



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μελέτη της χωρικής κατανομής και των χρονικών μεταβολών
της φωτοχημικής ρύπανσης στην περιοχή της Αττικής**

**Ναταλία Ανυφαντή
Α.Μ.:11114201400004**

Επιβλέπουσα

Μαρία Χατζάκη, Επίκουρη Καθηγήτρια

ΑΘΗΝΑ

ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2022

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της χωρικής και χρονικής κατανομής των επιπέδων της φωτοχημικής ρύπανσης στο Λεκανοπέδιο της Αττικής, καθώς και η ερμηνεία της συμπεριφοράς των ενδοετήσιων τιμών για όλο το χρονικό διάστημα μελέτης. Τα δεδομένα προήλθαν από τις μετρήσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων του Εθνικού Δικτύου Παρακολούθησης της Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης (ΕΔΠΑΡ), του οποίου την ευθύνη λειτουργίας έχει το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ), υπό το οποίο λειτουργούν συνολικά 14 σταθμοί μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην Αθήνα. Στο πλαίσιο της εργασίας, έγινε η κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων των φωτοχημικών ρύπων του μονοξειδίου του αζώτου (NO), του διοξειδίου του αζώτου (NO₂), και του όζοντος (O₃) για τη χρονική περίοδο 1984–2017 και, συγκεκριμένα, για τους σταθμούς ATH, ARI, GEO, MAR, LYK, LIO, PIR, PER, SMY, και PAT, για τους οποίους υπήρχαν επαρκή δεδομένα. Συγκεκριμένα, κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα των συγκεντρώσεων των φωτοχημικών ρύπων, όπου μελετώνται οι ενδοημερήσιες (ωριαίες) διακυμάνσεις των ρύπων για τους παραπάνω σταθμούς για κάθε μήνα του έτους. Επίσης, προσδιορίστηκαν οι μηνιαίες τάσεις των συγκεντρώσεων των τριών ρύπων, καθώς και η στατιστική σημαντικότητα αυτών για κάθε σταθμό.

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι οι μέγιστες συγκεντρώσεις του NO εμφανίζονται τους χειμερινούς μήνες λόγω των κεντρικών θερμάνσεων και των καμινάδων. Επίσης, επικρατεί τους μήνες αυτούς και αυξημένη χρήση των μέσων κινητής τροχιάς για τις ανάγκες πρόσβασης στην εργασία. Σε ό,τι αφορά στις ωριαίες διακυμάνσεις βλέπουμε ότι οι μέγιστες συγκεντρώσεις επικρατούν τις πρωινές ώρες μεταξύ 8:00-10:00 και τις βραδινές ώρες μεταξύ 21:00-23:00, λόγω των έντονων αιχμών της κυκλοφορίας. Οι σταθμοί στους οποίους εντοπίζονται αυξημένες συγκεντρώσεις του NO είναι οι ARI, ATH, MAR, GEO, PAT, και PIR λόγω του ότι ανήκουν στην κατηγορία των βιομηχανικών σταθμών και σταθμών αστικής κυκλοφορίας. Με βάση τις χρονικές διακυμάνσεις του NO παρατηρούμε ότι οι υψηλότερες τιμές συγκεντρώσεων εμφανίζονται κυρίως μέχρι το 2010, ενώ στη συνέχεια οι τιμές των μέγιστων συγκεντρώσεων των ρύπων μειώνονται, γεγονός που αποδίδεται στην τεχνολογική αναβάθμιση των παλιών αυτοκινήτων με νέους κινητήρες.

Για το NO₂, το μέγιστο των μηνιαίων συγκεντρώσεων εντοπίζεται στους περισσότερους σταθμούς κατά τους θερινούς μήνες, ενώ στους σταθμούς LIO, LYK και MAR, αυξημένες συγκεντρώσεις παρουσιάζονται και κατά τους χειμερινούς μήνες. Όσον αφορά στις ωριαίες τιμές το μέγιστο εντοπίζεται μεταξύ 10:00-12:00 και 22:00-24:00. Οι σταθμοί με τις μέγιστες ωριαίες τιμές του NO₂ είναι οι ARI, ATH, PAT, και PIR, διότι είναι αστικής κυκλοφορίας. Οι μέγιστες τιμές των συγκεντρώσεων εντοπίζονται έως το 2008, λόγω των παλαιών καυσίμων.

Το O₃ παρουσιάζει τις μέγιστες μηνιαίες συγκεντρώσεις τους καλοκαιρινούς μήνες λόγω αυξημένης ηλιοφάνειας σε ένταση και διάρκεια, και τις μέγιστες ωριαίες συγκεντρώσεις λίγο μετά το μεσημέρι. Οι σταθμοί με τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις O₃ είναι αυτοί των βορείων προαστίων, δηλαδή οι LIO, LYK, και MAR, γεγονός που αποδίδεται στο φαινόμενο της θαλάσσιας αύρας.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι και για τους τρεις ρύπους και κυρίως για τα οξειδία του αζώτου παρουσιάζεται στατιστικά σημαντική τάση μείωσης μέσα στην εξεταζόμενη χρονική περίοδο το οποίο μπορεί να αποδοθεί κυρίως στην ανανέωση του στόλου των αυτοκινήτων που κυκλοφορούν στο λεκανοπέδιο της Αττικής, αλλά και στις τεχνολογίες.

Abstract

The scope of this dissertation is to study the spatial and temporal distribution of the levels to photochemical pollution in the Attica Basin, as well as to interpret the variability and trends of monthly values for all years. The data derive from the measurements of air pollutants of the National Air Pollution Monitoring Network, under the Ministry of Environment and Energy, which operates 14 air pollution measurement stations in greater Athens area.

Data on the available photochemical pollutants of nitric oxide (NO), nitrogen dioxide (NO₂), and ozone (O₃) were therefore processed in the period 1984–2017 for the ATH, ARI, GEO, MAR, LYK, LIO, PIR, PER, SMY, and PAT stations. In particular, the diagrams of the monthly concentrations of photochemical pollutants were created, where hourly variations are studied during the 24 hours for the above stations. The monthly averages of the concentrations of photochemical pollutants, as well as their monthly trends along with their statistical significance, were also calculated for each station for the examined period.

The results show that the highest concentrations of nitric oxide NO pollutant occur in the winter months because the use of central heating and chimneys of buildings prevail in these months and the increased use of transportation from workers. In terms of hourly variations, we find that maximum concentrations prevail in the morning hours between 8:00-10:00 and during the evening between 21:00-23:00 due to the intense traffic. The stations with the maximum concentration of NO are ARI, ATH, MAR, GEO, PAR, and PIR because they belong to the category of urban and industrial stations. From the NO temporal variations, we find that the higher values occur mainly until 2010, while the values of the maximum concentrations decrease thereafter, which is due to the technological upgrade of old cars.

For NO₂ pollutant, the maximum concentrations are found for most stations in the summer months, while at the stations LIO, LYK, and MAR the maximum values appear in the winter months. With regard to hourly values, a maximum is presented between the hours 10:00-12:00 and 22:00-24:00. The stations with the highest values of NO₂ are ARI, ATH, PAT, and PIR, because they are affected by urban traffic. Concentrations peaked in the years 1984-2008 due to old fuels.

O₃ exhibits the maximum monthly values in the summer months due to increased sunshine intensity and duration, and maximum hourly concentrations shortly after noon. The stations with the highest concentrations of ozone are in the northern suburbs, LIO, LYK, and MAR, which is attributed to the phenomenon of sea breeze.

It is important to note that all three pollutants and mainly the nitrogen oxides exhibit statistically significant decreasing trends in the entire examined period, which can be mainly attributed to the new pollution control technologies.

Περιεχόμενα

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	6
2	ΑΕΡΙΑ ΡΥΠΑΝΣΗ	8
2.1	ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΩΝ	8
2.2	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΡΥΠΩΝ	10
2.3	ΚΥΡΙΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΩΝ	10
2.4	ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ	16
2.5	ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΡΥΠΩΝ	17
2.6	ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΟΥ ΕΥΝΟΟΥΝ ΕΠΕΙΣΟΔΙΑ ΡΥΠΑΝΣΗΣ	19
2.7	ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΕΡΙΑΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ	21
2.7	ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΩΝ ΕΠΕΙΣΟΔΙΩΝ ΡΥΠΑΝΣΗΣ	23
2.8	ΑΕΡΙΑ ΡΥΠΑΝΣΗ ΣΤΗΝ ΑΘΗΝΑ	24
2.8.1	Μονοξείδιο του άνθρακα	25
2.8.2	Διοξείδιο του θείου (SO ₂)	25
2.8.3	Μονοξείδιο του αζώτου (NO), και διοξείδιο του αζώτου (NO ₂)	26
2.8.4	Όζον (O ₃)	27
2.8.5	Αιωρούμενα σωματίδια	28
2.8.6	Βενζόλιο (C ₆ H ₆)	29
2.8.7	Πτητικές Οργανικές Ενώσεις	29
2.9	Το ΦΩΤΟΧΗΜΙΚΟ ΝΕΦΟΣ ΚΑΙ ΟΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΟΥ	30
2.9.1	Φωτοχημικό νέφος (φωτοχημική αιθαλομίχλη)	30
2.9.2	Φωτοχημικές αντιδράσεις στην ατμόσφαιρα	31
2.9.3	Επιπτώσεις	32
2.10	ΌΞΙΝΗ ΒΡΟΧΗ	32
2.11	Η ΜΕΙΩΣΗ ΤΟΥ ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ	36
2.11.1	Η στιβάδα του όζοντος	36
2.11.2	Η τρύπα του όζοντος	36
3	ΔΕΔΟΜΕΝΑ - ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	38
3.1	ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΤΑΣΗ	41
3.1.1	Παλινδρόμηση	41
3.1.2	Ευθεία Παλινδρόμησης	41
3.1.3	Όρια Εμπιστοσύνης	41
3.1.4	Συντελεστής Συσχέτισης και Συντελεστής Προσδιορισμού	42
3.1.5	Όρια εμπιστοσύνης του συντελεστή συσχέτισης r	42
3.1.6	Ορισμός Τάσης με τη βοήθεια της Παλινδρομικής Ανάλυσης	43
4	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	45
4.1	ΩΡΙΑΙΕΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΤΩΝ ΦΩΤΟΧΗΜΙΚΩΝ ΡΥΠΩΝ	45
4.1.1	Οξείδιο του Αζώτου	45
4.1.2	Διοξείδιο του Αζώτου	49
4.1.3	Όζον	54
4.2	ΜΕΣΕΣ ΜΗΝΙΑΙΕΣ ΤΙΜΕΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΤΩΝ ΦΩΤΟΧΗΜΙΚΩΝ ΡΥΠΩΝ	59
4.2.1	Μονοξείδιο του Αζώτου	59
4.2.2	Διοξείδιο του Αζώτου	82
4.2.3	Όζον	104

5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	125
6	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	128

1 Εισαγωγή

Με την έννοια της ατμοσφαιρικής ρύπανσης ερμηνεύεται η εκπομπή των αέριων ρύπων στην ατμόσφαιρα, δηλαδή οποιουδήποτε είδους ουσιών, θορύβου, η ακτινοβολίας σε μεγάλη διάρκεια, συγκέντρωση και ποσότητα με απώτερο σκοπό να δημιουργηθούν δυσμενείς συνέπειες στην ανθρώπινη υγεία, στους ζώντες οργανισμούς και στα διάφορα οικοσυστήματα με αποτέλεσμα το περιβάλλον να είναι ακατάλληλο για τις επιθυμητές χρήσεις του. Στη παραπάνω περίπτωση έχει επικρατήσει ο όρος «νέφος» που κάνει την εμφάνιση του στις μεγαλουπόλεις (Μελάς, 2007). Οι πηγές από όπου και σχηματίζονται οι αέριοι ρύποι είναι οι ανθρωπογενείς, όπου έχουν να κάνουν με βιομηχανικές δραστηριότητες, κεντρικές θερμάνσεις, και χρήση των διαφόρων μέσων κινητής τροχιάς, και οι φυσικές πηγές όπως τα ηφαίστεια, οι πυρκαγιές, η αποσάθρωση των εδαφών, η βιολογική αποσύνθεση των φυτών και οι διάφορες θαλάσσιες εκτάσεις.

Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τους πρωτογενείς όπου οι ρύποι εκπέμπονται κατευθείαν στην ατμόσφαιρα από τις πηγές, και τους δευτερογενείς που οι ρύποι σχηματίζονται στην ατμόσφαιρα αφού έχουν πρώτα αντιδράσει οι πρωτογενείς ρύποι μεταξύ τους σε συνδυασμό με την παρουσία της ηλιακής ακτινοβολίας ή άλλα αέρια στην ατμόσφαιρα.

Το νέφος εμφανίζεται στην ατμόσφαιρα με δύο μορφές: την καπνομίχλη, ή νέφος τύπου Λονδίνου, και το φωτοχημικό νέφος, ή νέφος τύπου Λος Άντζελες. Το νέφος της καπνομίχλης παρουσιάζεται όταν επικρατεί μεγάλη συγκέντρωση ρύπων όπως το μονοξείδιο του άνθρακα CO, το διοξείδιο του θείου SO₂ καθώς και αιωρούμενα σωματίδια σε συνδυασμό με τη μεγάλη σχετική υγρασία και την χαμηλή θερμοκρασία. Το φωτοχημικό νέφος εμφανίζεται όταν έχουμε υψηλή ηλιοφάνεια σε ένταση και διάρκεια, μεγάλες θερμοκρασίες, μικρή σχετική υγρασία, και υψηλές συγκεντρώσεις οξειδίων του αζώτου (NO, NO₂), υδρογονανθράκων και δευτερογενών προϊόντων τους (ΥΠΕΚΑ, 2017). Επομένως, στην Αττική τους χειμερινούς μήνες επικρατεί το νέφος της καπνομίχλης, ενώ κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών εντοπίζονται φωτοχημικοί ρύποι.

Η πορεία της εξέλιξης των ατμοσφαιρικών ρύπων στο Λεκανοπέδιο της Αττικής παρακολουθείται μέσω της βοήθειας του Εθνικού Δικτύου μέτρησης των σταθμών της Ατμοσφαιρικής ρύπανσης, το οποίο καλύπτει τις περισσότερες περιοχές της Αθήνας. Για κάθε χρόνο το ΥΠΕΚΑ κυκλοφορεί μια έκθεση μέσω της οποίας αναλύονται όλες οι συγκεντρώσεις των ρύπων έτσι ώστε να είναι αισθητή η εικόνα της επικινδυνότητας της ατμόσφαιρας στις περιοχές της Αττικής, αλλά και η βελτίωση της ποιότητας του αέρα σε διαχρονικό στάδιο. Οι πηγές των ρύπων που βρίσκονται κοντά από κάθε σταθμό, καθώς και η γεωγραφική θέση των σταθμών μας δίνουν πληροφορίες σχετικά με τον τύπο του περιβάλλοντος στον οποίο ανήκουν οι σταθμοί που μελετώνται, και με βάση τα στοιχεία αυτά εξετάζεται η συχνότητα εμφάνισης των επεισοδίων της ρύπανσης, τα επίπεδα ρύπανσης, καθώς και η διαχρονική εξέλιξη της ποιότητας της ατμόσφαιρας.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναλύονται τα δεδομένα συγκέντρωσης των φωτοχημικών ρύπων (NO, NO₂, O₃) για τη χρονική περίοδο 1984–2017. Για τους σκοπούς αυτούς, αξιοποιήθηκαν τα δεδομένα μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης των σταθμών

που καλύπτουν την Αττική, όπου συγκεκριμένα χωρίστηκαν σε σταθμούς που ανήκουν στο κέντρο της Αθήνας, στα βόρεια προάστια, και στο νότιο τομέα των Αθηνών. Σύμφωνα με τις μετρήσεις μελετάται η διαχρονική πορεία των φωτοχημικών ρύπων στο Λεκανοπέδιο της Αττικής, η εποχική διακύμανση των συγκεντρώσεων των ρύπων, καθώς επίσης και οι μεταβολές στα επίπεδα τους κατά τη διάρκεια της ημέρας. Έπειτα εντοπίζονται για κάθε φωτοχημικό ρύπο ξεχωριστά οι υπερβάσεις στα επίπεδα συγκέντρωσης τους στην ατμόσφαιρα προκειμένου να εξαχθούν τα συμπεράσματα σχετικά με τις μετεωρολογικές συνθήκες που ευνοούν τα επεισόδια ρύπανσης, τη συχνότητα εμφάνισης τους, και τα εποχιακά χαρακτηριστικά τους. Επίσης, για κάθε ρύπο εξετάζεται και το περιβάλλον του σταθμού στο οποίο ανήκει με σκοπό να βρεθούν οι πιο επιβαρυνμένες γεωγραφικά περιοχές της Αθήνας από τις εκπομπές των αερίων NO, NO₂, και O₃, με σκοπό να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα από την πολιτεία προκειμένου να απομακρυνθούν οι ρύποι που δημιουργούν αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, που προκύπτει μέσω της εκτίμησης της πορείας για τον κάθε φωτοχημικό ρύπο ξεχωριστά μεταξύ των ετών 1984–2017. Επιπλέον, εξετάζεται και για κάθε ρύπο η στατιστική σημαντικότητα των μηνιαίων τιμών των τάσεων, δηλαδή η συναρτησιακή σχέση μεταξύ των μεταβλητών των ρύπων για όλα τα χρόνια μαζί.

Επομένως, η συμβολή της παρούσας διπλωματικής εργασίας στη μελέτη της ποιότητας της ατμόσφαιρας στις περιοχές της Αττικής, σχετίζεται με το γεγονός ότι αξιοποιεί τα δεδομένα των ρύπων NO, NO₂, και O₃ που καλύπτουν τη χρονική περίοδο 1984–2017 και έτσι κατηγοριοποιούνται τα αποτελέσματα σύμφωνα με τη γεωγραφική θέση των σταθμών μέτρησης, τις μηνιαίες και ωριαίες μεταβολές, καθώς και τις χρονικές μεταβολές.

2 Αέρια ρύπανση

Ως αέρια ρύπανση ονομάζεται η παρουσία στην ατμόσφαιρα κάθε είδους υλικού σε συγκέντρωση ή διάρκεια που ενδέχεται να προκαλέσει αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου, στους ζώντες οργανισμούς και στα οικοσυστήματα με σκοπό να καταστεί το περιβάλλον ακατάλληλο για τις επιθυμητές χρήσεις του. Πρόκειται για ουσίες που απαντώνται είτε σε αέρια, είτε σε υγρή, και είτε σε στερεή μορφή οι οποίες εκπέμπονται από τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες ή προκύπτουν μέσω της αλληλεπίδρασης τους με οικοσυστήματα. Κάτω από ορισμένες συνθήκες, η ατμοσφαιρική ρύπανση μπορεί να φτάσει σε επίπεδα τα οποία μπορούν να προκαλέσουν ανεπιθύμητες συνθήκες διαβίωσης (<http://www.ypeka.gr>).

2.1 Κατηγορίες αέριων ρύπων

Οι βασικότεροι ρύποι από τους οποίους εξαρτάται η ρύπανση της ατμόσφαιρας στα μεγάλα αστικά κέντρα είναι οι εξής:

- Το διοξείδιο του θείου (SO_2)
- Το διοξείδιο του αζώτου (NO_2) και τα οξείδια του αζώτου, δηλαδή το μονοξείδιο (NO) και το διοξείδιο (NO_2)
- Το μονοξείδιο του άνθρακα (CO)
- Ο μόλυβδος (Pb), λόγω της τοξικότητάς του
- Τα αιωρούμενα σωματίδια διαμέτρου μικρότερης των 10 μm , καθώς αυτά εισπνέονται και τα διακρίνουμε σε δύο κατηγορίες, τα $\text{A}_{\Sigma 10}$ και τα $\text{A}_{\Sigma 2,5}$
- Το βενζόλιο που λόγω της επικινδυνότητάς του επειδή είναι καρκινογόνο ανήκει στην κατηγορία των Πτητικών Οργανικών Ενώσεων (Volatile Organic Compounds - VOCs) (Ρεμουντάκη, 2010).

Η πλειοψηφία των υλικών που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα με βάση τη χημική τους σύσταση σε μεγάλες ποσότητες είναι μόρια, όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), το διοξείδιο του θείου (SO_2), το υδρόθειο (H_2S), τα οξείδια του αζώτου (NO , NO_2 , N_2O), η αμμωνία (NH_3), οι σωματιδιακοί ρύποι (που είναι υλικά σε στερεή ή υγρή κατάσταση τα οποία μπορούν να αιωρούνται στην ατμόσφαιρα για μεγάλα χρονικά διαστήματα), το μεθάνιο (CH_4), καθώς επίσης και οι διάφοροι Πολυκυκλικό Αρωματικοί Υδρογονάνθρακες PAHs που είναι οργανικές ενώσεις που περιέχουν άνθρακα και υδρογόνο αποτελούμενες από τρεις ή περισσότερους βενζολικούς δακτυλίους που απαντώνται σε μορφή ατμών ή σωματιδίων (Γεντεκάκης, 2010).

Ανάλογα με το τρόπο παραγωγής τους, οι ατμοσφαιρικοί ρύποι χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τους πρωτογενείς και τους δευτερογενείς. Οι πρωτογενείς ρύποι εκπέμπονται από μία πηγή κατ' ευθείαν στην ατμόσφαιρα και επιβαρύνουν την ποιότητα του αέρα, παραδείγματα τέτοιων ειδών ρύπων είναι το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) που εκπέμπεται από τις εξατμίσεις των βενζινοκίνητων αυτοκινήτων και μηχανών και πάσης φύσεως οχημάτων, όταν συντελείται ατελής καύση της καύσιμης ύλης, το διοξείδιο του θείου (SO_2), το οποίο προέρχεται από βιομηχανίες, εργοστάσια παραγωγής ενέργειας, διυλιστήρια

πετρελαίου και καύσεις γαιανθράκων, όπως ο λιγνίτης και το κάρβουνο, καθώς και τα αιωρούμενα σωματίδια σε συνδυασμό με σχετικά χαμηλή θερμοκρασία και μεγάλη σχετική υγρασία. Οι δευτερογενείς ατμοσφαιρικοί ρύποι σχηματίζονται όταν οι πρωτογενείς ρύποι υφίστανται στην ατμόσφαιρα μετατροπές μέσω χημικών ή φωτοχημικών αντιδράσεων με τη συμβολή της ηλιακής ακτινοβολίας, παρουσιάζουν καταλυτικό ρόλο στο φαινόμενο του φωτοχημικού νέφους αφού αποτελούνται από υψηλή συγκέντρωση οξειδίων του αζώτου (NOx) υδρογονανθράκων και δευτερογενών προϊόντων τους σε συνδυασμό με υψηλή θερμοκρασία, μεγάλη ηλιοφάνεια σε ένταση και διάρκεια, και χαμηλή σχετική υγρασία που έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία του αερίου του όζοντος (O₃). Επίσης, οι δευτερογενείς ρύποι μπορεί να είναι πιο επιβλαβής για την ανθρώπινη υγεία και τα οικοσυστήματα από ότι οι πρωτογενείς (www.ypeka.gr).

Πίνακας 2.1.1 Σημαντικότεροι ατμοσφαιρικοί ρύποι, ιδιότητες και κυριότερες επιπτώσεις τους (Θεωδοροπούλου, 2006).

Ρύπος	Πηγή	Επιπτώσεις
Οξείδια του άνθρακα	CO ₂	Καύση άνθρακα, πετρελαίου, φυσικού αερίου, βιολογικές διεργασίες αποσύνθεσης
	CO	Ατελής καύση υδρογονανθράκων καυσίμων αυτοκινήτων, μονάδες θέρμανσης, βιομηχανικές, καύση αερίων απόβλητων
Οργανικές ενώσεις του άνθρακα	CH ₄ (μεθάνιο) V.O.C. (πηκτική οργανική ένωση)	Ατελείς καύσεις πτητικών καυσίμων, χρήση οργανικών στην χημική βιομηχανία, πετρελαιοβιομηχανία
	πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες	Μηχανές εσωτερικής καύσης, μηχανές καύσης μαζούτ, πετρελαιοβιομηχανία
Ενώσεις αζώτου N	NO, NO ₂ , N ₂ O, N ₂ O ₃ , NaO ₅	Καύσεις απορριμμάτων, μηχανές εσωτερικής καύσης, καύσεις υλικών σε υψηλές θερμοκρασίες
	NH ₃ , N ₂ H ₄ (υδραζίνη)	Αποικοδόμηση λιπασμάτων, βιομηχανία
Ενώσεις θείου S	SO ₂ H ₂ S	Καύσεις άνθρακα, καύσεις πετρελαίου, πετροχημική βιομηχανία, μεταλλουργική βιομηχανία
Σωματιδιακοί ρύποι	Μηχανές εσωτερικής καύσης, καύση απορριμμάτων, βιομηχανία (υψικάμιντοι), καυστήρες καλοριφέρ, φυσικές πηγές όπως εκρήξεις ηφαιστειών, υπολείμματα αποσύνθεσης οργανικής ύλης, φωτιές σε δάση, κτλ	Εναπόθεση, προσρόφηση και μεταφορά βαρέων μετάλλων, τοξικών και ραδιενεργών μορίων, θολότητα, φαινόμενο θερμοκηπίου, συμμετοχή στη δημιουργία ακραίων μετεωρολογικών φαινομένων όπως χαλάζι κτλ, τοξικολογικές επιδράσεις κυρίως λόγω συσσώρευσης στο αναπνευστικό σύστημα ανθρώπων και ζώων
Χλώριο και παράγωγα (P.V.C.) Freon	Μηχανές εσωτερικής καύσης, βιομηχανία, γεωργικές καλλιέργειες (διάσπαση εντομοκτόνων παρασιτοκτόνων), μονάδες απολύμανσης	Τοξικότητα, αναπνευστικά προβλήματα, φωτοχημικό νέφος

2.2 Συγκεντρώσεις ατμοσφαιρικών ρύπων

Οι συγκεντρώσεις των αέριων ρύπων στην ατμόσφαιρα δίνονται σε μέρη ανά εκατομμύριο (ppm), επιπλέον για τη συγκέντρωση των ρύπων στον αέρα χρησιμοποιείται και μια άλλη μονάδα που είναι μάζα κατά όγκο, δηλαδή $\mu\text{g}/\text{m}^3$, και σε πιο μεγάλες συγκεντρώσεις είναι mg/m^3 .

Κάθε αέριο ρύπος χαρακτηρίζεται από τον χρόνο παραμονής του στην ατμόσφαιρα ή αλλιώς την ημιπερίοδο ζωής που δίνεται από τη σχέση $T=M/K$, όπου M είναι η συνολική μάζα του αέριου ρύπου στην ατμόσφαιρα, K είναι ο ρυθμός καταστροφής, και T ο χρόνος παραμονής (Ζερεφός, 1984).

Πίνακας 2.2.1 Συντελεστές μετατροπής των συγκεντρώσεων από $\mu\text{g}/\text{m}^3$ σε ppm και το αντίστροφο υπό κανονικές συνθήκες (Μελάς, 2007).

Ρύπος	Μετατροπή από $\mu\text{g m}^{-3}$ σε ppm Συντελεστής μετατροπής	Μετατροπή από ppm σε $\mu\text{g m}^{-3}$ Συντελεστής μετατροπής
Οζον (O_3)	0.51×10^{-3}	1960
Διοξείδιο του αζώτου (NO_2)	0.53×10^{-3}	1880
Οξείδιο του αζώτου (NO)	0.81×10^{-3}	1230
Διοξείδιο του άνθρακα (CO_2)	0.56×10^{-3}	1800
Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)	0.87×10^{-3}	1150
Διοξείδιο του θείου (SO_2)	0.38×10^{-3}	2620
Αμμωνία (NH_3)	1.44×10^{-3}	695

2.3 Κύριες πηγές εκπομπής αέριων ρύπων

Ως πηγές εκπομπής αέριων ρύπων θεωρούνται διάφορες τοποθεσίες και δραστηριότητες, οι οποίες είναι υπεύθυνες για την εκπομπή των ρύπων στην ατμόσφαιρα. Οι πηγές εκπομπής χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τις **ανθρωπογενείς πηγές** και τις **φυσικές πηγές**. Το μεγαλύτερο ποσοστό των παραγόμενων αέριων ρύπων προέρχεται από φυσικές πηγές, οι οποίες παρόλο που συμβάλλουν σημαντικά στην επιβάρυνση της ποιότητας του αέρα δεν μπορούν να ελεγχθούν από τις δραστηριότητες των ανθρώπων. Η καλή διασπορά που παρουσιάζουν οι φυσικές πηγές ανά την υφήλιο έχει σαν αποτέλεσμα την καλύτερη ανάμειξη των ρύπων με τον καθαρό αέρα, ωστόσο με κάποιες εξαιρέσεις, προκύπτει ότι οι

εκπομπές των αέριων ρύπων από τις φυσικές πηγές δεν οδηγούν από μόνες τους σε υψηλές συγκεντρώσεις.

Οι σημαντικότερες φυσικές πηγές εκπομπής ρύπων είναι:

1. Τα ηφαίστεια (κυρίως αιωρούμενα σωματίδια, διοξείδιο του θείου, υδρόθειο και μεθάνιο).
2. Οι πυρκαγιές δασών (κυρίως αιωρούμενα σωματίδια, μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα).
3. Οι ωκεανοί και γενικότερα, οι θαλάσσιες εκτάσεις (όπως τα θειικά άλατα και το χλωριούχο νάτριο).
4. Βιολογική αποσύνθεση των φυτών και των ζώων (κυρίως υδρογονάνθρακες, αμμωνία και υδρόθειο).
5. Η αποσάθρωση του εδάφους (αιωρούμενα σωματίδια)
6. Τα φυτά και τα δέντρα (κυρίως υδρογονάνθρακες).

Τα θειικά αερολύματα που προκύπτουν από τις ηφαιστειακές εκρήξεις δεν εκπέμπονται μόνο στην τροπόσφαιρα, αλλά και σε αρκετά μεγαλύτερα ύψη από την επιφάνεια της γης, σε τεράστιες ποσότητες και αποστάσεις με πολύ μεγάλους χρόνους παραμονής στην ατμόσφαιρα. Επίσης, τα θειικά αερολύματα επιδρούν και στη διαμόρφωση της θερμοκρασίας, αλλά με αντίθετο τρόπο από αυτών των αερίων του θερμοκηπίου, διότι προκαλούν ψύξη του αέρα.

Οι πυρκαγιές των δασών από τις οποίες προκύπτουν τα αιωρούμενα σωματίδια και το διοξείδιο και μονοξείδιο του άνθρακα ευνοούνται συνήθως τους καλοκαιρινούς μήνες λόγω μεγάλων περιόδων ζέστης και παρατεταμένης ανομβρίας.



Εικόνα 2.3.1: Φωτοχημική αιθαλομίχλη στο Las Vegas (Μελάς, 2000)



Εικόνα 2.3.2 Θύελλα σκόνης (Μελάς, 2000)



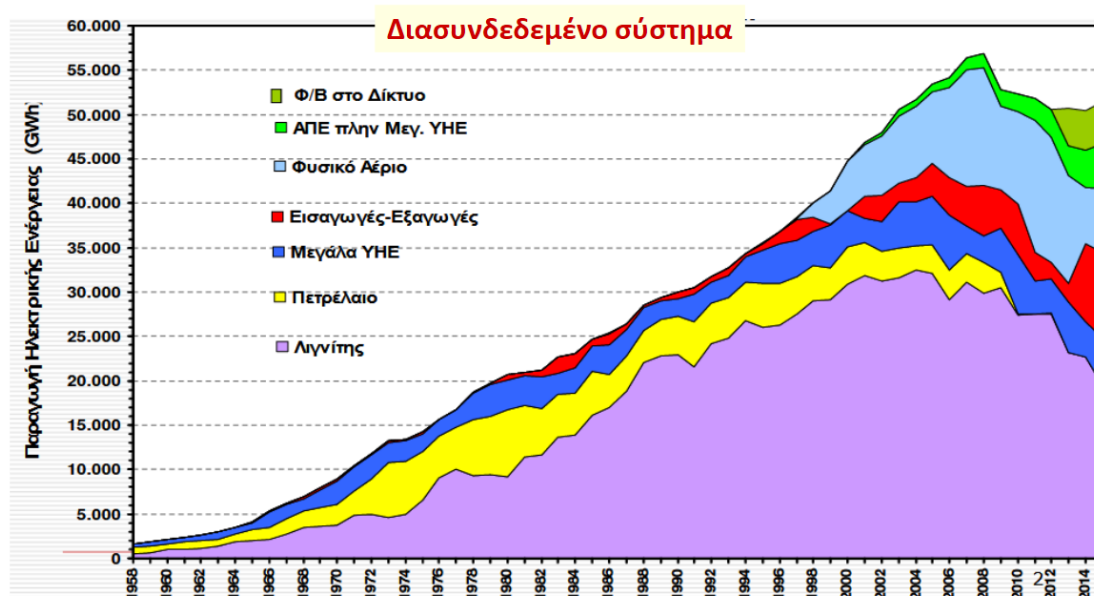
Εικόνα 2.3.3 Η έκρηξη του Pinatubo στις Φιλιππίνες, η μεγαλύτερη του 19 αιώνα (Μελάς, 2000)

Οι ανθρωπογενείς πηγές εκπομπής ατμοσφαιρικών ρύπων είναι υπεύθυνες για τα μεγαλύτερα περιβαλλοντικά προβλήματα που έχουν εμφανιστεί. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ανατροπή της φυσικής ισορροπίας καθώς επίσης και στην μεγάλη πυκνότητα εκπομπής των ρύπων από τις ανθρωπογενείς πηγές σε μικρές γεωγραφικές περιοχές, όπως οι αστικές και οι βιομηχανικές (Ζάνης, 2014).

Οι ανθρωπογενείς πηγές ατμοσφαιρικής ρύπανσης χωρίζονται σε τρεις κύριες κατηγορίες οι οποίες είναι:

- Η βιομηχανική δραστηριότητα που περιλαμβάνει και τον τομέα παραγωγής ενέργειας
- Οι μεταφορές από τα διάφορα τροχοφόρα
- Οι κεντρικές θερμάνσεις (Μελάς, 2000)

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην χώρα μας βασίζεται κυρίως στην καύση των ορυκτών καυσίμων που περιλαμβάνουν τις μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπου είναι ο άνθρακας, το φυσικό αέριο καθώς και τα διάφορα πετρελαιοειδή. Με βάση τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας από τις αρχές του 21 αιώνα ο άνθρακας αποτελεί μια γρήγορη αναπτυσσόμενη πηγή ενέργειας. Το 37% της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην χώρα μας σχετίζεται με τη χρήση του άνθρακα, που είναι ένα οργανικό στοιχείο με κύρια συστατικά τον άνθρακα C και το υδρογόνο H₂, επίσης σε μικρότερες ποσότητες ο άνθρακας περιλαμβάνει και άλλα συστατικά όπως το άζωτο, το οξυγόνο και το θείο.(district-energy.gr/ορυκτά καύσιμα) Ο λιγνίτης ο οποίος ανήκει στην κατηγορία των ορυκτών ανθράκων, λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας σε ενέργεια και της μεγάλης περιεκτικότητας σε υγρασία, δεν μπορεί να μεταφερθεί με ευκολία και για το λόγο αυτό και έτσι χρησιμοποιείται από εργοστάσια που είναι τοποθετημένα κοντά σε ορυχεία λιγνίτη. Επειδή περιλαμβάνει μεγάλο ποσοστό υγρασίας είναι εξαιρετικά επικίνδυνος για το περιβάλλον, διότι με την καύση του προκαλείται ατμοσφαιρική ρύπανση. Οι μεγαλύτερες λιγνιτοφόρες λεκάνες στην Ελλάδα είναι στην Πτολεμαΐδα, τη Δράμα και την Φλώρινα (Wikipedia.org/Λιγνίτης).



Σχήμα 2.3.1 Χρονική εξέλιξη πηγών ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα (Μαμάσης 2018-2019)

Οι εκπομπές από τη θέρμανση των κτιρίων είναι σημαντικές για την ατμόσφαιρα των πόλεων κατά τη χειμερινή περίοδο. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η λειτουργία των κεντρικών θερμάνσεων με σκοπό την θέρμανση των κατοικιών, είναι απαραίτητο να γίνει η χρήση του καυσίμου της βιομάζας. Η βιομάζα είναι ένα υλικό το οποίο παράγεται από

ζωντανούς οργανισμούς όπως το ξύλο, καθώς και άλλα προϊόντα του δάσους που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο με σκοπό την παραγωγή ενέργειας. Η οικονομική κατάσταση που επικρατεί στην Ευρώπη τα τελευταία εννιά χρόνια έχει επιφέρει μεγάλη αύξηση της αγοραίας τιμής των συμβατικών καυσίμων λόγω της μεγάλης φορολογίας, επίσης στην Ελλάδα η αντίστοιχη αύξηση της τιμής των μη στερεών καυσίμων ήταν μεταξύ 40% με 60%. Επομένως με βάση τα παραπάνω η πολύ υψηλή τιμή της αγοράς σε συνδυασμό με την περιορισμένη οικονομική δυνατότητα των νοικοκυριών έχει οδηγήσει στην υπερβολική χρήση της βιομάζας για οικιακή θέρμανση. Αρκετές είναι ωστόσο οι μελέτες που έχουν επικεντρωθεί στις επιπτώσεις των εκπομπών των αέριων ρύπων από τις καύσεις ξύλου των κατοικιών. Ωστόσο με βάση την Ευρωπαϊκή Ένωση Γεωεπιστημών σε τρεις μεγάλες Ευρωπαϊκές πόλεις, όπως το Λονδίνο, το Βερολίνο, και το Παρίσι, κατά τη διάρκεια του χειμώνα διαπιστώθηκε ότι η συχνή καύση ξύλου συμβάλει σημαντικά στις παραβιάσεις του ημερήσιου ορίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης, και η συνεισφορά των αιωρούμενων σωματιδίων AS_{10} μπορεί να ξεπεράσει το όριο της οδικής κυκλοφορίας. Με βάση τις απογραφές των εκπομπών καύσης ξύλου κατοικιών που έγιναν στην Ελλάδα προέκυψε ότι το 67% του παραγόμενου μονοξειδίου του άνθρακα CO προέρχεται από τα τζάκια. Άρα σε Ευρωπαϊκό επίπεδο η καύση της βιομάζας είναι η κύρια πηγή πρωτογενών εκπομπών $AS_{2,5}$ και AS_{10} καθώς και εκπομπών μαύρου άνθρακα που συμβάλουν περίπου στο 56, 40 και 46% αντίστοιχα στην παρουσία τους στην ατμόσφαιρα. Η καύση του ξύλου στα τζάκια εκπέμπει ένα μείγμα αιθάλης και οργανικού άνθρακα, όπου το δεύτερο είναι το κύριο συστατικό του αερολύματος. Υπάρχουν επομένως σημαντικές επιπτώσεις, εξαιτίας της δημιουργίας των ανθρακικών αερολυμάτων καθώς επίσης και των αιωρούμενων σωματιδίων AS από την καύση ξύλων που χρησιμοποιείται από τα σπίτια κατά τη διάρκεια του χειμώνα, και έτσι έχουμε αυξημένη νοσηρότητα και θνησιμότητα, αλλά και καρδιαγγειακές παθήσεις (Athanasopoulou et al. 2017).

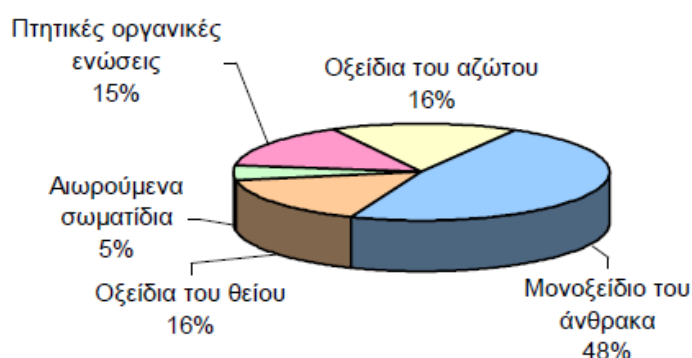
Οι εκπομπές που προκύπτουν από τις βιομηχανικές δραστηριότητες είναι συγκεντρωμένες σε περιοχές μεγάλων αστικών κέντρων. Υπάρχουν δύο κατηγορίες βιομηχανικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης που είναι: 1) Από μεγάλες βιομηχανικές μονάδες όπως είναι τα διυλιστήρια, οι τσιμεντοβιομηχανίες, οι χαλυβουργίες και οι μονάδες εξόρυξης και επεξεργασίας μετάλλων και 2) από πολλές μικρότερες βιομηχανίες που είναι συσσωρευμένες σε μία περιοχή που γειτνιάζει άμεσα με κατοικημένη περιοχή όπως είναι η Ελευσίνα, ο Ασπρόπυργος, τα Οινόφυτα και η δυτική Θεσσαλονίκη. Τα διυλιστήρια καλύπτουν την Ελληνική αγορά σε ποσοστό περίπου 95% με συνολική ετήσια δυναμικότητα διύλισης 19.000 τόνους το έτος. Λόγω της φύσης τους αλλά και του μεγέθους τους οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν είναι σημαντικές με τους κάτοικους των γύρω περιοχών να αντιδρούν συχνά εξαιτίας της υποβάθμισης της ποιότητας ζωής τους με την τοπική κοινωνία να είναι αντίθετη με την επέκταση των εγκαταστάσεων των διυλιστηρίων πετρελαίου. Οι σημαντικότεροι, ωστόσο, ρύποι που εκλύονται από τις εγκαταστάσεις διύλισης πετρελαίου είναι διοξείδιο του θείου (SO_2), οξείδια του αζώτου (NOx), οργανικές πτητικές ενώσεις (VOC), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), υδρόθειο (H_2S), υδροφθόριο (HF), και η αμμωνία (NH_3). Οι κυριότερες από τις οργανικές ενώσεις είναι οι αλδεΐδες, ο μόλυβδος, το βενζόλιο, ο τετρααιθυλιούχος μόλυβδος, ο τετραμεθυλιούχος μόλυβδος, το κανονικό εξάνιο, το τολουόλιο και οι ολεφίνες. Οι υδρογονάνθρακες είναι οι κυριότερες πτητικές οργανικές ενώσεις. Η τσιμεντοβιομηχανία

αποτελεί τον σημαντικότερο κλάδο ως προς τις αέριες εκπομπές των ρύπων, ανάμεσα σε όλες τις εγκαταστάσεις εξόρυξης και επεξεργασίας μη μεταλλικών υλικών με βάση την Υπηρεσία Ευρωπαϊκού Περιβάλλοντος. Τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά θέματα που έχουν να κάνουν με την παραγωγή τσιμέντου είναι η αέρια ρύπανση και η κατανάλωση θερμικής ενέργειας. Τις κύριες εκπομπές από την κατανάλωση του τσιμέντου αποτελούν τα αιωρούμενα σωματίδια ΑΣ και ΑΣ₁₀, τα οξείδια του αζώτου (NO_x), το διοξείδιο του θείου (SO₂), το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), και το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), σε μικρές ωστόσο ποσότητες μπορεί να εκλύονται ποσότητες πτητικών οργανικών ενώσεων (VOC), αμμωνίας (NH₃), χλωρίου, και υδροχλωρίου, όπως επίσης και υπολείμματα ατελούς καύσης, και επικίνδυνα συστατικά. Αυτό που απασχολεί περισσότερο τη βιομηχανία παραγωγής τσιμέντου είναι οι εκπομπές σκόνης που διακρίνονται σε σημειακές πηγές εκπομπής σκόνης (ελεγχόμενες) και διάχυτες πηγές (μη ελεγχόμενες), μπορεί όμως να θεωρηθεί ότι οι διάχυτες εκπομπές σκόνης δημιουργούνται από την κυκλοφορία των οχημάτων μεταφοράς υλικών, την υπαίθρια αποθήκευση πρώτων υλών, τη διακίνηση υλικών με οχήματα και τη λειτουργία συστημάτων μεταφοράς. Από τις εγκαταστάσεις παραγωγής τσιμέντου τα οξείδια του αζώτου (NO_x) είναι ο σημαντικότερος ρύπος όσο αφορά την αέρια ρύπανση. Η εισαγωγή του θείου στη διεργασία προέρχεται από τις πρώτες ύλες και τα καύσιμα. Το θείο εμφανίζεται στο πρώτο στάδιο του προθερμαντήρα όταν τα σουλφίδια εξατμίζονται μερικώς από τις πρώτες ύλες με αποτέλεσμα ο αέρας από αυτήν τη μονάδα να ελευθερωθεί απ' ευθείας στην ατμόσφαιρα. Επίσης, όπως ισχύει για τα NO_x και τους άλλους ρύπους οι εκπομπές SO₂ ποικίλλουν από εγκατάσταση σε εγκατάσταση. Η εκπομπή του διοξειδίου του άνθρακα εκτιμάται σε 800-900 kg/τόνο με το 60% αυτής της εκπομπής να προέρχεται από διαδικασία της ασβεστοποίησης και το 40% να σχετίζεται με τη καύση του καυσίμου.



Εικόνα 2.3.4 Βιομηχανικές δραστηριότητες (Μελάς, 2000)

Τα οχήματα είναι η κυριότερη πηγή ατμοσφαιρικής ρύπανσης στα αστικά κέντρα που έχουν να κάνουν κυρίως με το μέγεθος του πληθυσμού και όσο αυξάνει το μέγεθος των πόλεων τόσο περισσότερο μεγαλώνουν και οι ρύποι. Η συχνή επιδείνωση τους γίνεται κυρίως λόγω της έλλειψης ανοιχτών χώρων αναψυχής και πρασίνου, και λόγω της άρρηκτης σύνδεσης τους με τα συγκοινωνιακά και πολεοδομικά προβλήματα των ελληνικών πόλεων. Επίσης, ένας άλλος παράγοντας ρύπανσης που προκύπτει από τα οχήματα είναι οι εκπομπές ρύπων από παλιά αυτοκίνητα, τα οποία δεν είναι σε θέση να ανταποκριθούν στις σύγχρονες απαιτήσεις ελέγχου της ρύπανσης. Οι ρύποι που εξέρχονται μέσω του θαλάμου καύσης των αυτοκινήτων είναι οι υδρογονάνθρακες, τα οξείδια του αζώτου, και το μονοξείδιο του άνθρακα με τον τελευταίο να είναι και ο ρύπος ο οποίος οφείλεται σε μεγαλύτερο βαθμό στα αυτοκίνητα σε σχέση με τους υπόλοιπους. Παρά το γεγονός ότι έχει γίνει αντικατάσταση των παλιών αυτοκινήτων με καταλυτικά αυτοκίνητα παρατηρούμε υπερβάσεις στις τιμές του διοξειδίου του αζώτου λόγω της έντονης κυκλοφορίας των οχημάτων στις αστικές πόλεις. Επομένως, για τα μεγάλα αστικά κέντρα οι κινητές πηγές, δηλαδή τα οχήματα, είναι η κυριότερη πηγή των ρύπων στην ατμόσφαιρα με χαρακτηριστικούς τα οξείδια του αζώτου και το μονοξείδιο του άνθρακα, επίσης είναι η κύρια αιτία εκδήλωσης του φωτοχημικού νέφους στις μεγαλουπόλεις (Ρεμουντάκη, 2010).



Σχήμα 2.3.2 Κατανομή των ανθρωπογενών ρύπων που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα (Ζάνης, 2014).

2.4 Ατμοσφαιρικός κύκλος της ρύπανσης

Μια ποικιλία ατμοσφαιρικών μηχανισμών είναι υπεύθυνη για την μεταφορά, τον μετασχηματισμό και την απομάκρυνση των αέριων ρύπων που εκλύονται στην ατμόσφαιρα (ΥΠΕΚΑ 2018). Είναι σημαντικό να καταλάβουμε το κύκλο των ρύπων που περιλαμβάνει τη μεταφορά και διασπορά των ρύπων καθώς και οποιοδήποτε φυσικό ή χημικό μετασχηματισμό μεταξύ πηγής και αποδέκτη προκειμένου να παρακολουθήσουμε τα αποτελέσματα των ανθρωπογενών πηγών ρύπανσης.

Με τον όρο μεταφορά εννοούμε τον μηχανισμό με τον οποίο μεταφέρεται ο ρύπος από μία πηγή σε έναν αποδέκτη με κύριο μέσο τον άνεμο. Σαν σημειακή πηγή μπορούμε να θεωρήσουμε μία καμινάδα κάποιας βιομηχανικής μονάδας που ρυπαίνει την ατμόσφαιρα. Κατά τη διάρκεια όμως της μεταφοράς, ο ρυπασμένος θύσανος που εκπέμπεται από την καμινάδα δεν παραμένει στο αρχικό κυλινδρικό του σχήμα που είναι ίδιας διαμέτρου με την καμινάδα, αλλά λόγω της τύρβης και των στροβίλων αναμειγνύεται στο χώρο με το περιβάλλοντα αέρα και ο μηχανισμός αυτός χαρακτηρίζεται ως ατμοσφαιρική διάχυση, η

οποία έχει ως αποτέλεσμα την εξάπλωση του ρυπασμένου θυσάνου καθώς μεταφέρεται με τον άνεμο. Οι διαδικασίες της ανάμειξης λόγω τύρβης και της εξάπλωσης του ρυπασμένου θυσάνου τείνουν να μειώσουν την αρχική πυκνότητα του καθώς απομακρύνεται από την πηγή και πλησιάζει τον αποδέκτη. Το σύνολο των διαδικασιών αυτών το αποκαλούμε διασπορά.

Με τον όρο μετασχηματισμό εννοούμε την παραγωγή ή καταστροφή ενός ρύπου, κυρίως με τη βοήθεια της ξηρής ή υγρής εναπόθεσης (φυσικές διαδικασίες) ή μέσω της χρήσης διαφόρων χημικών αντιδράσεων (χημικές διαδικασίες). Επομένως, γίνεται κατανοητό ότι ο κύκλος των ρύπων στην ατμόσφαιρα είναι μια ιδιαίτερα σύνθετη διαδικασία που εξαρτάται από διαφορετικούς παράγοντες που δρουν σε διαφορετικές κλίμακες χώρου και χρόνου όπως:

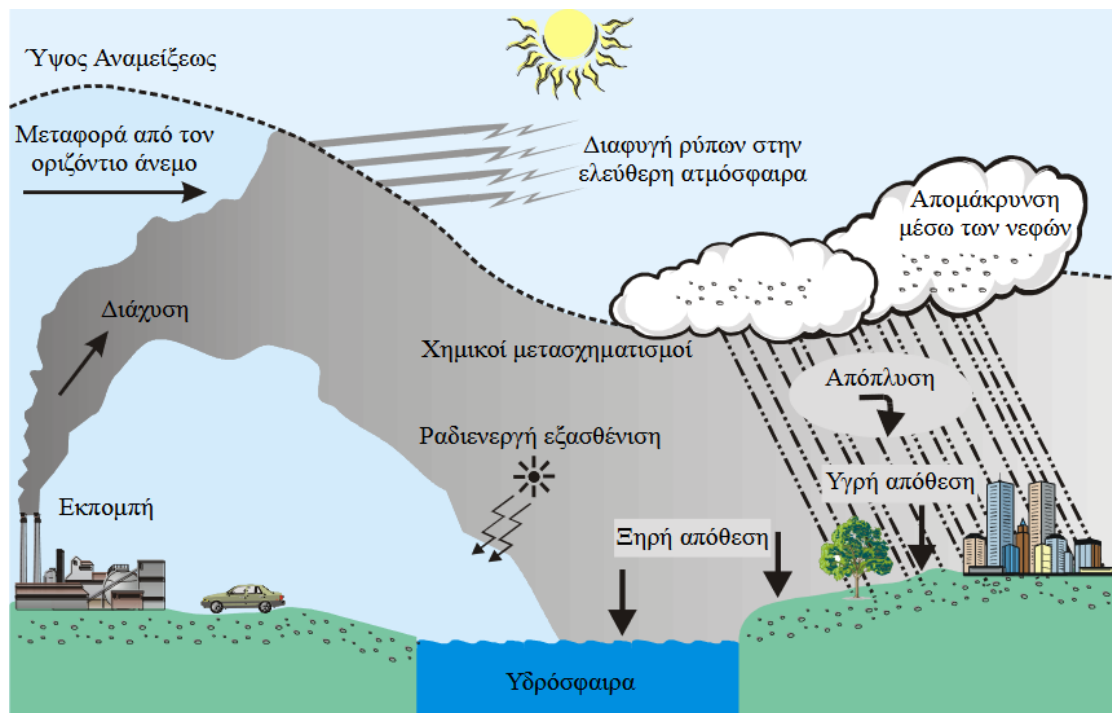
- Τα μέσης και τοπικής κλίμακας συστήματα κυκλοφορίας που συνδέονται με τα συγκεκριμένα τοπογραφικά χαρακτηριστικά ενός τόπου
- Την συνοπτική μετεωρολογική κατάσταση στην ατμόσφαιρα (π.χ. κυκλωνική ή αντικυκλωνική κατάσταση, ταχύτητα του ανέμου)
- Τον βαθμό ανατάραξης της ατμόσφαιρας και την σχετιζόμενη ένταση των στροβίλων που καθορίζουν τη διάχυση των ρύπων στην ατμόσφαιρα
- Τον χρόνο ζωής των ρύπων που εξαρτάται από τον ρυθμό των φυσικών και χημικών μετασχηματισμών τους ή καταστροφής τους
- την χωρική κατανομή και την ένταση των ρυθμών ρύπανσης (Ζάνης, 2014).

Η μεταφορά των ρύπων από την ατμόσφαιρα στο έδαφος ονομάζεται απόθεση και αποτελεί μια φυσική διαδικασία απομάκρυνσης των ρύπων από την ατμόσφαιρα. Γενικά ξεχωρίζουμε τρεις διαφορετικούς τύπους απόθεσης:

1. **Καθίζηση** ονομάζεται η πτώση λόγω βαρύτητας των σχετικά μεγάλων και βαρέων σωματιδίων.
2. **Ξηρή απόθεση** υφίστανται τα μικρά σωματίδια και οι αέριοι ρύποι, τα οποία ακολουθούν αδρανώς τις κινήσεις του αέρα και τα οποία κατακρατούνται, όταν έρθουν σε επαφή, με την υποκείμενη επιφάνεια.
3. **Υγρή απόθεση** που λαμβάνει χώρα σε περίπτωση υετού οπότε μπορεί να συμβεί κάποιο από τα παρακάτω ενδεχόμενα, δηλαδή είτε σάρωση των ατμοσφαιρικών ρύπων από την βροχή ή το χιόνι, είτε πρόσληψη των ρύπων σε ένα προηγούμενο στάδιο από τα μικρά σταγονίδια του νέφους, τα οποία αργότερα ενώνονται μεταξύ τους φτιάχνοντας σταγόνες βροχής (βροχόπλυση και χιονόπλυση) (ΥΠΕΚΑ, 2018).

2.5 Διασπορά ατμοσφαιρικών ρύπων

Η παρακάτω εικόνα μας δείχνει σχηματικά τις διαδικασίες οι οποίες συντελούν στην διασπορά των ατμοσφαιρικών ρύπων που εκπέμπονται από μια καμινάδα.



Σχήμα 2.5.1 Σχηματική περιγραφή των ατμοσφαιρικών διεργασιών που επηρεάζουν τη διασπορά των ρύπων (Ζάνης, 2014).

Σε πρώτη φάση, οι αέριοι ρύποι όταν αφήνουν την καμινάδα είναι κατά κανόνα θερμότεροι από τον περιβάλλοντα αέρα. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την αρχική ορμή που έχουν τα καυσαέρια όταν φθάνουν στην κορυφή της καμινάδας έχει σαν αποτέλεσμα ο θύσανος να ανυψώνεται μέχρι ενός ορισμένου ύψους. Βέβαια, το ύψος αυτό είναι μεγαλύτερο του φυσικού ύψους της καμινάδας και ονομάζεται ενεργό ύψος της καμινάδας. Η διαφορά που προκύπτει από το φυσικό και το ενεργό ύψος της καμινάδας ονομάζεται αρχική ανύψωση του θυσάνου, η οποία σε πολλές περιπτώσεις παρουσιάζει μεγάλη σημασία καθώς μπορεί να αυξήσει το ενεργό ύψος της καμινάδας κατά 2 με 10 φορές περισσότερο του ύψους της κατασκευαστικής καμινάδας (Ζάνης, 2014).

Ο καπνός μεταφέρεται μακριά από την πηγή από τον μέσο άνεμο. Η διεύθυνση του ανέμου καθορίζει την περιοχή προς την οποία θα κατευθυνθούν, οι ρύποι ενώ η ταχύτητα του ανέμου προσδιορίζει σε μεγάλο βαθμό τον ρυθμό αραιώσης τους. Στις περιπτώσεις στις οποίες η ταχύτητα του ανέμου είναι πολύ χαμηλή, οι συνθήκες διασποράς είναι άσχημες και υπάρχει αυξημένη πιθανότητα εμφάνισης επεισοδίου ρύπανσης σε περιοχές με πολύ μεγάλη πυκνότητα εκπομπών, όπου τέτοιες συνθήκες έχουμε κοντά στο κέντρο των αντικυκλωνικών συστημάτων. Επιπλέον, σε περιπτώσεις που ο θύσανος ρύπανσης βρίσκεται πάνω από το ύψος που συντελούνται ισχυρές στροβιλώδεις κινήσεις, τότε μπορεί ο ρυπασμένος αέρας να ταξιδέψει σε αποστάσεις αρκετών εκατοντάδων χιλιομέτρων. Η οριζόντια μεταφορά αποτελεί τον πλέον σημαντικό μηχανισμό απομάκρυνσης και αραιώσης των ρύπων (Ζάνης, 2014).

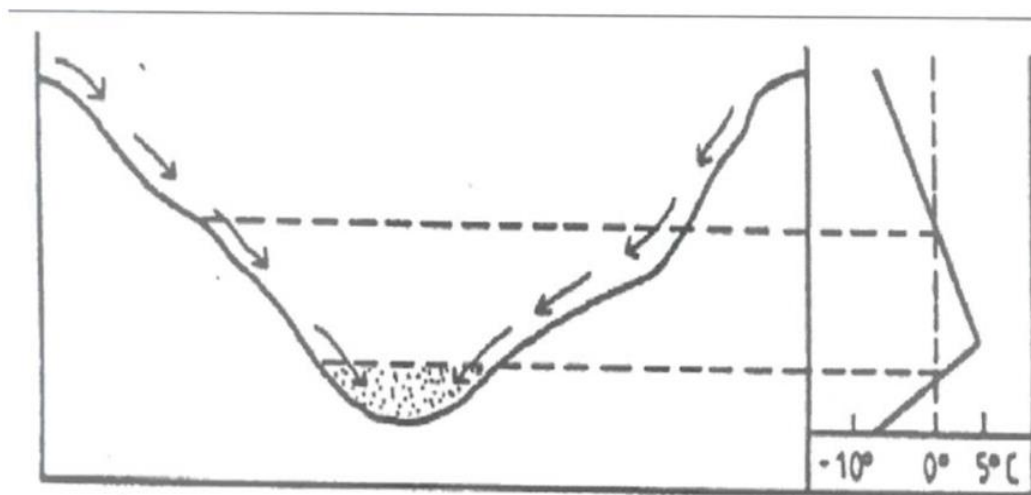
Οι αναταρακτικές κινήσεις του αέρα είναι παράλληλα υπεύθυνες για την κατακόρυφη μεταφορά και την διαπλάτυνση του θυσάνου, με τελικό αποτέλεσμα την αραιώση. Η κλίμακα και η ένταση της αραιώσης εξαρτώνται από τον βαθμό ανατάραξης της

ατμόσφαιρας. Σε συνθήκες ευστάθειας οι τυρβώδεις στρόβιλοι είναι μικρότερης κλίμακας και η κατακόρυφη διάχυση γίνεται αργά ενώ σε συνθήκες μεγάλης αστάθειας οι τυρβώδεις στρόβιλοι είναι μεγαλύτεροι και η διάχυση πολύ έντονη. Η διάχυση των ρύπων γίνεται μέχρι ένα συγκεκριμένο ύψος από την επιφάνεια της γης το οποίο ονομάζεται ύψος ανάμειξης (Ζάνης, 2014).

2.6 Μετεωρολογικές συνθήκες που ευνοούν επεισόδια ρύπανσης

Οι μετεωρολογικές συνθήκες που ευθύνονται για τα επεισόδια ατμοσφαιρικής ρύπανσης οφείλονται κυρίως στο φαινόμενο των θερμοκρασιακών αναστροφών, όπου η θερμοκρασία πάνω από ένα μεγάλο ύψος αντί να συνεχίσει την πορεία ελάττωσης της με το ύψος αρχίζει να αυξάνεται. Ο τρόπος δημιουργίας των θερμοκρασιακών αναστροφών αποδίδεται στους εξής τρόπους:

- Στην ταχύτερη ψύξη του αέρα που βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος σε σχέση με τον υπερκείμενο αέρα, λόγω της απώλειας θερμότητας από την επιφάνεια της γης που ακτινοβολεί την ηλιακή ενέργεια προς το διάστημα, η ψύξη αυτή είναι έντονη όσο πιο πολύ διαρκεί η νύχτα και όσο πιο ψυχρός είναι ο αέρας. Οι αναστροφές αυτού του είδους ονομάζονται αναστροφές ακτινοβολίας και εμφανίζονται κατά το χειμώνα στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη, στις ανέφελες νύχτες, καθώς και σε χιονοσκεπή εδάφη.
- Στην κατολίσθηση του αέρα στη κοιλάδα, όπου γίνεται συγκέντρωση του ψυχρού και πυκνού αέρα προερχόμενου από τις κορυφές και τις πλαγιές των γειτονικών βουνών στη βάση της κοιλάδας. Σαν αποτέλεσμα του μηχανισμού αυτού είναι η δημιουργία των χαμηλών θερμοκρασιών στον πυθμένα της κοιλάδας. Οι αναστροφές που προκύπτουν από κατολίσθηση του αέρα δημιουργούνται κυρίως την άνοιξη στα μέσα γεωγραφικά πλάτη.

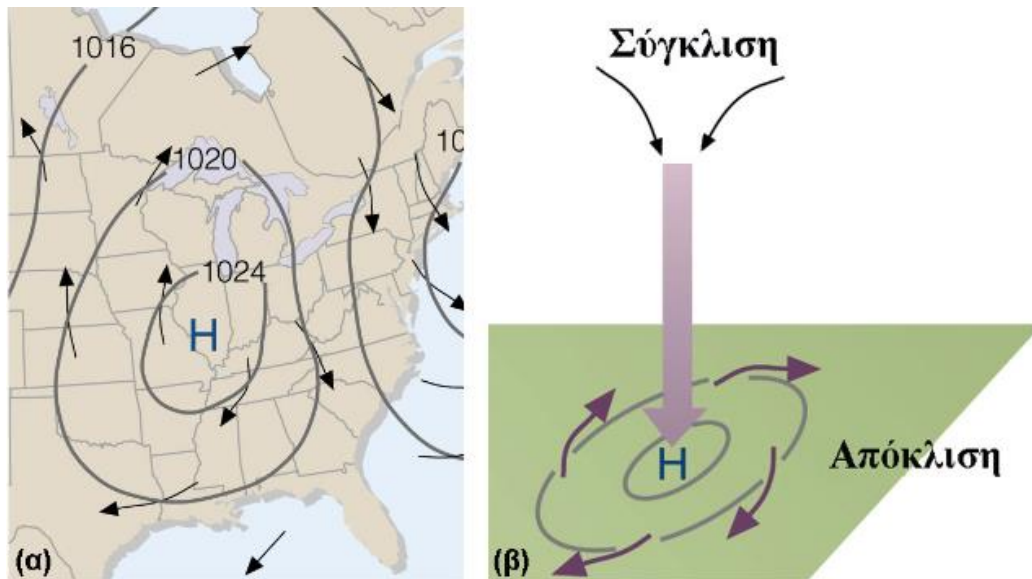


Σχήμα 2.6.1 Κατολίσθηση αέρα σε κοιλάδα (Μαχαιράς και Μπαλαφούτης, 1997).

- Αναστροφές που οφείλουν τη δημιουργία τους σε οριζόντια μεταφορά, όπου έχουμε την κίνηση του θερμού αέρα πάνω από τη ψυχρή επιφάνεια, με αποτέλεσμα τη ψύξη του αέρα στη ζώνη επαφής με το έδαφος, ενώ σε μεγαλύτερα ύψη επικρατεί η θέρμανση του.

- Αρκετές αναστροφές της θερμοκρασίας δημιουργούνται σε μεγαλύτερα ύψη από την επιφάνεια της γης, επομένως σε αυτές τις περιπτώσεις η ημερήσια πορεία του κύκλου θέρμανσης και ψύξης στην επιφάνεια είναι μικρή, οπότε ο σχηματισμός των αναστροφών αυτών συμβαίνει μέρα και νύκτα. Οι σημαντικότερες αναστροφές οι οποίες δημιουργούνται μέσω αυτής της μεγάλης ποικιλίας των ατμοσφαιρικών διαδικασιών είναι:
 1. Οι μετωπικές αναστροφές που σχηματίζονται κατά τη διάρκεια της συνάντησης δύο αέριων μαζών με διαφορετικές θερμοκρασίες, με συνέπεια ο ψυχρότερος αέρας να οδηγείται κάτω από τον θερμότερο.
 2. Ο επόμενος τύπος της αναστροφής έχει να κάνει με την αναστροφή καθίζησης που δημιουργείται σε μια αέρια μάζα όταν ένας όγκος αέρα αρχίζει να καθιζάνει και να εξαπλώνεται πάνω από ένα κατώτερο στρώμα. Με αυτό τον τρόπο ο αέρας που βυθίζεται θερμαίνεται έντονα, με την κορυφή του στρώματος του να είναι θερμότερη από την βάση. Άρα καταλαβαίνουμε ότι η θερμοκρασία που είναι στα υψηλότερα στρώματα είναι μεγαλύτερη από αυτή που επικρατεί στα κατώτερα. Αυτός ο τύπος των αναστροφών εμφανίζεται κυρίως στους αντικυκλώνες. Επίσης στις αναστροφές καθίζησης η υγρασία ελαττώνεται καθ' ύψος, σε αντίθεση με τις μετωπικές αναστροφές που επικρατούν τα αντίθετα φαινόμενα (Μαχαιράς, και Μπαλαφούτης, 1997).

Ο αντικυκλώνας ή σύστημα υψηλών πιέσεων ή βαρομετρικό υψηλό παρουσιάζει στο κέντρο του και στην επιφάνεια του εδάφους μεγαλύτερες τιμές ατμοσφαιρικής πίεσης από αυτές που επικρατούν στην γύρω περιοχή. Έτσι η πίεση αυξάνεται από την περιφέρεια προς το κέντρο του συστήματος, με την ένταση των ανέμων να είναι αυξημένη προς το κέντρο. Λόγω της τριβής που υπάρχει κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, έχουμε απόκλιση των ανέμων από το κέντρο προς την περιφέρεια του συστήματος, με συνέπεια να εμφανίζεται καθοδική κίνηση του αέρα στο κέντρο του συστήματος προκειμένου να αντισταθμιστεί η απώλεια μάζας λόγω της οριζόντιας απόκλισης. Εξαιτίας της καθοδικής κίνησης ο άνεμος θερμαίνεται αδιαβατικά με ασθενείς ανέμους, και άρα στην περιοχή των αντικυκλώνων επικρατεί καλοκαιρία. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η εμφάνιση στρώματος θερμοκρασιακής αναστροφής, καθώς η αέρια μάζα είναι θερμότερη από αυτή που επικρατεί κοντά στην επιφάνεια (Κατσαφάδος και Μαυροματίδης, 2015).



Σχήμα 2.6.2. Αντικυκλωνικά συστήματα (Κατσαφάδος, και Μαυροματίδης, 2015).

Τα τοπικά συστήματα αύρας έχουν μεγάλη σημασία σε προβλήματα ρύπανσης της ατμόσφαιρας, διότι τροποποιούν την κατακόρυφη δομή της θερμοκρασίας της. Το σύστημα της θαλάσσιας αύρας εμφανίζεται όταν η θέρμανση της ξηράς προκαλεί μεγαλύτερη θερμοκρασία και χαμηλότερη πίεση του υπερκείμενου της αέρα σε σχέση με τη γειτονική της θαλάσσια περιοχή. Ο ψυχρότερος αέρας που είναι πάνω από τη θάλασσα πνέει προς την ξηρά για να καταλάβει τη θέση του θερμού ανερχόμενου αέρα. Κατά τη διάρκεια της νύχτας επικρατούν τα αντίθετα φαινόμενα με αυτά της θαλάσσιας αύρας και έτσι έχουμε την απόγειο αύρα, με τη πρώτη να είναι η πιο ισχυρή (Κανελλοπούλου, 2007).

Επιπλέον τα συστήματα αύρας δημιουργούνται όχι μόνο από τις θερμοκρασιακές αντιθέσεις του αέρα πάνω από την ξηρά και τη θάλασσα, αλλά και από τοπογραφικά αίτια όπως είναι η αύρα των βουνών και των κοιλάδων, που εμφανίζεται το καλοκαίρι με αντικυκλωνικό σύστημα. Την ημέρα ο αέρας που βρίσκεται κάτω από τις κλιτύες και το δάπεδο της κοιλάδας θερμαίνεται περισσότερο από τον αέρα που βρίσκεται στον κεντρικό άξονα της κοιλάδας, και άρα έχουμε την αύρα του βουνού, ενώ κατά τη διάρκεια της νύχτας η επιφάνεια της κοιλάδας ψύχεται εκπέμποντας στο υπέρυθρο και έτσι έχουμε την αύρα του βουνού (Ζερεφός, 1984).

2.7 ⇨ Επιπτώσεις αέριας ρύπανσης

Οι επιπτώσεις που προκύπτουν μέσω της ατμοσφαιρικής ρύπανσης παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην υποβάθμιση των οικοσυστημάτων, του δομημένου περιβάλλοντος και της υγείας των ανθρώπων. Τα κυριότερα αρνητικά αποτελέσματα της αέριας ρύπανσης είναι τα εξής:

- Μείωση της ορατότητας
- Σχηματισμός ομίχλης
- Αλλαγή της βροχόπτωσης
- Αλλαγή της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος

- Αλλαγή της θερμοκρασίας και των ανέμων
- Διάβρωση των υλικών
- Επίδραση στις λίμνες και στη βλάστηση
- Επίδραση στην ανθρώπινη υγεία (eea.europa.eu).

Η ατμοσφαιρική ρύπανση προκαλεί πολύ σημαντικές επιπτώσεις στη χλωρίδα και τη πανίδα μέσω του φαινομένου της όξινης βροχής. Τα οξείδια του θείου και του αζώτου είναι υπεύθυνα για τη δημιουργία του φαινομένου της όξινης βροχής. Η όξινη βροχή απομακρύνει τα μέταλλα και τα θρεπτικά συστατικά του εδάφους που είναι απαραίτητα προκειμένου να αναπτυχθούν τα δέντρα, επίσης η όξινη βροχή εκπλένει αλουμίνιο από το έδαφος το οποίο είναι αρκετά επιβλαβές για τα φυτά. Σε μεγάλα υψόμετρα η όξινη ομίχλη και τα σύννεφα ενδέχεται να απομακρύνουν τα θρεπτικά συστατικά από το φύλλωμα των δένδρων αφήνοντας τα με νεκρά φύλλα και βελόνες. Επομένως, με βάση αυτά, τα δέντρα θα είναι λιγότερο ικανά να απορροφήσουν το φως του ηλίου, πράγμα που τα καθιστά λιγότερο ικανά ώστε να αντέξουν τις θερμοκρασίες κατάψυξης (epa.gov/acidrain/effects-acid-rain).

Η όξινη βροχή επίσης δημιουργεί προβλήματα στο δομημένο περιβάλλον και στα υλικά με αποτέλεσμα την καταστροφή, την επιφανειακή διάβρωση και τον θρυμματισμό των γλυπτών και των αρχαίων μνημείων εφόσον αποτελούνται από μάρμαρο που περιέχει ανθρακικό ασβέστιο με συνέπεια το διοξείδιο του θείου υπό οξειδωμένη μορφή των θειικών ιόντων στις σταγόνες βροχής να προκαλέσει γυψοποίηση, δηλαδή να μετατρέψει το ανθρακικό ασβέστιο σε θειικό ασβέστιο. Επίσης, το όζον επειδή είναι ισχυρότερο οξειδωτικό μέσο σε σχέση με το οξυγόνο δημιουργεί γρηγορότερη γήρανση στα ελαστικά που περιέχουν καουτσούκ συμβάλλοντας έτσι στον θρυμματισμό τους (Ρεμουντάκη, 2010).

Πολύ σημαντικές είναι επίσης οι επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην υγεία των ανθρώπων, καθώς δημιουργούν πολύ σοβαρά προβλήματα όπως:

- Αναπνευστικά νοσήματα, αύξηση ευαισθησίας πνευμόνων, φλεγμονές των αναπνευστικών οδών και επιδείνωση χρόνιων καρδιακών νοσημάτων μέσω των υψηλών συγκεντρώσεων του διοξειδίου του θείου (SO₂).
- Το διοξείδιο του αζώτου (NO₂) προκαλεί ερεθισμό του αναπνευστικού συστήματος και αύξηση της ευπάθειας που σχετίζονται με αναπνευστικές λοιμώξεις.
- Μείωση των πνευμονικών λειτουργιών όπως βήχας και αυξημένες κρίσεις άσθματος μέσω του αερίου του όζον O₃.
- Μείωση της ικανότητας μεταφοράς του οξυγόνου από το κυκλοφοριακό σύστημα με αποτέλεσμα τη δημιουργία ζάλης, και την επιδείνωση σε καρδιαγγειακά νοσήματα λόγω του μονοξειδίου του άνθρακα (CO).
- Μεταφορά τοξικών και ραδιενεργών ρύπων στον οργανισμό, αναπνευστικά νοσήματα, φλεγμονές των αναπνευστικών οδών και ευαισθησία πνευμόνων σε πνευμονικό οίδημα μέσω των αιωρούμενων σωματιδίων ΑΣ₁₀ και ΑΣ_{2,5}.
- Το βενζόλιο προκαλεί καρκίνο του αίματος και σοβαρές ασθένειες όπως η λευχαιμία

- Τα αέρια που περιέχουν μόλυβδο δημιουργούν επιπτώσεις στο κεντρικό νευρικό σύστημα όπως αύξηση αρτηριακής πίεσης, αναιμία και νευροπάθειες (eea.europa.eu/themes/air/health-impacts-of-air-pollution).

2.7 Τρόποι αντιμετώπισης των επεισοδίων ρύπανσης

Η προστασία του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος δεν είναι μόνο ευθύνη των φορέων του κράτους, της πολιτείας και των μεγάλων εγκαταστάσεων που επιβαρύνουν τον αέρα με σημαντικές ποσότητες ρύπων, αποτελεί όμως και υπόθεση που αφορά τον καθένα από εμάς.

Σε ό,τι αφορά στα κτίρια και τις κατοικίες, η αντικατάσταση των καυστήρων πετρελαίου με καυστήρες φυσικού αερίου είναι μια σπουδαία λύση, γιατί το φυσικό αέριο είναι καθαρότερο και πιο αποδοτικό από ό,τι είναι το πετρέλαιο. Επίσης, πρέπει να γίνονται παρεμβάσεις συντήρησης με στόχο τη μείωση των απωλειών θερμότητας στα κτίρια.

Στις αστικές περιοχές η κυκλοφορία είναι υπεύθυνη για το μεγαλύτερο μέρος εκπομπών των ρύπων και τα μέτρα που θα πρέπει να ληφθούν με στόχο τη μείωση των εκπομπών είναι κυρίως:

- Βελτίωση των καυσίμων και των λιπαντικών με τον περιορισμό του θείου και του μολύβδου στα καύσιμα
- Αύξηση της αποδοτικότητας του καυσίμου στα οχήματα
- Αποτελεσματική διαχείριση της κυκλοφορίας
- Ενθάρρυνση του περιορισμού της χρήσης των οχημάτων μέσω των μέσων μαζικής μεταφοράς
- Καθιέρωση οικονομικών κινήτρων μέσω της ελάφρυνσης της φορολογίας στην αμόλυβδη βενζίνη
- Περιορισμός της χρήσης ΙΧ μέσω οικονομικών και διοικητικών δεσμών.

Ωστόσο, για τη μείωση των εκπομπών των ρύπων από τα οχήματα έχουν παρθεί μέτρα που αφορούν στην απόσυρση των παλαιών αυτοκινήτων πριν το 1991 με νέα αυτοκίνητα τα οποία θα είναι εξοπλισμένα με καταλυτικούς μετατροπείς, όπως επίσης και τα υβριδικά αυτοκίνητα νέας τεχνολογίας θα μπορούσαν να αντικαταστήσουν σίγουρα σε μεγάλο ποσοστό τα παλιά παρά το ακριβό τους κόστος. Σε περίπτωση, επίσης που οι μετεωρολογικές συνθήκες είναι ευνοϊκές για την ανάπτυξη της ρύπανσης απαγορεύεται η κυκλοφορία των οχημάτων στο κέντρο της Αθήνας τη συγκεκριμένη ημέρα. Επιπλέον, ορισμένα σημαντικά έργα που θεσπίστηκαν για τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα είναι:

- Μείωση της περιεκτικότητας σε θείο από τα βαρέα καύσιμα από 0,3% κατά βάρος σε 0,2% κατά βάρος
- Από το 1995 η περιεκτικότητα σε αέρια θείου στην αμόλυβδη μειώθηκε από 0,10% κατά βάρος σε 0,05% ανά βάρος.
- Η περιεκτικότητα βενζολίου στη βενζίνη μειώθηκε από 5% ανά όγκο σε 4% ανά όγκο.
- Εισαγωγή φυσικού αερίου στο 15% περίπου του ενεργειακού ισοζυγίου στην Αθήνα μέχρι το 2000.

Τέλος, σαν αποτέλεσμα των παραπάνω πρακτικών έχουμε μείωση του επιπέδου του διοξειδίου του θείου, του διοξειδίου του αζώτου και του όζοντος. Με την ολοκλήρωση ωστόσο των μεγάλων έργων υποδομής στην Αθήνα, δηλαδή το μετρό, οι περιφερειακοί δρόμοι, η εισαγωγή φυσικού αερίου και η αντικατάσταση των λεωφορείων θα έχουμε σε σημαντικό βαθμό τη μείωση του επιπέδου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης (eea.europa.eu).

2.8 Αέρια ρύπανση στην Αθήνα

Η ατμοσφαιρική ρύπανση των αστικών και βιομηχανικών περιοχών στη χώρα μας λόγω της αύξησης του πληθυσμού των αστικών κέντρων, της άναρχης πολεοδομικής επέκτασης και των αυξητικών τάσεων της βιομηχανικής παραγωγής κατά το έτος 1950-1990 αποτελούσε πολύ σημαντικό πρόβλημα. Το πρόβλημα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στο Λεκανοπέδιο της Αττικής έχει να κάνει άμεσα με τη δυσμενή τοπογραφία, με την υπερσυγκέντρωση του πληθυσμού, την ραγδαία αύξηση των τροχοφόρων, καθώς και των βιομηχανικών εγκαταστάσεων και δραστηριοτήτων όπου λειτουργούν σε αστικές περιοχές. Στις προηγούμενες δεκαετίες στην περιοχή της Αθήνας είχαμε τη δημιουργία του φωτοχημικού νέφους που είναι ένα μίγμα από σωματίδια καπνού, μονοξειδίου του άνθρακα (CO), διοξειδίου του θείου (SO₂), οξείδια του αζώτου (NO_x) και όζον (O₃), για το οποίο ευθύνονταν κυρίως οι μηχανές εσωτερικής καύσης των αυτοκινήτων, οι κεντρικές θερμάνσεις των σπιτιών και τα καυσαέρια από τις εγκαταστάσεις της βιομηχανίας. Ωστόσο με τη βελτίωση των καυσίμων των αυτοκινήτων, την αντικατάσταση των παλιών αυτοκινήτων με καινούργια, τη μετεγκατάσταση των βιομηχανιών και βιοτεχνιών σε περιοχές βιομηχανικές και την εισαγωγή του φυσικού αερίου ως ενεργειακό καύσιμο είχε σαν αποτέλεσμα τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα στις μεγάλες πόλεις. Το 2011-2013 είχαμε αύξηση της φορολογίας του πετρελαίου θέρμανσης, αλλά στη συνέχεια μειώθηκε η τιμή του λόγω της πτώσης των διεθνών τιμών και των επιδομάτων θέρμανσης. Το νέφος της αιθαλομίχλης περιέχει κυρίως αιθάλη δηλαδή μαύρο άνθρακα λόγω της μαζικής καύσης κακής ποιότητας ξύλων. Σε ότι αφορά στους αέριους ρύπους SO₂, NO και CO παρατηρούμε μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης τα τελευταία χρόνια, αλλά έχουμε αύξηση των αιωρούμενων σωματιδίων (PM) και του όζοντος (O₃) που ανήκουν στην κατηγορία των φωτοχημικών ρύπων (Valavanidis et al., 2015).

Στην περιοχή του Θησείου στην Αθήνα εντοπίστηκαν σημαντικά επεισόδια ατμοσφαιρικής ρύπανσης που οφείλουν τη δημιουργία τους στις εκπομπές καύσης ξύλου για τη θέρμανση των σπιτιών κατά τη χειμερινή περίοδο, όπου μέσω των συγκεκριμένων πηγών ρύπανσης προκύπτει ο σχηματισμός των διαφόρων πρωτογενών ρύπων, όπως είναι τα αιωρούμενα σωματίδια ΑΣ καθώς και διάφορα αέρια με κύριο συστατικό τον άνθρακα. Η μέση συγκέντρωση για τα ΑΣ₁₀ κατά τη διάρκεια της περιόδου της αιθαλομίχλης από τις εκπομπές καύσεις ξύλου στο Θησείο ήταν περίπου 45,2 μg/m³, τα οποία και υπερέβησαν το ανώτατο ημερήσιο όριο για ολόκληρη τη λεκάνη της Αθήνας σύμφωνα με τα δεδομένα της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Η ρύπανση της ατμόσφαιρας από τις εκπομπές καύσης ξύλου συνεχίζεται καθ' όλη τη διάρκεια του χειμώνα, αλλά και στη διάρκεια των ήπιων ημερών. Με βάση μια διαχρονική ανάλυση των σημερινών αποτελεσμάτων ενός μοντέλου προκύπτει ότι οι τιμές της αέριας ρύπανσης στο Θησείο είναι αντιπροσωπευτικές των μέσων συνθηκών ρύπανσης της Αθήνας. Διαπιστώθηκε, επίσης, ότι οι διαφορές για τα αιωρούμενα σωματίδια, καθώς και για τα ανθρακικά αερολύματα ήταν πολύ μεγάλες κατά

τη διάρκεια της νύκτας σε σχέση με τη μέρα, λόγω του ότι το βράδυ επικρατούν πιο ψυχρές συνθήκες με αποτέλεσμα να γίνεται έντονη δραστηριότητα των εκπομπών ρύπανσης. Μεταξύ των ωρών 21 και 23 οι παρατηρούμενες συγκεντρώσεις για τα αιωρούμενα σωματίδια AS_{10} , τα σωματίδια του οργανικού άνθρακα PM1 OA, και τα σωματίδια των ανθρακικών αερολυμάτων PM1 BC είναι κατά μέσο όρο $90,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $74,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και $9,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές είναι αντιπροσωπευτικές σχεδόν στο 70% των μέγιστων ωριαίων συγκεντρώσεων σε μια εκτεταμένη αστική περιοχή, υποστηρίζοντας ότι το Θησείο αντιπροσωπεύει τις συνθήκες ατμοσφαιρικής ρύπανσης του περιβάλλοντος πάνω από την αστική λεκάνη της Αθήνας (Athanasopoulou et al., 2017).

2.8.1 Μονοξείδιο του άνθρακα

Το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) είναι ένα αέριο το οποίο είναι άχρωμο και άοσμο όπου εκπέμπεται μέσω των εξατμίσεων των μηχανών των βενζινοκίνητων αυτοκινήτων καθώς και πάσης φύσεως μηχανών όταν γίνεται ατελής καύση της καύσιμης ύλης (ΥΠΕΝ,2017). Με την καύση του άνθρακα ή των διαφόρων οργανικών ενώσεων προκύπτει ο σχηματισμός του που δίνεται μέσω της αντίδρασης $C + 1/2 O_2 \rightarrow CO$, που έχει σαν αποτέλεσμα την απώλεια μεγάλου ποσοστού διαθέσιμης θερμικής ενέργειας.

Οι ανθρωπογενείς πηγές ρύπων που ευθύνονται για την μεγάλη σε ποσότητα παραγωγή του CO στην ατμόσφαιρα προέρχονται από τα οχήματα, ενώ οι φυσικές πηγές που προκαλούν τη δημιουργία του μονοξειδίου του άνθρακα CO είναι κυρίως τα ηφαίστεια και οι πυρκαγιές, επίσης το CO σχηματίζεται και μέσω της οξείδωσης των υδρογονανθράκων, με κυρίως το μεθάνιο. Το σύνολο των ανθρωπογενών πηγών εκπομπής του μονοξειδίου του άνθρακα είναι κατά μια τάξη μεγέθους χαμηλότερο από τις φυσικές εκπομπές. Η μέση συγκέντρωση του CO στην ατμόσφαιρα είναι 0.1 ppm, ενώ σε σήραγγες αυτοκινητόδρομων και σε στενές λεωφόρους μεγάλης κυκλοφορίας μπορεί να φτάσει και τα 50 ppm, και ο χρόνος παραμονής του στην ατμόσφαιρα είναι της τάξης του ενός μήνα (Κούγκολος, 2018).

Το μονοξείδιο του άνθρακα λόγω των επιπτώσεων που προκύπτουν στην υγεία των ανθρώπων χαρακτηρίζεται ως ατμοσφαιρικός ρύπος. Το CO επηρεάζει την ικανότητα της μεταφοράς του οξυγόνου στο αίμα, όταν εισπνέεται τότε αντικαθιστά το οξυγόνο από την αιμογλοβίνη του αίματος και σχηματίζει καρβοξυ-αιμογλοβίνη (COHb), και αυτό συμβαίνει διότι το μονοξείδιο του άνθρακα έχει μεγαλύτερη χημική συγγένεια με την αιμογλοβίνη από ό,τι με το οξυγόνο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του μεταφερόμενου οξυγόνου στο αίμα όταν αυτό βρίσκεται στον αέρα ακόμα και σε μικρές ποσότητες. Στις αστικές περιοχές η συγκέντρωση του CO φτάνει συχνά μεταξύ 5 και 50 ppm, ενώ οι οδηγοί των οχημάτων είναι συχνά εκτεθειμένοι σε συγκεντρώσεις έως 100 ppm (Ρεμουντάκη, 2010).

2.8.2 Διοξείδιο του θείου (SO₂)

Το διοξείδιο του θείου (SO₂) είναι ένα αέριο άχρωμο, και άοσμο στις χαμηλές συγκεντρώσεις, αλλά σε μεγάλες συγκεντρώσεις εμφανίζει έντονη ερεθιστική οσμή. Το SO₂ αντιδρά στην ατμόσφαιρα για να σχηματίζει το τριοξείδιο του θείου (SO₃) που δρα έντονα με τους υδρατμούς σχηματίζοντας ομίχλη θειικού οξέος το οποίο είναι ένα φαινόμενο που

απαντάται στο πρόβλημα της ρύπανσης από όξινη βροχή. Σημαντικές επίσης μορφές του θείου στην ατμόσφαιρα είναι το καρβονυλοσουλφίδιο (OCS), ο διθειάνθρακας (CS₂), το διμεθυλοσουλφίδιο (CH₃)₂S, το υδρόθειο (H₂S) και τα θειικά άλατα (Ζάνης 2014). Οι κυριότερες φυσικές πηγές παραγωγής των θειούχων ενώσεων είναι τα ηφαίστεια, οι ωκεανοί και η αποσύνθεση των οργανικών ενώσεων (Κούγκολος 2018).

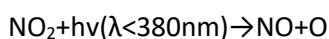
Οι κυριότερες ανθρωπογενείς πηγές εκπομπής του διοξειδίου του θείου έχουν να κάνουν με τις βιομηχανικές μονάδες όπου γίνεται η καύση των ορυκτών καυσίμων που περιέχουν θείο. Ωστόσο ένα πολύ μικρό ποσοστό εκπομπών του διοξειδίου του θείου οφείλεται στα διάφορα οχήματα, με το μεγαλύτερο ποσοστό να εκπέμπεται από μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ σημαντικά ποσοστά προέρχονται από τα διυλιστήρια και την τσιμεντοβιομηχανία. Οι μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις στα αστικά κέντρα είναι της τάξης των 100 μg/Λ³. Το πετρέλαιο και οι γαιάνθρακες περιέχουν σημαντικά ποσοστά θείου το οποίο βρίσκεται δεσμευμένο σε ανόργανες θειούχες ενώσεις, καθώς επίσης και ως οργανικό θείο. Καθώς συντελείται η καύση των καυσίμων το θείο εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα κυρίως ως διοξείδιο του θείου (SO₂), και σε μικρότερες ποσότητες ως τριοξείδιο του θείου (SO₃).

Το διοξείδιο του θείου οξειδώνεται στην ατμόσφαιρα και είναι η κύρια αιτία σχηματισμού της όξινης βροχής. Καθώς το ποσοστό των υδρατμών στην ατμόσφαιρα είναι χαμηλό και δεν δημιουργούνται νέφη τότε το SO₂ οξειδώνεται στην αέρια φάση, ενώ όταν το ποσοστό των υδρατμών στην ατμόσφαιρα είναι πολύ μεγάλο και υπάρχουν νέφη τότε η οξείδωση του SO₂ γίνεται στην αέρια φάση επειδή παρουσιάζει μεγάλη διαλυτότητα στο νερό. Η οξείδωση του διαλυμένου στα σταγονίδια SO₂ προς θειικά ιόντα μπορεί να γίνει μέσω του ατμοσφαιρικού οξυγόνου O₂, καθώς επίσης και από άλλα οξειδωτικά μέσα που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα όπως είναι το όζον O₃ (Ρεμουντάκη, 2010).

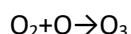
Η μεγάλη έκθεση του διοξειδίου του θείου στην ατμόσφαιρα μπορεί να δημιουργήσει αναπνευστικά προβλήματα, να τροποποιήσει τον αμυντικό μηχανισμό των πνευμόνων και να επιδεινώσει τυχόν υπάρχουσες καρδιοαγγειακές παθήσεις. Επιπλέον, οι υψηλές συγκεντρώσεις του SO₂ στην ατμόσφαιρα προκαλούν μείωση της ορατότητας, αύξηση της οξύτητας των ποταμών και των λιμνών και αλλοιώσεις στη βλάστηση και στα μέταλλα (Ζάνης, 2014)

2.8.3 Μονοξείδιο του αζώτου (NO), και διοξείδιο του αζώτου (NO₂)

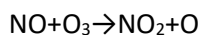
Το NO είναι πρωτογενής ρύπος, ενώ το NO₂ είναι δευτερογενής ρύπος που προέρχεται μέσω της αντίδρασης του NO με το O₃. Χρησιμοποιούμε συνήθως τον όρο NO_x για το άθροισμα των συγκεντρώσεων NO και NO₂ καθώς η αλληλομετατροπή μεταξύ τους γίνεται αρκετά γρήγορα. Το NO είναι αέριο άχρωμο και άοσμο, ενώ το NO₂ είναι ερυθροκάστανο με δριμεία οσμή. Τα οξείδια του αζώτου συμμετέχουν σε μεγάλο αριθμό φωτοχημικών αντιδράσεων όπως στο σχηματισμό της φωτοχημικής καπνομίχλης. Επομένως, η αντίδραση:



είναι μια από τις αρχικές αντιδράσεις που συμβάλλουν στην αλυσίδα των αντιδράσεων σχηματισμού της φωτοχημικής καπνομίχλης. Στη συνέχεια, τα άτομα οξυγόνου αντιδρούν με το O_2 και δίνουν όζον:



Το σχηματιζόμενο όζον αντιδρά με NO και έτσι σχηματίζεται πάλι το NO_2 :



Ο κύκλος των αντιδράσεων αυτών ονομάζεται φωτοχημικός κύκλος των οξειδίων του αζώτου. Μεγάλο ποσοστό των οξειδίων του αζώτου μεταφέρεται στο έδαφος διαμέσου των μηχανισμών της ξηρής και της υγρής απόθεσης με χρόνο παραμονής μερικές ημέρες. Στη συνέχεια, τα οξείδια του αζώτου απομακρύνονται από την ατμόσφαιρα είτε ως νιτρικό οξύ και νιτρικά άλατα που υπόκεινται σε υγρή ή ξηρή εναπόθεση είτε με χημικές αντιδράσεις που οδηγούν στους δευτερογενείς ρύπους.

Με την καύση των ορυκτών καυσίμων στα αυτοκίνητα, σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και σε κεντρικές θερμάνσεις έχουμε την παραγωγή του NO. Οι καύσεις των ορυκτών καυσίμων συμβάλλουν από 50% στις ανθρωπογενείς πηγές εκπομπής του NO.

Τα οξείδια του αζώτου αποτελούν τοξικές ενώσεις με δυσμενείς επιπτώσεις στα ζώα, στους ανθρώπους και στα φυτά. Το NO δημιουργεί παράλυση και σπασμούς του νευρικού συστήματος, το NO_2 είναι ερεθιστικό για τα μάτια και τους πνεύμονες δημιουργώντας ερεθισμούς και πνευμονικό οίδημα. Σε συγκέντρωση που υπερβαίνει τα 150 ppm προκαλεί θάνατο. Επίσης, το NO και το NO_2 προκαλούν στον περίγυρο των φύλλων νέκρωση και ελαττώνουν την ανάπτυξη των φυτών, επιπλέον, το NO_2 συμβάλλει στη δημιουργία του φαινομένου της όξινης βροχής, επηρεάζοντας με αυτό το τρόπο αρνητικά τη βλάστηση (Κούγκολος, 2018).

2.8.4 Όζον (O_3)

Το όζον (O_3) είναι ένα αέριο άχρωμο με χαρακτηριστική οσμή και το συναντάμε σε όλα τα γνωστά προβλήματα ρύπανσης από την αστική μέχρι και την παγκόσμια, όπως είναι η φωτοχημική ρύπανση, η αύξηση του τροποσφαιρικού όζοντος, η μείωση του στρατοσφαιρικού όζοντος, η τρύπα του όζοντος, καθώς και η ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου.

Το όζον παράγεται στην στρατόσφαιρα που βρίσκεται σε ύψος 15-50 km από την επιφάνεια της γης όπου σε αυτήν υπάρχει περίπου το 90% όλου του όζοντος στην ατμόσφαιρα της γης και μας προστατεύει από τη βλαβερή υπέρυθη ακτινοβολία του ηλίου γιατί δρα ως φίλτρο στο υπεριώδες. Οι περισσότερες ωστόσο ανθρωπογενείς ουσίες που συμβάλλουν στην καταστροφή του όζοντος είναι κυρίως τα ισχυρά αέρια του θερμοκηπίου, με δυνατότητα θέρμανσης του πλανήτη 14.000 μεγαλύτερη του διοξειδίου του άνθρακα CO_2 . Ακόμα η παγκόσμια κατάργηση των υδροχλωροφθορανθράκων (HCFC) και των χλωροφθορανθράκων (CFC) που είναι αέρια τα οποία καταστρέφουν το όζον οδήγησε σε αύξηση της χρήσης άλλων τύπων αερίων που είναι τα φθοριούχα αέρια, παρόλο που δεν καταστρέφουν τη στιβάδα του όζοντος, επιδρούν σημαντικά στην υπερθέρμανση του

πλανήτη (ec.europa.eu/clima/policies/ozone_en). Το υπόλοιπο 10% του όζοντος βρίσκεται στο χαμηλότερο στρώμα της ατμόσφαιρας, την τροπόσφαιρα (0-15 km) και έχει να κάνει με επεισόδια φωτοχημικού νέφους στα αστικά κέντρα καθώς και γύρω από αυτά, όπου μπορεί με αυτό το τρόπο να δημιουργήσει πολλά προβλήματα στη φύση και στον άνθρωπο όταν ξεπεραστούν κάποιες οριακές τιμές. Το όζον της τροπόσφαιρας είναι ένας δευτερογενής ρύπος που παράγεται σε συνδυασμό με διάφορες χημικές αντιδράσεις μεταξύ του οξυγόνου, των πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs) και των οξειδίων του αζώτου (NOx) υπό συνθήκες έντονης ηλιακής ακτινοβολίας και υψηλών θερμοκρασιών. Οι πηγές εκπομπής που συντελούν στη δημιουργία του όζοντος είναι τα οχήματα, τα εργοστάσια, οι χωματερές τα χημικά διαλυτικά και τα βενζινάδικα. Επίσης, το όζον είναι ένα ισχυρό οξειδωτικό μέσο για το σχηματισμό της όξινης βροχής γιατί οξειδώνει το SO₂ σε H₂SO₄.

Οι επιπτώσεις που δημιουργεί το όζον, όταν υπάρχει σε μεγάλες συγκεντρώσεις, είναι ερεθισμός της αναπνευστικής οδού, διαταραχή της αναπνευστικής λειτουργίας, αίσθημα ξηρότητας στο λαιμό, φλεγμονή στους πνεύμονες και πιθανή επιδεικτικότητα σε μολύνσεις του αναπνευστικού και ερεθισμό των οφθαλμών. Επίσης, προκαλεί στα φυτά δυσμενείς επιδράσεις, μειώνει την παραγωγή στις αγροτικές καλλιέργειες και προκαλεί ζημιά στη δασική βλάστηση (ΥΠΕΚΑ, 2017).

2.8.5 Αιωρούμενα σωματίδια

Με την έννοια αιωρούμενα σωματίδια εννοούμε κάθε σώμα στερεό ή υγρό που βρίσκεται σε διασπορά με διάμετρο μεγαλύτερη από 0.002 μm και μικρότερη από 500 μm, είναι ρύποι με μεγάλη ποικιλία συστατικών με τη χημική τους σύσταση να ποικίλλει και να εξαρτάται από τη προέλευσή τους. Οι κυριότερες πηγές προέλευσης των αιωρούμενων σωματιδίων χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις φυσικές και τις ανθρωπογενείς. Οι φυσικές πηγές περιλαμβάνουν την ηφαιστειακή δραστηριότητα, τη θαλάσσια σκόνη και το απογυμνωμένο έδαφος, ενώ οι ανθρωπογενείς πηγές έχουν να κάνουν κυρίως με βιομηχανικές δραστηριότητες, παραγωγή τσιμέντου, γύψου, πυρκαγιές, αγροτικές δραστηριότητες, καθώς επίσης και με τη χρήση των πετρελαιοκίνητων οχημάτων, ωστόσο μικρότερα σε μέγεθος σωματίδια δημιουργούνται στην ατμόσφαιρα από τις αντιδράσεις μεταξύ των αέριων ρύπων οι οποίες επιταχύνονται σε μεγάλες θερμοκρασίες με την παρουσία της ηλιακής ακτινοβολίας.

Οι επιδράσεις που δημιουργούνται στην υγεία έχουν σχέση με το μέγεθος των σωματιδίων και τη σύστασή τους. Τα σωματίδια που είναι μικρά σε μέγεθος με διάμετρο μικρότερη των 10 μm εισχωρούν βαθιά μέσα στο αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου επηρεάζοντας την αναπνοή και προκαλώντας διάφορες ασθένειες στο αναπνευστικό σύστημα, ενώ όταν η διάμετρός τους είναι μεγαλύτερη των 10 μm τότε αυτά δεν εισέρχονται στο αναπνευστικό σύστημα. Επίσης, επηρεάζουν τις ηλεκτρικές ιδιότητες της ατμόσφαιρας συνεισφέροντας στη δημιουργία των νεφών ως πυρήνες συμπύκνωσης και επιδρούν στο κλίμα μεταβάλλοντας το ισοζύγιο ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα (ΥΠΕΚΑ, 2017).

2.8.6 Βενζόλιο (C₆H₆)

Το βενζόλιο είναι μια χημική ένωση σε υγρή μορφή που αποτελείται από άνθρακα και υδρογόνο με χαρακτηριστική οσμή, απαντάται σε μορφή ατμών λόγω του ότι το σημείο ζέσεως του είναι χαμηλό και ανήκει στην κατηγορία των Πτητικών Οργανικών Ενώσεων. Είναι ένα αέριο τοξικό και καρκινογόνου όπου για αυτούς τους λόγους η οριακή του τιμή στην ατμόσφαιρα είναι πολύ χαμηλή στα 5 μg/m³.

Το βενζόλιο παράγεται μέσω της χημικής και πετροχημικής βιομηχανίας και χρησιμοποιείται σε διάφορες εφαρμογές ως διαλύτης, όπως είναι η παραγωγή χρωμάτων, πλαστικών, και βερνικιών. Η εκπομπή του στην ατμόσφαιρα γίνεται κυρίως μέσω των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων όπως είναι τα βενζινοκίνητα οχήματα που είναι και η κύρια πηγή, ενώ άλλες πηγές είναι η βιομηχανία, τα διυλιστήρια η διακίνηση των καυσίμων και η οικιακή θέρμανση.

Το βενζόλιο προκαλεί εκδήλωση καρκίνων του αίματος λίγα χρόνια μετά την έκθεσή του σε αυτό και για αυτόν τον λόγο έχει χαρακτηριστεί και ως καρκινογόνος ένωση (ΥΠΕΚΑ, 2017).

2.8.7 Πτητικές Οργανικές Ενώσεις

Οι Πτητικές Οργανικές Ενώσεις (ΠΟΕ) είναι οργανικές ενώσεις που είναι σε αέρια φάση υπό τις συνήθεις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Περιλαμβάνουν ωστόσο περισσότερες από 100 ενώσεις, όλες τις ενώσεις που περιέχουν άνθρακα, με εξαίρεση το μονοξείδιο και το διοξείδιο του άνθρακα, ενώ εξαιρείται το μεθάνιο πολλές φορές. Οι ενώσεις αυτές περιέχουν τάξεις πολλών οργανικών ενώσεων όπως είναι οι κεκορεσμένοι, οι ακόρεστοι αρωματικοί και ελαφρείς πολυαρωματικοί υδρογονάνθρακες, καθώς και οι οξυγονούχες και αλογονούχες ενώσεις.

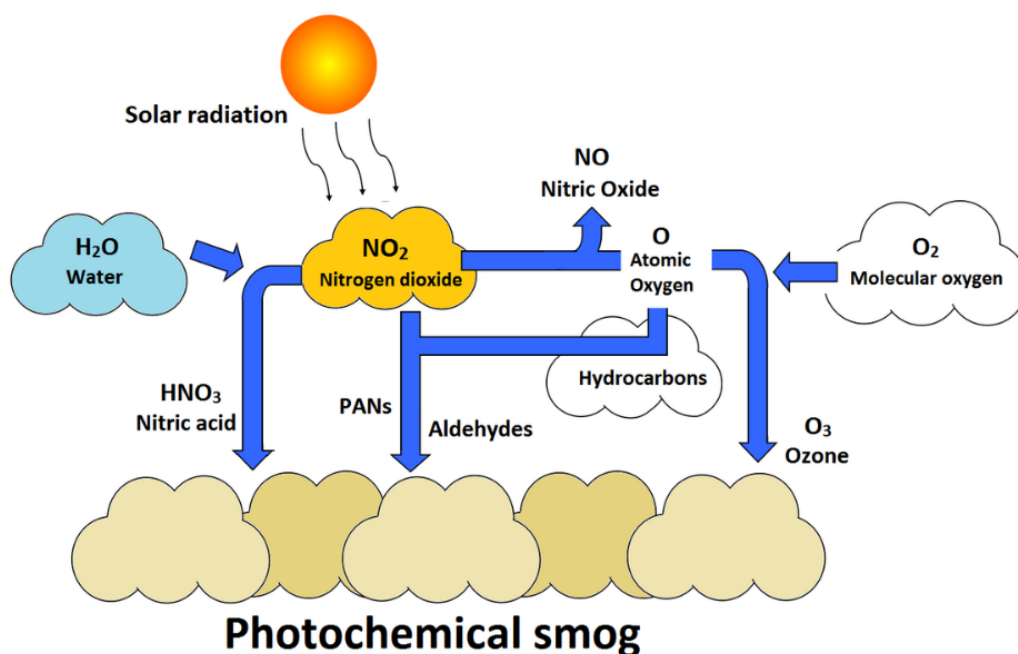
Οι πηγές εκπομπής των Πτητικών Οργανικών Ενώσεων έχουν να κάνουν τόσο με ανθρωπογενείς πηγές όσο και με φυσικές. Οι σημαντικότερες ανθρωπογενείς εκπομπές των Πτητικών Οργανικών Ενώσεων είναι η πετροχημική βιομηχανία, τα διυλιστήρια, καθώς και η χρήση και η καύση των ορυκτών καυσίμων, είτε από τις διάφορες βιομηχανικές εγκαταστάσεις και θερμάνσεις, είτε από τα τροχοφόρα στα οποία γίνεται και ατελής καύση των καυσίμων. Σημαντική, επίσης, πηγή είναι και η χρήση των διαλυτών για την παραγωγή διάφορων βιομηχανικών ειδών. Οι φυσικές πηγές εκπομπής των Πτητικών Οργανικών Ενώσεων προκύπτουν από τις δασικές πυρκαγιές, καθώς και από διάφορες αναερόβιες διεργασίες.

Οι Πτητικές Οργανικές Ενώσεις με κύριο εκπρόσωπο το βενζόλιο, έχουν πολύ σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία, ενώ άλλες Πτητικές Οργανικές Ενώσεις έχουν μεγάλη τοξικότητα και προκαλούν καρκίνο. Σημαντικές επιπτώσεις των ΠΟΕ στο περιβάλλον είναι η συνεισφορά τους στην παραγωγή του φωτοχημικού όζοντος στην τροπόσφαιρα και στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Ακόμα, οι χημικές ενώσεις των ΠΟΕ που είναι αδρανείς μπορούν να έχουν στην ατμόσφαιρα μεγάλους χρόνους παραμονής, και επομένως, να φτάσουν στην στρατόσφαιρα στην οποία επειδή είναι διαθέσιμες ακτινοβολίες μεγαλύτερης ενέργειας να συμβάλλουν τελικά στην καταστροφή του όζοντος της στρατόσφαιρας (Ρεμουντάκη, 2010).

2.9 Το Φωτοχημικό νέφος και οι επιπτώσεις του

2.9.1 Φωτοχημικό νέφος (φωτοχημική αιθαλομίχλη)

Φωτοχημικό νέφος ή φωτοχημική αιθαλομίχλη είναι ένα φαινόμενο που χαρακτηρίζεται από μεγάλες συγκεντρώσεις δευτερογενών ρύπων οι οποίοι παράγονται μέσω των πρωτογενών ρύπων που είναι το μονοξείδιο και το διοξείδιο του αζώτου (NO και NO_2), οι υδρογονάνθρακες και το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) διαμέσου των φωτοχημικών διεργασιών. Οι δευτερογενείς ρύποι που προκύπτουν μέσω αυτής της διαδικασίας είναι το όζον (O_3), το διοξείδιο του αζώτου (NO_2), το PAN (νιτρικό υπεροξυακετύλιο) και το HNO_3 που αποτελούν φωτοχημικούς ρύπους (Κούγκολος, 2018). Επομένως με βάση τα παραπάνω που αναφέρθηκαν το μεγαλύτερο μέρος μέσω συνεισφοράς δημιουργίας της φωτοχημικής αιθαλομίχλης είναι τα αυτοκίνητα, ενώ οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας με τη καύση του άνθρακα, παράγουν τους απαραίτητους ρύπους που βοηθάνε στη δημιουργία του συγκεκριμένου νέφους. Επειδή το φωτοχημικό νέφος παρουσιάζει μεγάλη αφθονία σε περιοχές με υψηλότερες θερμοκρασίες, είναι πιο συχνή η εμφάνιση του κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Σχηματίζεται τις πρωινές ώρες, όταν ένα μεγάλο ποσοστό του αστικού πληθυσμού κάνει χρήση των μέσων κινητής τροχιάς, με αποτέλεσμα στους κινητήρες των αυτοκινήτων να παράγονται τα οξείδια του αζώτου NO_x που μπορούν να συνδυαστούν με νερό προκειμένου να δημιουργηθεί νιτρικό οξύ HNO_3 ή να αντιδράσουν με το ηλιακό φως για να παράγουν άτομα οξυγόνου, που στη συνέχεια συνδυάζονται με μοριακό οξυγόνο για την παραγωγή του όζοντος (energyeducation/Photochemical_smog). Στην αντίθετη, όμως, περίπτωση καθώς η θερμοκρασία μειώνεται τότε οι χημικές αντιδράσεις επιβραδύνονται και το φωτοχημικό νέφος δημιουργείται σπάνια. Με βάση τον παρακάτω πίνακα το 90% του όζοντος βρίσκεται στη στρατόσφαιρα, ενώ το υπόλοιπο 10% είναι στην τροπόσφαιρα (Ζάνης, 2014).



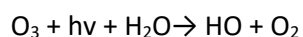
Σχήμα 2.9.1.1. Φωτοχημικός σχηματισμός του νέφους (energyeducation/Photochemical_smog).

2.9.2 Φωτοχημικές αντιδράσεις στην ατμόσφαιρα

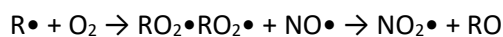
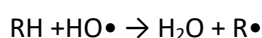
Οι φωτοχημικές αντιδράσεις έχουν σαν αποτέλεσμα την απορρόφηση της ενέργειας από ορισμένες ουσίες μεταβάλλοντας έτσι την ενεργειακή τους κατάσταση, και έτσι δημιουργείται η ηλεκτρονική υπερδιέγερση που οδηγεί στην δημιουργία δραστικών ουσιών όπως είναι τα ιόντα και οι ελεύθερες ρίζες τα οποία είναι ικανά για αλυσωτές αντιδράσεις, καθώς και για δευτερογενείς ρύπους. Οι φωτοχημικές αντιδράσεις είναι κυρίως προϊόν δημιουργίας της ηλιακής υπεριώδους ακτινοβολίας (UV), των δραστικών πτητικών υδρογονανθράκων όπως οι αλδεΐδες, του μονοξειδίου του άνθρακα (CO), και των οξειδίων του αζώτου (NOx). Από τις αντιδράσεις που προκύπτουν διαμέσου του παραπάνω μίγματος έχουμε την παραγωγή των κυριότερων δραστικών ρύπων που είναι το όζον (O₃), το υπεροξείδιο του υδρογόνου (H₂O₂), το νιτρικό υπεροξυλοακετίλιο (CH₃C(O)OONO₂, PAN), και τα υπεροξείδια του αζώτου των μηχανισμών ελευθέρων ριζών.

Η παραγωγή του όζοντος γίνεται φωτοχημικά μέσω οξείδωσης του μονοξειδίου του άνθρακα (CO), και Πτητικών Οργανικών Ενώσεων (ΠΟΕ) με οξείδια του αζώτου (NOx). Οι αντιδράσεις είναι:

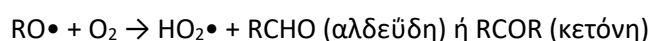
α) Παραγωγή ρίζας υδροξυλίου μέσω του όζοντος O₃



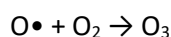
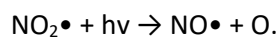
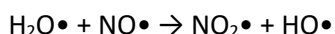
β) Αλκάνια και ρίζα υδροξυλίου



γ) Σχηματισμός καρβονυλικών ενώσεων



η υδρο-υπεροξυλο- ρίζα με NO μετατρέπεται σε όζον



Οι καρβονυλικές ενώσεις που παράγονται από τα στάδια των μηχανισμών φωτοκαταλύονται μέσω της παραγωγής πρόσθετων υπεροξυλο- ελευθέρων ριζών και μετατρέπονται τελικά σε όζον. Το σημαντικότερο στάδιο που παίζει πολύ μεγάλο ρόλο στην παραγωγή του όζοντος είναι η σχετική ταχύτητα διάσπασης των πτητικών οργανικών ενώσεων (ΠΟΕ). Επομένως, ο ρόλος των VOCs στην τροπόσφαιρα είναι ο βασικός παράγοντας για τα στάδια των φωτοοξειδωτικών αλυσωτών αντιδράσεων (Βαλαβανίδης, 2008).

2.9.3 Επιπτώσεις

Το όζον που είναι και ο μεγαλύτερος φωτοχημικός ρύπος που βρίσκεται σε μεγάλη αφθονία κατά την εκδήλωση του φαινομένου της φωτοχημικής ρύπανσης είναι ισχυρό οξειδωτικό που εμφανίζει μεγάλες επιπτώσεις στα φυτικά είδη και στις καλλιέργειες, προσβάλλοντας τους ιστούς και προκαλώντας γρήγορη γήρανση και μειωμένη αντοχή των φυτικών ειδών, συμβάλλοντας έτσι και στην ολοσχερή καταστροφή τους.

Τα οξειδία του αζώτου και άλλοι φωτοχημικοί ρύποι έχουν σημαντικές επιπτώσεις στους φυτικούς οργανισμούς και στις αγροτικές καλλιέργειες σε περιοχές που είναι κοντά στα μεγάλα αστικά κέντρα. Έτσι, όταν το πράσινο μέρος των φυτών είναι εκτεθειμένο σε ατμόσφαιρα που περιέχει μεγάλες συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα, τότε έχουμε τη δημιουργία στίγματος στα φύλλα καθώς και τη γήρανση των φυτικών ιστών. Επίσης, τα ΝΟx προκαλούν γρηγορότερη φθορά και γήρανση στα υλικά του δομημένου περιβάλλοντος όπως διάβρωση στις μεταλλικές επιφάνειες και τέλος συνεισφέρουν στη δημιουργία του φαινομένου της όξινης βροχής επειδή μετατρέπονται σε νιτρικά αερολύματα και το νιτρικό οξύ αποχωρίζεται από την ατμόσφαιρα μέσω των κατακρημνίσεων (Ρεμουντάκη, 2010).

2.10 Όξινη βροχή

Ως όξινη βροχή ονομάζουμε το φαινόμενο κατά το οποίο ποσότητες νιτρικού και θειικού οξέος πέφτουν στο έδαφος σε υγρή μορφή με μέσο μεταφοράς τη βροχή, την ομίχλη, το χιόνι και το χαλάζι, δημιουργώντας έτσι καταστροφές στη χλωρίδα και την πανίδα και καταστρέφοντας κτίρια και μνημεία.

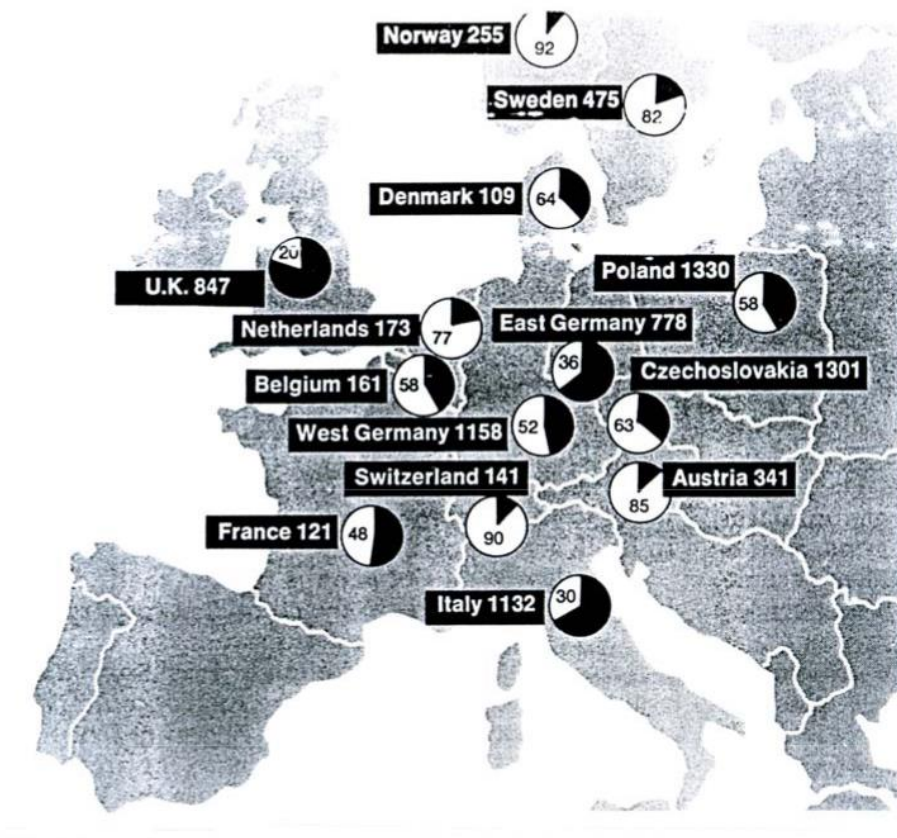
Η κλίμακα του pH είναι ένα μέγεθος μέσω της οποίας καταλαβαίνουμε αν ένα διάλυμα είναι ουδέτερο (pH=7), όξινο (pH μικρότερο του 7), ή αλκαλικό με pH μεγαλύτερο του 7. Το νερό της βροχής έχει δείκτη pH από 6.5 έως 5.6 και είναι ελαφρώς όξινο λόγω της διάλυσης σε αυτό του διοξειδίου του άνθρακα που υπάρχει στην ατμόσφαιρα. Από την αρχή, όμως, της βιομηχανικής επανάστασης έχουμε μείωση στις τιμές του pH της βροχής, ενώ οι τιμές του pH της όξινης βροχής κυμαίνονται μεταξύ 4.6 και 4.

φτάνουν σε αυτό σε μεγάλες ποσότητες καταστρέφουν τους ωφέλιμους μικροοργανισμούς, διαλύουν μεγάλες ποσότητες θρεπτικών αλάτων που καθώς απομακρύνονται από το νερό της βροχής απελευθερώνουν βαρέα μέταλλα του αργιλίου και του μαγγανίου που είναι τοξικά για τα φυτά. Όλο αυτό έχει σαν συνέπεια την εξασθένηση των δέντρων που τελικά πεθαίνουν γιατί γίνονται ευάλωτα σε βακτήρια και ασθένειες (Ζάνης, 2014).



Εικόνα 2.10.1 Η όξινη βροχή στις χώρες της Δυτικής Ευρώπης και οι καταστροφές των δασών (Βαλαβανίδης 2008).

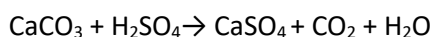
Σε διεθνή κλίμακα υπολογίζεται ότι εναποτίθεται $85 - 99 \times 10^6$ τόνοι αζώτου, από τους οποίους το $1/3$ προέρχεται από φυσικές διεργασίες. Οι διασυννοριακές ωστόσο ρυπάνσεις από όξινη βροχή στην Ευρώπη έχουν συμβάλει στη δημιουργία ενός πολύ σημαντικού περιβαλλοντικού προβλήματος σε αρκετές χώρες. Εδάφη τα οποία είναι πάνω από γρανιτικά υποστρώματα έχουν μικρή ικανότητα εξουδετέρωσης των όξινων εναποθέσεων, σε αντίθεση με τα εδάφη τα οποία είναι πλούσια σε βασικά κατιόντα όπως, ασβεστίου, μαγνησίου, καλίου και νατρίου. Τα πλούσια σε οξύτητα εδάφη εντοπίζονται στις Σκανδιναβικές κυρίως χώρες και ιδιαίτερα στη Σουηδία (Βαλαβανίδης, 2008).



Εικόνα 2.10.2 Ευρωπαϊκές χώρες και όξινη βροχή και συνεισφορά της κάθε χώρας στη διασυννοριακή ρύπανση (Βαλαβανίδης, 2008).

Η όξινη βροχή έχει καταστρεπτικές επιδράσεις στα επιφανειακά νερά, όπως είναι οι λίμνες και τα μικρά ποτάμια εφόσον η αυξημένη συγκέντρωση των οξέων καταστρέφει την υδάτινη χλωρίδα, το πλαγκτόν και τα αβγά των αμφιβίων και των ψαριών, με τις μεγαλύτερες ποσότητες να υπερτερούν κατά την άνοιξη με την τήξη των πάγων.

Σημαντικές βλάβες που προκαλεί η όξινη βροχή είναι η καταστροφή των μνημείων, των αγαλμάτων και των κτηρίων που είναι κατασκευασμένα από ανθρακικό ασβέστιο (CaCO₃) όπως ο ασβεστόλιθος και το μάρμαρο. Το θειικό οξύ που υπάρχει στην όξινη βροχή ενώνεται με το ασβέστιο και δίνει γύψο (CaSO₄), όπου με βάση την παρακάτω αντίδραση είναι:



Επομένως, έχουμε τη μετατροπή του ανθρακικού ασβεστίου σε γύψο από το νερό της βροχής που στη συνέχεια φουσκώνει και σκάει έχοντας σαν τελικό αποτέλεσμα τη διάβρωση του υλικού.

Για την αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού, είναι αναγκαίος ο περιορισμός του διοξειδίου του θείου και των οξειδίων του αζώτου. Σημαντικά, ωστόσο, μέτρα αποτελούν η αποθείωση των καυσίμων των εργοστασίων αλλά και η εφαρμογή του καταλύτη ως καυσαέριο στο αυτοκίνητο (Ζάνης, 2014).

2.11 Η μείωση του στρατοσφαιρικού όζοντος

2.11.1 Η στιβάδα του όζοντος

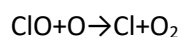
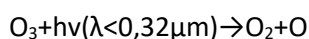
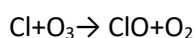
Το στρώμα του όζοντος είναι μια περιοχή που βρίσκεται 20 με 30 χιλιόμετρα πάνω από την επιφάνεια της γης, και περιέχει μεγάλη συγκέντρωση όζοντος στην στρατόσφαιρα. Η στιβάδα του όζοντος λειτουργεί ως προστατευτική ασπίδα που μας προστατεύει από την επιβλαβή υπεριώδη ακτινοβολία (UV) από τον ήλιο. Συγκεκριμένα, η στιβάδα του όζοντος μας προστατεύει από την υπεριώδη ακτινοβολία UV-B, η οποία προκαλεί ηλιακό έγκαυμα, ωστόσο όταν υπάρχει μακροχρόνια έκθεση σε αυτήν την ακτινοβολία τότε δημιουργείται μεγάλη βλάβη στα περισσότερα ζώα και φυτά. Το όζον απορροφά την ακτινοβολία UV-B από τον ήλιο, όπου στη συνέχεια χωρίζεται σε ένα μόριο οξυγόνου (O₂) και ένα ξεχωριστό ατομικό οξυγόνο (O), έπειτα αυτά τα δύο συστατικά μπορούν να σχηματίσουν το O₃. Επομένως, με την απορρόφηση της UV-B ακτινοβολίας στη στρατόσφαιρα, η στιβάδα του O₃ εμποδίζει τα βλαβερά επίπεδα να φτάσουν στην επιφάνεια της γης (ozone.unep.org).

2.11.2 Η τρύπα του όζοντος

Τις τελευταίες δεκαετίες έχει δημιουργηθεί ιδιαίτερο ενδιαφέρον και ανησυχία όσο αφορά την καταστρεπτική δράση επί του στρατοσφαιρικού όζοντος από χημικές ενώσεις ανθρωπογενούς κυρίως προέλευσης. Οι ενώσεις αυτές που είναι αδρανείς στην τροπόσφαιρα, μπορεί να φτάσουν στην στρατόσφαιρα από όπου διασπώνται υπό την επίδραση της UV-C και UV-B υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας, με τα προϊόντα τα οποία απελευθερώνονται να αντιδρούν με το O₃ και να προκαλούν ελάττωση των συγκεντρώσεων του. Η μείωση αυτή είναι πιθανό να έχει βλαπτικές συνέπειες για τη βιόσφαιρα της γης.

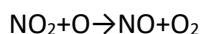
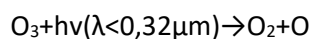
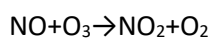
Τα άτομα χλωρίου Cl είναι ένα από τα αέρια τα οποία συμμετέχουν στη διάσπαση του O₃, που απελευθερώνονται από μόρια χλωροφθορανθράκων, τα οποία υπό την επίδραση της υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας με μήκη κύματος 0,19 και 0,21 μm, διασπώνται φωτολυτικά στην στρατόσφαιρα. Οι κύριοι χλωροφθοράνθρακες που συμμετέχουν σε αυτή τη διεργασία είναι το CFC₁₂, που χρησιμοποιείται σαν προωθητικό στα φιαλίδια ψεκασμού, και το CF₂Cl₃, που χρησιμοποιείται σαν ψυκτικό, ωστόσο και οι δύο αυτές ουσίες είναι χημικά αδρανείς, με πολύ μεγάλο χρόνο ζωής και μέσω των βιομηχανικών χρήσεων απελευθερώνονται. Επομένως, κάποιες ποσότητες χλωροφθορανθράκων που αναφέραμε παραπάνω μπορούν μέσω των ανοδικών ρευμάτων και της αέριας μίξης να μεταφερθούν στην στρατόσφαιρα σταδιακά, όπου διασπώνται μέσω της δράσης της ενεργητικής υπεριώδους ακτινοβολίας, ελευθερώνοντας άτομα χλωρίου Cl.

Οι κύκλοι των αντιδράσεων μέσω των οποίων το χλώριο το οποίο εκλύεται στην στρατόσφαιρα μέσω της φωτόλυσης των χλωροφθορανθράκων, όπου διασπά και καταστρέφει το O₃ είναι οι εξής



Το τελικό αποτέλεσμα που προκύπτει από τις παραπάνω αντιδράσεις είναι η καταστροφή δύο μορίων του όζοντος και η παραγωγή τριών μορίων οξυγόνου $2O_3+h\nu\rightarrow 3O_2$, ενώ το Cl αναπαράγεται και παραμένει χημικά ενεργό εισερχόμενο σε έναν δεύτερο κύκλο αντιδράσεων.

Ένα άλλο μόριο το οποίο συμβάλλει στην καταστροφή του όζοντος είναι το μονοξείδιο του αζώτου NO, όπου σχηματίζεται στη στρατόσφαιρα μέσω της διάσπασης του υποξειδίου του αζώτου N_2O , που αντιδρά με το ατομικό οξυγόνο προκειμένου να δώσει το μονοξείδιο του αζώτου $N_2O+O\rightarrow NO$. Το N_2O σχηματίζεται στο έδαφος από βακτήρια που ενεργούν σε αζωτούχα λιπάσματα, και επειδή είναι χημικά αδρανές μπορεί να μεταφερθεί μέρος αυτού σταδιακά στην στρατόσφαιρα. Το NO εκλύεται από τις εξατμίσεις των υπερηχητικών αεροπλάνων που πετούν κοντά στην τροπόπαυση. Ο κύκλος των αντιδράσεων από τους οποίους το O_3 καταστρέφεται από το NO, είναι ανάλογος με αυτόν του Cl και έτσι έχουμε



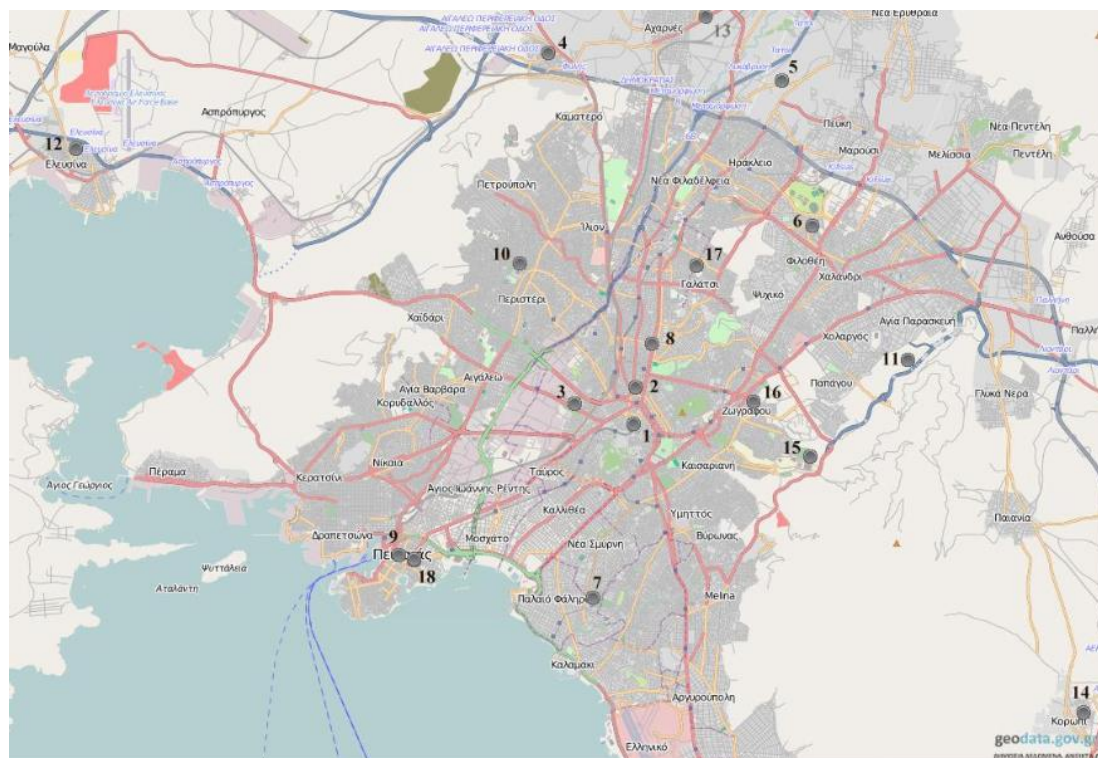
Άρα το αποτέλεσμα αυτών των αντιδράσεων είναι όπως και προηγουμένως με το Cl με την παραγωγή τριών μορίων οξυγόνου, δηλαδή $2O_3+h\nu\rightarrow 3O_2$, με το NO να συνεχίζει να αναπαράγεται και να συμμετέχει στην καταστροφή του O_3 (Χαλδούπης, 2015).

Μια άλλη σημαντική παράμετρος, η οποία δείχνει πόσο μια ουσία συμμετέχει στην καταστροφή του στρατοσφαιρικού όζοντος, είναι το δυναμικό ελάττωσης του όζοντος (ODP), που είναι ο λόγος της επίδρασης μια χημικής ουσίας στο όζον ως προς την επίδραση που έχει μια ίση σε βάρος ποσότητα τριχλωροφθορομεθανίου (CFC). Οι φθοράνθρακες που περιέχουν βρώμιο έχουν πολύ υψηλό δυναμικό ODP που φτάνει μέχρι και 10, ενώ οι υδρογονοχλωροφθοράνθρακες (HCFCs) έχουν ODP μεταξύ 0.01 και 0.1 (Κούγκολος, 2018).

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος σχετικά με τη μείωση του στρατοσφαιρικού όζοντος έχουμε οδηγηθεί στην απαγόρευση της χρήσης των χλωροφθορανθράκων με βάση τη σύναψη διεθνών συνθηκών. Ωστόσο, παρά τα μέτρα αυτά για τη βελτίωση του προβλήματος η απελευθέρωση των καταστρεπτικών ουσιών για το όζον O_3 συνεχίζεται παγκόσμια, όπως για παράδειγμα, με την συνεχή αύξηση της χρήσης των αζωτούχων λιπασμάτων, η οποία οδηγεί σε συνεχή απελευθέρωση των NOx από το έδαφος. Τέλος, το πρόβλημα της καταστροφής του όζοντος δεν είναι εύκολη λύση και απαιτεί τη διεθνή επιστημονική και κρατική επαγρύπνηση καθώς και ευαισθητοποίηση του κόσμου (Χαλδούπης, 2015).

3 Δεδομένα - Μεθοδολογία

Τα δεδομένα τα οποία αναλύονται και μελετώνται στην προκειμένη εργασία προέρχονται από τις μετρήσεις του ΕΔΠΑΡ, δηλαδή του Εθνικού Δικτύου Μέτρησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης στην Αττική. Υπό τη διεύθυνση του Τμήματος Ποιότητας της Ατμόσφαιρας που την ευθύνη λειτουργίας του έχει το ΥΠΕΝ, λειτουργούν δεκατέσσερις σταθμοί μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην περιοχή της Αττικής, καθώς και ένας σταθμός στην Αλιάρτο Βοιωτίας όπως παρουσιάζεται και στον παρακάτω χάρτη.



Σχήμα 3.1: Χάρτης σταθμών μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης του ΕΔΠΑΡ στην Αττική. www.geodata.gov.gr

Όνομα	Σταθμός					Χαρακτηρισμός	Μετρούμενοι ρύποι						
	WGS84		ΕΓΣΑ87		Υψόμετρο (m -asl)		SO ₂	NOx	CO	O ₃	ΑΕ ₁₀	ΑΕ _{2,5}	C ₆ H ₆
	Γεωγρ. Μήκος	Γεωγρ. Πλάτος	X (m)	Y(m)									
Αθήνας [1]	23° 43' 30",56	37° 58' 32",19	475861,4	4203144,21	75	Αστικός-Κυκλοφορίας	v	v	v	v			
Αριστοτέλους [2]	23° 43' 33",34	37° 59' 07",67	475932,35	4204237,61	75	Αστικός-Κυκλοφορίας	v	v			v	v	
Γεωπονική [3]	23° 42' 12",44	37° 58' 53",42	473957,7	4203804,36	40	Περιστατικός-Βιομηχανικός		v	v	v			
Λιόσια [4]	23° 41' 45",93	38° 04' 26",92	473344,48	4214085,13	165	Περιστατικός-Υποβάθρου		v		v	v		
Λυκόβρυση* [5]	23° 47' 14",24	38° 03' 54",72	481341,08	4213070,48	234	Περιστατικός-Υποβάθρου		v		v	v	v	
Μαρούσι [6]	23° 47' 08",41	38° 01' 41",68	481189,53	4208970,47	170	Αστικός-Κυκλοφορίας		v	v	v	v		
Νέα Σμύρνη [7]	23° 42' 40",77	37° 55' 45",83	474630,7	4198020,95	50	Αστικός-Υποβάθρου		v	v	v	v		v
Πατησίων [8]	23° 43' 52",87	37° 59' 49",17	476412,51	4205515,17	105	Αστικός-Κυκλοφορίας	v	v	v	v			v
Πειραιάς I** [9]	23° 38' 36",75	37° 56' 31",40	468679,3	4199445,93	4	Αστικός-Κυκλοφορίας	v	v	v	v	v	v	v
Περιστερί [10]	23° 41' 12",01	38° 01' 05",56	472497,21	4207882,04	80	Αστικός-Υποβάθρου		v		v	v		
Αγ. Παρασκευή [11]	23° 49' 03",82	37° 59' 33",05	483995,32	4205000,11	290	Περιστατικός-Υποβάθρου		v		v	v	v	
Ελευσίνα [12]	23° 32' 12",27	38° 02' 55",39	459353,92	4211321,8	20	Περιστατικός-Βιομηχανικός	v	v		v	v	v	v
Θρακομα-κεδόνες [13]	23° 45' 23",37	38° 08' 27",34	478661,66	4221479,46	550	Περιστατικός-Υποβάθρου		v		v	v	v	
Κορωπί [14]	23° 52' 38",40	37° 53' 55",36	489215,4	4194584,06	140	Περιστατικός-Υποβάθρου	v	v		v	v		
Οινόφυτα	23° 38' 14",22	38° 18' 12",85	468286,03	4239559,63	100	Περιστατικός-Βιομηχανικός	v	v		v	v		
Αλιάρτος	23° 06' 31",02	38° 22' 21",68	422136,04	4247542,97	110	Υποβάθρου	v	v		v	v		
Παλαιότεροι σταθμοί													
Ζωγράφου [15]	23° 47' 06",26	37° 58' 01",37	481121,43	4202180,74	245	Περιστατικός-Υποβάθρου		v		v	v		
Γουδή [16]	23° 45' 56",41	37° 58' 53",90	479421,17	4203803,65	155	Αστικός-Κυκλοφορίας		v			v	v	
Γαλάτσι [17]	23° 44' 49",08	38° 01' 11",60	477790,29	4208051,96	154	Περιστατικός-Υποβάθρου	v	v		v			
Πειραιάς II [18]	23° 39' 03",80	37° 56' 21",80	469338,25	4199147,56	25	Αστικός-Υποβάθρου	v	v		v			

Σχήμα 3.2: Χαρακτηριστικά σταθμών μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης του ΕΔΠΑΡ (ΥΠΕΚΑ, 2017).

Οι ρύποι που μελετήθηκαν από τους παραπάνω σταθμούς είναι οι φωτοχημικοί, δηλαδή τα οξειδία του αζώτου (NO, NO₂) και το όζον (O₃). Οι μέθοδοι οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση των φωτοχημικών ρύπων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 3.1. Η μέτρηση γίνεται σε συνεχή βάση καθ' όλη την διάρκεια του 24ώρου, με τον αναλυτή να δίνει την τιμή για κάθε ένα λεπτό.

Πίνακας 3.1: φωτοχημικοί ρύποι και μέθοδοι μέτρησης (ΥΠΕΚΑ, 2017).

Ρύπος	Μέθοδος μέτρησης
Μονοξειδίο του άνθρακα (CO)	Απορρόφηση στο υπέρυθρο (NDIR)
Οξειδία του αζώτου (NO, NO ₂)	Χημειοφωταύγεια
Όζον (O ₃)	Απορρόφηση στο υπεριώδες

Τα δεδομένα αρχικά λήφθηκαν σε μορφή συμπιεσμένου αρχείου από τη σελίδα του ΥΠΕΝ. Σε κάθε συμπιεσμένο αρχείο περιέχεται για ένα έτος το σύνολο των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκε από το Εθνικό Δίκτυο Παρακολούθησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης (ΕΔΠΑΡ) στους αντίστοιχους σταθμούς. Επομένως, οι φάκελοι περιλαμβάνουν τα δεδομένα κάθε έτους από κάθε σταθμό και συγκεκριμένα, τις ωριαίες συγκεντρώσεις των ρύπων για όλα τα έτη. Τα αρχεία αυτά των μετρήσεων είναι στη μορφή dat και έχουν τρία συνθετικά, με το πρώτο συνθετικό να είναι το όνομα του ρύπου, το δεύτερο το όνομα του σταθμού και το τρίτο είναι το έτος π.χ. NO#LYK1998.dat.

Στον παρακάτω πίνακα πραγματοποιήθηκε η καταγραφή των διαθέσιμων σταθμών ανά ρύπο και συγκεκριμένα καταγράφηκε πότε αρχίζουν τα δεδομένα και πότε τελειώνουν, καθώς και αν λείπουν ενδιάμεσα ολόκληροι μήνες ή και ολόκληρα χρόνια. Ωστόσο, οι σταθμοί οι οποίοι είναι αξιόπιστοι για τη μελέτη που γίνεται είναι οι GEO, MAR, LIO, PER,

ΑΤΗ, ΡΑΤ, ΛΥΚ, ΣΜΥ, ΑΡΙ, και ΡΙΡ διότι σε αυτούς περιλαμβάνεται αρκετά μεγάλο μέγεθος χρονοσειράς με τουλάχιστον είκοσι χρόνια.

Πίνακας 3.2: Σταθμοί μέτρησης φωτοχημικών ρύπων στην Αττική και χρονική διάρκεια διαθέσιμων μετρήσεων. Με χρώμα σημειώνονται οι σταθμοί που επελέγησαν για μελέτη στην παρούσα εργασία.

Σταθμός	NO	NO₂	O₃
Γεωπονική GEO	1987-2017	1985-2017	1987-2017
Μαρούσι MAR	1987-2017	1989-2017	1987-2017
Πειραιάς PIR	2014-2017	2014-2017	2014-2017
Πειραιάς II BIO	1987-2015	1985-2015	1987-2015
Λιοσίων LIO	1987-2017	1985-2017	1987-2017
Γουδί GOU	2000-2009	2000-2009	
Γαλάτσι GAL	2000-2015	2000-2005	2000-2005
Περιστερί PER	1990-2017	1990-2017	1990-2013
Αγία Παρασκευή AGP	2000-2017	2000-2017	2000-2017
Αθηνάς ATH	1988-2017	1988-2017	1990-2017
Πατησίων PAT	1987-2017	1984-2013	1987-2017
Λυκόβρυση LYK	1994-2017	1994-2017	1994-2017
Νέα Σμύρνη SMY	1987-2017	1985-2016	1987-2016
Θρακομακεδόνες THR	2000-2017	2000-2017	2000-2017
Αριστοτέλους ARI	1994-2017	1994-2017	
Ζωγράφου PAN	2000-2007	2000-2007	2000-2007

Έπειτα έγινε η προετοιμασία των αρχείων με NO, NO₂, και O₃ προκειμένου να γίνει η μελέτη της φωτοχημικής ρύπανσης, τα οποία είναι χωρισμένα ανά σταθμό με όλα τα χρόνια μαζί. Πραγματοποιήθηκε η κατασκευή ενός αρχείου μέσω της χρήσης του excel στο οποίο περιλαμβάνονται όλοι οι σταθμοί για κάθε ρύπο, καθώς και οι μηνιαίες και χρονικές τιμές συγκέντρωσης των ρύπων.

Στο επόμενο βήμα δημιουργήθηκε ένα αρχείο στο οποίο περιέχονται οι μηνιαίες τιμές ανά χρόνο, καθώς και οι μέσες μηνιαίες τιμές για όλα τα χρόνια μαζί, έπειτα ακολούθησε η διαδικασία κατασκευής των διαγραμμάτων για όλους τους ρύπους και τους σταθμούς με βάση τις μέσες μηνιαίες τιμές για όλα τα χρόνια μαζί.

Στη συνέχεια, υπολογίστηκε η μέση τιμή (average) των μηνιαίων τιμών ανά χρόνο.

3.1 Παλινδρόμηση και Τάση

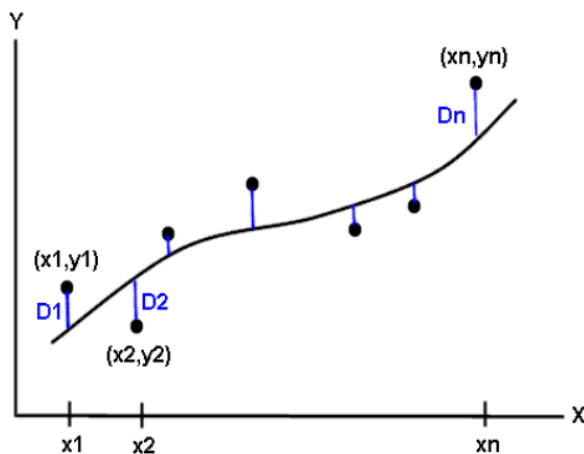
3.1.1 Παλινδρόμηση

Η Παλινδρομική Ανάλυση αποτελεί βασική στατιστική μέθοδο για την εύρεση συναρτησιακών σχέσεων μεταξύ τυχαίων μεταβλητών. Επομένως, όταν δύο μεταβλητές X, Y συνδέονται μέσω της συναρτησιακής σχέσης $Y = F(X)$, τότε οι τιμές της Y μπορούν να υπολογιστούν για κάθε τιμή της X μέσω της χρήσης της συνάρτησης F .

Σαν απλή γραμμική παλινδρόμηση ορίζεται η γραμμική συνάρτηση που υπολογίζεται μεταξύ x_i της ανεξάρτητης μεταβλητής X , καθώς και των αντίστοιχων τιμών Y_i της εξαρτημένης μεταβλητής Y . Άρα το γραμμικό μοντέλο της εξίσωσης παλινδρόμησης είναι της μορφής: $y_i = a + bx_i$, όπου a, b οι σταθερές της γραμμικής εξίσωσης με το b να είναι ο συντελεστής παλινδρόμησης, ενώ το a η τετμημένη επί την αρχή.

3.1.2 Ευθεία Παλινδρόμησης

Η ευθεία Παλινδρόμησης δίνει την εκτίμηση των τιμών της y για τις τιμές της x , οπότε με την βοήθεια της εξίσωσης $Y = a + bx$ βρίσκουμε για κάθε x μια τιμή Y .



Αν όλα τα σημεία του παραπάνω διαγράμματος έπεφταν πάνω στην ευθεία, τότε χωρίς σφάλμα η ευθεία θα μας είχε δώσει τις τιμές y , το οποίο δεν ισχύει στην προκειμένη περίπτωση διότι τα σημεία δεν πέφτουν πάνω στην ευθεία, αλλά σχηματίζουν ένα σμήνος σημείων γύρω από αυτήν.

Εάν Y είναι η εκτίμηση του y , τότε η ποσότητα $S_{yx} = \sqrt{\sum (y - Y)^2} / h$ εκφράζει ένα μέτρο του πόσο διάσπαρτα είναι τα σημεία γύρω από την ευθεία και ονομάζεται τυπικό σφάλμα της εκτίμησης της y από την x .

3.1.3 Όρια Εμπιστοσύνης

Ο συντελεστής Παλινδρόμησης b της ευθείας Παλινδρόμησης του δείγματος μας δίνει την ποσοτική εξάρτηση του X επί του Y στο δείγμα, αλλά δεν μπορεί όμως να μας δώσει την τιμή β του πληθυσμού μέσω του οποίου προέρχεται το δείγμα. Επομένως θέλουμε τα όρια

στα οποία είναι πιθανόν να εντοπίζεται η πραγματική τιμή β του πληθυσμού, τα οποία δίνονται με τη βοήθεια της στατιστικής συνάρτησης $t = \beta - b/sb$ που ακολουθεί την κατανομή του student με $n - 2$ βαθμούς ελευθερίας. Το sb είναι το τυπικό σφάλμα του συντελεστή Παλινδρόμησης b , όπου υπολογίζεται μέσω της βοήθειας του excel.

Τα όρια εμπιστοσύνης της πραγματικής τιμής β του πληθυσμού του δείγματος είναι:

$b - \frac{ta}{2} \times sb \leq \beta \leq b + ta/2 \times sb$, όπου $ta/2$ είναι η κρίσιμη τιμή στη στάθμη σημαντικότητας α που εντοπίζεται στον πίνακα της t κατανομής για $n - 2$ βαθμούς ελευθερίας. Η μεταξύ σχέση της στάθμης σημαντικότητας α και του επιπέδου εμπιστοσύνης p δίνεται μέσω της εξίσωσης $p = 1 - \alpha$, με τη στάθμη σημαντικότητας να είναι συνήθως $\alpha = 0,05$, επομένως το επίπεδο εμπιστοσύνης p είναι 95%.

3.1.4 Συντελεστής Συσχέτισης και Συντελεστής Προσδιορισμού

Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης r δεν εξετάζει το βαθμό της μίας συναρτησιακής σχέσης σε σχέση με την άλλη, αλλά εκφράζει την ένταση του συνδέσμου μεταξύ των δύο αυτών μεταβλητών X και Y .

Άρα από ένα δείγμα τιμών x_i, y_i των μεταβλητών X, Y υπολογίζεται ο συντελεστής συσχέτισης του δείγματος υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

Όπου το πρόσημο του συντελεστή εξαρτάται πάντα από του αριθμητή καθώς ο παρονομαστής είναι πάντα θετικός. Έτσι εάν $r > 0$, τότε αυξανόμενων των τιμών της μίας μεταβλητής αυξάνονται και οι τιμές της άλλης. Αν $r < 0$, τότε η αύξηση των τιμών της μίας μεταβλητής συνοδεύεται από μείωση των τιμών της άλλης, και αν $r = 0$, τότε η συνδιακύμανση των μεταβλητών X, Y είναι μηδέν και δεν υπάρχει μεταξύ τους γραμμική σύνδεση.

Επομένως με βάση αυτά που αναφέραμε καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης r είναι καθαρός αριθμός, βρίσκεται πάντοτε μεταξύ των τιμών $-1 \leq r \leq 1$, και το πρόσημο του είναι το ίδιο με του συντελεστή παλινδρόμησης b , ο οποίος όμως δεν αποτελεί δείκτη του μεγέθους της συσχέτισης.

Ο συντελεστής προσδιορισμού ορίζεται από το τετράγωνο του συντελεστή συσχέτισης και συμβολίζεται με r^2 που προσδιορίζει το ποσοστό μεταβλητότητας της Y που οφείλεται στην τάση που υπολογίσαμε.

3.1.5 Όρια εμπιστοσύνης του συντελεστή συσχέτισης r

Ο συντελεστής συσχέτισης r που υπολογίζεται από ένα δείγμα αποτελεί εκτίμηση του συντελεστή συσχέτισης ρ του πληθυσμού από τον οποίο τον οποίο το δείγμα προκύπτει και θα πρέπει να γίνει έλεγχος των υποθέσεων για τη στατιστική του σημαντικότητα.

Θεωρούμε τη μηδενική υπόθεση $r = \rho = 0$ έναντι της εναλλακτικής $r \neq \rho$ για δύο ασυσχέτιστες μεταβλητές X, Y . Ο στατιστικός έλεγχος θα γίνει με τη χρήση της στατιστικής συνάρτησης που ακολουθεί την κατανομή Student για $n-2$ βαθμούς ελευθερίας και θα είναι: $t = r/sr$, όπου το sr είναι το τυπικό σφάλμα του συντελεστή συσχέτισης r του δείγματος, και δίνεται από τη σχέση: $sr = \frac{\sqrt{1-r^2}}{\sqrt{n-2}}$.

Από τον πίνακα της t κατανομής ορίζεται και η κρίσιμη τιμή $ta(2)$ σε δίπλευρο έλεγχο.

Επομένως αν $|t| > ta(2)$, τότε η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται, άρα η τιμή του συντελεστή συσχέτισης είναι στατιστικά σημαντική, και έτσι υπάρχει μεταξύ των δύο μεταβλητών X, Y γραμμική σύνδεση.

Αν $|t| < ta(2)$, τότε η μηδενική υπόθεση δεν μπορεί να απορριφθεί, και επομένως το δείγμα προέρχεται από πληθυσμό ασυσχέτιστων μεταβλητών X, Y .

3.1.6 Ορισμός Τάσης με τη βοήθεια της Παλινδρομικής Ανάλυσης

Η γραμμική τάση προσδιορίζεται με τη χρήση της Παλινδρομικής Ανάλυσης, συγκεκριμένα ο συντελεστής b της ευθείας Παλινδρόμησης αποτελεί την τάση της χρονοσειράς.

Η στατιστική της σημαντικότητα ελέγχεται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο όπως και στον συντελεστή συσχέτισης r με την εφαρμογή του t ελέγχου για $n - 2$ βαθμούς ελευθερίας θεωρώντας την μηδενική υπόθεση $\beta = 0$, έναντι της εναλλακτικής $\beta \neq 0$. Επίσης, για να είναι η τάση στατιστικά σημαντική σε επίπεδο σημαντικότητας 95% θα πρέπει $p < 0,05$, δηλαδή το επίπεδο εμπιστοσύνης ρ να είναι μικρότερο από την στάθμη σημαντικότητας $\alpha = 0,05$.

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η Παλινδρομική Ανάλυση και Τάση των μέσων μηνιαίων τιμών ανά χρόνο για τους ρύπους NO, NO_2 και O_3 . Συγκεκριμένα, για κάθε σταθμό σε μηνιαία βάση ανά χρόνο υπολογίστηκαν τα διαγράμματα διασποράς, η ευθεία παλινδρόμησης, η εξίσωση της ευθείας Παλινδρόμησης που είναι της μορφής: $y = bx + a$, όπου το b είναι η τάση Παλινδρόμησης της ευθείας (*trend/slop*), και R^2 ο συντελεστής προσδιορισμού στον οποίο εκφράζεται η μηνιαία μεταβολή των φωτοχημικών ρύπων, που αποδίδεται στη γραμμική τάση b που υπολογίστηκε.

Στο συντελεστή συσχέτισης R που υπολογίστηκε εξετάστηκε η σχέση ανάμεσα των δύο αυτών μεταβλητών X, Y , δηλαδή των μηνιαίων τιμών ανά χρόνο κυμαινόμενη πάντα στο διάστημα $-1 < R < 1$ με το πρόσημο να είναι το ίδιο με την τάση Παλινδρόμησης.

Έπειτα με την βοήθεια του excel υπολογίστηκε η τυπική απόκλιση του X , δηλαδή των χρονοσειρών Sx , καθώς και η τυπική απόκλιση των τιμών Y, Sy των μηνιαίων τιμών.

Το τυπικό σφάλμα της εκτίμησης της y από την x δίνεται από την σχέση:

$$Syx = \sqrt{\sum (y - Y)^2 / h}$$

Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1994	98,17	154,95	116,89	60,57	68,40	56,10	50,55	46,71	73,84	86,21	157,29	196,80
1995	138,03	132,30	60,41	68,02	50,15	45,62	46,59	25,75	47,77	93,94	118,71	109,36
1996	76,53	89,72	57,96	52,53	50,86	41,32	34,38	25,64	38,41	89,55	136,73	132,69
1997	130,27	100,94	51,02	34,19	42,50	27,83	46,63	21,88	40,70	58,90	96,65	100,88
1998	184,93	83,64	51,28	36,53	54,20	27,88	25,87	21,88	81,17	59,46	98,28	90,75
1999	67,04	64,22	71,05	41,39	29,75	35,39	39,59	40,71	47,78	34,10	44,33	49,69
2000	47,16	76,13	62,60	36,53	44,96	44,07	14,58	12,98	40,70	58,90	96,65	123,21
2001	88,76	74,08	56,97	37,02	33,17	18,98	21,81	24,97	38,93	64,38	117,98	95,91
2002	117,36	90,15	71,53	45,42	27,21	14,86	30,11	15,65	58,26	72,13	129,13	102,03
2003	75,28	44,75	50,96	31,66	40,79	26,98	24,82	25,07	37,13	66,08	107,18	108,72
2004	107,12	120,48	45,22	33,19	24,87	25,09	17,97	27,16	25,71	57,69	115,78	113,98
2005	113,08	55,12	60,08	41,25	38,04	27,89	28,59	21,47	45,74	62,21	88,63	83,48
2006	70,40	80,15	41,23	36,52	30,99	25,42	21,01	19,88	38,59	46,66	124,86	126,77
2007	102,43	61,78	38,03	34,25	32,96	39,60	29,24	22,15	36,14	58,90	80,15	90,04
2008	89,82	107,89	35,68	44,47	35,94	24,83	21,49	23,63	38,06	58,24	89,91	67,82
2009	75,05	45,93	49,70	35,85	30,79	25,39	24,97	17,71	36,51	61,13	110,19	55,08
2010	47,94	57,97	43,37	28,49	32,49	27,85	21,06	20,37	39,20	56,52	86,84	72,17
2011	82,34	65,01	38,52	20,17	21,72	18,48	12,41	11,74	27,67	50,39	77,77	113,55
2012	71,21	49,82	44,23	19,11	14,88	13,39	16,20	17,69	34,26	35,12	37,88	87,46
2013	72,05	43,38	29,56	24,82	16,89	11,26	13,29	10,75	20,88	54,21	61,13	82,18
2014	66,89	45,39	28,43	20,96	15,17	17,73	12,89	17,61	20,87	36,54	50,06	88,24
2015	80,43	36,11	23,50	22,70	23,05	17,46	15,10	9,93	27,07	34,62	99,22	130,53
average	91,01	76,13	51,28	36,53	34,54	27,88	25,87	21,88	40,70	58,90	96,65	100,88
trend/slop	-2,290	-3,514	-2,299	-1,539	-1,748	-1,287	-1,407	-0,877	-1,586	-1,776	-2,701	-1,796
R	-0,468	-0,719	-0,761	-0,799	-0,839	-0,722	-0,797	-0,653	-0,692	-0,700	-0,579	-0,373
sy	31,782	31,740	19,605	12,594	13,528	11,573	11,462	8,723	14,882	16,487	30,271	31,285
sy.x	28,090	22,061	12,711	7,512	7,355	8,005	6,917	6,605	10,746	11,781	24,670	29,029
sx	6,494	6,494	6,494	6,494	6,494	6,494	6,494	6,494	6,494	6,494	6,494	6,494
sqrt(n-2)	4,472	4,472	4,472	4,472	4,472	4,472	4,472	4,472	4,472	4,472	4,472	4,472
t	2,307	4,628	3,251	5,951	6,903	4,620	5,000	3,858	4,280	4,378	5,108	-1,797

Προκειμένου να είναι οι τάσεις που μελετώνται στατιστικά σημαντικές σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0,05$, χρησιμοποιήθηκε η στατιστική συνάρτηση:

$$t = \frac{\beta - b}{S_{yx}/S_x} \sqrt{n - 2}$$

Που ακολουθεί την κατανομή του Student για $n - 2$ βαθμούς ελευθερίας. Έτσι, χρησιμοποιήθηκε η μηδενική υπόθεση $\beta = 0$ όπου δεν υπάρχει τάση, επομένως γίνεται :

$$t = \frac{b}{S_{yx}/S_x} \sqrt{n - 2}$$

Με βάση τα παραπάνω οι τιμές t ώστε οι τάσεις να είναι στατιστικά σημαντικές σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95% (ή στάθμη σημαντικότητας $\alpha=0.05$), θα πρέπει να εντοπίζονται εκτός του διαστήματος $-2.06 \leq t \leq 2.06$, δηλαδή όταν $t \leq -2,06$ ή $t \geq 2,06$, στην περίπτωση μας που οι βαθμοί ελευθερίας είναι περίπου 30 (ανάλογα με το σταθμό και τη διαθέσιμη χρονοσειρά συγκεντρώσεων των ρύπων).

4 Αποτελέσματα

4.1 Ωριαίες διακυμάνσεις της συγκέντρωσης των φωτοχημικών ρύπων

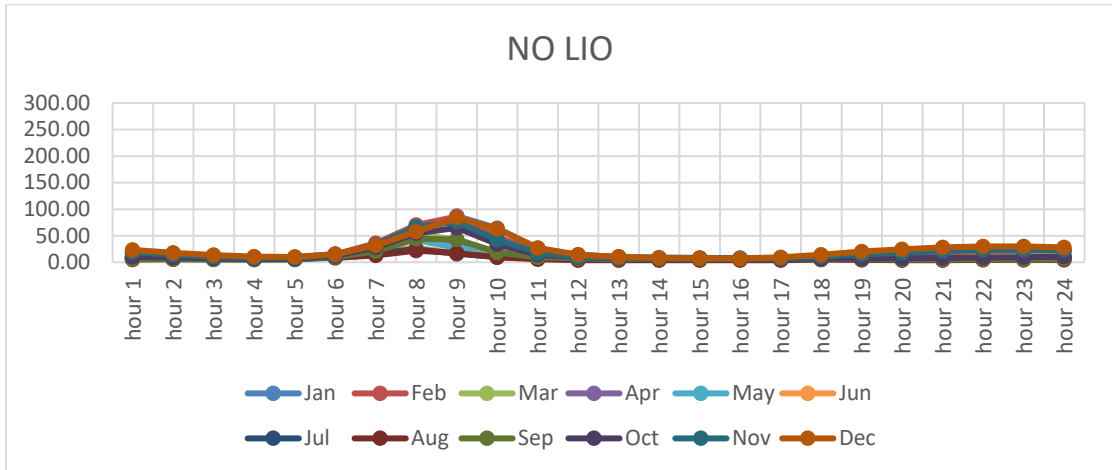
Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται οι ωριαίες διακυμάνσεις των εξεταζόμενων φωτοχημικών ρύπων ανά μήνα, ώστε να μελετηθεί τόσο η κατανομή τους κατά τη διάρκεια του 24ώρου μέσα στο έτος, όσο και η χωρική κατανομή τους στο Λεκανοπέδιο της Αττικής σε κλιματολογική βάση για τα χρόνια 1984-2017.

4.1.1 Οξείδιο του Αζώτου

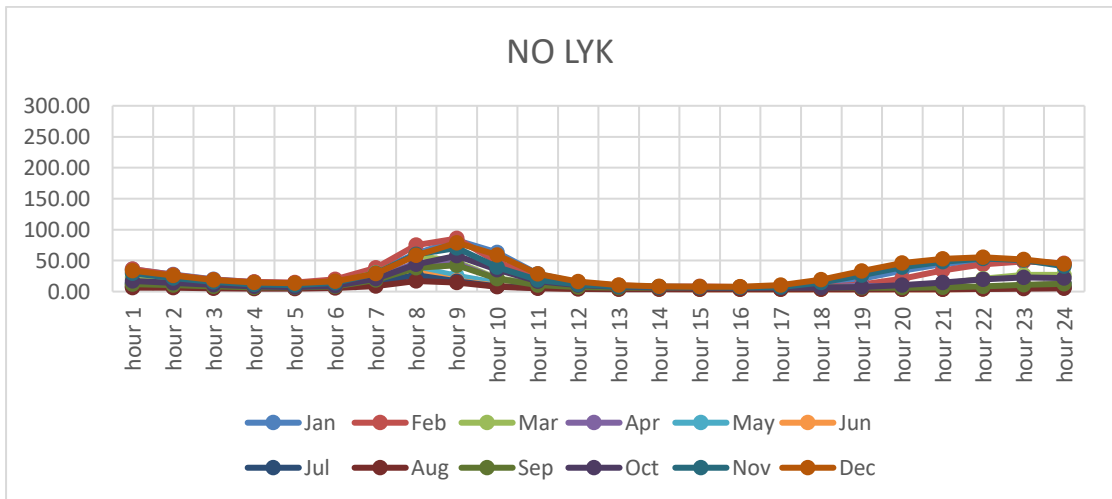
Για τον ρύπο του οξειδίου του αζώτου (NO) με βάση τους σταθμούς μελέτης (Σχήματα 4.1-4.10) που παρουσιάζονται στον χάρτη (Εικόνα 3), βλέπουμε ότι το NO παρουσιάζει μειωμένη συγκέντρωση στο βόρειο τμήμα που οφείλεται στο γεγονός ότι επικρατούν ισχυροί άνεμοι με μεγάλες ταχύτητες το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα τη διάχυσή και την αραιώσή του, σε αντίθεση με το νότιο κομμάτι όπου εκεί έχουμε αύξηση της συγκέντρωσης του ρύπου λόγω μειωμένης ταχύτητας του ανέμου.

Σε ό,τι έχει να κάνει με την ενδοετήσια συμπεριφορά του ρύπου του οξειδίου του αζώτου βλέπουμε ότι παρουσιάζει μέγιστες τιμές τους χειμερινούς μήνες, δηλαδή τον Ιανουάριο, τον Φεβρουάριο, τον Δεκέμβριο και τον Νοέμβριο και λιγότερες τους καλοκαιρινούς μήνες και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στη διάρκεια του χειμώνα οι ανθρώπινες δραστηριότητες είναι αρκετά αυξημένες σε σχέση με το καλοκαίρι που έχει να κάνει με την αυξημένη χρήση των αυτοκινήτων καθώς και με την λειτουργία των διαφόρων βιομηχανικών εργοστασίων, τα οποία είναι συγκεντρωμένα στις μεγάλες αστικές πόλεις. Στην κατηγορία της βιομηχανικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης ανήκουν και μεγάλες βιομηχανικές ομάδες όπως είναι τα διυλιστήρια, οι τσιμεντοβιομηχανίες, οι χαλυβουργίες και οι μονάδες εξόρυξης και επεξεργασίας μετάλλων.

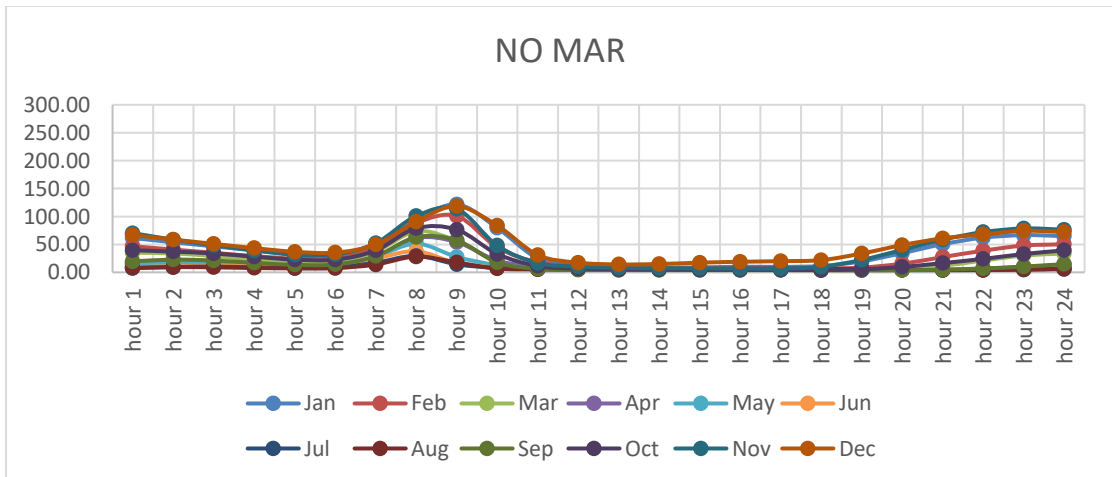
Επίσης, οι αυξημένες τιμές του NO τον χειμώνα οφείλονται και στις μετεωρολογικές συνθήκες όπου λόγω του ψυχρού κλίματος που επικρατεί έχουμε αύξηση των κεντρικών θερμάνσεων. Με βάση την ωριαία μεταβολή των συγκεντρώσεων του NO από τα παραπάνω διαγράμματα βλέπουμε μεγαλύτερες τιμές το πρωί δηλαδή τις ώρες μεταξύ 8-10 καθώς και το βράδυ μεταξύ 9-11. Το χρονικό διάστημα στο οποίο εμφανίζονται τα δύο μέγιστα έχει να κάνει κυρίως με το ότι τις ώρες αυτές επικρατούν έντονες αιχμές κυκλοφορίας καθώς επίσης και αυξημένη χρήση των κεντρικών θερμάνσεων, επίσης το χρονικό διάστημα στο οποίο εμφανίζεται το πρωινό μέγιστο επικρατούν ευνοϊκές μετεωρολογικές συνθήκες για τη συγκέντρωση των ρύπων, δηλαδή έχουμε την εμφάνιση των θερμοκρασιακών αναστροφών όπου λόγω των υψηλών πιέσεων τα συστήματα κινούνται αργά και καλύπτουν μεγάλες γεωγραφικές περιοχές. Τα υψηλά βαρομετρικά συνοδεύονται από ανέφελο ουρανό με συχνή εμφάνιση θερμοκρασιακών αναστροφών ακτινοβολίας κατά τη νύχτα και τις πρώτες πρωινές ώρες. Επομένως, λόγω των υψηλών πιέσεων που επικρατούν στις περιοχές, οι χαμηλές ταχύτητες των ανέμων επιδρούν αρνητικά στον αερισμό των περιοχών με αποτέλεσμα τον εγκλωβισμό των ρύπων.



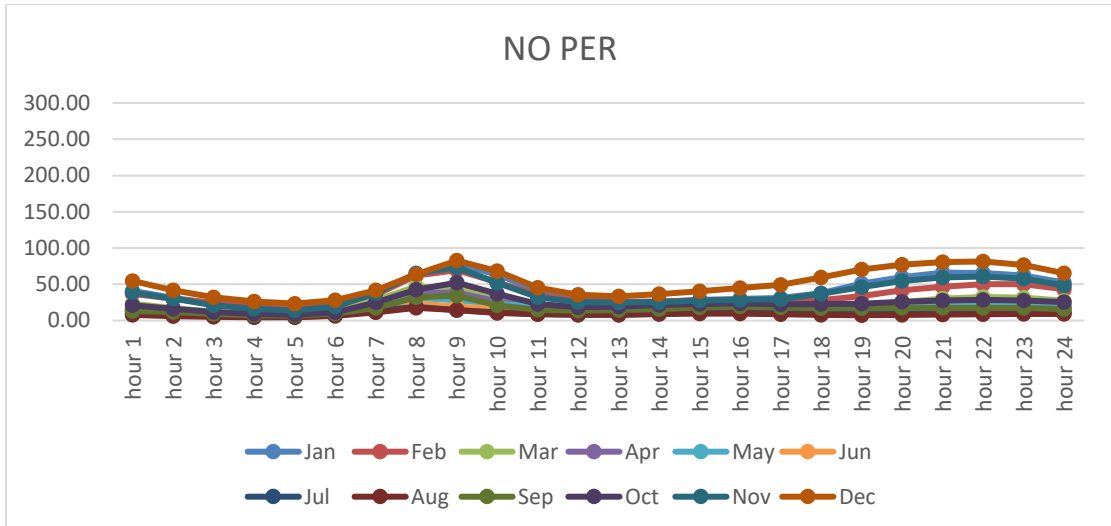
Σχήμα 4.1.1.1 Μηνιαίες συγκεντρώσεις του NO για το σταθμό Λιοσίων.



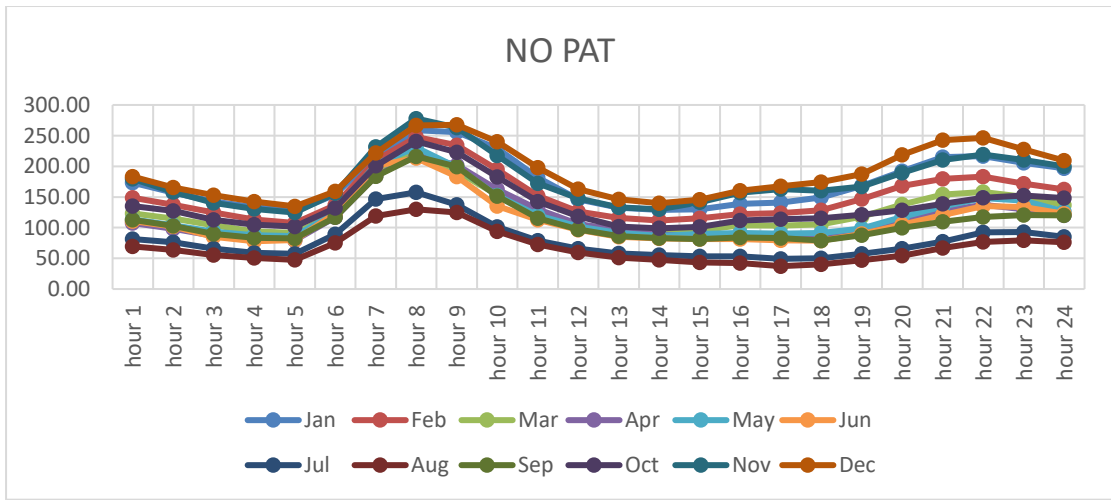
Σχήμα 4.1.1.2 Μηνιαίες συγκεντρώσεις του NO για το σταθμό Λυκόβρυση.



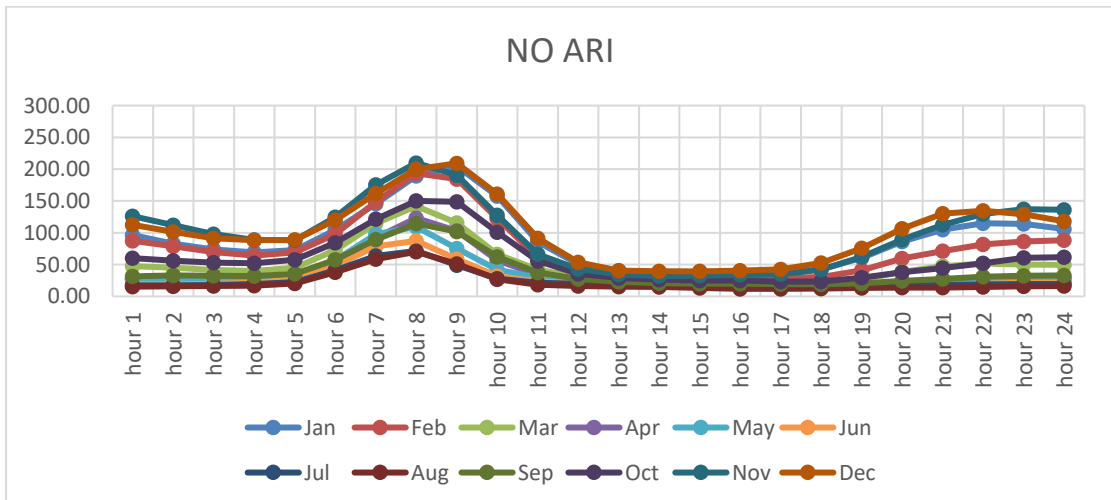
Σχήμα 4.1.1.3. Μηνιαίες συγκεντρώσεις του NO για το σταθμό Μαρούσι.



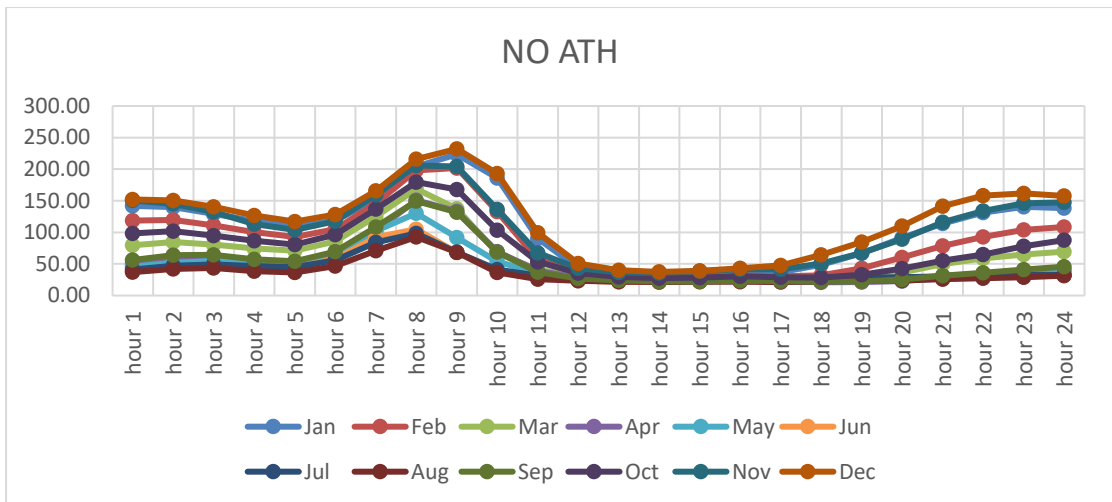
Σχήμα 4.1.1.4. Μηνιαίες συγκεντρώσεις του NO για το σταθμό *Περιστερί*.



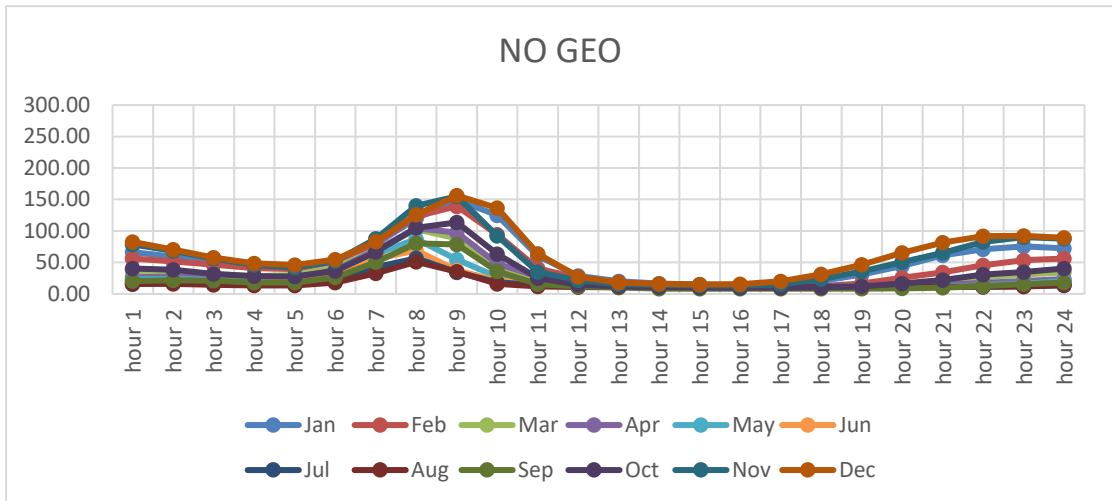
Σχήμα 4.1.1.5. Μηνιαίες συγκεντρώσεις του NO για το σταθμό *Πατησίων*.



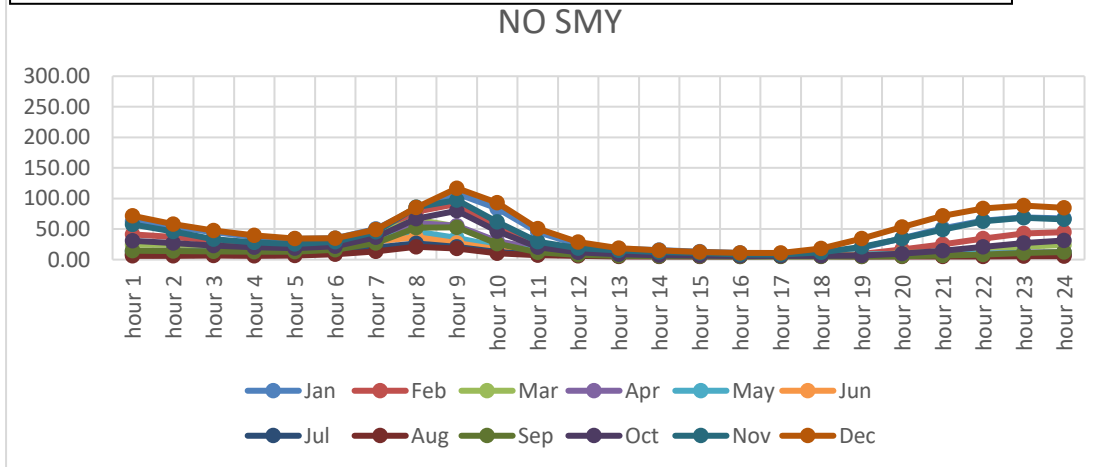
Σχήμα 4.1.1.6. Μηνιαίες συγκεντρώσεις του NO για το σταθμό *Αριστοτέλους*



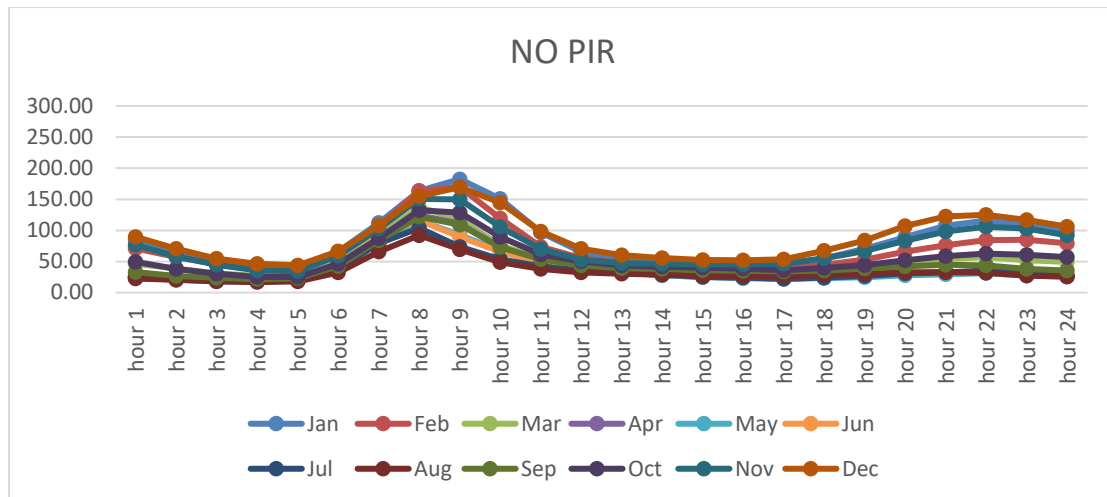
Σχήμα 4.1.1.7. Μηνιαίες συγκεντρώσεις του NO για το σταθμό Αθηνάς.



Σχήμα 4.1.1.8. Μηνιαίες συγκεντρώσεις του NO για το σταθμό Γεωπονική.



Σχήμα 4.1.1.9. Μηνιαίες συγκεντρώσεις του NO για το σταθμό Νέα Σμύρνη.



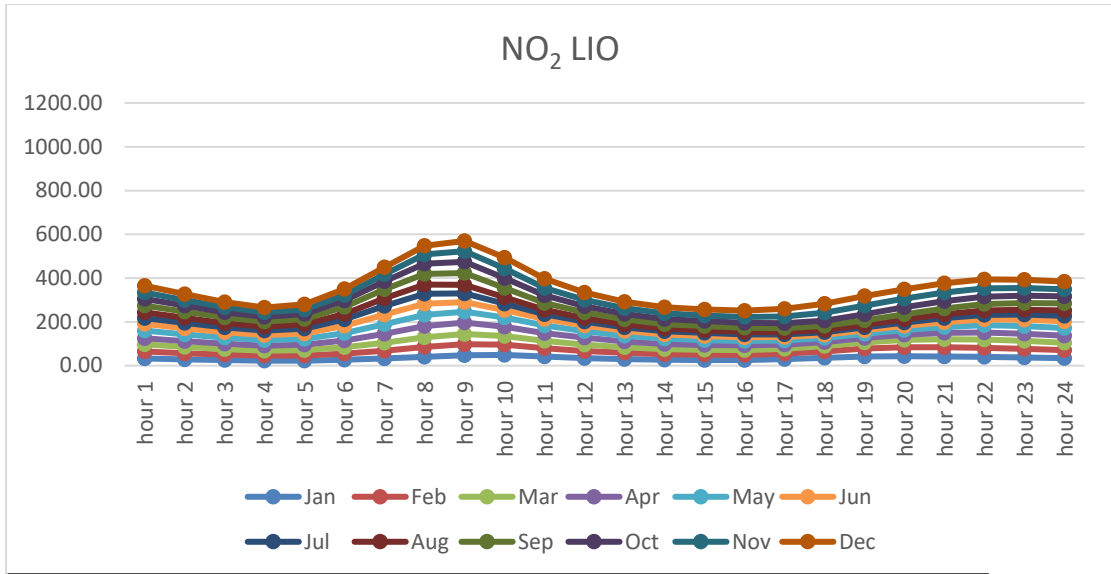
Σχήμα 4.1.1.10. Μηνιαίες συγκεντρώσεις του NO για το σταθμό του Πειραιά.

4.1.2 Διοξείδιο του Αζώτου

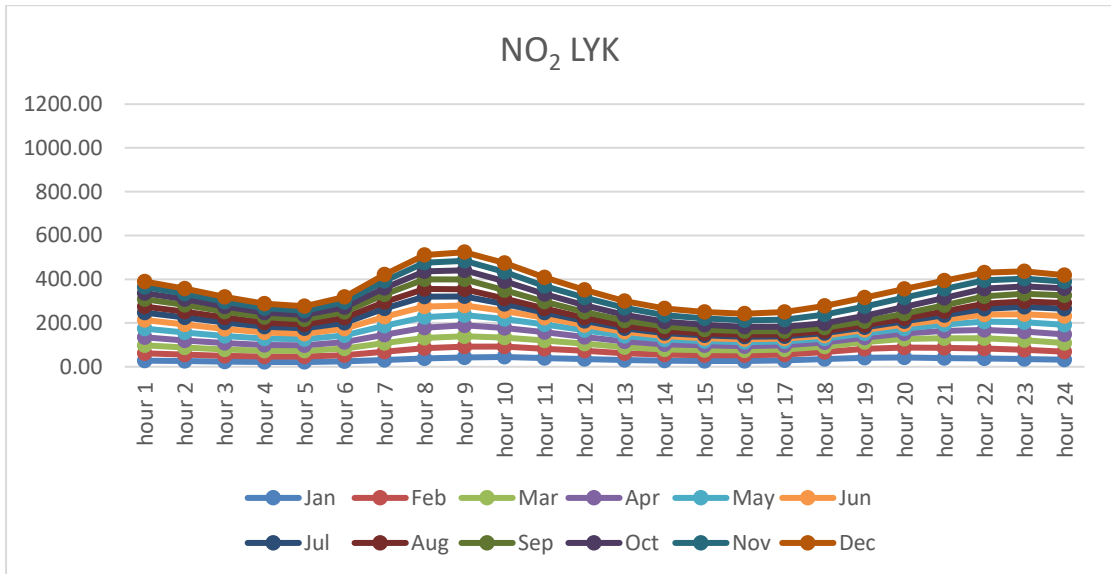
Για τον ρύπο του διοξειδίου του αζώτου (NO_2) με βάση τα παρακάτω διαγράμματα παρατηρούμε ότι οι σταθμοί που βρίσκονται στο βόρειο και ανατολικό κομμάτι του χάρτη όπως είναι τα Λιόσια, η Λυκόβρυση, και το Μαρούσι παρουσιάζουν μειωμένες τιμές συγκέντρωσης ρύπων σε σχέση με τις περιοχές οι οποίες βρίσκονται στο Νότιο και δυτικό κομμάτι του χάρτη. Αυτό έχει να κάνει με το γεγονός ότι η τοπογραφία του Λεκανοπέδιου της Αθήνας είναι κλειστή με αποτέλεσμα να δυσκολεύει τον αερισμό και τη διάχυση των ρύπων, και έτσι η επικρατούσα διεύθυνση του ανέμου είναι είτε βορειοανατολική είτε νοτιοδυτική, επίσης οι βορειοανατολικοί άνεμοι έχουν μεγάλη ταχύτητα ανέμου και συντελούν στη διάχυση των ρύπων επομένως για αυτό το λόγο οι περιοχές όπως τα Λιόσια, το Μαρούσι και η Λυκόβρυση έχουν χαμηλή συγκέντρωση ρύπων.

Για την ενδοετήσια συμπεριφορά του ρύπου του διοξειδίου του αζώτου (NO_2), το οποίο ανήκει στην κατηγορία των δευτερογενών πηγών ατμοσφαιρικής ρύπανσης εφόσον προκύπτει μέσω του οξειδίου του αζώτου (NO) καθώς και με τη συμβολή διαφόρων χημικών αντιδράσεων με την παρουσία της ηλιακής ακτινοβολίας, στα παρακάτω διαγράμματα παρατηρούμε ότι κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου του έτους παρουσιάζει τις μέγιστες τιμές. Αυτό οφείλεται στη μέγιστη ηλιοφάνεια σε ένταση και διάρκεια που επικρατεί καθώς και στην υψηλή συχνότητα των θερμοκρασιακών αναστροφών όπου λόγω των συνθηκών της καλοκαιρίας για μεγάλο χρονικό διάστημα έχουμε χαμηλές ταχύτητες ανέμου και χαμηλό αερισμό της περιοχής.

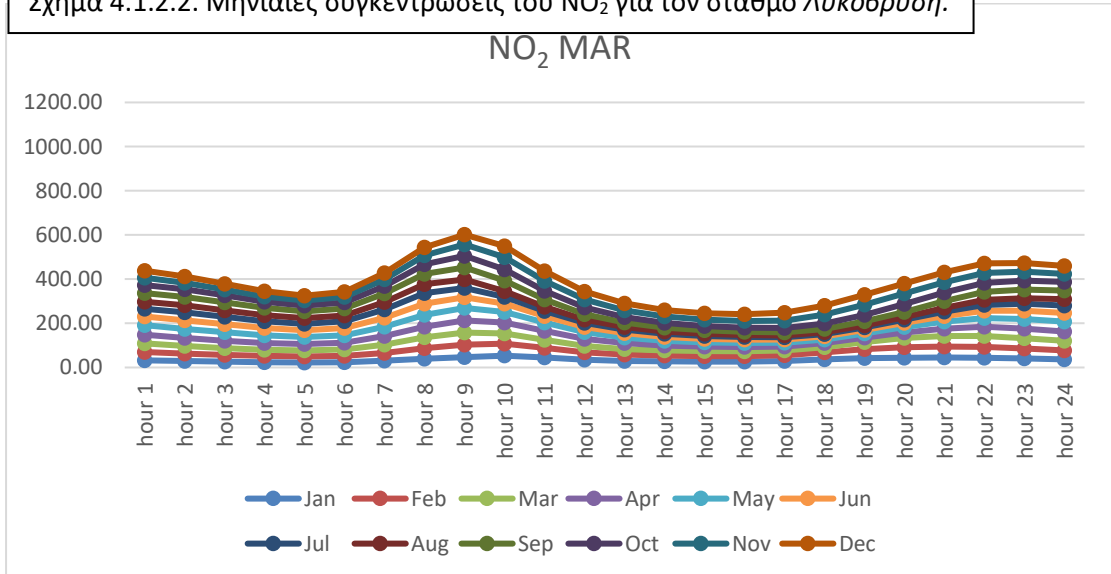
Βάσει της ωριαίας μεταβολής συγκεντρώσεων των ρύπων του NO_2 στα διαγράμματα βλέπουμε ότι παρουσιάζει το μέγιστο τις ώρες 10-12πμ, δηλαδή παρουσιάζει κάποια χρονική στέρηση σε σχέση με τον ρύπο του NO ο οποίος είναι απαραίτητος προκειμένου να σχηματιστεί, ενώ επίσης εμφανίζεται και ένα δευτερογενές νυχτερινό μέγιστο μεταξύ των ωρών 22-24.



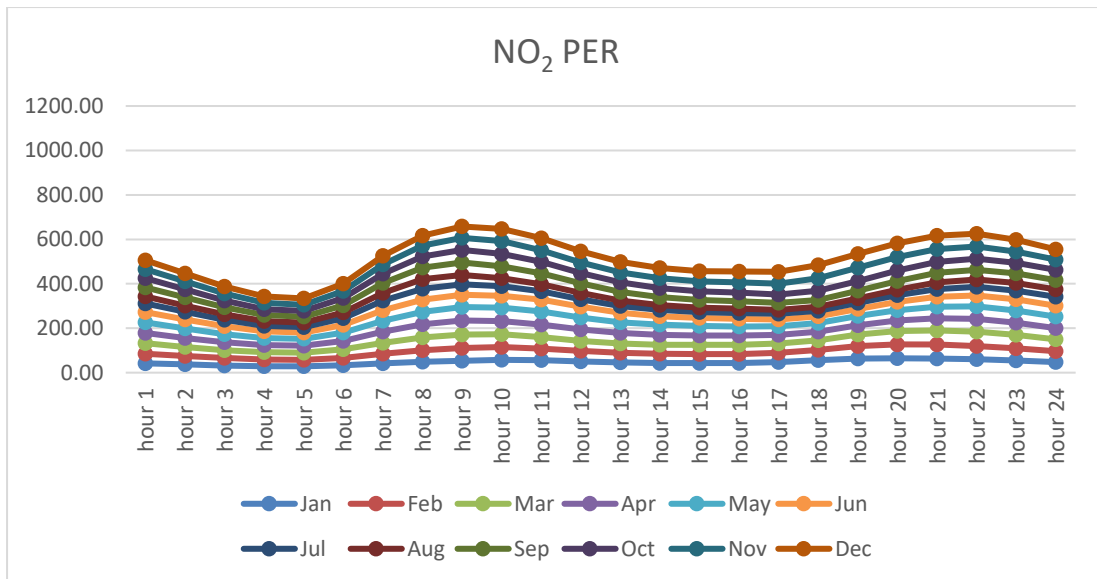
Σχήμα 4.1.2.1. Μηνιαίες συγκεντρώσεις του NO₂ για τον σταθμό Λιοσίων.



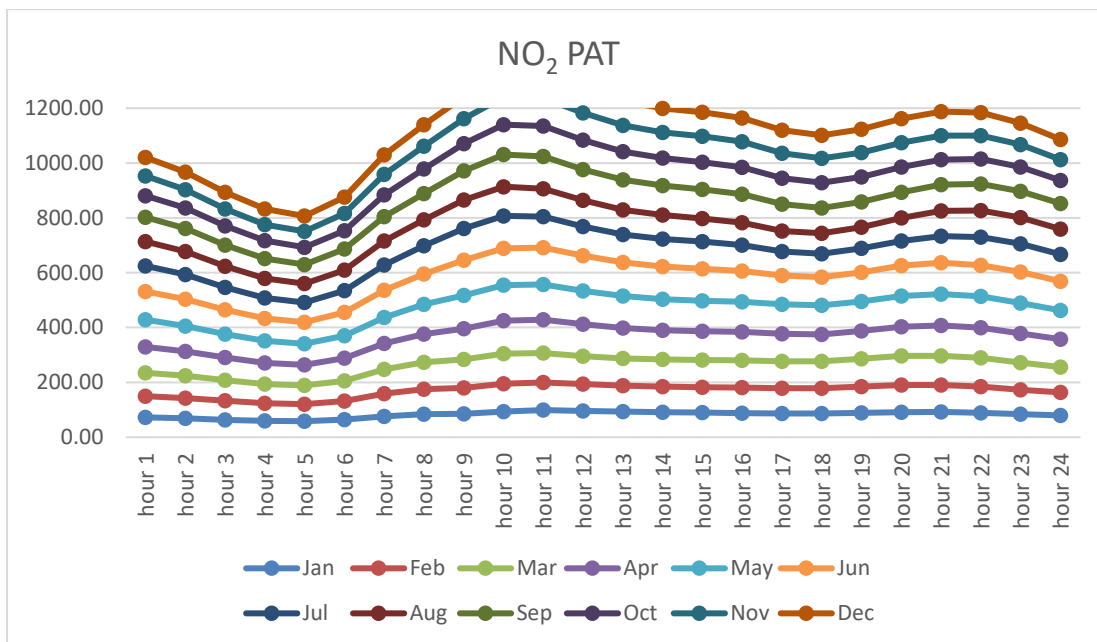
Σχήμα 4.1.2.2. Μηνιαίες συγκεντρώσεις του NO₂ για τον σταθμό Λυκόβρυση.



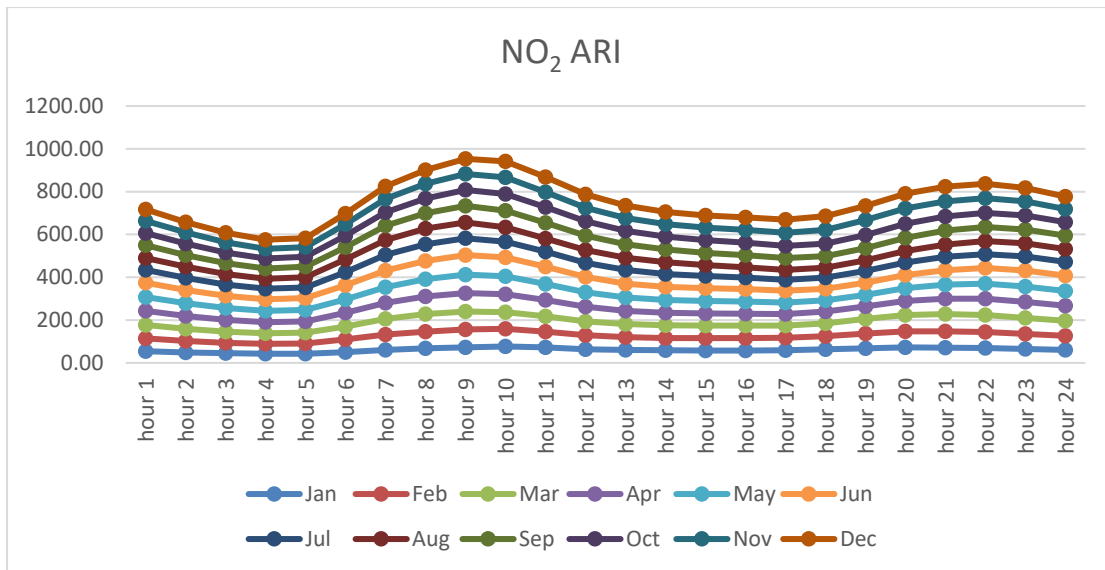
Σχήμα 4.1.2.3. Μηνιαίες συγκεντρώσεις του NO₂ για τον σταθμό Μαρούσι.



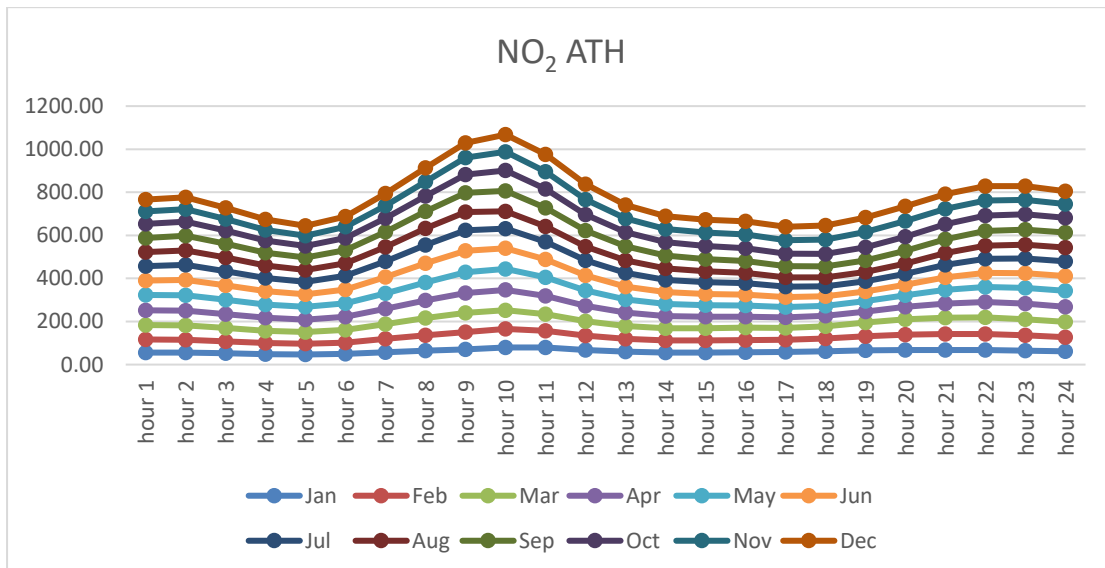
Σχήμα 4.1.2.4. Μηνιαίες συγκεντρώσεις του NO₂ για τον σταθμό *Περιστερί*.



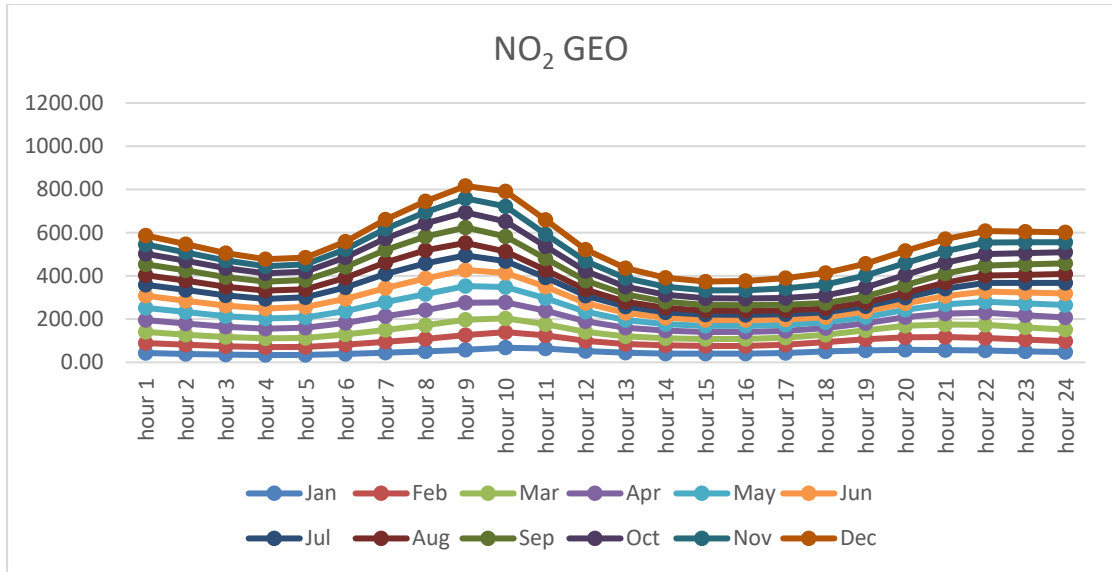
Σχήμα 4.1.2.5. Μηνιαίες συγκεντρώσεις του NO₂ για τον σταθμό *Πατησίων*.



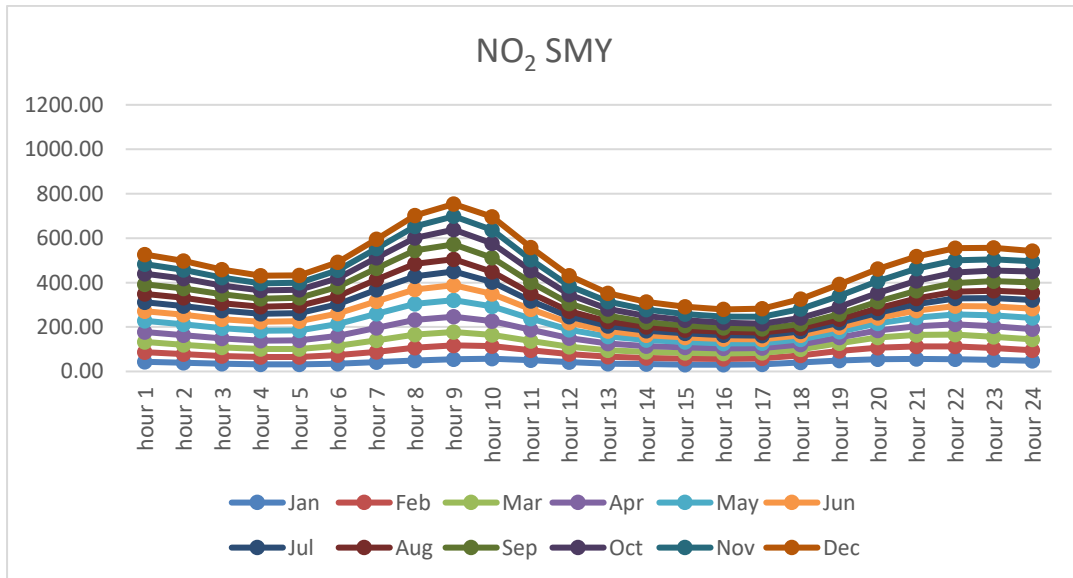
Σχήμα 4.1.2.6. Μηνιαίες συγκεντρώσεις του NO₂ για τον σταθμό Αριστοτέλους.



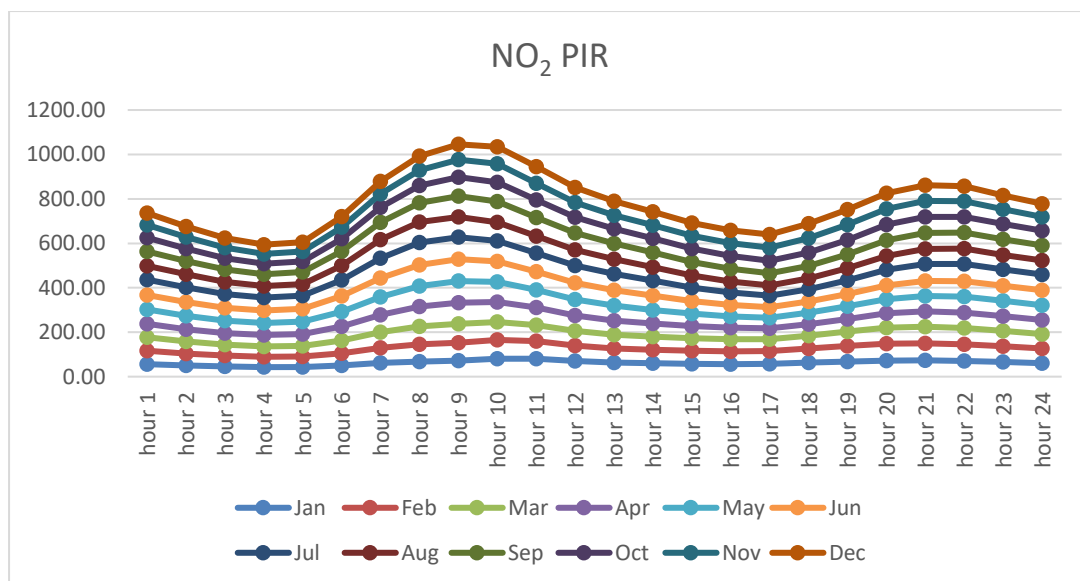
Σχήμα 4.1.2.7. Μηνιαίες συγκεντρώσεις του NO₂ για τον σταθμό Αθηνάς.



Σχήμα 4.1.2.8. Μηνιαίες συγκεντρώσεις του NO₂ για τον σταθμό Γεωπονική.



Σχήμα 4.1.2.9. Μηνιαίες συγκεντρώσεις του NO₂ για τον σταθμό Νέα Σμύρνη.



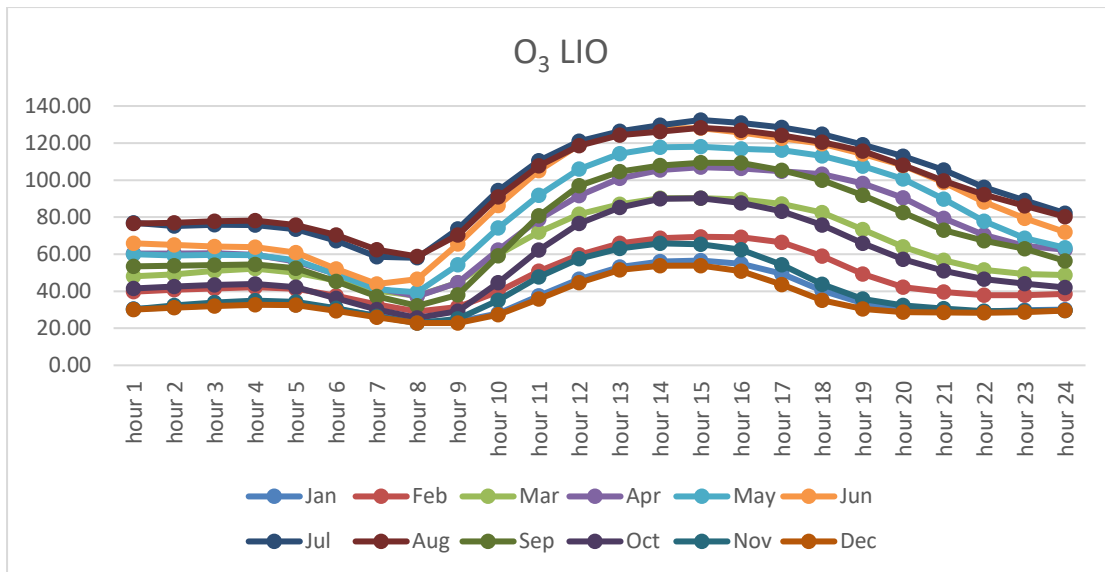
Σχήμα 4.1.2.10. Μηνιαίες συγκεντρώσεις του NO₂ για τον σταθμό Πειραιά.

4.1.3 Όζον

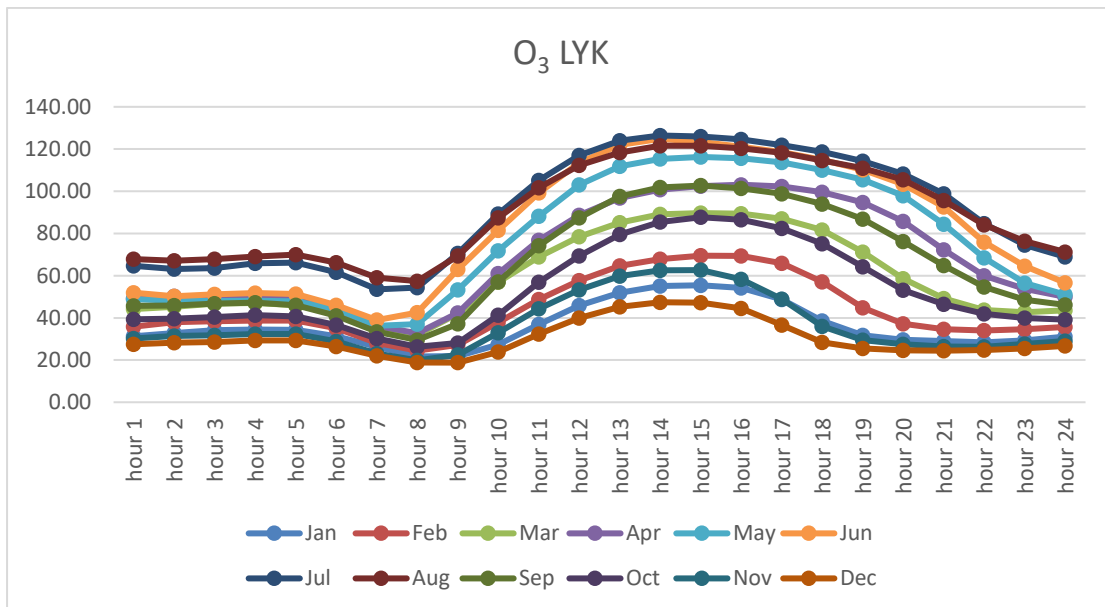
Το όζον O₃ με βάση τα παρακάτω διαγράμματα παρατηρούμε ότι παρουσιάζει μέγιστες συγκεντρώσεις στους σταθμούς οι οποίοι βρίσκονται στο Βόρειο και κεντρικό τμήμα του χάρτη σε αντίθεση με τους σταθμούς οι οποίοι είναι στα νότια. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι στις περιοχές αυτές επικρατεί έντονη κυκλοφορία οχημάτων, βιομηχανικά εργοστάσια, χημικά διαλυτικά καθώς και πολλά βενζινάδικα όπου σε συνδυασμό με τις συνθήκες έντονης ηλιακής ακτινοβολίας η ατμόσφαιρα επιδεινώνεται.

Ο σχηματισμός του όζοντος O₃ προκύπτει από την επίδραση χημικών αντιδράσεων μεταξύ του οξυγόνου, των πτητικών οργανικών ενώσεων και των οξειδίων του αζώτου με έντονες θερμοκρασίες. Επειδή ανήκει στους δευτερογενείς ρύπους παρουσιάζει τις μέγιστες τιμές κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου δηλαδή τους μήνες Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο.

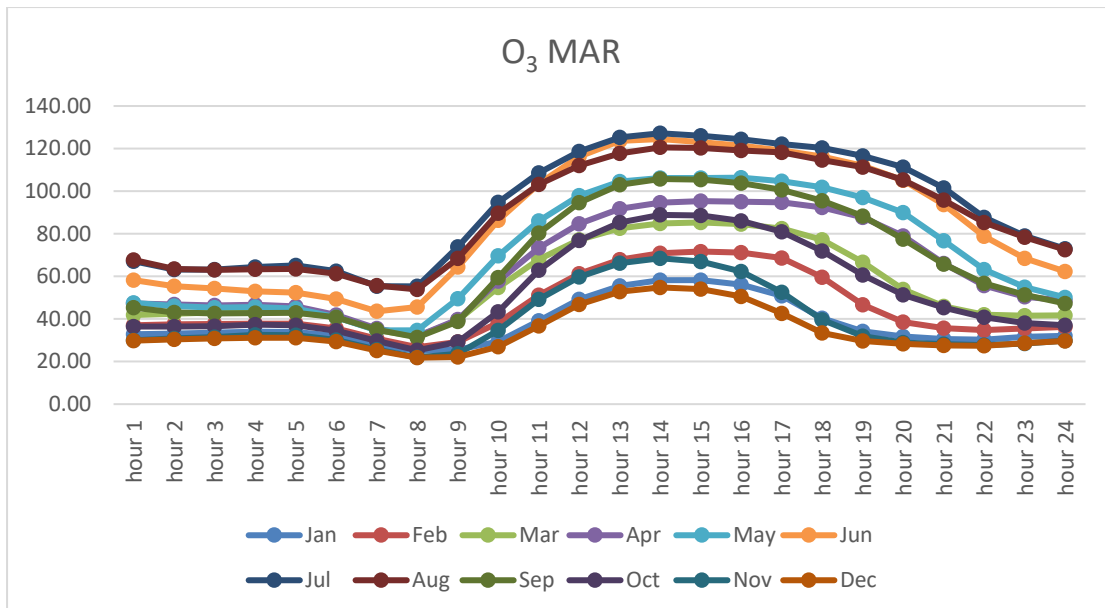
Σύμφωνα με τις ωριαίες μεταβολές του όζοντος O₃ βλέπουμε ότι παρουσιάζει τις μέγιστες τιμές τις μεσημεριανές ώρες και αυτό σχετίζεται στο ότι νωρίς το πρωί έχουμε αύξηση των συγκεντρώσεων του NO με την κυκλοφορία των οχημάτων όπου στη συνέχεια οι συγκεντρώσεις του μειώνονται λόγω της μετατροπής του σε NO₂. Με την αύξηση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας το μεσημέρι, παρουσιάζεται αύξηση του ρυθμού της φωτολυτικής διάσπασης του διοξειδίου του αζώτου NO₂ και έτσι προκύπτει η μείωση των συγκεντρώσεων του με ταυτόχρονη αύξηση των συγκεντρώσεων του όζοντος.



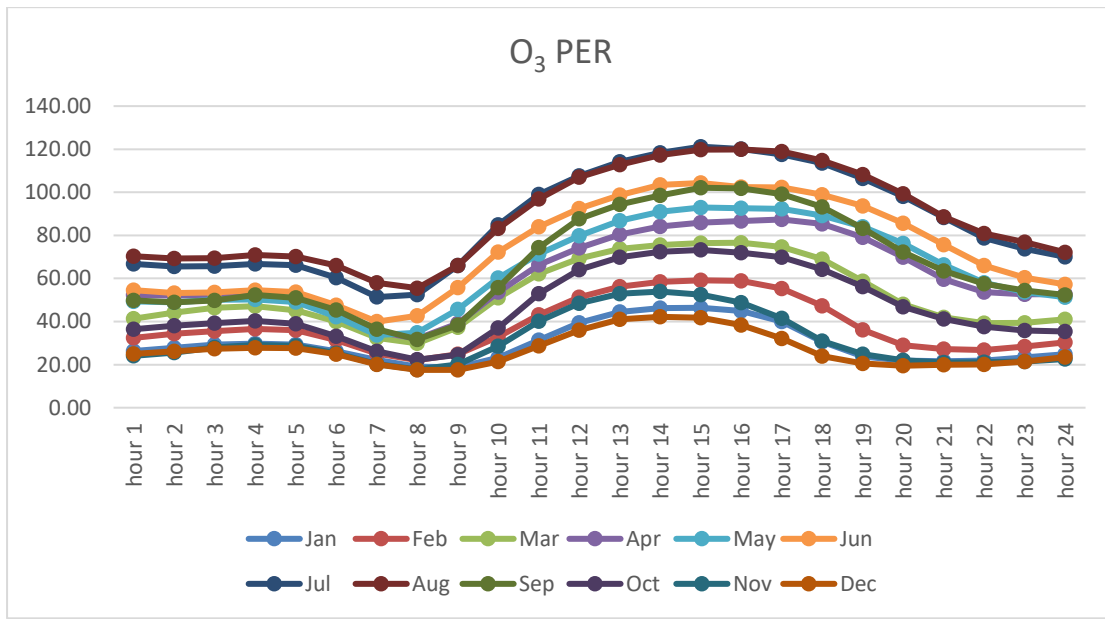
Σχήμα 4.1.3.1. Μηνιαίες συγκεντρώσεις του O₃ για τον σταθμό Λιόσια.



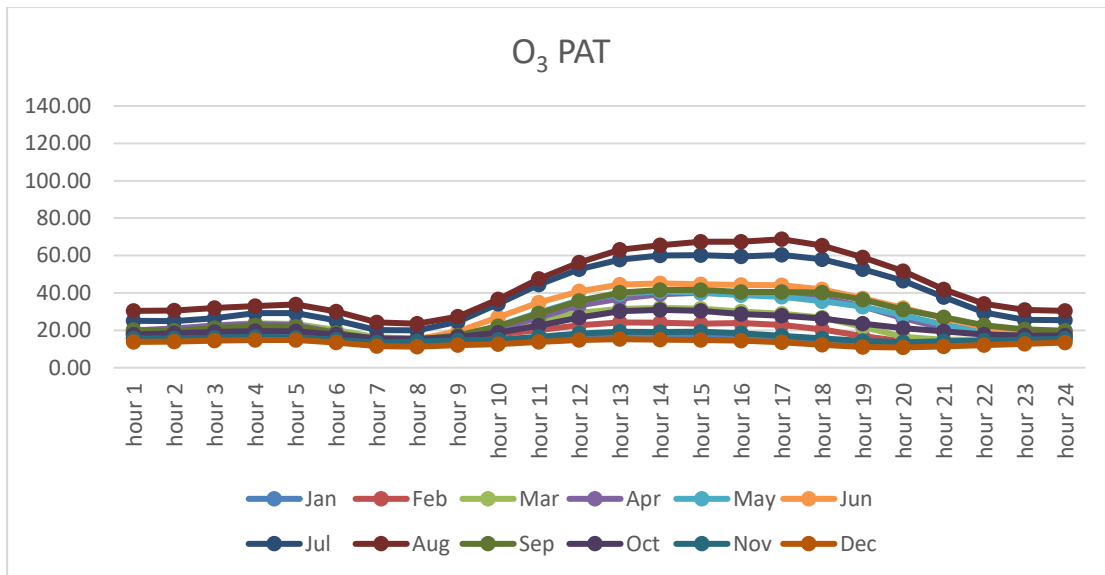
Σχήμα 4.1.3.2. Μηνιαίες συγκεντρώσεις του O₃ για τον σταθμό Λυκόβρυση.



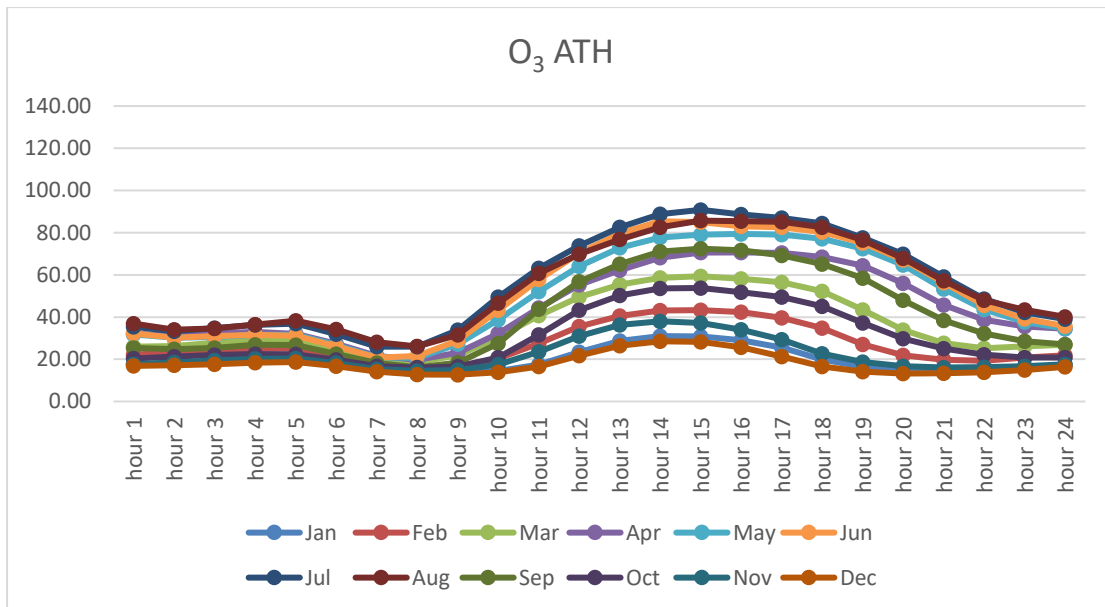
Σχήμα 4.1.3.3. Μηνιαίες συγκεντρώσεις του O₃ για τον σταθμό Μαρούσι.



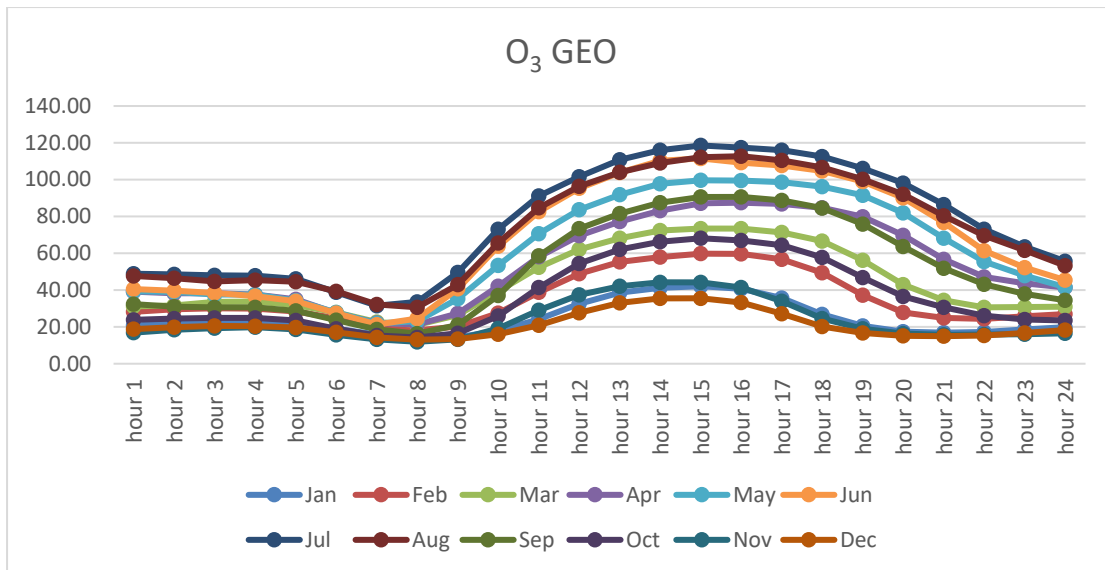
Σχήμα 4.1.3.4. Μηνιαίες συγκεντρώσεις του O₃ για τον σταθμό Περιστερί.



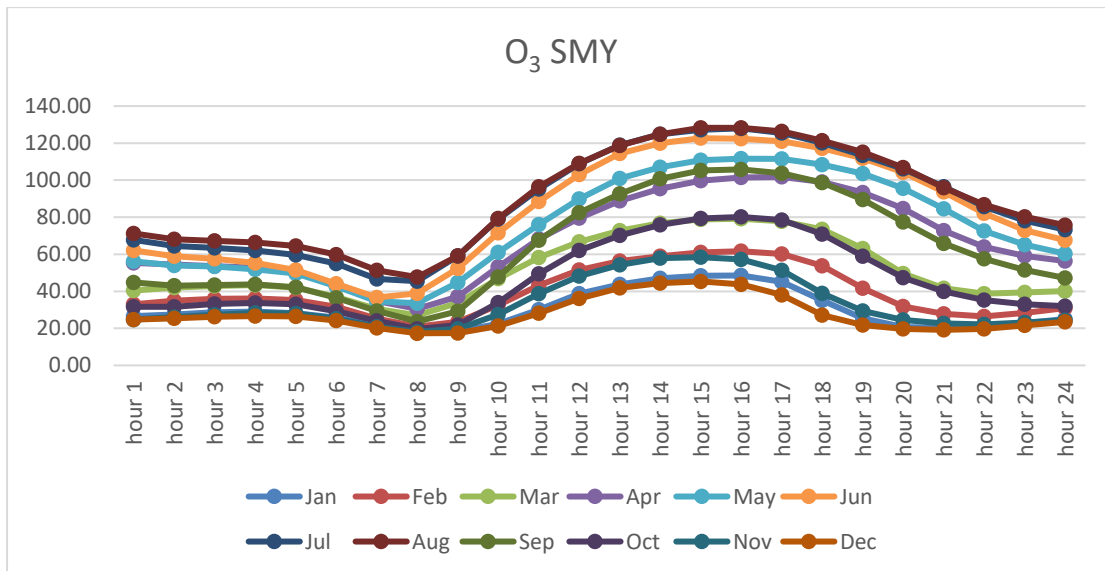
Σχήμα 4.1.3.5. Μηνιαίες συγκεντρώσεις του O₃ για τον σταθμό Πατησίων.



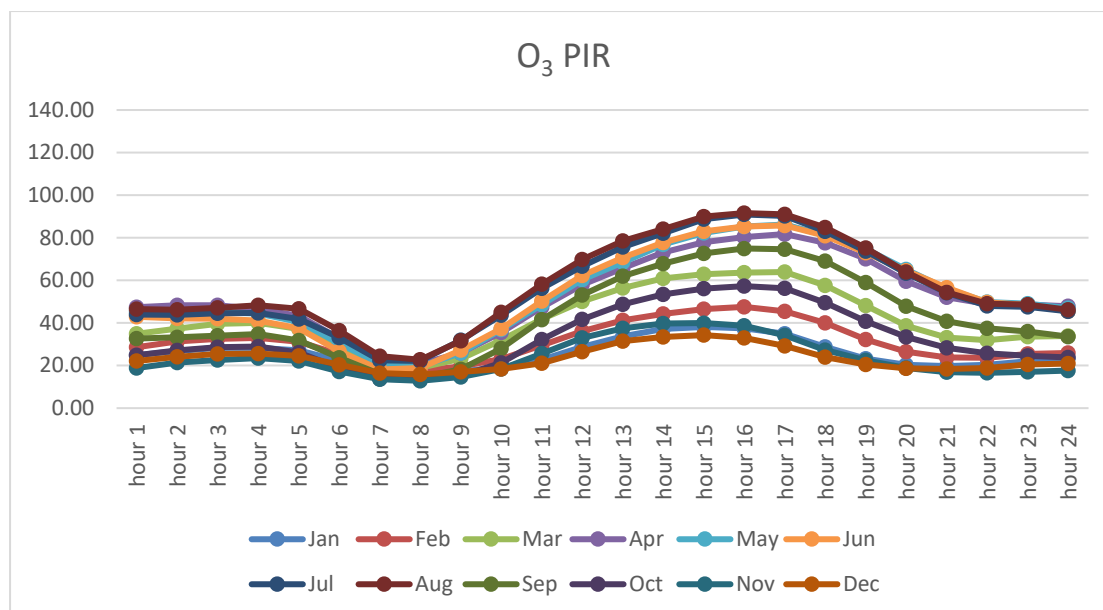
Σχήμα 4.1.3.6. Μηνιαίες συγκεντρώσεις του O₃ για τον σταθμό Αθηνάς.



Σχήμα 4.1.3.7. Μηνιαίες συγκεντρώσεις του O₃ για τον σταθμό Γεωπονική.



Σχήμα 4.1.3.8. Μηνιαίες συγκεντρώσεις του O₃ για τον σταθμό Νέα Σμύρνη.



Σχήμα 4.1.3.9. Μηνιαίες συγκεντρώσεις του O₃ για τον σταθμό Πειραιά.

4.2 Μέσες μηνιαίες τιμές συγκεντρώσεων των φωτοχημικών ρύπων

Στη παράγραφο αυτή αναλύονται οι μέσες μηνιαίες τιμές των εξεταζόμενων φωτοχημικών ρύπων, και οι μηνιαίες τάσεις των ρύπων για όλα τα χρόνια μαζί, επίσης εξετάζεται και η στατιστική σημαντικότητα των τάσεων στις περιοχές της Αθήνας για την χρονική περίοδο 1984–2017.

4.2.1 Μονοξείδιο του Αζώτου

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα για το μονοξείδιο του αζώτου.

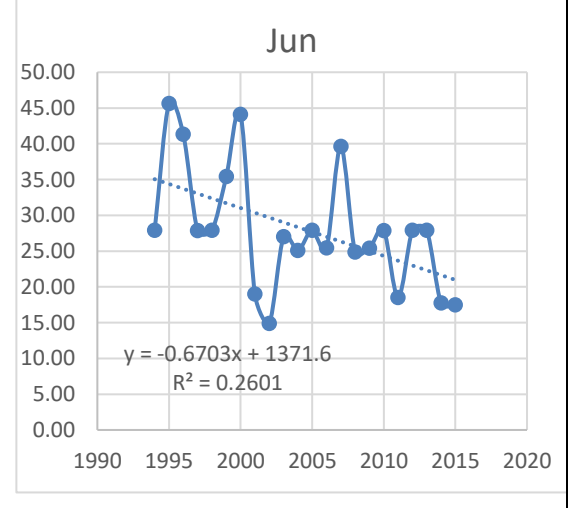
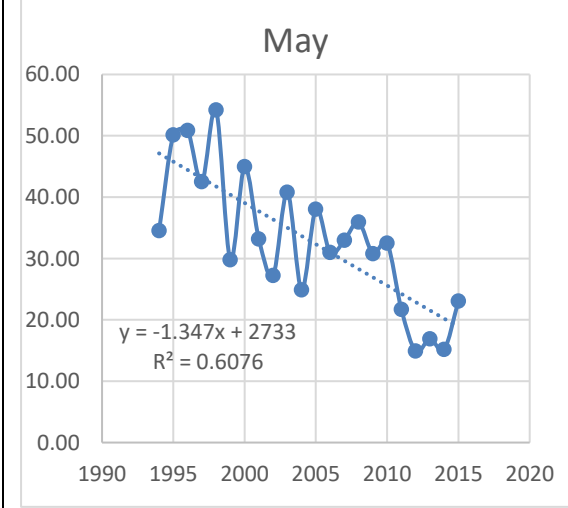
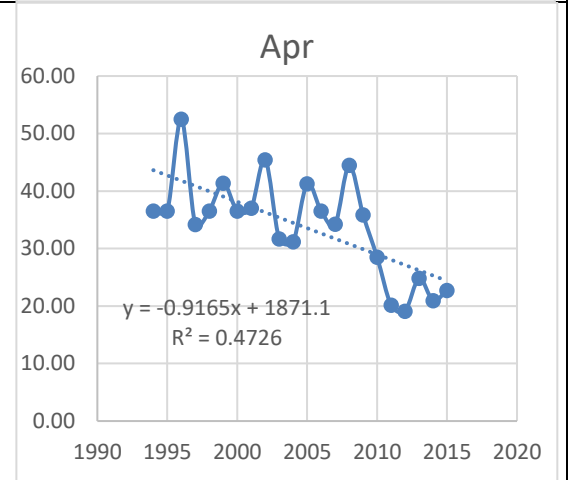
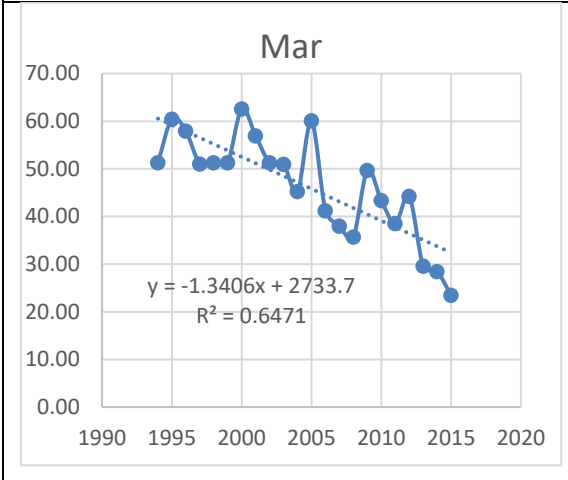
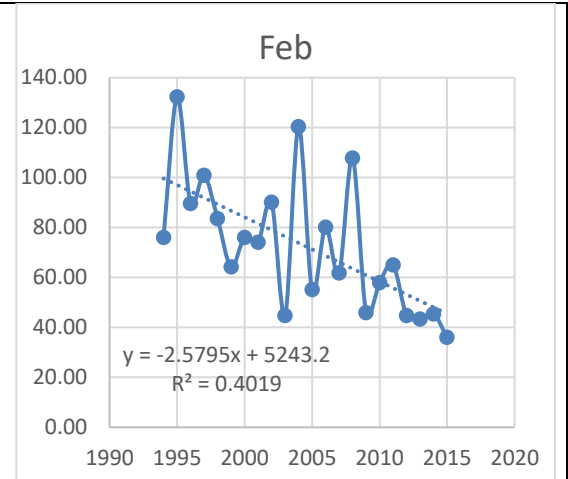
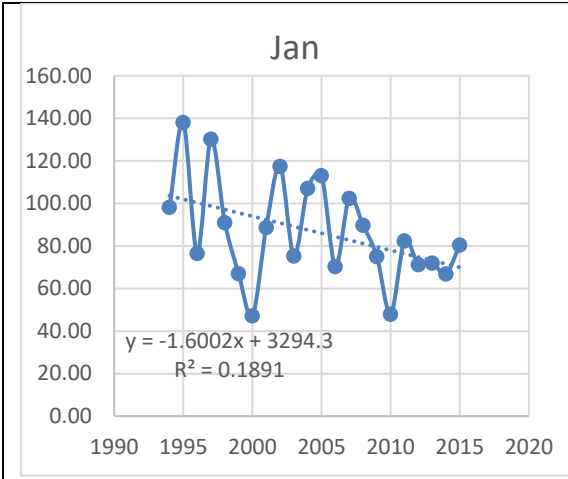
Πίνακας 4.2.1.1. Μέσες μηνιαίες τιμές συγκεντρώσεων NO (ppm).

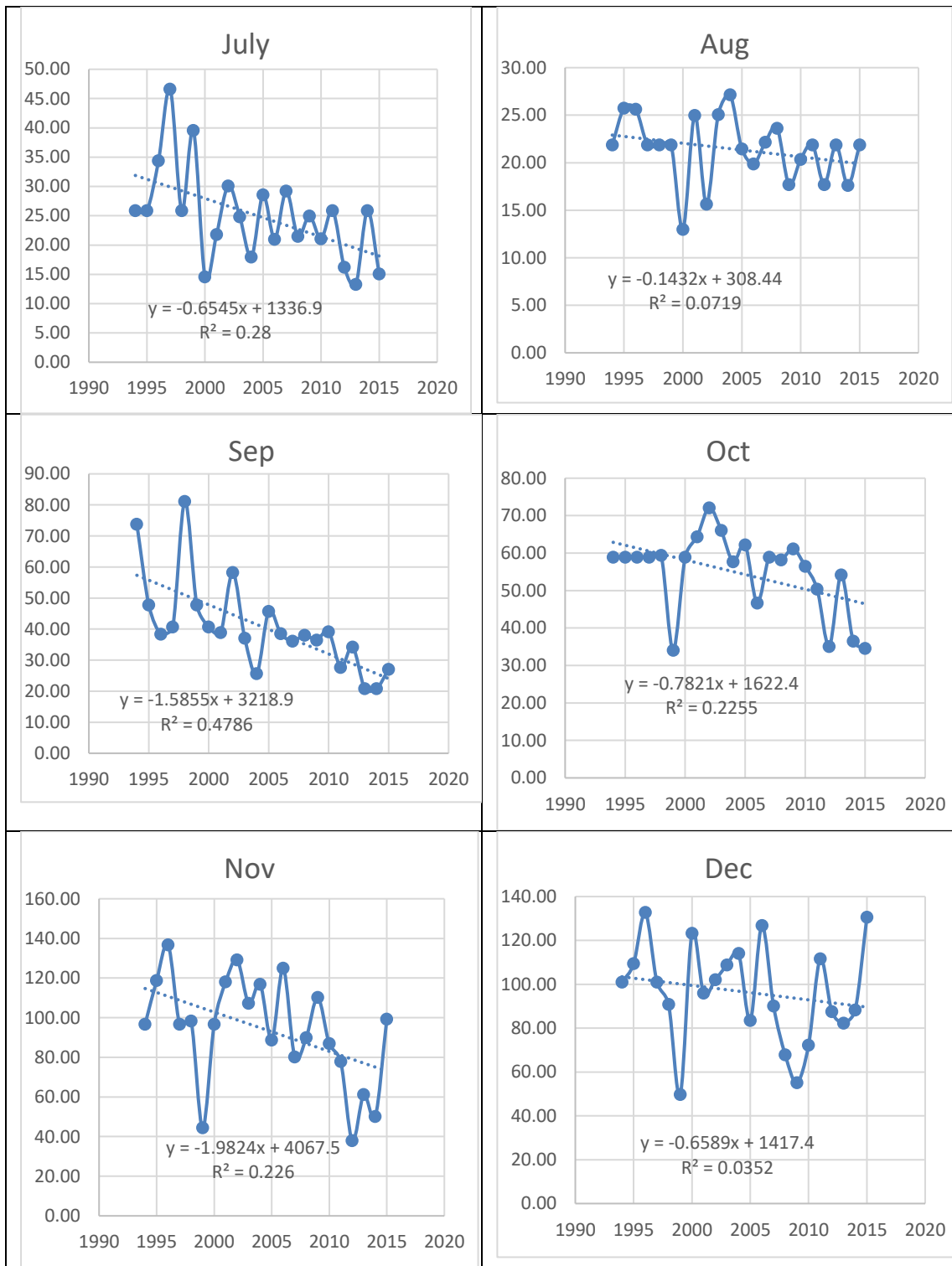
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
ARI	86.74	72.55	46.48	34.01	33.00	28.01	25.01	21.40	40.70	54.68	93.90	96.52
ATH	107.31	86.52	62.96	43.61	42.99	33.09	31.06	31.74	50.62	73.37	103.45	119.60
GEO	55.68	46.16	32.83	27.46	16.35	17.62	13.13	10.21	22.10	35.19	55.51	64.22
LIO	21.19	18.49	11.90	11.21	10.32	7.41	5.92	5.53	9.10	13.46	18.73	23.66
LYK	29.59	27.42	16.44	12.66	10.84	7.77	7.20	5.91	11.26	15.97	26.97	29.05
MAR	42.70	33.18	21.15	13.56	11.93	11.02	8.09	8.15	13.02	21.77	42.57	42.00
PAT	178.28	156.48	129.10	118.72	122.46	113.10	22.03	65.30	110.65	137.20	178.51	189.36
PER	35.54	29.98	20.60	21.92	17.55	10.93	9.23	7.97	11.67	20.25	35.26	38.06
PIR	83.41	70.22	49.58	39.88	37.76	38.35	37.03	8.08	44.16	55.58	74.54	90.79
SMY	43.65	29.18	21.31	15.72	13.55	9.44	7.68	7.29	11.98	23.26	14.57	49.05

Πίνακας 4.2.1.2. Μηνιαίες τάσεις συγκεντρώσεων NO (ppm/year). **Επιτονισμένες** αναγράφονται οι τιμές των τάσεων που είναι στατιστικά σημαντικές σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.05$ και **επιτονισμένες - υπογραμμισμένες** οι τιμές που είναι στατιστικά σημαντικές σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.01$.

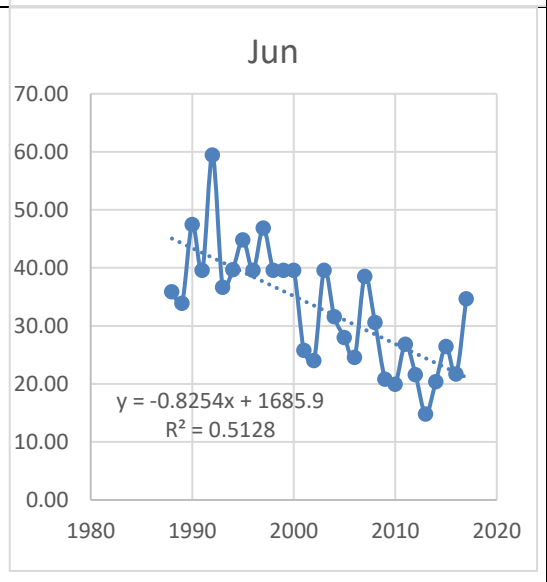
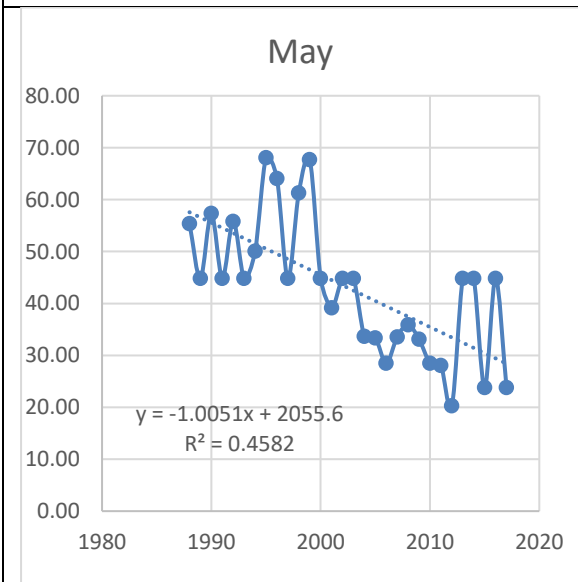
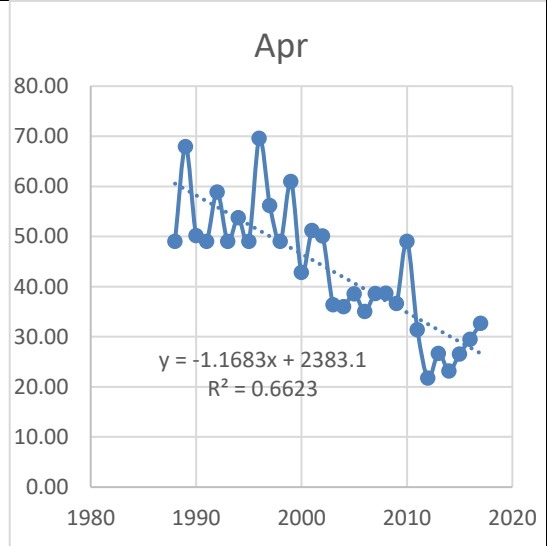
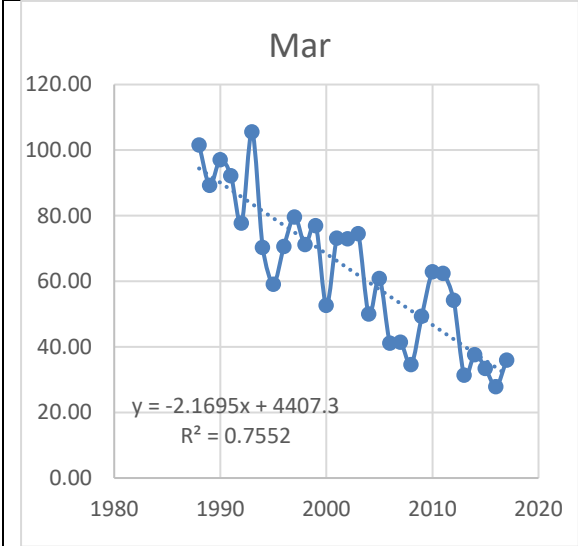
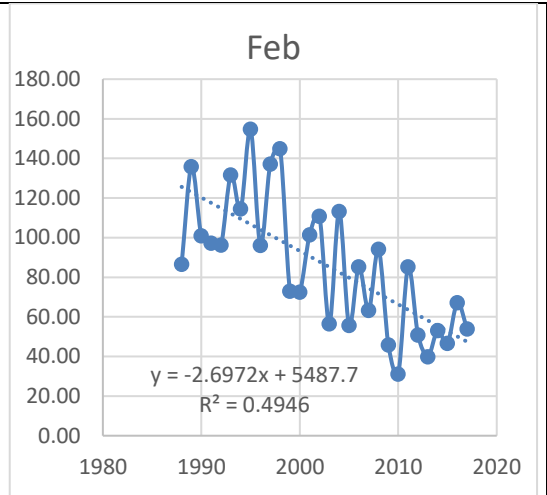
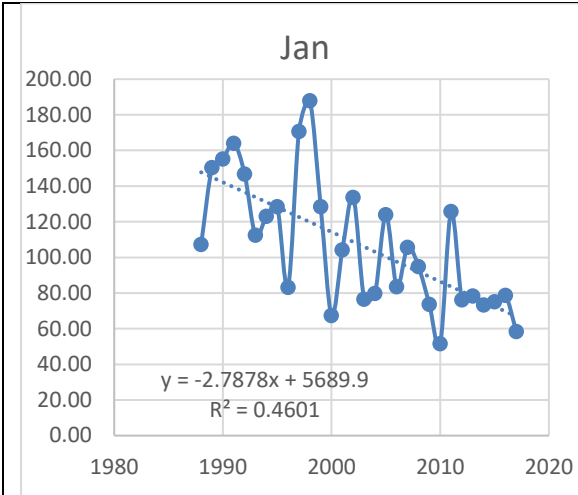
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
ARI	-1.600	-2.580	-1.341	-0.916	-1.347	-0.670	-0.654	-0.143	-1.586	-0.782	-1.982	-0.659
ATH	-2.788	-2.697	-2.169	-1.168	-1.005	-0.825	-0.658	-0.626	-1.054	-1.675	-2.543	-2.680
GEO	-0.973	-0.816	-1.191	-1.242	-0.578	-0.801	-0.694	-0.475	-0.877	-0.815	-1.029	-1.689
LIO	-0.002	-0.055	-0.068	-0.168	-0.210	-0.219	-0.183	-0.135	-0.133	-0.022	0.125	0.377
LYK	-0.719	-1.070	-0.275	-0.421	-0.266	-0.143	-0.280	-0.251	-0.521	-0.642	-0.766	-0.588
MAR	-1.315	-1.427	-0.682	-0.473	-0.521	-0.428	-0.414	-0.302	-0.412	-0.745	-1.568	-0.495
PAT	-5.486	-2.534	-3.600	-3.902	-3.864	-3.273	-2.037	-1.745	-3.492	-4.045	-4.549	-4.650
PER	-1.229	-0.772	-1.064	-1.095	-0.818	-0.682	-0.436	-0.222	-0.466	-0.939	-1.338	-1.031
PIR	-1.613	-1.338	-0.757	-0.498	-0.426	0.000	-0.138	-0.026	-0.422	-0.861	-1.151	-1.626
SMY	-0.697	-0.078	-0.161	-0.177	-0.188	-0.204	-0.174	-0.162	-0.332	-0.613	-0.779	-1.264

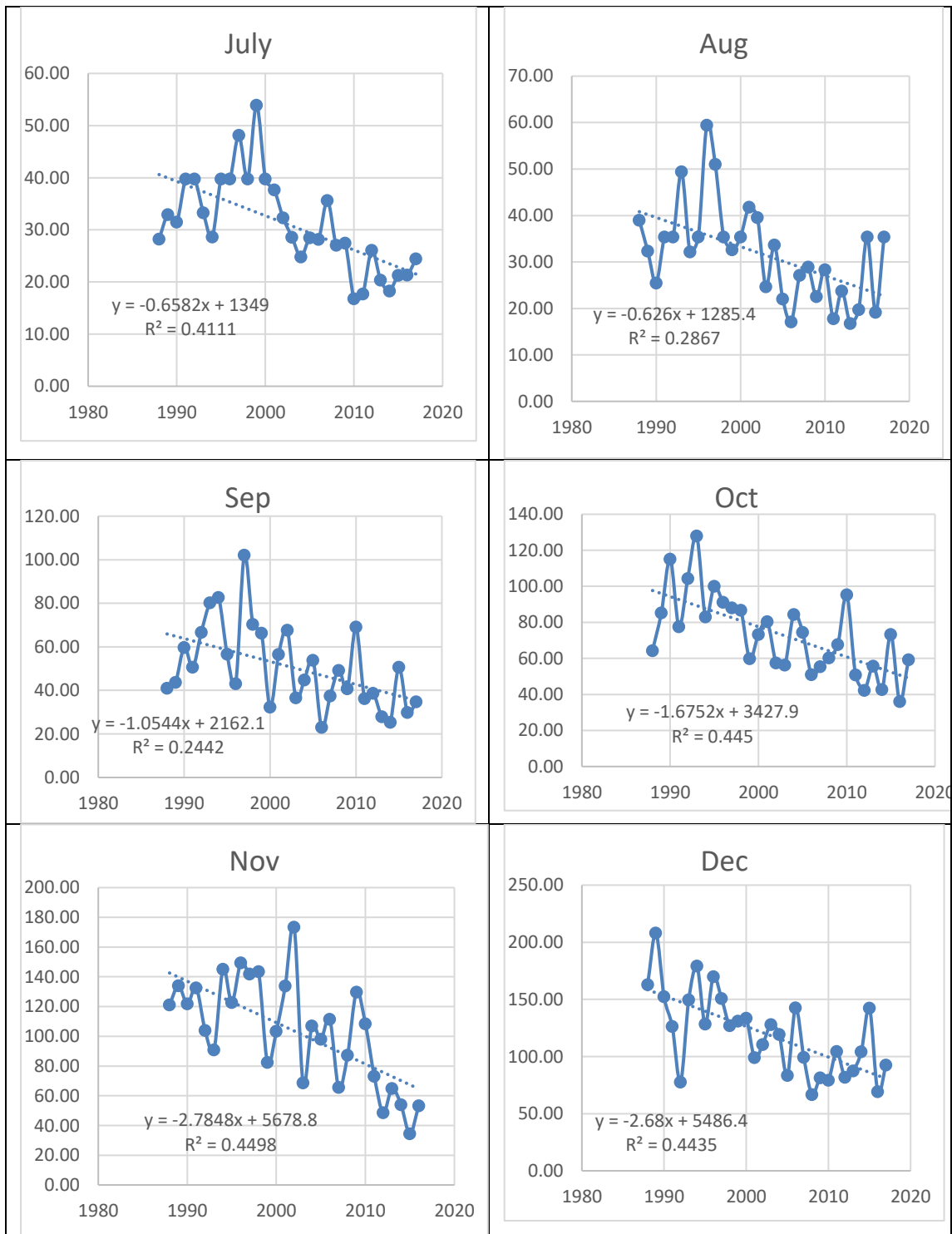
Στη συνέχεια, δίνονται τα διαγράμματα των τάσεων για τον ρύπο του μονοξειδίου του αζώτου NO για τους σταθμούς του Λεκανοπεδίου Αττικής με βάση τις χρονικές μεταβολές των συγκεντρώσεων.



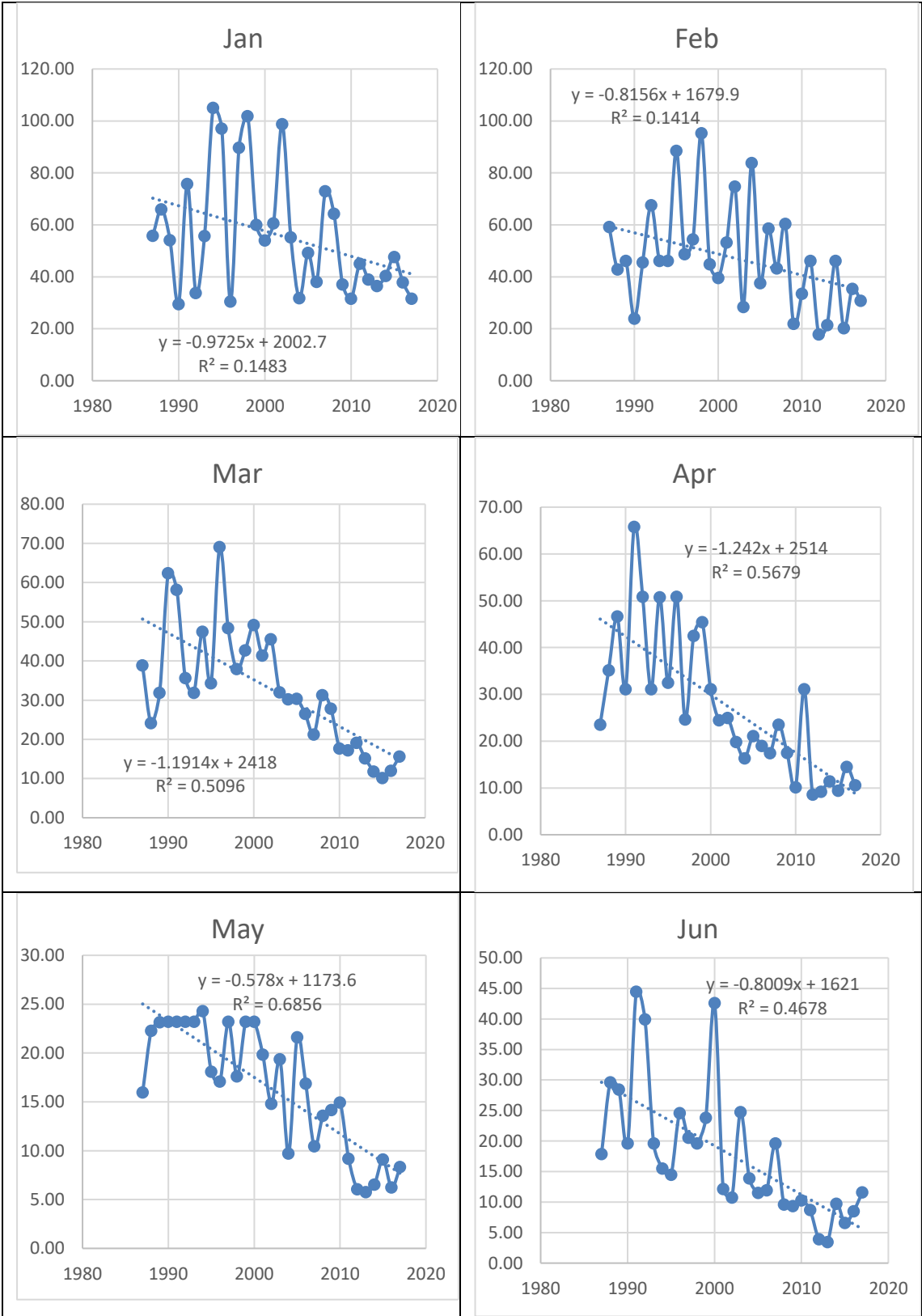


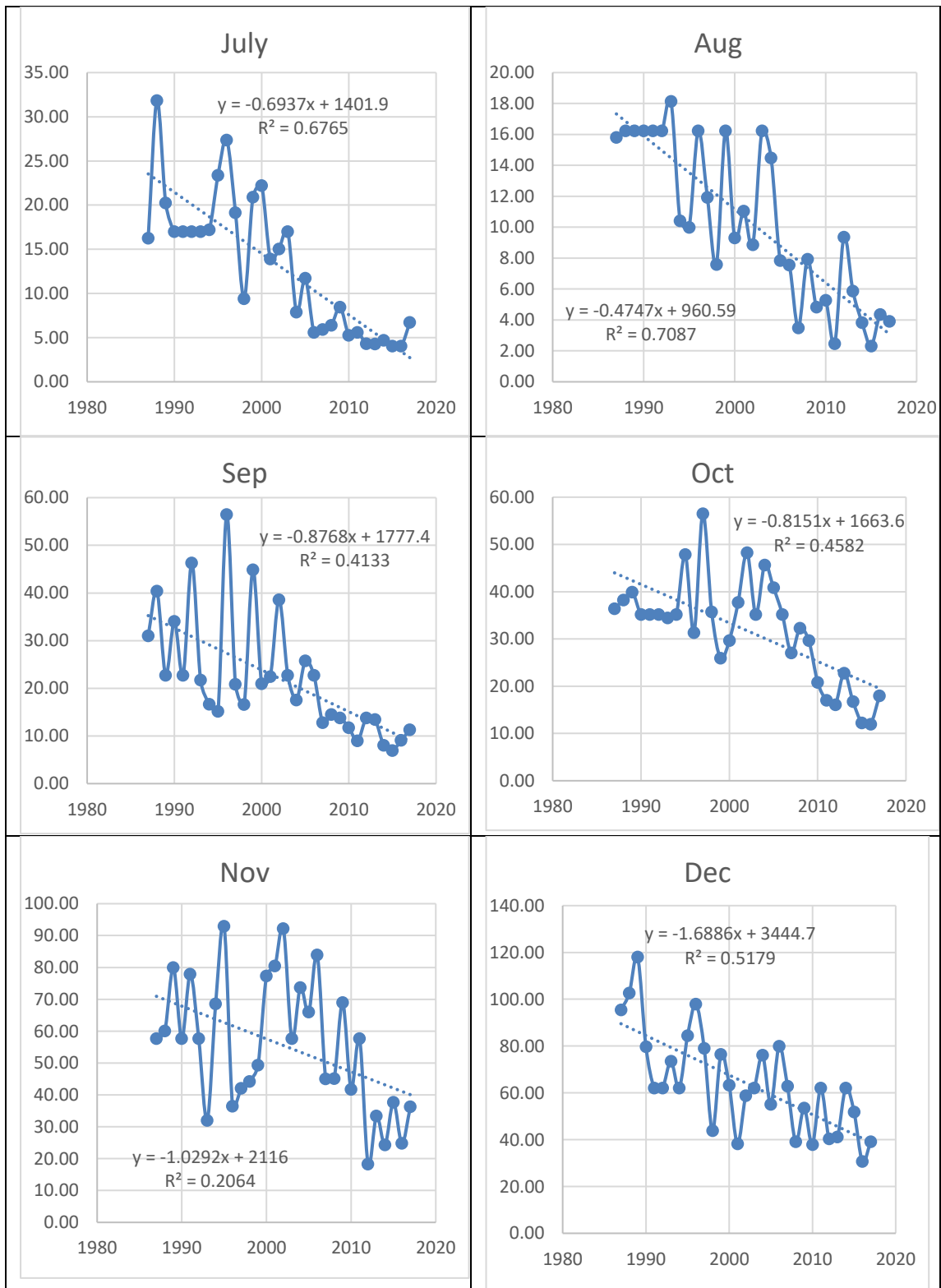
Σχήμα 4.2.2.1. Διαγράμματα μηνιαίων τάσεων του NO για τον σταθμό ARI.



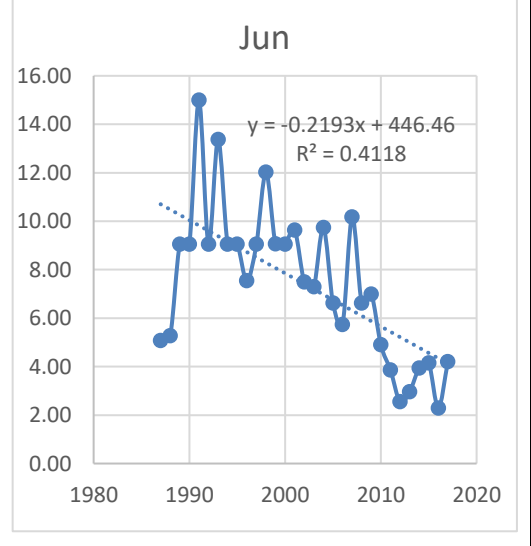
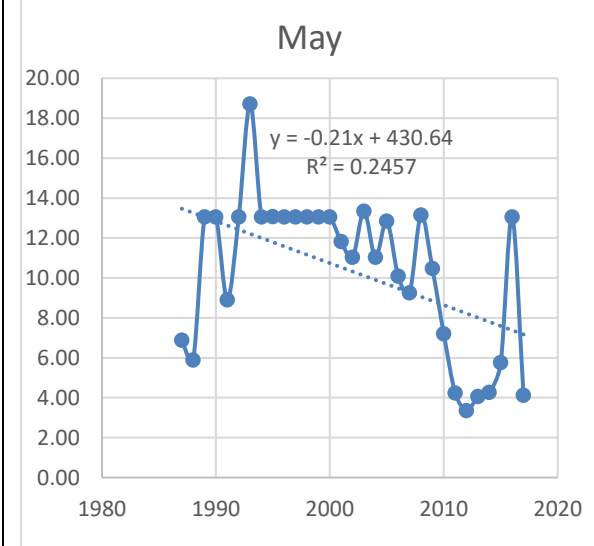
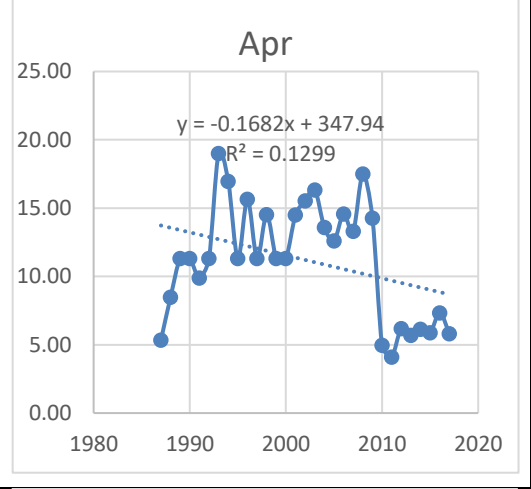
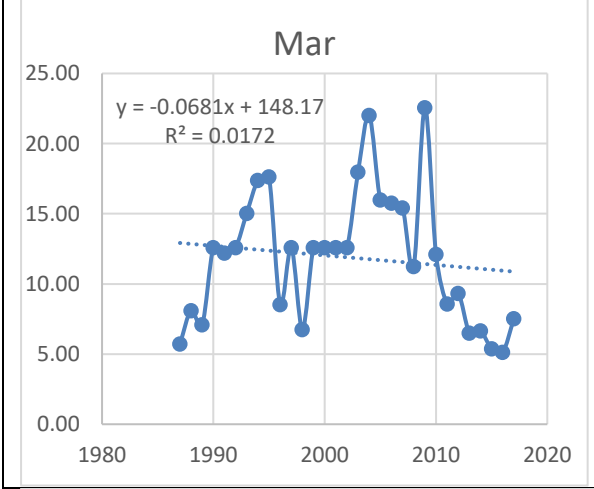
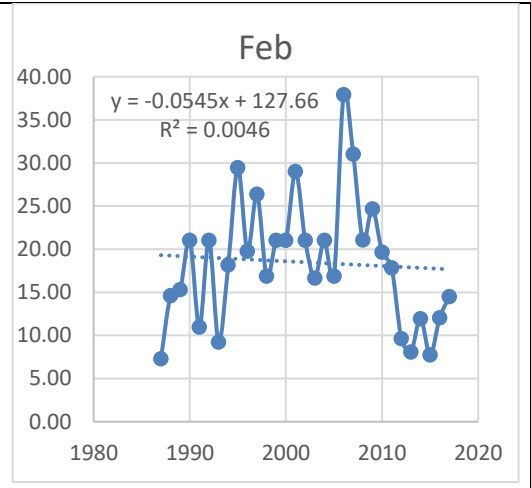
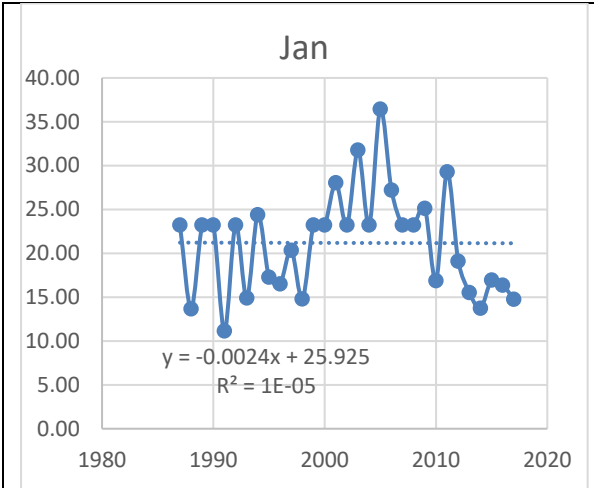


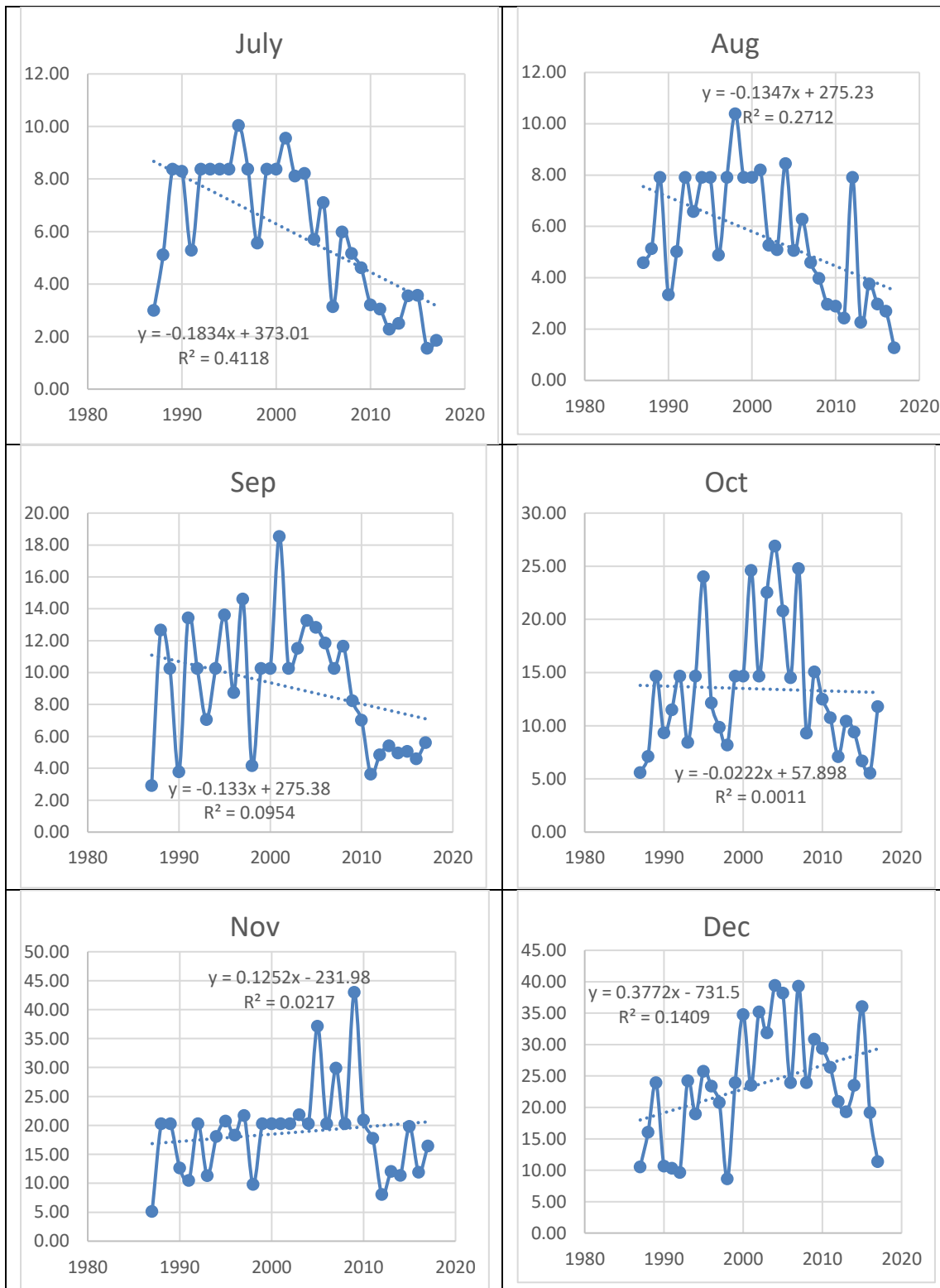
Σχήμα 4.2.2.2. Διαγράμματα μηνιαίων τάσεων του NO για τον σταθμό ΑΘΗ.



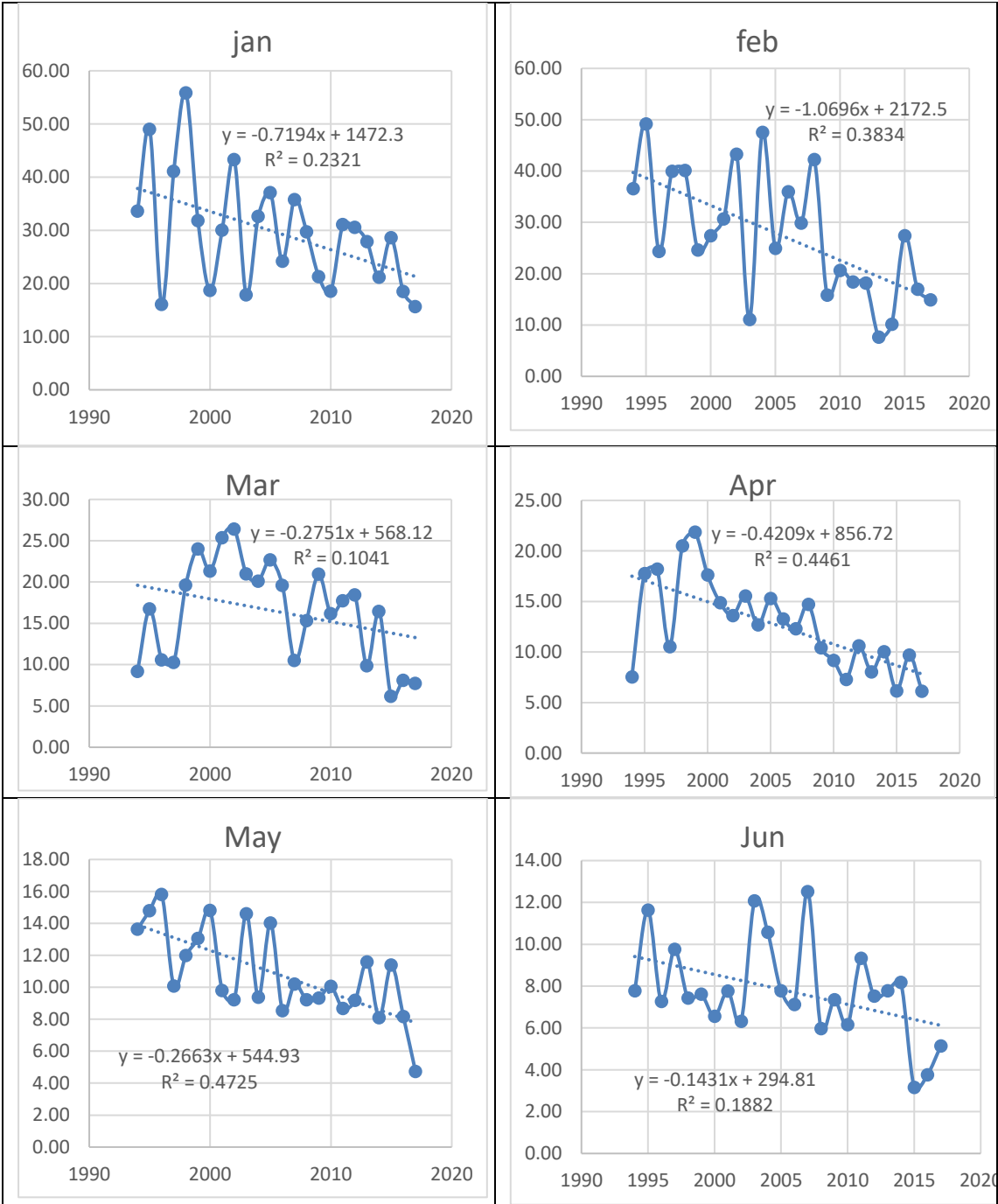


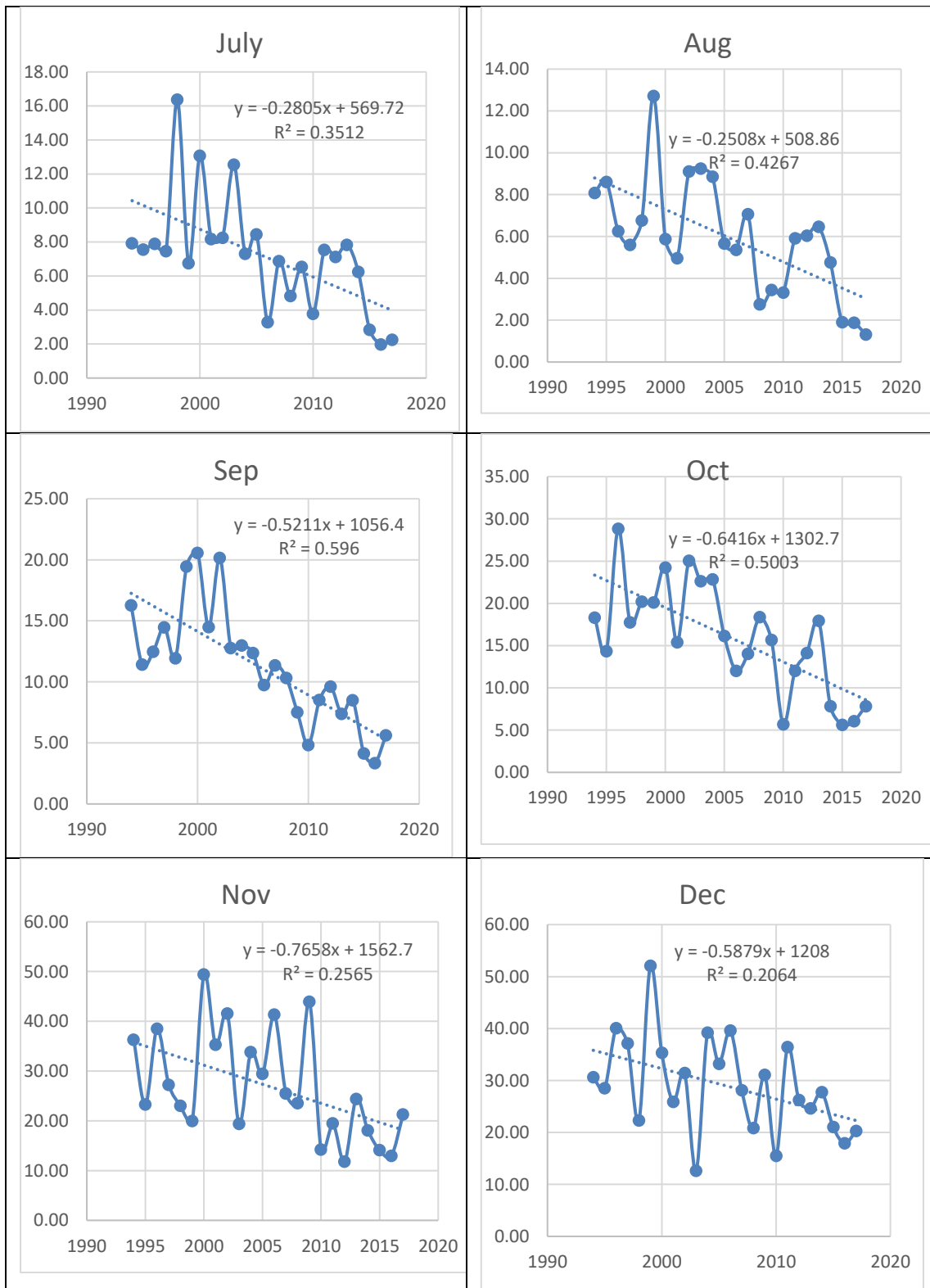
Σχήμα 4.2.2.3. Διαγράμματα μηνιαίων τάσεων του NO για τον σταθμό GEO.



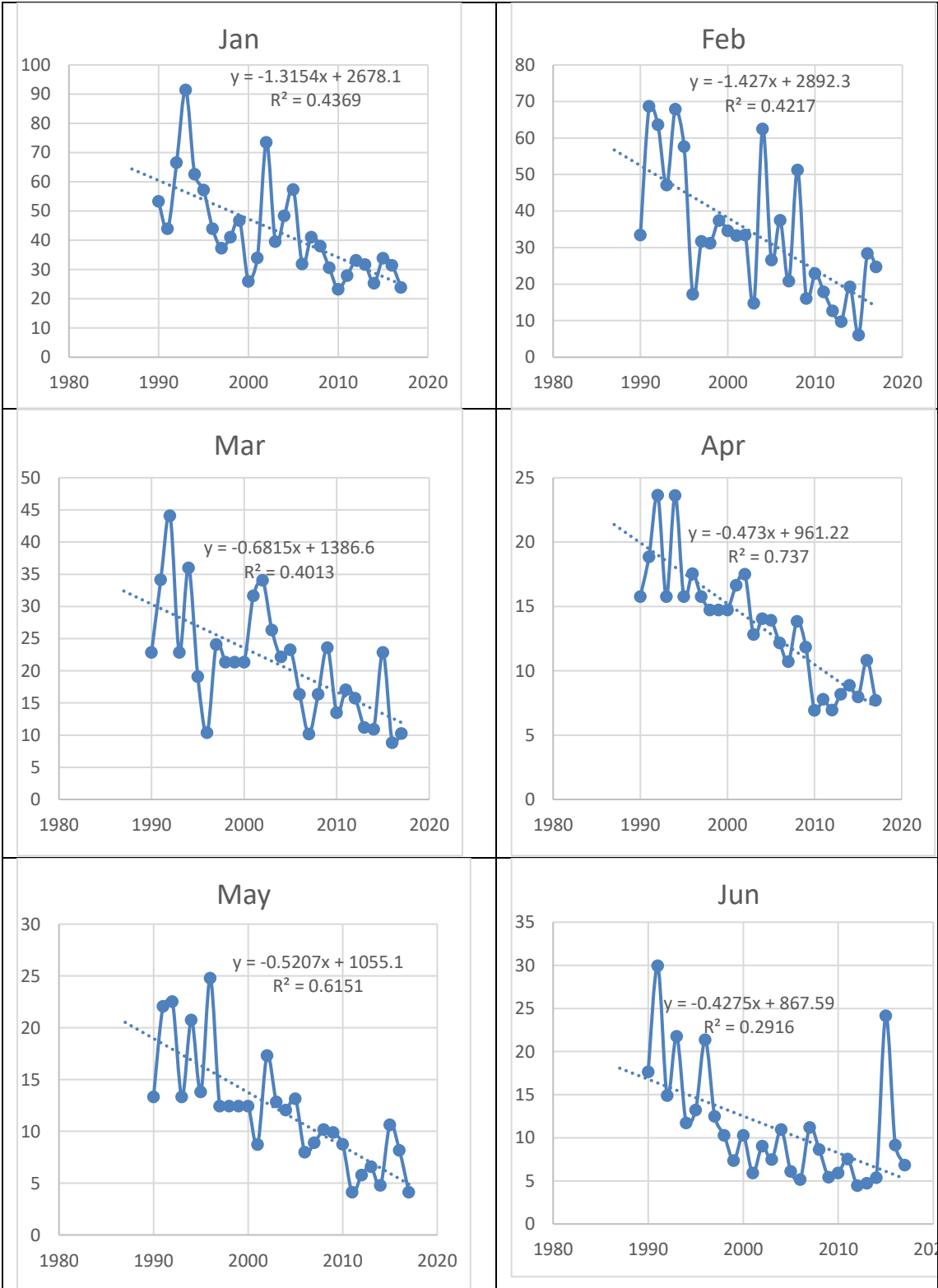


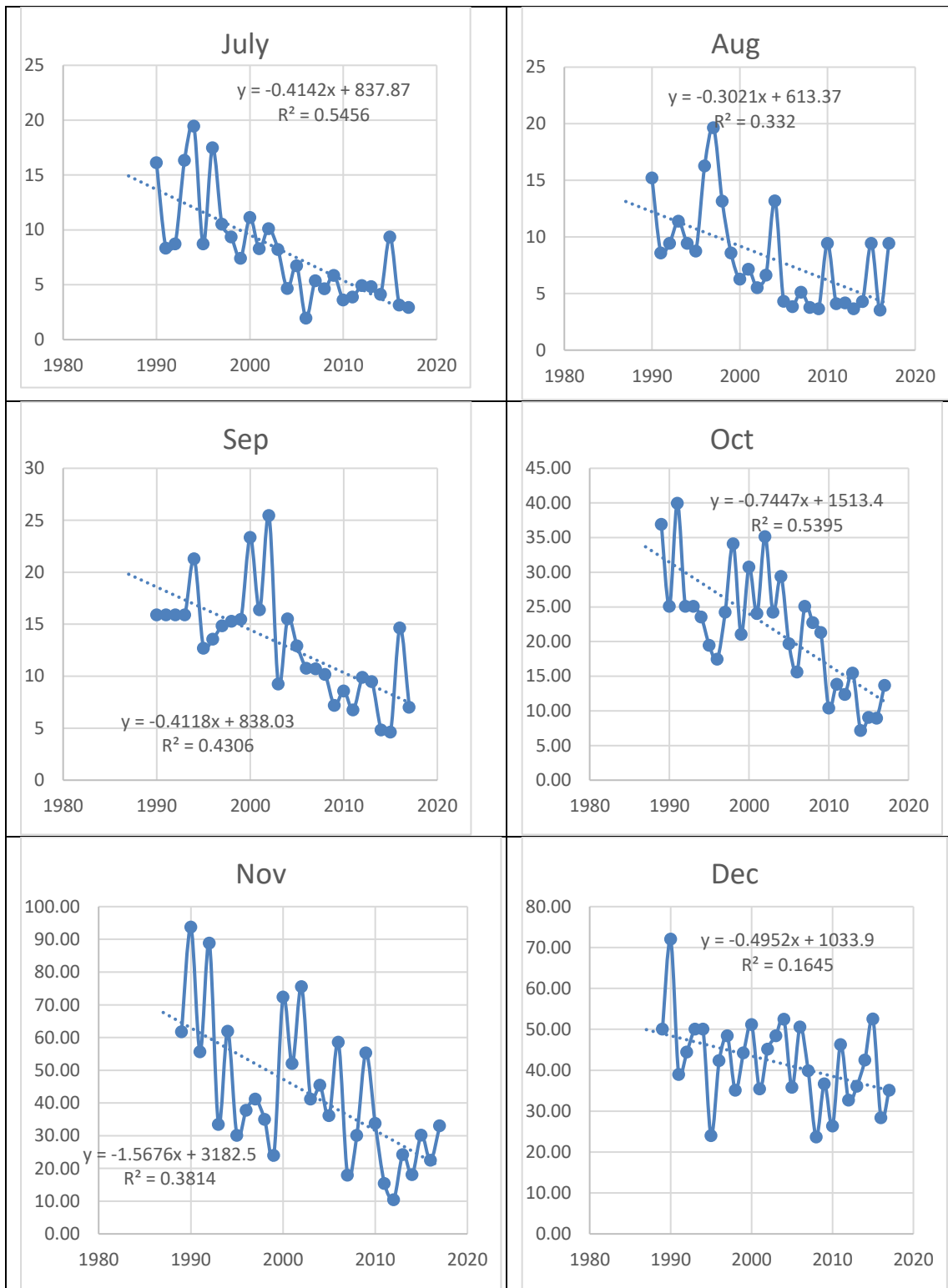
Σχήμα 4.2.2.4. Διαγράμματα μηνιαίων τάσεων του NO για τον σταθμό GEO.



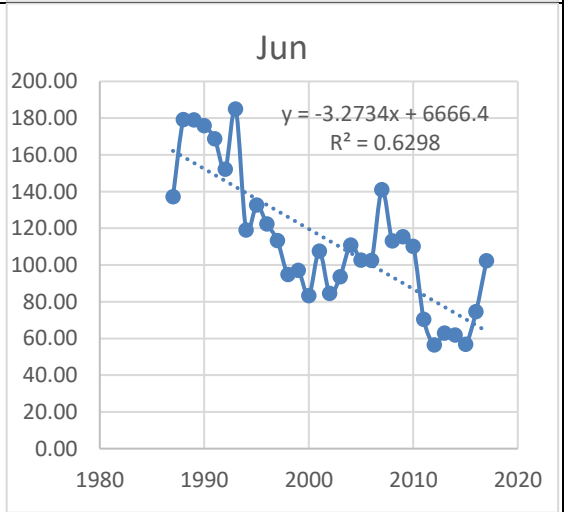
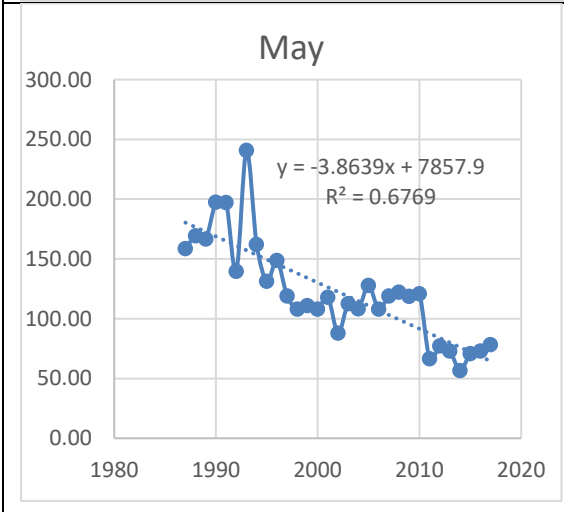
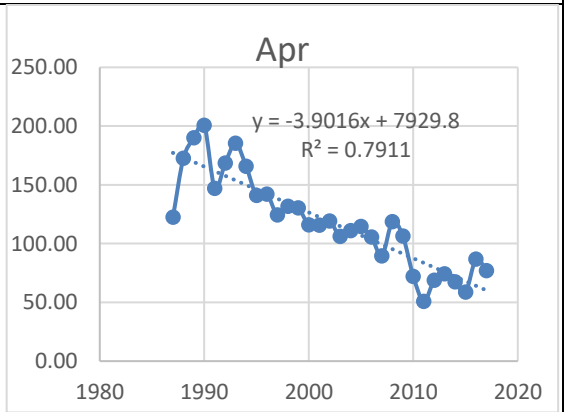
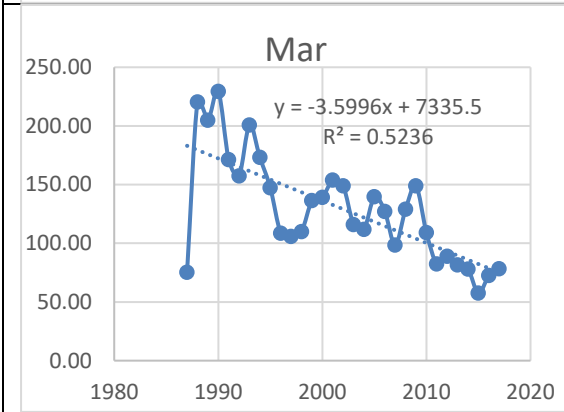
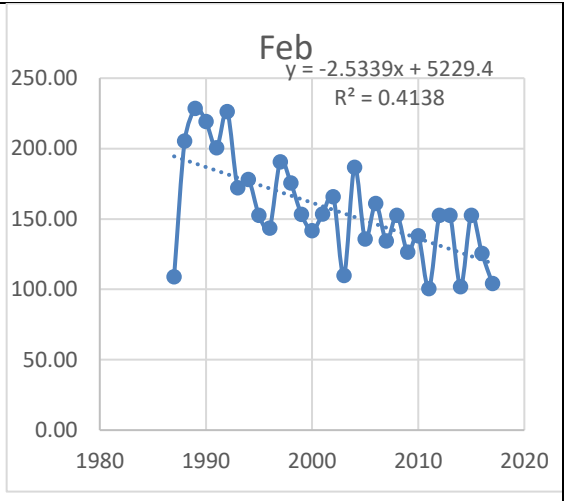
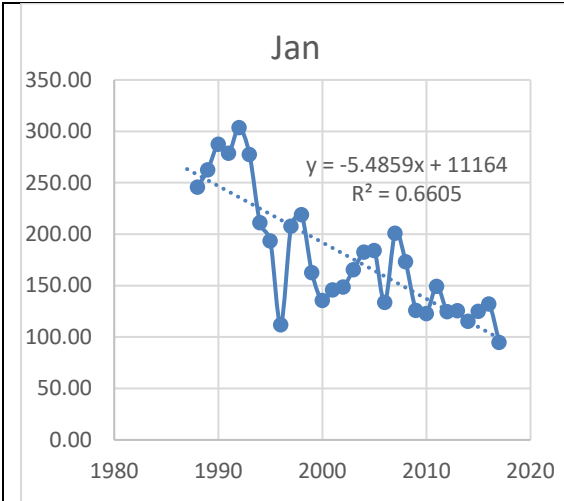


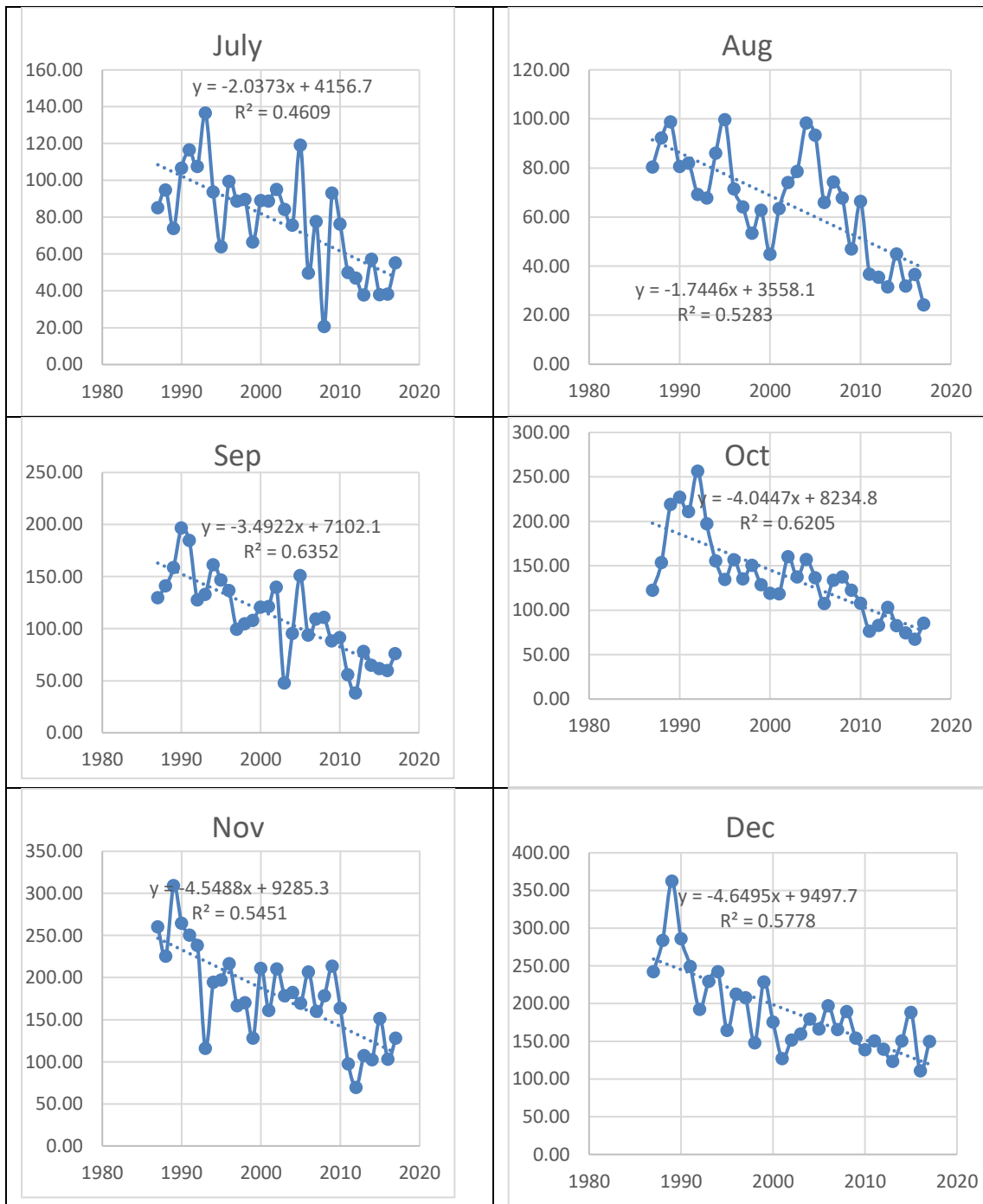
Σχήμα 4.4.4.5. Διαγράμματα μηνιαίων τάσεων του NO για τον σταθμό LYK.



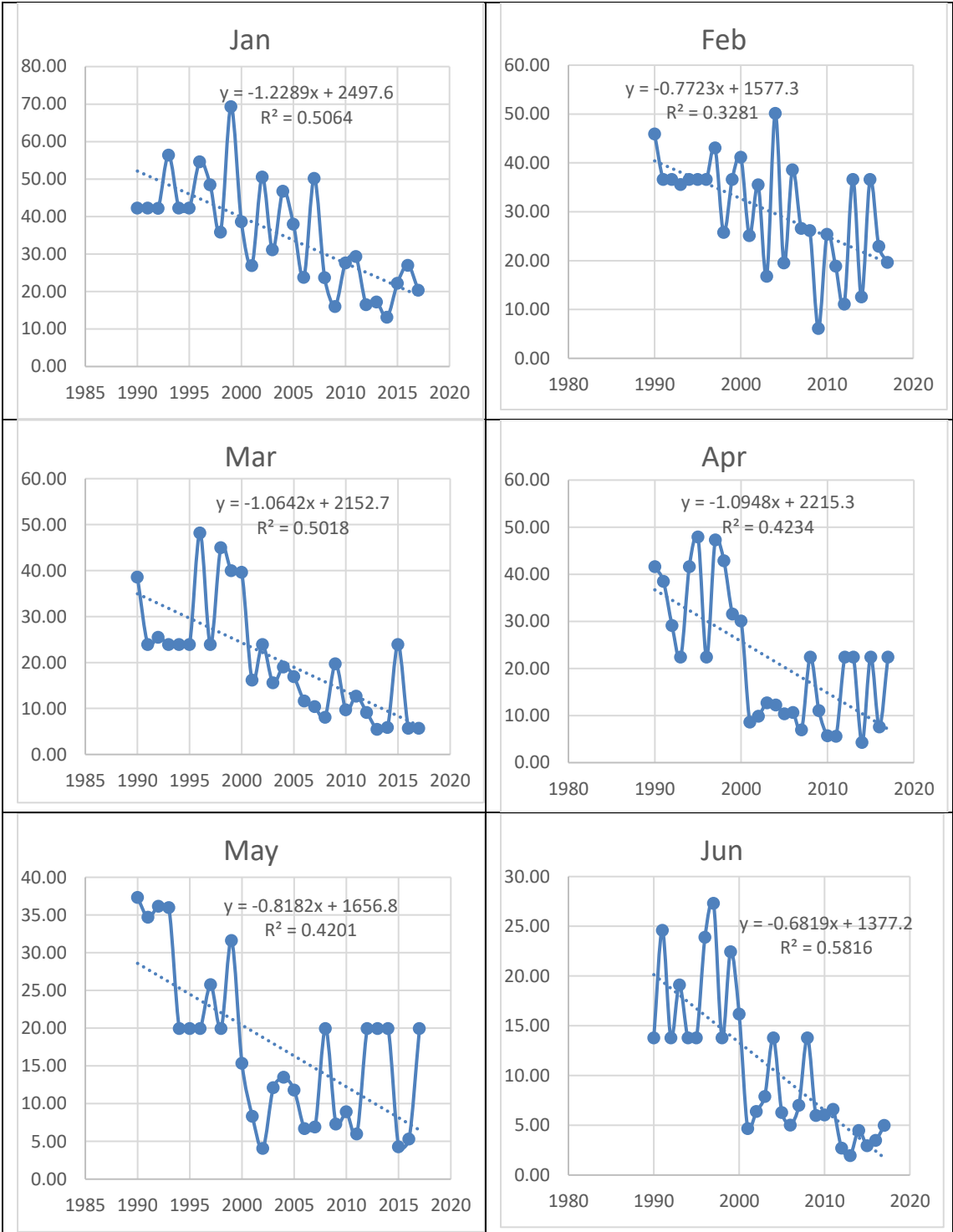


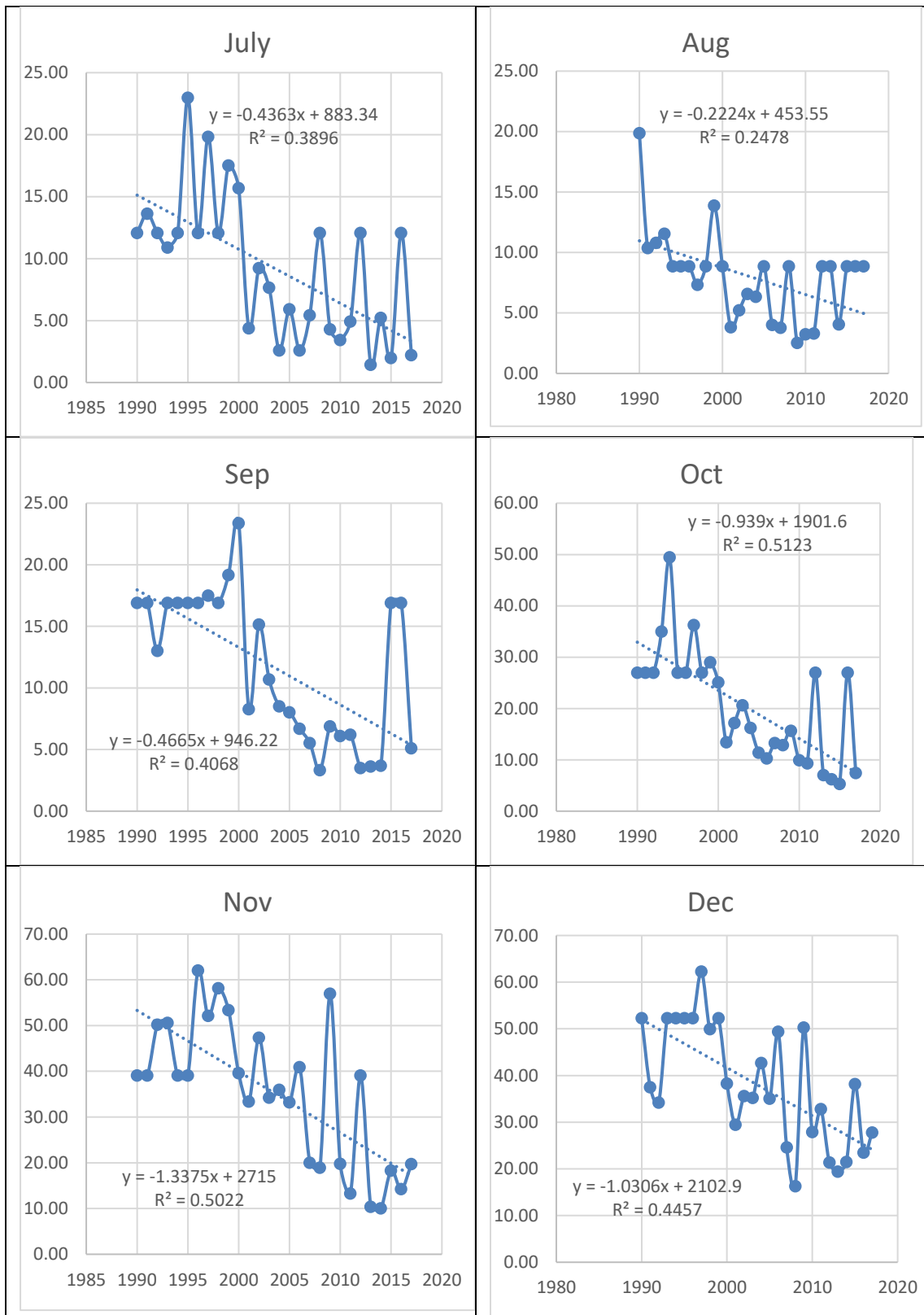
Σχήμα 4.2.2.6. Διαγράμματα μηνιαίων τάσεων του NO για τον σταθμό MAR.



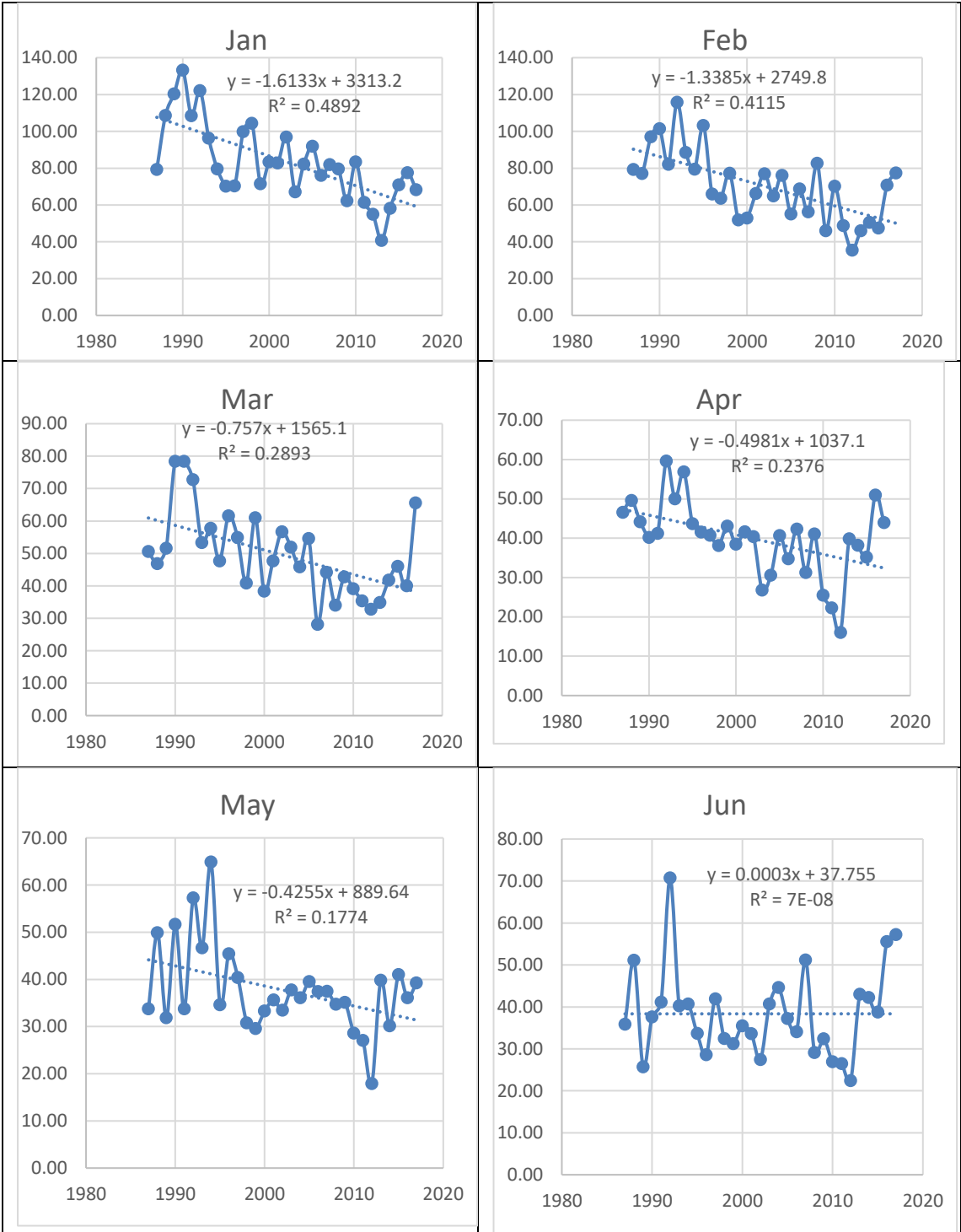


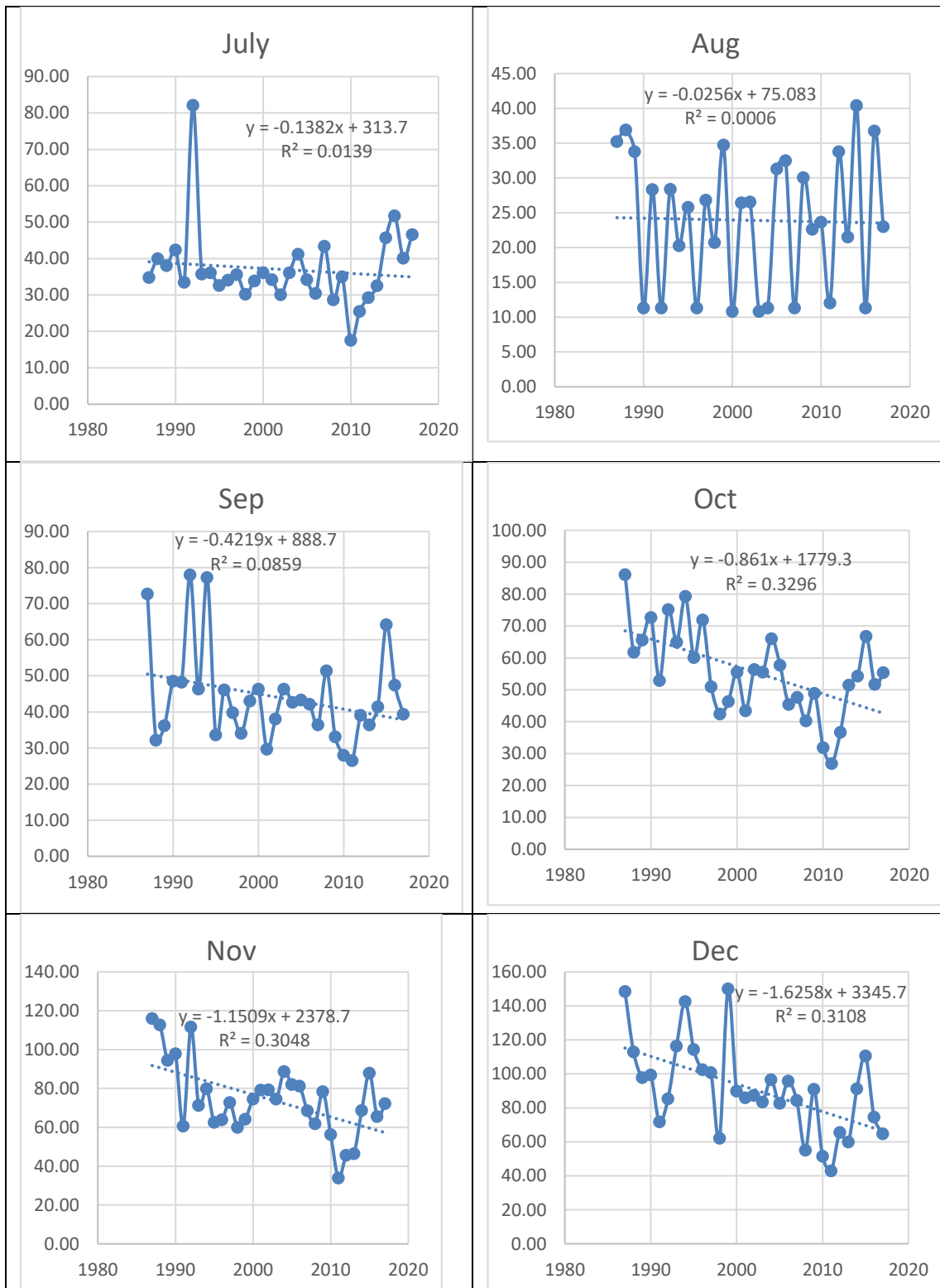
Σχήμα 4.2.2.7. Διαγράμματα μηνιαίων τάσεων του NO για τον σταθμό PAT.



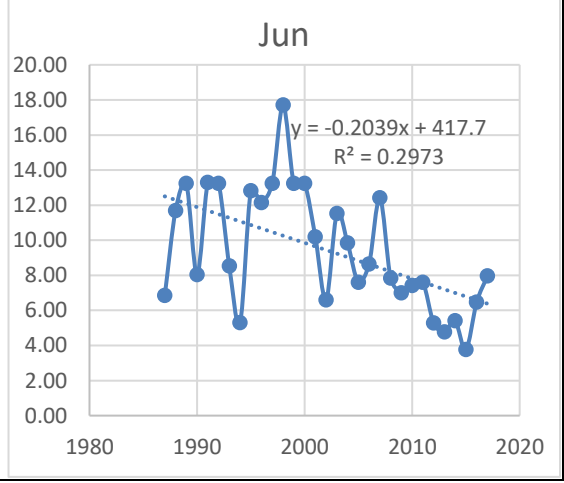
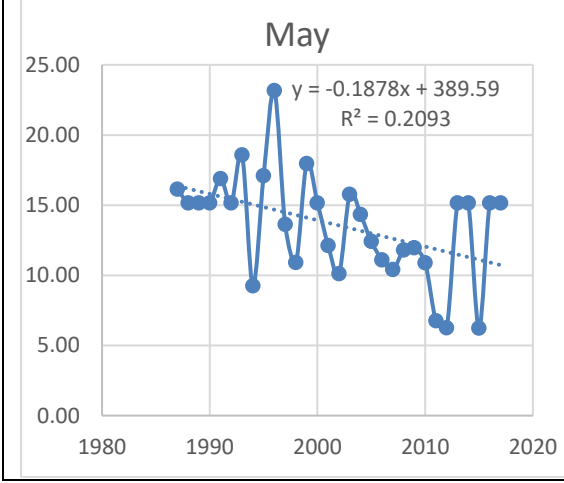
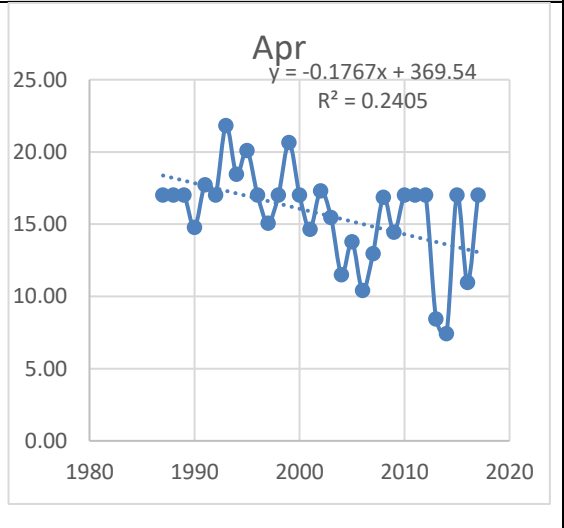
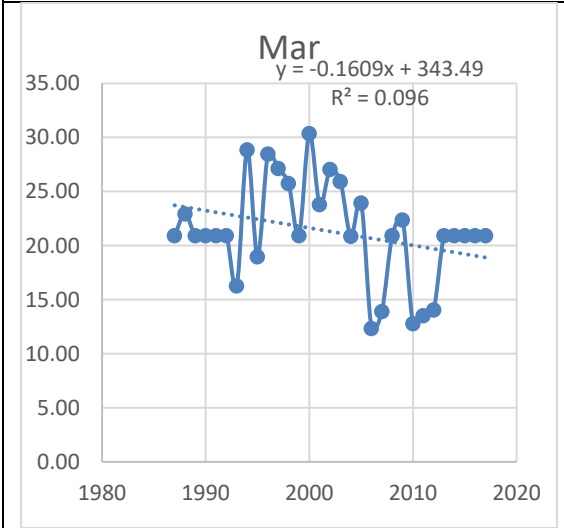
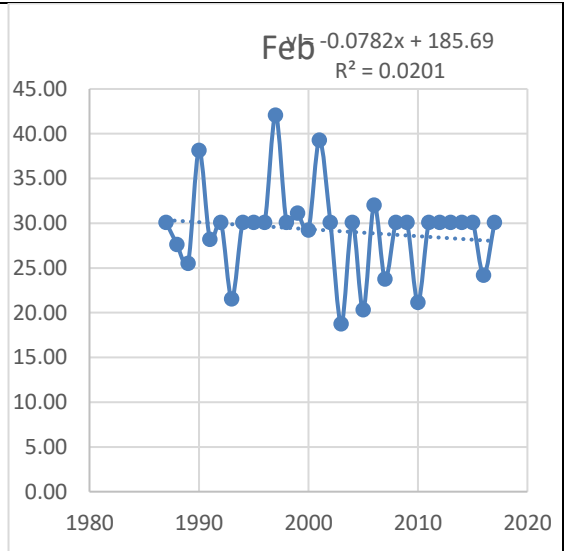
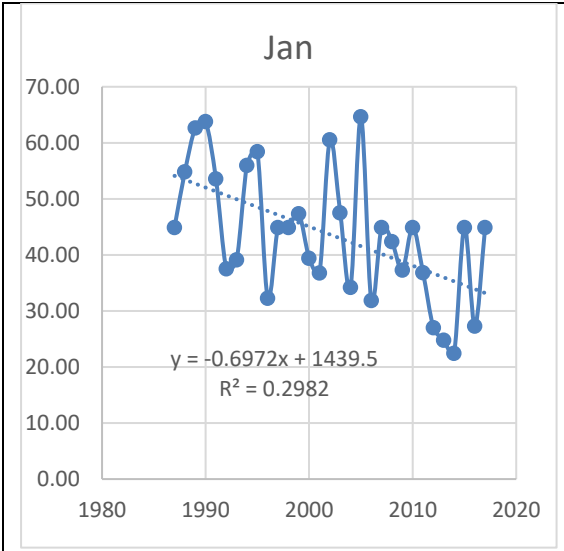


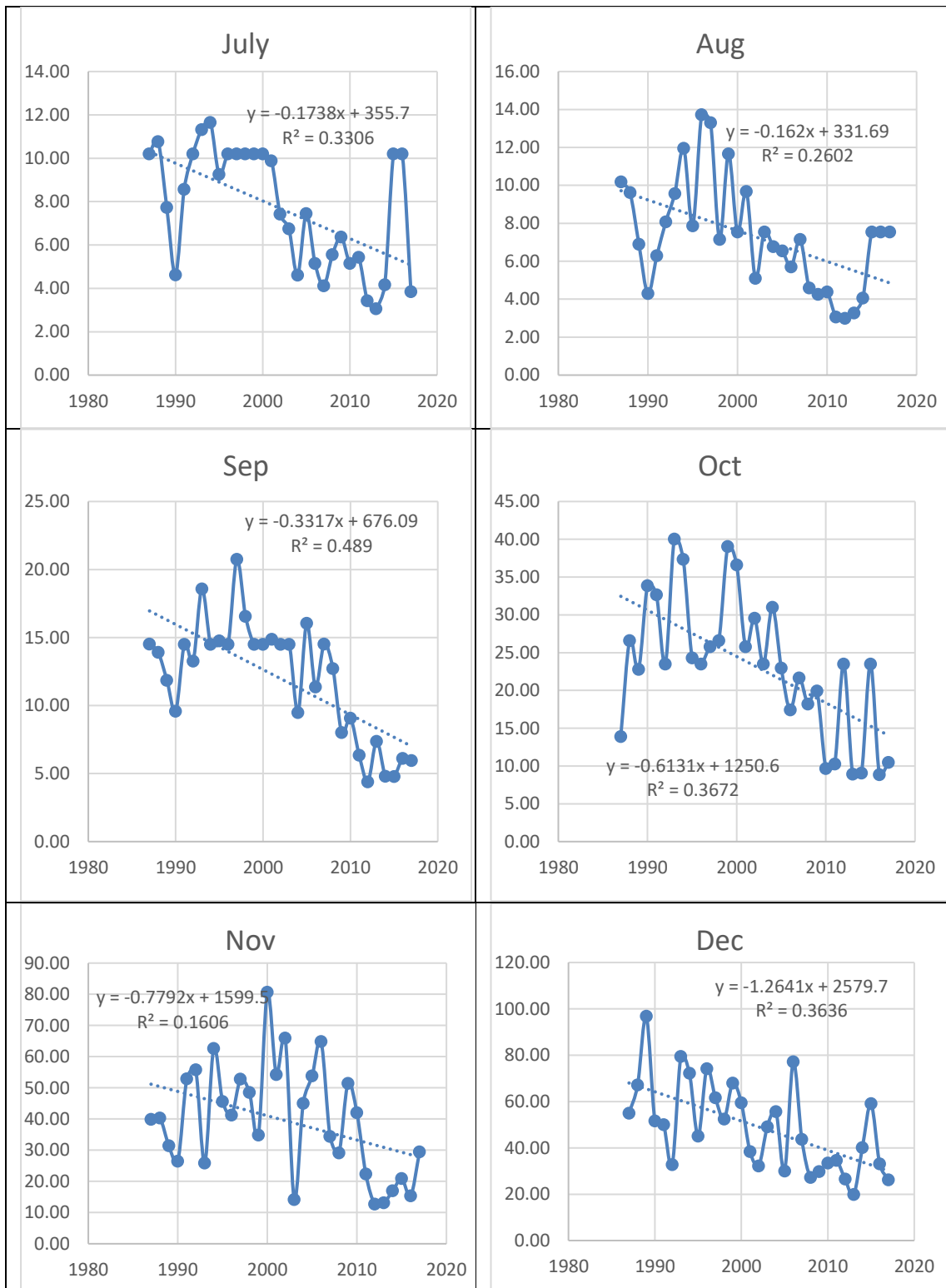
Σχήμα 4.2.2.8. Διαγράμματα μηνιαίων τάσεων του NO για τον σταθμό PER





Σχήμα 4.2.2.9. Διαγράμματα μηνιαίων τάσεων του NO για τον σταθμό PIR.





Σχήμα 4.2.2.10. Διαγράμματα μηνιαίων τάσεων του NO για τον σταθμό SMY.

Για τον ρύπο του μονοξειδίου του αζώτου (NO) σύμφωνα με τα διαγράμματα των μηνιαίων τάσεων με βάση τους σταθμούς ARI, ATH, GEO, LIO, LYK, MAR, PAT, PIR και SMY, βλέπουμε ότι οι τάσεις των ρύπων είναι μεγαλύτερες στους σταθμούς ARI, ATH, MAR, GEO, PAT, και PIR σε σχέση με τους σταθμούς LIO, LYK, PER, και SMY. Το γεγονός εκείνο οφείλεται στο ότι οι πρώτοι σταθμοί ανήκουν στην κατηγορία σταθμών αστικής κυκλοφορίας και βιομηχανικών σταθμών σύμφωνα με το σχήμα 3.2, επομένως οι πηγές ρύπανσης NO στα

αστικά κέντρα έχουν να κάνουν κυρίως με ανθρωπογενής δραστηριότητες όπου το μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού κάνει χρήση των μέσων κινητής τροχιάς, και κυρίως των αυτοκινήτων που είναι παλιάς τεχνολογίας τα οποία χρονολογούνται μεταξύ 1992-1993 (Ρεμουντάκη, 2010). Η λειτουργία αυτών των αυτοκινήτων η οποία συμβάλλει στην εκπομπή του ρύπου του NO γίνεται μέσω της χρήσης των κινητήρων ντίζελ οι οποίοι παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στο σχηματισμό των εκπομπών NOx στην ατμόσφαιρα. Οι κινητήρες ντίζελ λειτουργούν με άπαχα μίγματα τα οποία έχουν μεγάλους συντελεστές περισσειας αέρα, και άρα αυτή η διαδικασία της καύσης περιλαμβάνει περισσότερο οξυγόνο από το κανονικό, ένας άλλος λόγος είναι ότι επειδή οι κινητήρες ντίζελ έχουν μεγάλους λόγους συμπίεσης δημιουργούν μεγάλες θερμοκρασίες καύσης. Επομένως, βλέπουμε ότι σε σχέση με τους βενζινοκινητήρες τα αυτοκίνητα κατηγορίας ντίζελ συμβάλουν σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό στη παραγωγή του αερίου NO (*intechopen.com/NOx Pollutants from Diesel Vehicles and Trends in the control Technologies*). Επιπλέον επειδή στα αστικά κέντρα της Αττικής επικρατεί βιομηχανική δραστηριότητα οι συγκεντρώσεις του NO αυξάνονται περισσότερο μέσω κυρίως των εργοστασίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, των τσιμεντοβιομηχανιών και των διυλιστηρίων (Ρεμουντάκη, 2010). Οι δεύτεροι σταθμοί που προαναφέραμε ανήκουν στην κατηγορία των σταθμών υποβάθρου και έτσι δεν επηρεάζονται ισχυρά από κάποια πηγή εκπομπής ρύπων διότι βρίσκονται μακριά. Με βάση την επίδραση των μετεωρολογικών παραμέτρων στη ρύπανση από το σχήμα 3.1 του χάρτη των σταθμών μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης του ΕΔΠΑΡ στην Αττική (ΥΠΕΚΑ, 2017) παρατηρούμε ότι μεγαλύτερες τιμές των συγκεντρώσεων του NO έχουμε με ανέμους νοτιοδυτικής διεύθυνσης ,και μικρότερες με ανέμους της βορειοανατολικής διεύθυνσης. Το γεγονός αυτό αποδίδεται κυρίως στο ότι οι βορειοανατολικοί άνεμοι έχουν μεγαλύτερη μέση ταχύτητα σε σχέση με τους νοτιοδυτικούς και έτσι έχουμε διάχυση του NO (ΥΠΕΚΑ, 2017).

Σύμφωνα με τις μηνιαίες τάσεις των συγκεντρώσεων των οξειδίων του αζώτου NO για κάθε σταθμό παρατηρούμε ότι οι μέγιστες του τάσεις εμφανίζονται κατά τους χειμερινούς μήνες, δηλαδή Ιανουάριο, Φεβρουάριο, Νοέμβριο και Δεκέμβριο, ενώ τους καλοκαιρινούς μήνες Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο οι τάσεις είναι μικρές. Αυτό έχει να κάνει με το γεγονός ότι λόγω της λειτουργίας των κεντρικών θερμάνσεων τον χειμώνα όπου επικρατούν χαμηλές θερμοκρασίες, προκειμένου να υπάρχει στα σπίτια θέρμανση γίνεται χρήση είτε των κεντρικών θερμάνσεων, είτε των καμινάδων. Το πρόβλημα που δημιουργούν οι κεντρικές θερμάνσεις είναι ότι επειδή επικρατεί καύση, το πετρέλαιο που καίγεται εκπέμπει στην ατμόσφαιρα καυσαέρια τα οποία περιέχουν αιθάλη που είναι ο καπνός, οξείδια του αζώτου NOx, και υδρογονάνθρακες τα οποία συμβάλλουν στην ατμοσφαιρική ρύπανση (www.kepka.org). Επίσης, επειδή τους χειμερινούς μήνες η κυκλοφορία των εργαζομένων στις αστικές περιοχές είναι πιο έντονη κυρίως γιατί μετακινείται ο περισσότερος κόσμος προκειμένου να βρεθεί στην εργασία του σε σχέση με τους καλοκαιρινούς μήνες όπου έχουμε κυρίως άδειες των εργαζομένων με αποτέλεσμα να γίνεται το χειμώνα η μεγαλύτερη χρήση των μέσων κινητής τροχιάς στις αστικές πόλεις και άρα την εκπομπή του ρύπου NO στην ατμόσφαιρα.

Βάσει των διαχρονικών μεταβολών των ρύπων του NO παρατηρούμε ότι οι τιμές μειώνονται όσο περνάνε τα χρόνια. Αυτό σημαίνει ότι με το πέρασμα των χρόνων και καθώς εξελίσσεται η τεχνολογία έχουμε την απόσυρση των παλαιών αυτοκινήτων στα

οποία κυριαρχούσε ατελή καύση των καυσίμων που είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία του ΝΟ στην ατμόσφαιρα με καινούργια νέας τεχνολογίας αυτοκίνητα στα οποία εμφανίζονται βελτιώσεις των ήδη υπάρχοντων καταλυτικών μετατροπών (Ρεμουντάκη, 2010). Επιπλέον, τα νέα αυτοκίνητα που έχουν προωθηθεί στην αγορά χρησιμοποιούν εναλλακτικά καύσιμα (βιοκαύσιμα), που είναι και τα μόνα κατάλληλα υποκατάστατα της βενζίνης και του ντίζελ στις μεταφορές, επίσης έχουμε και την ανάπτυξη των ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Σε ό,τι έχει να κάνει με τη θέρμανση των κτιρίων τα τελευταία χρόνια έχει γίνει αντικατάσταση σε μεγάλο βαθμό των καυστήρων πετρελαίου με καυστήρες φυσικού αερίου, όπου το φυσικό αέριο είναι το καθαρότερο από τα ορυκτά καύσιμα, σε οικιακές και βιομηχανικές χρήσεις (Ρεμουντάκη, 2010).

4.2.2 Διοξείδιο του Αζώτου

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το διοξείδιο του αζώτου.

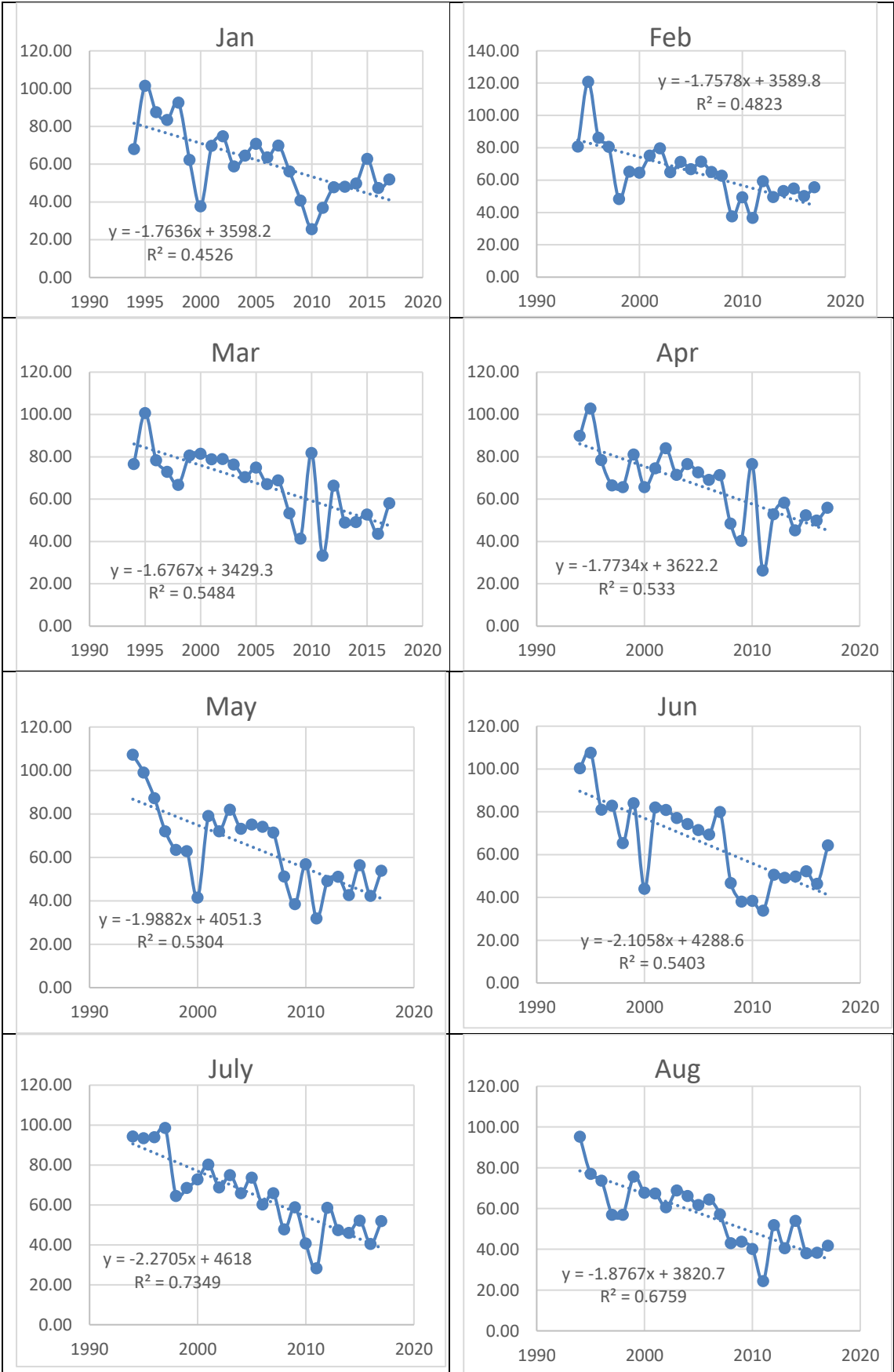
Πίνακας 4.2.3.1. Μέσες μηνιαίες τιμές συγκεντρώσεων NO₂ (ppm).

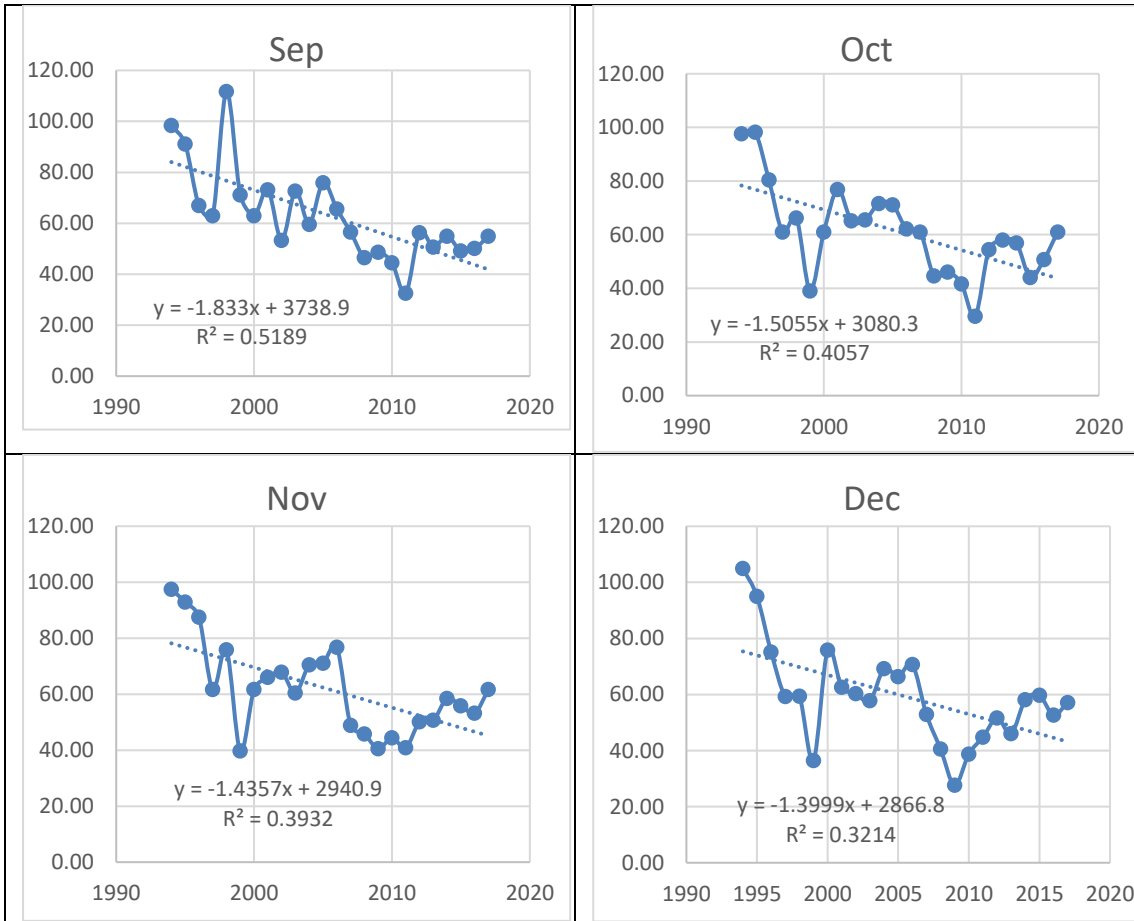
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
ARI	61.36	64.61	66.78	65.71	63.89	65.39	64.49	56.90	62.95	61.04	61.66	59.29
ATH	61.60	64.36	66.69	66.01	66.80	64.69	16.24	59.78	16.35	66.60	64.22	62.04
GEO	47.59	47.92	47.81	47.49	45.74	44.51	40.87	34.46	11.51	46.71	46.02	47.47
LIO	34.12	33.49	30.60	29.56	30.37	27.99	21.43	20.22	28.13	30.09	31.47	34.02
LYK	32.84	34.43	33.30	31.31	31.43	28.01	23.88	6.42	27.90	27.98	32.37	31.62
MAR	35.31	37.44	34.37	32.48	33.94	30.27	25.58	21.60	31.12	32.75	35.77	35.53
PAT	82.81	87.94	94.75	101.71	106.40	108.83	95.42	87.41	95.83	89.15	83.80	78.87
PER	47.75	46.99	48.55	50.60	48.36	42.73	36.63	26.58	38.58	44.93	46.28	47.34
PIR	61.52	65.68	64.06	65.34	66.28	19.31	71.66	64.77	68.78	65.42	61.50	61.06
SMY	43.46	41.04	40.91	41.17	43.43	38.53	35.27	30.16	37.88	40.20	43.59	43.71

Πίνακας 4.2.3.2. Μηνιαίες τάσεις συγκεντρώσεων NO₂ (ppm/year). **Επιτονισμένες** αναγράφονται οι τιμές των τάσεων που είναι στατιστικά σημαντικές σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.05$ και **επιτονισμένες - υπογραμμισμένες** οι τιμές που είναι στατιστικά σημαντικές σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.01$.

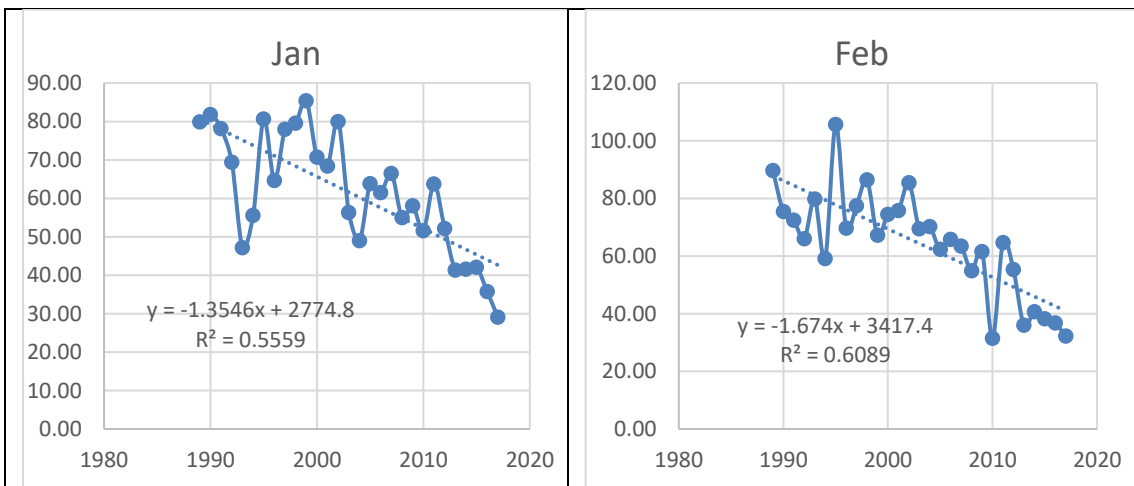
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
ARI	-1.764	-1.758	-1.677	-1.773	-1.988	-2.106	-2.271	-1.877	-1.833	-1.506	-1.436	-1.400
ATH	-1.355	-1.674	-1.693	-1.643	-1.944	-1.508	-1.205	-1.048	-1.416	-1.753	-1.612	-1.353
GEO	-0.409	-0.582	-0.526	-0.722	-0.611	-0.599	-0.734	-0.823	-0.662	-0.648	-0.487	-0.721
LIO	-0.044	0.123	0.053	-0.043	-0.243	-0.329	-0.108	-0.292	-0.196	-0.088	0.290	-0.070
LYK	-0.745	-0.789	-0.350	-0.679	-0.675	-0.471	-0.744	-0.688	-0.866	-0.697	-0.905	-0.692
MAR	-0.147	-0.466	-0.306	-0.270	-0.660	-0.445	-0.367	-0.462	-0.528	-0.680	-0.365	-0.303
PAT	-1.438	-1.254	-1.538	-1.773	-1.717	-1.771	-1.420	-1.773	-1.679	-1.756	-1.255	-1.071
PER	-1.423	-1.124	-1.420	-1.343	-1.783	-1.433	-1.319	-0.683	-1.014	-1.566	-0.789	-1.081
PIR	-1.251	-1.485	-1.363	-0.904	-0.887	0.127	-0.872	-0.695	-1.293	-1.291	-1.009	-0.992
SMY	0.227	0.409	0.146	-0.274	-0.532	-0.518	-0.506	-0.636	-0.272	-0.177	0.277	0.195

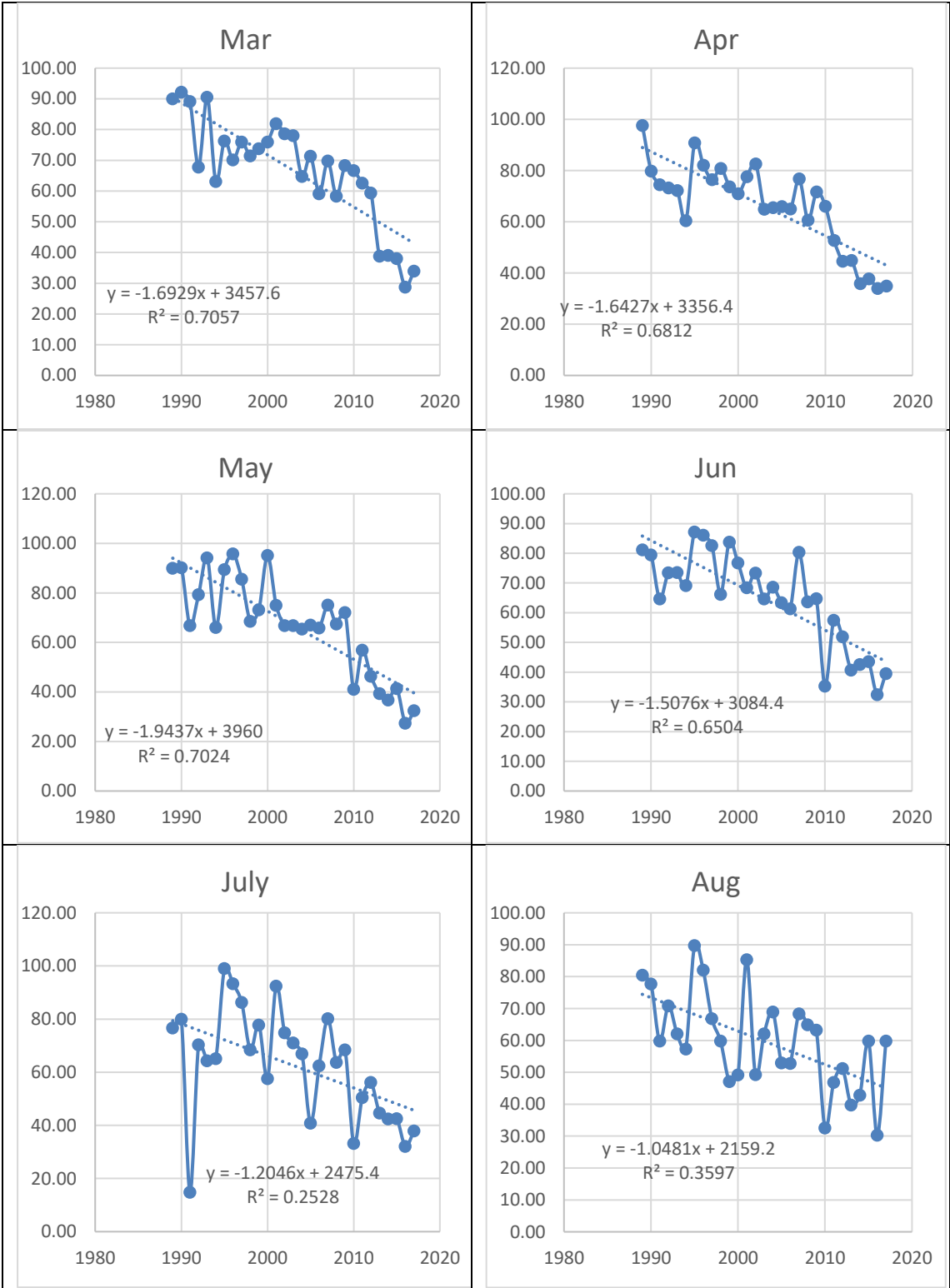
Στη συνέχεια δίνονται τα αντίστοιχα διαγράμματα των τάσεων για το ρύπο του διοξειδίου του αζώτου NO₂ για κάθε σταθμό στην Αθήνα με βάση τις χρονικές μεταβολές για τη περίοδο 1984-2017.

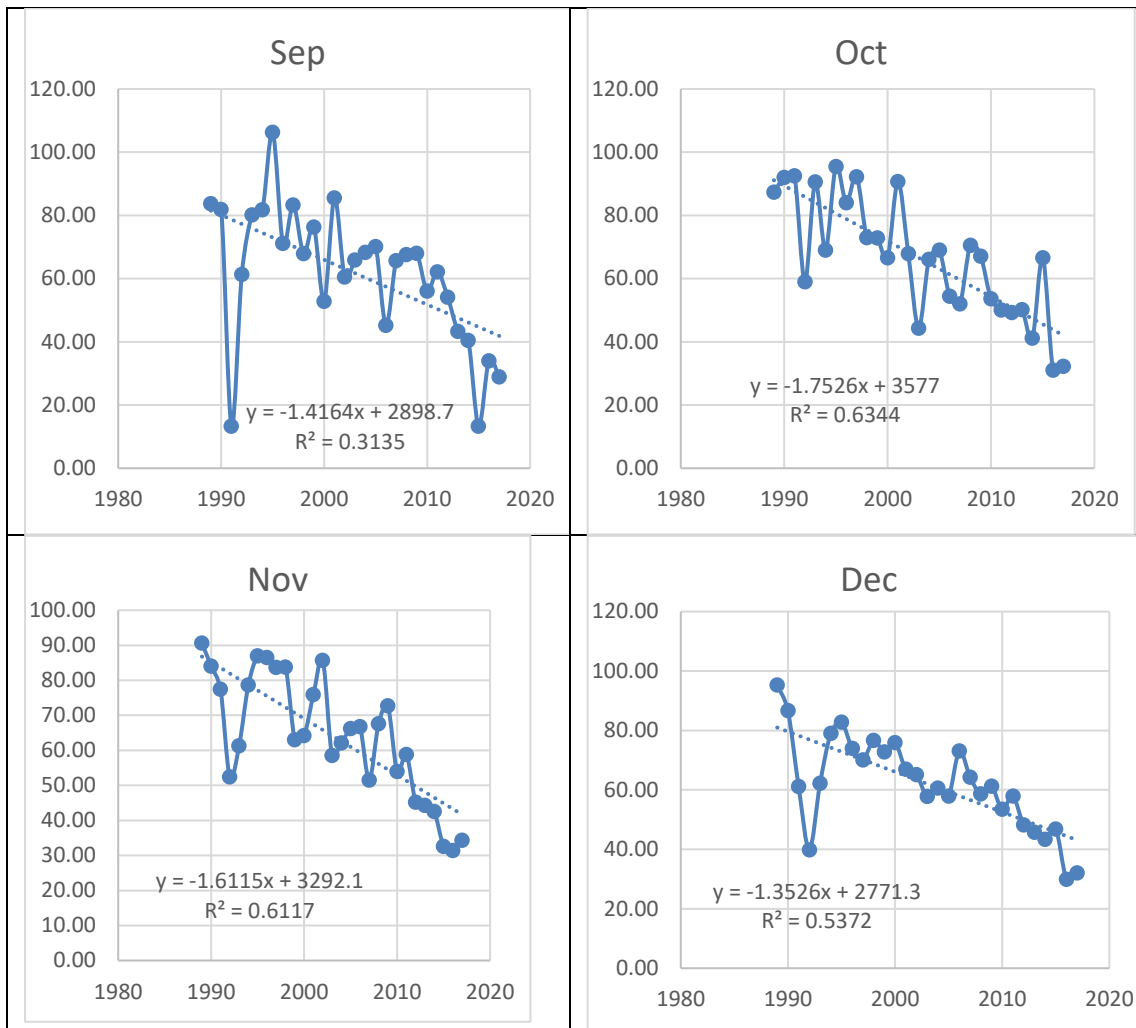




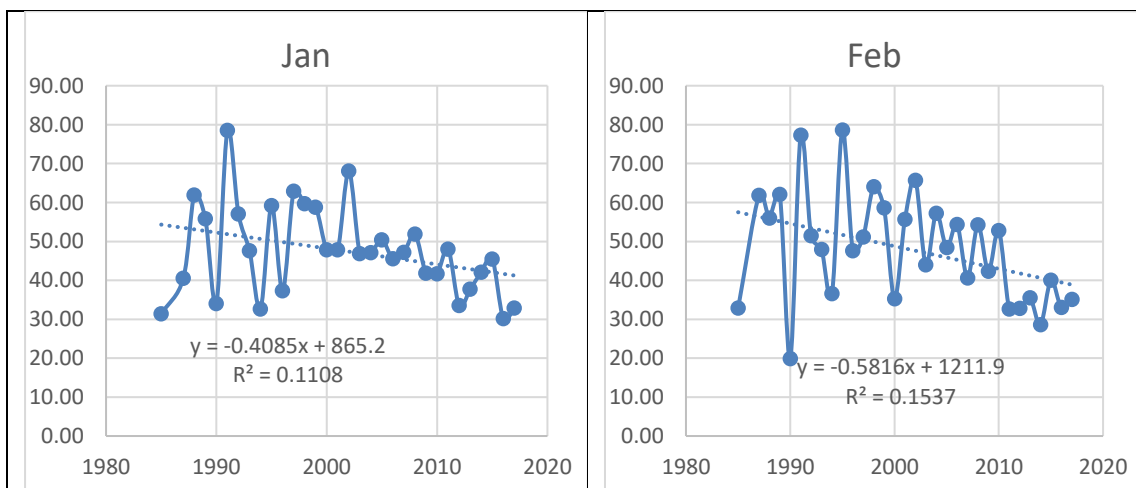
Σχήμα 4.2.4.1. Διαγράμματα μηνιαίων τάσεων NO₂ για τον σταθμό ARI

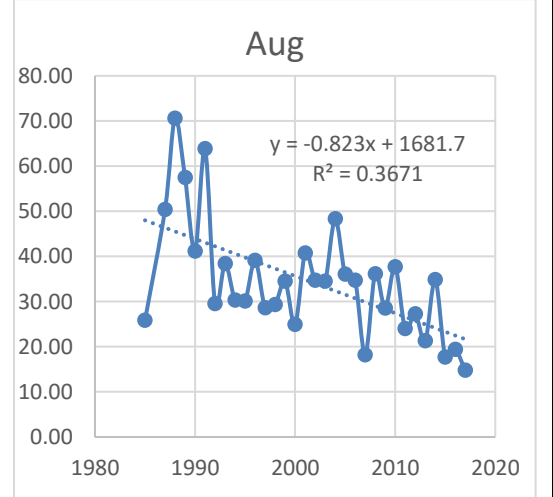
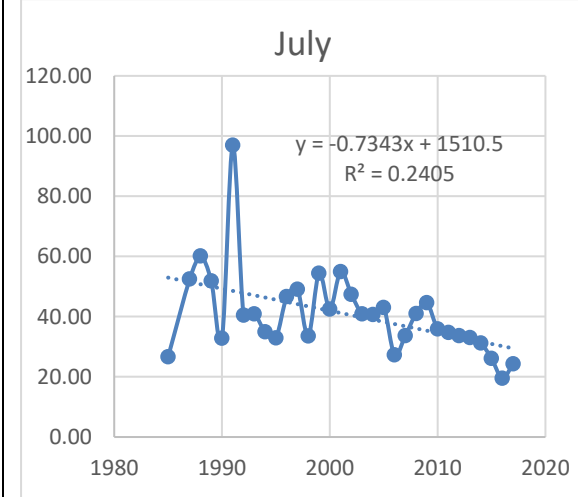
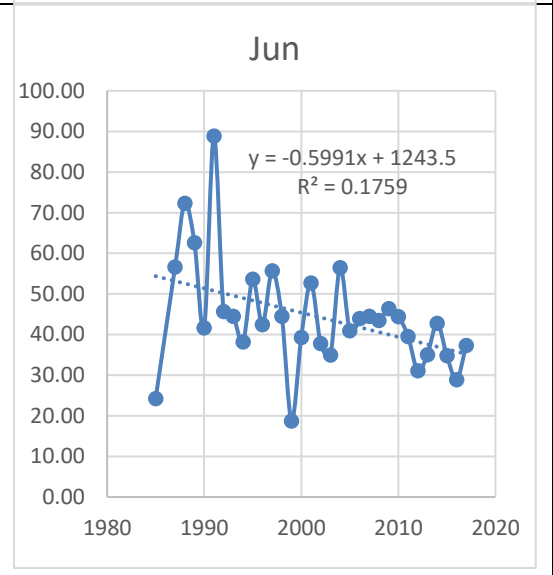
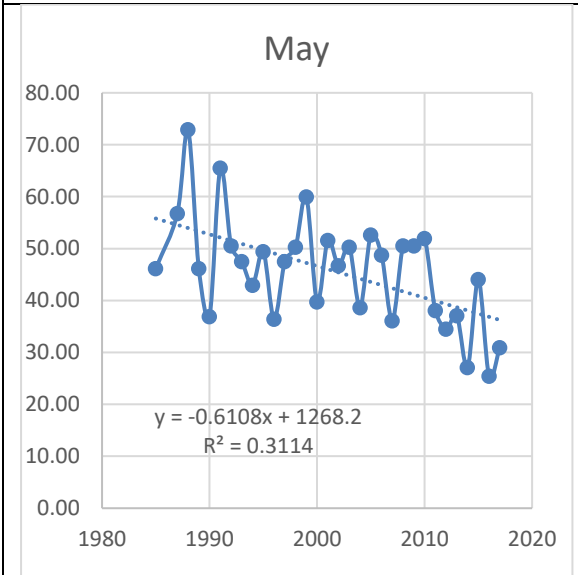
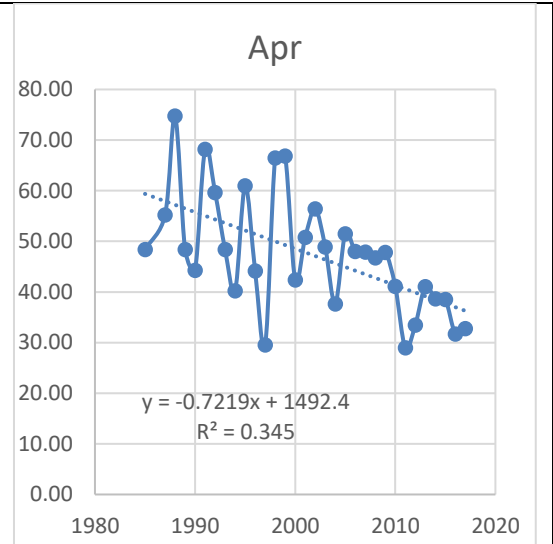
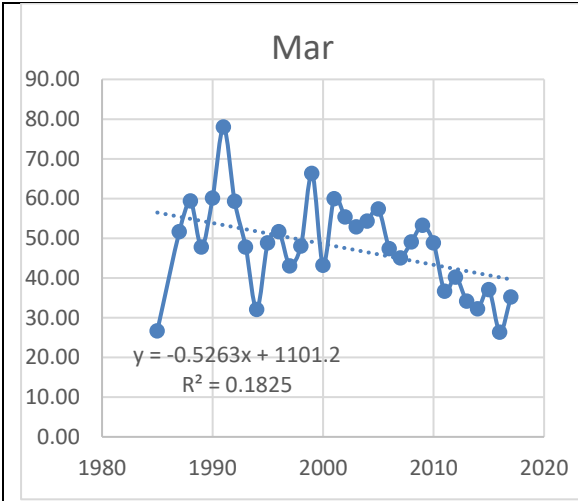


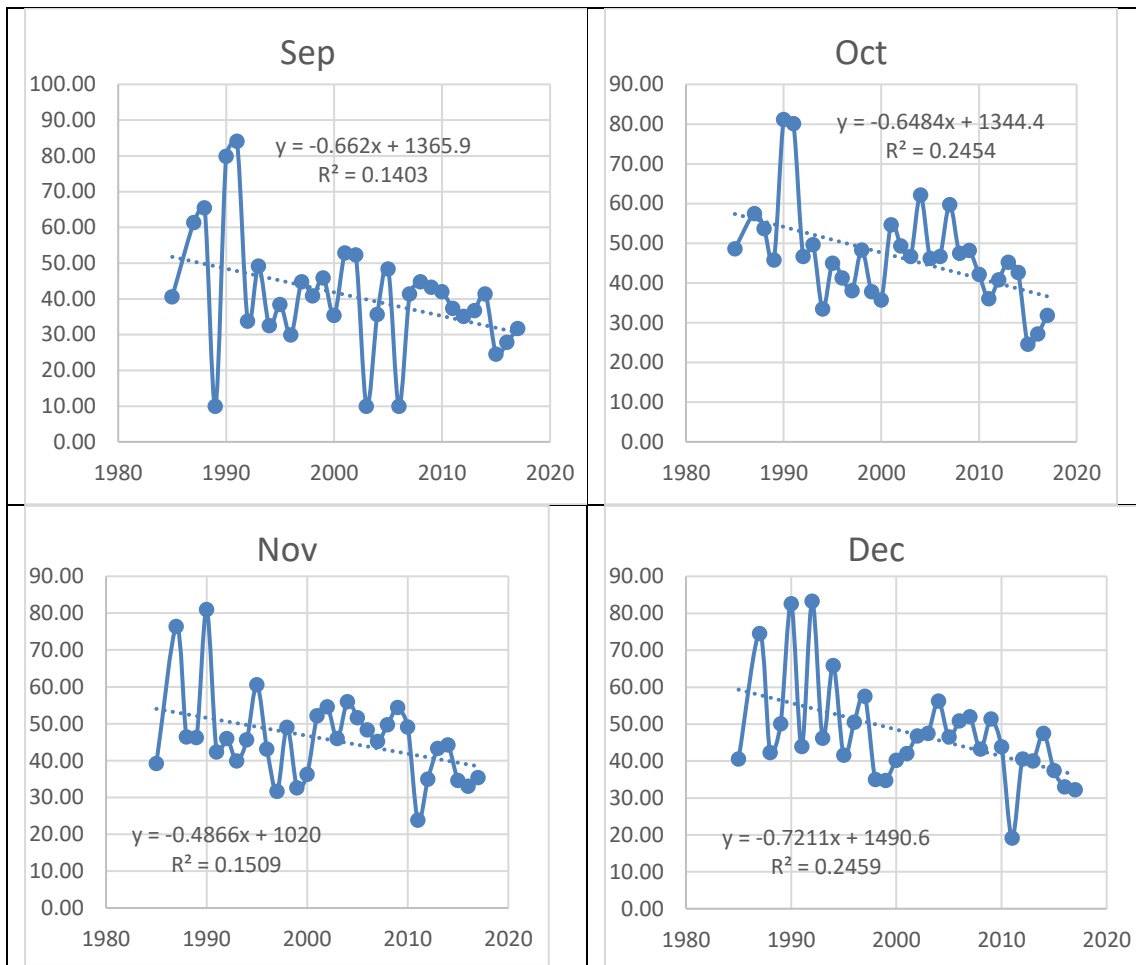




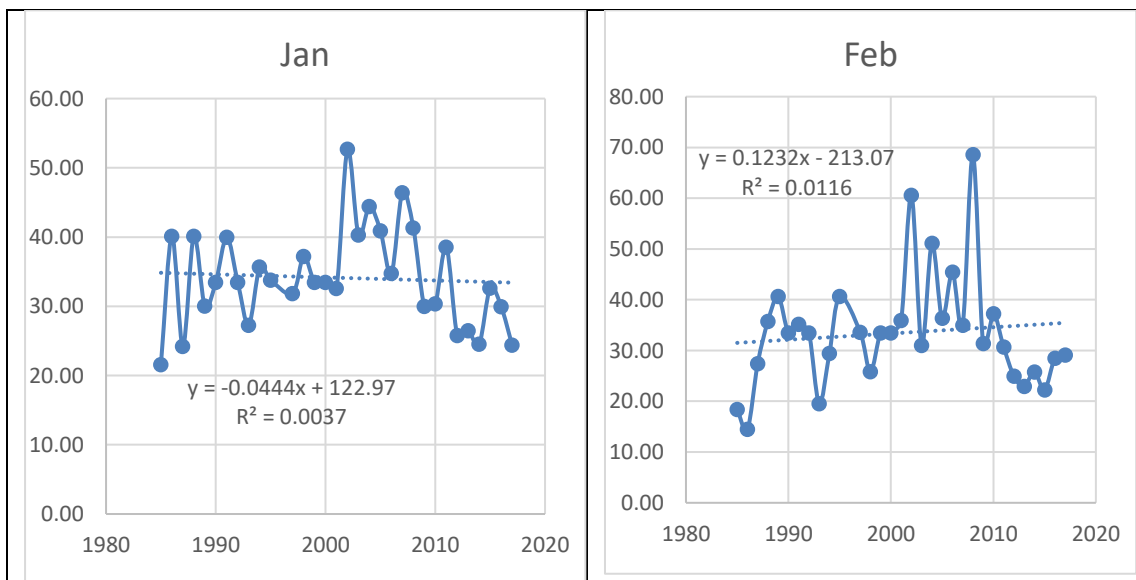
Σχήμα 4.2.4.2. Διαγράμματα μηνιαίων τάσεων του NO₂ για τον σταθμό ΑΘΗ.

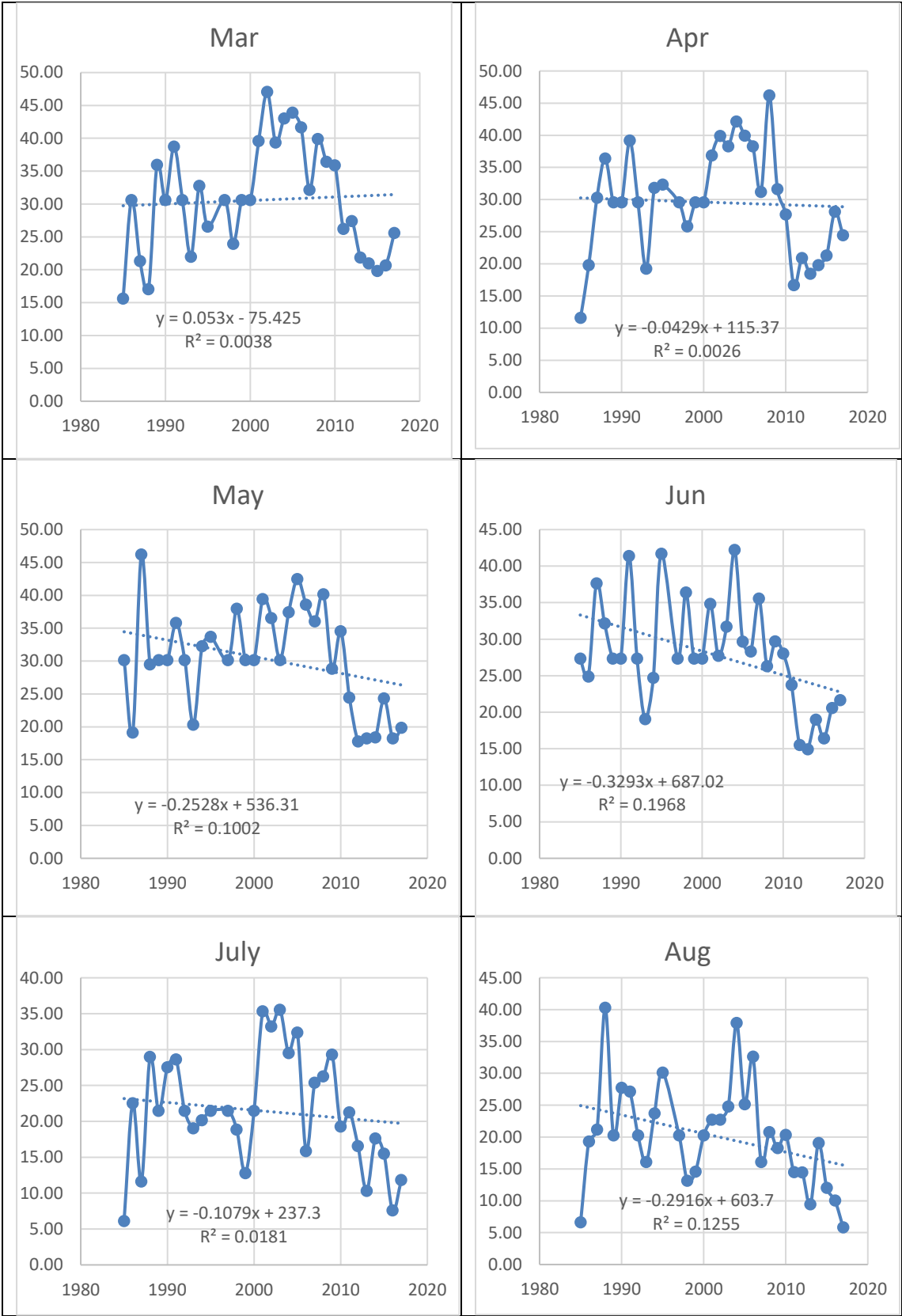


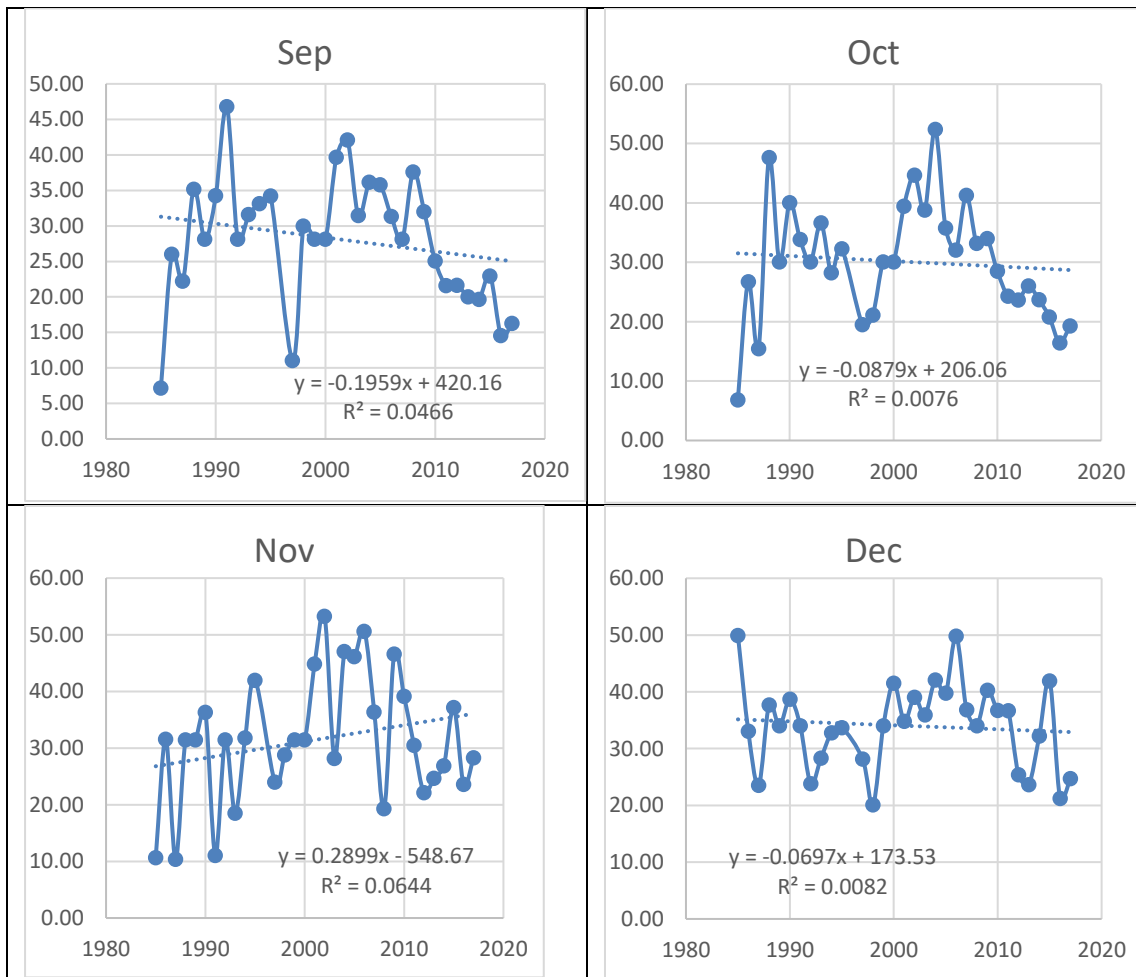




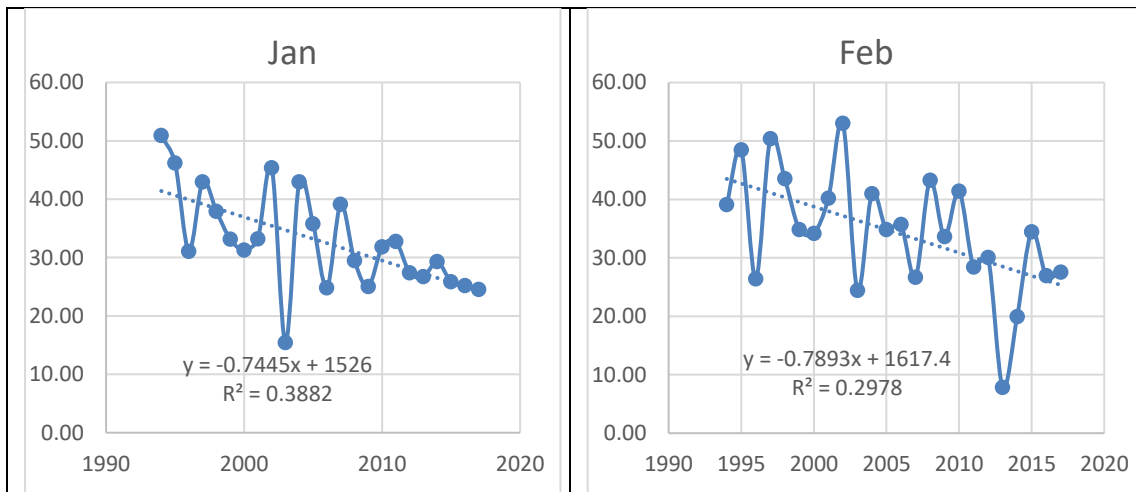
Σχήμα 4.2.4.3. Διαγράμματα μηνιαίων τάσεων του NO₂ για τον σταθμό ΓΕΟ.

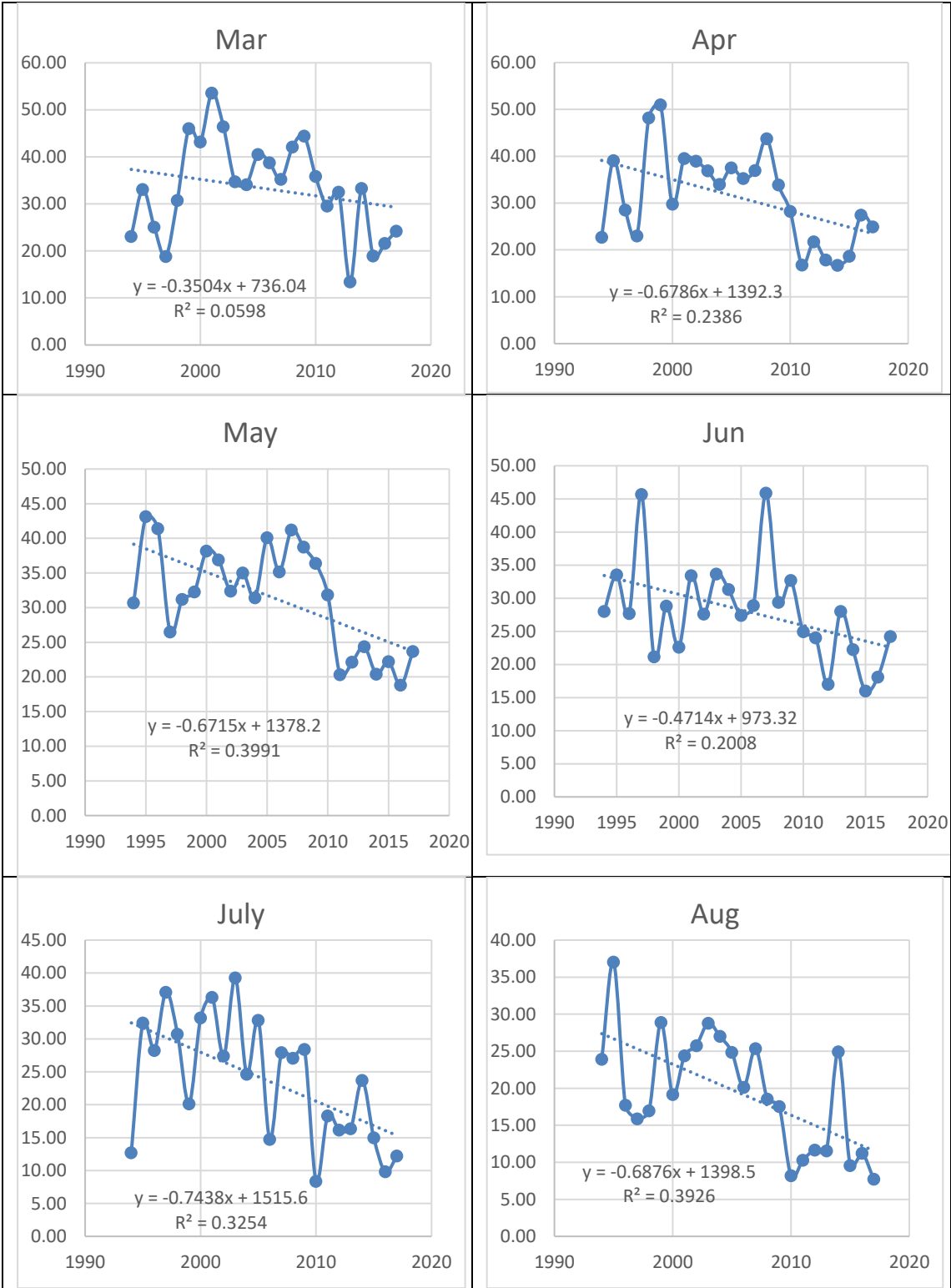


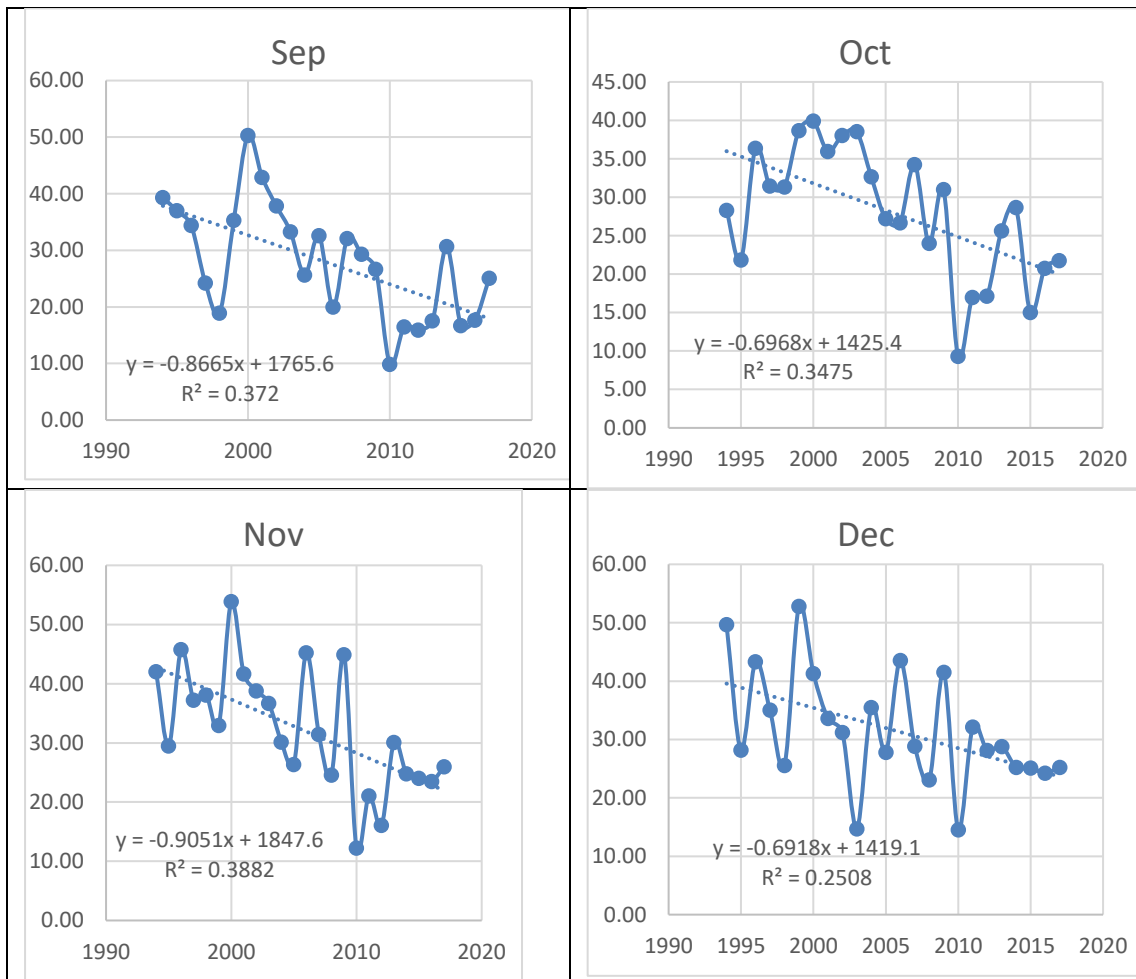




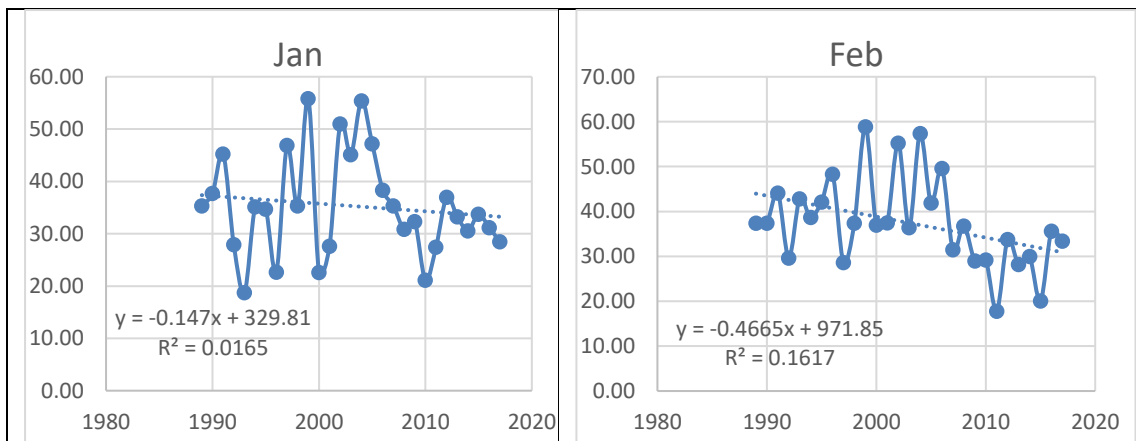
Σχήμα 4.2.4.4 Διαγράμματα μηνιαίων τάσεων του NO₂ για τον σταθμό LIO

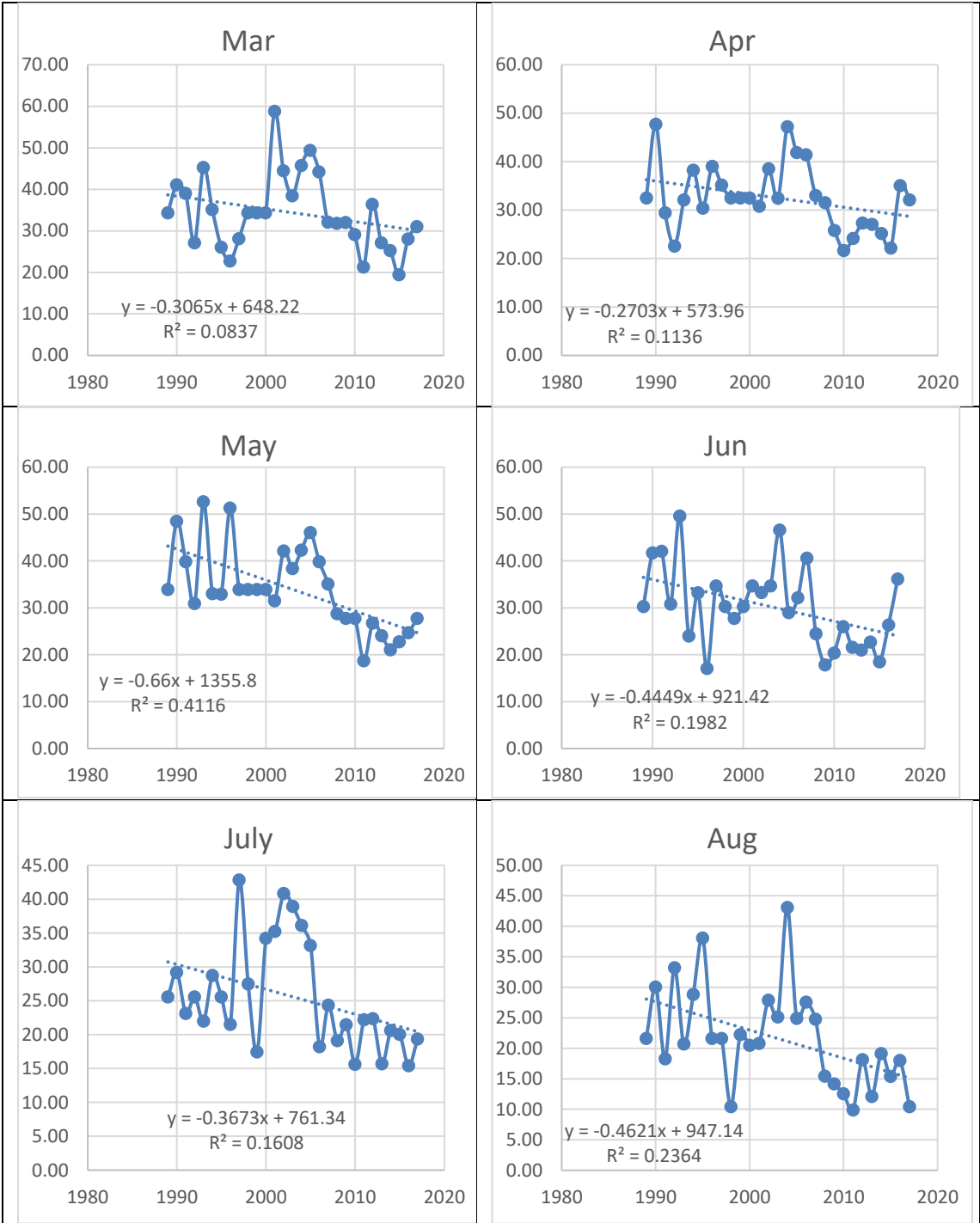


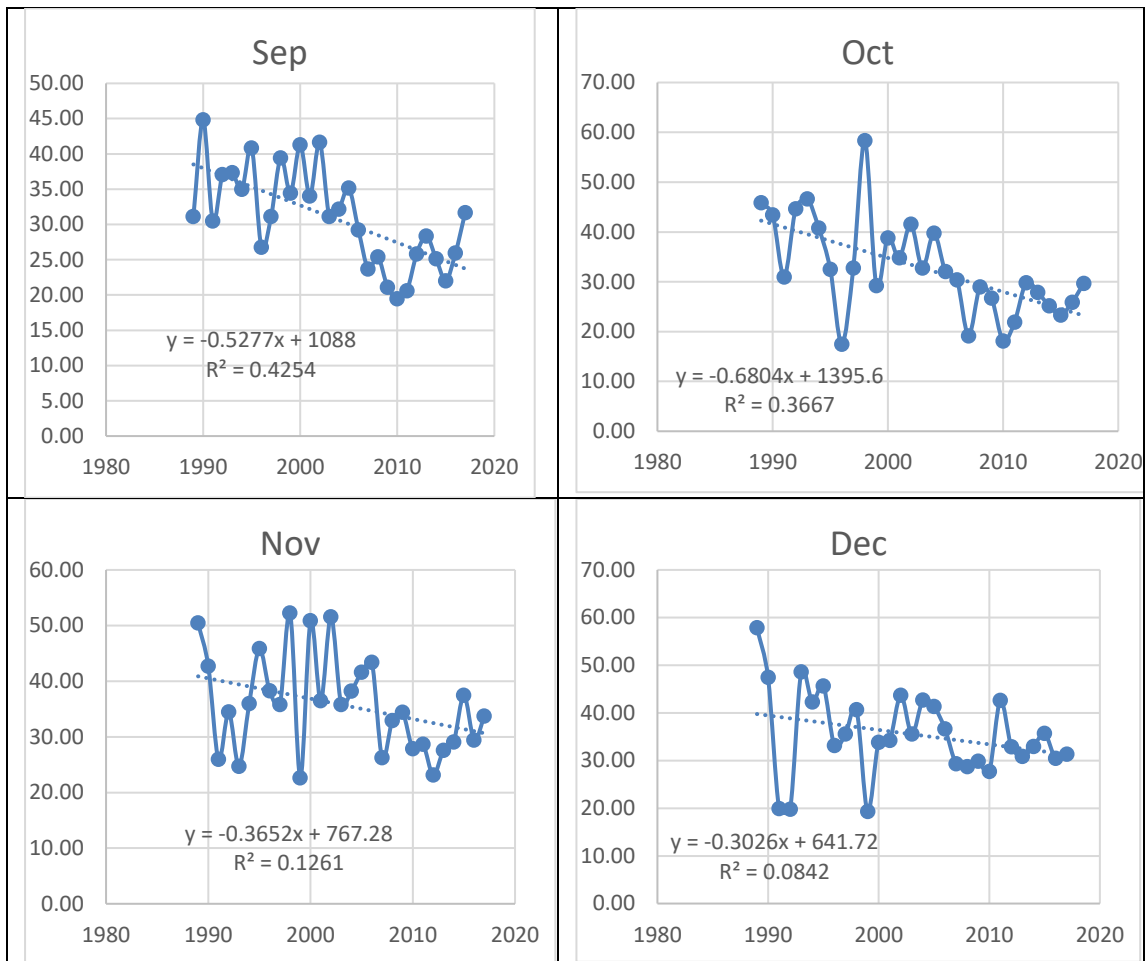




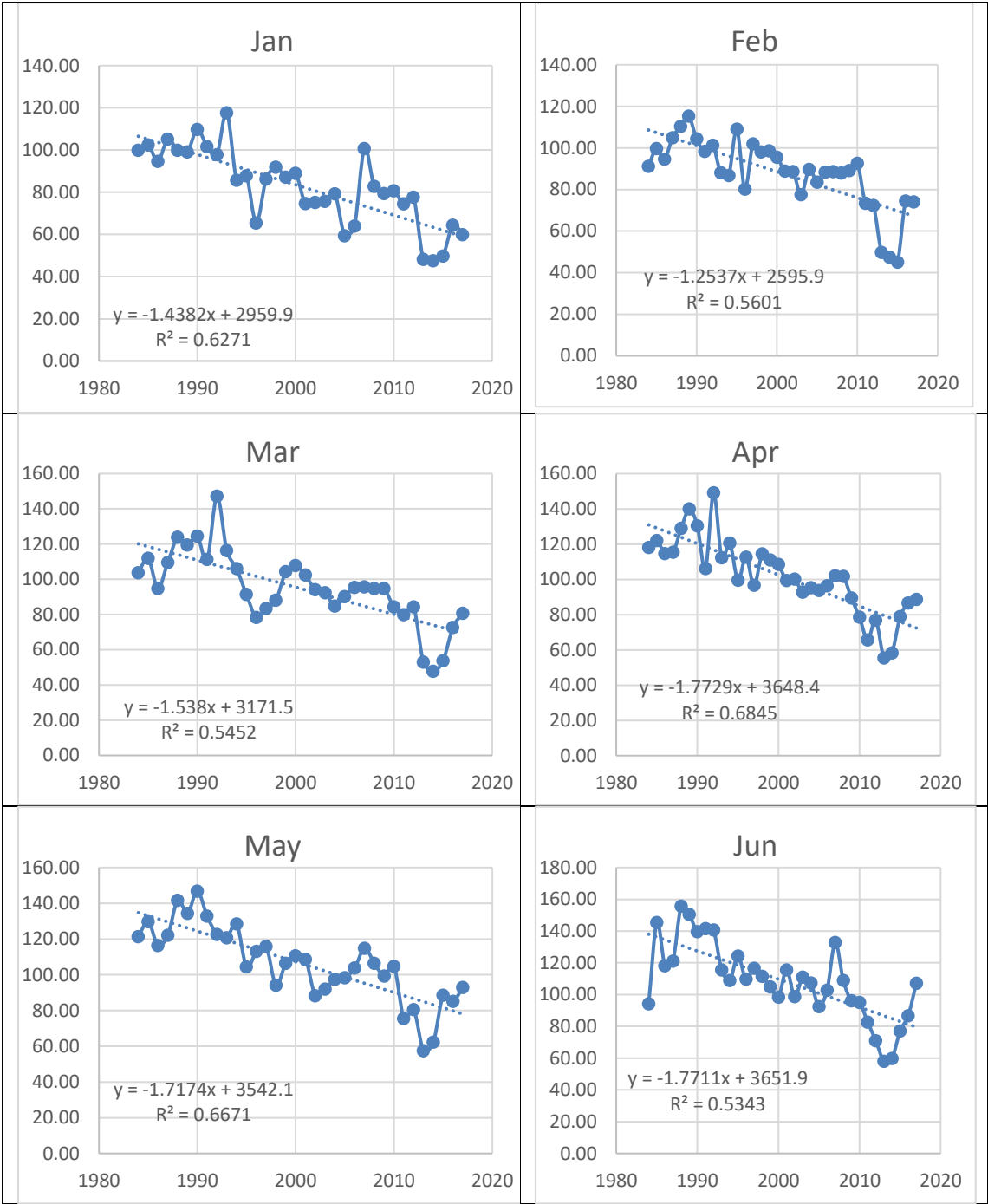
Σχήμα 4.2.4.5. Διαγράμματα μηνιαίων τάσεων του NO₂ για τον σταθμό LYK.

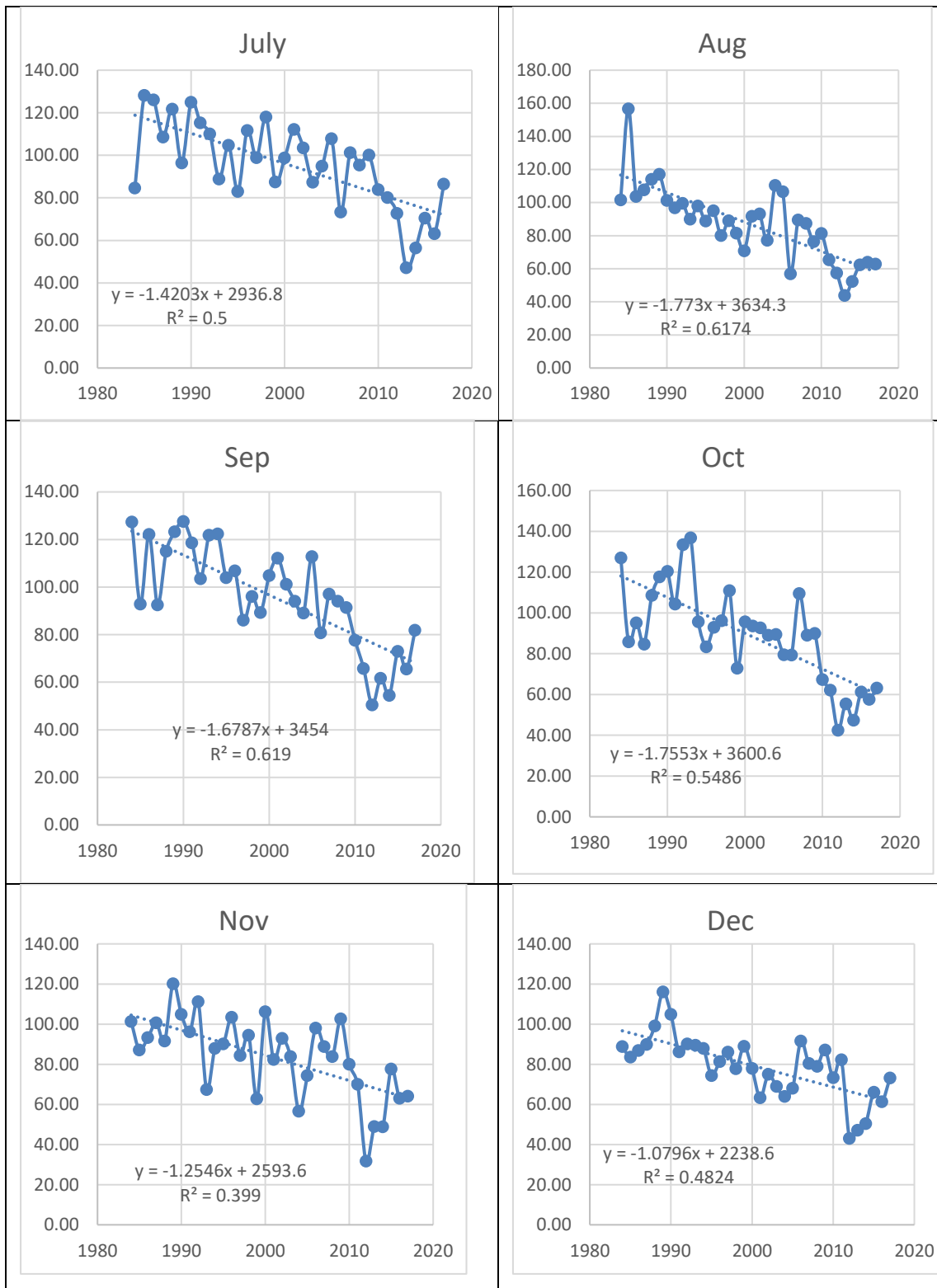




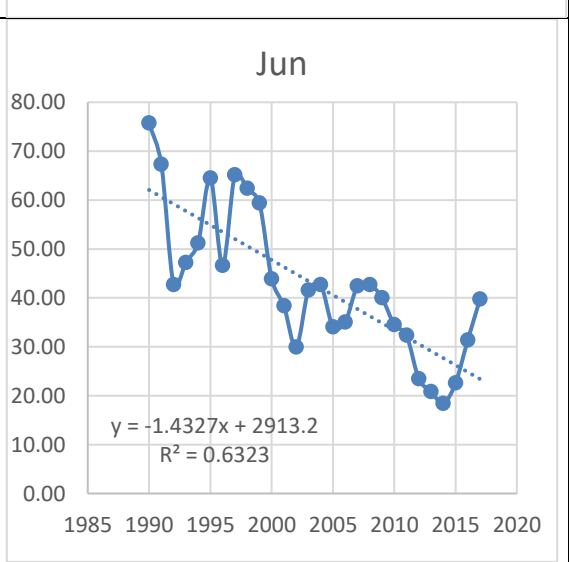
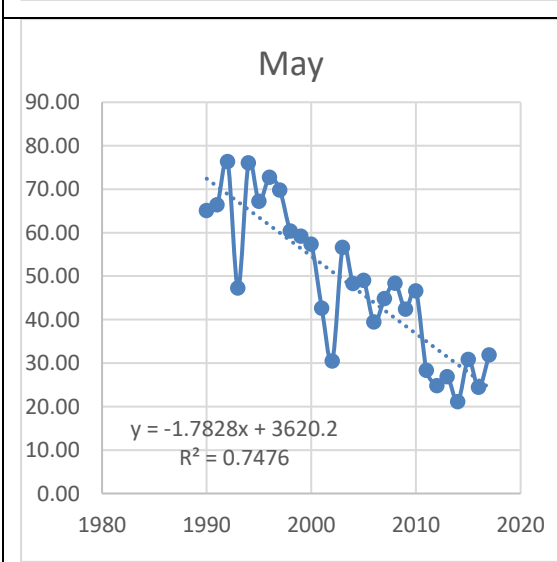
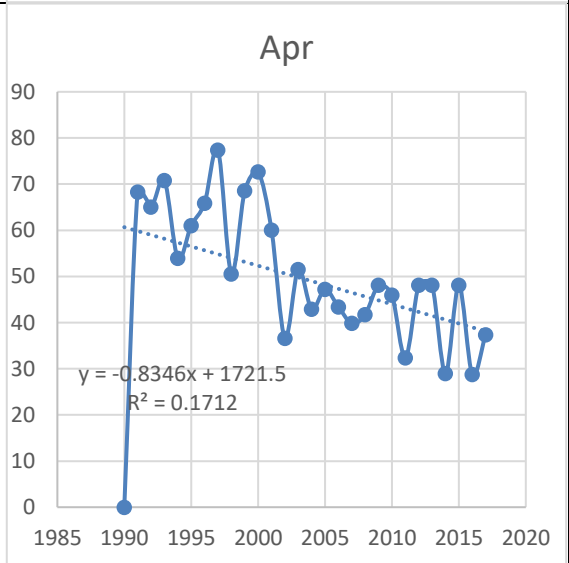
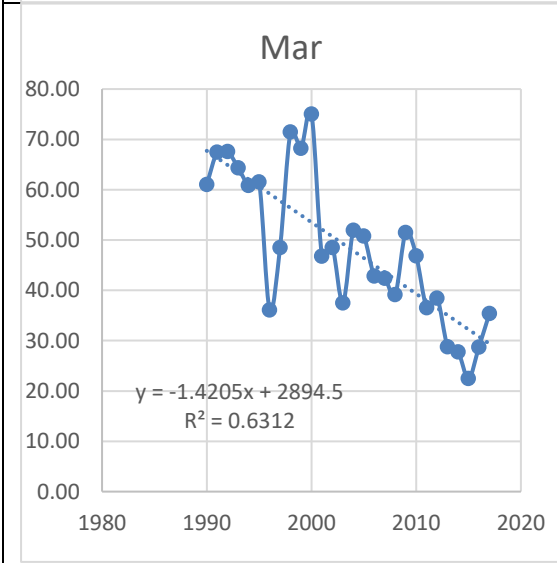
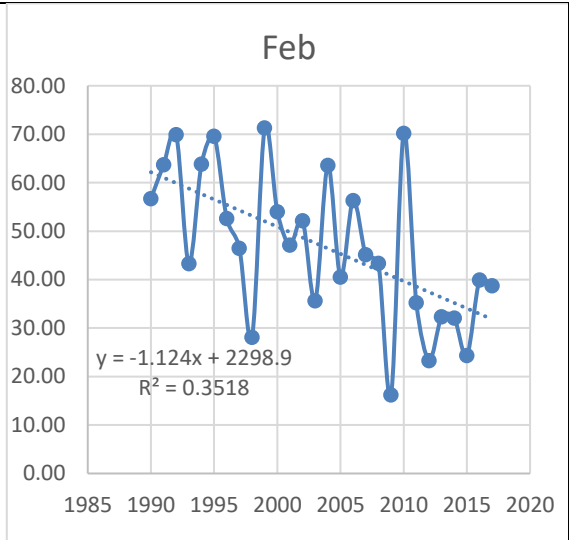
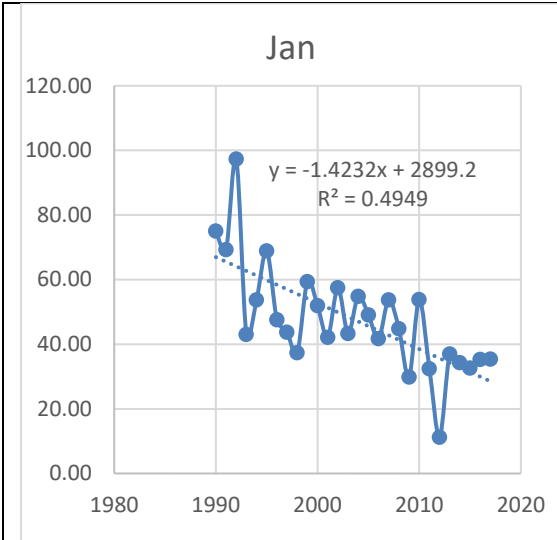


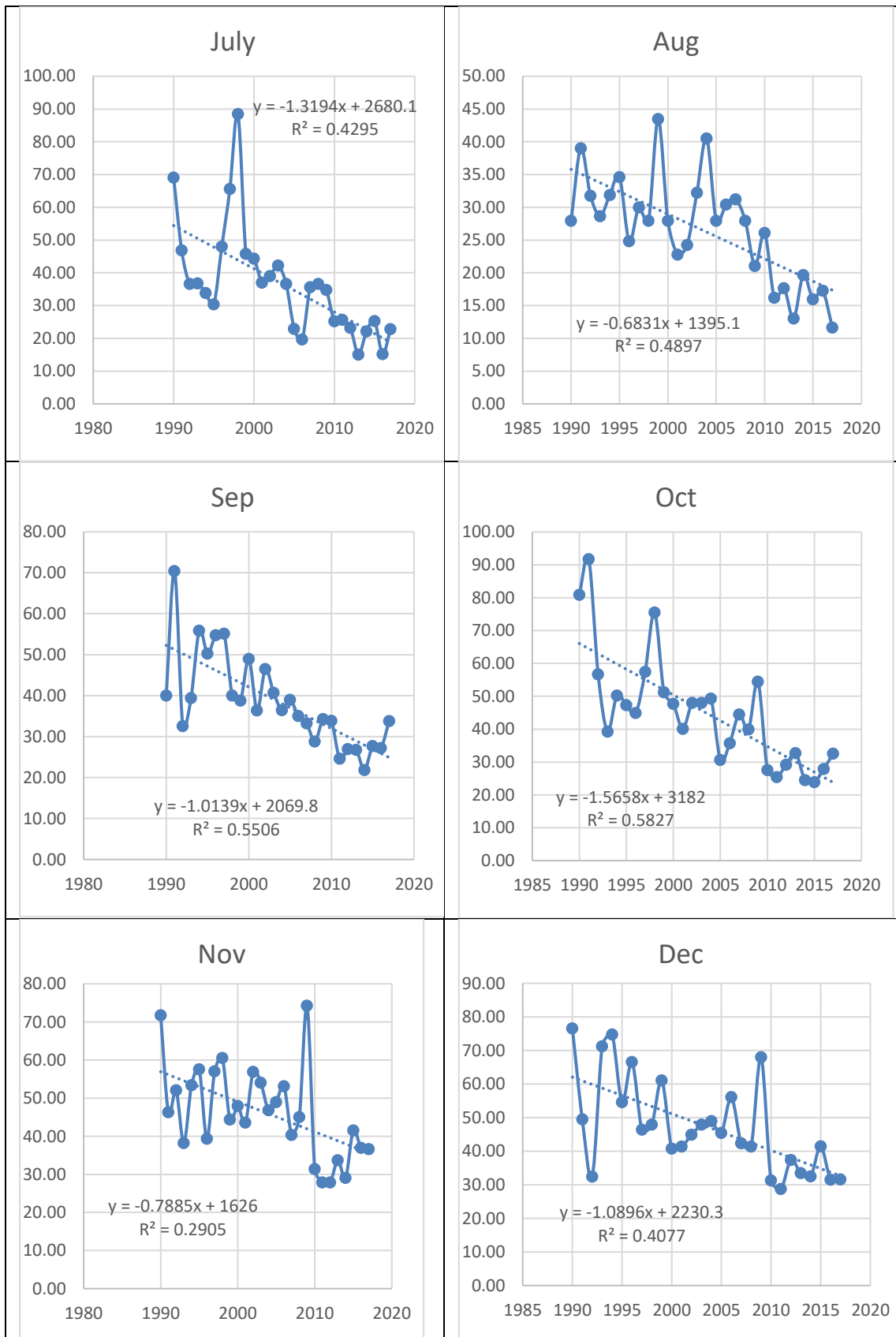
Σχήμα 4.2.4.6. Διαγράμματα μηνιαίων τάσεων του NO₂ για τον σταθμό MAR.



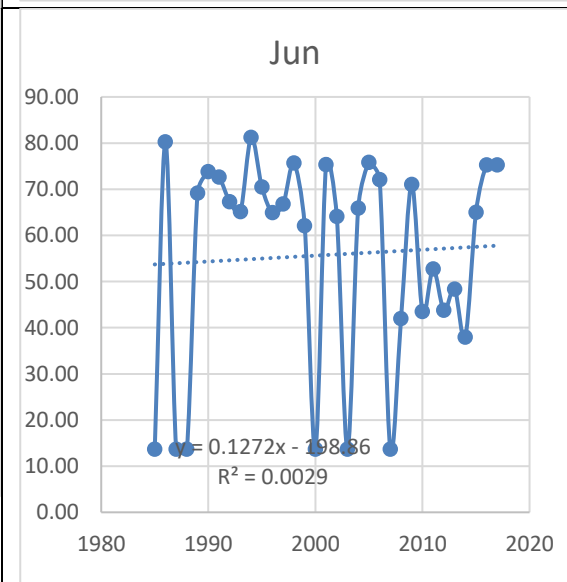
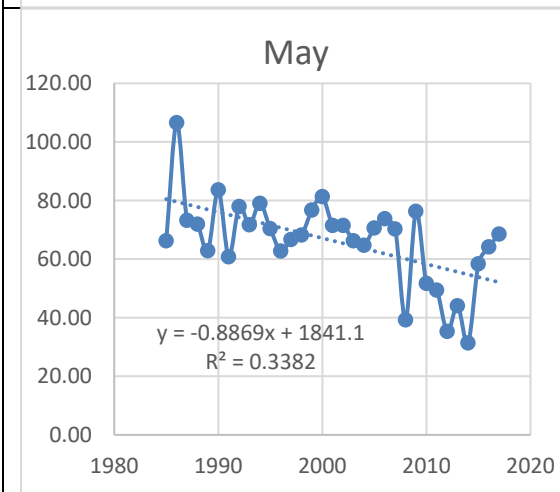
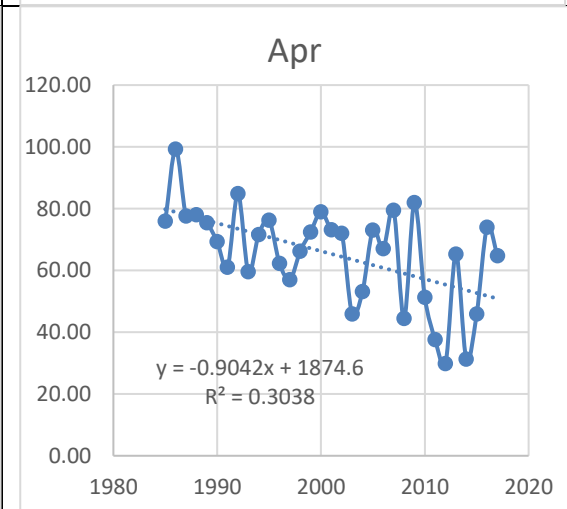
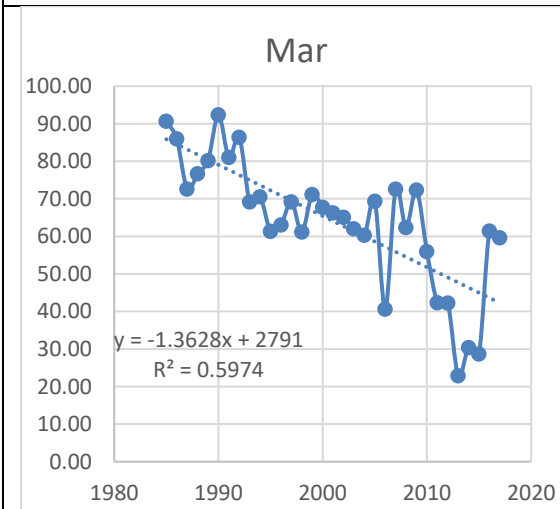
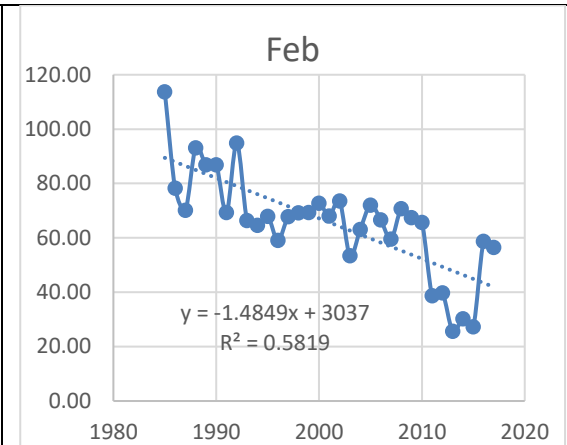
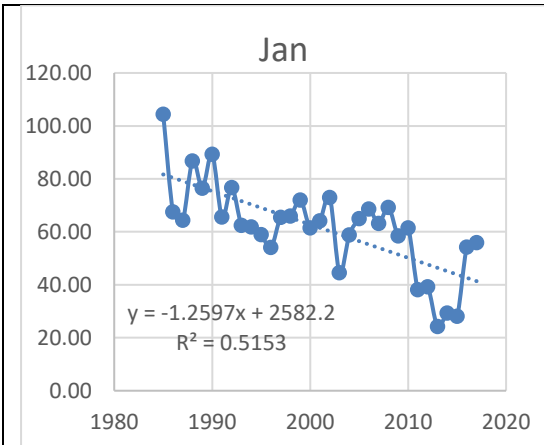


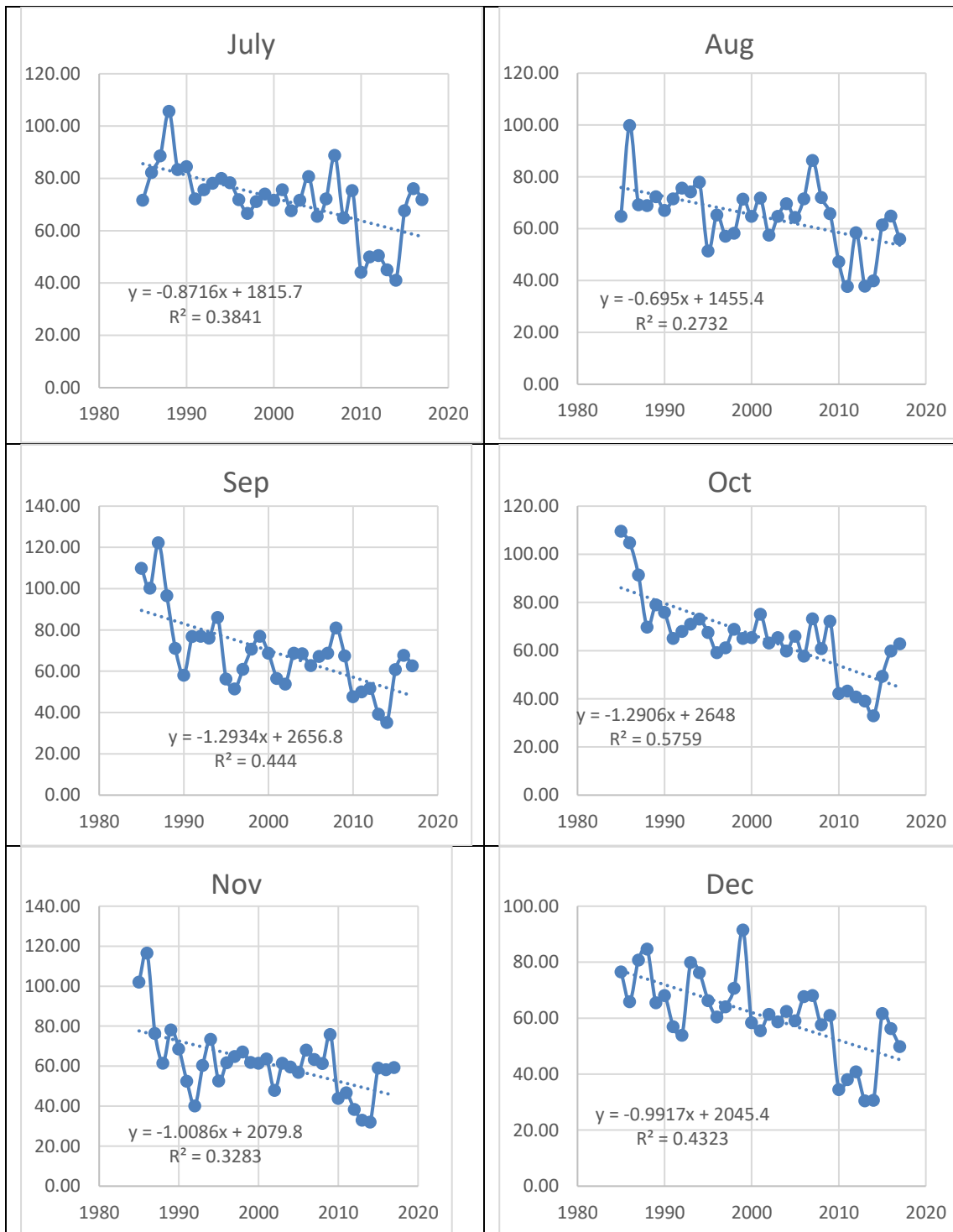
Σχήμα 4.2.4.7. Διαγράμματα μηνιαίων τάσεων του NO₂ για τον σταθμό PAT.



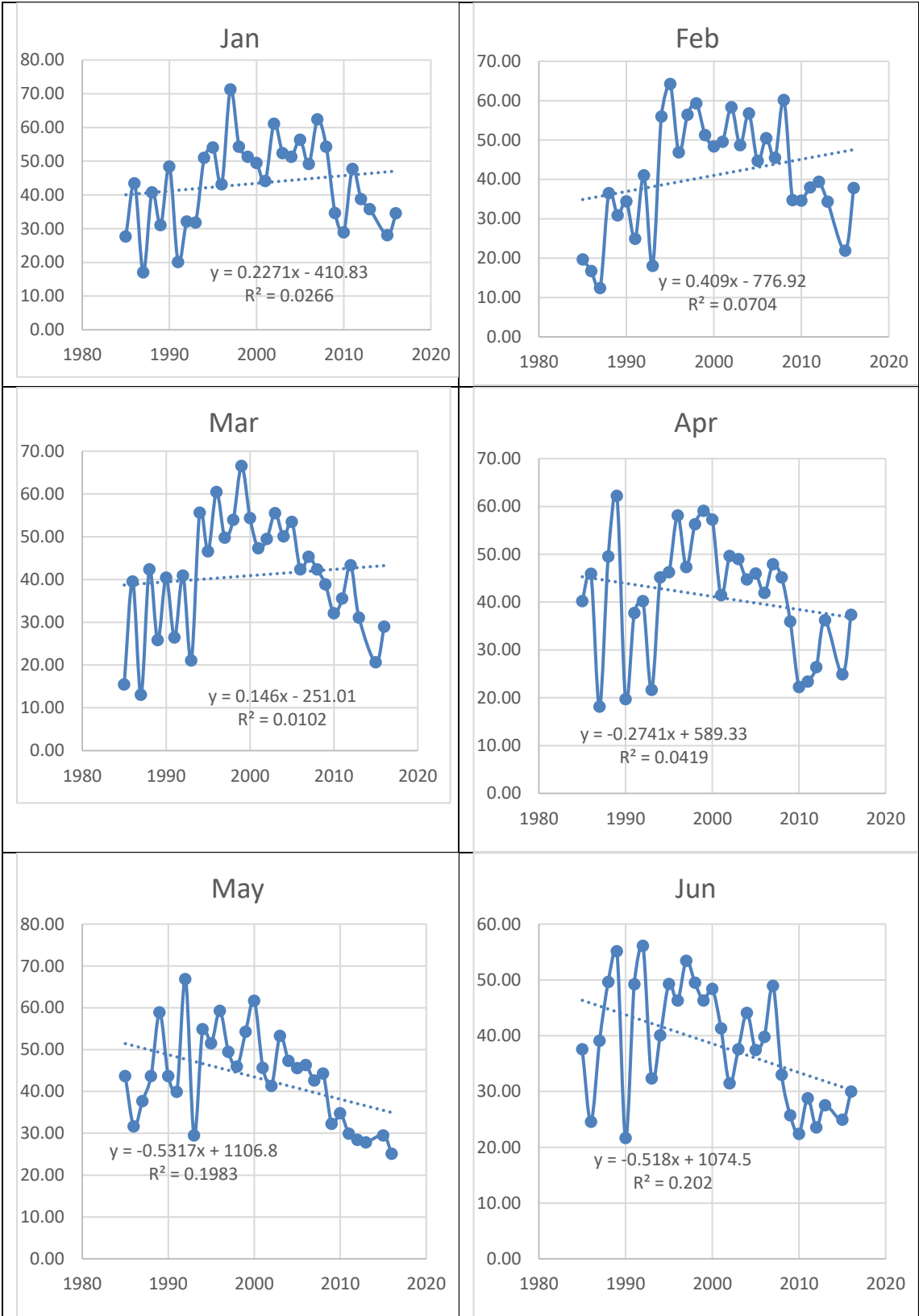


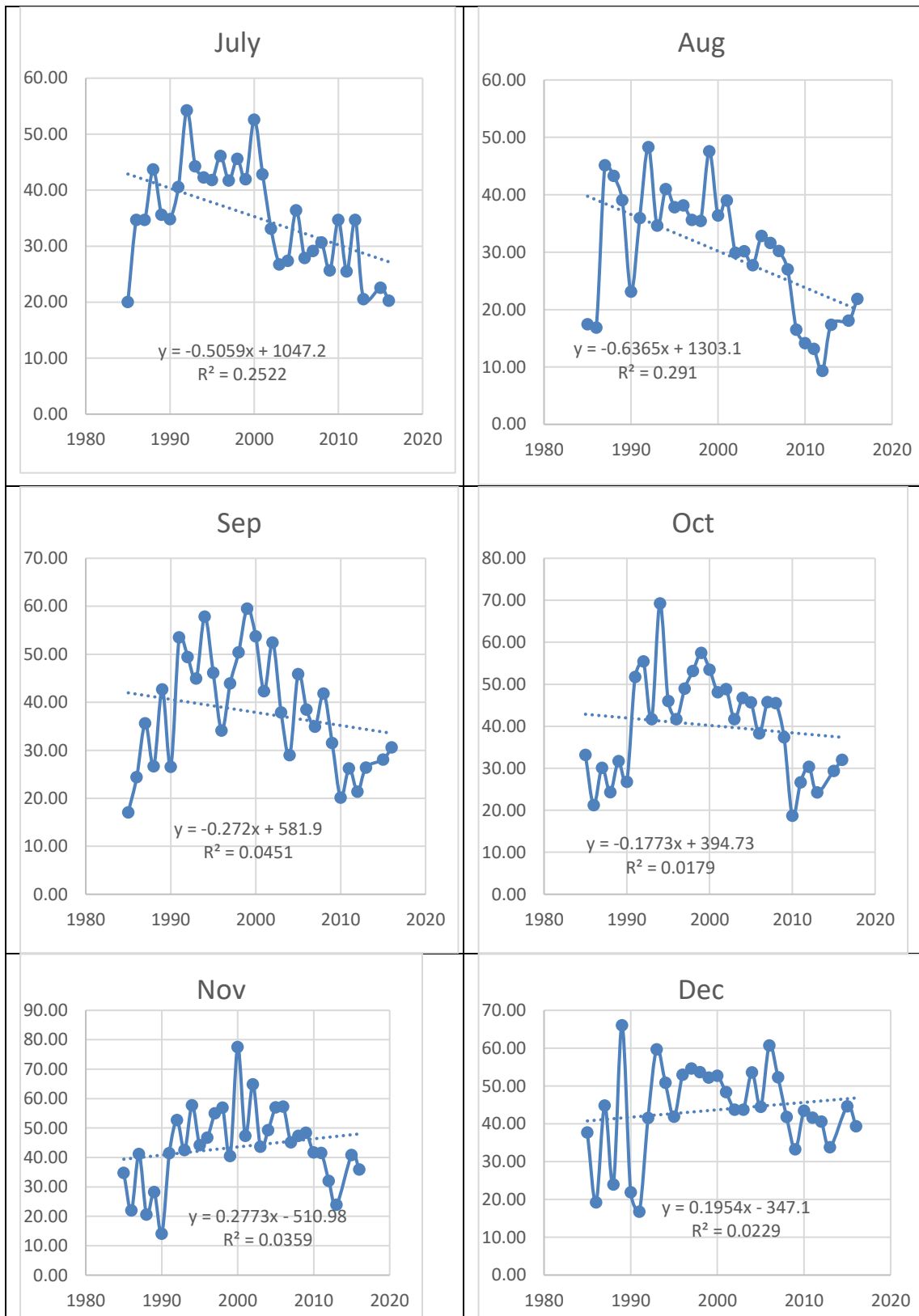
Σχήμα 4.2.4.8. Διαγράμματα μηνιαίων τάσεων του NO₂ για τον σταθμό PER.





Σχήμα 4.2.4.9. Διαγράμματα μηνιαίων τάσεων του NO₂ για τον σταθμό PIR.





Σχήμα 4.2.4.10. Διαγράμματα μηνιαίων τάσεων του NO₂ για τον σταθμό SMY.

Βάσει των παραπάνω διαγραμμάτων των χρονικών μεταβολών των μηνιαίων τιμών του ρύπου του διοξειδίου του αζώτου NO₂ για κάθε σταθμό βλέπουμε ότι μέγιστες συγκεντρώσεις παρουσιάζονται στους σταθμούς ARI, ATH, PAT, και PIR όπου οι περισσότερες τιμές κυμαίνονται στο διάστημα μεταξύ 100-180 μg/m³, και σε έκθεση

μεγαλύτερη από $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ είναι δυνατό να έχουμε μέχρι και θάνατο. Η τοξικότητα του είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τον ρύπο του NO , και δημιουργεί μεγάλο ερεθισμό στα μάτια και τους πνεύμονες (Κούγκολος, 2018). Επειδή οι παραπάνω σταθμοί είναι αστικής κυκλοφορίας σύμφωνα με τα δεδομένα του Σχήματος 3.1 από τη σελίδα του ΥΠΕΧΩΔΕ έχουμε τη δημιουργία του φαινομένου της όξινης βροχής στην οποία συμμετέχει σε μεγάλο ποσοστό ο ρύπος του NO_2 . Η παραγωγή της οφείλεται κυρίως στις διάφορες καύσεις των ορυκτών καυσίμων που είναι είτε βιομηχανικές είτε εσωτερικές από τις διάφορες μηχανές των αυτοκινήτων σε συνδυασμό με την δημιουργία των έντονων καιρικών φαινομένων όπως οι βροχές (ΥΠΕΚΑ,2017). Το παραπάνω έχει ως αποτέλεσμα τη συγκέντρωση του ρύπου NO_2 στην ατμόσφαιρα και έτσι εμφανίζεται η διάβρωση του εδάφους με τη μετακίνηση των θρεπτικών στοιχείων, την αναστολή της βλάστησης, καθώς και την αλλοίωση της προστατευτικής επιφάνειας των φύλλων (Ρεμουντάκη ,2010). Επίσης, οι μεγάλες συγκεντρώσεις του ρύπου NO_2 στους σταθμούς που αναφέραμε οφείλονται στο γεγονός ότι επικρατεί αυξημένη χρήση των μέσων κινητής τροχιάς όπως τα αυτοκίνητα και τα λεωφορεία καθώς πρόκειται για αστικές περιοχές με τεράστια συγκέντρωση του πληθυσμού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή του ρύπου του NO που στη συνέχεια μετατρέπεται σε NO_2 καθώς αντιδρά μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας. Στους σταθμούς GEO, LIO, LYK, MAR, PER και SMY οι συγκεντρώσεις του NO_2 είναι χαμηλές κυρίως για το λόγο ότι ανήκουν στην κατηγορία των αστικών υποβάθρου με τη μικρότερη κατανάλωση ρύπων αφού και οι τιμές τους τα μεγαλύτερα διαστήματα είναι μικρότερες από $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Με βάση τις τιμές των μηνιαίων συγκεντρώσεων των ρύπων NO_2 για κάθε σταθμό βλέπουμε ότι οι μέγιστες τιμές στους περισσότερους σταθμούς εμφανίζονται τους καλοκαιρινούς μήνες δηλαδή Ιούνιο, Ιούλιο, Αύγουστο και κυρίως τον μήνα Ιούνιο, ενώ στους σταθμούς LIO, LYK και MAR οι μεγαλύτερες τιμές του NO_2 είναι στους χειμερινούς μήνες. Όσο αφορά τη πρώτη περίπτωση δηλαδή την εμφάνιση των μέγιστων τιμών του NO_2 τους καλοκαιρινούς μήνες αυτό οφείλεται στο ότι το NO_2 είναι ένας δευτερογενής ρύπος που προκύπτει μέσω του σχηματισμού του πρωτογενή ρύπου NO που παράγεται μέσω υψηλών θερμοκρασιών στις μηχανές καύσης, και στη συνέχεια καθώς οξειδώνεται μέσα από φωτοχημικές αντιδράσεις με την παρουσία της ηλιακής ακτινοβολίας προκύπτει ο σχηματισμός του NO_2 (Ζερεφός 1984). Επίσης, τα παραπάνω αποδίδονται στη μεγάλη συχνότητα θερμοκρασιακών αναστροφών και έτσι ο αέρας που βρίσκεται χαμηλότερα να ψύχεται απότομα και να εμφανίζει χαμηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τα υπερκείμενα στρώματα (Μουστρή, 2015). Βέβαια όλο αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην υπάρχει καλός αερισμός στην περιοχή με τις ταχύτητες του ανέμου να είναι χαμηλές, και άρα να επικρατεί στην ατμόσφαιρα σε μεγάλο βαθμό ο ρύπος NO_2 . Στη δεύτερη περίπτωση, δηλαδή στους σταθμούς LIO, LYK και MAR, οι συγκεντρώσεις του NO_2 είναι μεγαλύτερες τους χειμερινούς μήνες σε σχέση με τους καλοκαιρινούς παρά το γεγονός του ότι βρίσκονται στο βόρειο τμήμα του Χάρτη 3.2 του ΥΠΕΧΩΔΕ όπου οι άνεμοι βορειοανατολικής κατεύθυνσης έχουν ισχυρή ένταση σε σχέση με τους νοτιοδυτικούς ανέμους (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2017), και αυτό γιατί επικρατούν συστήματα χαμηλών πιέσεων με αποτέλεσμα να έχουμε καλές συνθήκες αερισμού σε υψηλότερα στρώματα με την απομάκρυνση του ρύπου του NO_2 .

Σύμφωνα με τις χρονικές μεταβολές των συγκεντρώσεων του ρύπου NO_2 για τους παραπάνω σταθμούς παρατηρούμε ότι όσο περνάνε τα χρόνια και κυρίως για τα έτη μεταξύ 2008-2017 οι τιμές του NO_2 είναι μειωμένες σε σχέση με τα προηγούμενα έτη όπου ήταν

σχετικά υψηλές, δηλαδή μεγαλύτερες από την οριακή τιμή που είναι 40μg/m³. Ωστόσο παρατηρούμε και με βάση τα διαγράμματα ότι η μεταβολή των ατμοσφαιρικών επιπέδων του NO₂ ακολουθεί σχεδόν την ίδια πορεία με τον ρύπο του NO, και αυτό έχει να κάνει ενδεχομένως με το γεγονός ότι με τα χρόνια της οικονομικής κρίσης υπήρξε σημαντική μείωση των εκπομπών των ρύπων του NO από τον τομέα των οδικών μεταφορών, όπου είναι σε μεγάλο βαθμό υπεύθυνος για την παραγωγή του NO₂ στην ατμόσφαιρα. Για τις χρονικές περιόδους 2010-2015 σε επίπεδο ευρωπαϊκό, η μείωση των εκπομπών των αστικών και περαστικών σταθμών αποδίδεται στις αυστηρότερες νομοθεσίες που επικρατούν για τα νέα οχήματα, με τον περιορισμό των παλαιών πετρελαιοκίνητων οχημάτων και των μη-καταλυτικών μετατροπών (ΕΚΠΑΑ, 2018). Επίσης, η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να γίνεται μέσω της χρήσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας προκειμένου να υπάρχει μείωση των βασικών ρύπων και παρακίνηση των βιομηχανιών υψηλής τεχνολογίας. Επιπλέον, μέσω της ενσωμάτωσης της οδηγίας της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη χώρα μας σε ό,τι έχει να κάνει με τις βιομηχανικές εκπομπές, οι νέες εγκαταστάσεις θα επιτρέπεται να είναι σε λειτουργία μόνο αν διαθέτουν άδεια, η οποία περιλαμβάνει τα όρια των τιμών της εκπομπής ρύπων προκειμένου να μην υπάρχει επικράτηση έντονων φαινομένων ατμοσφαιρικής ρύπανσης (Ρεμουντάκη, 2010).

4.2.3 Όζον

Στην παράγραφο αυτή, παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα για το Όζον.

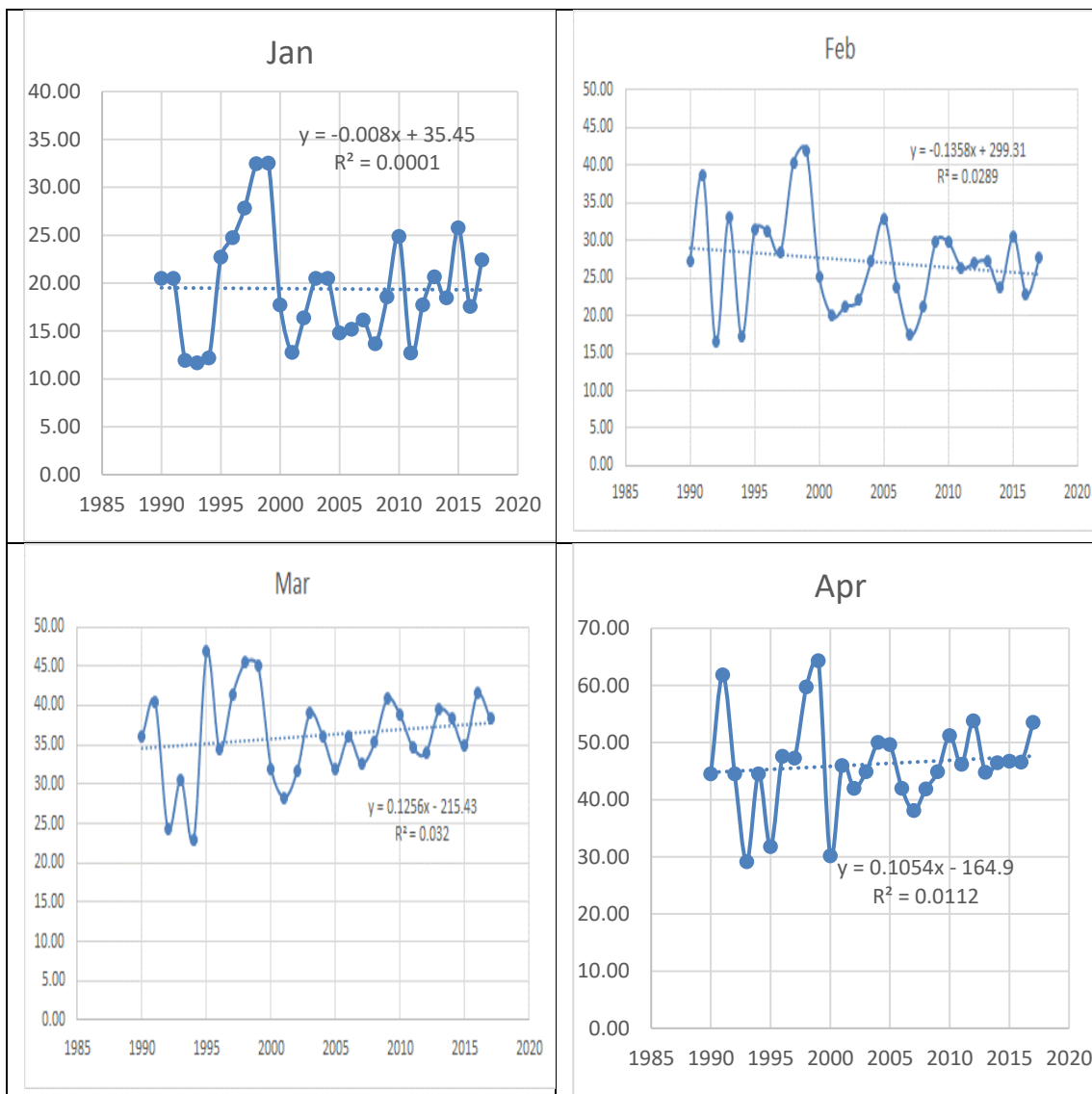
Πίνακας 4.2.5.1. Μέσες μηνιαίες τιμές συγκεντρώσεων O₃ (ppm).

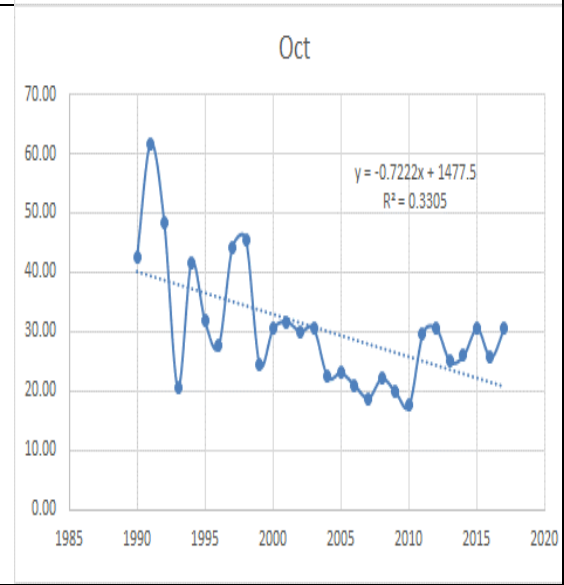
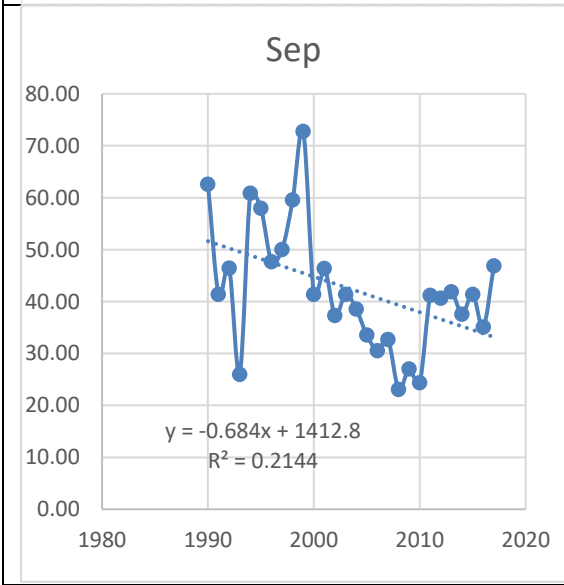
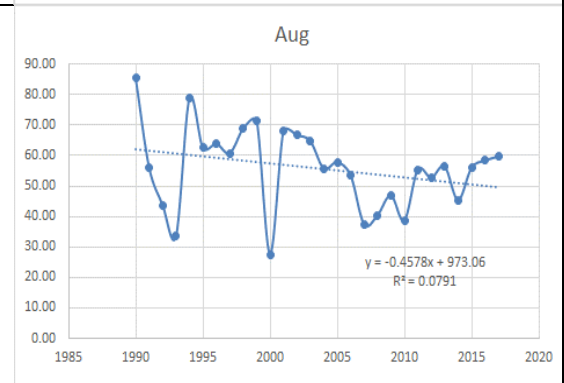
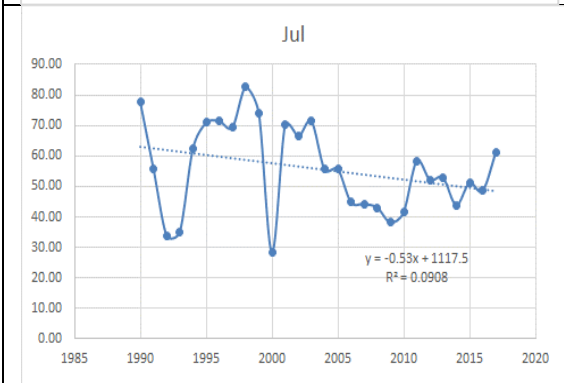
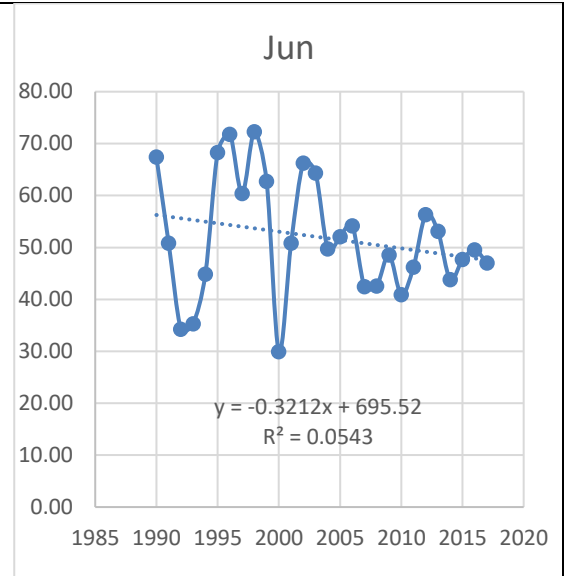
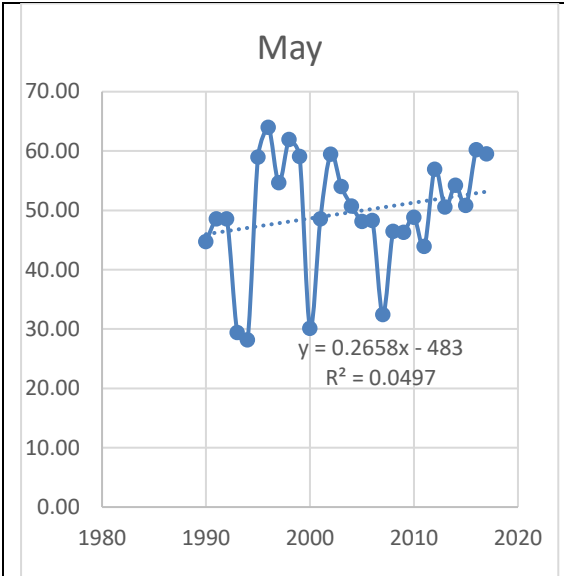
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
ATH	20.40	27.24	36.15	44.51	49.57	51.92	55.76	55.91	42.40	30.51	23.18	17.95
GEO	23.41	35.16	44.30	53.73	61.46	67.08	76.41	72.58	54.26	39.10	24.78	21.70
LIO	37.61	47.23	63.38	75.23	83.14	91.20	97.87	95.19	72.22	55.59	39.64	34.94
LYK	35.28	43.83	59.00	68.23	74.79	82.07	90.70	89.96	65.31	53.06	36.88	31.62
MAR	37.29	45.98	56.17	66.03	71.46	84.75	91.40	88.67	66.75	52.45	39.37	33.93
PAT	15.06	19.20	22.46	26.56	25.71	28.55	37.68	45.81	26.39	22.13	15.99	12.24
PER	30.39	40.11	54.39	66.51	68.48	75.15	87.71	92.30	66.87	46.68	31.89	27.28
PIR	24.06	31.15	42.42	54.37	56.49	52.12	57.85	59.45	43.31	33.50	23.18	23.92
SMY	29.92	40.97	51.42	69.92	73.79	82.43	90.98	92.11	66.12	45.87	33.03	28.42

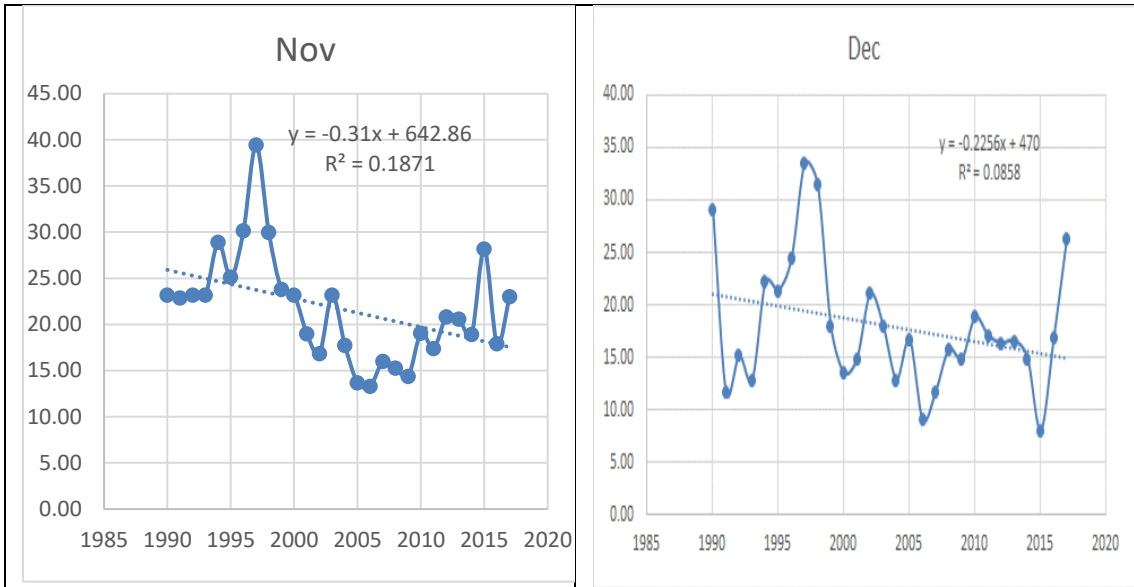
Πίνακας 4.2.5.2. Μηνιαίες τάσεις συγκεντρώσεων O₃ (ppm/year). **Επιτονισμένες** αναγράφονται οι τιμές των τάσεων που είναι στατιστικά σημαντικές σε επίπεδο σημαντικότητας α=0.05 και **επιτονισμένες - υπογραμμισμένες** οι τιμές που είναι στατιστικά σημαντικές σε επίπεδο σημαντικότητας α=0.01.

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
ATH	-0.008	-0.136	0.126	0.266	-0.321	-0.279	-0.530	-0.458	-0.684	-0.722	-0.601	-0.226
GEO	0.399	0.162	0.169	0.325	-0.481	-0.465	-0.444	0.238	0,026	0,057	0,342	0,332
LIO	0,038	-0.154	-0.154	-0.242	-0.289	-0.525	-0.444	-0.325	-0.333	-0.179	-0.170	-0.028
LYK	-0.255	0.007	-0.078	0.468	-0.001	-0.268	0.355	0.942	0.651	0.195	0.308	0.035
MAR	-0.020	0.066	0.127	0.456	0.291	-0.448	-0.121	0.191	0.047	0.145	0.107	0.021
PAT	-0.306	-0.127	-0.068	0.130	-0.206	-0.370	-0.513	-0.472	-0.061	-0.346	-0.282	-0.248
PER	0.214	0.147	0,546	1,017	1,037	0,656	0.578	0,680	0,858	0,821	0.247	0,391
PIR	-0.120	-0.206	0,003	-0,962	-0,564	-0.599	-0,934	-0,827	-0,687	-0,370	-0.243	-0,309
SMY	0,606	0,739	1,222	0,886	0,943	0.490	0,771	0,974	0,613	0,868	0,700	0,595

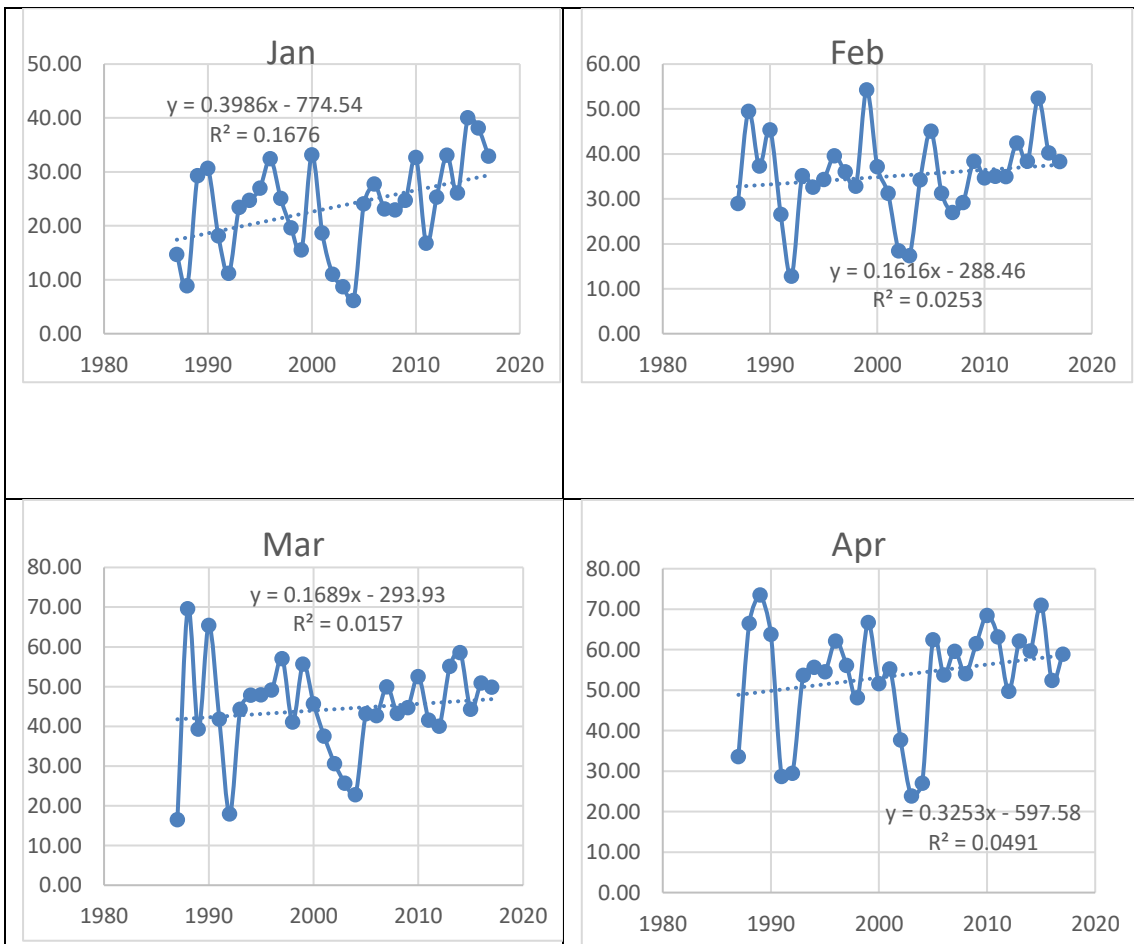
Δίνονται τα διαγράμματα τάσεων για κάθε σταθμό της Αθήνας, όπου παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις του ρύπου του όζοντος O₃ βάση των χρονικών μεταβολών 1984-2017 για όλους τους μήνες.

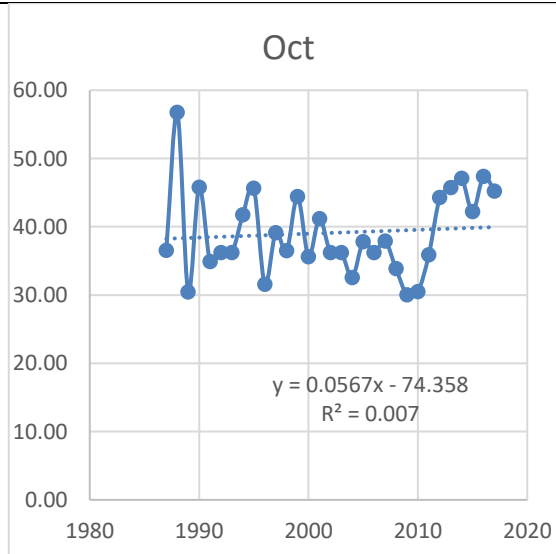
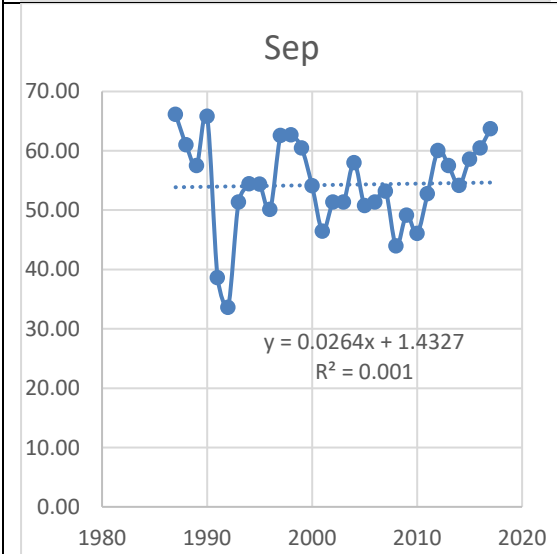
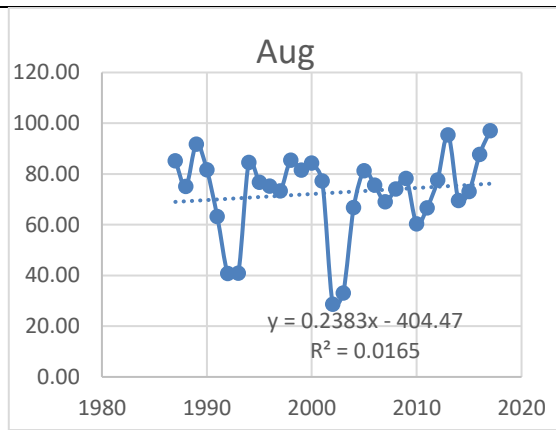
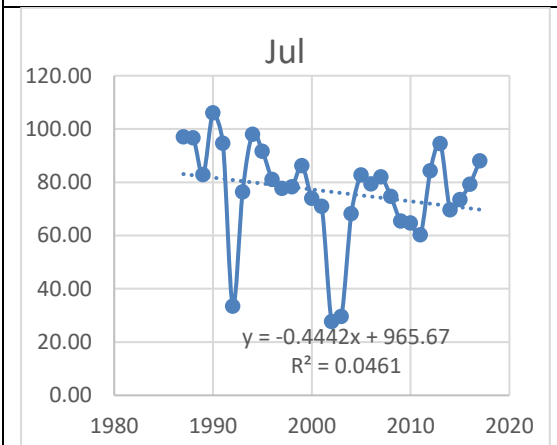
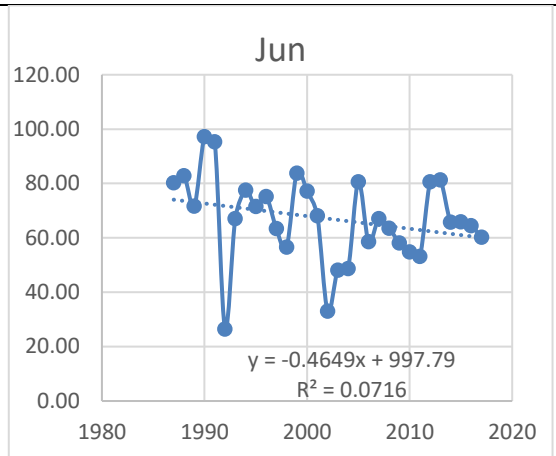
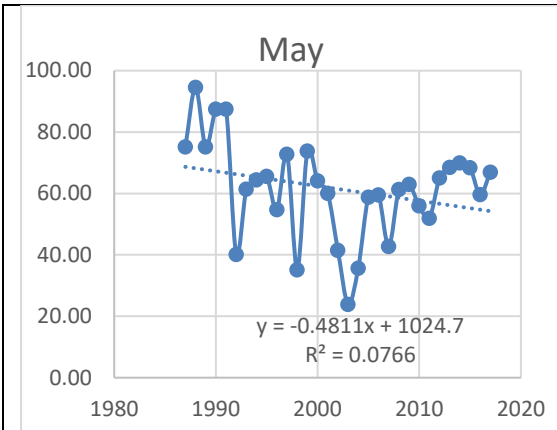


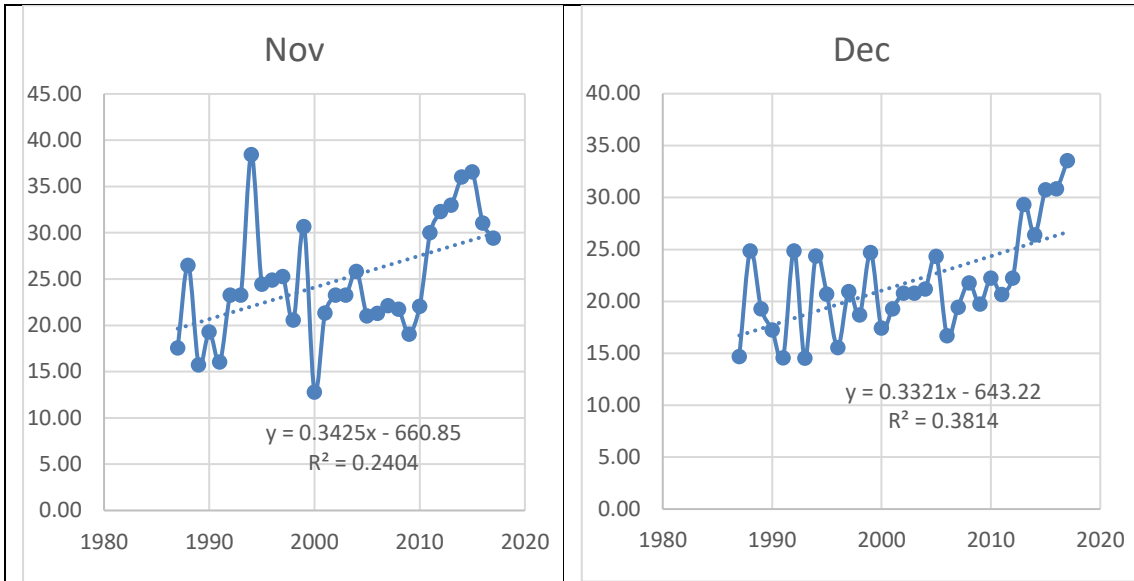




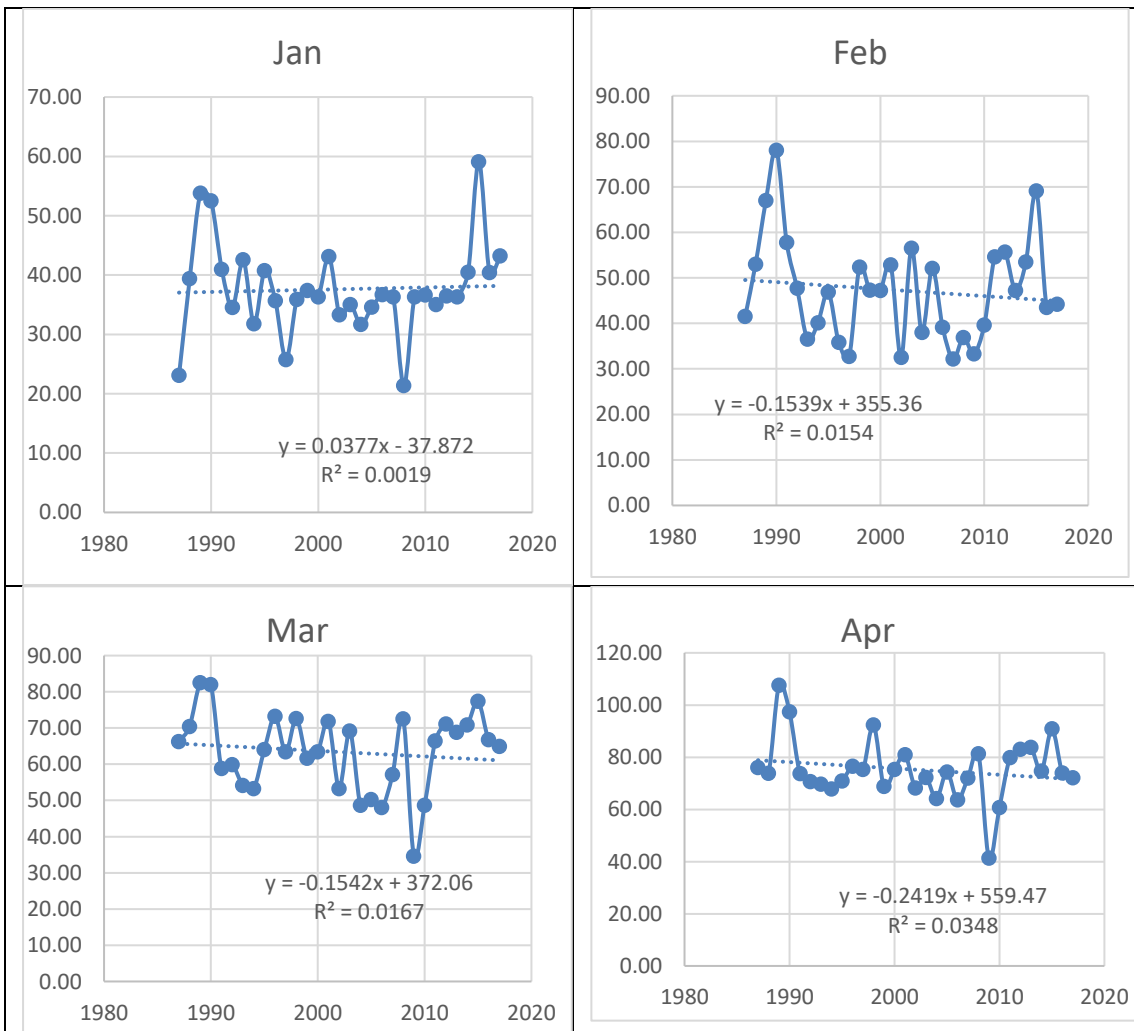
Σχήμα 4.2.6.1. Διαγράμματα μηνιαίων τάσεων του O_3 για τον σταθμό ΑΗ.

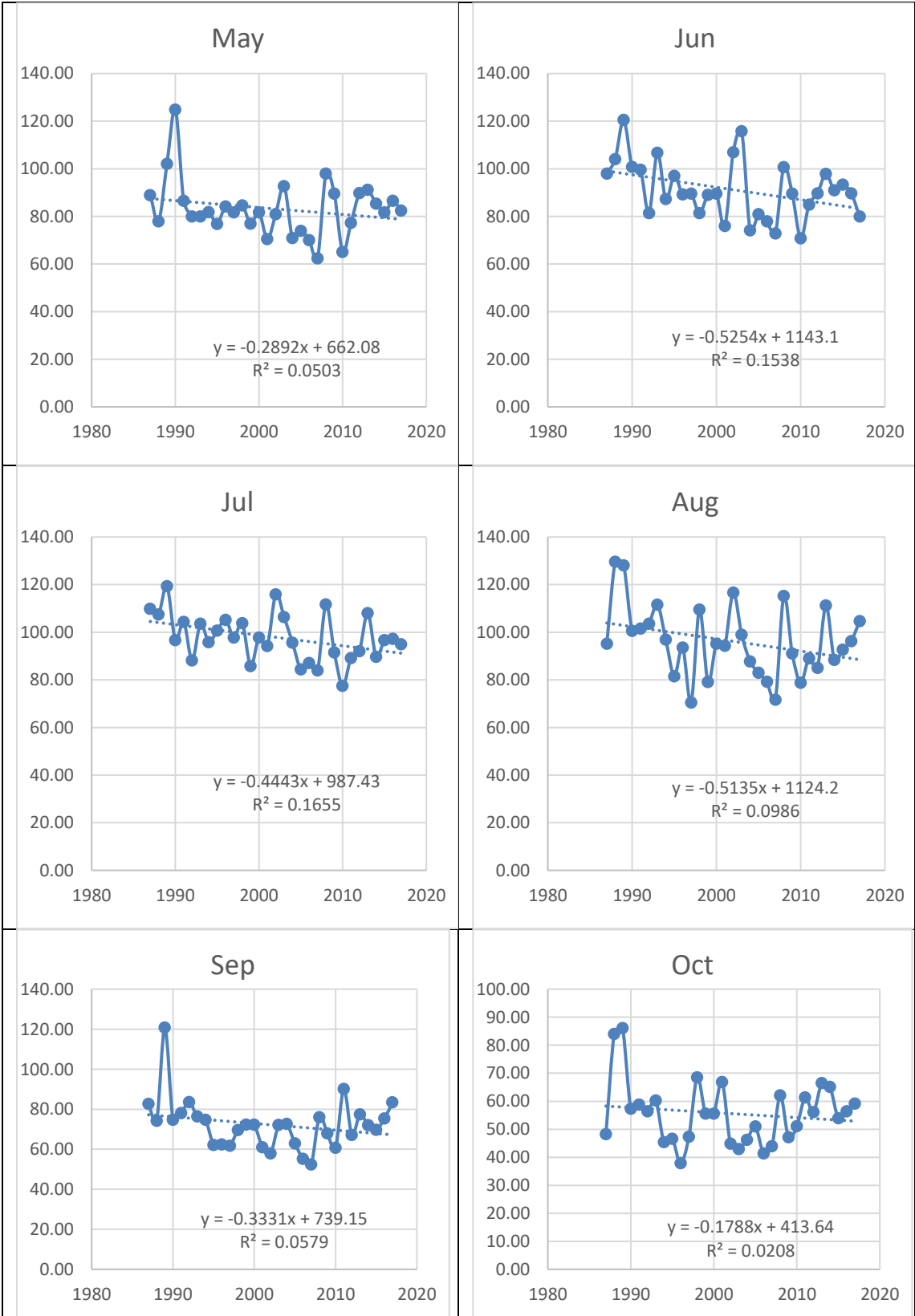


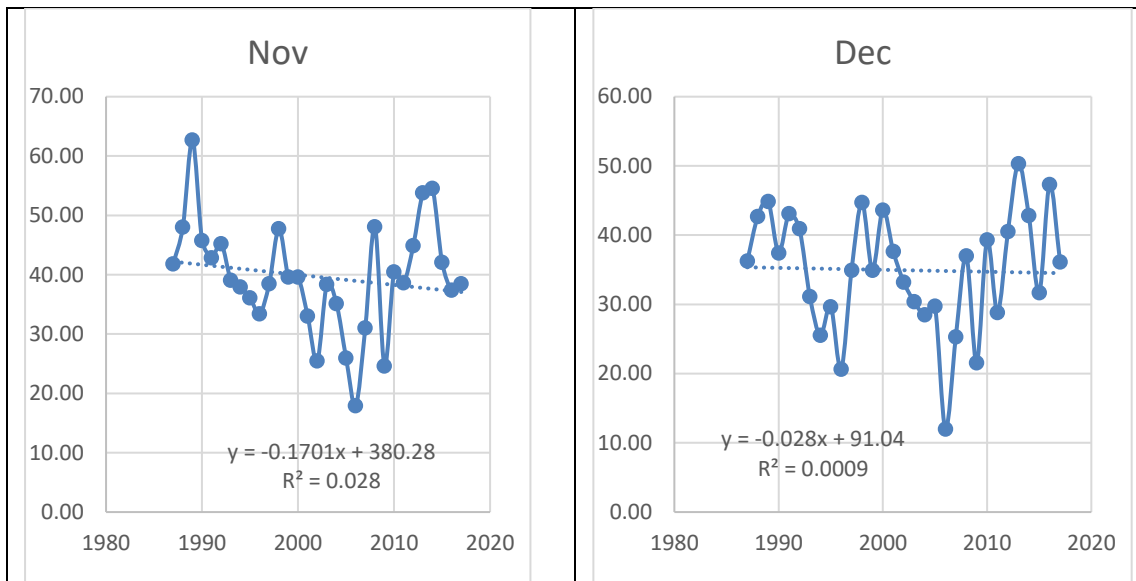




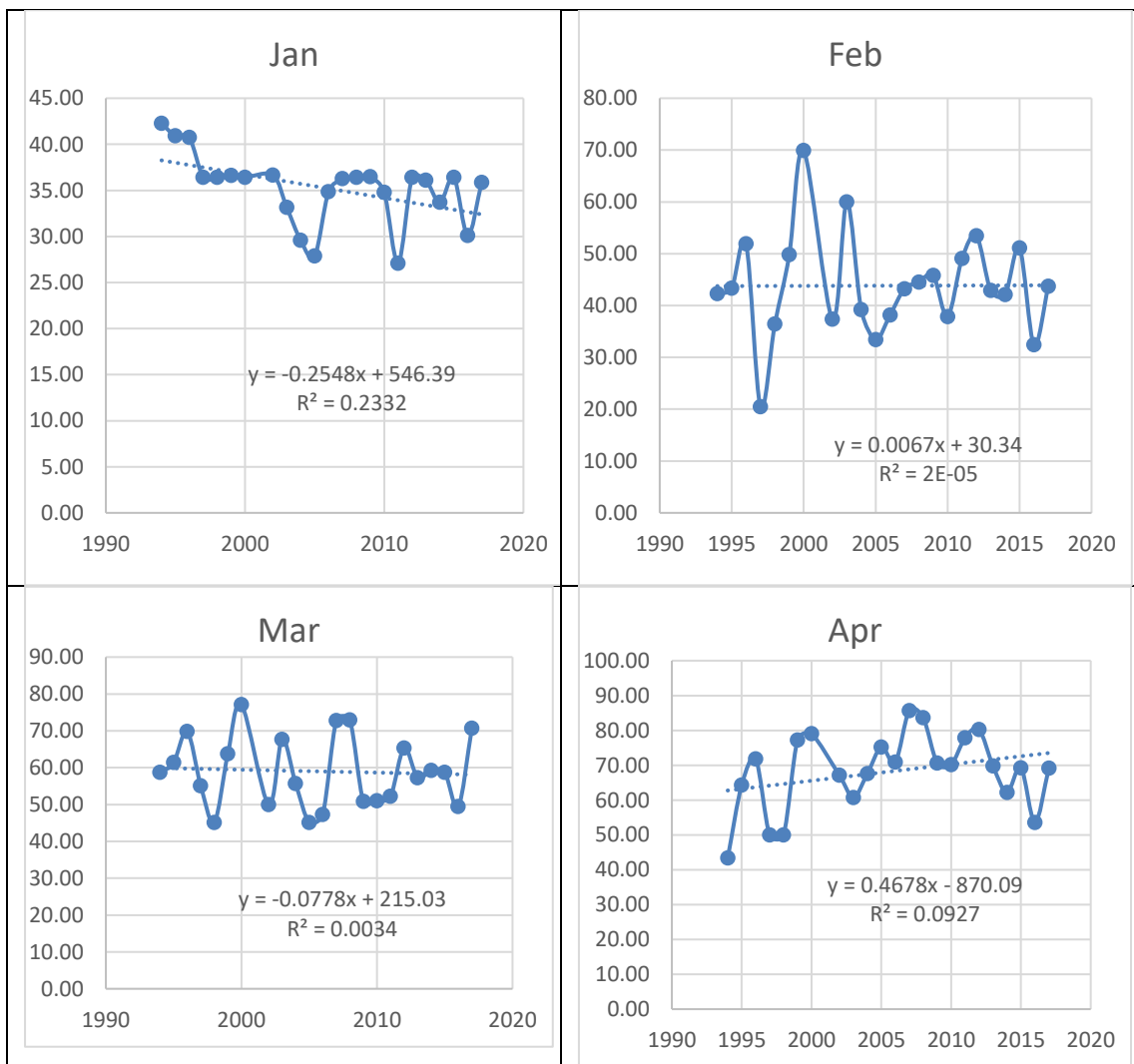
Σχήμα 4.2.6.2. Διαγράμματα μηνιαίων τάσεων του O₃ για τον σταθμό GEO.

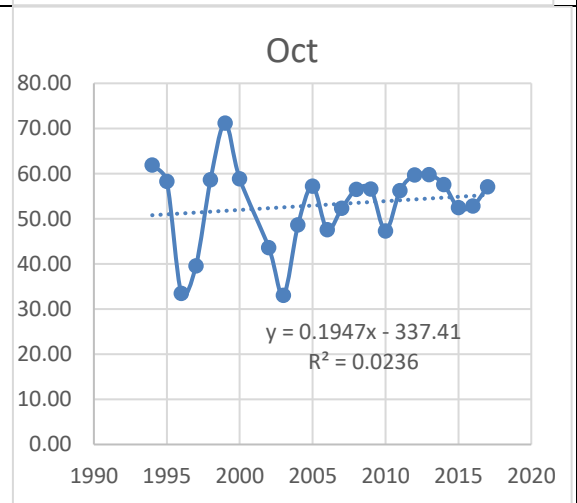
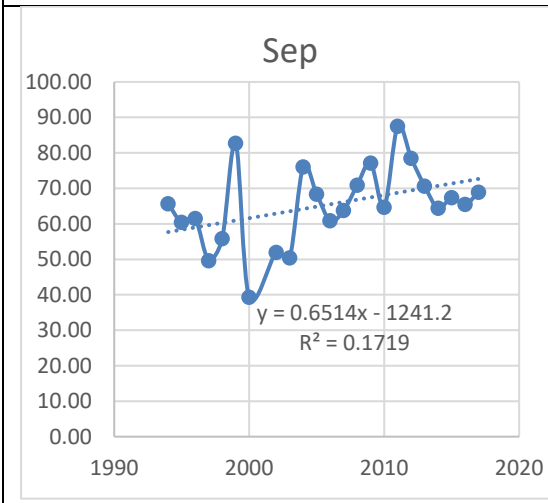
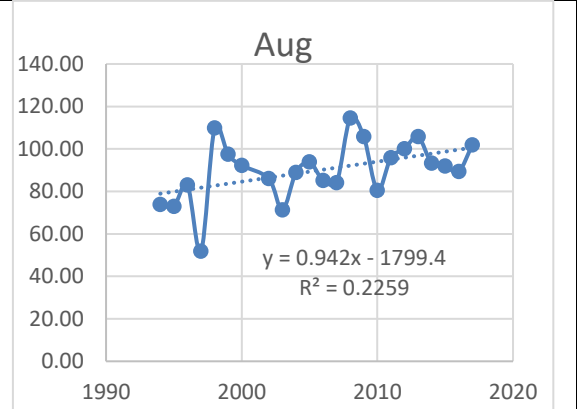
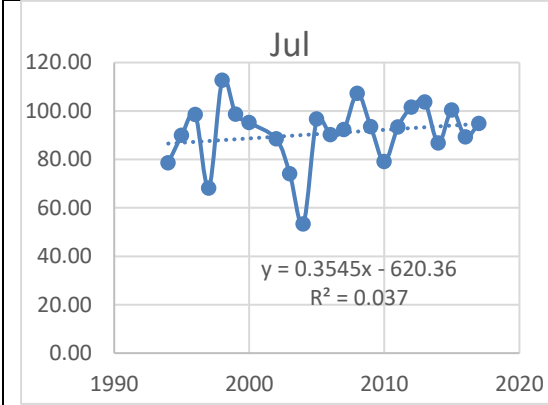
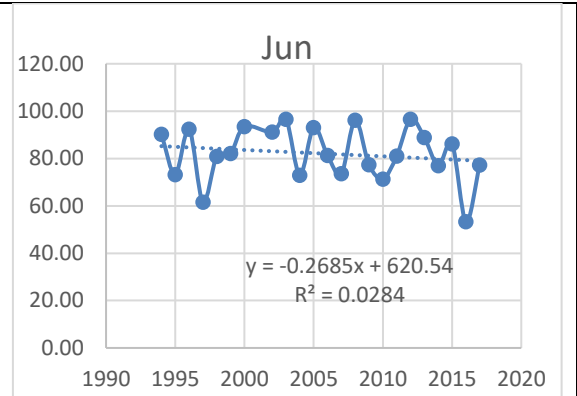
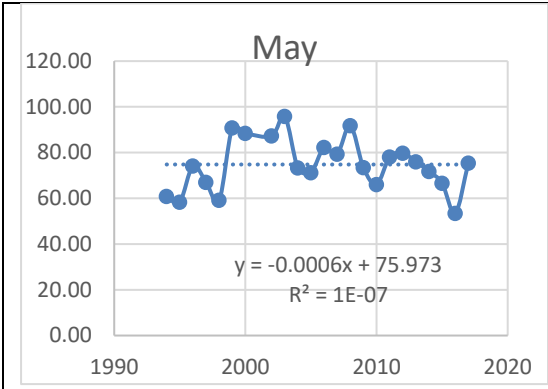


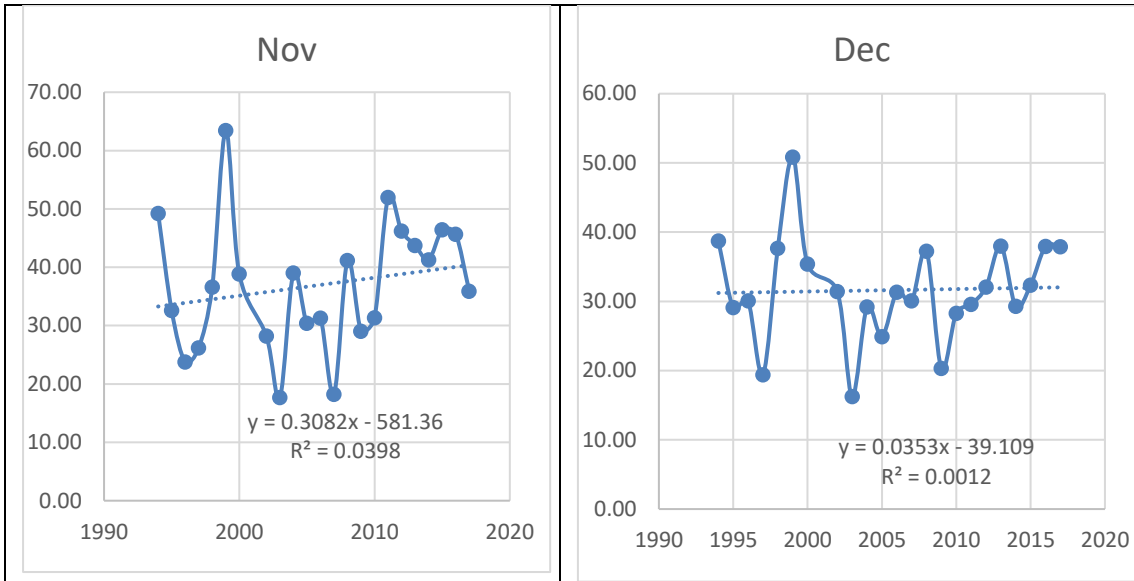




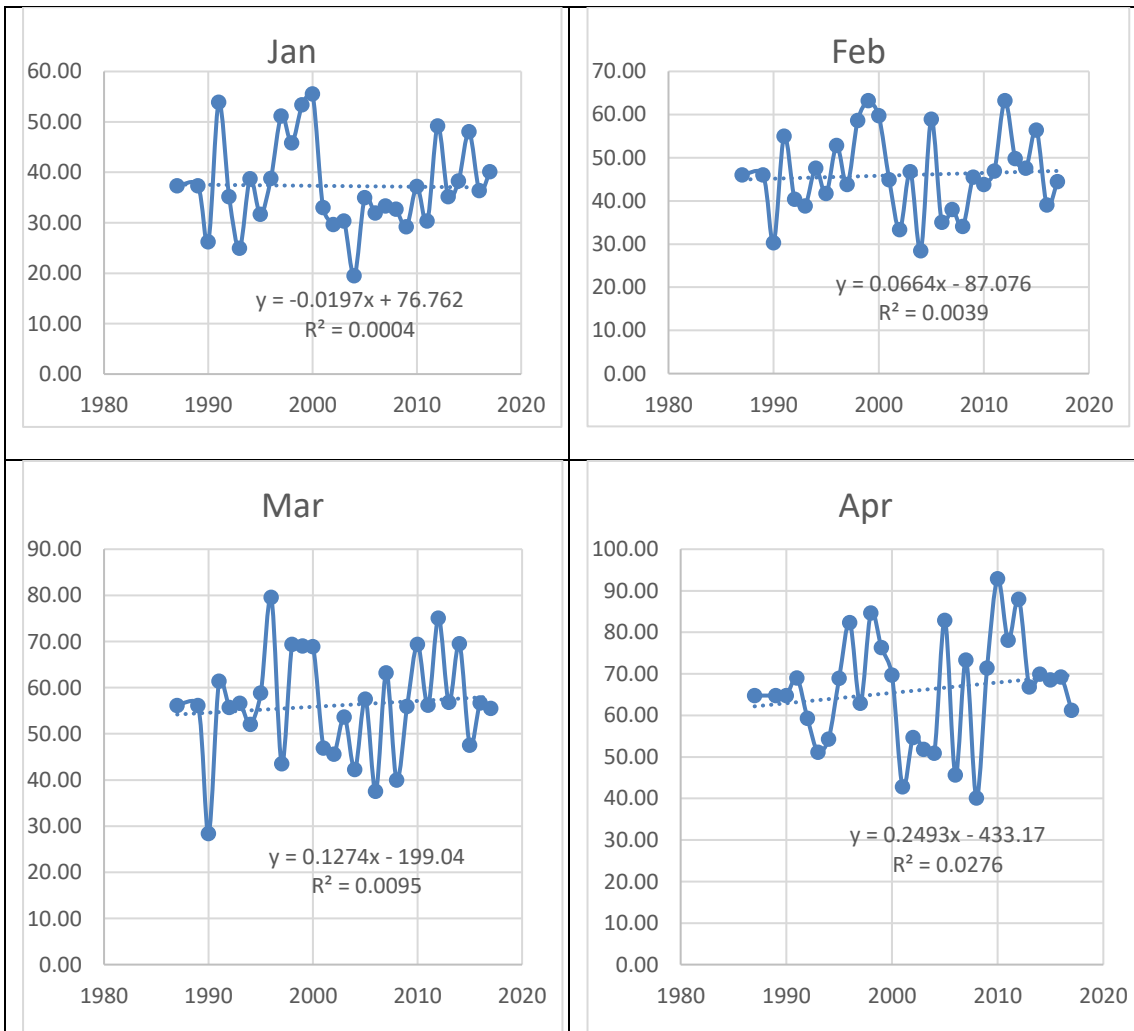
Σχήμα 4.2.6.3. Διαγράμματα μηνιαίων τάσεων του O₃ για τον σταθμό ΛΙΟ.

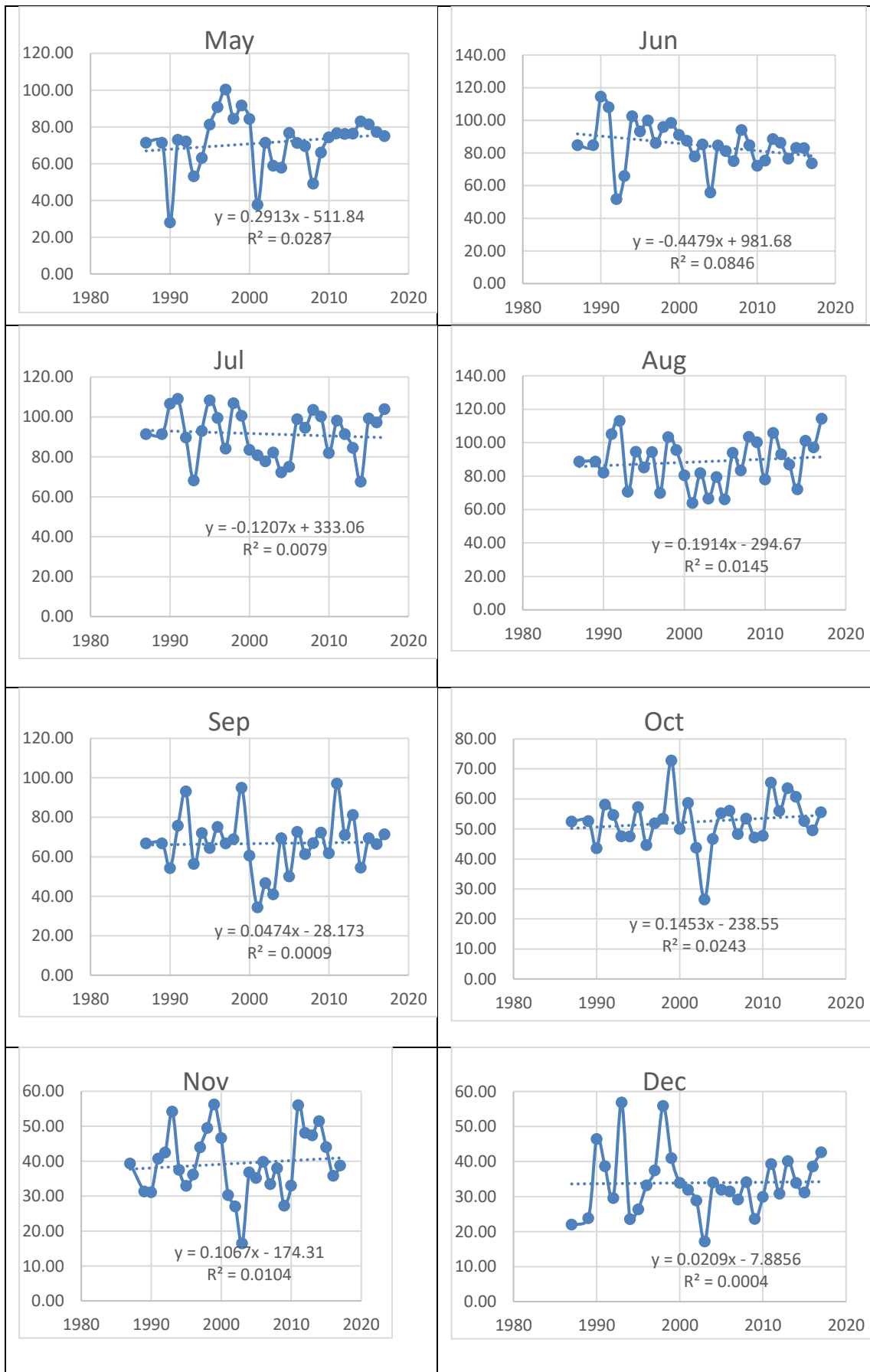




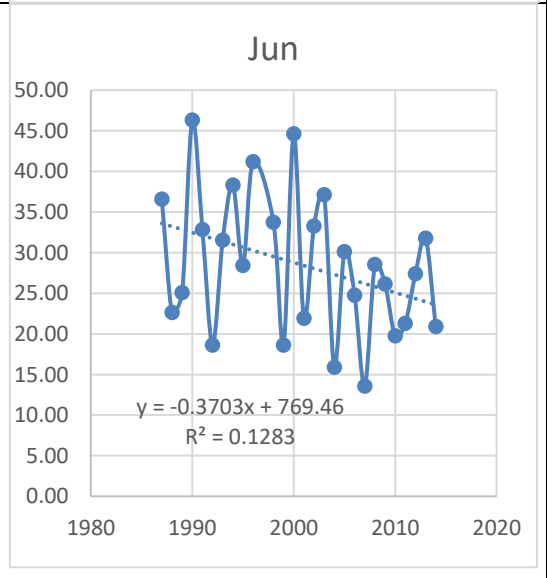
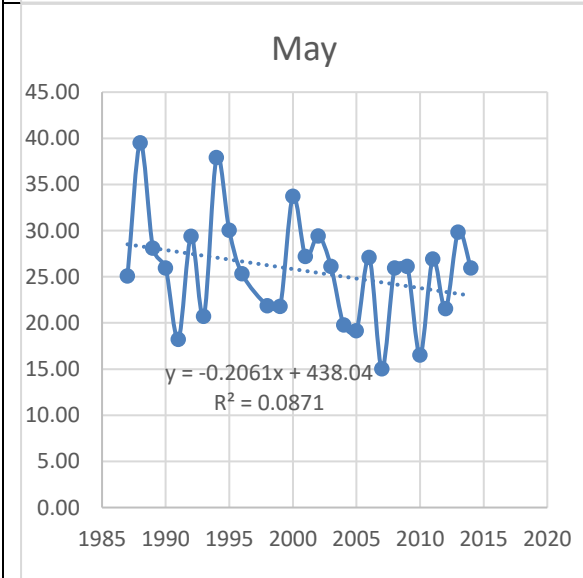
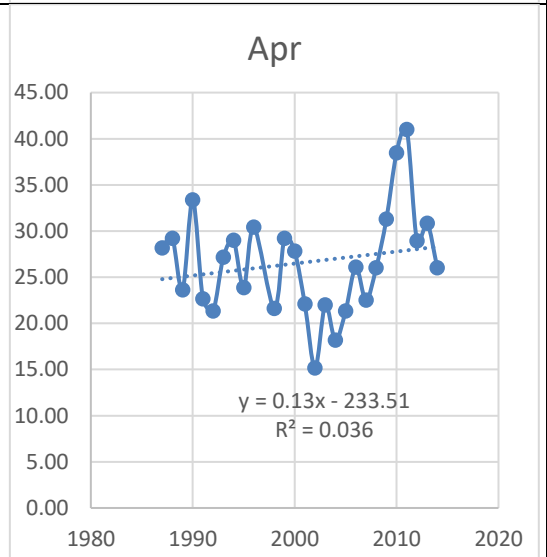
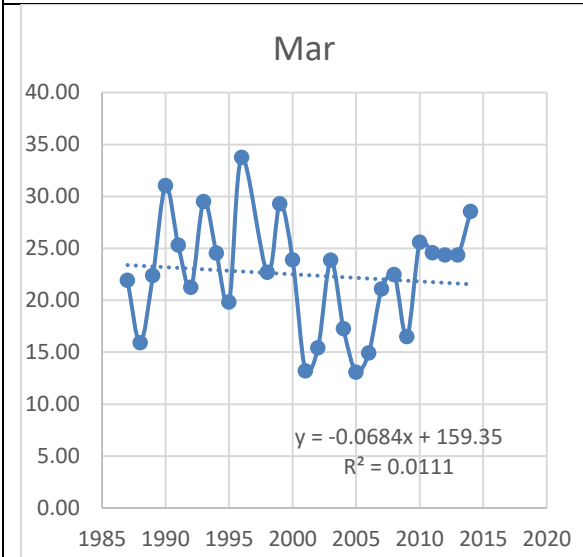
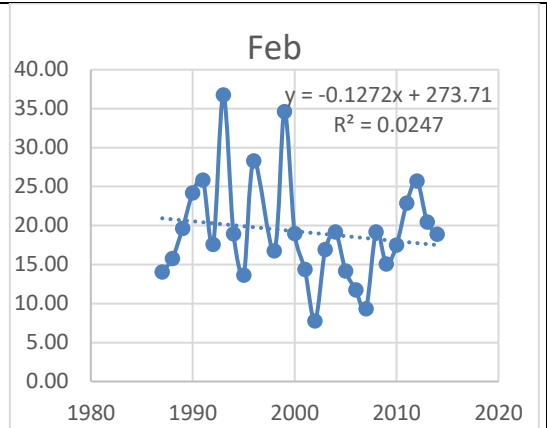
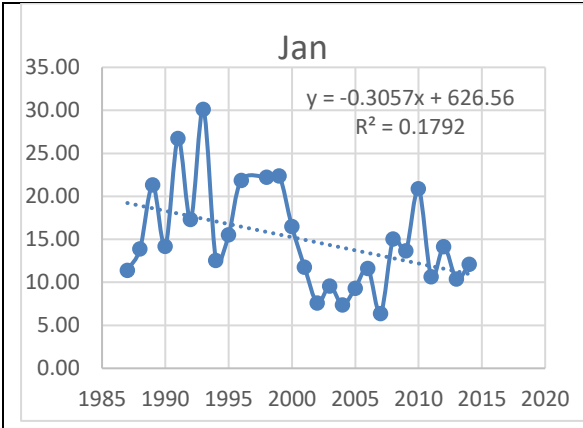


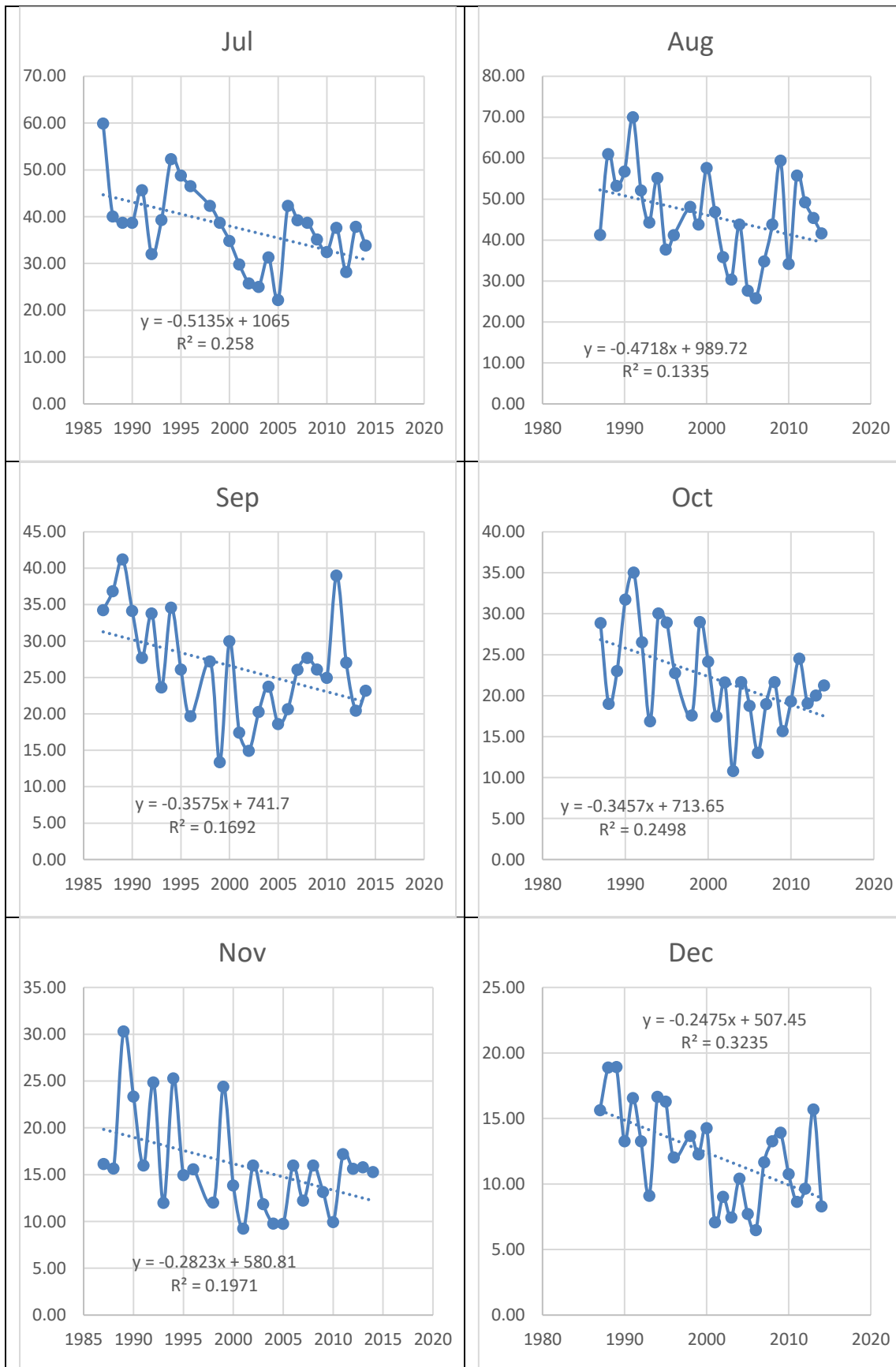
Σχήμα 4.2.6.4. Διαγράμματα μηνιαίων τάσεων O₃ για το σταθμό LYK.



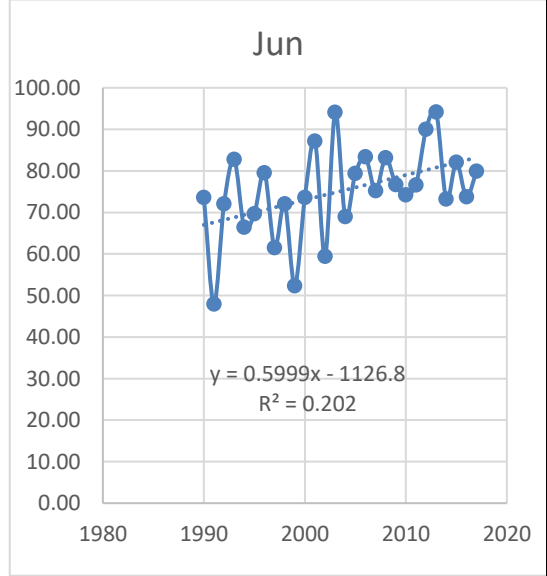
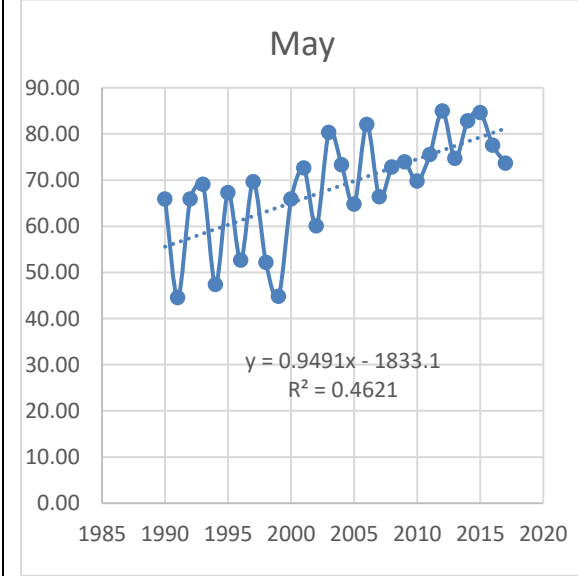
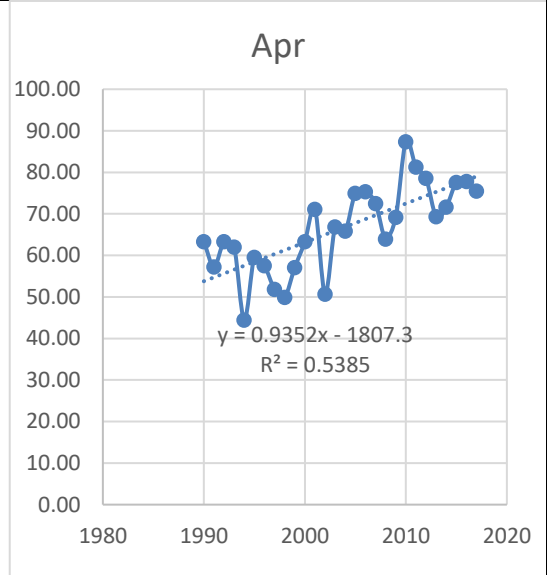
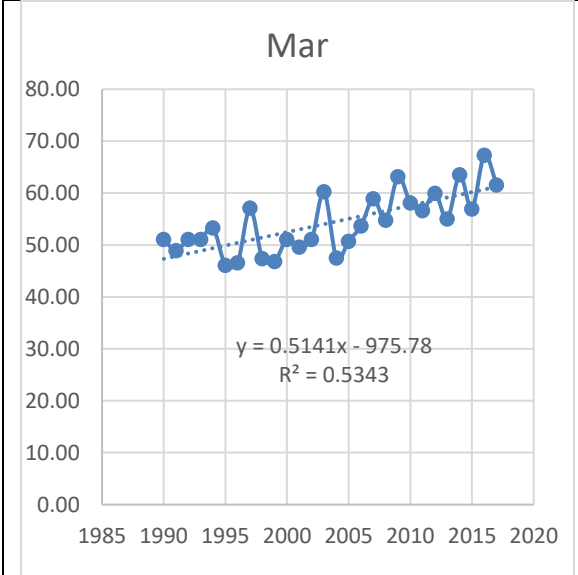
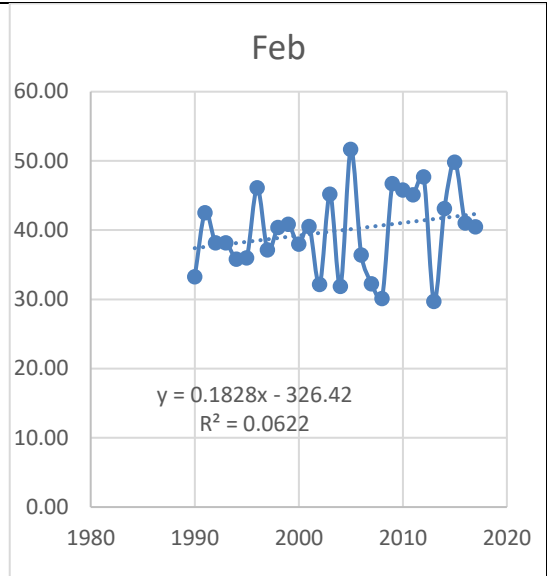
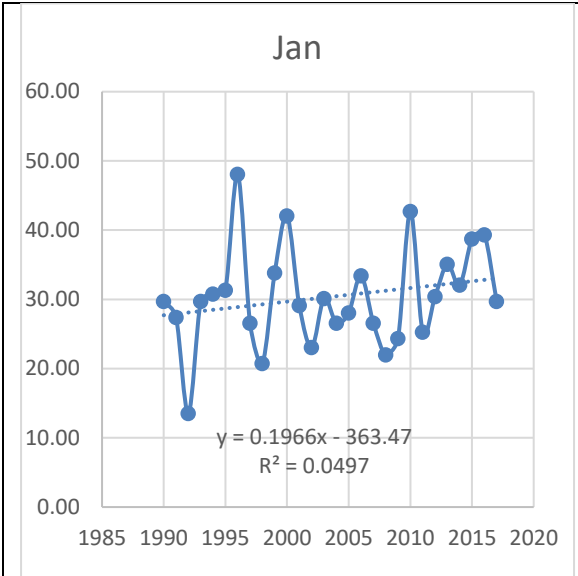


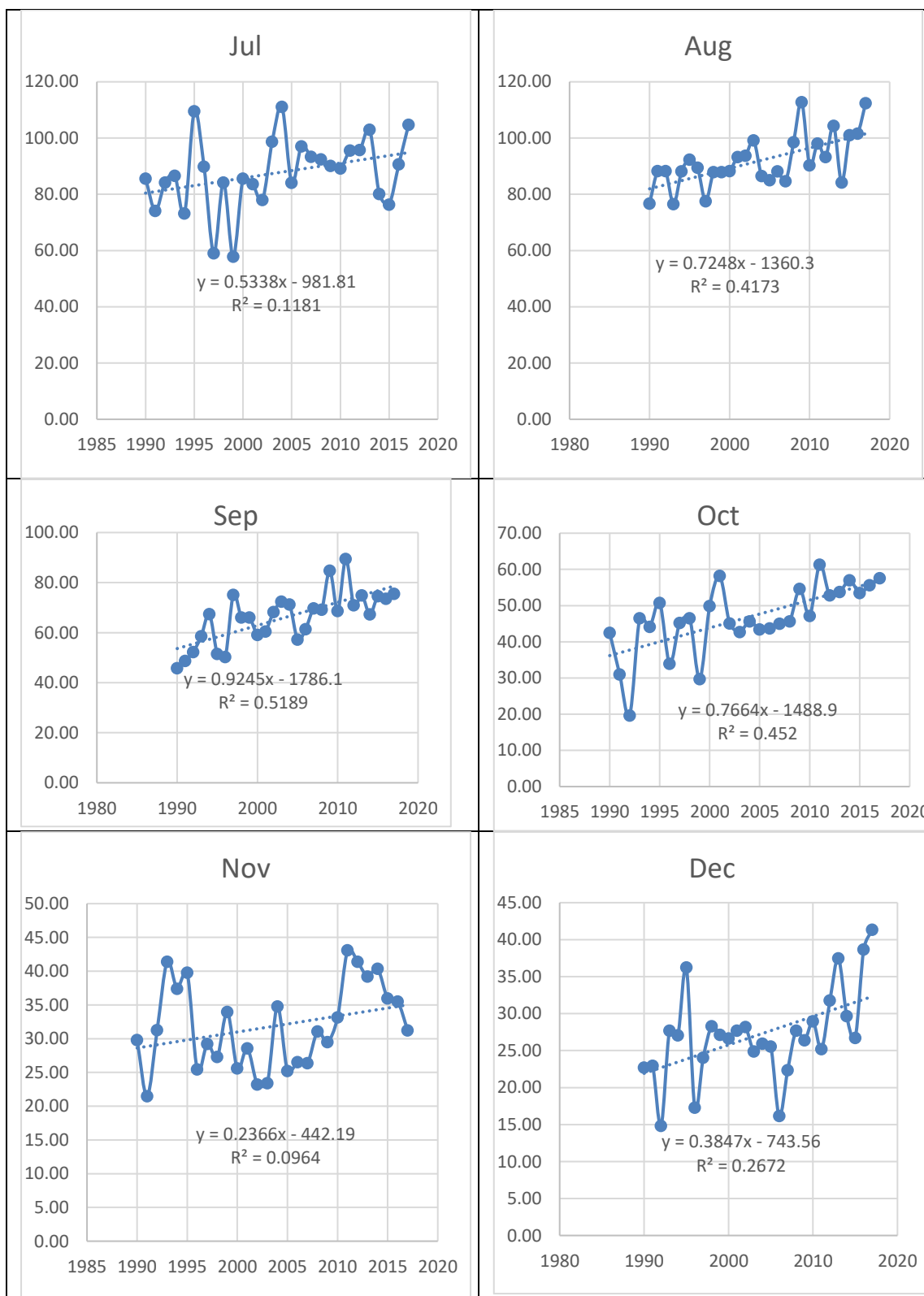
Σχήμα 4.2.6.5. Διαγράμματα μηνιαίων τάσεων του O₃ για τον σταθμό MAR.



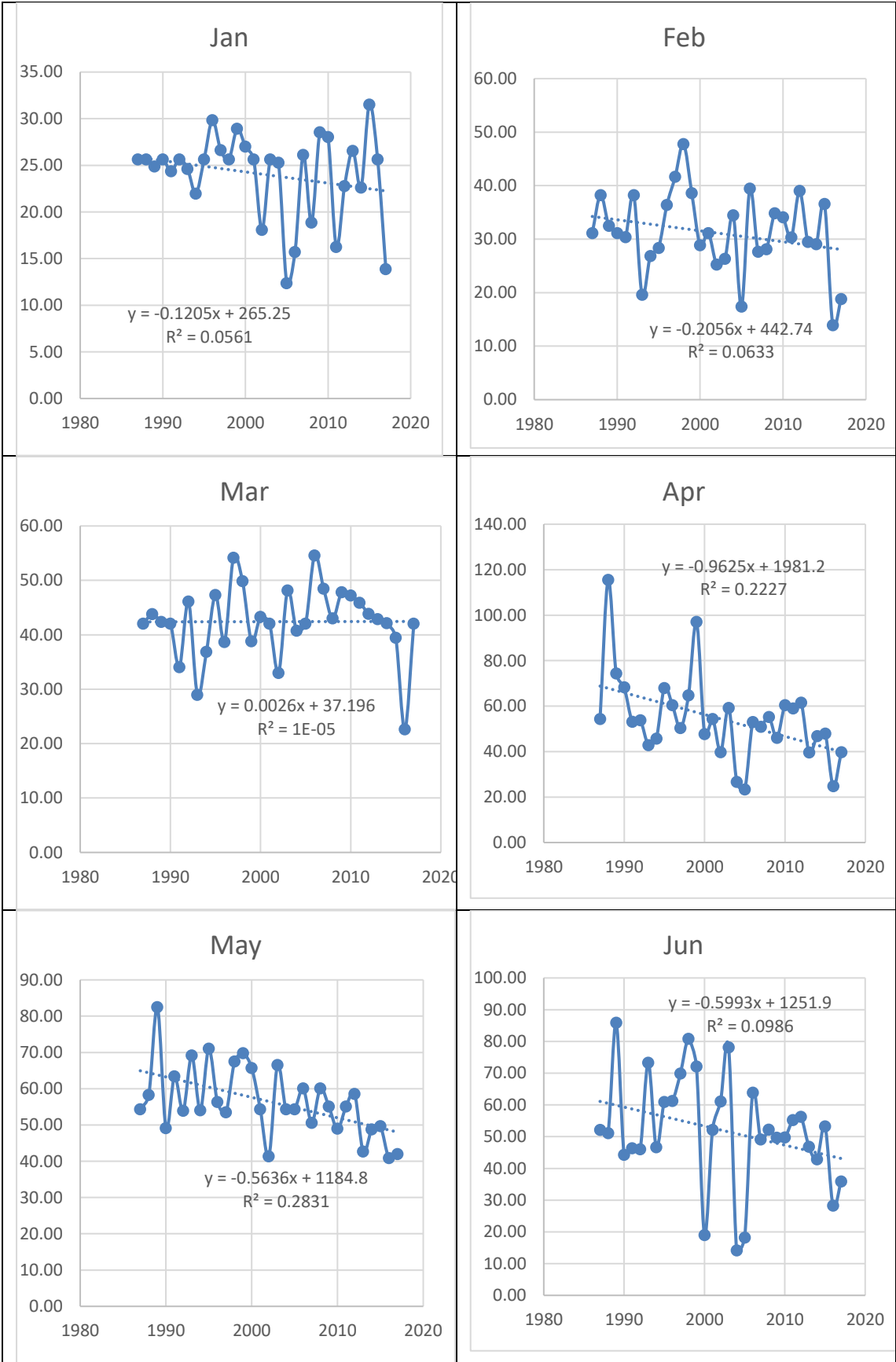


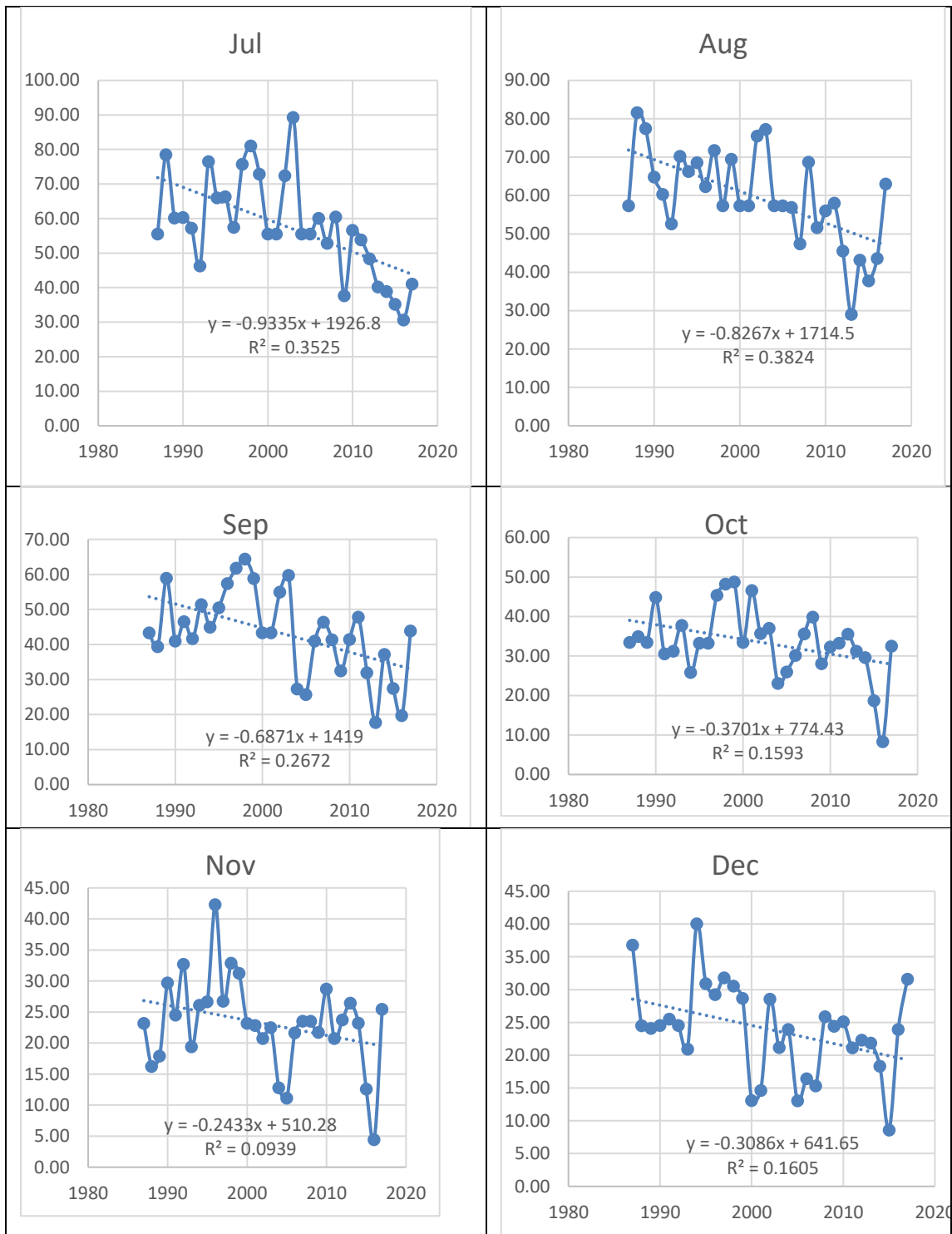
Σχήμα 4.2.6.6. Διαγράμματα μηνιαίων τάσεων του O₃ για τον σταθμό PAT.



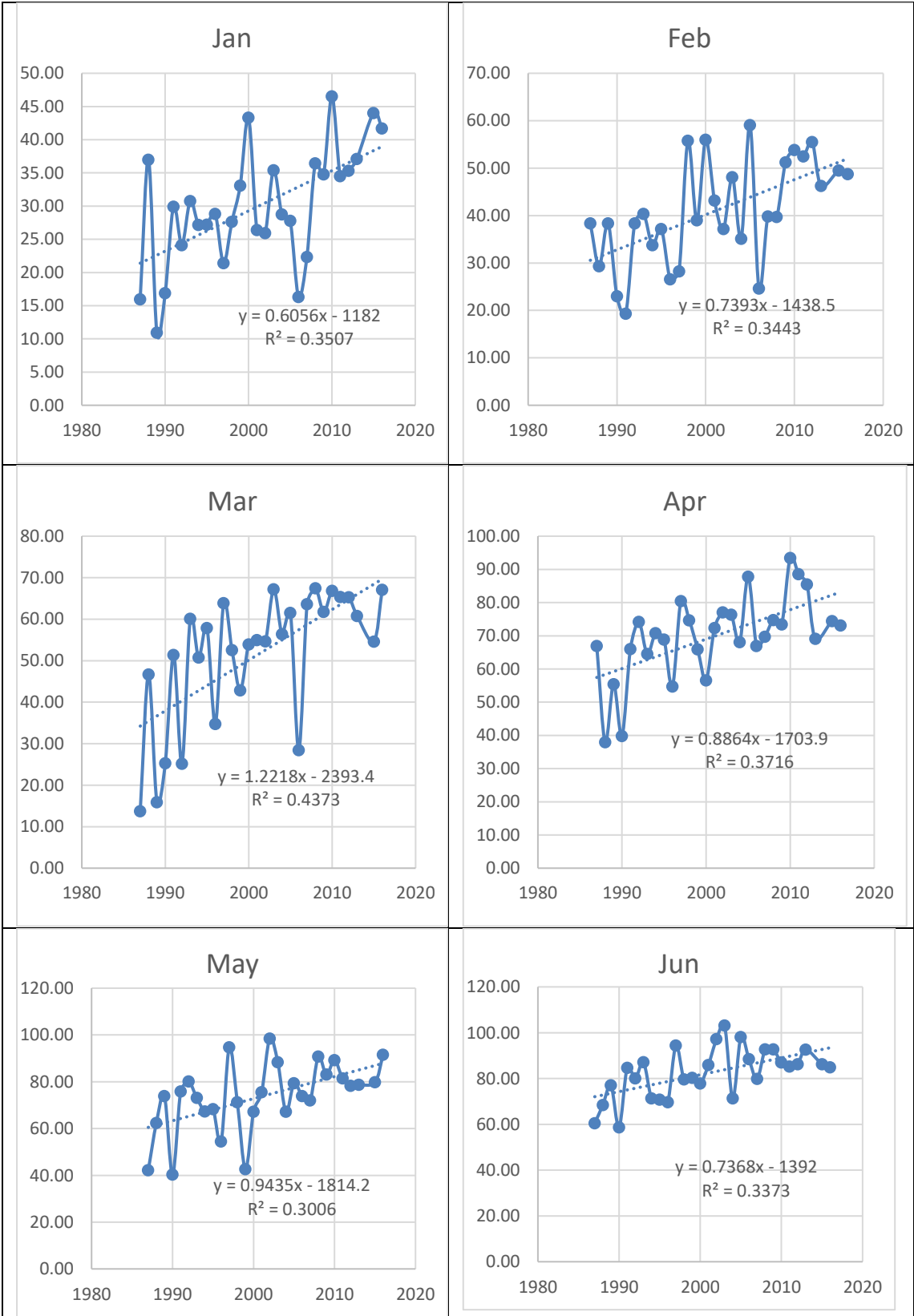


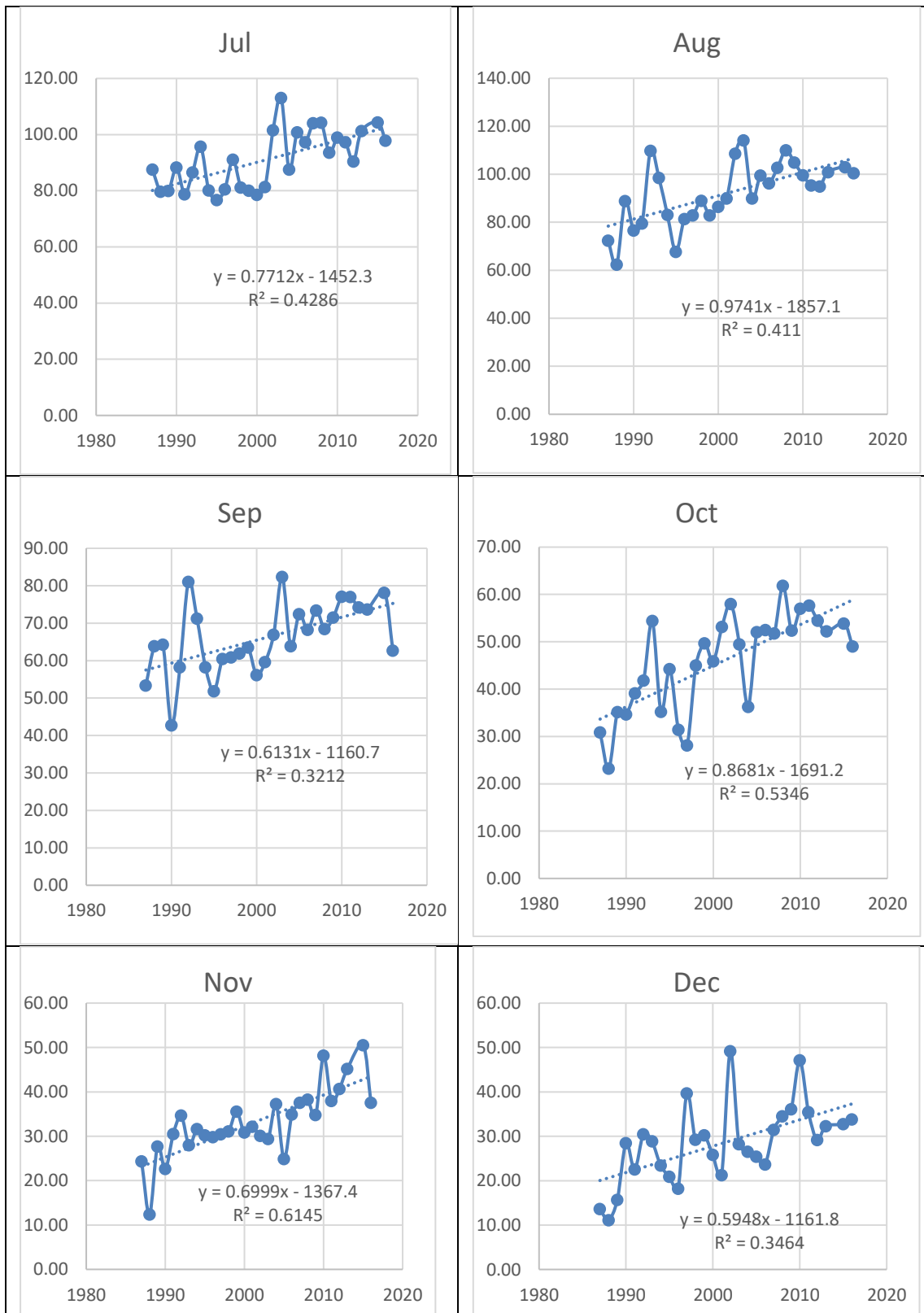
Σχήμα 4.2.6.7. Διαγράμματα μηνιαίων τάσεων του O₃ για τον σταθμό PER.





Σχήμα 4.2.6.8. Διαγράμματα μηνιαίων τάσεων του O₃ για τον σταθμό PIR.





Σχήμα 4.2.6.9. Διαγράμματα μηνιαίων τάσεων του O₃ για τον σταθμό SMY.

Για τον ρύπο του όζοντος O₃ με βάση τα διαγράμματα των μηνιαίων τάσεων για κάθε σταθμό, βλέπουμε ότι οι υψηλότερες τάσεις των ρύπων στο λεκανοπέδιο της Αττικής παρουσιάζονται στους σταθμούς των Βορείων προαστίων δηλαδή LIO, LYK, MAR, καθώς οι τάσεις του O₃ ξεπερνούν τις συγκεντρώσεις των 120 μg/m₃ που είναι και οι υπερβάσεις του

ορίου προστασίας για την υγεία σύμφωνα με τα δεδομένα του ΕΔΠΑΡ για τα έτη 1987-2017 (ΥΠΕΚΑ, 2017). Επομένως, τα παραπάνω που αναφέραμε αποδίδονται κυρίως στα συστήματα της θαλάσσιας αύρας, τα οποία εμφανίζονται κυρίως όταν εξασθενούν οι βόρειοι-βορειοανατολικοί άνεμοι με ισχυρές ταχύτητες που έχουν την ικανότητα να απομακρύνουν τους αέριους ρύπους από την ατμόσφαιρα. Μετά την εξασθένηση αυτών των ανέμων παρουσιάζονται οι νοτιοδυτικοί άνεμοι που είναι και η διεύθυνση προς την οποία φυσάει και η θαλάσσια αύρα μέσω της οποίας αποδίδεται και η μεγαλύτερη συγκέντρωση του ρύπου O_3 στην ατμόσφαιρα (Μελάς, 2007). Επειδή κατά τη διάρκεια της ημέρας επικρατεί έντονη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της ξηράς και της θάλασσας ο αέρας πάνω από την ξηρά είναι θερμότερος σε σχέση με τον αέρα ο οποίος είναι πάνω από τη θάλασσα, και αυτό έχει να κάνει με το γεγονός της αργής θέρμανσης του νερού λόγω της μεγάλης του θερμοχωρητικότητας όπου η ηλιακή ακτινοβολία διεισδύει αρκετά μέτρα κάτω από την επιφάνεια του, σε αντίθεση με την ξηρά όπου η επιφάνεια του εδάφους θερμαίνεται πολύ γρήγορα μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας (Ζιώμας, 2007). Για τον λόγο αυτό πάνω από την ξηρά 2-3 ώρες περίπου μετά την ανατολή του ηλίου η ατμοσφαιρική πίεση είναι πιο μικρή σε σχέση με αυτή που επικρατεί πάνω από την θάλασσα και έτσι δημιουργείται άνεμος που πνέει από την θάλασσα δηλαδή τον κόλπο του Σαρωνικού προς τον βορρά με ύψος που μπορεί να φτάσει και τα 500 μέτρα, και όλα αυτά βέβαια μέχρι τις πρώτες απογευματινές ώρες (geo.auth.gr/aura). Άρα καταλαβαίνουμε ότι με βάση αυτά που αναφέραμε η θαλάσσια αύρα αυξάνει τις συγκεντρώσεις του ρύπου του όζοντος στους σταθμούς των βορείων προαστίων της Αττικής λόγω της επίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας που είναι και βασικός παράγοντας για το σχηματισμό του.

Ως προς τις μηνιαίες συγκεντρώσεις του ρύπου του όζοντος O_3 και παρατηρώντας τα διαγράμματα, βλέπουμε ότι οι μεγαλύτερες τιμές του O_3 επικρατούν τους καλοκαιρινούς κυρίως μήνες δηλαδή Μάιο, Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο, ενώ τον χειμώνα ο ρύπος O_3 έχει σχετικά μικρές τιμές. Το συμπέρασμα αυτό οφείλεται κυρίως στην αυξημένη ηλιοφάνεια σε ένταση και διάρκεια όπου επικρατεί το καλοκαίρι καθώς και στην μεγάλη συχνότητα των θερμοκρασιακών αναστροφών από κατάπτωση που είναι ευνοημένη το καλοκαίρι υπό συνθήκες άπνοιας και χαμηλών ταχυτήτων ανέμων. Επομένως, βάσει αυτών των επεισοδίων που κυριαρχούν έχουμε τη μείωση του στρώματος ανάμιξης κοντά στην περιοχή και άρα τον εγκλωβισμό των ρύπων του O_3 λόγω των χαμηλών ταχυτήτων των ανέμων (Ρεμουντάκη, 2010). Ένας άλλος παράγοντας στον οποίο ευθύνεται αυτή η μεγάλη συγκέντρωση του όζοντος το καλοκαίρι έχει να κάνει με τη θαλάσσια αύρα όπως περιγράψαμε και παραπάνω, η οποία φυσά τις μέρες του καλοκαιριού λίγες ώρες μετά την ανατολή του ηλίου μέχρι αργά το απόγευμα με πορεία από τη θάλασσα προς τη στεριά, άρα καταλαβαίνουμε ότι ο λόγος για τον οποίο δημιουργείται η θαλάσσια αύρα οφείλεται κατά κύριο λόγο στην θέρμανση της ξηράς που βρίσκεται κοντά στη θάλασσα, αναγκάζοντας έτσι τον αέρα να κινείται ανοδικά επειδή θερμαίνεται απότομα, έχουμε επομένως την κίνηση του αέρα από περιοχή υψηλών πιέσεων που είναι η θάλασσα όπου το καλοκαίρι πάνω από αυτήν ο αέρας είναι ψυχρότερος, προς περιοχές χαμηλών πιέσεων, δηλαδή προς την ξηρά όπου ο αέρας είναι θερμότερος. Τους χειμερινούς μήνες όπου η ηλιοφάνεια είναι μικρής διάρκειας η θαλάσσια αύρα είναι ασθενέστερη. Σαν αποτέλεσμα αυτών που περιγράψαμε τώρα είναι η δημιουργία του δευτερογενούς ρύπου του όζοντος

που σχηματίζεται με την δημιουργία των NOx μέσω της αλληλεπίδρασης τους με την ακτινοβολία του ηλίου.

Με βάση τις διαχρονικές διακυμάνσεις του όζοντος O₃ στους σταθμούς της Αθήνας παρατηρούμε γενικά μια τάση σταθεροποίησης τους η οποία έχει να κάνει και με τις κλιματικές συνθήκες που επικρατούν στην Αττική, όπου λόγω των υψηλών θερμοκρασιών και της έντονης ηλιοφάνειας καθώς και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του Λεκανοπεδίου που η τοπογραφία του είναι κλειστή λόγω της ύπαρξης των ορεινών όγκων που εμποδίζουν την διασπορά και απομάκρυνση των ρύπων σε συνδυασμό πάντα με την αύξηση των ρυπογόνων δραστηριοτήτων των ανθρώπων όπως η αυξημένη χρήση των μέσων κινητής τροχιάς (ΥΠΕΚΑ, 2017), οι τάσεις κυμαίνονται περίπου σε σταθερά επίπεδα για όλα τα χρόνια. Ενώ στους σταθμούς των βορείων προαστίων δηλαδή στα Λιόσια, τη Λυκόβρυση και το Μαρούσι και κυρίως για τα έτη μεταξύ 1998-2009 βλέπουμε ότι οι τιμές του O₃ ξεπερνούν κατά πολύ τα 120μg/m₃ που είναι και οι τιμές του ορίου συναγερμού για την ανθρώπινη υγεία με βάση τα δεδομένα από την έκθεση του ΥΠΕΚΑ, πράγμα το οποίο έχει να κάνει κυρίως με το φαινόμενο της θαλάσσιας αύρας όπως περιγράψαμε και παραπάνω το οποίο παρουσιάζεται ιδιαίτερα έντονα το καλοκαίρι με αυξημένη θερμοκρασία και ηλιοφάνεια, ενώ για τα υπόλοιπα έτη οι τιμές του O₃ δεν είναι τόσο μεγάλες κυρίως γιατί υπάρχει αλλαγή των κινητήρων των αυτοκινήτων με νέους όπως αναφέραμε και για το ρύπο του NO και έτσι δεν παράγονται οι ρύποι των NOx που είναι και οι βασικοί υπεύθυνοι για την δημιουργία των δευτερογενών ρύπων του O₃ μέσω διαφόρων φωτοχημικών αντιδράσεων.

5 Συμπεράσματα

Η συστηματική εξέταση των φαινομένων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στα μεγάλα αστικά κέντρα μας οδηγεί στην μελέτη των παραγόντων, των διαφόρων δηλαδή ουσιών οι οποίες οδηγούν σε σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, στα διάφορα οικοσυστήματα, καθώς και στην ανθρώπινη υγεία. Ένα τέτοιο φαινόμενο το οποίο και αναλύεται στην εργασία είναι η δημιουργία του φωτοχημικού νέφους, που είναι αποτέλεσμα της επίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας με τα οξείδια του αζώτου NO , και NO_2 , και των Πτητικών Οργανικών Ενώσεων σε συνδυασμό με γεωγραφικούς παράγοντες που έχουν να κάνουν με τη θέση των σταθμών που μελετώνται (αστικός-κυκλοφορίας, υποβάθρου). Έπειτα από την επεξεργασία των δεδομένων που συγκεντρώνουν οι Σταθμοί Μέτρησης της Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης σχετικά με τη συσσώρευση των φωτοχημικών ρύπων στις αστικές μεγαλουπόλεις, είναι δυνατό να οδηγήσουν στον έλεγχο και στην καλύτερη βελτίωση της ποιότητας της ατμόσφαιρας προκειμένου να μην υπάρξουν στο μέλλον προβλήματα επεισοδίων ρύπων.

Σε αυτή την εργασία μελετήθηκε η συγκέντρωση των φωτοχημικών ρύπων στο Λεκανοπέδιο της Αττικής. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του Εθνικού Δικτύου Μέτρησης των σταθμών της Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης, και συγκεκριμένα για τους σταθμούς των βόρειων, νότιων και κεντρικών προαστίων αναλύονται οι ωριαίες διακυμάνσεις των φωτοχημικών ρύπων NO , NO_2 , και O_3 ανά μήνα, έτσι ώστε να μελετηθεί η κατανομή τους κατά τη διάρκεια του 24ώρου μέσα στο έτος, καθώς και η χωρική κατανομή τους σε κλιματολογική βάση κατά τα έτη 1984–2017. Επίσης, μελετάται και η χρονική συμπεριφορά των εξεταζόμενων ρύπων ανά μήνα για κάθε σταθμό ξεχωριστά. Συγκεκριμένα, από την ανάλυση των δεδομένων και με βάση τα διαγράμματα βρέθηκε ότι:

- Για τις ωριαίες μεταβολές των φωτοχημικών ρύπων και συγκεκριμένα για το ρύπο του NO βρέθηκε ότι εμφανίζει μέγιστα μεταξύ των ωρών 8-10 πμ και 21-23 μμ, διότι σε εκείνο το χρονικό διάστημα επικρατούν έντονες κυκλοφοριακές αιχμές, χρήση των κεντρικών θερμάνσεων και ευνοϊκές μετεωρολογικές συνθήκες για τη συγκέντρωση των ρύπων όπου λόγω της δημιουργίας των θερμοκρασιακών αναστροφών, οι χαμηλές ταχύτητες του ανέμου επιδρούν αρνητικά στον αερισμό της περιοχής και επομένως ο ρύπος εγκλωβίζεται.
- Σύμφωνα με τις ωριαίες μεταβολές των συγκεντρώσεων του φωτοχημικού ρύπου του NO_2 διαπιστώθηκε ότι παρουσιάζει κάποια χρονική στέρηση σε σύγκριση με το ρύπο του NO , δηλαδή εμφανίζει τα χρονικά του μέγιστα μεταξύ των ωρών 10-12 και 22-24 μμ, διότι ανήκει στην κατηγορία των δευτερογενών ρύπων όπου ο σχηματισμός του προκύπτει μέσω του αερίου του NO , το οποίο αντιδρά με την ηλιακή ακτινοβολία
- Για τον ρύπο του όζοντος O_3 με βάση τις αναλύσεις που έγιναν βρέθηκε ότι τις μεταμεσημβρινές ώρες εμφανίζει τις μέγιστες τιμές καθώς τις ώρες αυτές εμφανίζεται το μέγιστο της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας από την οποία και εξαρτάται ο σχηματισμός της δευτερογενούς ρύπανσης.

- Με βάση τις μηνιαίες τιμές των ρύπων του μονοξειδίου του αζώτου NO για κάθε σταθμό βρέθηκε ότι τους χειμερινούς μήνες δηλαδή Ιανουάριο, Φεβρουάριο, Νοέμβριο και Δεκέμβριο οι συγκεντρώσεις είναι μέγιστες, ενώ τους μήνες του καλοκαιριού δηλαδή Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο οι συγκεντρώσεις είναι μικρές και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τον χειμώνα γίνεται μέγιστη χρήση των διαφόρων συστημάτων θέρμανσης καθώς και υπερβολική χρήση των καμινάδων που έχει σαν συνέπεια να δημιουργούνται στην ατμόσφαιρα αέρια πλούσια σε ρύπους των οξειδίων του αζώτου. Επίσης, επικρατεί και αύξηση της χρήσης των μέσων κινητής τροχιάς για σκοπούς μετακίνησης του εργατικού δυναμικού που έχει σαν αποτέλεσμα τη ρύπανση της ατμόσφαιρας από τα καυσαέρια.
- Για τον ρύπο του διοξειδίου του αζώτου NO₂ βρέθηκαν στους περισσότερους σταθμούς μέγιστες συγκεντρώσεις τους καλοκαιρινούς μήνες και κυρίως το μήνα Ιούνιο λόγω του ότι είναι ένας δευτερογενής φωτοχημικός ρύπος που προκύπτει μέσω του σχηματισμού του πρωτογενή ρύπου NO εξ αιτίας της παρουσίας της ηλιακής ακτινοβολίας. Στους σταθμούς LIO, LYK και MAR οι μέγιστες τάσεις του NO₂ εντοπίζονται τους χειμερινούς μήνες λόγω των θερμοκρασιακών αναστροφών που περιγράφουμε.
- Στον ρύπο του όζοντος O₃ τους καλοκαιρινούς μήνες Μάιο, Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο εντοπίστηκαν αυξημένες συγκεντρώσεις λόγω κυρίως της αυξημένης ηλιοφάνειας που επικρατεί το καλοκαίρι. Επιπλέον, οι τιμές αυτές οφείλονται και στο παράγοντα της θαλάσσιας αύρας που επικρατεί το καλοκαίρι όπου δημιουργείται πνοή του ανέμου λίγο πριν το μεσημέρι και μέχρι αργά το απόγευμα με πορεία από τη θάλασσα προς τη στεριά με συνέπεια τη συσσώρευση των ρύπων στο εσωτερικό του λεκανοπεδίου.
- Σύμφωνα με τις χρονικές μεταβολές του ρύπου του NO παρατηρούμε ότι οι τιμές από το 2008 και μετά αρχίζουν να μειώνονται γεγονός που έχει να κάνει με τη τεχνολογική αναβάθμιση των αυτοκινήτων στα οποία γίνεται χρήση των εναλλακτικών καυσίμων αντικαθιστώντας τη βενζίνη και το ντίζελ, τα οποία είναι υπεύθυνα για τις συγκεντρώσεις του NO στην ατμόσφαιρα.
- Για τον ρύπο του διοξειδίου του αζώτου NO₂ σε ό,τι αφορά τις χρονικές μεταβολές βρέθηκε ότι ακολουθεί την ίδια πορεία σε σχέση με το ρύπο του μονοξειδίου του αζώτου.
- Ο ρύπος του όζοντος O₃ παρουσιάζει μια τάση σταθεροποίησης στους σταθμούς της Αθήνας που έχει να κάνει κυρίως με τις κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στην Αττική που είναι η έντονη ηλιοφάνεια σε συνδυασμό με τα ιδιαίτερα τοπογραφικά χαρακτηριστικά του Λεκανοπεδίου που είναι η ύπαρξη ορεινών όγκων και η κλειστή τοπογραφία, εμποδίζοντας έτσι την απομάκρυνση και διασπορά των ρύπων.
- Με βάση τα διαγράμματα των μηνιαίων τάσεων βρέθηκε ότι ο ρύπος NO εμφανίζει στους σταθμούς ARI, ATH, MAR, GEO, PAT και PIR τις μεγαλύτερες μειώσεις διότι οι σταθμοί αυτοί ανήκουν στην κατηγορία των σταθμών αστικής κυκλοφορίας και βιομηχανικών ενώ οι υπόλοιποι σταθμοί LIO, LYK, PER και SMY ανήκουν στην κατηγορία των σταθμών υποβάθρου και έτσι δεν επηρεάζονται από κάποια πηγή εκπομπής ρύπων καθώς βρίσκονται μακριά.

- Στον ρύπο του διοξειδίου του αζώτου NO₂ εντοπίστηκαν οι μεγαλύτερες τάσεις μείωσης στους σταθμούς ARI, ATH, PAT και PIR διότι είναι αστικής κυκλοφορίας, ενώ στους σταθμούς GEO, LIO, LYK, MAR, PER, και SMY οι τάσεις δεν είναι τόσο ισχυρές, καθώς ανήκουν στην κατηγορία των σταθμών αστικού υποβάθρου με τη μικρότερη παραγωγή των ρύπων.
- Για τον ρύπο του όζοντος O₃ σύμφωνα με τα διαγράμματα των μηνιαίων τιμών των τάσεων βρέθηκε ότι παρουσιάζει τις μεγαλύτερες μεταβολές στους σταθμούς των βορείων προαστίων δηλαδή LIO, LYK, και MAR.

6 Βιβλιογραφία

- Athanasopoulou, E., O. Speyer, D. Brunner, H. Vogel, B. Vogel, N. Mihalopoulos, and E. Gerasopoulos, 2017: Changes in domestic heating fuel use in Greece: effects on atmospheric chemistry and radiation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 10597–1061. <https://doi.org/10.5194/acp-17-10597-2017>
- Valavanidis, V., T. Vlachogianni, S. Loridas, C. Fiotakis, 2015: Atmospheric Pollution in Urban Areas of Greece and Economic Crisis. Trends in air quality and atmospheric pollution data, research, and adverse health effects, Department of Chemistry, University of Athens. http://www.chem.uoa.gr/wp-content/uploads/epistimonika_themata/atmosph_pollut_greece.pdf
- Βαλαβανίδης, Α., 2008: ΟΙΚΟΤΟΞΙΚΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΤΟΞΙΚΟΛΟΓΙΑ, Ερευνητική μεθοδολογία για την εκτίμηση οικολογικού κινδύνου από επικίνδυνες χημικές ουσίες, Σύγχρονα θέματα. ISBN 978-960-88130-6-9
- Γεντεκάκης, Β.Ι., 2010: ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ: επιπτώσεις, έλεγχος και εναλλακτικές τεχνολογίες. Κλειδάριθμος, Αθήνα. ISBN 978-960-461-394-6
- Εθνικό Κέντρο Περιβάλλοντος και Αειφόρου Ανάπτυξης (ΕΚΠΑΑ), Έκθεση κατάστασης περιβάλλοντος, Ελλάδα, 2018
- Ζάνης, Π., 2014: ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗ ΡΥΠΑΝΣΗ ΚΑΙ ΧΗΜΕΙΑ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Ζερεφός, Χ., 1984: ΜΑΘΗΜΑΤΑ ΦΥΣΙΚΗΣ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΗΣ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
- Ζιώμας, Γ., 2007, Ατμόσφαιρα- Ατμοσφαιρική ρύπανση, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Αθήνα
- Θεοδωροπούλου, Μ.Π., 2006: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΡΥΠΑΝΣΗΣ: κεφάλαιο 2- Αέρια ρύπανση, Ελληνικό Ακαδημαϊκό Διαδίκτυο
- Κανελλοπούλου, Ε., 2007, Εφαρμοσμένη κλιματολογία. Συμμετρία, Αθήνα. ISBN 978-960-266-300-4
- Κατσαφάδος, Π., Μαυροματίδης, Η., 2015, Εισαγωγή στη φυσική της ατμόσφαιρας και την κλιματική αλλαγή, <http://www.kallipos.gr/> , ΕΜΠ. ISBN 978-960-053-6
- Κούγκολος, Γ., Α., 2018, Περιβαλλοντική μηχανική ρύπανση και προστασία περιβάλλοντος, Τζιόλα. ISBN 978-960-418-562-7
- Μαμάσης, Ν., Ευστρατιάδης, Ν., 2018-2019: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ: Ηλεκτρική ενέργεια, Τομέας υδατικών πόρων και περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Μαχαίρας, Π., Μπαλαφούτης, Χ., 1997, Γενική κλιματολογία με στοιχεία μετεωρολογίας, Θεσσαλονίκη. ISBN 978-960-120-090-3

Μελάς, Δ., 2007: ΦΥΣΙΚΗ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Μελάς, Δ., Αλεξανδροπούλου, Δ., Αμοιρίδης, Β., Κακαρίδου, Μ., Σουλακέλλης, Ν., 2000: ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ, Αθήνα

Μουστρής, Π., 2015: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ: Μοντέλα διάχυσης και διασποράς ατμοσφαιρικής ρύπανσης, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, Εργαστήριο Ατμοσφαιρικής ρύπανσης και Τεχνολογιών Αντιρρύπανσης, Αιγάλεω

Ρεμουντάκη, Ε., 2010: Αέρας και ατμοσφαιρική ρύπανση, WWF Ελλάς, Αθήνα. ISBN 978-960-7506-14-6

ΥΠΕΚΑ, 2018, Ετήσια έκθεση ατμοσφαιρικής ρύπανσης ΥΠΕΚΑ 2017-2018

Χαλδούπης, Χ., 2015, Εισαγωγή στην ατμοσφαιρική φυσική, Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα, Κάλλιπος. ISBN 978-960-143-4

Ιστότοποι

<https://www.eea.europa.eu/themes/air>

<https://www.epa.gov/acidrain/effects-acid-rain>

<https://www.eea.europa.eu/themes/air/health-impacts-of-air-pollution>

https://ec.europa.eu/clima/policies/ozone_en

<https://energyeducation.ca/encyclopedia/Smog>

<https://ozone.unep.org/>

<https://www.intechopen.com/books/diesel-and-gasoline-engines/no-sub-x-sub-pollutants-from-diesel-vehicles-and-trends-in-the-control-technologies>

<https://www.kepka.org/>

<https://ypen.gov.gr/perivallon/poiotita-tis-atmosfairas/>

<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9B%CE%B9%CE%B3%CE%BD%CE%AF%CF%84%CE%B7%CF%82>

<http://www.geo.auth.gr/courses/gmc/1000/aura.html>

<http://raxes.meteoclub.gr/>