



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΙΙ: ΑΝΑΛΥΣΗΣ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ &
ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ & ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ
ΤΟΥ **ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥ ΚΟΥΛΙΔΗ**

**Επιπτώσεις λειτουργίας αεροδρομίων στο
ατμοσφαιρικό περιβάλλον**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΑΝΔΡΕΑΣ Γ. ΜΠΟΥΝΤΟΥΒΗΣ

Αρχικός επιβλέπων ο αείμνηστος Καθηγητής Ιωάννης Ζιώμας

Αθήνα 2024

Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από τη Σχολή Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνωμών του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

*Η εργασία αυτή αφιερώνεται στη σύζυγό μου και στο γιό μας·
η αγάπη τους ήταν το ισχυρότερο κίνητρο για την ολοκλήρωσή της.*

Ευχαριστίες

Η διατριβή αυτή ξεκίνησε υπό την επίβλεψη του αείμνηστου Καθηγητή Ιωάννη Ζιώμα και σηματοδεύτηκε από τη μάχη του ενάντια στη επάρατη νόσο και τον αδόκητο θάνατό του.

Η ολοκλήρωση της εργασίας επιτεύχθηκε με την καταλυτική συμβολή και καθοδήγηση του επιβλέποντος Καθηγητή Ανδρέα Μπουντουβή. Τον ευχαριστώ μέσα από την καρδιά μου, τόσο για την υποστήριξη της συγκεκριμένης έρευνας, όσο και για τη συνολική του προσφορά ως σπουδαίος δάσκαλος.

Τα μέλη της τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής, οι Καθηγητές Διονύσιος Ασημακόπουλος και Χρήστος Κυρανούδης, υπήρξαν πολύτιμοι αρωγοί στην εκπόνηση της εργασίας και τους ευχαριστώ θερμά για τη στήριξή τους.

Τα τέσσερα μέλη της Εξεταστικής Επιτροπής, οι Καθηγήτριες Μαρία Παπαδοπούλου και Κατερίνα Αδάμ και οι Καθηγητές Δημήτρης Μέλισσας και Παναγιώτης Νάστος, με τις εύστοχές παρεμβάσεις τους, συνεισέφεραν ενδιαφέρουσες βελτιώσεις και προσθήκες στο τελικό στάδιο διαμόρφωσης της διατριβής και τους ευχαριστώ θερμά.

Τέλος, ιδιαιτέρως θερμές ευχαριστίες αξίζουν στην Δρ. Αθηνά Πρόγιου και στον Δρ. Ιωάννη Σέμπο. Με την επιστημοσύνη και την πείρα τους συνέβαλαν με τρόπο αναντικατάστατο στις δημοσιευμένες εργασίες που παρήγαγε η διατριβή.

Περίληψη

Οι αερομεταφορές αποτελούν βασικό πυλώνα του σύγχρονου τρόπου ζωής αλλά οι επιπτώσεις τους στην ποιότητα του αέρα είναι σημαντικές, ιδίως στην περιοχή επιρροής των μεγάλων αεροδρομίων. Στην παρούσα εργασία προσδιορίζονται οι επιπτώσεις αυτές μέσα από αναλυτικές υπολογιστικές προσεγγίσεις γύρω από τα τρία μεγαλύτερα αεροδρόμια της Ελλάδας, ήτοι τον Διεθνή Αερολιμένα Αθηνών, τον αερολιμένα Θεσσαλονίκης και τον αερολιμένα Ηρακλείου.

Στο εισαγωγικό μέρος της εργασίας, συλλέγονται από τη βιβλιογραφία και παρουσιάζονται διαρθρωμένα τα βασικά στοιχεία του τομέα των αερομεταφορών στο διεθνές, το ευρωπαϊκό και το εθνικό επίπεδο. Στην Ελλάδα, ένα από τα έτη με τον υψηλότερο αριθμό αεροπορικών κινήσεων, ο οποίος πλησίασε τις 460 χιλιάδες πτήσεις, ήταν το 2009. Το ίδιο έτος, παρουσιάστηκε μια από τις υψηλότερες κινήσεις σε καθένα από τα αεροδρόμια της εργασίας, με 210.147 πτήσεις στον Διεθνή Αερολιμένα Αθηνών, 50.238 πτήσεις στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης και 44.842 πτήσεις στον αερολιμένα Ηρακλείου. Για αρκετά έτη μετά το 2009 ο αριθμός πτήσεων παρουσίασε μείωση, για να ανακάμψει θεαματικά τα τελευταία έτη στα ίδια ή και σε ελαφρώς υψηλότερα επίπεδα. Παρουσιάζονται επίσης οι βασικές έννοιες της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, περιλαμβανόμενων των επιπτώσεων της στη δημόσια υγεία και στα οικοσυστήματα, καθώς και η κατάσταση της ποιότητας του αέρα σε τέσσερα επίπεδα. Στο παγκόσμιο επίπεδο, τα προβλήματα εμφανίζονται κυρίως στην Κίνα, την Ινδία και σε ορισμένες περιοχές της Αφρικής, ενώ στο ευρωπαϊκό επίπεδο οι συγκεντρώσεις των αέριων ρύπων μειώνονται διαχρονικά. Στο επίπεδο της ελληνικής επικράτειας, η κατάσταση ως προς το μονοξείδιο του άνθρακα είναι άριστη, ως προς τα οξείδια του αζώτου και του θείου παρουσιάζονται υπερβάσεις κυρίως στη δυτική Αττική και στην Πτολεμαΐδα, ενώ ως προς τα αιωρούμενα σωματίδια παρουσιάζονται υπερβάσεις σε μεγάλο μέρος του νότιου και δυτικού τμήματος της χώρας ως αποτέλεσμα τόσο της μεταφοράς ρύπανσης από πηγές εκτός του Ελλαδικού χώρου, όσο και φυσικής εκπομπής σωματιδίων από τις γυμνές επιφάνειες του εδάφους και από τη θάλασσα. Στο επίπεδο των τριών μεγάλων αστικών συγκροτημάτων της Ελλάδας, ήτοι της Αθήνας, του Πειραιά και της Θεσσαλονίκης, όπου ζει περίπου ο μισός περίπου πληθυσμός της χώρας, η ποιότητα του αέρα παρουσιάζει διαχρονικές τάσεις βελτίωσης από τη δεκαετία του 80 και εξής. Γύρω από τα μεγάλα αεροδρόμια, τα μόνα διαθέσιμα είναι τα στοιχεία του συστήματος παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα στα Μεσόγεια, τα οποία ως προς το NO₂ που είναι ο κύριος ρύπος των αερομεταφορών, δείχνουν μικτές διαχρονικές τάσεις, με εμφανείς βελτιώσεις αλλά και ορατές επιδεινώσεις στη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας.

Οι εκπομπές αέριων ρύπων από τις αερομεταφορές αφορούν στη συνολική πορεία μιας πτήσης, αλλά εκείνες με τις εντονότερες επιπτώσεις είναι όσες συμβαίνουν κοντά στο έδαφος, δικαιολογώντας την εστίαση του ενδιαφέροντος της εργασίας αυτής στις περιοχές των αεροδρομίων. Οι κυριότερες πηγές εκπομπής αέριων ρύπων στα αεροδρόμια είναι οι κινήσεις των αεροσκαφών, οι οποίες τυποποιούνται ως ένα βαθμό με τη βοήθεια του «κύκλου προσγείωσης - απογείωσης», καθώς και μια σειρά επίγειων πηγών, όπως οι βοηθητικές μονάδες ισχύος, ο εξοπλισμός εξυπηρέτησης εδάφους και τα υπολείμματα φρένων και ελαστικών από τα αεροσκάφη. Οι εκπομπές αυτές επηρεάζουν τα οικοσυστήματα ή άλλες πλευρές του περιβάλλοντος, αλλά η κύρια ανησυχία προέρχεται από το ενδεχόμενο επίδρασής τους στη δημόσια υγεία. Μια πρόσφατη εργασία ανασκόπησης δείχνει ότι η επίδραση αυτή είναι πιθανή, αλλά η εξαγωγή γενικών συμπερασμάτων είναι πολύ δύσκολη, δεδομένης της μεγάλης ποικιλότητας των αεροδρομίων και της εξάρτησης που παρουσιάζει η επίπτωσή τους στην ποιότητα του αέρα από την αεροπορική κυκλοφορία και το μίγμα των αεροσκαφών, από τις επίγειες δραστηριότητες, αλλά και από τη θέση, τη γεωγραφία και τη μετεωρολογία της περιοχής. Το ενδιαφέρον αρκετών σύγχρονων ερευνών εστιάζεται στους ρύπους που θεωρούνται ως οι πλέον επικίνδυνοι για την ανθρώπινη υγεία, δηλαδή στα αιωρούμενα σωματίδια, ιδίως τα λεπτά, και στις επικίνδυνες αέριες ουσίες όπως η φορμαλδεΐδη, καθώς και στο τροποσφαιρικό όζον. Οι βασικοί αέριοι ρύποι των αερομεταφορών, δηλαδή το CO, τα NO_x, τα PM₁₀ και τα SO_x εμφανίζουν ευδιάκριτα υψηλότερες του υποβάθρου συγκεντρώσεις σε μικρές αποστάσεις από τα αεροδρόμια, αλλά εντός των γύρω οικισμών τείνουν να εμφανίζουν συγκεντρώσεις παρόμοιου επιπέδου με αυτές του υποβάθρου ή του αστικού περιβάλλοντος. Λόγω αυτής της ομοιότητας, είναι ιδιαίτερα δύσκολη η εξαγωγή ποσοτικών συμπερασμάτων για την επίδραση των εκπεμπόμενων από το αεροδρόμιο ρύπων στη δημόσια υγεία των κατοίκων στους οικιστικούς πόλους. Στην εγγύς περιοχή των αεροδρομίων, η συγκέντρωση του τροποσφαιρικού όζοντος μειώνεται, επειδή λόγω των ιδιοτήτων της φωτοχημείας του, μέρος του O₃ καταστρέφεται· ωστόσο, σε μεγαλύτερη ακτίνα, η συνεισφορά των αεροδρομίων στο σχηματισμό O₃ οδηγεί σε αύξηση των επιδράσεων του συγκεκριμένου ρύπου στη δημόσια υγεία.

Ο μηχανισμός ανάμεσα στις εκπομπές αέριων ρύπων που οφείλονται στη λειτουργία ενός αεροδρομίου και στις επιδράσεις των ουσιών αυτών στη δημόσια υγεία, όπως και ευρύτερα στο περιβάλλον, είναι η διασπορά των ρύπων αυτών στον αέρα της περιοχής και η δημιουργία των συγκεντρώσεων στις οποίες εκτίθενται οι γύρω περιοχές. Η μελέτη των συγκεντρώσεων αυτών αποτελεί τον κεντρικό κορμό της παρούσας εργασίας.

Ο τρόπος μελέτης των συγκεντρώσεων επελέγη μετά από αξιολόγηση των μεθόδων που επικρατούν στον τομέα αυτό και διακρίνονται σε μεθόδους βασιζόμενες σε μετρήσεις και σε

υπολογιστικές προσεγγίσεις. Οι πρώτες, στις οποίες χρησιμοποιείται είτε σταθερός είτε κινητός εξοπλισμός, χαρακτηρίζονται από αυξημένη ακρίβεια αλλά περιορισμένη χωρική κάλυψη, ενώ δυσκολεύονται να φωτίσουν την αιτιακή διαδρομή από τις πηγές εκπομπής αέριων ρύπων, οι οποίες είναι συνήθως πολλές (οδική κυκλοφορία, θέρμανση, βιομηχανία, εναέριες και επίγειες δραστηριότητες αεροδρομίων) στις τελικά καταγραφόμενες συγκεντρώσεις. Οι δεύτερες, στις οποίες χρησιμοποιείται μια ποικιλία συστημάτων υπολογιστικής προσομοίωσης, διασυνδέουν αιτιωδώς τις εκπομπές από κάθε συγκεκριμένη πηγή με το ποσοστό συμμετοχής της στην τελική συγκέντρωση, αλλά εμπεριέχουν αβεβαιότητες, οι οποίες σχετίζονται τόσο με τις εσωτερικές παραδοχές των μοντέλων που χρησιμοποιούνται όσο και με την έλλειψη αναλυτικών στοιχείων εισόδου. Πάντως, η χρήση υπολογιστικών μεθόδων ενθαρρύνεται κατά σαφή τρόπο από τη σύγχρονη ευρωπαϊκή και εθνική νομοθεσία. Στο πλαίσιο αυτό, στην παρούσα εργασία επελέγη η αξιοποίηση ενός εγνωσμένης αξίας συστήματος υπολογιστικής προσομοίωσης των εκπομπών αέριων ρύπων από τις αερολιμενικές δραστηριότητες και των συγκεντρώσεων που προκαλεί η διασπορά τους στην επηρεαζόμενη περιοχή. Το σύστημα αυτό είναι το EDMS και αποτελεί το προτεινόμενο από την US EPA μοντέλο κανονιστικής χρήσης, δηλαδή ελέγχου συμμόρφωσης υφιστάμενων ή σχεδιαζόμενων αεροδρομίων με τα ισχύοντα όρια ποιότητας αέρα. Η ιδιαιτερότητα της προσέγγισης που υιοθετεί η παρούσα εργασία είναι η εφαρμογή του EDMS με τον ρεαλιστικότερο δυνατό τρόπο, δηλαδή με πραγματικά μετεωρολογικά στοιχεία ωριαίας συχνότητας, με πραγματικό μίγμα αεροσκαφών και με πραγματικές χρονικές κατανομές των κινήσεών τους. Για την ενσωμάτωση επαρκούς περιθωρίου ασφάλειας στα αποτελέσματα των υπολογισμών, χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου τα στοιχεία αεροπορικής κυκλοφορίας του έτους 2009, στη διάρκεια του οποίου καταγράφηκε ο μεγαλύτερος αριθμός κινήσεων αεροσκαφών, τόσο συνολικά στην Ελλάδα, όσο και στο καθένα από τα τρία αεροδρόμια μελέτης. Το κύριο υπολογιστικό σκέλος συμπληρώνεται με άλλα δύο πρόσθετα σκέλη, με τα οποία επεκτείνεται η εμβέλεια της παρούσας εργασίας πέρα από τις εκτιμήσεις ατμοσφαιρικής ρύπανσης γύρω από αεροδρόμια και τις αξιολογήσεις της ποιότητας αέρα στις επηρεαζόμενες περιοχές. Το πρώτο πρόσθετο σκέλος είναι η αντιπαραβολή που επιχειρείται μεταξύ υπολογιστικών εκτιμήσεων και μετρήσεων στην περίπτωση του ΔΑΑ, όπου υπάρχει επαρκές πλήθος στοιχείων πεδίου, ενώ το δεύτερο πρόσθετο σκέλος είναι η ανάλυση ευαισθησίας του EDMS, που εφαρμόστηκε στο σύνολο του συστήματος, προκειμένου να εξετασθεί η απόκρισή του υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες εισόδου.

Τα αποτελέσματα εφαρμογής της προσέγγισης αυτής στα τρία μεγαλύτερα αεροδρόμια της Ελλάδας, περιλαμβάνουν πρώτα τον υπολογισμό των εκπομπών και στη συνέχεια των προσδιορισμό των συγκεντρώσεων.

Ως προς τις εκπομπές, τα αποτελέσματα ενέχουν μια αυτοτελή χρησιμότητα για την παρακολούθηση της επίδρασης των αεροδρομίων στη μικρο- και μακρο-κλίμακα της ποιότητας της ατμόσφαιρας. Επιπλέον, η ανάλυσή τους εντοπίζει μια αξιοσημείωτα καλή προσέγγιση μεταξύ των αποτελεσμάτων υπολογισμού με το EDMS και αυτών που προέρχονται από την παρακολούθηση της πραγματικής λειτουργίας του ΔΑΑ. Διαπιστώνεται επίσης μερική σύγκλιση με αποτελέσματα άλλων εργασιών, καταλήγοντας σε μια μέση αναμενόμενη εκπομπή 4 - 5 kg NO_x ανά κίνηση αεροσκάφους, ενώ τέλος εντοπίζεται συμβατότητα των αποτελεσμάτων του EDMS με τα σχετικά μεγέθη της εθνικής απογραφής εκπομπών.

Ως προς τις συγκεντρώσεις, τα αποτελέσματα του υπολογιστικού προσδιορισμού τους για καθένα από τους μελετώμενους ρύπους, αποτελούν μια ρεαλιστική λεπτομερή χαρτογράφηση της ποιότητας του αέρα γύρω από τα τρία μεγαλύτερα αεροδρόμια της χώρας. Η αξιοποίησή τους μπορεί να αποβεί χρήσιμη σε τρία τουλάχιστον επίπεδα. Καταρχήν, στο να διαπιστωθεί ο βαθμός και η εμβέλεια επίδρασης του αεροδρομίου στο ατμοσφαιρικό περιβάλλον της περιοχής του, εξετάζοντας εάν υπάρχουν ή επαπειλούνται υπερβάσεις οριακών τιμών και σε ποιες θέσεις. Στη συνέχεια, στο να ιεραρχηθούν οι επιπτώσεις στην ποιότητα του αέρα από τη λειτουργία του αεροδρομίου στην κατάλληλη θέση της κλίμακας σημαντικότητας των περιβαλλοντικών απειλών της περιοχής. Και τέλος, ο υπολογιστικός προσδιορισμός και η χαρτογράφηση των συγκεντρώσεων αέριων ρύπων γύρω από τα μεγάλα αεροδρόμια της χώρας έχει τη δυνατότητα να χρησιμεύσει στο σχεδιασμό των κατάλληλων μέτρων για τη μείωσή τους, όπου χρειάζονται, με βάση αντικειμενικές και λεπτομερείς εικόνες της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, αλλά και στο να τεκμηριωθεί η μη αναγκαιότητα λήψης μέτρων, όπου αυτά δεν έχουν να προσφέρουν ουσιαστικό όφελος. Πέραν αυτών, η ανάλυση των αποτελεσμάτων υπολογιστικού προσδιορισμού των συγκεντρώσεων, με προσεγγίσεις όπως η αντιπαραβολή τους με μετρήσεις και η ανάλυση ευαισθησίας, έχει τη δυνατότητα να υποδείξει αφενός τη συμμετοχή του αεροδρομίου στην τελική εικόνα ποιότητας του αέρα και αφετέρου να αποκαλύψει πτυχές της συμπεριφοράς του μοντέλου που δεν είναι επαρκώς γνωστές.

Για την αξιολόγηση της κατάστασης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης γύρω από τα τρία αεροδρόμια, θεωρήθηκε σκόπιμο, με βάση την αρχή της πρόληψης, να εξετασθούν οι δυσμενέστερες ρεαλιστικά αναμενόμενες καταστάσεις και όχι οι συνηθέστερες, που πιθανόν θα ήταν ηπιότερες. Έτσι, στα αποτελέσματα υπολογιστικού προσδιορισμού των συγκεντρώσεων για κάθε μια από τις 8.760 ώρες του έτους 2009 εντοπίστηκε πρώτα ότι οι τιμές για το δίμηνο Ιουλίου - Αυγούστου ήταν σαφώς υψηλότερες από αυτές των υπόλοιπων μηνών· στη συνέχεια αναζητήθηκαν και εξετάσθηκαν οι υψηλότερες συγκεντρώσεις κάθε δεκαήμερου του διμήνου αυτού, θεωρώντας ότι οι έξι αυτές διαφορετικές δυσμενείς

καταστάσεις αντιπροσωπεύουν ικανοποιητικά τις διάφορες συνθήκες εκπομπής και διασποράς υπό τις οποίες μπορούν να προκύψουν σοβαρές επιβαρύνσεις στην ποιότητα του αέρα από το κάθε εξεταζόμενο αεροδρόμιο.

Τα αποτελέσματα του υπολογιστικού προσδιορισμού των συγκεντρώσεων γύρω από το Διεθνή Αερολιμένα Αθηνών δείχνουν ότι τα CO, PM_{2.5}, PM₁₀ και SO₂ κινούνται σε καθησυχαστικά επίπεδα, πολύ χαμηλότερα των οριακών τιμών. Αντίθετα, οι συγκεντρώσεις NO₂ υποδεικνύουν ενδεχόμενα υπερβάσεων του οριακού επιπέδου ωριαίας μέσης συγκέντρωσης (200 μg/m³), αλλά όχι της ετήσιας μέσης συγκέντρωσης. Οι υπερβάσεις αυτές αναμένεται να εμφανίζονται σε περιοχές σημαντικής έκτασης, αλλά με ιδιαίτερα περιορισμένη συχνότητα, αφού η εκδήλωσή τους προϋποθέτει συνθήκες υψηλού ρυθμού αεροπορικών κινήσεων και ειδικών τιμών ως προς τις μετεωρολογικές παραμέτρους, οι οποίες να οδηγούν σε μεγάλη ευστάθεια του επιφανειακού ατμοσφαιρικού στρώματος και εγκλωβισμό των NO_x σε χαμηλό ύψος. Οι συνθήκες αυτές δεν είναι τελείως σπάνιες στη διάρκεια του διμήνου Ιουλίου – Αυγούστου, αλλά απέχουν πολύ από το να αποτελούν τον κανόνα, οπότε οι δεκαοκτώ φορές που, σύμφωνα με την ευρωπαϊκή και εθνική νομοθεσία, είναι δυνατή η υπέρβαση των 200 μg/m³ NO₂ πριν θεωρηθεί ότι συντελείται παραβίαση του ορίου, είναι μάλλον επαρκείς, έστω και οριακά, για να καλύψουν τις πιθανές εμφανίσεις των υψηλών συγκεντρώσεων NO_x.

Στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης, οι συγκεντρώσεις που υπολογίστηκαν με το EDMS για το CO, τα PM_{2.5}, τα PM₁₀ και το SO₂ επίσης κινούνται σε καθησυχαστικά επίπεδα, πολύ χαμηλότερα των οριακών τιμών. Οι συγκεντρώσεις NO₂ όμως, εμπεριέχουν υπερβάσεις του οριακού επιπέδου ωριαίας μέσης συγκέντρωσης, που αναμένεται να εμφανίζονται σε περιοχές μικρής έκτασης και με ιδιαίτερα περιορισμένη συχνότητα, αφού η εκδήλωσή τους προϋποθέτει και εδώ πολύ συγκεκριμένες συνθήκες υψηλού ρυθμού αεροπορικών κινήσεων και ειδικής μετεωρολογίας εγκλωβισμού των NO_x σε χαμηλό ύψος, οι οποίες δεν αναμένεται να εμφανίζονται περισσότερο από δεκαοκτώ φορές στη διάρκεια του διμήνου Ιουλίου – Αυγούστου. Αξίζει πάντως να σημειωθεί ότι, παρά το γεγονός ότι η αεροπορική κυκλοφορία στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης είναι περίπου τέσσερις φορές μικρότερη από αυτή του ΔΑΑ, οι υπερβάσεις του οριακού επιπέδου NO_x δεν αποφεύγονται, απλώς εκτείνονται σε σημαντικά μικρότερες περιοχές.

Στον αερολιμένα Ηρακλείου, το EDMS υπολογίζει ότι οι συγκεντρώσεις CO, PM_{2.5}, PM₁₀ και SO₂ κινούνται επίσης σε καθησυχαστικά επίπεδα, πολύ χαμηλότερα των οριακών τιμών. Οι συγκεντρώσεις NO₂ είναι υψηλές αλλά τα ενδεχόμενα υπερβάσεων του οριακού επιπέδου ωριαίας μέσης συγκέντρωσης είναι περιορισμένα, σαφώς λιγότερα από ότι στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης και εντός των δεκαοκτώ φορών που επιτρέπονται τέτοιες υπερβάσεις. Σημειώνεται πάντως ότι, παρά το γεγονός ότι η αεροπορική κυκλοφορία μεταξύ

αερολιμένων Ηρακλείου και Θεσσαλονίκης είναι ίδια σε ετήσια αποτίμηση, στο Ηράκλειο η συχνότητα και η έκταση των υπερβάσεων του οριακού επιπέδου μέσης ωριαίες συγκέντρωσης NO_2 είναι σαφώς μικρότερες, αντανakλώντας την επιρροή των άλλων παραμέτρων – πλην του αριθμού πτήσεων – που διαμορφώνουν τις τελικές συγκεντρώσεις. Δεδομένου ότι, όπως προαναφέρθηκε, η ανάλυση των συγκεντρώσεων αέριων ρύπων γύρω από τα τρία αεροδρόμια εστιάστηκε στις δυσμενείς καταστάσεις, αυτές δηλαδή με τις υψηλότερες συγκεντρώσεις, προέκυψε το ερώτημα του πόσο συχνές αναμένεται να είναι οι καταστάσεις αυτές. Έτσι, τα αποτελέσματα του EDMS για καθεμιά από τις 1.488 ώρες του διμήνου Ιουλίου-Αυγούστου εξετάστηκαν υπό το πρίσμα των σχετικών συχνοτήτων εμφάνισης υψηλών, μέσων και χαμηλών συγκεντρώσεων, εστιάζοντας στα NO_x που είναι ο μόνος ρύπος με ευρήματα προσέγγισης ή και υπέρβασης του οριακού του επιπέδου. Διαπιστώθηκε ότι οι σχετικές συχνότητες εμφάνισης πολύ υψηλών συγκεντρώσεων NO_x , δηλαδή τιμών κοντά στο όριο των $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$, είναι ιδιαίτερα μικρές και στα τρία αεροδρόμια, παρά την υψηλή αεροπορική κυκλοφορία του εξεταζόμενου διμήνου. Οι σχετικές συχνότητες όμως των μέτριων και υψηλών συγκεντρώσεων NO_x μαζί, ήταν αρκετά μεγαλύτερες. Πάντως, οι συχνότητες των συγκεντρώσεων NO_x κάτω των $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ κινούνται αθροιστικά κοντά στο 90%. Συγκρίνοντας τις κατανομές σχετικών συχνοτήτων των επιπέδων συγκέντρωσης NO_x στα τρία αεροδρόμια, παρατηρείται ότι, παρά τη σαφώς μικρότερη αεροπορική κυκλοφορία στο αεροδρόμιο της Θεσσαλονίκης σε σύγκριση με αυτό της Αθήνας, τα επίπεδα υψηλών συγκεντρώσεων NO_x είναι σαφώς συχνότερα. Αυτό οφείλεται στις δυσμενέστερες συνθήκες διασποράς (μεγαλύτερη συχνότητα νηνεμίας και ανέμων χαμηλής ταχύτητας), οι οποίες καθυστερούν τη διασπορά των εκπεμπόμενων αέριων ρύπων, καταλήγοντας να παράγουν μεγαλύτερες τοπικά συγκεντρώσεις από μικρότερες εκπομπές. Η εξήγηση αυτή, δηλαδή ο καθοριστικότερος ρόλος των συνθηκών διασποράς έναντι των εκπομπών στη διαμόρφωση των συγκεντρώσεων, επιβεβαιώνεται εξ αντιδιαστολής και από την περίπτωση του αερολιμένα Ηρακλείου, όπου οι πολύ συχνοί άνεμοι μέσης ταχύτητας οδηγούν σε ιδιαίτερα αυξημένη σχετική συχνότητα εμφάνισης πολύ χαμηλών συγκεντρώσεων NO_x , σε πλήρη αντίθεση με τη Θεσσαλονίκη, και παρά το γεγονός ότι κινήσεις αεροσκαφών, άρα και οι ρυθμοί εκπομπής αέριων ρύπων στα δύο αεροδρόμια είναι παρεμφερείς.

Περνώντας στη σύγκριση αποτελεσμάτων του EDMS με μετρήσεις συγκεντρώσεων, σημειώνεται καταρχάς ότι αυτές αφορούν την περιοχή των Μεσογείων γύρω από το ΔΑΑ και περιλαμβάνουν μετρήσεις από τέσσερις σταθμούς. Σε ότι αφορά στο CO , η γενική διαπίστωση είναι ότι οι μετρήσεις σε όλους τους σταθμούς, παρότι σε απόλυτους αριθμούς πολύ μικρές ($0,1 - 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) είναι αρκετά υψηλότερες συγκριτικά με τα αποτελέσματα των υπολογισμών, τα οποία στη μεγάλη τους πλειονότητα είναι μηδενικά. Αυτό σημαίνει ότι σε

όλη την περιοχή των Μεσογείων καταγράφονται συγκεντρώσεις υποβάθρου CO που δεν μπορούν να αποδοθούν στη λειτουργία του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών. Ανάλογη εικόνα σχηματίζεται και για τα SO_x. Οι συγκεντρώσεις υποβάθρου, προερχόμενες από πηγές του τοπικού ανθρωπογενούς περιβάλλοντος άσχετες από το αεροδρόμιο, παρότι μικρές σε απόλυτους αριθμούς (π.χ. 5 – 9 μg/m³ για το σταθμό των Σπάτων) οδηγούν σε μετρήσεις που είναι αρκετά μεγαλύτερες από τα αποτελέσματα των υπολογισμών, τα οποία κινούνται σε τιμές κατά πολύ μικρότερες της μονάδας. Ακόμη πιο έντονο είναι το ανάλογο φαινόμενο των υψηλών τιμών υποβάθρου στην περίπτωση των συγκεντρώσεων PM₁₀, όπου σειρά φαινομένων μη-σχετιζόμενων με το αεροδρόμιο οδηγούν σε μετρήσεις 20 – 50 μg/m³, ενώ τα αποτελέσματα του EDMS κινούνται σε πολύ χαμηλές τιμές που στην πλειονότητά τους είναι μηδενικές. Ως προς τις συγκεντρώσεις των NO_x, τα συμπεράσματα από τη σύγκριση μετρήσεων και υπολογιστικών αποτελεσμάτων είναι πιο σύνθετα. Το πρώτο συμπέρασμα είναι ότι οι μετρήσεις διαφέρουν συστηματικά από τα αποτελέσματα του EDMS, τόσο στη χρονική εξέλιξη των ωριαίων τιμών, όσο και στη στατιστική κατανομή τους. Η εικόνα απόκλισης στο επίπεδο των συγκεντρώσεων είναι αντίστροφη από την πολύ καλή σύγκλιση που παρατηρήθηκε στο επίπεδο των εκπομπών και οφείλεται σε μια σειρά λόγων, όπως η στοχαστικότητα του μοντέλου, οι μικρές διαφορές στα πρότυπα κατανομής πτήσεων ανά ώρα και ημέρα και κυρίως η σημαντική απόσταση μεταξύ σημείου εκπομπής (αεροδρομίου) και σταθμών μέτρησης συγκέντρωσης (4 - 9,35 km) με τη συνακόλουθη μεταβλητότητα των συνθηκών διασποράς εντός της απόστασης αυτής, ενώ το μοντέλο λειτουργεί υπό την παραδοχή ότι οι συνθήκες διασποράς είναι σταθερές σε όλο το πεδίο μελέτης. Τέλος, το σημαντικότερο μέρος των αποκλίσεων αποδίδεται στην επίδραση πηγών του τοπικού ανθρωπογενούς περιβάλλοντος, άσχετων από το αεροδρόμιο, όπως η οδική κυκλοφορία σε παρακείμενες των σταθμών οδούς. Το δεύτερο συμπέρασμα είναι ότι οι εκτιμήσεις συγκέντρωσης NO_x βάσει του EDMS είναι γενικά μικρότερες των μετρήσεων. Αυτό δεν οφείλεται σε κάποια συστηματική τάση υποεκτίμησης του μοντέλου, αλλά κατά μείζονα λόγο στη συνεισφορά και άλλων πηγών NO_x, πέραν του αεροδρομίου, ενώ δεν αποτελεί ασυνήθιστο εύρημα: οι υποεκτιμήσεις των υπολογιστικών αναλύσεων σε σχέση με τις μετρήσεις πεδίου είναι αρκετά συνηθισμένες, ακόμη και σε πολύ πρόσφατες εργασίες, όπου μέσω αντίστροφης μοντελοποίησης διαπιστώνεται ότι, για να ανέλθουν οι υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις στο επίπεδο των μετρούμενων, χρειάζεται να αυξηθεί σοβαρά ο ρυθμός εκπομπής που εισάγεται στους υπολογισμούς του μοντέλου διασποράς από 14 έως 55%. Το τρίτο συμπέρασμα σχετίζεται με το ρόλο των NO_x ως κύριου ρύπου του αεροδρομίου και συνακόλουθα της προέλευσης ενός σημαντικού τμήματος των μετρούμενων συγκεντρώσεων από το αεροδρόμιο. Έτσι, υπάρχει η προοπτική καλύτερης συσχέτισης μεταξύ μετρήσεων και αποτελεσμάτων EDMS σε σχέση με τους άλλους ρύπους, η οποία επιβεβαιώνεται από τη

στατιστική ανάλυση. Το τέταρτο συμπέρασμα σχετικά με τα NO_x, αφορά στη διαπίστωση ότι όλες οι περιπτώσεις προσέγγισης μεταξύ υπολογιστικών αποτελεσμάτων και ωριαίων μετρήσεων εντοπίζονται σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου, κάτω των 3 m/s. Αυτό συμβαίνει διότι για υψηλότερες ταχύτητες ανέμου, η υπολογιζόμενη από το EDMS διασπορά είναι αρκετά έντονη και οδηγεί σε σχεδόν μηδενικές συγκεντρώσεις NO_x στη μεγάλη απόσταση (~4 km) του σταθμού των Σπάτων, οπότε οτιδήποτε και αν καταγράφει ο σταθμός προέρχεται από τοπικές πηγές, εκτός αεροδρομίου.

Το τελευταίο σκέλος της εργασίας είναι η ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου, δηλαδή η μελέτη του τρόπου που αλλαγές στις συνθήκες εισόδου προκαλούν μεταβολές στα αποτελέσματα. Οι παράμετροι που επηρεάζουν τα αποτελέσματα κατά περίπλοκο τρόπο είναι οι μετεωρολογικές, οι οποίες επιδρούν στο υπολογιστικό άρθρωμα της διασποράς (AERMOD), ενώ οι παράμετροι που επηρεάζουν τις εκπομπές, όπως ο αριθμός πτήσεων και τα είδη των αεροσκαφών αναμένεται να έχουν μια σαφώς γραμμικότερη επιρροή. Στο πλαίσιο αυτό, αναλύθηκε η ευαισθησία του EDMS ως προς τις πέντε κυριότερες μετεωρολογικές παραμέτρους.

Η παράμετρος με την εντονότερη επίδραση στα αποτελέσματα είναι η ταχύτητα του ανέμου. Μικρές μεταβολές της προκαλούν σημαντικές διαφοροποιήσεις στις μέγιστες τιμές των συγκεντρώσεων και στην έκταση των ισορροπιακών γραμμών. Από έμπρακτης περιβαλλοντικής σκοπιάς, αυτό σημαίνει ότι, ακόμη και ένα ελαφρύ αεράκι είναι επαρκές για να διασπείρει τους αέριους ρύπους ενός αεροδρομίου και να μειώσει τις συγκεντρώσεις εδάφους σε επίπεδα πολύ κάτω των οριακών· αντίθετα, η άπνοια και οι πολύ χαμηλές ταχύτητες ανέμου (μικρότερες του 1 m/s) αποτελούν αναγκαία και συχνά ικανή συνθήκη για την εμφάνιση υψηλών συγκεντρώσεων. Παράλληλα, ο εντοπισμός της υψηλής ευαισθησίας των αποτελεσμάτων συγκέντρωσης ως προς την ταχύτητα του ανέμου, καταδεικνύει τον κρίσιμο ρόλο του συγκεκριμένου μεγέθους στις μελέτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Η ώρα της ημέρας επηρεάζει έντονα τα αποτελέσματα των υπολογισμών συγκέντρωσης. Αυτό είναι ένα αξιοσημείωτο συμπέρασμα, με την έννοια ότι η συγκεκριμένη παράμετρος σπανίως αναφέρεται μεταξύ εκείνων που επηρεάζουν τα αποτελέσματα μοντέλων διασποράς. Η αλλαγή των αποτελεσμάτων, αναλόγως του εάν αυτά λαμβάνονται για πρωινή, απογευματινή ή βραδινή ώρα, οφείλεται στη μετάπτωση του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος από διαμεταγωγικό σε σταθεροποιημένο στη διάρκεια του εικοσιτετραώρου. Για το λόγο αυτό, στη διάρκεια των περισσότερων ωρών με ηλιοφάνεια, οι υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις είναι πολύ χαμηλές, σχεδόν μηδενικές, λόγω της διασποράς που προκαλείται από τις κατακόρυφες κινήσεις στο επιφανειακό στρώμα, παρά τη χαμηλή ένταση του διατμητικού ανέμου. Επομένως, κατά τη διεξαγωγή εκτιμήσεων σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όταν η έμφαση μετατοπίζεται προς τις δυσμενείς πιθανότερες

καταστάσεις, αυτό το χρονικό διάστημα του εικοσιτετράωρου θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη με μικρό συντελεστή βαρύτητας.

Η θερμοκρασία περιβάλλοντος επηρεάζει μόνο υπό συγκεκριμένες συνθήκες τα αποτελέσματα υπολογισμού των συγκεντρώσεων. Συγκεκριμένα, οι αλλαγές της θερμοκρασίας προκαλούν ορατές αλλαγές στα αποτελέσματα των συγκεντρώσεων που υπολογίζει το EDMS μόνο κατά τις ώρες μετάβασης από διαμεταγωγικό σε σταθεροποιημένο επιφανειακό στρώμα και αντιστρόφως· κατά τις υπόλοιπες ώρες, οι αλλαγές θερμοκρασίας οδηγούν σε πολύ μικρή μεταβολή των αποτελεσμάτων. Κατά τις ώρες μετάβασης του επιφανειακού στρώματος, η επίδραση της θερμοκρασίας δεν είναι απλή: χαρακτηρίζεται από μια γενική τάση μείωσης της συγκέντρωσης με την αύξηση της θερμοκρασίας, η οποία όμως δεν έχει ομοιόμορφο ρυθμό και διακόπτεται από διακυμάνσεις.

Το ποσοστό νεφοκάλυψης επηρεάζει με διαφορετικό τρόπο τα αποτελέσματα συγκεντρώσεων κατά τις απογευματινές ώρες σε σχέση με τις πρωινές. Το απόγευμα, όσο αυξάνεται η νέφωση, τόσο περιορίζεται η μέγιστη τιμή και η χωρική εξάπλωση της συγκέντρωσης, ενώ το πρωί η μεταβολή της νέφωσης δεν προκαλεί ορατές αλλαγές στα αποτελέσματα υπολογισμού των συγκεντρώσεων.

Το ύψος των νεφών επηρεάζει ελάχιστα τα αποτελέσματα υπολογισμού των συγκεντρώσεων. Αυτό αποτελεί μια θετική σύμπτωση, διότι το ύψος νέφωσης σπανίως είναι διαθέσιμο· μπορεί ωστόσο να υποκατασταθεί από μια αδρή εμπειρική τιμή, χωρίς ιδιαίτερη επίδραση στα αποτελέσματα προσομοίωσης των συγκεντρώσεων με το EDMS.

Abstract

Impacts of the operation of airports in the atmospheric environment

Aviation is a key element of the modern lifestyle, but its impact on air quality is important, especially in the vicinity of large airports. In this work, these impacts are determined through detailed computational approaches around the three major airports of Greece, namely Athens International Airport, Thessaloniki Airport and Heraklion Airport.

The introductory part of the thesis presents coherent bibliographic information of the aviation sector at the international, European and national levels. In Greece, the highest number of air traffic was recorded in 2009 and approached 460 thousand flights. In the same year, the highest traffic was recorded in each of the airports, with 210,147 flights at Athens International Airport, 50,238 flights at Thessaloniki airport and 44,842 flights at Heraklion airport. The basic concepts of air pollution, including its impacts on public health and ecosystems, are presented in the introductory part, along with information on the state of air quality at four levels. At the global level, problems arise mainly in China, India and some parts of Africa, while concentrations of air pollutants at European level keep reducing over time. At the level of the Greek territory, carbon monoxide is very low, nitrogen oxides and sulfur oxides exceed limit values mainly in western Attica and Ptolemaida, while in the case of the particulate matter, there are extended exceedances in most of the southern and western part of the country as a result of both pollution transport from sources outside Greece and the physical emission of particles from unvegetated soil and from the sea. At the level of the three major cities of Greece, namely Athens, Piraeus and Thessaloniki, where about half of the country's population lives, air quality has been improving over the years since the 1980s. Around the big airports, the only available data come from the air quality monitoring system in Mesogia, and show, with regard to NO₂ which is the main air pollutant, mixed trends, with significant improvements over time but also visible deteriorations during last decade.

Aviation emissions of air pollutants relate to the overall course of a flight, but those with the most pronounced impacts are the emissions that occur near the ground, justifying the focus of interest of this work on airport regions. The main sources of air pollutant emissions at aerodromes are aircraft movements, which are to some extent standardized by means of the "landing-take-off cycle", as well as a series of ground sources such as auxiliary power units, ground service equipment and brake/tire residues from aircraft. These emissions affect ecosystems and other aspects of the environment, but the main concern comes from their potential impact on public health. A recent review article shows that this impact is likely, but

it is very difficult to draw general conclusions, given the great diversity of aerodromes and the dependence of their air quality impacts from the specificities of their air traffic, aircraft mix and ground activities, but also from the location, geography and meteorology of the area. The interest of several modern studies focuses on the pollutants considered the most dangerous for human health, namely fine particles, and dangerous gaseous substances such as formaldehyde and tropospheric ozone. The main air pollutants of aviation, i.e. CO, NO_x, PM₁₀ and SO_x, show concentrations distinctly higher than the background at short distances, but within more distant residential areas they tend to exhibit concentrations similar to background. Because of this similarity, it is difficult to derive quantitative conclusions about the effect of pollutants emitted by the airport on the public health of the population at residential areas. In the proximity of aerodromes, the concentration of tropospheric ozone is decreasing because, due to its photochemical features, part of O₃ is destroyed; however, at a greater radius, the contribution of aerodromes to the formation of O₃ leads to an increase in the effects of this pollutant on public health.

The mechanism between the emissions of air pollutants by the operation of an airport and the impacts of these substances on public health, as well as on the environment, is the dispersion of these pollutants in the air of the region; the concentrations of air pollutants which occur via this dispersion are the core issue of this work.

The way of studying the concentrations was selected following an assessment of the methods in this field. These methods are either based on measurements or on computational approaches. The first category is based on performing field measurements of concentrations, using either fixed or mobile equipment; those methods excel in accuracy but lack spatial coverage, and have difficulties illuminating the causal path between emissions from different sources (airport activities, road traffic, heating, industry etc.) and overall measured concentrations. Computational methods rely on a variety of computational simulation systems that interconnect the emissions from each particular source with its portion in the final concentration; those methods contain uncertainties related to both the internal assumptions of the models used and the lack of detailed input data. However, the use of computational methods is clearly encouraged by modern European and national legislation. In this context, we selected the most acknowledged system of computational simulation of air pollutant emissions from airport activities and the concentrations that occur by the dispersal of these emissions in the affected area. This system is the EDMS, which is the regulatory model proposed by the US EPA, i.e. to be used for compliance checking of existing or planned airports with air quality limits. The special character of the approach adopted in this work is the implementation of the EDMS in the most realistic way, i.e. using real meteorological data of hourly frequency, a real mix of aircraft and real time distributions of

their movements. To ensure a sufficient margin of safety into the results of the calculations, the aircraft movements of 2009 were used as input data; during this year, the number of aircraft movements was the largest ever recorded, both in Greece as a total and in each of the three airports of this work. The main computational part of this work is complemented by two additional parts, with a view to extending the scope beyond the air pollution assessments around airports and air quality assessments in the affected areas. The first one is the comparison between computational estimates and measurements in the Athens Airport case where detailed air quality measurements are available. The second extension is the sensitivity analysis of the EDMS applied to the system as a whole, in order to examine its response under varied inputs.

The results of applying this approach to the three largest airports in Greece (Athens, Thessaloniki and Heraklion) include first the calculation of emissions and then the determination of concentrations of air pollutants in the vicinity of each of these airports.

In terms of emissions, the results can be used in monitoring the impact of airports on the micro- and macro-scale of air quality. In addition, emissions calculated by EDMS are found to be in good agreement with the monitoring data of the actual operation of Athens Airport. There is also some convergence with the results of other work, resulting in an expected average of NO_x of 4.55 kg per aircraft movement. EDMS results are also consistent with the national emission inventory figures concerning aviation.

In terms of concentrations, the results of their computational determination for each of the pollutants studied construct a realistic detailed air quality map around each of the three largest airports in the country. These maps can be useful to determine the extent and the levels of the airport's impact on the air quality of its vicinity, examining whether limit values are exceeded and pinpointing the locations of high pollution levels. The maps are also useful for assessing the importance of air quality impacts from airport operations against other environmental threats in the area. Finally, the calculation and mapping of air pollutant concentrations around major Greek airports can be used to design appropriate measures of reducing them, where necessary, based on objective and detailed images of atmospheric pollution, as well as to document the lack of urgent need for action where such action is not expected to have any significant benefit. In addition, the analysis of computational results, via approaches such as comparison with field measurements and sensitivity analysis, has the potential to indicate both airport participation in the overall levels of air quality and to reveal aspects of the behavior of the model that are not well known yet.

The results of the computational determination of concentrations around Athens International Airport show that CO , $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} and SO_2 are expected to stay well below the

limit values. In contrast, NO₂ concentrations indicate potential exceedances of the limit value for average hourly concentration (200 µg/m³), but not of the limit value for annual mean concentration. These exceedances are expected to occur in areas of significant size but with a limited frequency, since their occurrence requires a high rate of air movements along with specific meteorological parameters which lead to a high stability of the surface layer and the entrapment of NO_x at low altitudes. Although these conditions are not quite uncommon during the July-August period, they lay far from being the norm; so, the eighteen times that legislation allows to exceed 200 µg/m³ NO₂ seem sufficient, even marginally, to cover the likely occurrences of high NO_x concentrations.

At Thessaloniki Airport, the concentrations calculated with EDMS for CO, PM_{2.5}, PM₁₀ and SO₂ are also well below the limit values. NO₂ concentrations, however, include potential exceedances of the limit value for average hourly concentration, expected to occur in small areas and at a very limited frequency, since their occurrence requires specific conditions for high air traffic and special NO_x entrapment meteorology, which are not expected to occur more than eighteen times during the July-August period. However, it is worth noting that, despite the fact that air traffic at Thessaloniki airport is about four times lower than that of AIA, exceedances of the NO_x limit are not avoided, they simply extend to much smaller areas.

At the Heraklion airport, EDMS estimates that concentrations of CO, PM_{2.5}, PM₁₀ and SO₂ are also expected to move well below limit values. NO₂ concentrations are high, but the potential exceedances of the limit value for average hourly concentration are rare, much fewer than at Thessaloniki airport and within the eighteen times allowed for such exceedances. Despite the fact that air traffic between Heraklion and Thessaloniki airports is the same, the frequency and extent of NO₂ exceedances in Heraklion are significantly lower, reflecting the influence of the other parameters - apart from flight numbers - shaping the final concentrations.

As the analysis of air pollution around the three airports has been focused on the most adverse situations, i.e. those with the higher concentrations, there is a point in asking how often these situations are expected to occur. Processing the results for NO_x concentration for each of the 1,488 hours of July and August, we found that the relative frequency of very high levels (such as the ones close or even above the limit values) are very rare, despite the intense use of the airports and the consequent intense emissions. Medium or high levels (but well below the limit values) of NO_x have been found to occur more frequently, but levels from 0 to 150 µg/m³ cumulatively hold for more than 90% of the processed hours. Comparing the distribution of relative frequencies of the three airports, we found that NO_x levels at Thessaloniki are considerably higher than at Athens, despite of the higher emissions of the latter airport. This is attributed to the difference in dispersion conditions: At Thessaloniki, the higher frequency of low-speed winds and of calm weather, compared to Athens, delays the

dispersion of emitted NO_x and leads to higher concentrations from lower emissions. This explanation, i.e. the dominance of dispersion conditions over the emission rates in defining the final concentrations, is confirmed by the case of Heraklion. There, similar emission rates as at Thessaloniki lead to considerably lower concentrations because of the higher frequency of medium and high wind speeds.

Turning to the comparison of EDMS results with concentration measurements, it is first noted that these concern the Mesogia region around AIA and include measurements from four stations. As far as CO is concerned, the general finding is that measurements at all stations, although in absolute numbers very small ($0,1 - 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) are quite higher than the results of the calculations, which for the vast majority of times are close to zero. This means that throughout the Mesogia region there are concentrations of CO background that cannot be attributed to the operation of Athens International Airport. A similar image is derived from the SO_x figures. Background concentrations from sources of the local anthropogenic environment unrelated to the airport, although small in absolute numbers (e.g. $5 - 9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for the Spata station) lead to measurements that are significantly larger than the results of the calculations, which are well below $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Even more pronounced is the similar phenomenon of high background values in the case of PM_{10} concentrations, where a range of phenomena irrelevant from the airport lead to measurements of $20 - 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, while the results of EDMS are very low and the majority of them are zero. In regard with NO_x concentrations, the findings from the comparison of measurements and computational results are more complex. The first conclusion is that the measurements are systematically different from the EDMS results, both in the time series of the hourly values and in their statistical distribution. The divergence picture at the concentration level is in contrast with the good convergence observed at the emission level; this happens due to a number of reasons, such as the model's stochastic features, some small differences in hourly and daily flight distribution patterns, and especially the significant distance between the source (airport) and the monitoring stations (4 - 9,35 km), which allows for significant variability of the dispersion conditions within this distance, while the model operates on the assumption that the dispersion conditions are constant throughout the study area. Finally, the most significant part of the deviations is attributed to the influence of sources of the local anthropogenic environment, irrespective of the airport, such as road traffic close by the stations. The second conclusion is that EDMS results on NO_x concentrations are generally smaller than the measurements. This is not due to a systematic tendency of the model to underestimate air pollution levels; to a greater extent it is attributed to the contribution of other NO_x sources beyond the airport's operation. And, this is not an unusual finding; underestimations of computational results in relation to field measurements are quite

common, even in recent works where, by means of reverse modeling, it is ascertained that in order for the calculated concentrations to rise to the level of the measured ones, it is necessary to seriously increase the emission rate introduced in the dispersion model from 14 to 55%. The third conclusion relates to the role of NO_x as the main pollutant at the airport and, consequently, to the origin of a significant portion of the field measured concentrations from the airport. Because of this origin, there is a prospect of better correlation between measurements and EDMS results than other pollutants, which is confirmed by the statistical analysis. The fourth conclusion on NO_x relates to the finding that all approximations between computational results and hourly measurements are detected at low wind speeds of less than 3 m/s. This is because, for higher wind speeds, the EDMS calculated dispersion is quite intense and leads to near zero NO_x concentrations at the long distance (~ 4 km) of the Spata station, so whatever the station records are, they come from local sources and not from the airport. The final part of the thesis is the sensitivity analysis of the model, i.e. the study of how changes in input conditions cause changes in the results. The parameters that affect the results in a complex way are meteorological, which affect the AERMOD module, while parameters affecting emissions such as flights number and aircraft types are expected to have a more linear influence. In this context, the sensitivity of EDMS to the five main meteorological parameters was analyzed.

The parameter with the strongest effect on the results is wind speed. Small changes of this parameter cause significant changes in peak concentrations and the extent of pollution levels. From an environmental point of view, this means that even a light breeze is sufficient to disperse the air pollutants of an airport and reduce ground concentrations to levels well below limit values; on the contrary, apnea or very low wind speeds (less than 1 m/s) are a necessary and often sufficient condition for the appearance of high concentrations. At the same time, the identification of the high sensitivity of the concentration results in wind speeds demonstrates the critical role of this parameter in the modeling exercises used in environmental impact assessment studies.

The time of the day strongly influences the effects of concentration calculations. This is a remarkable finding, in the sense that this parameter is rarely included amongst those that influence the results of dispersion models. Variation in the results, depending on whether they occur for morning, afternoon or evening hours, is due to the transition of the atmospheric surface boundary layer from convective to stable stratified state over the 24-hour period. For this reason, during most hours with sunshine, the calculated concentrations are very low, almost zero, due to the dispersion caused by the vertical movements in the convective surface layer, despite the low shear wind intensity. A practical consequence of this finding is, when conducting environmental impact assessments, where emphasis is placed to

the worst-case scenarios, this part of the 24-hour period when convective layer appears, should be accounted for with a smaller weighting factor.

Ambient temperature only affects the calculation results of the concentrations under certain conditions. In particular, the temperature change cause visible change in the concentration results calculated by the EDMS only during the transition times from a convective to a stratified surface layer and vice versa; during the remaining hours, temperature changes lead to a very small change in the results. During the transition time of the surface layer, the effect of temperature is not simple: it is characterized by a general tendency to decrease the concentration with the temperature increase, interrupted by fluctuations.

The cloud cover percentage affects the concentration results in differentiated ways during the afternoon hours in relation to the morning hours. In the afternoon, as cloud cover increases, both the maximum value and the spatial spread of the concentration decrease, while in the morning cloud cover change does not cause visible changes in the calculation results of the of the concentrations.

The cloud ceiling height has little effect on the results of the calculation of concentrations. This is a positive coincidence because cloud ceiling height measurements are rarely available; however, they can be substituted by a rough empirical value, with no significant impact on the results of simulated concentrations with EDMS.

Πίνακας περιεχομένων

1. Εισαγωγή	1
1.1. Η σημερινή εικόνα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τις αερομεταφορές	1
1.2. Διαφαινόμενη ερευνητική δυνατότητα	2
1.3. Σκοπός της εργασίας.....	3
1.4. Γενικό περίγραμμα εννοιών	6
1.4.1. Ατμοσφαιρική ρύπανση	6
1.4.2. Κυριότεροι ατμοσφαιρικοί ρύποι	6
1.4.3. Επίδραση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στη δημόσια υγεία και στο περιβάλλον	7
1.5. Η ρύπανση του αέρα στον κόσμο, στην Ευρώπη και στην Ελλάδα.....	7
1.6. Οριακές τιμές για την ποιότητα του αέρα.....	8
1.7. Οι εναέριες μεταφορές	9
2. Εκπομπές αερομεταφορών στα αεροδρόμια - επίδραση στη δημόσια υγεία.....	10
3. Τρόποι μελέτης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στα αεροδρόμια	11
4. Το σύστημα EDMS.....	14
5. Υπολογιστικός προσδιορισμός εκπομπών και συγκεντρώσεων στους τρεις μεγαλύτερους αερολιμένες της Ελλάδας.....	15
5.1. Συνθήκες αναφοράς.....	16
5.1.1. Ετήσιος αριθμός κινήσεων	17
5.1.2. Μετεωρολογικές συνθήκες αναφοράς	18
5.1.3. Διαμόρφωση μεθοδολογίας υπολογισμών.....	19
5.2. Διεθνής Αερολιμένας Αθηνών	21
5.2.1. Διάταξη.....	22
5.2.2. Αεροπορική κυκλοφορία	24
5.2.3. Μίγμα αεροσκαφών	25
5.2.4. Κατανομές κινήσεων.....	26
5.2.5. Μετεωρολογία	29
5.2.6. Σημεία υπολογισμού συγκεντρώσεων	37
5.2.7. Αποτελέσματα υπολογισμού εκπομπών	39
5.2.8. Αποτελέσματα υπολογισμού συγκεντρώσεων.....	41
5.3. Αερολιμένας Θεσσαλονίκης.....	75
5.3.1. Διάταξη.....	76
5.3.2. Αεροπορική κυκλοφορία.....	77
5.3.3. Μίγμα αεροσκαφών	79

5.3.4.	Κατανομές κινήσεων.....	80
5.3.5.	Μετεωρολογία	81
5.3.6.	Σημεία υπολογισμού συγκεντρώσεων	85
5.3.7.	Αποτελέσματα υπολογισμού εκπομπών	87
5.3.8.	Αποτελέσματα υπολογισμού συγκεντρώσεων.....	89
5.4.	Αερολιμένας Ηρακλείου	124
5.4.1.	Διάταξη.....	124
5.4.2.	Αεροπορική κυκλοφορία.....	127
5.4.3.	Μίγμα αεροσκαφών.....	128
5.4.4.	Κατανομές κινήσεων.....	129
5.4.5.	Μετεωρολογία	131
5.4.6.	Σημεία υπολογισμού συγκεντρώσεων	137
5.4.7.	Αποτελέσματα υπολογισμού εκπομπών	137
5.4.8.	Αποτελέσματα υπολογισμού συγκεντρώσεων.....	138
6.	Ανάλυση αποτελεσμάτων	152
6.1.	Συγκρίσεις εκπομπών	155
6.1.1.	Αποτελέσματα υπολογισμού εκπομπών Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών έναντι των αποτελεσμάτων παρακολούθησης	155
6.1.2.	Αναγωγή εκπομπών και αντιπαραβολή με αποτελέσματα προγενέστερων εργασιών.....	156
6.1.3.	Αποτελέσματα υπολογισμού εκπομπών έναντι απογραφής συνολικών εκπομπών της αεροπορικής κυκλοφορίας στην Ελλάδα	162
6.2.	Συγκρίσεις συγκεντρώσεων με οριακές τιμές.....	167
6.2.1.	Αναλογία NO ₂ στο μίγμα NO _x	167
6.2.2.	Αναλογία SO ₂ στο μίγμα των SO _x	172
6.2.3.	Ανταγωνισμός ασταθούς ατμόσφαιρας και αυξημένων εκπομπών.....	172
6.2.4.	Σύγκριση συγκεντρώσεων με οριακές τιμές στο Διεθνή Αερολιμένα Αθηνών.....	174
6.2.5.	Σύγκριση συγκεντρώσεων με οριακές τιμές στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.....	177
6.2.6.	Σύγκριση συγκεντρώσεων με οριακές τιμές στον αερολιμένα Ηρακλείου.....	179
6.3.	Συχνότητες εμφάνισης υψηλών συγκεντρώσεων NO _x	182
6.4.	Αντιπαραβολή αποτελεσμάτων υπολογισμού συγκεντρώσεων με μετρήσεις στην περιοχή του ΔΑΑ.....	185
6.4.1.	Το δίκτυο σταθμών παρακολούθησης ποιότητας αέρα στην περιοχή των Μεσογείων.....	185
6.4.2.	Συγκρίσεις αποτελεσμάτων στις θέσεις των σταθμών	186
6.4.2.1.	Σταθμός Σπάτων.....	187
6.4.2.1.i.	Αντιπαραβολή χρονοσειρών	187

6.4.2.1.ii.	Διασπορά μετρήσεων-εκτιμήσεων	191
6.4.2.1.iii.	Στατιστική ανάλυση.....	195
6.4.2.1.iv.	Επίδραση άλλων πηγών	202
6.4.2.1.v.	Διαπιστώσεις.....	206
6.4.2.2.	Σταθμός Μαρκόπουλου	212
6.4.2.3.	Σταθμός Κορωπίου	219
6.4.2.4.	Σταθμός Παλλήνης.....	226
7.	Ανάλυση ευαισθησίας: επίδραση των παραμέτρων εισόδου στα αποτελέσματα της υπολογιστικής προσομοίωσης.....	234
7.1.	Ώρα της ημέρας	235
7.1.1.	Μηχανισμός επίδρασης της ώρας της ημέρας στις δυνατότητες μίξης του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος.....	235
7.1.2.	Διαμόρφωση δεδομένων εισόδου	237
7.1.3.	Αποτελέσματα.....	238
7.2.	Ταχύτητα ανέμου	242
7.2.1.	Μηχανισμός επίδρασης της ταχύτητας του ανέμου στη διασπορά των αέριων ρύπων	242
7.2.2.	Διαμόρφωση δεδομένων εισόδου	245
7.2.3.	Αποτελέσματα.....	246
7.3.	Θερμοκρασία.....	251
7.3.1.	Μηχανισμός επίδρασης της θερμοκρασίας στη διασπορά των αέριων ρύπων	251
7.3.2.	Διαμόρφωση δεδομένων εισόδου	252
7.3.3.	Αποτελέσματα.....	253
7.4.	Νεφοκάλυψη	261
7.4.1.	Μηχανισμός επίδρασης της νεφοκάλυψης στη διασπορά των αέριων ρύπων.....	261
7.4.2.	Διαμόρφωση δεδομένων εισόδου	262
7.4.3.	Αποτελέσματα.....	263
7.5.	Ύψος νέφωσης	269
7.5.1.	Μηχανισμός επίδρασης του ύψους νέφωσης στη διασπορά των αέριων ρύπων.....	269
7.5.2.	Διαμόρφωση δεδομένων εισόδου	270
7.5.3.	Αποτελέσματα.....	271
7.6.	Διαπιστώσεις από την ανάλυση ευαισθησίας	274
8.	Συμπεράσματα.....	277
8.1.	Μεθοδολογία.....	277
8.2.	Αποτελέσματα.....	278

8.3.	Ανάλυση αποτελεσμάτων.....	279
8.3.1.	Εκπομπές.....	279
8.3.2.	Συγκεντρώσεις.....	281
8.3.3.	Σύγκριση υπολογιστικών αποτελεσμάτων – μετρήσεων.....	283
8.3.4.	Ανάλυση ευαισθησίας.....	285
9.	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	290
10.	Κατάλογος συντομογραφιών.....	292
11.	Παράρτημα Α: Στοιχεία τεκμηρίωσης κεφαλαίου 1.....	297
11.1.	Βασικές έννοιες.....	297
11.1.1.	Ατμόσφαιρα.....	297
11.1.2.	Κυριότεροι ατμοσφαιρικοί ρύποι.....	298
11.1.3.	Επίδραση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στη δημόσια υγεία και στο περιβάλλον.....	299
11.2.	Η ρύπανση του αέρα ως πρόβλημα στο διεθνές επίπεδο.....	300
11.3.	Η ποιότητα του αέρα στην Ευρώπη.....	304
11.4.	Η ατμοσφαιρική ρύπανση στην Ελλάδα.....	306
11.4.1.	Η κατάσταση σε όλη τη χώρα.....	306
11.4.2.	Η κατάσταση στις μεγάλες πόλεις.....	312
11.4.3.	Η κατάσταση γύρω από τα αεροδρόμια.....	314
11.5.	Οριακές τιμές για την ποιότητα του αέρα.....	315
11.6.	Οι εναέριες μεταφορές.....	319
11.6.1.	Ο τομέας αερομεταφορών στο διεθνές και στο ευρωπαϊκό επίπεδο.....	320
11.6.2.	Ο τομέας αερομεταφορών στην Ελλάδα.....	322
12.	Παράρτημα Β: Στοιχεία τεκμηρίωσης κεφαλαίου 2.....	326
12.1.	Κατηγορίες πηγών εκπομπής αέριων ρύπων.....	326
12.2.	Οι εκπομπές από τους κινητήρες των αεροσκαφών.....	327
12.3.	Κύκλος προσγείωσης – απογείωσης (LTO).....	332
12.4.	Επίγειες πηγές εκπομπής ρύπων στην ατμόσφαιρα.....	335
12.4.1.	Μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος.....	335
12.4.2.	Οχήματα εξοπλισμού επίγειας υποστήριξης.....	338
12.4.3.	Υπολείμματα φθοράς των φρένων και ελαστικών των αεροσκαφών.....	339
12.5.	Η επίδραση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης των αεροδρομίων στη δημόσια υγεία.....	341
13.	Παράρτημα Γ: Στοιχεία τεκμηρίωσης κεφαλαίου 3.....	345
13.1.	Μέθοδοι βασιζόμενες σε μετρήσεις.....	346
13.1.1.	Δίκτυα σταθερών σταθμών παρακολούθησης συγκεντρώσεων αέριων ρύπων.....	347

13.1.2.	Κινητοί σταθμοί ποιότητας αέρα, φορητά όργανα μέτρησης συγκεντρώσεων αέριων ρύπων και βιοενδεικτικές προσεγγίσεις.....	349
13.1.3.	Περιπτώσεις αξιοποίησης μεθόδων βασιζόμενων σε μετρήσεις για τη μελέτη αέριας ρύπανσης σε αεροδρόμια	350
13.1.3.1.	Αποτελέσματα παρακολούθησης στα αεροδρόμια της Ρώμης Fiumicino και Ciampino	352
13.1.3.2.	Μετρήσεις σωματιδίων με κινητό σταθμό κατάντη του αεροδρομίου του Los Angeles.....	354
13.1.3.3.	Μετρήσεις ποιότητας αέρα στα Μεσόγεια Αττικής πριν και μετά την έναρξη λειτουργίας του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών στα Σπάτα.....	356
13.2.	Μέθοδοι βασιζόμενοι σε υπολογισμούς.....	358
13.2.1.	Οι υπολογιστικές μέθοδοι και η νέα Οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την Ποιότητα του Αέρα	359
13.2.1.1.	Εκτιμήσεις και αξιολογήσεις μόνο με τη χρήση μοντέλων.....	361
13.2.1.2.	Ολοκληρωμένη εκτίμηση με χρήση υπολογιστικών προσομοιώσεων και μετρήσεων.....	361
13.2.1.3.	Συνδυασμός υπολογιστικών αποτελεσμάτων και μετρήσεων.....	362
13.2.2.	Περιπτώσεις αξιοποίησης υπολογιστικών μεθόδων για τη μελέτη αέριας ρύπανσης σε αεροδρόμια.....	363
13.2.2.1.	Αεροδρόμιο Φλωρεντίας «Amerigo Vesprucci».....	364
13.2.2.2.	Διεθνές Αεροδρόμιο του Los Angeles	366
13.3.	Η θέση της παρούσας εργασίας εντός του φάσματος των τρόπων μελέτης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στα αεροδρόμια.....	367
14.	Παράρτημα Δ: Στοιχεία τεκμηρίωσης κεφαλαίου 4.....	370
14.1.	Μέθοδος υπολογισμού εκπομπών από αεροσκάφη.....	372
14.2.	Μέθοδος υπολογισμού συγκεντρώσεων	374
15.	Βιβλιογραφικές αναφορές.....	378

Κατάλογος γραφημάτων

Γράφημα 1:	Εξέλιξη του ετήσιου αριθμού αεροσκαφών που εξυπηρετούνται από τον ΔΑΑ.....	24
Γράφημα 2:	Μηνιαία κατανομή των αεροπορικών κινήσεων στον ΔΑΑ.....	27
Γράφημα 3:	Εβδομαδιαία κατανομή των αεροπορικών κινήσεων στον ΔΑΑ.....	28
Γράφημα 4:	Ημερήσια κατανομή των αεροπορικών κινήσεων στον ΔΑΑ.....	28
Γράφημα 5:	Διακύμανση της θερμοκρασίας στον ΔΑΑ το 2009.....	29
Γράφημα 6:	Διακύμανση της σχετικής υγρασίας στον ΔΑΑ το 2009.....	30
Γράφημα 7:	Μηνιαία ανεμογράμματα στον ΔΑΑ για το πρώτο εξάμηνο του 2009.....	31
Γράφημα 8:	Μηνιαία ανεμογράμματα στον ΔΑΑ για το δεύτερο εξάμηνο του 2009.....	32
Γράφημα 9:	Μέση ταχύτητα ανέμου καθ' ύψος στον ΔΑΑ ανά εξάμηνο του 2009. Στο δεύτερο εξάμηνο είναι εμφανής η συνεισφορά των μελτεμιών.....	34
Γράφημα 10:	Μέση θερμοκρασία καθ' ύψος στον ΔΑΑ ανά εξάμηνο του 2009.....	34
Γράφημα 11:	Διακύμανση της μέγιστης ημερήσιας ηλιοφάνειας στον ΔΑΑ.....	36
Γράφημα 12:	Διακύμανση της οροφής νεφών στον ΔΑΑ.....	36
Γράφημα 13:	Ποσοστιαία συμβολή των τριών πηγών στις εκπομπές κάθε αέριου ρύπου στον ΔΑΑ.....	40
Γράφημα 14:	Συγκέντρωση CO στο δυσμενέστερο 8ωρο του πρώτου δεκαημέρου Ιουλίου στον ΔΑΑ.....	42
Γράφημα 15:	Συγκέντρωση CO στο δυσμενέστερο 8ωρο του δεύτερου δεκαημέρου Ιουλίου στον ΔΑΑ.....	43
Γράφημα 16:	Συγκέντρωση CO στο δυσμενέστερο 8ωρο του τρίτου δεκαημέρου Ιουλίου στον ΔΑΑ.....	44
Γράφημα 17:	Συγκέντρωση CO στο δυσμενέστερο 8ωρο του πρώτου δεκαημέρου Αυγούστου στον ΔΑΑ.....	45
Γράφημα 18:	Συγκέντρωση CO στο δυσμενέστερο 8ωρο του δεύτερου δεκαημέρου Αυγούστου στον ΔΑΑ.....	46
Γράφημα 19:	Συγκέντρωση CO στο δυσμενέστερο 8ωρο του τρίτου δεκαημέρου Αυγούστου στον ΔΑΑ.....	47
Γράφημα 20:	Συγκέντρωση NO _x στη δυσμενέστερη ώρα του πρώτου δεκαημέρου Αυγούστου στον ΔΑΑ.....	48
Γράφημα 21:	Συγκέντρωση NO _x στη δυσμενέστερη ώρα του δεύτερου δεκαημέρου Ιουλίου στον ΔΑΑ.....	49

Γράφημα 22:	Συγκέντρωση NO_x στη δυσμενέστερη ώρα του τρίτου δεκαημέρου Ιουλίου στον ΔΑΑ.	50
Γράφημα 23:	Συγκέντρωση NO_x στη δυσμενέστερη ώρα του πρώτου δεκαημέρου Αυγούστου στον ΔΑΑ.	51
Γράφημα 24:	Συγκέντρωση NO_x στη δυσμενέστερη ώρα του δεύτερου δεκαημέρου Αυγούστου στον ΔΑΑ.	52
Γράφημα 25:	Συγκέντρωση NO_x στη δυσμενέστερη ώρα του τρίτου δεκαημέρου του Αυγούστου στον ΔΑΑ.	53
Γράφημα 26:	Μέση ετήσια συγκέντρωση NO_x στη διάρκεια του 2009 στον ΔΑΑ.	54
Γράφημα 27:	Μέση ετήσια συγκέντρωση $\text{PM}_{2.5}$ στη διάρκεια του 2009 στον ΔΑΑ.	55
Γράφημα 28:	Συγκέντρωση PM_{10} στο δυσμενέστερο 24ωρο του πρώτου δεκαημέρου Ιουλίου στον ΔΑΑ.	56
Γράφημα 29:	Συγκέντρωση PM_{10} στο δυσμενέστερο 24ωρο του δεύτερου δεκαημέρου Ιουλίου στον ΔΑΑ.	57
Γράφημα 30:	Συγκέντρωση PM_{10} στο δυσμενέστερο 24ωρο του τρίτου δεκαημέρου Ιουλίου στον ΔΑΑ.	58
Γράφημα 31:	Συγκέντρωση PM_{10} στο δυσμενέστερο 24ωρο του πρώτου δεκαημέρου Αυγούστου στον ΔΑΑ.	59
Γράφημα 32:	Συγκέντρωση PM_{10} στο δυσμενέστερο 24ωρο του δεύτερου δεκαημέρου Αυγούστου στον ΔΑΑ.	60
Γράφημα 33:	Συγκέντρωση PM_{10} στο δυσμενέστερο 24ωρο του τρίτου δεκαημέρου Αυγούστου στον ΔΑΑ.	61
Γράφημα 34:	Συγκέντρωση SO_x στη δυσμενέστερη ώρα του πρώτου δεκαημέρου Ιουλίου στον ΔΑΑ.	62
Γράφημα 35:	Συγκέντρωση SO_x στο δυσμενέστερο 24ωρο του πρώτου δεκαημέρου Ιουλίου στον ΔΑΑ.	63
Γράφημα 36:	Συγκέντρωση SO_x στη δυσμενέστερη ώρα του δεύτερου δεκαημέρου Ιουλίου στον ΔΑΑ.	64
Γράφημα 37:	Συγκέντρωση SO_x στο δυσμενέστερο 24ωρο του δεύτερου δεκαημέρου Ιουλίου στον ΔΑΑ.	65
Γράφημα 38:	Συγκέντρωση SO_x στη δυσμενέστερη ώρα του τρίτου δεκαημέρου Ιουλίου στον ΔΑΑ.	66
Γράφημα 39:	Συγκέντρωση SO_x στο δυσμενέστερο 24ωρο του τρίτου δεκαημέρου του Ιουλίου στον ΔΑΑ.	67

Γράφημα 40:	Συγκέντρωση SO _x στη δυσμενέστερη ώρα του πρώτου δεκαημέρου Αυγούστου στον ΔΑΑ.	68
Γράφημα 41:	Συγκέντρωση SO _x στο δυσμενέστερο 24ωρο του πρώτου δεκαημέρου Αυγούστου στον ΔΑΑ.	69
Γράφημα 42:	Συγκέντρωση SO _x στη δυσμενέστερη ώρα του δεύτερου δεκαημέρου Αυγούστου στον ΔΑΑ.	70
Γράφημα 43:	Συγκέντρωση SO _x στο δυσμενέστερο 24ωρο του δεύτερου δεκαημέρου Αυγούστου στον ΔΑΑ.	71
Γράφημα 44:	Συγκέντρωση SO _x στη δυσμενέστερη ώρα του τρίτου δεκαημέρου Αυγούστου στον ΔΑΑ.	72
Γράφημα 45:	Συγκέντρωση SO _x στο δυσμενέστερο 24ωρο του τρίτου δεκαημέρου Αυγούστου στον ΔΑΑ.	73
Γράφημα 46:	Εξέλιξη του ετήσιου αριθμού αεροσκαφών που εξυπηρετούνται από τον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.....	78
Γράφημα 47:	Μηνιαία κατανομή των αεροπορικών κινήσεων στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.	80
Γράφημα 48:	Διακύμανση της θερμοκρασίας στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης το 2009.	81
Γράφημα 49:	Διακύμανση της σχετικής υγρασίας στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης το 2009.	82
Γράφημα 50:	Μηνιαία ανεμογράμματα στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης για το πρώτο εξάμηνο του 2009.	83
Γράφημα 51:	Μηνιαία ανεμογράμματα στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης για το δεύτερο εξάμηνο του 2009.	84
Γράφημα 52:	Ποσοστιαία συμβολή των τριών πηγών στις εκπομπές κάθε αέριου ρύπου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.	88
Γράφημα 53:	Συγκέντρωση CO στο δυσμενέστερο 8ωρο του πρώτου δεκαημέρου Ιουλίου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.	91
Γράφημα 54:	Συγκέντρωση CO στο δυσμενέστερο 8ωρο του δεύτερου δεκαημέρου Ιουλίου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.	92
Γράφημα 55:	Συγκέντρωση CO στο δυσμενέστερο 8ωρο του τρίτου δεκαημέρου Ιουλίου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.	93
Γράφημα 56:	Συγκέντρωση CO στο δυσμενέστερο 8ωρο του πρώτου δεκαημέρου Αυγούστου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.	94

Γράφημα 57:	Συγκέντρωση CO στο δυσμενέστερο 8ωρο του δεύτερου δεκαημέρου Αυγούστου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.	95
Γράφημα 58:	Συγκέντρωση CO στο δυσμενέστερο 8ωρο του τρίτου δεκαημέρου Αυγούστου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.	96
Γράφημα 59:	Συγκέντρωση NO _x στη δυσμενέστερη ώρα του πρώτου δεκαημέρου Ιουλίου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.	97
Γράφημα 60:	Συγκέντρωση NO _x στη δυσμενέστερη ώρα του δεύτερου δεκαημέρου Ιουλίου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.	98
Γράφημα 61:	Συγκέντρωση NO _x στη δυσμενέστερη ώρα του τρίτου δεκαημέρου Ιουλίου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.	99
Γράφημα 62:	Συγκέντρωση NO _x στη δυσμενέστερη ώρα του πρώτου δεκαημέρου Αυγούστου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.	100
Γράφημα 63:	Συγκέντρωση NO _x στη δυσμενέστερη ώρα του δεύτερου δεκαημέρου Αυγούστου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.	101
Γράφημα 64:	Συγκέντρωση NO _x στη δυσμενέστερη ώρα του τρίτου δεκαημέρου Αυγούστου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.	102
Γράφημα 65:	Ετήσια μέση συγκέντρωση NO _x (2009) στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.	103
Γράφημα 66:	Συγκέντρωση PM ₁₀ στο δυσμενέστερο 24ωρο του πρώτου δεκαημέρου Ιουλίου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.	104
Γράφημα 67:	Συγκέντρωση PM ₁₀ στο δυσμενέστερο 24ωρο του δεύτερου δεκαημέρου Ιουλίου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.	105
Γράφημα 68:	Συγκέντρωση PM ₁₀ στο δυσμενέστερο 24ωρο του τρίτου δεκαημέρου Ιουλίου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.	106
Γράφημα 69:	Συγκέντρωση PM ₁₀ στο δυσμενέστερο 24ωρο του πρώτου δεκαημέρου Αυγούστου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.	107
Γράφημα 70:	Συγκέντρωση PM ₁₀ στο δυσμενέστερο 24ωρο του δεύτερου δεκαημέρου Αυγούστου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.	108
Γράφημα 71:	Συγκέντρωση PM ₁₀ στο δυσμενέστερο 24ωρο του τρίτου δεκαημέρου Αυγούστου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.	109
Γράφημα 72:	Μέση ετήσια συγκέντρωση PM ₁₀ στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.	110
Γράφημα 73:	Συγκέντρωση SO _x στη δυσμενέστερη ώρα του πρώτου δεκαημέρου Ιουλίου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.	111
Γράφημα 74:	Συγκέντρωση SO _x στο δυσμενέστερο 24ωρο του πρώτου δεκαημέρου Ιουλίου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.	112

Γράφημα 75:	Συγκέντρωση SO _x στη δυσμενέστερη ώρα του δεύτερου δεκαημέρου Ιουλίου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.	113
Γράφημα 76:	Συγκέντρωση SO _x στο δυσμενέστερο 24ωρο του δεύτερου δεκαημέρου Ιουλίου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.	114
Γράφημα 77:	Συγκέντρωση SO _x στη δυσμενέστερη ώρα του τρίτου δεκαημέρου Ιουλίου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.	115
Γράφημα 78:	Συγκέντρωση SO _x στο δυσμενέστερο 24ωρο του τρίτου δεκαημέρου Ιουλίου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.	116
Γράφημα 79:	Συγκέντρωση SO _x στη δυσμενέστερη ώρα του πρώτου δεκαημέρου Αυγούστου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.	117
Γράφημα 80:	Συγκέντρωση SO _x στο δυσμενέστερο 24ωρο του πρώτου δεκαημέρου Αυγούστου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.	118
Γράφημα 81:	Συγκέντρωση SO _x στη δυσμενέστερη ώρα του δεύτερου δεκαημέρου Αυγούστου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.	119
Γράφημα 82:	Συγκέντρωση SO _x στο δυσμενέστερο 24ωρο του δεύτερου δεκαημέρου Αυγούστου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.	120
Γράφημα 83:	Συγκέντρωση SO _x στη δυσμενέστερη ώρα του τρίτου δεκαημέρου Αυγούστου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.	121
Γράφημα 84:	Συγκέντρωση SO _x στο δυσμενέστερο 24ωρο του τρίτου δεκαημέρου Αυγούστου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.	122
Γράφημα 85:	Εξέλιξη του ετήσιου αριθμού αεροσκαφών που εξυπηρετούνται από τον ΚΑΗΚ.	127
Γράφημα 86:	Μηνιαία κατανομή των αεροπορικών κινήσεων στον ΚΑΗΚ το 2009.	130
Γράφημα 87:	Εβδομαδιαία κατανομή των αεροπορικών κινήσεων στον ΚΑΗΚ το 2009.	130
Γράφημα 88:	Ημερήσια κατανομή των αεροπορικών κινήσεων στον ΚΑΗΚ το 2009. 131	
Γράφημα 89:	Διακύμανση της θερμοκρασίας στον ΚΑΗΚ το 2009.	132
Γράφημα 90:	Μηνιαία ανεμολογικά δεδομένα ΚΑΗΚ για το πρώτο εξάμηνο του 2009.	133
Γράφημα 91:	Μηνιαία ανεμολογικά δεδομένα ΚΑΗΚ για το δεύτερο εξάμηνο του 2009.	134
Γράφημα 92:	Κατανομή ανέμου καθ' ύψος πάνω από τον ΚΑΗΚ για τέσσερις ημέρες του Ιουλίου 2009.	136

Γράφημα 93 (επάνω) και γράφημα 94 (κάτω): Συγκέντρωση CO στα δύο δυσμενέστερα οκτάωρα του Ιουλίου 2009.	140
Γράφημα 95 (επάνω) και γράφημα 96 (κάτω): Συγκέντρωση CO στα δύο δυσμενέστερα οκτάωρα του Αυγούστου 2009.	141
Γράφημα 97 (επάνω) και γράφημα 98 (κάτω): Συγκέντρωση NO _x στις δύο δυσμενέστερες ώρες του Ιουλίου 2009.	142
Γράφημα 99 (επάνω) και γράφημα 100 (κάτω): Συγκέντρωση NO _x στις δύο δυσμενέστερες ώρες του Αυγούστου 2009.	143
Γράφημα 101: Μέση ετήσια συγκέντρωση NO _x στη διάρκεια του 2009.....	144
Γράφημα 102: Μέση ετήσια συγκέντρωση PM _{2.5} στη διάρκεια του 2009.....	145
Γράφημα 103 (επάνω) και γράφημα 104 (κάτω): Συγκέντρωση PM ₁₀ στις δύο δυσμενέστερες ημέρες του Ιουλίου 2009.....	146
Γράφημα 105 (επάνω) και γράφημα 106 (κάτω): Συγκέντρωση PM ₁₀ στις δύο δυσμενέστερες ημέρες του Αυγούστου 2009.....	147
Γράφημα 107 (επάνω) και γράφημα 108 (κάτω): Ωριαία και εικοσιτετράωρη συγκέντρωση SO _x στα δυσμενέστερα αντίστοιχα διαστήματα του Ιουλίου 2009.....	148
Γράφημα 109 (επάνω) και γράφημα 110 (κάτω): Ωριαία και εικοσιτετράωρη συγκέντρωση SO _x στα δεύτερα πιο δυσμενή αντίστοιχα διαστήματα του Ιουλίου 2009.....	149
Γράφημα 111 (επάνω) και γράφημα 112 (κάτω): Ωριαία και εικοσιτετράωρη συγκέντρωση SO _x σε μια από τις δυσμενέστερες ημέρες του Αυγούστου 2009.....	150
Γράφημα 113 (επάνω) και γράφημα 114 (κάτω): Ωριαία και εικοσιτετράωρη συγκέντρωση SO _x σε μια από τις δυσμενέστερες ημέρες του Αυγούστου 2009.....	151
Γράφημα 115: Εκπομπές ανά κύκλο προσγείωσης-απογείωσης στους αερολιμένες της παρούσας εργασίας και άλλων εργασιών, υπολογισμένες με διαφορετικές μεθόδους.....	160
Γράφημα 116: Σχετικές συχνότητες ωριαίων μέγιστων τιμών συγκέντρωσης NO _x	183
Γράφημα 117: Χρονοσειρά μετρήσεων και εκτιμήσεων ωριαίας μέσης συγκέντρωσης CO στο σταθμό Σπάτων.	188
Γράφημα 118: Χρονοσειρά μετρήσεων και εκτιμήσεων ωριαίας μέσης συγκέντρωσης NO _x στο σταθμό Σπάτων.	189
Γράφημα 119: Χρονοσειρά μετρήσεων και εκτιμήσεων ωριαίας μέσης συγκέντρωσης PM ₁₀ στο σταθμό Σπάτων.	190

Γράφημα 120: Χρονοσειρά μετρήσεων και εκτιμήσεων ωριαίας μέσης συγκέντρωσης SO _x στο σταθμό Σπάτων.	191
Γράφημα 121: Διασπορά μετρήσεων-εκτιμήσεων ωριαίας μέσης συγκέντρωσης για τους τέσσερις ρύπους (CO, NO _x , PM ₁₀ και SO _x) στο σταθμό Σπάτων.	192
Γράφημα 122: Κατανομή ωριαίων ταχυτήτων ανέμου στις οποίες παρατηρείται προσέγγιση προλέξεων-μετρήσεων στο σταθμό Σπάτων.	194
Γράφημα 123: Ιστόγραμμα της κατανομής μετρήσεων (επάνω αριστερά), της κατανομής αποτελεσμάτων EDMS (επάνω δεξιά) και διάγραμμα ποσοστημορίων των δύο κατανομών (κάτω) για την ωριαία μέση συγκέντρωση CO στο σταθμό των Σπάτων.	197
Γράφημα 124: Ιστόγραμμα της κατανομής μετρήσεων (επάνω αριστερά), της κατανομής αποτελεσμάτων EDMS (επάνω δεξιά) και διάγραμμα ποσοστημορίων των δύο κατανομών (κάτω) για την ωριαία μέση συγκέντρωση NO _x στο σταθμό των Σπάτων.	198
Γράφημα 125: Ιστόγραμμα της κατανομής μετρήσεων (επάνω αριστερά), της κατανομής αποτελεσμάτων EDMS (επάνω δεξιά) και διάγραμμα ποσοστημορίων των δύο κατανομών (κάτω) για την ωριαία μέση συγκέντρωση PM ₁₀ στο σταθμό των Σπάτων.	199
Γράφημα 126: Ιστόγραμμα της κατανομής μετρήσεων (επάνω αριστερά), της κατανομής αποτελεσμάτων EDMS (επάνω δεξιά) και διάγραμμα ποσοστημορίων των δύο κατανομών (κάτω) για την ωριαία μέση συγκέντρωση SO _x στο σταθμό των Σπάτων.	200
Γράφημα 127: Ροδογράμματα ανέμου στο σταθμό των Σπάτων για το διάστημα μη-αιχμής (Ιαν.-Ιούν. και Σεπ.-Δεκ.) και για το διάστημα αιχμής (Ιούλ.-Αύγ.).	203
Γράφημα 128: Ακτινικό διάγραμμα μέσων τιμών των ωριαίων συγκεντρώσεων NO ₂ στο σταθμό των Σπάτων ανά προέλευση ανέμου για το διάστημα μη-αιχμής.	204
Γράφημα 129: Ακτινικό διάγραμμα μέσων τιμών των ωριαίων συγκεντρώσεων NO ₂ στο σταθμό των Σπάτων ανά προέλευση ανέμου για το διάστημα αιχμής.	205
Γράφημα 130: Μετρήσεις και εκτιμήσεις ωριαίας μέσης συγκέντρωσης CO στο σταθμό Μαρκόπουλου.	212
Γράφημα 131: Μετρήσεις και εκτιμήσεις ωριαίας μέσης συγκέντρωσης NO _x στο σταθμό Μαρκόπουλου.	213
Γράφημα 132: Μετρήσεις και εκτιμήσεις ωριαίας μέσης συγκέντρωσης PM ₁₀ στο σταθμό Μαρκόπουλου.	213

Γράφημα 133: Διασπορά μετρήσεων-εκτιμήσεων ωριαίας μέσης συγκέντρωσης για τους NO_x και PM_{10} στο σταθμό Μαρκόπουλου.	214
Γράφημα 134: Ιστόγραμμα της κατανομής μετρήσεων (επάνω αριστερά), της κατανομής αποτελεσμάτων EDMS (επάνω δεξιά) και διάγραμμα ποσοστημορίων των δύο κατανομών (κάτω) για την ωριαία μέση συγκέντρωση NO_x στο σταθμό του Μαρκόπουλου.	216
Γράφημα 135: Ιστόγραμμα της κατανομής μετρήσεων (επάνω αριστερά), της κατανομής αποτελεσμάτων EDMS (επάνω δεξιά) και διάγραμμα ποσοστημορίων των δύο κατανομών (κάτω) για την ωριαία μέση συγκέντρωση PM_{10} στο σταθμό του Μαρκόπουλου.	217
Γράφημα 136: Μετρήσεις και εκτιμήσεις ωριαίας μέσης συγκέντρωσης NO_x στο σταθμό Κορωπίου.	220
Γράφημα 137: Μετρήσεις και εκτιμήσεις ωριαίας μέσης συγκέντρωσης PM_{10} στο σταθμό Κορωπίου.	220
Γράφημα 138: Διασπορά μετρήσεων-εκτιμήσεων ωριαίας μέσης συγκέντρωσης για τους NO_x και PM_{10} στο σταθμό Κορωπίου.	221
Γράφημα 139: Ιστόγραμμα της κατανομής μετρήσεων (επάνω αριστερά), της κατανομής αποτελεσμάτων EDMS (επάνω δεξιά) και διάγραμμα ποσοστημορίων των δύο κατανομών (κάτω) για την ωριαία μέση συγκέντρωση NO_x στο σταθμό του Κορωπίου.	223
Γράφημα 140: Ιστόγραμμα της κατανομής μετρήσεων (επάνω αριστερά), της κατανομής αποτελεσμάτων EDMS (επάνω δεξιά) και διάγραμμα ποσοστημορίων των δύο κατανομών (κάτω) για την ωριαία μέση συγκέντρωση PM_{10} στο σταθμό του Κορωπίου.	224
Γράφημα 141: Μετρήσεις και εκτιμήσεις ωριαίας μέσης συγκέντρωσης NO_x στο σταθμό Παλλήνης.	227
Γράφημα 142: Μετρήσεις και εκτιμήσεις ωριαίας μέσης συγκέντρωσης PM_{10} στο σταθμό Παλλήνης.	227
Γράφημα 143: Διασπορά μετρήσεων-εκτιμήσεων ωριαίας μέσης συγκέντρωσης για τους NO_x και PM_{10} στο σταθμό Παλλήνης.	228
Γράφημα 144: Ιστόγραμμα της κατανομής μετρήσεων (επάνω αριστερά), της κατανομής αποτελεσμάτων EDMS (επάνω δεξιά) και διάγραμμα ποσοστημορίων των δύο κατανομών (κάτω) για την ωριαία μέση συγκέντρωση NO_x στο σταθμό της Παλλήνης.	230
Γράφημα 145: Ιστόγραμμα της κατανομής μετρήσεων (επάνω αριστερά), της κατανομής αποτελεσμάτων EDMS (επάνω δεξιά) και διάγραμμα	

ποσοστημορίων των δύο κατανομών (κάτω) για την ωριαία μέση συγκέντρωση PM ₁₀ στο σταθμό της Παλλήνης.	231
Γράφημα 146: Η επίδραση της ώρας της ημέρας στη συγκέντρωση CO, υπό άνεμο χαμηλής ταχύτητας.....	239
Γράφημα 147: Η επίδραση της ταχύτητας ανέμου και της ώρας της ημέρας στη συγκέντρωση CO.....	241
Γράφημα 148: Επίδραση της ταχύτητας ανέμου στη διασπορά του CO.....	247
Γράφημα 149: Επίδραση της ταχύτητας ανέμου στη διασπορά των NO _x	248
Γράφημα 150: Συγκεντρώσεις CO και NO _x πάνω στην κεντρική γραμμή διασποράς, υπό διαφορετικές ταχύτητες ανέμου.	249
Γράφημα 151: Συγκεντρώσεις CO και NO _x σε ισαπέχοντα σημεία της κεντρικής γραμμής διασποράς, υπό διαφορετικές ταχύτητες ανέμου.....	250
Γράφημα 152: Συγκεντρώσεις CO και NO _x πάνω στην κεντρική γραμμή διασποράς, υπό διαφορετικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, για μια χαρακτηριστική ώρα σταθεροποιημένου επιφανειακού στρώματος.....	254
Γράφημα 153: Συγκεντρώσεις CO και NO _x πάνω στην κεντρική γραμμή διασποράς, υπό διαφορετικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, κατά την ώρα μετάβασης από διαμεταγωγικό σε σταθεροποιημένο επιφανειακό στρώμα.	256
Γράφημα 154: Συγκεντρώσεις CO σε δύο σημεία της κεντρικής γραμμή διασποράς, υπό διαφορετικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, κατά την ώρα μετάβασης από διαμεταγωγικό σε σταθεροποιημένο επιφανειακό στρώμα.....	257
Γράφημα 155: Επίδραση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος στη χωρική διασπορά του CO στη διάρκεια μιας μεταβατικής ώρας.....	258
Γράφημα 156: Επίδραση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος στη χωρική διασπορά του NO _x στη διάρκεια μιας μεταβατικής ώρας.	259
Γράφημα 157: Μέση ωριαία συγκέντρωση CO και NO _x πάνω στην κεντρική γραμμή διασποράς, υπό μεταβαλλόμενη νεφοκάλυψη, στις 10:00 (υψηλή εισερχόμενη ακτινοβολία, κρύο έδαφος).....	264
Γράφημα 158: Μέση ωριαία συγκέντρωση CO και NO _x πάνω στην κεντρική γραμμή διασποράς, υπό μεταβαλλόμενη νεφοκάλυψη, στις 17:00 (μέτρια εισερχόμενη ακτινοβολία, θερμό έδαφος).....	266
Γράφημα 159: Επίδραση της νέφωσης στη χωρική διασπορά του CO στη διάρκεια μιας απογευματινής ώρας.....	268

Γράφημα 160: Μέση ωριαία συγκέντρωση CO και NO _x πάνω στην κεντρική γραμμή διασποράς, υπό μεταβαλλόμενο ύψος νέφωσης, στις 12:00 (<i>υψηλή εισερχόμενη ακτινοβολία, κρύο έδαφος</i>).....	272
Γράφημα 161: Μέση ωριαία συγκέντρωση CO και NO _x πάνω στην κεντρική γραμμή διασποράς, υπό μεταβαλλόμενο ύψος νέφωσης, στις 17:00 (<i>μέτρια εισερχόμενη ακτινοβολία, θερμό έδαφος</i>).....	273
Γράφημα 162: Εκπομπές αέριων ρύπων στην Ευρωπαϊκή Ένωση.	305
Γράφημα 163: Εξέλιξη συγκεντρώσεων αέριων ρύπων σε κεντρικά σημεία μεγάλων πόλεων της Ελλάδας.	313
Γράφημα 164: Εξέλιξη συγκεντρώσεων αέριων ρύπων σε κεντρικά σημεία μεγάλων πόλεων της Ελλάδας.	314
Γράφημα 165: Παγκόσμια αεροπορική κυκλοφορία επιβατών και εμπορευμάτων.	321
Γράφημα 166: Εξέλιξη του συνολικού ετήσιου αριθμού κινήσεων αεροσκαφών στην Ελλάδα.....	325
Γράφημα 167: Ποσοστιαία κατανομή εκπομπών στις φάσεις πτήσης.....	330

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 6:	Η θέση του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών σε σχέση με το κέντρο της πόλης.....	21
Σχήμα 7:	Η διάταξη του ΔΑΑ εισηγμένη στο EDMS.	23
Σχήμα 8:	Το δίκτυο σημείων υπολογισμού των συγκεντρώσεων αέριων ρύπων κατά τη μελέτη του ΔΑΑ στο EDMS.....	38
Σχήμα 9:	Η θέση του αερολιμένα Θεσσαλονίκης σε σχέση με την πόλη.	75
Σχήμα 10:	Η διάταξη του ΚΑΘΜ εισηγμένη στο EDMS.	77
Σχήμα 11:	Το δίκτυο σημείων υπολογισμού των συγκεντρώσεων αέριων ρύπων κατά τη μελέτη του αερολιμένα Θεσσαλονίκης στο EDMS.....	86
Σχήμα 12:	Η διάταξη του ΚΑΗΚ εισηγμένη στο EDMS.....	126
Σχήμα 13:	Το δίκτυο σημείων υπολογισμού των συγκεντρώσεων αέριων ρύπων του ΚΑΗΚ στο EDMS.....	137
Σχήμα 14:	Ο φωτοχημικός κύκλος αλληλεπίδρασης των NO _x με το O ₃ στην τροπόσφαιρα.....	169
Σχήμα 15:	Το δίκτυο σταθμών παρακολούθησης της ποιότητας αέρα γύρω από τον ΔΑΑ, με ένδειξη των αποστάσεων κάθε σταθμού από τον πύργο ελέγχου.....	186
Σχήμα 16:	Η θέση του σταθμού παρακολούθησης ποιότητας αέρα στα Σπάτα.....	209
Σχήμα 17:	Η θέση του σταθμού παρακολούθησης ποιότητας αέρα στο Μαρκόπουλο.....	219
Σχήμα 18:	Οι μεταπτώσεις του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος στη διάρκεια του εικοσιτετραώρου.	236
Σχήμα 19:	Φωτογραφία από τη Μεγάλη Αιθαλομίχλη του Λονδίνου το 1952 (αριστερά) και τη θολή ατμόσφαιρα του Los Angeles την παραμονή Χριστουγέννων του 1948 (δεξιά).	301
Σχήμα 20:	Η ατμοσφαιρική ρύπανση στο Πεκίνο (αριστερά) και στο Νέο Δελχί (δεξιά).	301
Σχήμα 21:	Δορυφορική αποτύπωση των μέσων επιπέδων NO ₂ στην τροπόσφαιρα του πλανήτη στη διάρκεια του 2014.	302
Σχήμα 22:	Γεωγραφική κατανομή της θνησιμότητας που συνδέεται με την ατμοσφαιρική ρύπανση το 2010.	303
Σχήμα 23:	Δορυφορική αποτύπωση της τάσης των μέσων επιπέδων NO ₂ στην τροπόσφαιρα της Ευρώπης από το 2005 ως το 2014.....	306

Σχήμα 24:	Επίπεδα της μέγιστης ετήσιας τιμής των μεγίστων ημερησίων οκτάωρων συγκεντρώσεων του CO στην Ελλάδα.....	308
Σχήμα 25:	Επίπεδα της μέσης ετήσιας συγκέντρωσης NO ₂ στην Ελλάδα.	309
Σχήμα 26:	Επίπεδα ημερήσιας συγκέντρωσης PM ₁₀ στην Ελλάδα.	310
Σχήμα 27:	Φυσικές εκπομπές PM ₁₀ από την επίδραση του ανέμου στο έδαφος.....	311
Σχήμα 28:	Φυσικές εκπομπές PM ₁₀ από θαλάσσιο αλάτι που παράγεται από την επίδραση του ανέμου στις θαλάσσιες επιφάνειες.	311
Σχήμα 29:	Επίπεδα της μέσης ετήσιας τιμής της συγκέντρωσης SO ₂ στην Ελλάδα.....	312
Σχήμα 30:	Διαφοροποιήσεις των ποσοστών πληθυσμού που εκτίθεται σε κίνδυνο λόγω ρύπανσης του αέρα αναλόγως των οριακών τιμών.	318
Σχήμα 31:	Στροβιλοκινητήρας απλής αεριώθησης (turbojet) στα αριστερά και διπλής ροής (turbofan) στα δεξιά.	328
Σχήμα 32:	Γραφική αναπαράσταση της σύστασης των απαερίων στην έξοδο ενός τυπικού στροβιλοκινητήρα εμπορικού αεροσκάφους.	330
Σχήμα 33:	Απλοποιημένο διάγραμμα λειτουργίας τυπικού στροβιλοκινητήρα εμπορικού αεροσκάφους, ουσίες που εκπέμπονται στην έξοδό του και βασικές επιδράσεις των ουσιών αυτών.....	331
Σχήμα 34:	Αναπαράσταση κύκλου LTO.....	333
Σχήμα 35:	Εικόνες τυπικής θέσης και διάταξης της βοηθητικής μονάδας ισχύος στα εμπορικά αεροσκάφη.	336
Σχήμα 36:	Εικόνες τυπικής ηλεκτροπαραγωγού μονάδας εδάφους (GPU) και σύνδεσής της με το αεροσκάφος.....	337
Σχήμα 37:	Εικόνες οχημάτων που ανήκουν στον εξοπλισμό επίγειας υποστήριξης.	338
Σχήμα 38:	Εικόνες από το σύστημα τροχών/φρένων σε αεροσκάφη κατά την προσγείωση.....	340
Σχήμα 1:	Εικόνες από το ηλιακό ηλεκτροκίνητο μέλλον της αεροπορίας, το οποίο όμως απέχει ακόμη αρκετές δεκαετίες.	346
Σχήμα 2:	Τα αεροδρόμια της Ρώμης και το εκτενές δίκτυο σημείων παθητικής δειγματοληψίας για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα.....	352
Σχήμα 3:	Οι μετρήσεις συγκέντρωσης αριθμού σωματιδίων με τον κινητό σταθμό κατάντη του αεροδρομίου του Los Angeles.....	355
Σχήμα 4:	Η αρχιτεκτονική του EDMS.....	371
Σχήμα 5:	Η δομή του AERMOD	376

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1:	Οριακές τιμές ποιότητας της ατμόσφαιρας στην ελληνική νομοθεσία	8
Πίνακας 2:	Μίγμα αεροσκαφών στον ΔΑΑ κατά τη διάρκεια του 2009.....	26
Πίνακας 3:	Εκπομπές αέριων ρύπων από τη λειτουργία του ΔΑΑ, όπως υπολογιστήκαν από το EDMS.	39
Πίνακας 4:	Μίγμα αεροσκαφών στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.	79
Πίνακας 5:	Εκπομπές αέριων ρύπων από τη λειτουργία του αερολιμένα Θεσσαλονίκης, όπως υπολογιστήκαν από το EDMS.	87
Πίνακας 6:	Μίγμα αεροσκαφών του ΚΑΗΚ.....	128
Πίνακας 7:	Χρήση διαδρόμων του ΚΑΗΚ ανά κατηγορία αεροσκαφών.....	129
Πίνακας 8:	Εκπομπές αέριων ρύπων από τη λειτουργία του ΚΑΗΚ το 2009, όπως υπολογιστήκαν από το EDMS.	138
Πίνακας 9:	Σύγκριση στοιχείων παρακολούθησης με αποτελέσματα EDMS ως προς τις εκπομπές ορισμένων αέριων ρύπων από τη λειτουργία του ΔΑΑ το 2009.	155
Πίνακας 10:	Αποτελέσματα υπολογισμού εκπομπών στο αεροδρόμιο της Ζυρίχης για το 2003 με τρεις διαφορετικές μεθόδους.	157
Πίνακας 11:	Αποτελέσματα υπολογισμού εκπομπών στο ΔΑΑ.....	158
Πίνακας 12:	Αποτελέσματα υπολογισμού εκπομπών στο αεροδρόμιο της Ζυρίχης για το 2004.....	158
Πίνακας 13:	Ανηγμένες εκπομπές στα αεροδρόμια της παρούσας εργασίας και σε αυτά άλλων εργασιών.....	159
Πίνακας 14:	Ετήσιες εκπομπές αέριων ρύπων στην Ελλάδα το 2009.....	163
Πίνακας 15:	Υπολογισμός εκπομπών εσωτερικών πτήσεων στην Ελλάδα το 2009.	165
Πίνακας 16:	Αντιπαραβολή των εκπομπών από τις πτήσεις εσωτερικού στους τρεις υπό μελέτη αερολιμένες με τις συνολικές εκπομπές πολιτικής αεροπορίας στην Ελλάδα.	165
Πίνακας 17:	Ατμοσφαιρικοί ρύποι που παρακολουθούνται ανά σταθμό του δικτύου του ΔΑΑ.....	185
Πίνακας 18:	Οριακές τιμές ποιότητας της ατμόσφαιρας στην ελληνική νομοθεσία	317
Πίνακας 19:	Τα αεροδρόμια της Ελλάδας	323

Πίνακας 20:	Κατανάλωση καυσίμου και εκπομπές ανά κύκλο LTO των ευρύτερα χρησιμοποιούμενων εμπορικών αεροσκαφών.....	334
Πίνακας 21:	Μέσες συγκεντρώσεις αέριων ρύπων πριν και μετά την έναρξη λειτουργίας του ΔΑΑ.....	357

1. Εισαγωγή

Στην εργασία αυτή εξετάζεται η ατμοσφαιρική ρύπανση που προκαλείται από τις αερομεταφορές, με την ανάλυση να εστιάζεται στις περιοχές γύρω από τα αεροδρόμια, όπου και αναμένονται οι μεγαλύτερες επιπτώσεις, λόγω της γειτνίασης των αεροπορικών και επίγειων αερολιμενικών δραστηριοτήτων με το ανθρωπογενές, αλλά και το φυσικό περιβάλλον. Το αντικείμενο της εργασίας ανταποκρίνεται στην ερευνητική ανάγκη που διαφαίνεται να δημιουργεί η σημερινή εικόνα αναφορικά με την επίδραση των ελληνικών αεροδρομίων, και κυρίως των μεγαλύτερων από αυτά, στην ποιότητα του αέρα της περιοχής επιρροής τους.

1.1. Η σημερινή εικόνα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τις αερομεταφορές

Η ατμοσφαιρική ρύπανση γύρω από τα αεροδρόμια είναι ευθεία απόρροια της λειτουργίας τους, αφού η βασική αρχή πρόωσης των αεριωθούμενων αεροσκαφών, τα οποία επικρατούν στις πτήσεις της πολιτικής αεροπορίας, είναι η εξώθηση των προϊόντων καύσης από τις στροβιλομηχανές τους. Επιπλέον, πέραν των κινήσεων των αεριωθούμενων σκαφών, στα αεροδρόμια εντοπίζεται σειρά άλλων πηγών εκπομπής αέριων ρύπων, όπως οι κινήσεις των ελικοφόρων σκαφών και οι επίγειες υποστηρικτικές δραστηριότητες. Επομένως, τόσο προς το παρόν όσο και για το ορατό μέλλον, η λειτουργία των αεροδρομίων είναι συνυφασμένη με την εκπομπή σημαντικών ποσοτήτων αέριων ρύπων, η διασπορά των οποίων στον αέρα της ευρύτερης περιοχής μεταβάλλει την ποιότητα του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος.

Οι παράμετροι της μεταβολής αυτής, δηλαδή τα είδη και οι συγκεντρώσεις των αέριων ρύπων, η έκταση της εξάπλωσης τους και οι ενδεχόμενες υπερβάσεις των οριακών τιμών ποιότητας αέρα, μπορούν να προσεγγιστούν με διαφορετικούς τρόπους, όπως οι υπολογιστικές μεθοδολογίες ή οι μετρήσεις πεδίου, καθώς και με διαφορετικούς βαθμούς χωρικής και χρονικής αναλυτικότητας. Οι μεθοδολογίες αυτές, που άλλοτε επικαλύπτονται και άλλοτε αλληλοσυμπληρώνονται, βασίζονται σε διαφορετικές παραδοχές, χρησιμοποιούν διαφορετικά μέσα, χαρακτηρίζονται από διαφορετικές κοστολογήσεις και τα αποτελέσματά τους ποικίλουν ως προς τη χρησιμότητα, αλλά και την αιτιακή συσχέτιση με τις επιμέρους πηγές εκπομπής ρύπων. Σε γενικές γραμμές, οι μετρήσεις πεδίου, με σταθερούς ή κινούμενους σταθμούς, αποτυπώνουν τις τιμές συγκέντρωσης με μεγάλη αξιοπιστία, αλλά μόνο στο χωρικό σημείο και στο χρονικό διάστημα της μέτρησης, ενώ η δυνατότητα συσχέτισης των συνολικά μετρούμενων συγκεντρώσεων με τις εντός ή εκτός αεροδρομίου επιμέρους πηγές προέλευσης των αέριων ρύπων είναι μάλλον περιορισμένη. Οι υπολογιστικές προσεγγίσεις, με τη στοχαστικότητα που ενσωματώνουν, είναι λιγότερο αξιόπιστες ως προς τις τιμές συγκέντρωσης, αλλά αποτυπώνουν την αναμενόμενη ποιότητα αέρα σε όλη την έκταση της περιοχής ενδιαφέροντος, επιτρέποντας συγχρόνως την αιτιώδη συσχέτιση των συγκεντρώσεων με τις πηγές προέλευσής τους.

Αυτές οι δυνατότητες των υπολογιστικών προσεγγίσεων εκτίμησης της ποιότητας του αέρα έχουν οδηγήσει σε ευρύτερη διάδοσή τους, επικουρούμενες από μια σειρά γενικότερων εξελίξεων, όπως η αύξηση της ευχερώς διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος, η πρόοδος που σημειώνεται στην αξιοπιστία των μοντέλων ποιότητας αέρα, η διαθεσιμότητα λεπτομερών μετεωρολογικών στοιχείων κ.ά. Ο κύριος ως τώρα τομέας χρήσης τους είναι η εκ των προτέρων εκτίμηση των επιπτώσεων ενός σχεδιαζόμενου έργου στην ποιότητα της ατμόσφαιράς, αλλά βαθμιαία οι υπολογιστικές προσεγγίσεις κερδίζουν έδαφος και στον τομέα της παρακολούθησης του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος γύρω από εν λειτουργία έργα, συχνά σε συνδυασμό με δειγματοληπτικές μετρήσεις πεδίου.

1.2. Διαφαινόμενη ερευνητική δυνατότητα

Η αυξανόμενη διάδοση των υπολογιστικών προσεγγίσεων εκτίμησης της ποιότητας του αέρα γύρω από αεροδρόμια, δημιουργεί μια διπλή ερευνητική δυνατότητα, στην οποία αποσκοπεί να ανταποκριθεί η παρούσα εργασία. Από τη μια μεριά, είναι πλέον δυνατόν να εκτιμηθούν με αναλυτικό τρόπο οι επιπτώσεις στην ποιότητα του αέρα γύρω από τα μεγάλα αεροδρόμια της Ελλάδας, προκειμένου να διαπιστωθεί ο βαθμός στον οποίο οι

συγκεντρώσεις αέριων ρύπων συνιστούν ή όχι υποβάθμιση του περιβάλλοντος, καθώς και οι περιοχές στις οποίες ενδέχεται να συμβαίνει αυτό. Παρότι επιμέρους τέτοιες εκτιμήσεις έχουν κατά καιρούς επιχειρηθεί, μέχρι σήμερα δεν υπάρχει μια ολοκληρωμένη εικόνα για την επίδραση που έχουν οι αερολιμένες στην ποιότητα του αέρα, ιδίως υπό τις ιδιαίτερες συνθήκες της Ελλάδας, όπως η εποχική αιχμή της αεροπορικής κυκλοφορίας και ο έντονα μεσογειακός κλιματικός τύπος. Από την άλλη μεριά, η ευρεία χρήση μοντέλων ποιότητας αέρα, τόσο στις μελέτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων που αξιολογούνται στο πλαίσιο λήψης σημαντικών αποφάσεων για την υλοποίηση ή μη μεγάλων έργων, όσο και στην περιβαλλοντική παρακολούθηση της λειτουργίας υφιστάμενων αεροδρομίων, καθιστά απαραίτητη την όσο γίνεται αναλυτικότερη διερεύνηση των συνθηκών εντός των οποίων τα αποτελέσματα παραμένουν αξιόπιστα, καθώς και των διακυμάνσεων ή ευαισθησιών που παρουσιάζει η απόδοση των μοντέλων.

Η ανταπόκριση στην παραπάνω διαφαινόμενη ερευνητική δυνατότητα δεν ξεκινά από μηδενική βάση. Τα δεδομένα και ευρήματα που έχουν δημοσιευτεί στο επιστημονικό πεδίο της υπολογιστικής προσομοίωσης της ποιότητας αέρα είναι ιδιαιτέρως εκτενή, με ποικίλους όμως βαθμούς συσχέτισης με τα ζητήματα των ελληνικών αεροδρομίων. Η ανασκόπηση και αξιοποίηση των στοιχείων αυτών αποτελεί μια ακόμη διάσταση της παρούσας εργασίας, που αποβλέπει στο να επαυξήσει τη χρησιμότητά της για την ελληνική περιβαλλοντική επιστημονική κοινότητα.

1.3. Σκοπός της εργασίας

Η γενική στόχευση της εργασίας έγκειται στη μελέτη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης που προκαλείται από τις αερομεταφορές, με έμφαση στις περιοχές γύρω από τα αεροδρόμια, προκειμένου να διερευνηθεί η έκταση και ένταση της επίδρασης που τα έργα αυτά προκαλούν στην ποιότητα του αέρα. Οι ειδικές συνθήκες που πλαισιώνουν τη γενική αυτή στόχευση προέρχονται από την εστίαση του ενδιαφέροντος σε αεροδρόμια της Ελλάδας, τα οποία παρουσιάζουν σημαντική αιχμή της δραστηριότητάς τους τους καλοκαιρινούς μήνες, λόγω τουρισμού, και ταυτόχρονα λειτουργούν στις ιδιαίτερες μετεωρολογικές συνθήκες που δημιουργεί το έντονα μεσογειακό κλίμα της χώρας. Η διερεύνηση επιχειρείται να κινηθεί κατά το δυνατόν πλησιέστερα στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας των εξεταζόμενων αερολιμένων, αξιοποιώντας μοντέλα που ενσωματώνουν τις ακριβείς πρότυπες εκπομπές αεροσκαφών και επίγειου εξοπλισμού, πραγματικά μετεωρολογικά στοιχεία και στοιχεία

όπως το μίγμα αεροσκαφών και η χρονική κατανομή πτήσεων τα οποία αναλογούν στην πραγματική καταγραφή αναχωρήσεων – αφίξεων.

Στο πλαίσιο αυτό, ο σκοπός της εργασίας, δηλαδή η διερεύνηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τις αερομεταφορές στην Ελλάδα, αναλύεται στις εξής επιμέρους επιδιώξεις:

- Υπολογιστική προσομοίωση των εκπομπών αέριων ρύπων κατά τη λειτουργία των τριών μεγαλύτερων αεροδρομίων της Ελλάδας και των συγκεντρώσεων των ρύπων αυτών σε όλη την περιοχή επιρροής καθενός από τα αεροδρόμια αυτά.
- Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων συγκριτικά με τις οριακές τιμές ποιότητας αέρα που προβλέπει το εθνικό και ενωσιακό δίκαιο, προκειμένου να διαπιστωθεί εάν υπάρχουν ήδη ή αναμένονται στο μέλλον υπερβάσεις των ορίων αυτών.
- Σύγκριση των αποτελεσμάτων της υπολογιστικής προσομοίωσης με τις μετρήσεις εκπομπών και συγκεντρώσεων αέριων ρύπων για το μεγαλύτερο αεροδρόμιο της χώρας, που είναι και το μόνο που διαθέτει τέτοια στοιχεία.
- Διερεύνηση των συνθηκών που επηρεάζουν την απόδοση του μοντέλου, με την ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων του υπό μεταβαλλόμενες παραμέτρους.

Η συνεισφορά της εργασίας στο επιστημονικό της πεδίο απορρέει από τις παραπάνω επιδιώξεις. Συγκεκριμένα, ως προς την ανάλυση της ποιότητας του αέρα στις περιοχές επιρροής των τριών μεγάλων αεροδρομίων της χώρας (Αθήνα, Θεσσαλονίκη και Ηράκλειο), επιχειρείται μια υπέρβαση των αποτελεσμάτων από τις μέχρι σήμερα σχετικές προσπάθειες, οι οποίες ήταν ενταγμένες κυρίως στο πλαίσιο των σχετικών μελετών περιβαλλοντικών επιπτώσεων και χαρακτηρίζονται από αρκετά απλουστευτικές παραδοχές, καταλήγοντας σε χρήσιμα μεν, γενικόλογα δε συμπεράσματα. Επιπλέον, για τους δύο πρώτους αερολιμένες, οι μελέτες ποιότητας αέρα διενεργήθηκαν πριν από αρκετά χρόνια και είναι αμφίβολη πλέον η συσχέτισή τους με τη σημερινή κατάσταση, ενώ για τον τρίτο αερολιμένα η μελέτη είναι πιο πρόσφατη αλλά βασίζεται σε αρκετά απλουστευτικές παραδοχές. Έτσι, υφίσταται ανάγκη αναλυτικότερης και πιο επίκαιρης διερεύνησης των ζητημάτων ατμοσφαιρικής ρύπανσης στις περιοχές επιρροής των τριών μεγαλύτερων αεροδρομίων της χώρας, η οποία επιχειρείται να καλυφθεί στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Συγκεκριμένα, διεξάγεται για πρώτη φορά η ακριβέστερη δυνατή προσομοίωση της ποιότητας αέρα γύρω από τα συγκεκριμένα αεροδρόμια, με βάση πραγματικά δεδομένα αεροσκαφών, επίγειου εξοπλισμού, δρομολογίων και μετεωρολογικών παραμέτρων. Τα ευρήματα της συγκεκριμένης προσπάθειας αφορούν κατά πρώτο λόγο στις περιβαλλοντικές συνθήκες στις οποίες εκτίθεται ο πληθυσμός των περιοχών γύρω από τα τρία αυτά αεροδρόμια, δεδομένου ότι στην περίμετρό τους εντοπίζονται αρκετοί οικιστικοί πόλους και περιοχές παραγωγικών δραστηριοτήτων. Κατά δεύτερο λόγο, τα ευρήματα της προσομοίωσης για τα μεγάλα αεροδρόμια εμπεριέχουν ενδείξεις για την κατάσταση που αναμένεται να επικρατεί γύρω

από τα μικρότερα αεροδρόμια, λειτουργώντας ως μια βάση αναφοράς σχετικά με το πότε θα πρέπει οι υπεύθυνοι για το περιβάλλον να αναλαμβάνουν προληπτικά ή κατασταλτικά μέτρα για την προστασία της ποιότητας του αέρα.

Ως προς τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της υπολογιστικής προσομοίωσης με τις μετρήσεις των σταθμών παρακολούθησης της ποιότητας αέρα, η βασική συνεισφορά της παρούσας εργασίας αφορά κυρίως στην αναζήτηση των αιτίων που προκαλούν τις παρατηρούμενες διαφορές, πολλές εκ των οποίων συναρτώνται με το μεσογειακό κλιματικό χαρακτήρα της Ελλάδας και δεν έχουν ως τώρα αναδειχθεί επαρκώς.

Τέλος, μέσα από την ανάλυση ευαισθησίας, εντοπίζονται ορισμένες ιδιαιτερότητες στη λειτουργία ενός από τα πιο διαδεδομένα συστήματα υπολογιστικής προσομοίωσης ποιότητας αέρα για αεροδρόμια, του EDMS, οι οποίες δεν έχουν δημοσιευτεί ως τώρα και ενδέχεται να αναριοθετούν το εύρος των συνθηκών εντός των οποίων τα αποτελέσματα της προσομοίωσης θα πρέπει να θεωρούνται αντιπροσωπευτικά.

1.4. Γενικό περίγραμμα εννοιών

Στις ακόλουθες ενότητες παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες που σχετίζονται άμεσα με το θέμα της εργασίας, τόσο για λόγους πληρότητας όσο και με στόχο να διατυπωθεί το κατάλληλο εννοιολογικό πλαίσιο που θα επιτρέψει, κυρίως σε αναγνώστες χωρίς μεγάλη εξοικείωση με τα ζητήματα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, να παρακολουθήσουν τον ειρμό των μεθοδολογικών προσεγγίσεων, των αποτελεσμάτων και των συμπερασμάτων που θα παρουσιαστούν στα επόμενα κεφάλαια. Η παρουσίαση εδώ, στο κύριο σώμα της εργασίας, είναι επιγραμματική, ενώ η αναλυτικότερη καταγραφή βρίσκεται στο Παράρτημα Α.

1.4.1. Ατμοσφαιρική ρύπανση

Η ατμόσφαιρα αποτελεί το αέριο περίβλημα της γης και η δομή της παρουσιάζεται στην ενότητα 11.1.1 του Παραρτήματος Α.

Κατά μέσο όρο, ο ξηρός ατμοσφαιρικός αέρας αποτελείται από άζωτο (78,08%), οξυγόνο (20,95%), αργό (0,93%), διοξείδιο του άνθρακα (0,033%) και πολύ μικρές ποσότητες από άλλα αέρια, κυρίως «ευγενή». Στον ατμοσφαιρικό αέρα υπάρχουν επίσης, σε μεταβαλλόμενες ποσότητες, υδρατμοί και ουσίες που μπορούν να προκαλέσουν αρνητικές επιδράσεις στην υγεία του ανθρώπου ή στην ισορροπία του φυσικού περιβάλλοντος, οι οποίες καλούνται *ατμοσφαιρικοί ρύποι*.

Συνεπώς, ως ατμοσφαιρική ρύπανση νοείται η αλλαγή της σύστασης του αέρα λόγω εκπομπής και διάχυσης σε αυτόν ουσιών που μπορούν να προκαλέσουν αρνητικές επιδράσεις στην υγεία του ανθρώπου ή στην ισορροπία του φυσικού περιβάλλοντος. Οι ουσίες αυτές καλούνται ατμοσφαιρικοί ή αέριοι ρύποι και περιλαμβάνουν ενώσεις που είναι παρούσες εκ φύσεως στην ατμόσφαιρα, αλλά κυρίως ουσίες ανθρωπογενούς προέλευσης.

1.4.2. Κυριότεροι ατμοσφαιρικοί ρύποι

Οι κυριότεροι ατμοσφαιρικοί ρύποι είναι το διοξείδιο του θείου (SO₂), το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), τα οξείδια του αζώτου (NO_x), το όζον (O₃), τα αιωρούμενα σωματίδια (PM₁₀ και PM_{2.5}) και οι υδρογονάνθρακες (HCs). Τα βασικά στοιχεία για τους ρύπους αυτούς παρουσιάζονται συνοπτικά στην ενότητα 11.1.2 του Παραρτήματος Α.

1.4.3. Επίδραση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στη δημόσια υγεία και στο περιβάλλον

Η αυξημένη συγκέντρωση αέριων ρύπων στην ατμόσφαιρα, δηλαδή η κακή ποιότητα του αέρα, έχει αρνητικές επιπτώσεις στη δημόσια υγεία και στο φυσικό περιβάλλον. Οι επιπτώσεις αυτές είναι σημαντικές, έχουν αναγνωρισθεί και ερευνηθεί τις τελευταίες δεκαετίες και τα σχετικά στοιχεία παρουσιάζονται συνοπτικά στην ενότητα 11.1.3 του Παραρτήματος Α.

1.5. Η ρύπανση του αέρα στον κόσμο, στην Ευρώπη και στην Ελλάδα

Στο **διεθνές επίπεδο**, η ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελεί μείζον πρόβλημα, το οποίο εμφανίζεται στις περισσότερες πυκνοκατοικημένες περιοχές της Γης. Στο παρελθόν οι πλέον επιβαρυνόμενες περιοχές εντοπιζόνταν στις μεγάλες πόλεις της Ευρώπης και της Αμερικής, ενώ πλέον το πρόβλημα έχει γιγαντωθεί στην Κίνα και στην Ασία. Οι βασικές διαστάσεις του προβλήματος της αέριας ρύπανσης στο διεθνές επίπεδο παρουσιάζονται στην ενότητα 11.2 του Παραρτήματος Α.

Στην **Ευρώπη**, τα έντονα προβλήματα ατμοσφαιρικής ρύπανσης, ιδίως στις μεγάλες πόλεις από το μέσο του 20^{ου} αιώνα και εξής, οδήγησαν στη λήψη πολλών και εντατικών μέτρων, τα οποία βελτιώσαν σε ιδιαίτερα μεγάλο βαθμό την ποιότητα του αέρα. Σήμερα, η ατμοσφαιρική ρύπανση στην Ευρώπη αποτελεί ζήτημα υπό έλεγχο, με περιθώρια βελτίωσης αλλά και κινδύνους επιδείνωσης. Αναλυτικότερα στοιχεία επί αυτού παρουσιάζονται στην ενότητα 11.3 του Παραρτήματος Α.

Στην **Ελλάδα**, η ποιότητα του αέρα παρακολουθείται τις τελευταίες δεκαετίες σε τακτική βάση και τα αποτελέσματα δείχνουν βελτίωση, χωρίς ωστόσο να λείπουν και περιστατικά χειροτέρευσης. Η χαρτογράφηση των επιπέδων συγκέντρωσης αέριων ρύπων σε όλη την επικράτεια δείχνει ότι το CO κινείται σε χαμηλά επίπεδα, το NO₂ εμφανίζει αυξημένες συγκεντρώσεις μόνο στην Αθήνα και στη Θεσσαλονίκη, το SO₂ είναι παντού χαμηλά πλην της Αθήνας και των λιγνιτικών περιοχών της Δυτικής Μακεδονίας, ενώ το πιο επίμονο πρόβλημα αποτελεί η αυξημένη συγκέντρωση PM₁₀ σε μεγάλο μέρος της χώρας. Λεπτομερέστερα στοιχεία για την ρύπανση του αέρα στον κόσμο, στην Ευρώπη και στην

Ελλάδα, καθώς και για την ποιότητα του αέρα στις μεγάλες Ελληνικές πόλεις και στις περιοχές που επηρεάζονται από τα μεγάλα αεροδρόμια παρουσιάζονται στις ενότητες 11.2, 11.3 και 11.4 του Παραρτήματος Α.

1.6. Οριακές τιμές για την ποιότητα του αέρα

Οι οριακές τιμές στις συγκεντρώσεις των κρίσιμων αέριων ρύπων που ισχύουν στην Ελλάδα είναι ταυτόσημες με αυτές που καθορίστηκαν με τις σχετικές Οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης και καταγράφονται στον ακόλουθο πίνακα, ενώ η εξέλιξή τους και οι λεπτομέρειες της σχετικής νομοθεσίας παρουσιάζονται στην ενότητα 11.5 του Παραρτήματος Α.

Πίνακας 1: Οριακές τιμές ποιότητας της ατμόσφαιρας στην ελληνική νομοθεσία

Ρύπος	Οριακή τιμή	Περίοδος αναφοράς	Επιτρεπόμενες υπερβάσεις ανά έτος
CO	10 mg/m ³	Οκτάωρη μέση τιμή	-
SO ₂	350 μg/m ³	Ωριαία μέση τιμή	24 φορές
	125 μg/m ³	Ημερήσια μέση τιμή	3 φορές
NO ₂	200 μg/m ³	Ωριαία μέση τιμή	18 φορές
	40 μg/m ³	Ετήσια μέση τιμή	-
PM ₁₀	50 μg/m ³	Ημερήσια μέση τιμή	35 φορές
	40 μg/m ³	Ετήσια μέση τιμή	-
O ₃	50 μg/m ³	Οκτάωρη μέση τιμή	25 φορές
Pb	0,5 μg/m ³	Ετήσια μέση τιμή	-
C ₆ H ₆	5 μg/m ³	Ετήσια μέση τιμή	-
As	6 ng/m ³	Ετήσια μέση τιμή	-
Cd	5 ng/m ³	Ετήσια μέση τιμή	-
Ni	20 ng/m ³	Ετήσια μέση τιμή	-
PAH [ως βενζο(α)πυρένιο]	1 ng/m ³	Ετήσια μέση τιμή	-

1.7. Οι εναέριες μεταφορές

Οι αερομεταφορές έχουν εξελιχθεί σε συστατικό στοιχείο του τρόπου ζωής, συνδέοντας ηπείρους, χώρες και πόλεις, σε βαθμό πρωτοφανή στην ιστορία της ανθρωπότητας. Η σημασία του τομέα και η διάρθρωσή του στο διεθνές, ευρωπαϊκό και εθνικό επίπεδο, καθώς και ειδικότερα στοιχεία για τα αεροδρόμια της Ελλάδας στην ενότητα 11.6 του Παραρτήματος Α.

2. Εκπομπές αερομεταφορών στα αεροδρόμια - επίδραση στη δημόσια υγεία

Οι πτήσεις των αεροσκαφών και οι επίγειες δραστηριότητες των αεροδρομίων αποτελούν πηγές σημαντικών εκπομπών αέρων ρύπων. Το θέμα αυτό αποτελεί πεδίο επιστημονικής έρευνας εδώ και δεκαετίες, η οποία παραμένει ενεργή και εξελίσσεται μαζί με την εξέλιξη των αεροσκαφών και των καυσίμων, καθώς και τον εξηλεκτρισμό πολλών επίγειων δραστηριοτήτων.

Οι κατηγορίες και τα είδη των εκπεμπόμενων ρύπων, καθώς και οι ποσότητες που εκπέμπονται από τους κινητήρες των αεροσκαφών και τις επίγειες δραστηριότητες των αεροδρομίων παρουσιάζονται στις ενότητες 12.1, 12.2, 12.3 και 12.4 του Παραρτήματος Β. Στα στοιχεία αυτά περιλαμβάνεται και η επεξήγηση του κύκλου LTO (Landing and Take Off cycle) που χρησιμοποιείται για να αντιπροσωπεύσει την κίνηση ενός αεροσκάφους στο αεροδρόμιο εξυπηρέτησης του.

Οι εκπομπές αέριων ρύπων στην περιοχή ενός αεροδρομίου συντελούν στη ρύπανση του αέρα η οποία με τη σειρά της επιδρά δυσμενώς στη δημόσια υγεία. Η επίδραση αυτή παρουσιάζει ποικιλομορφία, διότι επηρεάζεται ισχυρά από την αεροπορική κυκλοφορία και το μίγμα των αεροσκαφών, από τις επίγειες δραστηριότητες, αλλά και από τη θέση, τη γεωγραφία και τη μετεωρολογία της περιοχής. Για τον λόγο αυτό, δεν είναι δυνατή η εξαγωγή γενικών συμπερασμάτων· αντίθετα, απαιτείται ειδική προσέγγιση – όπως αυτή που περιλαμβάνεται στην παρούσα εργασία – ώστε να ερευνηθεί η σύνθεση και η ποσότητα των εκπομπών, ο τρόπος διασποράς τους γύρω από το συγκεκριμένο αεροδρόμιο και το πεδίο συγκεντρώσεων που προκύπτει, και στη συνέχεια να εξεταστούν οι συνθήκες έκθεσης του πληθυσμού προκειμένου να συναχθούν οι επιδράσεις στη δημόσια υγεία. Πληρέστερη ανάλυση του θέματος παρατίθεται στην ενότητα 12.5 του Παραρτήματος Β.

3. Τρόποι μελέτης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στα αεροδρόμια

Οι τρόποι μελέτης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στα αεροδρόμια παρουσιάζουν αξιοσημείωτη ποικιλότητα και μπορεί να θεωρηθεί ότι σχηματίζουν ένα φάσμα, στο ένα άκρο του οποίου βρίσκονται οι συνεχείς μετρήσεις συγκεντρώσεων με σταθερούς σταθμούς παρακολούθησης και στο άλλο άκρο οι πλήρως υπολογιστικές προσεγγίσεις, με βάση μόνο τα στοιχεία κίνησης των αεροσκαφών και τοπικής μετεωρολογίας. Μεταξύ αυτών των άκρων περιλαμβάνονται ενδιάμεσες παραλλαγές, όπως οι μετρήσεις πραγματικού χρόνου με κινητούς σταθμούς ή η συλλογή δειγμάτων αέρα και η εκ των υστέρων ανάλυσή τους, αλλά και συνδυαστικές προσεγγίσεις μετρήσεων - υπολογιστικών προσεγγίσεων, όπως οι υπολογισμοί διασποράς με χρήση πραγματικής μετεωρολογίας ή η βαθμονόμηση των υπολογιστικών ομοιωμάτων με βάση μετρήσεις συγκεντρώσεων.

Οι μέθοδοι που βασίζονται σε μετρήσεις, με σταθερούς ή κινητούς σταθμούς, παρέχουν ακριβείς αποτυπώσεις των συγκεντρώσεων αέριων ρύπων σε συγκεκριμένα σημεία, αλλά παρουσιάζουν δύο αδυναμίες. Πρώτον, δεν βοηθούν στην κατανόηση της αιτιώδους συσχέτισης μεταξύ των μετρούμενων συγκεντρώσεων και των εκπομπών του αεροδρομίου όταν, ως συνήθως, στην περιοχή λειτουργούν και άλλες πηγές αέριων ρύπων (π.χ. αυτοκινητόδρομοι, οικισμοί, βιοτεχνικές εγκαταστάσεις κ.ά.). Δεύτερον, η σημειακή καταγραφή έχει ενδεικτική μόνο αξία για τα επίπεδα συγκέντρωσης στην ευρύτερη περιοχή του σταθμού. Στην ενότητα 13.1 του Παραρτήματος Γ, έχουν συγκεντρωθεί αναλυτικά στοιχεία για (α) τα δίκτυα σταθερών σταθμών παρακολούθησης συγκεντρώσεων αέριων ρύπων και (β) τους κινητούς σταθμούς ποιότητας αέρα και για τα φορητά όργανα μέτρησης συγκεντρώσεων αέριων ρύπων, καθώς και για τις βιοενδεικτικές προσεγγίσεις. Επίσης, παρουσιάζονται τρεις περιπτώσεις αξιοποίησης μεθόδων βασιζόμενων σε μετρήσεις για τη μελέτη αέριας ρύπανσης σε αεροδρόμια, στη Ρώμη, στο Los Angeles και στα Μεσόγεια της Αττικής.

Οι μέθοδοι παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα που βασίζονται σε υπολογιστικές προσεγγίσεις άρχισαν να αξιοποιούνται όλο και εντονότερα τις τελευταίες δεκαετίες, για τρεις λόγους. Πρώτον, η αυξημένη υπολογιστική ισχύς που απαιτούν οι μέθοδοι αυτές

άρχιζε να είναι ευχερώς διαθέσιμη μόνο τα τελευταία 15-20 χρόνια. Ο δεύτερος λόγος συνδέεται με την ανάγκη αιτιώδους διασύνδεσης μεταξύ εκπομπών αέριων ρύπων από κάθε συγκεκριμένη πηγή και ποσοστού της τελικής συγκέντρωσης που αναλογεί στην πηγή αυτή. Και ο τρίτος λόγος αφορά την επέκταση των εκτιμήσεων ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε εκτεταμένες περιοχές, των οποίων η σχετικώς καλή ποιότητα αέρα δεν δικαιολογούσε την εγκατάσταση σταθμών παρακολούθησης ή τη διεξαγωγή μετρήσεων με κινητό σταθμό. Στην ενότητα 13.2 του Παραρτήματος Γ, παρουσιάζονται αναλυτικά στοιχεία για τα κυριότερα θέματα που σχετίζονται με τις υπολογιστικές μεθόδους παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, όπως (α) η ενθάρρυνση χρήσης τους από τη νέα Οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την Ποιότητα του Αέρα, (β) δύο περιπτώσεις αξιοποίησης τέτοιων μεθόδων σε αεροδρόμια, της Φλωρεντίας και του Los Angeles.

Η θέση της παρούσας εργασίας εντός του φάσματος των τρόπων μελέτης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στα αεροδρόμια εντοπίζεται στις υπολογιστικές μεθόδους. Συγκεκριμένα, η προσέγγιση που ακολουθείται στην παρούσα εργασία για τη μελέτη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στα τρία μεγαλύτερα αεροδρόμια της Ελλάδας αξιοποιεί ένα εγνωσμένης αξίας σύστημα υπολογιστικής προσομοίωσης των εκπομπών αέριων ρύπων από τις αερολιμενικές δραστηριότητες και των συγκεντρώσεων που προκαλεί η διασπορά τους στην επηρεαζόμενη περιοχή. Το σύστημα αυτό, που παρουσιάζεται αναλυτικότερα στο επόμενο κεφάλαιο, είναι το EDMS και αποτελεί το προτεινόμενο από την US EPA μοντέλο κανονιστικής χρήσης, δηλαδή ελέγχου συμμόρφωσης υφιστάμενων ή σχεδιαζόμενων αεροδρομίων με τα ισχύοντα όρια ποιότητας αέρα. Πρόκειται επομένως για ένα εξειδικευμένο μοντέλο, που σχεδιάστηκε για χρήση σε περιπτώσεις αεροδρομίων, και το οποίο ενσωματώνει δύο αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά. Πρώτον, ως προς τον υπολογισμό των εκπομπών, το EDMS αξιοποιεί τη βάση δεδομένων των εκπομπών από κάθε κινητήρα αεροσκαφών που καταχωρείται στον ICAO, μαζί με λεπτομερείς προσεγγίσεις του χρόνου και της έντασης λειτουργίας των κινητήρων στις διάφορες φάσεις του LTO. Δεύτερον, ως προς τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων, το EDMS χρησιμοποιεί ένα καθιερωμένο μοντέλο διασποράς, το AERMOD, το οποίο συνδυάζει ισορροπημένα φυσικές προσεγγίσεις με στοχαστικές εκτιμήσεις και έχει δοκιμαστεί σε σημαντικό εύρος περιπτώσεων με καλά αποτελέσματα.

Η ιδιαιτερότητα της προσέγγισης που υιοθετεί η παρούσα εργασία είναι η εφαρμογή του EDMS με τον ρεαλιστικότερο δυνατό τρόπο, δηλαδή με πραγματικά μετεωρολογικά στοιχεία ωριαίας συχνότητας, με πραγματικό μίγμα αεροσκαφών και με πραγματικές χρονικές κατανομές των κινήσεών τους. Επιπλέον, αυτό το καθαρά υπολογιστικό σκέλος που αφορά και στα τρία αεροδρόμια, συμπληρώνεται με άλλα δύο σκέλη που επεκτείνουν την εμβέλεια της παρούσας εργασίας πέρα από τις εκτιμήσεις ατμοσφαιρικής ρύπανσης γύρω από αεροδρόμια και τις αξιολογήσεις της ποιότητας αέρα στις επηρεαζόμενες περιοχές.

Το πρώτο πρόσθετο σκέλος είναι η αντιπαραβολή που επιχειρείται μεταξύ υπολογιστικών εκτιμήσεων και μετρήσεων, εκεί όπου είναι δυνατόν, δηλαδή μόνο στην περίπτωση του ΔΑΑ. Αυτή η περίπτωση ωστόσο, χαρακτηρίζεται από επαρκές πλήθος στοιχείων πεδίου (τέσσερις σταθμοί με ωριαίες καταγραφές για το μεγαλύτερο μέρος του έτους αναφοράς) ώστε η αντιπαραβολή τους με τα υπολογιστικά αποτελέσματα να καταλήξει σε ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Επισημαίνεται πάντως ότι το συγκεκριμένο σκέλος δεν αλλάζει το χαρακτήρα της μεθόδου από καθαρά υπολογιστική προσέγγιση σε συνδυαστική χρήση υπολογισμών-μετρήσεων, όπως αυτές που παρουσιάστηκαν στις ενότητες 13.2.1.2 και 13.2.1.3, δεδομένου ότι οι μετρήσεις συγκεντρώσεων δεν χρησιμοποιήθηκαν για την αλλαγή των αποτελεσμάτων των υπολογισμών, παρά μόνο για τον έλεγχό τους.

Το δεύτερο πρόσθετο σκέλος είναι η ανάλυση ευαισθησίας του EDMS, που εφαρμόστηκε στο σύνολο του συστήματος, προκειμένου να εξετασθεί η απόκρισή του υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες εισόδου. Συγκεκριμένα, κρατώντας ως βάση το πραγματικό υπόβαθρο του ΔΑΑ, και εισάγοντας ένα ρεαλιστικό σενάριο πτήσεων, ζητήθηκε από το EDMS να υπολογίσει τις συγκεντρώσεις, τόσο σε ολόκληρη την περιοχή επιρροής όσο και σε συγκεκριμένα σημεία, υπό μεταβαλλόμενες τιμές μιας σημαντικής παραμέτρου, ενώ όλες οι άλλες διατηρούνταν σταθερές. Με τον τρόπο αυτό εξήχθησαν δύο είδη συμπερασμάτων: το πρώτο αφορά την απόκριση του μοντέλου υπό διαφορετικές συνθήκες εισόδου, όπως προαναφέρθηκε· επομένως αυτό το είδος συμπερασμάτων αφορά κυρίως στις προσομοιώσεις και την αξιοπιστία του. Το δεύτερο όμως είδος συμπερασμάτων αφορά και στις πραγματικές καταστάσεις, δείχνοντας για παράδειγμα ότι η κάθετη κυκλοφορία στο επιφανειακό οριακό στρώμα, η οποία παρότι είναι έντονη στα μεσογειακά γεωγραφικά πλάτη σπανίως γίνεται αισθητή, προκαλεί εξίσου σημαντική ανάμιξη με την οριζόντια κυκλοφορία που γίνεται αισθητή ως άνεμος, και η ανάμιξη αυτή αραιώνει γρήγορα τις εκπομπές ρύπων στην ατμόσφαιρα, διατηρώντας χαμηλά τις συγκεντρώσεις τους στη διάρκεια των περισσότερων ωρών της ημέρας, ιδιαίτερα κατά τη θερινή περίοδο.

4. Το σύστημα EDMS

Το βασικό εργαλείο της εργασίας αυτής, το EDMS (Emissions and Dispersion Modeling System) είναι ένα σύστημα συνδυασμένων μοντέλων εκπομπών και συγκεντρώσεων για την εκτίμηση και αξιολόγηση των επιπτώσεων στην ποιότητα του αέρα από τη λειτουργία αεροδρομίων. Το σύστημα αναπτύχθηκε για την FFA, την Ομοσπονδιακή Αρχή Πολιτικής Αεροπορίας των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής, σε συνεργασία με την Πολεμική Αεροπορία των ΗΠΑ.

Με ιστορία τριών δεκαετιών, στη διάρκεια των οποίων αναπτύχθηκαν πέντε εκδόσεις του, το EDMS αποτελεί το πρότυπο σύστημα υπολογιστικής προσομοίωσης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης γύρω από υπάρχοντα ή σχεδιαζόμενα αεροδρόμια. Στο Παράρτημα Δ (κεφ. 14) παρουσιάζονται τα βασικά συστατικά και η δομή του EDMS, η οποία αντιστοιχεί στην αρχιτεκτονική που είναι συνήθης στα πολυεπίπεδα συστήματα προσομοιώσεων. Στην ενότητα 14.1 παρουσιάζεται η μέθοδος υπολογισμού εκπομπών από αεροσκάφη, η οποία βασίζεται σε μια αναλυτικότερη της συνήθους θεώρηση του κύκλου προσγείωσης-απογείωσης, καθώς και στη δυναμική προσομοίωση κάθε τμήματος κίνησης του αεροσκάφους στην περιοχή του αεροδρομίου. Για τα αριθμητικά αποτελέσματα χρησιμοποιούνται οι συντελεστές εκπομπών του ICAO, οι οποίοι αντλούνται από τη βάση δεδομένων που διαχειρίζεται το EUROCONTROL. Στην ενότητα 14.2 του Παραρτήματος Δ παρουσιάζεται η μέθοδος υπολογισμού των συγκεντρώσεων, η οποία βασίζεται στο AERMOD. Οι βασικές ιδιότητες του συγκεκριμένου μοντέλου διασποράς και η μαθηματική του θεμελίωση, μαζί με τα συνοδά μοντέλα τοπικής μετεωρολογίας και μορφολογίας του εδάφους, παρατίθενται στην εν λόγω ενότητα με βάση τα στοιχεία που έχουν καταγραφεί στα εγχειρίδια της EPA. Το συμπέρασμα της μελέτης των στοιχείων αυτών είναι ότι η υλοποίηση του AERMOD μέσα στο EDMS έχει τη δυνατότητα να αποδώσει αρκετά ρεαλιστικά αποτελέσματα αέριας ρύπανσης εάν τροφοδοτηθεί από επαρκώς λεπτομερή στοιχεία εκπομπών, μετεωρολογίας και εδάφους.

5. Υπολογιστικός προσδιορισμός εκπομπών και συγκεντρώσεων στους τρεις μεγαλύτερους αερολιμένες της Ελλάδας

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν με το EDMS για τα τρία αεροδρόμια της Ελλάδας που παρουσιάζουν την υψηλότερη κυκλοφορία, μαζί με τα αντίστοιχα δεδομένα εισόδου και τις σχετικές παραδοχές. Στόχος του κεφαλαίου είναι η ποσοτικοποίηση των εκπομπών και των συγκεντρώσεων αέριων ρύπων στα αεροδρόμια της χώρας που παρουσιάζονται οι υψηλότερες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις, ώστε να διαμορφωθεί τελικώς μια συμπερασματολογία που να αφορά τις δυσμενέστερες πιθανές καταστάσεις εκπομπών και συγκεντρώσεων, η οποία θα είναι χρήσιμη άμεσα για τις υπό μελέτη περιπτώσεις και έμμεσα για όλα τα άλλα αεροδρόμια, στα οποία ευλόγως θα αναμένονται μικρότερες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις.

Στην πορεία του κεφαλαίου, περιγράφονται λεπτομερώς τα δεδομένα εισόδου, οι διαφορές ως προς την αναλυτικότητά τους, η επίδραση των διαφορών αυτών στα αποτελέσματα, καθώς και οι παραδοχές που χρειάστηκε να γίνουν και ο βαθμός ρεαλισμού τους. Στο παραπάνω πλαίσιο, υπολογίζονται:

- α) Οι εκπομπές, σε ετήσια βάση, των βασικών αέριων ρύπων από τις αερομεταφορές (CO , NO_x , SO_x , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$) και των οργανικών ουσιών (THC, NMVOC).

β) Οι συγκεντρώσεις των παραπάνω βασικών αέριων ρύπων, για κάθε χρονική περίοδο που έχει τεθεί οριακή τιμή (π.χ. για ωριαία και εικοσιτετράωρη περίοδο στο SO₂ κ.ο.κ.).

Οι αερολιμένες που επελέγησαν προς μελέτη είναι:

- i. Ο Διεθνής Αερολιμένας Αθηνών «Ελευθέριος Βενιζέλος», ο οποίος αποτελεί το μεγαλύτερο (τόσο ως προς τις διαστάσεις όσο και ως προς τις κινήσεις) αεροδρόμιο της χώρας.
- ii. Ο Αερολιμένας Θεσσαλονίκης «Μακεδονία», δεύτερο κατά σειρά αεροδρόμιο της χώρας ως προς τις κινήσεις, το οποίο εξυπηρετεί μεγάλο μέρος της Βόρειας Ελλάδας.
- iii. Ο Αερολιμένας Ηρακλείου «Νίκος Καζαντζάκης», τρίτος από άποψη κυκλοφορίας, η οποία χαρακτηρίζεται από έντονη εποχιακή διακύμανση και με θέση που βρίσκεται σε επαφή με αστικές εκτάσεις, εγείροντας επιτακτικά περιβαλλοντικά ζητήματα.

5.1. Συνθήκες αναφοράς

Οι συνθήκες λειτουργίας ενός αερολιμένα και συγκεκριμένα ο ετήσιος αριθμός αεροπορικών κινήσεων και η τοπική μετεωρολογία παρουσιάζουν διακυμάνσεις από έτος σε έτος.

Γνωρίζοντας τις συνθήκες που επικρατούσαν στα έτη του πρόσφατου παρελθόντος, θα ήταν εφικτό να υπολογιστούν εκπομπές και συγκεντρώσεις για τις περιόδους εκείνες, αλλά μια τέτοια «προς τα πίσω» θεώρηση θα είχε αμφίβολη χρησιμότητα, αν δεν μπορούσε να οδηγήσει σε συμπεράσματα για τις «προς τα εμπρός» καταστάσεις. Έτσι, αυτό που αναζητείται ως χρήσιμο στην περιβαλλοντική θεώρηση ενός αερολιμένα, είναι μια κατάσταση αντιπροσωπευτική των διαχρονικών συνθηκών, ένα «σενάριο αναφοράς», στο οποίο θα αντιπροσωπεύονται όχι μόνο η παρούσα κατάσταση ή τα δεδομένα του παρελθόντος, αλλά κυρίως οι ευλόγως αναμενόμενες μελλοντικές συνθήκες.

Με τον τρόπο αυτό, τα αποτελέσματα των υπολογισμών θα μπορούν να αποτελέσουν βάση για την πρόβλεψη και εκ των προτέρων διαχείριση των όποιων περιβαλλοντικών ζητημάτων προκύψουν κατά την εφεξής λειτουργία ενός αερολιμένα. Συγχρόνως, το σενάριο αναφοράς θα πρέπει να ενσωματώνει τις αρχές της προφύλαξης και της προληπτικής δράσης,^[1] με την επιλογή παραμέτρων που κλίνουν προς την πλευρά των δυσμενών συνθηκών, ώστε τα αποτελέσματα, καθώς και τα μέτρα στα οποία ενδέχεται να οδηγήσουν, να εμπεριέχουν ένα περιθώριο ασφάλειας και σε κάθε περίπτωση να έχουν τη δυνατότητα να προλάβουν τις συνέπειες μιας δυσμενέστερης του μέσου όρου κατάστασης.

5.1.1. Ετήσιος αριθμός κινήσεων

Στο πλαίσιο αυτό, για τη διαμόρφωση του πρώτου σκέλους του σεναρίου αναφοράς, δηλαδή του κατάλληλου ετήσιου αριθμού κινήσεων, είναι απαραίτητη μια αναδρομή στις καταγραφές της αεροπορικής κυκλοφορίας, όπως παρουσιάστηκαν στην ενότητα 11.6.2 (σελ. 322 κ.ε.). Σύμφωνα με τα στοιχεία αυτά, ο αριθμός των αεροπορικών κινήσεων παρουσίασε μια σαφή αυξητική τάση από το 1991 έως το 2009, ενώ κατόπιν η πορεία αντιστράφηκε, με διαρκώς μειούμενες πτήσεις τόσο εσωτερικού όσο και εξωτερικού, για να αυξηθεί και πάλι από το 2014 ως το 2018-2019. Στη συνέχεια η πανδημία μείωσε δραματικά για δύο χρόνια τις πτήσεις, που πάντως ανέκαμψαν θεαματικά το 2022 και 2023.

Όπως δείχνουν οι παγκόσμιες αναλύσεις και με δεδομένο ότι ο τομέας των αερομεταφορών είναι έντονα διεθνοποιημένος με αποτέλεσμα να επηρεάζεται σημαντικότερα από τις εξελίξεις στο εξωτερικό εν σχέση με αυτές στο εσωτερικό περιβάλλον της χώρας, η γενική κατεύθυνση των αερομεταφορών είναι αυξητική. Η τάση αυτή είναι στατιστικού χαρακτήρα: χωρίς να μπορεί να προβλεφθεί με βεβαιότητα ότι κάθε επόμενο έτος θα παρουσιάζει αεροπορική κυκλοφορία μεγαλύτερη του προηγούμενου, μπορεί με μεγάλη πιθανότητα να εκτιμηθεί ότι η μακροχρόνια τάση στους αριθμούς εξυπηρετούμενων σκαφών και επιβατών θα είναι αυξητική. Αυτή η τάση μπορεί να ενσωματωθεί στους υπολογισμούς αέριας ρύπανσης με δύο τρόπους: είτε θεωρώντας ένα σταθερό μέγεθος ετήσιας κυκλοφορίας, που αντιπροσωπεύει ένα επίπεδο κοντά στα μέγιστα μεγέθη της στατιστικής κατανομής, είτε χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση προεκβολής για τον υπολογισμό του πιθανότερου φόρτου σε ένα μελλοντικό έτος. Σταθμίζοντας το γεγονός ότι τα μελλοντικά μεγέθη εναέριας κυκλοφορίας δεν εξαρτώνται από τα αντίστοιχα μεγέθη του παρελθόντος αλλά κυρίως από εξωγενείς παράγοντες, διαφαίνεται ότι η θεώρηση μιας σταθερής αεροπορικής κυκλοφορίας, κοντά στα μέγιστα αναμενόμενα μεγέθη, εξυπηρετεί καλύτερα το σκοπό της εργασίας, υπό το «κόστος» βέβαια κάποιας υπερ- ή υπό-εκτίμησης στις εκπομπές και συνεπακόλουθα στις συγκεντρώσεις.

Δεδομένου επιπλέον ότι, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 11.6.2 (σελ. 322 και εξής), το έτος 2009 καταγράφηκαν στο καθένα από τα υπό μελέτη αεροδρόμια, ιδιαίτερα υψηλές τιμές ετήσιων κινήσεων αεροσκαφών, και μάλιστα με αρκετή διαφορά από τα περισσότερα άλλα έτη, συνάγεται ότι το επίπεδο αεροπορικής κυκλοφορίας του έτους αυτού μπορεί να θεωρηθεί ως ο κατάλληλος ετήσιος αριθμός αεροπορικών κινήσεων για το σενάριο αναφοράς.

5.1.2. Μετεωρολογικές συνθήκες αναφοράς

Η μετεωρολογία αποτελεί διαφορετική περίπτωση. Εάν χρειάζεται να προσδιοριστούν οι στατιστικές ιδιότητες που χαρακτηρίζουν το κλίμα ή την ανεμολογία μιας περιοχής, τότε είναι απαραίτητη η επεξεργασία μιας κατά το δυνατόν μακράς σειράς μετρήσεων. Οι στατιστικές αυτές ιδιότητες αφορούν μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις των μετεωρολογικών παραμέτρων, που εξάγονται από έντονα διακυμαινόμενες ωριαίες τιμές. Όμως, οι μέσες τιμές έχουν μικρή μόνο χρησιμότητα σε ότι αφορά τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων αέριων ρύπων, για τρεις λόγους.

Πρώτον, εάν χρησιμοποιηθούν ως ιδιότητες της αντιπροσωπευτικής κατάστασης, οδηγούν σε αποτελέσματα συγκεντρώσεων που να μην έχουν αυξημένη πιθανότητα εμφάνισης αλλά απέχουν από τα δυσμενέστερα δυνατά και επομένως δεν μπορούν να θεωρηθούν κατάλληλα για την εφαρμογή των αρχών της προφύλαξης και της προληπτικής δράσης. Με δυο λόγια τα μέσα στατιστικά μεγέθη της μετεωρολογίας, όταν χρησιμοποιούνται σε υπολογισμούς συγκεντρώσεων «εξωραΐζουν» την κατάσταση, αν και με έναν ιδιαίτερα ευλογοφανή τρόπο.

Δεύτερον, τέτοια αποτελέσματα δεν είναι χρήσιμα για συγκρίσεις με τα όρια, τα οποία έχουν θεσπιστεί στην πλειονότητά τους αναφερόμενα σε ωριαίες, οκτάωρες ή εικοσιτετράωρες τιμές,* προκειμένου να περιορίσουν την εμφάνιση επικίνδυνων για τη δημόσια υγεία επιπέδων συγκέντρωσης, τα οποία αναμένονται υπό συγκεκριμένες, δυσμενείς μετεωρολογικές συνθήκες, οι οποίες περιλαμβάνουν χαμηλή ταχύτητα ανέμου, κατεύθυνσή του από την πηγή προς τις οικιστικές περιοχές και επιφανειακό ατμοσφαιρικό στρώμα με σταθεροποιημένη δομή. Από την άλλη μεριά, η μέση ετήσια τιμή μιας μετεωρολογικής παραμέτρου π.χ. της ταχύτητας του ανέμου είναι ένα θεωρητικό μέγεθος, αντιπροσωπευτικό ολόκληρου του φάσματος ωριαίων ταχυτήτων που μετρήθηκαν σε ένα έτος, που δεν είναι ιδιαίτερα αντιπροσωπευτικό των ταχυτήτων που επικρατούν σε συγκεκριμένες, δυσμενείς για την αραίωση των ρύπων, ώρες. Με δυο λόγια, οι υπολογισμοί των δυσμενών ωριαίων συγκεντρώσεων χρειάζονται τις αντίστοιχες, κατά το δυνατόν πραγματικές, ωριαίες μετεωρολογικές παραμέτρους.

Τρίτον, από στατιστικής πλευράς, εάν οι μέσες μετεωρολογικές τιμές εισαχθούν στους υπολογισμούς συγκεντρώσεων, δεν θα οδηγήσουν σε αποτελέσματα μέσων συγκεντρώσεων. Εάν υποθεθεί ότι η συγκέντρωση είναι μια συνάρτηση f μιας ή περισσότερων μετεωρολογικών παραμέτρων, τότε η μέση συγκέντρωση \bar{C} δεν είναι συνάρτηση των μέσων

* Με την εξαίρεση του βενζολίου (C₆H₆) και των λεπτών αιωρούμενων σωματιδίων (PM_{2.5}), για τα οποία έχουν θεσμοθετηθεί με τις Οδηγίες 2000/69/EK και 2008/50 αντίστοιχα οριακές τιμές της μέσης ετήσιας συγκέντρωσής τους. Αναγνωρίζεται όμως στο σκεπτικό των Οδηγιών ότι αυτή η αντιμετώπιση είναι προσωρινή, προιδέάζοντας ότι όταν συλλεχθεί ικανή τεκμηρίωση, θα προωθηθούν όρια σε χρονικά λεπτομερέστερο επίπεδο.

τιμών των παραμέτρων αυτών. Αντίθετα, είναι ο εκ των υστέρων υπολογιζόμενος μέσος όρος των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την εφαρμογή της συνάρτησης στις χρονικά διακυμαινόμενες τιμές των μετεωρολογικών παραμέτρων.

Δηλαδή, αν $C = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$, τότε $\bar{C} \neq f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_k)$.

$$\text{Αντιθέτως, } \bar{C} = \bar{f}(x_1, x_2, \dots, x_k) = \frac{\sum_{i=1}^n f_i(x_1, x_2, \dots, x_k)}{n}.$$

Με δυο λόγια, οι συγκεντρώσεις που υπολογίζονται βάσει των μέσων ετήσιων μετεωρολογικών παραμέτρων δεν είναι μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις. Αντιστοιχούν σε μια θεωρητική ημέρα ή ώρα, κατά την οποία οι επικρατούσες συνθήκες θα ήταν ίσες με τις μέσες τιμές. Αντιθέτως, για τον υπολογισμό μέσων ετησίων συγκεντρώσεων απαιτείται ο υπολογισμός των ωριαίων συγκεντρώσεων και κατόπιν η εξαγωγή του μέσου όρου τους.

Συνάγεται επομένως ότι, για τη διεξαγωγή υπολογισμών συγκεντρώσεων, των οποίων τα αποτελέσματα να είναι χρήσιμα για τη χάραξη περιβαλλοντικής πολιτικής στην περιοχή ενός αερολιμένα, χρειάζεται να εντοπισθεί ένα σύνολο μετεωρολογικών παραμέτρων που να μπορεί να εκληφθεί ως *ευλόγως αναμενόμενο δυσμενές σενάριο*, συγκεντρώνοντας τα εξής χαρακτηριστικά:

- (α) να είναι αντιπροσωπευτικό της περιοχής, π.χ. να αφορά σε καταστάσεις που εμφανίζονται – συχνά ή όχι – στην περιοχή, και επομένως να μην είναι απλώς ένα τεχνητά κατασκευασμένο σύνολο μετεωρολογικών παραμέτρων δυσμενών για τη διασπορά,
- (β) να χαρακτηρίζει καταστάσεις αυξημένης συγκέντρωσης, ή ισοδύναμα περιορισμένης διασποράς και αραίωσης, ώστε να είναι αντιπροσωπευτικό δυσμενών περιπτώσεων.

5.1.3. Διαμόρφωση μεθοδολογίας υπολογισμών

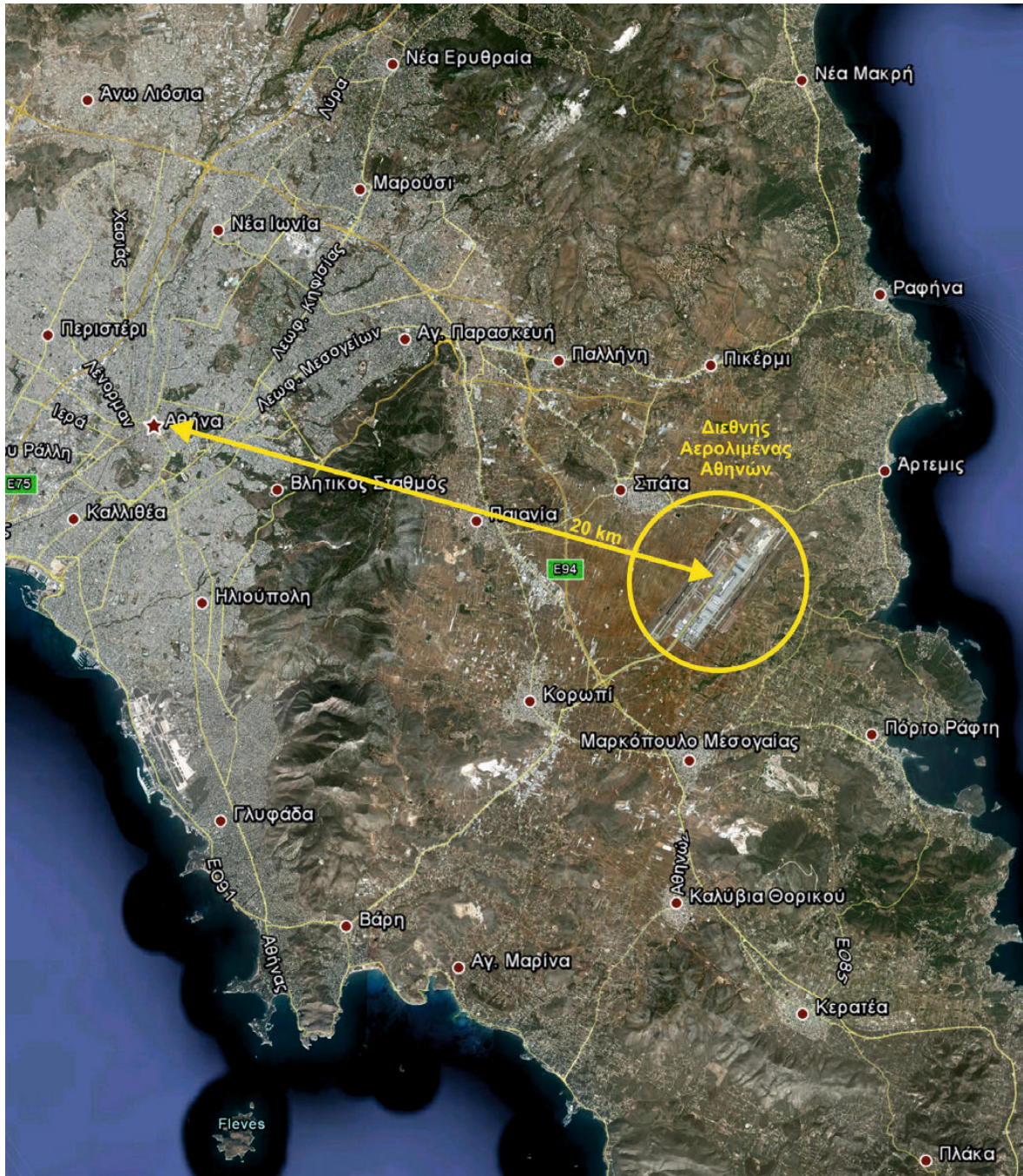
Με βάση τις παραπάνω παραδοχές και θεωρήσεις, και έχοντας υπόψη τις δυνατότητες που δίνονται από το λογισμικό και τα μετεωρολογικά δεδομένα, διαμορφώθηκε ως βέλτιστη η εξής προσέγγιση:

- i. Υπολογισμός των εκπομπών για κάθε ώρα ενός πραγματικού έτους.
- ii. Υπολογισμός των αντίστοιχων συγκεντρώσεων, πάλι για κάθε ώρα ενός πραγματικού έτους. Αυτό σημαίνει ότι στους υπολογισμούς, αντί στατιστικών τιμών, χρησιμοποιούνται τα πραγματικά μετεωρολογικά δεδομένα.

- iii. Αναζήτηση, μεταξύ των αποτελεσμάτων, εκείνων των τιμών συγκέντρωσης που να σηματοδοτούν υπερβάσεις ορίων ή ανησυχητικές προσεγγίσεις προς αυτά.
- iv. Ανάλυση των λόγων που οδηγούν στις αυξημένες αυτές συγκεντρώσεις και διαπίστωση του εάν πρόκειται για ασυνήθιστους συνδυασμούς μετεωρολογίας και κινήσεων (επομένως δεν είναι πιθανή η συχνή επανεμφάνισή τους) ή για συνήθεις καταστάσεις, οπότε και ανακύπτει η ανάγκη λήψης μέτρων για τη μείωση των συγκεντρώσεων.

5.2. Διεθνής Αερολιμένας Αθηνών

Ο Διεθνής Αερολιμένας Αθηνών «Ελευθέριος Βενιζέλος» (ΔΑΑ) βρίσκεται ~20 km ανατολικά του κέντρου της Αθήνας.



Σχήμα 1: Η θέση του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών σε σχέση με το κέντρο της πόλης.

Η σημαντική αυτή απόσταση, αλλά και η μεσολάβηση του Υμηττού, ελαχιστοποιεί την όποια επίδραση της λειτουργίας του αερολιμένα στην ποιότητα του αέρα του λεκανοπεδίου. Γύρω

όμως από το ΔΑΑ υπάρχουν αρκετοί οικισμοί, και μάλιστα με αυξανόμενη έκταση και πληθυσμό την τελευταία δεκαετία, που ενδέχεται να επηρεάζονται αρκετά ως προς την ποιότητα του αέρα.

Ο Διεθνής Αερολιμένας Αθηνών ξεκίνησε τη λειτουργία του στις 29 Μαρτίου 2001, αντικαθιστώντας το αεροδρόμιο του Ελληνικού, το οποίο εξυπηρετούσε για έξι δεκαετίες την Αθήνα. Κατασκευασμένος σε κεντρικό σημείο της τότε σχετικής αραιοκατοικημένης Ανατολικής Αττικής, ο ΔΑΑ μαζί με την Αττική Οδό αποτέλεσαν δύο έργα που άλλαξαν με ταχείς ρυθμούς την πληθυσμιακή κατανομή και την πολεοδομική εικόνα στην ευρύτερη περιοχή των Μεσογείων.

Με μέσα ετήσια μεγέθη που περιλαμβάνουν εξυπηρετούμενο αριθμό επιβατών γύρω στα 16 εκατομμύρια, εμπορευματική κίνηση 80-90 χιλιάδων τόνων και κινήσεις αεροσκαφών γύρω στις 200 χιλιάδες,^[2-11] ο ΔΑΑ αποτελεί τον μακράν μεγαλύτερο αερολιμένα της Ελλάδας, στον οποίο εξυπηρετείται περίπου το 40% των 40 εκατομμυρίων επιβατών όλων των ελληνικών αεροδρομίων· επιπλέον, θεωρείται ένας από τους σημαντικότερους αερολιμενικούς κόμβους στη νοτιοανατολική Μεσόγειο.

Λόγω των χαρακτηριστικών αυτών, ο ρόλος του ΔΑΑ στις ατμοσφαιρικές επιπτώσεις των αερομεταφορών είναι καθοριστικός. Η πρώτη εκτίμηση των (μελλοντικών τότε) περιβαλλοντικών επιπτώσεων του έργου του διεθνούς αεροδρομίου Σπάτων, διεξήχθη το 1992, με τη μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων που αργότερα ενσωματώθηκε στους περιβαλλοντικούς όρους του ν. 2338/1995.^[12] Από την έναρξη λειτουργίας του νέου αερολιμένα και εξής, το καλά οργανωμένο και δραστήριο Τμήμα Περιβάλλοντος της εταιρείας του ΔΑΑ δημοσιεύει κάθε εξάμηνο περιβαλλοντικές εκθέσεις, στις οποίες περιλαμβάνονται τα αποτελέσματα μετρήσεων ποιότητας αέρα από το δίκτυο πέντε σταθμών που έχουν εγκατασταθεί σε χαρακτηριστικά σημεία της περιοχής των Μεσογείων.

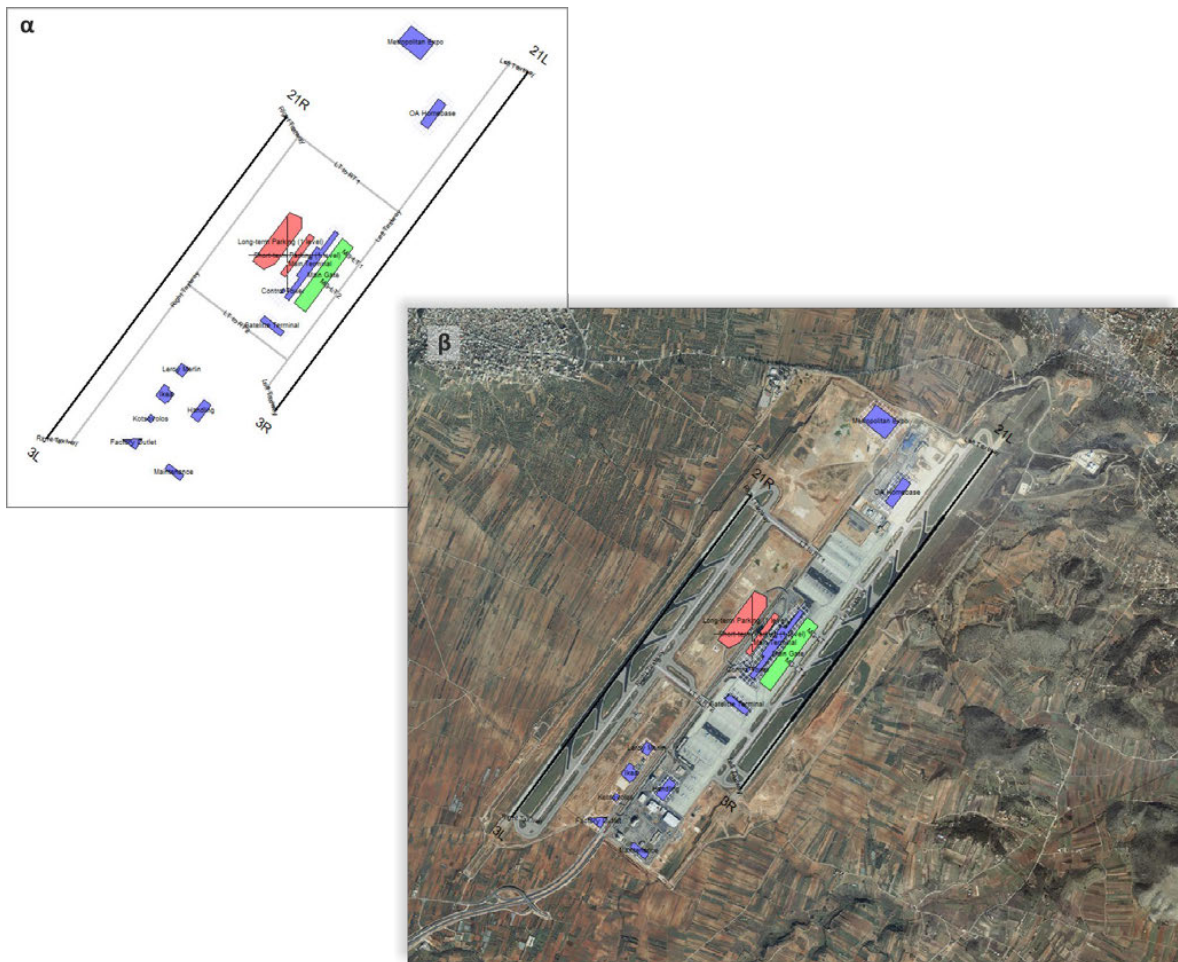
5.2.1. Διάταξη

Τα βασικά στοιχεία της γεωμετρίας του ΔΑΑ είναι:

- Οι δύο ανεξάρτητοι διάδρομοι αεροσκαφών, ο δεξιός 03R-21L με μήκος 4.000 m και ο αριστερός 03L-21R με μήκος 3.800 m.
- Οι δύο βασικοί τροχόδρομοι, παράλληλοι στους παραπάνω διαδρόμους, και το δίκτυο τροχοδρόμησης των αεροσκαφών μεταξύ πυλών, δαπέδων και διαδρόμων.
- Ο κεντρικός αεροσταθμός (main terminal), μήκους 800 m και πλάτους 40 – 80 m, με δεκατέσσερις θέσεις συναρμογής αεροσκαφών.

- Ο δευτερεύων αεροσταθμός (satellite terminal), μήκους 230 m και πλάτους 40 m, με δέκα θέσεις συναρμογής αεροσκαφών.
- Η βασική πύλη των αεροσκαφών, η οποία αποτελείται από την έκταση μπροστά από τον κεντρικό αεροσταθμό, όπου πραγματοποιείται η πλειονότητα των επίγειων διαδικασιών πριν από την αναχώρηση και μετά την άφιξη των σκαφών.
- Οι υπαίθριοι χώροι στάθμευσης μεγάλης και μικρής διάρκειας, χωρητικότητας 5.802 και 1.357 θέσεων αντίστοιχα.
- Η τεχνική βάση της Ολυμπιακής Αεροπορίας.
- Τα κτίρια επίγειας εξυπηρέτησης (handling) και συντήρησης υποδομών (maintenance).
- Το εμπορικό πάρκο στο νοτιοδυτικό άκρο της έκτασης του ΔΑΑ, στο οποίο έχουν εγκατασταθεί τέσσερα μεγάλα κτίρια καταστημάτων (IKEA, Factory Outlet, Leroy-Merlin και Κωτσόβολος).
- Το εκθεσιακό κέντρο Metropolitan Expo στο βορειοδυτικό άκρο της έκτασης του ΔΑΑ.

Η διάταξη των στοιχείων αυτών, όπως εισήχθησαν στο EDMS παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.

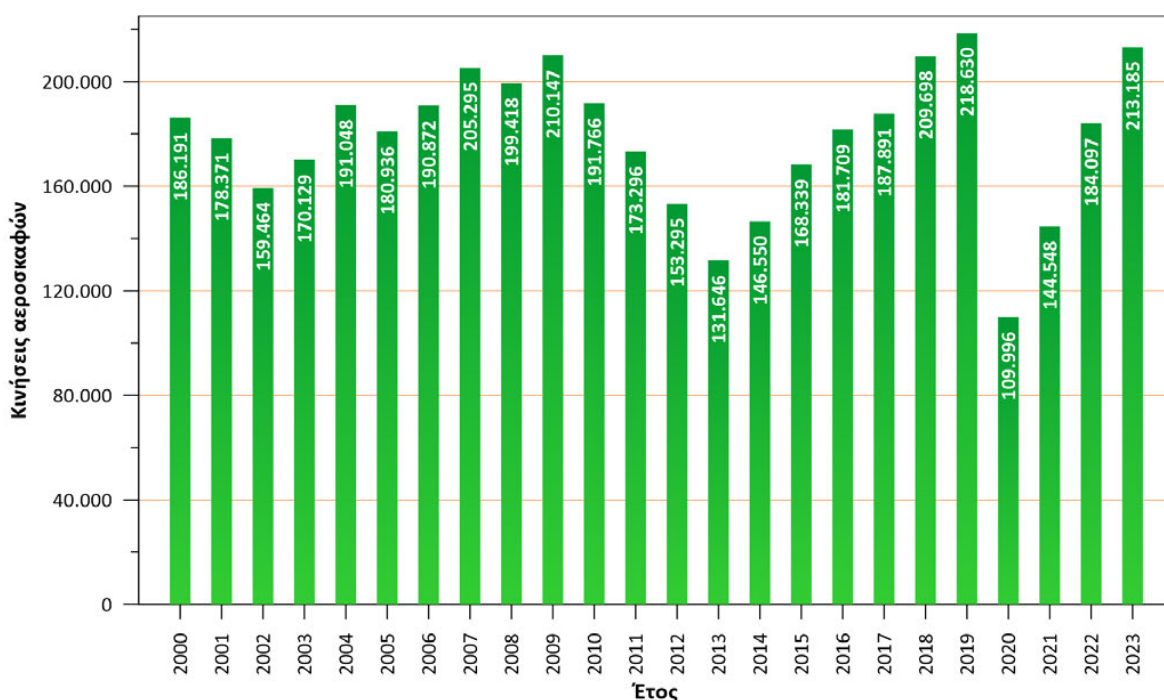


Σχήμα 2: Η διάταξη του ΔΑΑ εισηγμένη στο EDMS.

Στην επάνω αριστερά εικόνα (α) φαίνονται τα γεωμετρικά στοιχεία του ΔΑΑ που σχεδιάσθηκαν στο EDMS, ενώ στην κάτω δεξιά (β) έχει προστεθεί ως υπόβαθρο η αεροφωτογραφία του έργου από το Google Earth Plus. Με μαύρο χρώμα φαίνονται οι διάδρομοι, με γκρι οι τροχόδρομοι, με πράσινο η κύρια πύλη, με μπλε τα κτίρια και με ανοιχτό κόκκινο οι χώροι στάθμευσης. Ο χάρτης είναι προσανατολισμένος (βορράς προς τα πάνω).

5.2.2. Αεροπορική κυκλοφορία

Ο αριθμός των ετήσιων κινήσεων στον ΔΑΑ κυμαίνεται κοντά στο επίπεδο των 200.000, με αρκετές διακυμάνσεις, που εκδηλώθηκαν ως σαφή αυξητική τάση από το 2002 έως το 2009, έντονα πτωτική τάση μετά, και ανάκαμψη μετά, στη διάρκεια των δύο τελευταίων ετών. Η εξέλιξη του αριθμού ετήσιων κινήσεων στο ΔΑΑ από την έναρξη λειτουργίας του παρουσιάζεται στο επόμενο γράφημα, τα στοιχεία του οποίου αντλήθηκαν από τα δεδομένα που δημοσιεύει η εταιρεία λειτουργίας του αερολιμένα.^[13,14,3-11]



Γράφημα 1: Εξέλιξη του ετήσιου αριθμού αεροσκαφών που εξυπηρετούνται από τον ΔΑΑ.

Ένας αντιπροσωπευτικά υψηλός αριθμός κινήσεων καταγράφηκε το 2009· τα επόμενα έτη έως το 2013, η κρίση στην οικονομία μείωνε κάθε χρόνο σχεδόν κατά 20 χιλιάδες κινήσεις την αεροπορική κυκλοφορία, ενώ τα έτη 2014 και 2015 η τάση αντιστράφηκε και η κίνηση στον ΔΑΑ παρουσιάζει αυξητική τάση, υπολειπόμενη ωστόσο σημαντικά των μεγίστων που

παρατηρήθηκαν την τριετία 2007-2009. Μόλις το 2018-2019 επανήλθαν τα μεγέθη του 2009, για να μειωθούν δραματικά στη συνέχεια λόγω πανδημίας COVID-19 και να εκτιναχθούν το 2023 λίγο πάνω από το επίπεδο του 2009.

Στο πλαίσιο αυτό, μπορεί να θεωρηθεί ότι το επίπεδο του ετήσιου αριθμού κινήσεων του 2009, δηλαδή 210.000 κινήσεις ή 105.000 LTOs, αποτελεί ένα ρεαλιστικά υψηλό επίπεδο για τους υπολογισμούς ποιότητας αέρα γύρω από το ΔΑΑ.

5.2.3. Μίγμα αεροσκαφών

Το μερίδιο των κινήσεων ανά τύπο αεροσκάφους διαμορφώθηκε με βάση τα στοιχεία που δημοσιεύει ο ΔΑΑ^[3] και παρουσιάζεται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 2: Μίγμα αεροσκαφών στον ΔΑΑ κατά τη διάρκεια του 2009.

Τύπος αεροσκάφους	Μέγεθος και πρόωση	Αριθμός πτήσεων	Ποσοστό
Airbus 319	Μεγάλο αεριωθούμενο	14.080	6,7%
Airbus 320	Μεγάλο αεριωθούμενο	65.146	31,0%
Airbus 321	Μεγάλο αεριωθούμενο	31.312	14,9%
Airbus 330	Βαρύ αεριωθούμενο	5.254	2,5%
ATR 42-300	Μικρό ελικοφόρο	14.920	7,1%
ATR 72-500	Μεγάλο ελικοφόρο	7.775	3,7%
Anro RJ-100	Μεγάλο αεριωθούμενο	14.500	6,9%
Boeing 737-300	Μεγάλο αεριωθούμενο	5.464	2,6%
Boeing 737-400	Μεγάλο αεριωθούμενο	24.797	11,8%
Boeing 747-300	Βαρύ αεριωθούμενο	3.993	1,9%
Boeing 757	Μεγάλο αεριωθούμενο	5.254	2,5%
Boeing 767-300	Βαρύ αεριωθούμενο	5.254	2,5%
Bombardier Dash8-400	Μεγάλο ελικοφόρο	3.993	1,9%
McDonnell Douglas DC-9	Μεγάλο αεριωθούμενο	3.152	1,5%
McDonnell Douglas MD-81	Μεγάλο αεριωθούμενο	3.152	1,5%
Tupolev 154	Μεγάλο αεριωθούμενο	2.101	1,0%
Σύνολο		210.147	100,0%

5.2.4. Κατανομές κινήσεων

Ο βασικός παράγοντας που επηρεάζει τη χωρική κατανομή των αεροπορικών κινήσεων στους δύο διαδρόμους του ΔΑΑ – πέραν της εκάστοτε επικρατούσας κατεύθυνσης ανέμου – είναι η προσπάθεια περιορισμού των οχλήσεων από το θόρυβο των αεροσκαφών στους οικισμούς της Αρτέμιδας και της Ραφήνας.

Στο πλαίσιο αυτό, εφαρμόζονται διαδικασίες μείωσης θορύβου που αναφέρονται κυρίως σε:

- αποφυγή της χρήσης του ανατολικού διαδρόμου (03R) για απογειώσεις προς βορρά στη διάρκεια της νύχτας (23:00–07:00),

- αποφυγή της χρήσης του ανατολικού διαδρόμου (21L) για προσγειώσεις προς νότο στη διάρκεια της νύχτας (23:00–07:00),
- επιλεκτική χρήση διαδρόμων κατά τις απογευματινές ώρες (15:00–18:00).

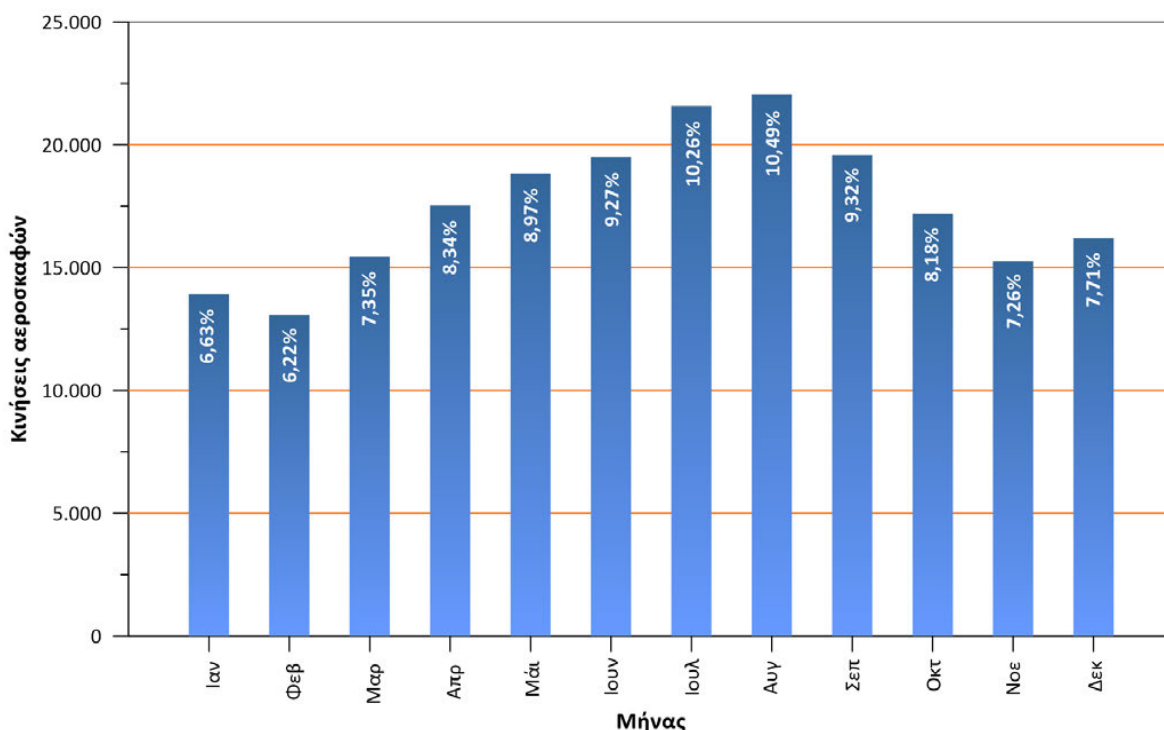
Για τα δύο παραπάνω χρονικά διαστήματα, συστήνεται επίσης η αποφυγή της αντίστροφης ώσης που χρησιμοποιείται ορισμένες φορές για την επιβράδυνση του σκάφους μετά την προσγείωση, ενώ ισχύουν επίσης οδηγίες για τα ίχνη των σκαφών που απογειώνονται.

Η εφαρμογή των διαδικασιών αυτών οδήγησε στα ακόλουθα αποτελέσματα κατά τη διάρκεια του 2009:^[15]

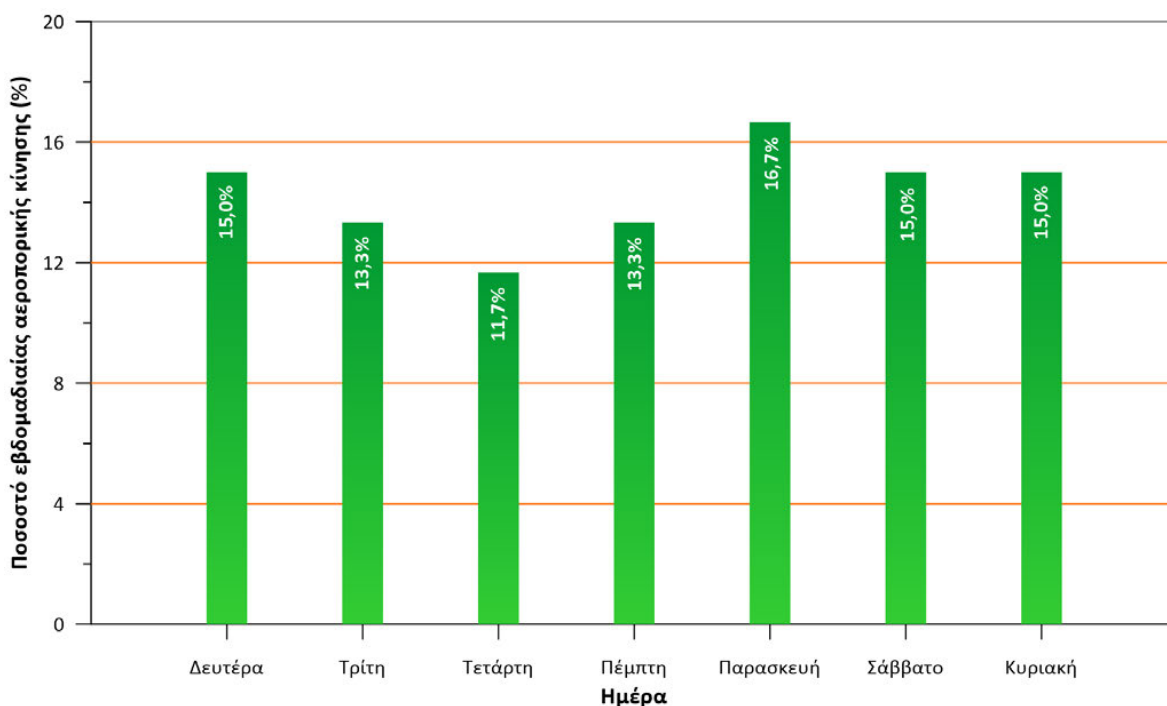
- ποσοστό απογειώσεων προς βορρά από 23:00 έως 07:00 από τον διάδρομο 03R: 6%
- ποσοστό προσγειώσεων προς νότο από 23:00 έως 07:00 από τον διάδρομο 21L:10%
- ποσοστό απογειώσεων προς βορρά από 15:00 έως 18:00 από τον διάδρομο 03R: 7%
- ποσοστό προσγειώσεων προς νότο από 15:00 έως 18:00 από τον διάδρομο 21L:3%.

Πέραν των περιορισμών αυτών, οι κινήσεις των αεροσκαφών κατανέμονται ισοδύναμα στους διαδρόμους.

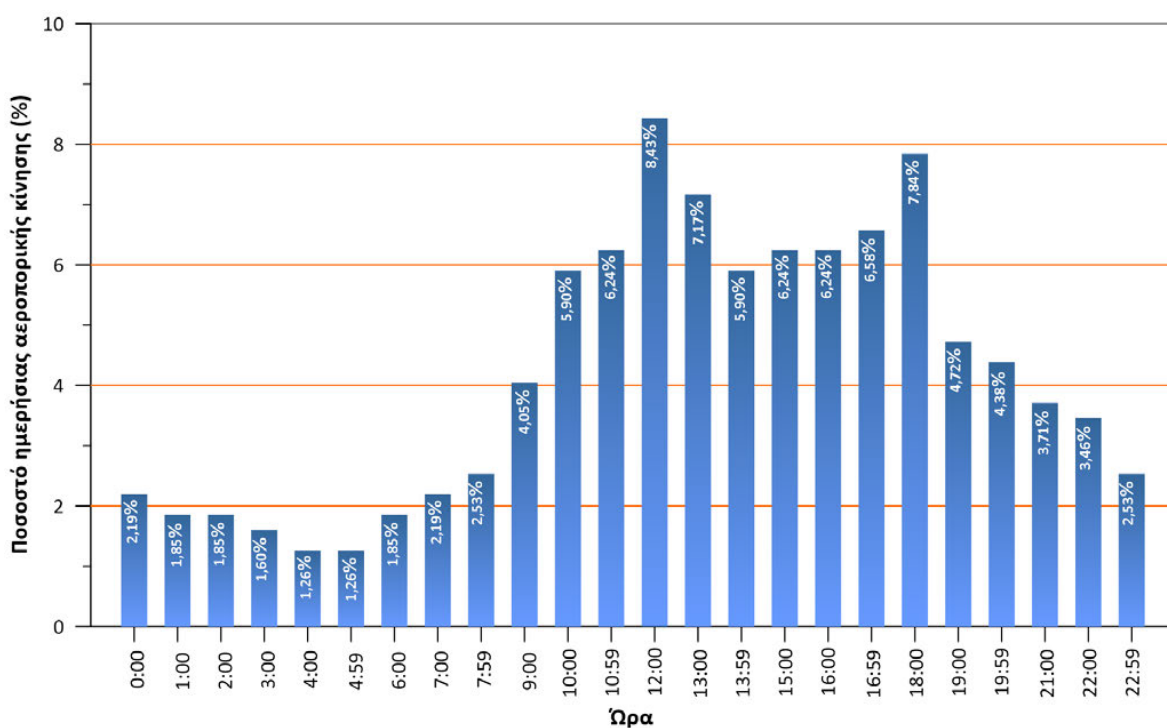
Χρονικά, οι κινήσεις σε μηνιαία, εβδομαδιαία και ημερήσια βάση, σύμφωνα με τα στοιχεία που δημοσιεύει ο ΔΑΑ,^[4] κατανέμονται με τον τρόπο που παρουσιάζεται στα επόμενα γραφήματα.



Γράφημα 2: Μηνιαία κατανομή των αεροπορικών κινήσεων στον ΔΑΑ.



Γράφημα 3: Εβδομαδιαία κατανομή των αεροπορικών κινήσεων στον ΔΑΑ.



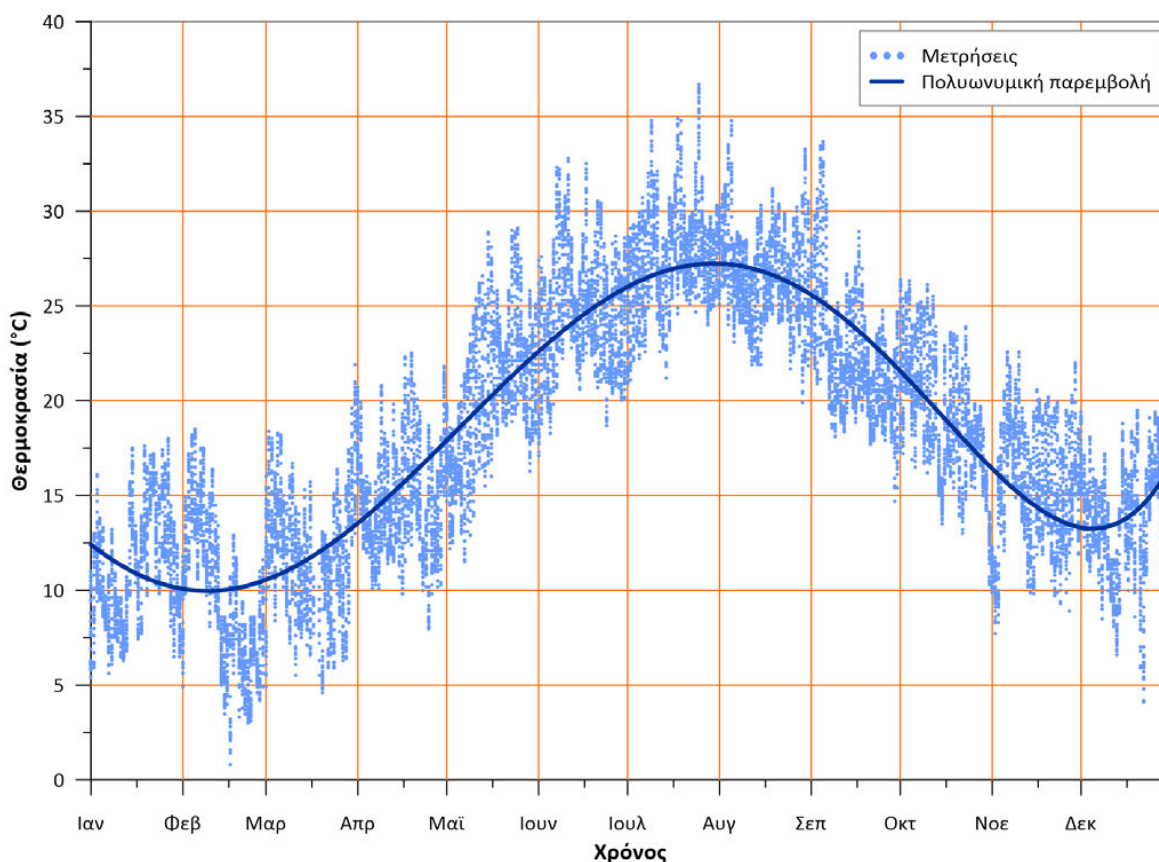
Γράφημα 4: Ημερήσια κατανομή των αεροπορικών κινήσεων στον ΔΑΑ.

5.2.5. Μετεωρολογία

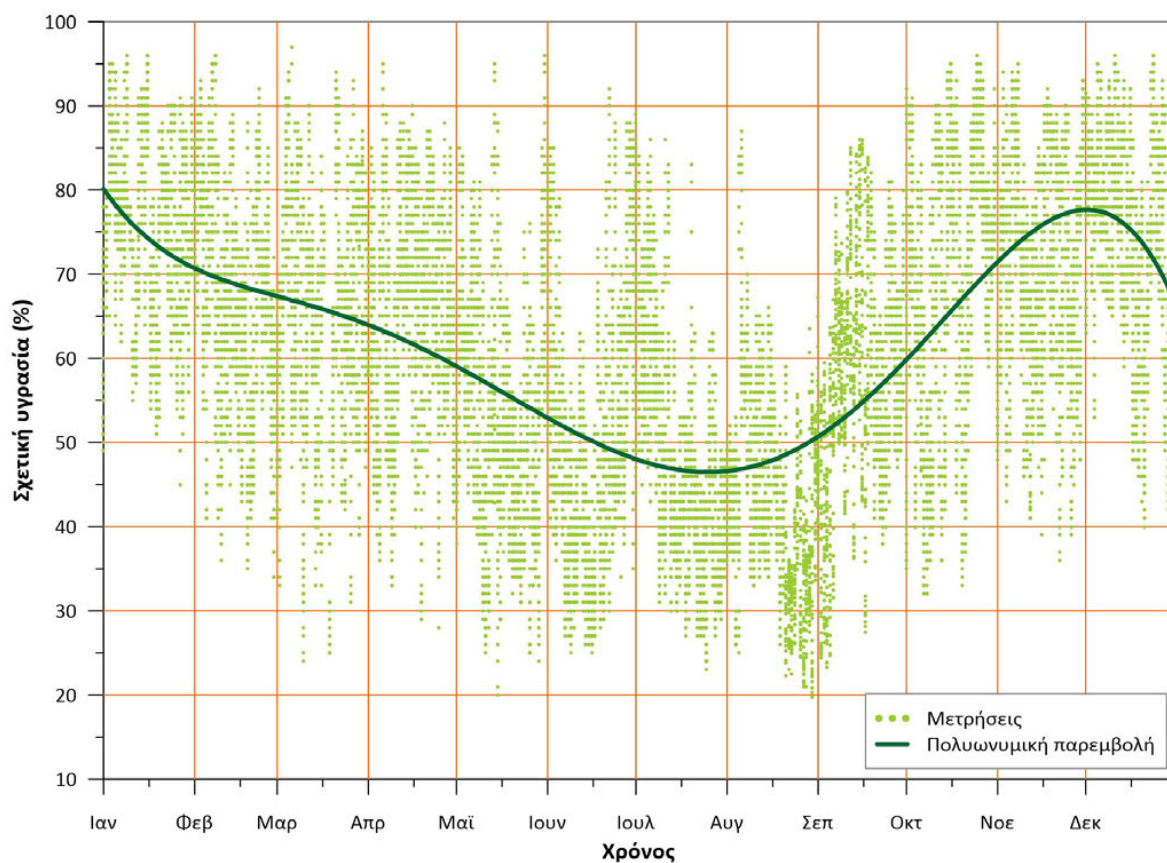
Τα επίγεια μετεωρολογικά στοιχεία που εισήχθησαν στο EDMS για τους υπολογισμούς εκπομπών και συγκεντρώσεων του ΔΑΑ, προήλθαν από το μετεωρολογικό σταθμό που λειτουργεί εντός του αερολιμένα. Οι αναλυτικές μετεωρολογικές καταγραφές του 2009 αποτελούνται από ωριαίες μετρήσεις των παραμέτρων ανέμου (διεύθυνση - ταχύτητα), της θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας και της ηλιακής ακτινοβολίας, οι οποίες χορηγήθηκαν από το Τμήμα Περιβάλλοντος του ΔΑΑ ειδικά για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας,^[16] ενώ σύνοψή τους δημοσιεύεται στις εξαμηνιαίες περιβαλλοντικές εκθέσεις και στα ετήσια δελτία φροντίδας περιβάλλοντος.^[15]

Η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία παρουσιάζονται στο γράφημα 5 και στο γράφημα 6 αντίστοιχα· η εξέλιξή τους στη διάρκεια του 2009 μπορεί να χαρακτηριστεί ως τυπική του μεσογειακού ξηρού κλίματος.

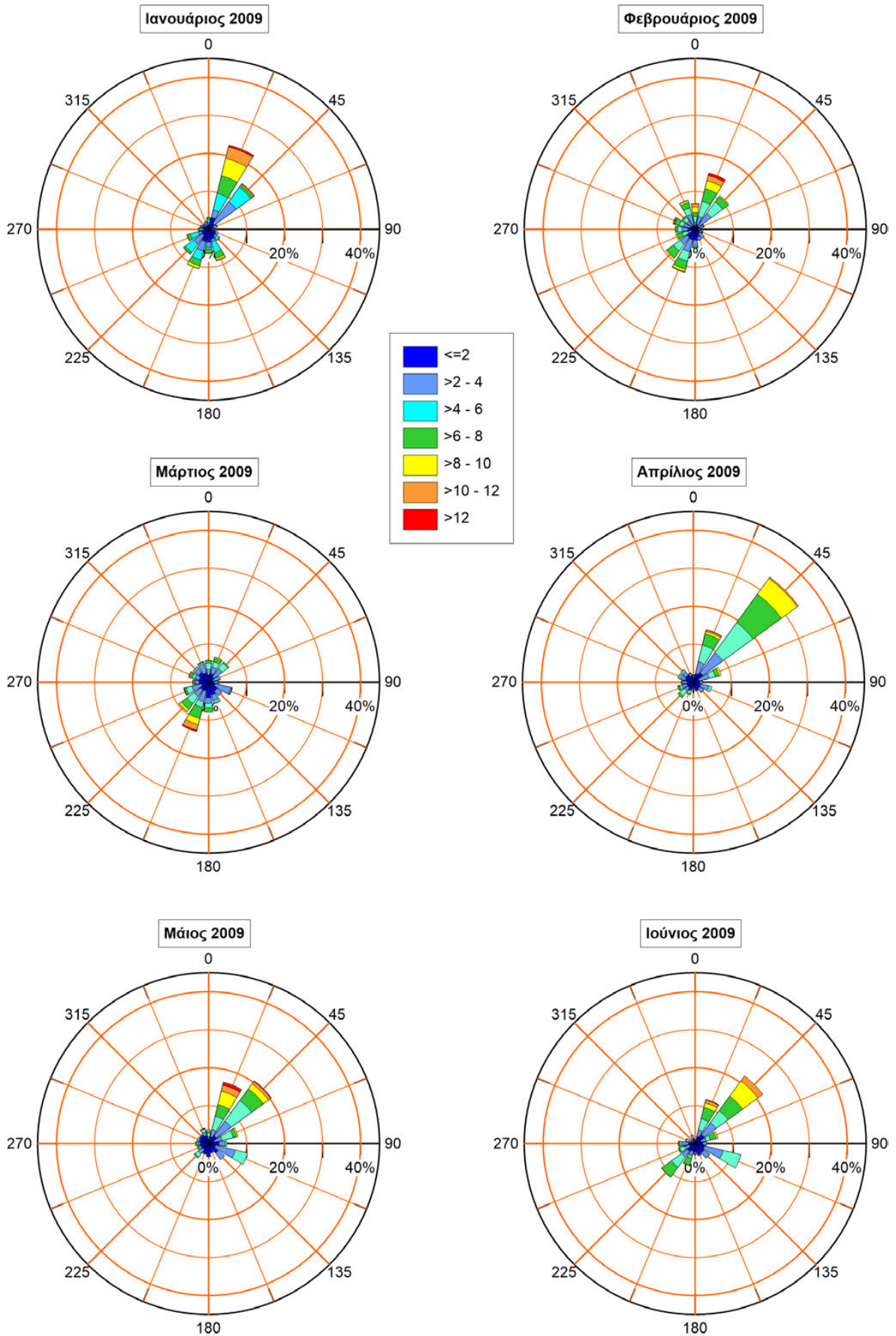
Ακολουθεί η κατανομή κατευθύνσεων και ταχυτήτων ανέμου στη στάθμη εδάφους (10 m) του ΔΑΑ, για καθένα από τους δώδεκα μήνες του 2009, η οποία συνοψίζεται στο γράφημα 7 για τους έξι πρώτους μήνες και στο γράφημα 8 για τους έξι τελευταίους.



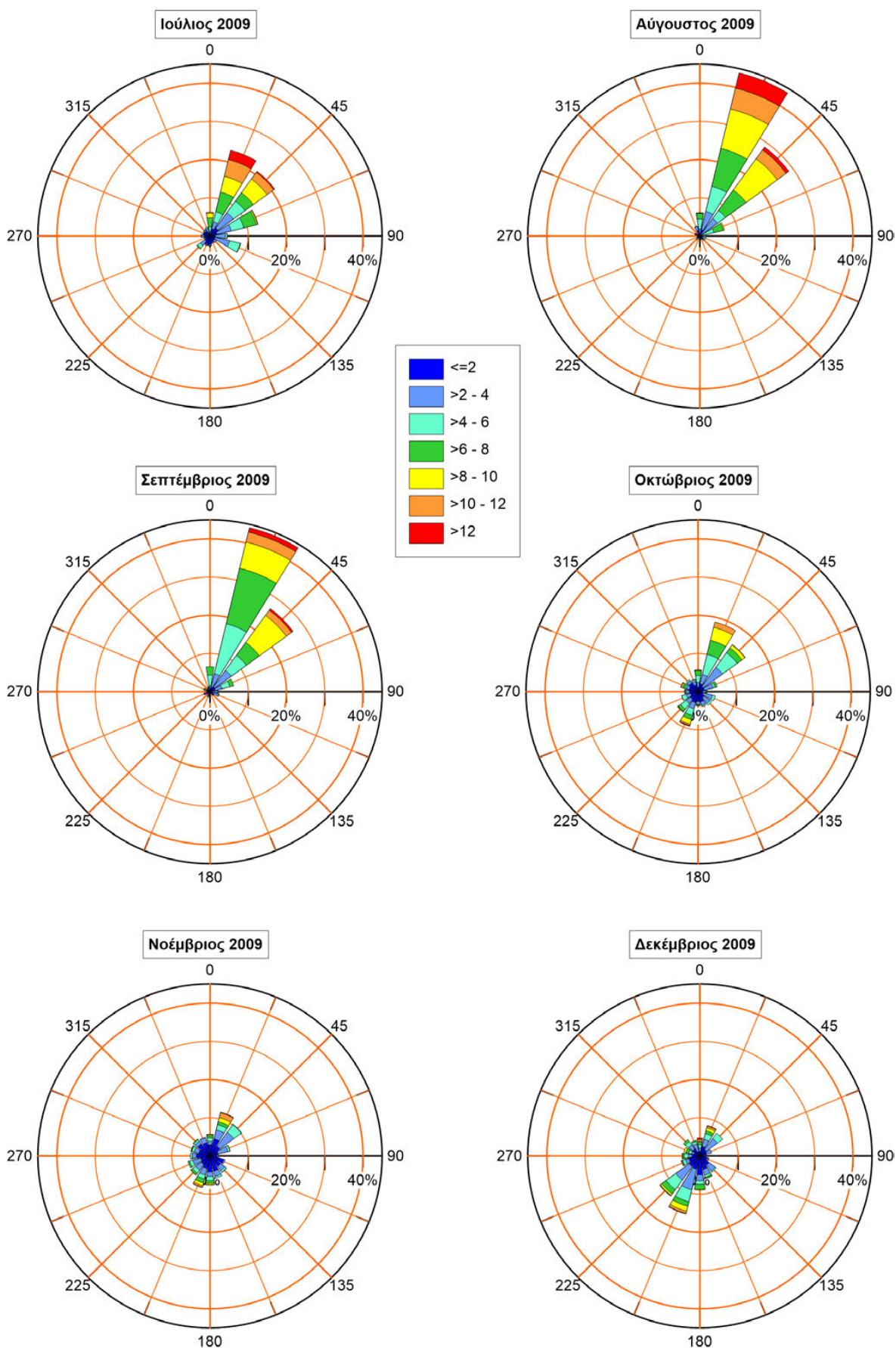
Γράφημα 5: Διακύμανση της θερμοκρασίας στον ΔΑΑ το 2009.



Γράφημα 6: Διακύμανση της σχετικής υγρασίας στον ΔΑΑ το 2009.



Γράφημα 7: Μηνιαία ανεμογράμματα στον ΔΑΑ για το πρώτο εξάμηνο του 2009.

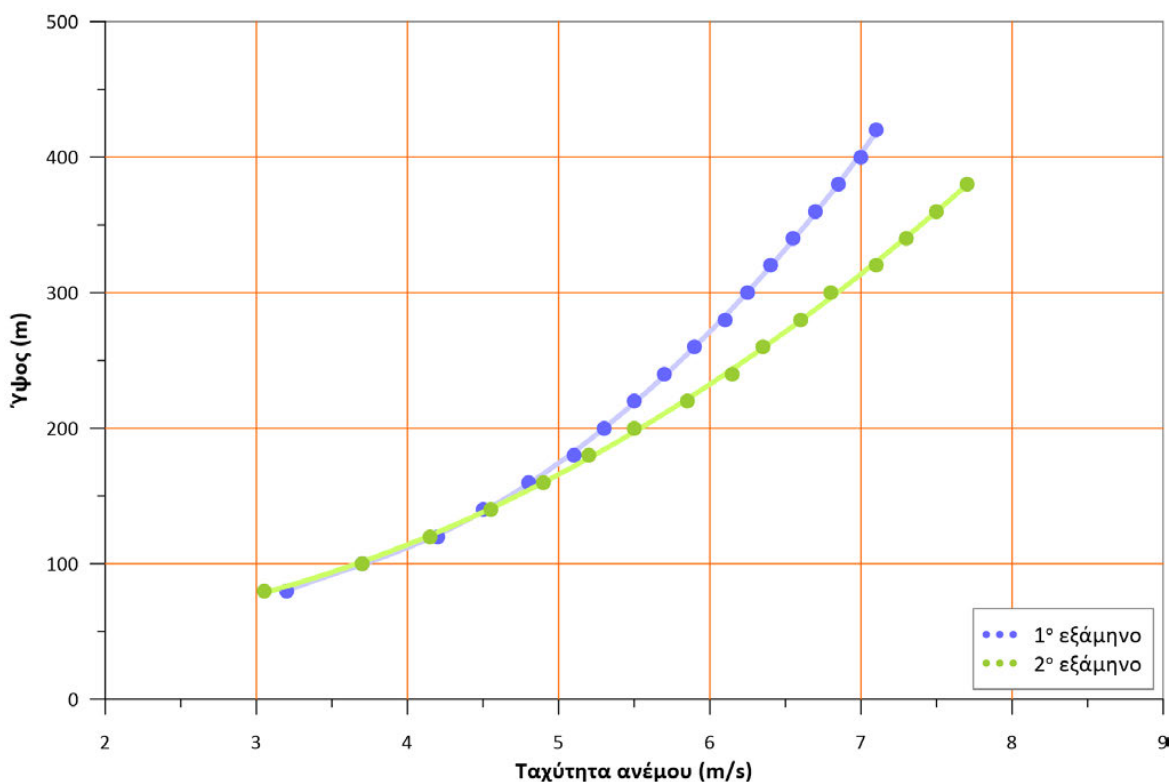


Γράφημα 8: Μηνιαία ανεμογράμματα στον ΔΑΑ για το δεύτερο εξάμηνο του 2009.

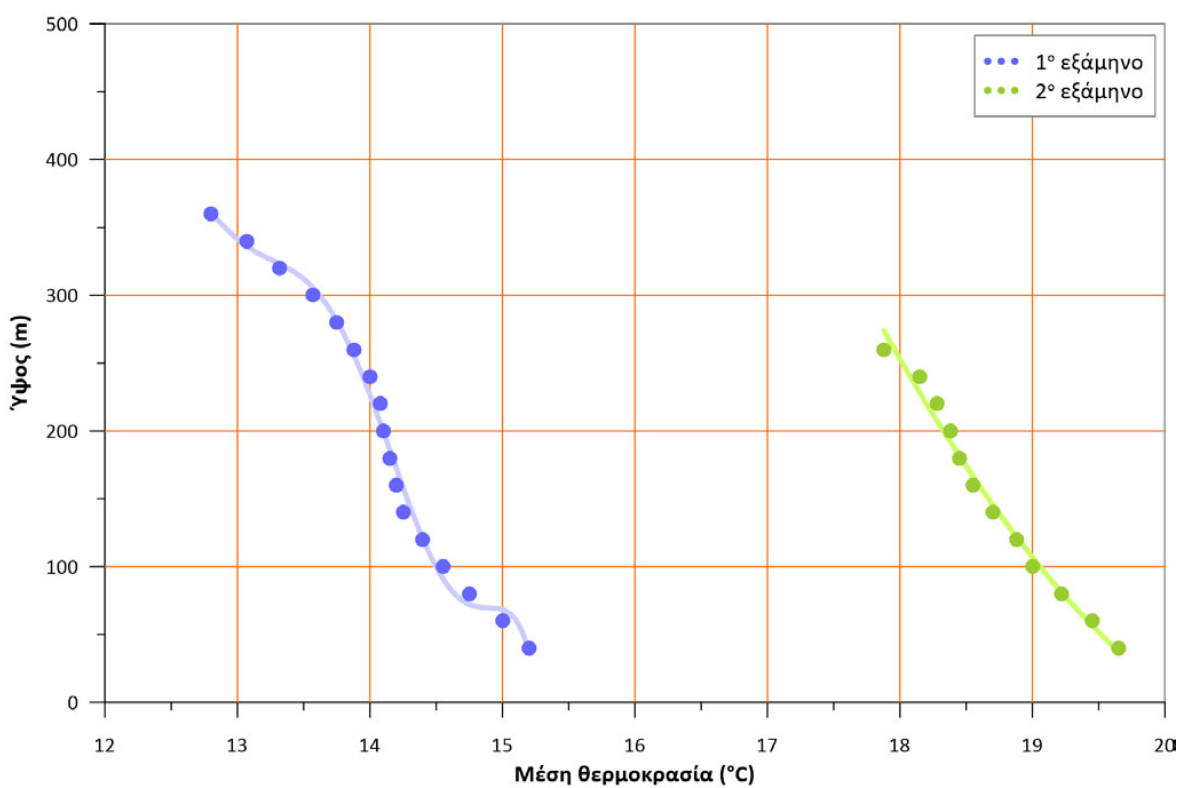
Οι βασικότερες παρατηρήσεις ως προς τις μετεωρολογικές συνθήκες επιφάνειας στο Διεθνή Αερολιμένα Αθηνών, κυρίως δε ως προς τις παραμέτρους που επιδρούν καθοριστικότερα στη διασπορά των αέριων ρύπων, είναι οι εξής:

- Η υψηλή μέση ημερήσια θερμοκρασία (μπλε γραμμή στο γράφημα 5 παραπάνω), η οποία κινείται πάνω από τους 15 °C για επτά περίπου μήνες κατ' έτος, υποδεικνύει έντονη ηλιοφάνεια, κάτι που επιβεβαιώνεται και από το γράφημα 11 στη σελίδα 36. Η έντονη ηλιοφάνεια, συνδυαζόμενη με τις σχετικά περιορισμένες εντάσεις ανέμου, καθιστά συνηθέστερες τις καταστάσεις ευστάθειας Pasquill A (πολύ ασταθής) και B (ασταθής). Οι συγκεκριμένες καταστάσεις είναι ιδιαίτερα ευνοϊκές για τη γρήγορη κατακόρυφη αραίωση των αέριων ρύπων και τη συνακόλουθη μείωση των συγκεντρώσεών τους. Για τις νυχτερινές ώρες, αν και δεν διατίθενται μετρήσεις νεφοκάλυψης, εκτιμάται ότι το ποσοστό της θα κινείται συνήθως κάτω του 50%, βάσει της εμπειρικής εικόνας για την περιοχή. Επομένως, οι συνηθέστερες καταστάσεις Pasquill τη νύχτα αναμένεται να είναι οι ευσταθείς (E και F), που δυσχεραίνουν τη γρήγορη αραίωση των αέριων ρύπων και ευνοούν την εμφάνιση αυξημένων συγκεντρώσεών τους.
- Οι κύριες κατευθύνσεις ανέμου, όπως διακρίνεται από τα ανεμογράμματα (γράφημα 7 και γράφημα 8 παραπάνω) εντοπίζονται με αξιοσημείωτη σταθερότητα στον άξονα BBA-NNΔ, με σημαντική επικράτηση της προέλευσης από BBA. Οι εντάσεις κατά τη διάρκεια του τριμήνου Ιουλίου - Σεπτεμβρίου είναι κατά σημαντικό ποσοστό (20% - 45%) μεγαλύτερες των 2 m/s, ευνοώντας τη γρήγορη αραίωση των αέριων ρύπων.

Ως προς τις μετεωρολογικές συνθήκες καθ' ύψος, αξίζει να σημειωθεί ότι ο ΔΑΑ είναι ένα από τα λίγα αεροδρόμια στην Ευρώπη και το μόνο στην Ελλάδα που διαθέτει ηχητικό radar (SODAR – Sonic Detection And Ranging) και ηλεκτρομαγνητικό ακουστικό radar (RASS – Radio Acoustic Sounding System) για την καταγραφή των παραμέτρων ανέμου και θερμοκρασίας στην κατακόρυφη διάσταση. Με τα όργανα αυτά, συλλέγονται λεπτομερή δεδομένα για το προφίλ του ανέμου και της θερμοκρασίας στο ατμοσφαιρικό στρώμα πάνω από το αεροδρόμιο. Μια συνοπτική εικόνα των δεδομένων αυτών^[17,18] αποτυπώνεται στα ακόλουθα γραφήματα.



Γράφημα 9: Μέση ταχύτητα ανέμου καθ' ύψος στον ΔΑΑ ανά εξάμηνο του 2009. Στο δεύτερο εξάμηνο είναι εμφανής η συνεισφορά των μελετιμών.



Γράφημα 10: Μέση θερμοκρασία καθ' ύψος στον ΔΑΑ ανά εξάμηνο του 2009.

Ως προς τη διεύθυνση του ανέμου καθ' ύψος, η βασική τάση που χαρακτηρίζει τα δεδομένα του 2009 είναι μια ελαφρά στροφή από τη ΒΒΔ προέλευση (30°) που επικρατεί στην επιφάνεια προς τη βόρεια προέλευση (15° στα 60 m και 0° στα 500 m).

Δύο ακόμη μετεωρολογικές παράμετροι που λήφθηκαν υπόψη στους υπολογισμούς είναι η ηλιακή ακτινοβολία (καθοριστική – μαζί με την ταχύτητα ανέμου – για τον προσδιορισμό της ατμοσφαιρικής ευστάθειας) και το ύψος νέφωσης, για το οποίο δεν υπήρχαν άμεσες μετρήσεις, οπότε προσδιορίστηκε μέσω των σχέσεων:^[19]

$$z_{LCL} \approx 125(\theta - \theta_d)$$

$$\theta_d = \frac{B \left(\ln \left(\frac{RH}{100} \right) + \frac{A \cdot \theta}{B + \theta} \right)}{A - \ln \left(\frac{RH}{100} \right) - \frac{A \cdot \theta}{B + \theta}}$$

όπου: z_{LCL} (height of lifting condensation level) είναι το ύψος νέφωσης, το οποίο ισούται με το ύψος εκείνο όπου μια ανερχόμενη στοιχειώδης μάζα αέρα αποκτά σχετική υγρασία 100%, ψυχόμενη κατά συνεχή αδιαβατικό τρόπο,^[19]

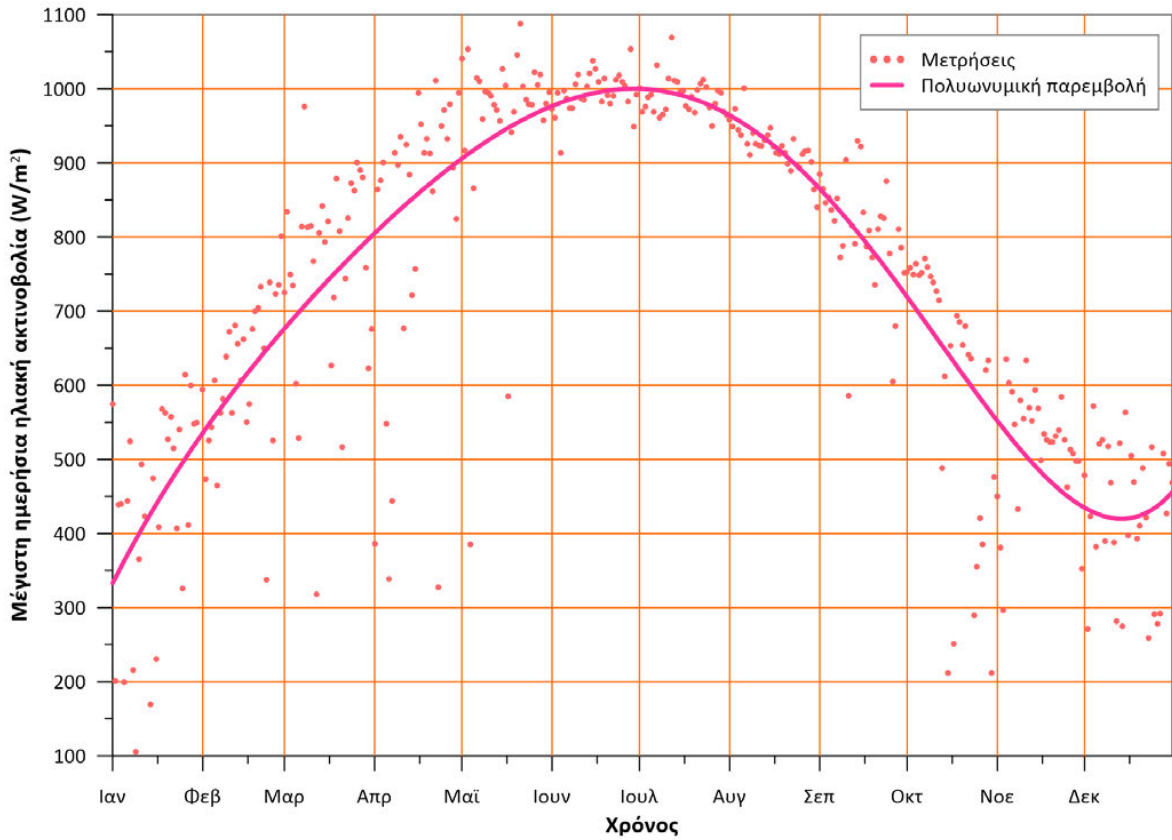
θ η θερμοκρασία κοντά στο έδαφος σε °C,

θ_d η θερμοκρασία του σημείου δρόσου (dew point temperature) σε °C,

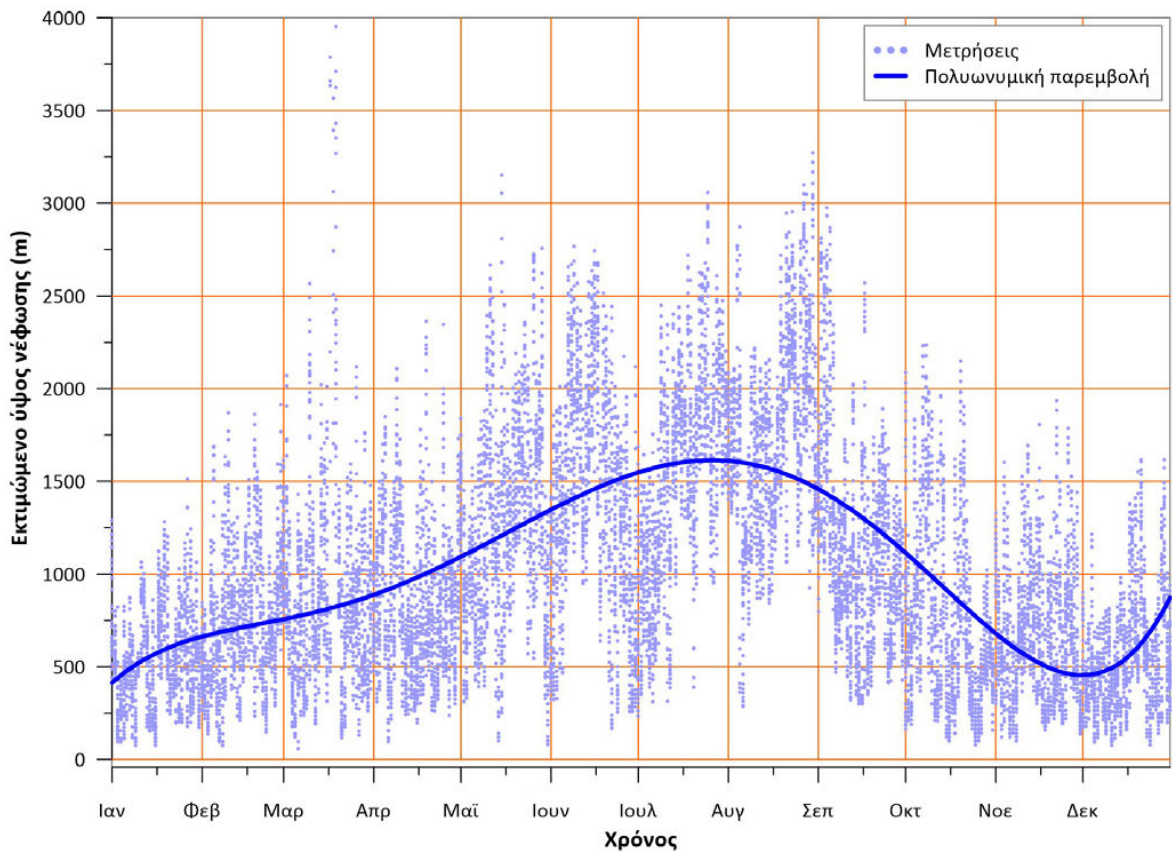
RH η σχετική υγρασία,

A και B εμπειρικοί συντελεστές ίσοι με 17,625 και 243,04 °C αντίστοιχα.

Η εξέλιξη των δύο αυτών μετεωρολογικών παραμέτρων κατά τη διάρκεια του 2009 παρουσιάζεται στα επόμενα γραφήματα.



Γράφημα 11: Διακύμανση της μέγιστης ημερήσιας ηλιοφάνειας στον ΔΑΑ.

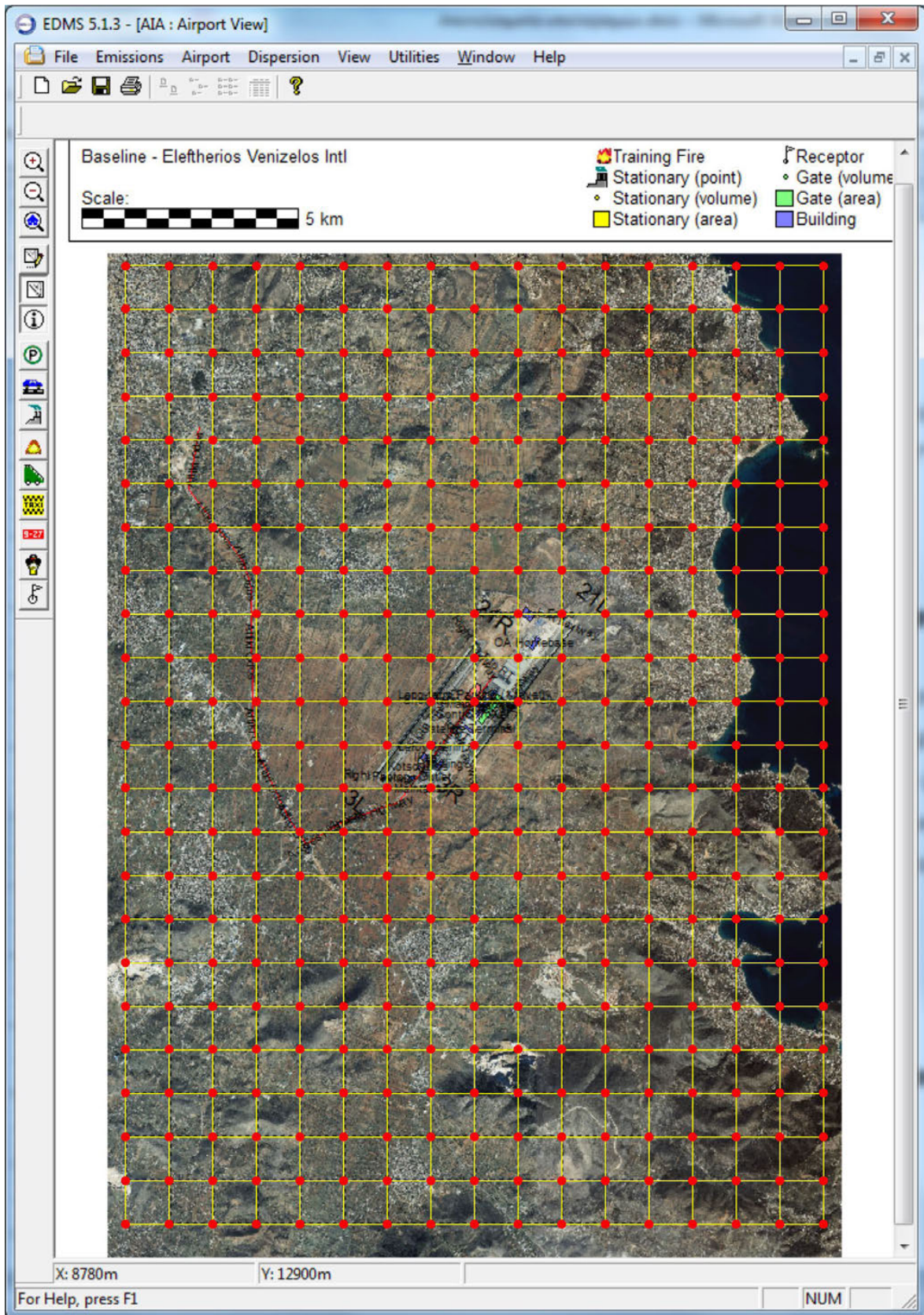


Γράφημα 12: Διακύμανση της οροφής νεφών στον ΔΑΑ.

5.2.6. Σημεία υπολογισμού συγκεντρώσεων

Για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων, διαμορφώθηκε ένα ορθογωνικό δίκτυο 425 σημείων (17×25), με κέντρο τον σταθμό του προαστιακού σιδηροδρόμου που βρίσκεται σχεδόν στο κέντρο του ΔΑΑ. Το δίκτυο σημείων εκτείνεται 8 km εκατέρωθεν του ΔΑΑ στην κατεύθυνση ανατολή - δύση και 12 km εκατέρωθεν στην κατεύθυνση βορρά - νότου· καλύπτει δηλαδή μια έκταση 384 km².

Τα σημεία υπολογισμού των συγκεντρώσεων, εισηγμένα στο EDMS παρουσιάζονται στην επόμενη εικόνα, όπου και διακρίνεται ότι καλύπτεται το μεγαλύτερο μέρος της ευρύτερης περιοχής των Μεσογείων. Το βήμα υπολογισμού, δηλαδή η απόσταση μεταξύ των σημείων, τόσο κατά την οριζόντια όσο και κατά την κάθετη διεύθυνση είναι 1 km.



Σχήμα 3: Το δίκτυο σημείων υπολογισμού των συγκεντρώσεων αέριων ρύπων κατά τη μελέτη του ΔΑΑ στο EDMS.

5.2.7. Αποτελέσματα υπολογισμού εκπομπών

Το σύστημα EDMS παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού των εκπομπών από τις δραστηριότητες ενός αεροδρομίου, με ακρίβεια ανάλογη της λεπτομέρειας των δεδομένων εισόδου που αφορούν στις δραστηριότητες αυτές. Εάν για παράδειγμα διατίθεται μια ακριβής χρονική καταγραφή της απογείωσης, προσγείωσης και επίγειας λειτουργίας κάθε αεροσκάφους που χρησιμοποίησε το αεροδρόμιο, καθώς και της λειτουργίας των μέσων επίγειας υποστήριξης (κυρίως GSE και APU), τότε ο υπολογισμός των εκπομπών μπορεί να είναι πολύ λεπτομερής. Σε άλλες περιπτώσεις, όπως αυτή του ΔΑΑ όπου είναι δημοσιευμένα μόνο τα συγκεντρωτικά στοιχεία της αεροπορικής κίνησης, ο υπολογισμός των εκπομπών χρειάζεται να ενσωματώσει τις αβεβαιότητες που προκύπτουν από τις παραδοχές αφενός της κατανομής της συνολικής ετήσιας κίνησης ανά μήνα, ημέρα ώρα κ.ο.κ. και αφετέρου της συνάρτησης μεταξύ αεροπορικών κινήσεων και λειτουργίας του επίγειου εξοπλισμού. Πάντως, εάν οι υπολογιζόμενες εκπομπές αφορούν ετήσια στοιχεία, οι παραδοχές αυτές δεν αναμένεται να εισάγουν αβεβαιότητες σοβαρού μεγέθους, αφού πολλές αποκλίσεις θα αλληλοαναιρούνται· αντίθετα, σε λεπτομερέστερα επίπεδα π.χ. ημέρας ή ώρας οι αβεβαιότητες (δηλαδή οι πιθανές διαφορές μεταξύ πραγματικής κατάστασης και υπολογιστικής προσομοίωσης) είναι εύλογο να αναμένονται σοβαρότερες.

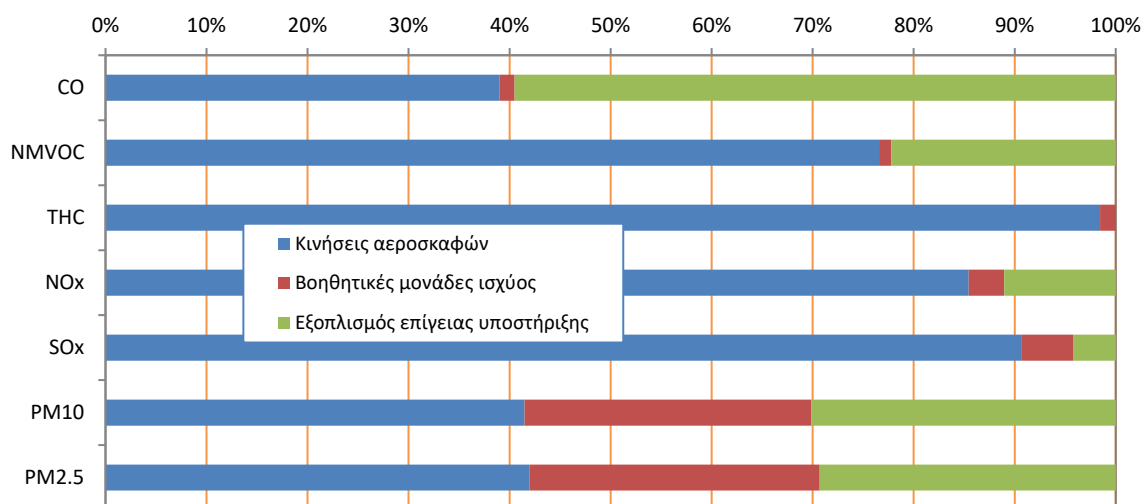
Με βάση τα παραπάνω, η περισσότερο αξιοποιήσιμη πληροφορία εντοπίζεται στις *εκπομπές ετήσιας βάσης*. Έτσι, στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται οι εκπομπές που υπολογίστηκαν από το EDMS για τη λειτουργία του ΔΑΑ κατά τη διάρκεια του 2009, με τα στοιχεία εισόδου που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες ενότητες.

Πίνακας 3: Εκπομπές αέριων ρύπων από τη λειτουργία του ΔΑΑ, όπως υπολογίστηκαν από το EDMS.

Πηγή	Εκπομπές ΔΑΑ (tn/yr)						
	CO	NMVOC	THC	NO _x	SO _x	PM ₁₀	PM _{2.5}
Κινήσεις αεροσκαφών	651,82	112,908	97,65	852,73	72,34	4,92	4,92
Βοηθητικές μονάδες ισχύος	25,19	1,778	1,54	35,05	4,11	3,36	3,36
Εξοπλισμός επίγειας υποστήριξης	994,72	32,766	--	110,14	3,37	3,58	3,43
Σύνολο	1.671,73	147,45	99,19	997,92	79,81	11,86	11,71

Συμπληρωματικά, αναφέρεται ότι η ετήσια κατανάλωση αεροπορικού καυσίμου για το 2009 υπολογίστηκε στους 61.762,75 tn.

Η ποσοστιαία κατανομή των τριών πηγών για κάθε ρύπο παριστάνεται στο ακόλουθο γράφημα.



Γράφημα 13: Ποσοστιαία συμβολή των τριών πηγών στις εκπομπές κάθε αέριου ρύπου στον ΔΑΑ.

Από το παραπάνω γράφημα, εξάγονται οι εξής διαπιστώσεις:

- Οι κινητήρες των αεροσκαφών, δηλαδή η θεωρούμενη ως κύρια πηγή ρύπανσης κατά την κίνηση των αεροσκαφών, συμβάλλει περίπου κατά 40% στην εκπομπή CO αιωρούμενων σωματιδίων. Αντίθετα, οι κινητήρες είναι υπεύθυνοι για το μακράν μεγαλύτερο μέρος των εκπομπών NO_x και SO_x (περίπου 85% για τα πρώτα και άνω του 90% για τα δεύτερα).
- Οι βοηθητικές μονάδες ισχύος είναι υπεύθυνες κυρίως για την εκπομπή σωματιδίων. Δευτερευόντως συμμετέχουν σε μικρό βαθμό στις εκπομπές NO_x και SO_x, ενώ εκπέμπουν ελάχιστο CO και οργανικές ενώσεις.
- Ο εξοπλισμός επίγειας εξυπηρέτησης είναι υπεύθυνος για το μεγαλύτερο μέρος του εκπεμπόμενου CO, για σημαντικό μέρος των αιωρούμενων σωματιδίων και των πτητικών οργανικών ενώσεων, και σε ένα ποσοστό λίγο μεγαλύτερο του 11% για τα NO_x.

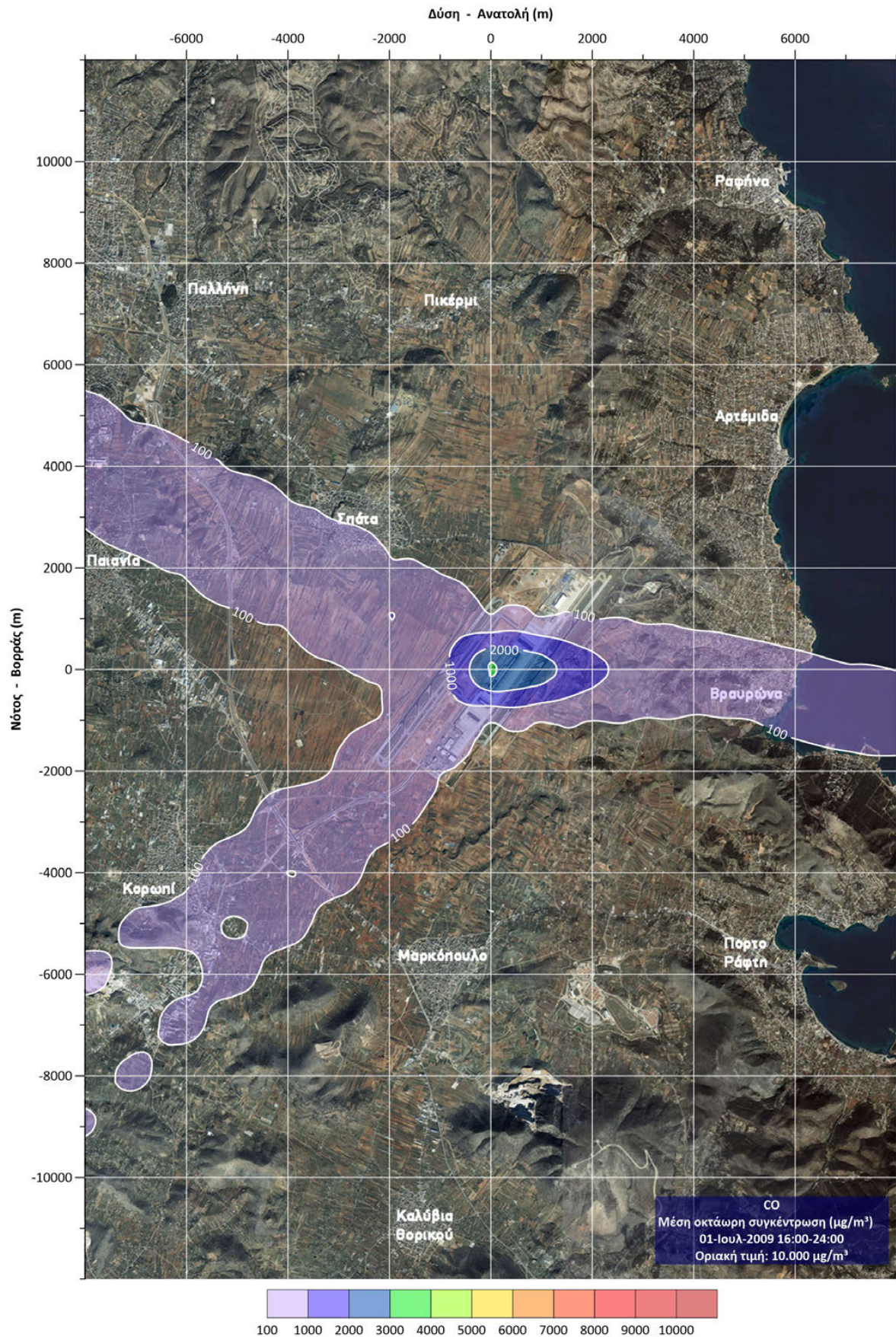
5.2.8. Αποτελέσματα υπολογισμού συγκεντρώσεων

Όπως αναφέρθηκε, ο Διεθνής Αερολιμένας Αθηνών είναι το μεγαλύτερο ελληνικό αεροδρόμιο, με κίνηση τετραπλάσια του δεύτερου μεγαλύτερου· επομένως, οι επιπτώσεις της λειτουργίας του ΔΑΑ στην ποιότητα του αέρα αναμένεται να είναι πολύ εντονότερες από αυτές σε οποιοδήποτε άλλο αεροδρόμιο της χώρας. Αξίζει συνεπώς η λεπτομερέστερη δυνατή ανάλυση των συγκεντρώσεων αέριων ρύπων γύρω από το ΔΑΑ, ώστε να εξετασθεί επαρκής αριθμός περιπτώσεων που να αντιπροσωπεύουν όλες τις ρεαλιστικά αναμενόμενες δυσμενείς καταστάσεις.

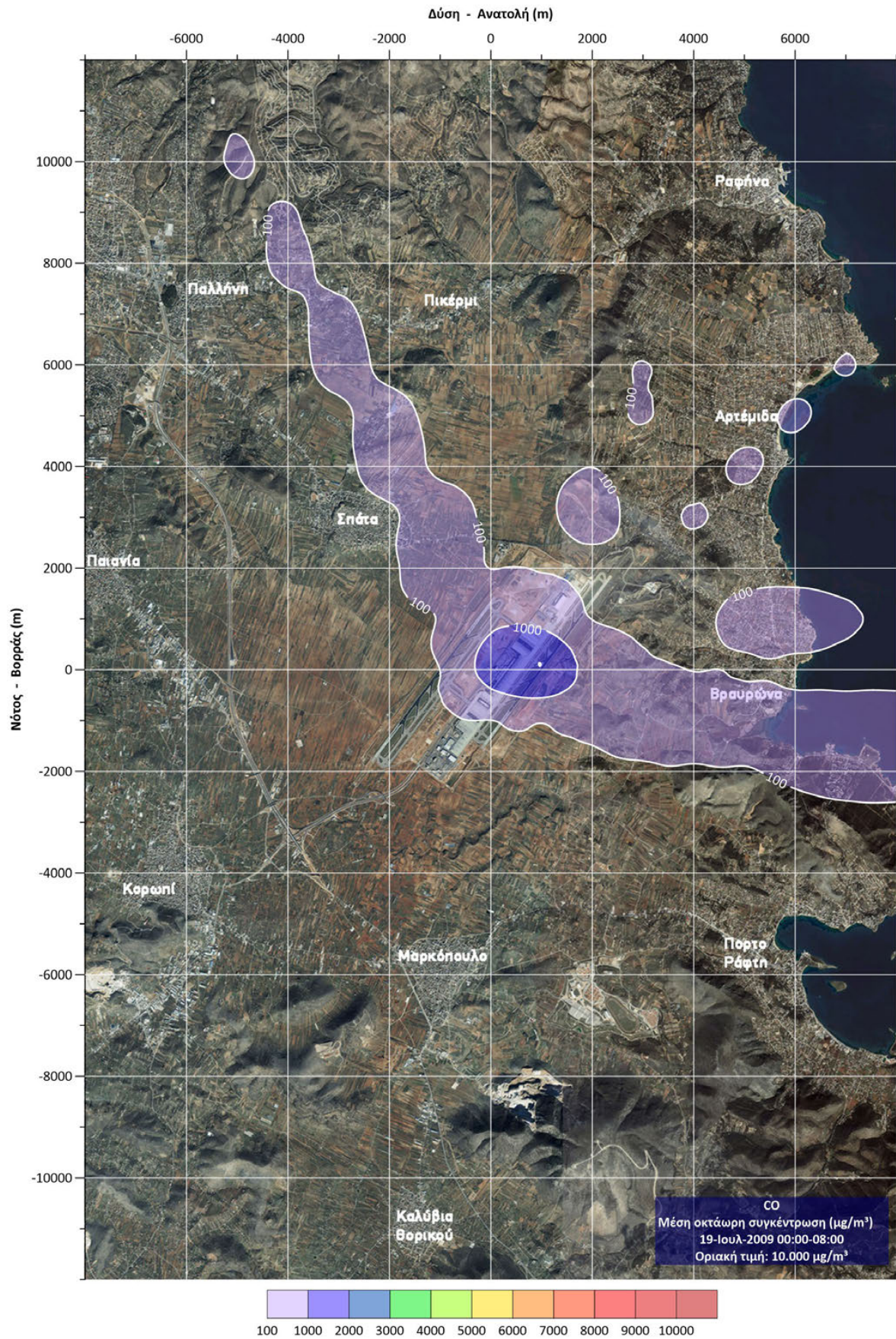
Στο πλαίσιο αυτό, διαμορφώνεται το εξής σκεπτικό:

- Ο Ιούλιος και ο Αύγουστος είναι οι δύο μήνες που ο ΔΑΑ εμφανίζει την υψηλότερη κίνηση αεροσκαφών (βλ. γράφημα 2, σελ. 27), επομένως σε όλους του υπόλοιπους μήνες οι εκπομπές και συγκεντρώσεις αέριων ρύπων αναμένονται μικρότερες.
- Στο δίμηνο Ιουλίου – Αυγούστου θα πρέπει να εξετασθούν αρκετές καταστάσεις, ώστε να καλύπτονται επαρκώς οι πιθανοί δυσμενείς συνδυασμοί μετεωρολογικών συνθηκών (οι οποίες επηρεάζουν τη διασπορά) και κορύφωσης του αριθμού κινήσεων σε ημερήσια και εβδομαδιαία βάση (που επηρεάζουν τις εκπομπές).
- Για το σκοπό αυτό, διαφαίνεται κατάλληλη η διάκριση κάθε μήνα σε τρία δεκαήμερα και η αναζήτηση της δυσμενέστερης κατάστασης (δηλαδή εκείνης που χαρακτηρίζεται από τις υψηλότερες συγκεντρώσεις, σε ωριαία ή εικοσιτετράωρη βάση, ανάλογα με το ρύπο) σε καθένα από αυτά. Με τον τρόπο αυτό, συλλέγεται επαρκής αριθμός συνδυασμών κίνησης – μετεωρολογίας, που αντιπροσωπεύει ικανοποιητικά όλες τις ρεαλιστικά αναμενόμενες δυσμενείς καταστάσεις. Στο πλαίσιο αυτό, το EDMS ρυθμίστηκε για να υπολογίσει τις συγκεντρώσεις για καθμία από τις 768 ώρες και τα 62 εικοσιτετράωρα του διμήνου Ιουλίου – Αυγούστου, ενώ στη συνέχεια επελέγησαν για παρουσίαση εκείνες οι περιπτώσεις με τις υψηλότερες τιμές.

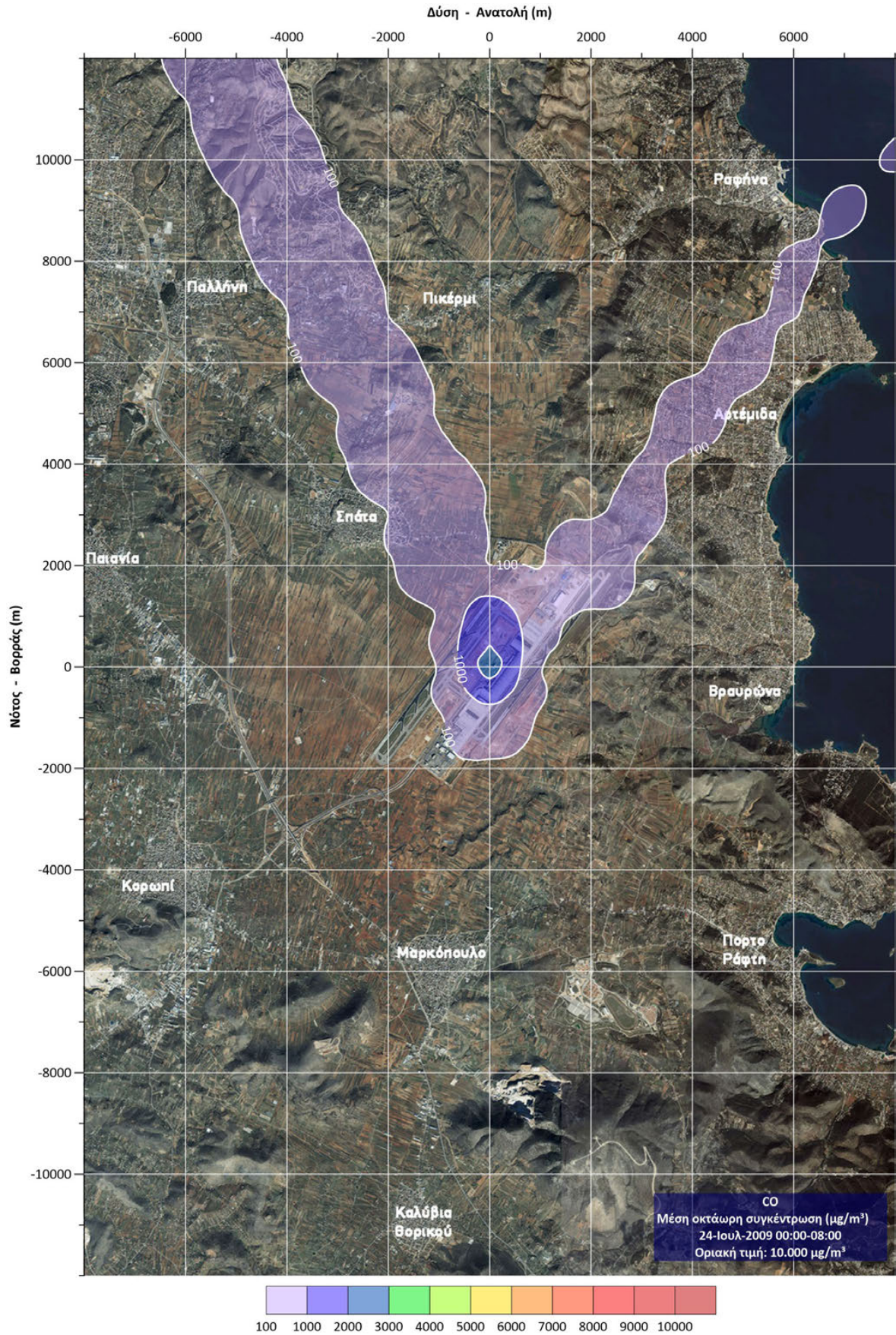
Έτσι, στα επόμενα γραφήματα παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις που υπολογίστηκαν με το EDMS γύρω από το ΔΑΑ για τη δυσμενέστερη ώρα ή μέρα των έξι δεκαημέρων του διμήνου Ιουλίου – Αυγούστου, κατά σειρά για τους ρύπους CO, NO_x, PM₁₀ και SO_x, στη χρονική βάση που αναφέρονται τα νομοθετημένα όρια για κάθε ρύπο, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση με αυτά. Παρουσιάζεται επίσης η μέση ετήσια συγκέντρωση των NO_x και των λεπτών αιωρούμενων σωματιδίων PM_{2,5} για τις οποίες επίσης έχουν νομοθετηθεί όρια. Ο υπολογισμός αυτών των συγκεντρώσεων βασίστηκε στις συνθήκες (εκπομπές – μετεωρολογία) του διμήνου, επομένως τα αποτελέσματα θα πρέπει να θεωρηθούν εκτιμήσεις αρκετά δυσμενέστερες των ρεαλιστικών.



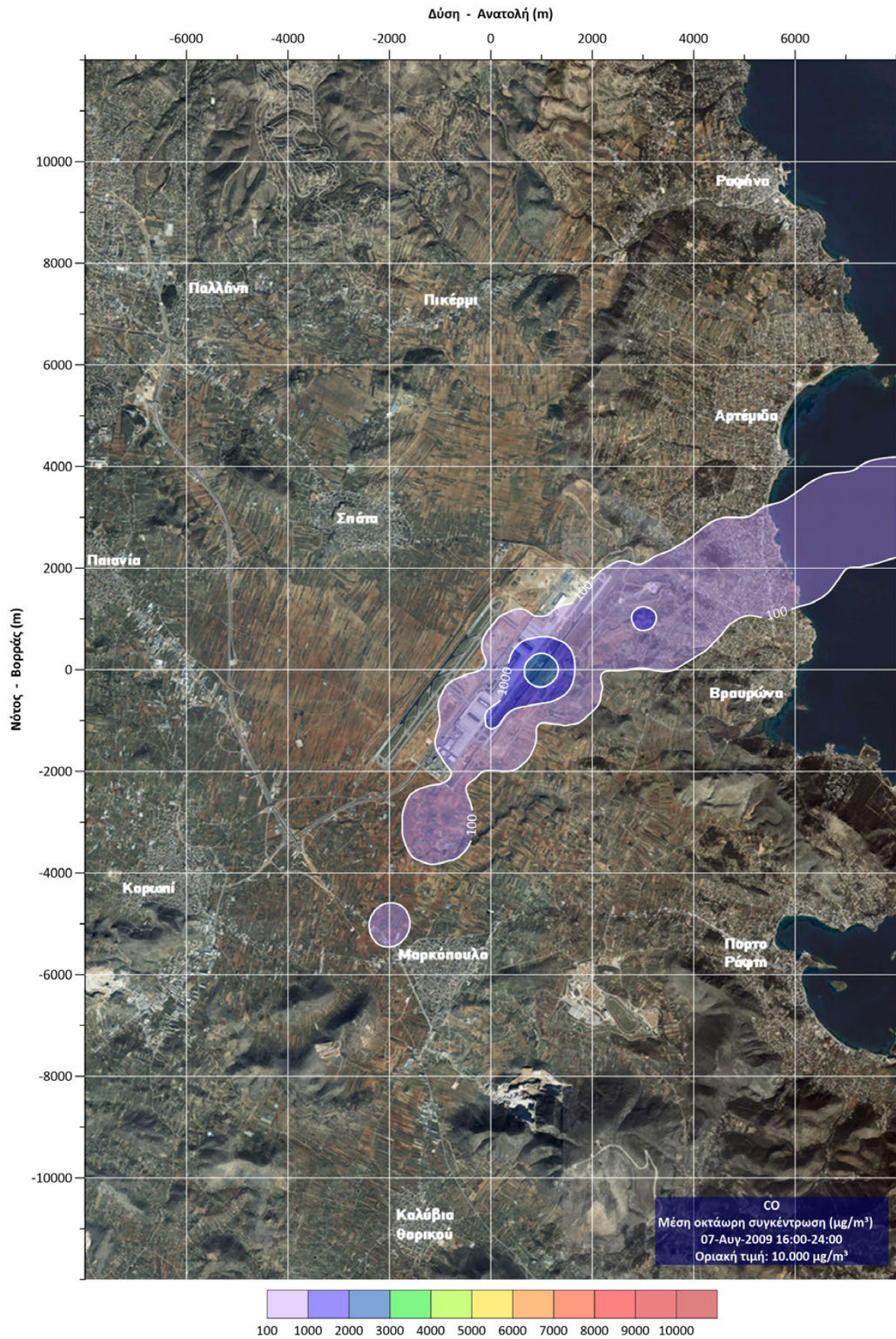
Γράφημα 14: Συγκέντρωση CO στο δυσμενέστερο δωρο του πρώτου δεκαημέρου Ιουλίου στον ΔΑΑ.



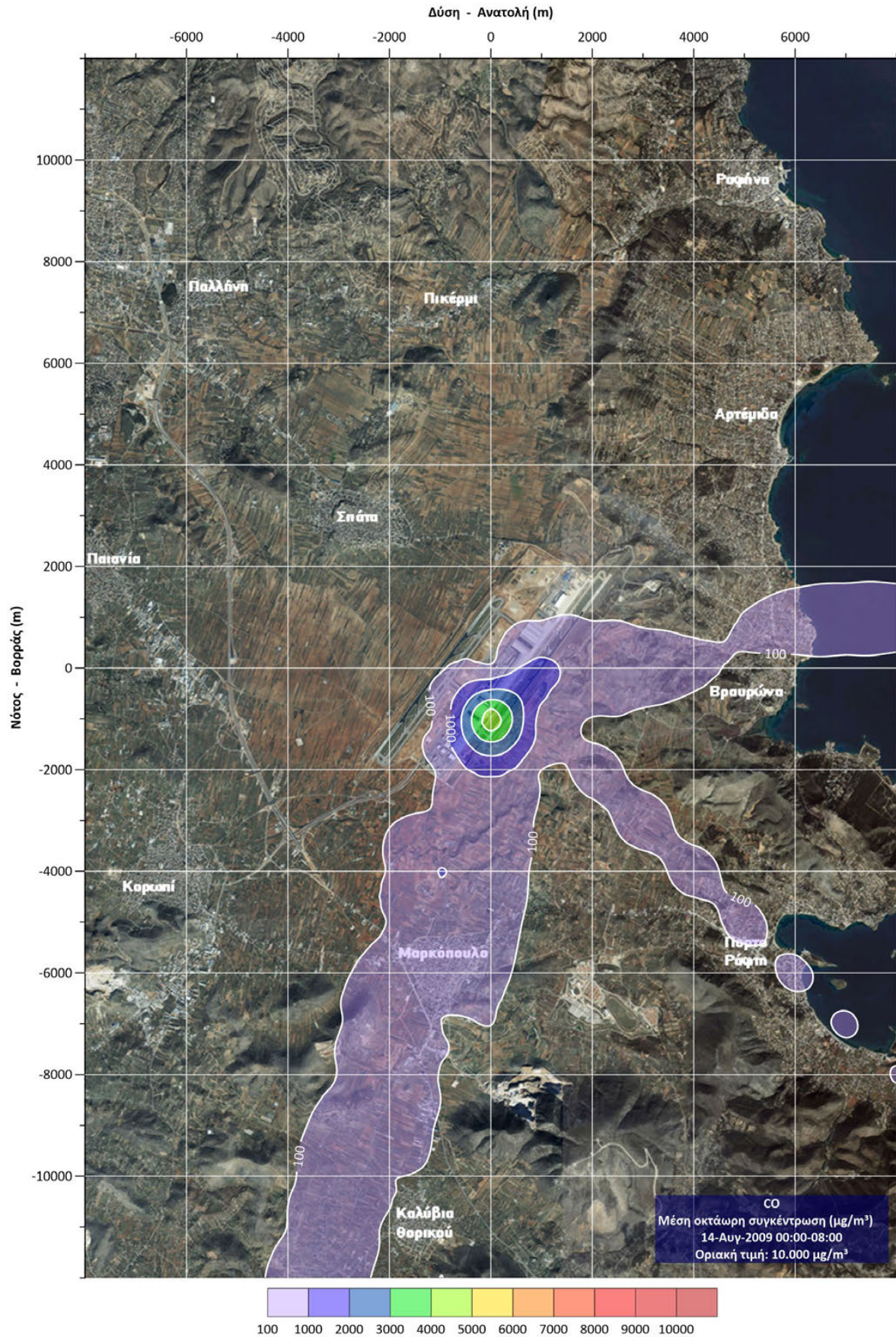
Γράφημα 15: Συγκέντρωση CO στο δυσμενέστερο 8ωρο του δεύτερου δεκαήμερου Ιουλίου στον ΔΑΑ.



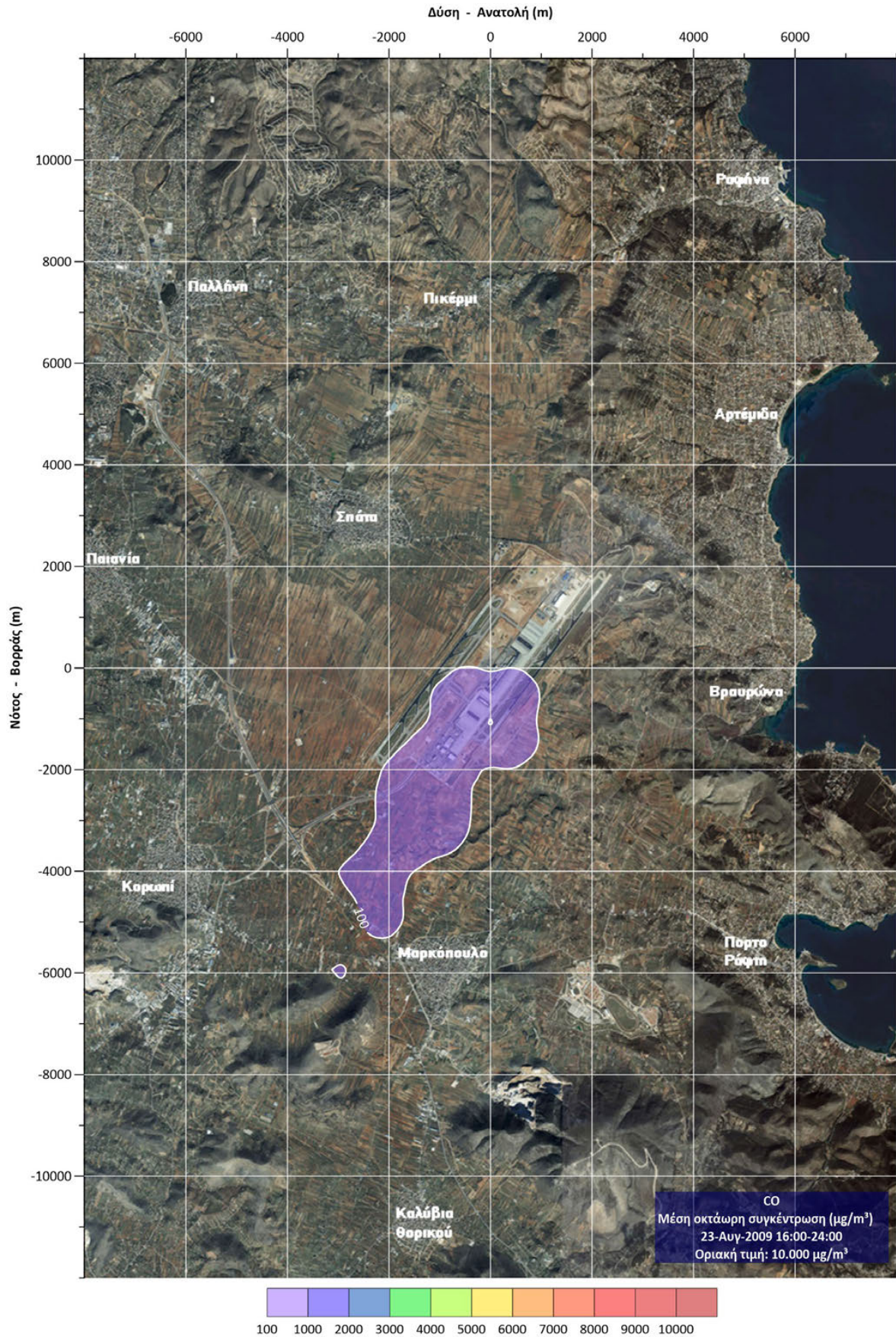
Γράφημα 16: Συγκέντρωση CO στο δυσμενέστερο δωρο του τρίτου δεκαημέρου Ιουλίου στον ΔΑΑ.



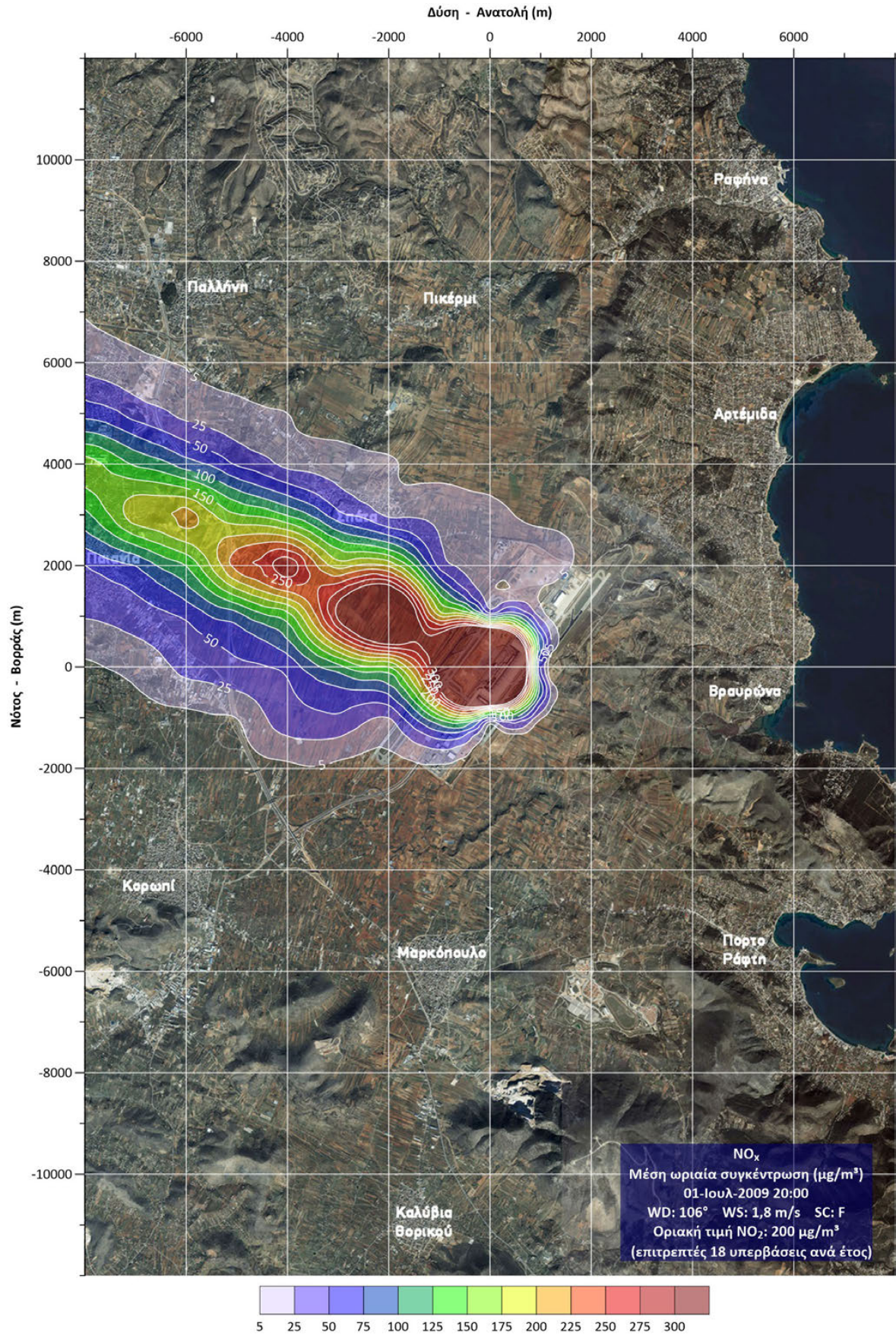
Γράφημα 17: Συγκέντρωση CO στο δυσμενέστερο θωρο του πρώτου δεκαημέρου Αυγούστου στον ΔΑΑ.



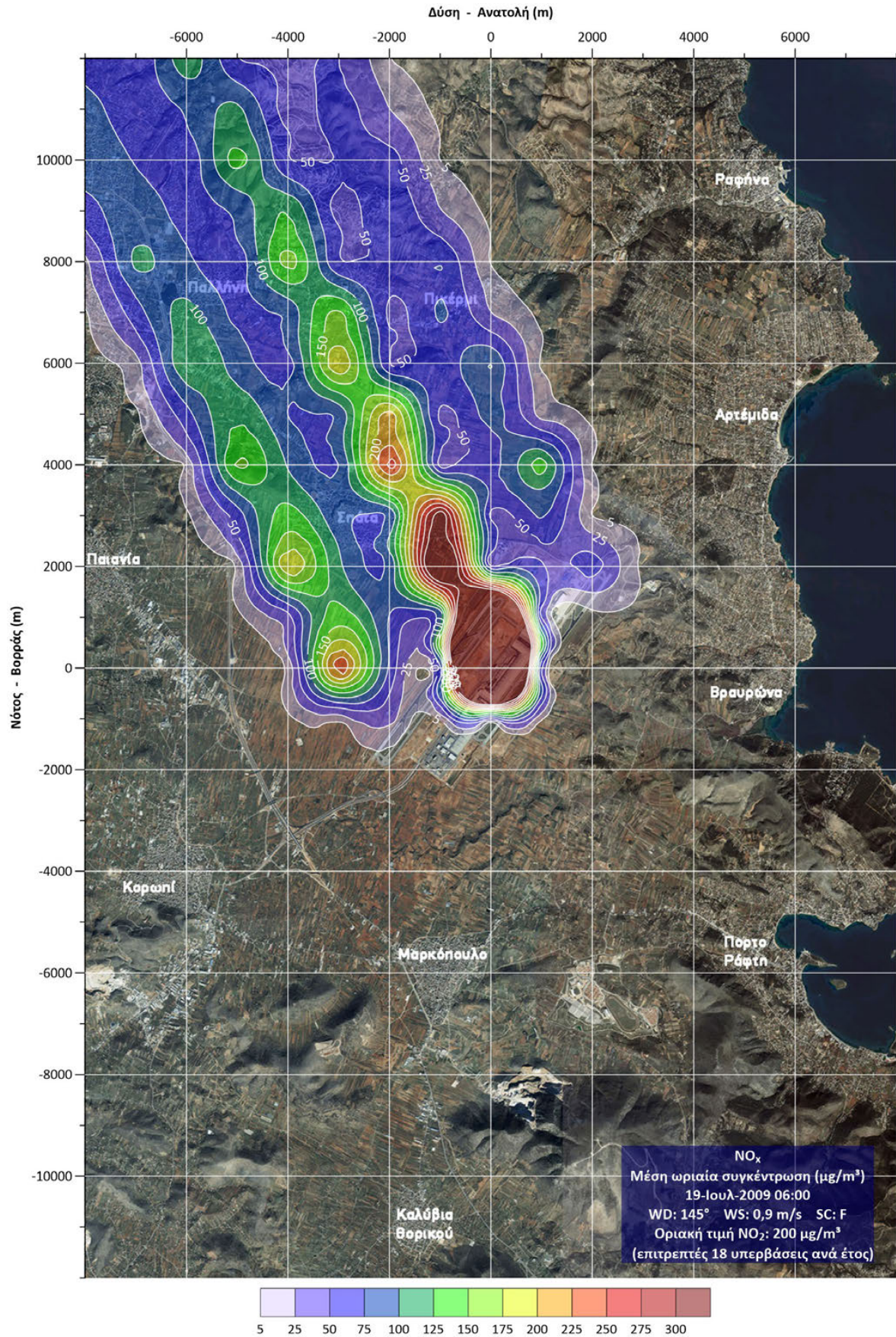
Γράφημα 18: Συγκέντρωση CO στο δυσμενέστερο θωρο του δεύτερου δεκαημέρου Αυγούστου στον ΔΑΑ.



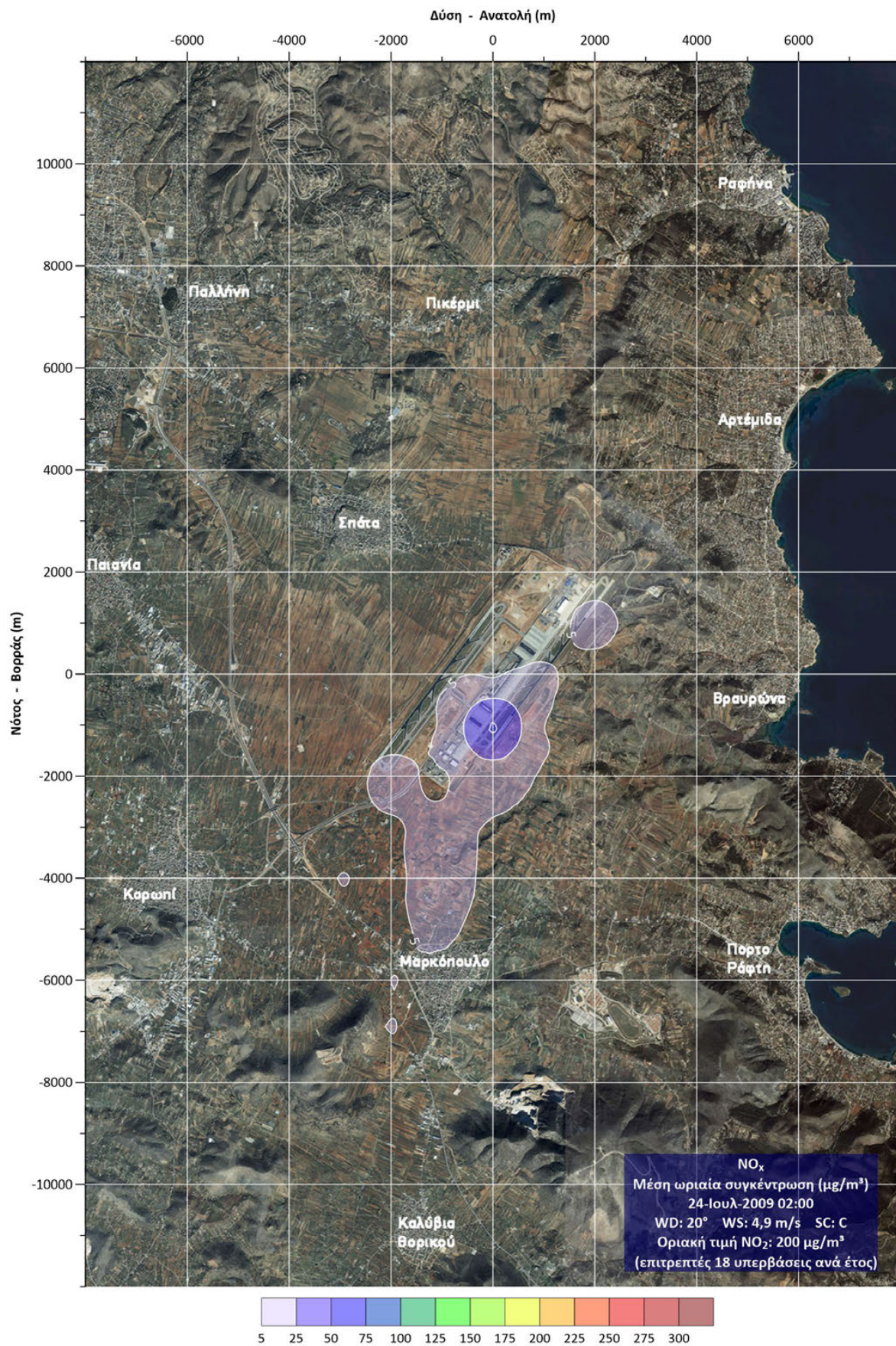
Γράφημα 19: Συγκέντρωση CO στο δυσμενέστερο δωρο του τρίτου δεκαημέρου Αυγούστου στον ΔΑΑ.



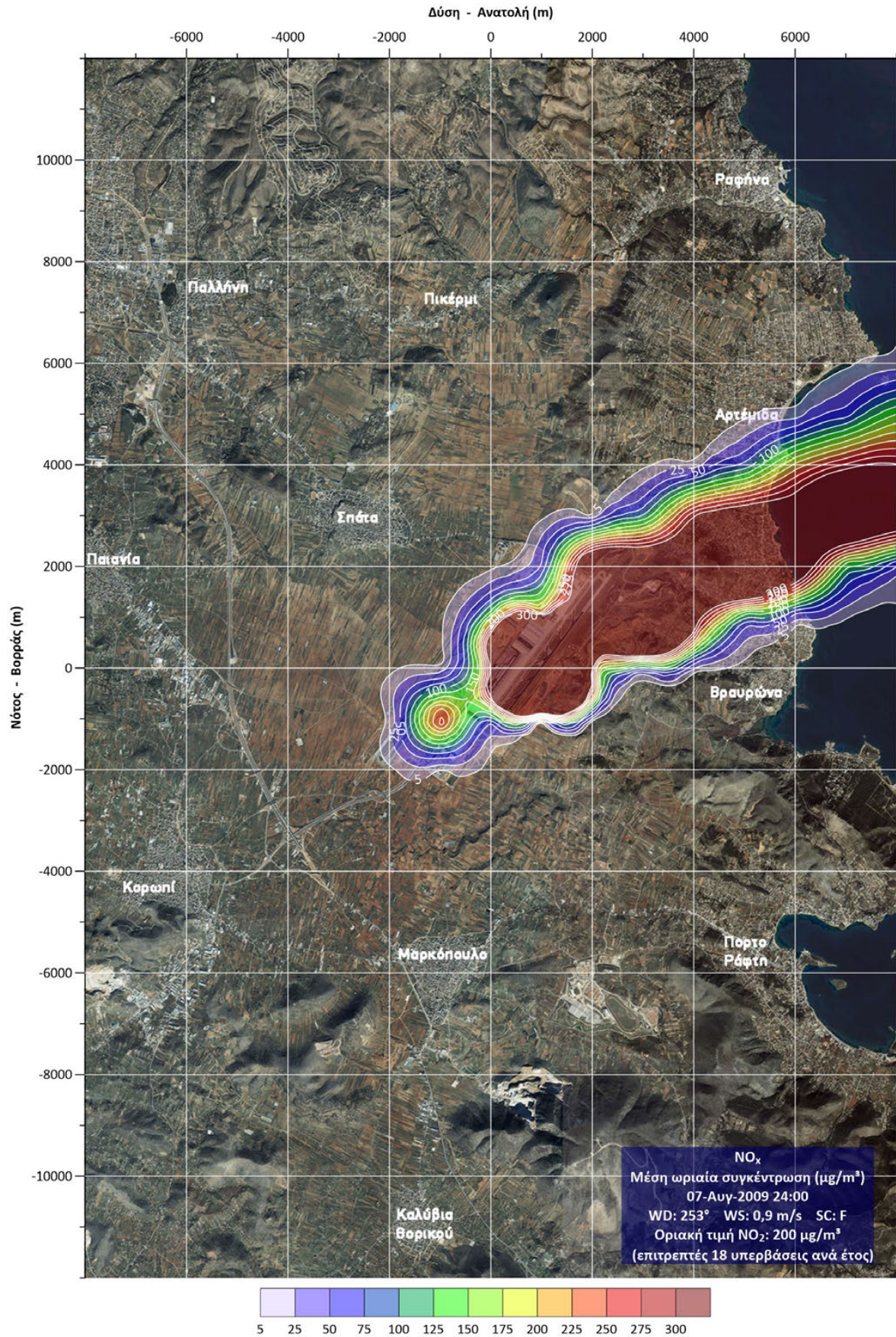
Γράφημα 20: Συγκέντρωση NO_x στη δυσμενέστερη ώρα του πρώτου δεκαημέρου Αυγούστου στον ΔΑΑ.



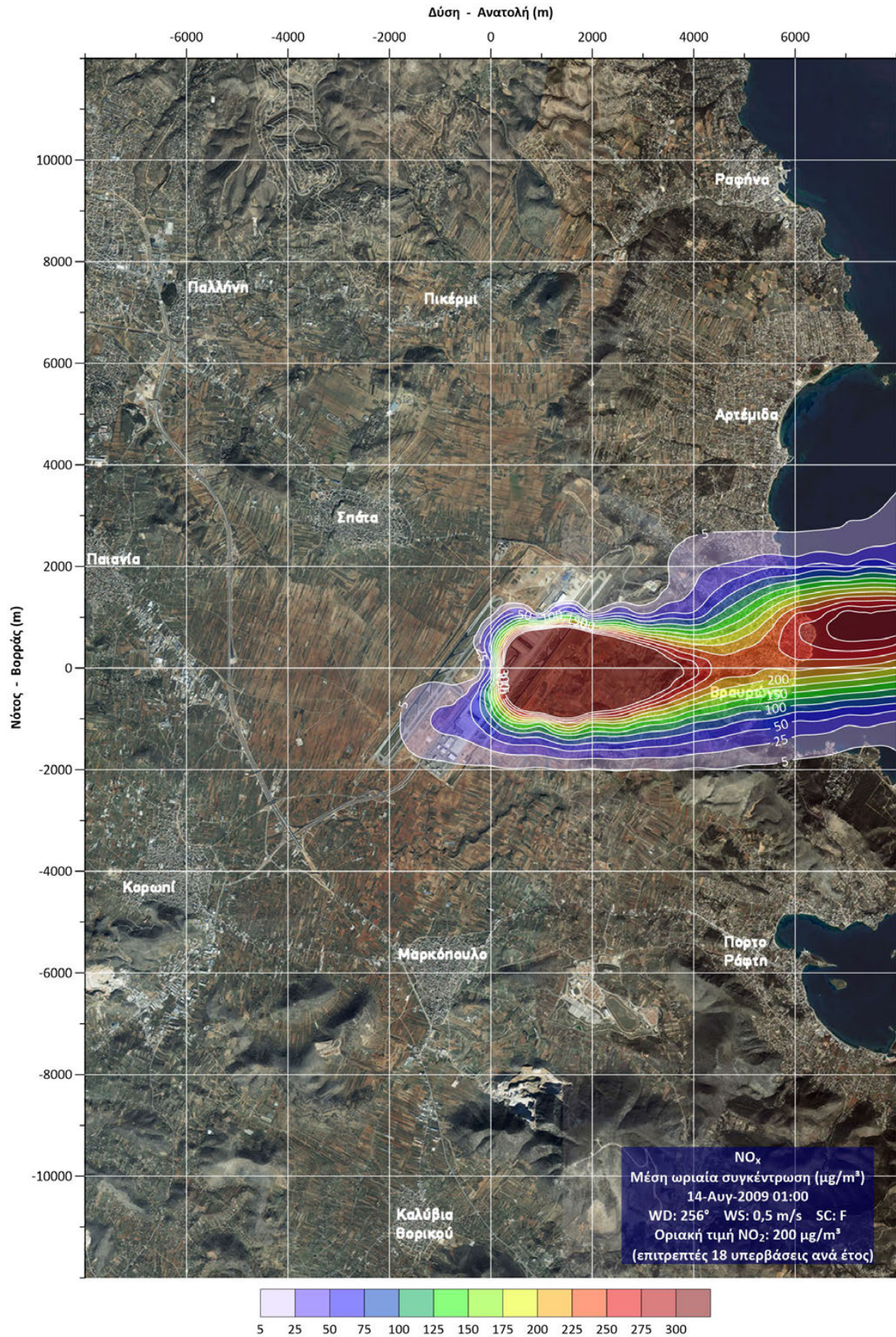
Γράφημα 21: Συγκέντρωση NO_x στη δυσμενέστερη ώρα του δεύτερου δεκαήμερου Ιουλίου στον ΔΑΑ.



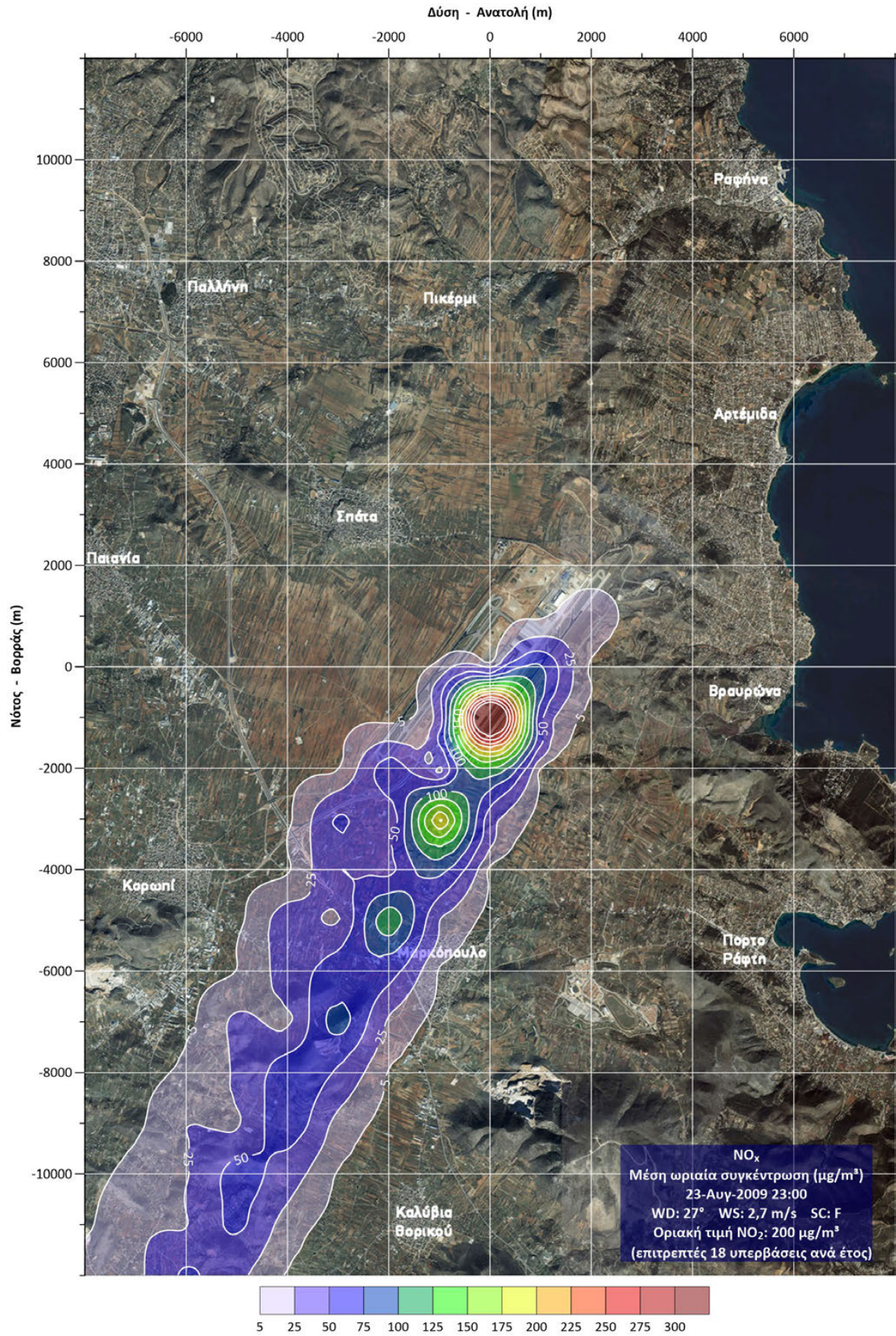
Γράφημα 22: Συγκέντρωση NO_x στη δυσμενέστερη ώρα του τρίτου δεκαημέρου Ιουλίου στον ΔΑΑ.



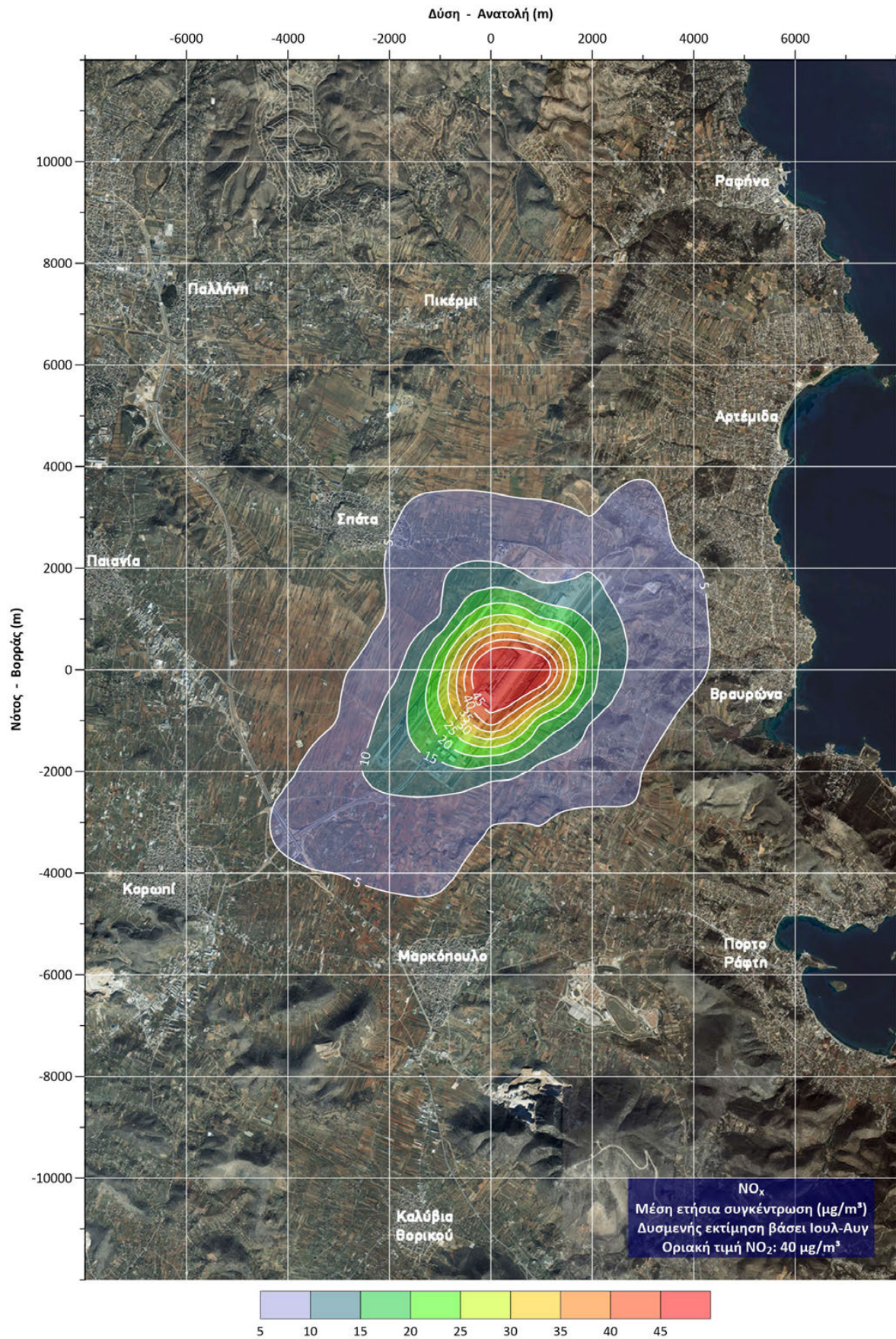
Γράφημα 23: Συγκέντρωση NO_x στη δυσμενέστερη ώρα του πρώτου δεκαημέρου Αυγούστου στον ΔΑΑ.



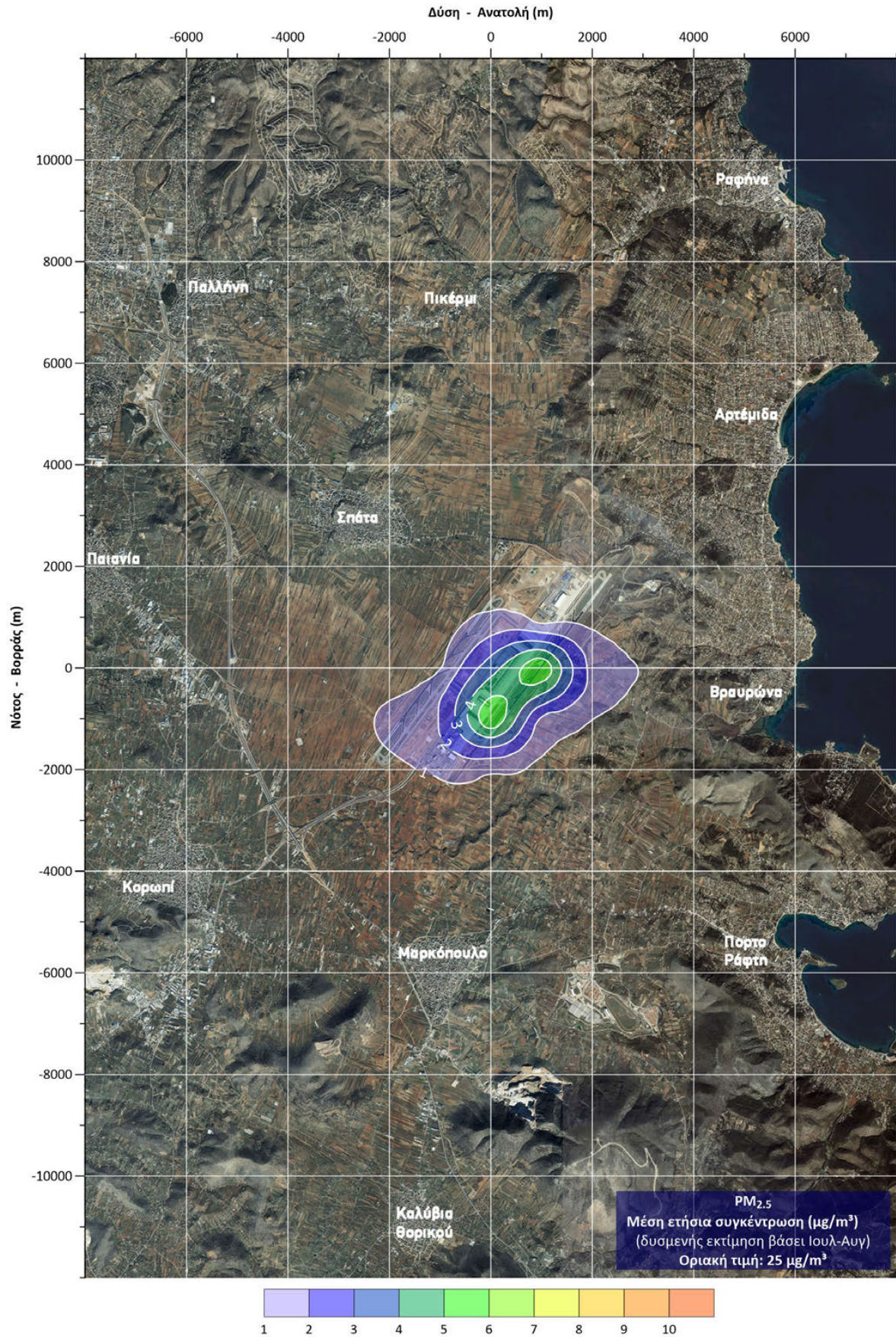
Γράφημα 24: Συγκέντρωση NO_x στη δυσμενέστερη ώρα του δεύτερου δεκαήμερου Αυγούστου στον ΔΑΑ.



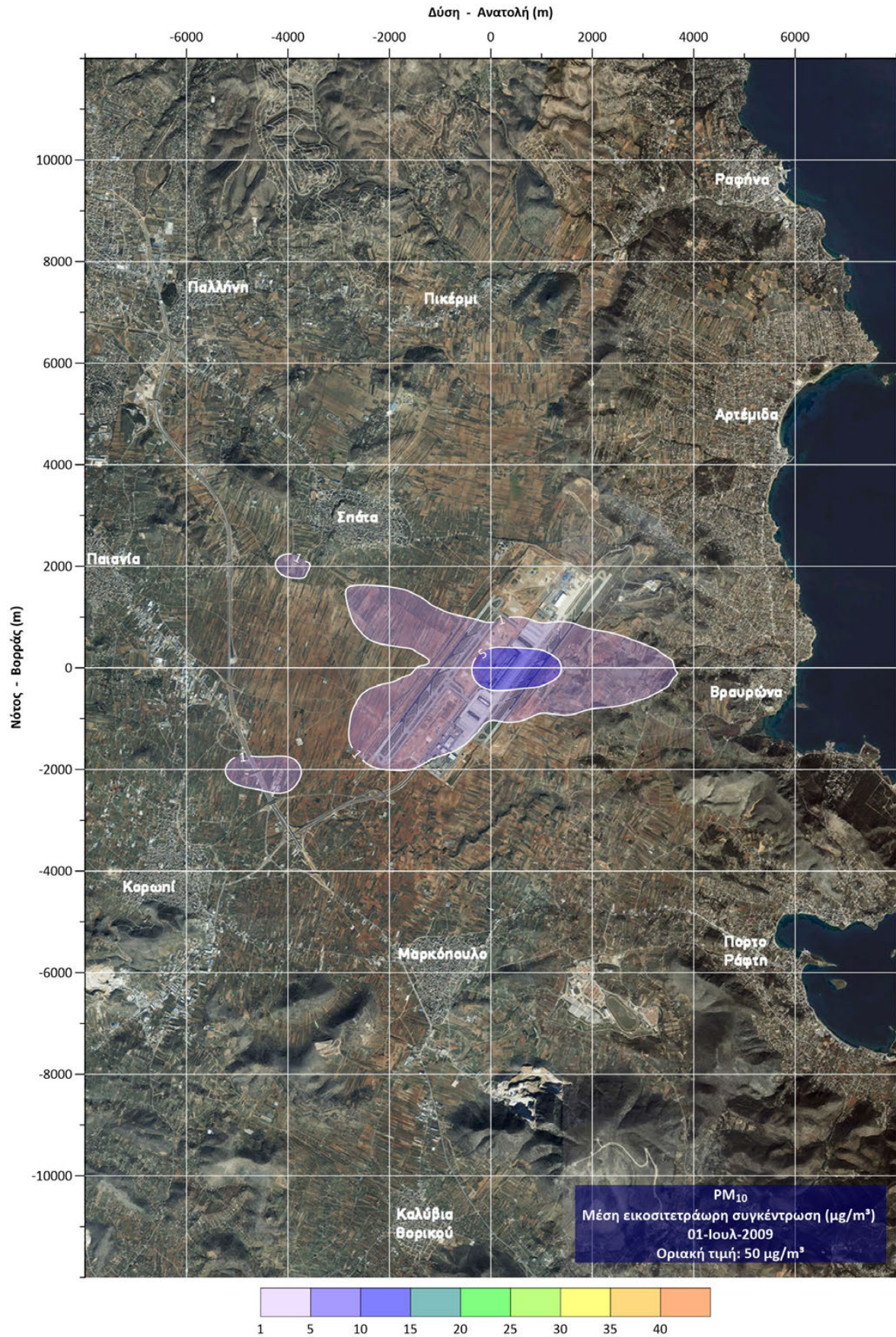
Γράφημα 25: Συγκέντρωση NO_x στη δυσμενέστερη ώρα του τρίτου δεκαημέρου του Αυγούστου στον ΔΑΑ.



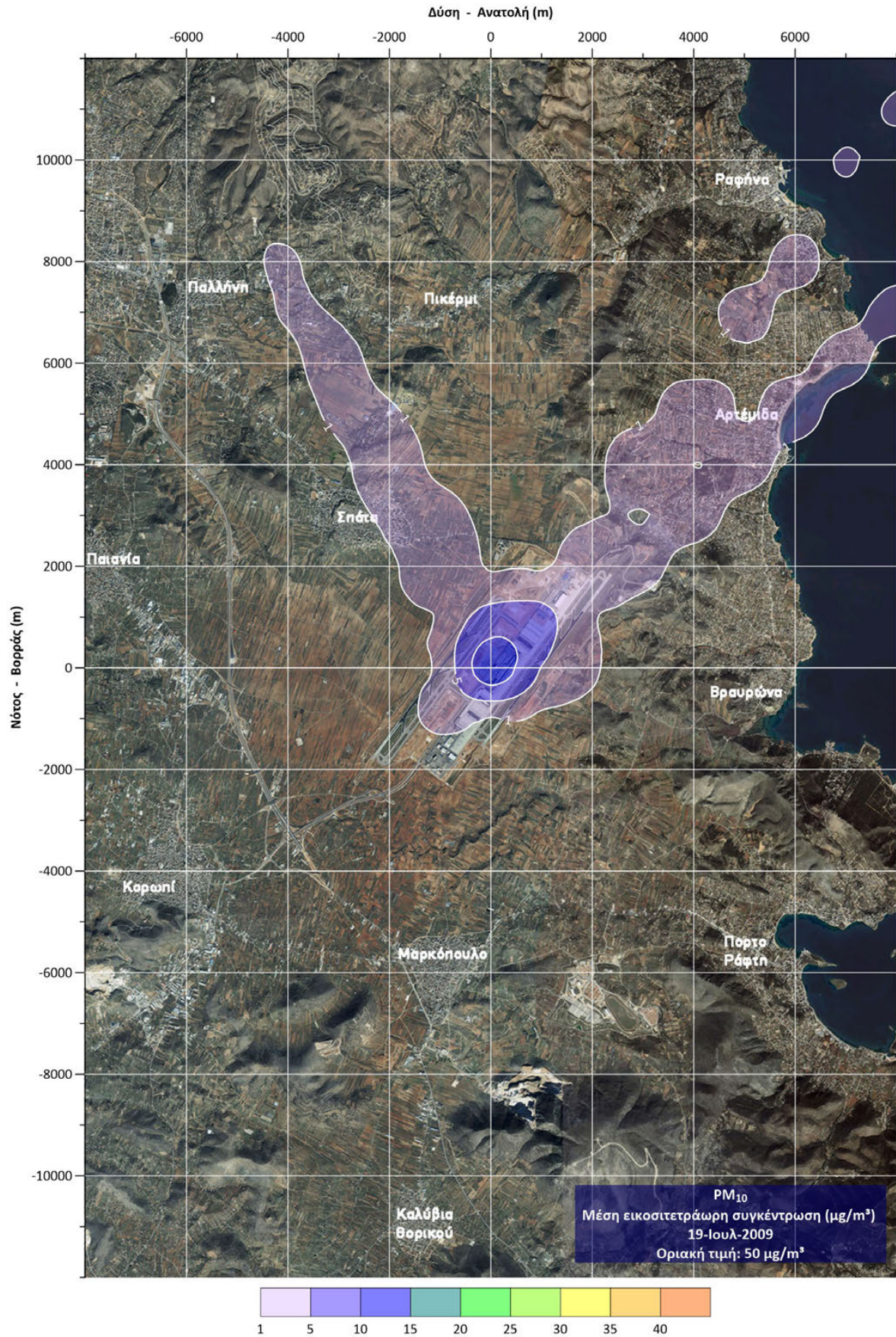
Γράφημα 26: Μέση ετήσια συγκέντρωση NO_x στη διάρκεια του 2009 στον ΔΑΑ.



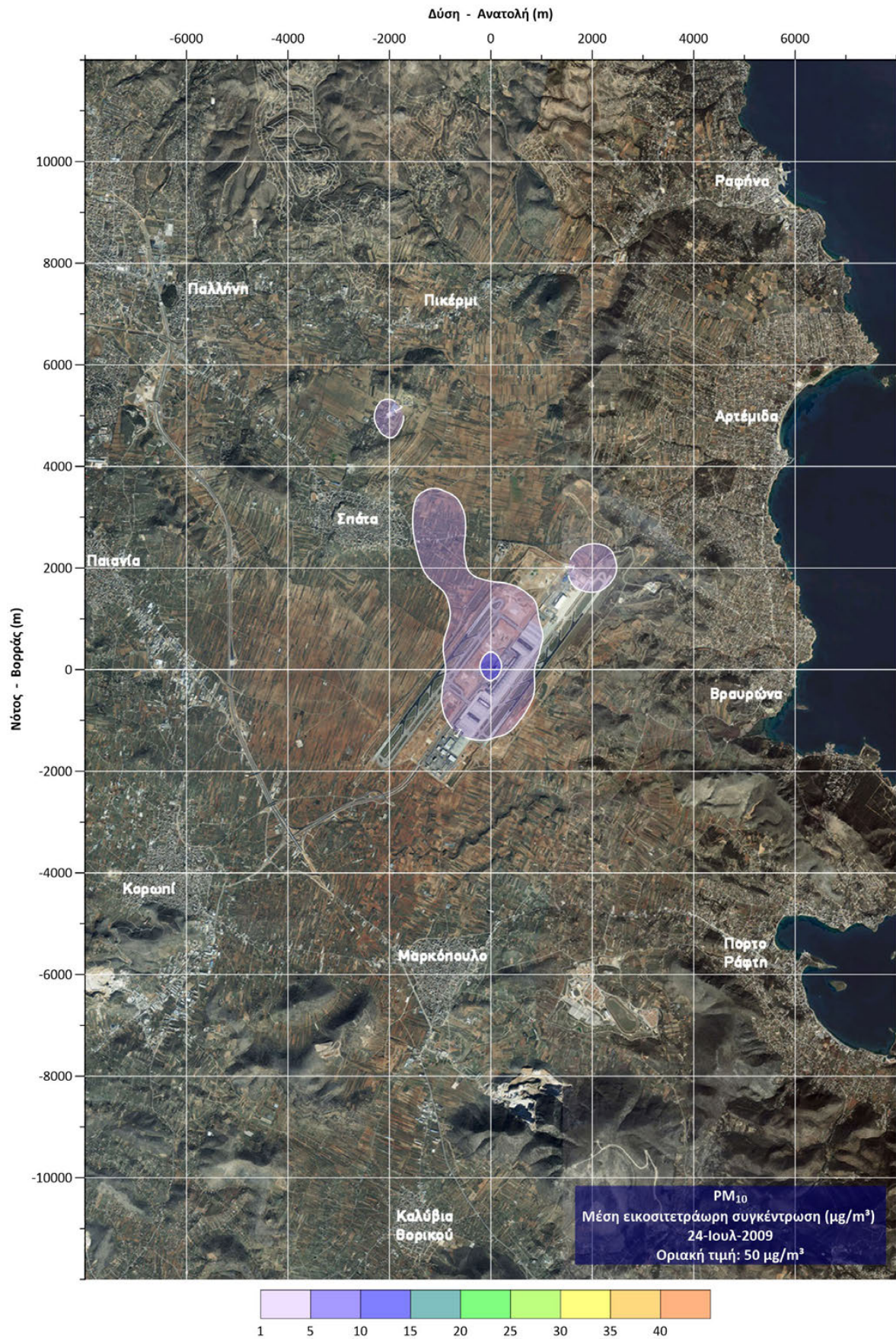
Γράφημα 27: Μέση ετήσια συγκέντρωση PM_{2.5} στη διάρκεια του 2009 στον ΔΑΑ.



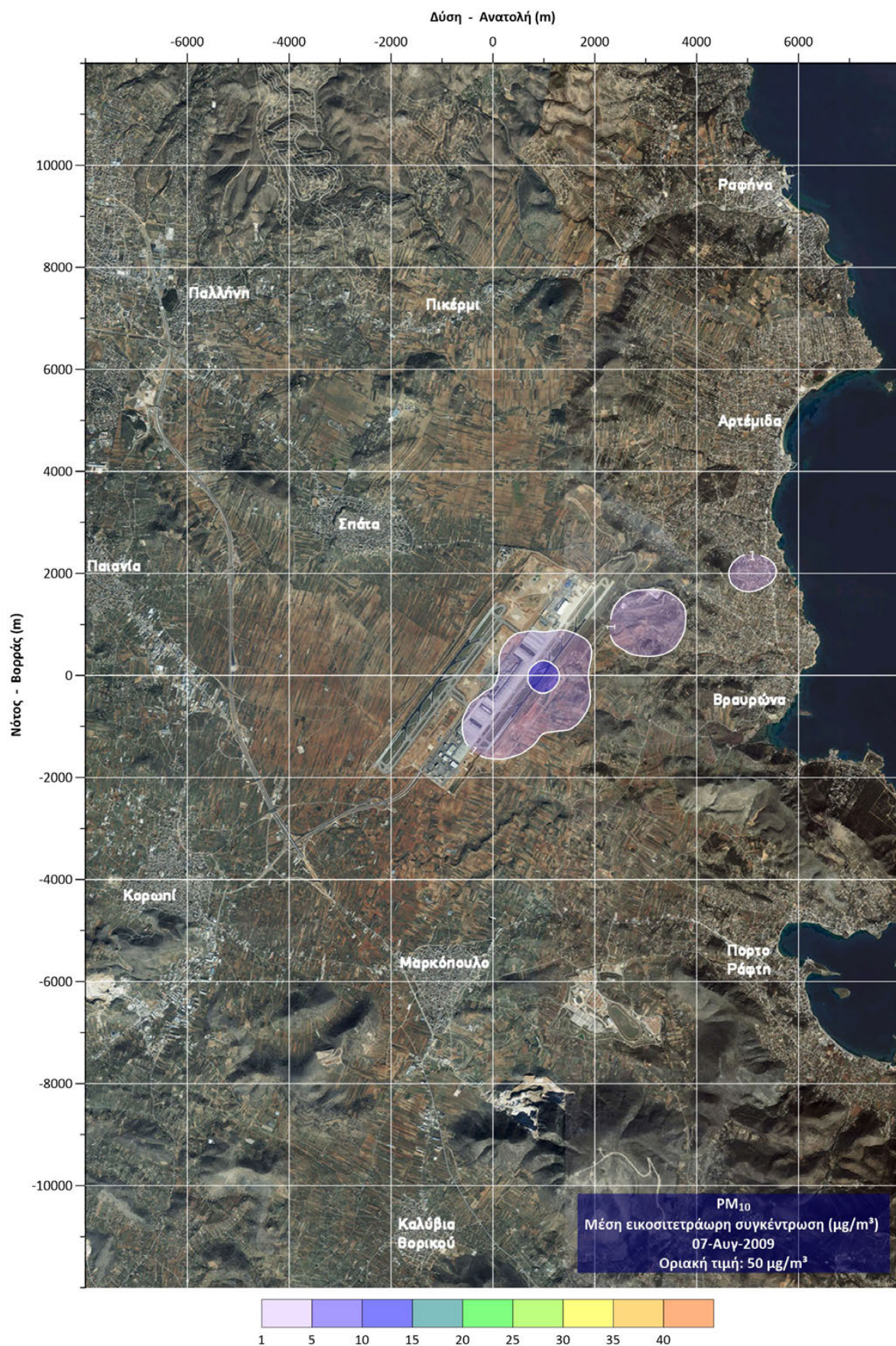
Γράφημα 28: Συγκέντρωση PM₁₀ στο δυσμενέστερο 24ωρο του πρώτου δεκαημέρου Ιουλίου στον ΔΑΑ.



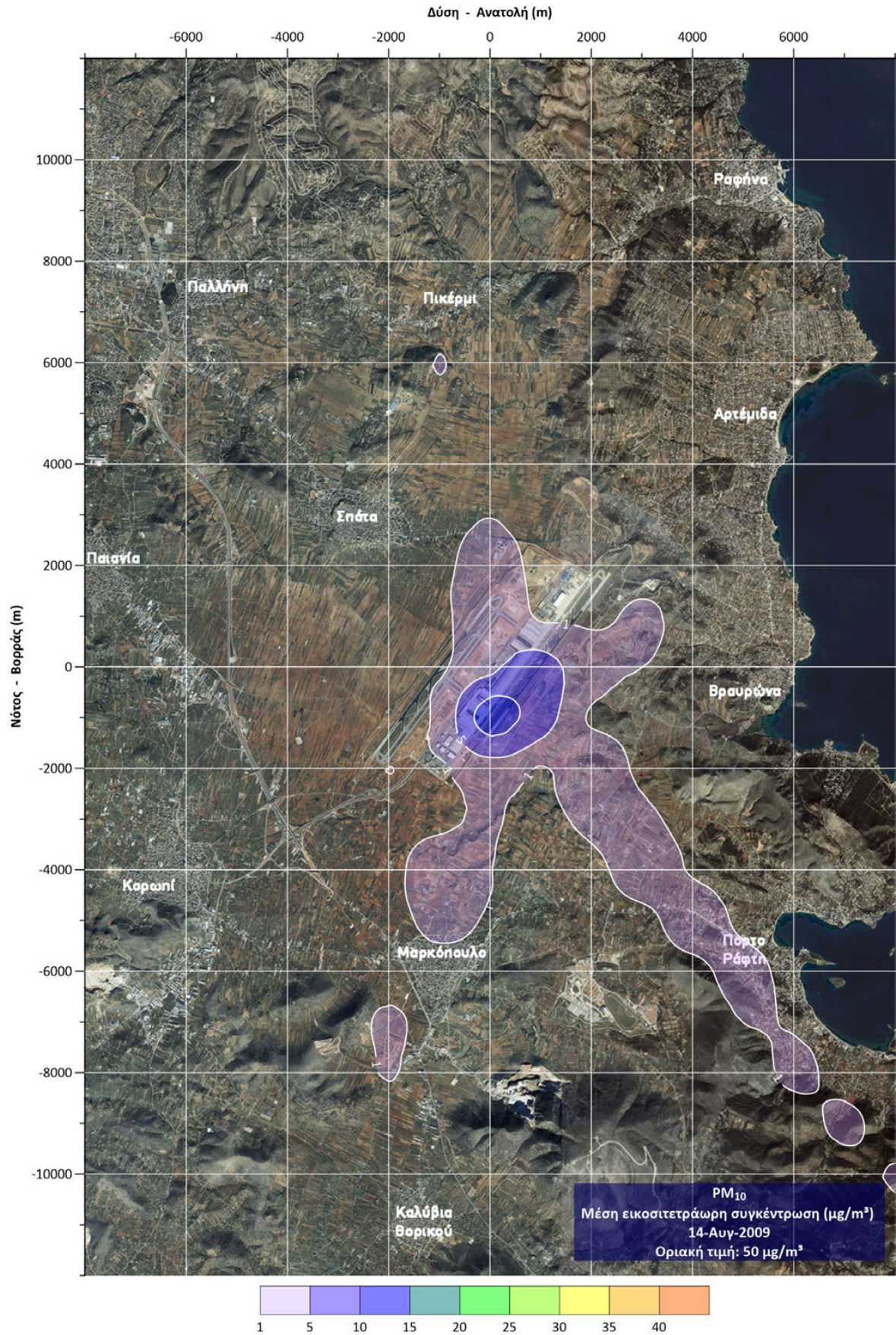
Γράφημα 29: Συγκέντρωση PM₁₀ στο δυσμενέστερο 24ωρο του δεύτερου δεκαήμερου Ιουλίου στον ΔΑΑ.



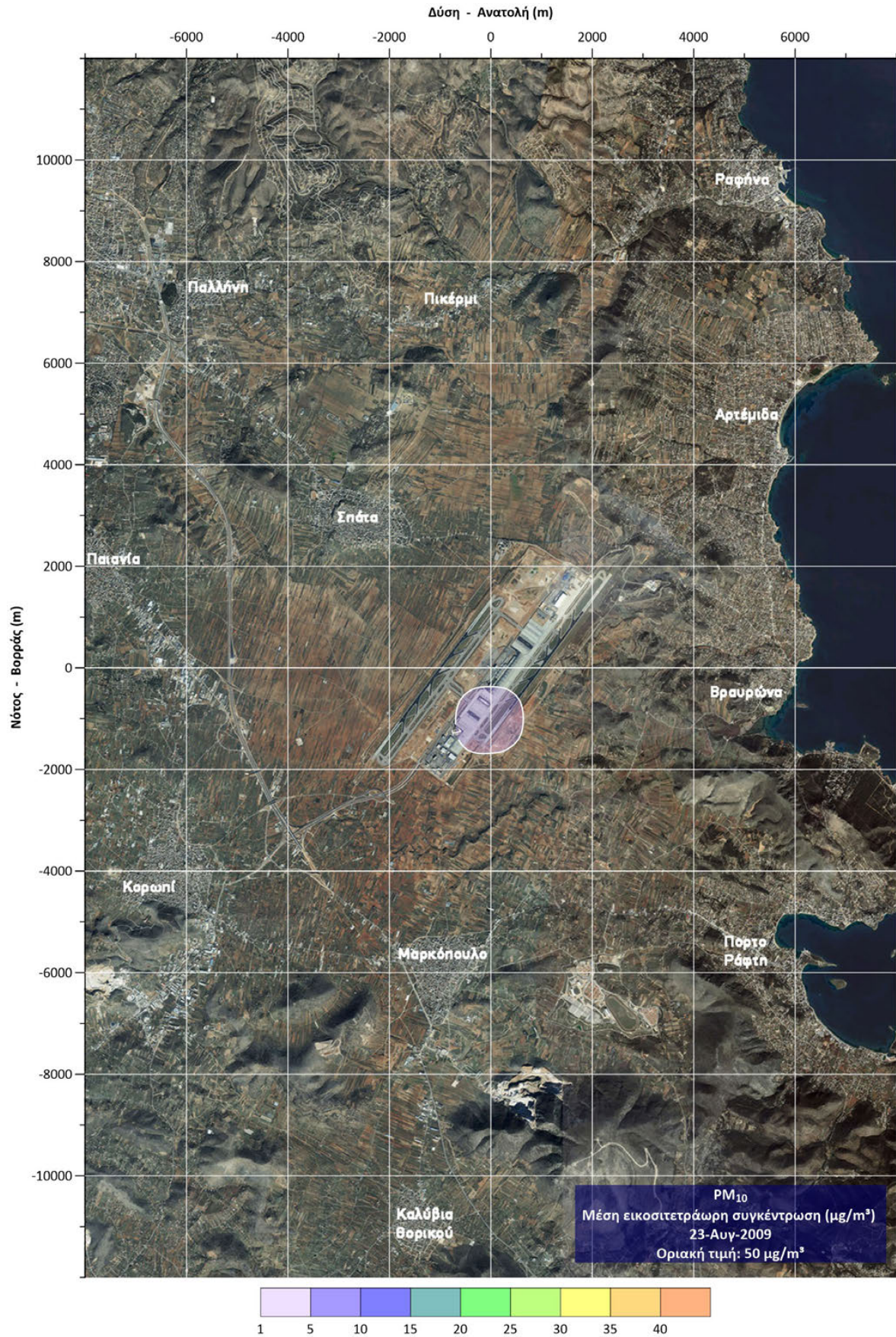
Γράφημα 30: Συγκέντρωση PM₁₀ στο δυσμενέστερο 24ωρο του τρίτου δεκαημέρου Ιουλίου στον ΔΑΑ.



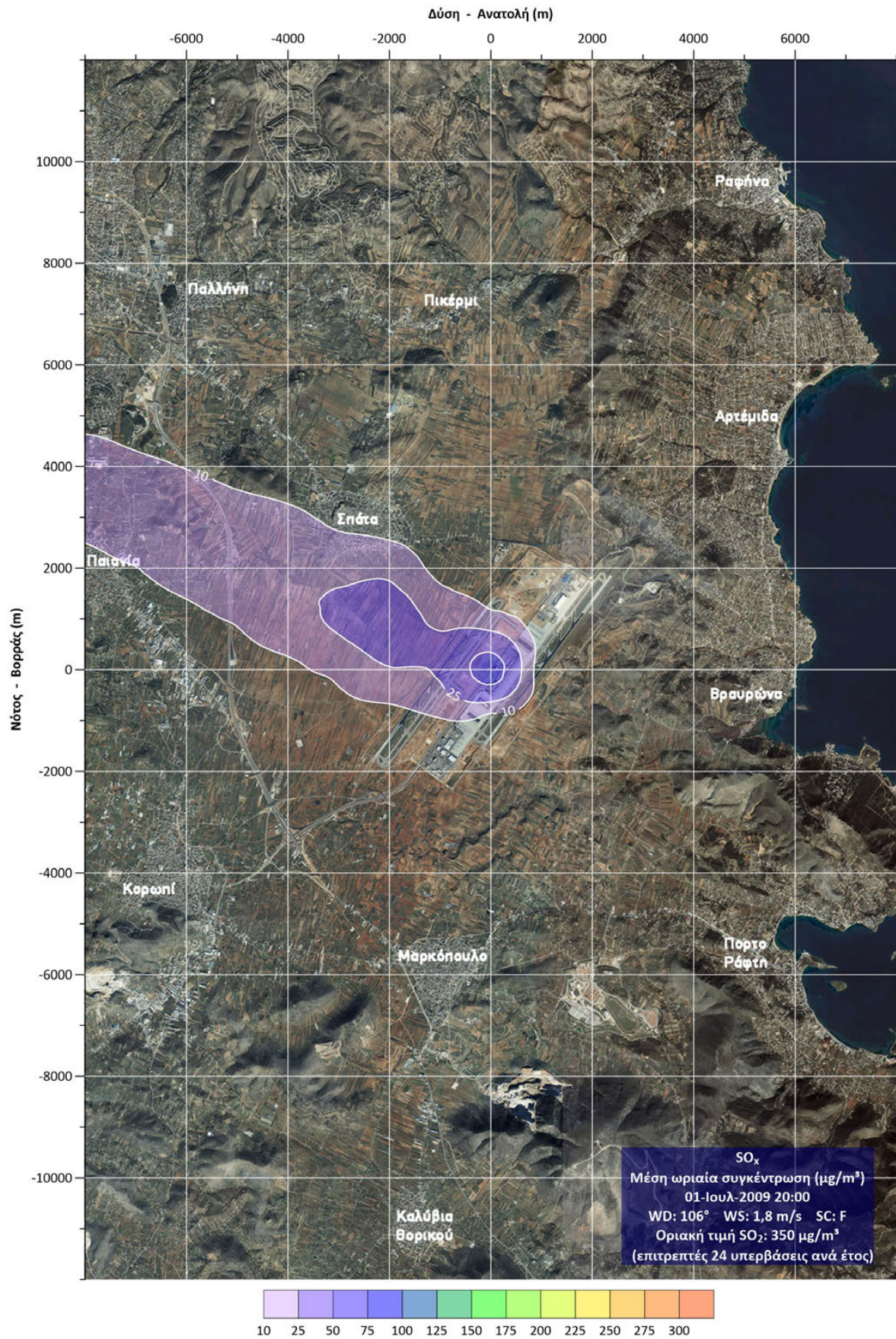
Γράφημα 31: Συγκέντρωση PM₁₀ στο δυσμενέστερο 24ωρο του πρώτου δεκαημέρου Αυγούστου στον ΔΑΑ.



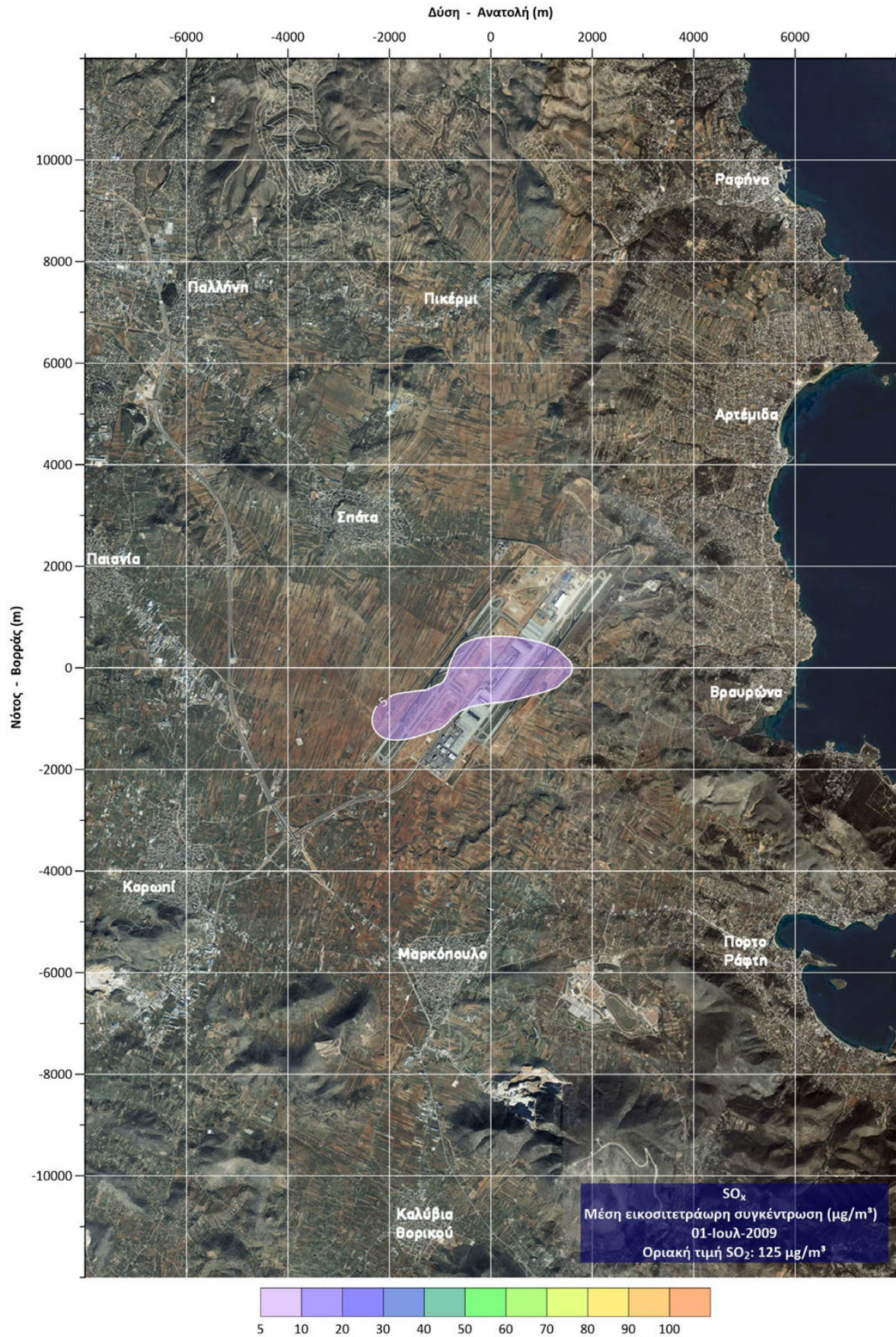
Γράφημα 32: Συγκέντρωση PM₁₀ στο δυσμενέστερο 24ωρο του δεύτερου δεκαημέρου Αυγούστου στον ΔΑΑ.



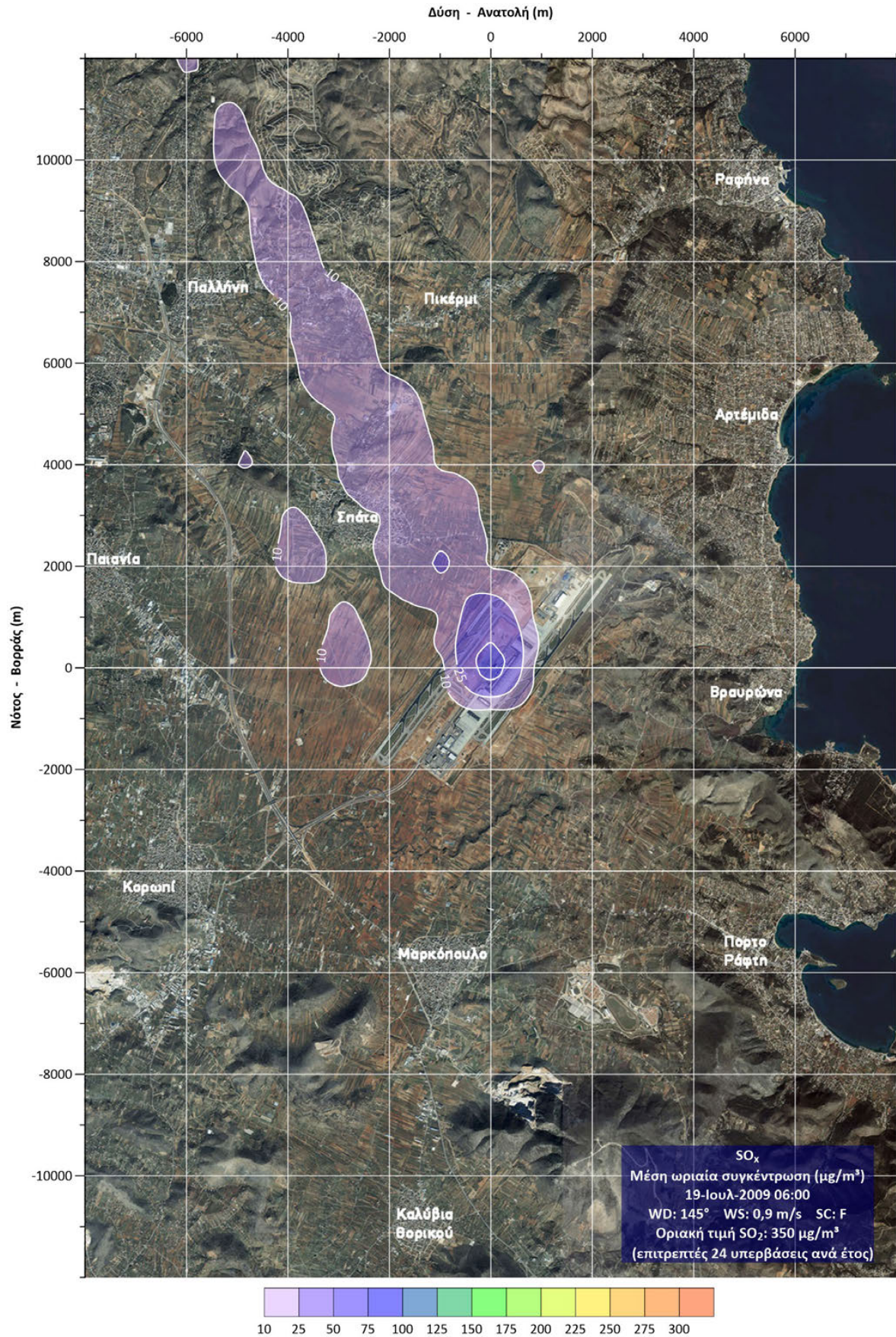
Γράφημα 33: Συγκέντρωση PM₁₀ στο δυσμενέστερο 24ωρο του τρίτου δεκαημέρου Αυγούστου στον ΔΑΑ.



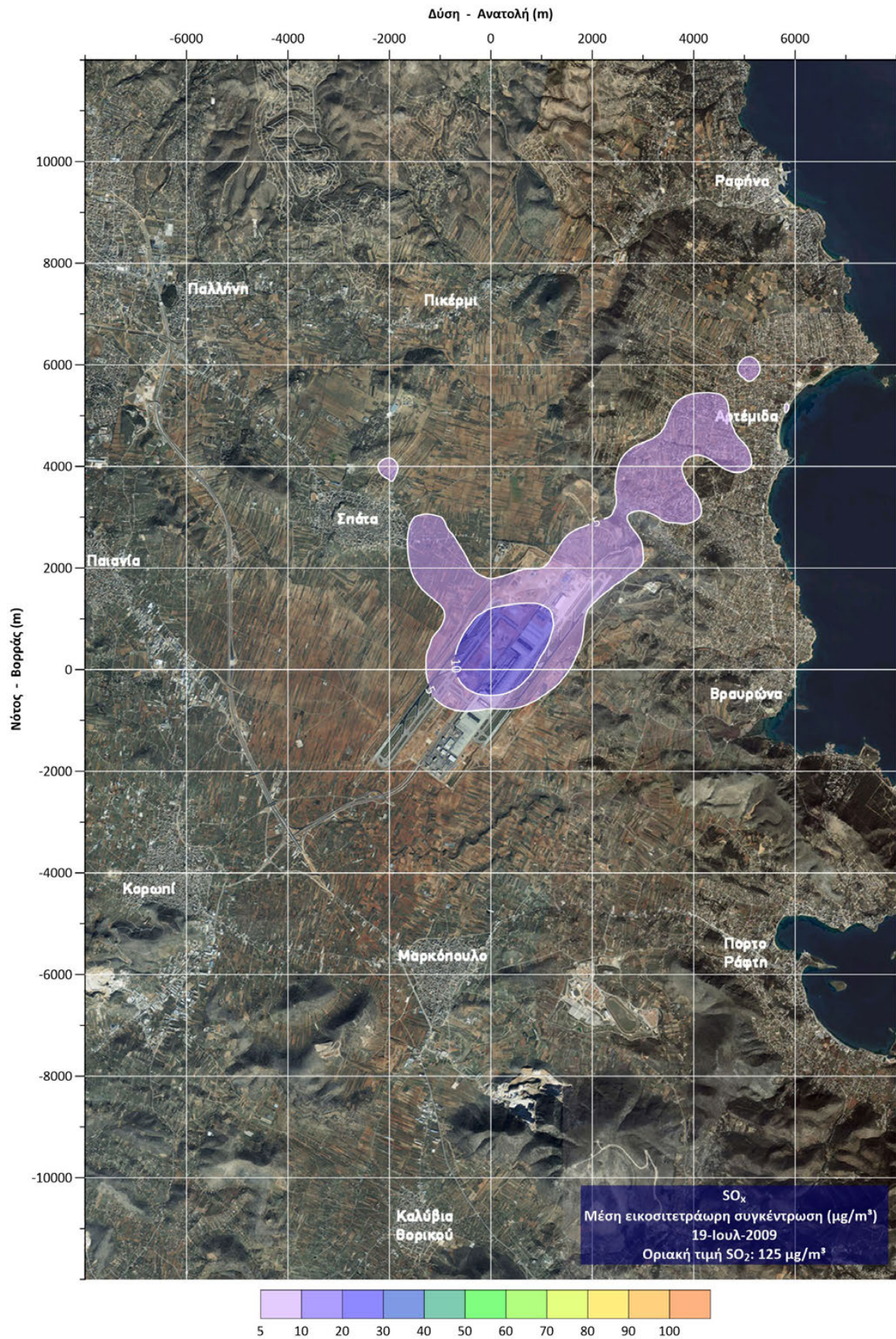
Γράφημα 34: Συγκέντρωση SO_x στη δυσμενέστερη ώρα του πρώτου δεκαημέρου Ιουλίου στον ΔΑΑ.



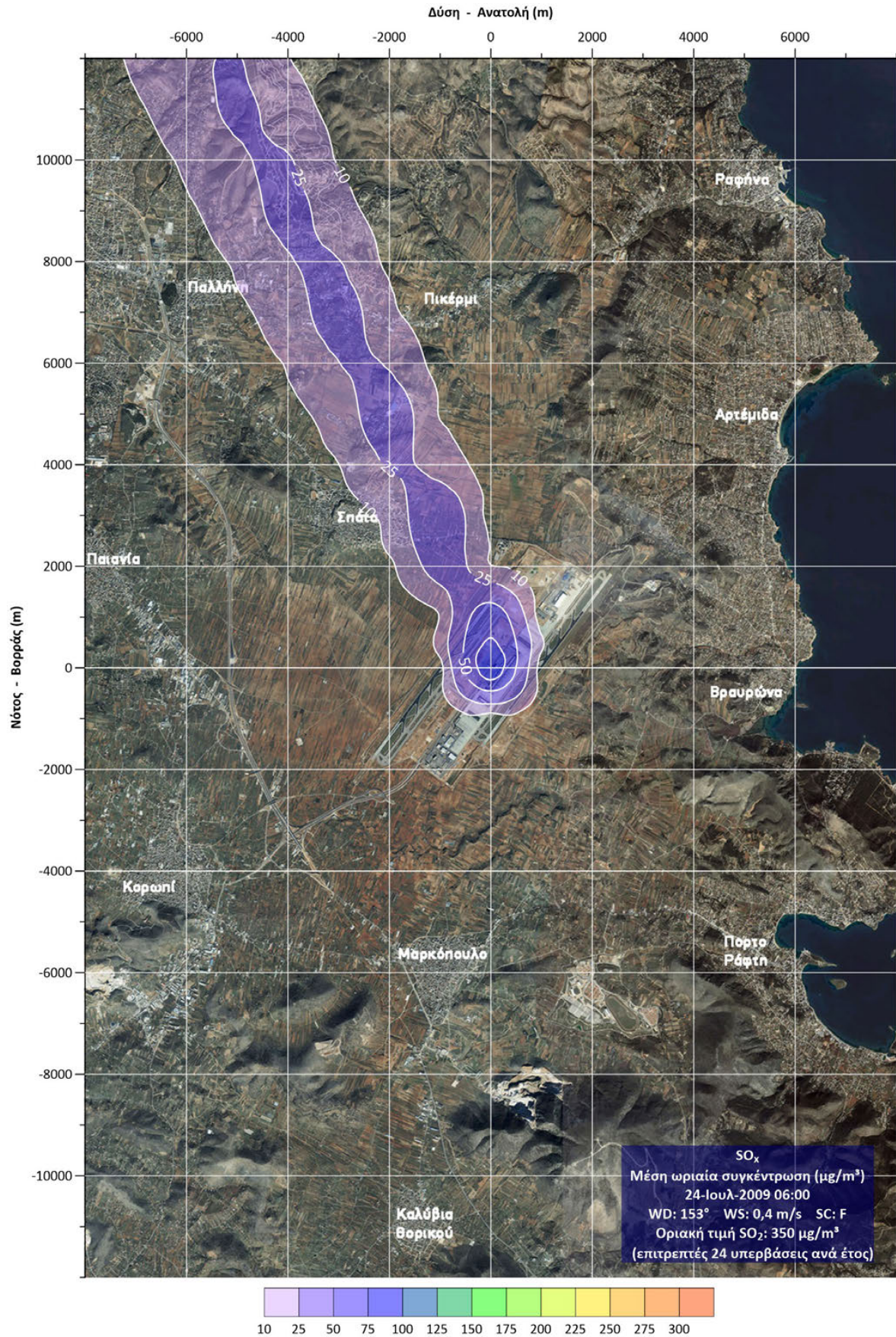
Γράφημα 35: Συγκέντρωση SO_x στο δυσμενέστερο 24ωρο του πρώτου δεκαημέρου Ιουλίου στον ΔΑΑ.



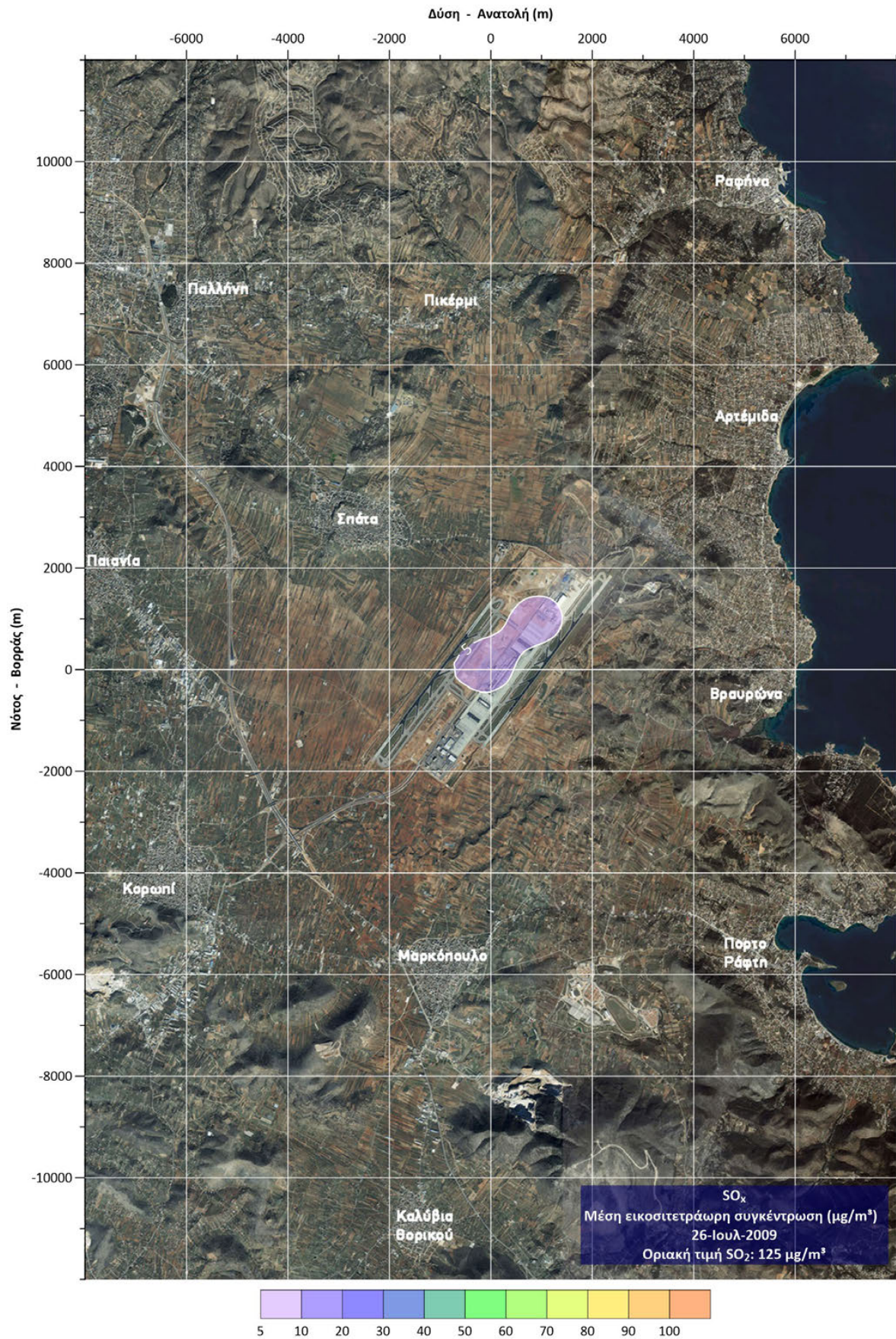
Γράφημα 36: Συγκέντρωση SO_x στη δυσμενέστερη ώρα του δεύτερου δεκαημέρου Ιουλίου στον ΔΑΑ.



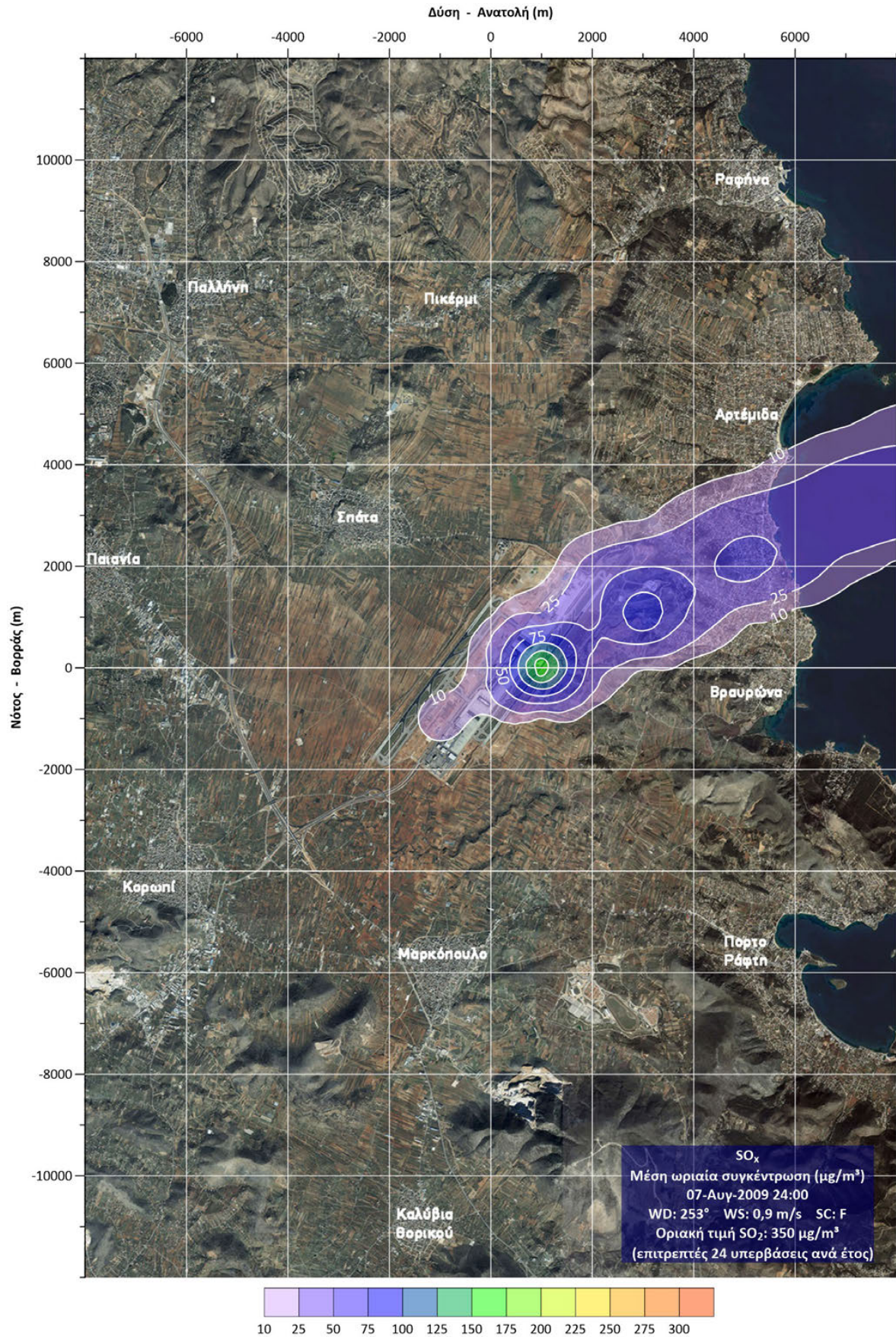
Γράφημα 37: Συγκέντρωση SO_x στο δυσμενέστερο 24ωρο του δεύτερου δεκαημέρου Ιουλίου στον ΔΑΑ.



Γράφημα 38: Συγκέντρωση SO_x στη δυσμενέστερη ώρα του τρίτου δεκαημέρου Ιουλίου στον ΔΑΑ.



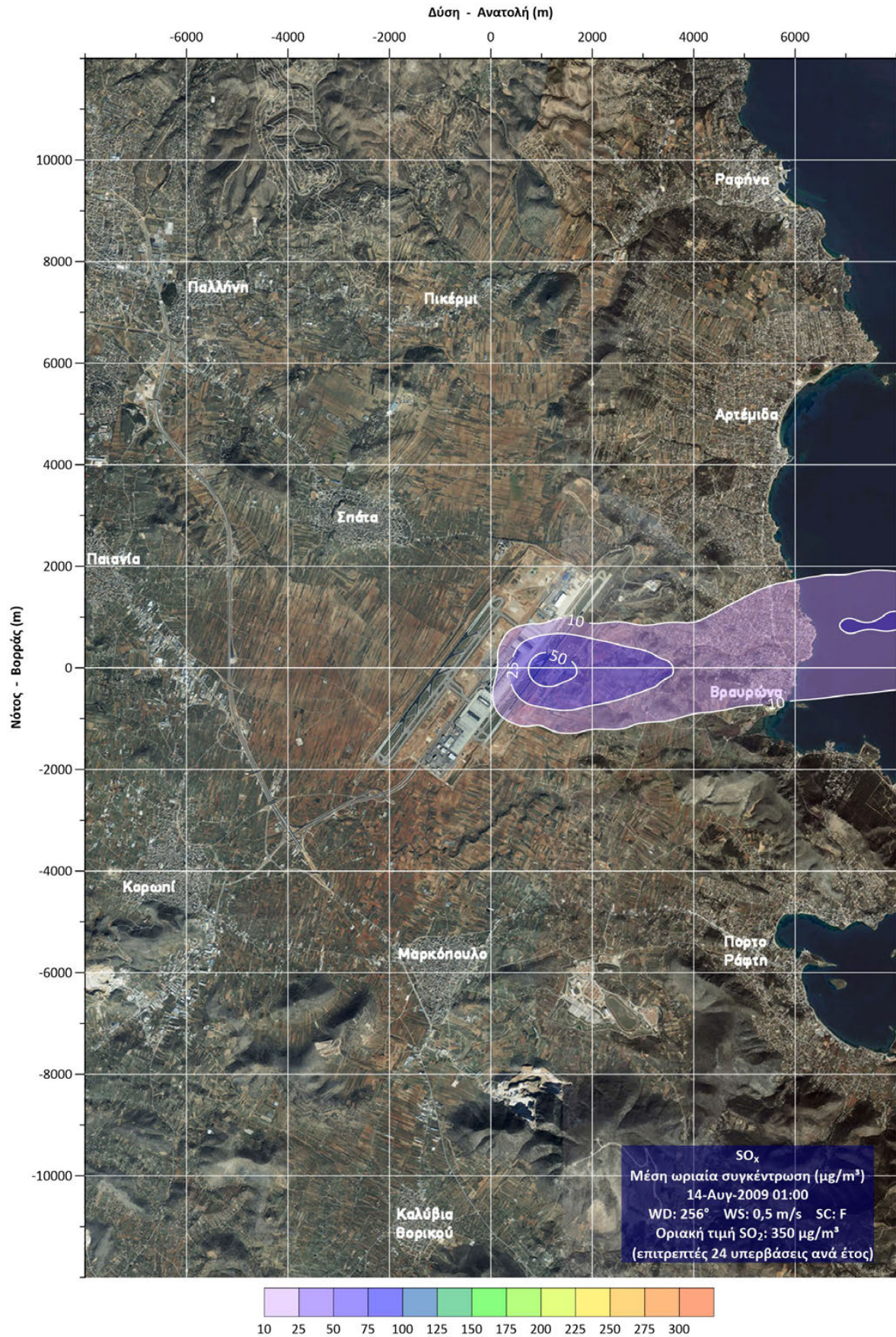
Γράφημα 39: Συγκέντρωση SO_x στο δυσμενέστερο 24ωρο του τρίτου δεκαημέρου του Ιουλίου στον ΔΑΑ.



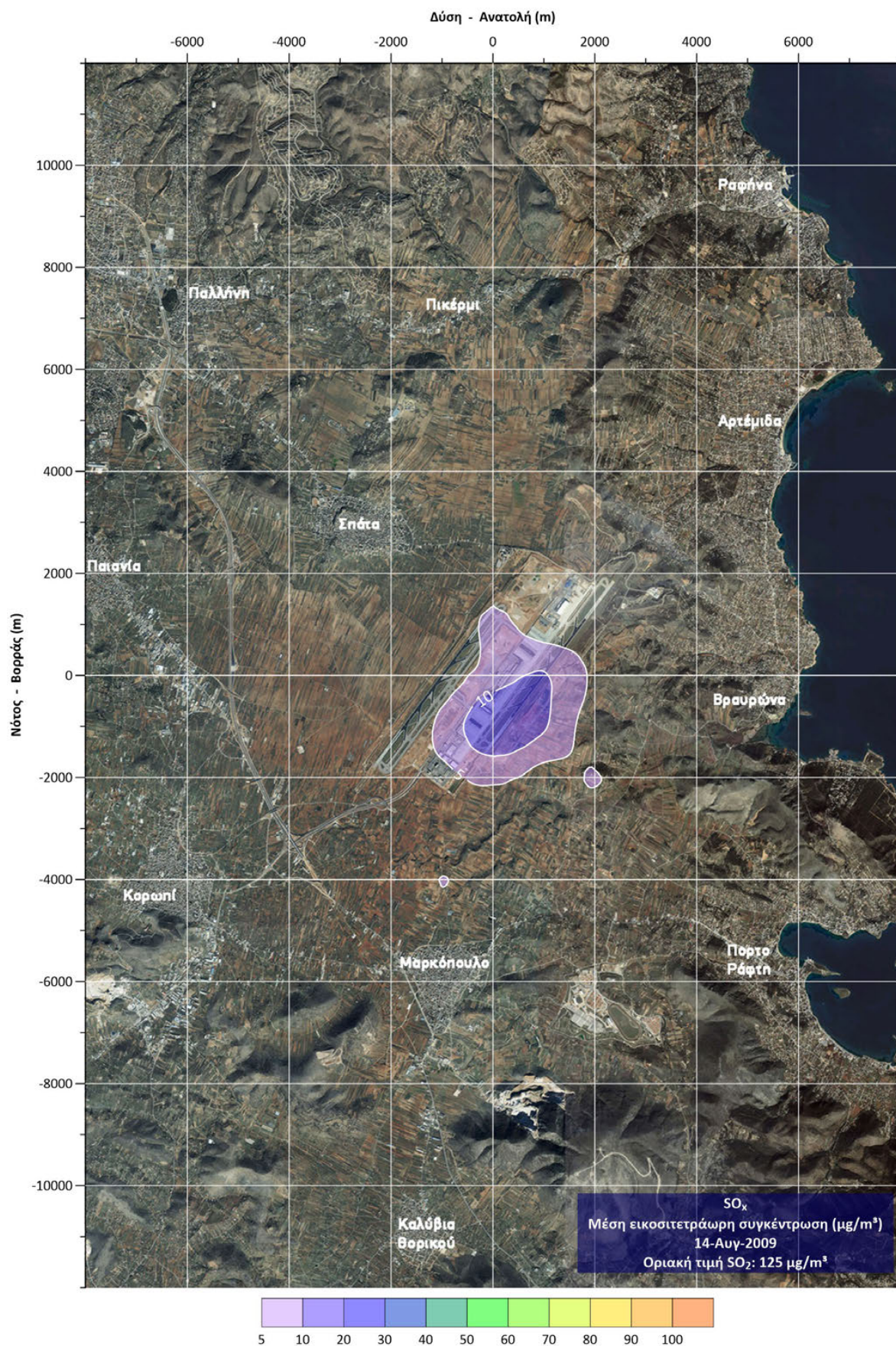
Γράφημα 40: Συγκέντρωση SO_x στη δυσμενέστερη ώρα του πρώτου δεκαημέρου Αυγούστου στον ΔΑΑ.



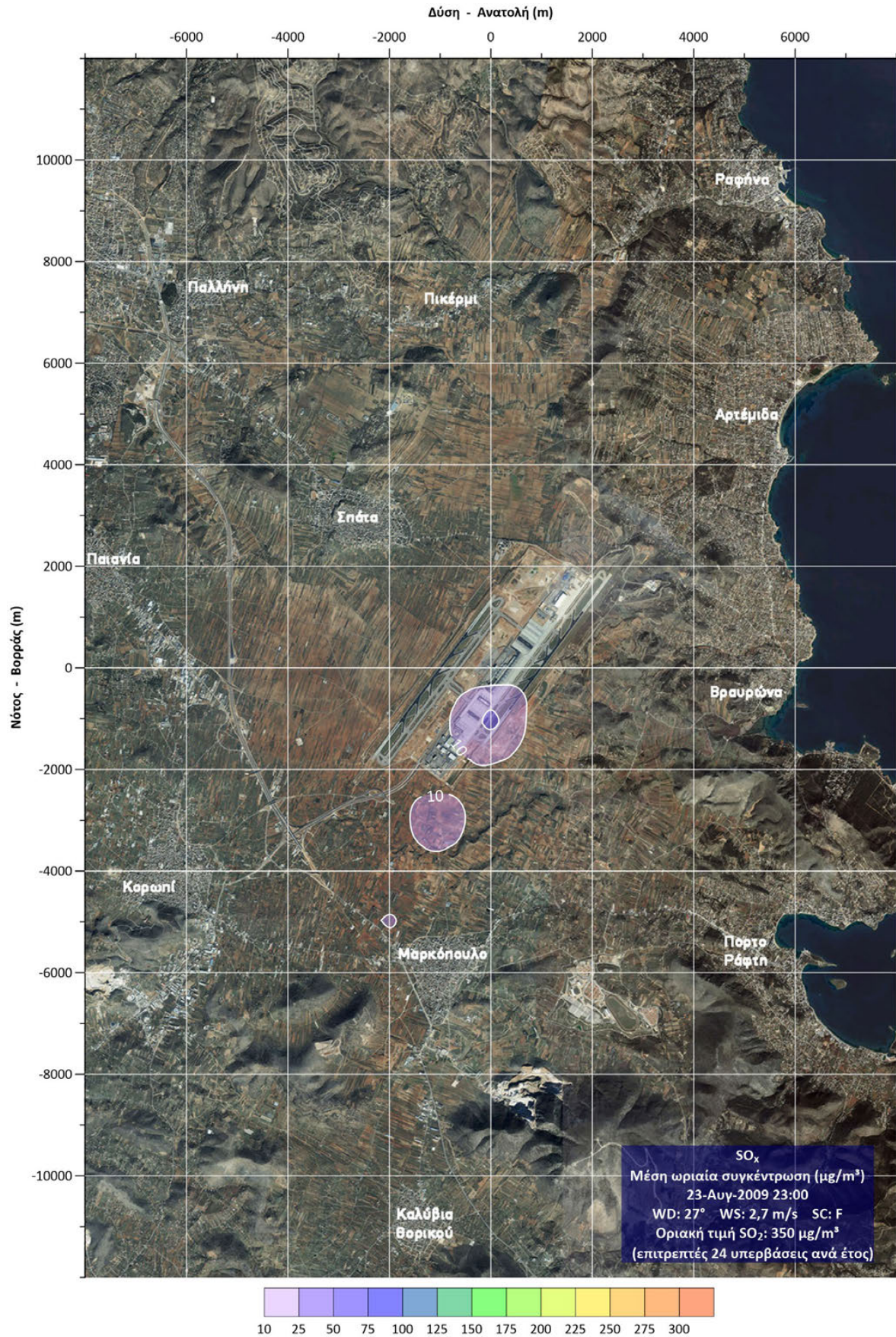
Γράφημα 41: Συγκέντρωση SO_x στο δυσμενέστερο 24ωρο του πρώτου δεκαήμερου Αυγούστου στον ΔΑΑ.



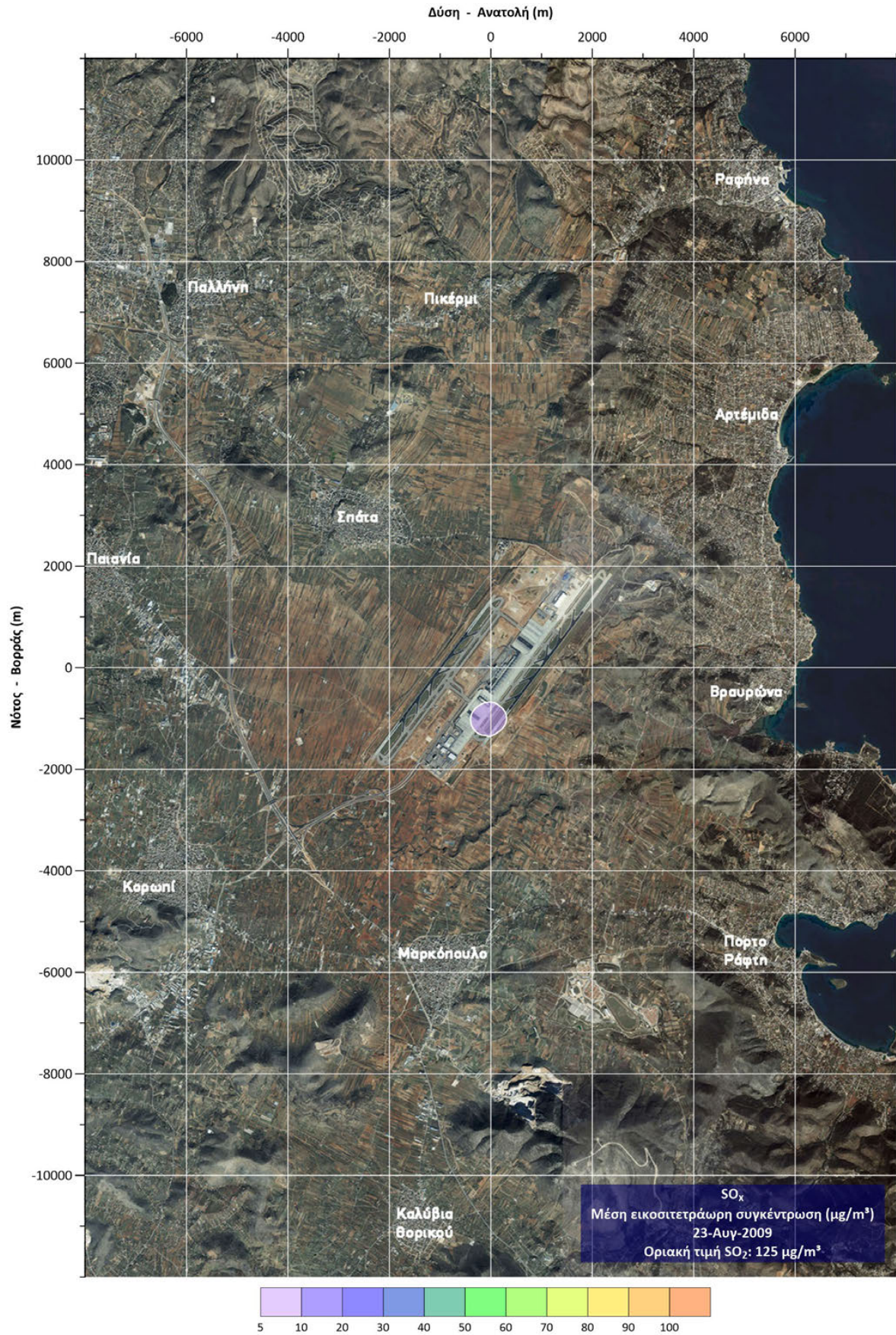
Γράφημα 42: Συγκέντρωση SO_x στη δυσμενέστερη ώρα του δεύτερου δεκαημέρου Αυγούστου στον ΔΑΑ.



Γράφημα 43: Συγκέντρωση SO_x στο δυσμενέστερο 24ωρο του δεύτερου δεκαημέρου Αυγούστου στον ΔΑΑ.



Γράφημα 44: Συγκέντρωση SO_x στη δυσμενέστερη ώρα του τρίτου δεκαημέρου Αυγούστου στον ΔΑΑ.



Γράφημα 45: Συγκέντρωση SO_x στο δυσμενέστερο 24ωρο του τρίτου δεκαημέρου Αυγούστου στον ΔΑΑ.

Στα παραπάνω γραφήματα αποτυπώθηκαν τα αποτελέσματα των υπολογισμών συγκέντρωσης αέριων ρύπων στην περιοχή του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών, σε χρονική κλίμακα όμοια με αυτή που έχει υιοθετηθεί στη θέσπιση ορίων, δηλαδή μέση τιμή οκταώρου για το CO, μέση τιμή ώρας και μέση τιμή έτους για τα NO_x, μέση τιμή έτους για τα PM_{2.5}, μέση τιμή εικοσιτετραώρου για τα PM₁₀, και μέση τιμή ώρας και εικοσιτετραώρου για τα SO_x.

Στα γραφήματα παρουσιάστηκαν οι δυσμενέστερες ανά δεκαήμερο περιπτώσεις του διμήνου Ιουλίου - Αυγούστου 2009. Υπενθυμίζεται ότι το 2009 επελέγη ως έτος αναφοράς επειδή στη διάρκειά του καταγράφηκε ο υψηλότερος αριθμός αεροπορικών κινήσεων στα μεγάλα αεροδρόμια της χώρας, ο οποίος έως και το 2016 δεν έχει ξεπεραστεί, ενώ το δίμηνο Ιουλίου - Αυγούστου αποτελεί το διάστημα του έτους στο οποίο κορυφώνεται ο αριθμός των αεροπορικών κινήσεων. Συνεπώς, τα παραπάνω γραφήματα απεικονίζουν τις δυσμενέστερες ρεαλιστικά αναμενόμενες καταστάσεις διασποράς αέριων ρύπων στην περιοχή του ΔΑΑ, οι οποίες πάντως αναμένεται να εμφανίζονται σπάνια, ενώ η συνήθης κατάσταση αναμένεται να είναι σαφώς ευνοϊκότερη.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων που αποτυπώθηκαν στα παραπάνω γραφήματα, σε ότι αφορά τόσο τη σύγκρισή τους με τις ισχύουσες οριακές τιμές όσο και την αντιπαραβολή τους με τις μετρήσεις πεδίου, παρουσιάζεται στις ενότητες 6.2.4 και 6.4 του επόμενου κεφαλαίου.

5.3. Αερολιμένας Θεσσαλονίκης

Ο Αερολιμένας Θεσσαλονίκης «Μακεδονία» βρίσκεται σε απόσταση ~15 km νότια του κέντρου της πόλης, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 4: Η θέση του αερολιμένα Θεσσαλονίκης σε σχέση με την πόλη.

Οι κινήσεις αεροσκαφών που εξυπηρετεί ο αερολιμένας Θεσσαλονίκης κυμαίνονται στο επίπεδο των $5 \cdot 10^4$ ετησίως και αντιστοιχούν στο 10,9% του μέσου ετήσιου αριθμού πτήσεων σε όλη την Ελλάδα. Από την άποψη αυτή ο αερολιμένας Θεσσαλονίκης κατατάσσεται στη δεύτερη θέση των ελληνικών αερολιμένων, μετά τον ΔΑΑ. Ο αριθμός των επιβατών του, της τάξεως $4,1 \cdot 10^6$ ετησίως (~10,4% του συνόλου επιβατών που διακινείται στα ελληνικά αεροδρόμια), τον κατατάσσουν τρίτο μεταξύ των ελληνικών αερολιμένων.

5.3.1. Διάταξη

Τα κυριότερα στοιχεία της γεωμετρίας του αερολιμένα Θεσσαλονίκης είναι:

- Οι δύο διασταυρούμενοι διάδρομοι αεροσκαφών, ο παλαιός 10-24, που τώρα τελεί υπό επέκταση προς τη θάλασσα, και ο νεότερος 16-34. Το μήκος και των δύο διαδρόμων είναι 2.400 m.
- Οι δύο βασικοί τροχόδρομοι, παράλληλοι στους παραπάνω διαδρόμους.
- Η βασική πύλη των αεροσκαφών, η οποία αποτελείται από την έκταση μπροστά από τον κεντρικό αεροσταθμό, όπου πραγματοποιείται η πλειονότητα των επίγειων διαδικασιών πριν από την αναχώρηση και μετά την άφιξη των σκαφών.
- Ο κεντρικός αεροσταθμός και ο πύργος ελέγχου

Η διάταξη των στοιχείων αυτών, όπως εισήχθησαν στο EDMS παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.

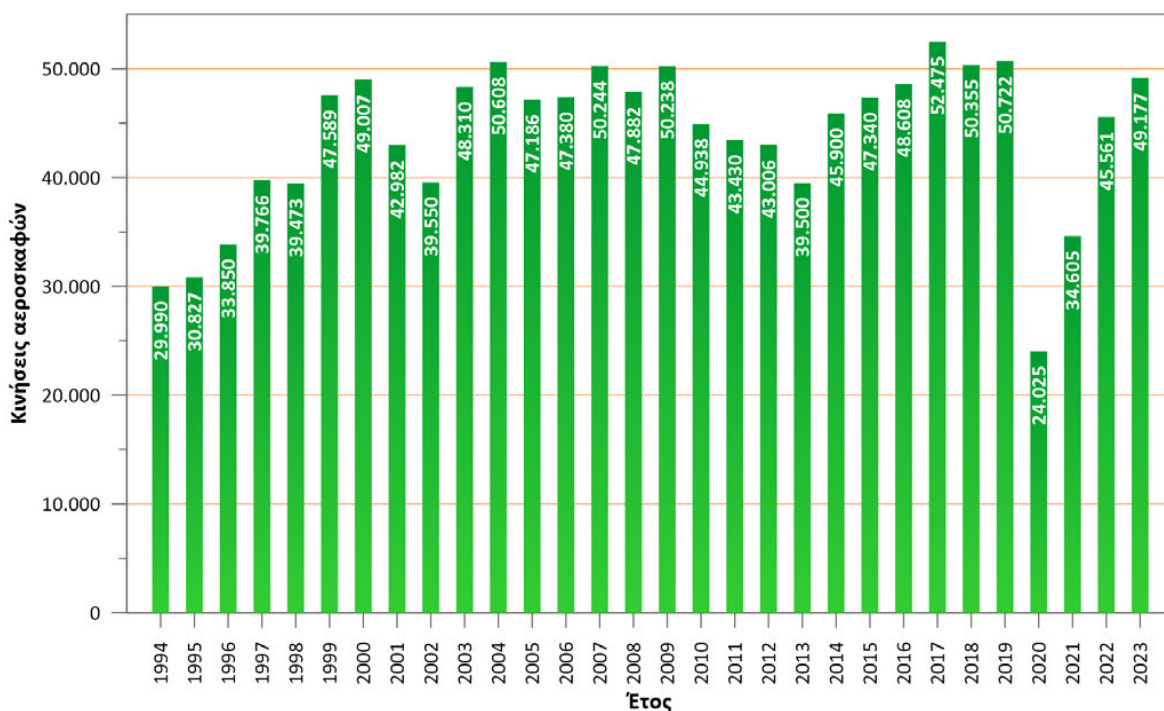


Σχήμα 5: Η διάταξη του αερολιμένα Θεσσαλονίκης εισηγμένη στο EDMS.

Στην επάνω δεξιά εικόνα (α) φαίνονται τα γεωμετρικά στοιχεία του αερολιμένα Θεσσαλονίκης που σχεδιάστηκαν στο EDMS, ενώ στην κάτω αριστερή (β) έχει προστεθεί ως υπόβαθρο η αεροφωτογραφία του έργου από το Google Earth Plus. Με μαύρο χρώμα φαίνονται οι διάδρομοι, με γκρι οι τροχόδρομοι, με πράσινο η κύρια πύλη, με μπλε τα κτίρια και με ανοιχτό κόκκινο οι χώροι στάθμευσης. Ο χάρτης είναι προσανατολισμένος (βορράς προς τα πάνω).

5.3.2. Αεροπορική κυκλοφορία

Ο αριθμός των ετήσιων κινήσεων στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης κυμαίνεται στο επίπεδο των 50.000, με διακυμάνσεις που δεν μπορούν να θεωρηθούν μικρές. Η εξέλιξη του αριθμού ετήσιων κινήσεων από το 1994 και εξής παρουσιάζεται στο επόμενο γράφημα, τα στοιχεία του οποίου αντλήθηκαν από τα δεδομένα που δημοσιεύει η Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας.^[20,21]



Γράφημα 46: Εξέλιξη του ετήσιου αριθμού αεροσκαφών που εξυπηρετούνται από τον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.

Από το 1997 έως και το 2012, ο ετήσιος αριθμός κινήσεων κινείται στο διάστημα από 40 έως 50 χιλιάδες, με κορυφώσεις τα έτη 2000, 2004, 2007 και 2009· τα έτη 2010-2013 παρατηρείται συνεχής πτωτική τάση, η οποία αντιστρέφεται στη διετία 2014-2015, υπολειπόμενη ωστόσο των μεγίστων που παρατηρήθηκαν τα έτη 2007 και 2009. Το 2017 σημειώνεται νέο μέγιστο, ενώ μετά το 2019 μειώνονται δραματικά οι πτήσεις λόγω πανδημίας COVID-19, για να εκτιναχθούν το 2023 λίγο κάτω από το επίπεδο του 2009.

Με βάση τα παραπάνω μεγέθη, ένας ετήσιος αριθμός κινήσεων της τάξεως των 50.000 μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί μια ρεαλιστικά παραδοχή μεγίστου φόρτου για τους υπολογισμούς ποιότητας αέρα γύρω από τον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.

5.3.3. Μίγμα αεροσκαφών

Το μερίδιο των κινήσεων ανά τύπο αεροσκάφους διαμορφώθηκε με βάση τα στοιχεία που χορηγήθηκαν από την ΥΠΑ και παρουσιάζεται στον επόμενο πίνακα.

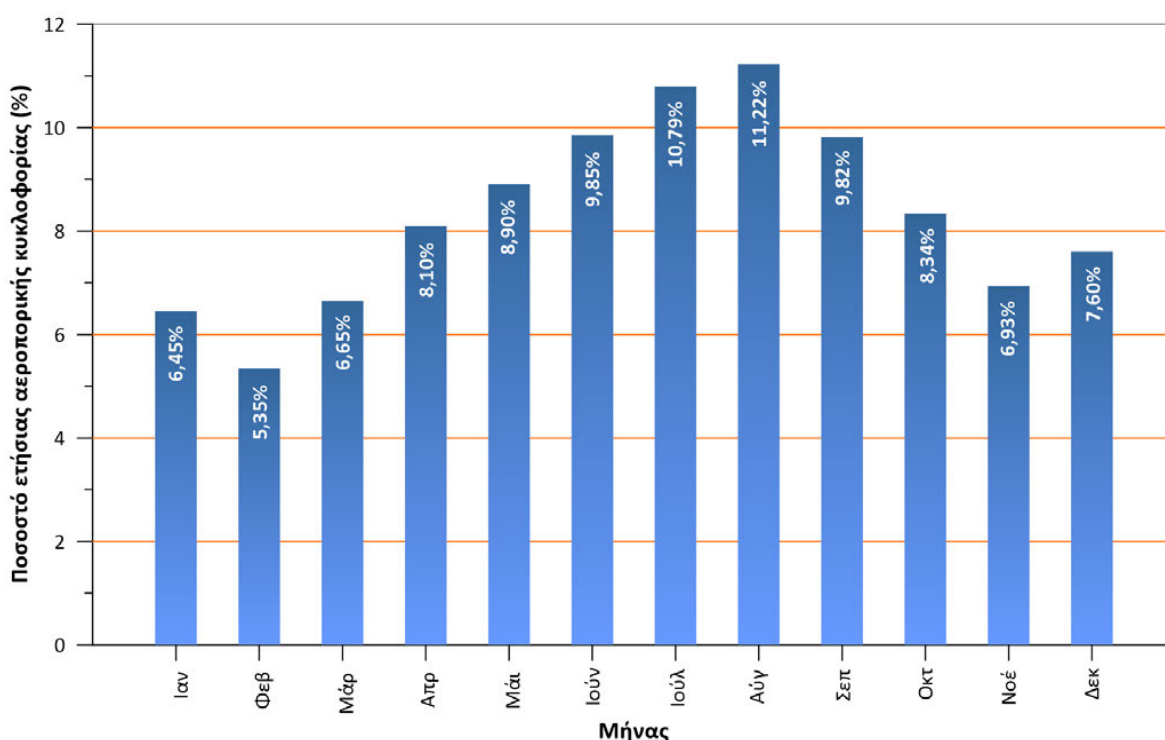
Πίνακας 4: Μίγμα αεροσκαφών στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.

Τύπος αεροσκάφους	Μέγεθος και πρόωση	Αριθμός πτήσεων	Ποσοστό
Airbus 319	Μεγάλο αεριωθούμενο	5.354	10,7%
Airbus 320	Μεγάλο αεριωθούμενο	14.664	29,3%
Airbus 321	Μεγάλο αεριωθούμενο	2.468	4,9%
Airbus 330	Βαρύ αεριωθούμενο	28	0,1%
ATR 42-300	Μικρό ελικοφόρο	4.474	8,9%
ATR 72-500	Μεγάλο ελικοφόρο	1.606	3,2%
Anro RJ-100	Μεγάλο αεριωθούμενο	1.742	3,5%
Boeing 737-300	Μεγάλο αεριωθούμενο	4.610	9,2%
Boeing 737-400	Μεγάλο αεριωθούμενο	6.864	13,7%
Boeing 747-300	Βαρύ αεριωθούμενο	162	0,3%
Boeing 757	Μεγάλο αεριωθούμενο	1.936	3,9%
Boeing 767-300	Βαρύ αεριωθούμενο	114	0,2%
Bombardier Dash8-400	Μεγάλο ελικοφόρο	1.256	2,5%
Canadair CRJ-900	Μεγάλο αεριωθούμενο	1.026	2,1%
Embraer ERJ-145	Μεγάλο αεριωθούμενο	2.166	4,3%
Jetstream JS-41	Μικρό αεριωθούμενο	858	1,7%
McDonnell Douglas MD-83	Μεγάλο αεριωθούμενο	506	1,0%
Tupolev 154	Μεγάλο αεριωθούμενο	166	0,3%
Σύνολο		50.000	100,0%

5.3.4. Κατανομές κινήσεων

Χωρικά, ο βασικός παράγοντας που επηρεάζει την κατανομή των αεροπορικών κινήσεων στους δύο διαδρόμους του αερολιμένα Θεσσαλονίκης – πέραν της εκάστοτε επικρατούσας κατεύθυνσης ανέμου – είναι η εκτέλεση των εργασιών επέκτασης του διαδρόμου 10-28 προς τη θάλασσα και η συνεπαγόμενη δυσκολία χρήσης του άκρου 10. Για την προσομοίωση αυτής της περιορισμένης χρήσης, θεωρήθηκε ότι το άκρο 10 χρησιμοποιείται μόνο για το 10% των κινήσεων, ενώ το υπόλοιπο 90% ισοκατανέμεται στα τρία άλλα άκρα.

Χρονικά, οι κινήσεις σε μηνιαία βάση, σύμφωνα με τα στοιχεία που δημοσιεύει η ΥΠΑ, εξελίχθηκαν κατά το ακόλουθο γράφημα.



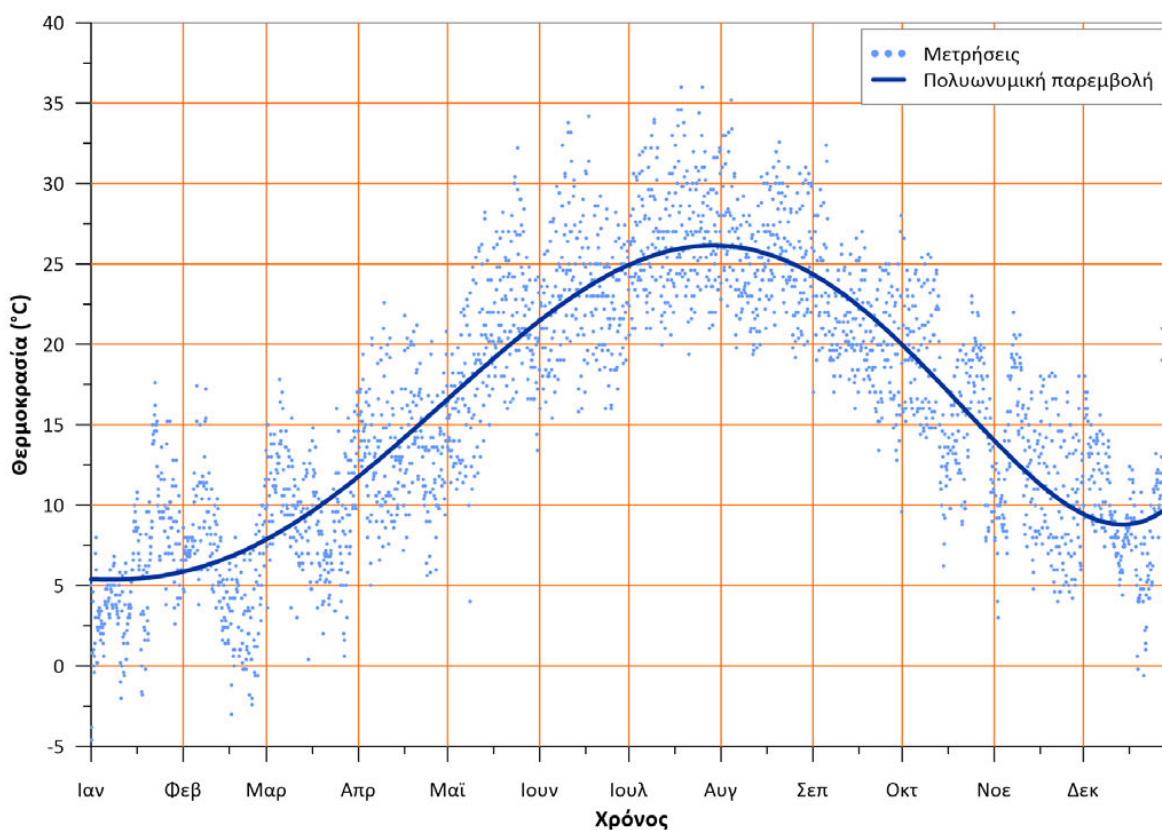
Γράφημα 47: Μηνιαία κατανομή των αεροπορικών κινήσεων στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.

Για την κατανομή των αεροπορικών κινήσεων στις μέρες της εβδομάδας και στις ώρες της ημέρας, δεν βρέθηκαν στοιχεία και επομένως είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν παραδοχές. Θεωρώντας ότι η αεροπορική κυκλοφορία στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης δεν θα παρουσιάζει μεγάλες διαφορές από αυτή του ΔΑΑ, προκύπτει ως εύλογη λύση η χρήση της εβδομαδιαίας και ημερήσιας κατανομής κινήσεων του αθηναϊκού αερολιμένα, οι οποίες παρουσιάστηκαν στο γράφημα 3 και στο γράφημα 4 αντίστοιχα.

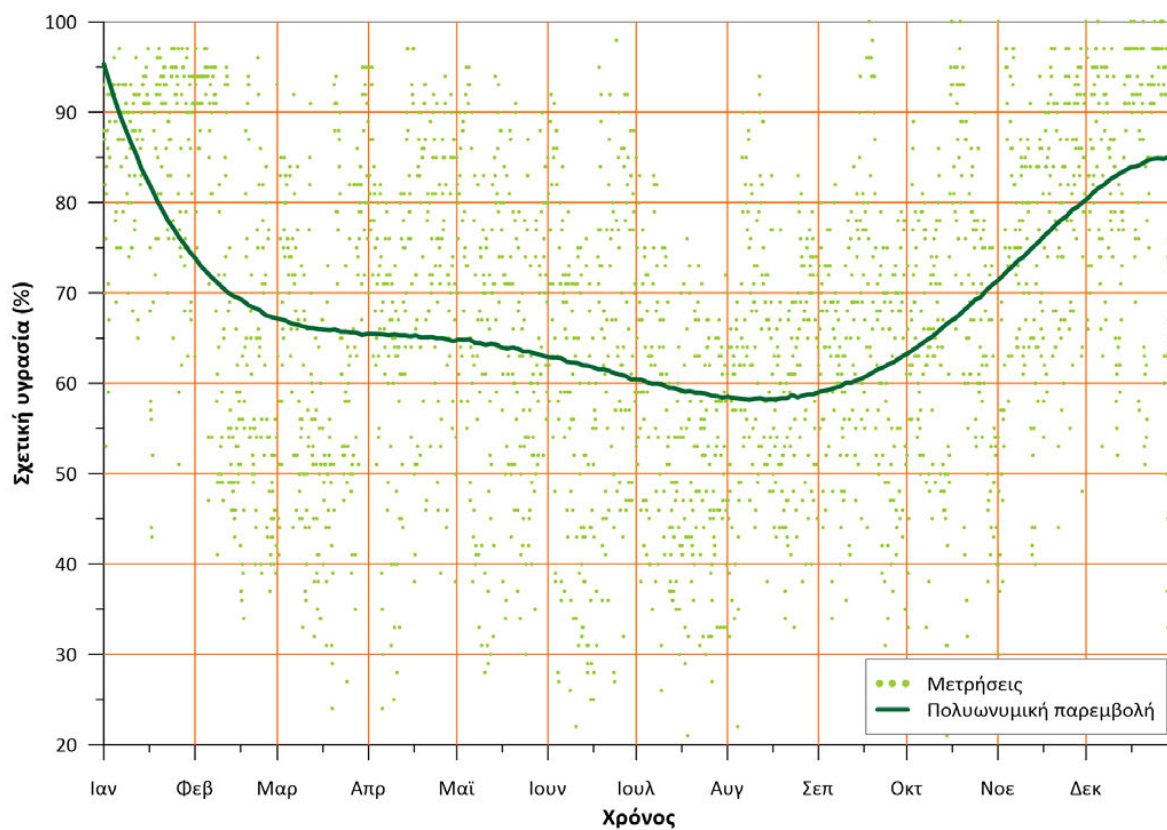
5.3.5. Μετεωρολογία

Οι μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή καταγράφονται από το μετεωρολογικό σταθμό που βρίσκεται εντός του αερολιμένα Θεσσαλονίκης. Τα αναλυτικά στοιχεία του 2009 χορηγήθηκαν από την ΕΜΥ για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, μετά από αίτηση. Αποτελούνται από καταγραφές της διεύθυνσης και της ταχύτητας ανέμου, της πίεσης, της θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας και της νέφωσης, ανά τρίωρο.

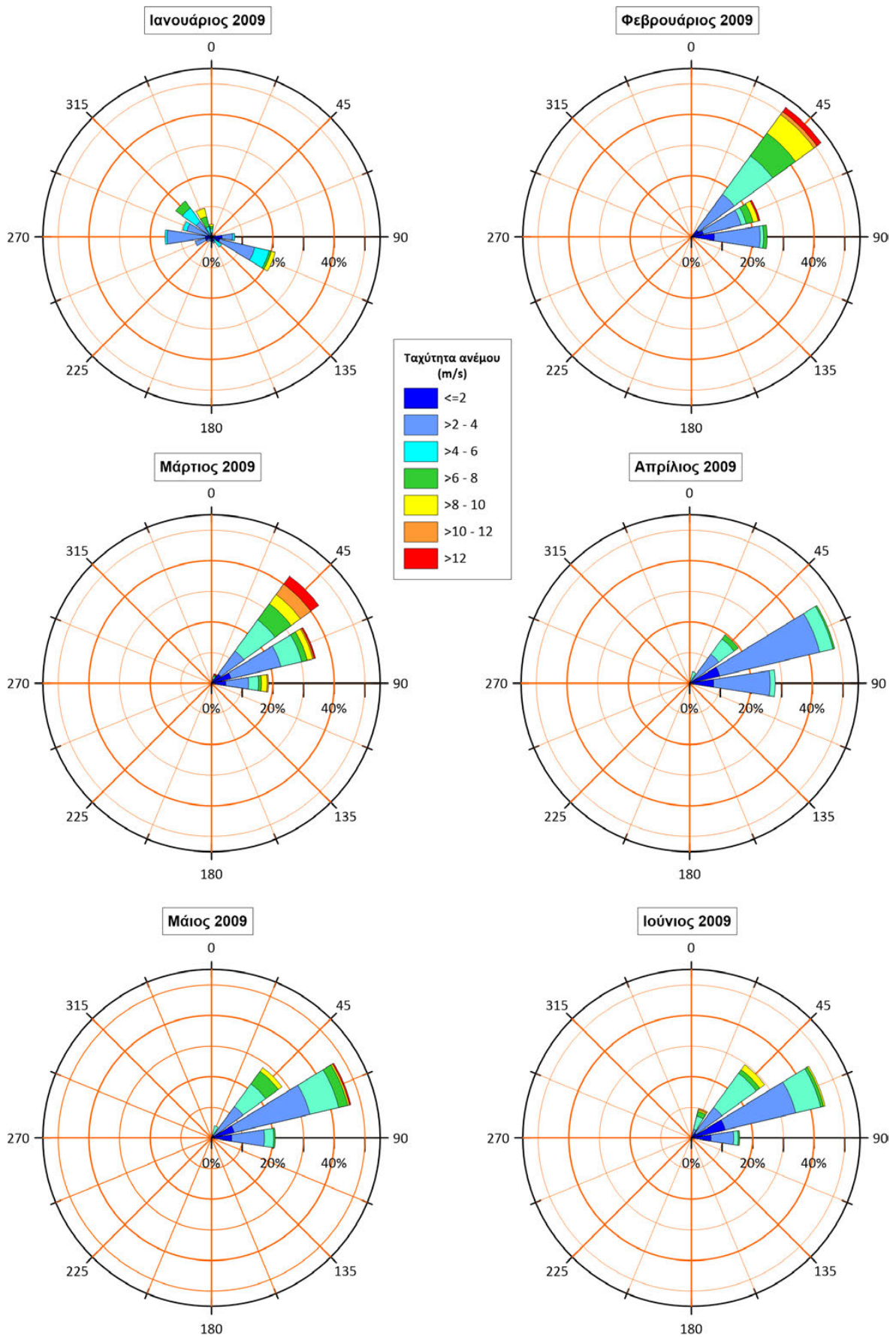
Η εξέλιξη της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας παρουσιάζονται στο γράφημα 48 και στο γράφημα 49 αντίστοιχα· οι εποχιακές τους μεταβολές μπορούν να χαρακτηρισθούν ως τυπικές του μεσογειακού ξηρού κλίματος. Ακολουθούν τα ανεμογράμματα του 2009, τα οποία παρουσιάζονται στο γράφημα 50 για τους έξι πρώτους μήνες και στο γράφημα 51 για τους έξι τελευταίους.



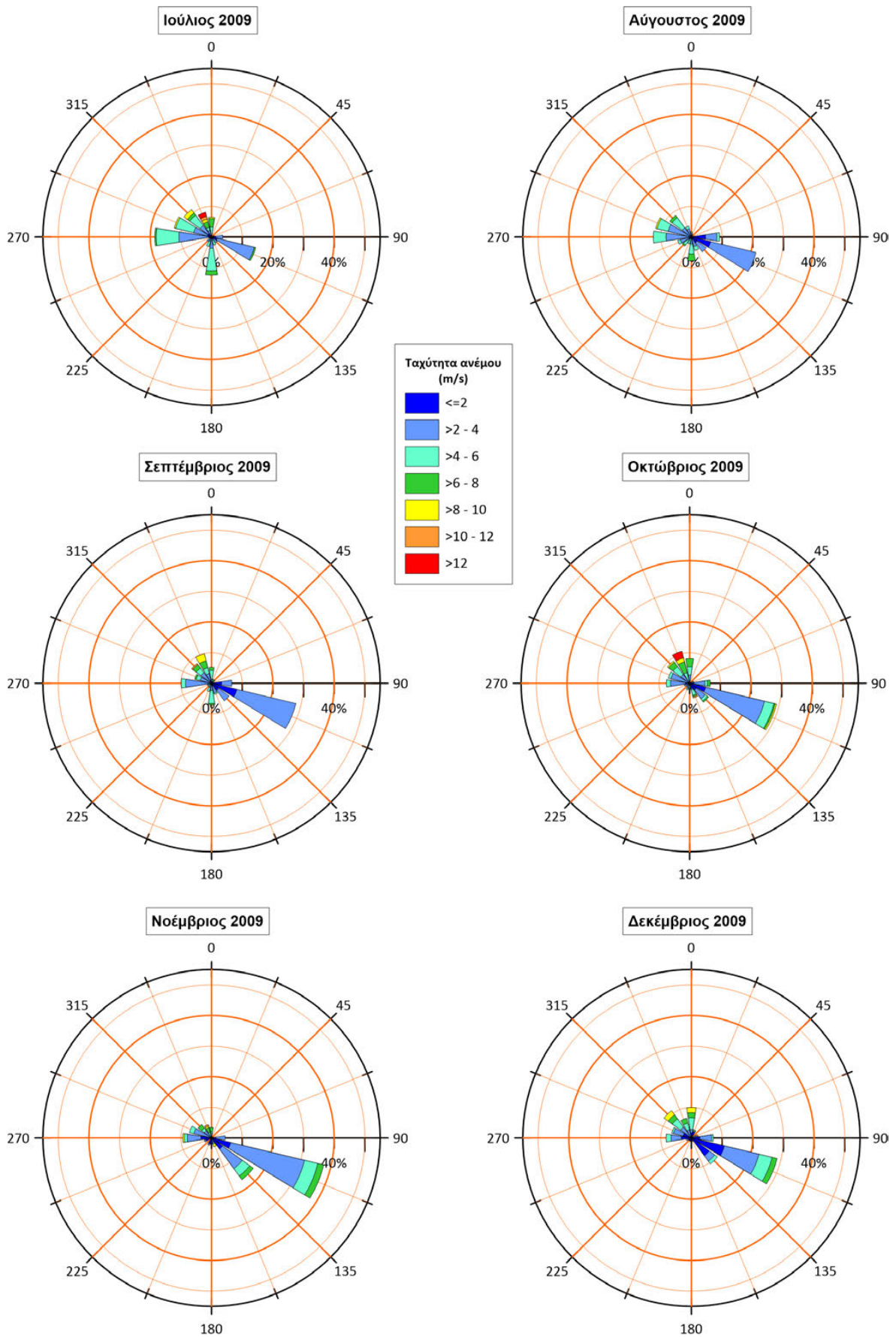
Γράφημα 48: Διακύμανση της θερμοκρασίας στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης το 2009.



Γράφημα 49: Διακύμανση της σχετικής υγρασίας στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης το 2009.



Γράφημα 50: Μηνιαία ανεμογράμματα στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης για το πρώτο εξάμηνο του 2009.



Γράφημα 51: Μηνιαία ανεμογράμματα στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης για το δεύτερο εξάμηνο του 2009.

Οι βασικότερες παρατηρήσεις ως προς τις μετεωρολογικές συνθήκες επιφάνειας στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης είναι οι εξής:

- Η μέση ημερήσια θερμοκρασία (μπλε γραμμή στο γράφημα 48 παραπάνω) κινείται πάνω από τους 15 °C για έξι περίπου μήνες κατ' έτος, υποδεικνύοντας έντονη ηλιοφάνεια η οποία, συνδυαζόμενη με τις σχετικά περιορισμένες εντάσεις ανέμου, καθιστά συνηθέστερες τις ασταθείς καταστάσεις της ατμόσφαιρας. Οι συγκεκριμένες καταστάσεις είναι ιδιαίτερα ευνοϊκές για τη γρήγορη κατακόρυφη αραιώση των αέριων ρύπων και τη συνακόλουθη μείωση των συγκεντρώσεών τους.
- Αξιοσημείωτη, αν και χωρίς επίδραση στα αποτελέσματα διασποράς των ρύπων, είναι η υψηλότερη σχετική υγρασία (πράσινη γραμμή στο γράφημα 49 παραπάνω) η οποία κινείται σε επίπεδα άνω του 70% τους 3-4 ψυχρότερους μήνες, αγγίζοντας συχνά τον κορεσμό. Οι μετρήσεις αυτές είναι αντιπροσωπευτικές των συχνών επεισοδίων πυκνής ομίχλης που δυσχεράνουν τη χρήση του αεροδρομίου, παρά τη σημαντική υποβοήθηση που προσφέρει το σύστημα ενόργανης («τυφλής») προσέγγισης ILS II.
- Οι κύριες προελεύσεις ανέμου εμφανίζουν αξιοσημείωτη σταθερότητα. Στη διάρκεια του πρώτου εξαμήνου, η μεγάλη πλειοψηφία των ανέμων προέρχεται από τα ΒΑ ενώ στη διάρκεια του δευτέρου εξαμήνου η προέλευση μετατοπίζεται στα Α-ΝΑ, όπως διακρίνεται στα ανεμογράμματα (γράφημα 50 και γράφημα 51 παραπάνω). Η συχνότητα των ανέμων χαμηλής ταχύτητας (μικρότερης των 2 m/s), είναι αξιοσημείωτα χαμηλή, εν αντίθεση με τους ανέμους μέτριας (2-4 m/s) ή υψηλότερης (> 4 m/s) ταχύτητας, που επικρατούν.

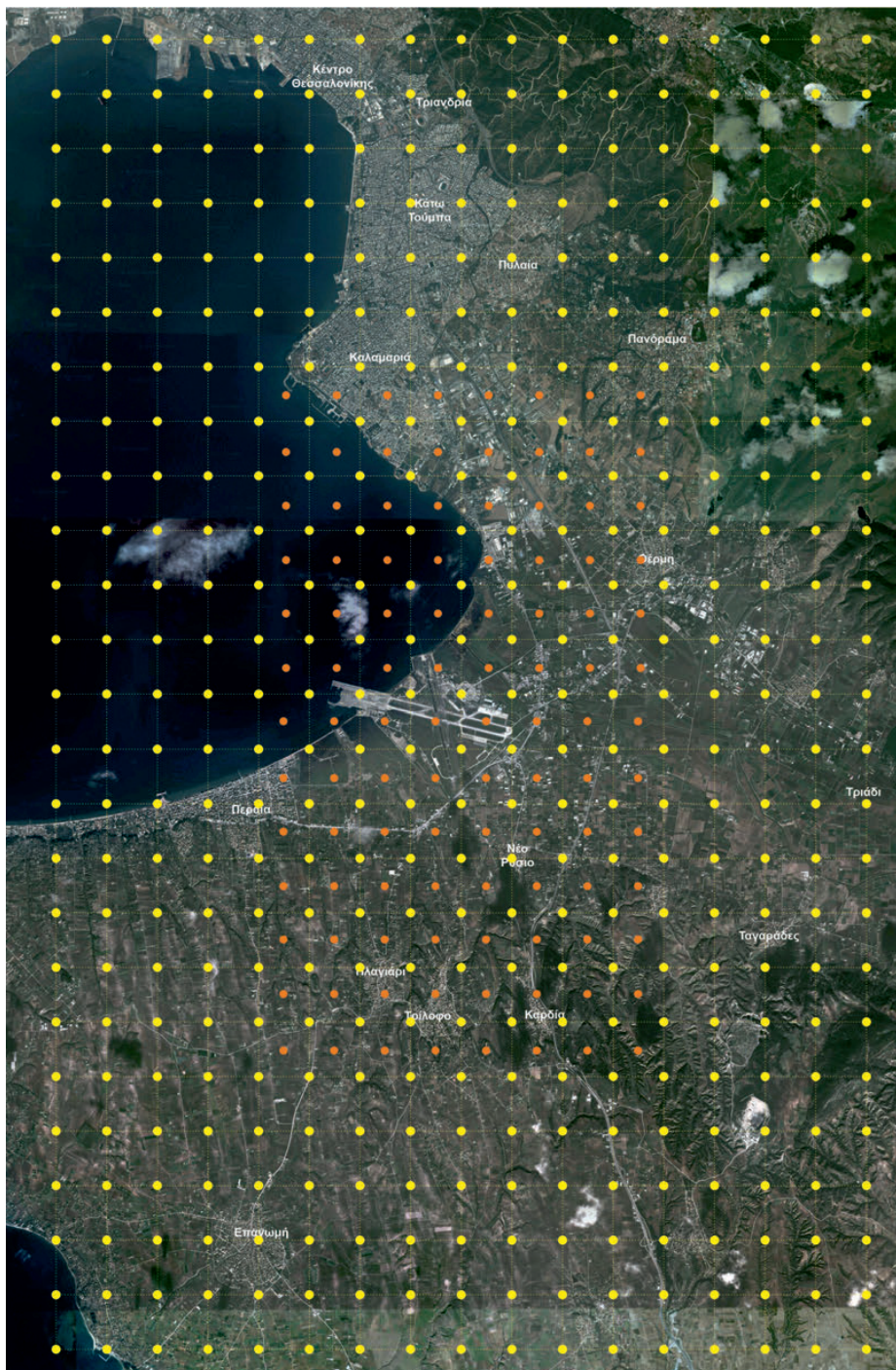
5.3.6. Σημεία υπολογισμού συγκεντρώσεων

Για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων στην περιοχή του αερολιμένα Θεσσαλονίκης, διαμορφώθηκε εν πρώτοις ένα ορθογωνικό δίκτυο 425 σημείων (17×25), με κέντρο τον πύργο ελέγχου. Το δίκτυο σημείων εκτείνεται 8 km εκατέρωθεν του αερολιμένα στην κατεύθυνση ανατολή – δύση και 12 km στην κατεύθυνση βορρά – νότου· καλύπτει δηλαδή μια έκταση 384 km².

Επιπλέον, για να εξαχθούν πυκνότερα αποτελέσματα στην εγγύς περιοχή του αεροδρομίου, δηλαδή 4 × 6 km, όπου οι μεταβολές των συγκεντρώσεων αναμένονται εντονότερες, διαμορφώθηκε ένα επιπρόσθετο δίκτυο σημείων υπολογισμού, στο κέντρο των τετραγώνων του προηγούμενου δικτύου.

Τα παραπάνω σημεία υπολογισμού των συγκεντρώσεων, με διαφορετικό χρωματισμό για καθένα εκ των δύο δικτύων, παρουσιάζονται στην επόμενη εικόνα, στην οποία διακρίνεται

ότι καλύπτεται με τον τρόπο αυτό το μεγαλύτερο μέρος της πόλης της Θεσσαλονίκης στο βορρά, αλλά και περιοχές με αυξημένη πυκνότητα κατοίκησης στα νότια του νομού (π.χ. Περαιά, Επανωμή, Πλαγιάρι, Τρίλοφο, Ταγαράδες κ.ά.).



Σχήμα 6: Το δίκτυο σημείων υπολογισμού των συγκεντρώσεων αέριων ρύπων κατά τη μελέτη του αερολιμένα Θεσσαλονίκης στο EDMS.

Τα κίτρινα σημεία απέχουν 1 km μεταξύ τους και τα κόκκινα τοποθετούνται στο κέντρο των νοητών τετραγώνων στην εγγύς περιοχή, για να πυκνώσει το δίκτυο.

5.3.7. Αποτελέσματα υπολογισμού εκπομπών

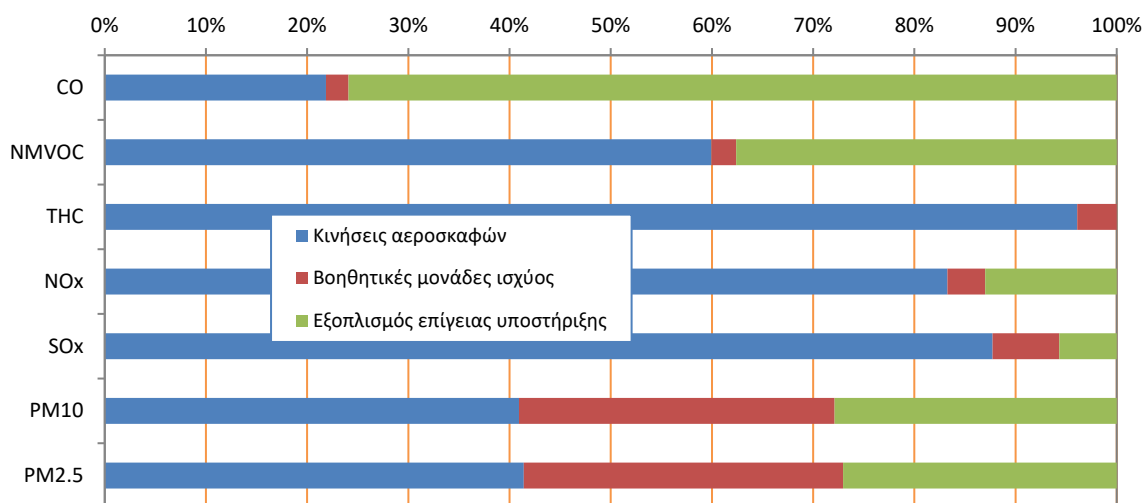
Τα στοιχεία των παραπάνω ενοτήτων (διάταξη, κινήσεις, μετεωρολογία κ.ά.) εισήχθησαν στο μοντέλο του αερολιμένα Θεσσαλονίκης στο EDMS. Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα 5.2.7 (σελ. 39) σχετικά με την καταλληλότητα της ετήσιας περιόδου, υπολογίστηκαν από το EDMS οι ετήσιες εκπομπές από τη λειτουργία του αεροδρομίου, οι οποίες παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 5: Εκπομπές αέριων ρύπων από τη λειτουργία του αερολιμένα Θεσσαλονίκης, όπως υπολογίστηκαν από το EDMS.

Πηγή	Εκπομπές αερολιμένα Θεσσαλονίκης (tn/yr)						
	CO	NM VOC	THC	NO _x	SO _x	PM ₁₀	PM _{2.5}
Κινήσεις αεροσκαφών	68,84	12,34	10,67	159,15	11,87	1,09	1,09
Βοηθητικές μονάδες ισχύος	7,02	0,50	0,43	7,12	0,89	0,83	0,83
Εξοπλισμός επίγειας υποστήριξης	239,13	7,74	--	24,84	0,77	0,74	0,71
Σύνολο	314,98	20,58	11,10	191,10	13,52	2,67	2,64

Συμπληρωματικά, αναφέρεται ότι η ετήσια κατανάλωση αεροπορικού καυσίμου για το 2009 υπολογίστηκε στους 10.130,26 tn.

Η ποσοστιαία κατανομή των τριών πηγών για κάθε ρύπο παριστάνεται στο ακόλουθο γράφημα.



Γράφημα 52: Ποσοστιαία συμβολή των τριών πηγών στις εκπομπές κάθε αέριου ρύπου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.

Από το παραπάνω γράφημα, εξάγονται οι εξής διαπιστώσεις:

- Οι κινήσεις των αεροσκαφών, δηλαδή η θεωρούμενη ως κύρια δραστηριότητα ενός αεροδρομίου, συμβάλλει περίπου κατά 23% στην εκπομπή CO και κατά 42% στα αιωρούμενα σωματίδια. Αντίθετα, τα αεροσκάφη είναι υπεύθυνα για το μακράν μεγαλύτερο μέρος των εκπομπών NO_x και SO_x (περίπου 84% και 88% αντιστοίχως).
- Οι βοηθητικές μονάδες ισχύος είναι υπεύθυνες κυρίως για την εκπομπή σωματιδίων. Δευτερευόντως συμμετέχουν σε μικρό βαθμό στις εκπομπές NO_x και SO_x, ενώ εκπέμπουν πολύ λίγο CO και οργανικές ενώσεις.
- Ο εξοπλισμός επίγειας υποστήριξης είναι υπεύθυνος για το μακράν μεγαλύτερο μέρος του εκπεμπόμενου CO, για σημαντικό μέρος των αιωρούμενων σωματιδίων, και για σχετικά μικρά ποσοστά των πτητικών οργανικών ενώσεων και των NO_x.

5.3.8. Αποτελέσματα υπολογισμού συγκεντρώσεων

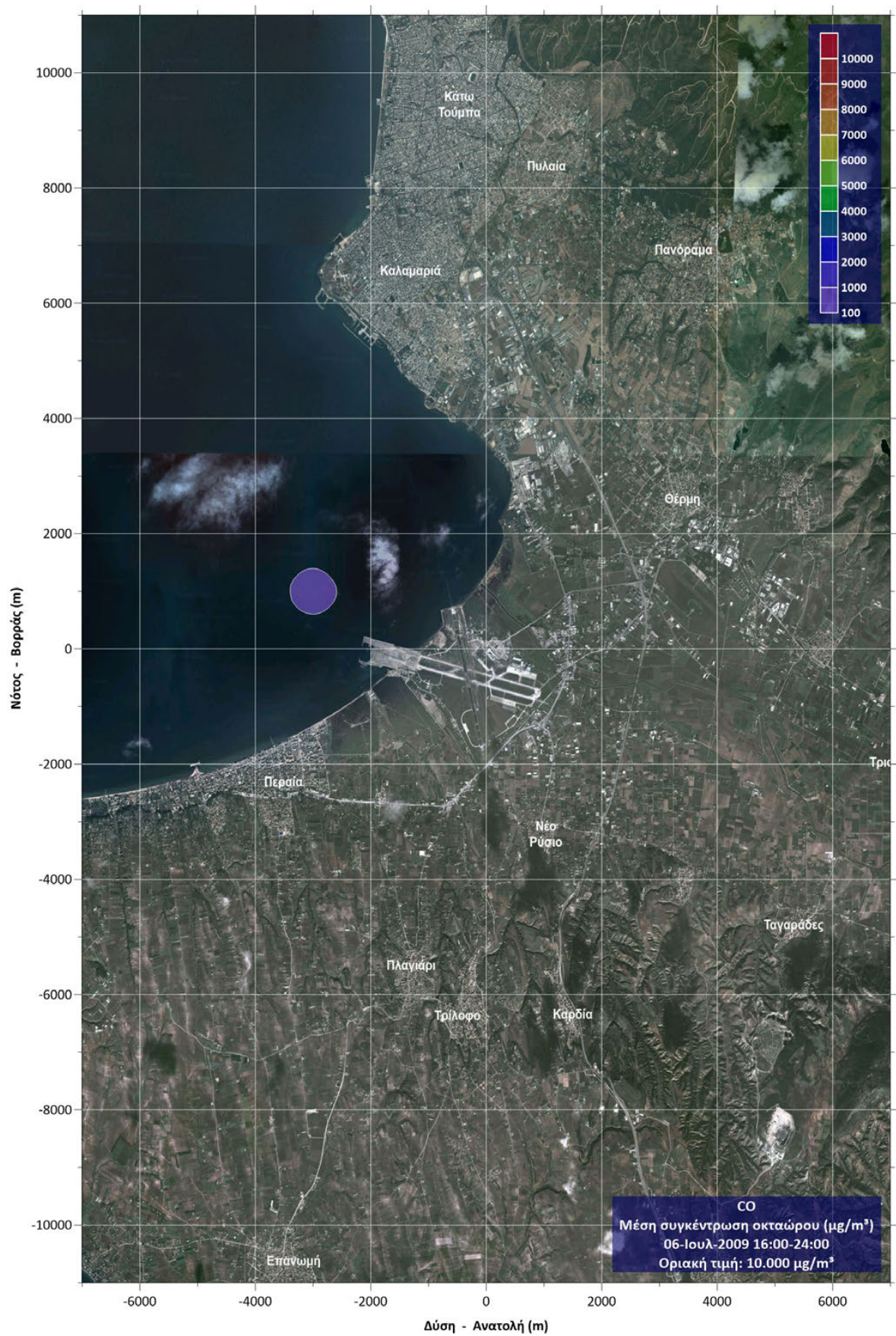
Ο αερολιμένας Θεσσαλονίκης, βάσει των ετήσιων κινήσεων αεροσκαφών, μοιράζεται τη δεύτερη θέση μεταξύ των ελληνικών αεροδρομίων, μαζί με τον αερολιμένα του Ηρακλείου. Η απόστασή του από το κέντρο της πόλης είναι σχετικώς επαρκής (~13 km), αλλά οι μικρές αποστάσεις από άλλες πυκνοκατοικημένες περιοχές, όπως η Θέρμη, η Καλαμαριά και η Κάτω Τούμπα στα βόρειά του, η Περαιά και άλλοι παραλιακοί οικισμοί στα δυτικά του, καθώς και η Επανομή στα νότια, καθιστούν αναγκαία τη διερεύνηση της επίδρασης που έχει η λειτουργία του αερολιμένα Θεσσαλονίκης στην ποιότητα του αέρα, σε αρκετές κατευθύνσεις γύρω από αυτόν.

Στο πλαίσιο αυτό, και σε αναλογία με όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα 5.2.8 για το ΔΑΑ (σελ. 41), διαμορφώνεται το εξής σκεπτικό:

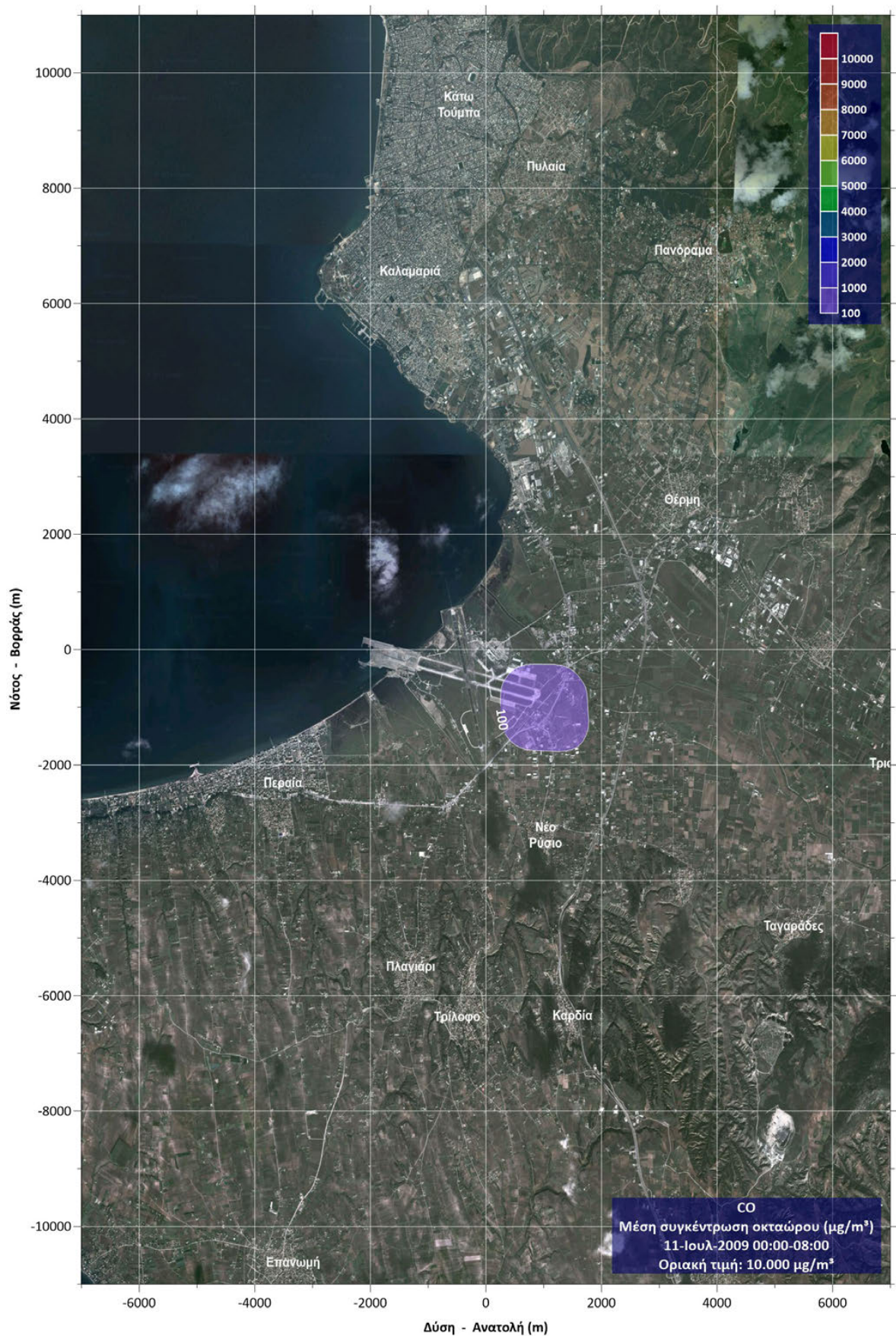
- Ο Ιούλιος και ο Αύγουστος είναι οι δύο μήνες που ο αερολιμένας Θεσσαλονίκης εμφανίζει την υψηλότερη κίνηση αεροσκαφών (βλ. γράφημα 47, σελ. 80), επομένως σε όλους του υπόλοιπους μήνες οι εκπομπές και συγκεντρώσεις αέριων ρύπων αναμένονται μικρότερες. Αυτό ισχύει για τόσο για το 2009, όσο και για όλα τα επόμενα έτη.
- Στο δίμηνο Ιουλίου – Αυγούστου θα πρέπει να εξετασθούν αρκετές καταστάσεις, ώστε να καλύπτονται επαρκώς οι πιθανοί δυσμενείς συνδυασμοί μετεωρολογικών συνθηκών (οι οποίες επηρεάζουν τη διασπορά) και κορύφωσης του αριθμού κινήσεων σε ημερήσια και εβδομαδιαία βάση (που επηρεάζουν τις εκπομπές).
- Για το σκοπό αυτό, διαφαίνεται κατάλληλη, όπως και στην περίπτωση του ΔΑΑ, η διάκριση κάθε μήνα σε τρία δεκαήμερα και η αναζήτηση της δυσμενέστερης κατάστασης (δηλαδή εκείνης που χαρακτηρίζεται από τις υψηλότερες συγκεντρώσεις, σε ωριαία ή εικοσιτετράωρη βάση, ανάλογα με το ρύπο) σε καθένα από αυτά. Με τον τρόπο αυτό, συλλέγεται επαρκής αριθμός συνδυασμών κίνησης – μετεωρολογίας, που αντιπροσωπεύει ικανοποιητικά όλες τις ρεαλιστικά αναμενόμενες δυσμενείς καταστάσεις. Στο πλαίσιο αυτό, το EDMS ρυθμίστηκε για να υπολογίσει τις συγκεντρώσεις για καθεμία από τις 768 ώρες και τα 62 εικοσιτετράωρα του διμήνου Ιουλίου – Αυγούστου 2009, ενώ στη συνέχεια επελέγησαν για παρουσίαση εκείνες οι περιπτώσεις με τις υψηλότερες τιμές.

Έτσι, στα επόμενα γραφήματα παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις που υπολογίστηκαν με το EDMS γύρω από τον αερολιμένα Θεσσαλονίκης για τη δυσμενέστερη ώρα ή μέρα των έξι δεκαημέρων του διμήνου Ιουλίου – Αυγούστου 2009, κατά σειρά για τους ρύπους CO, NO_x, PM₁₀ και SO_x, στη χρονική βάση που αναφέρονται τα νομοθετημένα όρια για κάθε ρύπο, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση με αυτά. Παρουσιάζεται επίσης η μέση ετήσια συγκέντρωση των

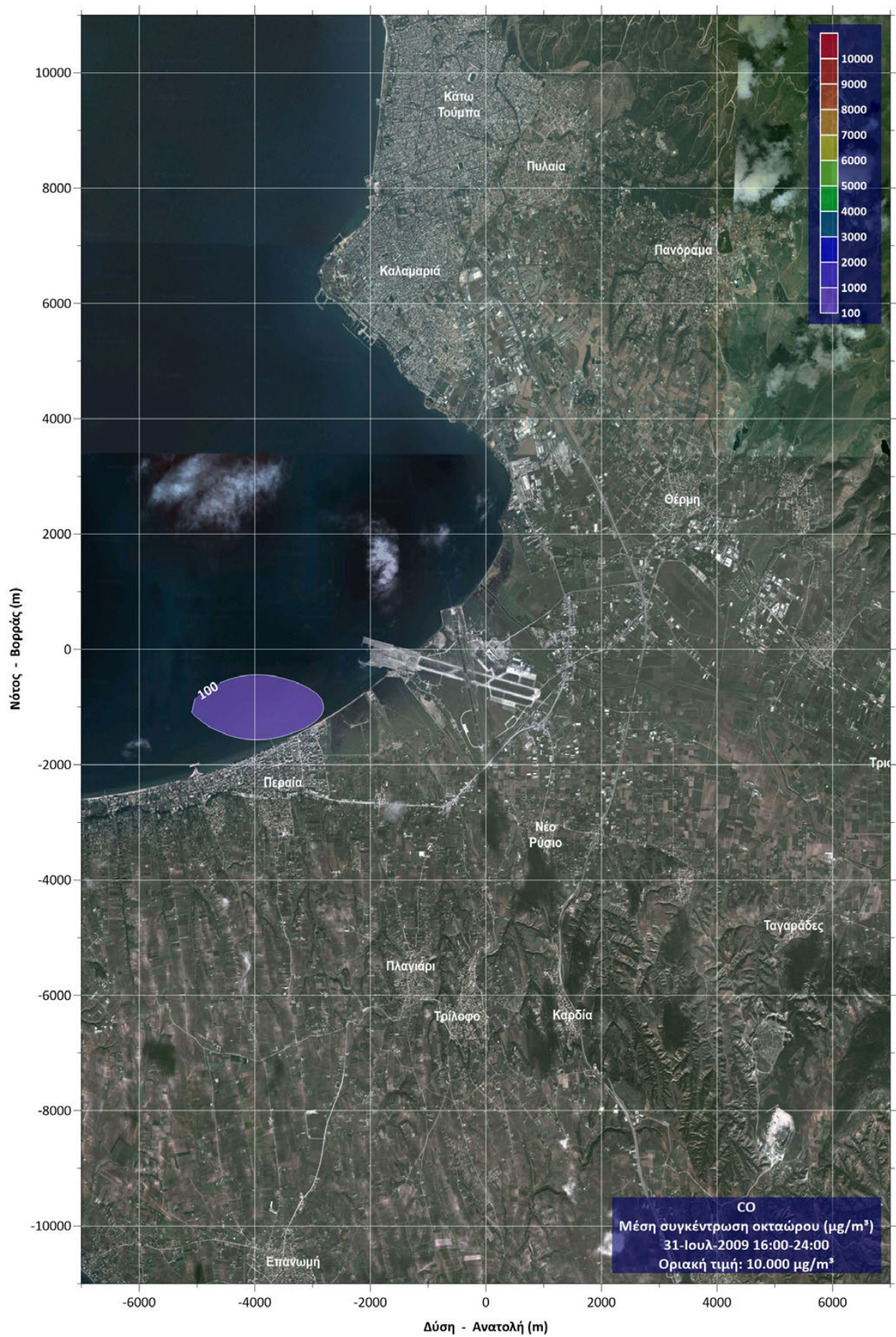
NO_x και των λεπτών αιωρούμενων σωματιδίων PM_{2.5} για τις οποίες επίσης έχουν νομοθετηθεί όρια. Ο υπολογισμός αυτών των ετήσιων συγκεντρώσεων βασίστηκε στις συνθήκες (εκπομπές – μετεωρολογία) του διμήνου, επομένως τα αποτελέσματα θα πρέπει να θεωρηθούν εκτιμήσεις αρκετά δυσμενέστερες των ρεαλιστικών.



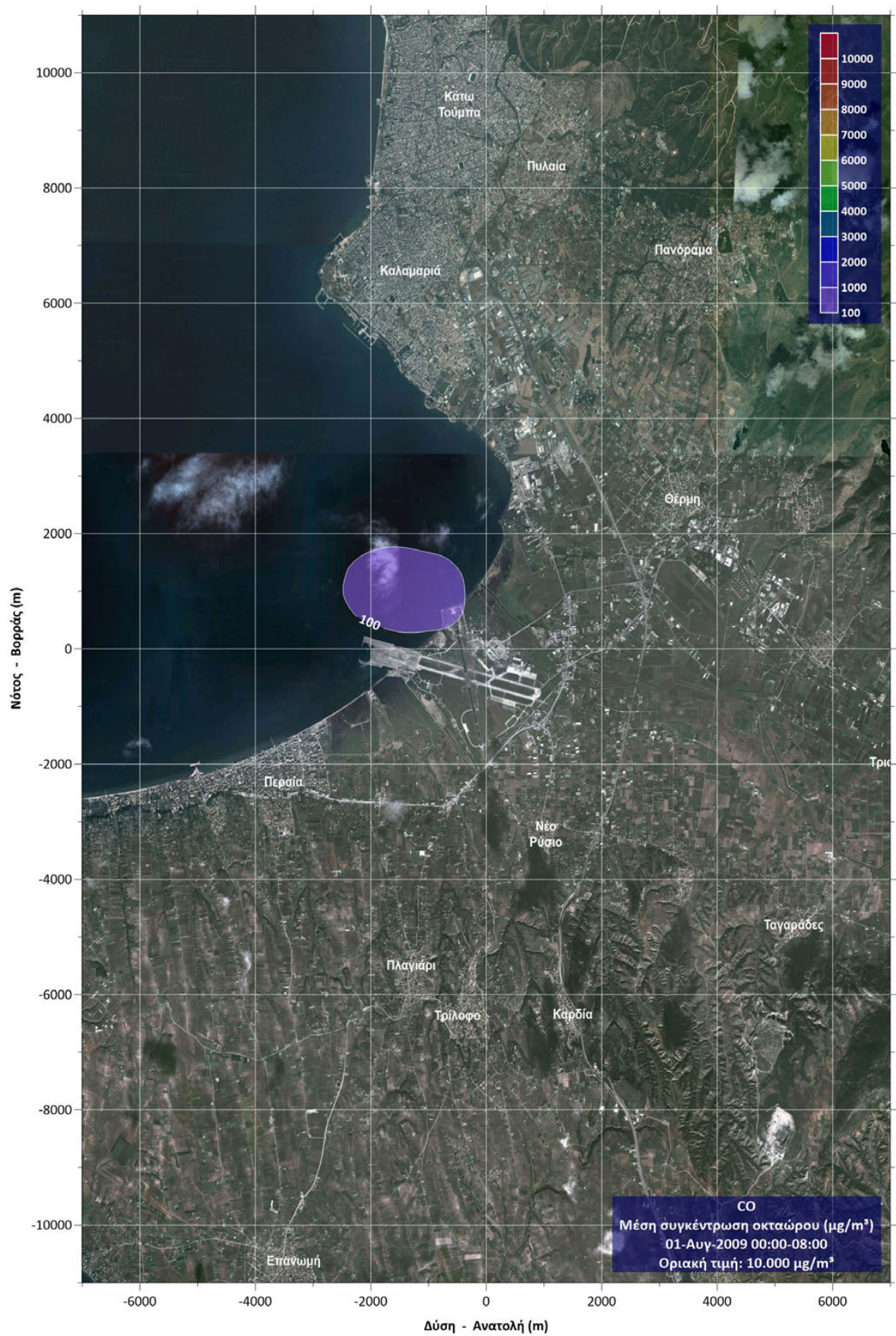
Γράφημα 53: Συγκέντρωση CO στο δυσμενέστερο δωρο του πρώτου δεκαημέρου Ιουλίου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.



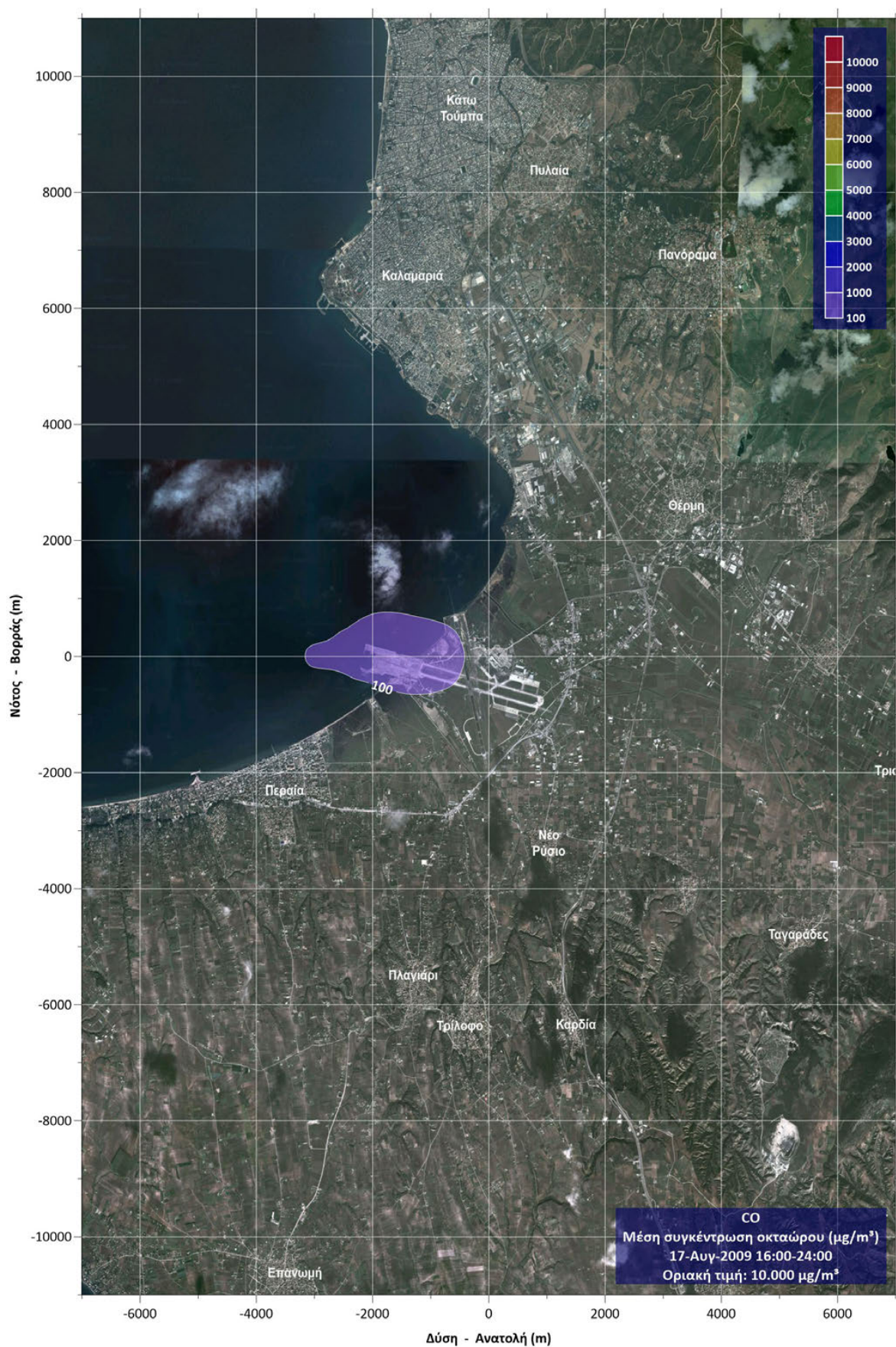
Γράφημα 54: Συγκέντρωση CO στο δυσμενέστερο δωρο του δεύτερου δεκαημέρου Ιουλίου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.



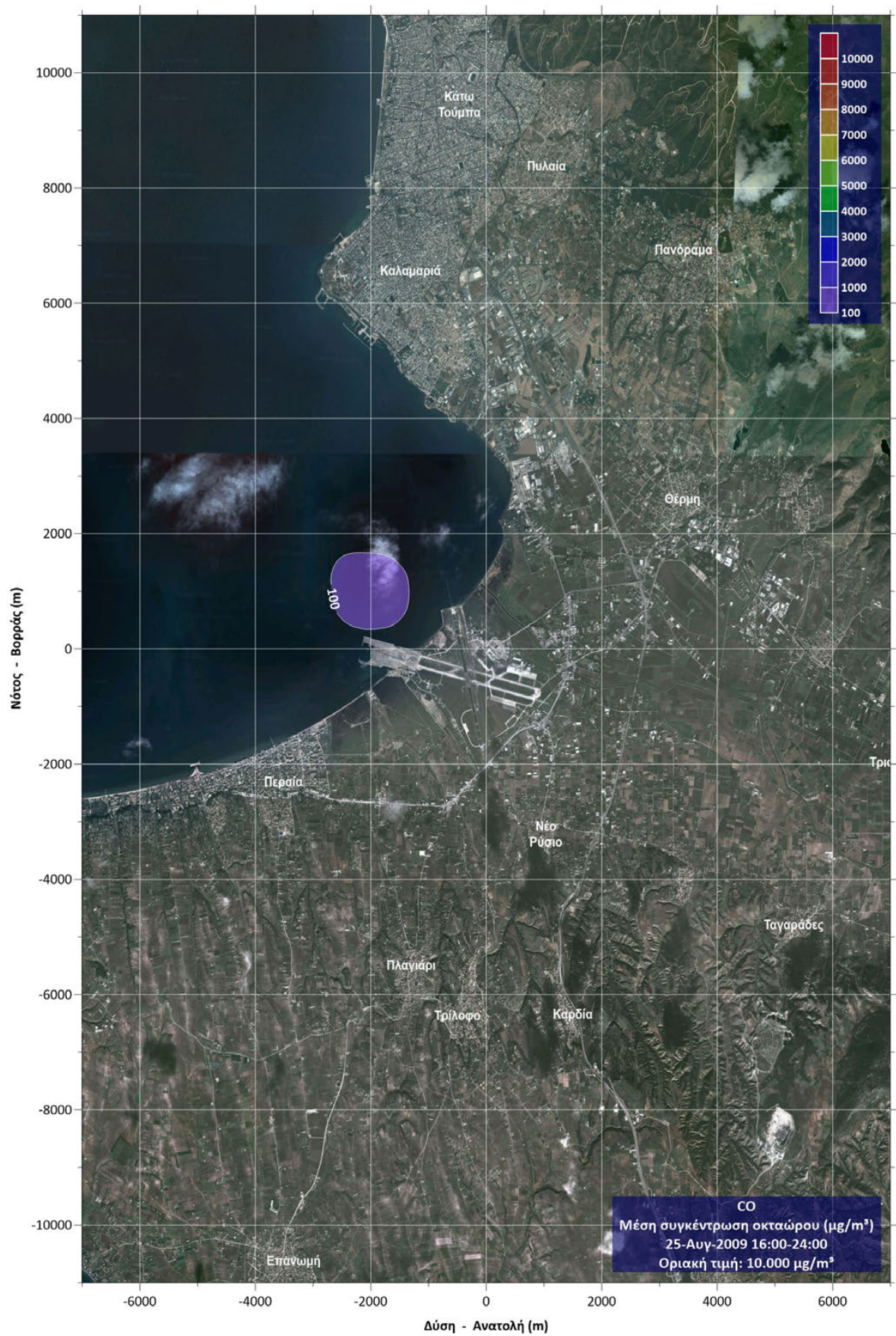
Γράφημα 55: Συγκέντρωση CO στο δυσμενέστερο 8ωρο του τρίτου δεκαημέρου Ιουλίου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.



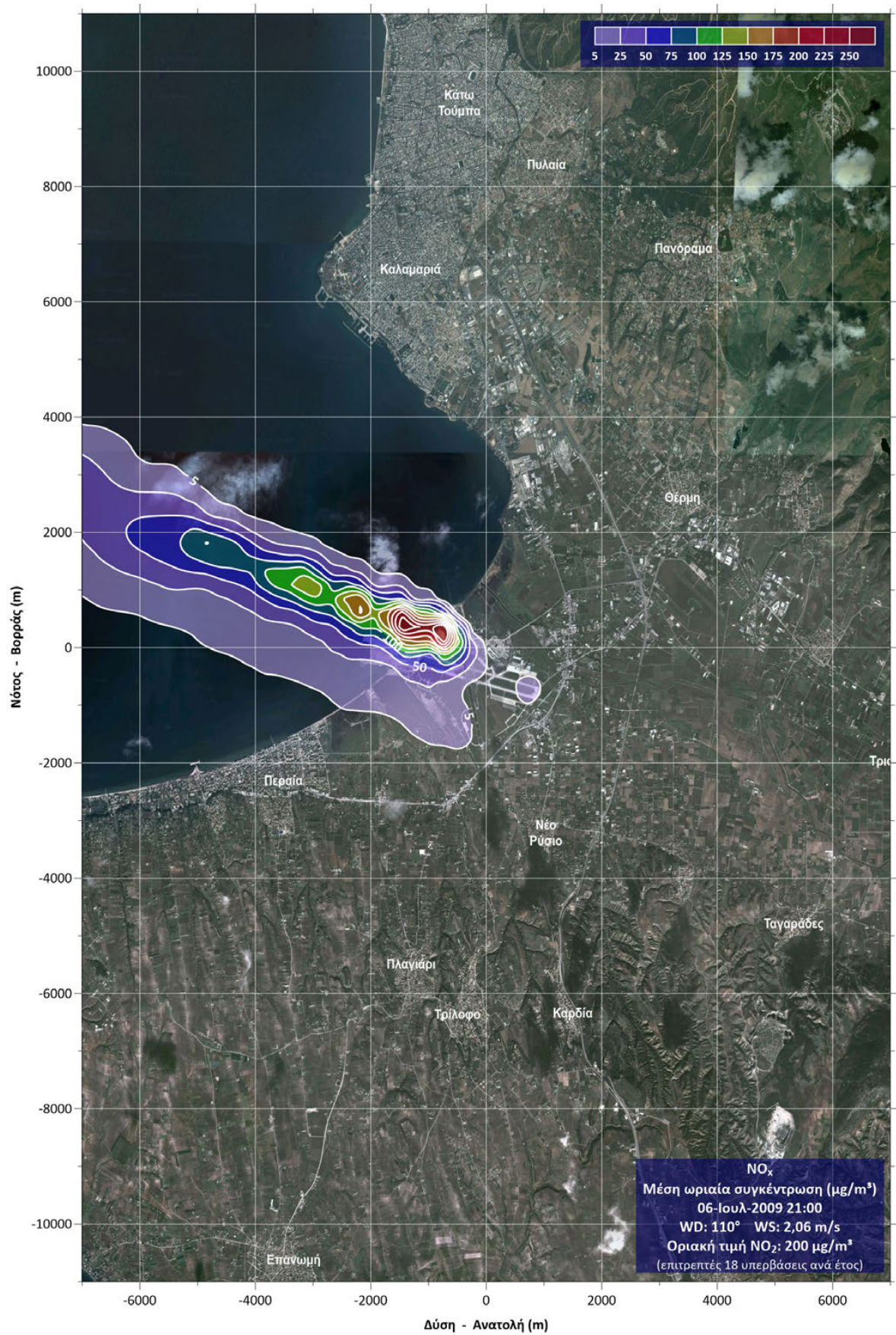
Γράφημα 56: Συγκέντρωση CO στο δυσμενέστερο δωρο του πρώτου δεκαημέρου Αυγούστου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.



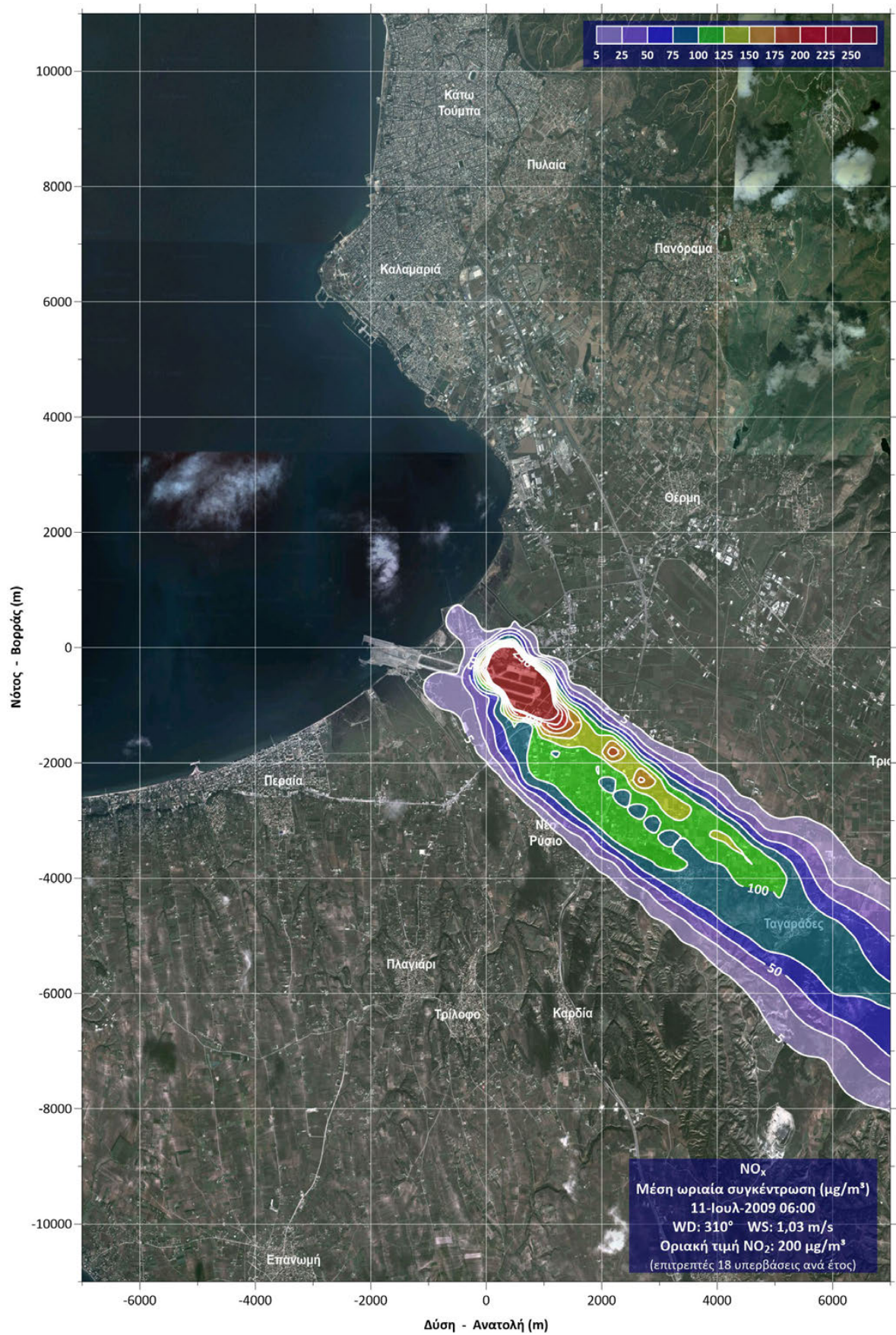
Γράφημα 57: Συγκέντρωση CO στο δυσμενέστερο δωρο του δεύτερου δεκαημέρου Αυγούστου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.



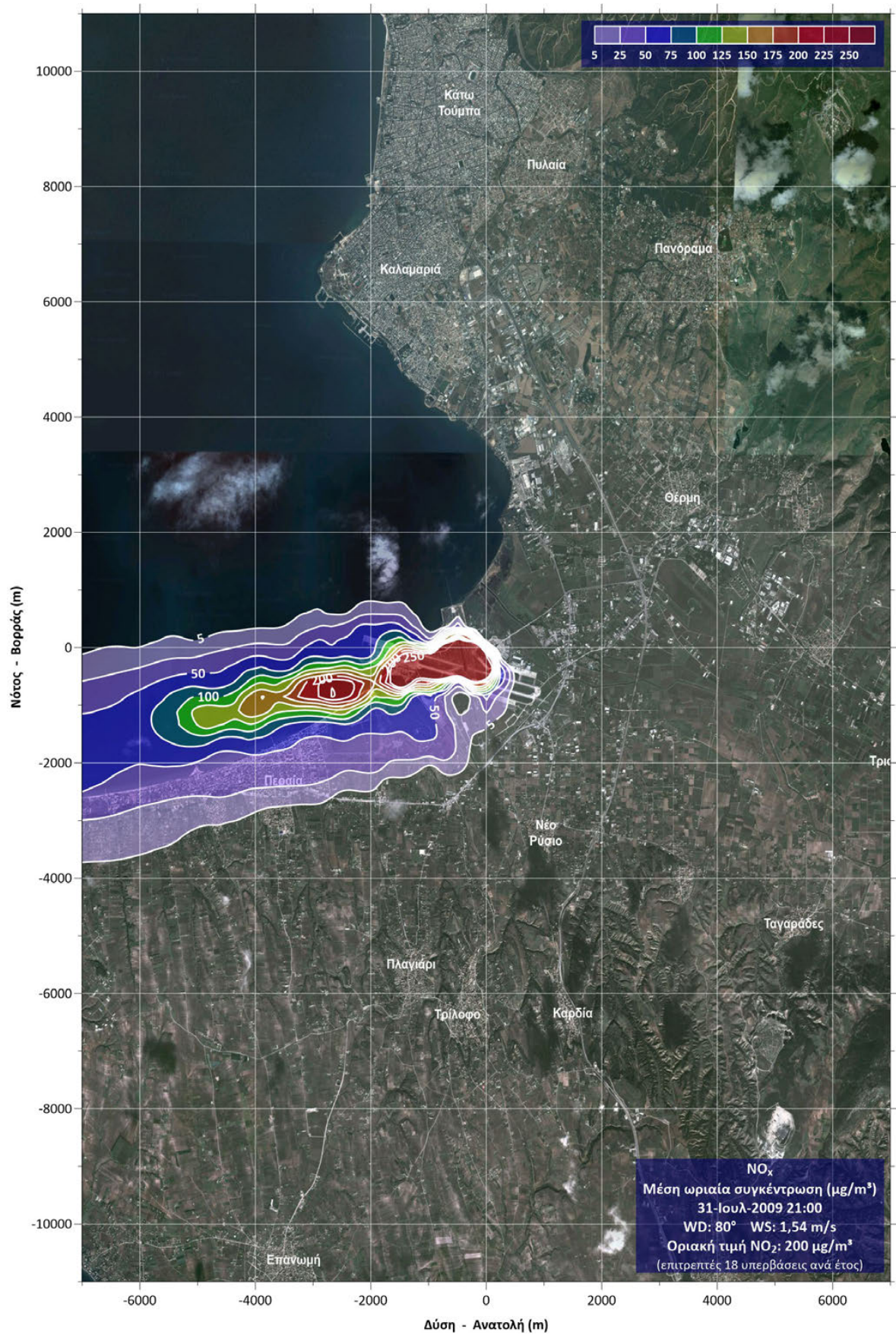
Γράφημα 58: Συγκέντρωση CO στο δυσμενέστερο δωρο του τρίτου δεκαημέρου Αυγούστου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.



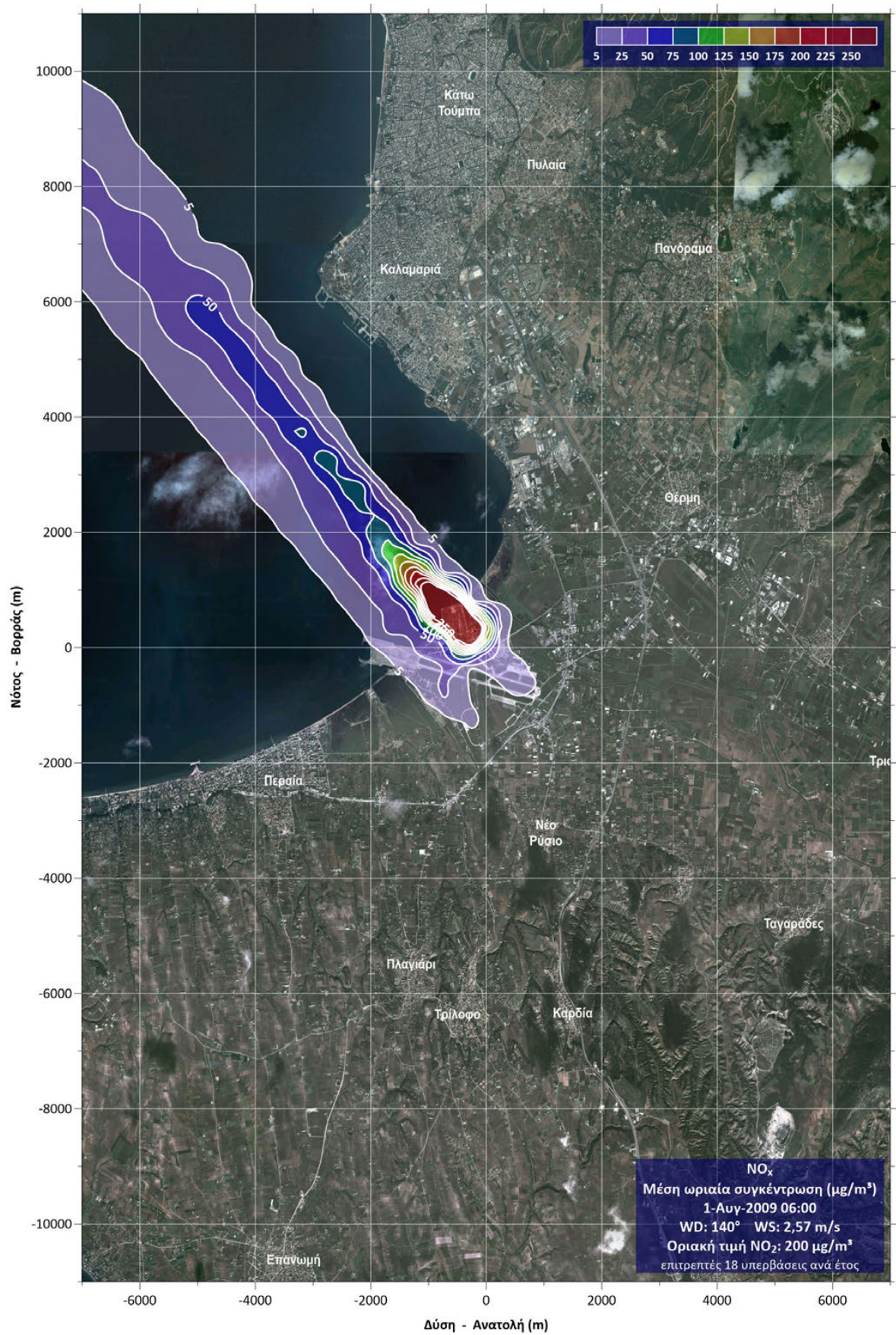
Γράφημα 59: Συγκέντρωση NO_x στη δυσμενέστερη ώρα του πρώτου δεκαημέρου Ιουλίου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.



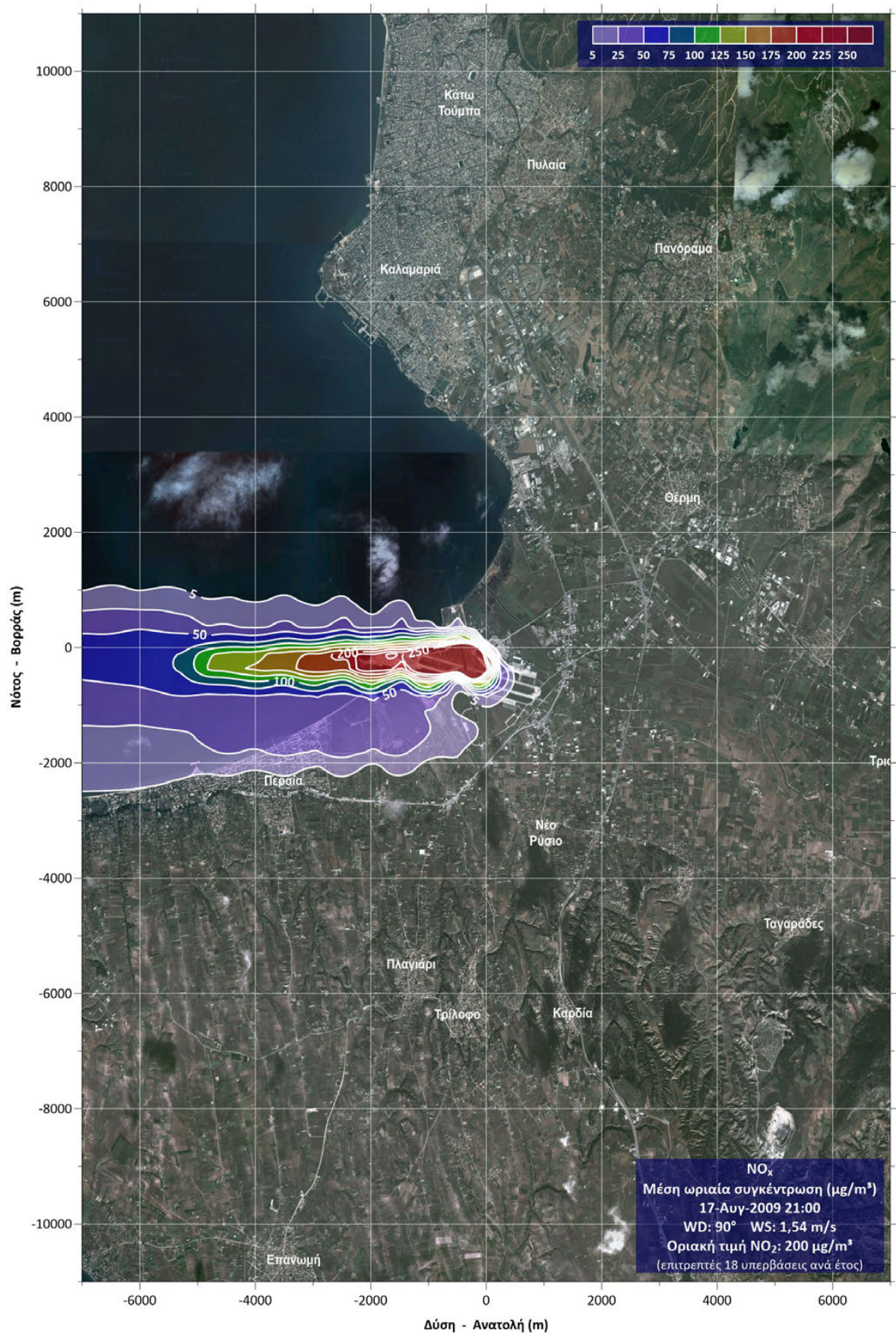
Γράφημα 60: Συγκέντρωση NO_x στη δυσμενέστερη ώρα του δεύτερου δεκαημέρου Ιουλίου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.



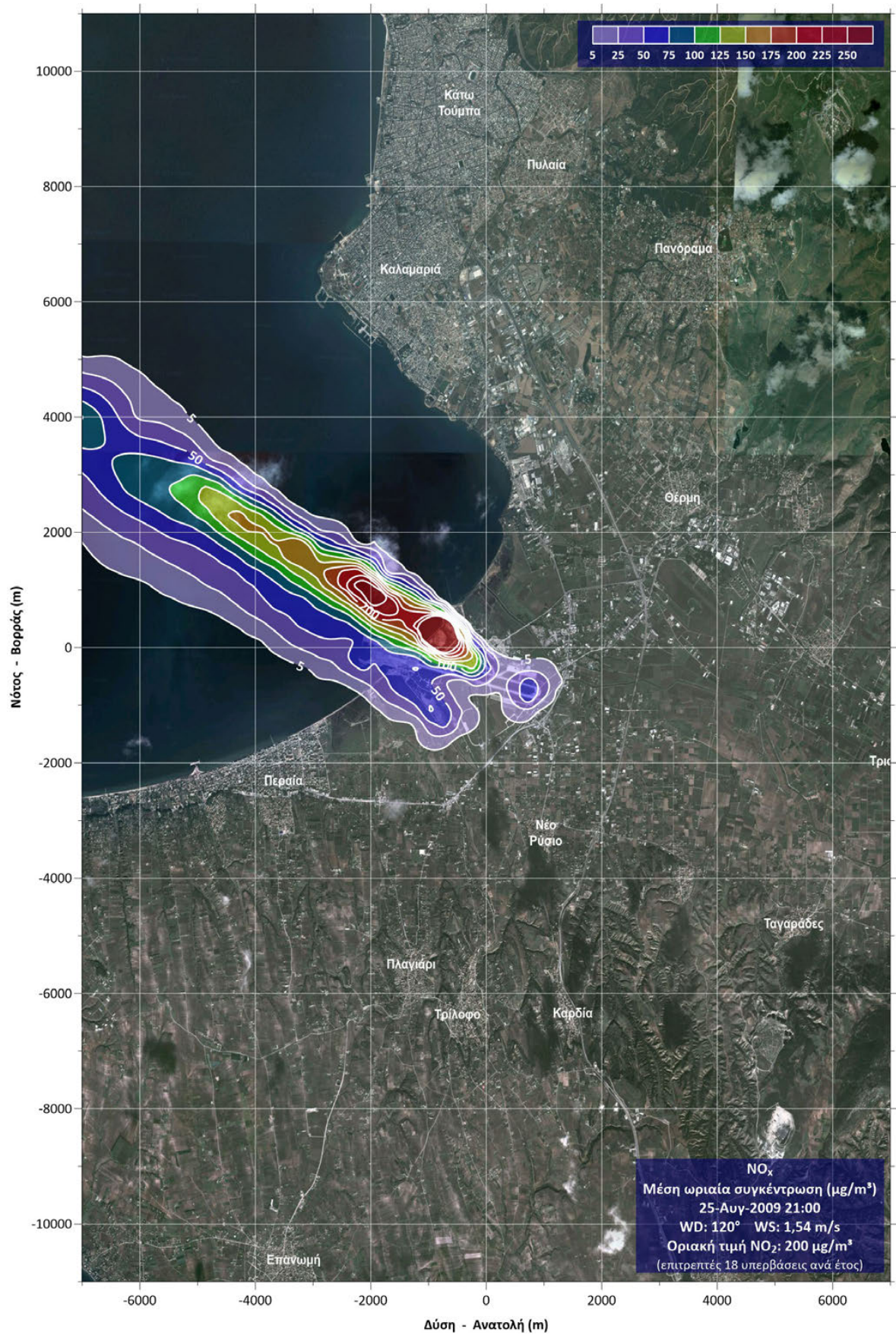
Γράφημα 61: Συγκέντρωση NO_x στη δυσμενέστερη ώρα του τρίτου δεκαημέρου Ιουλίου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.



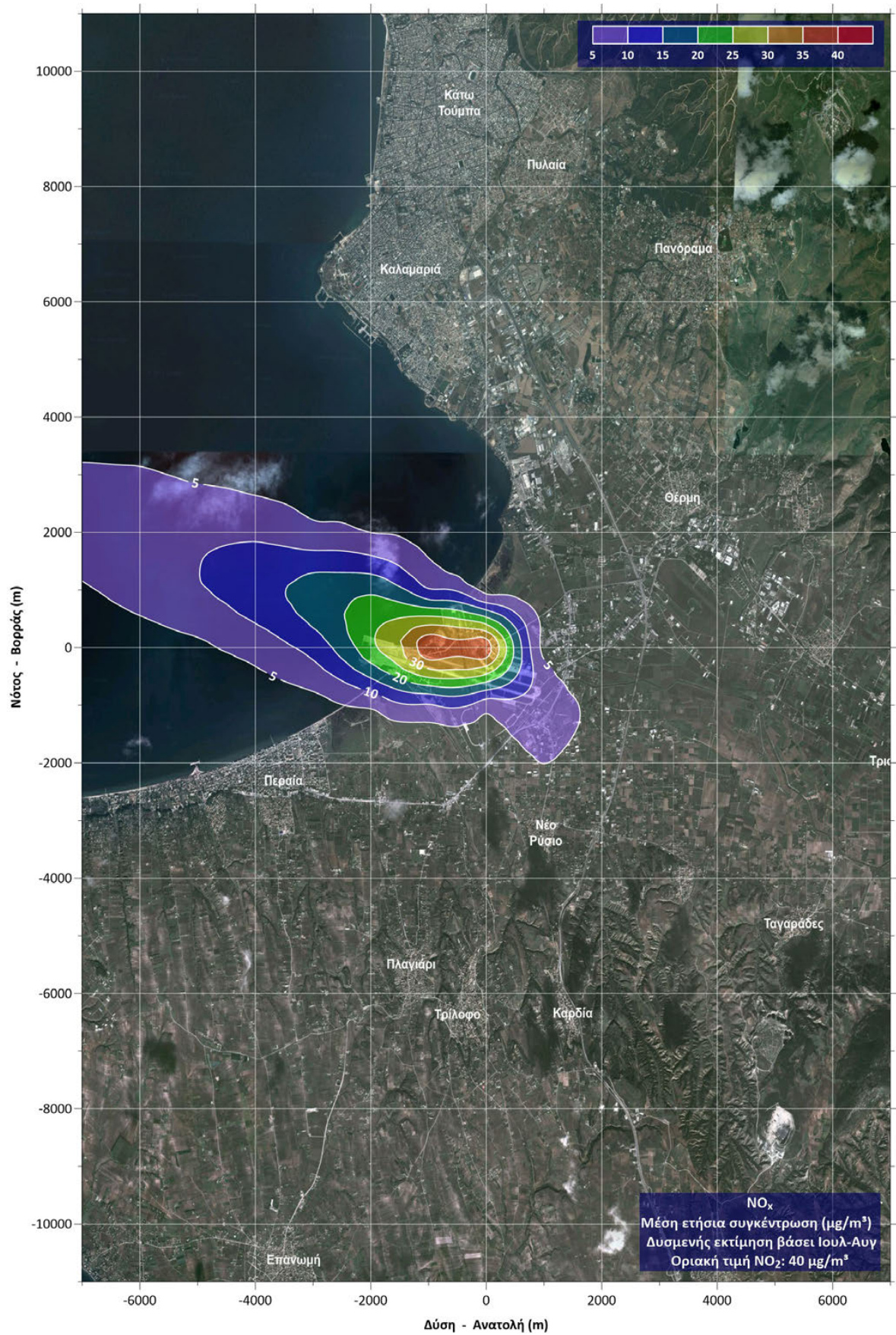
Γράφημα 62: Συγκέντρωση NO_x στη δυσμενέστερη ώρα του πρώτου δεκαημέρου Αυγούστου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.



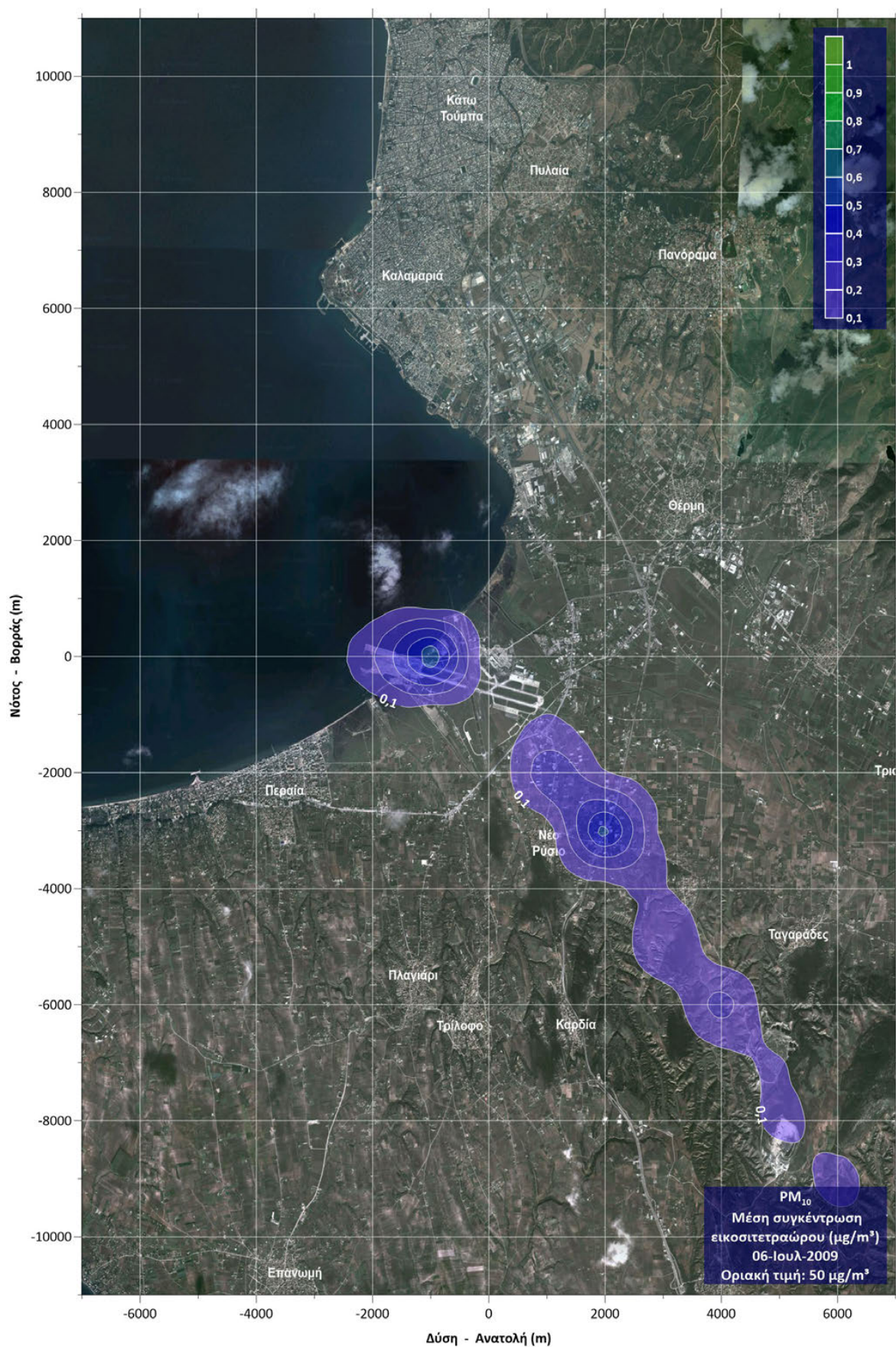
Γράφημα 63: Συγκέντρωση NO_x στη δυσμενέστερη ώρα του δεύτερου δεκαημέρου Αυγούστου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.



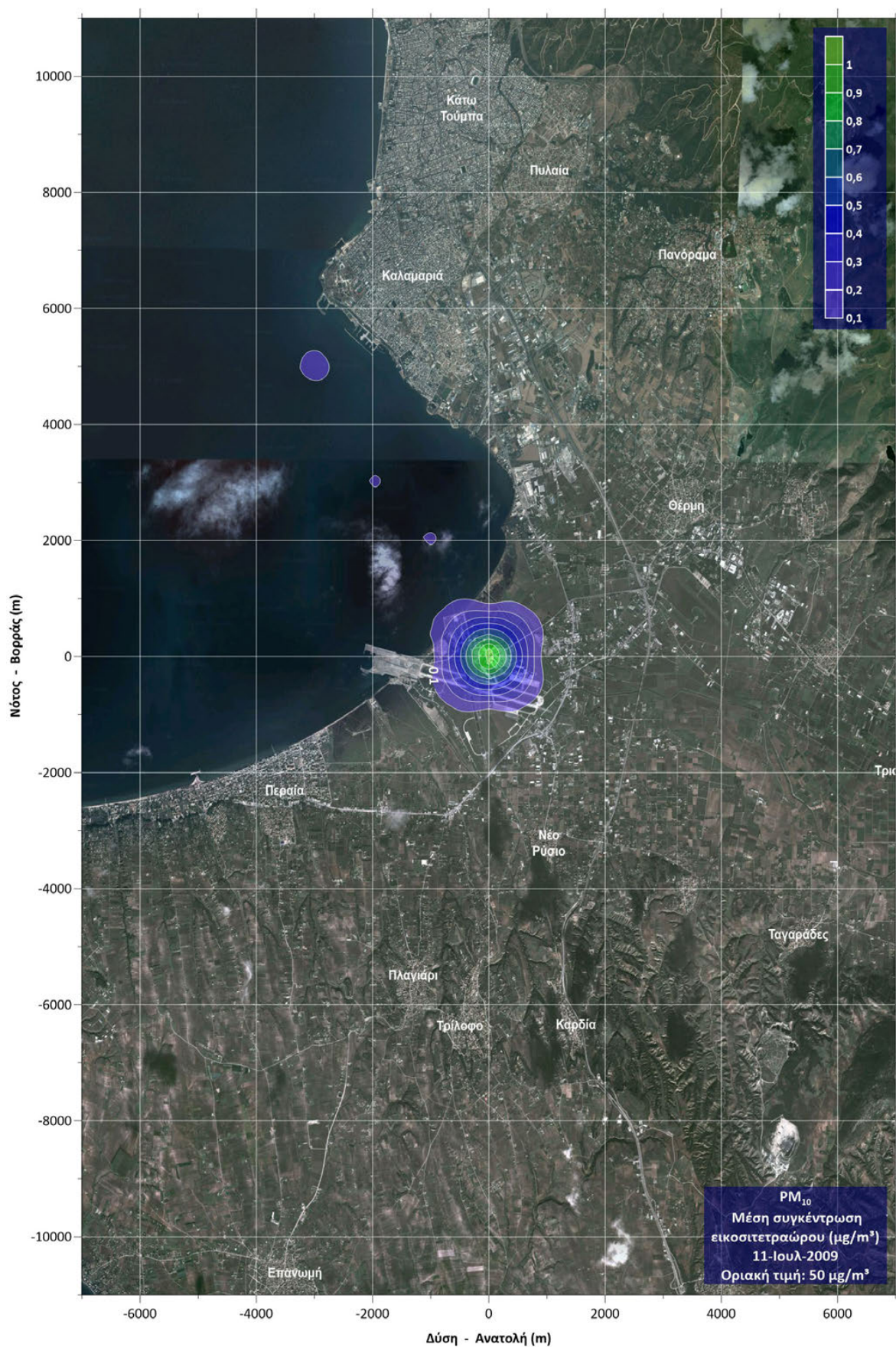
Γράφημα 64: Συγκέντρωση NO_x στη δυσμενέστερη ώρα του τρίτου δεκαημέρου Αυγούστου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.



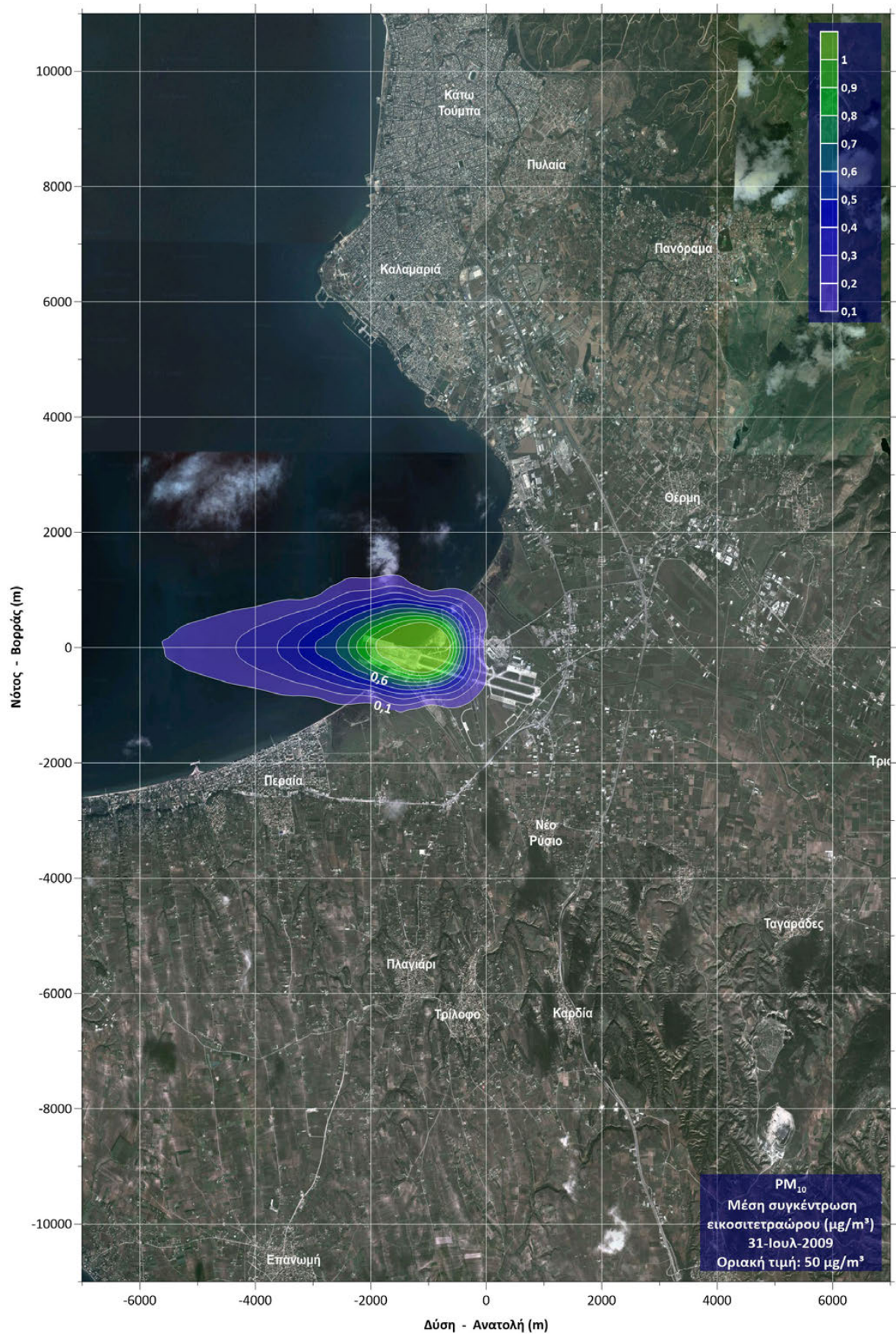
Γράφημα 65: Ετήσια μέση συγκέντρωση NO_x (2009) στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.



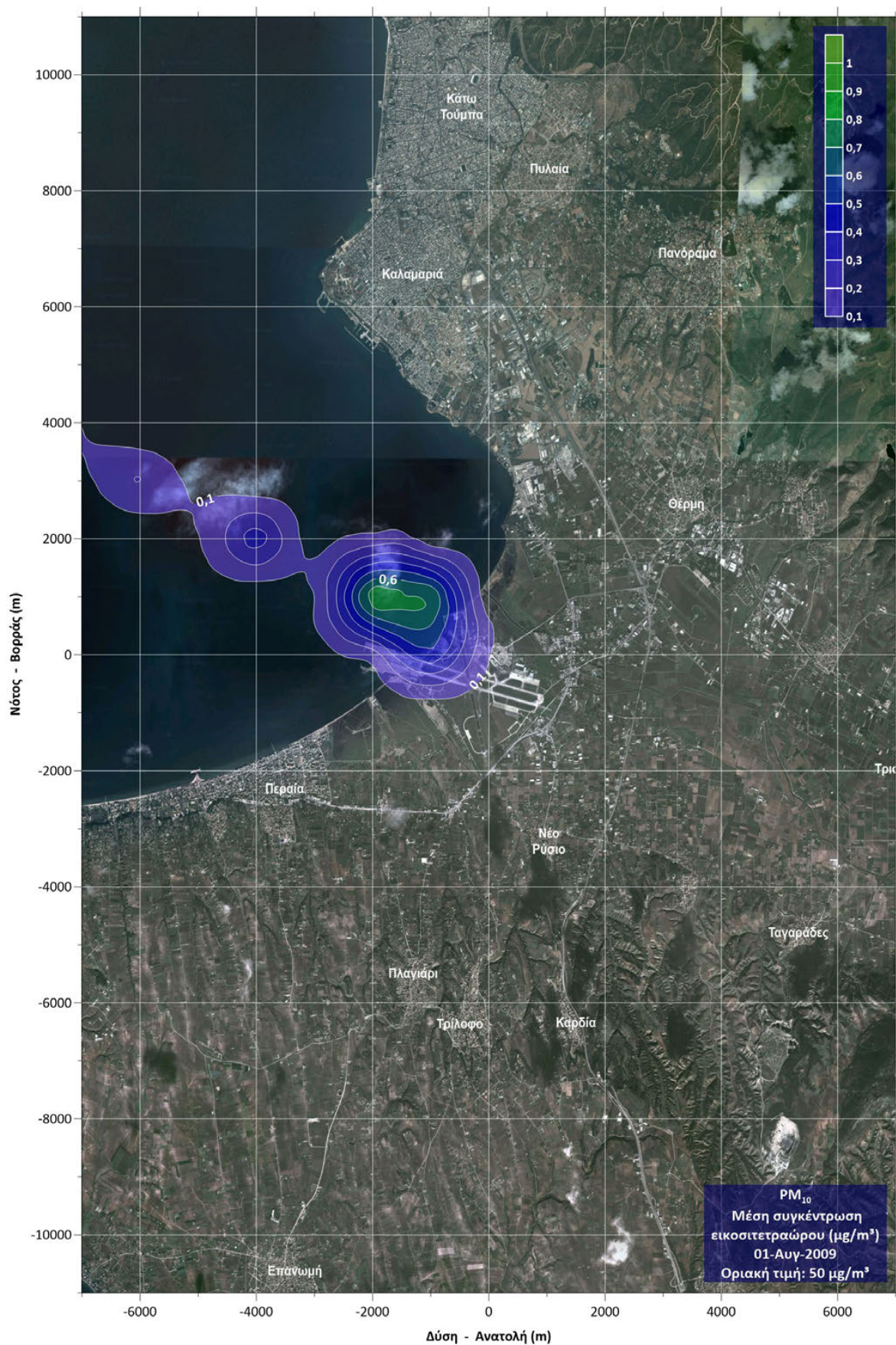
Γράφημα 66: Συγκέντρωση PM₁₀ στο δυσμενέστερο 24ωρο του πρώτου δεκαημέρου Ιουλίου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.



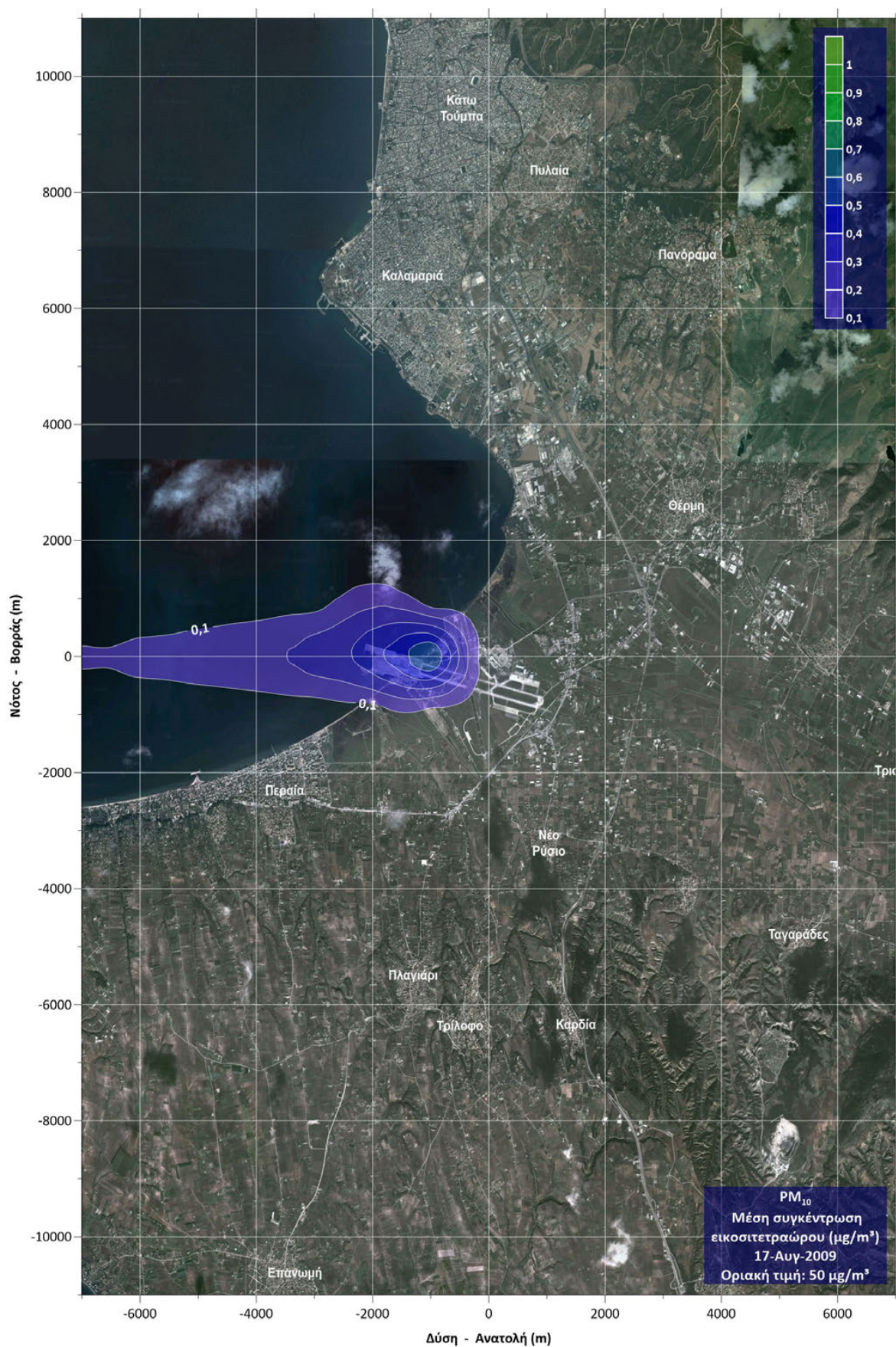
Γράφημα 67: Συγκέντρωση PM₁₀ στο δυσμενέστερο 24ωρο του δεύτερου δεκαημέρου Ιουλίου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.



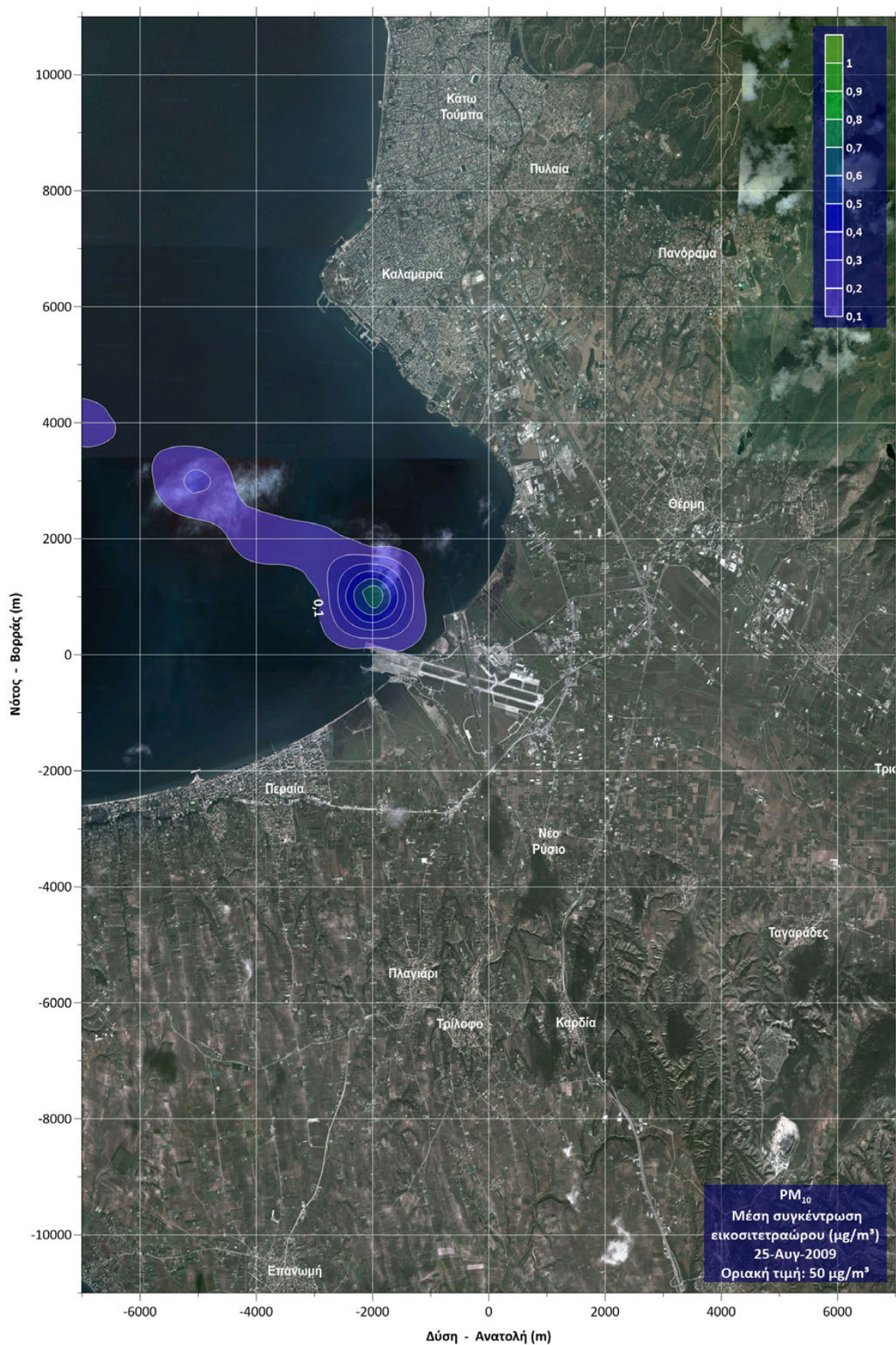
Γράφημα 68: Συγκέντρωση PM_{10} στο δυσμενέστερο 24ωρο του τρίτου δεκαήμερου Ιουλίου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.



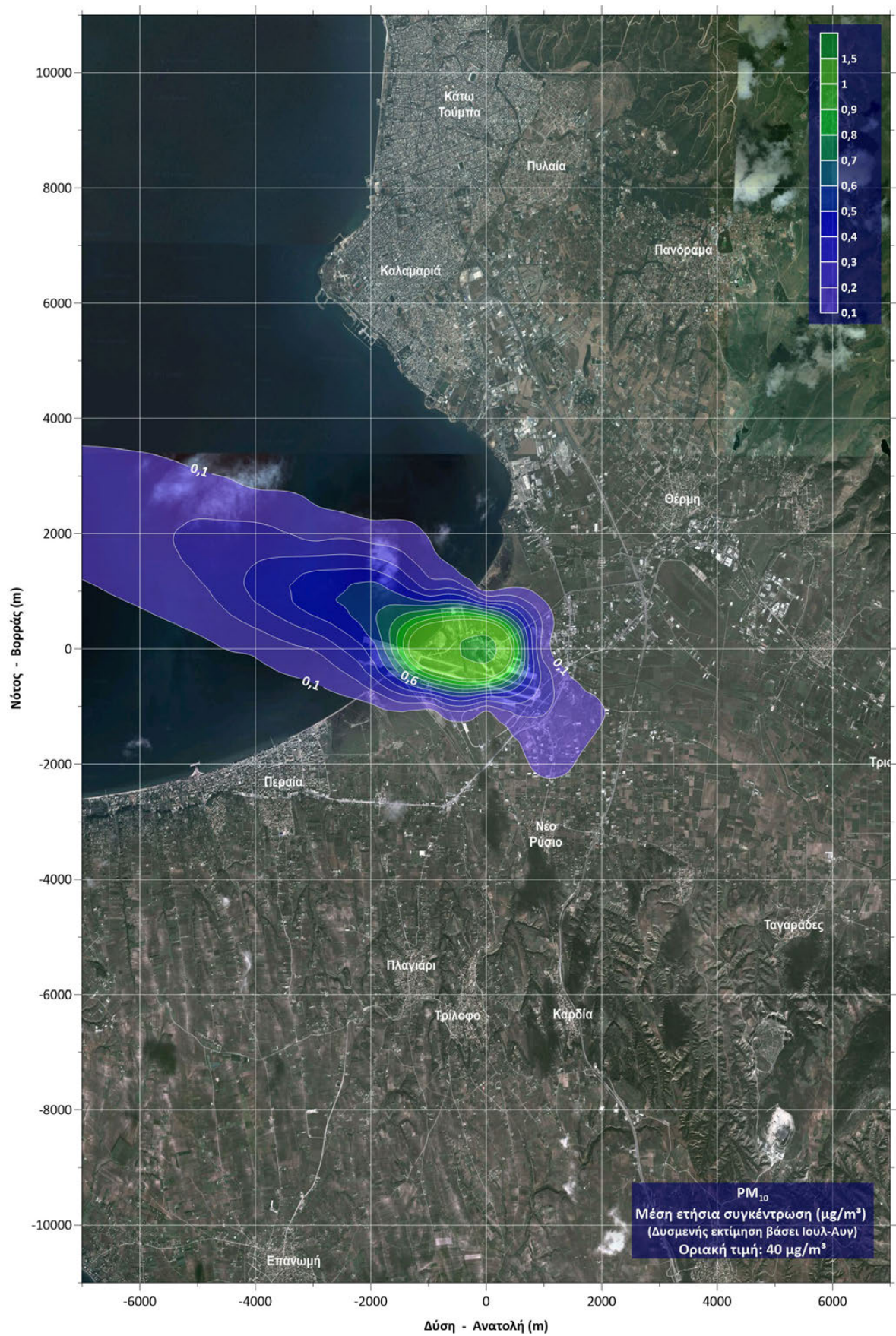
Γράφημα 69: Συγκέντρωση PM₁₀ στο δυσμενέστερο 24ωρο του πρώτου δεκαημέρου Αυγούστου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.



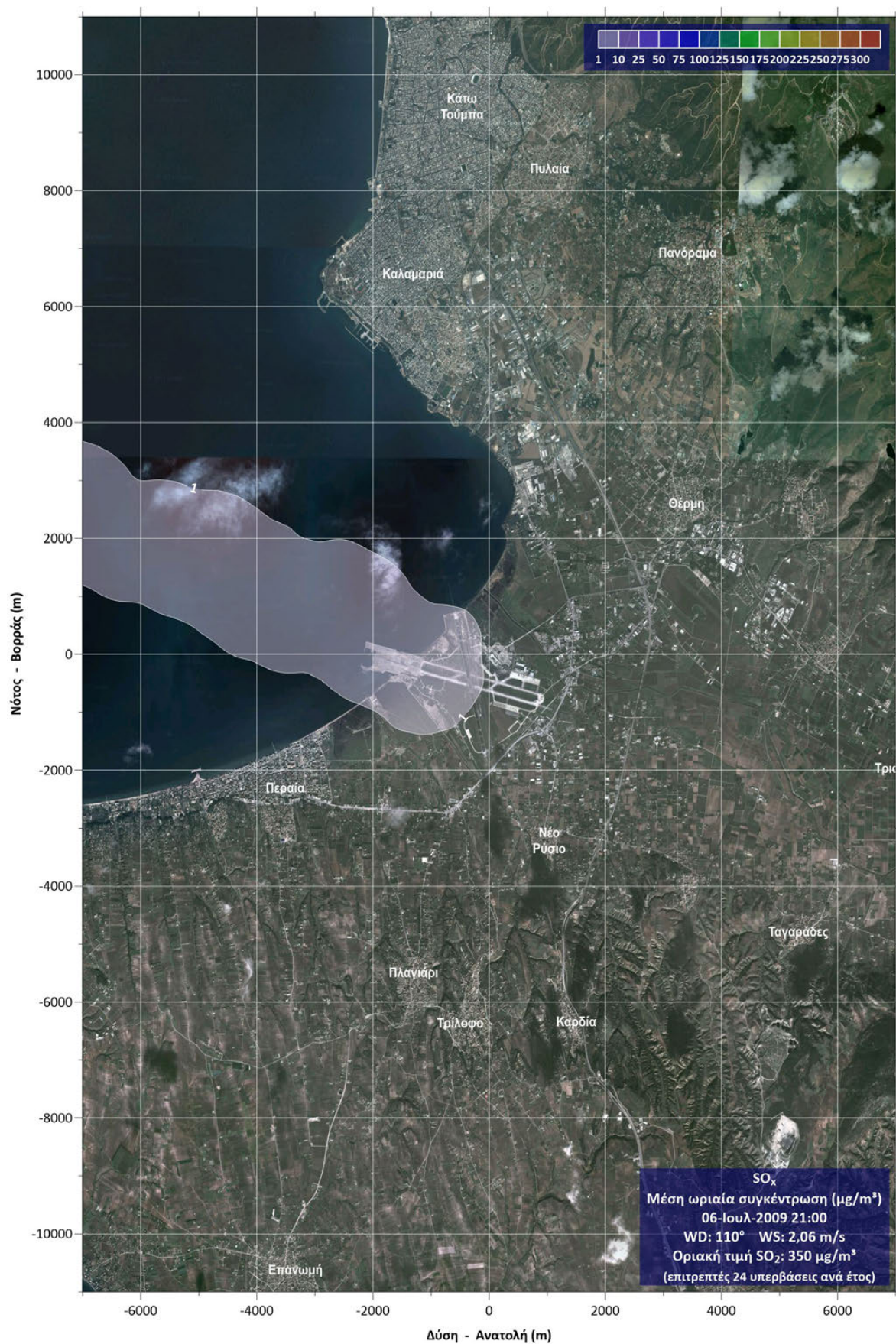
Γράφημα 70: Συγκέντρωση PM₁₀ στο δυσμενέστερο 24ωρο του δεύτερου δεκαημέρου Αυγούστου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.



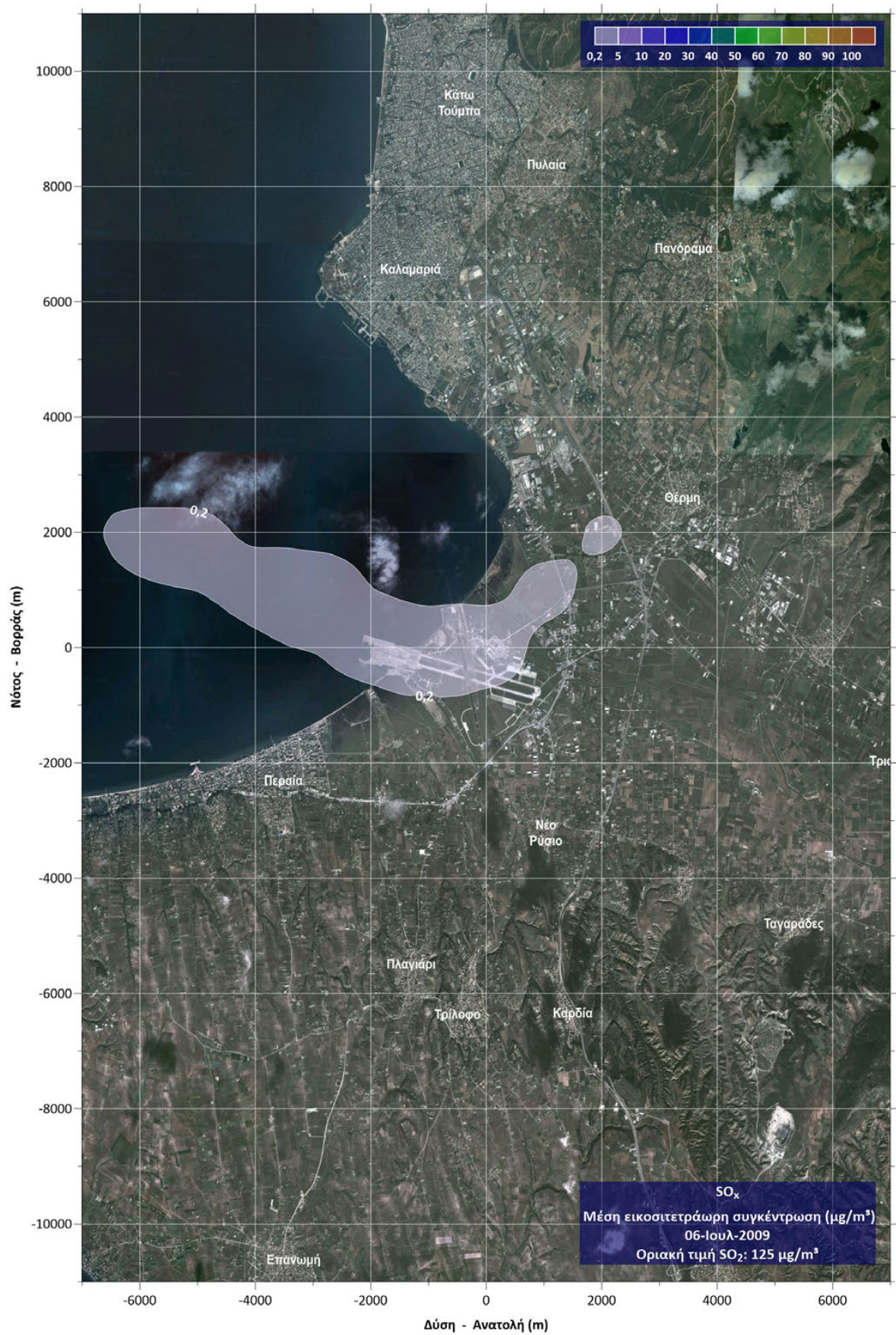
Γράφημα 71: Συγκέντρωση PM₁₀ στο δυσμενέστερο 24ωρο του τρίτου δεκαημέρου Αυγούστου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.



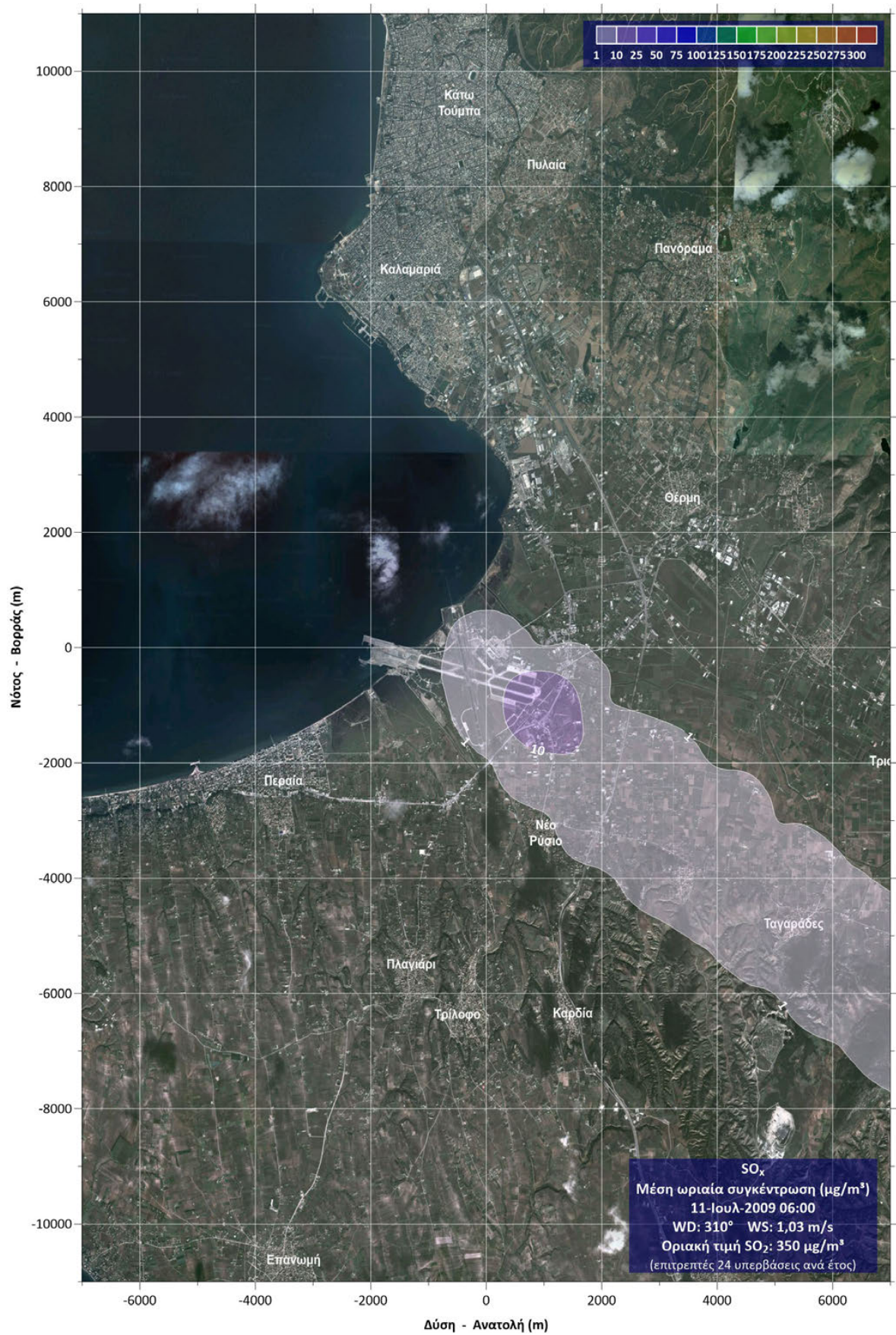
Γράφημα 72: Μέση ετήσια συγκέντρωση PM₁₀ στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.



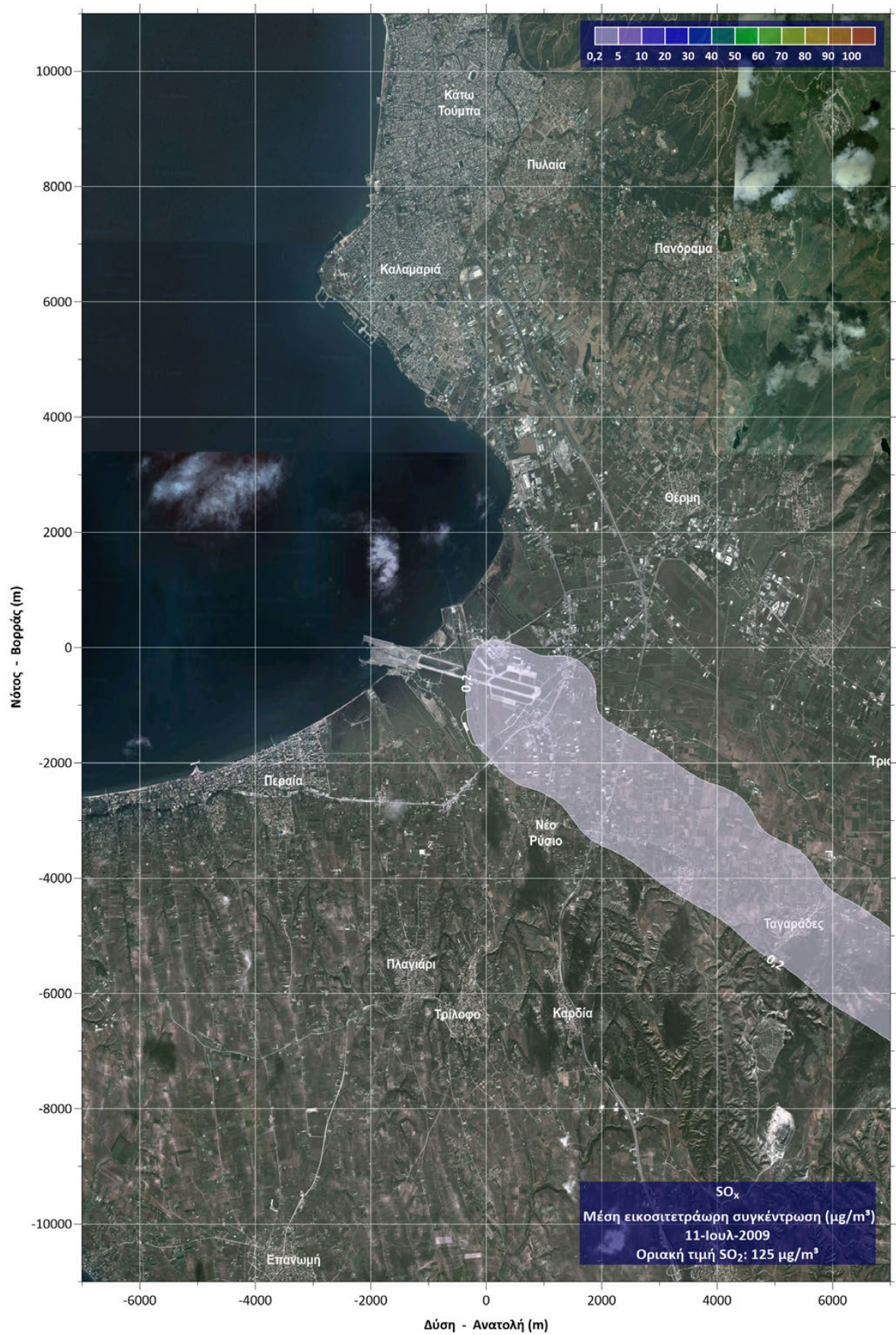
Γράφημα 73: Συγκέντρωση SO_x στη δυσμενέστερη ώρα του πρώτου δεκαημέρου Ιουλίου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.



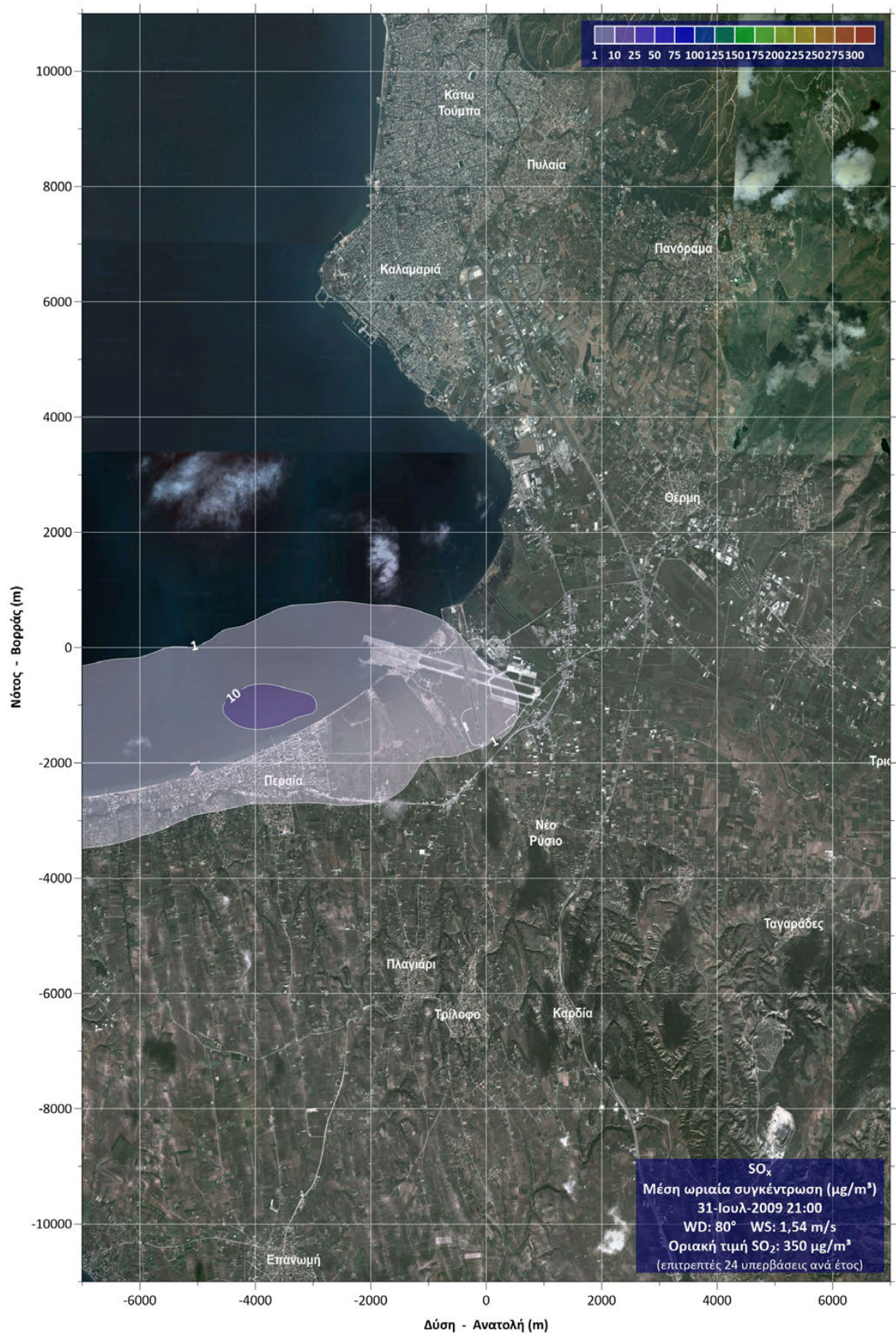
Γράφημα 74: Συγκέντρωση SO_x στο δυσμενέστερο 24ωρο του πρώτου δεκαημέρου Ιουλίου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.



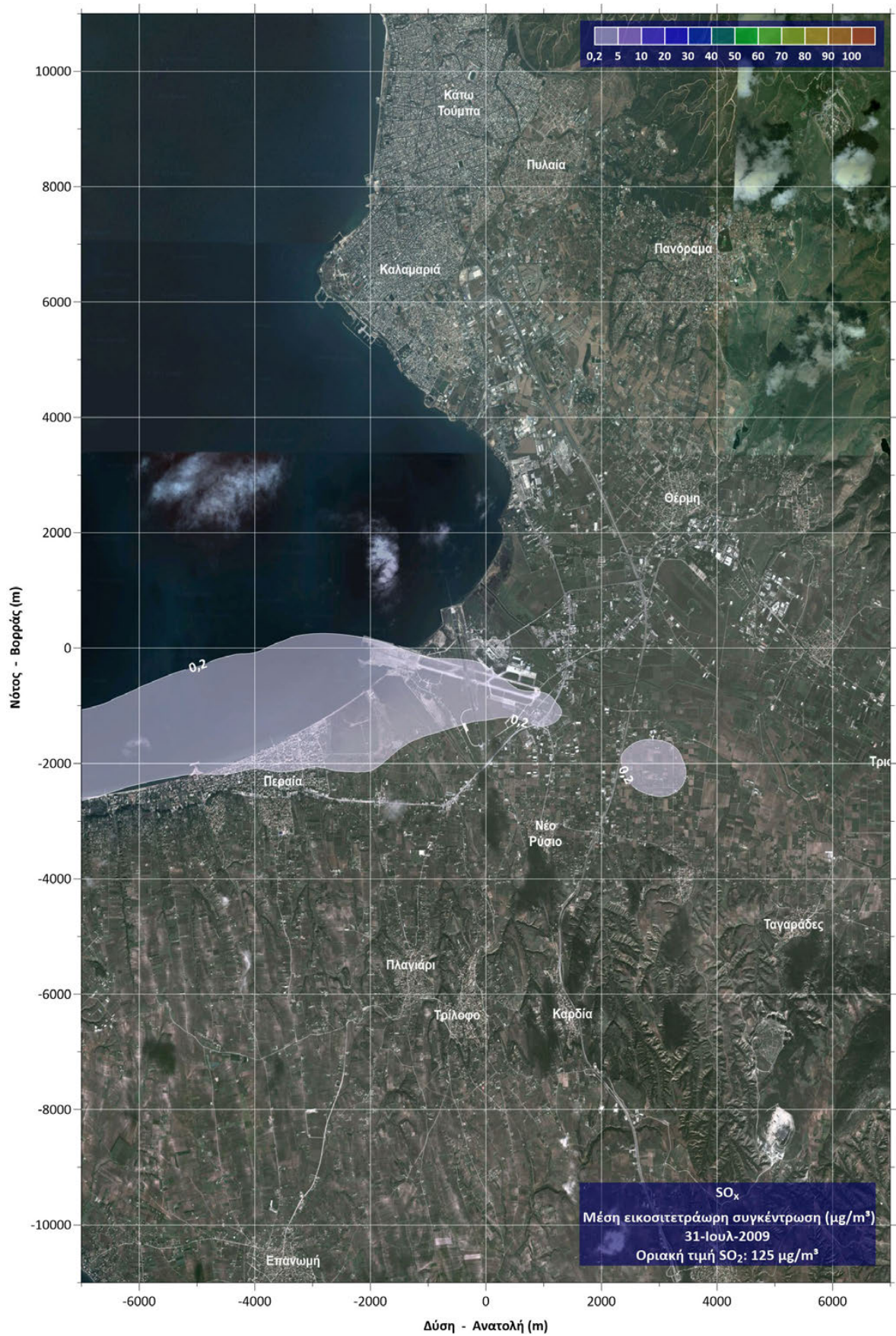
Γράφημα 75: Συγκέντρωση SO_x στη δυσμενέστερη ώρα του δεύτερου δεκαημέρου Ιουλίου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.



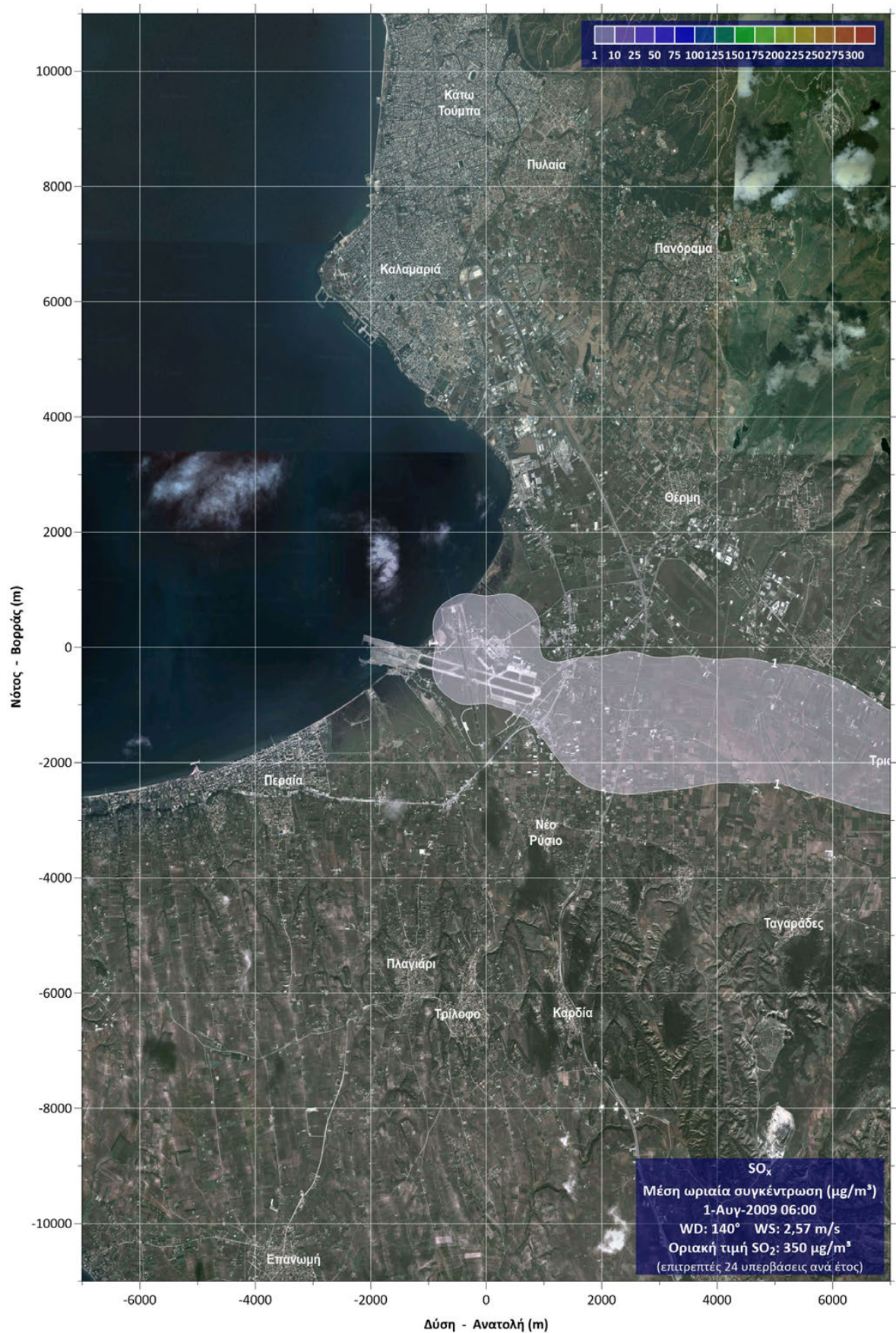
Γράφημα 76: Συγκέντρωση SO_x στο δυσμενέστερο 24ωρο του δεύτερου δεκαημέρου Ιουλίου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.



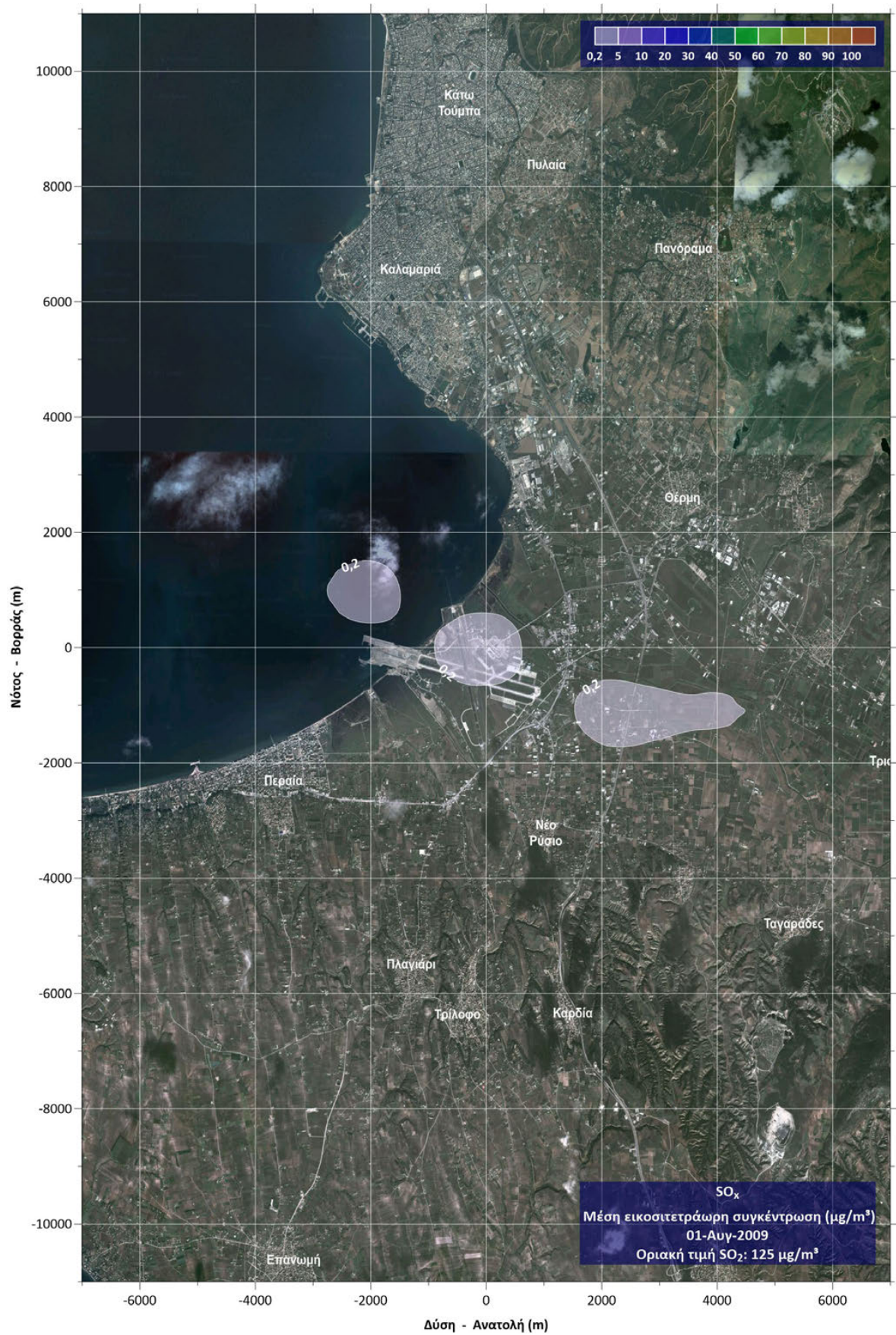
Γράφημα 77: Συγκέντρωση SO_x στη δυσμενέστερη ώρα του τρίτου δεκαημέρου Ιουλίου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.



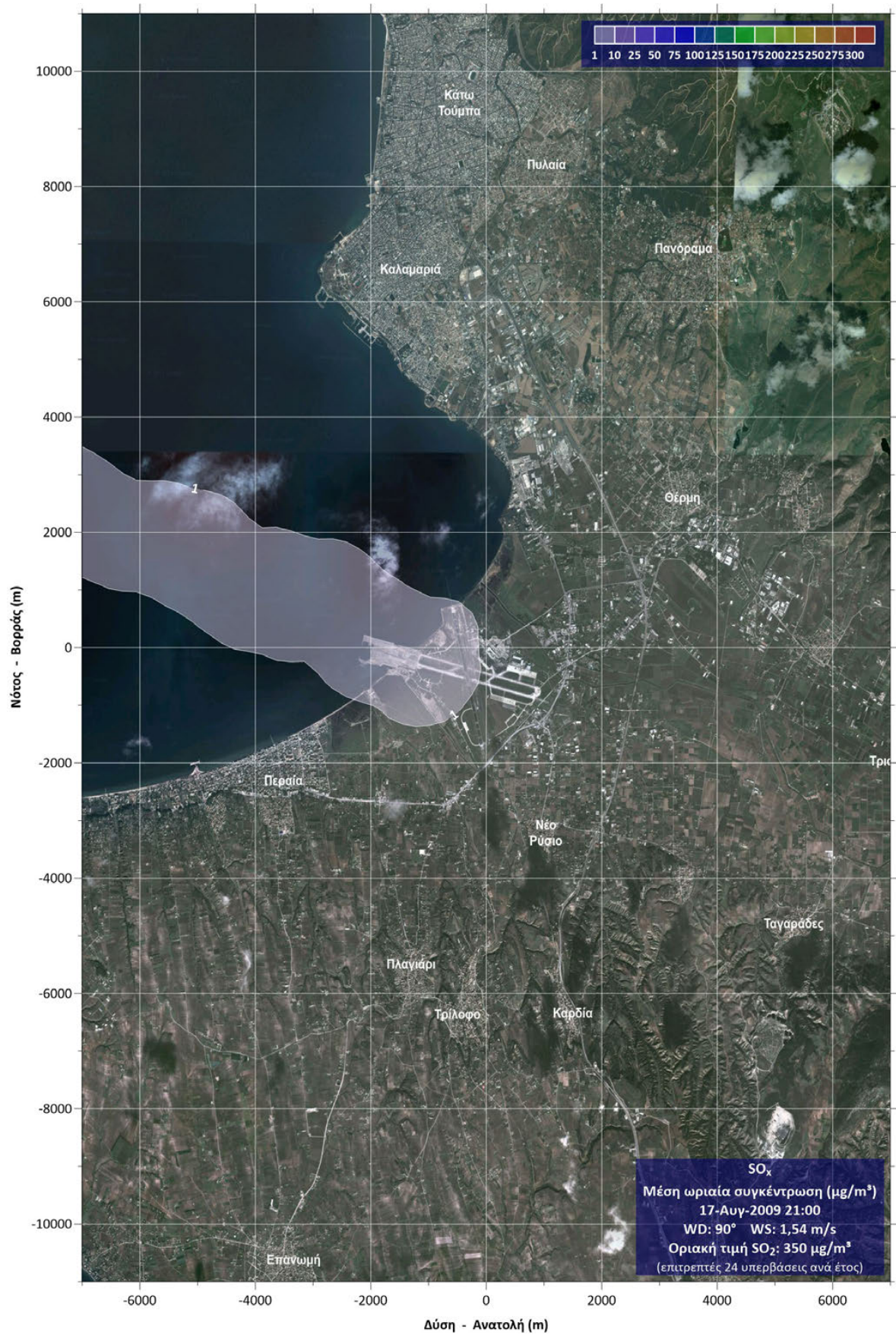
Γράφημα 78: Συγκέντρωση SO_x στο δυσμενέστερο 24ωρο του τρίτου δεκαημέρου Ιουλίου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.



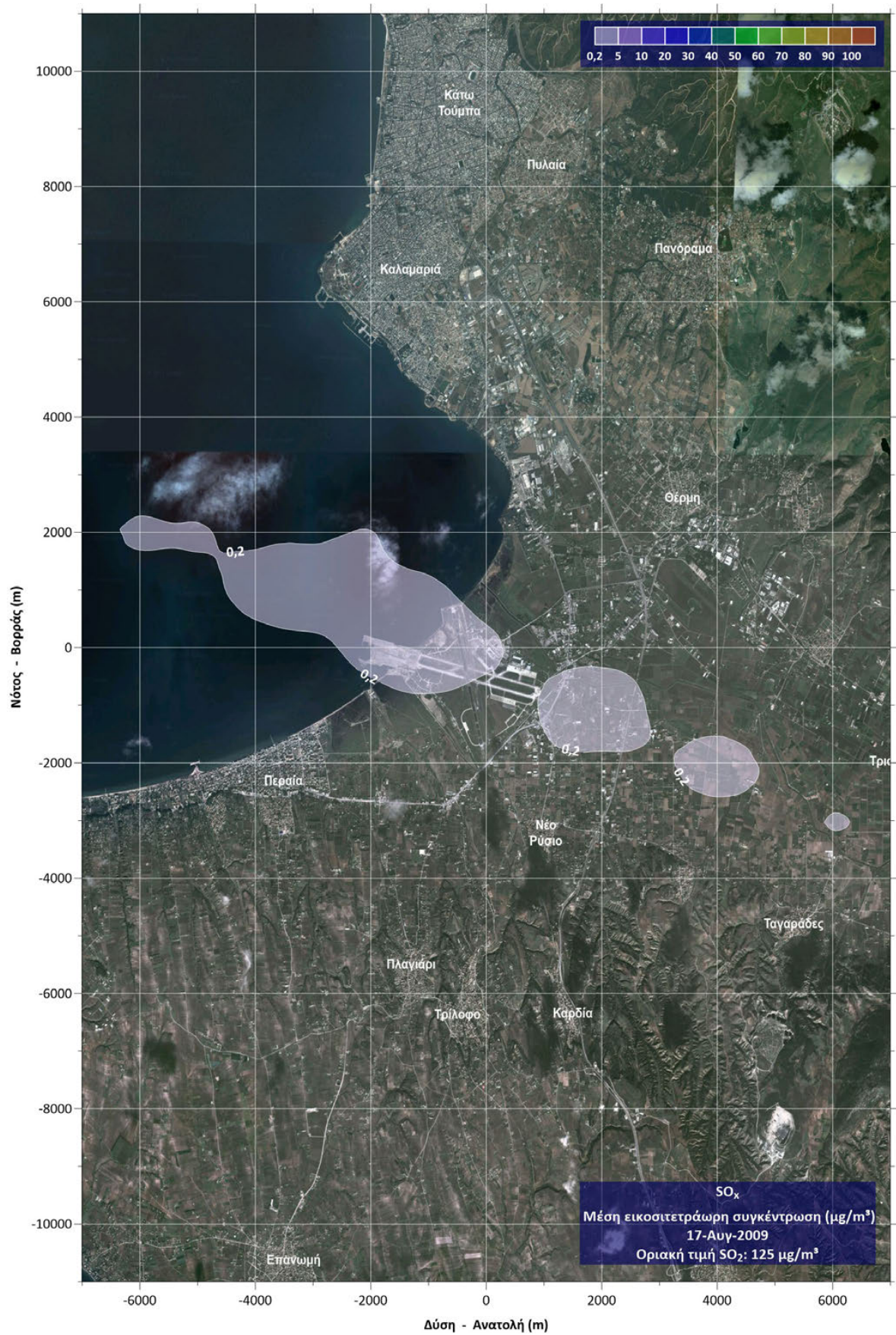
Γράφημα 79: Συγκέντρωση SO_x στη δυσμενέστερη ώρα του πρώτου δεκαημέρου Αυγούστου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.



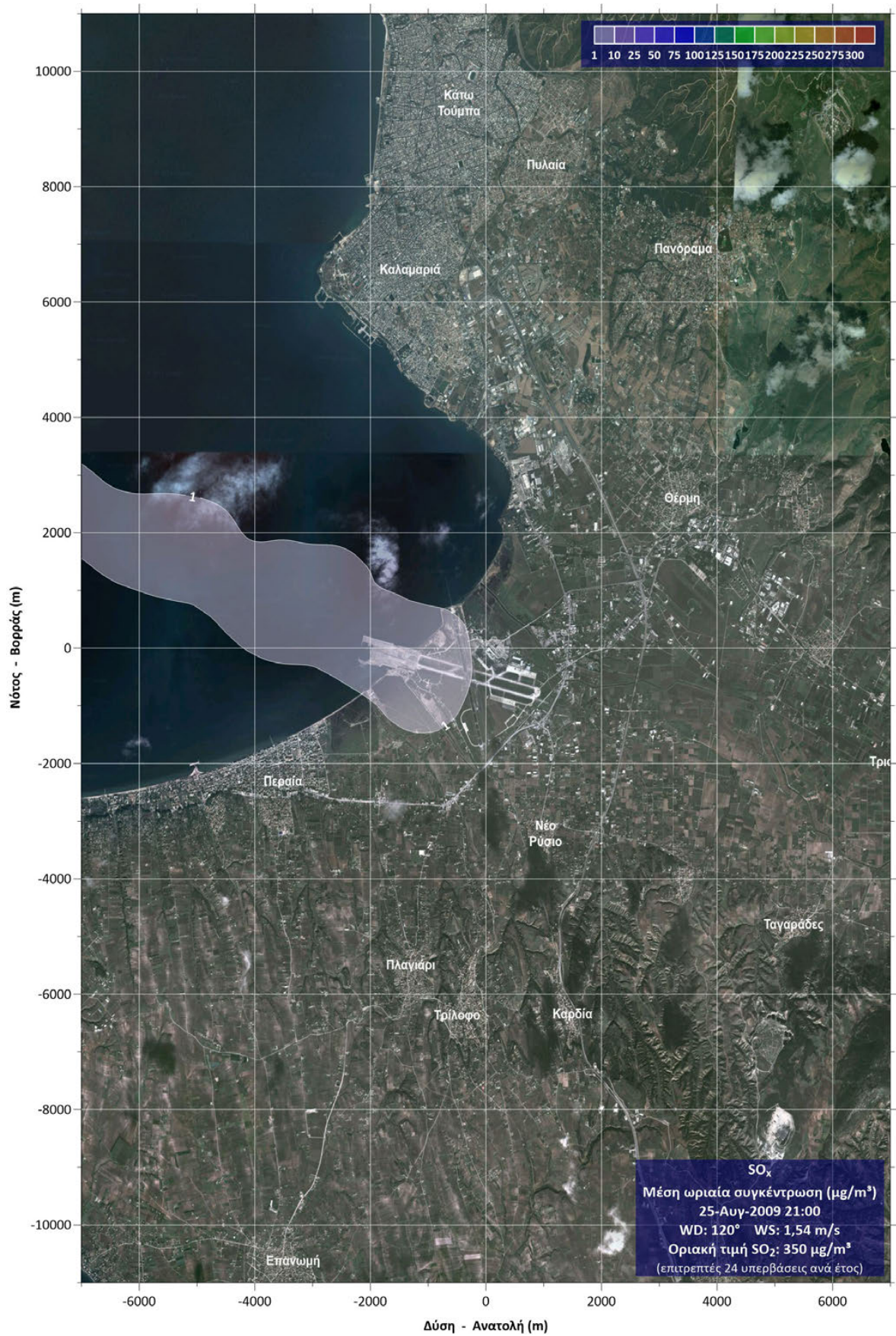
Γράφημα 80: Συγκέντρωση SO_x στο δυσμενέστερο 24ωρο του πρώτου δεκαημέρου Αυγούστου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.



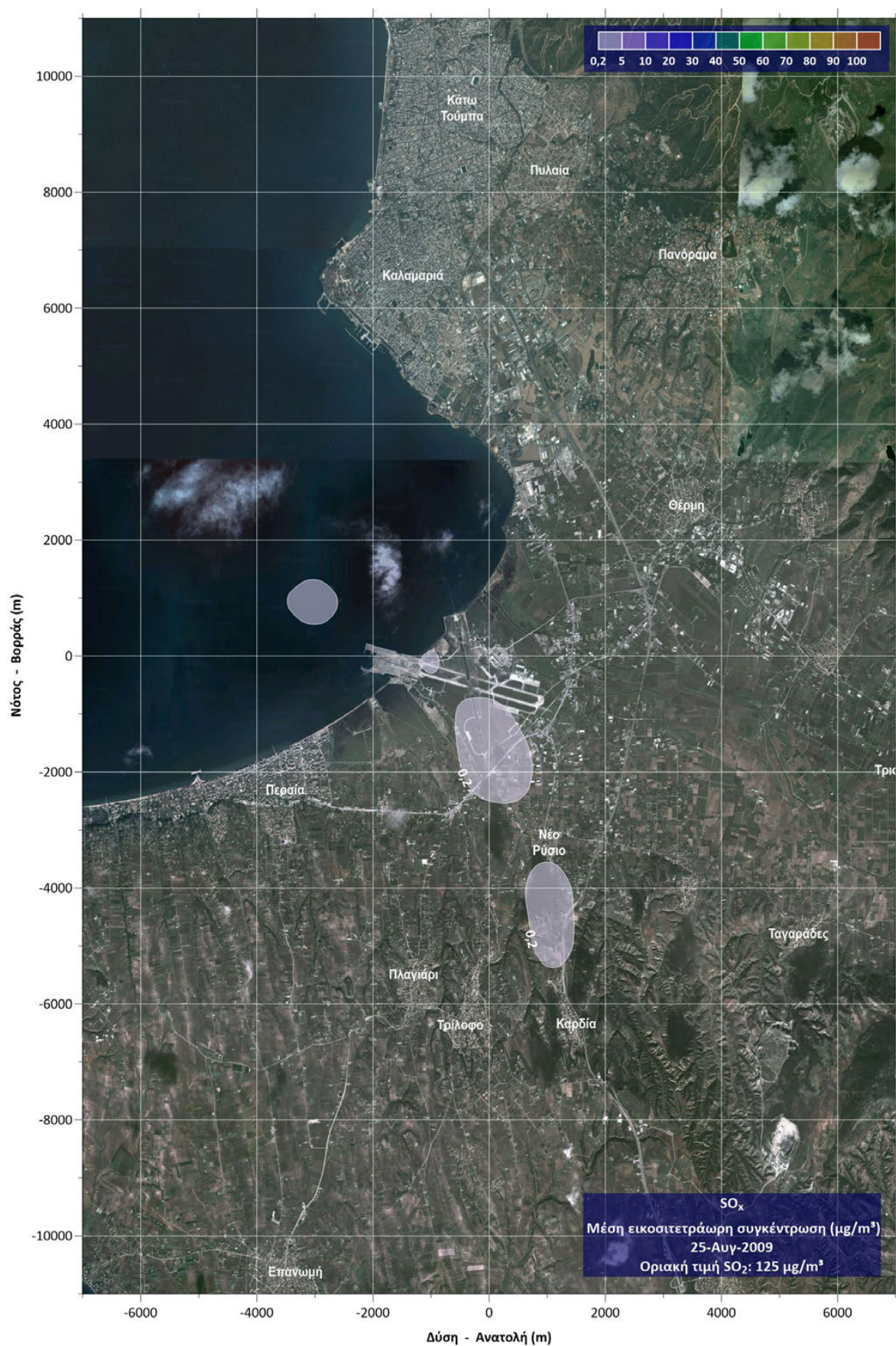
Γράφημα 81: Συγκέντρωση SO_x στη δυσμενέστερη ώρα του δεύτερου δεκαημέρου Αυγούστου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.



Γράφημα 82: Συγκέντρωση SO_x στο δυσμενέστερο 24ωρο του δεύτερου δεκαημέρου Αυγούστου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.



Γράφημα 83: Συγκέντρωση SO_x στη δυσμενέστερη ώρα του τρίτου δεκαήμερου Αυγούστου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.



Γράφημα 84: Συγκέντρωση SO_x στο δυσμενέστερο 24ωρο του τρίτου δεκαημέρου Αυγούστου στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης.

Στα παραπάνω γραφήματα αποτυπώθηκαν τα αποτελέσματα των υπολογισμών συγκέντρωσης αέριων ρύπων στην περιοχή του αερολιμένα Θεσσαλονίκης, τα οποία προέρχονται από τις πτήσεις της πολιτικής αεροπορίας, χωρίς δηλαδή να περιληφθούν στους υπολογισμούς οι στρατιωτικές πτήσεις, οι οποίες άλλωστε είναι πολύ λιγότερες και χρονικά ακανόνιστες.

Οι συγκεντρώσεις υπολογίστηκαν και παρουσιάστηκαν σε χρονική κλίμακα όμοια με αυτή που έχει υιοθετηθεί στη θέσπιση ορίων, δηλαδή μέση τιμή οκταώρου για το CO, μέση τιμή ώρας και μέση τιμή έτους για τα NO_x, μέση τιμή έτους για τα PM_{2.5}, μέση τιμή εικοσιτετραώρου για τα PM₁₀, και μέση τιμή ώρας και εικοσιτετραώρου για τα SO_x.

Στα γραφήματα παρουσιάστηκαν οι δυσμενέστερες ανά δεκαήμερο περιπτώσεις του διμήνου Ιουλίου - Αυγούστου 2009. Όπως προαναφέρθηκε, το 2009 επελέγη ως έτος αναφοράς επειδή στη διάρκειά του καταγράφηκε ο υψηλότερος αριθμός αεροπορικών κινήσεων στα μεγάλα αεροδρόμια της χώρας, ο οποίος έως και το 2016 δεν έχει ξεπεραστεί. Παράλληλα, το δίμηνο Ιουλίου - Αυγούστου αποτελεί το διάστημα του έτους στο οποίο κορυφώνεται ο αριθμός των αεροπορικών κινήσεων. Συνεπώς, τα παραπάνω γραφήματα απεικονίζουν τις δυσμενέστερες ρεαλιστικά αναμενόμενες καταστάσεις διασποράς αέριων ρύπων στην περιοχή του αερολιμένα Θεσσαλονίκης, οι οποίες πάντως αναμένεται να εμφανίζονται σπάνια, ενώ η συνήθης κατάσταση αναμένεται να είναι σαφώς ευνοϊκότερη.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων που αποτυπώθηκαν στα παραπάνω γραφήματα, σε ότι αφορά τη γεωγραφική τους εξάπλωση και τη σύγκρισή τους με τις ισχύουσες οριακές τιμές, παρουσιάζεται στην ενότητα 6.2.5 του επόμενου κεφαλαίου.

5.4. Αερολιμένας Ηρακλείου

Ο Κρατικός Αερολιμένας Ηρακλείου (ΚΑΗΚ) βρίσκεται 4 km ανατολικά της πόλης. Ο αριθμός των επιβατών που εξυπηρετεί ο ΚΑΗΚ, της τάξεως $5,4 \cdot 10^6$ ετησίως (~12,8% του συνόλου επιβατών που διακινείται στα ελληνικά αεροδρόμια), τον κατατάσσουν δεύτερο μεταξύ των ελληνικών αερολιμένων, ενώ από την άποψη των κινήσεων αεροσκαφών βρίσκεται στην τρίτη θέση, μετά τον αερολιμένα Θεσσαλονίκης, εξυπηρετώντας περίπου το 10,3% του μέσου ετήσιου αριθμού πτήσεων.

Οι υψηλοί φόρτοι του ΚΑΗΚ, σε συνδυασμό με τη θέση του σε επαφή με τον αστικό ιστό της Νέας Αλικαρνασσού, τον καθιστούν μια προφανή επιλογή προς διερεύνηση των ατμοσφαιρικών του επιπτώσεων.

Για την εκτίμηση και αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του αερολιμένα, έχει μεταξύ άλλων εκπονηθεί πρόσφατα επικαιροποιημένη Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων^[22] η οποία αξιοποιείται στην παρούσα διατριβή κυρίως ως πηγή στοιχείων. Επιπλέον, πολλά από τα βασικά στοιχεία λειτουργίας του ΚΑΗΚ αντλούνται από τα ετήσια περιβαλλοντικά δελτία του αερολιμένα που ήταν διαθέσιμα την περίοδο διεξαγωγής των υπολογισμών.^[23,24]

5.4.1. Διάταξη

Τα βασικά στοιχεία της γεωμετρίας του ΚΑΗΚ είναι:

- Ο κύριος διάδρομος 9-27, ο οποίος χρησιμοποιείται από τα μεσαίου και μεγάλου μεγέθους αεροσκάφη.
- Ο δευτερεύων διάδρομος 12-30, που χρησιμοποιείται μόνο από αεροσκάφη μικρού μεγέθους.
- Η βασική πύλη των αεροσκαφών μεσαίου και μεγάλου μεγέθους, η οποία αποτελείται από την έκταση μπροστά από τον αεροσταθμό, όπου πραγματοποιούνται οι επίγειες διαδικασίες πριν από την αναχώρηση και μετά την άφιξη των σκαφών.
- Η δευτερεύουσα πύλη των επίγειων διαδικασιών για τα μικρά αεροσκάφη.
- Οι τροχόδρομοι σύνδεσης της βασικής πύλης με τα δύο άκρα του κύριου διαδρόμου.
- Οι τροχόδρομοι σύνδεσης της δευτερεύουσας πύλης με τα άκρα του διαδρόμου 12-30.
- Το κτίριο του αεροσταθμού.
- Ο υπαίθριος χώρος στάθμευσης.

Η διάταξη των στοιχείων αυτών, όπως εισήχθησαν στο EDMS παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα, όπου η αεροφωτογραφία υποβάθρου προέρχεται από το Google Earth Plus και με μαύρο χρώμα φαίνονται οι διάδρομοι, με γκρι οι τροχόδρομοι, με πράσινο οι πύλες, με μπλε ο αεροσταθμός και με κόκκινο ο χώρος στάθμευσης. Ο χάρτης είναι προσανατολισμένος (βορράς προς τα πάνω).

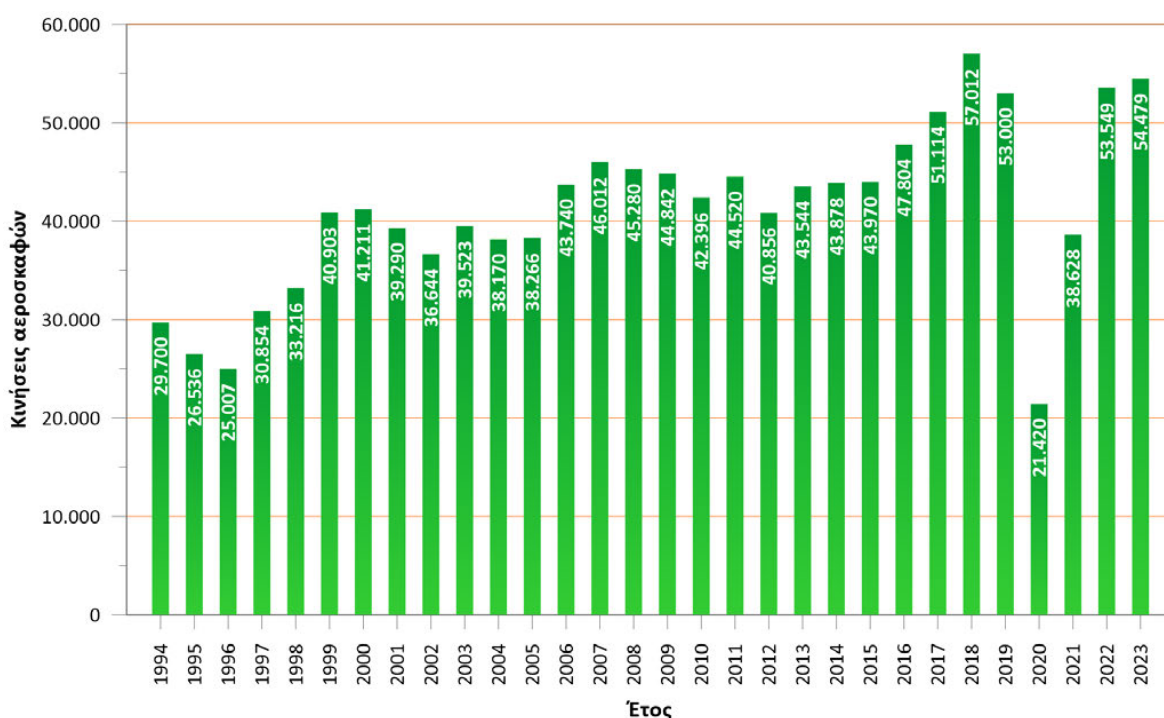


Σχήμα 7: Η διάταξη του ΚΑΗΚ εισηγμένη στο EDMS.

5.4.2. Αεροπορική κυκλοφορία

Για τις κινήσεις αεροσκαφών στον ΚΑΗΚ, στο πλαίσιο των όσων αναφέρονται στην ενότητα 5.1 παραπάνω, διαμορφώθηκε μια προσέγγιση ρεαλιστικά δυσμενούς σεναρίου, μέσω προσαύξησης στα πραγματικά στοιχεία κυκλοφορίας του έτους 2009^[23] ώστε τα αποτελέσματα να καλύπτουν και το ενδεχόμενο μικρής μελλοντικής αύξησης στην εναέρια κυκλοφορία του αεροδρομίου.

Η εξέλιξη της συνολικής ετήσιας κίνησης αεροσκαφών στον αερολιμένα Ηρακλείου από το 1994 και εξής, βάσει των στοιχείων της ΥΠΑ,^[25] παρουσιάζεται στο επόμενο γράφημα.



Γράφημα 85: Εξέλιξη του ετήσιου αριθμού αεροσκαφών που εξυπηρετούνται από τον ΚΑΗΚ.

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία, διαφαίνεται ότι μια ετήσια συνολική κυκλοφορία μεγέθους 50.000 κινήσεων (δηλαδή 25.000 LTOs) αποτελεί μια ρεαλιστικά παραδοχή μεγίστου φόρτου για τους υπολογισμούς ποιότητας αέρα γύρω από τον αερολιμένα Ηρακλείου.

5.4.3. Μίγμα αεροσκαφών

Το μερίδιο των κινήσεων ανά τύπο αεροσκάφους διαμορφώθηκε κατ' αναλογία με τα στοιχεία της ΜΠΕ^[22] και παρουσιάζεται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 6: Μίγμα αεροσκαφών του ΚΑΗΚ.

Τύπος αεροσκάφους	Μέγεθος και πρόωση	Αριθμός πτήσεων	Ποσοστό
Airbus 300	Βαρύ αεριωθούμενο	300	0,6%
Airbus 320	Μεγάλο αεριωθούμενο	9.000	18,0%
Airbus 321	Μεγάλο αεριωθούμενο	6.500	13,0%
Airbus 330	Βαρύ αεριωθούμενο	150	0,3%
ATR 42-300	Μικρό ελικοφόρο	1.900	3,8%
ATR 72-500	Μεγάλο ελικοφόρο	2.400	4,8%
Avro RJ-85	Μεγάλο αεριωθούμενο	300	0,6%
Boeing 717-200	Μεγάλο αεριωθούμενο	250	0,5%
Boeing 737-200	Μεγάλο αεριωθούμενο	24.500	49,0%
Boeing 747-300	Βαρύ αεριωθούμενο	150	0,3%
Boeing 757-200	Μεγάλο αεριωθούμενο	3.000	6,0%
Boeing 767-200	Βαρύ αεριωθούμενο	600	1,2%
Boeing 777-200	Βαρύ αεριωθούμενο	50	0,1%
McDonnell Douglas DC-9	Μεγάλο αεριωθούμενο	150	0,3%
McDonnell Douglas MD-81	Μεγάλο αεριωθούμενο	150	0,3%
Turbolev 154	Μεγάλο αεριωθούμενο	600	1,2%
Σύνολο		50.000	100,0%

5.4.4. Κατανομές κινήσεων

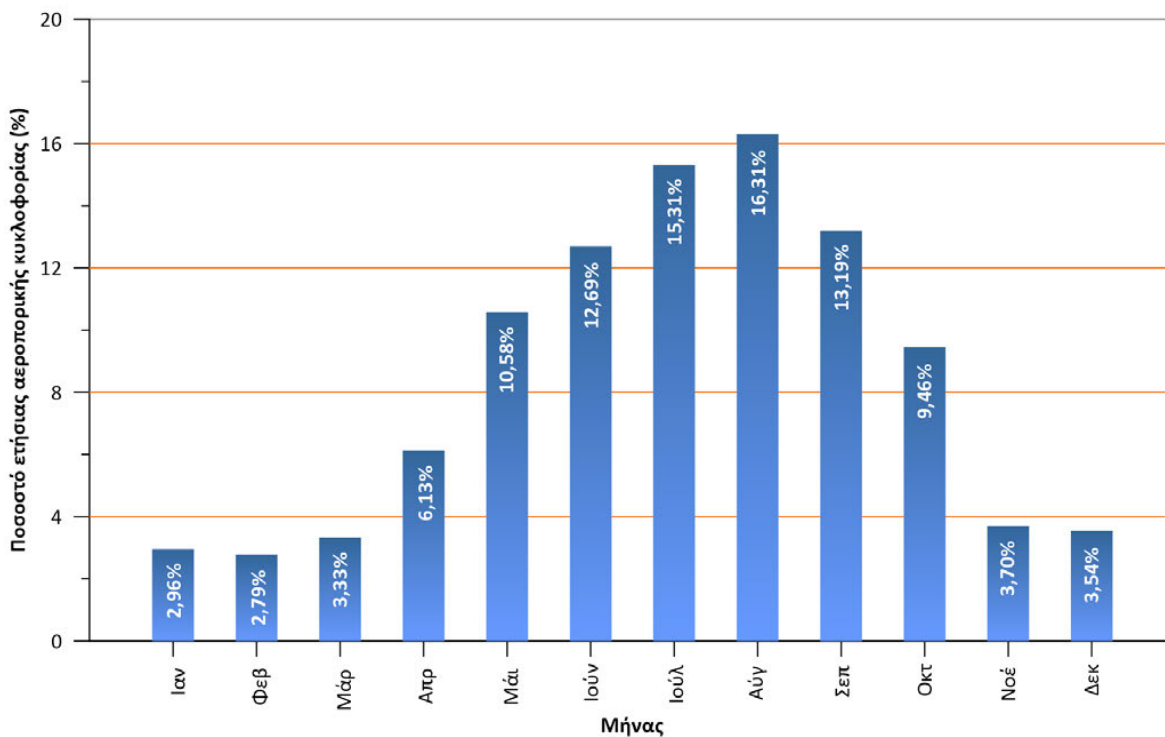
Χωρικά, οι κινήσεις αεροσκαφών κατανέμονται διακριτά στους δύο διαδρόμους του ΚΑΗΚ: τα μικρά αεροσκάφη χρησιμοποιούν τον μικρό πλάγιο δευτερεύοντα διάδρομο (12-30), ενώ τα μεγάλα και τα βαρέα αεροσκάφη χρησιμοποιούν τον κύριο διάδρομο (09-27).

Τα ποσοστά των κινήσεων ανά άκρο χρησιμοποιούμενου διαδρόμου από την κάθε κατηγορία αεροσκαφών είναι αυτά του επόμενου πίνακα.

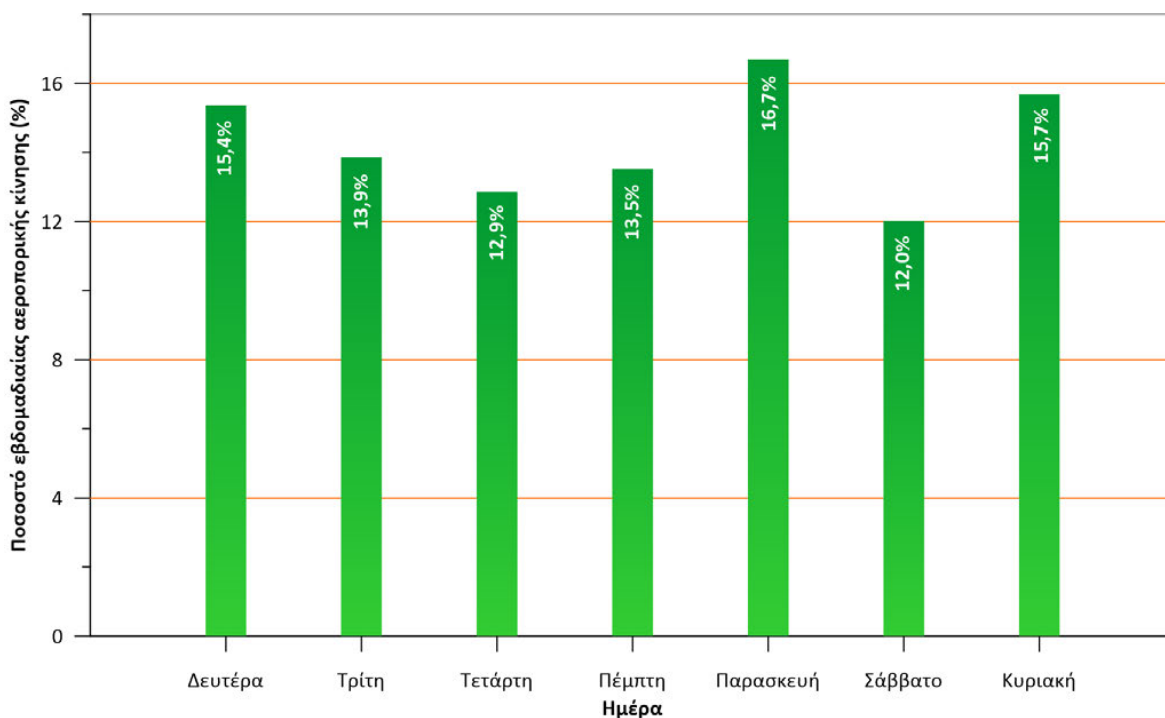
Πίνακας 7: Χρήση διαδρόμων του ΚΑΗΚ ανά κατηγορία αεροσκαφών.

Μέγεθος αεροσκάφους	Διάδρομος	Άκρο	Ποσοστό χρήσης	
			Απογειώσεις	Προσγειώσεις
Μικρά	Κύριος	9	0%	0%
		27	0%	0%
	Δευτερεύων	12	2%	2%
		30	98%	98%
Μεγάλα	Κύριος	9	7%	7%
		27	93%	93%
	Δευτερεύων	12	0%	0%
		30	0%	0%
Βαρέα	Κύριος	9	7%	7%
		27	93%	93%
	Δευτερεύων	12	0%	0%
		30	0%	0%

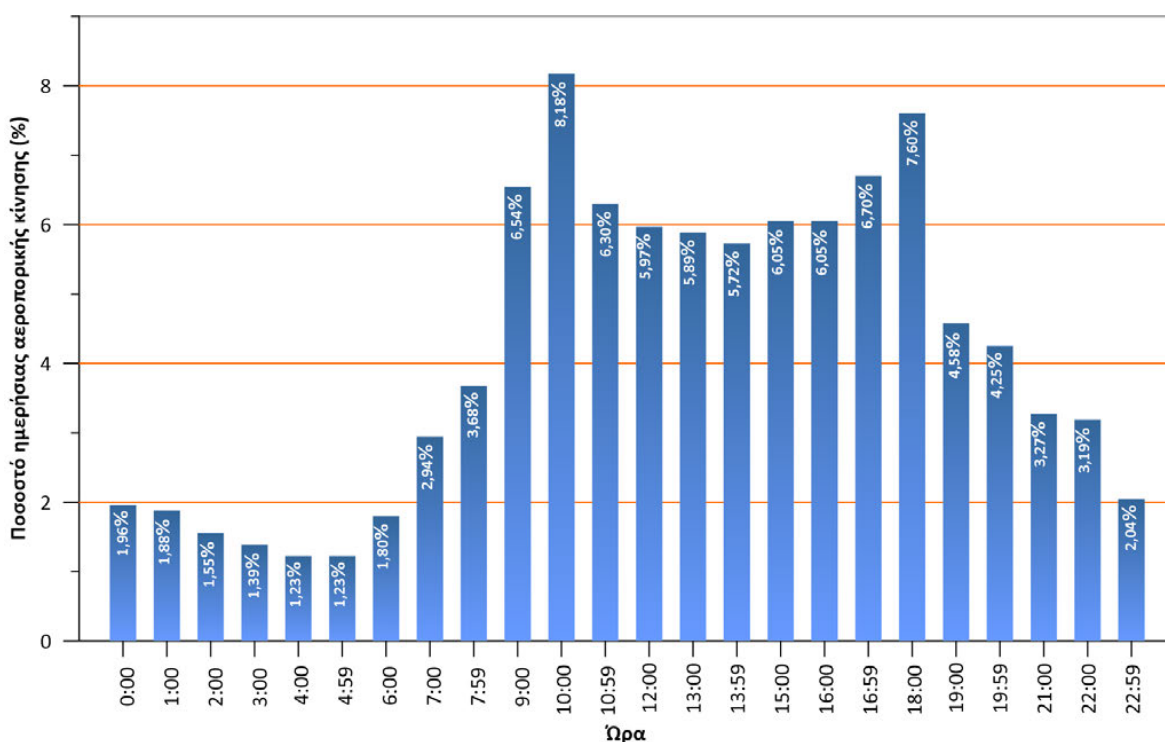
Χρονικά, οι κινήσεις σε μηνιαία, εβδομαδιαία και ημερήσια βάση, σύμφωνα με τα στοιχεία της ΥΠΑ^[21] και του αερολιμένα^[23] κατανέμονται με τον τρόπο που παρουσιάζεται στα επόμενα γραφήματα.



Γράφημα 86: Μηνιαία κατανομή των αεροπορικών κινήσεων στον ΚΑΗΚ το 2009.



Γράφημα 87: Εβδομαδιαία κατανομή των αεροπορικών κινήσεων στον ΚΑΗΚ το 2009.

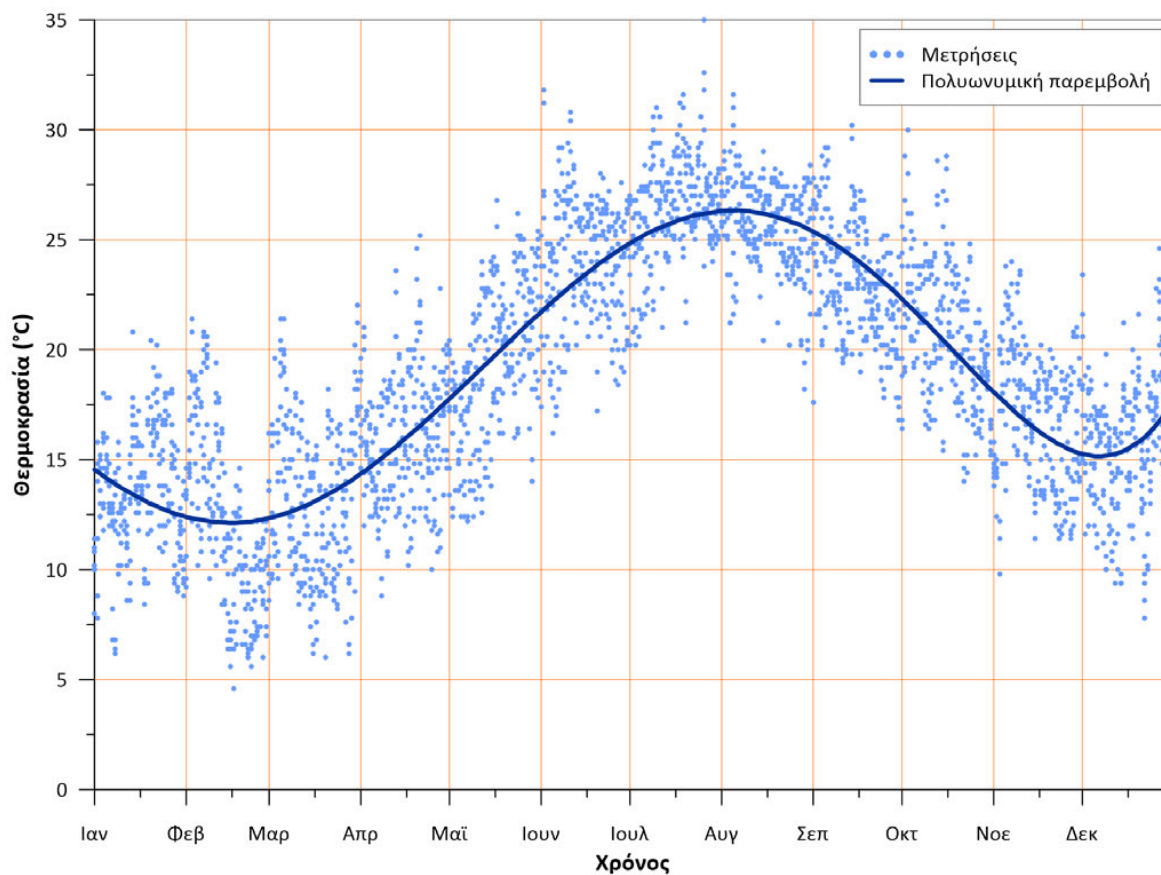


Γράφημα 88: Ημερήσια κατανομή των αεροπορικών κινήσεων στον ΚΑΗΚ το 2009.

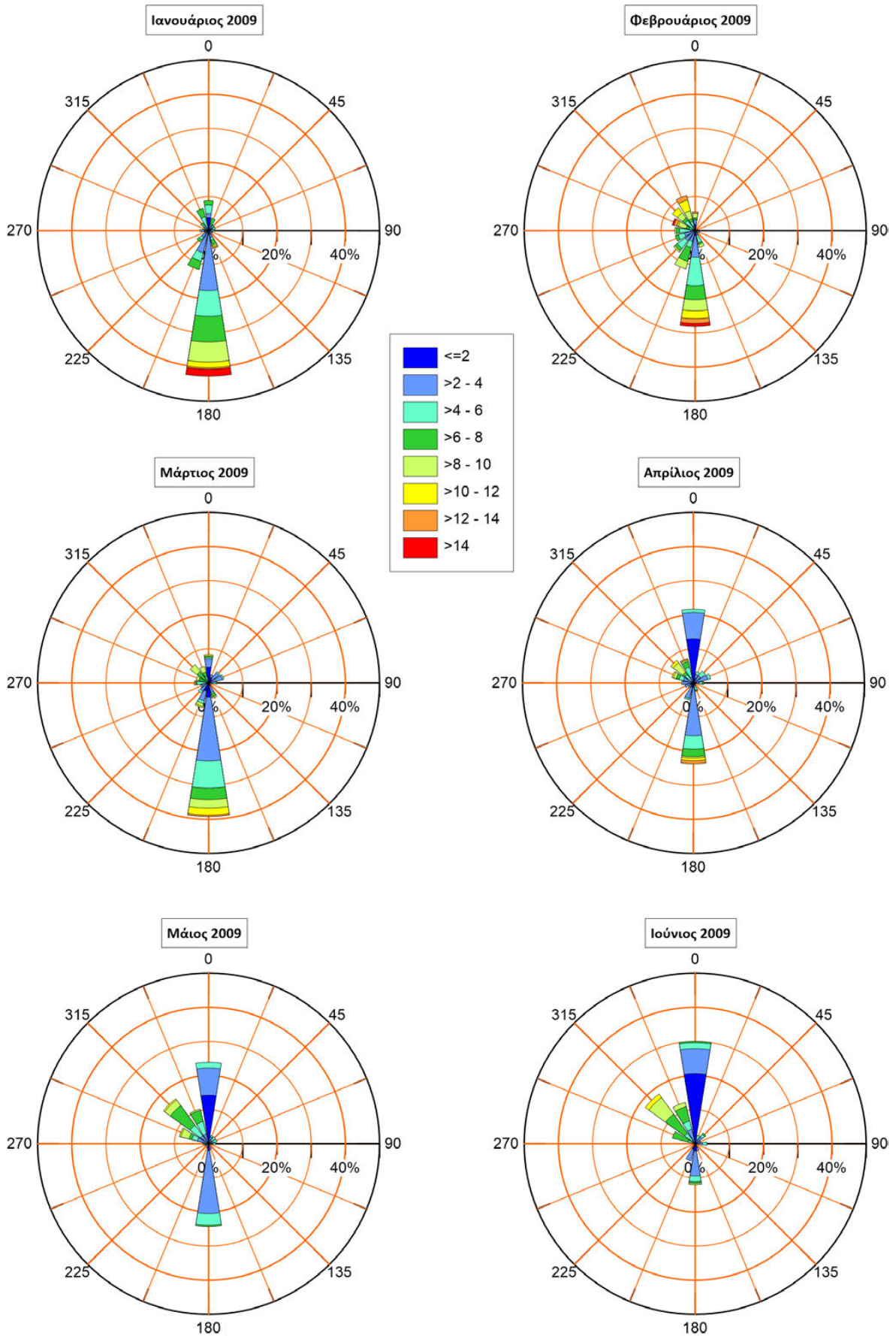
Οι δύο παραπάνω κατανομές αποτελούν εκτιμήσεις με βάση τα στοιχεία που δημοσιεύει ο αερολιμένας.^[23] Αφορούν κυρίως τους καλοκαιρινούς μήνες, με την τουριστική κίνηση σε πλήρη ανάπτυξη, ενώ το χειμώνα αφενός οι διαφορές μεταξύ Παρασκευής – Κυριακής και των υπόλοιπων εργάσιμων ημερών αναμένονται μεγαλύτερες, αφετέρου οι νυκτερινές πτήσεις είναι πολύ περιορισμένες.

5.4.5. Μετεωρολογία

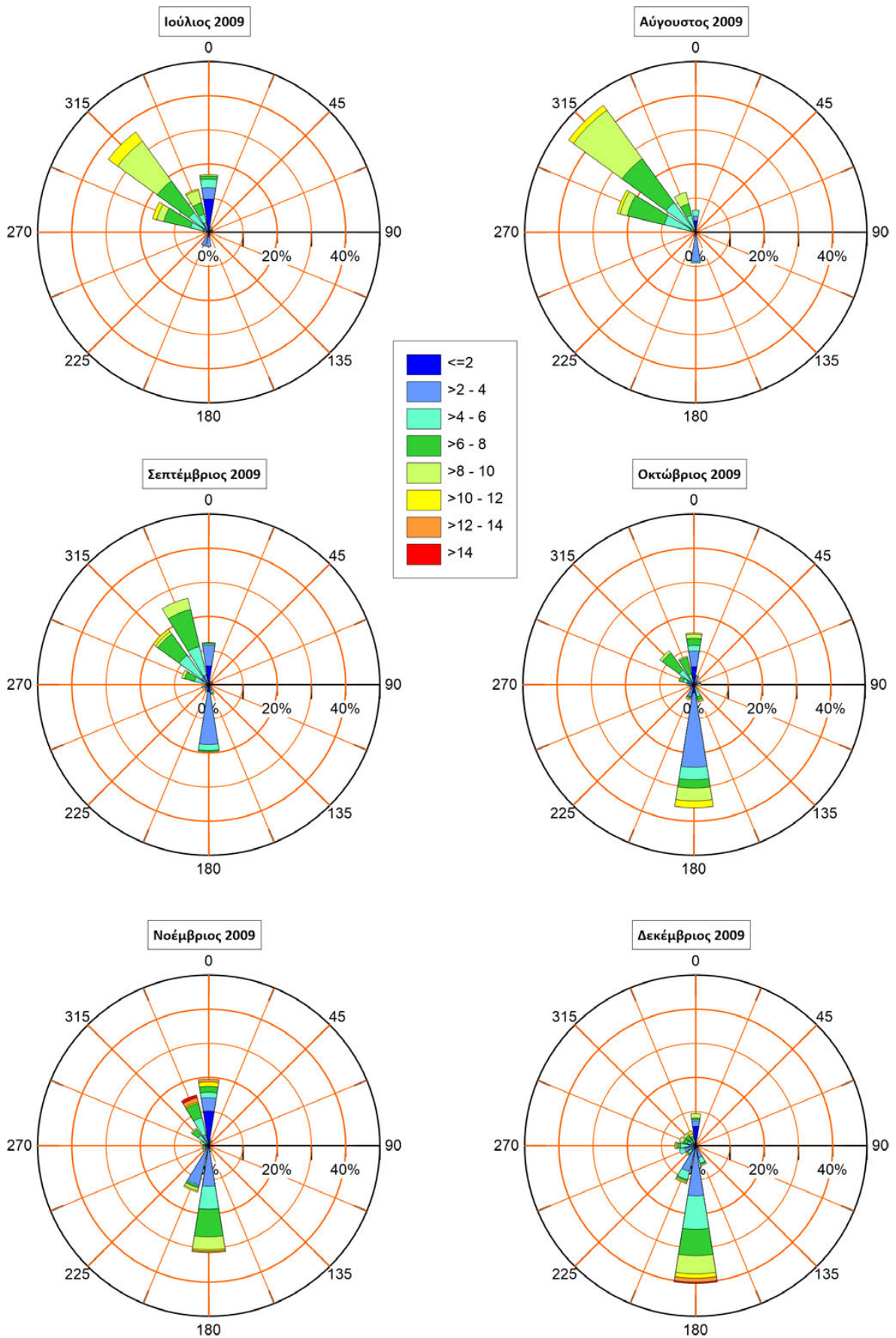
Τα επίγεια μετεωρολογικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς εκπομπών και συγκεντρώσεων του ΚΑΗΚ με το EDMS, προήλθαν από το μετεωρολογικό σταθμό της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας που λειτουργεί στο αεροδρόμιο.^[26] Αφορούν στο έτος 2009 και αποτελούνται από μετρήσεις των παραμέτρων ανέμου και της θερμοκρασίας, οι οποίες διενεργήθηκαν ανά τρίωρο στα 10 m από το επίπεδο του εδάφους. Τα στοιχεία αυτά συνοψίζονται στα γραφήματα των επόμενων σελίδων.



Γράφημα 89: Διακύμανση της θερμοκρασίας στον ΚΑΗΚ το 2009.



Γράφημα 90: Μηνιαία ανεμολογικά δεδομένα ΚΑΗΚ για το πρώτο εξάμηνο του 2009.

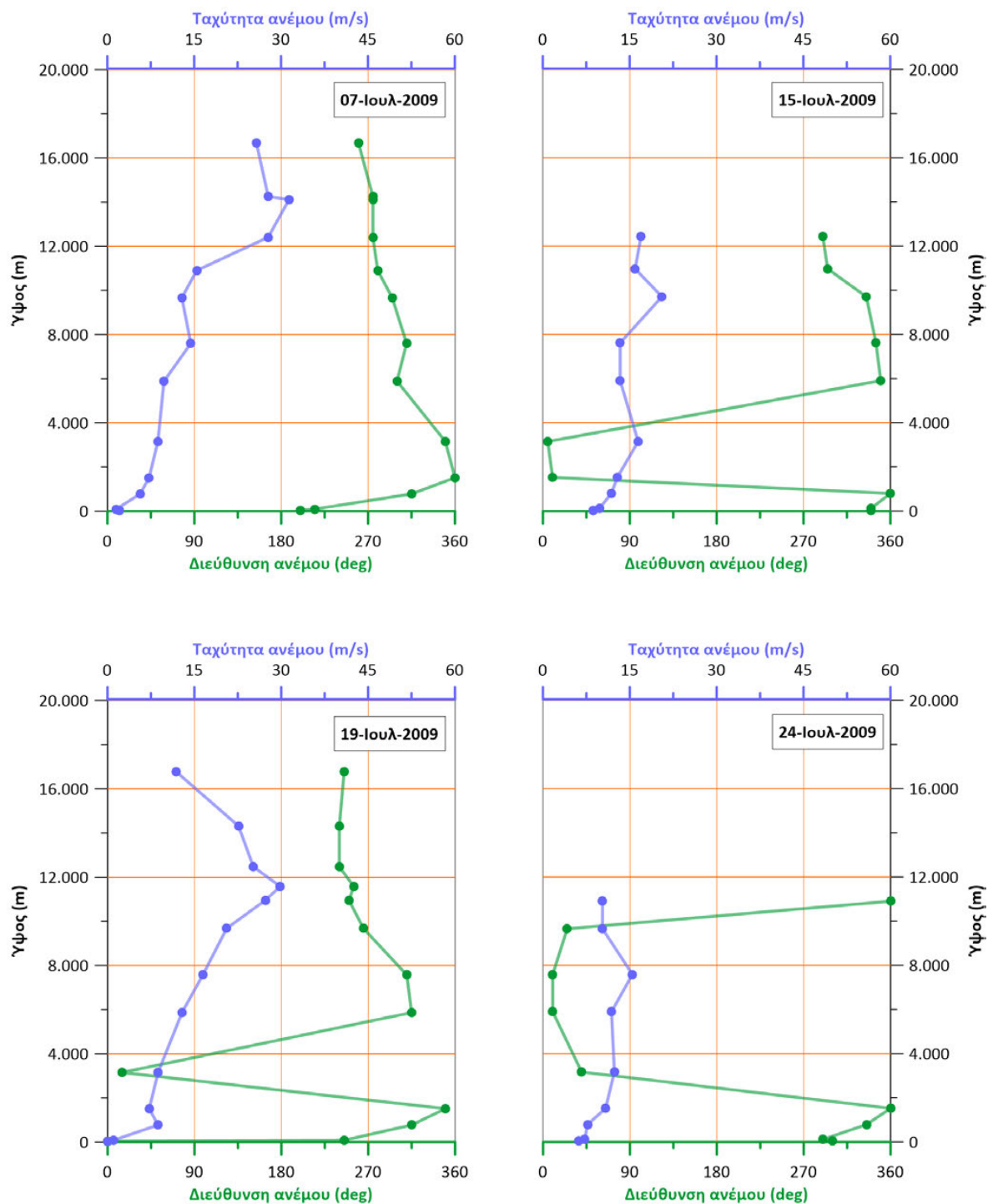


Γράφημα 91: Μηνιαία ανεμολογικά δεδομένα ΚΑΗΚ για το δεύτερο εξάμηνο του 2009.

Μερικές βασικές παρατηρήσεις επί των μετεωρολογικών παραμέτρων του Ηρακλείου που επιδρούν καθοριστικότερα στη διασπορά αέριων ρύπων, είναι οι εξής:

- Η έντονη ηλιοφάνεια κατά τους περισσότερους μήνες του χρόνου, ιδίως δε τους θερινούς, σε συνδυασμό με τις σχετικά περιορισμένες εντάσεις ανέμου, καθιστά συνηθέστερη κατάσταση ευστάθειας Pasquill την A (πολύ ασταθής), η οποία είναι ιδιαίτερα ευνοϊκή για τη γρήγορη κατακόρυφη αραίωση των αέριων ρύπων και τη συνακόλουθη μείωση των συγκεντρώσεών τους. Για τις νυχτερινές ώρες, αν και δεν διατίθενται μετρήσεις νεφοκάλυψης, εκτιμάται ότι το ποσοστό της θα κινείται συνήθως κάτω του 50%, βάσει της εμπειρικής εικόνας για την περιοχή. Επομένως, οι συνηθέστερες καταστάσεις Pasquill τη νύχτα αναμένεται να είναι οι ευσταθείς (E και F), που δυσχεραίνουν τη γρήγορη αραίωση των αέριων ρύπων και ευνοούν την εμφάνιση αυξημένων συγκεντρώσεών τους.
- Οι κύριες κατευθύνσεις ανέμου, όπως διακρίνεται από τα ανεμογράμματα (γράφημα 90 και γράφημα 91 παραπάνω) εντοπίζονται στον άξονα B-N με κυριότερη προέλευση τη νότια. Εξαίρεση αποτελούν τα μελέμια, που κυριαρχούν τον Ιούλιο, Αύγουστο και Σεπτέμβριο, πνέοντας από βορειοδυτικά. Και στις δύο περιπτώσεις πάντως, οι άνεμοι ωθούν τους αέριους ρύπους του ΚΑΗΚ σε κατευθύνσεις απομάκρυνσης από το πολεοδομικό συγκρότημα του Ηρακλείου (το οποίο βρίσκεται στα δυτικά του αερολιμένα).

Για την καθ' ύψος κατανομή ανέμου πάνω από το Ηράκλειο, αντλήθηκαν δεδομένα ραδιοβολίσεων από το Earth System Research Laboratory της National Oceanic and Atmospheric Administration των ΗΠΑ.^[27] Η κατανομή ανέμου για τέσσερις χαρακτηριστικές ημέρες του Ιουλίου 2009 παρουσιάζεται στο επόμενο γράφημα.

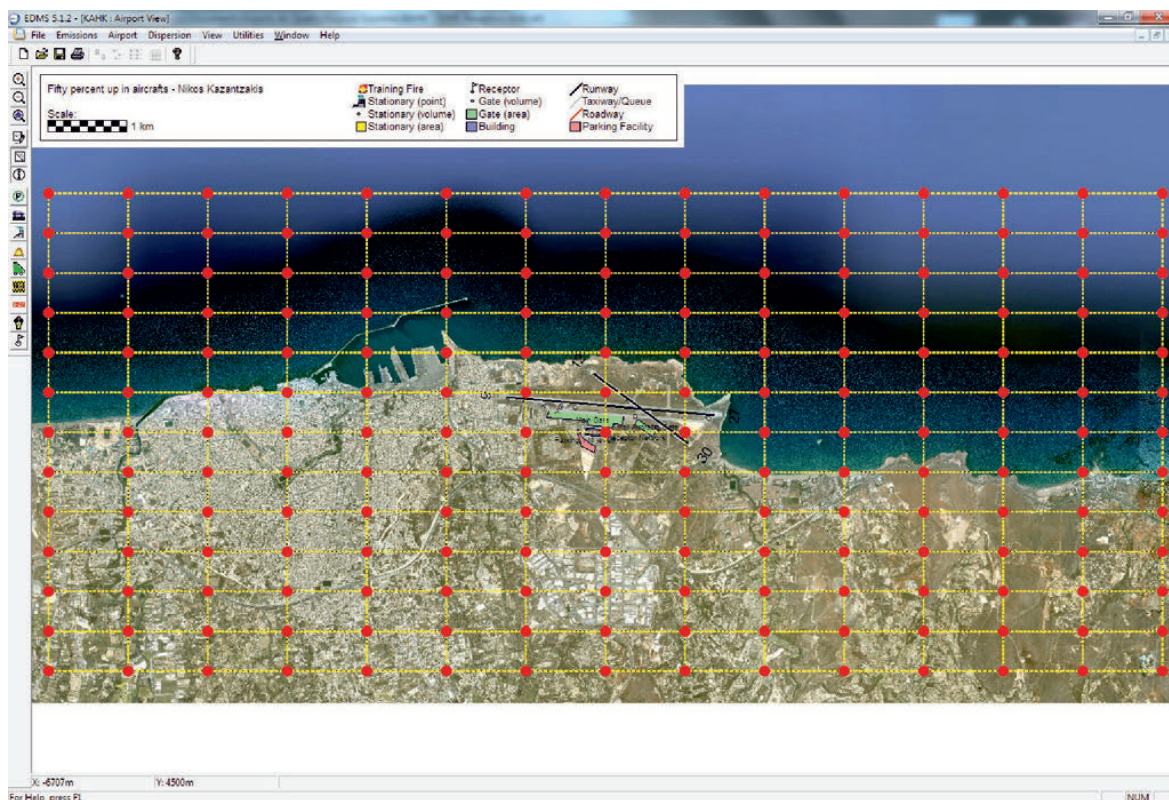


Γράφημα 92: Κατανομή ανέμου καθ' ύψος πάνω από τον ΚΑΗΚ για τέσσερις ημέρες του Ιουλίου 2009.

Τα δεδομένα ραδιοβολίσεων για το 2009 δεν ήταν πλήρη, π.χ. απουσίαζαν στοιχεία για τον Αύγουστο. Παρόλα αυτά, χρησιμοποιήθηκαν στο EDMS με το σκεπτικό ότι αποτελούσαν την καλύτερη διαθέσιμη λύση.

5.4.6. Σημεία υπολογισμού συγκεντρώσεων

Για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων, διαμορφώθηκε ένα ορθογωνικό δίκτυο 195 σημείων (15×13), με κέντρο τον πύργο ελέγχου του ΚΑΗΚ και έκταση 14 km εκατέρωθεν του πύργου στην κατεύθυνση Ανατολή – Δύση και 7 km στην κατεύθυνση Βορράς – Νότος. Το δίκτυο των σημείων αυτών, εισηγμένων στο EDMS παρουσιάζεται στην επόμενη εικόνα, όπου και διακρίνεται ότι καλύπτεται το μεγαλύτερο μέρος της πόλης του Ηρακλείου και των οικισμών του Δήμου Αλικαρνασσού. Το βήμα υπολογισμού, δηλαδή η απόσταση μεταξύ διαδοχικών σημείων είναι 1 km κατά την οριζόντια διεύθυνση, ενώ κατά την κάθετη 0,5 km, δεδομένου ότι κατ' αυτήν οι μεταβολές των συγκεντρώσεων αναμένονται σε μικρότερες αποστάσεις.



Σχήμα 8: Το δίκτυο σημείων υπολογισμού των συγκεντρώσεων αέριων ρύπων του ΚΑΗΚ στο EDMS.

5.4.7. Αποτελέσματα υπολογισμού εκπομπών

Το λογισμικό EDMS παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού των εκπομπών από τις δραστηριότητες ενός αεροδρομίου με ακρίβεια ανάλογη της λεπτομέρειας των δεδομένων εισόδου που αφορούν στις δραστηριότητες αυτές. Εάν για παράδειγμα διατίθεται μια ακριβής χρονική καταγραφή της απογείωσης, προσγείωσης και επίγειας λειτουργίας κάθε

αεροσκάφους που χρησιμοποίησε το αεροδρόμιο, καθώς και της λειτουργίας του επίγειου εξοπλισμού (κυρίως GSE και APU), τότε ο υπολογισμός των εκπομπών μπορεί να είναι πολύ λεπτομερής. Σε άλλες περιπτώσεις, όπως αυτή του ΚΑΗΚ όπου είναι γνωστά μόνο τα συγκεντρωτικά στοιχεία της αεροπορικής κίνησης, ο υπολογισμός των εκπομπών χρειάζεται να ενσωματώσει τις αβεβαιότητες που προκύπτουν από τις παραδοχές αφενός της κατανομής της συνολικής ετήσιας κίνησης ανά μήνα, ημέρα ώρα κ.ο.κ. και αφετέρου της σύνδεσης μεταξύ αεροπορικών κινήσεων και λειτουργίας του επίγειου εξοπλισμού. Πάντως, εάν οι υπολογιζόμενες εκπομπές αφορούν ετήσια στοιχεία, οι παραδοχές αυτές δεν αναμένεται να εισάγουν αβεβαιότητες σοβαρού μεγέθους, αφού πολλές αποκλίσεις θα αλληλοαναιρούνται· αντίθετα, σε λεπτομερέστερα επίπεδα π.χ. ημέρας ή ώρας οι αβεβαιότητες (δηλαδή οι πιθανές διαφορές μεταξύ πραγματικής κατάστασης και υπολογιστικής προσομοίωσης) είναι εύλογο να αναμένονται σοβαρότερες.

Με βάση τα παραπάνω, η περισσότερο αξιοποιήσιμη πληροφορία εντοπίζονται στις εκπομπές ετήσιας βάσης. Έτσι, στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται οι εκπομπές που υπολογίστηκαν από το EDMS για τη λειτουργία του ΚΑΗΚ κατά τη διάρκεια του 2009, με τα στοιχεία εισόδου που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες ενότητες.

Πίνακας 8: Εκπομπές αέριων ρύπων από τη λειτουργία του ΚΑΗΚ το 2009, όπως υπολογίστηκαν από το EDMS.

Πηγή	Εκπομπές ΚΑΗΚ 2009 (tn/yr)						
	CO	NMVOC	THC	NO _x	SO _x	PM ₁₀	PM _{2.5}
Κινήσεις αεροσκαφών	69,73	15,59	13,48	192,87	13,44	1,30	1,30
Βοηθητικές μονάδες ισχύος	11,81	0,82	0,71	7,84	1,10	1,19	1,19
Εξοπλισμός επίγειας υποστήριξης	278,39	9,04	--	29,21	0,90	0,89	0,86
Σύνολο	359,93	25,45	14,19	229,92	15,44	3,38	3,35

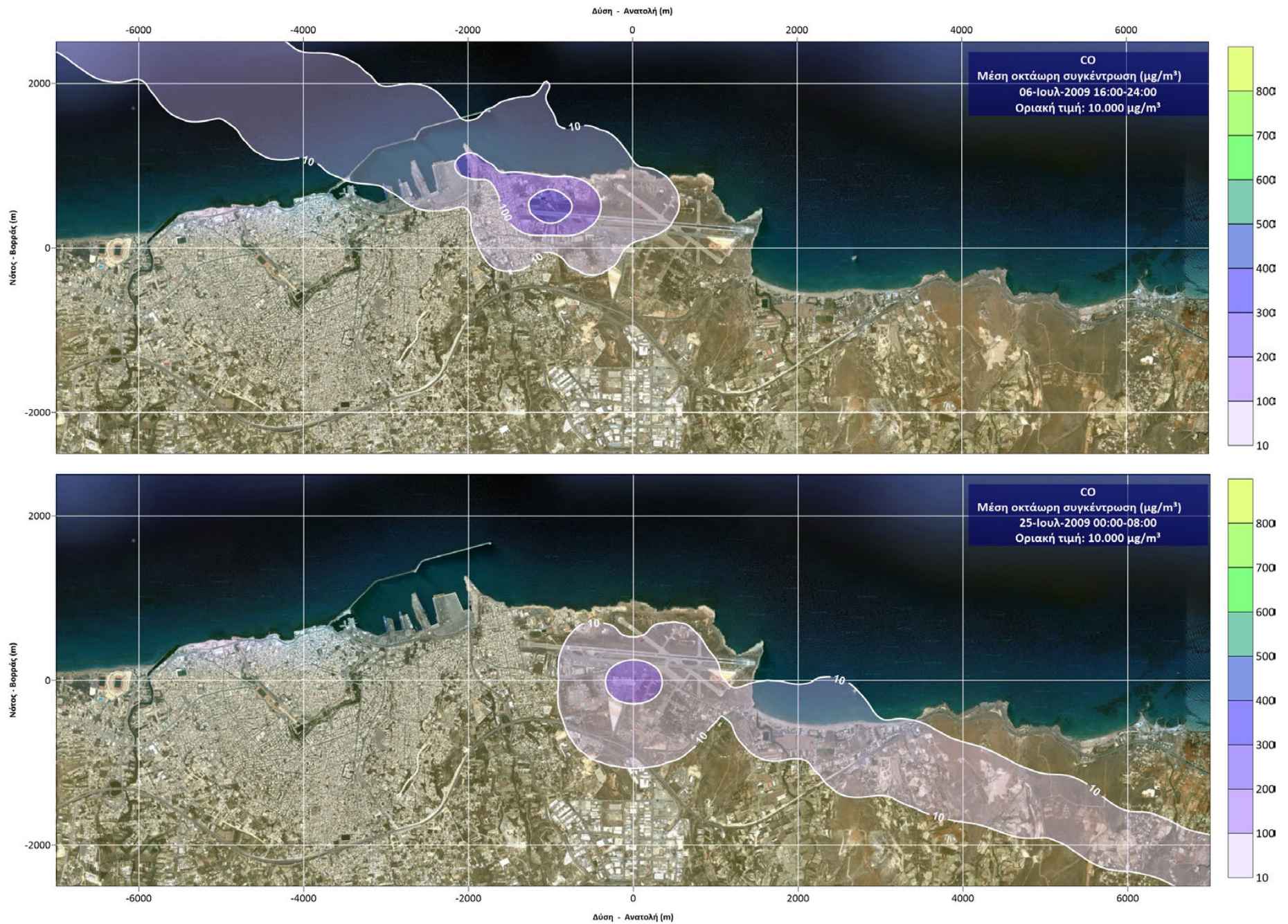
Συμπληρωματικά, αναφέρεται ότι η ετήσια κατανάλωση αεροπορικού καυσίμου για το 2009 υπολογίστηκε στους 11.474,76 tn.

5.4.8. Αποτελέσματα υπολογισμού συγκεντρώσεων

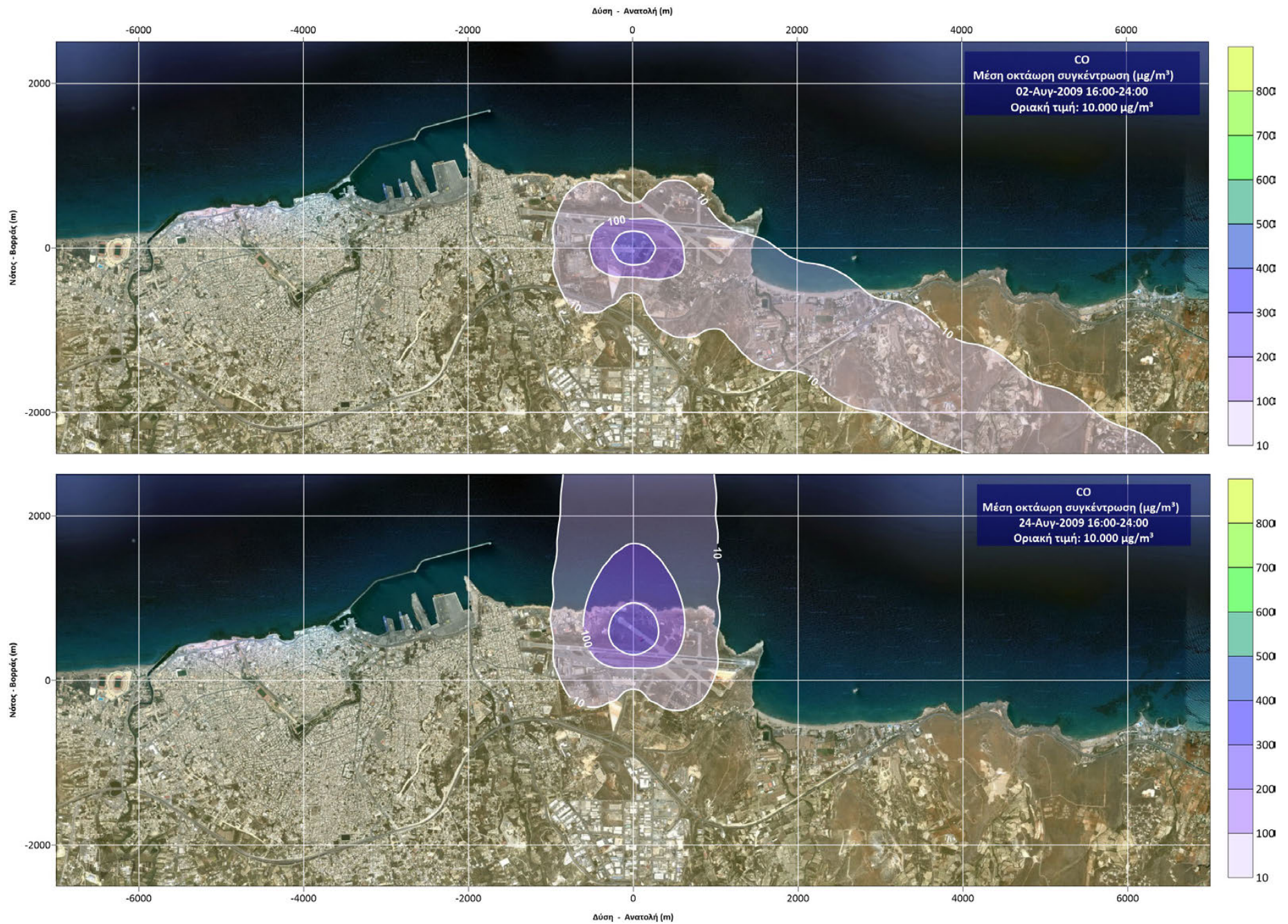
Στις επόμενες σελίδες, παρουσιάζονται σε γραφήματα οι τιμές των συγκεντρώσεων που υπολογίστηκαν με το EDMS για τη λειτουργία του ΚΑΗΚ κατά τη διάρκεια του 2009. Όπως

προαναφέρθηκε, οι υπολογισμοί διεξήχθησαν για το σύνολο των 8.760 ωρών του έτους και κατόπιν εντοπίστηκαν οι δύο δυσμενέστερες καταστάσεις όλου του έτους, θεωρώντας ότι με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται αφενός ρεαλισμός (αφού εξετάζονται υπαρκτές καταστάσεις), αφετέρου επαρκής υπερεκτίμηση, απαραίτητη κατά την αρχή της προφύλαξης (δεδομένου ότι οι καταστάσεις που επιλέγονται ως δυσμενείς εμφανίζονται μόνο 1-2 φορές το χρόνο).

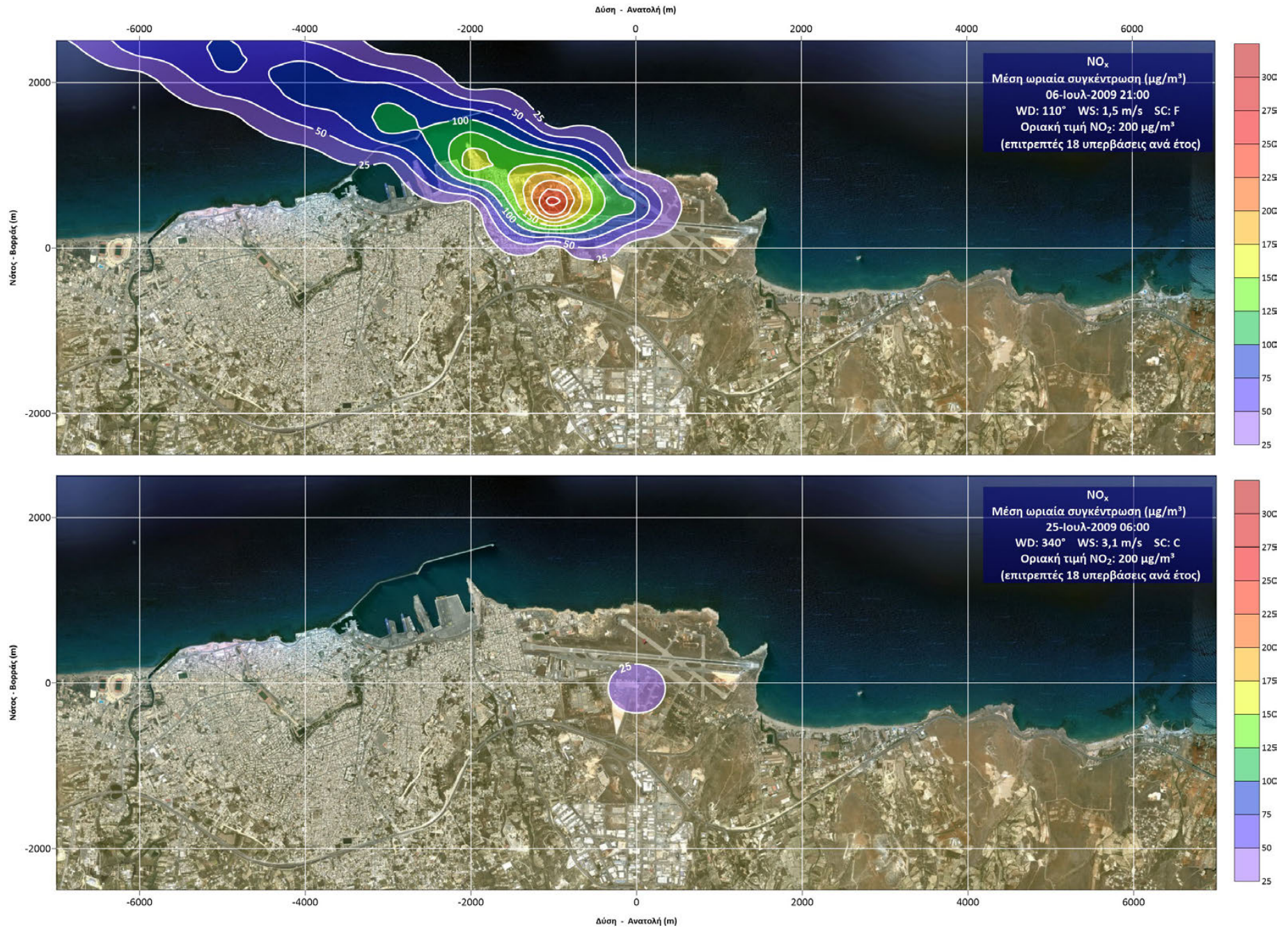
Η χρονική βάση των συγκεντρώσεων επελέγη ίδια με τα όρια που ισχύουν για κάθε ρύπο, ώστε να είναι δυνατή η άμεση σύγκριση.



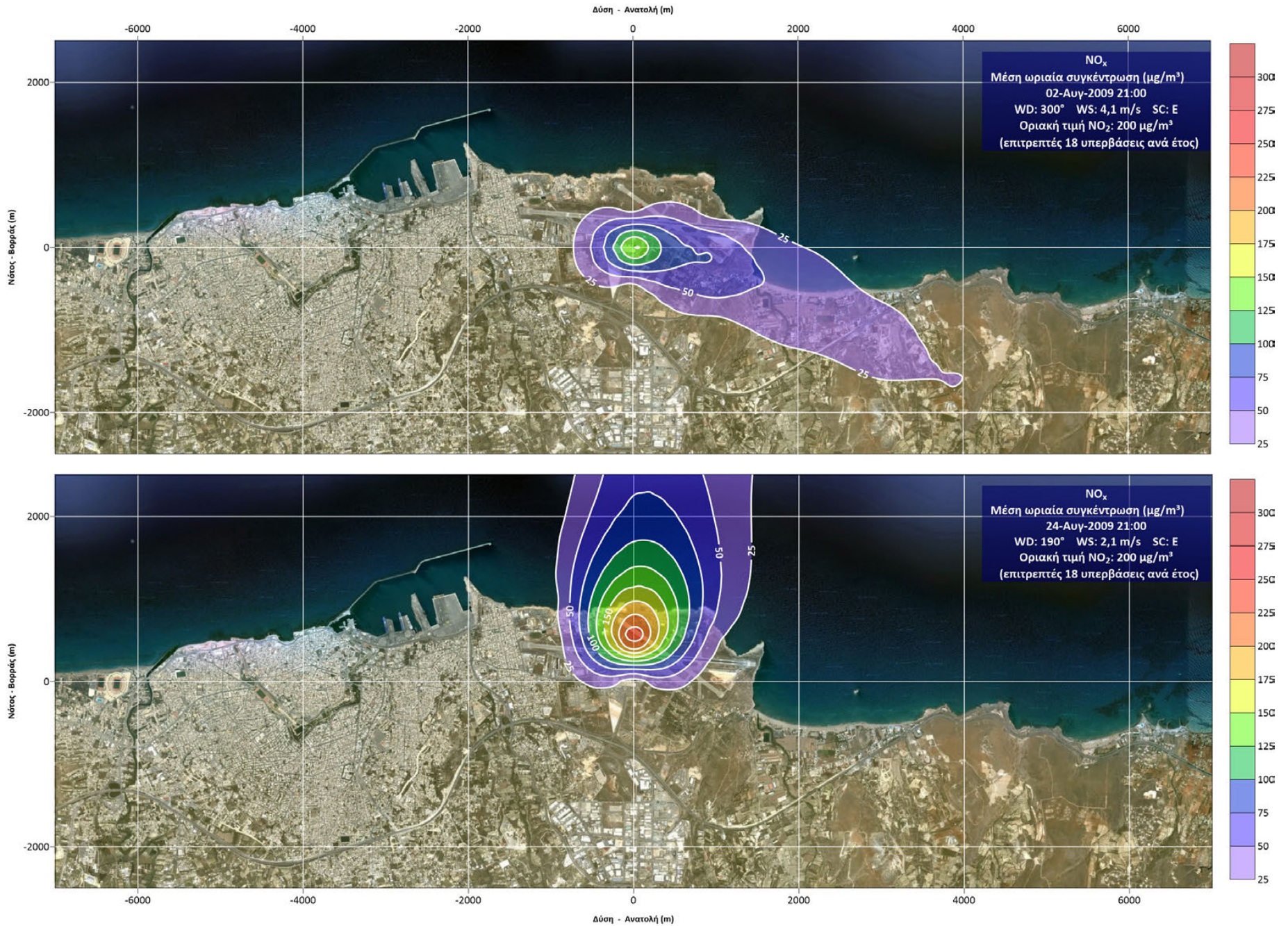
Γράφημα 93 (επάνω) και γράφημα 94 (κάτω): Συγκέντρωση CO στα δύο δυσμενέστερα οκτάωρα του Ιουλίου.



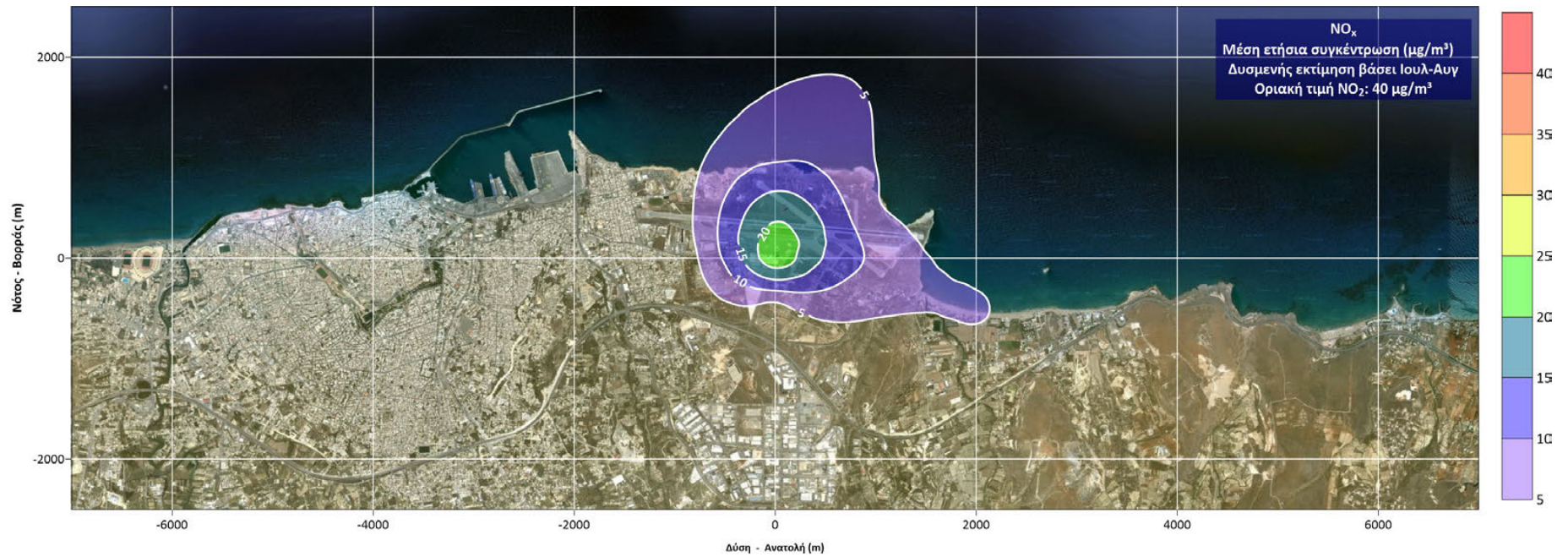
Γράφημα 95 (επάνω) και γράφημα 96 (κάτω): Συγκέντρωση CO στα δύο δυσμενέστερα οκτάωρα του Αυγούστου.



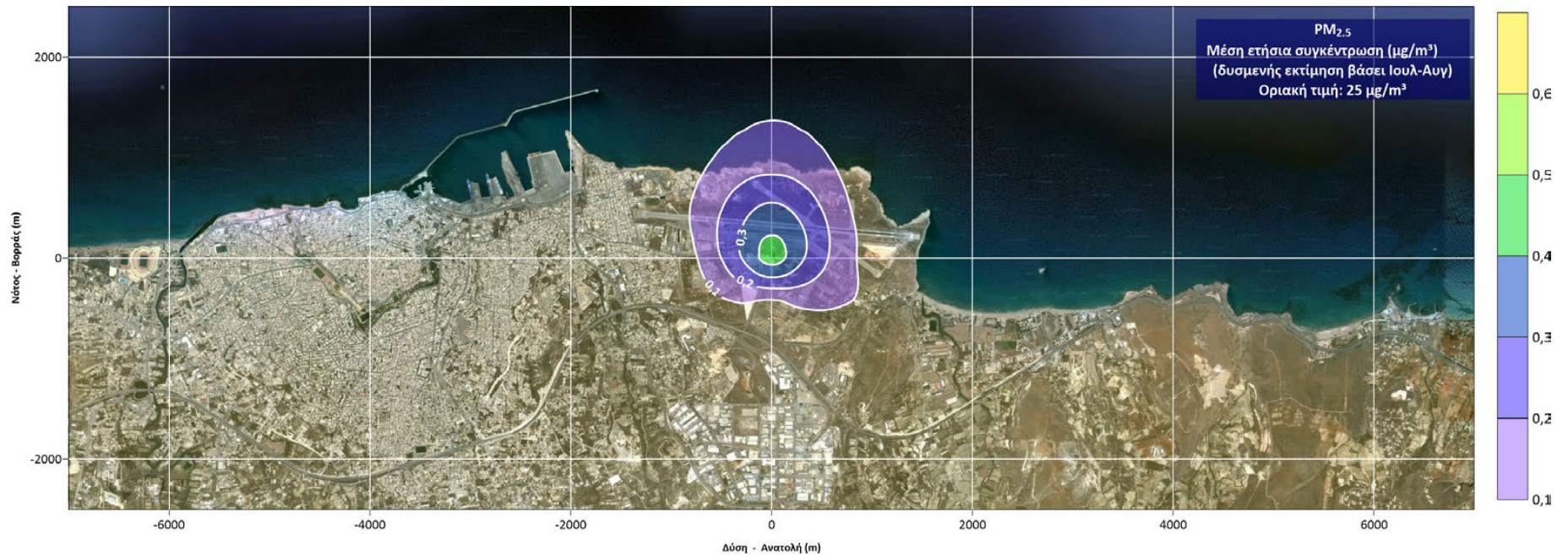
Γράφημα 97 (επάνω) και γράφημα 98 (κάτω): Συγκέντρωση NO_x στις δύο δυσμενέστερες ώρες του Ιουλίου.



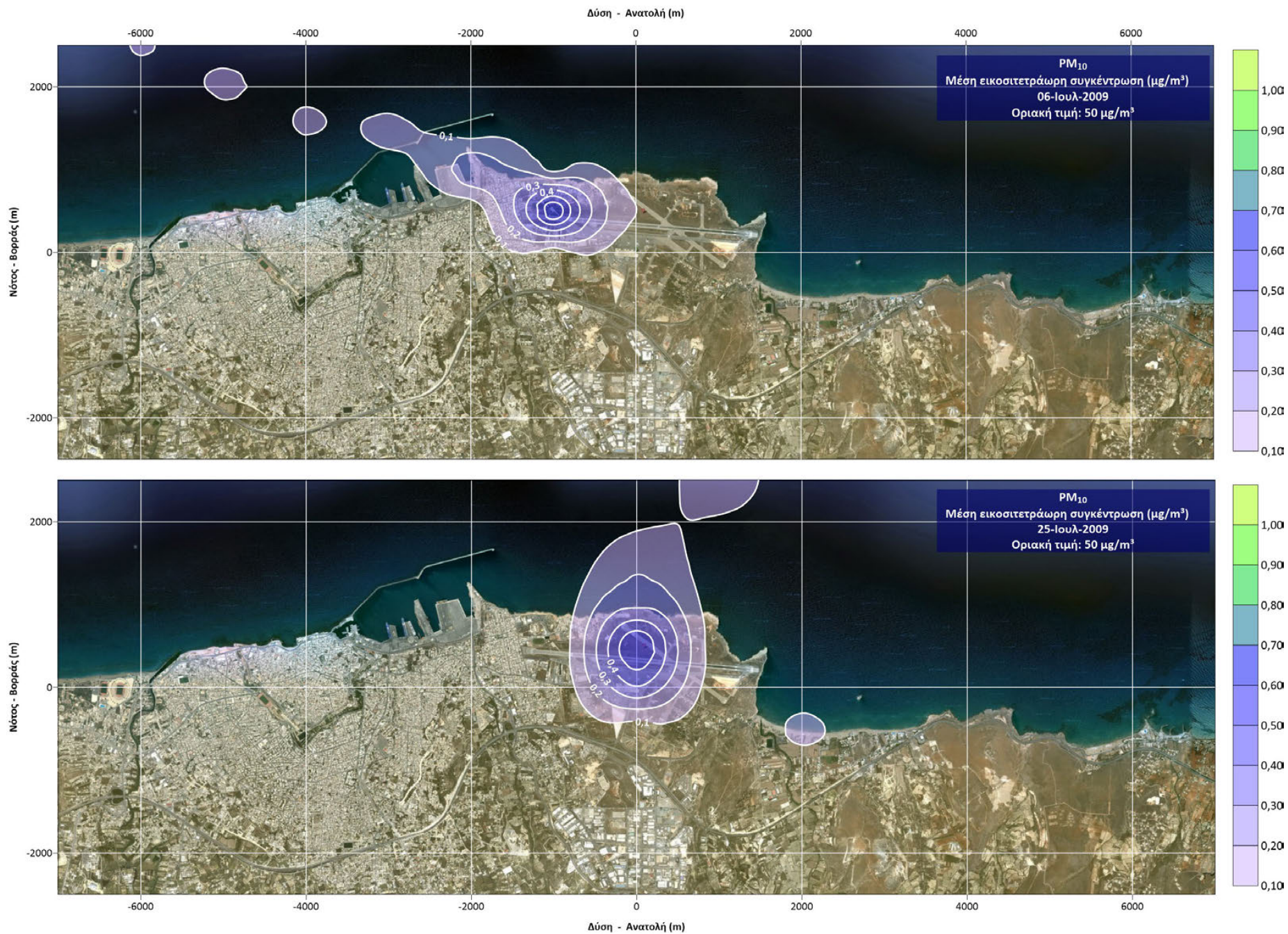
Γράφημα 99 (επάνω) και γράφημα 100 (κάτω): Συγκέντρωση NO_x στις δύο δυσμενέστερες ώρες του Αυγούστου.



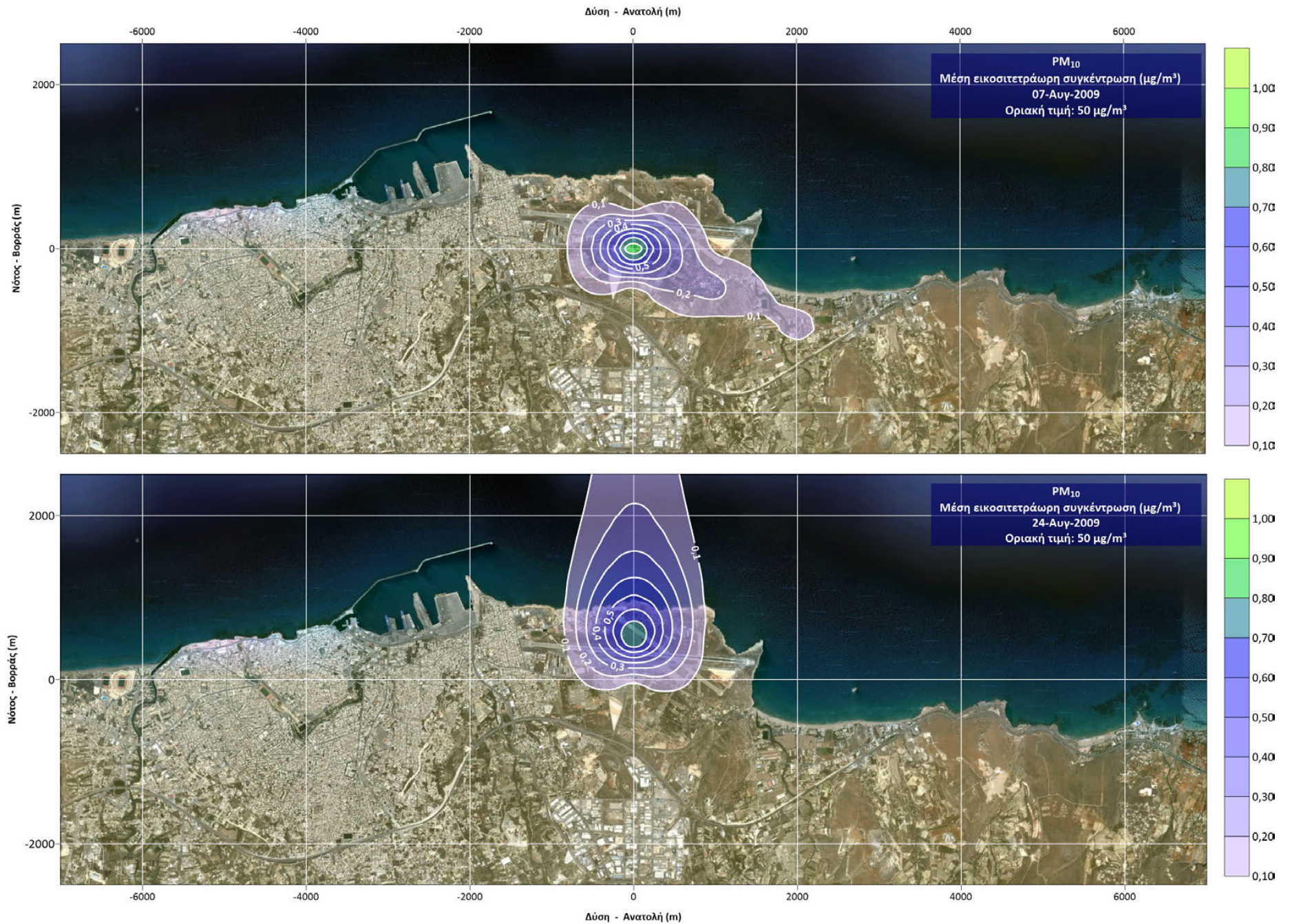
Γράφημα 101: Μέση ετήσια συγκέντρωση NO_x στη διάρκεια του έτους.



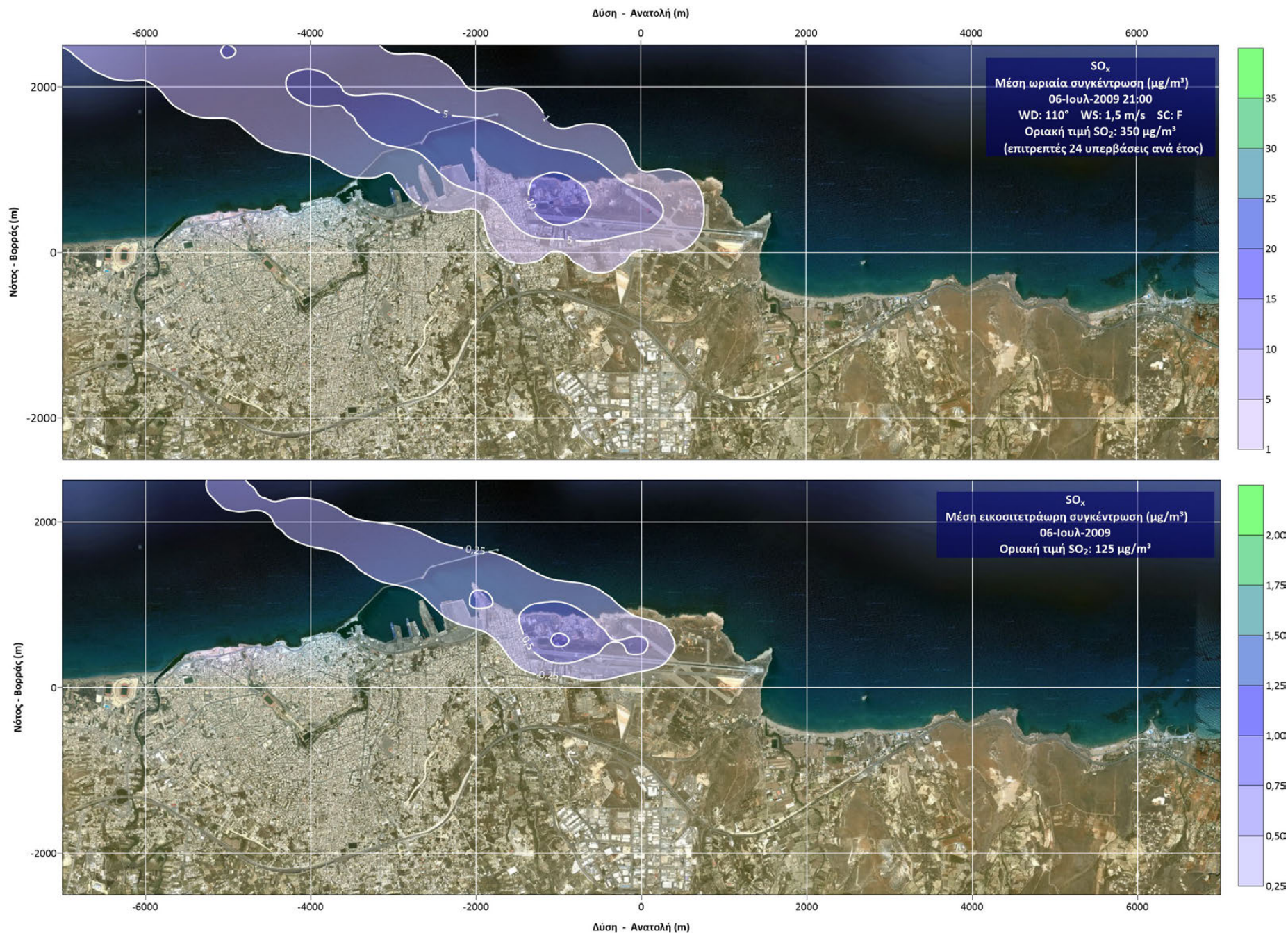
Γράφημα 102: Μέση ετήσια συγκέντρωση PM_{2.5} στη διάρκεια του έτους.



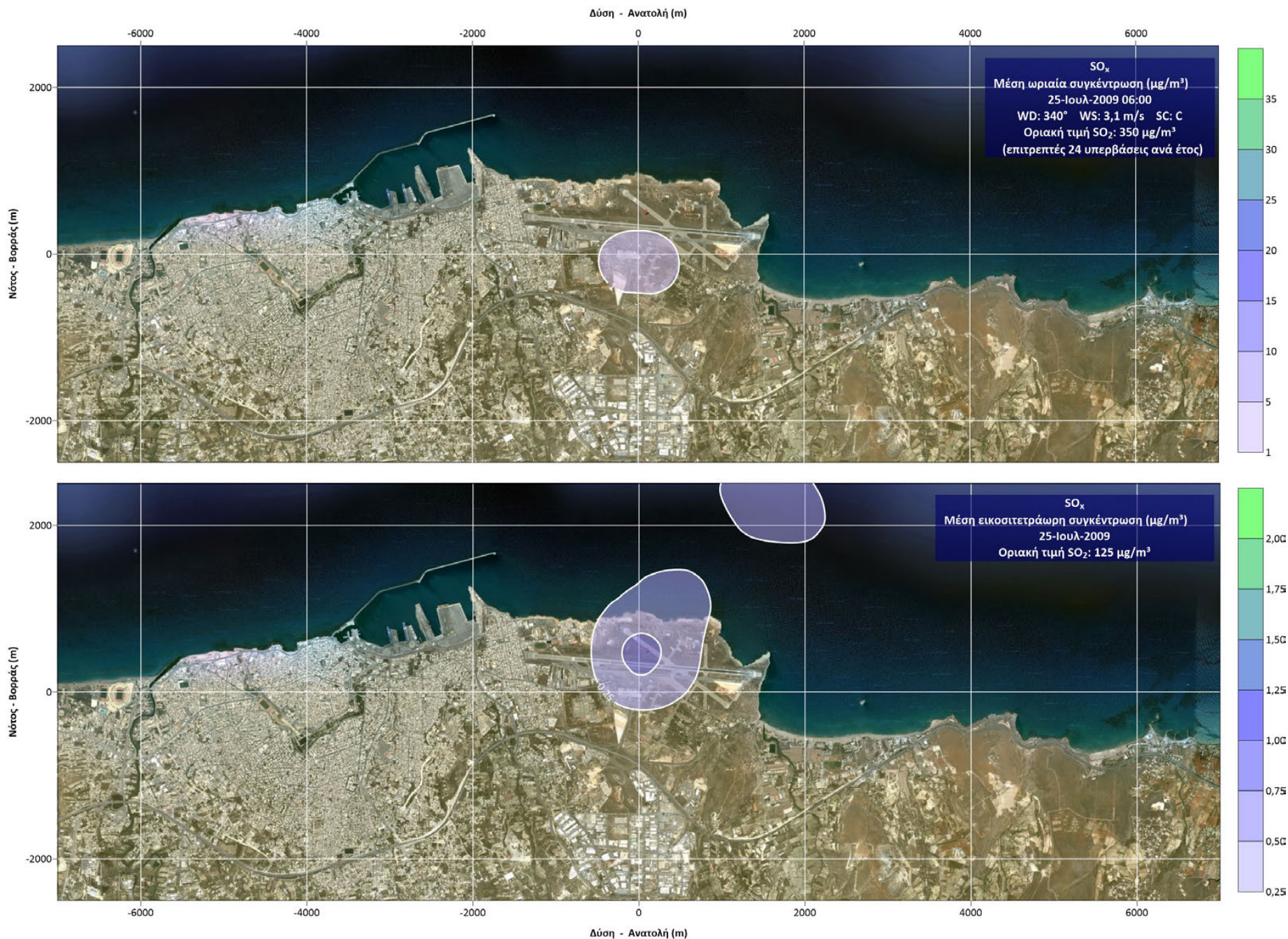
Γράφημα 103 (επάνω) και γράφημα 104 (κάτω): Συγκέντρωση PM₁₀ στις δύο δυσμενέστερες ημέρες του Ιουλίου.



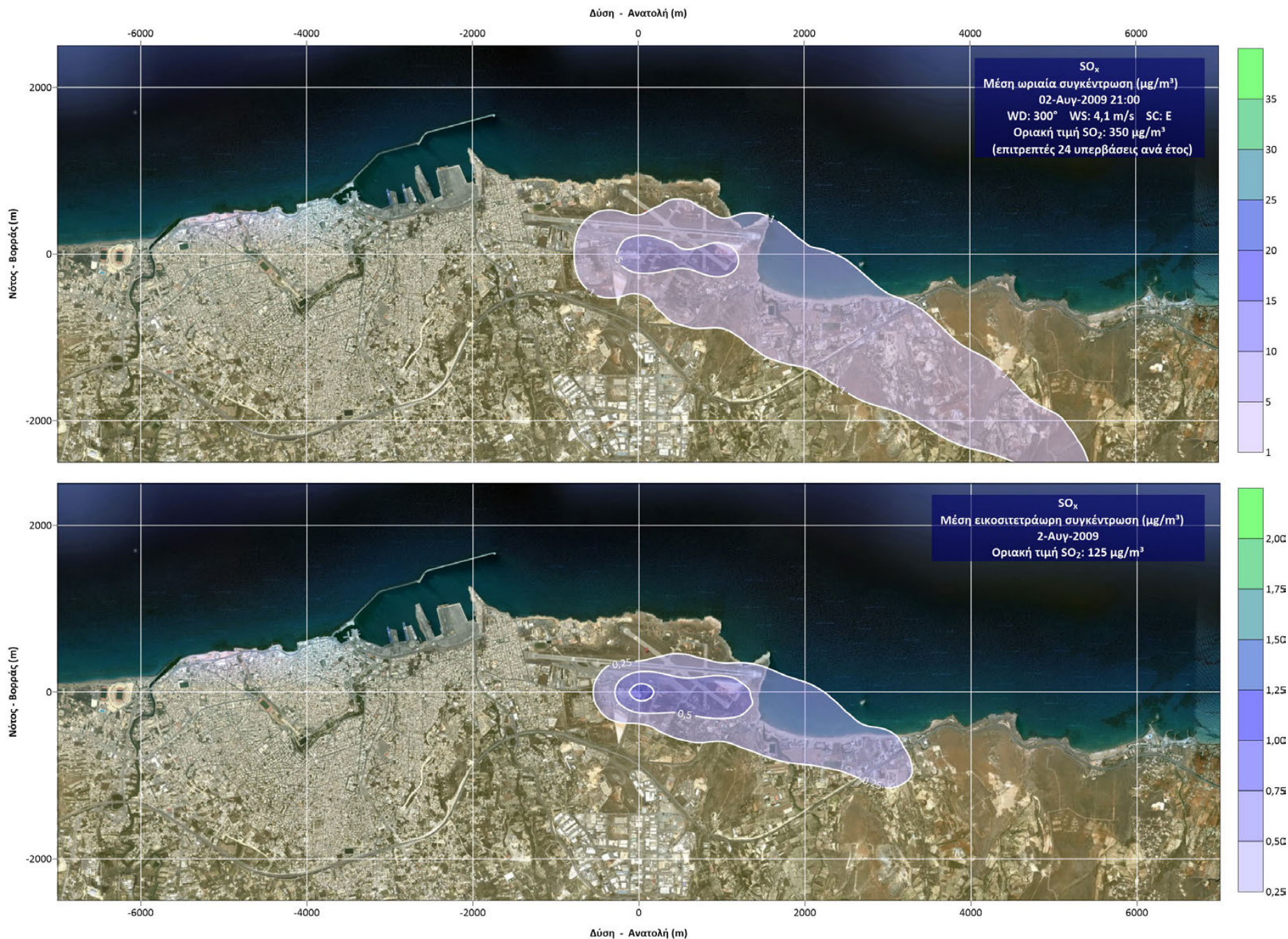
Γράφημα 105 (επάνω) και γράφημα 106 (κάτω): Συγκέντρωση PM₁₀ στις δύο δυσμενέστερες ημέρες του Αυγούστου.



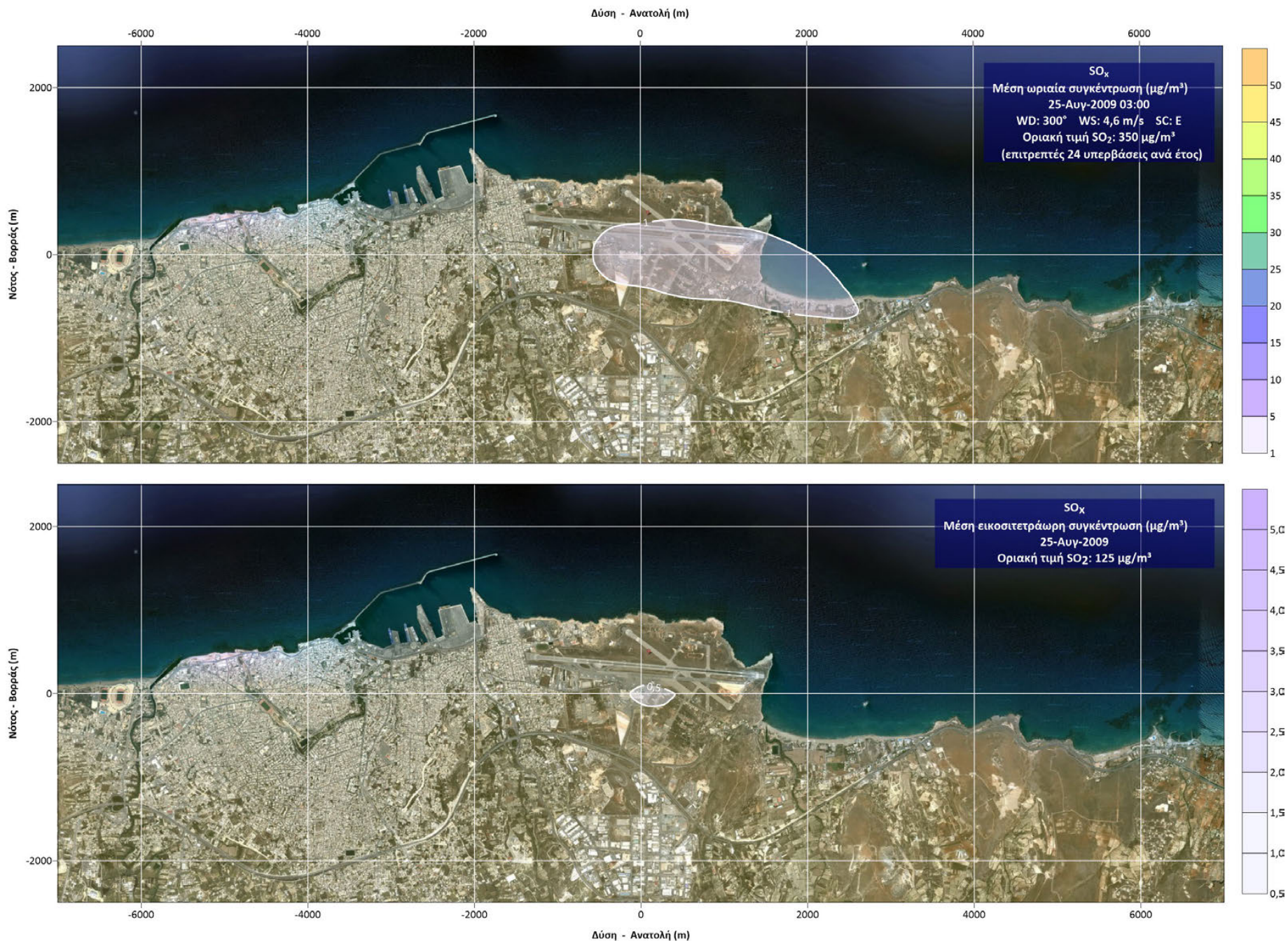
Γράφημα 107 (επάνω) και γράφημα 108 (κάτω): Οριαία και εικοσιτετράωρη συγκέντρωση SO_x στα δυσμενέστερα αντίστοιχα διαστήματα του Ιουλίου.



Γράφημα 109 (επάνω) και γράφημα 110 (κάτω): Ωριαία και εικοσιτετράωρη συγκέντρωση SO_x στα δεύτερα πιο δυσμενή αντίστοιχα διαστήματα του Ιουλίου.



Γράφημα 111 (επάνω) και γράφημα 112 (κάτω): Οριαία και εικοσιτετράωρη συγκέντρωση SO_x σε μια από τις δυσμενέστερες ημέρες του Αυγούστου.



Γράφημα 113 (επάνω) και γράφημα 114 (κάτω): Ωριαία και εικοσιτετράωρη συγκέντρωση SO_x σε μια από τις δυσμενέστερες ημέρες του Αυγούστου.

6. Ανάλυση αποτελεσμάτων

Έχοντας παρουσιάσει στο προηγούμενο κεφάλαιο τα αποτελέσματα των υπολογισμών για τις εκπομπές και τις συγκεντρώσεις αέριων ρύπων στα τρία μεγαλύτερα αεροδρόμια της Ελλάδας, η εργασία προχωρά τώρα στην ανάλυση αυτών των αποτελεσμάτων, προκειμένου να εξαχθούν αξιοποιήσιμα συμπεράσματα ως προς την ποιότητα του αέρα στις επηρεαζόμενες περιοχές, αλλά και ως προς την αξιοπιστία της υπολογιστικής προσομοίωσης.

Το πρώτο μέρος της ανάλυσης αποτελεσμάτων εστιάζει στις εκπομπές, οι οποίες αποτελούν τη γενεσιουργό αιτία των συγκεντρώσεων και επομένως θα πρέπει να εξεταστούν κατά προτεραιότητα. Ένας ακόμη λόγος που η ανάλυση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων ως προς τις εκπομπές έχει ειδική σημασία, είναι το γεγονός ότι η χρήση των μοντέλων ενθαρρύνεται μεταξύ άλλων με σκοπό να διερευνάται η αιτιοκρατική συσχέτιση εκπομπών και συγκεντρώσεων, ή ισοδύναμα, να εκτιμάται το ποσοστό της συγκέντρωσης που αντιστοιχεί σε κάθε πηγή (source apportionment). Η ανάλυση επομένως των εκπομπών και η εξαγωγή συμπερασμάτων για την αξιοπιστία των σχετικών υπολογισμών έχει ιδιαίτερη σημασία για τη γενικότερη χρησιμότητα των μοντέλων όπως το EDMS. Λόγω της σημασίας αυτής, η ανάλυση εκτείνεται σε τρεις κατευθύνσεις: Πρώτα, αντιπαραβάλλονται τα αποτελέσματα εκπομπών που υπολογίστηκαν στην παρούσα εργασία για το ΔΑΑ με εκείνα που έχει δημοσιεύσει η Υπηρεσία Περιβάλλοντος του αερολιμένα. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα εκπομπών και για τα τρία αεροδρόμια της εργασίας αυτής αντιπαραβάλλονται με τα ευρήματα προηγούμενων εργασιών, μετά από κατάλληλες αναγωγές. Τέλος, επιχειρείται η αντιπαραβολή των εκπομπών των τριών αεροδρομίων με τα δεδομένα της εθνικής απογραφής εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και ειδικότερα με το σκέλος εκείνο που αφορά τις συνολικές εκπομπές της αεροπορικής κυκλοφορίας.

Η επόμενη ενότητα της ανάλυσης αποτελεσμάτων στρέφει το ενδιαφέρον της στις συγκεντρώσεις και ειδικότερα στη σύγκρισή τους με τις ισχύουσες οριακές τιμές. Δεδομένου ότι το EDMS αποτελεί κατά βάση ένα μοντέλο κανονιστικού χαρακτήρα, η συγκεκριμένη ενότητα ανταποκρίνεται επακριβώς σ' αυτό, επιδιώκοντας να διαπιστώσει την κανονιστική συμμόρφωση της λειτουργίας των τριών αεροδρομίων της εργασίας αυτής με τα ισχύοντα όρια ποιότητας αέρα. Η σύγκριση αποτελεσμάτων - ορίων προϋποθέτει τη επίλυση ορισμένων ζητημάτων όπως οι αναλογίες NO_2 και SO_2 στα μίγματα NO_x και SO_x αντίστοιχα, οι οποίες διερευνώνται λεπτομερώς στο πλαίσιο της συγκεκριμένης ενότητας.

Η τελευταία ενότητα του κεφαλαίου ανάλυσης των αποτελεσμάτων, εστιάζεται στην αντιπαραβολή αυτών που αφορούν στο ΔΑΑ με τις μετρήσεις των σταθμών ποιότητας αέρα που λειτουργούν στα Μεσόγεια. Πρόκειται κατ' ουσία για σύγκριση προλέξεων - μετρήσεων, η οποία οδηγεί σε σημαντικά συμπεράσματα αφενός για την επίδοση του EDMS και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων του, αφετέρου για τις πηγές εκτός αεροδρομίου που επηρεάζουν τις συγκεντρώσεις στα σημεία των σταθμών. Η σύγκριση αποτελεσμάτων - μετρήσεων πραγματοποιείται με διεξοδικό τρόπο και τα κύρια χαρακτηριστικά της είναι τα εξής:

- Αντιπαραβάλλονται μετρήσεις και υπολογιστικά αποτελέσματα για όλους τους ρύπους για τους οποίους διατίθενται καταγραφές σε κάθε σταθμό. Αναζητούνται με τον τρόπο αυτό διαφορές συστηματικού χαρακτήρα, δηλαδή υπερ- ή υπό-εκτιμήσεις συγκεντρώσεων που θα εκδηλώνονται οριζόντια σε όλους τους ρύπους, δεδομένου μάλιστα ότι το EDMS δεν συμπεριλαμβάνει φωτοχημικές μεταβολές των ουσιών κατά τον υπολογισμό της διασπορά τους.
- Η αντιπαραβολή σε κάθε σταθμό διεξάγεται μέσω τριών συμπληρωματικών προσεγγίσεων. Πρώτα αντιπαραβάλλονται οι χρονοσειρές ωριαίων συγκεντρώσεων, στη συνέχεια εξετάζεται η διασπορά μεταξύ μετρήσεων και εκτιμήσεων και τέλος αναλύονται οι συγκλίσεις και αποκλίσεις με τη βοήθεια απλών μεθόδων περιγραφικής στατιστικής ανάλυσης.
- Δίνεται σημαντική έμφαση στα δεδομένα του σταθμού των Σπάτων, ο οποίος είναι ο πλησιέστερος στο αεροδρόμιο, αλλά σε επαρκή απόσταση ώστε να εκδηλωθούν οι κύριοι παράγοντες που δημιουργούν ή ενισχύουν τις διαφορές μεταξύ υπολογιστικών αποτελεσμάτων και μετρήσεων, όπως οι ανομοιογένειες στις μετεωρολογικές συνθήκες, η μεταβλητότητα του αναγλύφου και οι επιδράσεις άλλων πηγών εκπομπής αέριων ρύπων.
- Επιχειρείται ο εντοπισμός παραγόντων που προκαλούν ή εντείνουν τις διαφορές μεταξύ υπολογιστικών εκτιμήσεων και μετρήσεων. Στο πλαίσιο αυτό, εξετάζονται ζητήματα όπως η θέση κάθε σταθμού και το είδος του περιβάλλοντος γύρω από αυτόν,

περιλαμβανόμενων πιθανών πηγών αέριων ρύπων όπως μεγάλοι οδικοί άξονες ή περιοχές συγκέντρωσης βιομηχανικών και βιοτεχνικών δραστηριοτήτων.

6.1. Συγκρίσεις εκπομπών

Στην ενότητα αυτή αντιπαραβάλλονται τα αποτελέσματα του υπολογισμού εκπομπών από το EDMS με τα δεδομένα της παρακολούθησης εκπομπών (διαθέσιμα μόνο για το ΔΑΑ), με τις εκτιμήσεις εκπομπών από άλλες εργασίες, καθώς και με τις εκτιμήσεις εκπομπών της πολιτικής αεροπορίας στη Ελλάδα, όπως αυτές έχουν περιληφθεί στην ετήσια απογραφή αερίων που επηρεάζουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

6.1.1. Αποτελέσματα υπολογισμού εκπομπών Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών έναντι των αποτελεσμάτων παρακολούθησης

Ο ΔΑΑ αποτελεί το μοναδικό ελληνικό αερολιμένα στον οποίο παρακολουθούνται οι εκπομπές κρίσιμων αέριων ρύπων που συναρτώνται και με το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Στο πλαίσιο του λεπτομερούς προγράμματος παρακολούθησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και επιδόσεων του αεροδρομίου, περιλαμβάνεται η καταγραφή των αέριων εκπομπών NO_x, CO και υδρογονανθράκων.

Στα δημοσιευμένα από το ΔΑΑ αποτελέσματα της ετήσιας περιβαλλοντικής παρακολούθησης του 2009,^[15] περιέχονται στοιχεία μόνο για τις εκπομπές αεροσκαφών. Η σύγκριση των στοιχείων αυτών με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του EDMS, τα οποία παρουσιάστηκαν στην ενότητα 5.2.7 (σελ. 39), φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 9: Σύγκριση στοιχείων παρακολούθησης με αποτελέσματα EDMS ως προς τις εκπομπές ορισμένων αέριων ρύπων από τη λειτουργία του ΔΑΑ το 2009.

Ετήσιες εκπομπές αεροσκαφών (tn/yr)	Αποτελέσματα παρακολούθησης ΔΑΑ	Αποτέλεσμα υπολογισμού με EDMS	Διαφορά
CO	610,00	651,82	6,9%
NO _x	880,00	852,73	-3,1%
HC	92,00	112,91	6,1%

Διαπιστώνεται αξιοσημείωτα καλή προσέγγιση μεταξύ των αποτελεσμάτων υπολογισμού με το EDMS και αυτών που προέρχονται από την παρακολούθηση της πραγματικής λειτουργίας του ΔΑΑ, και για τους τρεις ρύπους.

Η διαπίστωση αυτή αποτελεί σοβαρή ένδειξη ότι το τμήμα του EDMS που αφορά στον υπολογισμό εκπομπών, όταν τροφοδοτείται με λεπτομερή στοιχεία περιγραφής της

λειτουργίας ενός αεροδρομίου, μπορεί να υπολογίσει με ιδιαίτερα αξιόπιστο τρόπο τις εκπομπές αέριων ρύπων από τη συνολική αεροπορική δραστηριότητα.

Περαιτέρω, η ένδειξη αξιοπιστίας του EDMS ως προς τα αποτελέσματα του ΔΑΑ λειτουργεί ενισχυτικά ως προς την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων για τις εκπομπές στους υπόλοιπους δύο αερολιμένες της εργασίας αυτής, στους οποίους δεν είναι δυνατή η διεξαγωγή συγκρίσεων λόγω έλλειψης δεδομένων καταγραφής εκπομπών. Εφόσον το EDMS τροφοδοτήθηκε με στοιχεία λειτουργίας του καθενός από τους αερολιμένες αυτούς εξίσου λεπτομερή με το ΔΑΑ, μπορεί εύλογα να συναχθεί ότι η προσέγγιση των αποτελεσμάτων υπολογισμού στις πραγματικές τιμές είναι εξίσου καλή.

6.1.2. Αναγωγή εκπομπών και αντιπαραβολή με αποτελέσματα προγενέστερων εργασιών

Ο υπολογισμός των εκπομπών με το EDMS στα αεροδρόμια της εργασίας αυτής κατέληξε σε μεγέθη που αφορούν στο σύνολο της ετήσιας αεροπορικής κίνησης σε καθένα από αυτά. Εάν οι εκπομπές κάθε αερολιμένα διαιρεθούν με τον αντίστοιχο αριθμό πτήσεων, προκύπτουν συγκρίσιμα μεγέθη, π.χ. εκπομπές ανά 1.000 κινήσεις αεροσκαφών, τα οποία επιτρέπουν την αντιπαραβολή μεταξύ των διαφορετικής δυναμικότητας αερολιμένων της παρούσας εργασίας, αλλά και τη σύγκριση με αποτελέσματα άλλων εργασιών. Στο πλαίσιο αυτό, εντοπίστηκαν οι εξής τρεις εργασίες που περιέχουν υπολογισμούς εκπομπών, πρόσφορους για επεξεργασία και σύγκριση με τα αποτελέσματα της παρούσας προσέγγισης:

- Οι Duchene et al.^[28] υπολογίζουν τις εκπομπές του αερολιμένα Ζυρίχης για το έτος 2003 με τρεις διαφορετικές μεθοδολογίες.
- Ο Μ. Θεοφανίδης^[29] χρησιμοποιεί το EDMS 5.02 για να υπολογίσει τις εκπομπές του ΔΑΑ για το 2006.
- Οι Fleuti et al.^[30] υπολογίζουν με αναλυτικότερο τρόπο τις εκπομπές του αερολιμένα Ζυρίχης για το 2004.

Στην εργασία των Duchene et al. υπολογίζονται οι εκπομπές CO, NO_x και HC για τη λειτουργία του αεροδρομίου της Ζυρίχης με τις μεθοδολογίες ALAQS AV-1,^[31] LASPORT 1.3.4^[32] και EDMS 4.12, με στοιχεία του έτους 2003, οδηγώντας στα μεγέθη των παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 10: Αποτελέσματα υπολογισμού εκπομπών στο αεροδρόμιο της Ζυρίχης για το 2003 με τρεις διαφορετικές μεθόδους.

Αερολιμένας: Ζυρίχη				
Έτος: 2003				
Κινήσεις αεροσκαφών: 265.882				
Πηγή		Εκπομπές (tn/yr)		
		CO	HC	NO _x
EDMS	Κινήσεις αεροσκαφών	1225,5	150,9	949,8
	Επίγεια υποστήριξη	119,9	13,5	123,6
	Σύνολο	2430,3	297,5	2063,9
LASPORT	Κινήσεις αεροσκαφών	1204,8	146,6	1114,1
	Επίγεια υποστήριξη	55,2	63,3	63,1
	Σύνολο	2473,9	308,3	2140,0
ALAQ5	Κινήσεις αεροσκαφών	1269,1	161,7	1025,9
	Επίγεια υποστήριξη	57,1	57,5	65,6
	Σύνολο	1269,1	161,7	1025,9

Από την εργασία του Μ. Θεοφανίδη,^[29] στη δημοσιευμένη έκδοση της οποίας δεν αναφέρονται αριθμητικά τα μεγέθη των εκπομπών, ερμηνεύοντας τα γραφήματα αντλούνται τα στοιχεία του ακόλουθου πίνακα.

Πίνακας 11: Αποτελέσματα υπολογισμού εκπομπών στο ΔΑΑ.

Αερολιμένας: Διεθνής Αερολιμένας Αθηνών «Ελ. Βενιζέλος»					
Έτος: 2006					
Κινήσεις αεροσκαφών: 190.872					
Πηγή		Εκπομπές ανά 100.000 κινήσεις (tn)			
		CO	HC	NO _x	
EDMS	Κινήσεις αεροσκαφών		98,0	80,0	380,0
	Επίγεια υποστήριξη		60,0	5,0	30,0
	Σύνολο		158,0	85,0	410,0

Οι Fleuti et al., στο πλαίσιο της ανάλυσης ευαισθησίας των εκπομπών του αεροδρομίου της Ζυρίχης, εφαρμόζουν εκ νέου τη μέθοδο LASPORT, στην έκδοση 1.6. Χρησιμοποιώντας αυτή τη φορά τα αναλυτικά στοιχεία κινήσεων (σκάφος προς σκάφος) και μετεωρολογίας του 2004, καταλήγουν στα αποτελέσματα του ακόλουθου πίνακα.^[30]

Πίνακας 12: Αποτελέσματα υπολογισμού εκπομπών στο αεροδρόμιο της Ζυρίχης για το 2004.

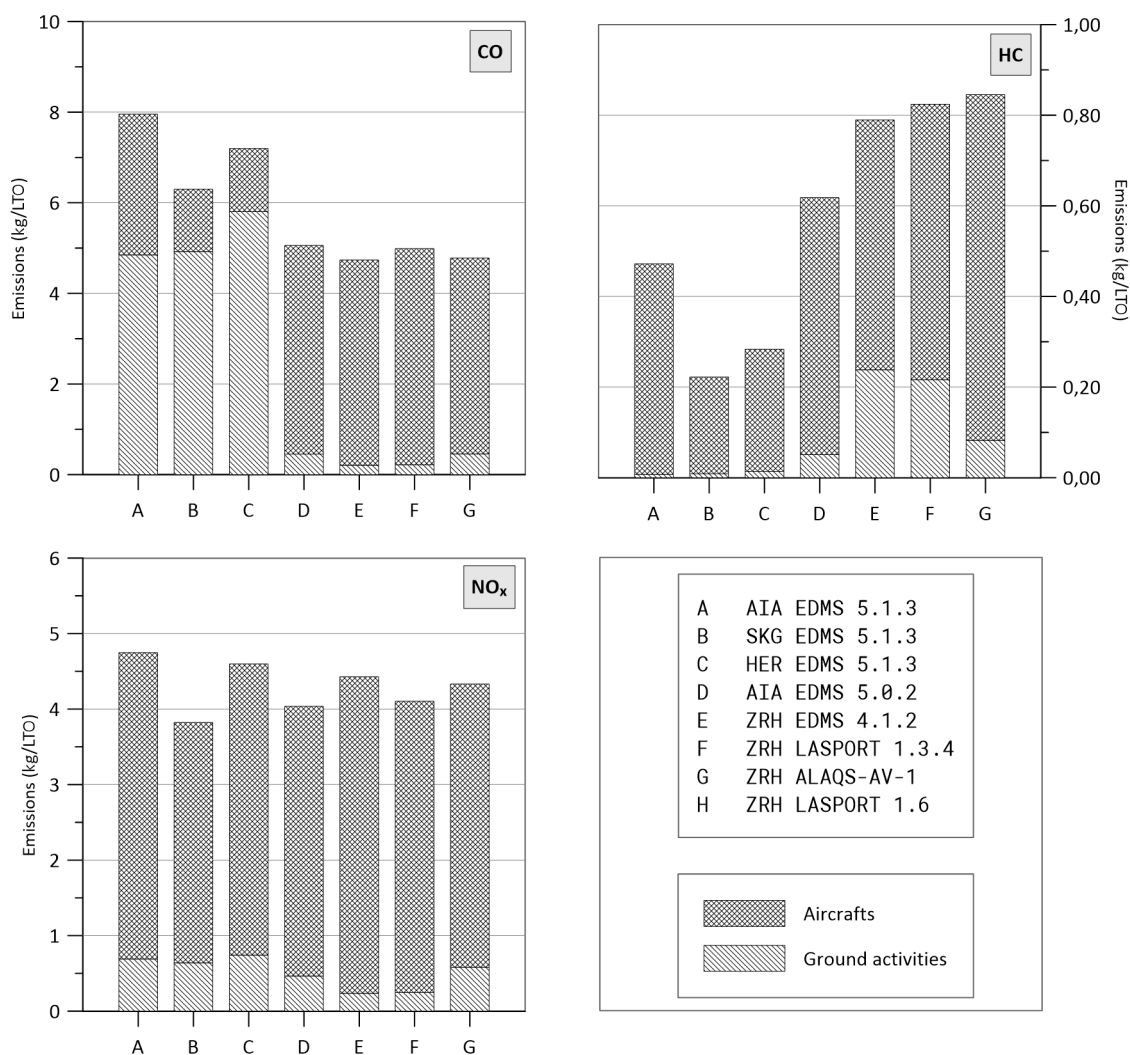
Αερολιμένας: Ζυρίχη					
Έτος: 2004					
Κινήσεις αεροσκαφών: 263.320					
Πηγή		Εκπομπές (tn/yr)			
		CO	HC	NO _x	
LASPORT	Κινήσεις αεροσκαφών		1138,1	201,0	987,8
	Επίγεια υποστήριξη		120,6	21,6	153,4
	Σύνολο		1258,7	222,6	1141,2

Συγκεντρώνοντας τώρα και ανάγοντας τα παραπάνω στοιχεία ανά κύκλο προσγείωσης-απογείωσης (LTO, βλ. ενότητα 12.3, σελ. 332 κ.ε.), όπως και τα αποτελέσματα του υπολογισμού εκπομπών της παρούσας εργασίας (πίνακας 3 σελ. 39, πίνακας 5 σελ. 87 και πίνακας 8 σελ. 138) διαμορφώνεται ο ακόλουθος πίνακας.

Πίνακας 13: Ανηγμένες εκπομπές στα αεροδρόμια της παρούσας εργασίας και σε αυτά άλλων εργασιών.

Αερολιμένας	Έτος	Μέθοδος	Ανηγμένες εκπομπές (kg/LTO)								
			Α: Αεροσκάφη			Ε: Επίγειες δραστηριότητες			Σ: Σύνολο		
			CO			HC			NO _x		
			A	E	Σ	A	E	Σ	A	E	Σ
ATH	2009	EDMS 5.1	3,10	4,85	7,96	0,46	0,01	0,47	4,06	0,69	4,75
SKG	2009	EDMS 5.1	1,38	4,92	6,30	0,21	0,01	0,22	3,18	0,64	3,82
HER	2009	EDMS 5.1	1,39	5,80	7,20	0,27	0,01	0,28	3,86	0,74	4,60
ΔΑΑ	2006	EDMS 5.02	0,98	0,60	1,58	0,80	0,05	0,85	3,80	0,30	4,10
Ζυρίχη	2003	EDMS 4.12	4,61	0,45	5,06	0,57	0,05	0,62	3,57	0,46	4,04
Ζυρίχη	2003	LASPORT 1.3.4	4,53	0,21	4,74	0,55	0,24	0,79	4,19	0,24	4,43
Ζυρίχη	2003	ALAQS AV-1	4,77	0,21	4,99	0,61	0,22	0,82	3,86	0,25	4,11
Ζυρίχη	2004	LASPORT 1.6	4,32	0,46	4,78	0,76	0,08	0,85	3,75	0,58	4,33

Τα μεγέθη του πίνακα αυτού απεικονίζονται στο επόμενο γράφημα.



Γράφημα 115: Εκπομπές ανά κύκλο προσγείωσης-απογείωσης στους αερολιμένες της παρούσας εργασίας και άλλων εργασιών, υπολογισμένες με διαφορετικές μεθόδους.

Οι βασικότερες διαπιστώσεις που εξάγονται από την αντιπαραβολή των ανηγμένων εκπομπών, την οποία εξυπηρετεί το παραπάνω γράφημα, είναι οι εξής:

- Υπάρχουν κατά περίπτωση σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των υπολογισμών εκπομπών που έχουν διεξαχθεί με διαφορετικές μεθόδους ή/και σε διαφορετικά αεροδρόμια. Ένα σημαντικό μέρος των διαφορών αυτών εξηγείται βάσει των διαφορετικών μιγμάτων αεροσκαφών που κινήθηκαν στο κάθε αεροδρόμιο: περισσότερα αεριωθούμενα αυξάνουν τις εκπομπές σε σχέση με τα ελικοφόρα. Ένα άλλο μέρος των διαφορών οφείλεται στο βαθμό αναλυτικότητας που είχαν τα δεδομένα εισόδου κάθε προσέγγισης: όταν εισάγονται οι ακριβείς χρόνοι των κινήσεων και τα λεπτομερή μετεωρολογικά στοιχεία η προσέγγιση αναμένεται να είναι καλύτερη. Τέλος, οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των μοντέλων εξηγούν το υπολειπόμενο μέρος των διακυμάνσεων.

- Η μικρότερη διακύμανση παρατηρείται στον υπολογισμό εκπομπών NO_x. Και στις οκτώ περιπτώσεις, η εκπεμπόμενη ποσότητα οξειδίων του αζώτου υπολογίζεται από 3,82 έως 4,75 kg/LTO. Η σύγκλιση των εκτιμήσεων εμφανίζεται τόσο στις εκπομπές από τα αεροσκάφη όσο και σε αυτές των επίγειων δραστηριοτήτων, όπου πάντως η διακύμανση είναι μεγαλύτερη. Επειδή όμως οι επίγειες δραστηριότητες συμμετέχουν σε πολύ περιορισμένο βαθμό στις εκπομπές NO_x, δεν διαταράσσεται ιδιαίτερα η σύγκλιση των συνολικών αποτελεσμάτων.
- Συνεχίζοντας επί των NO_x, μπορούν να διατυπωθούν δύο παρατηρήσεις:
 - α) Διαφαίνεται ότι υπάρχει δυνατότητα διατύπωσης ενός εμπειρικού κανόνα (rule of thumb) για την αδρή εκτίμηση των μέσων εκπομπών ανά κίνηση αεροσκάφους, ως εξής: «στα αεροδρόμια με πλειοψηφία αεριωθούμενων, αναμένεται κατά μέσο όρο εκπομπή 4 - 5 kg NO_x ανά κίνηση αεροσκάφους».
 - β) Για ολόκληρο το ταξίδι του αεροσκάφους, υπολογισμοί που αναφέρονται στις συνολικές εκπομπές NO_x μιας πτήσης, π.χ. για την αεροπορική κυκλοφορία της Αυστραλίας, καταλήγουν σε ένα μέσο επίπεδο εκπομπών γύρω στα 93 kg NO_x ανά πτήση.^[33] Όση προσαρμογή και αν χρειάζεται το μέγεθος αυτό για τις αποστάσεις που καλύπτουν οι πτήσεις μεταξύ ευρωπαϊκών ή ελληνικών αεροδρομίων, αντιπαραβάλλοντάς το με την προηγούμενη παρατήρηση συνάγεται ότι μόνο ένα μικρό μέρος των NO_x από την εναέρια κυκλοφορία εκπέμπεται κοντά στα αεροδρόμια. Αυτό φυσικά δεν αναιρεί το γεγονός ότι, επειδή αυτό το μικρό μέρος των NO_x εκπέμπεται κοντά στο έδαφος ενδέχεται να οδηγεί σε σημαντικές συγκεντρώσεις τους και συνακόλουθα σε ανησυχητικές ενδεχόμενες επιπτώσεις στην υγεία του επηρεαζόμενου πληθυσμού.
- Σε ότι αφορά τις ανηγμένες εκπομπές CO, οι διαφορές μεταξύ των εκτιμήσεων διακρίνονται σε τρεις ομάδες, ανάλογα με τη μεθοδολογική προσέγγιση. Η πρώτη ομάδα αποτελείται από τα τρία αεροδρόμια της παρούσας εργασίας, στα οποία χρησιμοποιήθηκε το πραγματικό μίγμα αεροσκαφών και η βάση δεδομένων εκπομπών του Eurocontrol που είναι ενσωματωμένη στο EDMS. Τα αποτελέσματα που παρήχθησαν για τις εκπομπές CO είναι ιδιαίτερα συναφή μεταξύ τους, αφού κινούνται στο εύρος 6,30 - 7,96 kg/LTO. Η δεύτερη ομάδα αποτελείται από τις τέσσερις εκτιμήσεις για το αεροδρόμιο της Ζυρίχης. Εκεί, οι διαφορετικές μέθοδοι καταλήγουν σε ακόμη συναφέστερα μεταξύ τους αποτελέσματα, τα οποία κινούνται στο εύρος 4,74 - 5,06 kg/LTO. Τέλος, η τρίτη ομάδα περιλαμβάνει τα αποτελέσματα για το ΔΑΑ του 2006 (εργασία Θεοφανίδη), τα οποία κινούνται στο ¼ περίπου των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας, κατά πάσα πιθανότητα λόγω των απλοποιητικών παραδοχών

για τον υπολογισμό τους, όπως η θεώρηση μέσου στόλου αεροσκαφών και εξοπλισμού υποστήριξης ή/και η χρήση απλουστευμένου μετεωρολογικού προτύπου.

- Οι ανηγμένες εκπομπές HC διακρίνονται σε δύο ομάδες. Η πρώτη αποτελείται τα τρία αεροδρόμια της παρούσας εργασίας, στα οποία η μοναδιαία εκπομπή HC υπολογίστηκε από 0,22 ως 0,47 kg/LTO. Η δεύτερη ομάδα αποτελείται από όλα τα υπόλοιπα αποτελέσματα, δηλαδή αυτά για το ΔΑΑ του 2006 (εργασία Θεοφανίδη) και εκείνα των τεσσάρων εκτιμήσεων για το αεροδρόμιο της Ζυρίχης, τα οποία κινούνται από 0,62 έως 0,85 kg/LT.
- Η σχετικώς μεγάλη διαφοροποίηση στις ανηγμένες εκπομπές CO και HC δεν διαφαίνεται να επιτρέπει την εξαγωγή εμπειρικών κανόνων, όπως για τα NO_x. Ωστόσο, η διακύμανση των αποτελεσμάτων σε επίπεδα ίδιας τάξης μεγέθους, υποδεικνύει ότι οι διαφορετικές μεθοδολογίες υπολογισμού εκπομπών, παρά τις επιμέρους αποκλίσεις, καταλήγουν σε συμβατά μεταξύ τους αποτελέσματα.

6.1.3. Αποτελέσματα υπολογισμού εκπομπών έναντι απογραφής συνολικών εκπομπών της αεροπορικής κυκλοφορίας στην Ελλάδα

Η σύγκριση των εκπομπών αέριων ρύπων των τριών μεγαλύτερων αεροδρομίων της χώρας με τις συνολικές εκπομπές της αεροπορικής κυκλοφορίας στην Ελλάδα, καθώς και με τις εκπομπές άλλων τομέων της οικονομικής δραστηριότητας, θα μπορούσε να αποτελέσει τη βάση για ενδιαφέρουσες σκέψεις.

Οι εκτιμήσεις εκπομπών αέριων ρύπων σε εθνικό επίπεδο για το έτος 2009^[34] πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της ετήσιας απογραφής των εκπομπών που επηρεάζουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Για το λόγο αυτό, οι ρύποι που συμπεριελήφθησαν είναι το CO, οι NMVOC, τα NO_x και το SO₂. Οι τρεις πρώτες ουσίες θεωρούνται ως έμμεσα αέρια του θερμοκηπίου, κυρίως λόγω του ρόλου τους ως πρόδρομες του τροποσφαιρικού όζοντος και της επίδρασής τους στο χρόνο ζωής των κύριων αερίων του θερμοκηπίου. Για παράδειγμα, το CO αντιδρά με τις υδροξυλικές ρίζες προς CO₂. Οι ρίζες αυτές όμως αποτελούν τον κύριο μηχανισμό απορρόφησης του CH₄ και επομένως η αύξηση της συγκέντρωσης CO περιορίζει τα OH που είναι διαθέσιμα για την «καταστροφή» του μεθανίου, αυξάνοντας το χρόνο ζωής του στην ατμόσφαιρα.

Τα επίπεδα των ετήσιων εκπομπών για τις τέσσερις αυτές ουσίες, ανά τομέα, παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 14: Ετήσιες εκπομπές αέριων ρύπων στην Ελλάδα το 2009.

Πηγές εκπομπής	Εκπεμπόμενες ποσότητες (tn/yr)			
	CO	NMVOC	NO _x	SO ₂
Σύνολο (A+B)	540.526,71	113.385,73	372.959,31	421.664,15
A. Δραστηριότητες καύσης (1+2+3+4)	540.132,22	79.916,08	372.219,64	408.356,90
1. Ενέργεια (α+β+γ)	45.596,10	6.075,94	129.599,19	333.676,49
α. Παραγωγή ηλεκτρισμού και θέρμανση	44.940,03	5.513,72	123.575,12	296.179,92
β. Διύλιση πετρελαίου	633,48	554,69	5.873,44	37.496,57
γ. Παραγωγή στερεών καυσίμων και άλλα	22,59	7,53	150,63	--
2. Βιομηχανία και κατασκευές (α+β+γ+δ+ε+στ)	11.029,78	4.542,39	21.684,64	11.828,72
α. Σίδηρος και χάλυβας	45,99	10,06	264,57	47,95
β. Μη-σιδηρούχα μέταλλα	157,67	132,78	1.409,21	3.532,96
γ. Χημικά	130,57	74,28	831,72	1.041,18
δ. Χαρτί και εκτυπώσεις	44,74	26,46	291,32	376,57
ε. Τρόφιμα, ποτά, καπνός	5.891,14	3.746,60	2.407,84	1.177,26
στ. Άλλα	4.759,67	552,21	16.479,99	5.652,79
3. Μεταφορές (α+β+γ+δ)	385.556,50	59.841,69	193.932,81	46.991,42
α. Πολιτική αεροπορία	3.401,10	181,41	4.754,07	438,82
β. Οδικές μεταφορές	375.144,80	57.351,18	136.462,74	756,60
γ. Σιδηροδρομικές μεταφορές	321,00	139,50	1.188,00	600,00
δ. Ναυτιλία	6.689,60	2.169,60	51.528,00	45.196,00
4. Άλλοι τομείς (α+β+γ)	97.949,84	9.456,06	27.003,00	15.860,27
α. Εμπόριο/διοίκηση	914,47	126,19	915,56	1.669,33
β. Κατοικία	59.500,64	4.747,90	5.276,97	12.875,71
γ. Γεωργία/δασοπονία/αλιεία	37.534,73	4.581,97	20.810,47	1.315,22
B. Διαφυγούσες εκπομπές	394,49	33.469,64	739,67	13.307,25

Τα μεγέθη του προηγούμενου πίνακα, ιδίως αυτά που σχετίζονται με τις εκπομπές της αεροπορίας, έχουν προκύψει με τη χρήση των μεθόδων που συστήνονται από το Intergovernmental Panel on Climate Change και εμπεριέχουν αρκετές εξαιρέσεις και παραδοχές που θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τις συγκριτικές προσεγγίσεις. Η κυριότερη εξαίρεση αφορά το διαχωρισμό εθνικών και διεθνών πτήσεων: δεδομένου ότι η απογραφή στο πλαίσιο του Πρωτοκόλλου του Κιότο αφορά εθνικές εκπομπές, στον προηγούμενο πίνακα εμφανίζονται τα μεγέθη που σχετίζονται με τις εθνικές πτήσεις μόνο, χωρίς να έχουν συμπεριληφθεί οι διεθνείς.* Η κυριότερη παραδοχή αναφορικά με τον υπολογισμό των εκπομπών αεροπορίας είναι ότι αυτές προκύπτουν με βάση μέσου συντελεστές εκπομπής ανά κύκλο προσγείωσης - απογείωσης (LTOs) χωρίς εξειδίκευση ως προς τον τύπο των αεροσκαφών και ως προς τις επίγειες δραστηριότητες.

Βάσει των παραπάνω, γίνεται κατανοητό ότι η σύγκριση των εκπομπών των τριών αεροδρομίων της παρούσας εργασίας με τις συνολικές εκπομπές της πολιτικής αεροπορίας στην Ελλάδα θα πρέπει να αφορά μόνο στις πτήσεις εσωτερικού. Επομένως, οι εκπομπές των τριών αεροδρομίων θα πρέπει να διαχωριστούν σε πτήσεις εσωτερικού και εξωτερικού. Ο απλούστερος, αλλά ταυτόχρονα και ο μόνος διαθέσιμος τρόπος διεξαγωγής αυτού του διαχωρισμού είναι η αντιστοίχιση των εκπομπών με τα ποσοστά του συνολικού αριθμού πτήσεων που αφορούν σε κινήσεις εσωτερικού και εξωτερικού, όπως αυτά δημοσιεύονται από την ΥΠΑ. Η προσέγγιση αυτή προϋποθέτει την παραδοχή ότι οι μοναδιαίες εκπομπές ανά πτήση είναι ίδιες είτε αυτή αφορά στο εσωτερικό είτε στο εξωτερικό· αυτό βέβαια μόνο απλουστευτικά μπορεί να αξιοποιηθεί, αφού το μίγμα αεροσκαφών είναι διαφορετικό ανάλογα με το εάν η πτήση προέρχεται ή κατευθύνεται στο εσωτερικό ή στο εξωτερικό. Συγκεκριμένα, το σύνολο σχεδόν των ελικοφόρων αεροσκαφών, των οποίων οι εκπομπές είναι μικρότερες από ότι των αεριωθούμενων, αντιστοιχεί σε πτήσεις εσωτερικού, ιδίως προς τα νησιά του Αιγαίου ή/και τα περιφερειακά αεροδρόμια χαμηλής ζήτησης, ενώ οι κινήσεις προς το εξωτερικό πραγματοποιούνται με αεριωθούμενα αεροσκάφη. Τα ελικοφόρα αντιστοιχούν στο 12,7% των ετήσιων κινήσεων του ΔΑΑ για το 2009, καθώς και στο 14,6% και 8,6% των αερολιμένων Θεσσαλονίκης και Ηρακλείου αντίστοιχα. Επομένως, η απόκλιση που εισάγει η παραδοχή αναλογικής κατανομής, στις πτήσεις εσωτερικού και εξωτερικού, των περιορισμένων εκπομπών από τα ελικοφόρα, αντί αποκλειστικά σε αυτές του εσωτερικού, δεν αναμένεται να εισάγει μεγάλο σφάλμα στον υπολογισμό της τελικής αντιστοίχισης, η οποία κατόπιν των παραπάνω επεξηγήσεων παρουσιάζεται στον επόμενο πίνακα.

* Οι εκπομπές των διεθνών πτήσεων για τα έξι κύρια αέρια του θερμοκηπίου (CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC και SF₆) υπολογίζονται σε ισοδύναμο CO₂ και παρουσιάζονται στην απογραφή του 2009 ως πληροφορίες υπομνήματος (memo items). Αυτό όμως δεν συμβαίνει για τους τέσσερις υπό συζήτηση αέριους ρύπους (CO, NMVOC, NO_x και SO₂).

Πίνακας 15: Υπολογισμός εκπομπών εσωτερικών πτήσεων στην Ελλάδα το 2009.

Αερολιμένας	Σύνολο πτήσεων 2009 (LTOs)	Πτήσεις εσωτερικού	Πτήσεις εξωτερικού	Εκπομπές (tn/yr)				
					CO	NMVOC	NO _x	SO _x
Διεθνής Αερολιμένας Αθηνών	210.147	LTOs: 104.423	LTOs: 105.724	Συνολικές	1671,73	99,189	997,918	79,813
		Ποσοστό: 49,7%	Ποσοστό: 50,3%	Εσωτερικού	830,690	49,287	495,870	39,659
Αερολιμένας Θεσσαλονίκης	50.238	LTOs: 25.686	LTOs: 24.552	Συνολικές	314,984	11,103	191,1	13,524
		Ποσοστό: 51,1%	Ποσοστό: 48,9%	Εσωτερικού	161,047	5,677	97,707	6,915
Αερολιμένας Ηρακλείου	44.842	LTOs: 18.859	LTOs: 25.983	Συνολικές	359,932	14,191	229,916	15,436
		Ποσοστό: 42,1%	Ποσοστό: 57,9%	Εσωτερικού	151,375	5,968	96,695	6,492
Σύνολο ελληνικών αερολιμένων	457.706	LTOs: 240.126	LTOs: 217.580	Εσωτερικού (πίνακας 14)	3.401,100	181,41	4.754,07	438,82
		Ποσοστό: 52,5%	Ποσοστό: 47,5%					

Με βάση τις εκπομπές πτήσεων εσωτερικού του παραπάνω πίνακα για τους τρεις υπό μελέτη αερολιμένες, στον επόμενο πίνακα παρουσιάζεται το ποσοστό συμμετοχής τους στις συνολικές εκπομπές της πολιτικής αεροπορίας στην Ελλάδα.

Πίνακας 16: Αντιπαραβολή των εκπομπών από τις πτήσεις εσωτερικού στους τρεις υπό μελέτη αερολιμένες με τις συνολικές εκπομπές πολιτικής αεροπορίας στην Ελλάδα.

Πηγή εκπομπών	CO		NMVOC		NO _x		SO _x	
	tn/yr	Ποσοστό	tn/yr	Ποσοστό	tn/yr	Ποσοστό	tn/yr	Ποσοστό
Συνολικές εκπομπές πολιτικής αεροπορίας στην Ελλάδα	3.401,10	--	181,41	--	4.754,07	--	438,82	--
Διεθνής Αερολιμένας Αθηνών	830,69	24,4%	49,29	27,2%	495,87	10,4%	39,66	9,0%
Αερολιμένας Θεσσαλονίκης	314,98	9,3%	11,10	6,1%	191,10	4,0%	13,52	3,1%
Αερολιμένας Ηρακλείου	151,37	4,5%	5,97	3,3%	96,69	2,0%	6,49	1,5%
Σύνολο τριών αερολιμένων	1.297,05	38,1%	66,36	36,6%	783,66	16,5%	59,68	13,6%

Το πρώτο συμπέρασμα από τα μεγέθη του παραπάνω πίνακα είναι ότι τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας ως προς τις εκπομπές είναι συμβατά με τα αποτελέσματα της εθνικής απογραφής των εκπομπών. Πράγματι, στο σύνολο των ελληνικών αερολιμένων, το 2009 εξυπηρετήθηκαν 240.126 πτήσεις εσωτερικού, εκ των οποίων το άθροισμα όσων πέταξαν από/προς τους τρεις υπό μελέτη αερολιμένες ήταν 148.968 LTOs, που αντιστοιχεί σε

ποσοστό 62%. Όπως αναφέρεται στην ενότητα 12.1, οι εκπομπές των αεροσκαφών κατά τη διάρκεια της δραστηριότητάς τους στο αεροδρόμιο (προσγείωση – επίγεια εξυπηρέτηση – απογείωση) αποτελούν μέρος μόνο των συνολικών εκπομπών ανά δρομολόγιο, ενώ το υπόλοιπο μέρος των εκπομπών αφορά στην πτήση σε μεγάλο ύψος. Σε δρομολόγια μεγάλων αποστάσεων το ποσοστό των εκπομπών κατά την κύρια πτήση μπορεί να κυμανθεί από 70 έως 90% και μόνο το υπόλοιπο να αφορά στις δραστηριότητες του σκάφους στο αεροδρόμιο.^[33,35,36] Δεδομένου ωστόσο ότι οι δημοσιεύσεις αυτές βασίζονται σε δρομολόγια μεγάλων αποστάσεων, όπου η κύρια πτήση αφορά πολλές εκατοντάδες ή και λίγες χιλιάδες χιλιόμετρα, όπως π.χ. στις εσωτερικές πτήσεις Αυστραλίας ή ΗΠΑ, τα ποσοστά χρειάζονται μια προσαρμογή για την περίπτωση των εσωτερικών πτήσεων της Ελλάδας, όπου οι καλυπτόμενες αποστάσεις πτήσης είναι πολύ μικρότερες. Σε κάθε περίπτωση πάντως, το να υπολογίζεται ότι από τις δραστηριότητες στους υπό μελέτη αερολιμένες εκπέμφθηκαν μέρη μόνο των συνολικών εκπομπών αέριων ρύπων υποδεικνύει μια κατ' αρχήν συμβατότητα των αποτελεσμάτων.

Το δεύτερο συμπέρασμα αφορά στα ποσοστά εκπομπών καθενός ρύπου ξεχωριστά. Ο πίνακας 16 αναφέρει ότι για το CO και τα NMVOC το ποσοστό εκπομπών στα τρία αεροδρόμια της παρούσας εργασίας είναι σχετικά μεγάλο, από 36,6 έως 38,1%, ενώ για τα NO_x και τα SO_x το ποσοστό, σε σχέση με τις συνολικές εκπομπές είναι σαφώς μικρότερο, από 13,6 ως 16,5%. Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 12.1, οι εκπομπές CO και τα NMVOC είναι εντονότερες στη διάρκεια των αερολιμενικών δραστηριοτήτων μιας πτήσης ενώ τα NO_x και τα SO_x εκπέμπονται κατά το μεγαλύτερο μέρος τους στη διάρκεια της κύριας πτήσης, μακριά από το αεροδρόμιο. Δεδομένου ότι οι εκπομπές στο πλαίσιο της εθνικής απογραφής υπολογίστηκαν με ενιαίο τρόπο, χωρίς διαχωρισμό μεταξύ αερολιμενικών δραστηριοτήτων και κύριας πτήσης, ενώ αντίθετα το EDMS υπολογίζει τις εκπομπές των αερολιμενικών δραστηριοτήτων μόνο, και μάλιστα με λεπτομερή τρόπο, είναι εύλογο τα αποτελέσματα του μοντέλου να καταλήγουν σε μεγαλύτερα ποσοστά CO και NMVOC και σε μικρότερα ποσοστά NO_x και SO_x.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, διαπιστώνεται ότι η σύγκριση των αποτελεσμάτων υπολογισμού των εκπομπών στα τρία μεγαλύτερα αεροδρόμια της χώρας με το EDMS με αυτά που υπολογίστηκαν στο πλαίσιο της εθνικής απογραφής εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και αφορούν στις συνολικές εκπομπές της πολιτικής αεροπορικής κυκλοφορίας στην Ελλάδα, υποδεικνύει συμβατότητα των ευρημάτων.

6.2. Συγκρίσεις συγκεντρώσεων με οριακές τιμές

Στο πλαίσιο της παρούσας ενότητας εξετάζεται η σχέση που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα υπολογισμού των συγκεντρώσεων αέριων ρύπων, τα οποία παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 5, με τις οριακές τιμές που έχουν θεσπιστεί στην Ελλάδα και οι οποίες είναι ταυτόσημες με αυτές που ισχύουν στην Ευρωπαϊκή Ένωση.

Για να καταστεί εφικτή η σύγκριση αυτή, θα πρέπει προηγουμένως να διευκρινιστούν δύο ζητήματα: η σχέση NO_2 με τα NO_x και η σχέση SO_2 με τα SO_x . Η αναγκαιότητα αυτή προκύπτει διότι τα μεν αποτελέσματα του EDMS εκφράζονται σε συγκεντρώσεις όλων των οξειδίων NO_x και SO_x , ενώ οι οριακές τιμές χρησιμοποιούν τις συγκεντρώσεις μόνο των διοξειδίων NO_2 και SO_2 .

6.2.1. Αναλογία NO_2 στο μίγμα NO_x

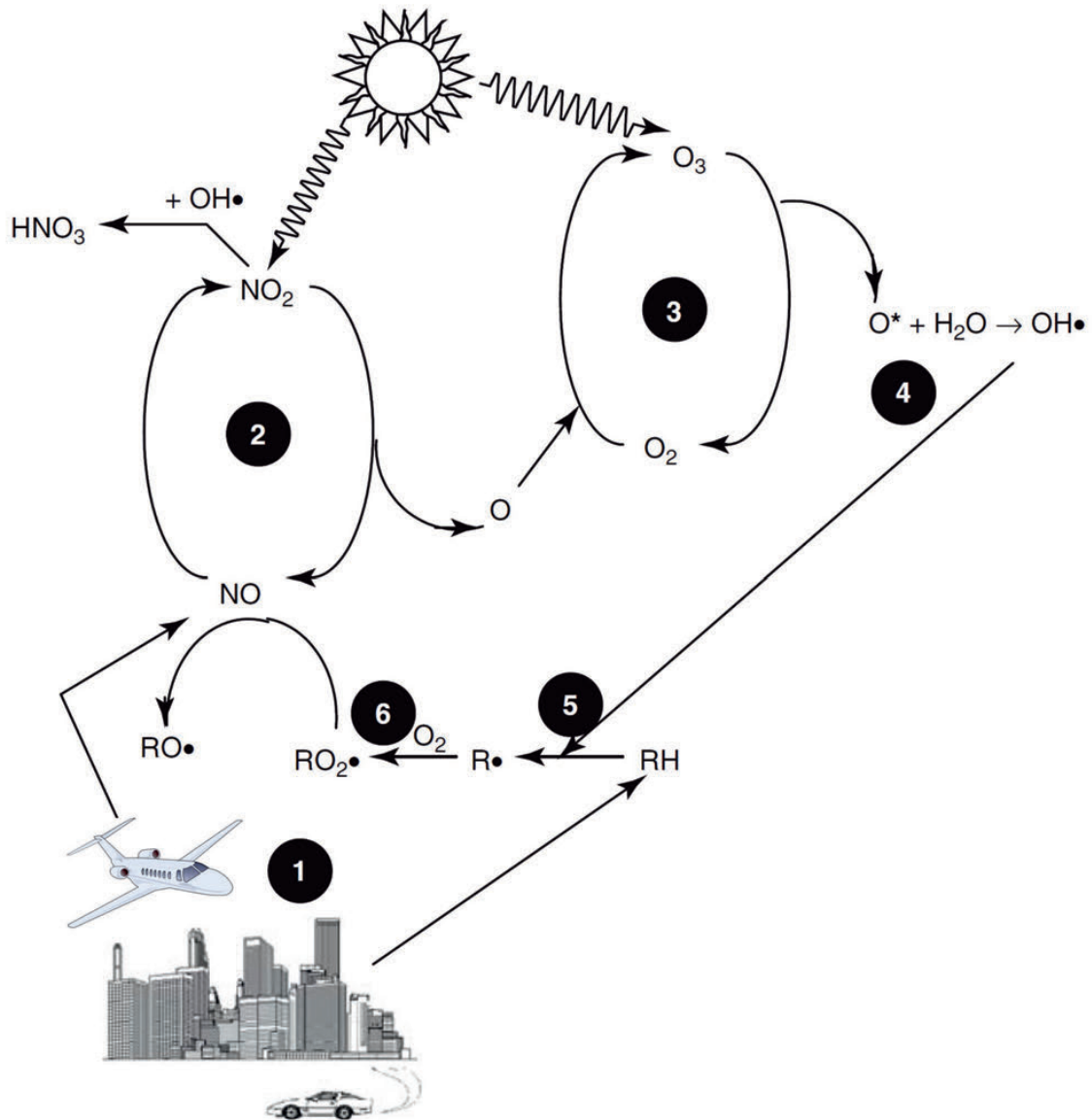
Τα NO_x ανήκουν στα κύρια συστατικά που εμπλέκονται στο σχηματισμό τροποσφαιρικού όζοντος^[37] που, σε αντίθεση με το επιθυμητό O_3 της άνω στρατόσφαιρας, προκαλεί βλάβες και θεωρείται ατμοσφαιρικός ρύπος. Επιπλέον, τα NO_x εμπλέκονται στο σχηματισμό νιτρικών σωματιδίων και όξινων αερολυμάτων, τα οποία σε υψηλές συγκεντρώσεις αποτελούν παράγοντες χρόνιων αναπνευστικών παθήσεων.^[38] Τέλος, οι υψηλές συγκεντρώσεις των οξειδίων του αζώτου ευθύνονται για περιβαλλοντικά προβλήματα σε κλίμακα μεγαλύτερη από αυτή της εκπομπής τους, συμβάλλοντος για παράδειγμα σε ορισμένες πτυχές του φαινομένου παγκόσμιας θέρμανσης, καθώς είναι δυνατόν να μεταφέρονται από τους επικρατούντες ανέμους σε μεγάλες αποστάσεις.^[39]

Τα δύο βασικά συστατικά των NO_x είναι το μονοξείδιο και το διοξείδιο του αζώτου (NO και NO_2). Από τα δύο αυτά οξείδια, εκείνο που ευθύνεται κυρίως για τις επιπτώσεις στη δημόσια υγεία και στο περιβάλλον είναι το NO_2 . Πρόκειται για αέριο που προκαλεί ερεθισμό, με συμπτώματα τόσο οξείας όσο και χρόνιας μορφής, έχοντας συνδεθεί με παθήσεις του αναπνευστικού και του καρδιαγγειακού συστήματος.^[40-43] Για τους λόγους αυτούς, τα όρια ποιότητας αέρα σε ευρωπαϊκό^[44] και εθνικό^[45] επίπεδο αναφέρονται σε συγκεντρώσεις NO_2 και όχι NO_x .*

* Ας σημειωθεί πάντως, ότι για ορισμένες πηγές NO_x έχουν θεσπιστεί πάγια όρια εκπομπών (κινητήρες εσωτερικής καύσης, μεγάλες εγκαταστάσεις καύσης κ.ά.), ενώ και κατά τη διαδικασία έγκρισης περιβαλλοντικών όρων επιβάλλονται ad hoc περιορισμοί επί των συνολικών NO_x , όταν χρειάζεται.

Μέχρι στιγμής, δεν υπάρχει τυποποιημένη υπολογιστική προσέγγιση μετατροπής των αποτελεσμάτων του EDMS από NO_x σε NO_2 ^[46,47]. Η έρευνα για τις σχέσεις που συνδέουν τις εκπομπές και συγκεντρώσεις NO_x με τις συγκεντρώσεις NO_2 και O_3 είναι ενεργή και περιλαμβάνει εύρος ζητημάτων όπως περιπτώσεις μεγάλων πόλεων^[48,49] ή και ολόκληρων επικρατειών,^[50] περιπτώσεις εκπομπών και συγκεντρώσεων εντός αεροδρομίων^[51,52] αλλά και συσχέτισης της λειτουργίας μεγάλων αεροδρομίων με τις συγκεντρώσεις NO_x στην επηρεαζόμενη αστική περιοχή.^[53-57]

Η χημεία των οξειδίων του αζώτου στην ατμόσφαιρα είναι σχετικώς σύνθετη, αν και αρκετά μελετημένη.^[58-61] Το γνωστότερο χαρακτηριστικό της είναι ο φωτοχημικός κύκλος αλληλεπίδρασης των NO_x με το O_3 στα χαμηλά στρώματα της ατμόσφαιρας, που οδηγεί στο σχηματισμό φωτοχημικού νέφους. Το επόμενο σχήμα^[62] παριστάνει τις κυριότερες επιμέρους αντιδράσεις του κύκλου αυτού.



Σχήμα 9: Ο φωτοχημικός κύκλος αλληλεπίδρασης των NO_x με το O₃ στην τροπόσφαιρα.

Ο κύκλος ξεκινά (1) με τις εκπομπές NO_x που αποτελούνται κυρίως από NO και προέρχονται από ανθρωπογενείς πηγές, καθώς και με τις εκπομπές υδρογονανθράκων τόσο από ανθρωπογενείς όσο και από φυσικές πηγές. Ακολουθεί (2) ο σχηματισμός NO₂ με την οξείδωση του NO από υπεροξικές ρίζες (RO₂•). Αντιστρόφως, αναδημιουργείται NO όταν το NO₂ φωτολύεται υπό την επίδραση της υπεριώδους ακτινοβολίας δίνοντας ατομικό O, το οποίο (3) αντιδρά με το μοριακό O₂ δίνοντας O₃. Μέρος του όζοντος φωτολύεται από την υπεριώδη ακτινοβολία σε μοριακό O₂ και διεγερμένο ατομικό οξυγόνο (O*). Το τελευταίο επιδρά (4) στους υδατμούς σχηματίζοντας υδροξυλικές ρίζες (OH•). Αυτές εν μέρει μετατρέπουν μερικά μόρια NO₂ σε HNO₃, ενώ κατά το άλλο μέρος τους αντιδρούν (5) με τους υδρογονάνθρακες δίνοντας ελεύθερες ρίζες (R•). Οι ρίζες αυτές αντιδρούν με το O₂ της

ατμόσφαιρας σχηματίζοντας τις υπεροξικές ρίζες που προαναφέρθηκαν στην αρχή του κύκλου.

Τα οξειδία του αζώτου (NO_x) που εκπέμπονται από τις επίγειες και αεροπορικές δραστηριότητες ενός αερολιμένα αποτελούνται από μονοξείδιο και διοξείδιο του αζώτου (NO και NO_2 αντίστοιχα). Οι πρωτογενείς εκπομπές αποτελούνται κυρίως από NO , σε ποσοστά από 80% έως 95%,^[63-65] μέρος του οποίου οξειδώνεται, όπως προαναφέρθηκε σε NO_2 . Η χρονική κλίμακα αυτής της αντίδρασης είναι της τάξεως λεπτών^[66] όπως και της αντίστροφης αντίδρασης του NO_2 σε NO , η οποία σχηματίζει το ατομικό O που μετατρέπει το O_2 σε O_3 .^[67] Αμφότερες οι αντιδράσεις επηρεάζονται, όπως προαναφέρθηκε, από την ένταση της υπερϊώδους ακτινοβολίας και τη συγκέντρωση του O_3 . Είναι επομένως ιδιαίτερα δύσκολο να υπολογιστεί εκ των προτέρων και με αξιόπιστο τρόπο η αναλογία συγκεντρώσεων NO/NO_2 στην οποία θα καταλήξει το εκπεμπόμενο μίγμα οξειδίων του αζώτου.

Για το λόγο αυτό, είναι χρήσιμο να συνδυαστεί η παραπάνω ανάλυση με δημοσιευμένα στοιχεία από μετρήσεις πεδίου. Αρκετές δημοσιεύσεις που εξετάζουν την επίδραση της λειτουργίας μεγάλων αεροδρομίων στις συγκεντρώσεις NO_x σε γειτονικές περιοχές^[53-57] δείχνουν ότι, ακόμη και σε συνθήκες που ευνοούν πλήρως τη δημιουργία του, το ποσοστό NO_2 στα συνολικά NO_x στην ευρύτερη ακτίνα ενός αεροδρομίου δεν υπερβαίνει το 40%· αυτό όμως συμβαίνει σε γεωγραφικά πλάτη αρκετά βορειότερα της χώρας μας. Στην Ελλάδα, τα μόνα διαθέσιμα για το θέμα στοιχεία εντοπίζονται στα αποτελέσματα του δικτύου παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα που λειτουργεί υπό την ευθύνη του ΔΑΑ γύρω από τον αερολιμένα Σπάτων. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι το ποσοστό NO_2 στα συνολικά NO_x κυμαίνεται γύρω στο 70%.

Από κανονιστικής πλευράς, είναι χρήσιμο να συνεκτιμηθούν οι συστάσεις της US EPA για το θέμα,^[68,69] οι οποίες περιλαμβάνουν τρεις κατηγορίες προσεγγίσεων. Η πρώτη (Tier 1), που είναι και η απλούστερη, προβλέπει τη χρήση της παραδοχής ότι το σύνολο των NO_x μετατρέπονται σε NO_2 , καταλήγοντας έτσι σε αποτελέσματα που αντιστοιχούν στη δυσμενέστερη θεωρητικώς δυνατή κατάσταση, αλλά εμπεριέχουν μια σοβαρή υπερεκτίμηση της συγκέντρωσης του NO_2 . Η δεύτερη προσέγγιση (Tier 2) περιλαμβάνει δύο επιλογές: η πρώτη εξ αυτών προβλέπει τη χρήση ενός σταθερού συντελεστή αναλογίας για τον υπολογισμό της ωριαίας συγκέντρωσης NO_2 από αυτή των NO_x ίσου με 80% (Ambient Ratio Method, ARM), ο οποίος έχει προκύψει ως δυσμενέστερος πιθανός στην πλειονότητα των περιπτώσεων. Με τη χρήση του συντελεστή αυτού υπερκετιμάται το NO_2 όταν τα NO_x κυμαίνονται σε σχετικώς υψηλά επίπεδα, αλλά ο βαθμός υπερεκτίμησης θεωρείται ότι παραμένει ρεαλιστικός και ταυτόχρονα καλύπτει την αρχή της πρόληψης. Η δεύτερη επιλογή της κατηγορίας Tier 2 προβλέπει τη χρήση εμπειρικών συντελεστών που

μεταβάλλονται ανάλογα με το επίπεδο της συνολικής συγκέντρωσης NO_x (ARM2) και οι οποίοι είναι υψηλοί όταν τα NO_x είναι χαμηλά και χαμηλοί όταν τα NO_x είναι ψηλά. Οι συντελεστές αυτοί υπολογίζονται από τη US EPA μέσα από την επεξεργασία των χρονοσειρών μετρήσεων συγκέντρωσης NO_2 και NO_x σε εθνικό επίπεδο και είναι γενικώς μικρότεροι του 75% αλλά μεγαλύτεροι από αυτούς της Tier 3 που θα αναφερθεί αμέσως παρακάτω. Συγκεκριμένα, σε υψηλές συγκεντρώσεις NO_x ο συντελεστής NO_2/NO_x που χρησιμοποιεί η US EPA στις προεκδόσεις του κώδικα για τη μελλοντική ενσωμάτωση της ARM2 στο AERMOD είναι 20% και μόνο σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις NO_x , όπου η σύγκριση με τα όρια NO_2 στερείται σημασίας, ο συντελεστής αυτός λαμβάνεται ίσος με 90%. Η τρίτη και νεότερη προσέγγιση (Tier 3) προβλέπει τη χρήση ειδικών μεθόδων με τις οποίες προσδιορίζεται ο βαθμός μετατροπής των NO_x σε NO_2 σε κάθε συγκεκριμένη περίπτωση και ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν. Οι δύο επικρατούσες τέτοιες μέθοδοι είναι η Ozone Limiting Method (OLM) and η Plume Volume Molar Ratio Method (PVMRM). Η εφαρμογή των μεθόδων αυτών απαιτεί αναλυτικά δεδομένα με κυριότερο τον λόγο NO_2/NO_x στην έξοδο των καυσαερίων, ενώ στην περίπτωση της OLM απαιτούνται και καταγραφές συγκέντρωσης O_3 και ηλιακής ακτινοβολίας για μακρά χρονικά διαστήματα. Επιπλέον, πρόκειται για σχετικώς νέες μεθόδους που δεν έχουν ακόμη οριστικοποιηθεί σε επίπεδο κώδικα, παρότι υπάρχει σημαντικός αριθμός εκδόσεων και προεκδόσεών τους, ενώ επίσης δεν έχουν ακόμη υιοθετηθεί στο κανονιστικό επίπεδο ούτε από την US EPA ούτε από άλλες εθνικές αρχές προστασίας του περιβάλλοντος.

Η χρήση των μεθόδων της Tier 3 σε βορειότερα γεωγραφικά πλάτη, όπου το όζον υποβάθρου είναι χαμηλό, οδηγεί σε λόγους NO_2/NO_x αρκετά χαμηλότερους από αυτούς των μεθόδων Tier 1 και 2, κυμαινόμενους μεταξύ 20% και 40%. Στην Ελλάδα ωστόσο, όπου σχεδόν στο σύνολο της επικράτειας οι συγκεντρώσεις τροποσφαιρικού O_3 υπερβαίνουν την τιμή-στόχο των $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ συστηματικά,^[70] οι λόγοι NO_2/NO_x κυμαίνονται σε επίπεδα παρεμφερή του 80% που προτείνει η απλή AMR προσέγγισης της Tier 2. Για παράδειγμα, η μέθοδος OLM υποθέτει ότι το μίγμα των NO_x καταρχήν αποτελείται από 10% NO_2 (πρωτογενές ή θερμικό NO_2) και 90% NO . Το τελευταίο θα μετατραπεί φωτοχημικά σε NO_2 σε βαθμό ανάλογο με τη διαθεσιμότητα του όζοντος υποβάθρου. Αν θεωρηθεί μια συγκέντρωση NO_x της τάξης των $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$, τα $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ θα είναι το πρωτογενές NO_2 ενώ τα υπόλοιπα $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ θεωρούνται αρχικώς ως NO . Διαιρώντας με το μοριακό του βάρος ($14+16=30$), υπολογίζεται ότι η συγκέντρωση του NO είναι $6 \text{ mol}/\text{m}^3$. Αν υποθεθεί ότι η συγκέντρωση του O_3 είναι γύρω στα $144 \mu\text{g}/\text{m}^3$, δηλαδή διαιρούμενη με το μοριακό του βάρος ($3 \times 16=48$) ίση με $3 \text{ mol}/\text{m}^3$, τότε σύμφωνα με την OLM το μισό από το αρχικό NO θα παραμείνει ως έχει και το άλλο μισό θα αντιδράσει στοιχειομετρικά με το O_3 , δίνοντας $3 \times 46 = 138 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ NO}_2$. Έτσι η τελική συγκέντρωση NO_2 θα είναι $20 + 138 = 158 \mu\text{g}/\text{m}^3$ που αντιστοιχεί στο 79% της αρχικής.

Με βάση όλα τα παραπάνω επομένως, μια εύλογη παραδοχή εργασίας που καλύπτει με ασφάλεια την ανάγκη σύγκρισης με τις οριακές τιμές και ισορροπεί μεταξύ συστάσεων της US EPA και μετρήσεων στο ΔΑΑ, είναι η θεώρηση ότι στις υπολογιζόμενες με το EDMS συγκεντρώσεις NO_x γύρω από τα αεροδρόμια της παρούσας εργασίας το ποσοστό NO_2 είναι 70%.

6.2.2. Αναλογία SO_2 στο μίγμα των SO_x

Τα SO_x στα καυσαέρια προέρχονται από την οξείδωση του S που περιέχεται στο καύσιμο, το οποίο μετατρέπεται σε SO_2 και σε ανιόντα SO_4^{2-} . Τα θειικά ανιόντα μετατρέπονται άμεσα σε H_2SO_4 , το οποίο προσροφάται στα αιωρούμενα σωματίδια, από τα οποία αργότερα θα εξατμιστεί κατά ένα ποσοστό, γι' αυτό και θεωρείται ότι ανήκει στο πτητικό μέρος των PM. Το ποσοστό μετατροπής του περιεχόμενου στα καύσιμα θείου σε θειικά ιόντα αποτελεί δεδομένο εισόδου των υπολογισμών και σύμφωνα με την καλύτερη διαθέσιμη προσέγγιση εκτιμάται κοντά στο 2,4%,^[71] πλην των αερολιμένων των ΗΠΑ όπου η EPA έχει καταστήσει υποχρεωτική τη χρήση της συντηρητικής τιμής του 5% για το εν λόγω ποσοστό. Στους Ελληνικούς πάντως αερολιμένες που εξετάζονται στην εργασία αυτή, θεωρείται ότι το ποσοστό μετατροπής θείου σε θειικά ιόντα είναι 2,4% και επομένως το θείο που μετατρέπεται σε SO_2 είναι το 97,6% του περιεχόμενου στο καύσιμο S. Σε κάθε περίπτωση πάντως, το θείο που μετατρέπεται σε H_2SO_4 υπολογίζεται ως μέρος των PM, ενώ αυτό που παραμένει υπολογίζεται ως διοξείδιο.

Συνοψίζοντας, το σύνολο των συγκεντρώσεων SO_x που υπολογίζονται από το μοντέλο (δεδομένου ότι το θείο των SO_4 έχει επιμεριστεί ήδη στα PM) μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιστοιχεί σε SO_2 .

6.2.3. Ανταγωνισμός ασταθούς ατμόσφαιρας και αυξημένων εκπομπών

Κατά την καλοκαιρινή περίοδο, τις ώρες της ημέρας - σε αντίθεση με τη νύχτα - εμφανίζονται συγχρόνως δύο φαινόμενα:

- Η υψηλή ηλιοφάνεια ωθεί την ατμόσφαιρα σε ασταθή κατάσταση, η οποία ευνοεί την ταχεία μίξη και τη γρήγορη αραίωση των ρύπων. Δημιουργείται έτσι μια σοβαρή τάση μείωσης των συγκεντρώσεων στο επίπεδο του εδάφους.
- Συγχρόνως, στις ημερήσιες ώρες καταγράφεται αυξημένη αεροπορική κίνηση που μεταφράζεται σε αυξημένους ρυθμούς εκπομπής ρύπων, οι οποίοι ωθούν σε αύξηση των συγκεντρώσεων. Συγκεκριμένα, στα δεδομένα εισόδου των υπολογισμών του

EDMS χρησιμοποιήθηκαν οι πραγματικές μέσες κατανομές της αεροπορικής κίνησης του εικοσιτετραώρου, οι οποίες εμπεριέχουν φόρτιση των ημερήσιων ωρών από τέσσερις έως και επτά φορές μεγαλύτερη από αυτή των νυκτερινών (βλ. γράφημα 4, σελ. 28, για το ΔΑΑ και τον αερολιμένα Θεσσαλονίκης, καθώς και γράφημα 88, σελ. 131 για τον ΚΑΗΚ).

Τα δύο αυτά φαινόμενα είναι ανταγωνιστικά ως προς την επίδρασή τους στις συγκεντρώσεις των αέριων ρύπων: το πρώτο, η αυξημένη καθ' ύψος κινητικότητα του αέρα στο επιφανειακό στρώμα λόγω ηλιοφάνειας, τείνει να τις μειώσει, ενώ το δεύτερο, οι αυξημένες εκπομπές της πυκνότερης κατά τη διάρκεια της ημέρας αεροπορικής κυκλοφορίας τείνει να αυξήσει τις συγκεντρώσεις.

Βάσει των υπολογισμών του EDMS, και στα τρία αεροδρόμια επικρατεί ξεκάθαρα η αστάθεια της ατμόσφαιρας και η μείωση των συγκεντρώσεων που προκαλεί. Συγκεκριμένα, στα αποτελέσματα για το καλοκαίρι του 2009, με χρήση πραγματικής μετεωρολογίας και ρεαλιστικά δυσμενή αεροπορική κίνηση, για τις ώρες της ημέρας με σημαντική ηλιοφάνεια, από τις 8:00 έως και τις 19:00, οι συγκεντρώσεις όλων των ρύπων, περιλαμβανόμενων των NO_x που αποτελούν τον χαρακτηριστικό ρύπο των αεροδρομίων, κινούνται είτε στο μηδέν είτε πολύ κοντά σε αυτό. Η διαπίστωση αυτή δοκιμάστηκε και ισχύει ακόμη και όταν συνυπολογίζονται οι εκπομπές από την οδική κυκλοφορία.

Αντίθετα, τις νυκτερινές ώρες, κατά τις οποίες στο επιφανειακό στρώμα επικρατεί θερμική ισορροπία, το ποσοστό νεφοκάλυψης του θερινού ουρανού είναι πολύ κάτω του 50% και οι άνεμοι συνήθως είναι ήπιοι (κάτω των 4 m/s), η κατάσταση της ατμόσφαιρας καθίσταται ευσταθής (E ή F κατά Pasquill) και τα αποτελέσματα διασποράς των ρύπων μετατοπίζονται σε υψηλότερες τιμές, παρά το γεγονός των μικρότερων εκπομπών λόγω περιορισμένης αεροπορικής κυκλοφορίας.

Ιδίως κατά τις μεταβατικές ώρες (π.χ. 20:00-21:00 ή 05:00-06:00) όπου η ευστάθεια της ατμόσφαιρας έχει ήδη επικρατήσει και συγχρόνως ο ρυθμός των πτήσεων (και άρα των εκπομπών) παραμένει υψηλός, συγκριτικά με τις μετέπειτα ώρες, συντρέχουν όλες οι συνθήκες για εμφάνιση αυξημένων συγκεντρώσεων.

Οι διαπιστώσεις αυτές εξηγούν το γεγονός ότι οι ωριαίες συγκεντρώσεις NO_x και SO_x που παρουσιάστηκαν στα γραφήματα των ενοτήτων 5.2.8, 5.3.8 και 5.4.8 ως οι μεγαλύτερες του έτους 2009 αφορούν στο σύνολό τους νυκτερινές ή μεταβατικές ώρες (παρότι σε εκείνες τις ώρες ο αριθμός πτήσεων είναι σαφώς μικρότερος) αφού στις ημερήσιες ώρες οι συγκεντρώσεις υπολογίστηκαν ως μηδενικές ή πολύ μικρές.

Το φαινόμενο του συγκεκριμένου ανταγωνισμού, υπό το πρίσμα της επίδρασης της ώρας της ημέρας στα αποτελέσματα του EDMS, αναλύεται περαιτέρω στην ενότητα 7.1 (σελ. 235 κ.ε.).

6.2.4. Σύγκριση συγκεντρώσεων με οριακές τιμές στο Διεθνή Αερολιμένα Αθηνών

Το **μονοξείδιο του άνθρακα** που προέρχεται από τη λειτουργία του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών εξαπλώνεται σε μεγάλο μέρος των Μεσογείων, αλλά σε συγκεντρώσεις πολύ χαμηλότερες της οριακής τιμής, όπως προκύπτει από τα γραφήματα των σελίδων 42 έως και 47. Το μεγαλύτερο μέρος της εξάπλωσης του CO αφορά σε συγκεντρώσεις από 100 έως 1.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, δηλαδή από 100 έως 10 φορές κάτω από την οριακή τιμή των 10.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Σε μικρότερες περιοχές εντός ή σε επαφή με το ΔΑΑ εμφανίζονται και υψηλότερες συγκεντρώσεις CO, με τη μέγιστη υπολογιζόμενη να κινείται στο επίπεδο των 4.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, χαμηλότερη δηλαδή του μισού της οριακής τιμής. Η σχετικώς υψηλή αυτή συγκέντρωση εντοπίζεται στο δάπεδο ελιγμών και επίγειας εξυπηρέτησης των αεροσκαφών μπροστά από τον αεροσταθμό (γραφήματα σελίδων 42 και 46) χωρίς να επεκτείνεται εκτός αερολιμένα. Με βάση τα ευρήματα αυτά, διαπιστώνεται ότι οι συγκεντρώσεις CO που προέρχονται από τη λειτουργία του ΔΑΑ, παρότι δεν μπορούν να χαρακτηριστούν αμελητέες, επιβαρύνουν σε μικρό μόνο βαθμό την ποιότητα του αέρα στην περιοχή.

Ως προς τα **οξείδια του αζώτου**, η εικόνα είναι διαφορετική, αφού οι συγκεντρώσεις που οφείλονται στη λειτουργία του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών ανέρχονται σε σημαντικά επίπεδα συγκριτικά με τις οριακές τιμές. Σε ότι αφορά τις μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις, με βάση την παραδοχή για 70% NO₂ στα NO_x (ενότητα 6.2.1, σελ. 167 κ.ε.), το όριο των 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ για το NO₂ αντιστοιχεί σε επίπεδο 286 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ NO_x. Ανατρέχοντας στα γραφήματα των σελίδων 48 έως και 53, διαπιστώνεται ότι υπάρχουν σημαντικές εκτάσεις στις οποίες υπολογίστηκε ότι η συγκέντρωση NO_x υπερβαίνει τα 275-300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ και συνεπώς αναμένεται υπέρβαση της οριακής τιμής NO₂. Η αφετηρία των εκτάσεων αυτών εντοπίζεται στο κεντρικό μέρος του ΔΑΑ, ενώ η μορφή τους μοιάζει είτε με μια επιμήκη κηλίδα είτε με συνένωση ή διαδοχή τέτοιων κηλίδων, εκτεινόμενη κατά την επικρατούσα κατεύθυνση του ανέμου. Στη δυσμενέστερη των έξι δυσμενών περιπτώσεων που εξετάσθηκαν (γράφημα 23, σελ. 51) η περιοχή αναμενόμενης υπέρβασης της οριακής τιμής NO₂ εκτείνεται σε περίπου 13 km² βορειοανατολικά του αερολιμένα, καλύπτοντας σημαντικό μέρος της οικιστικής περιοχής της Αρτέμιδας. Σε τρεις ακόμη περιπτώσεις (γραφήματα σελίδων 48, 49 και 52) η περιοχή υπέρβασης έχει σημαντική έκταση, της τάξεως των 4 - 6 km² ενώ στις άλλες δύο εκ των έξι δυσμενών περιπτώσεων οι υπερβάσεις είναι είτε σημειακές (σελ. 53) είτε ανύπαρκτες (σελ. 50). Πέραν της πλήρως ευσταθούς ατμόσφαιρας που χαρακτηρίζει και τις έξι δυσμενείς περιπτώσεις που εξετάσθηκαν, στις τέσσερις δυσμενέστερες εξ αυτών με τις μεγάλες εκτάσεις υπέρβασης, παρατηρείται ότι η καθοριστική συνθήκη είναι η αργή ταχύτητα του

ανέμου, από 0,5 έως 1,8 m/s, με επιβαρυντικότερη όλων την ενδιάμεση ταχύτητα των 0,9 m/s (1,8 knots).

Διαπιστώνεται επομένως ότι, ενώ στις περιπτώσεις που εξετάστηκαν η εμφάνιση υπερβάσεων της ωριαίας οριακής τιμής NO₂ στην ευρύτερη περιοχή του ΔΑΑ λόγω της λειτουργίας του είναι συχνότατη, οι υπερβάσεις αυτές εκδηλώνονται υπό ιδιαίτερα συγκεκριμένες συνθήκες, οι οποίες θα πρέπει να συντρέξουν ταυτόχρονα. Ειδικότερα, πέραν του υψηλού αριθμού αεροπορικών κινήσεων που οδηγεί σε υψηλό ρυθμό εκπομπής NO_x, χρειάζεται χαμηλή ταχύτητα ανέμου, μικρότερη των 2 m/s, μαζί με έλλειψη ηλιοφάνειας, συνθήκες δηλαδή που μεταφράζονται σε μεγάλη ευστάθεια του επιφανειακού ατμοσφαιρικού στρώματος και οδηγούν στον εγκλωβισμό των NO_x σε χαμηλό ύψος. Οι συνθήκες αυτές δεν είναι τελείως σπάνιες στη διάρκεια του διμήνου Ιουλίου – Αυγούστου, αλλά απέχουν πολύ από το να αποτελούν τον κανόνα, όπως άλλωστε προκύπτει από τη χαμηλή συχνότητα ανέμων ταχύτητας μικρότερης ή ίσης των 2 m/s που απεικονίζουν τα ανεμογράμματα των δύο αυτών μηνών στο γράφημα 8 (σελ. 32). Επομένως, οι 18 φορές που, σύμφωνα με την ευρωπαϊκή και εθνική νομοθεσία, είναι δυνατή η υπέρβαση του επιπέδου των 200 μg/m³ NO₂ πριν θεωρηθεί ότι συντελείται παραβίαση του ορίου, είναι μάλλον επαρκείς για να καλύψουν τις πιθανές εμφανίσεις των υψηλών συγκεντρώσεων NO_x.

Περνώντας στα **λεπτά αιωρούμενα σωματίδια PM_{2.5}**, δηλαδή αυτά με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερων των 2,5 μm, διαπιστώνεται ότι η συγκέντρωσή τους λόγω της λειτουργίας του ΔΑΑ κυμαίνεται σε επίπεδα που δεν εμπνέουν ανησυχία. Συγκεκριμένα, όπως προκύπτει από το γράφημα 27 (σελ. 55), η μέση ετήσια συγκέντρωση PM_{2.5} στη διάρκεια του 2009 εμφανίζει δύο μικρές εκτάσεις εντός του αερολιμένα με τιμές της τάξεως των 5 μg/m³, δηλαδή πέντε φορές κάτω από το όριο των 25 μg/m³, ενώ στην υπόλοιπη έκταση οι τιμές μειώνονται γρήγορα, με τρόπο που η συνολικά επηρεαζόμενη έκταση, δηλαδή εκείνη που περιβάλλεται από την ισορροπαντική γραμμή του 1 μg/m³ να μην υπερβαίνει τα 10 km². Η θέση των περιοχών με την αυξημένη συγκέντρωση PM_{2.5} εντός του αερολιμένα και πολύ κοντά στα σημεία που πραγματοποιούνται επίγειες δραστηριότητες λειτουργίας και εξυπηρέτησης των αεροσκαφών υποδεικνύει ότι η πηγή των λεπτών αιωρούμενων σωματιδίων είναι οι επίγειες και όχι οι εναέριες δραστηριότητες των αεροσκαφών.

Σε ότι αφορά τα **αιωρούμενα σωματίδια PM₁₀** (δηλαδή αυτά με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερων των 10 μm), οι συγκεντρώσεις που οφείλονται στη λειτουργία του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών, συμπεριλαμβανόμενων των πτητικών αλλά και των επίγειων δραστηριοτήτων πλην οδικής κυκλοφορίας, υπολογίστηκε ότι κινούνται αρκετά κάτω από την ισχύουσα οριακή τιμή. Συγκεκριμένα, η υψηλότερη τιμή μέσης συγκέντρωσης εικοσιτετραώρου που υπολογίστηκε στο πλέον δυσμενέστερο από πλευράς εκπομπών δίμηνο Ιουλίου – Αυγούστου 2009 κινείται στο επίπεδο των 10 μg/m³, δηλαδή 5 φορές κάτω

από την οριακή τιμή των $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (γραφήματα σελίδων 56 ως και 61). Η συγκέντρωση αυτή γεωγραφικά εμφανίζεται σε μια μικρή έκταση, της τάξεως του 1 km^2 , εντοπισμένη επί η σε επαφή με το δάπεδο αεροσκαφών μπροστά από τον αεροσταθμό, γεγονός που υποδεικνύει ότι η κύρια πηγή των PM_{10} είναι οι επίγειες δραστηριότητες λειτουργίας και εξυπηρέτησης των αεροσκαφών (APUs και GSEs αντίστοιχα), και όχι οι κινήσεις απογείωσης/προσγείωσης. Σε όλες τις άλλες θέσεις πέραν της μικρής ζώνης των $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, οι συγκεντρώσεις PM_{10} αναμένονται πολύ μικρότερες. Συνάγεται επομένως ότι οι συγκεντρώσεις PM_{10} που προέρχονται από τη λειτουργία του ΔΑΑ δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι επιβαρύνουν κατά ουσιαστικό τρόπο την ποιότητα του αέρα στην περιοχή.

Οι συγκεντρώσεις που υπολογίστηκαν για τα **οξείδια του θείου** και παρουσιάζονται στα γραφήματα των σελίδων 62 ως και 73 σχηματίζουν μια καθησυχαστική εικόνα. Αφού υπενθυμιστεί πρώτον ότι για το SO_2 , το βασικό οξύδιο των SO_x , ισχύουν όρια τόσο για την ωριαία όσο και για την ημερήσια συγκέντρωση, και δεύτερον ότι σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα 6.2.2 παραπάνω η συγκέντρωση όλων των SO_x αντιστοιχίζεται, έστω και με κάποια υπερβολή, με συγκέντρωση SO_2 , διαπιστώνεται ότι οι συγκεντρώσεις SO_x που οφείλονται στη λειτουργία του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών αναμένονται πολύ χαμηλότερες των ορίων. Συγκεκριμένα, σε ότι αφορά τη μέση ωριαία συγκέντρωση SO_x , η υψηλότερη τιμή της, η οποία εμφανίστηκε μια μόνο φορά (γράφημα 40, σελ. 68), κινήθηκε στο επίπεδο των $175 - 200 \mu\text{g}/\text{m}^3$, δηλαδή περίπου στο μισό του ορίου των $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$, σε μια κηλίδα έκτασης μικρότερης του $0,5 \text{ km}^2$, εντός του αερολιμένα, ενώ σε όλες τις άλλες θέσεις οι τιμές της συγκέντρωσης SO_x είναι πολύ χαμηλότερες. Στις υπόλοιπες πέντε δυσμενείς περιπτώσεις, η μέση ωριαία συγκέντρωση SO_x ήταν αρκετά χαμηλότερη, με μια μικρή κηλίδα των $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ή σε μια περίπτωση και των $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, εντός του αερολιμένα, ενώ σε όλες τις άλλες θέσεις οι τιμές κινήθηκαν πολύ χαμηλότερα. Για τη μέση εικοσιτετράωρη συγκέντρωση, τα επίπεδα που υπολογίζει το EDMS είναι ακόμη χαμηλότερα από τα όρια, αφού κινούνται το πολύ στο επίπεδο των $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, δηλαδή πλέον των 10 φορές χαμηλότερα του ορίου των $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Διαπιστώνεται επομένως ότι οι συγκεντρώσεις SO_x που προέρχονται από τη λειτουργία του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών, τόσο σε ημερήσια όσο και σε εικοσιτετράωρη βάση, δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι επιβαρύνουν κατά ουσιαστικό τρόπο την ποιότητα του αέρα στην περιοχή.

6.2.5. Σύγκριση συγκεντρώσεων με οριακές τιμές στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης

Σε ότι αφορά το **μονοξείδιο του άνθρακα**, οι συγκεντρώσεις που προέρχονται από τη λειτουργία του αερολιμένα Θεσσαλονίκης υπολογίστηκε ότι κινούνται πολύ κάτω από την οριακή τιμή, όπως προκύπτει από τα γραφήματα των σελίδων 91 έως και 96. Συγκεκριμένα, η υψηλότερη τιμή που υπολογίστηκε στο πλέον δυσμενέστερο από πλευράς εκπομπών δίμηνο Ιουλίου - Αυγούστου 2009 κινείται στο επίπεδο των $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, δηλαδή εκατό φορές κάτω από την οριακή τιμή των $10.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Η συγκέντρωση αυτή γεωγραφικά εντοπίζεται σε εκτάσεις της τάξεως των $4\text{-}5 \text{ km}^2$, σε σχετικά μικρές αποστάσεις από τον αερολιμένα, κατάντη της κάθε φορά κατεύθυνσης του ανέμου, ενώ σε όλες τις άλλες θέσεις, οι συγκεντρώσεις CO αναμένονται πολύ μικρότερες. Σε κάθε περίπτωση, είναι αναμφίβολο ότι οι συγκεντρώσεις CO που προέρχονται από τη λειτουργία του αερολιμένα Θεσσαλονίκης δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι επιβαρύνουν κατά ουσιαστικό τρόπο την ποιότητα του αέρα στην περιοχή.

Αντίστροφη όμως είναι η εικόνα για τα **οξειδία του αζώτου**. Στα γραφήματα που παρουσιάστηκαν από τη σελ. 97 έως και τη σελ. 102, και τα οποία αφορούν στις μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις NO_x , διακρίνονται περιοχές στις οποίες η συγκέντρωση υπερβαίνει τα $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Υπενθυμίζοντας την παραδοχή για 70% NO_2 στα NO_x (ενότητα 6.2.1, σελ. 167 κ.ε.), βάσει της οποίας το όριο των $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ για το NO_2 αντιστοιχεί σε επίπεδο $286 \mu\text{g}/\text{m}^3$ NO_x , συνάγεται ότι στο εσωτερικό των περιοχών αυτών είναι πιθανή η εμφάνιση υπερβάσεων του επιπέδου αυτού. Ωστόσο, οι περιοχές αυτές, που έχουν τη μορφή κηλίδων, είναι μικρής έκτασης, μικρότερης των 2 km^2 , και εντοπίζονται σε θέσεις εφραπτόμενες στον αερολιμένα και κατάντη της εκάστοτε κατεύθυνσης του ανέμου. Υπό καμία από τις συνθήκες που εξετάστηκαν, οι κηλίδες αυτές της υψηλότερης του ορίου συγκέντρωσης δεν φαίνεται να εκτείνονται σε οικιστικές περιοχές. Ταυτόχρονα όμως, πρέπει να σημειωθεί ότι οι υπερβάσεις, έστω και στις μικρές κηλίδες που προαναφέρθηκαν, είναι παρούσες και στις έξι δυσμενείς περιπτώσεις που εξετάστηκαν, γεγονός που σημαίνει ότι η εμφάνισή τους δεν πρέπει να θεωρείται σπάνια. Προϋπόθεση βέβαια για να εμφανιστούν, όπως προκύπτει από την αναδρομή στις μετεωρολογικές συνθήκες των περιπτώσεων που παρουσιάστηκαν από τη σελ. 97 έως και τη σελ. 102, είναι να συντρέξουν ταυτόχρονα χαμηλή ταχύτητα ανέμου, μικρότερη των 3 m/s , και έλλειψη ηλιοφάνειας, συνθήκες δηλαδή που μεταφράζονται σε μεγάλη ευστάθεια του επιφανειακού ατμοσφαιρικού στρώματος και εγκλωβισμό των NO_x σε χαμηλό ύψος. Επομένως, οι 18 φορές που, σύμφωνα με την ευρωπαϊκή και εθνική νομοθεσία, είναι δυνατή η υπέρβαση του επιπέδου των $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ NO_2 πριν θεωρηθεί ότι καταγράφεται

υπέρβαση ορίου, είναι μάλλον επαρκείς για να καλύψουν τις πιθανές εμφανίσεις τόσο υψηλών συγκεντρώσεων NO_x .

Συναξιολογώντας όλα τα παραπάνω, καθώς και το γεγονός ότι οι υπολογισμοί αφορούν το εντατικότερο από άποψη αεροπορικών κινήσεων δίμηνο του εντατικότερου ως τώρα έτους, μπορεί να συναχθεί η διαπίστωση ότι η συγκέντρωση των NO_x , αντιστοιχιζόμενη με τιμές NO_2 , αναμένεται να προσεγγίζει συχνά αλλά σπανίως να υπερβαίνει το νομοθετημένο όριο. Εάν υπάρξουν παραβάσεις, αυτές αναμένονται τον Αύγουστο, εάν υποθεθεί ότι οι πρώτες 18 επιτρεπόμενες υπερβάσεις της οριακής τιμής των $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ NO_2 θα εξαντληθούν στη διάρκεια του Ιουλίου. Σε κάθε περίπτωση πάντως, με τις εκπομπές της τρέχουσας αεροπορικής κυκλοφορίας, η οποία κυμαίνεται στο επίπεδο των 50.000 κινήσεων ανά έτος, οι οποίες κηλίδες υψηλής συγκέντρωσης NO_x αναμένονται σε θέσεις που δεν επηρεάζουν περιοχή υψηλής πληθυσμιακής πυκνότητας. Οι διαπιστώσεις αυτές, που αφορούν στις μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις NO_x , επιβεβαιώνονται και από την εικόνα της μέσης ετήσιας συγκέντρωσης NO_x , όπως αυτή παρουσιάστηκε στο γράφημα 65, στη σελ. 103, υπερεκτιμημένη λόγω του υπολογισμού της βάσει των ωριαίων τιμών του εντατικότερου διμήνου όλου του έτους. Στο γράφημα αυτό, φαίνεται μια μικρή περιοχή βόρεια του αερολιμένα και σε επαφή με αυτόν, όπου είναι πιθανή η υπέρβαση του ορίου των $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ NO_2 , εντός της οποίας δεν υπάρχουν οικιστικές ή επιχειρηματικές χρήσεις γης.

Σε ότι αφορά τα **αιωρούμενα σωματίδια PM_{10}** , οι συγκεντρώσεις που οφείλονται στη λειτουργία του αερολιμένα Θεσσαλονίκης, συμπεριλαμβανόμενων των πτητικών αλλά και των επίγειων δραστηριοτήτων πλην οδικής κυκλοφορίας, υπολογίστηκε ότι κινούνται πολύ κάτω από την ισχύουσα οριακή τιμή. Συγκεκριμένα, η υψηλότερη τιμή μέσης συγκέντρωσης εικοσιτετραώρου που υπολογίστηκε στο πλέον δυσμενέστερο από πλευράς εκπομπών δίμηνο Ιουλίου - Αυγούστου 2009 κινείται στο επίπεδο των $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, δηλαδή 50 φορές κάτω από την οριακή τιμή των $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (γραφήματα σελ. 104 ως και 109). Η συγκέντρωση αυτή γεωγραφικά εντοπίζεται σε πολύ μικρή έκταση, σαφώς μικρότερη του 1km^2 , σε σχετικά μικρές αποστάσεις από τον αερολιμένα, κατάντη της επικρατούσας κατά τη διάρκεια της μέρας κατεύθυνσης ανέμου, ενώ σε όλες τις άλλες θέσεις, οι συγκεντρώσεις PM_{10} αναμένονται πολύ μικρότερες. Ανάλογη εικόνα προκύπτει και για την ετήσια μέση συγκέντρωση PM_{10} που παρουσιάστηκε στο γράφημα 72, όπου το υψηλότερο επίπεδο τιμών κινείται στο $1,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, δηλαδή 26 φορές χαμηλότερα του ορίου των $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Η έκταση στην οποία αναμένεται η συγκέντρωση αυτή είναι το δάπεδο αεροσκαφών μπροστά στον αεροσταθμό, όπου πραγματοποιούνται οι περισσότερες επίγειες δραστηριότητες του αερολιμένα.

Συνάγεται επομένως ότι οι συγκεντρώσεις PM_{10} που προέρχονται από τη λειτουργία του αερολιμένα Θεσσαλονίκης, τόσο σε ημερήσια όσο και σε ετήσια βάση, δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι επιβαρύνουν κατά ουσιαστικό τρόπο την ποιότητα του αέρα στην περιοχή.

Ως προς τα **οξείδια του θείου**, η κατάσταση που περιγράφουν τα γραφήματα των σελίδων 111 ως και 122 είναι καθησυχαστική. Αφού υπενθυμιστεί ότι για το SO_2 , το βασικό οξείδιο των SO_x , ισχύουν όρια τόσο για την ωριαία όσο και για την ημερήσια συγκέντρωση, διαπιστώνεται ότι οι συγκεντρώσεις SO_x που οφείλονται στη λειτουργία του αερολιμένα Θεσσαλονίκης αναμένονται πολύ χαμηλότερες των ορίων αυτών. Συγκεκριμένα, σε ότι αφορά τη μέση ωριαία συγκέντρωση SO_x , η οποία όπως προαναφέρθηκε αντιστοιχίζεται, έστω και με κάποια υπερβολή, με συγκέντρωση SO_2 , δεν υπερβαίνει τα επίπεδα των $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, δηλαδή 35 φορές κάτω από το όριο των $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$, σε κηλίδες έκτασης $1 - 2 \text{ km}^2$, σε θέσεις εφαιπτόμενες του αερολιμένα, κατάντη του ανέμου. Για τη μέση εικοσιτετράωρη συγκέντρωση, τα επίπεδα που υπολογίζει το EDMS είναι ακόμη χαμηλότερα από τα όρια, αφού κινούνται στο επίπεδο των $0,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, πάνω από 600 φορές χαμηλότερα του ορίου των $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Διαπιστώνεται επομένως ότι οι συγκεντρώσεις SO_x που προέρχονται από τη λειτουργία του αερολιμένα Θεσσαλονίκης, τόσο σε ημερήσια όσο και σε εικοσιτετράωρη βάση, δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι επιβαρύνουν κατά ουσιαστικό τρόπο την ποιότητα του αέρα στην περιοχή.

6.2.6. Σύγκριση συγκεντρώσεων με οριακές τιμές στον αερολιμένα Ηρακλείου

Οι συγκεντρώσεις **μονοξειδίου του άνθρακα** που προέρχονται από τη λειτουργία του αερολιμένα Ηρακλείου υπολογίστηκε ότι κινούνται πολύ κάτω από την οριακή τιμή, όπως προκύπτει από τα γραφήματα των σελίδων 140 έως και 141. Συγκεκριμένα, η υψηλότερη τιμή που υπολογίστηκε στο πλέον δυσμενέστερο από πλευράς εκπομπών δίμηνο Ιουλίου - Αυγούστου 2009 κινείται στο επίπεδο των $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$, δηλαδή πενήντα φορές κάτω από την οριακή τιμή των $10.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Η συγκέντρωση αυτή εντοπίζεται σε μια κηλίδα μικρότερη του 1 km^2 , η οποία περιβάλλεται από μια σχετικά περιορισμένη ζώνη των $100 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ CO}$. Σε όλες τις άλλες θέσεις, οι συγκεντρώσεις CO αναμένονται πολύ μικρότερες. Επομένως, οι συγκεντρώσεις CO που προέρχονται από τη λειτουργία του αερολιμένα Ηρακλείου δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι επιβαρύνουν κατά ουσιαστικό τρόπο την ποιότητα του αέρα στην περιοχή.

Ως προς τα **οξείδια του αζώτου**, στα γραφήματα που παρουσιάστηκαν από τη σελ. 142 έως και τη σελ. 143, και τα οποία αφορούν στις μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις NO_x , διακρίνεται

μία μόνο περιοχή, πολύ μικρού μεγέθους (εντός αερολιμένα στο γράφημα της 6-Ιουλ-2009, σελ. 142) στην οποία η συγκέντρωση υπερβαίνει τα $275 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Υπάρχουν επίσης μερικές κάπως μεγαλύτερες περιοχές με συγκεντρώσεις άνω των $200 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{NO}_x$, γεγονός που υποδηλώνει αξιοσημείωτες επιβαρύνσεις. Πάντως, υπενθυμίζοντας την παραδοχή για 70% NO_2 στα NO_x (ενότητα 6.2.1, σελ. 167 κ.ε.), βάσει της οποίας το όριο των $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ για το NO_2 αντιστοιχεί σε επίπεδο $286 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{NO}_x$, συνάγεται ότι μόνο στο εσωτερικό της πολύ μικρής περιοχής που προαναφέρθηκε, εντός του αερολιμένα και για μία μόνο από τις τέσσερις δυσμενείς καταστάσεις που εξετάστηκαν, αναμένεται η εμφάνιση υπέρβασης του επιπέδου των $200 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{NO}_2$. Επομένως, οι 18 φορές που, σύμφωνα με την ευρωπαϊκή και εθνική νομοθεσία, είναι δυνατή η υπέρβαση του επιπέδου αυτού πριν θεωρηθεί ότι καταγράφεται υπέρβαση ορίου, είναι μάλλον επαρκείς για να καλύψουν τις μάλλον σπάνιες εμφανίσεις τόσο υψηλών συγκεντρώσεων NO_x .

Συναξιολογώντας όλα τα παραπάνω, καθώς και το γεγονός ότι οι υπολογισμοί αφορούν το εντατικότερο από άποψη αεροπορικών κινήσεων δίμηνο του εντατικότερου ως τώρα έτους, μπορεί να συναχθεί η διαπίστωση ότι η συγκέντρωση των NO_x , αντιστοιχιζόμενη με τιμές NO_2 , αναμένεται να προσεγγίζει συχνά αλλά όχι να υπερβαίνει το νομοθετημένο όριο. Η εκτίμηση αυτή, που βασίζεται στις μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις NO_x , επιβεβαιώνονται και από την εικόνα της μέσης ετήσιας συγκέντρωσης NO_x , όπως αυτή παρουσιάστηκε στο γράφημα 101, στη σελ. 144, υπερεκτιμημένη λόγω του υπολογισμού της βάσει των ωριαίων τιμών του εντατικότερου διμήνου όλου του έτους. Στο γράφημα αυτό, φαίνεται ότι οι μέσες συγκεντρώσεις NO_x δεν αναμένεται να υπερβούν το μισό του ορίου των $40 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{NO}_2$.

Περνώντας στα **λεπτά αιωρούμενα σωματίδια $\text{PM}_{2.5}$** , διαπιστώνεται ότι η συγκέντρωσή τους λόγω της λειτουργίας του αερολιμένα Ηρακλείου κυμαίνεται σε επίπεδα που δεν εμπνέουν ανησυχία. Συγκεκριμένα, όπως προκύπτει από το γράφημα 102 (σελ. 145), η μέση ετήσια συγκέντρωση $\text{PM}_{2.5}$ στη διάρκεια του 2009 εμφανίζει μια πολύ μικρή έκταση εντός του αερολιμένα με τιμές της τάξεως των $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, δηλαδή πενήντα φορές κάτω από το όριο των $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ενώ στην υπόλοιπη έκταση οι τιμές μειώνονται γρήγορα, με τρόπο που η συνολικά επηρεαζόμενη έκταση, δηλαδή εκείνη που περιβάλλεται από την ισορροπαντική γραμμή του $0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ να μην υπερβαίνει τα 3km^2 . Η θέση των περιοχών με την αυξημένη συγκέντρωση $\text{PM}_{2.5}$ εντός του αερολιμένα και πολύ κοντά στα σημεία που πραγματοποιούνται επίγειες δραστηριότητες λειτουργίας και εξυπηρέτησης των αεροσκαφών, όπως συνέβη και στο ΔΑΑ, υποδεικνύει ότι η πηγή των λεπτών αιωρούμενων σωματιδίων είναι οι επίγειες και όχι οι εναέριας δραστηριότητες των αεροσκαφών.

Σε ότι αφορά τα **αιωρούμενα σωματίδια PM_{10}** , οι συγκεντρώσεις που οφείλονται στη λειτουργία του αερολιμένα Ηρακλείου, προερχόμενα τόσο από τις πτήσεις όσο και από τις επίγειες δραστηριότητες πλην οδικής κυκλοφορίας, υπολογίστηκε ότι κινούνται πολύ κάτω

από την ισχύουσα οριακή τιμή, όπως προκύπτει από τα γραφήματα των σελίδων 146 ως 147. Συγκεκριμένα, η υψηλότερη τιμή μέσης συγκέντρωσης εικοσιτετράωρου που υπολογίστηκε στο πλέον δυσμενέστερο από πλευράς εκπομπών δίμηνο Ιουλίου – Αυγούστου 2009 κινείται στο επίπεδο των $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, δηλαδή 50 φορές κάτω από την οριακή τιμή των $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Η συγκέντρωση αυτή γεωγραφικά εντοπίζεται σε μια πολύ μικρή έκταση, γύρω από το δάπεδο αεροσκαφών μπροστά στον αεροσταθμό, όπου πραγματοποιούνται οι περισσότερες επίγειες δραστηριότητες του αερολιμένα, υποδεικνύοντας τις δραστηριότητες αυτές ως τις κύριες πηγές PM_{10} . Σε όλες τις άλλες θέσεις, οι συγκεντρώσεις αναμένονται πολύ μικρότερες. Συνάγεται επομένως ότι οι συγκεντρώσεις PM_{10} που προέρχονται από τη λειτουργία του αερολιμένα Ηρακλείου, τόσο σε ημερήσια όσο και σε ετήσια βάση, δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι επιβαρύνουν κατά ουσιαστικό τρόπο την ποιότητα του αέρα στην περιοχή.

Ως προς τα **οξείδια του θείου**, η κατάσταση που περιγράφουν τα γραφήματα των σελίδων 148 ως και 151 είναι καθησυχαστική. Συγκεκριμένα, σε ότι αφορά τη μέση ωριαία συγκέντρωση SO_x , η οποία όπως προαναφέρθηκε αντιστοιχίζεται, έστω και με κάποια υπερβολή, με συγκέντρωση SO_2 , οι υψηλότερες τιμές που υπολογίστηκαν κινούνται στα επίπεδα των $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, δηλαδή 35 φορές κάτω από το όριο των $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$, σε κηλίδες έκτασης περίπου 1 km^2 , σε θέσεις εντός του αερολιμένα. Για τη μέση εικοσιτετράωρη συγκέντρωση, τα επίπεδα που υπολογίζει το EDMS είναι ακόμη χαμηλότερα από τα όρια, αφού κινούνται στο σύνολό τους κάτω από το $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, πάνω από 125 φορές χαμηλότερα του ορίου των $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Διαπιστώνεται επομένως ότι οι συγκεντρώσεις SO_x που προέρχονται από τη λειτουργία του αερολιμένα Ηρακλείου, τόσο σε ημερήσια όσο και σε εικοσιτετράωρη βάση, δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι επιβαρύνουν κατά ουσιαστικό τρόπο την ποιότητα του αέρα στην περιοχή.

6.3. Συχνότητες εμφάνισης υψηλών συγκεντρώσεων NO_x

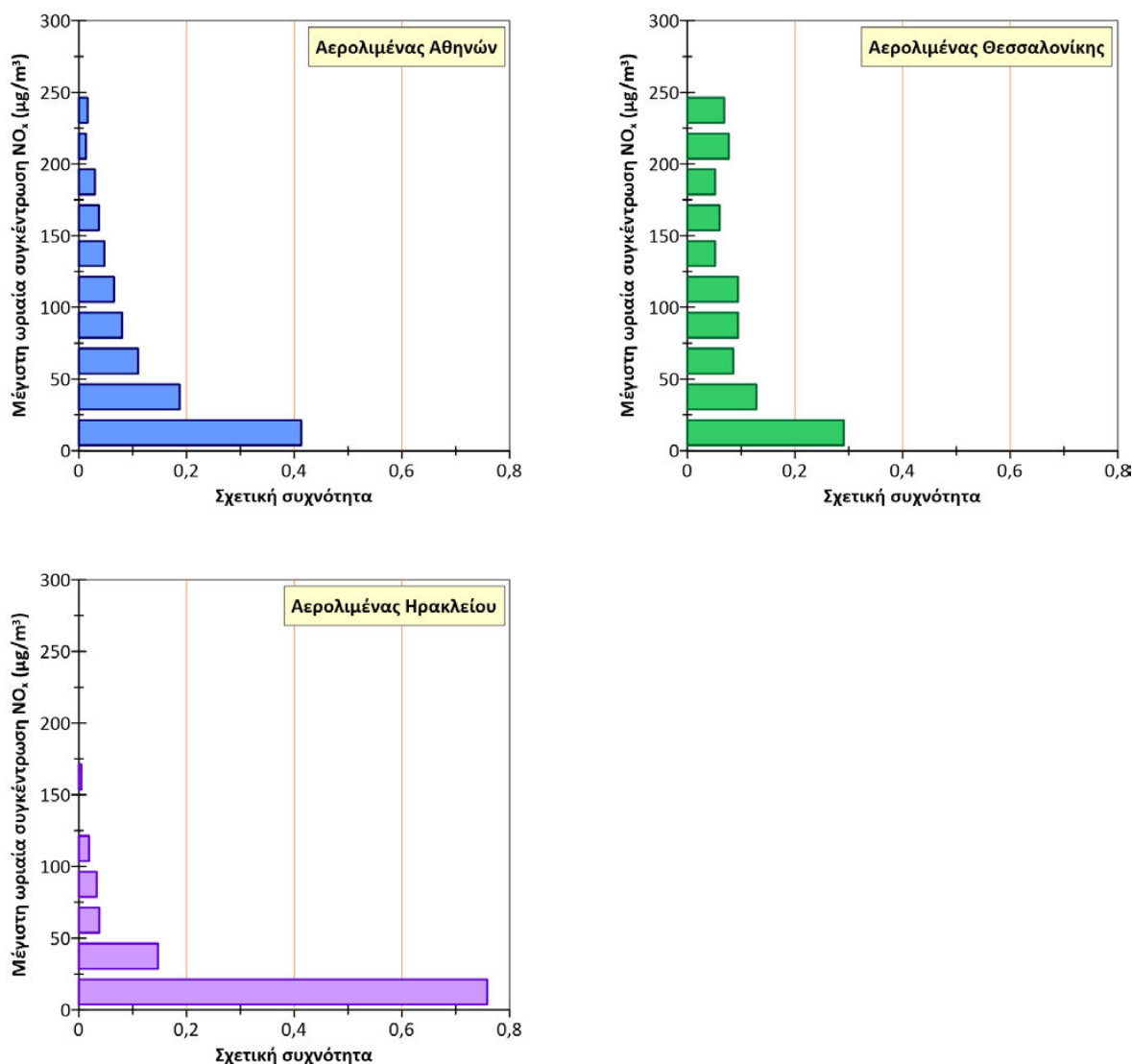
Στα γραφήματα συγκεντρώσεων των ενοτήτων 5.2.8, 5.3.8 και 5.4.8 παρουσιάστηκαν οι περιπτώσεις με τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις κάθε δεκαήμερου του πλέον φορτισμένου διμήνου, ώστε να σκιαγραφηθεί η επίδραση του κάθε αεροδρομίου στην ποιότητα του αέρα που είναι η δυσμενέστερη ευλόγως αναμενόμενη υπό ρεαλιστικές συνθήκες. Ωστόσο, υπάρχει το ενδεχόμενο να θεωρηθεί ότι αυτή η δυσμενής κατάσταση είναι κάτι σύνηθες, που εμφανίζεται αρκετά συχνά και υποβαθμίζει το περιβάλλον και την ποιότητα ζωής στην περιοχή επιρροής του αεροδρομίου κατά συστηματικό τρόπο, επιφέροντας μάλιστα κάποιες από τις επιβλαβείς επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, οι οποίες αναφέρθηκαν στις ενότητες 1.4.3 και 11.1.3.

Από το σύνολο των ρύπων που εξετάστηκαν, ο μόνος αέριος ρύπος του οποίου οι συγκεντρώσεις προσεγγίζουν, και ορισμένες φορές υπερβαίνουν, τα οριακά επίπεδα, είναι το διοξείδιο του αζώτου· τα αιωρούμενα σωματίδια, το μονοξείδιο του άνθρακα και το διοξείδιο του θείου κυμαίνονται σε συγκεντρώσεις πολύ χαμηλότερες των αντίστοιχων οριακών τους τιμών.

Έτσι, το ερώτημα που ανακύπτει είναι: πόσο συχνά εμφανίζονται αυτές οι δυσμενείς καταστάσεις υψηλών συγκεντρώσεων NO_x και πόσο συχνές είναι οι περιπτώσεις που οι συγκεντρώσεις είναι σαφώς χαμηλότερες και δεν εμπνέουν ανησυχία. Το ερώτημα αυτό είναι χρονικής φύσης (πότε εμφανίζονται οι υψηλές συγκεντρώσεις;), επομένως προσωρινά δεν χρειάζεται να συμπεριληφθεί η χωρική διάσταση (που ακριβώς εμφανίζονται οι υψηλές συγκεντρώσεις;), η οποία άλλωστε προκύπτει από τα προαναφερθέντα γραφήματα συγκεντρώσεων.

Στο πλαίσιο του συγκεκριμένου ερωτήματος, εντοπίστηκε η υψηλότερη τιμή συγκέντρωσης NO_x οπουδήποτε εντός της περιοχής μελέτης για κάθε μια από τις 1.488 ώρες του διμήνου Ιουλίου-Αυγούστου. Αυτές οι τιμές χρησιμεύουν ως εγγύηση ότι, για τη συγκεκριμένη ώρα, η συγκέντρωση NO_x σε οποιοδήποτε σημείο της περιοχής θα είναι μικρότερη ή το πολύ ίση με την ωριαία μέγιστη τιμή, επομένως όντως εξετάζεται η δυσμενέστερη συνθήκη.

Ταξινομώντας τα επίπεδα στα οποία κινήθηκαν αυτές οι ωριαίες μέγιστες τιμές σε καθένα από τα τρία αεροδρόμια της εργασίας με όρους σχετικής συχνότητας, προκύπτουν τα γραφήματα του επόμενου σχήματος.



Γράφημα 116: Σχετικές συχνότητες ωριαίων μέγιστων τιμών συγκέντρωσης NO_x.

Όπως παρατηρείται και από τα τρία ιστογράμματα, οι συχνότητες εμφάνισης υψηλών συγκεντρώσεων NO_x είναι πολύ περιορισμένες, ακόμη και στο πλέον φορτισμένο από πλευράς αεροπορικής κίνησης δίμηνο του Ιουλίου και Αυγούστου. Αφού υπενθυμιστεί ότι τα NO_x θεωρείται ότι αποτελούνται κατά 70% από NO₂ και 30% από NO, παρατηρείται ότι, ιδίως τα επίπεδα άνω των 250 µg/m³ NO_x (που σε αδρές γραμμές αντιστοιχούν στο όριο των 200 µg/m³ NO₂) εμφανίζονται τόσο σπάνια, που η σχετική τους συχνότητα προσεγγίζει το μηδέν. Δεν είναι ωστόσο πολύ σπάνια τα επίπεδα άνω των 200 µg/m³ NO_x που, χωρίς να προοιωνίζονται υπερβάσεις, θεωρούνται σχετικώς υψηλά. Πάντως, η μακράν μεγαλύτερη συχνότητα αντιστοιχεί σε επίπεδα NO_x πολύ χαμηλά, από 0 έως 25 µg/m³, ενώ αθροιστικά οι συχνότητες των επιπέδων κάτω των 150 µg/m³ κινούνται κοντά στο 90%. Υπενθυμίζεται ότι αυτές οι συχνότητες αφορούν την ωριαία μέγιστη τιμή, η οποία εμφανίζεται σε κάποια σημειακή θέση της περιοχής του αεροδρομίου, ενώ η συγκέντρωση NO_x σε όλη την υπόλοιπη περιοχή θα είναι πολύ χαμηλότερη.

Μια ενδιαφέρουσα διαπίστωση που συνάγεται από τη σύγκριση των παραπάνω ιστογραμμάτων μεταξύ τους, είναι ότι, παρά τη σαφώς μικρότερη αεροπορική κυκλοφορία στο αεροδρόμιο της Θεσσαλονίκης σε σύγκριση με αυτό της Αθήνας, τα επίπεδα υψηλών συγκεντρώσεων NO_x είναι σαφώς συχνότερα. Αυτό διαφαίνεται ότι οφείλεται στις δυσμενέστερες συνθήκες διασποράς, οι οποίες καθυστερούν τη διασπορά των εκπεμπόμενων αέριων ρύπων, καταλήγοντας να παράγουν μεγαλύτερες τοπικά συγκεντρώσεις από μικρότερες εκπομπές. Πράγματι, η σύγκριση της ανεμολογίας Ιουλίου και Αυγούστου μεταξύ Αθήνας και Θεσσαλονίκης (γράφημα 8 και γράφημα 51 αντιστοίχως) δείχνει ότι οι συχνότητες των ανέμων χαμηλής ταχύτητας γύρω από το ΔΑΑ είναι σαφώς περιορισμένες και οι άνεμοι μέσης ή σχετικώς υψηλής ταχύτητας είναι αρκετά συχνοί, σε αντίθεση με τις συνθήκες γύρω από τον αερολιμένα Θεσσαλονίκης, όπου η νηνεμία και οι χαμηλής ταχύτητας άνεμοι εμφανίζονται πολύ συχνά.

Η εξήγηση αυτή, δηλαδή ο καθοριστικότερος ρόλος των συνθηκών διασποράς έναντι των εκπομπών στη διαμόρφωση των συγκεντρώσεων, επιβεβαιώνεται εμμέσως και από την περίπτωση του αερολιμένα Ηρακλείου, όπου η σχετική συχνότητα εμφάνισης πολύ χαμηλών συγκεντρώσεων NO_x είναι ιδιαίτερα αυξημένη, σε πλήρη αντίθεση με τη Θεσσαλονίκη και παρά το γεγονός ότι κινήσεις αεροσκαφών, άρα και οι ρυθμοί εκπομπής αέριων ρύπων στα δύο αεροδρόμια είναι παρεμφερείς. Ανατρέχοντας όμως στο γράφημα 91 διαπιστώνεται ότι κατά το δίμηνο Ιουλίου – Αυγούστου, στο Ηράκλειο είναι ιδιαίτερα συχνοί οι άνεμοι μέσης ταχύτητας, από 4 ως 10 m/s, οι οποίοι δημιουργούν πολύ ευνοϊκές συνθήκες διασποράς των εκπεμπόμενων αέριων ρύπων, στον αντίποδα της ανεμολογίας της Θεσσαλονίκης που όπως προαναφέρθηκε χαρακτηρίζεται από νηνεμία και αυξημένη συχνότητα ανέμων χαμηλής ταχύτητας.

Όπως προκύπτει από τις παραπάνω παρατηρήσεις, ο ρόλος της ταχύτητας ανέμου στη διαμόρφωση των τελικών συγκεντρώσεων είναι μείζων. Λεπτομερέστερη διερεύνηση του ρόλου αυτού, υπό το πρίσμα της ανάλυσης ευαισθησίας των αποτελεσμάτων του μοντέλου ως προς την ταχύτητα του ανέμου, δίνονται στην ενότητα 7.2, από τη σελίδα 242 και εξής.

6.4. Αντιπαραβολή αποτελεσμάτων υπολογισμού συγκεντρώσεων με μετρήσεις στην περιοχή του ΔΑΑ

6.4.1. Το δίκτυο σταθμών παρακολούθησης ποιότητας αέρα στην περιοχή των Μεσογείων

Ο Διεθνής Αερολιμένας Αθηνών (ΔΑΑ) έχει αναπτύξει κατ' εφαρμογή των περιβαλλοντικών του όρων^[12] ένα εκτενές δίκτυο παρακολούθησης ποιότητας αέρα στην περιοχή των Μεσογείων.

Το δίκτυο αυτό αποτελείται από πέντε σταθμούς, τοποθετημένους στα Γλυκά Νερά, στο Κορωπί, στο Μαρκόπουλο, στην Παλλήνη και στα Σπάτα, καθώς και έναν κινητό σταθμό ο οποίος αλλάζει θέση κατά περιόδους και αυτή την εποχή βρίσκεται εντός του αερολιμένα. Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι που μετρούνται σε κάθε σταθμό παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.^[15]

Πίνακας 17: Ατμοσφαιρικοί ρύποι που παρακολουθούνται ανά σταθμό του δικτύου του ΔΑΑ

Σταθμός	NO ₂	O ₃	PM ₁₀	SO ₂	CO	HCs
Γλυκά Νερά	✓	✓	✓	✓	✓	×
Κορωπί	✓	✓	✓	×	×	✓
Μαρκόπουλο	✓	✓	✓	×	✓	×
Παλλήνη	✓	✓	✓	✓	✓	×
Σπάτα	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Σε κάθε σταθμό, μαζί με τις μετρήσεις συγκεντρώσεων καταγράφονται και οι βασικές μετεωρολογικές παράμετροι, όπως η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου, η θερμοκρασία, η υγρασία κ.ά.

Οι θέσεις των σταθμών και οι αποστάσεις τους από τον πύργο ελέγχου του ΔΑΑ παρουσιάζονται στο ακόλουθο σχήμα, μαζί με τις κύριες οδούς που εκπέμπουν ρύπους οδικής κυκλοφορίας στην περιοχή κάθε σταθμού.



Σχήμα 10: Το δίκτυο σταθμών παρακολούθησης της ποιότητας αέρα γύρω από τον ΔΑΑ, με ένδειξη των αποστάσεων κάθε σταθμού από τον πύργο ελέγχου.

6.4.2. Συγκρίσεις αποτελεσμάτων στις θέσεις των σταθμών

Το EDMS έχει τη δυνατότητα υπολογισμού των συγκεντρώσεων τόσο σε πλέγματα σημείων (βλ. σχήμα 3, σελ. 38) όσο και σε συγκεκριμένα σημεία των οποίων οι συντεταγμένες προσδιορίζονται στο σύστημα του μοντέλου, δηλαδή ως οριζόντια και κάθετη απόσταση από το σημείο (0,0) που στην περίπτωση του ΔΑΑ τέθηκε επί του πύργου ελέγχου. Αξιοποιώντας τη δυνατότητα αυτή, υπολογίσθηκαν οι συγκεντρώσεις στα σημεία που αντιστοιχούν στις θέσεις των σταθμών παρακολούθησης της ποιότητας αέρα γύρω από το ΔΑΑ, ώστε να καταστεί δυνατή η απευθείας σύγκριση προλέξεων – μετρήσεων.

6.4.2.1. Σταθμός Σπάτων

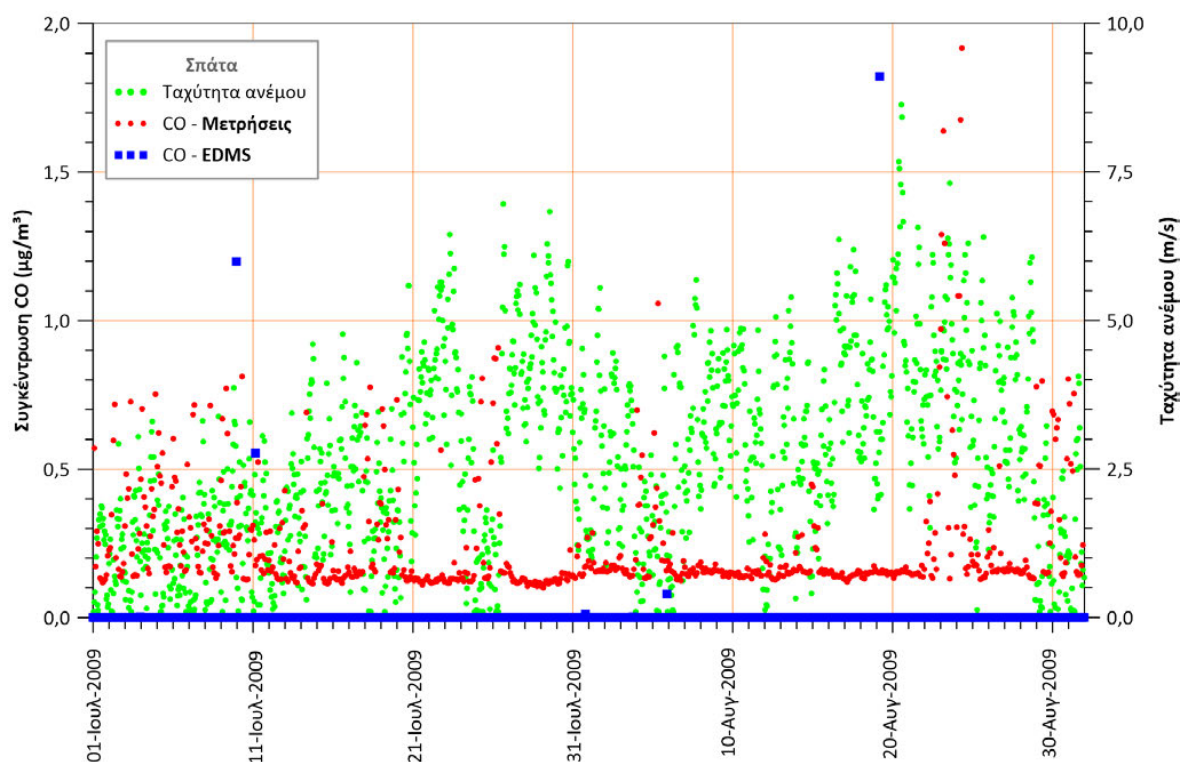
Ο σταθμός παρακολούθησης της ποιότητας αέρα στα Σπάτα είναι ο πλησιέστερος στο ΔΑΑ (σχήμα 10 παραπάνω). Επομένως, οι όποιες συσχετίσεις ανάμεσα στις μετρήσεις και στα αποτελέσματα του EDMS αναμένεται να είναι σαφέστερες στην περίπτωση του συγκεκριμένου σταθμού, σε σχέση με τους υπόλοιπους τέσσερις. Για το λόγο αυτό, οι συγκρίσεις και η αναζήτηση συσχετίσεων στο σταθμό των Σπάτων οφείλουν να είναι εξαντλητικά λεπτομερείς, ενώ τα ευρήματα καθορίζουν εν πολλοίς το βαθμό ανάλυσης που χρειάζονται οι ανάλογες διερευνήσεις στους υπόλοιπους σταθμούς.

6.4.2.1.i. Αντιπαραβολή χρονοσειρών

Η σύγκριση μεταξύ προλέξεων και μετρήσεων στο σταθμό αυτό παρουσιάζεται στα ακόλουθα γραφήματα που αναφέρονται στους τέσσερις κύριους ρύπους CO, NO_x, PM₁₀ και SO_x.

Στα τέσσερα πρώτα γραφήματα απεικονίζονται οι χρονοσειρές ωριαίων τιμών συγκέντρωσης των μετρήσεων και των αποτελεσμάτων του EDMS, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζεται η μέση ωριαία ταχύτητα ανέμου, στο δεξί κάθετο άξονα. Τα γραφήματα αυτά αποσκοπούν στην παρουσίαση της χρονικής εξέλιξης μετρήσεων και εκτιμήσεων, καθώς και στη συσχέτιση τόσο μεταξύ τους όσο και με την ταχύτητα του ανέμου. Μετά από αυτά, θα παρουσιαστεί μια τετράδα γραφημάτων διασποράς, προκειμένου να απεικονιστούν οι αποκλίσεις εκτιμήσεων-μετρήσεων και κατόπιν θα διατυπωθούν συνολικά οι παρατηρήσεις που προκύπτουν από την αντιπαραβολή προλέξεων-μετρήσεων.

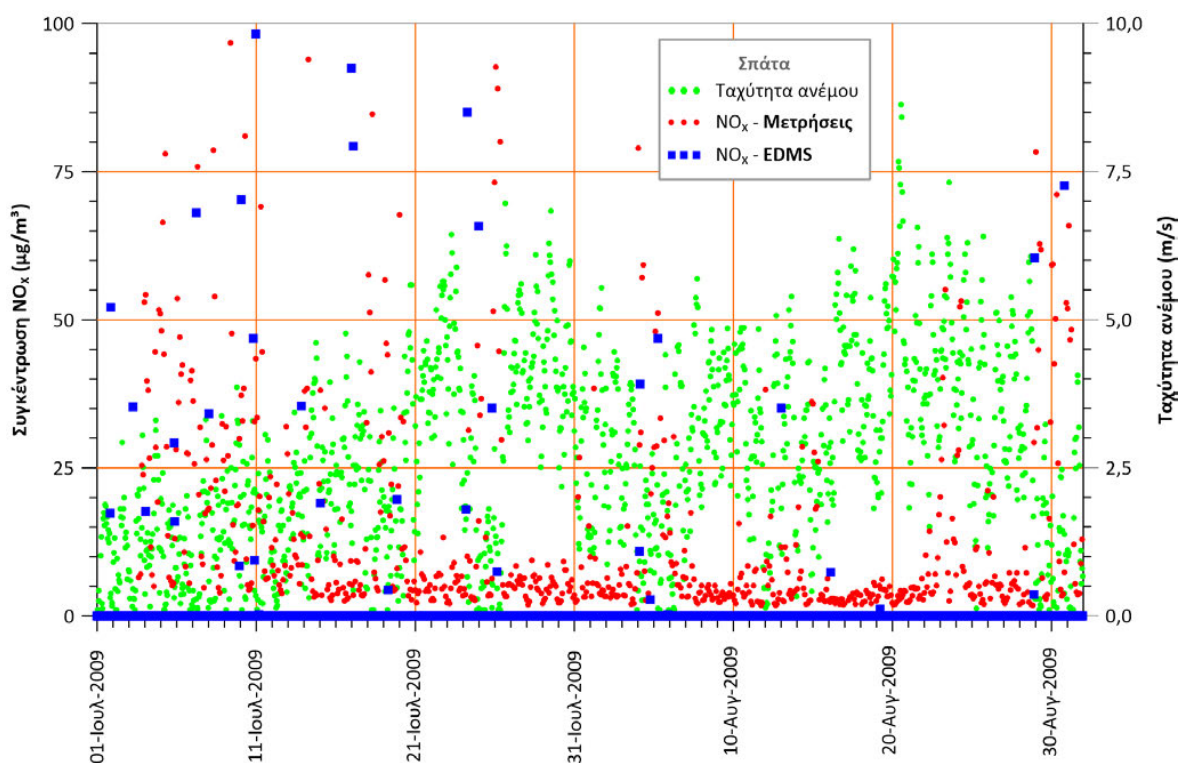
Ξεκινώντας από το CO, η αντιπαραβολή των χρονοσειρών μετρήσεων - εκτιμήσεων στο σταθμό των Σπάτων παρουσιάζεται στο ακόλουθο γράφημα.



Γράφημα 117: Χρονοσειρά μετρήσεων και εκτιμήσεων ωριαίας μέσης συγκέντρωσης CO στο σταθμό Σπάτων.

Η διαφορά ανάμεσα στα αποτελέσματα του EDMS και στις μετρήσεις CO είναι εμφανής και θα αναλυθεί παρακάτω συνολικά και για τους τέσσερις ρύπους. Προς το παρόν αξίζει να επισημανθεί η συσσώρευση των εκτιμήσεων του EDMS στη μηδενική τιμή (η οποία απεικονίζεται με το πλήθος των μπλε σημείων επί του οριζόντιου άξονα) σε αντίθεση με τις μετρήσεις που παρουσιάζουν ένα χαμηλό αλλά μη μηδενικό επίπεδο, με πολλά σημεία στο διάστημα από 0,1 έως 0,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ και αρκετά ακόμη σημεία από 0,2 έως και 0,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Προκαταρκτικά σημειώνεται εδώ ότι αυτό δεν μπορεί παρά να οφείλεται σε εκπομπές CO από άλλες πηγές, δεδομένου και του χαμηλού επιπέδου εκπομπών της συγκεκριμένης ουσίας από τις δραστηριότητες εντός ΔΑΑ.

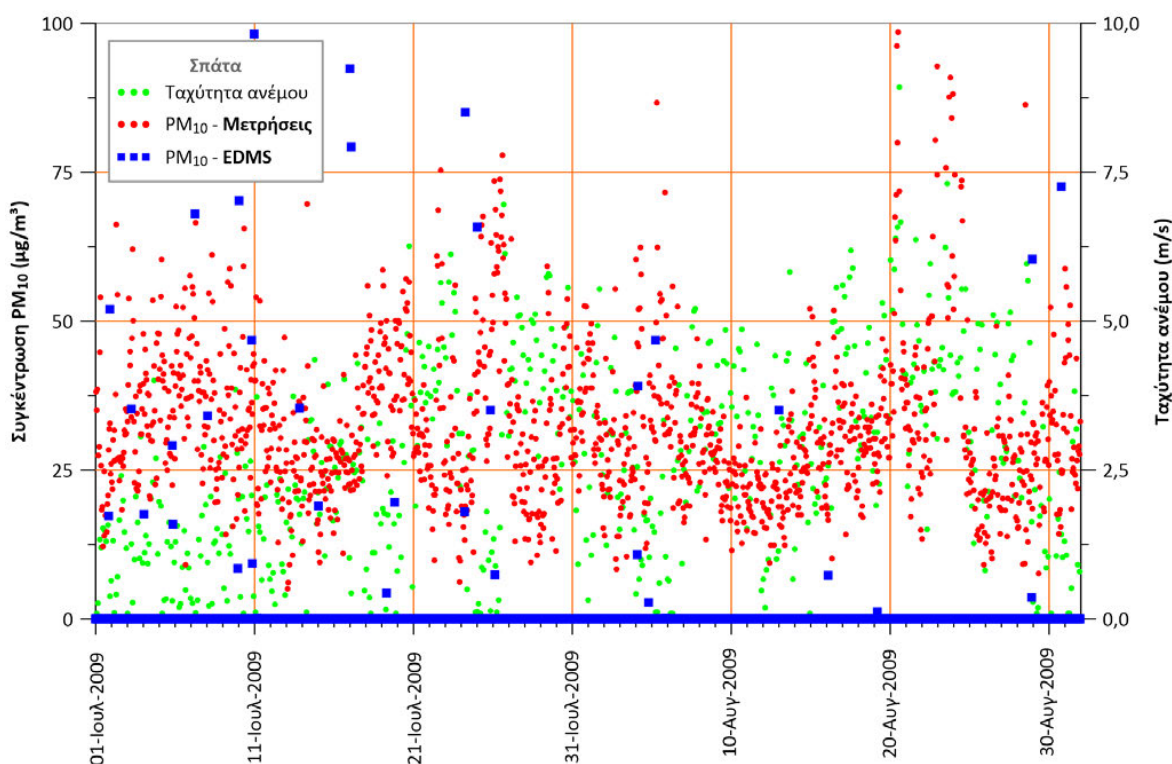
Για τον επόμενο ρύπο, τα NO_x , των οποίων οι εκπομπές σε αερολιμένες είναι όντως σημαντικές, η αντιπαραβολή των χρονοσειρών μετρήσεων - εκτιμήσεων στο σταθμό των Σπάτων παρουσιάζεται στο ακόλουθο γράφημα.



Γράφημα 118: Χρονοσειρά μετρήσεων και εκτιμήσεων ωριαίας μέσης συγκέντρωσης NO_x στο σταθμό Σπάτων.

Και στην περίπτωση των NO_x αξίζει προς το παρόν να επισημανθεί η συσσώρευση των εκτιμήσεων του EDMS στη μηδενική τιμή (μπλε σημεία επί του οριζόντιου άξονα) σε αντίθεση με τις μετρήσεις που παρουσιάζουν ένα χαμηλό αλλά μη μηδενικό επίπεδο. Παρατηρείται επιπλέον μια ευδιάκριτη διαφορά στην κατανομή των μετρήσεων κατά το πρώτο δεκαήμερο του Ιουλίου, με σαφώς αυξημένες μετρήσεις NO_x και χαμηλές ταχύτητες ανέμου, σε αντίθεση με το διάστημα από τις 20 Ιουλίου έως το τέλος Αυγούστου, με αυξημένο άνεμο και αρκετά χαμηλότερες μετρήσεις NO_x . Τα αποτελέσματα του EDMS παρουσιάζουν ανάλογη συμπεριφορά, με περισσότερα μπλε σημεία σε τιμές αυξημένων NO_x στο πρώτο δεκαήμερο του Ιουλίου και σαφώς λιγότερα κατά το επόμενο διάστημα.

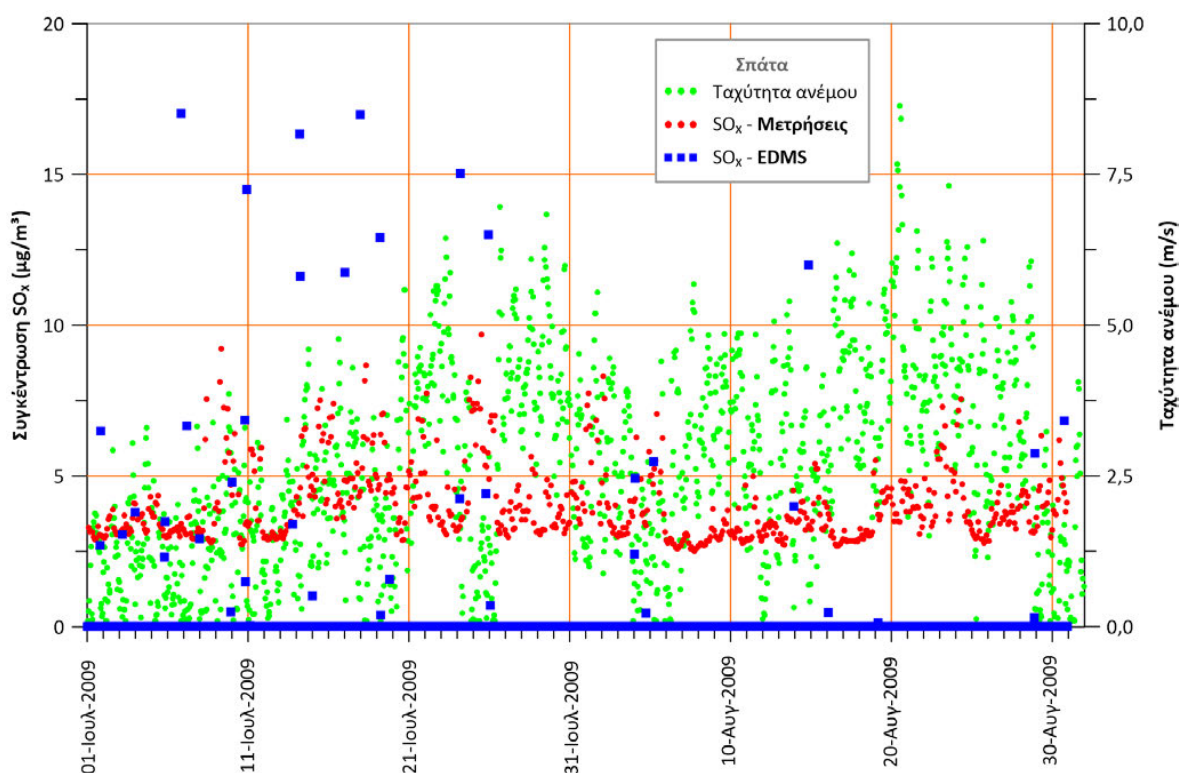
Για τον επόμενο ρύπο, τα PM_{10} , των οποίων οι εκπομπές σε αερολιμένες δεν μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες, η αντιπαραβολή των χρονοσειρών μετρήσεων - εκτιμήσεων στο σταθμό των Σπάτων παρουσιάζεται στο ακόλουθο γράφημα.



Γράφημα 119: Χρονοσειρά μετρήσεων και εκτιμήσεων ωριαίας μέσης συγκέντρωσης PM_{10} στο σταθμό Σπάτων.

Και στην περίπτωση των PM_{10} αξίζει προς το παρόν να επισημανθεί η συσσώρευση των εκτιμήσεων του EDMS στη μηδενική τιμή (μπλε σημεία επί του οριζόντιου άξονα) σε αντίθεση με τις μετρήσεις που παρουσιάζουν ένα σχετικά υψηλό επίπεδο, από 20 έως και άνω των $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ωστόσο, δεν είναι λίγες οι εκτιμήσεις που κινούνται στη ζώνη των μετρήσεων, αυξάνοντας τη συνάφεια των δύο χρονοσειρών.

Για τον τελευταίο κατά σειρά ρύπο, τα SO_x , των οποίων οι εκπομπές σε αερολιμένες είναι πολύ περιορισμένες, η αντιπαραβολή των χρονοσειρών μετρήσεων - εκτιμήσεων στο σταθμό των Σπάτων παρουσιάζεται στο ακόλουθο γράφημα.



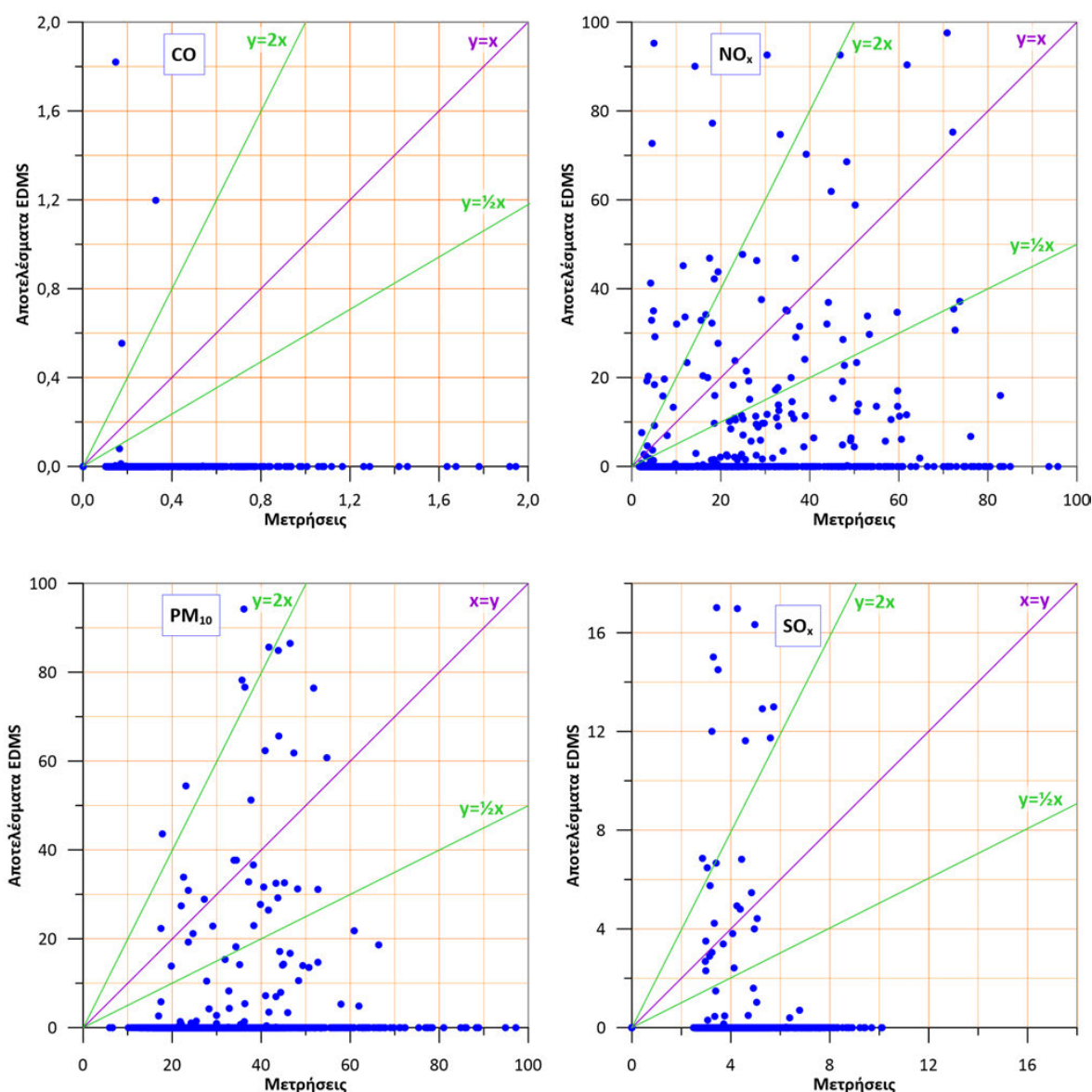
Γράφημα 120: Χρονοσειρά μετρήσεων και εκτιμήσεων ωριαίας μέσης συγκέντρωσης SO_x στο σταθμό Σπάτων.

Στην περίπτωση των SO_x αξίζει προς το παρόν να επισημανθεί η διαφορά στο επίπεδο βάσης των δύο χρονοσειρών, όπως παρατηρήθηκε και στους προηγούμενους ρύπους: οι μεν εκτιμήσεις του EDMS εκκινούν από το επίπεδο του μηδενός, ενώ οι μετρήσεις φαίνεται να κυμαίνονται γύρω από το επίπεδο των $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, υποδεικνύοντας τη συνεισφορά κάποιας άλλης πηγής πέραν των μεταφερόμενων από το αεροδρόμιο ποσοτήτων.

6.4.2.1.ii. Διασπορά μετρήσεων-εκτιμήσεων

Πέρα από τη χρονική παράθεση μετρήσεων και εκτιμήσεων στα γραφήματα που προηγήθηκαν, οι τιμές των μεγεθών αυτών μπορούν να απεικονιστούν σε γραφήματα διασποράς προκειμένου να καταστεί εμφανέστερη η συσχέτιση μεταξύ τους. Τα γραφήματα διασποράς αποτελούν ένα τύπο γραφημάτων που χρησιμοποιείται συχνά^[72,73] για να παρουσιάσει τη διασπορά των τιμών γύρω από την ιδανική κατάσταση που θα ήταν η πλήρης ταύτισή τους. Στην περίπτωση αντιπαραβολής μετρήσεων και εκτιμήσεων συγκεκριμένα, για κάθε συγκεκριμένη ώρα οι τιμές μέτρησης και αποτελέσματος EDMS θεωρείται ότι αποτελούν τις συντεταγμένες ενός σημείου στο γράφημα διασποράς. Εάν οι δύο αυτές τιμές συμπίπτουν το σημείο βρίσκεται πάνω στη διαγώνιο, στην «ιδανική» του θέση, ενώ όσο διαφοροποιούνται μεταξύ τους τόσο μακρύτερα μετακινείται το σημείο από τη θέση αυτή.

Η διασπορά μετρήσεων-εκτιμήσεων στο σταθμό των Σπάτων για τους τέσσερις ρύπους που εξετάστηκαν παραπάνω παρουσιάζονται στο επόμενο τετραπλό γράφημα.



Γράφημα 121: Διασπορά μετρήσεων-εκτιμήσεων ωριαίας μέσης συγκέντρωσης για τους τέσσερις ρύπους (CO, NO_x, PM₁₀ και SO_x) στο σταθμό Σπάτων.

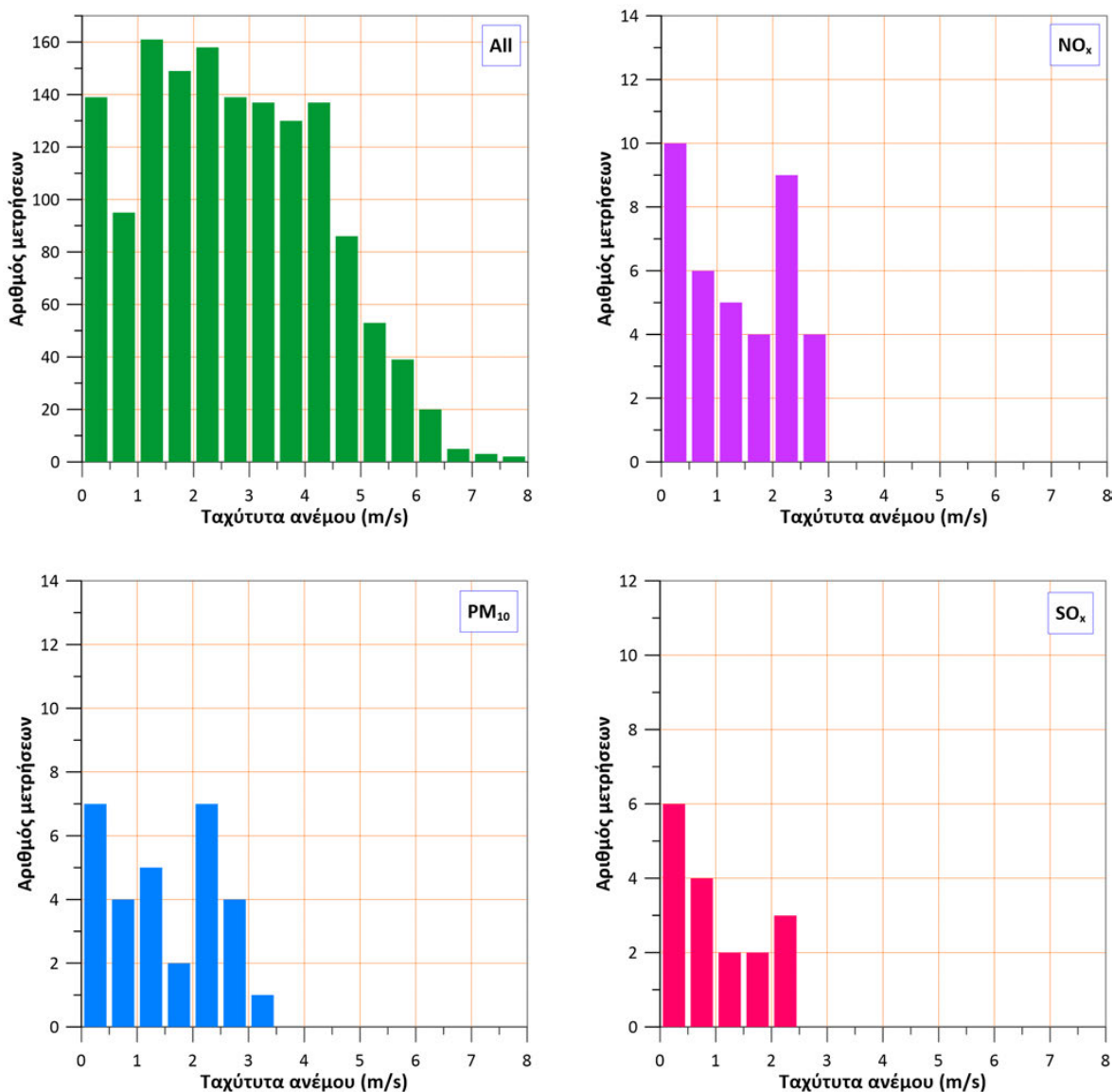
Στο επάνω αριστερά γράφημα διασποράς που αναφέρεται στο CO, είναι εμφανής η διαφορά που απεικονίστηκε και στο γράφημα 117 μεταξύ αφενός των αποτελεσμάτων του EDMS, που κινούνται στη μεγάλη τους πλειοψηφία κοντά στο μηδέν, και αφετέρου των μετρήσεων που παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη συσσώρευση στο διάστημα από 0,1 έως και 0,5 μg/m³. Πάντως, όπως προαναφέρθηκε, η διαφορά αυτή μάλλον δεν οφείλεται σε συστηματικό σφάλμα υποεκτίμησης του EDMS αλλά πιθανότατα σε συνεισφορά και άλλων – πέραν του αερολιμένα – πηγών CO, όπως π.χ. η γειτονική περιμετρική οδός Σπάτων.

Στο κάτω αριστερά γράφημα που αναφέρεται στα PM_{10} παρατηρείται συσσώρευση πολυάριθμων τιμών του EDMS κοντά στο μηδέν, αλλά και ένας αριθμός σημείων εντός των γραμμών $y=2x$ και $y=1/2x$, ενώ είναι ελάχιστα τα σημεία που οι μετρήσεις υπερβαίνουν το διπλάσιο των αντίστοιχων αποτελεσμάτων του EDMS. Πάντως, στις μετρούμενες συγκεντρώσεων PM_{10} στα Μεσόγεια πιθανότατα συμπεριλαμβάνονται σωματίδια που δεν σχετίζονται με τις εκπομπές του αερολιμένα και προέρχονται από άλλες πηγές ή φυσικά φαινόμενα που έχουν καταγραφεί στην Αττική,^[74-78] αλλά και σε άλλες περιοχές της Ελλάδας,^[70,79] όπως η αλατονέφωση που προέρχεται από τη γειτονική θάλασσα, η μεταφορά σκόνης από την Αφρική και η αιώρηση σκόνης από αγροτικές εκτάσεις και ανενεργά λατομεία. Σημαντική επίσης είναι και η επίδραση της πυκνής κυκλοφορίας οχημάτων στη παρακείμενη περιμετρική οδό Σπάτων.

Στο κάτω δεξιά γράφημα που αναφέρεται στα SO_x , η εικόνα είναι ανάλογη με το γράφημα των PM_{10} : παρατηρείται και πάλι συσσώρευση πολυάριθμων τιμών του EDMS κοντά στο μηδέν, αλλά και ένας αριθμός σημείων εντός των γραμμών $y=2x$ και $y=1/2x$, ενώ υπάρχουν και κάποια, μάλλον λίγα, σημεία που οι μετρήσεις υπερβαίνουν το διπλάσιο των αντίστοιχων αποτελεσμάτων του EDMS.

Το επάνω δεξιά γράφημα διασποράς που αναφέρεται στα NO_x , τον πιο χαρακτηριστικό ρύπο των αεροδρομίων, είναι χρήσιμο να αναλυθεί κάπως λεπτομερέστερα. Στο γράφημα περιέχονται 1.387 σημεία, τα οποία αντιστοιχούν σε εκείνες από τις 1.488 ώρες του διμήνου Ιουλίου - Αυγούστου 2009 για τις οποίες καταγράφηκε μέτρηση του συγκεκριμένου ρύπου. Από τα σημεία αυτά, το μεγάλο τους πλήθος, και συγκεκριμένα τα 1.304 ή το 94%, βρίσκεται κάτω από τη γραμμή $y=1/2x$, υποδεικνύοντας ότι οι μετρήσεις NO_x είναι συστηματικά μεγαλύτερες από τις εκτιμήσεις του EDMS. Από τα σημεία αυτά, τα 1.121 ή το 80,8% του συνόλου, έχει τεταγμένη, δηλαδή αποτέλεσμα EDMS, ίση με το μηδέν κάτι που οδηγεί σε συσσώρευσή τους πάνω στον άξονα του x. Στην άλλη πλευρά του γραφήματος, δηλαδή πάνω από τη γραμμή $y=2x$, όπου το αποτέλεσμα του EDMS είναι μεγαλύτερο από τη μέτρηση της ωριαίας συγκέντρωσης NO_x , εντοπίζονται 36 μόνο σημεία, δηλαδή το 2,6% του συνόλου. Κοντά στη γραμμή $x=y$ και συγκεκριμένα εντός των γραμμών $y=2x$ και $y=1/2x$, όπου υποδεικνύεται γειννίαση μετρήσεων-προλέξεων εντοπίζονται 47 σημεία (3,4%).

Εάν αναζητηθούν τα κοινά χαρακτηριστικά των σημείων εκείνων στα γραφήματα διασποράς τα οποία υποδεικνύουν σύγκλιση μεταξύ προλέξεων και μετρήσεων (δηλαδή εκείνων που εμπίπτουν μεταξύ των γραμμών $y=2x$ και $y=1/2x$) διαπιστώνεται ότι το βασικό τους γνώρισμα είναι η χαμηλή, αλλά όχι μηδενική ταχύτητα ανέμου. Η μεγάλη πλειοψηφία τους (ήτοι το σύνολο εκτός από 3-4 μεμονωμένες εξαιρέσεις) αντιστοιχούν σε άνεμο ταχύτητας από 0,2 έως 3,2 m/s. Στο επόμενο τετραπλό γράφημα φαίνεται ευκρινώς η συσσώρευση των σημείων σύγκλισης σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου.



Γράφημα 122: Κατανομή ωριαίων ταχυτήτων ανέμου στις οποίες παρατηρείται προσέγγιση προλέξεων-μετρήσεων στο σταθμό Σπάτων.

Στο επάνω αριστερά ιστόγραμμα με την ένδειξη "All" παρουσιάζεται η κατανομή όλων των ωριαίων μετρήσεων ταχύτητας ανέμου στη διάρκεια του διμήνου Ιουλίου - Αυγούστου 2009. Στο επάνω δεξιά ιστόγραμμα με την ένδειξη "NO_x" παρουσιάζεται η κατανομή των ταχυτήτων ανέμου για τις ώρες εκείνες στις οποίες η εκτίμηση του EDMS για τη συγκέντρωση NO_x ήταν κοντά στη μετρηθείσα, δηλαδή από μισή έως διπλάσια. Με ανάλογο τρόπο, τα δύο κάτω ιστογράμματα παρουσιάζουν την κατανομή των ταχυτήτων ανέμου για τις ώρες εκείνες στις οποίες οι εκτιμήσεις συγκεντρώσεων PM₁₀ και SO_x ήταν κοντά στις αντίστοιχες μετρήσεις. Είναι εμφανής η συγκέντρωση των σημείων σε ταχύτητες κάτω των 3 m/s και αντιστοίχως η έλλειψη σημείων σύγκλισης για ταχύτητες πάνω από το μέγεθος αυτό (με εξαίρεση τα PM₁₀, όπου ένα μόνο σημείο σύγκλισης παρατηρείται σε ταχύτητα λίγο χαμηλότερη από 3,5 m/s). Αξίζει όμως να επισημανθεί ότι ενώ όλα τα σημεία σύγκλισης στο

σταθμό των Σπάτων συγκεντρώνονται σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου, δεν ισχύει και το αντίστροφο: όλες οι ώρες με χαμηλή ταχύτητα ανέμου δεν χαρακτηρίζονται από συγκλίσεις εκτιμήσεων – μετρήσεων. Έτσι, διαφαίνεται ότι *αναγκαία συνθήκη, αν και όχι ικανή, για τη σύγκλιση των αποτελεσμάτων του EDMS με τις μετρήσεις πεδίου είναι οι χαμηλές ταχύτητες ανέμου, κάτω των 3 m/s.*

6.4.2.1.iii. Στατιστική ανάλυση

Η παραπάνω ανάλυση που βασίστηκε στην αντιπαραβολή χρονοσειρών μπορεί να συμπληρωθεί με τη σύγκριση μεταξύ μετρήσεων και υπολογιστικών αποτελεσμάτων ως προς τα στατιστικά τους χαρακτηριστικά.

Τα δύο εργαλεία της περιγραφικής στατιστικής που διαφαίνονται ως καταλληλότερα για τη σύγκριση αυτή είναι τα ιστογράμματα σχετικής συχνότητας και τα γραφήματα ποσοστημορίων.

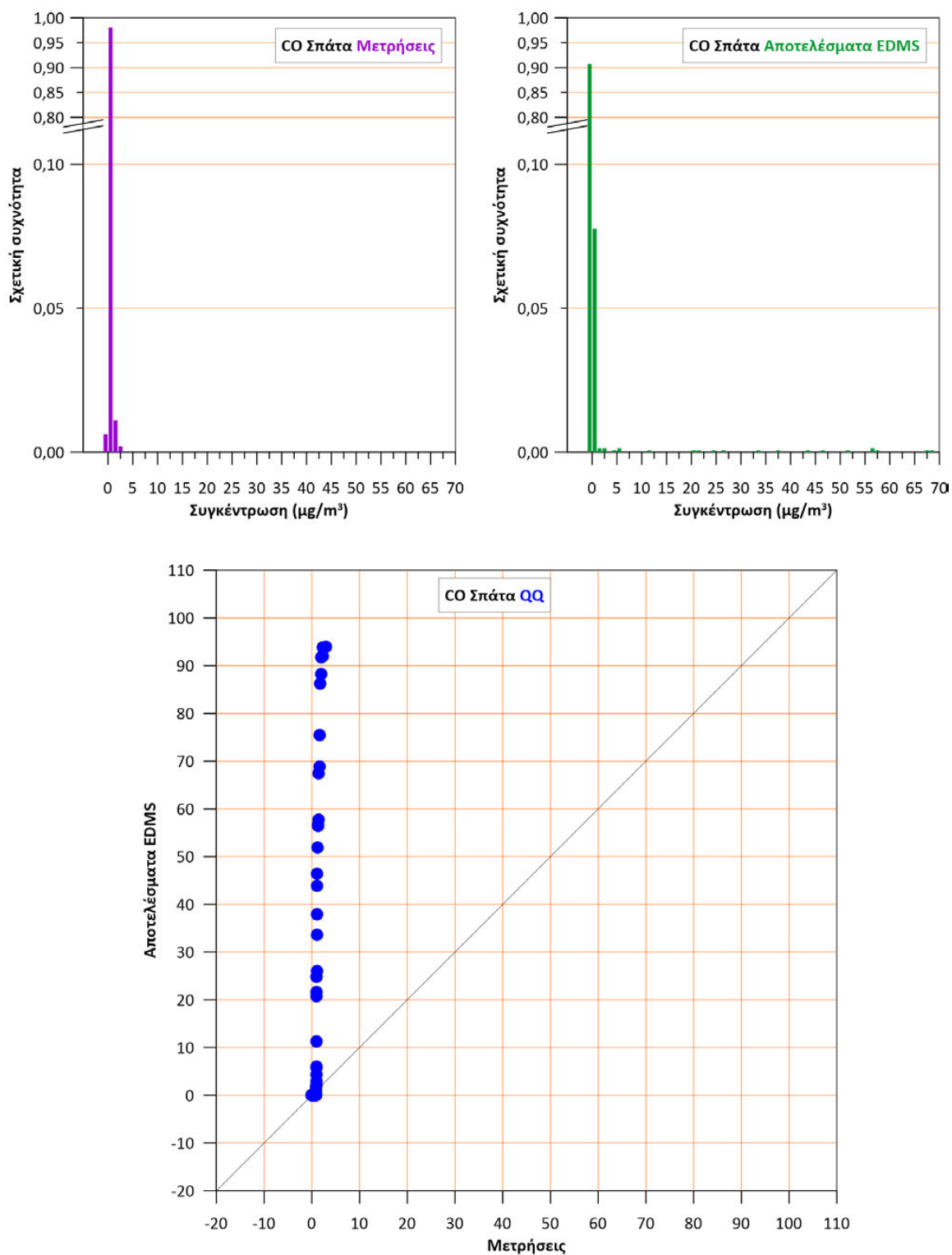
Το ιστόγραμμα σχετικής συχνότητας είναι ένας από τους συνηθέστερους τύπους στατιστικών γραφημάτων. Οι σχετικές συχνότητες που παρουσιάζονται στα ιστογράμματα, προκύπτουν από τον αριθμό των τιμών που βρίσκονται κοντά σε ένα σημείο δια του συνολικού αριθμού τιμών. Με τον τρόπο αυτό απεικονίζονται τόσο τα σημεία στα οποία συγκεντρώνονται τα μεγαλύτερα πλήθη τιμών μιας κατανομής, αλλά και το εύρος του διαστήματος στο οποίο περιέχεται η πλειονότητα των τιμών.

Το διάγραμμα ποσοστημορίων ή Q-Q plot (quantile-quantile plot) είναι ένας λιγότερο συχνός τύπος γραφήματος, που χρησιμοποιείται για τη σύγκριση στατιστικών κατανομών και στο πλαίσιο αυτό έχει χρησιμοποιηθεί με αποτελεσματικό τρόπο για συγκρίσεις μετρήσεων – εκτιμήσεων.^[80] Πιο συγκεκριμένα, τα Q-Q plots αποτελούν εργαλεία της περιγραφικής στατιστικής που χρησιμοποιούνται για τη διαπίστωση της συσχέτισης μεταξύ δύο διατεταγμένων κατανομών, μέσω της εικόνας που σχηματίζει η αναπαράσταση των ποσοστημορίων της πρώτης έναντι των αντίστοιχων ποσοστημορίων της δεύτερης κατανομής. Το ποσοστημόριο k (quantile ή percentile) είναι η τιμή εκείνη ενός διατεταγμένου δείγματος, κάτω της οποίας συσσωρεύεται το $k\%$ του πλήθους των τιμών και άρα άνω της οποίας βρίσκεται το $(100-k)\%$ του πλήθους τιμών. Όσο πλησιέστερες είναι οι κατανομές μεταξύ τους, τόσο τα σημεία του γραφήματος θα προσεγγίζουν τη διαγώνιο $x=y$. Τα σημεία που βρίσκονται κάτω από τη διαγώνιο υποδηλώνουν μικρότερες τιμές της κατανομής που αναπαρίσταται στον οριζόντιο άξονα σε σχέση με αυτές της κατανομής που αντιστοιχεί στον κάθετο άξονα, και αντιστρόφως. Όταν η κλίση της γραμμής που σχηματίζουν τα σημεία είναι πιο απότομη της διαγωνίου, υποδηλώνεται ότι οι τιμές της κατανομής που απεικονίζονται στον κάθετο άξονα είναι πιο αραιές από ότι αυτές της κατανομής του οριζόντιου άξονα, οπότε το ύψος που οριοθετεί κάθε ποσοστημόριο (υπενθυμίζεται ότι τα στατιστικά σύνολα

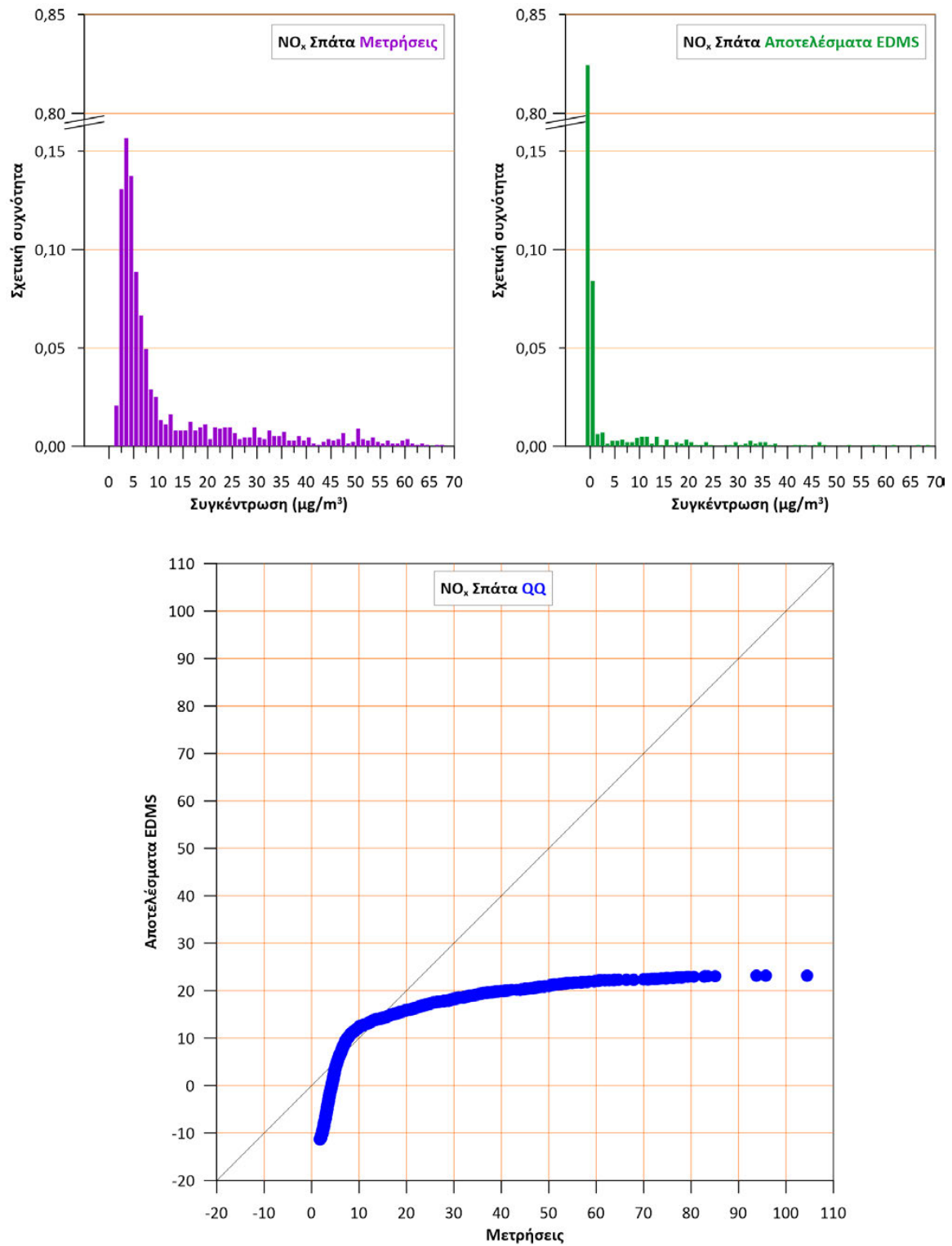
είναι διατεταγμένα) αυξάνεται γρηγορότερα. Αντίστοιχα, κλίση ηπιότερη της διαγωνίου σημαίνει αραιότερη κατανομή του άξονα x στο συγκεκριμένο διάστημα τιμών και ταχύτερη επαύξηση του ύψους των ποσοστημορίων σε σχέση με την κατανομή του άξονα y .

Κλείνοντας αυτή τη σύντομη εισαγωγή, σημειώνεται ότι η συνδυασμένη παρουσίαση των ιστογραμμάτων των κατανομών μετρήσεων και εκτιμήσεων μαζί με το διάγραμμα ποσοστημορίων, δίνει μια σαφέστερη εικόνα της συσχέτισης των κατανομών, η οποία επιτρέπει τον ευχερέστερο εντοπισμό συγκλίσεων και αποκλίσεων.

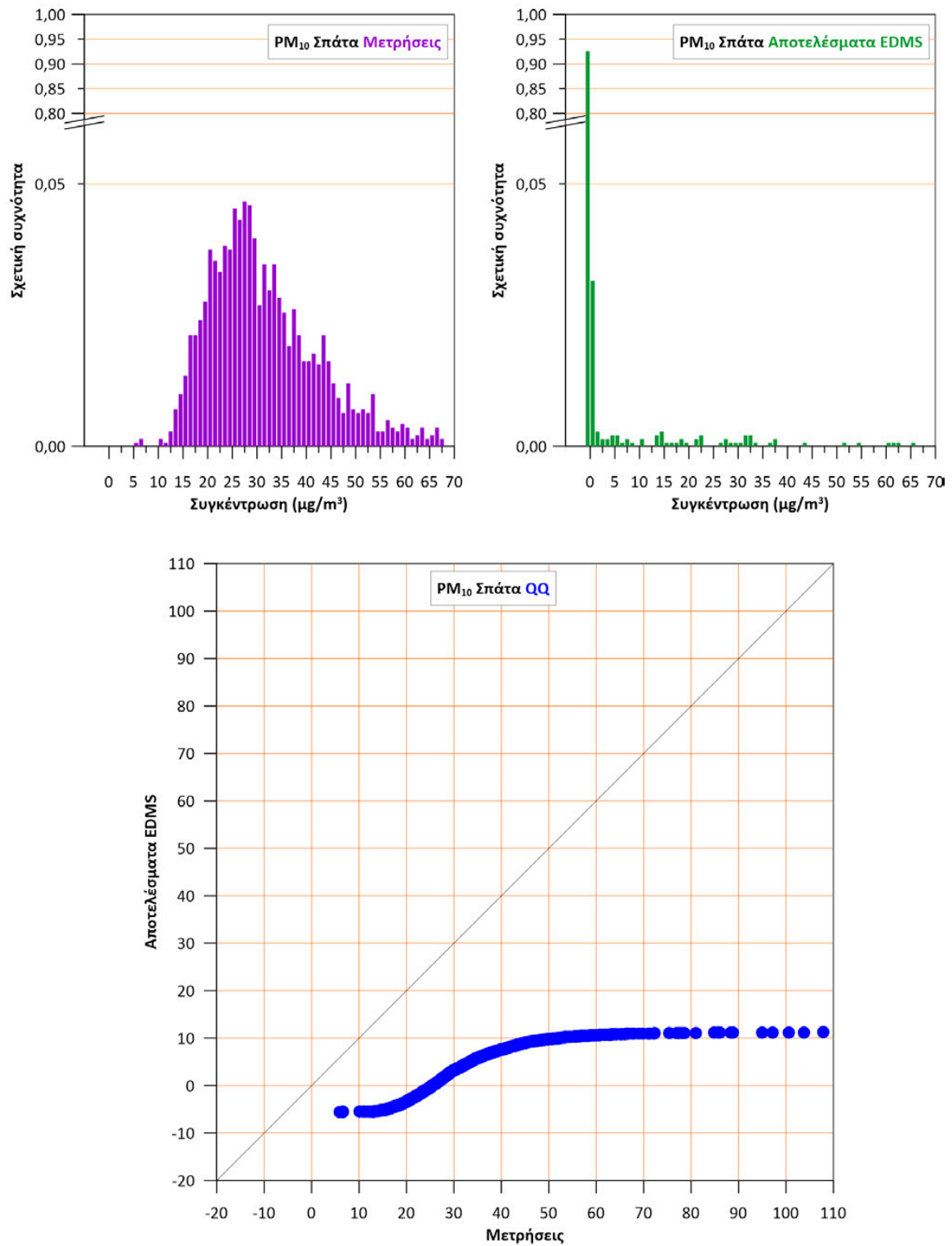
Σε εφαρμογή των παραπάνω, ακολουθούν τέσσερα (ένα για κάθε ρύπο) συνδυασμένα γραφήματα με τα ιστογράμματα και το διάγραμμα ποσοστημορίων των κατανομών μετρήσεων και αποτελεσμάτων του EDMS.



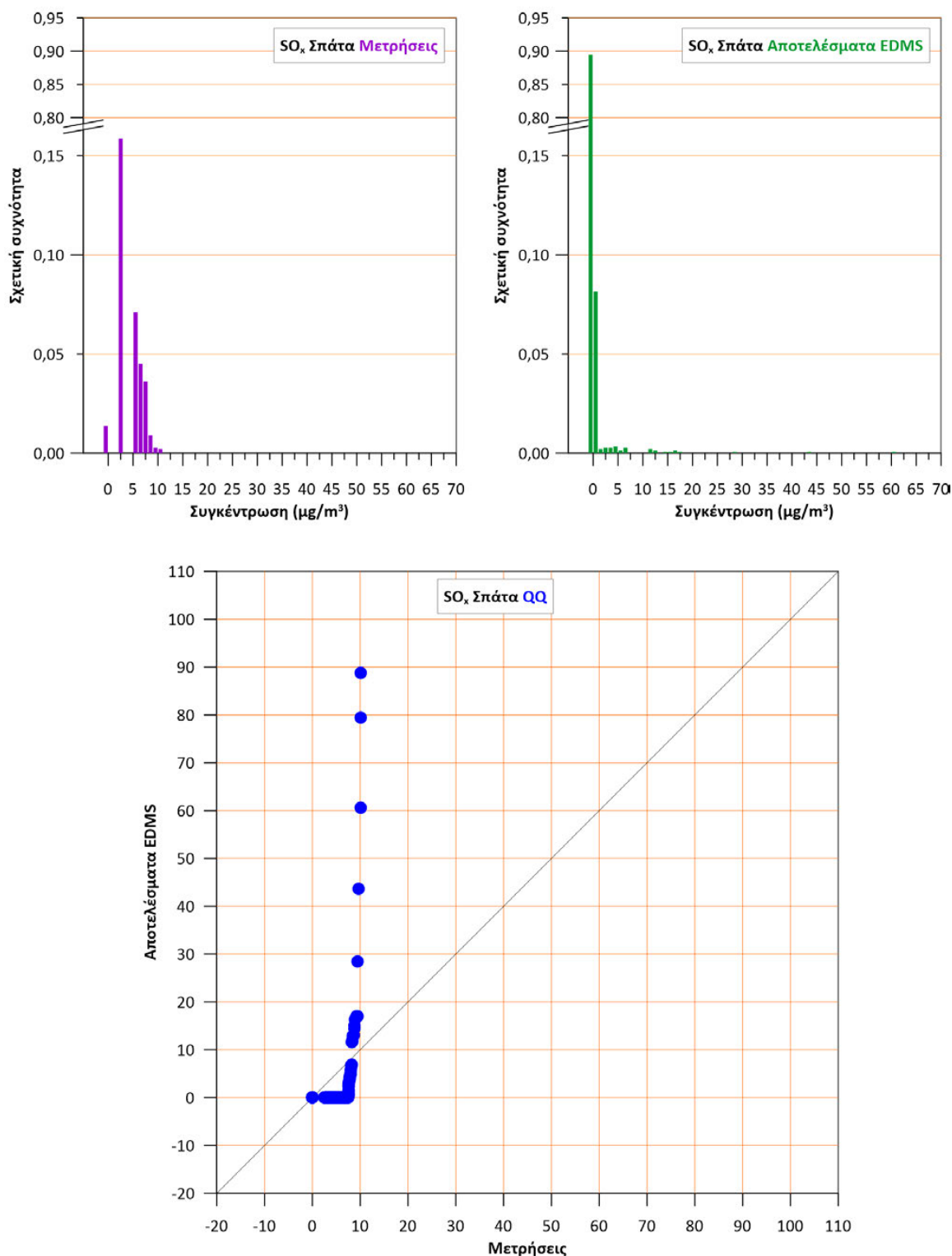
Γράφημα 123: Ιστόγραμμα της κατανομής μετρήσεων (επάνω αριστερά), της κατανομής αποτελεσμάτων EDMS (επάνω δεξιά) και διάγραμμα ποσοστημορίων των δύο κατανομών (κάτω) για την ωριαία μέση συγκέντρωση CO στο σταθμό των Σπάτων.



Γράφημα 124: Ιστόγραμμα της κατανομής μετρήσεων (επάνω αριστερά), της κατανομής αποτελεσμάτων EDMS (επάνω δεξιά) και διάγραμμα ποσοστημορίων των δύο κατανομών (κάτω) για την ωριαία μέση συγκέντρωση NO_x στο σταθμό των Σπάτων.



Γράφημα 125: Ιστόγραμμα της κατανομής μετρήσεων (επάνω αριστερά), της κατανομής αποτελεσμάτων EDMS (επάνω δεξιά) και διάγραμμα ποσοστημορίων των δύο κατανομών (κάτω) για την ωριαία μέση συγκέντρωση PM₁₀ στο σταθμό των Σπάτων.



Γράφημα 126: Ιστόγραμμα της κατανομής μετρήσεων (επάνω αριστερά), της κατανομής αποτελεσμάτων EDMS (επάνω δεξιά) και διάγραμμα ποσοστημορίων των δύο κατανομών (κάτω) για την ωριαία μέση συγκέντρωση SO_x στο σταθμό των Σπάτων.

Τα γραφήματα για το CO και τα SO_x δείχνουν έλλειψη συσχέτισης μεταξύ της στατιστικής κατανομής των μετρήσεων στον σταθμό των Σπάτων και των αποτελεσμάτων που υπολόγισε το EDMS. Για το μεν CO, η κατανομή των αποτελεσμάτων του EDMS στο γράφημα 123 δείχνει

ότι οι τιμές συγκεντρώνονται κατά 90% στο μηδέν και κατά το μεγαλύτερο μέρος του υπόλοιπου ποσοστού σε πολύ χαμηλές τιμές. Αντίθετα, οι μετρήσεις εμφανίζουν ένα πολύ μεγάλο μερίδιο, πάνω από 97%, σε χαμηλά αλλά μη-μηδενικά επίπεδα και πολύ μικρή παρουσία στα επίπεδα των λίγο μεγαλύτερων τιμών. Ως αποτέλεσμα αυτής της ασυμφωνίας, το διάγραμμα ποσοστημορίων των δύο αυτών κατανομών του CO εμφανίζει την απότομη άνοδό που ξεκινά από το μηδέν. Οι παρατηρήσεις αυτές είναι συνεπείς με την εικόνα που προκύπτει από τη χρονική αναπαράσταση των τιμών στο γράφημα 117.

Ανάλογη εικόνα εμφανίζεται και στις κατανομές των SO_x. Τα αποτελέσματα του EDMS συγκεντρώνονται κατά σχεδόν 90% στο μηδέν και κατά το μεγαλύτερο από το υπόλοιπο ποσοστό σε πολύ χαμηλά μη-μηδενικά επίπεδα, ενώ οι μετρήσεις παρουσιάζουν μεγαλύτερη διασπορά προς τα αυξημένα επίπεδα των 5 – 9 μg/m³. Έτσι, το διάγραμμα ποσοστημορίων των δύο αυτών κατανομών των SO_x στο γράφημα 126 εμφανίζει απότομη άνοδό.

Για τα NO_x και τα PM₁₀, είναι δυνατή η συναγωγή ορισμένων πιο λεπτομερών παρατηρήσεων:

- *Τα αποτελέσματα των υπολογισμών διαφέρουν κατά στατιστικά σημαντικό τρόπο από τις μετρήσεις. Σε ότι αφορά στα NO_x, θα πρέπει κατ' αρχήν να επισημανθεί ότι οι κατανομές μετρήσεων – εκτιμήσεων παρουσιάζουν σαφώς μεγαλύτερη συνάφεια από ότι στις περιπτώσεις των άλλων τριών ρύπων, τόσο ως προς την τάξη μεγέθους όσο και ως προς το εύρος των τιμών. Οι διαφορές μεταξύ των κατανομών, που είναι εμπειρικά εμφανείς στο γράφημα 118, επιβεβαιώνονται από τα ιστογράμματα στο γράφημα 124, καθώς και από την καμπύλη του διαγράμματος ποσοστημορίων στο ίδιο γράφημα, η οποία διαφέρει σημαντικά από την ευθεία της διαγωνίου. Αν οι κατανομές ήταν περισσότερο συναφείς, τα μπλε σημεία του διαγράμματος ποσοστημορίων θα σχημάτιζαν γραμμή σαφώς πλησιέστερη στη διαγώνιο, τόσο σε απόσταση όσο και σε σχήμα· επισημαίνεται πάντως ότι και η παρατηρούμενη συνάφεια, παρότι περιορισμένη, δεν μπορεί να θεωρηθεί ασήμαντη. Επίσης, η μορφή της καμπύλης των μπλε σημείων του διαγράμματος ποσοστημορίων στο γράφημα 124 υποδεικνύει ότι στο χαμηλό διάστημα τιμών συγκέντρωσης NO_x (2 – 10 μg/m³) το πλήθος τιμών της κατανομής των αποτελεσμάτων EDMS είναι μεγαλύτερο από αυτό της κατανομής των μετρήσεων, ενώ σε υψηλότερες τιμές υπερτερεί το πλήθος των μετρήσεων. Ανάλογες παρατηρήσεις ως προς τη στατιστικά σημαντική διαφοροποίηση μετρήσεων – αποτελεσμάτων EDMS ισχύουν και για τα PM₁₀: στο γράφημα 119 η χρονοσειρά των μετρήσεων (κόκκινα σημεία) περιέχει σαφώς υψηλότερες τιμές από τη χρονοσειρά των αποτελεσμάτων EDMS, κάτι που απεικονίζεται και στο γράφημα 125, τόσο στα ιστογράμματα όπου η κατανομή των μετρήσεων είναι σαφώς μετατοπισμένη προς υψηλότερες τιμές και παρουσιάζει μεγαλύτερο εύρος, όσο και στο διάγραμμα*

ποσοστημορίων με τη σαφή απόκλιση προς τα κάτω της μπλε καμπύλης συσχέτισης συγκριτικά με τη διαγώνιο.

- Τα αποτελέσματα του EDMS είναι συστηματικά μικρότερα από τις μετρούμενες συγκεντρώσεις στο σταθμό Σπάτων. Πιο συγκεκριμένα, το EDMS δίνει μεγάλο πλήθος μηδενικών ή πολύ μικρών εκτιμήσεων συγκέντρωσης, όπως αποτυπώνουν τα ιστογράμματα στο γράφημα 124 για τα NO_x και στο γράφημα 125 για τα PM₁₀. Οι μετρήσεις από την άλλη μεριά, κατανέμονται σε υψηλότερες τιμές: για τα μεν NO_x σε λίγο υψηλότερες των εκτιμήσεων (3 - 10 μg/m³) για τα δε PM₁₀ σε σαφώς υψηλότερες (18 - 45 μg/m³).

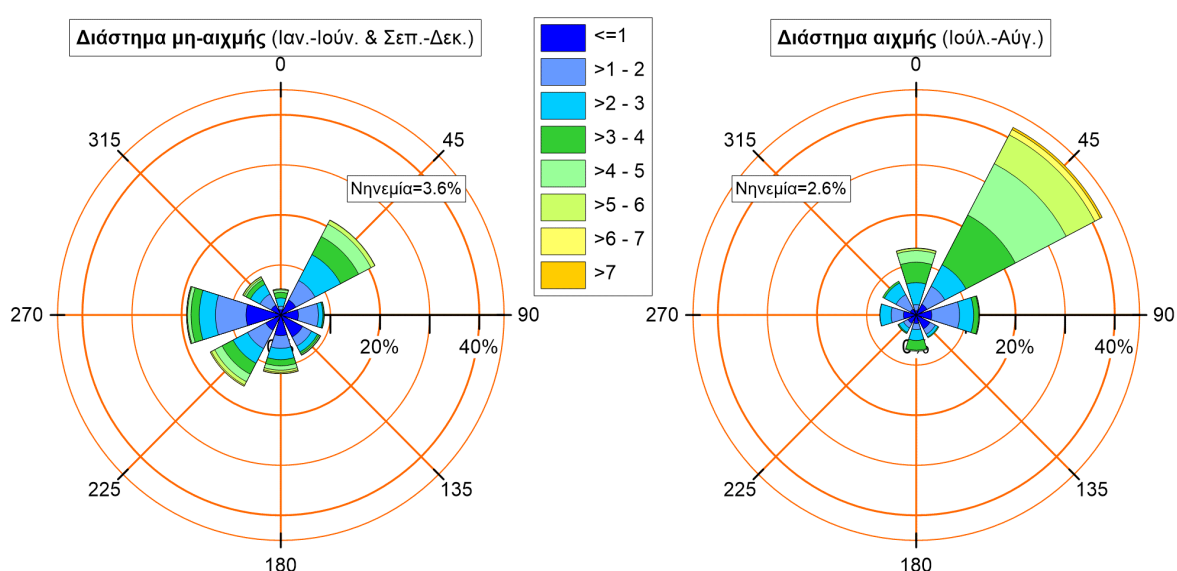
6.4.2.1.iv. Επίδραση άλλων πηγών

Η έως τώρα ανάλυση δείχνει ότι η επίδραση των εκπομπών του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών στο σταθμό παρακολούθησης ποιότητας αέρα στα Σπάτα δεν είναι καθοριστική. Το εύρημα αυτό ήταν ως ένα βαθμό αναμενόμενο, λόγω της θέσης του σταθμού, που βρίσκεται σε μικρή απόσταση τόσο από την περιφερειακή οδό του οικισμού των Σπάτων όσο και από τον οικιστικό ιστό. Επομένως, οι μετρήσεις του σταθμού είναι εύλογο να μην αντιπροσωπεύουν αποκλειστικά την επίδραση του αεροδρομίου, όπως έχει συμβεί σε άλλες, πειραματικά στοχευμένες στον έλεγχο του AERMOD, εργασίες.^[72,73,80] Επιπλέον, η μετεωρολογία και η μεταφορά αέριων ρύπων από άλλες πηγές, όπως η Αττική Οδός και το λεκανοπέδιο της Αθήνας, ασκούν τις δικές τους επιδράσεις στις μετρήσεις του σταθμού, οι οποίες όμως έχουν διερευνηθεί μόνο σε αδρές γραμμές,^[81-83] χωρίς δηλαδή αποτελέσματα που να παρέχουν τη δυνατότητα ποσοτικοποίησης της επίδρασης των παραγόντων αυτών στις ωριαίες μετρήσεις του σταθμού. Έτσι, στις επόμενες παραγράφους, επιχειρείται μια ανάλυση με βάση κυρίως την κατεύθυνση του ανέμου, ώστε να διερευνηθεί, έστω και σε εμπειρικό επίπεδο, ο βαθμός επίδρασης τόσο του ΔΑΑ όσο και των άλλων πηγών αέριας ρύπανσης στο σταθμό των Σπάτων.

Η λειτουργία του ΔΑΑ χαρακτηρίζεται από δύο διακριτά επίπεδα: στη διάρκεια των μηνών Ιουλίου και Αυγούστου παρατηρείται μια σημαντική αιχμή με περισσότερους από 21.500 LTOs ανά μήνα, ενώ στους υπόλοιπους 10 μήνες η κυκλοφορία κυμαίνεται μεταξύ 13 και 19 χιλιάδων LTOs ανά μήνα (βλ. γράφημα 2, σελ. 27). Έτσι, κατά πρώτον, η ανάλυση διαχωρίζεται σε χρονικό διάστημα αιχμής (Ιούλιος - Αύγουστος), στο οποίο άλλωστε έχει εστιάσει και η ανάλυση των προηγούμενων ενοτήτων, και σε διάστημα μη-αιχμής (Ιανουάριος - Ιούνιος και Σεπτέμβριος - Δεκέμβριος). Κατά δεύτερον, δεδομένου ότι τα NO_x είναι ο κύριος ρύπος που σχετίζεται με τη λειτουργία του ΔΑΑ, ενώ οι άλλοι ρύποι είτε υπολογίστηκε ότι κινούνται σε πολύ χαμηλά επίπεδα συγκεντρώσεων (CO και SO_x), είτε

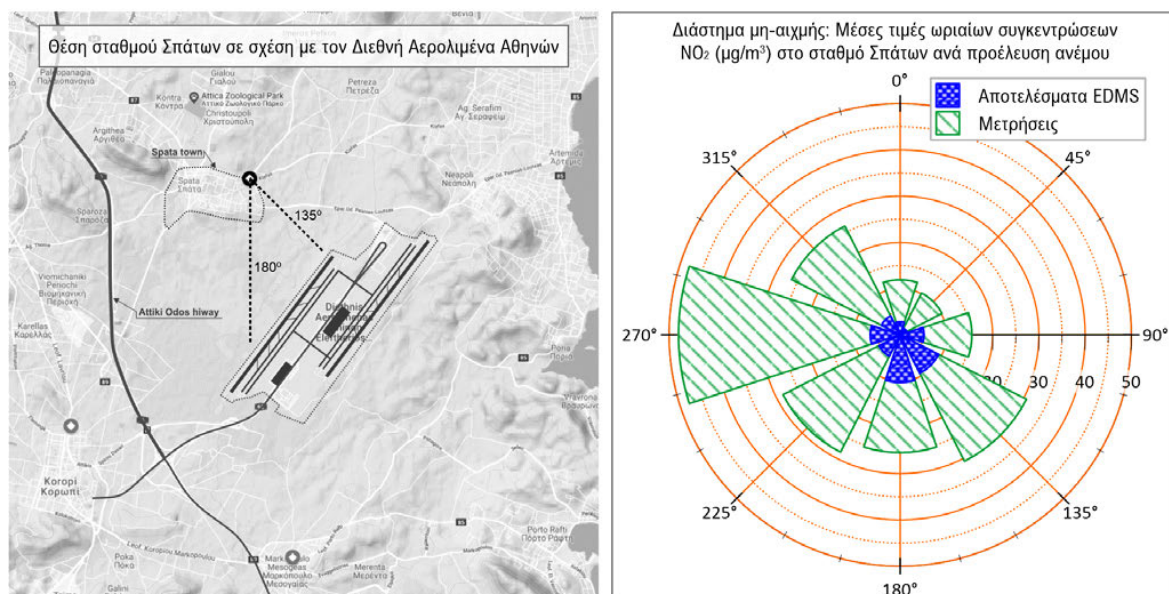
οφείλονται κατά μείζονα λόγο σε άλλες πηγές (PM₁₀), η ανάλυση εστιάζεται μόνο στα NO_x και, με βάση τα όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα 6.2.1 (σελ. 167 κ.ε.), στο ισοδύναμο NO₂.

Για να διερευνηθεί η συσχέτιση των συγκεντρώσεων NO₂ με την κατεύθυνση του ανέμου, οι μετρήσεις ανέμου στο σταθμό των Σπάτων διαχωρίζονται ανάλογα με την προέλευσή τους σε οκτώ τομείς και παρουσιάζονται στο επόμενο γράφημα. Τα χαρακτηριστικά που αξίζει να επισημανθούν είναι (α) η επικράτηση της βορειοανατολικής προέλευσης και στις δύο περιόδους, δηλαδή της πνοής ανέμου από κατευθύνσεις όπου δεν εντοπίζονται εντατικές πηγές εκπομπής αέριων ρύπων (β) τα σημαντικά ποσοστά ανέμων από δυτικές και νοτιοδυτικές κατευθύνσεις (18% και 13% περίπου αντιστοίχως) για την περίοδο μη-αιχμής, που αντιπαραβάλλονται με αρκετά μικρότερα ποσοστά από τις ίδιες κατευθύνσεις για την περίοδο αιχμής.



Γράφημα 127: Ροδογράμματα ανέμου στο σταθμό των Σπάτων για το διάστημα μη-αιχμής (Ιαν.-Ιούν. και Σεπ.-Δεκ.) και για το διάστημα αιχμής (Ιούλ.-Αύγ.).

Για το **διάστημα μη-αιχμής**, οι μετρήσεις ωριαίας μέσης συγκέντρωσης NO₂ και οι αντίστοιχες εκτιμήσεις του EDMS διαχωρίζονται ανάλογα με την προέλευση του ανέμου που έπνεε την ώρα αναφοράς τους, στους οκτώ τομείς που φαίνονται στο γράφημα 127 και στη συνέχεια για κάθε τομέα εξάγεται η μέση τιμή. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο επόμενο γράφημα.



Γράφημα 128: Ακτινικό διάγραμμα μέσω τιμών των ωριαίων συγκεντρώσεων NO_2 στο σταθμό των Σπάτων ανά προέλευση ανέμου για το διάστημα μη-αιχμής.

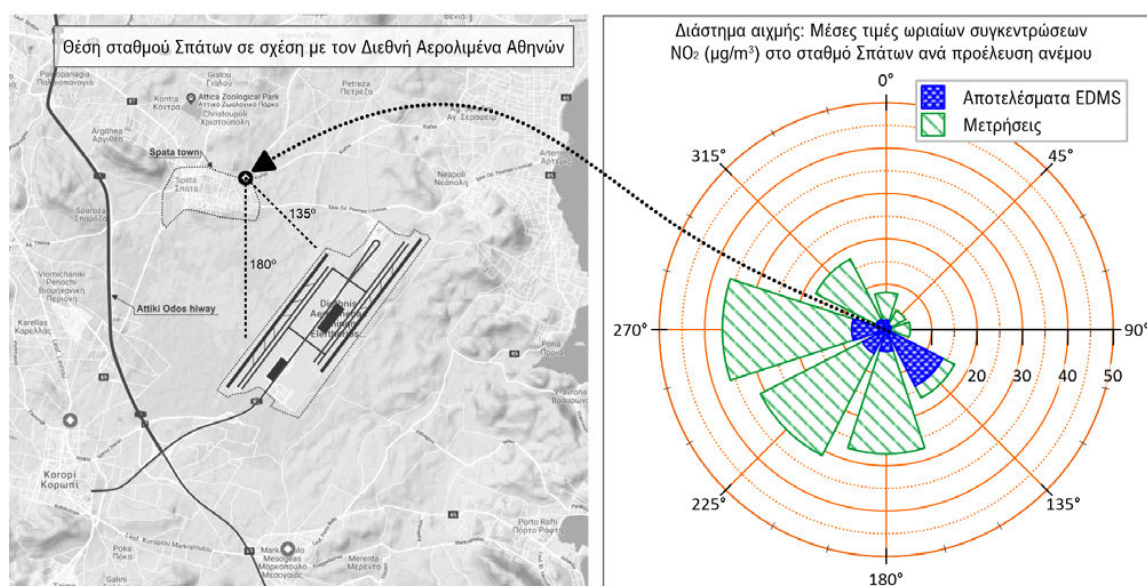
Οι κύριες διαπιστώσεις από την ανάλυση αυτή είναι οι εξής:

- Οι διακριτά υψηλότερες μετρήσεις (που δίνουν μέση τιμή σχεδόν $50 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{NO}_2$) καταγράφονται όταν πνέουν δυτικοί άνεμοι, οι οποίοι διαφαίνεται ότι μεταφέρουν οξείδια του αζώτου από το λεκανοπέδιο της Αθήνας και από τον αυτοκινητόδρομο της Αττικής Οδού προς το σταθμό των Σπάτων.
- Στα βόρεια και στα βορειοανατολικά του σταθμού δεν υπάρχουν σημαντικές πηγές εκπομπής NO_x που να μπορούν να δημιουργήσουν μεταφερόμενη ρύπανση, επομένως οι μετρήσεις του σταθμού κατά τη διάρκεια ανέμων από αυτές τις προελεύσεις μπορεί ευλόγως να θεωρηθεί ότι αντιπροσωπεύουν τη μέση συγκέντρωση υποβάθρου της περιοχής που οφείλεται σε τοπικές εκπομπές. Για το διάστημα μη-αιχμής, αυτή η συγκέντρωση φαίνεται να κινείται στο επίπεδο των $12\text{-}14 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Τέλος, οι αέριες μάζες που προέρχονται από τα νοτιοανατολικά και τα νότια, μεταφέρουν στο σταθμό αέριους ρύπους από την ευρύτερη περιοχή του ΔΑΑ, επομένως οι μετρήσεις κατά τη διάρκεια τέτοιων ανέμων θα πρέπει να θεωρούνται συνδεδεμένες με τη λειτουργία του αερολιμένα. Οι μέσες τιμές των μετρήσεων αυτών είναι περίπου 30 και $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ αντιστοίχως και αφαιρώντας την προαναφερθείσα μέση τιμή συγκέντρωσης υποβάθρου λόγω τοπικών εκπομπών, προκύπτει μια επίδραση του ΔΑΑ της τάξης των $13\text{-}16 \mu\text{g}/\text{m}^3$, η οποία είναι αρκετά κοντά στην αντίστοιχη τιμή του EDMS ($10\text{-}11 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Συνεπώς, με βάση την παραπάνω ανάλυση, διαπιστώνεται ότι για το διάστημα μη-αιχμής, το μοντέλο περιγράφει ικανοποιητικά την επίδραση του αερολιμένα στις μετρήσεις NO_2 του σταθμού των Σπάτων, τουλάχιστον σε επίπεδο μέσων μακροπρόθεσμων τιμών.

Για το **διάστημα αιχμής**, διαπιστώθηκε ήδη ότι η συσχέτιση μεταξύ των αποτελεσμάτων του EDMS και των μετρήσεων μέσης ωριαίας συγκέντρωσης NO_2 είναι πολύ περιορισμένη και η εικόνα προέλευσης των ανέμων που παρουσιάστηκε στο γράφημα 127 δικαιολογεί το εύρημα αυτό: οι συχνότεροι άνεμοι προέρχονται από τα βορειοανατολικά, οπότε η διάδοση του πλουμίου των ρύπων του αεροδρομίου δεν κατευθύνθηκε προς τα Σπάτα αλλά προς την αντίθετη κατεύθυνση τις περισσότερες ώρες του διμήνου αυτού. Οι άνεμοι από τα νοτιοανατολικά ή τα νότια, οι οποίοι ωθούν τους εκπεμπόμενους από το ΔΑΑ αέριους ρύπους προς την κατεύθυνση των Σπάτων ήταν αρκετά σπάνιοι, με αθροιστική συχνότητα της τάξης του 10-12%.

Ομαδοποιώντας και πάλι τις μετρήσεις του σταθμού για την ωριαία συγκέντρωση NO_2 και τα ανάλογα αποτελέσματα του EDMS με βάση την προέλευση του ανέμου κατά την ώρα αναφοράς τους και εξάγοντας τις μέσες τιμές, προκύπτει το γράφημα που ακολουθεί.



Γράφημα 129: Ακτινικό διάγραμμα μέσω τιμών των ωριαίων συγκεντρώσεων NO_2 στο σταθμό των Σπάτων ανά προέλευση ανέμου για το διάστημα αιχμής.

Οι βασικές διαπιστώσεις από το παραπάνω γράφημα για το διάστημα αιχμής είναι οι εξής:

- Οι δυτικοί άνεμοι συνδέονται και πάλι με τις υψηλότερες μετρήσεις συγκεντρώσεων NO_2 , η μέση τιμή των οποίων όμως είναι τώρα χαμηλότερη απ' ό,τι στο διάστημα μη-αιχμής, γύρω στα $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

- Οι μετρήσεις κατά τη διάρκεια βόρειων και βορειοανατολικών ανέμων, που όπως προαναφέρθηκε μπορούν να θεωρηθούν ως αντιπροσωπευτικές της επίδρασης των τοπικών πηγών, δίνουν μέσες τιμές περίπου 8 και 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ αντιστοίχως.
- Οι μετρήσεις κατά τη διάρκεια των νοτιοανατολικών ανέμων δίνουν μέση τιμή NO_2 που αντιστοιχίζεται με τη μέση τιμή των αποτελεσμάτων του EDMS, εάν ληφθεί υπόψη μια τιμή υποβάθρου της τάξης των 8-9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Για τους άλλους τομείς προέλευσης ανέμου, όπως ο νότιος και ο νοτιοδυτικός, οι διαφορές, φαίνεται να ισχύει ό,τι και για το δυτικό τομέα: η επίδραση άλλων πηγών ρύπανσης είναι εμφανής και σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή του αεροδρομίου.

Ολοκληρώνοντας την ανάλυση της επίδρασης άλλων - πλην αεροδρομίου - πηγών στις μετρήσεις NO_2 του σταθμού των Σπάτων, προκύπτει το γενικό συμπέρασμά ότι, εάν ληφθεί υπόψη η επίδραση αυτή, η οποία είναι σημαντικής έντασης, τότε τα αποτελέσματα του μοντέλου αντιστοιχίζονται ικανοποιητικά με τα αποτελέσματα των μετρήσεων, τουλάχιστον στο επίπεδο των μέσων τιμών.

6.4.2.1.v. Διαπιστώσεις

Από τα γραφήματα και τις παρατηρήσεις των τριών προηγούμενων ενοτήτων (αντιπαραβολή χρονοσειρών, διασπορά μετρήσεων-εκτιμήσεων και στατιστική ανάλυση) που αναφέρονται στο σταθμό παρακολούθησης ποιότητας αέρα στα Σπάτα, συνάγονται οι ακόλουθες διαπιστώσεις:

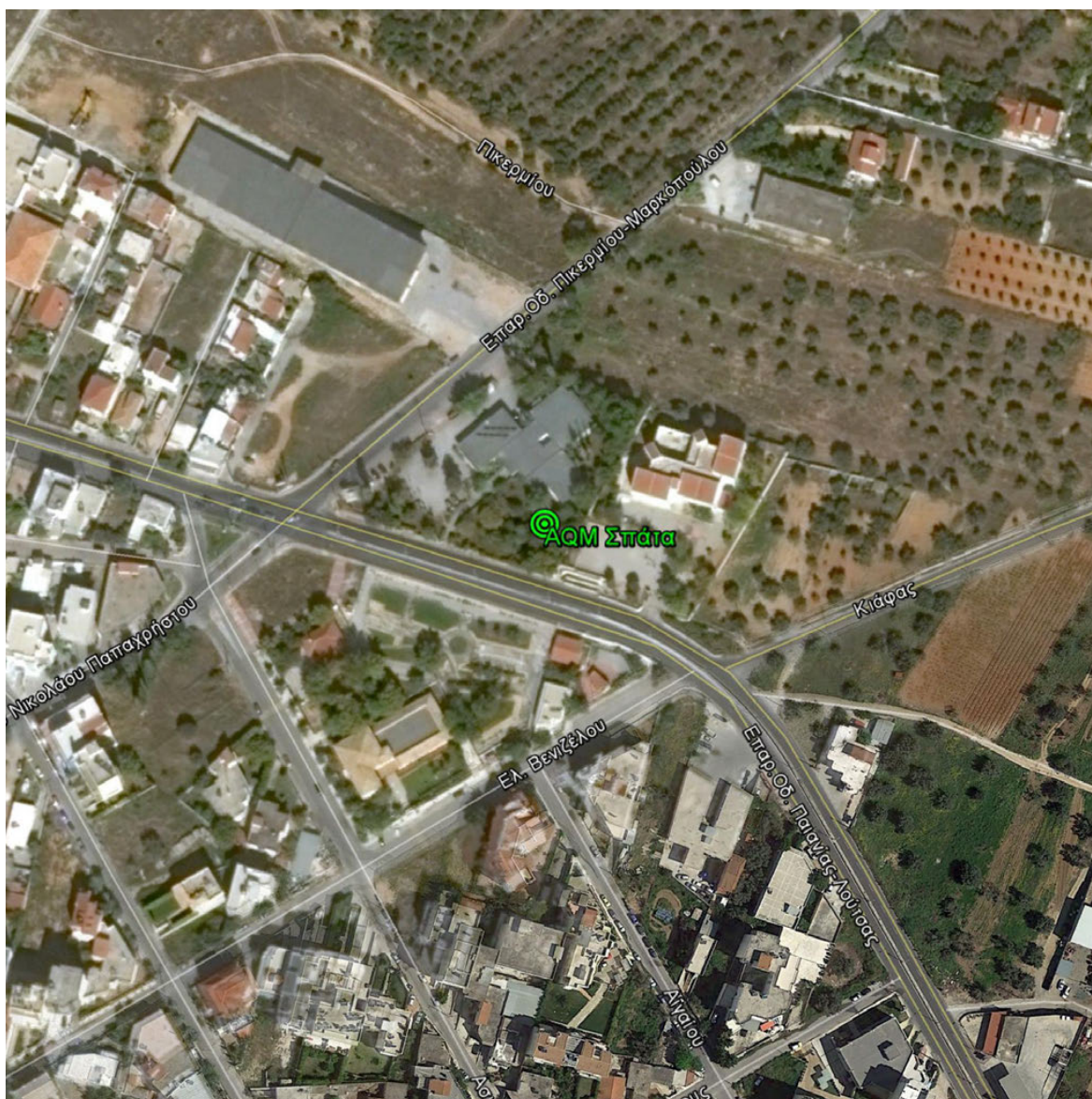
- *Οι συγκεντρώσεις μειώνονται σημαντικά με την αύξηση της ταχύτητας ανέμου.* Αυτό είναι αναμενόμενο γενικά, αφού οι υψηλότερες ταχύτητες ανέμου αναδεύουν και μεταφέρουν ταχύτερα τις αέριες μάζες, αραιώνοντας με τους δύο αυτούς τρόπους τους ρύπους που αυτές περικλείουν. Στα γραφήματα χρονοσειρών, το φαινόμενο αυτό απεικονίζεται ως αντίστιξη των πράσινων σημείων της ταχύτητας ανέμου, με τα μπλε και κόκκινα σημεία των εκτιμήσεων και μετρήσεων συγκέντρωσης αντίστοιχα. Οι λεπτομέρειες του τρόπου επίδρασης της ταχύτητας του ανέμου στα αποτελέσματα θα εξετασθούν στην ενότητα 7.2 (σελ. 242 κ.ε.) του κεφαλαίου 7 που αναφέρεται στην ανάλυση ευαισθησίας. Επιμέρους εκδήλωση της επίδρασης της ταχύτητας του ανέμου, είναι ότι τα σημεία σύγκλισης εκτιμήσεων - μετρήσεων στα Σπάτα συγκεντρώνονται σε ταχύτητες ανέμου κάτω 3 m/s (γράφημα 122)· πάνω από τις ταχύτητες αυτές οι συγκεντρώσεις που προβλέπει το EDMS είναι σχεδόν πάντα μηδενικές για όλους τους ρύπους, ενώ οι μετρήσεις όχι πάντα.
- *Οι εκτιμήσεις απέχουν αρκετά από τις μετρήσεις.* Η διαφορά αυτή εντοπίζεται τόσο σε αποκλίσεις στη χρονική εξέλιξη των ωριαίων τιμών μετρήσεων - αποτελεσμάτων EDMS, όσο και στη στατιστική κατανομή τους. Η εικόνα απόκλισης στο επίπεδο των

συγκεντρώσεων είναι αντίστροφη από την πολύ καλή σύγκλιση που παρατηρήθηκε στο επίπεδο των εκπομπών (ενότητα 6.1.1, σελ. 155) και οι λόγοι που οδηγούν στις παρατηρούμενες αποκλίσεις είναι αρκετοί:

- α) Οι υπολογισμοί διασποράς του EDMS πραγματοποιούνται με το AEROMOD που βασίζεται στη κατανομή των ρύπων κατά την καμπύλη Gauss. Πρόκειται για μια στατιστικού τύπου προσέγγιση, η οποία μπορεί να είναι βάσιμη μόνο σε επαρκώς μεγάλο δείγμα, αλλά δεν πρέπει να αναμένεται ότι θα ακολουθεί τη χρονική εξέλιξη των πραγματικών συγκεντρώσεων ώρα-προς-ώρα. Ένα παράδειγμα ίσως βοηθήσει: ρίχνοντας ένα ζάρι μερικές χιλιάδες φορές, μπορεί κανείς να είναι αρκετά σίγουρος ότι η συχνότητα εμφάνισης ενός από τους έξι αριθμούς, π.χ. του δύο, θα είναι ίση με ένα έκτο. Δεν μπορεί όμως να αναμένει ότι σε κάθε έξι ρίψεις η μία τουλάχιστον θα φέρνει δυο, ή ότι εάν μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών ρυθμιστεί στο να μιμείται τη στατιστική κατανομή των ρίψεων ενός ζαριού οι παραγόμενοι από αυτήν αριθμοί θα ακολουθούν ένας-προς-ένα τα αποτελέσματα των πραγματικών ρίψεων. Παρομοίως, το μοντέλο Gauss βασίζεται στη στοχαστική προσέγγιση ότι για μεγάλους αριθμούς ομοειδών συνθηκών διασποράς, οι συγκεντρώσεις κάθε φοράς θα ακολουθούν μια κανονική κατανομή με κέντρο τη μέση τιμή που προβλέπει το μοντέλο, και φυσικά χωρίς αυτό να σημαίνει ότι θα συμπίπτουν με την τιμή αυτή. Με δυο λόγια: μεγάλο μέρος των διαφορών που παρατηρούνται στην εξέλιξη των χρονοσειρών μετρήσεων και εκτιμήσεων οφείλονται στη στατιστική προέλευση των τελευταίων. Η αιτιολόγηση αυτή επικυρώνεται και από ευρήματα άλλων εργασιών, που διαπιστώνουν σαφώς καλύτερη προσέγγιση μετρήσεων και υπολογιστικών αποτελεσμάτων σε χρονικές κλίμακες ημέρας, εβδομάδας και μήνα από ότι στις ωριαίες ή τρίωρες τιμές.^[72]
- β) Οι υπολογισμοί με βάση τα μοντέλα Gauss βασίζονται στην παραδοχή σχετικώς ομογενών συνθηκών διασποράς σε όλη την απόσταση από το σημείο εκπομπής ως το σημείο υπολογισμού («δέκτη»). Η παραδοχή αυτή εισάγεται στους υπολογισμούς του AERMOD μέσω των σταθερών συντελεστών τυπικής απόκλισης στο οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο, οι οποίοι ρυθμίζουν τη μορφή της κωδωνοειδούς κατανομής συγκεντρώσεων γύρω από τον άξονα μεταφοράς. Οι συντελεστές αυτοί υπολογίζονται με αρκετά σύνθετο τρόπο, προκειμένου να ενσωματώσουν κατά το δυνατόν πληρέστερα τις ιδιαιτερότητες που σχετίζονται με το ανάγλυφο και τη διαστρωμάτωση της ατμόσφαιρας (σχέσεις Briggs στα παλαιότερα μοντέλα, μήκος Monin-Obukon στα σύγχρονα, βλ. και ενότητα 7.2.1, σελ. 242 κ.ε.)· βασίζονται όμως σε σταθερή ταχύτητα

ανέμου και θερμοκρασία, οπότε αναπόφευκτα παραμένουν σταθεροί καθ' όλο το μήκος από την πηγή έως το δέκτη. Η παραδοχή αυτή όμως είναι κοντά στην πραγματικότητα μόνο ελάχιστες φορές, διότι η διεύθυνση και η ταχύτητα ανέμου είναι σαφώς συνηθέστερο να μεταβάλλονται κατά μήκος μερικών χιλιομέτρων παρά να μένουν σταθερές, κάτι που όντως συμβαίνει στην Αττική.^[84,85] Αυτή η μεταβλητότητα των συνθηκών κατά μήκος της απόστασης διασποράς διαφοροποιεί, άλλοτε σε μικρότερο και άλλοτε σε μεγαλύτερο βαθμό, τις πραγματικές συγκεντρώσεις από τις υπολογιστικά προβλεπόμενες.

- γ) Παρότι ως προς τις εκπομπές σε ετήσια βάση τα αποτελέσματα των υπολογισμών συγκλίνουν αξιοσημείωτα με αυτή της παρακολούθησης (βλ. ενότητα 6.1.1), οι χρονοσειρές ωριαίων και ημερήσιων συγκεντρώσεων διαφέρουν. Αυτό οφείλεται εν μέρει (πέραν των δύο παραπάνω λόγων) και στο εξής γεγονός: στο EDMS εισήχθησαν σταθερά πρότυπα μέσης ποσοστιαίας κατανομής των κινήσεων ανά ώρα, ημέρα, εβδομάδα και μήνα, ενώ οι πραγματικές κινήσεις κατανέμονται γύρω από τις τιμές αυτές με ακανόνιστο τρόπο. Επομένως, παρότι οι ετήσιες εκπομπές συγκλίνουν, οι ωριαίες εκπομπές που υπολογίζονται από το EDMS δεν συμπίπτουν μια-προς-μια με τις πραγματικές ωριαίες εκπομπές του αερολιμένα, οι οποίες επηρεάζουν τις μετρήσεις συγκέντρωσης στο σταθμό των Σπάτων.
- δ) Ο σταθμός μετρά την τρέχουσα συγκέντρωση αέριων ρύπων, απ' όπου και αν προέρχονται αυτοί, χωρίς να μπορεί να διακριθεί ποιο μέρος τους σχετίζεται με τον αερολιμένα. Δεδομένου δε ότι η θέση του σταθμού εντός του περιβάλλοντος του Κέντρου Υγείας είναι αρκετά κοντά στην οδό Παιανίας - Λούτσας (βλ. σχήμα 13 παρακάτω), η οποία λειτουργεί ως περιφερειακός δακτύλιος του οικισμού Σπάτων και κατά τους θερινούς μήνες εμφανίζει ιδιαίτερα αυξημένο φόρτο λόγω υπερτοπικής κυκλοφορίας από και προς τις παραλίες της Αρτέμιδας, μπορεί με βεβαιότητα να θεωρηθεί ότι ένα σημαντικό μέρος των μετρούμενων συγκεντρώσεων συνδέεται με τη λειτουργία της οδού και όχι του αερολιμένα.



Σχήμα 11: Η θέση του σταθμού παρακολούθησης ποιότητας αέρα στα Σπάτα.

- *Η ανάλυση της διασποράς μεταξύ εκτιμήσεων και μετρήσεων αφενός δείχνει μια τάση υποεκτίμησης του μοντέλου έναντι των μετρήσεων, αφετέρου αναδεικνύει το μείζονα ρόλο της ταχύτητας του ανέμου. Η διαπίστωση υποεκτίμησης προκύπτει κυρίως από το γράφημα 121, όπου παρατηρούνται πολύ περισσότερα σημεία κάτω από τη γραμμή $y=x$ των διαγραμμάτων, δηλαδή στην περιοχή που οι εκτιμήσεις είναι μικρότερες των μετρήσεων, από ότι στο επάνω μέρος τους, όπου ισχύει το αντίστροφο. Πάντως, οι γενικά υψηλότερες των εκτιμήσεων τιμές των μετρήσεων οφείλονται κατά μείζονα λόγο στη συνεισφορά και άλλων πηγών NO_x , πέραν του αεροδρομίου. Ο σημαντικός ρόλος της ταχύτητας ανέμου προκύπτει από τη διαπίστωση ότι όλες οι περιπτώσεις προσέγγισης μεταξύ υπολογιστικών αποτελεσμάτων και ωριαίων μετρήσεων εντοπίζονται σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου, κάτω των 3 m/s, όπως φαίνεται στο*

γράφημα 122. Αυτό εξηγείται με βάση δύο λόγους που συντρέχουν είτε μαζί είτε μεμονωμένα. Ο πρώτος λόγος αφορά στην πλευρά των εκτιμήσεων και εντοπίζεται στο ότι το EDMS για σχετικώς υψηλές ταχύτητες ανέμου, υπολογίζει υψηλούς συντελεστές διασποράς καταλήγοντας σε πολύ χαμηλές ή και μηδενικές συγκεντρώσεις για αποστάσεις ανάλογες με αυτή μεταξύ Σπάτων και ΔΑΑ. Ο δεύτερος λόγος, που είναι ανεξάρτητος του πρώτου, αφορά την πλευρά των μετρήσεων: ανεξαρτήτως της υψηλής ή όχι ταχύτητας ανέμου, ο σταθμός μετρά τη συγκέντρωση αέριων ρύπων από όλες τις πηγές όπως προαναφέρθηκε. Έτσι, αρκετές ωριαίες μετρήσεις σημαντικού ύψους συγκέντρωσης οφείλονται σε ρύπους από την παρακείμενη οδό ή άλλες πηγές και η απόκλιση από την (ορθώς προβλεπόμενη ως μηδενική) εκτίμηση του EDMS είναι εύλογη. Αυτό ισχύει ιδίως για ρύπους όπως το CO, τα PM₁₀ και τα SO_x, των οποίων η εκπομπή από το αεροδρόμιο είναι σχετικά μικρή και επομένως η μετρούμενη συγκέντρωση συχνά κυριαρχείται από τη συνεισφορά των τοπικών εκπομπών. Η συνδυασμένη ή μεμονωμένη επίδραση των δύο αυτών λόγων διαφαίνεται ότι εξηγεί τις αποκλίσεις εκτιμήσεων – μετρήσεων.

- *Η στατιστική ανάλυση των κατανομών των μετρήσεων και των υπολογιστικών αποτελεσμάτων επιβεβαιώνει γενικά τις παραπάνω διαπιστώσεις. Τα ειδικότερα συμπεράσματα από την ανάλυση αυτή μπορούν να κωδικοποιηθούν ως εξής:*

α) Σε ότι αφορά στο CO, τα PM₁₀ και τα SO_x, τα διαγράμματα ποσοστημορίων έδειξαν ότι η κατανομή των αποτελεσμάτων EDMS δεν μπορεί να συσχετιστεί ευθέως με την κατανομή των μετρήσεων στο σταθμό των Σπάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι στις περιπτώσεις του CO και των SO_x, η έλλειψη συσχέτισης είναι εξηγήσιμη: οι ρύποι αυτοί εκπέμπονται σε μικρές ποσότητες κατά τη λειτουργία του αεροδρομίου και επομένως η συνεισφορά των εκπομπών αυτών στις συγκεντρώσεις που καταγράφει ο σταθμός μέτρησης στα Σπάτα, σε απόσταση 4 km, αναμένεται να είναι πολύ μικρή έως και μηδενική. Επομένως, στην πράξη ο σταθμός μετρά – μόνο ή κατά μείζονα λόγο – τις συγκεντρώσεις που προέρχονται από τοπικές, άσχετες με το αεροδρόμιο πηγές, όπως τα οχήματα που κινούνται στην παρακείμενη οδό. Άρα, ορθώς δεν παρατηρείται συσχέτιση μεταξύ των κατανομών εκτιμήσεων και μετρήσεων. Η κατάσταση με τα PM₁₀ είναι κάπως πιο σύνθετη: αφενός οι ποσότητες που εκπέμπονται από τις δραστηριότητες του αερολιμένα είναι επίσης μικρές, στοιχείο που προιδεάζει για εξίσου μικρές συγκεντρώσεις στα Σπάτα· αφετέρου οι μετρούμενες συγκεντρώσεις έχουν μια ασυνήθιστη πλειονότητα τιμών από τα 20 ως τα 35 μg/m³, επίπεδο που είναι αρκετά υψηλό για να μπορεί να σχετισθεί αιτιωδώς είτε με τις εκπομπές του αερολιμένα, είτε με τις εκπομπές των οχημάτων της

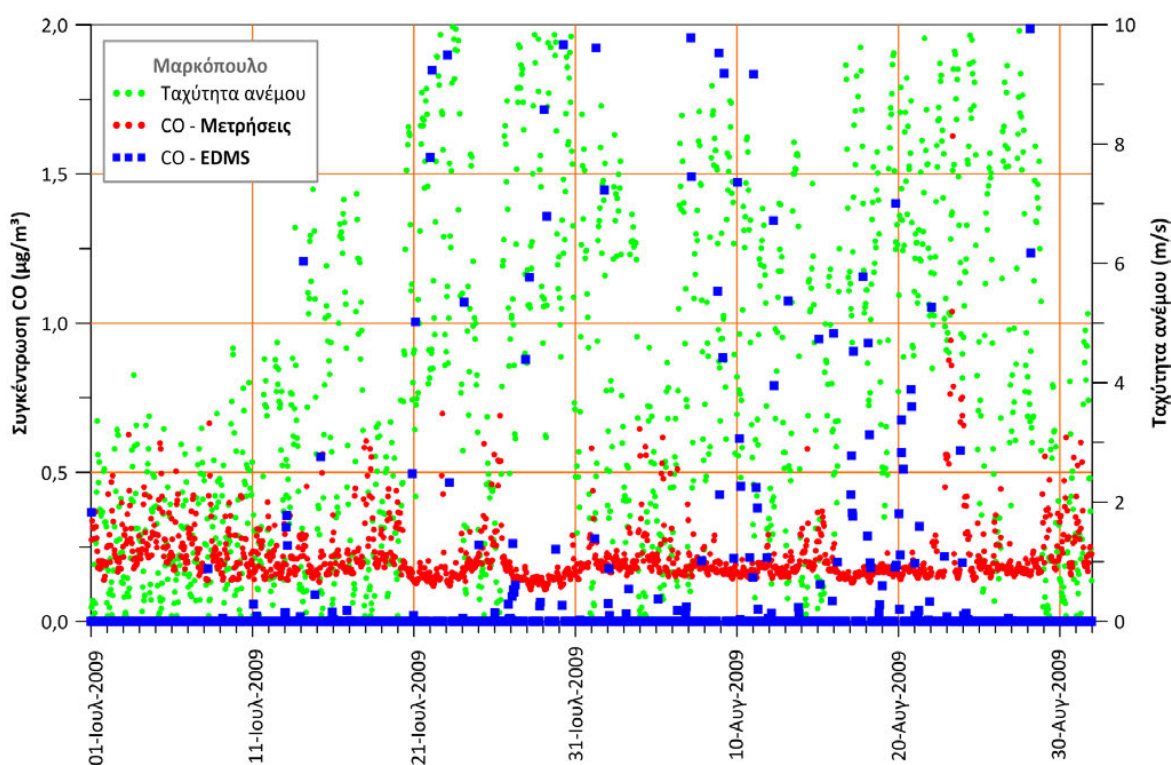
περιμετρικής οδού που βρίσκεται κοντά στο σταθμό, είτε με άλλες γνωστές ανθρωπογενείς πηγές σωματιδίων όπως π.χ. η κεντρική θέρμανση, αφού η ανάλυση αφορά θερινούς μήνες. Απομένει επομένως ως πλέον εύλογη η εξήγηση ότι η κύρια αιτία για τις υψηλές συγκεντρώσεις PM_{10} είναι ότι πρόκειται για σωματίδια φυσικής προέλευσης,^[74–76,78] όπως ήδη αναφέρθηκε στη σελίδα 193. Αξίζει πάντως να προστεθεί στο σημείο αυτό, ότι οι υποεκτιμήσεις των υπολογιστικών αναλύσεων σε σχέση με τις μετρήσεις πεδίου είναι αρκετά συνηθισμένες, ακόμη και σε πολύ πρόσφατες εργασίες, όπου μέσω αντίστροφης μοντελοποίησης διαπιστώνεται ότι, για να ανέλθουν οι υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις στο επίπεδο των μετρούμενων, χρειάζεται να αυξηθεί ο ρυθμός εκπομπής που εισάγεται στους υπολογισμούς του μοντέλου διασποράς από 14 έως 55%.^[86]

- β) Η πιο σύνθετη, αλλά και η πιο ενδιαφέρουσα περίπτωση είναι αυτή των NO_x . Πρώτον επειδή πρόκειται για τον χαρακτηριστικό ρύπο της λειτουργίας του αερολιμένα και δεύτερον επειδή, σε αντίθεση με τους άλλους ρύπους, η απόκλιση των κατανομών μετρήσεων – εκτιμήσεων δεν είναι τόσο μεγάλη, παρότι παραμένει υπαρκτή. Σημειώθηκε ήδη ότι οι κατανομές αυτές παρουσιάζουν συνάφεια τόσο ως προς την τάξη μεγέθους όσο και ως προς το εύρος των τιμών τους, καθώς και ότι οι εκτιμήσεις είναι γενικά μικρότερες των μετρήσεων. Το εύρημα αυτό δεν μπορεί να μεταφραστεί μονοσήμαντα σε τάση υποεκτίμησης του EDMS· αντίθετα, υπό τις συνθήκες που επικρατούν γύρω από το σταθμό των Σπάτων, θα πρέπει να συσχετιστεί μάλλον με πιθανές συνεισφορές άλλων, τοπικού χαρακτήρα, εκπομπών στις μετρούμενες συγκεντρώσεις NO_x . Αξίζει πάντως να προστεθεί στο σημείο αυτό, ότι η πρόσφατη ανάλογη αντιπαραβολή μετρήσεων – υπολογιστικών αποτελεσμάτων για το αεροδρόμιο του Los Angeles,^[87] εντοπίζει ανάλογες διαφορές και αναζητεί αντίστοιχη αιτιολόγηση, αποδίδοντας τις αυξημένες μετρήσεις NO_x στη συμβολή άλλων πηγών, πλην αεροδρομίου, όπως ιδίως της οδικής κυκλοφορίας.

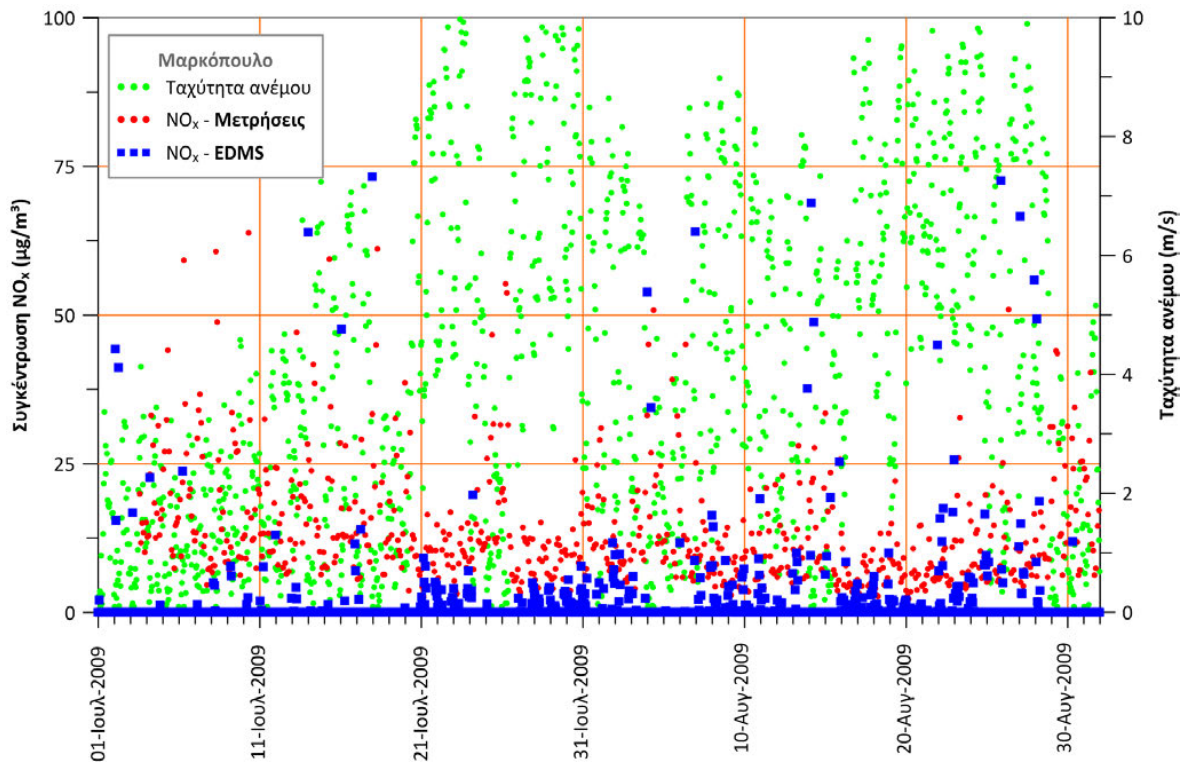
Οι άλλοι σταθμοί του δικτύου παρακολούθησης της ποιότητας της ατμόσφαιρας γύρω από το ΔΑΑ βρίσκονται σε σαφώς μεγαλύτερη απόσταση από τον αερολιμένα, οπότε οι παράγοντες που μεταβάλλουν τις συνθήκες διασποράς και κατά συνέπεια αυξάνουν τις αποκλίσεις μεταξύ εκτιμήσεων και μετρήσεων θα είναι ακόμη εντονότεροι. Συνεπώς, οι συγκρίσεις προλέξεων-μετρήσεων στις θέσεις των σταθμών αυτών έχουν ενδιαφέρον κυρίως για να εξετασθεί εάν οι διαπιστώσεις που εξήχθησαν για το σταθμό των Σπάτων ισχύουν κατ' ανάλογο τρόπο και για τις περιπτώσεις αυτές.

6.4.2.2. Σταθμός Μαρκόπουλου

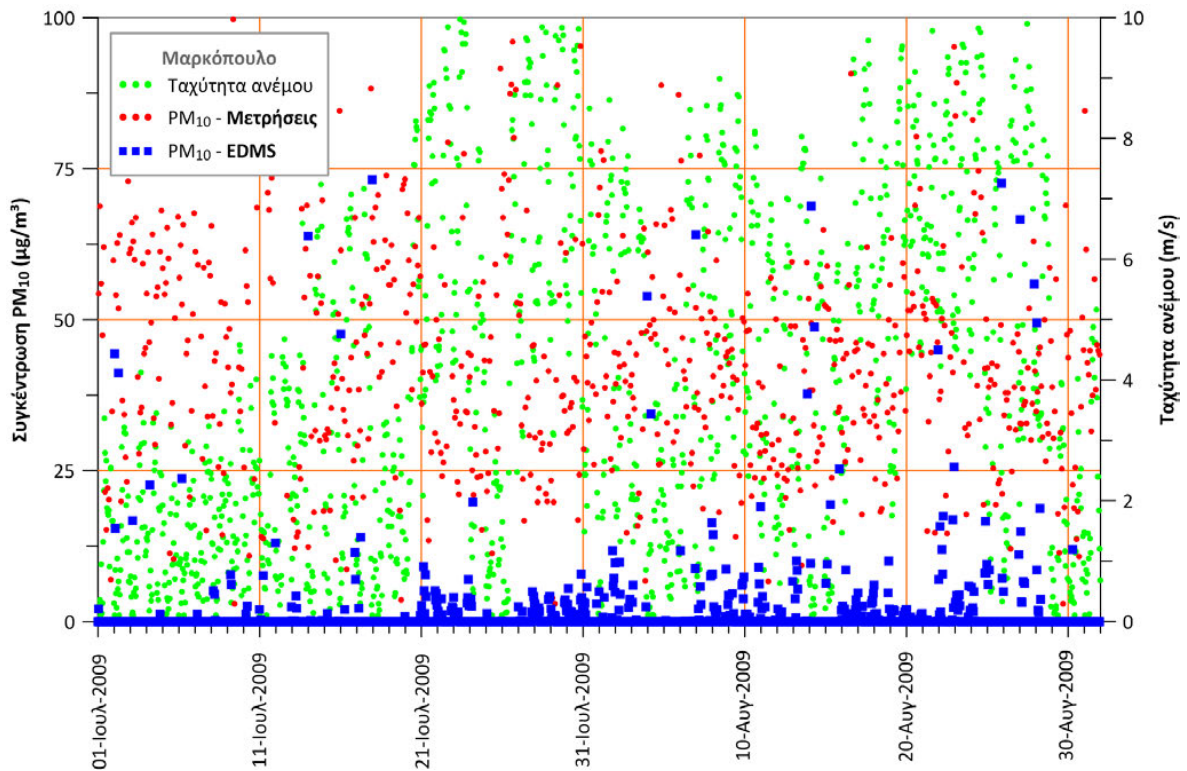
Ο σταθμός παρακολούθησης της ποιότητας αέρα στο Μαρκόπουλο βρίσκεται σε απόσταση 5,33 km νοτιώς του ΔΑΑ, σχεδόν αντιδιαμετρικά του σταθμού Σπάτων (σχήμα 10, σελ. 186) και μετρά τις συγκεντρώσεις των ρύπων CO, NO_x και PM₁₀. Η σύγκριση μεταξύ εκτιμήσεων του EDMS και μετρήσεων του σταθμού ποιότητας αέρα για τους ρύπους αυτούς παρουσιάζεται στα ακόλουθα τρία γραφήματα, στα οποία απεικονίζεται η διακύμανση μετρήσεων και εκτιμήσεων σε ωριαία βάση. Ταυτόχρονα, παρουσιάζεται η μέση ωριαία ταχύτητα ανέμου, στο δεξί κάθετο άξονα.



Γράφημα 130: Μετρήσεις και εκτιμήσεις ωριαίας μέσης συγκέντρωσης CO στο σταθμό Μαρκόπουλου.



Γράφημα 131: Μετρήσεις και εκτιμήσεις ωριαίας μέσης συγκέντρωσης NO_x στο σταθμό Μαρκόπουλου.



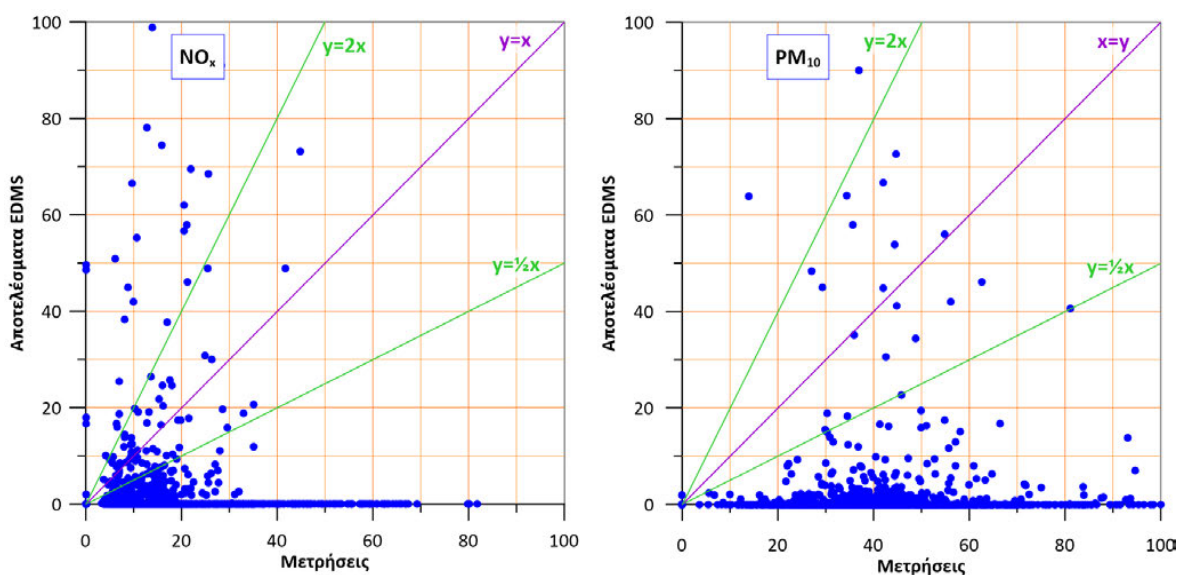
Γράφημα 132: Μετρήσεις και εκτιμήσεις ωριαίας μέσης συγκέντρωσης PM₁₀ στο σταθμό Μαρκόπουλου.

Αξίζει ως πρώτη, οριζόντια, παρατήρηση να σημειωθεί ότι τα παραπάνω γραφήματα απεικονίζουν ταχύτητες ανέμου (πράσινα σημεία) σημαντικά υψηλότερες από ότι στα Σπάτα.

Ως προς το CO, η εικόνα της χρονοσειράς μετρήσεων και εκτιμήσεων είναι ανάλογη με αυτή των Σπάτων: η πλειονότητα των αποτελεσμάτων του EDMS στο γράφημα 130 συγκεντρώνονται στο μηδέν, ενώ αντίθετα οι μετρήσεις εμφανίζουν ένα πολύ μεγάλο μερίδιο σε χαμηλά αλλά μη-μηδενικά επίπεδα. Παρέλκει επομένως η αναζήτηση συσχέτισης μεταξύ των δύο αυτών χρονοσειρών, αφού τα αποτελέσματα του EDMS διαφαίνεται ότι ορθώς κινούνται στο μηδέν, λόγω χαμηλής έντασης εκπομπών από τις δραστηριότητες του αεροδρομίου και μεγάλης απόστασης, ενώ οι μετρήσεις στην πράξη αφορούν – μόνο ή κατά μείζονα λόγο – τις συγκεντρώσεις που προέρχονται από τοπικές πηγές του αστικού περιβάλλοντος, άσχετες με το αεροδρόμιο.

Αντιθέτως με το CO, η αναζήτηση συσχέτισεων μεταξύ των κατανομών εκτιμήσεων – μετρήσεων των NO_x και PM₁₀ διαφαίνεται χρήσιμη, τόσο επειδή αποτελούν χαρακτηριστικούς ρύπους του αεροδρομίου όσο και για εξεταστεί εάν ενισχύονται ή όχι οι υποθέσεις εξήγησης των αποκλίσεων που διατυπώθηκαν για το σταθμό των Σπάτων.

Στο πλαίσιο αυτό, η διασπορά μετρήσεων-εκτιμήσεων στο σταθμό του Μαρκόπουλου για τους δύο αυτούς ρύπους παρουσιάζονται στο επόμενο διπλό γράφημα.



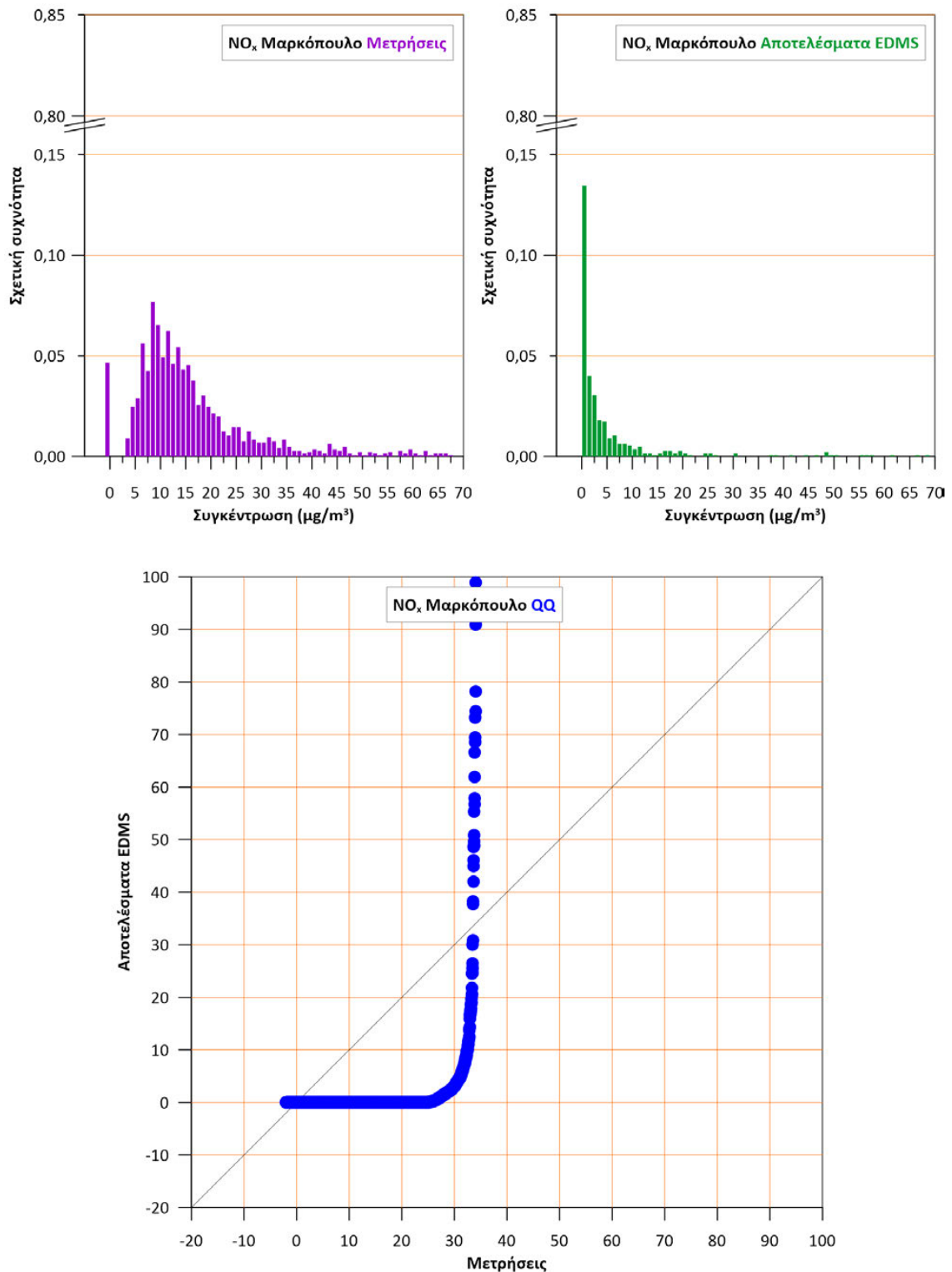
Γράφημα 133: Διασπορά μετρήσεων-εκτιμήσεων ωριαίας μέσης συγκέντρωσης για τους NO_x και PM₁₀ στο σταθμό Μαρκόπουλου.

Η διασπορά μετρήσεων-εκτιμήσεων για τα NO_x στο Μαρκόπουλο παρουσιάζει αναλογία με αυτή στα Σπάτα (επάνω δεξιά διάγραμμα στο γράφημα 121, σελ. 192) υπό την έννοια ότι ένα αξιοσημείωτο μερίδιο των σημείων κινούνται κοντά στη γραμμή $x=y$ και συγκεκριμένα εντός

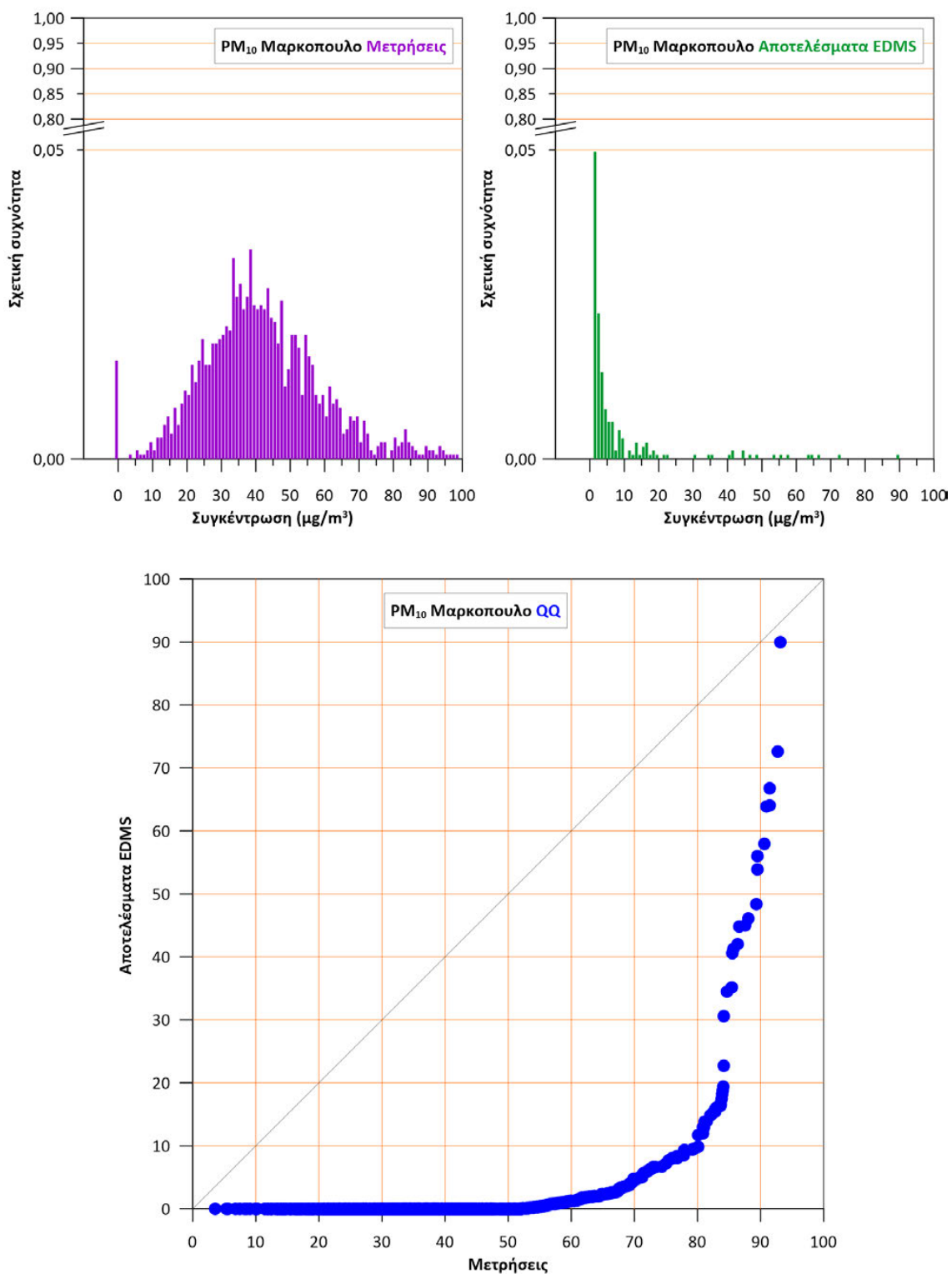
των γραμμών $y=2x$ και $y=1/2x$, υποδεικνύοντας γειτνίαση μετρήσεων-προλέξεων. Η διαφορά είναι ότι τα σημεία αυτά στο Μαρκόπουλο αφορούν χαμηλότερα επίπεδα τιμών NO_x , καθότι συγκεντρώνονται κάτω των $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ενώ στα Σπάτα εξαπλώνονταν έως και το επίπεδο των $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Ως προς τη διασπορά μετρήσεων-εκτιμήσεων για τα PM_{10} στο Μαρκόπουλο, η εικόνα παρουσιάζει κάποιες ομοιότητες αλλά και αρκετές διαφορές από αυτή στα Σπάτα (κάτω αριστερά διάγραμμα στο γράφημα 121, σελ. 192). Οι βασικές ομοιότητες είναι η συσσώρευση του μεγαλύτερου μέρους των εκτιμήσεων EDMS στο μηδέν, ως αποτέλεσμα του μικρού μεγέθους εκπομπών και της μεγάλης απόστασης, καθώς και η σαφώς μικρότερη κλίμακα των εκτιμήσεων σε σχέση με τις μετρήσεις, όπως υποδηλώνεται από τη συσσώρευση των σημείων κάτω από τη γραμμή $y=1/2x$. Η βασική διαφορά είναι στο Μαρκόπουλο τα σημεία που υποδεικνύουν γειτνίαση μετρήσεων-προλέξεων είναι σαφώς λιγότερα από τα Σπάτα.

Συνεχίζοντας τη διερεύνηση συσχετίσεων μεταξύ των κατανομών εκτιμήσεων - μετρήσεων των NO_x και PM_{10} , καθώς και τη σύγκριση με τις εξηγήσεις των αποκλίσεων που διατυπώθηκαν για το σταθμό των Σπάτων, στα ακόλουθα γραφήματα παρουσιάζονται τα διαγράμματα στατιστικής ανάλυσης (ιστογράμματα και διαγράμματα ποσοστημορίων).



Γράφημα 134: Ιστόγραμμα της κατανομής μετρήσεων (επάνω αριστερά), της κατανομής αποτελεσμάτων EDMS (επάνω δεξιά) και διάγραμμα ποσοστημορίων των δύο κατανομών (κάτω) για την ωριαία μέση συγκέντρωση NO_x στο σταθμό του Μαρκόπουλου.



Γράφημα 135: Ιστόγραμμα της κατανομής μετρήσεων (επάνω αριστερά), της κατανομής αποτελεσμάτων EDMS (επάνω δεξιά) και διάγραμμα ποσοστημορίων των δύο κατανομών (κάτω) για την ωριαία μέση συγκέντρωση PM₁₀ στο σταθμό του Μαρκόπουλου.

Τα γραφήματα στατιστικής ανάλυσης της κατανομής μετρήσεων και αποτελεσμάτων EDMS για τα NO_x και τα PM_{10} στο σταθμό του Μαρκόπουλου παρουσιάζουν σημαντικές αναλογίες με τα αντίστοιχα για το σταθμό Σπάτων, καθώς και ορισμένες αξιοσημείωτες διαφορές:

- *Η στατιστικά σημαντική διαφοροποίηση ανάμεσα στα αποτελέσματα των υπολογισμών και στις μετρήσεις παρατηρείται και στο Μαρκόπουλο. Στο συγκεκριμένο σταθμό μάλιστα, οι διαφοροποιήσεις είναι ακόμη σημαντικότερες από ότι στα Σπάτα και τα ιστογράμματα των κατανομών τόσο για τα NO_x όσο και για τα PM_{10} δείχνουν αυξημένες σχετικές συχνότητες μετρήσεων σε σχετικώς υψηλά επίπεδα τιμών, που δεν είναι ευλόγως πιθανό να προέρχονται από το αεροδρόμιο.*
- *Οι κατανομές των μετρήσεων NO_x είναι σαφώς διαφορετικές μεταξύ Μαρκόπουλου και Σπάτων, παρότι οι κατανομές των αποτελεσμάτων EDMS μοιάζουν. Πράγματι, η κατανομή των αποτελεσμάτων του EDMS για τα NO_x στο Μαρκόπουλο (πάνω δεξιά ιστόγραμμα στο γράφημα 137) μοιάζει αρκετά με την ανάλογη κατανομή στα Σπάτα (ανάλογο ιστόγραμμα στο γράφημα 124), υπό την έννοια ότι η σχετική συχνότητα των μηδενικών και πολύ μικρών τιμών είναι κυρίαρχη, αλλά και ότι υπάρχουν τιμές, μικρής αλλά όχι αμελητέας συχνότητας, που εκτείνονται ως τα 65-70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Αντιθέτως, η κατανομή των μετρήσεων ωριαίας συγκέντρωσης NO_x στο Μαρκόπουλο (πάνω αριστερά ιστόγραμμα στο γράφημα 135) έχει λίγες μηδενικές τιμές, ελάχιστες μικρές (ως 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) και σημαντικό πλήθος μεγαλύτερων τιμών, που δεν διαφαίνεται να συνδέονται αιτιωδώς με το αεροδρόμιο. Η διαφορά αυτή, η οποία συζητείται αναλυτικότερα παρακάτω, αντανακλάται άμεσα στο διάγραμμα ποσοστημορίων για το Μαρκόπουλο, το οποίο δεν παρουσιάζει συνάφεια με το αντίστοιχο για τα Σπάτα.*
- *Ανάλογες διαπιστώσεις ισχύουν και για τα PM_{10} . Η κατανομή αποτελεσμάτων του EDMS για τα σωματίδια στο Μαρκόπουλο (πάνω δεξιά ιστόγραμμα στο γράφημα 135) μοιάζει αρκετά με την ανάλογη κατανομή στα Σπάτα (ανάλογο ιστόγραμμα στο γράφημα 125), αλλά οι κατανομές των μετρήσεων είναι διαφορετικές. Συγκεκριμένα, οι μετρήσεις στο Μαρκόπουλο περιέχουν σημαντικό μερίδιο υψηλών τιμών PM_{10} , από 30 ως 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, οι οποίες δεν είναι καθόλου εύλογο να σχετίζονται με το αεροδρόμιο, με βάση την απόσταση και τις περιορισμένες εκπομπές των αερολιμενικών δραστηριοτήτων.*

Συνθέτοντας τις παραπάνω παρατηρήσεις, προκύπτει η εξής διαπίστωση: τόσο οι συγκεντρώσεις NO_x όσο και αυτές των PM_{10} κυμαίνονται σε υψηλότερες στάθμες από ότι στα Σπάτα, παρότι ο σταθμός απέχει από το αεροδρόμιο 1,3 km περισσότερο (σχήμα 10, σελ. 186). Αυτό το στοιχείο, σε συνδυασμό με τις ισορροπιακές καμπύλες συγκέντρωσης NO_x και PM_{10} (από γράφημα 20 στη σελ. 48 έως και γράφημα 33) οι οποίες στη μεγάλη τους πλειοψηφία αφήνουν ανεπηρέαστο το Μαρκόπουλο, υποδηλώνουν ότι οι μετρούμενες συγκεντρώσεις NO_x στον ομώνυμο σταθμό δεν σχετίζονται άμεσα με τη λειτουργία του

αερολιμένα. Λαμβάνοντας υπόψη ότι, ο σταθμός παρακολούθησης ποιότητας αέρα στο Μαρκόπουλο είναι τοποθετημένος σε κεντρικό σημείο της πόλης και επομένως μετρά τις συγκεντρώσεις αέριων ρύπων από όλες τις αστικές δραστηριότητες, στις οποίες τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο κυριαρχεί η οδική κυκλοφορία, συνάγεται ότι οι μετρούμενες συγκεντρώσεις NO_x στο Μαρκόπουλο δεν προσφέρονται για λεπτομερείς συγκρίσεις με τα αποτελέσματα του EDMS για το σημείο εκείνο.

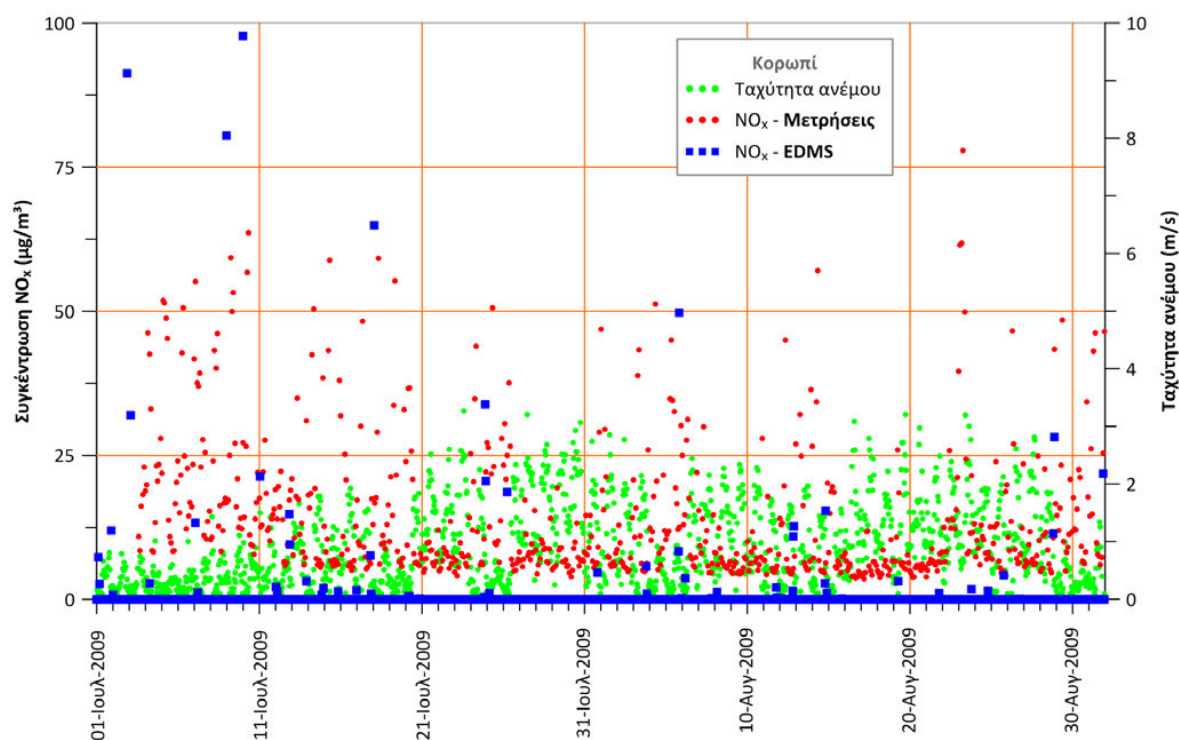


Σχήμα 12: Η θέση του σταθμού παρακολούθησης ποιότητας αέρα στο Μαρκόπουλο.

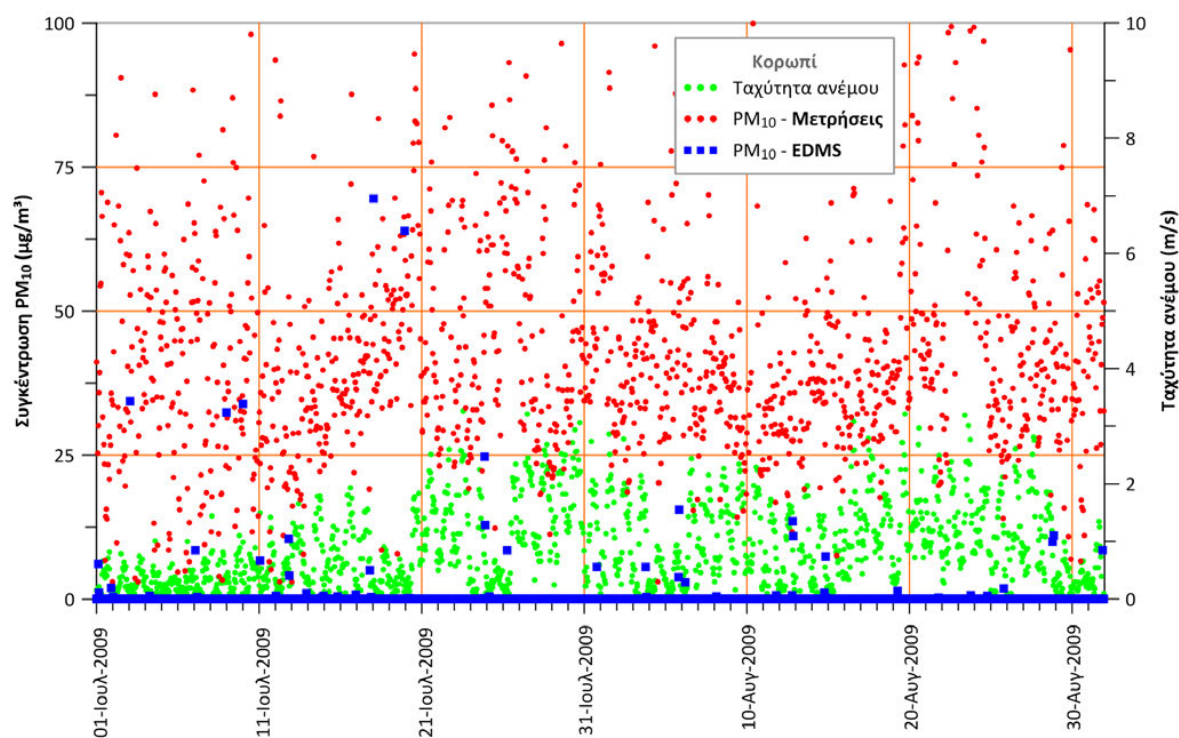
Μια ειδικότερη διαπίστωση αφορά στις σχετικώς υψηλές συγκεντρώσεις PM_{10} στο Μαρκόπουλο, οι οποίες είναι σαφώς υψηλότερες των Σπάτων. Η πιθανότερη πηγή εκτιμάται ότι εντοπίζεται στους εκτενείς χώρους λατομικής δραστηριότητας, σε απόσταση ~ 3 km από το σταθμό παρακολούθησης.

6.4.2.3. Σταθμός Κορωπίου

Ο σταθμός παρακολούθησης της ποιότητας αέρα στο Κορωπί βρίσκεται σε απόσταση 6,43 km νοτιοανατολικά του ΔΑΑ (σχήμα 10, σελ. 186) και μετρά τις συγκεντρώσεις των ρύπων NO_x και PM_{10} . Η σύγκριση μεταξύ προλέξεων και μετρήσεων για τους ρύπους αυτούς παρουσιάζεται στα ακόλουθα δύο γραφήματα, στα οποία απεικονίζεται η διακύμανση μετρήσεων και εκτιμήσεων σε ωριαία βάση. Ταυτόχρονα, παρουσιάζεται η μέση ωριαία ταχύτητα ανέμου, στο δεξί κάθετο άξονα.



Γράφημα 136: Μετρήσεις και εκτιμήσεις ωριαίας μέσης συγκέντρωσης NO_x στο σταθμό Κορωπίου.



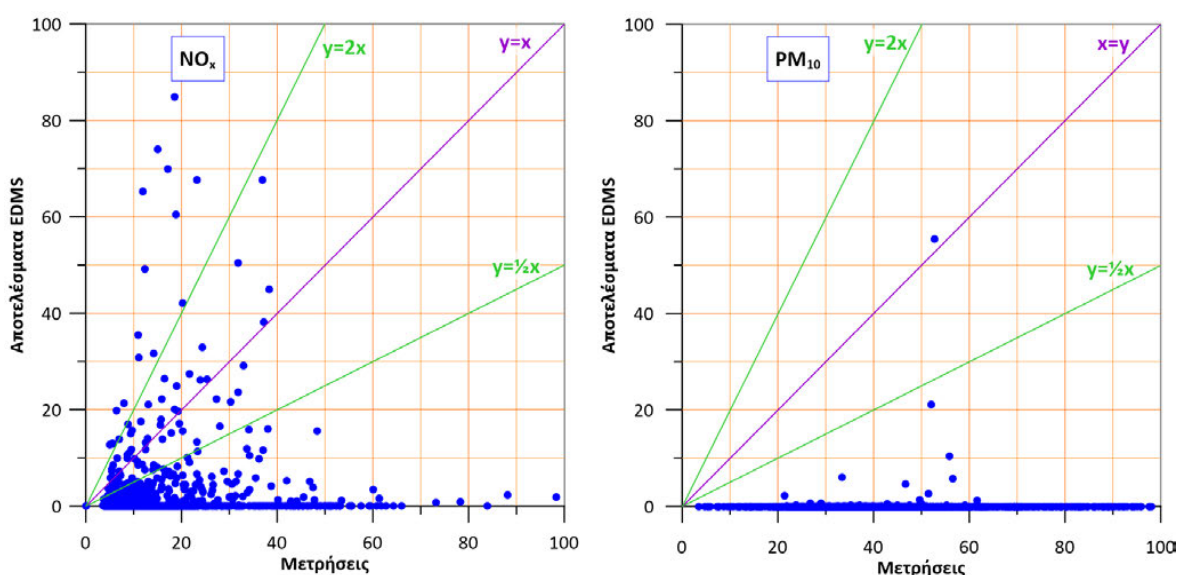
Γράφημα 137: Μετρήσεις και εκτιμήσεις ωριαίας μέσης συγκέντρωσης PM_{10} στο σταθμό Κορωπίου.

Σε αντίθεση με το Μαρκόπουλο, αλλά και με ορατή διαφοροποίηση από τα Σπάτα, οι ταχύτητες ανέμου στο Κορωπί στη διάρκεια του διμήνου Ιουλίου-Αυγούστου 2009 κυμάνθηκαν σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα.

Παρατηρείται ότι και στο Κορωπί τα PM_{10} κινούνται σε υψηλά επίπεδα, συγκριτικά με τα Σπάτα, στοιχείο που εμμέσως υποδεικνύει την πολύ περιορισμένη συσχέτιση της ποιότητας του αέρα στον οικισμό με τη λειτουργία του αεροδρομίου. Τα NO_x παρουσιάζουν περιορισμένο αριθμό εξάρσεων, κινούμενα στην πλειονότητά των μετρήσεων κάτω από το επίπεδο των $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Η στατιστική ανάλυση των κατανομών εκτιμήσεων - μετρήσεων των NO_x και PM_{10} διαφαίνεται χρήσιμη και στην περίπτωση του Κορωπίου, κυρίως για να εξεταστεί εάν ενισχύονται ή όχι οι υποθέσεις εξήγησης των αποκλίσεων που διατυπώθηκαν για το σταθμό των Σπάτων.

Στο πλαίσιο αυτό, η διασπορά μετρήσεων-εκτιμήσεων στο σταθμό του Κορωπίου για τους δύο αυτούς ρύπους παρουσιάζονται στο επόμενο διπλό γράφημα.



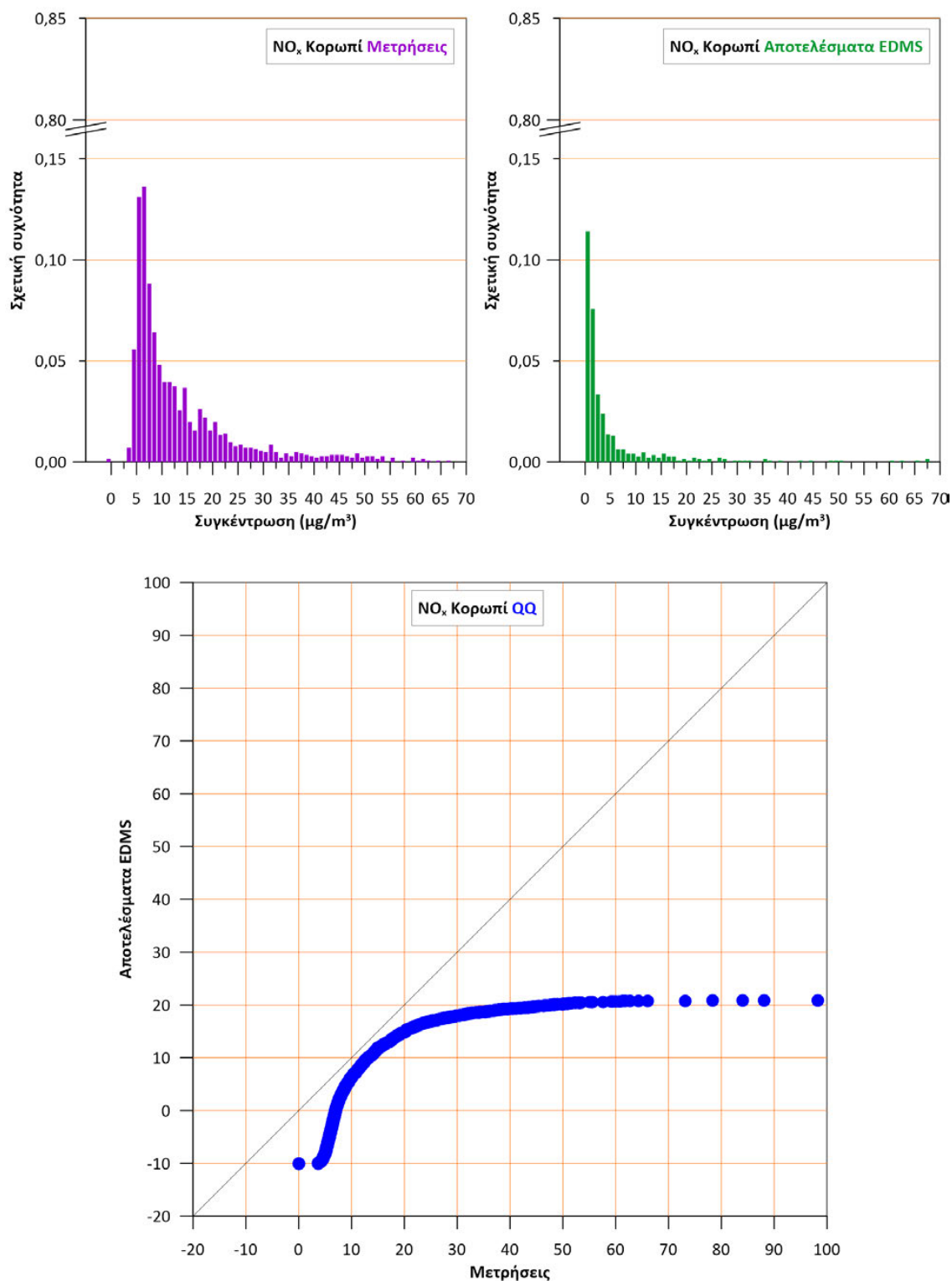
Γράφημα 138: Διασπορά μετρήσεων-εκτιμήσεων ωριαίας μέσης συγκέντρωσης για τους NO_x και PM_{10} στο σταθμό Κορωπίου.

Η διασπορά μετρήσεων-εκτιμήσεων για τα NO_x στο Κορωπί παρουσιάζει αναλογία με αυτή στα Σπάτα (επάνω δεξιά διάγραμμα στο γράφημα 121, σελ. 192) υπό την έννοια ότι ένα αξιοσημείωτο μερίδιο των σημείων κινούνται κοντά στη γραμμή $x=y$ και συγκεκριμένα εντός των γραμμών $y=2x$ και $y=1/2x$, υποδεικνύοντας γειτνίαση μετρήσεων-προλέξεων. Η διαφορά είναι ότι τα σημεία αυτά στο Κορωπί αφορούν χαμηλότερα επίπεδα τιμών NO_x , καθότι συγκεντρώνονται κάτω των $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ενώ στα Σπάτα εξαπλώνονταν έως και το επίπεδο των $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

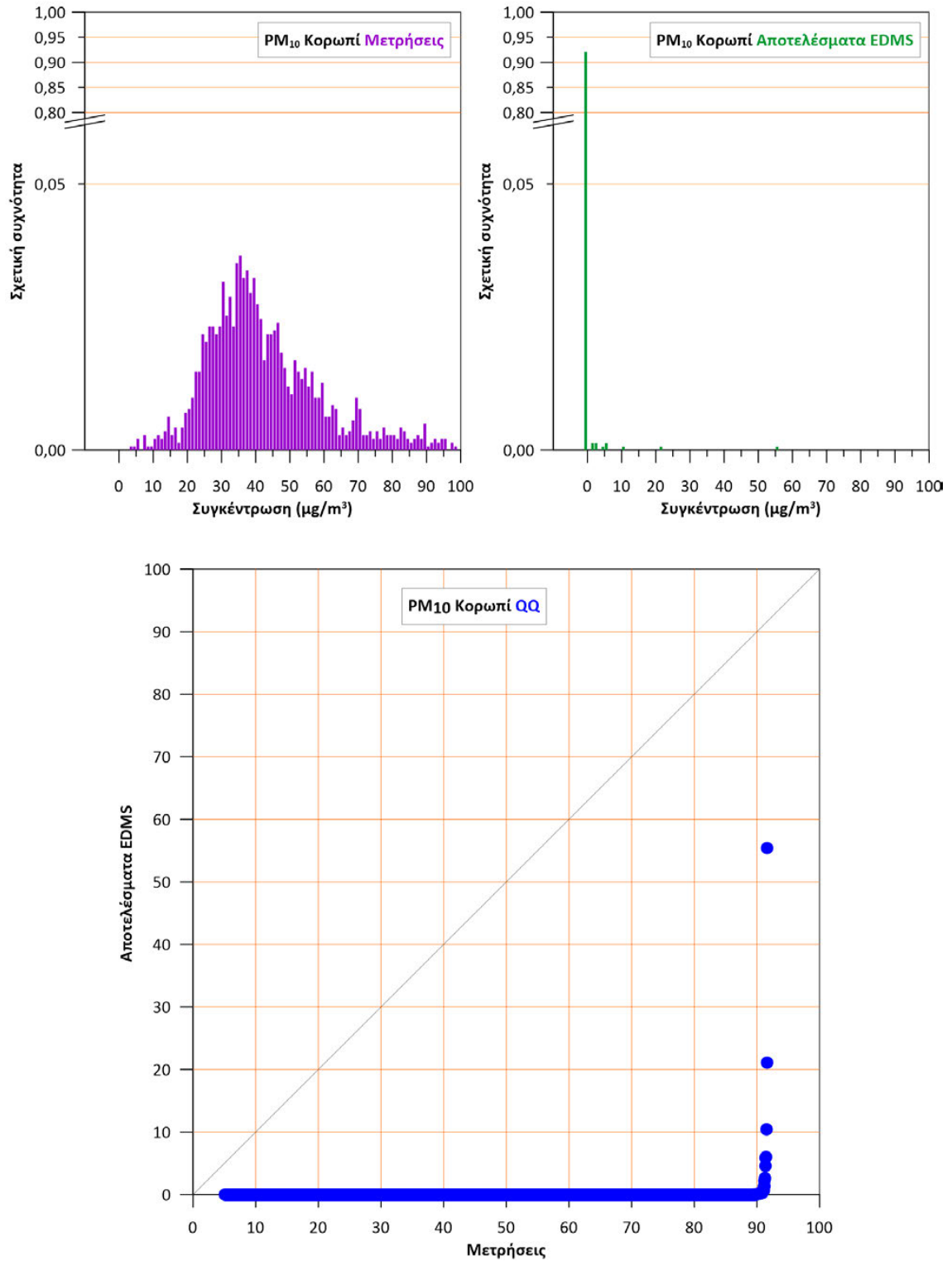
Ως προς τη διασπορά μετρήσεων-εκτιμήσεων για τα PM_{10} στο Κορωπί, η εικόνα παρουσιάζει σημαντικές διαφορές από αυτή στα Σπάτα (κάτω αριστερά διάγραμμα στο γράφημα 121, σελ. 192). Τα αποτελέσματα του EDMS συσσωρεύονται στη μηδενική τεταγμένη, που αντιστοιχεί

σε μηδενικά αποτελέσματα EDMS, με τετμημένες, δηλαδή τιμές μέτρησης, που εξαπλώνονται σε όλο το εύρος από 5 έως και 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ενώ οι περιπτώσεις γειτνίασης πρόλεξης - μέτρησης είναι ελάχιστες και πιθανότατα συμπτωματικές.

Συνεχίζοντας τη διερεύνηση συσχετίσεων μεταξύ των κατανομών εκτιμήσεων - μετρήσεων των NO_x και PM_{10} στο Κορωπί, στα ακόλουθα γραφήματα παρουσιάζονται τα διαγράμματα στατιστικής ανάλυσης (ιστογράμματα και διαγράμματα ποσοστημορίων).



Γράφημα 139: Ιστόγραμμα της κατανομής μετρήσεων (επάνω αριστερά), της κατανομής αποτελεσμάτων EDMS (επάνω δεξιά) και διάγραμμα ποσοστημορίων των δύο κατανομών (κάτω) για την ωριαία μέση συγκέντρωση NO_x στο σταθμό του Κορωπίου.



Γράφημα 140: Ιστόγραμμα της κατανομής μετρήσεων (επάνω αριστερά), της κατανομής αποτελεσμάτων EDMS (επάνω δεξιά) και διάγραμμα ποσοστημορίων των δύο κατανομών (κάτω) για την ωριαία μέση συγκέντρωση PM₁₀ στο σταθμό του Κορωπίου.

Τα γραφήματα στατιστικής ανάλυσης της κατανομής μετρήσεων και αποτελεσμάτων EDMS για τα NO_x και τα PM_{10} στο Κορωπί παρουσιάζουν σημαντικές αναλογίες με τα αντίστοιχα για τα Σπάτα και το Μαρκόπουλο, καθώς και ορισμένες αξιοσημείωτες διαφορές:

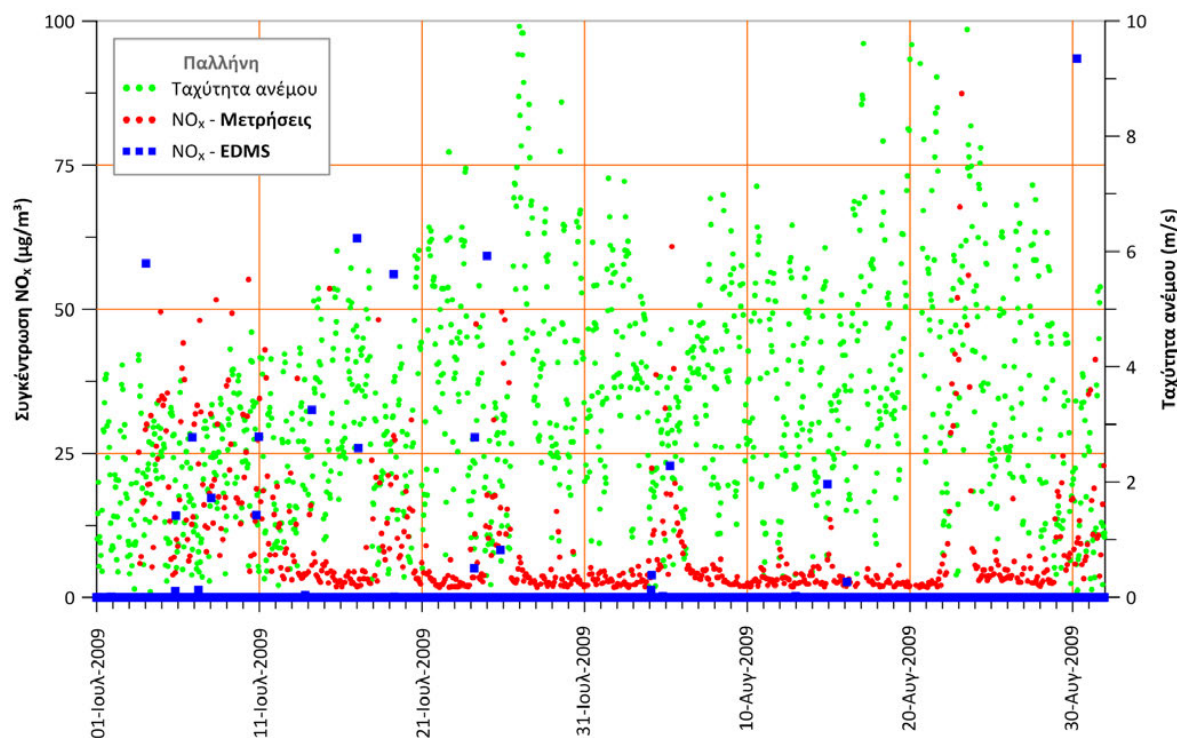
- *Η στατιστικά σημαντική διαφοροποίηση ανάμεσα στα αποτελέσματα των υπολογισμών και στις μετρήσεις παρατηρείται και στο Κορωπί. Στο συγκεκριμένο σταθμό μάλιστα, οι διαφοροποιήσεις είναι ακόμη σημαντικότερες από ότι στα Σπάτα, ιδίως για τα PM_{10} και λιγότερο για τα NO_x . Πάντως, και για τους δύο ρύπους, τα ιστογράμματα των κατανομών δείχνουν αυξημένες σχετικές συχνότητες μετρήσεων σε σχετικώς υψηλά επίπεδα τιμών, που δεν είναι ευλόγως πιθανό να προέρχονται από το αεροδρόμιο.*
- *Τόσο οι κατανομές των μετρήσεων NO_x όσο και αυτές των αποτελεσμάτων EDMS μοιάζουν αρκετά μεταξύ Κορωπίου και Σπάτων. Πράγματι, η κατανομή των αποτελεσμάτων του EDMS για τα NO_x στο Κορωπί (πάνω δεξιά ιστόγραμμα στο γράφημα 139) μοιάζει με την ανάλογη κατανομή στα Σπάτα (ανάλογο ιστόγραμμα στο γράφημα 124), ως προς το ότι η σχετική συχνότητα των μηδενικών τιμών είναι κυρίαρχη· παρότι στο Κορωπί οι πολύ μικρές τιμές παρουσιάζουν μια σαφώς ομαλότερη φθίνουσα κατανομή από ότι στα Σπάτα, αμφότερες οι κατανομές περιέχουν τιμές, πολύ μικρής συχνότητας, που εκτείνονται ως τα $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Στις κατανομές των μετρήσεων ωριαίας συγκέντρωσης NO_x , στο Κορωπί (πάνω αριστερά ιστόγραμμα στο γράφημα 139) η σχετική συχνότητα των μηδενικών τιμών είναι σαφώς μικρότερη απ' ότι στα Σπάτα, προς όφελος των μικρών τιμών, από 1 έως $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, των οποίων οι συχνότητα φθίνει με ήπια μορφή, ενώ στα Σπάτα οι ανάλογες σχετικές συχνότητες είναι πολύ μικρότερες. Η συνάφεια των κατανομών αντανακλάται και στα διαγράμματα ποσοστημορίων, οι καμπύλες των οποίων παρουσιάζουν ιδιαίτερη ομοιότητα.*
- *Αντίθετα, οι κατανομές μετρήσεων και εκτιμήσεων για τα PM_{10} παρουσιάζουν μικρότερη ομοιότητα. Η κατανομή των μετρήσεων στο Κορωπί (πάνω αριστερά ιστόγραμμα στο γράφημα 140) μοιάζει αρκετά με την κατανομή στα Σπάτα (ανάλογο ιστόγραμμα στο γράφημα 125), υπό την έννοια της μέγιστης σχετικής συχνότητας στη σχετικώς υψηλή συγκέντρωσης της τάξης των $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, γύρω από την οποία, στο διάστημα 10 ως $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ κατανέμεται ένα σημαντικό πλήθος τιμών, ενώ αξιοσημείωτος είναι και ο αριθμός των μετρήσεων σε υψηλότερες τιμές. Ανάλογη ομοιότητα παρατηρείται με την κατανομή μετρήσεων PM_{10} στο Μαρκόπουλο. Οι κατανομές των αποτελεσμάτων EDMS ωστόσο, παρουσιάζουν διαφορές: αν εξαιρεθεί η σχετική συχνότητα της μηδενικής τιμής, που είναι εξίσου μεγάλη και στους δύο σταθμούς, στο Κορωπί οι μη μηδενικές τιμές είναι ελάχιστες και σαφώς πολύ λιγότερες από ότι στα Σπάτα. Αυτό βέβαια είναι αναμενόμενο λόγω της μεγαλύτερης απόστασης από το αεροδρόμιο και των περιορισμένων εκπομπών των αερολιμενικών δραστηριοτήτων. Η διαφορά στις*

κατανομές μετρήσεων και εκτιμήσεων PM_{10} στους δύο σταθμούς αντανακλάται και στα διαγράμματα ποσοστημορίων, οι καμπύλες των οποίων παρουσιάζουν τελείως διαφορετική μορφή.

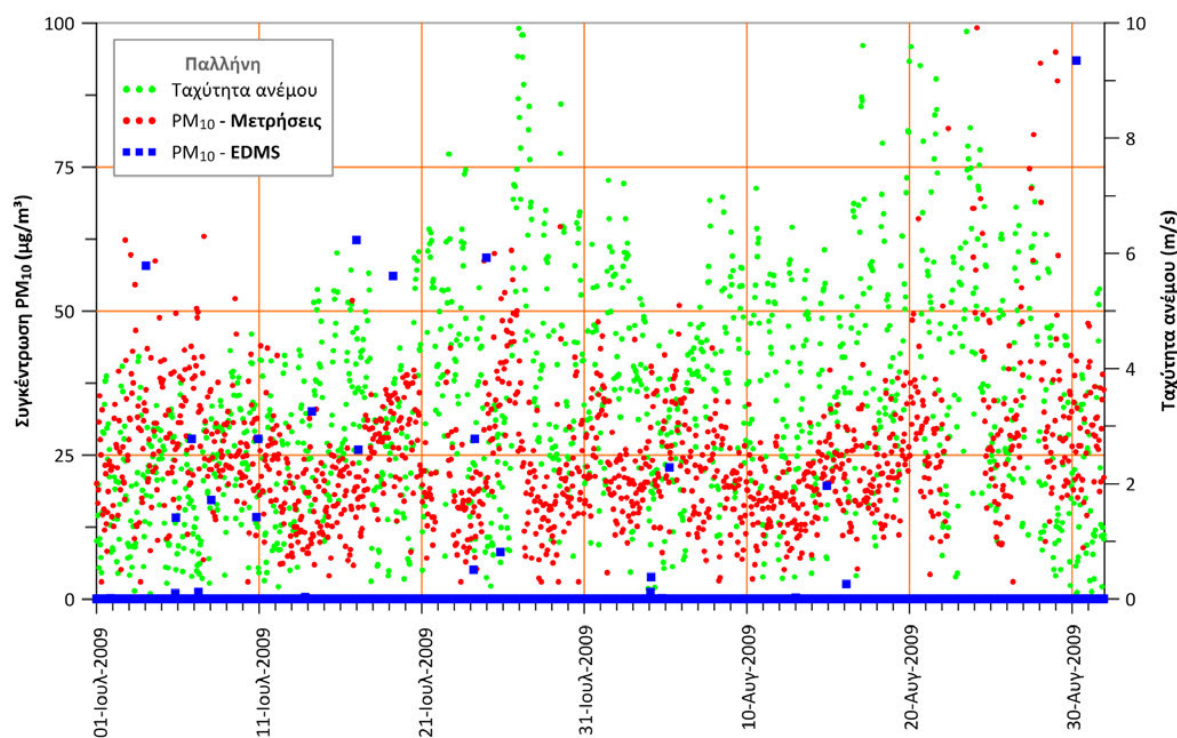
Συνθέτοντας τις παραπάνω παρατηρήσεις, προκύπτει η εξής διαπίστωση: τόσο οι συγκεντρώσεις NO_x όσο και αυτές των PM_{10} στο Κορωπί κυμαίνονται σε ελαφρώς υψηλότερες στάθμες από ότι στα Σπάτα, παρότι ο σταθμός απέχει από το αεροδρόμιο 1,43 km περισσότερο (σχήμα 10, σελ. 186). Το στοιχείο αυτό, σε συνδυασμό με τις ισορροπιακές καμπύλες συγκέντρωσης NO_x και PM_{10} (από γράφημα 20 στη σελ. 48 έως και γράφημα 33) οι οποίες στη μεγάλη τους πλειοψηφία αφήνουν ανεπηρέαστο το Κορωπί, υποδηλώνουν ότι οι μετρούμενες συγκεντρώσεις των ρύπων αυτών στον ομώνυμο σταθμό δεν σχετίζονται ευθέως με τη λειτουργία του αερολιμένα. Λαμβάνοντας υπόψη ότι, ο σταθμός παρακολούθησης ποιότητας αέρα στο Κορωπί είναι τοποθετημένος στο Κέντρο Υγείας, σε απόσταση 1,5 km από την Αττική Οδό, διαφαίνεται ότι οι μετρήσεις του είναι επηρεασμένες από την κυκλοφορία στο συγκεκριμένο αυτοκινητόδρομο, κάτι που γενικά μπορεί να εξηγήσει τις αυξημένες τιμές σε σύγκριση με τα αποτελέσματα του EDMS για το σημείο εκείνο.

6.4.2.4. Σταθμός Παλλήνης

Ο σταθμός παρακολούθησης της ποιότητας αέρα στην Παλλήνη βρίσκεται σε απόσταση 9,35 km βόρεια-βορειοδυτικά του ΔΑΑ (σχήμα 10, σελ. 186) και μετρά τις συγκεντρώσεις των ρύπων NO_x και PM_{10} . Η σύγκριση μεταξύ προλέξεων και μετρήσεων για τους ρύπους αυτούς παρουσιάζεται στα ακόλουθα δύο γραφήματα, στα οποία απεικονίζεται η διακύμανση μετρήσεων και εκτιμήσεων σε ωριαία βάση. Ταυτόχρονα, παρουσιάζεται η μέση ωριαία ταχύτητα ανέμου, στο δεξί κάθετο άξονα.



Γράφημα 141: Μετρήσεις και εκτιμήσεις ωριαίας μέσης συγκέντρωσης NO_x στο σταθμό Παλλήνης.



Γράφημα 142: Μετρήσεις και εκτιμήσεις ωριαίας μέσης συγκέντρωσης PM_{10} στο σταθμό Παλλήνης.

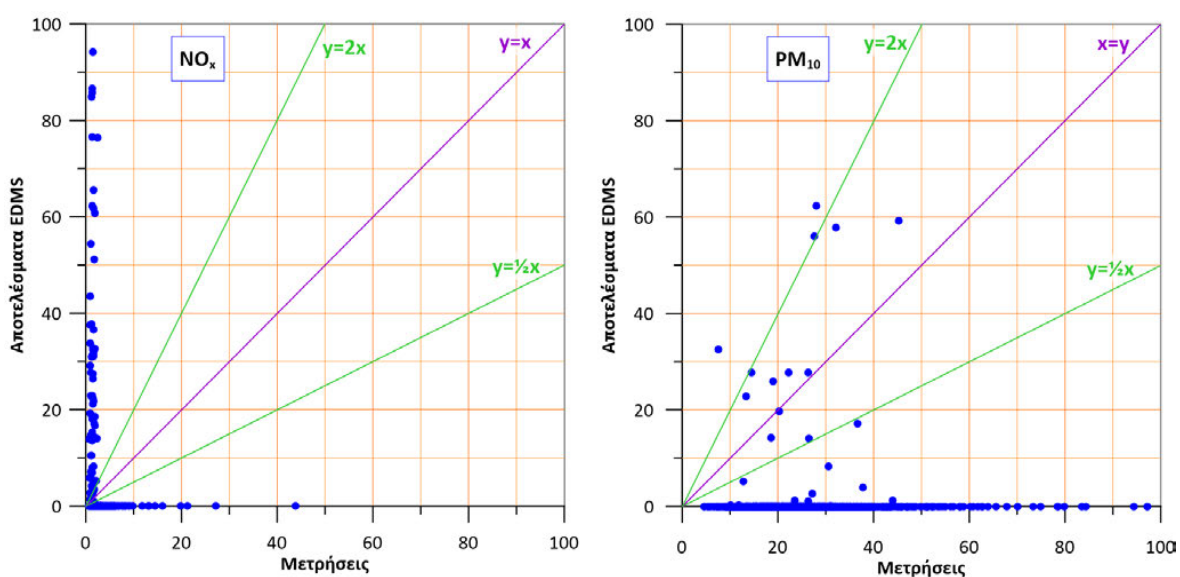
Σε αναλογία με το Μαρόκπουλο και τα Σπάτα, αλλά και με ορατή διαφοροποίηση από το Κορωπί, οι ταχύτητες ανέμου στην Παλλήνη στη διάρκεια του διμήνου Ιουλίου-Αυγούστου 2009 περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό ωρών με τιμές άνω των 3 m/s που ευνοούν την αραιώση

και τις χαμηλές συγκεντρώσεις ρύπων, ενώ ο αριθμός των ωρών με τιμές κάτω των 3 m/s είναι σαφώς μικρότερος.

Παρατηρείται ότι στην Παλλήνη τα PM_{10} κινούνται σε χαμηλότερα επίπεδα, συγκριτικά με τα Σπάτα το Μαρόκπουλο και το Κορωπί, ενώ η αντίστιξη της συγκέντρωσής τους με την ταχύτητα ανέμου είναι εμφανέστερη απ' ό,τι στους προηγούμενους σταθμούς. Συγχρόνως, τα NO_x παρουσιάζουν πολύ περιορισμένο αριθμό εξάρσεων, κινούμενα στη μεγάλη πλειονότητά των μετρήσεων κάτω από το επίπεδο των $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Τα δύο αυτά στοιχεία, σε συνδυασμό με τη σχετικώς μεγάλη απόσταση από τον ΔΑΑ, εμμέσως υποδεικνύουν την πολύ περιορισμένη συσχέτιση της ποιότητας του αέρα στην περιοχή της Παλλήνης με τη λειτουργία του αεροδρομίου.

Η στατιστική ανάλυση των κατανομών εκτιμήσεων - μετρήσεων των NO_x και PM_{10} διαφαίνεται οριακά χρήσιμη και στην περίπτωση της Παλλήνης, κυρίως για να εξεταστεί εάν ενισχύονται ή όχι οι υποθέσεις εξήγησης των αποκλίσεων που διατυπώθηκαν για το σταθμό των Σπάτων.

Στο πλαίσιο αυτό, η διασπορά μετρήσεων-εκτιμήσεων στο σταθμό της Παλλήνης για τους δύο αυτούς ρύπους παρουσιάζονται στο επόμενο διπλό γράφημα.

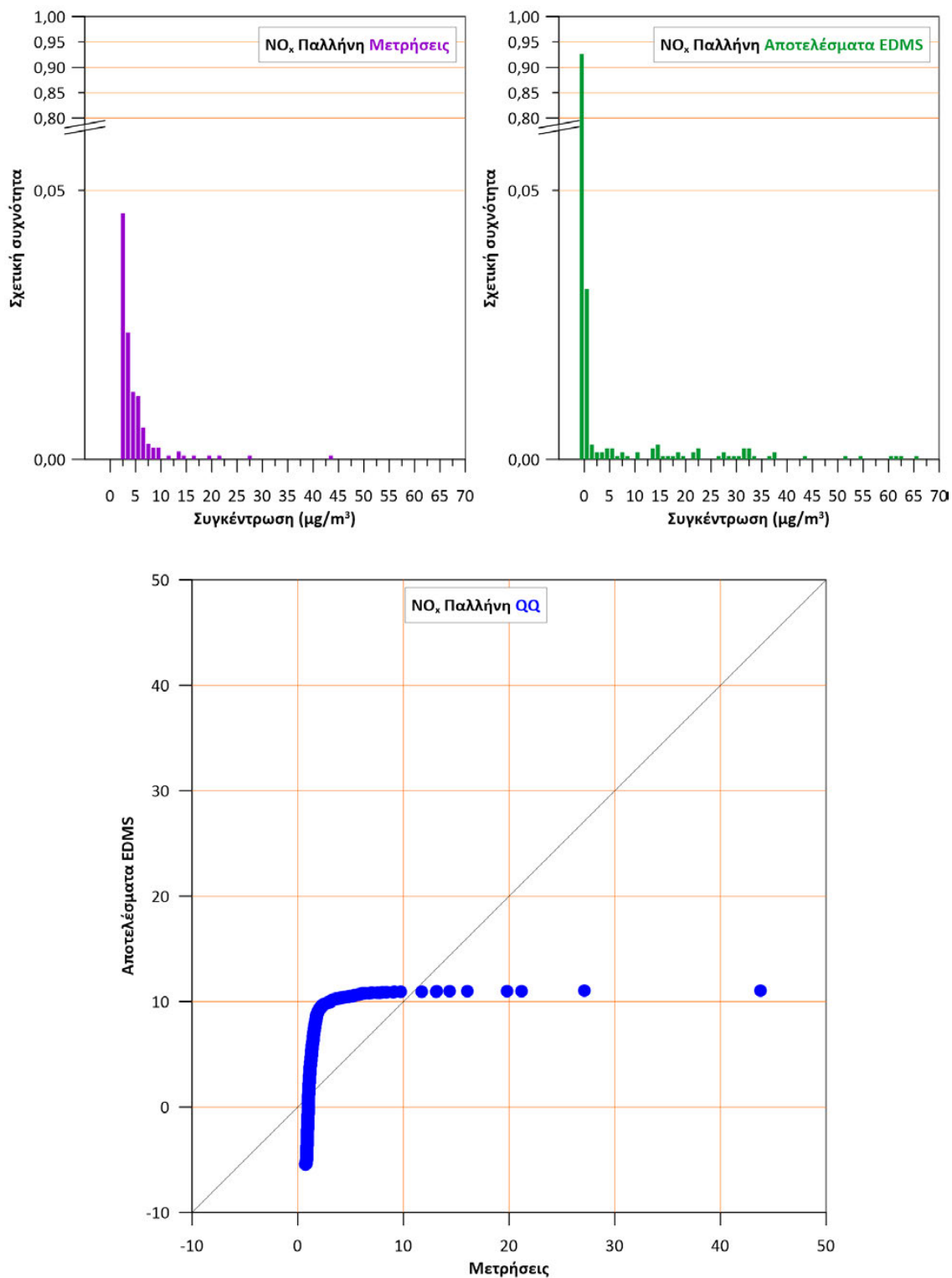


Γράφημα 143: Διασπορά μετρήσεων-εκτιμήσεων ωριαίας μέσης συγκέντρωσης για τους NO_x και PM_{10} στο σταθμό Παλλήνης.

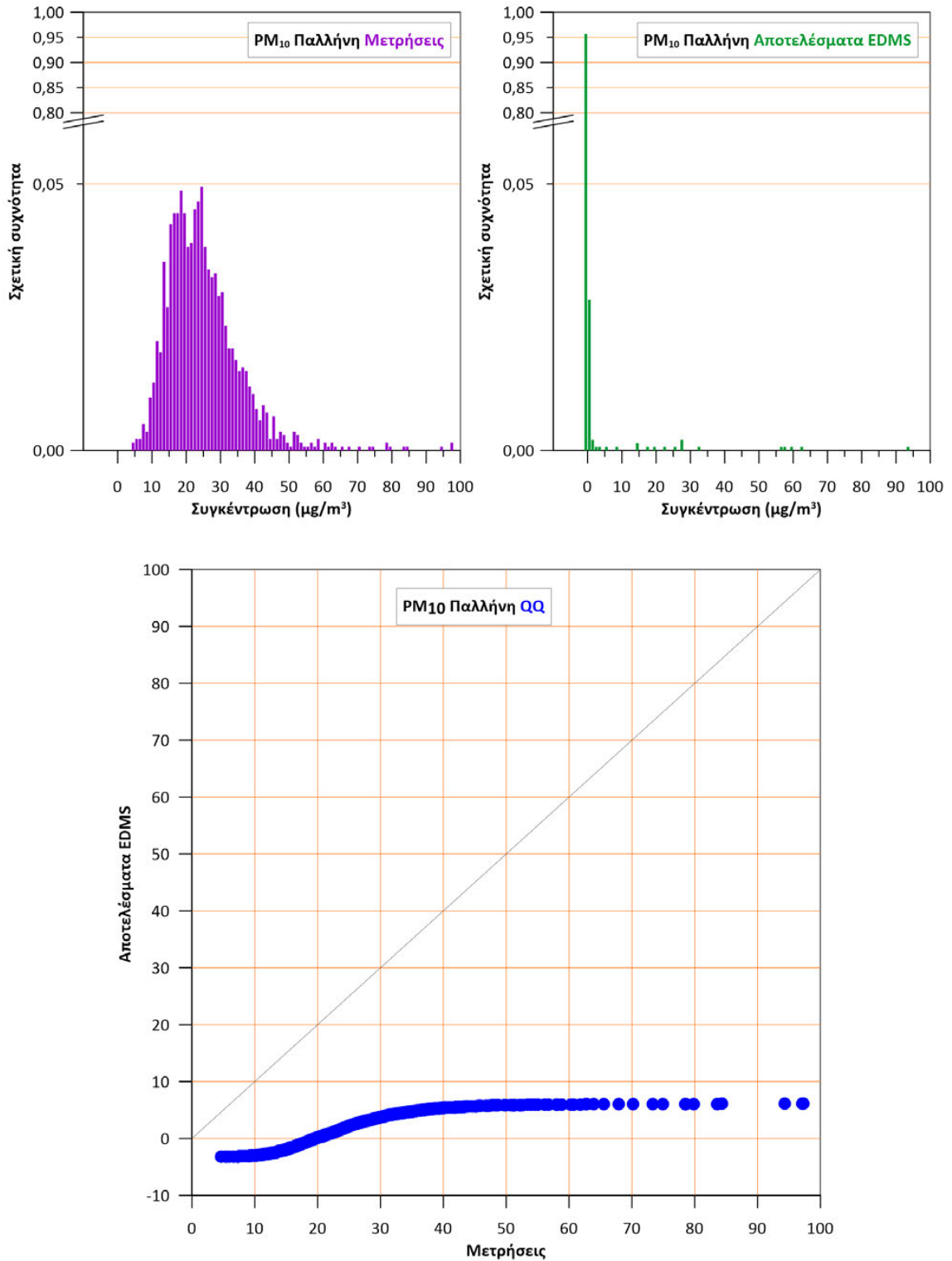
Η διασπορά μετρήσεων-εκτιμήσεων για τα NO_x στην Παλλήνη υποδεικνύει πλήρη ανεξαρτησία των δύο χρονοσειρών, αφού κανένα σημείο δεν βρίσκεται κοντά στη γραμμή $x=y$ ή έστω εντός των γραμμών $y=2x$ και $y=1/2x$, ενώ δεν διαπιστώνεται καμία αναλογία με την αντίστοιχη διασπορά στα Σπάτα (επάνω δεξιά διάγραμμα στο γράφημα 121, σελ. 192).

Ως προς τη διασπορά μετρήσεων-εκτιμήσεων για τα PM_{10} στην Παλλήνη, η εικόνα επίσης παρουσιάζει πλήρη διαφοροποίηση από αυτή στα Σπάτα (κάτω αριστερά διάγραμμα στο γράφημα 121, σελ. 192). Τα αποτελέσματα του EDMS συσσωρεύονται στη μηδενική τεταγμένη, που αντιστοιχεί σε μηδενικά αποτελέσματα EDMS, με τετμημένες, δηλαδή τιμές μέτρησης, που συσσωρεύονται κατά το μεγαλύτερο μέρος τους κάτω των $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ενώ υπάρχουν και μερικές τιμές έως τα $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Πάντως, οι περιπτώσεις γειννίασης πρόλεξης - μέτρησης είναι ελάχιστες και πιθανότατα συμπτωματικές.

Συνεχίζοντας τη διερεύνηση συσχετίσεων μεταξύ των κατανομών εκτιμήσεων - μετρήσεων των NO_x και PM_{10} στην Παλλήνη, στα ακόλουθα γραφήματα παρουσιάζονται τα διαγράμματα στατιστικής ανάλυσης (ιστογράμματα και διαγράμματα ποσοστημορίων).



Γράφημα 144: Ιστόγραμμα της κατανομής μετρήσεων (επάνω αριστερά), της κατανομής αποτελεσμάτων EDMS (επάνω δεξιά) και διάγραμμα ποσοστημορίων των δύο κατανομών (κάτω) για την ωριαία μέση συγκέντρωση NO_x στο σταθμό της Παλλήνης.



Γράφημα 145: Ιστόγραμμα της κατανομής μετρήσεων (επάνω αριστερά), της κατανομής αποτελεσμάτων EDMS (επάνω δεξιά) και διάγραμμα ποσοστημορίων των δύο κατανομών (κάτω) για την ωριαία μέση συγκέντρωση PM₁₀ στο σταθμό της Παλλήνης.

Τα γραφήματα στατιστικής ανάλυσης της κατανομής μετρήσεων και αποτελεσμάτων EDMS για τα NO_x και τα PM_{10} στην Παλλήνη παρουσιάζουν περιορισμένες αναλογίες με τα αντίστοιχα για τα Σπάτα, το Μαρκόπουλο και το Κορωπί. Συγκεκριμένα:

- *Η στατιστικά σημαντική διαφοροποίηση ανάμεσα στα αποτελέσματα των υπολογισμών και στις μετρήσεις παρατηρείται και στην Παλλήνη. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο, αφού πρόκειται για τον πιο απομακρυσμένο από το ΔΑΑ σταθμό ποιότητας αέρα. Στο συγκεκριμένο σταθμό μάλιστα, όπως επίσης ήταν αναμενόμενο, οι διαφοροποιήσεις είναι ακόμη σημαντικότερες από ότι στα Σπάτα, ιδίως για τα PM_{10} .*
- *Τόσο οι κατανομές των μετρήσεων NO_x όσο και αυτές των αποτελεσμάτων EDMS διαφέρουν αρκετά από τις αντίστοιχες τους στα Σπάτα και στους άλλους δύο σταθμούς. Στην Παλλήνη, οι μετρήσεις συγκεντρώνονται σε τιμές κάτω των $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (επάνω αριστερά ιστόγραμμα στο γράφημα 144) ενώ οι εκτιμήσεις του EDMS παρά την κυρίαρχη σχετική συχνότητα των μηδενικών τιμών, περιλαμβάνουν, μικρές μεν υπαρκτές δε, συχνότητες τιμών από 10 ως $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (επάνω δεξιά ιστόγραμμα στο ίδιο γράφημα). Η διαφορά αυτή αντανακλάται και στο διάγραμμα ποσοστημοριών.*
- *Οι κατανομές μετρήσεων και εκτιμήσεων για τα PM_{10} παρουσιάζουν σαφείς διαφορές μεταξύ τους και αδρές αναλογίες με τις αντίστοιχες τους στα Σπάτα, στο Μαρκόπουλο και στο Κορωπί. Η κατανομή των μετρήσεων PM_{10} στην Παλλήνη (επάνω αριστερά ιστόγραμμα στο γράφημα 145) ενέχει αναλογίες με τις αντίστοιχες κατανομές στους τρεις προηγούμενους σταθμούς, υπό την έννοια της μέγιστης σχετικής συχνότητας σε μια σχετικώς υψηλή τιμή της τάξης των $20\text{-}30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, γύρω από την οποία, στο διάστημα 5 ως $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ κατανέμεται ένα σημαντικό πλήθος τιμών, υπό το πρίσμα βέβαια που προαναφέρθηκε, ότι δηλαδή οι μετρήσεις PM_{10} είναι γενικά αρκετά χαμηλότερες στην Παλλήνη από ότι στους άλλους τρεις σταθμούς. Η κατανομή των αποτελεσμάτων EDMS στην Παλλήνη χαρακτηρίζεται από την αναμενόμενη κυριαρχία της μηδενικής τιμής, ενώ και εδώ, όπως και στο Μαρκόπουλο και στο Κορωπί, οι μη μηδενικές τιμές είναι ελάχιστες και σαφώς πολύ λιγότερες από ότι στα Σπάτα, κάτι αναμενόμενο λόγω της μεγαλύτερης απόστασης από το αεροδρόμιο και των περιορισμένων εκπομπών των αερολιμενικών δραστηριοτήτων.*

Συνθέτοντας τις παραπάνω παρατηρήσεις, προκύπτει η εξής διαπίστωση: οι συγκεντρώσεις NO_x και κυρίως αυτές των PM_{10} στην Παλλήνη, είναι χαμηλότερες των άλλων σταθμών και οι στατιστικές κατανομές μεταξύ μετρήσεων και αποτελεσμάτων δεν έχουν συνάφεια μεταξύ τους. Η πάνω από διπλάσια απόσταση του σταθμού της Παλλήνης από το ΔΑΑ σε σχέση με το σταθμό των Σπάτων (σχήμα 10, σελ. 186) προϊδεάζει για πολύ χαμηλότερα επίπεδα συγκέντρωσης αέριων ρύπων, εάν αυτοί προέρχονταν μόνο από το αεροδρόμιο. Η εκτίμηση αυτή ενισχύεται από τις ισορροπαντικές καμπύλες συγκέντρωσης NO_x και PM_{10} (από

γράφημα 20 στη σελ. 48 έως και γράφημα 33) οι οποίες στη μεγάλη τους πλειοψηφία αφήνουν ανεπηρέαστη την Παλλήνη. Οι μετρούμενες συγκεντρώσεις των ρύπων αυτών στον ομώνυμο σταθμό, που είναι σαφώς μεγαλύτερες του κατά τα παραπάνω αναμενόμενου επιπέδου, υποδηλώνουν ότι δεν υφίσταται ευθεία συσχέτισή τους με τη λειτουργία του αερολιμένα. Λαμβάνοντας υπόψη ότι, ο σταθμός παρακολούθησης ποιότητας αέρα στην Παλλήνη είναι τοποθετημένος στο Λύκειο, στο ανατολικό όριο του κεντρικού αστικού ιστού και δίπλα στην κύρια ανατολική οδική αρτηρία εισόδου της πόλης, διαφαίνεται ότι οι μετρήσεις του είναι επηρεασμένες από την κυκλοφορία στη συγκεκριμένη οδό, κάτι που γενικά μπορεί να εξηγήσει τις αυξημένες τιμές σε σύγκριση με τα αποτελέσματα του EDMS για το σημείο εκείνο.

7. Ανάλυση ευαισθησίας: επίδραση των παραμέτρων εισόδου στα αποτελέσματα της υπολογιστικής προσομοίωσης

Έχοντας ολοκληρώσει μια σειρά υπολογισμών με στόχο την προσέγγιση των βασικών χαρακτηριστικών της πραγματικής κατάστασης ως προς την ποιότητα του αέρα γύρω από σημαντικούς αερολιμένες της χώρας, η εργασία προχωρά τώρα στη διερεύνηση των τρόπων απόκρισης του βασικού της εργαλείου, του συστήματος EDMS, στις μεταβολές των συνθηκών προσομοίωσης. Σε αυτή την ανάλυση ευαισθησίας, αναζητούνται οι μεταβολές στα τελικά αποτελέσματα, δηλαδή στο πεδίο συγκεντρώσεων ή στις συγκεντρώσεις σε χαρακτηριστικά σημεία, καθώς μεταβάλλονται οι βασικές παράμετροι των δεδομένων εισόδου, όπως η ταχύτητα του ανέμου, η ώρα του εικοσιτετράωρου, η θερμοκρασία, η νέφωση κ.ά.

Βασικός στόχος αυτής της ανάλυσης είναι να κατανοηθεί, κατά ένα ευθύ και έμπρακτο τρόπο, πρώτον η απόκριση ενός σύνθετου συστήματος προσομοίωσης, όπως είναι το EDMS, καθώς οι παράμετροι εισόδου μεταβάλλονται, δεύτερον η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται υπό διαφορετικές χρονικές κλίμακες και συνθήκες εισόδου, και τρίτον να εντοπισθούν οι συνθήκες εκείνες που καθιστούν τα αποτελέσματα χρήσιμα για διαδικασίες εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων ή για κανονιστικούς σκοπούς, όπως η επιβολή ορίων.

Η ανάλυση ευαισθησίας είναι η μελέτη του πώς μεταβάλλεται η έξοδος μιας υπολογιστικής διεργασίας καθώς μεταβάλλονται οι παράμετροι εισόδου της, ή, ισοδύναμα, η διερεύνηση της σχετικής σημαντικότητας των παραμέτρων εισόδου της διεργασίας με κριτήριο την επίδρασή τους στα αποτελέσματα εξόδου της.^[88,89] Η ανάλυση αυτή θεωρείται απαραίτητη σε περιπτώσεις ποσοτικοποίησης επιπτώσεων^[90] και διακρίνεται σε «τοπική», όπου εξετάζεται η επίδραση που έχουν στα αποτελέσματα εξόδου μικρές μεταβολές μιας μόνο παραμέτρου εισόδου, και σε «ολική», όπου εξετάζεται η επίδραση της σύγχρονης μεταβολής πολλών ή όλων των παραμέτρων εισόδου.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι έως σήμερα δημοσιευμένες εργασίες που σχετίζονται με την ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων υπολογιστικής προσομοίωσης αέριας ρύπανσης είναι σχετικά λίγες σε αριθμό και αναφέρονται είτε στο AERMOD,^[91-94] είτε στο μοντέλο μεγάλης κλίμακας Unified Danish Eulerian Model^[95-97] είτε, πολύ πρόσφατα, σε στοχαστικές τεκμηριώσεις χάραξης πολιτικής για την ποιότητα του αέρα με το μοντέλο SHERPA.^[98] Έτσι, η ακόλουθη ανάλυση ευαισθησίας, που αφορά στη συνολική απόδοση του EDMS, εμπεριέχει το στοιχείο της πρωτοτυπίας και έχει τη δυνατότητα να αποδειχθεί χρήσιμη σε μελλοντικές εργασίες εφαρμογής είτε του ίδιου του EDMS, είτε του AEDT (Aviation Environmental Design Tool) που έχει διαδεχθεί το EDMS αλλά βασίζεται στην ίδια υπολογιστική προσέγγιση της διασποράς των αέριων ρύπων,^[99] είτε άλλων μοντέλων που ενσωματώνουν υπολογισμούς διασποράς βάσει του AERMOD.

7.1. Ώρα της ημέρας

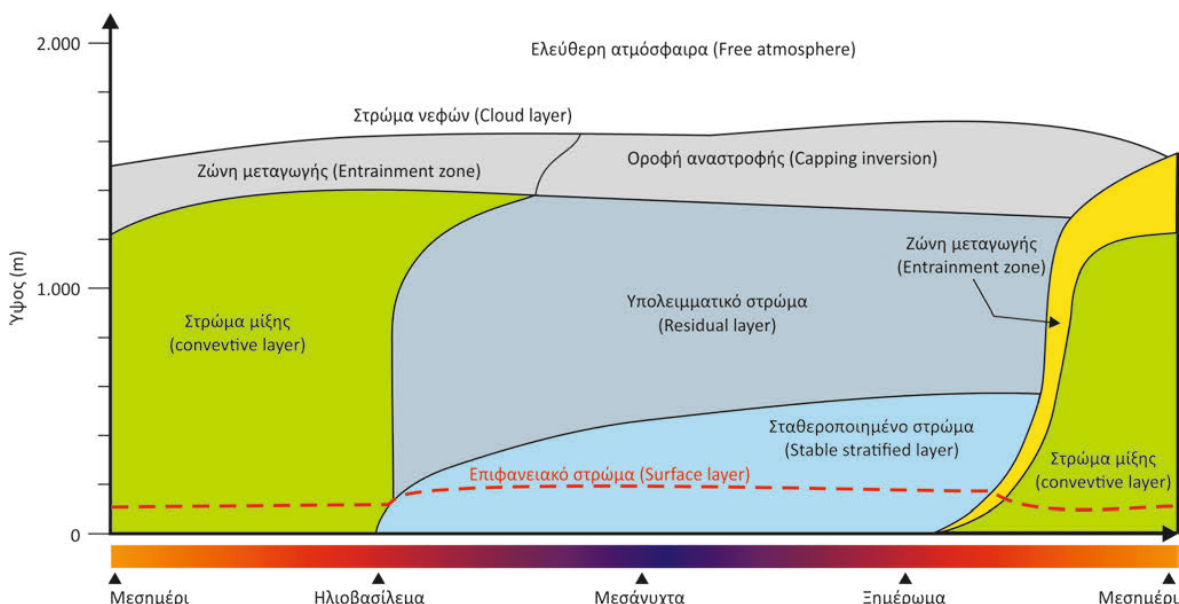
Στην ενότητα αυτή εξετάζεται το πώς επιδρά στο αποτέλεσμα η ώρα της ημέρας στην οποία επιλέγεται να γίνουν οι υπολογισμοί της συγκέντρωσης.

7.1.1. Μηχανισμός επίδρασης της ώρας της ημέρας στις δυνατότητες μίξης του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος

Είναι γνωστό ότι τα χαρακτηριστικά του οριακού στρώματος της ατμόσφαιρας μεταβάλλονται έντονα κατά τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου,^[100,101] κατά περιοδικό τρόπο. Στη διάρκεια της νύχτας η εισροή θερμότητας από την ηλιακή ακτινοβολία πρακτικώς μηδενίζεται και οι ροές θερμότητας μεταξύ εδάφους και εφαπτόμενου αέρα, καθώς και μεταξύ κατώτερων και υπερκείμενων αέριων στρωμάτων περιορίζονται στο ελάχιστο. Όταν

οι ταχύτητες του (διατμητικού) ανέμου είναι μικρές, εμφανίζεται μια σταθεροποιημένη διαστρωμάτωση,^[102] που χαρακτηρίζεται από ελάχιστες δυνατότητες συναγωγής και επομένως πολύ περιορισμένη διασπορά των ουσιών που εκλύονται μέσα στο οριακό στρώμα κατά τη διάρκεια της νύχτας.

Αντίθετα, στη διάρκεια της ημέρας, η εισροή θερμότητας από την ηλιακή ακτινοβολία θερμαίνει το έδαφος γρηγορότερα απ' ό τι τον αέρα. Με τη σειρά του, το έδαφος επανεκπέμπει το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας αυτής, θερμαίνοντας τον αέρα του κατώτερου, επαπτόμενου με το έδαφος, στρώματος. Ο κατά τον τρόπο αυτό θερμότερος και άρα ελαφρύτερος αέρας οδεύει προς τα ανώτερα στρώματα, δημιουργώντας στην πορεία του μικρές ή μεγαλύτερες δίνες. Έτσι, κατά την κατακόρυφη διάσταση, εμφανίζονται συνθήκες συναγωγής και μίξης^[103] που συντείνουν στην άμεση διασπορά των αέριων ρύπων. Κατά έναν απλουστευτικό τρόπο, η διαδοχή των φαινομένων αυτών παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 13: Οι μεταπτώσεις του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος στη διάρκεια του εικοσιτετραώρου.

Επομένως, η ώρα της ημέρας που θα επιλεγεί για τους υπολογισμούς συγκέντρωσης, επιδρά σημαντικά στο βαθμό με τον οποίο οι εκπεμπόμενοι ρύποι αραιώνονται στην ατμόσφαιρα, επηρεάζοντας έτσι, εμμέσως αλλά καθοριστικά, τα τελικά αποτελέσματα.

Το σύστημα του EDMS διαχειρίζεται το συγκεκριμένο θέμα με ιδιαίτερη αναλυτικότητα, ως εξής:

- Όπως αναφέρθηκε, οι υπολογισμοί συγκεντρώσεων του EDMS διεξάγονται με το αρθρωτό μοντέλο AERMOD που έχει αναπτυχθεί από την US EPA σε συνεργασία με την American Meteorological Society, το οποίο εμπεριέχει ένα ξεχωριστό άρθρωμα προεπεξεργασίας των μετεωρολογικών στοιχείων, το AERMET. Μέσω του αρθρώματος

αυτού και βάσει των μετεωρολογικών δεδομένων εισόδου, περιλαμβανόμενης της ώρας του εικοσιτετραώρου, υπολογίζεται μια εκτενής σειρά μεγεθών σχετικών με την οριζόντια και κατακόρυφη κατανομή των ταχυτήτων και θερμοκρασιών του αέρα στο πεδίο μελέτης. Μεταξύ των μεγεθών αυτών περιλαμβάνονται και οι παράμετροι μετάπτωσης από το σταθεροποιημένο ή σταθερό οριακό στρώμα (SBL) στο στρώμα μίξης ή διαμεταγωγικό στρώμα (CBL). Μια σύνοψη των χαρακτηριστικών του AERMET έχει παρατεθεί στην ενότητα 14.2 (σελ. 374 και εξής).

- Επιπλέον το AERMOD ενσωματώνει την εξής μετάβαση μεταξύ των βασικών παραδοχών του: ενώ στο SBL θεωρεί ότι τόσο στην οριζόντια όσο και στην κατακόρυφη διάσταση οι συγκεντρώσεις ακολουθούν την κανονική κωδωνοειδή κατανομή Gauss γύρω από τον άξονα του πλούμιου, στο CBL θεωρεί ότι στην κατακόρυφη διάσταση επικρατεί η δι-κανονική (bi-Gaussian) κατανομή, η οποία ανταποκρίνεται καλύτερα στη διαδοχή ανοδικών και καθοδικών κινήσεων του αέρα του επιφανειακού στρώματος που συναντά το πλούμιο κατά τη διάχυσή του.^[104]

Συνεπώς, από την άποψη του σχεδιασμού του, το μοντέλο διασποράς AERMOD λαμβάνει αναλυτικά υπόψη την επίδραση της ώρας της ημέρας, καθώς και των άλλων μεταβλητών που επηρεάζουν τις δυνατότητες συναγωγής του επιφανειακού ατμοσφαιρικού στρώματος. Έτσι, η ανάλυση ευαισθησίας που θα ακολουθήσει, αποκτά την ειδική σκοπιμότητα να δείξει την επίδραση αυτών των ιδιοτήτων του AERMOD στα αποτελέσματα που λαμβάνονται από την έμπρακτη εφαρμογή του EDMS.

7.1.2. Διαμόρφωση δεδομένων εισόδου

Για να αναλυθεί η επίδραση που προαναφέρθηκε, επιλέγεται η διαμόρφωση μιας υπόθεσης εργασίας με τα εξής δεδομένα εισόδου:

- Αερολιμένας:..... Διεθνής Αερολιμένας Αθηνών.
- Ρυθμός κίνησης αεροσκαφών: Σταθερός, 15 κύκλοι LTO ανά ώρα, 30% μεγάλα ελικοφόρα (ATR 72-500) και 70% μεγάλα αεριωθούμενα (Airbus 320-200 και Boeing 747-400).
- Χωρική κατανομή κινήσεων: Ομοιόμορφα και στους δύο διαδρόμους, με αφετηρία και κατάληξη στον κεντρικό αεροσταθμό.
- Εποχή: Χειμώνας (πρώτες 20 ημέρες του Ιανουαρίου).
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος:..... Σταθερή, 5,2 °C (42 °F).

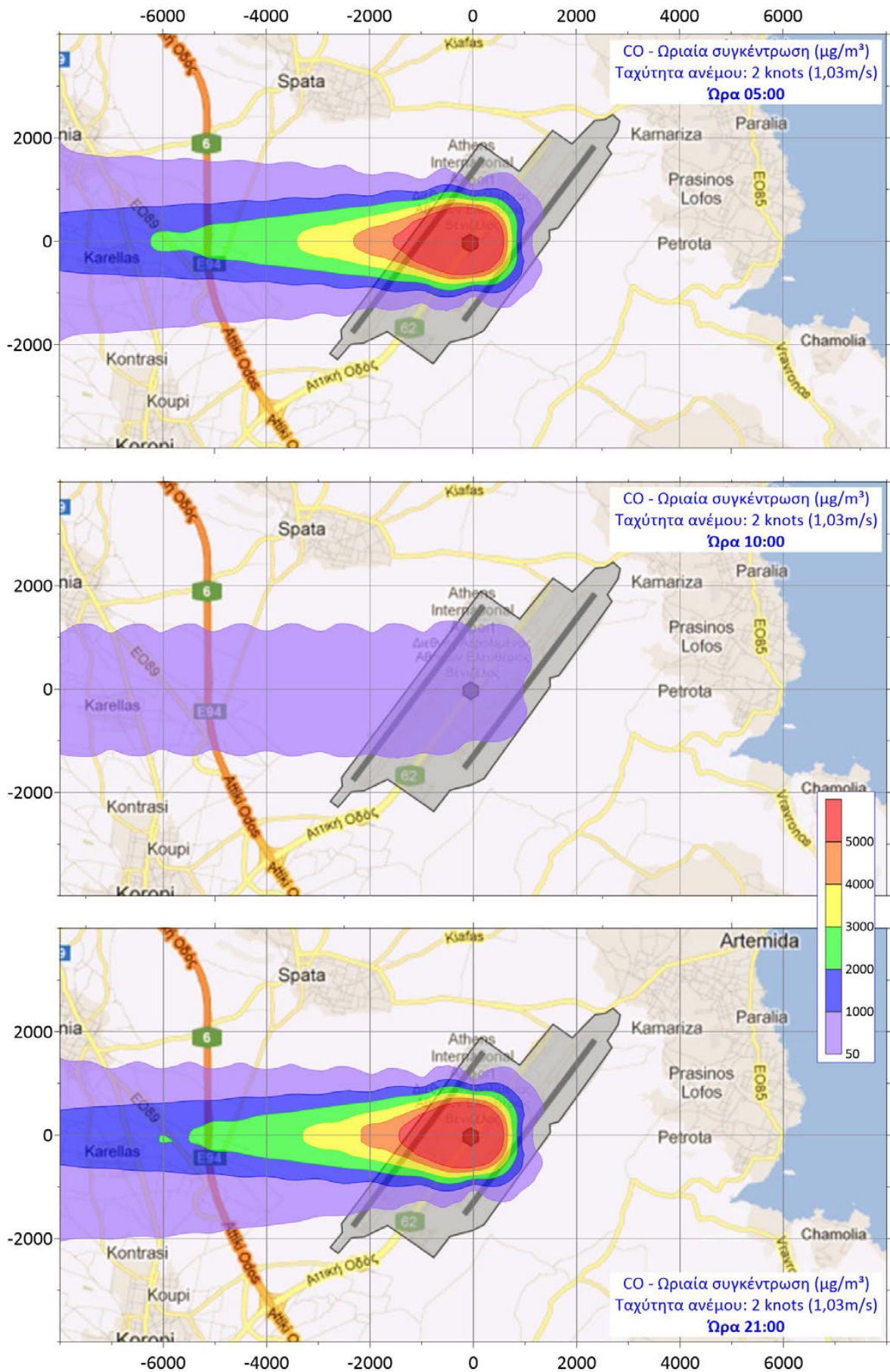
- Νέφωση:..... 0%.
- Κατεύθυνση ανέμου: Από ανατολικά.
- Ταχύτητα ανέμου: Μεταβλητή, από 1 έως 9 knots (0,51 ως 4,63 m/s).

Η ώρα της ημέρας εισάγεται στους υπολογισμούς μέσω του αρχείου μετεωρολογικών δεδομένων.

7.1.3. Αποτελέσματα

Εισάγοντας την παραπάνω υπόθεση εργασίας στο EDMS υπολογίζονται για κάθε ώρα του εικοσιτετραώρου οι συγκεντρώσεις των βασικών αέριων ρύπων. Στη διάρκεια κάθε εικοσιτετραώρου, η ταχύτητα του ανέμου, όπως και όλες οι άλλες μεταβλητές εισόδου διατηρούνται σταθερές. Το επόμενο εικοσιτετράωρο η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται κατά 1 knot (0,51 m/s), χωρίς περαιτέρω διαφοροποίηση στις άλλες μεταβλητές εισόδου.

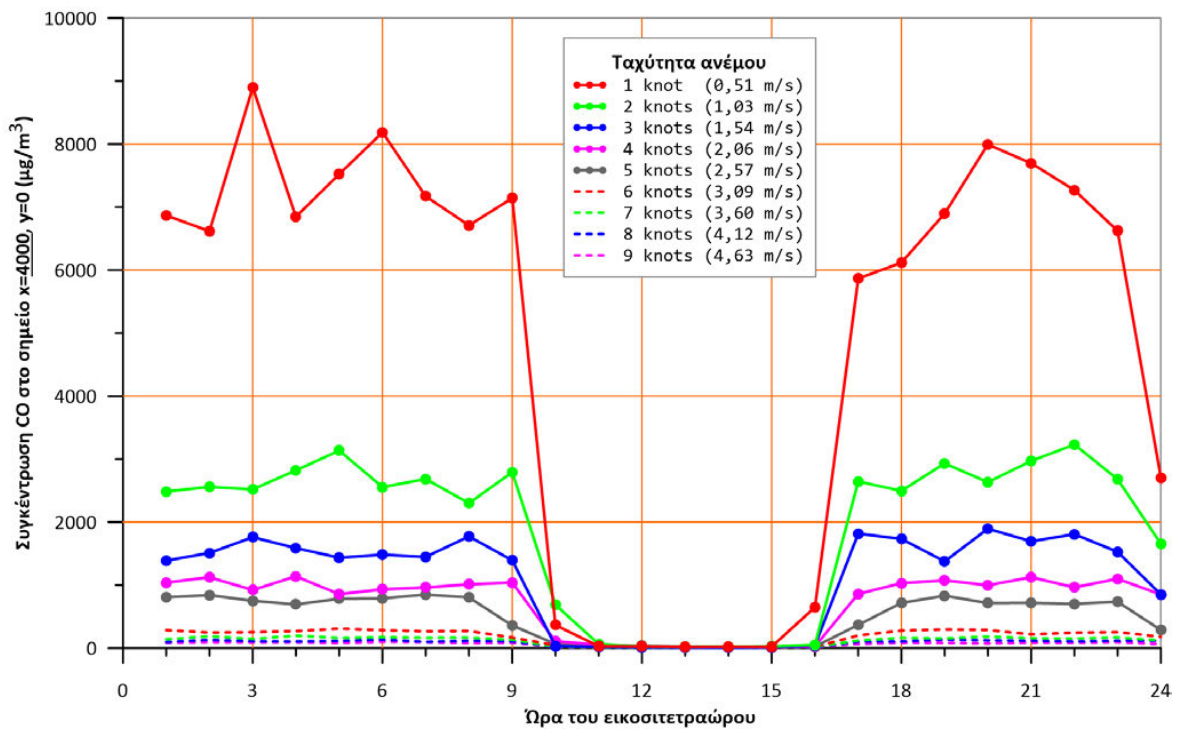
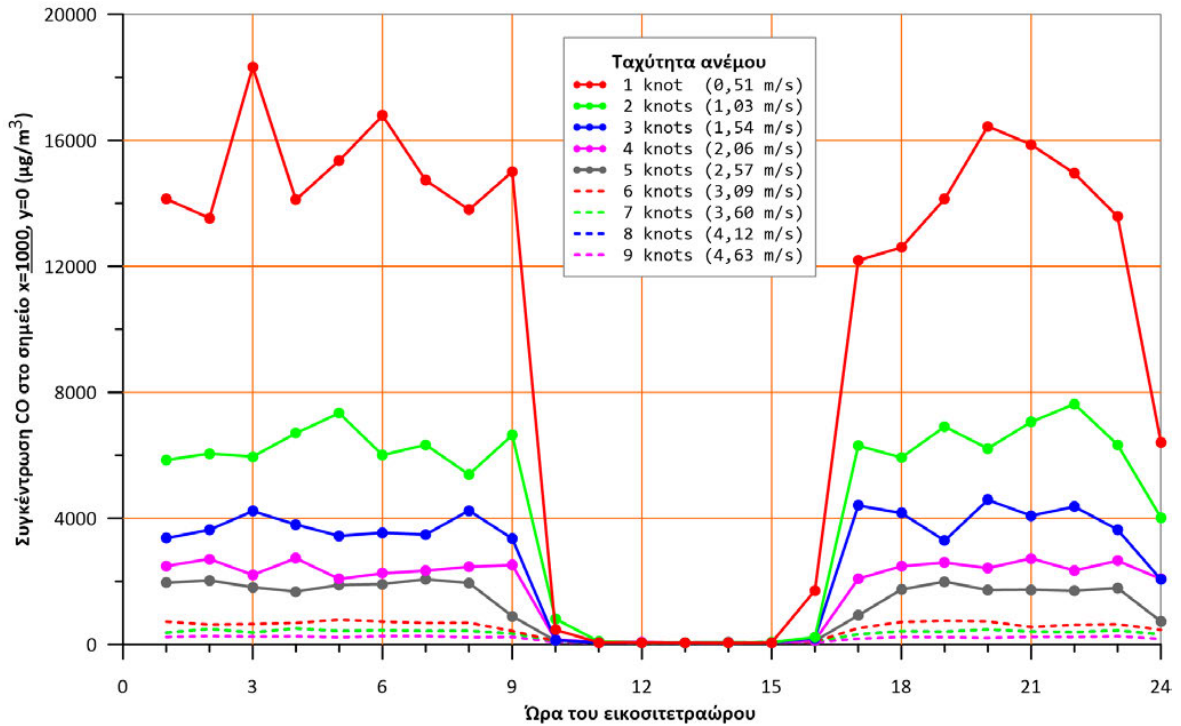
Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, προκύπτει ότι – όπως ήταν αναμενόμενο – οι διαφορές στις συγκεντρώσεις μεταξύ πολύ πρωινών, μεσημεριανών και βραδινών ωρών είναι μεγάλες, όταν δεν συμμετέχουν στη διασπορά άλλοι παράγοντες που ευνοούν τα φαινόμενα συναγωγής και μίξης, όπως οι υψηλές ταχύτητες ανέμου. Η διαπίστωση αυτή είναι κοινή για όλους τους ρύπους, αλλά εμφανίζεται πιο ανάγλυφα στο CO, του οποίου οι εκπομπές και συγκεντρώσεις είναι οι μεγαλύτερες. Έτσι, για μια εποπτική αναπαράσταση αυτών των διαφορών, στο επόμενο γράφημα παρουσιάζεται η κατανομή της μέσης ωριαίας συγκέντρωσης του CO, υπό άνεμο χαμηλής και σταθερής ταχύτητας, σε τρεις διαφορετικές ώρες (πρωί, μεσημέρι, βράδυ) του ίδιου εικοσιτετραώρου.



Γράφημα 146: Η επίδραση της ώρας της ημέρας στη συγκέντρωση CO, υπό άνεμο χαμηλής ταχύτητας.

Όπως φαίνεται από το προηγούμενο γράφημα, παρότι όλες οι μεταβλητές εισόδου που αφορούν στην εκπομπή και διασπορά παραμένουν σταθερές, η μεταβολή της ώρας της ημέρας, και συνεπώς των χαρακτηριστικών του επιφανειακού ατμοσφαιρικού στρώματος, οδηγούν σε μεγάλες διαφοροποιήσεις των συγκεντρώσεων.

Έχοντας υπόψη το εύρημα αυτό, καθώς και το ότι οι υψηλότερες συγκεντρώσεις εμφανίζονται πάνω στην κεντρική γραμμή διάδοσης, που στο παραπάνω γράφημα συμπίπτει με τον οριζόντιο άξονα, μπορεί τώρα να παρουσιασθεί η μεταβολή των συγκεντρώσεων στη διάρκεια του εικοσιτετραώρου, υπό διαφορετική κάθε φορά ταχύτητα ανέμου. Η μεταβολή αυτή φαίνεται στο ακόλουθο ζεύγος γραφημάτων, όπου παρουσιάζεται η συγκέντρωση CO σε δύο αντιπροσωπευτικά σημεία του άξονα x. Το πρώτο βρίσκεται μέσα στην έκταση των υψηλών συγκεντρώσεων, δηλαδή στην κόκκινη περιοχή των προηγούμενων γραφημάτων, σε απόσταση 1 km ανατολικά από το κέντρο του αερολιμένα. Το δεύτερο βρίσκεται σε απόσταση 4 km ανατολικά, στην έκταση των μέσων συγκεντρώσεων, δηλαδή στην πράσινη περιοχή των προηγούμενων γραφημάτων. Υπενθυμίζεται ότι ο άνεμος έχει υποθεθεί ότι φυσά από την ανατολή, επομένως τα δύο αυτά σημεία βρίσκονται κατάντη του αερολιμένα κατά τη φορά του ανέμου (downwind). Στα δύο αυτά σημεία, το ζεύγος των γραφημάτων παρουσιάζει τη μέση ωριαία συγκέντρωση CO ανά ώρα του εικοσιτετραώρου, υπό αυξανόμενη ταχύτητα ανέμου.



Γράφημα 147: Η επίδραση της ταχύτητας ανέμου και της ώρας της ημέρας στη συγκέντρωση CO.

Τα κύρια συμπεράσματα που εξαγονται από το παραπάνω ζεύγος γραφημάτων είναι τα εξής:

- Στη διάρκεια των πρωινών και μεσημεριανών ωρών με ηλιοφάνεια, συγκεκριμένα από τις 10:00 μέχρι τις 15:00, οι υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις πρακτικώς μηδενίζονται. Αυτό συμβαίνει διότι το μοντέλο AERMOD θεωρεί ότι έχει επικρατήσει το στρώμα μίξης με συνθήκες έντονης συναγωγής, επομένως οι κατακόρυφες κινήσεις του αέρα

αραιώνουν και απομακρύνουν προς τα πάνω τους ρύπους, ελαχιστοποιώντας έτσι τις συγκεντρώσεις τους στο επίπεδο του εδάφους.

- Το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα είναι τελείως ακατάλληλο για υπολογισμούς συγκεντρώσεων κανονιστικού χαρακτήρα. Στις περιπτώσεις αυτές ζητείται να αντιπαραβληθούν με τις οριακές τιμές οι συγκεντρώσεις του δυσμενέστερου πιθανού σεναρίου. Οι πρωινές και μεσημεριανές ώρες όχι μόνο δεν αποτελούν το δυσμενέστερο σενάριο, αλλά αντίθετα συνιστούν μια από τις ευνοϊκότερες περιπτώσεις συνθηκών μίξης.
- Οι διαφορές συγκεντρώσεων μεταξύ σταθεροποιημένου και διαμεταγωγικού επιφανειακού στρώματος είναι σημαντικές όταν οι ταχύτητες ανέμου είναι μικρές. Καθώς η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται, η διάτμηση που προκαλείται στη δομή του σταθεροποιημένου στρώματος, σε συνδυασμό με την αύξηση της ταχύτητας συναγωγής των εκπεμπόμενων ρύπων οδηγούν σε γρήγορη αραίωση και σε τελικώς χαμηλές συγκεντρώσεις εδάφους.
- Αν και θα εξετασθεί αναλυτικότερα στην επόμενη ενότητα, η επίδραση της ταχύτητας του ανέμου είναι ήδη ορατή στο γράφημα 147: πάνω από το επίπεδο των ~3 m/s οι συγκεντρώσεις μειώνονται ραγδαία.

7.2. Ταχύτητα ανέμου

Διαπιστώθηκε ήδη από την προηγούμενη ενότητα, αλλά και είναι ευρύτερα γνωστό ότι η ταχύτητα του ανέμου αποτελεί βασικό παράγοντα επίδρασης στις συγκεντρώσεις αέριων ρύπων. Στην ενότητα αυτή αναλύεται η επίδραση αυτή στα αποτελέσματα των υπολογισμών με το EDMS.

7.2.1. Μηχανισμός επίδρασης της ταχύτητας του ανέμου στη διασπορά των αέριων ρύπων

Ο άνεμος αποτελεί βασικό παράγοντα διάχυσης και αραίωσης των ρύπων που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα, λειτουργώντας κατά δύο συμπληρωματικούς τρόπους. Πρώτον, δημιουργεί ρεύματα συναγωγής που μεταφέρουν την αέρια μάζα υποδοχής των εκπεμπόμενων ρύπων, συμπαρασύροντάς τους και ταυτόχρονα διανέμοντάς τους σε μεγαλύτερο όγκο αέρα. Δεύτερον, διότι η διάτμηση του επιφανειακού στρώματος από τον

οριζόντιο άνεμο δημιουργεί τύρβη, επαυξάνοντας κατά πολύ την ανάμιξη και αραίωση των αέριων ρύπων, τόσο κατά την οριζόντια όσο και κατά την κατακόρυφη διάσταση. Οι μηχανισμοί αυτής της διάχυσης και αραίωσης έχουν μελετηθεί αναλυτικά, τόσο από φυσικής όσο και από υπολογιστικής πλευράς.^[105-107] Η σύγχρονη προσέγγιση βασίζεται στη θεωρία ομοιότητας των Monin και Obukhov, η βασική υπόθεση της οποίας είναι ότι σε ένα οριζοντίως ομογενές επιφανειακό ατμοσφαιρικό στρώμα, οι μακροσκοπικές (μέσες) τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών ροής και τύρβης εξαρτώνται από τέσσερις μόνο ανεξάρτητες μεταβλητές: το ύψος από το έδαφος, την οπισθέλκουσα της επιφάνειας, την κινηματική ροή θερμότητας της επιφάνειας και την χαρακτηριστική μεταβλητή της άνωσης. Οι απλουστευτικές παραδοχές στις οποίες βασίζεται η υπόθεση Monin-Obukhov είναι η ομοιογένεια και η μακροσκοπική σταθερότητα της οριζόντιας ροής, η κατακόρυφη σταθερότητα των τυρβωδών ροής ορμής και θερμότητας, η σχεδόν αμελητέα κλίμακα των μοριακών ανταλλαγών σε σχέση με τις τυρβώδεις, η αμελητέα επίδραση της περιστροφής της γης στο επιφανειακό στρώμα και, τέλος, η παραδοχή ότι η οπισθέλκουσα της επιφάνειας ενσωματώνει πλήρως την επίδραση της επιφανειακής τραχύτητας, του ύψους του οριακού στρώματος και των γεωστροφικών ανέμων. Η θεωρία εισάγει το μήκος Monin-Obukhov που συμβολίζεται με L , ως το χαρακτηριστικό ύψος (κλίμακα) του επιμέρους στρώματος της δυναμικής τύρβης· στο πλαίσιο αυτό, το πηλίκο z/L του ύψους από το έδαφος z με το μήκος Monin-Obukhov αντιπροσωπεύει τη σχετική σημαντικότητα των διατμητικών φαινομένων παραγωγής τύρβης στην καθ' ύψος δομή του ατμοσφαιρικού στρώματος.

Το AERMOD προβαίνει σε λεπτομερή υπολογισμό του μήκους Monin-Obukhov L και της αλληλένδετης με αυτό ταχύτητας τριβής u_* .^[104]

Στο στρώμα μίξης, η ταχύτητα τριβής υπολογίζεται από τη σχέση

$$u_* = \frac{k u_{ref}}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_o}\right) - \Psi_m\left(\frac{z_{ref}}{L}\right) + \Psi_m\left(\frac{z_o}{L}\right)} \quad (1)$$

όπου k η σταθερά von Karman (=0,4),

u_{ref} η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος μέτρησής της,

z_{ref} το ύψος αναφοράς, ήτοι μέτρησης της ταχύτητας ανέμου, (σε όλες τις περιπτώσεις της εργασίας αυτής $z_{ref} = 10 \text{ m}$),

z_o η τραχύτητα (ή ακριβέστερα το ύψος τραχύτητας).

Οι όροι σταθερότητας στην εξίσωση (1), δηλαδή τα Ψ_m υπολογίζονται από τις εξής σχέσεις:

$$\Psi\left(\frac{z_{ref}}{L}\right) = 2 \ln\left(\frac{1+\mu}{2}\right) + \ln\left(\frac{1+\mu^2}{2}\right) - 2 \tan^{-1} \mu + \frac{\pi}{2} \quad (2)$$

$$\Psi\left(\frac{z_o}{L}\right) = 2 \ln\left(\frac{1+\mu_o}{2}\right) + \ln\left(\frac{1+\mu_o^2}{2}\right) - 2 \tan^{-1} \mu_o + \frac{\pi}{2} \quad (3)$$

όπου

$$\mu = \left(1 - 16 \frac{z_{ref}}{L}\right)^{\frac{1}{4}} \quad \text{και} \quad \mu_o = \left(1 - 16 \frac{z_o}{L}\right)^{\frac{1}{4}}$$

Το αρχικό βήμα της επαναληπτικής διαδικασίας είναι ο υπολογισμός της u^* υποθέτοντας $\Psi_m = 0$. Αυτή η εκτίμηση της u^* χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του L βάσει της σχέσης

$$L = \frac{\rho c_p T_{ref} u_*^3}{k g H} \quad (4)$$

όπου g η επιτάχυνση της βαρύτητας

c_p η θερμοχωρητικότητα του αέρα υπό σταθερή πίεση,

ρ η πυκνότητα του αέρα και

T_{ref} η θερμοκρασία περιβάλλοντος στο ύψος αναφοράς.

Μετά το πρώτο βήμα, η u^* και το L επανυπολογίζονται σε διαδοχικούς κύκλους, έως ότου παρατηρηθεί σύγκλιση του L , δηλαδή η κάθε επόμενη τιμή του να είναι λιγότερο από 1% διαφορετική από την προηγούμενη.

Στο σταθεροποιημένο στρώμα, οι υπολογισμοί της u^* και του L είναι πιο εκτεταμένοι. Σε αυτούς συμμετέχει η χαρακτηριστική κλίμακα θερμοκρασίας θ^* που ορίζεται ως

$$\theta_* = -\frac{H}{\rho c_p u_*} \quad (5)$$

όπου $H = -\rho c_p u_* \theta_*$ η αγόμενη από το έδαφος προς τον αέρα θερμότητα (sensible heat flux).

Ειδικότερα, αξιοποιείται η εμπειρική παρατήρηση ότι η θ^* παρουσιάζει πολύ περιορισμένες διακυμάνσεις στη διάρκεια εμφάνισης του σταθεροποιημένου στρώματος, ιδίως δε τη νύχτα.

Το L συνδέεται με την θ^* μέσω της σχέσης

$$L = \frac{T_{ref}}{k g \theta_*} u_*^2 \quad (6)$$

Το προφίλ της ταχύτητας ανέμου τότε λαμβάνει τη μορφή

$$u = \frac{u_*}{k} \left[\ln\left(\frac{z}{z_o}\right) + \frac{\beta_m z_{ref}}{L} \right] \quad (7)$$

όπου $\beta_m = 5$.

Ακολουθεί μια εκτενής σειρά αντικαταστάσεων που περιγράφονται αναλυτικά στην τεκμηρίωση του AERMOD,^[104] και στις οποίες η u_{ref} συμμετέχει στον προσδιορισμό της u_* μέσω της σχέσης

$$u_* = \frac{C_D u_{ref}}{2} \left[-1 + \left(1 + \left(\frac{2u_o}{C_D^{\frac{1}{2}} u_{ref}} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (8)$$

Τελικώς, οι u_* και θ^* προκύπτουν από τη σύγκλιση μιας επαναληπτικής διαδικασίας και αφού χρησιμοποιηθούν στον υπολογισμό της H οδηγούν στον τελικό υπολογισμό του L μέσω της σχέσης (4).

Και στις δύο περιπτώσεις, είναι σαφές ότι η ταχύτητα του ανέμου, u_{ref} , ασκεί μια σημαντική και σύνθετη επίδραση στις συγκεντρώσεις, τόσο από φυσικής όσο και από υπολογιστικής πλευράς. Στις επόμενες παραγράφους αναζητείται η έμπρακτη εκδήλωση της επίδρασης αυτής στα αποτελέσματα των υπολογισμών.

7.2.2. Διαμόρφωση δεδομένων εισόδου

Για να αναλυθεί η επίδραση της ταχύτητας ανέμου στα αποτελέσματα, επιλέγεται η διαμόρφωση μιας υπόθεσης εργασίας όπου η ταχύτητα του ανέμου λαμβάνεται ως μεταβαλλόμενη παράμετρος, ενώ όλα τα άλλα δεδομένα εισόδου προκαθορίζονται σε σταθερές τιμές, οι οποίες γενικώς ευνοούν την εμφάνιση υψηλών συγκεντρώσεων. Ειδικά για τα χαρακτηριστικά ευστάθειας του επιφανειακού στρώματος, αξιοποιούνται τα ευρήματα της προηγούμενης ενότητας και επιλέγεται μια ώρα της ημέρας που να εξασφαλίζει ελάχιστες κατακόρυφες μετακινήσεις επιφανειακό ατμοσφαιρικό στρώμα, δηλαδή συνθήκες θερμικής ισορροπίας μεταξύ εδάφους και αέρα· με τον τρόπο αυτό, εξετάζεται κατά το δυνατόν απομονωμένα η επίδραση του οριζόντιου ανέμου, αφού η βασική διασπορά θα οφείλεται κυρίως στη μεταφορά και διάχυση μέσω της οριζόντιας διάτμησης που αυτός προκαλεί και πολύ λιγότερο στην κατακόρυφη διάσταση της τύρβης.

Έτσι, η υπόθεση εργασίας διαμορφώνεται με τα εξής δεδομένα εισόδου:

- Αερολιμένας:..... Διεθνής Αερολιμένας Αθηνών.
- Ρυθμός κίνησης αεροσκαφών: Σταθερός, 15 κύκλοι LTO ανά ώρα, 30% μεγάλα ελικοφόρα (ATR 72-500) και 70% μεγάλα αεριωθούμενα (Airbus 320-200 και Boeing 747-400).

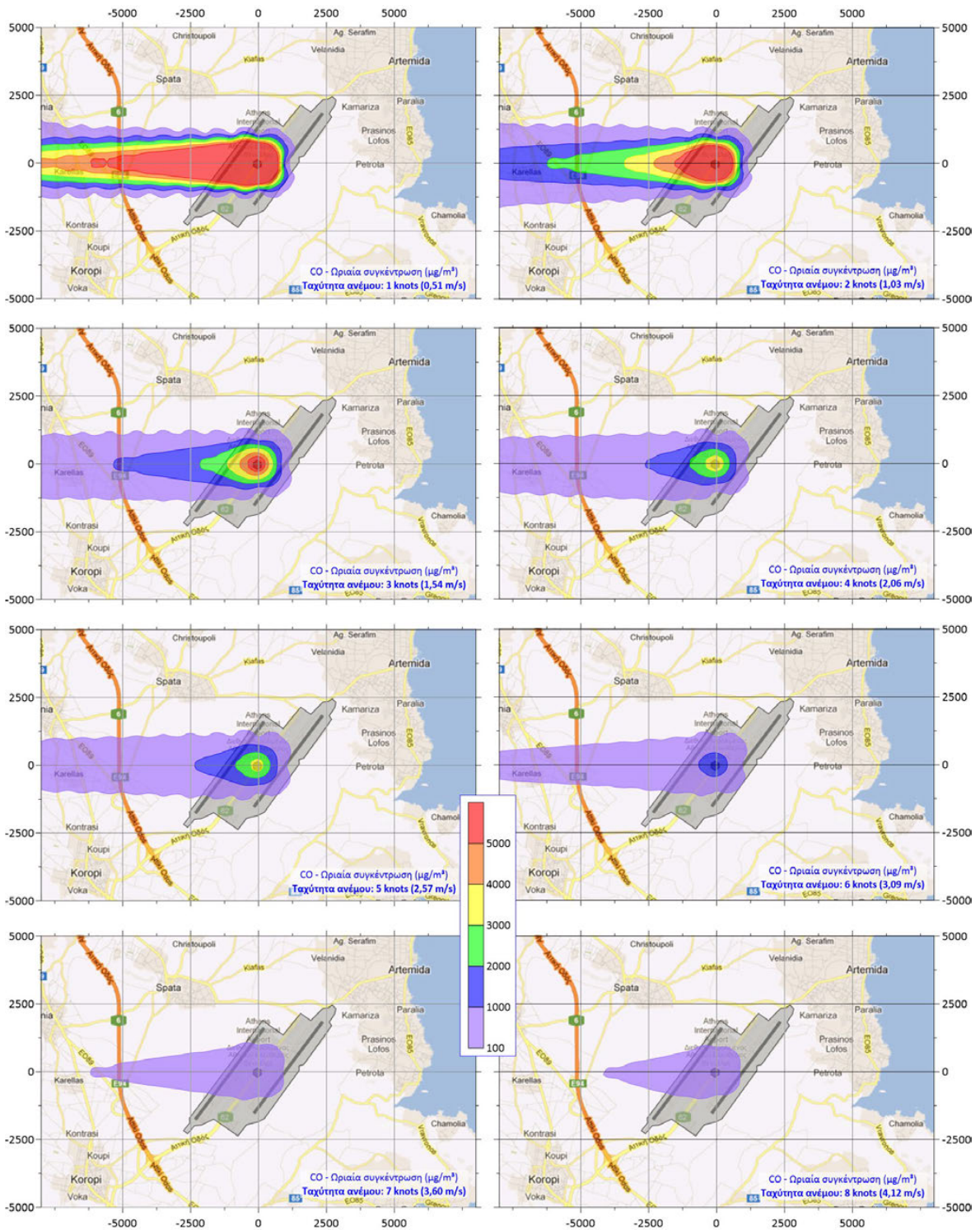
- Χωρική κατανομή κινήσεων: Ομοιόμορφα και στους δύο διαδρόμους, με αφετηρία και κατάληξη στον κεντρικό αεροσταθμό.
- Εποχή: Χειμώνας (πρώτες 20 ημέρες του Ιανουαρίου).
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος:..... Σταθερή, 5,2 °C (42 °F).
- Ώρα της ημέρας:..... 06:00.
- Νέφωση:..... 0%.
- Κατεύθυνση ανέμου: Από ανατολικά.
- Ταχύτητα ανέμου: *Μεταβλητή, από 1 έως 9 knots (0,51 ως 4,63 m/s).*

7.2.3. Αποτελέσματα

Εισάγοντας την παραπάνω υπόθεση εργασίας στο EDMS υπολογίζονται για κάθε βήμα της ταχύτητας ανέμου οι συγκεντρώσεις των βασικών αέριων ρύπων.

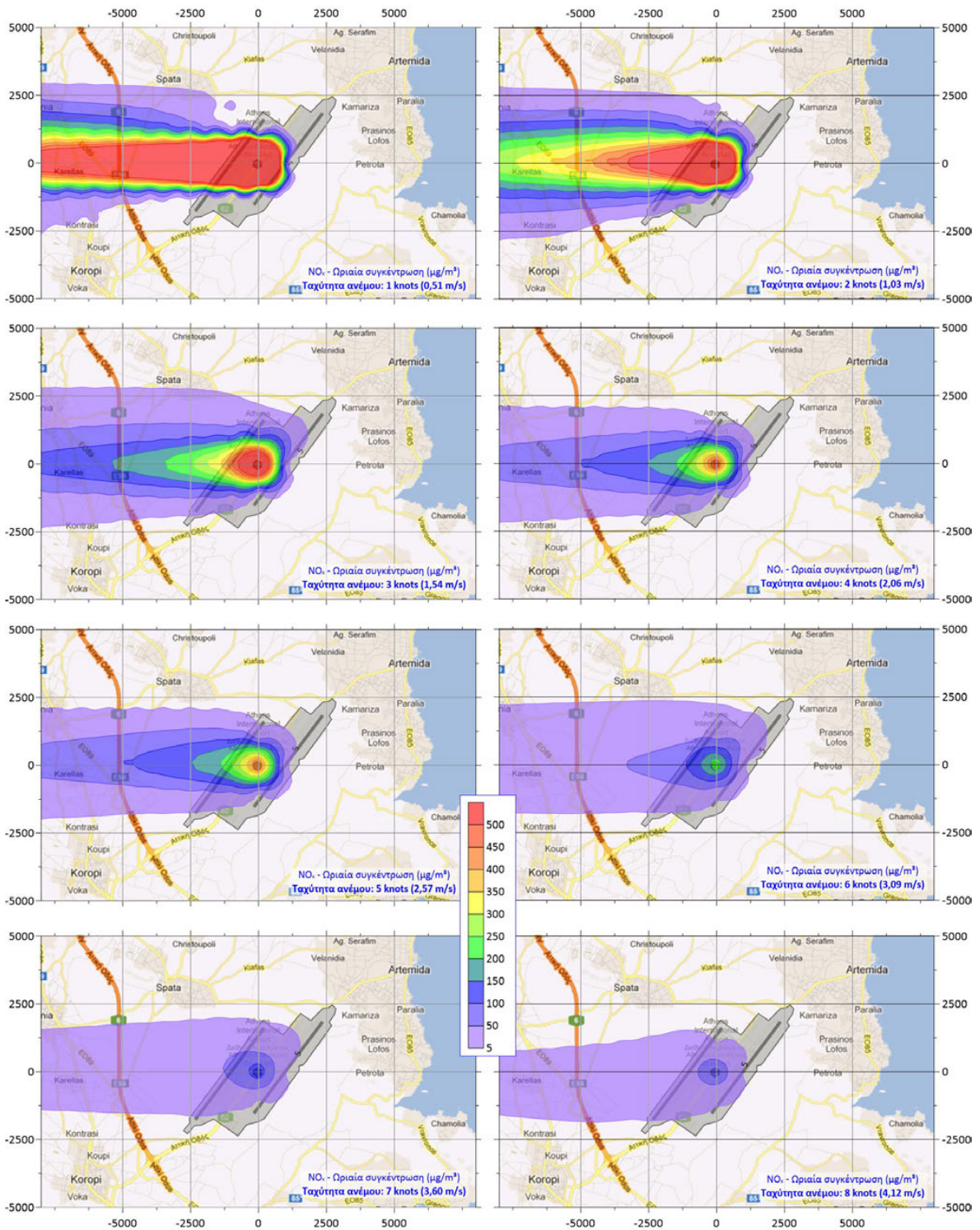
Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, προκύπτει ότι – όπως ήταν αναμενόμενο – η μείωση στις συγκεντρώσεις, καθώς η ταχύτητα ανέμου αυξάνει, είναι σημαντική.

Για το CO, η κατανομή της μέσης ωριαίας συγκέντρωσης υπό άνεμο αυξανόμενης ταχύτητας παρουσιάζεται στο επόμενο γράφημα, στο οποίο καθίσταται εμφανής η επίδραση ακόμη και μικρών (τάξεως 1 knot δηλαδή 0,51 m/s ή 1,83 km/hr) αυξήσεων στην ταχύτητα του ανέμου.



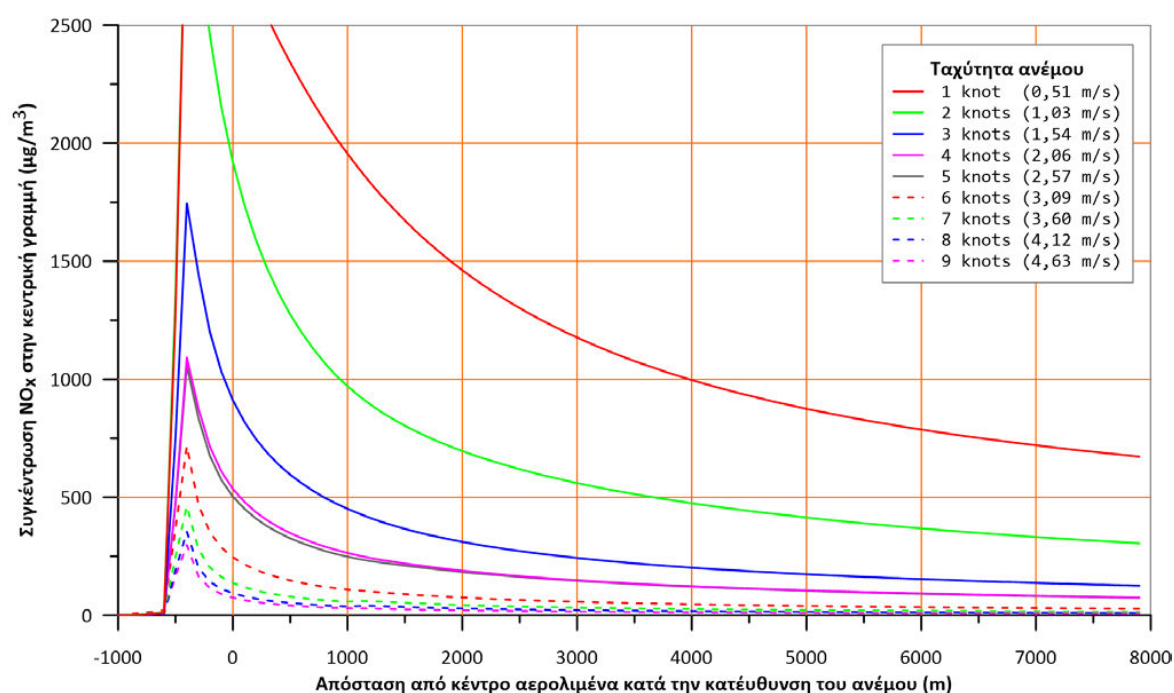
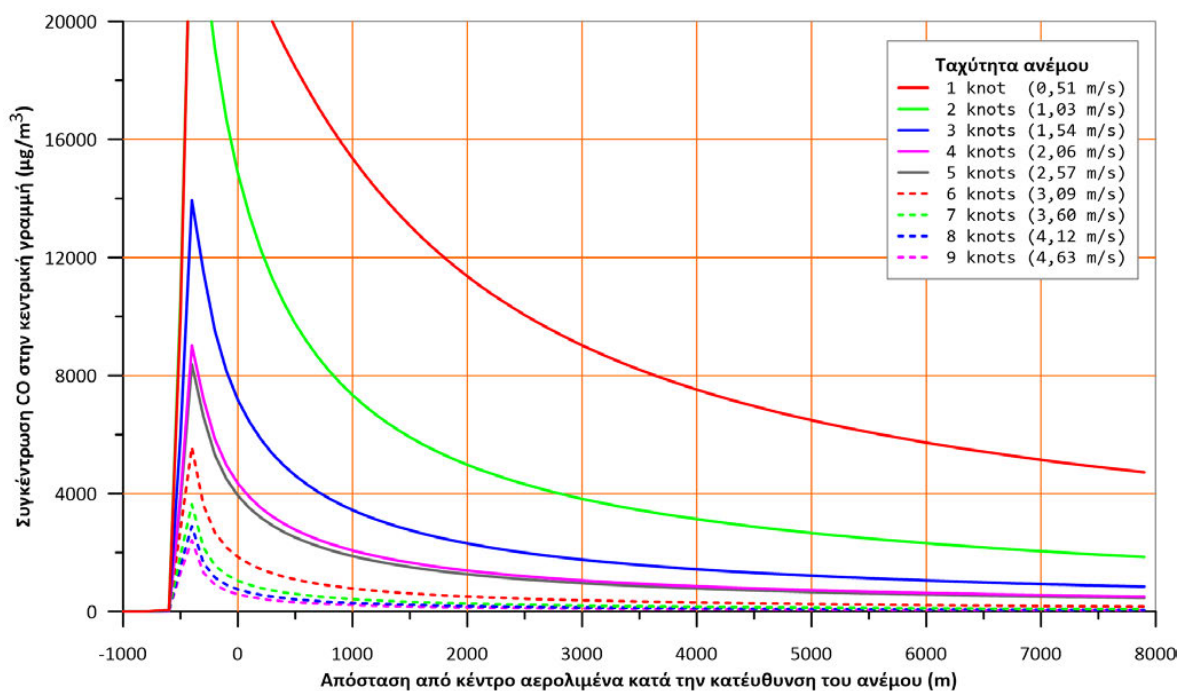
Γράφημα 148: Επίδραση της ταχύτητας ανέμου στη διασπορά του CO.

Ακριβώς ανάλογη εικόνα - όπως άλλωστε ήταν ευλόγως αναμενόμενο - δίνει και η αποκλιμάκωση των συγκεντρώσεων των NO_x καθώς η ταχύτητα του ανέμου αυξάνει, όπως φαίνεται στο ακόλουθο γράφημα.



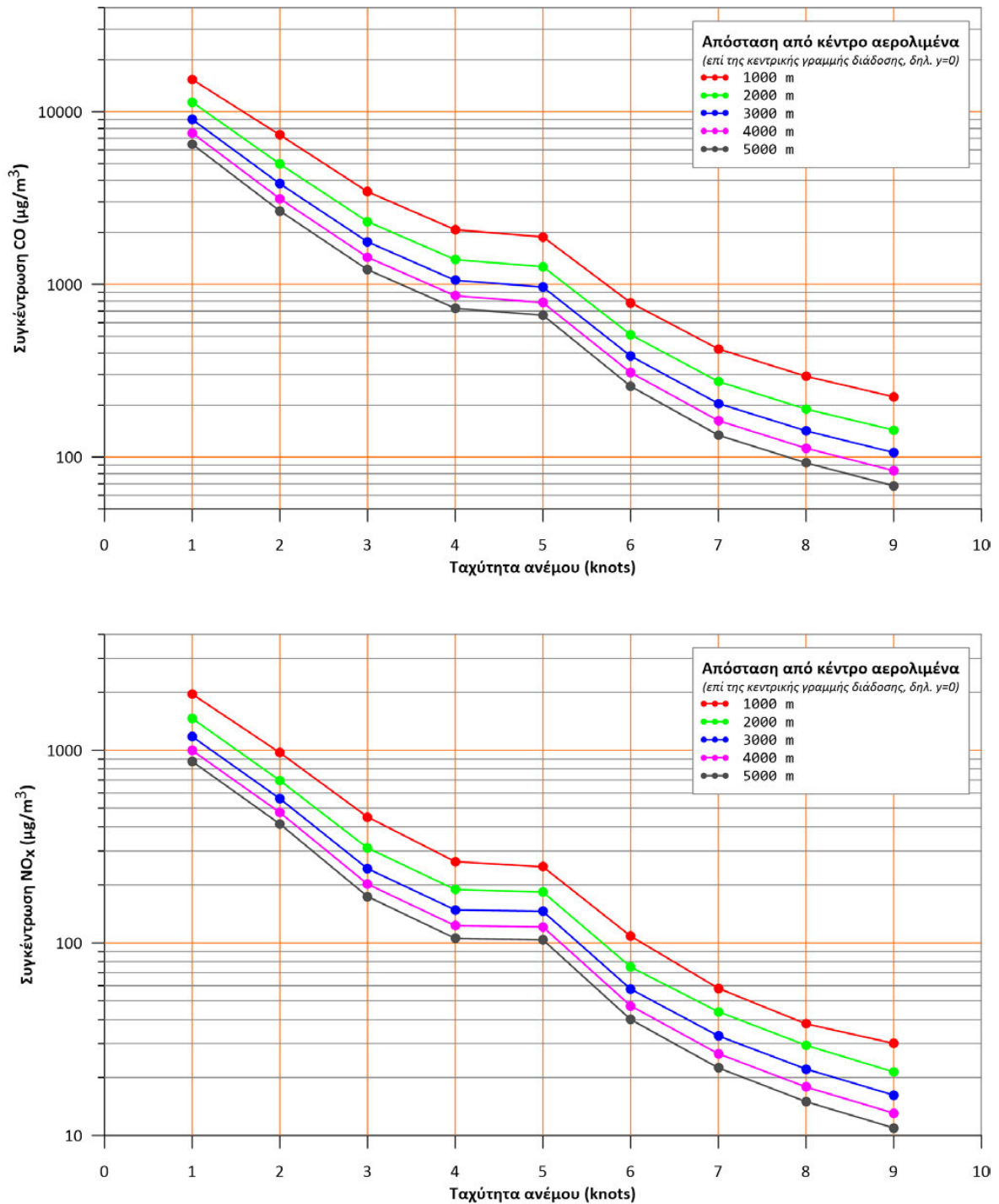
Γράφημα 149: Επίδραση της ταχύτητας ανέμου στη διασπορά των NO_x.

Ενώ στα παραπάνω γραφήματα η έμφαση δίνεται κυρίως στη μεταβολή της έκτασης των ισορροπαντικών γραμμών, το επόμενο γράφημα δείχνει τις μεταβολές στην «ένταση» της ρύπανσης, παρουσιάζοντας τις συγκεντρώσεις CO και NO_x πάνω στην κεντρική γραμμή του πλουμίου, υπό τις ίδιες με τα προηγούμενα γραφήματα ταχύτητες ανέμου.



Γράφημα 150: Συγκεντρώσεις CO και NO_x πάνω στην κεντρική γραμμή διασποράς, υπό διαφορετικές ταχύτητες ανέμου.

Η μείωση των συγκεντρώσεων καθώς αυξάνει η ταχύτητα φαίνεται να παρουσιάζει μια κανονικότητα, αλλά και μια εξαίρεση, στη μετάβαση από τα 4 στα 5 knots (2,06 → 2,57 m/s), όπου η μείωση δεν είναι τόσο ορατή όσο στις άλλες μεταβάσεις. Για να εμφανισθούν ευκρινέστερα αυτές οι δύο διαπιστώσεις (η κανονικότητα και η εξαίρεσή της) μπορεί να παρασταθεί γραφικά η συγκέντρωση των δύο χαρακτηριστικών ρύπων σε διακριτά σημεία της κεντρικής γραμμής, καθώς η ταχύτητα του ανέμου αυξάνει.



Γράφημα 151: Συγκεντρώσεις CO και NO_x σε ισαπέχοντα σημεία της κεντρικής γραμμής διασποράς, υπό διαφορετικές ταχύτητες ανέμου.

Αφού σημειωθεί ότι η κλίμακα των κάθετων αξόνων, όπου παριστάνονται οι συγκεντρώσεις στα παραπάνω γραφήματα, είναι λογαριθμική, διαπιστώνεται ότι όντως υφίσταται μια κανονικότητα στη μεταβολή των συγκεντρώσεων: καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου, ο λογάριθμος της συγκέντρωσης μειώνεται σχεδόν γραμμικά, σε όλα τα σημεία της κεντρικής γραμμής διασποράς. Εξάιρεση όντως αποτελεί η μετάβαση από τα 4 στα 5 knots, όπου οι συγκεντρώσεις παραμένουν σχεδόν αμετάβλητες. Αυτό είναι πιθανό να οφείλεται στη

μετάβαση του υπολογιστικού κώδικα του AERMOD από τις σχέσεις του σταθεροποιημένου στρώματος σε αυτές του διαμεταγωγικού.

Συνολικά, τα κύρια συμπεράσματα που εξάγονται από την ανάλυση ευαισθησίας ως προς την ταχύτητα του ανέμου, είναι τα εξής:

- Η ταχύτητα του ανέμου επιδρά ιδιαιτέρως έντονα στη διασπορά και αραιώση των αέριων ρύπων. Μικρές αυξήσεις στην ταχύτητα ανέμου, μειώνουν κατά πολύ το μέγεθος των συγκεντρώσεων και περιορίζουν δραστικά την έκταση εμφάνισης ανησυχητικών επιπέδων ρύπανσης. Αυτό το γενικώς γνωστό φαινόμενο επιβεβαιώνεται πλήρως από τα αποτελέσματα του EDMS. Αξίζει να σημειωθεί ότι, οι λίγες περιπτώσεις όπου οι συγκεντρώσεις NO_x παρουσιάζουν περιορισμένη μεταβλητότητα στην ταχύτητα του ανέμου,^[108] οφείλονται περισσότερο στις ειδικές θέσεις μέτρησης σε σχέση με το διάδρομο του αεροδρομίου, παρά σε πραγματική διαφοροποίηση από τη γενική αντίστροφη αναλογία μεταξύ συγκεντρώσεων και ταχύτητας ανέμου.
- Από τα 6 knots (~3,1 m/s) και πάνω, η διασπορά και αραιώση των αέριων ρύπων είναι τέτοια που οδηγεί σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις. Αυτά τα επίπεδα ταχύτητας ανέμου είναι πολύ συνηθισμένα· για παράδειγμα, στη διάρκεια του 2009, οι μετεωρολογικές καταγραφές δείχνουν ότι σχεδόν το 55% των ωριαίων μετρήσεων ταχύτητας ανέμου ήταν μεγαλύτερο των 3,1 m/s.

7.3. Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας εντάσσεται μεταξύ των κύριων παραγόντων επίδρασης στη διασπορά αέριων ρύπων και η πλειονότητα των μοντέλων συμπεριλαμβάνουν τη θερμοκρασία περιβάλλοντος μεταξύ των μετεωρολογικών δεδομένων εισόδου που ζητούν από το χρήστη. Στην ενότητα αυτή διερευνάται ο τρόπος με τον οποίο οι μεταβολές της θερμοκρασίας επιδρούν στα αποτελέσματα των υπολογισμών με το EDMS.

7.3.1. Μηχανισμός επίδρασης της θερμοκρασίας στη διασπορά των αέριων ρύπων

Η θερμοκρασία περιβάλλοντος υπεισέρχεται με μια πλειάδα τρόπων στην πορεία των υπολογισμών του EDMS, κατά μείζονα λόγο μέσω των σχέσεων που χρησιμοποιεί το μοντέλο

διασποράς AERMOD και πολύ λιγότερο ή καθόλου στα προηγούμενα στάδια υπολογισμού των εκπομπών. (Συγκεκριμένα, η θερμοκρασία επηρεάζει κυρίως τους υπολογισμούς εκπομπών από οχήματα, μέσω του επιμέρους σχετικού μοντέλου MOBILE 6.2, αλλά και της ανύψωσης των εκπομπών από τις εκπαιδευτικές φωτιές. Κανένα από τα δύο αυτά ζητήματα δεν συμμετέχει στην ανάλυση ευαισθησίας).

Από την άποψη της φυσικής διαμεσολάβησης, ο βασικός (αλλά όχι ο μόνος) μηχανισμός με τον οποίο η θερμοκρασία περιβάλλοντος επιδρά στη διασπορά των αέριων ρύπων, είναι ο καθορισμός της πυκνότητας του μέσου αραίωσης, και επακόλουθα της διαφοράς με την πυκνότητα του μίγματος απαερίων που εκπέμπονται από τις πηγές, η οποία με τη σειρά της καθορίζει το ύψος στο οποίο θα ανέλθουν οι εκπεμπόμενες ουσίες και η αραίωση που θα υποστούν σε αυτό το πρώτο στάδιο διάχυσης.

Υπολογιστικά, ο κύριος τρόπος με τον οποίο η θερμοκρασία περιβάλλοντος υπεισέρχεται στις εξισώσεις υπολογισμού της διασποράς αέριων ρύπων, είναι δια της συμμετοχής της στον προσδιορισμό του μήκους Monin-Obukhov L , το οποίο υπολογίζεται στο μεν στρώμα μίξης με την επαναληπτική διαδικασία που εκκινεί με την εξίσωση (4), στο δε σταθεροποιημένο στρώμα με τη σχέση (6). Παρότι και στις δύο περιπτώσεις η εξάρτηση του L από την T_{ref} είναι ευθέως αναλογική, στον υπολογισμό υπεισέρχονται παράγοντες αντιστρόφως ανάλογοι με τη θερμοκρασία (ρ στην πρώτη περίπτωση, θ^* στη δεύτερη), που απομειώνουν τη συνολική επίδραση της T_{ref} στο τελικό αποτέλεσμα.

Ταυτόχρονα, η T_{ref} συμμετέχει και με άλλους τρόπους στη σειρά υπολογισμών του AERMOD. Για παράδειγμα, στους υπολογισμούς της ταχύτητας τριβής u^* στο σταθεροποιημένο στρώμα, πέραν της εισαγωγής της μέσω του L , η T_{ref} επανεμφανίζεται στον προσδιορισμό μιας κρίσιμης ταχύτητας ανέμου u_{cr} , πάνω από την οποία η εξίσωση υπολογισμού της u^* δίνει πραγματικές λύσεις, ενώ για μικρότερες ταχύτητες ανέμου η u^* υπολογίζεται με γραμμική παρεμβολή, όπως αναφέρεται στην ενότητα 3.3.1 του συγγράμματος περιγραφής του τρόπου λειτουργίας του AERMOD.^[104] Επιπλέον, σύμφωνα με το ίδιο σύγγραμμα, η T_{ref} συμμετέχει στον υπολογισμό της καθαρής ακτινοβολίας όταν δεν διατίθενται σχετικές μετρήσεις (όπως στις περιπτώσεις που εξετάζονται εδώ), αλλά και στον προσδιορισμό της κατατομής (profile) της δυναμικής θερμοκρασίας καθ' ύψος.

7.3.2. Διαμόρφωση δεδομένων εισόδου

Για να αναλυθεί η επίδραση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος στα αποτελέσματα, επιλέγεται η διαμόρφωση μιας υπόθεσης εργασίας όπου η θερμοκρασία λαμβάνεται ως μεταβαλλόμενη παράμετρος, ενώ όλα τα άλλα δεδομένα εισόδου προκαθορίζονται σε σταθερές τιμές, οι

οποίες γενικώς ευνοούν την εμφάνιση υψηλών συγκεντρώσεων, επιλέγοντας π.χ. ως ταχύτητα ανέμου τα 4 knots (2,06 m/s).

Έτσι, η υπόθεση εργασίας διαμορφώνεται με τα εξής δεδομένα εισόδου:

- Αερολιμένας:..... Διεθνής Αερολιμένας Αθηνών.
- Ρυθμός κίνησης αεροσκαφών: Σταθερός, 15 κύκλοι LTO ανά ώρα, 30% μεγάλα ελικοφόρα (ATR 72-500) και 70% μεγάλα αεριωθούμενα (Airbus 320-200 και Boeing 747-400).
- Χωρική κατανομή κινήσεων: Ομοιόμορφα και στους δύο διαδρόμους, με αφετηρία και κατάληξη στον κεντρικό αεροσταθμό.
- Εποχή: Χειμώνας - καλοκαίρι (πρώτες 10 ημέρες του Ιανουαρίου για τις θερμοκρασίες από 0 °C ως 20 °C, πρώτες 10 ημέρες του Ιουλίου για τις θερμοκρασίες από 21 °C ως 40 °C).
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος:..... Μεταβλητή, από 0 °C ως 40 °C (32 - 104 °F).
- Ώρα της ημέρας:..... Όλες, ώστε να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα για τις πιο χαρακτηριστικές.
- Νέφωση:..... 0%.
- Κατεύθυνση ανέμου: Από ανατολικά.
- Ταχύτητα ανέμου: 4 knots (2,06 m/s).

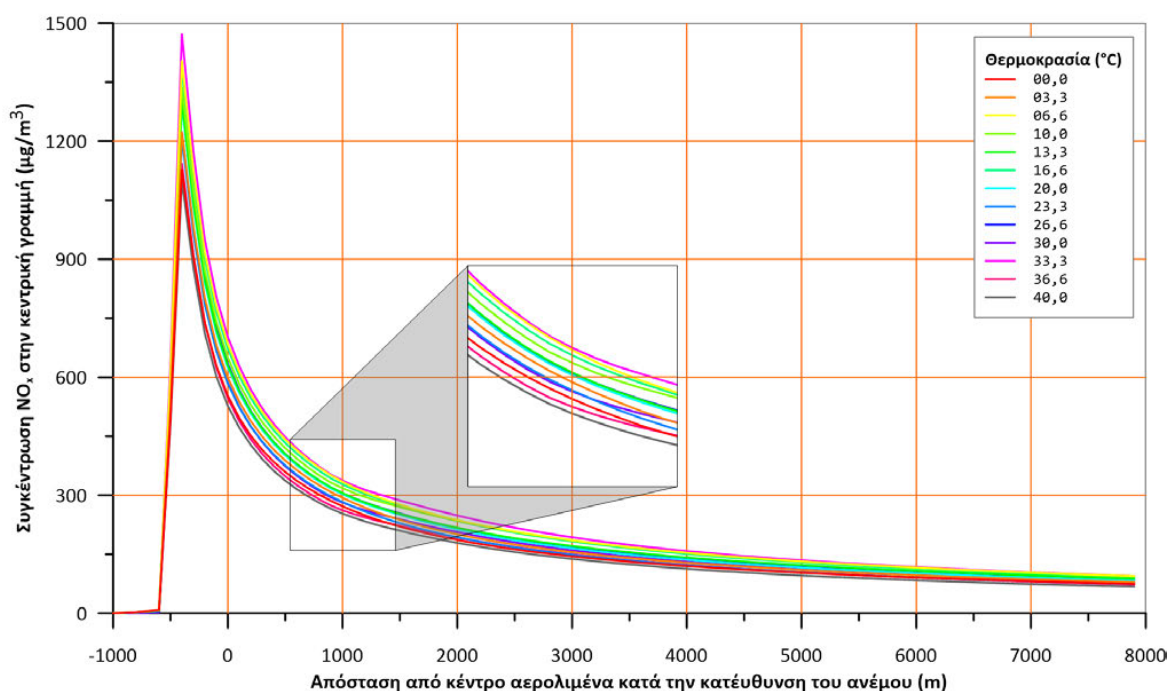
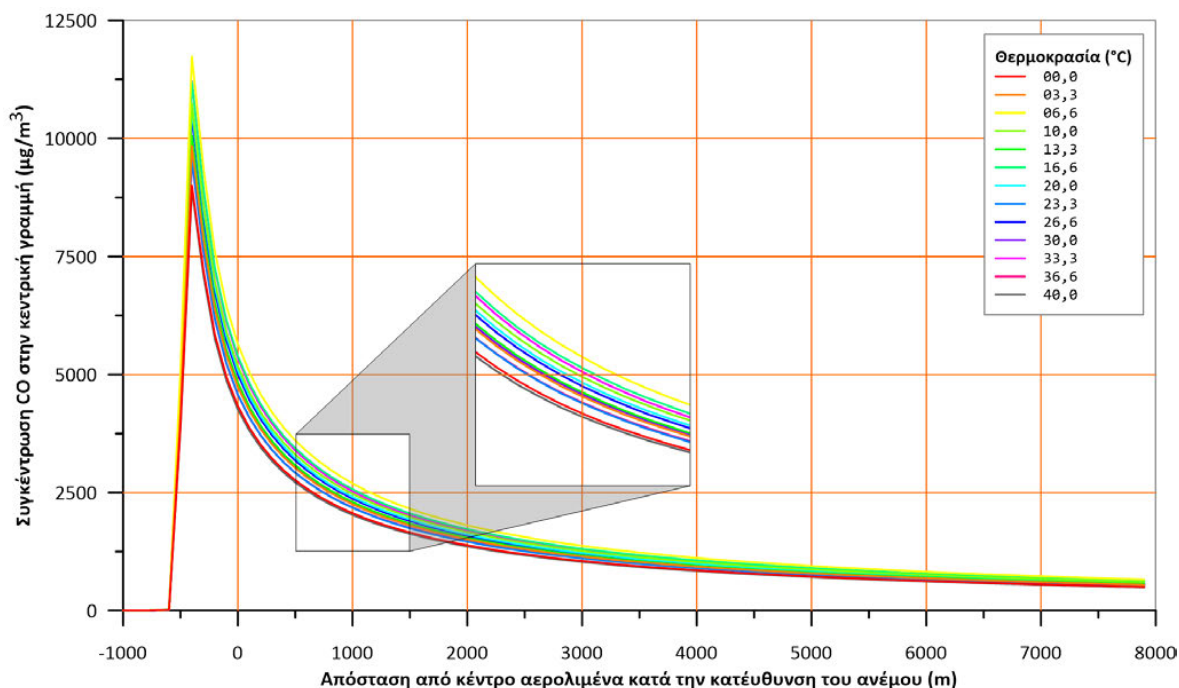
7.3.3. Αποτελέσματα

Έχοντας εισάγει την παραπάνω υπόθεση εργασίας στο EDMS, υπολογίστηκαν για κάθε βήμα της θερμοκρασίας περιβάλλοντος οι συγκεντρώσεις των βασικών αέριων ρύπων, ως μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις για καθεμία από τις ώρες του εικοσιτετραώρου. Εξετάζοντας τα ωριαία αποτελέσματα, εντοπίστηκαν δύο διαφορετικοί τύποι επίδρασης.

Ο πρώτος τύπος επίδρασης εμφανίζεται στη διάρκεια των ωρών που αντιστοιχούν σε σταθεροποιημένο επιφανειακό στρώμα (βλ. ενότητα 7.1, σελ. 235 και εξής). Στα διαστήματα αυτά, η επίδραση της διαφοροποίησης της θερμοκρασίας είναι πολύ περιορισμένη. Ως παράδειγμα δίνεται το ακόλουθο γράφημα, όπου παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των δύο χαρακτηριστικών αέριων ρύπων, CO και NO_x, επί της κεντρικής γραμμής διάδοσης για την ώρα 20:00, η οποία αποτελεί μια χαρακτηριστική ώρα σταθεροποιημένου επιφανειακού

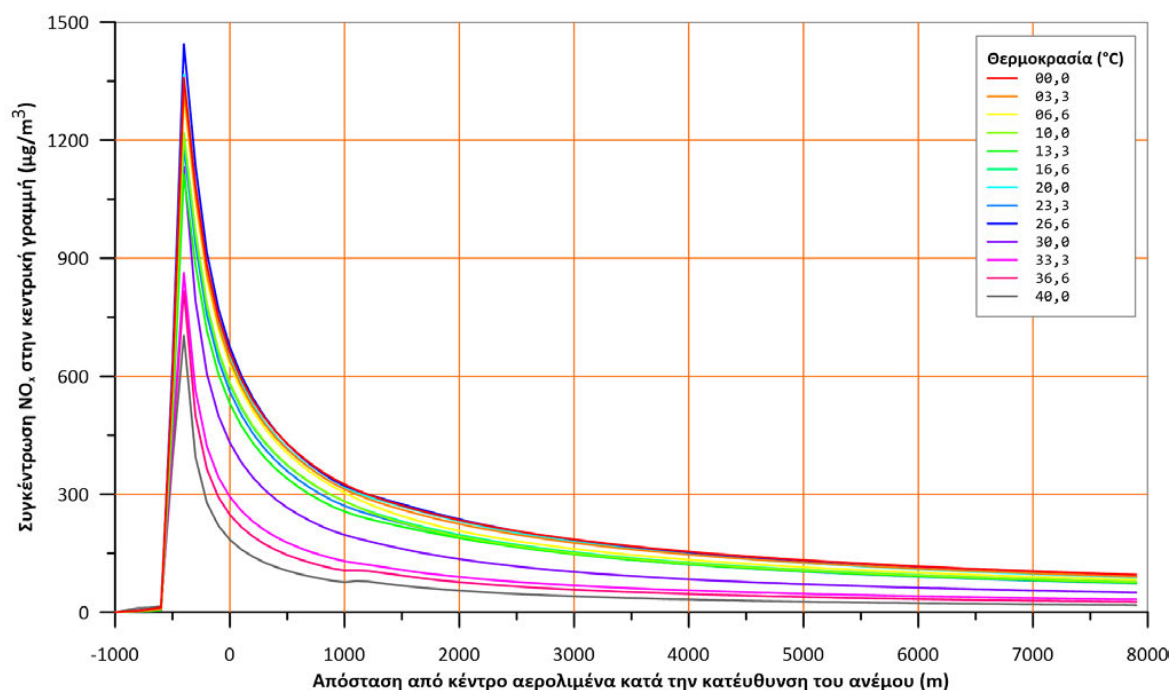
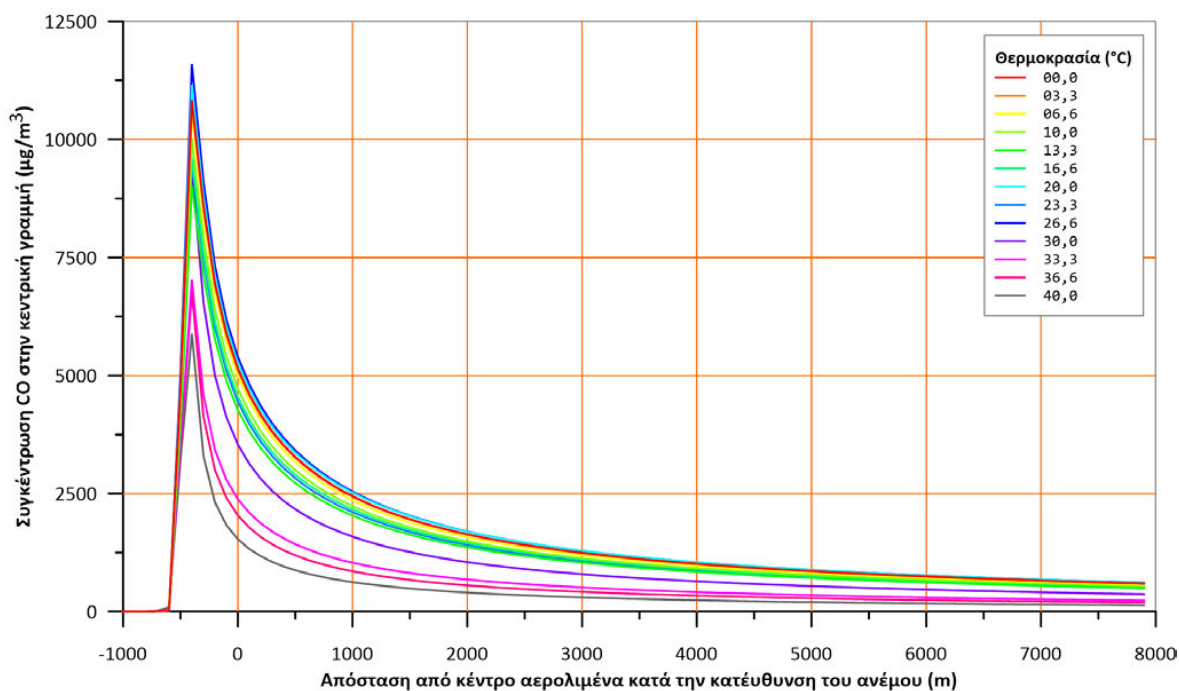
στρώματος. Είναι εμφανές ότι όσο και αν μεταβάλλεται η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, οι υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις δεν αλλάζουν σημαντικά.

Αντίστοιχη εικόνα επικρατεί και για τις άλλες ώρες κατά τις οποίες το επιφανειακό στρώμα θεωρείται από το EDMS ως σταθεροποιημένο.



Γράφημα 152: Συγκεντρώσεις CO και NO_x πάνω στην κεντρική γραμμή διασποράς, υπό διαφορετικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, για μια χαρακτηριστική ώρα σταθεροποιημένου επιφανειακού στρώματος.

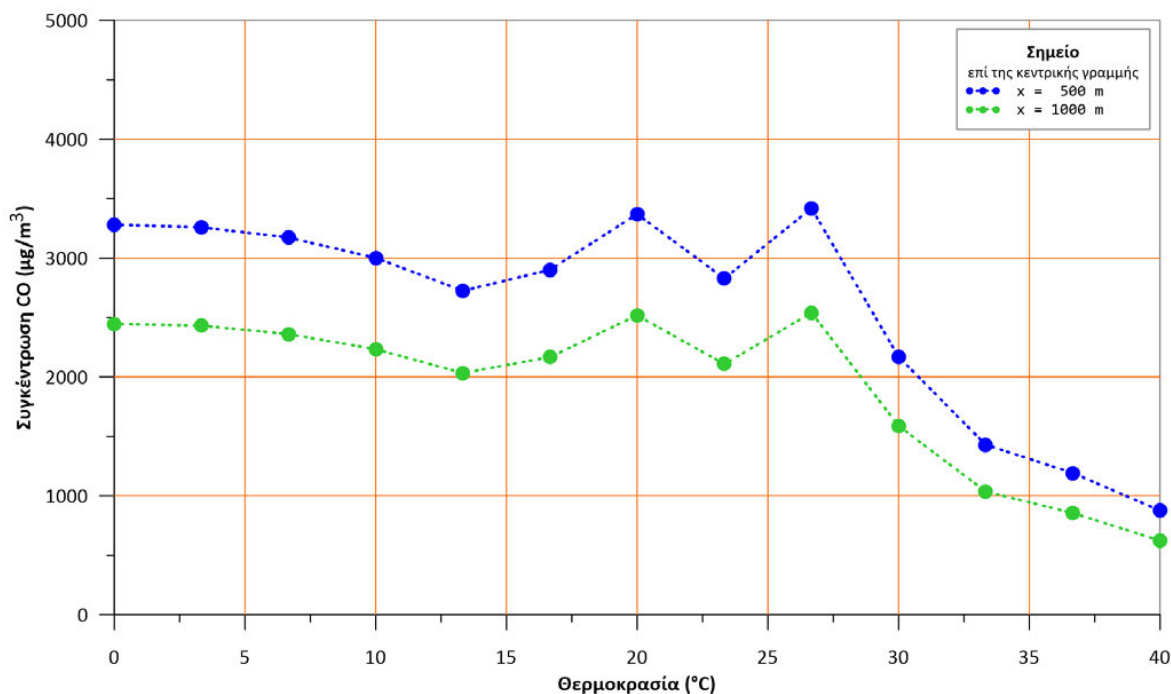
Ο δεύτερος τύπος επίδρασης εμφανίζεται κατά τις ώρες που το επιφανειακό στρώμα αλλάζει χαρακτήρα, από σταθεροποιημένο σε διαμεταγωγικό και αντιστρόφως. Στη διάρκεια των ωρών αυτών, διαφορετικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος οδηγούν σε διαφοροποιημένα αποτελέσματα συγκεντρώσεων. Η διαπίστωση αυτή φαίνεται χαρακτηριστικά στο επόμενο γράφημα, όπου παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των δύο χαρακτηριστικών αέριων ρύπων επί της κεντρικής γραμμής διάδοσης για την ώρα 17:00 (δηλαδή η μέση τιμή των συγκεντρώσεων στο διάστημα 16:00-17:00). Στη διάρκεια αυτής της ώρας, το EDMS υπολογίζει ότι πραγματοποιείται η μετάβαση από το διαμεταγωγικό επιφανειακό στρώμα της έντονης πρωινής και μεσημεριανής θέρμανσης του εδάφους, στο σταθεροποιημένο στρώμα της απογευματινής θερμοκρασιακής εξισορρόπησης μεταξύ εδάφους και εφαπτόμενου σε αυτό αέρα (βλ. γράφημα 147). Όπως φαίνεται, διαφορετικές θερμοκρασίες στη διάρκεια της ώρας αυτής οδηγούν σε αποτελέσματα συγκέντρωσης με ορατή διαφοροποίηση.



Γράφημα 153: Συγκεντρώσεις CO και NO_x πάνω στην κεντρική γραμμή διασποράς, υπό διαφορετικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, κατά την ώρα μετάβασης από διαμεταγωγικό σε σταθεροποιημένο επιφανειακό στρώμα.

Διαφαίνεται ότι καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, η υπολογιζόμενη συγκέντρωση διακυμαίνεται, αλλά όχι προς σταθερή κατεύθυνση και με ομοιόμορφο ρυθμό. Για να καταστεί πιο ευδιάκριτη η διακύμανση αυτή, μπορεί να ληφθεί μια κάθετη «τομή» του παραπάνω γραφήματος, δηλαδή να εξετασθούν οι τιμές της συγκέντρωσης σε ένα σημείο, υπό διαφορετική θερμοκρασία. Για το CO, το ακόλουθο γράφημα παρουσιάζει δύο τέτοιες

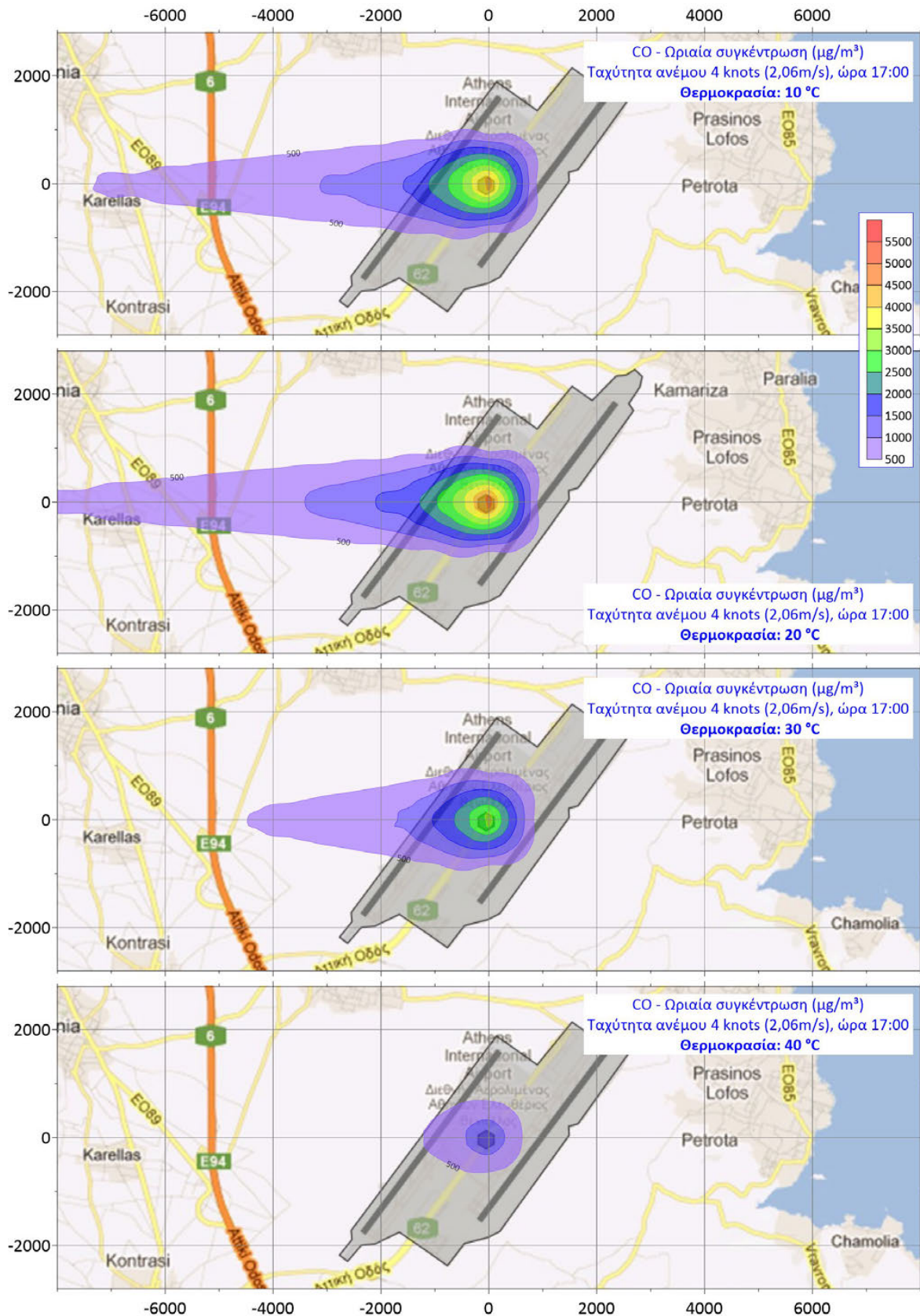
«τομές», στα σημεία $x=500$ και $x=1000$ m, όπου x η απόσταση από το κέντρο του αερολιμένα κατά την κατεύθυνση του ανέμου, όπως χρησιμοποιήθηκε στον οριζόντιο άξονα των προηγούμενων γραφημάτων.



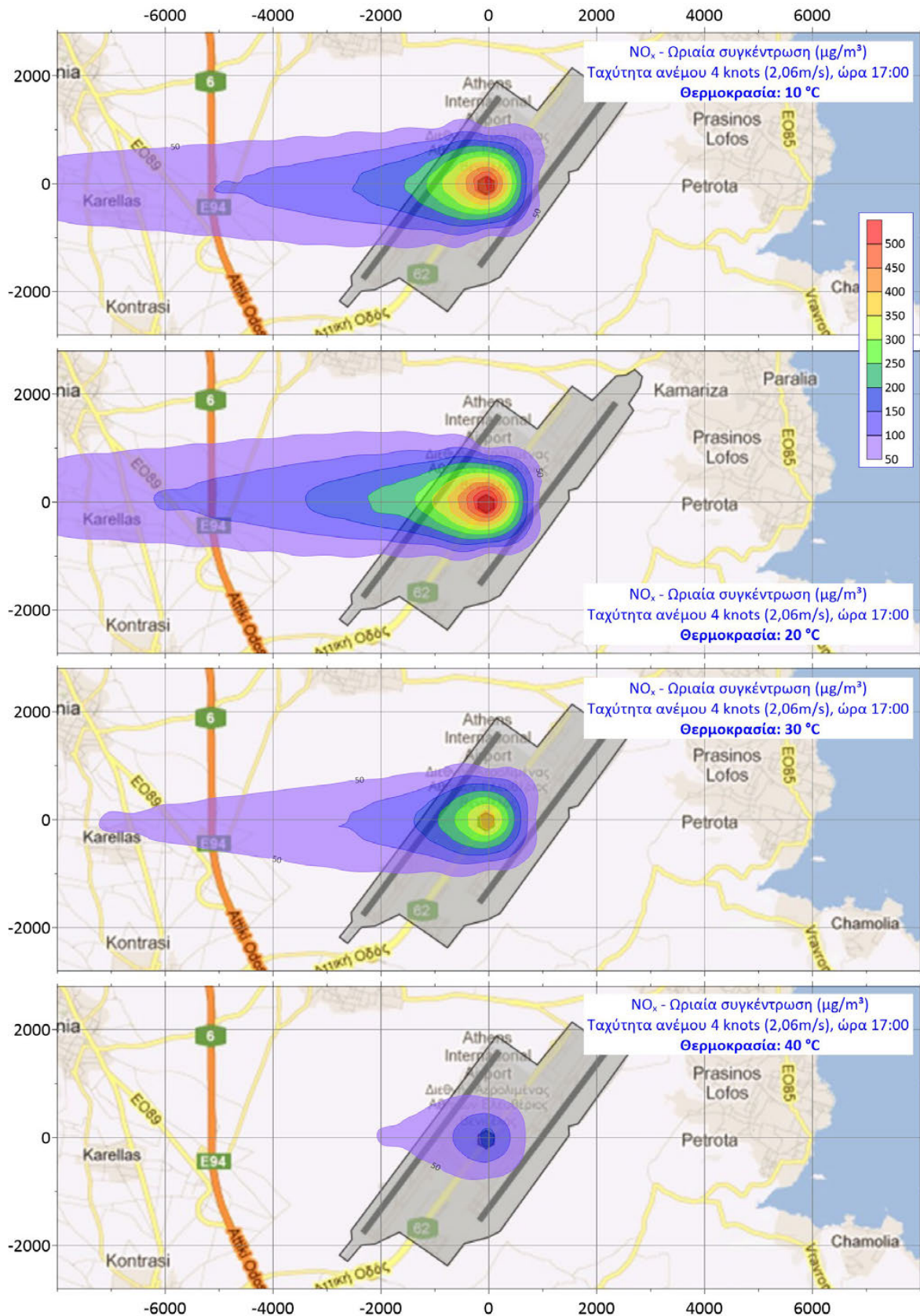
Γράφημα 154: Συγκεντρώσεις CO σε δύο σημεία της κεντρικής γραμμής διασποράς, υπό διαφορετικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, κατά την ώρα μετάβασης από διαμεταγωγικό σε σταθεροποιημένο επιφανειακό στρώμα.

Σε θερμοκρασίες από 0 °C μέχρι 13 °C παρατηρείται μικρή τάση μείωσης, από 13 °C έως 20 °C η τάση αυτή αντιστρέφεται, από 20 °C ως 27 °C παρατηρείται μια διακύμανση, η οποία ακολουθείται από νέα και σαφώς εντονότερη τάση μείωσης μεταξύ 27 °C ως 40 °C.

Αυτή η συμπεριφορά έχει το ανάλογο της και στη χωρική κατανομή των συγκεντρώσεων, όπως διαπιστώνεται από τα δύο επόμενα γραφήματα, στα οποία παρουσιάζεται η συγκέντρωση CO και NO_x για την ώρα 17:00, υπό τέσσερις ισαπέχουσες θερμοκρασίες. Από τους 10 °C στους 20 °C, οι διαφορές που επέρχονται στη χωρική κατανομή των συγκεντρώσεων είναι πολύ μικρές, σχεδόν δυσδιάκριτες. Από τους 20 °C στους 30 °C παρατηρείται μια σαφής μείωση τόσο της έκτασης όσο και του μεγέθους των συγκεντρώσεων, ενώ από τους 30 °C στους 40 °C η μείωση είναι ακόμη μεγαλύτερη.



Γράφημα 155: Επίδραση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος στη χωρική διασπορά του CO στη διάρκεια μιας μεταβατικής ώρας.



Γράφημα 156: Επίδραση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος στη χωρική διασπορά του NO_x στη διάρκεια μιας μεταβατικής ώρας.

Συνολικά, τα κύρια συμπεράσματα που εξάγονται από την ανάλυση ευαισθησίας ως προς τη θερμοκρασία, συνοψίζονται ως εξής:

- Η επίδραση των αλλαγών της θερμοκρασίας στα αποτελέσματα των συγκεντρώσεων που υπολογίζει το EDMS είναι ορατή κυρίως κατά τις ώρες μετάβασης από διαμεταγωγικό σε σταθεροποιημένο επιφανειακό στρώμα και αντιστρόφως. Κατά τις υπόλοιπες ώρες, αλλαγές στη θερμοκρασία περιβάλλοντος ως παράμετρο εισόδου των υπολογισμών, οδηγεί σε πολύ μικρή μεταβολή των αποτελεσμάτων.
- Ο τρόπος με τον οποίο οι διαφορετικές θερμοκρασίες κατά τις παραπάνω ώρες οδηγούν σε διαφορετικά αποτελέσματα δεν είναι απλός. Διακρίνεται μια γενική τάση μείωσης της συγκέντρωσης με την αύξηση της θερμοκρασίας, η οποία όμως δεν έχει ομοιόμορφο ρυθμό και διακόπτεται από διακυμάνσεις.
- Η παραπάνω συσχέτιση προκύπτει από ένα συνδυασμό φυσικών και υπολογιστικών αιτιών, τα οποία διαμορφώνουν ένα σύνθετο τρόπο με τον οποίο η θερμοκρασία επηρεάζει τη συγκέντρωση αέριων ρύπων. Τα φυσικά αίτια αφορούν κυρίως τη μεταβολή στην πυκνότητα του αέρα και το ύψος στο οποίο ανέρχονται κατά το πρώτο στάδιο αραίωσής τους οι εκπεμπόμενοι ρύποι, ενώ τα υπολογιστικά αίτια εντοπίζονται αφενός στο ότι η θερμοκρασία επηρεάζει το «κατώφλι» πέραν του οποίου αλλάζει η μέθοδος υπολογισμού ορισμένων εσωτερικών μεταβλητών (με κυριότερη την ταχύτητα τριβής u^*), αφετέρου στις επαναληπτικές διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του μήκους Monin-Obukhov L .
- Για την αποφυγή των παραπάνω επιδράσεων σε αποτελέσματα συγκεντρώσεων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για κανονιστικούς σκοπούς, διαφαίνεται ως ορθή πρακτική να διεξάγονται οι υπολογισμοί για ώρες που δεν περιέχουν μεταβάσεις της κατάστασης του ατμοσφαιρικού στρώματος, και οι οποίες για την Ελλάδα στην πλειονότητα των περιπτώσεων είναι το διάστημα 08:00-09:00 (από σταθεροποιημένο σε διαμεταγωγικό στρώμα) και 16:00-17:00 (από διαμεταγωγικό σε σταθεροποιημένο στρώμα). Κατ' αναλογία, για κανονιστικούς σκοπούς που απαιτούν προσέγγιση δυσμενούς σεναρίου, διαφαίνεται ως ορθή πρακτική η παραδοχή θερμοκρασιών που κινούνται στο κάτω άκρο του εύρους θερμοκρασιακής διακύμανσης της περιοχής του αερολιμένα.

7.4. Νεφοκάλυψη

Ο βαθμός κάλυψης του ουράνιου θόλου από σύννεφα, ή εν συντομία η νέφωση ή νεφοκάλυψη (cloud cover), περιλαμβάνεται μεταξύ των βασικών μετεωρολογικών δεδομένων που ζητούνται από τα περισσότερα μοντέλα διασποράς αέριων ρύπων, όπως και από το AERMOD. Στην ενότητα αυτή εξετάζεται η ευαισθησία των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται από το σύστημα EDMS (το οποίο χρησιμοποιεί το AERMOD) στις αλλαγές της νέφωσης.

7.4.1. Μηχανισμός επίδρασης της νεφοκάλυψης στη διασπορά των αέριων ρύπων

Η νεφοκάλυψη επιδρά με άμεσο τρόπο στο ποσοστό ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος. Η ηλιακή ακτινοβολία είναι η βασική αιτία κίνησης των αέριων μαζών του επιφανειακού ατμοσφαιρικού στρώματος, μέσω της θερμικής ενέργειας που εισφέρει. Η κατανομή της ενέργειας αυτής περιγράφεται από το ισοζύγιο

$$R_n = H + E_L + G \quad (9)$$

όπου R_n η καθαρή ηλιακή ακτινοβολία (net radiation),

H η αισθητή ροή θερμότητας (sensible heat flux),

E_L η ροή λανθάνουσας θερμότητας (latent heat flux), δηλαδή η απορρόφηση θερμότητας από το έδαφος, και

G η ροή θερμότητας από το έδαφος (soil heat flux).

Για μια πρώτη εκτίμηση της H , χρησιμοποιούνται οι απλές αναλογίες για τις άλλες θερμικές ροές $G = 0,1 R_n$ και $E_L = H/B_o$, όπου B_o ο λόγος Bowen που συχνά περιέχεται σε αναλυτικές μετεωρολογικές καταγραφές και αντιπροσωπεύει τη διαθέσιμη υγρασία του εδάφους. Η εκτίμηση αυτή της H είναι απαραίτητη για το χαρακτηρισμό του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος.

Εάν δεν διατίθενται μετρήσεις της R_n , τότε το μέγεθός της υπολογίζεται προσεγγιστικά από τη σχέση

$$R_n = \frac{(1 - r(\varphi))R + c_1 T_{ref}^6 - \sigma_{SB} T_{ref}^4 + c_2 n}{1 + c_3} \quad (10)$$

όπου R ο ηλιασμός, δηλαδή η συνολική έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία (insolation),

$c_{1,2,3}$ σταθερές με τιμές $c_1 = 5,31 \times 10^{-13} \text{ W/m}^2$, $c_2 = 60 \text{ W/m}^2$ και $c_3 = 0,12$,

σ_{SB} η σταθερά Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$),

$r(\varphi)$ η λευκαύγεια (albedo) δηλαδή το μέτρο της ανακλαστικότητας, που ισούται με το λόγο της ανακλώμενης προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία.

Η λευκαύγεια για γωνία πρόσπτωσης φ υπολογίζεται από τη σχέση

$$r(\varphi) = r' + (1 - r')e^{-0,1\varphi - 0,5(1-r')^2} \quad (11)$$

όπου $r' = r(90^\circ)$.

Η συνολική έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία R υπολογίζεται από τη σχέση

$$R = R_o (1 - 0,75n^{3,4}) \quad (12)$$

όπου n είναι το ποσοστό νεφοκάλυψης

R_o η ηλιακή ακτινοβολία καθαρού ουρανού, η οποία προκύπτει από τη σχέση

$$R_o = 990 \sin \varphi - 30$$

φ η γωνία ανόδου του ήλιου, υπολογιζόμενη από τη σχέση $\varphi = 0,5(\varphi(t_p) + \varphi(t))$

όπου t και t_p σημαίνουν την τρέχουσα και την προηγούμενη ώρα αντίστοιχα.

7.4.2. Διαμόρφωση δεδομένων εισόδου

Για να αναλυθεί η επίδραση των αλλαγών της νεφοκάλυψης στα αποτελέσματα, επιλέγεται η διαμόρφωση μιας υπόθεσης εργασίας όπου το ποσοστό της νέφωσης λαμβάνεται ως μεταβαλλόμενη παράμετρος, ενώ όλα τα άλλα δεδομένα εισόδου προκαθορίζονται σε σταθερές τιμές, οι οποίες γενικώς ευνοούν την εμφάνιση υψηλών συγκεντρώσεων.

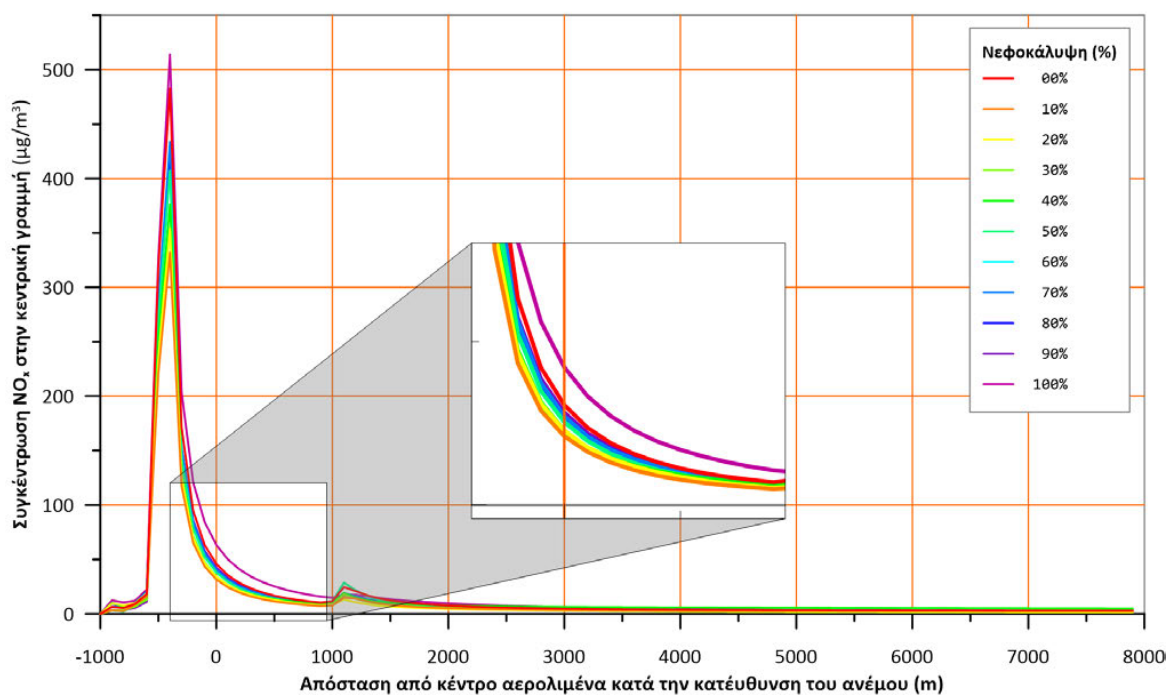
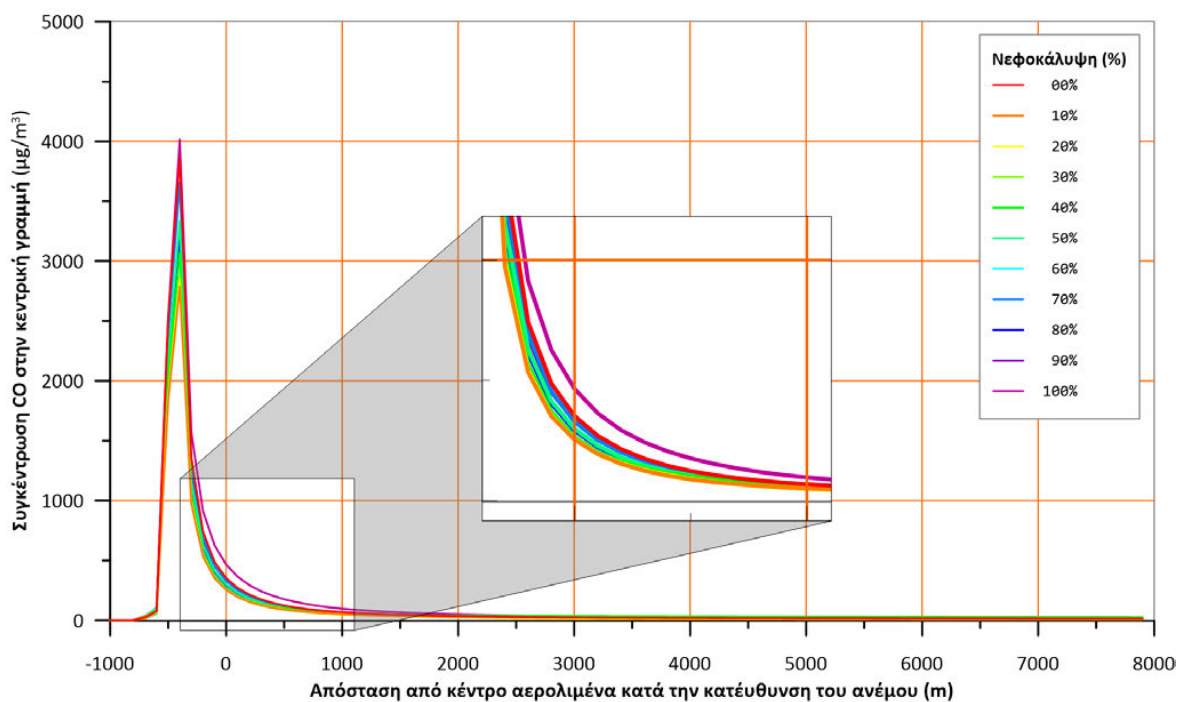
Έτσι, η υπόθεση εργασίας διαμορφώνεται με τα εξής δεδομένα εισόδου:

- Αερολιμένας:..... Διεθνής Αερολιμένας Αθηνών.
- Ρυθμός κίνησης αεροσκαφών: Σταθερός, 15 κύκλοι LTO ανά ώρα, 30% μεγάλα ελικοφόρα (ATR 72-500) και 70% μεγάλα αεριωθούμενα (Airbus 320-200 και Boeing 747-400).
- Χωρική κατανομή κινήσεων: Ομοιόμορφα και στους δύο διαδρόμους, με αφετηρία και κατάληξη στον κεντρικό αεροσταθμό.
- Εποχή: Χειμώνας
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος:..... 10 °C (50 °F).
- Ώρα της ημέρας:..... Όλες, ώστε να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα για τις πιο χαρακτηριστικές.
- Νεφοκάλυψη:Μεταβλητή, από 0% ως 100% με βήμα 10%.
- Κατεύθυνση ανέμου: Από ανατολικά.
- Ταχύτητα ανέμου: 4 knots (2,06 m/s).

7.4.3. Αποτελέσματα

Έχοντας εισάγει την παραπάνω υπόθεση εργασίας στο EDMS, υπολογίστηκαν για κάθε βήμα μεταβολής 10% της νέφωσης οι συγκεντρώσεις των βασικών αέριων ρύπων, ως μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις για καθεμία από τις ώρες του εικοσιτετραώρου. Εξετάζοντας τα ωριαία αποτελέσματα, εντοπίστηκαν δύο διαφορετικοί τύποι επίδρασης.

Ο πρώτος τύπος επίδρασης εμφανίζεται στη διάρκεια των πρωινών ωρών, από την ανατολή του ήλιου μέχρι την έναρξη του απογεύματος. Ως παράδειγμα δίνεται το ακόλουθο γράφημα, όπου παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των δύο χαρακτηριστικών αέριων ρύπων, CO και NO_x, επί της κεντρικής γραμμής διάδοσης για την ώρα 10:00, η οποία αποτελεί μια χαρακτηριστική μεσημεριανή ώρα υψηλής εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας.

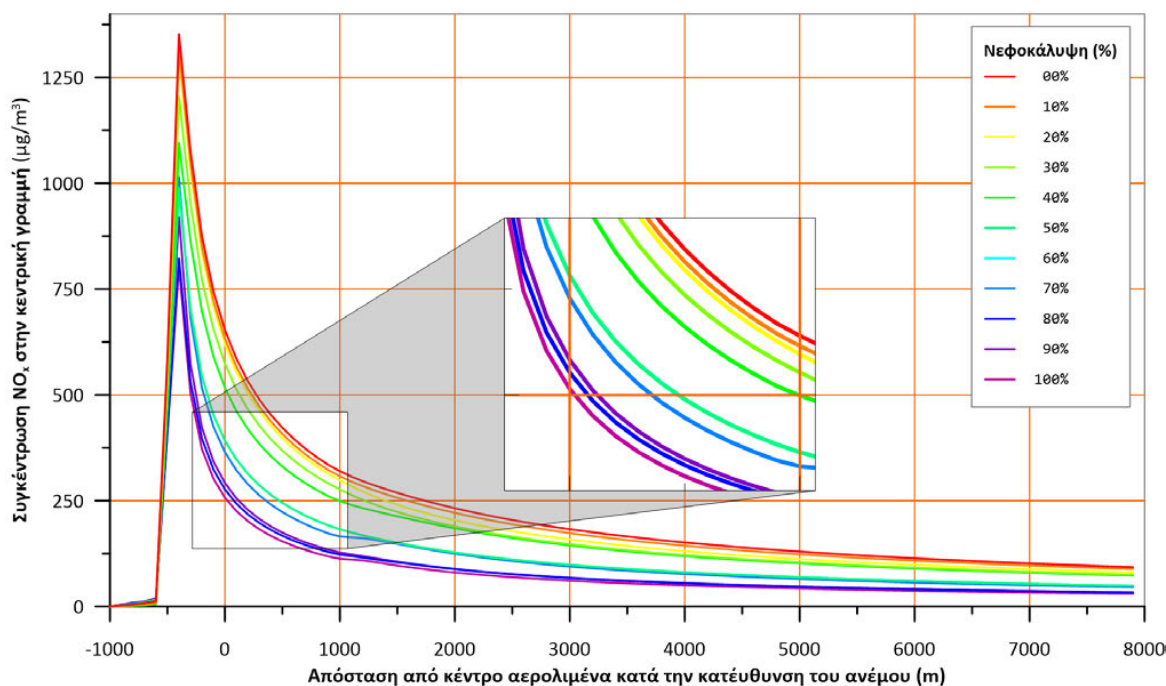
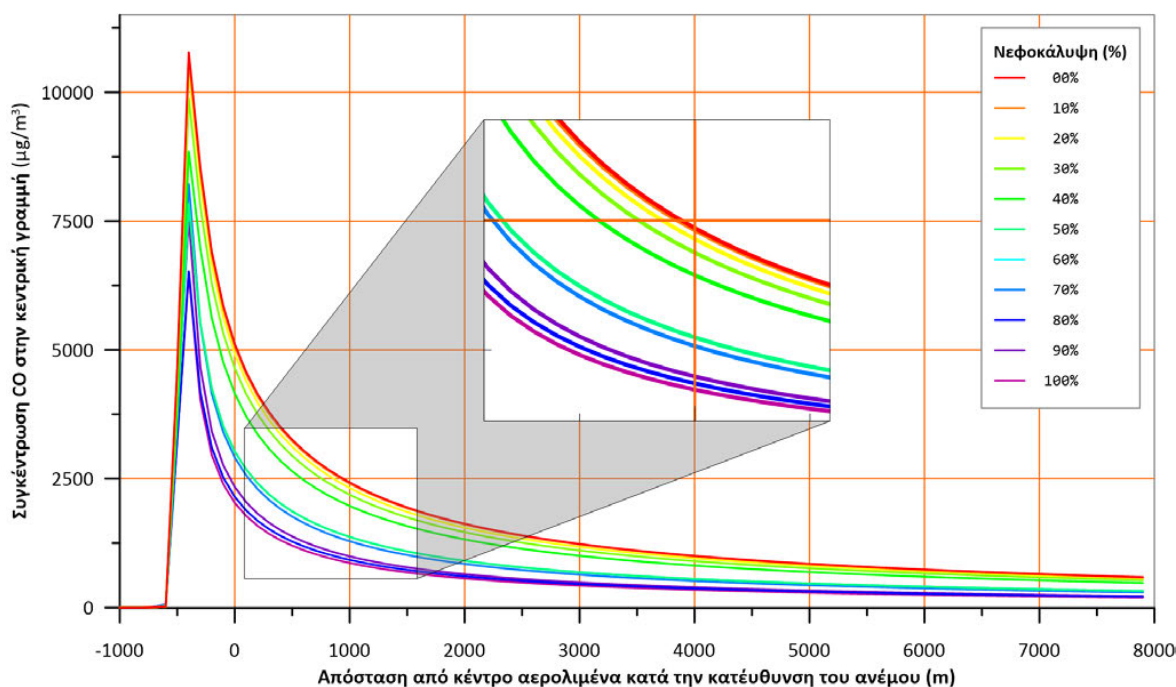


Γράφημα 157: Μέση ωριαία συγκέντρωση CO και NO_x πάνω στην κεντρική γραμμή διασποράς, υπό μεταβαλλόμενη νεφοκάλυψη, στις 10:00 (υψηλή εισερχόμενη ακτινοβολία, κρύο έδαφος).

Είναι εμφανές από το γράφημα ότι, η επίδραση της αύξησης της νεφοκάλυψης από 0 έως 90% είναι πολύ περιορισμένη, ενώ στο τελευταίο βήμα, από το 90% στο 100%, παρατηρείται ορατή μεν αλλά πολύ μικρή αύξηση των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων. Κατ' αναλογία, οι χωρικές διαφοροποιήσεις στην κατανομή των συγκεντρώσεων λόγω της αυξανόμενης νέφωσης είναι δυσδιάκριτες κατά τη συγκεκριμένη ώρα. Αντίστοιχη γενική εικόνα επικρατεί

και για τις άλλες ώρες, από 09:00 έως 16:00, όπου η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία είναι έντονη και το έδαφος παραμένει πιο κρύο από τον αέρα που εφάπτεται σε αυτό. Διευκρινίζεται ότι, η τοπική μικρή αιχμή που εμφανίζεται στο γράφημα των NO_x μετά το $x = 1000 \text{ m}$ αντιστοιχεί στις εκπομπές των αεροσκαφών που απογειώνονται από το δυτικό διάδρομο.

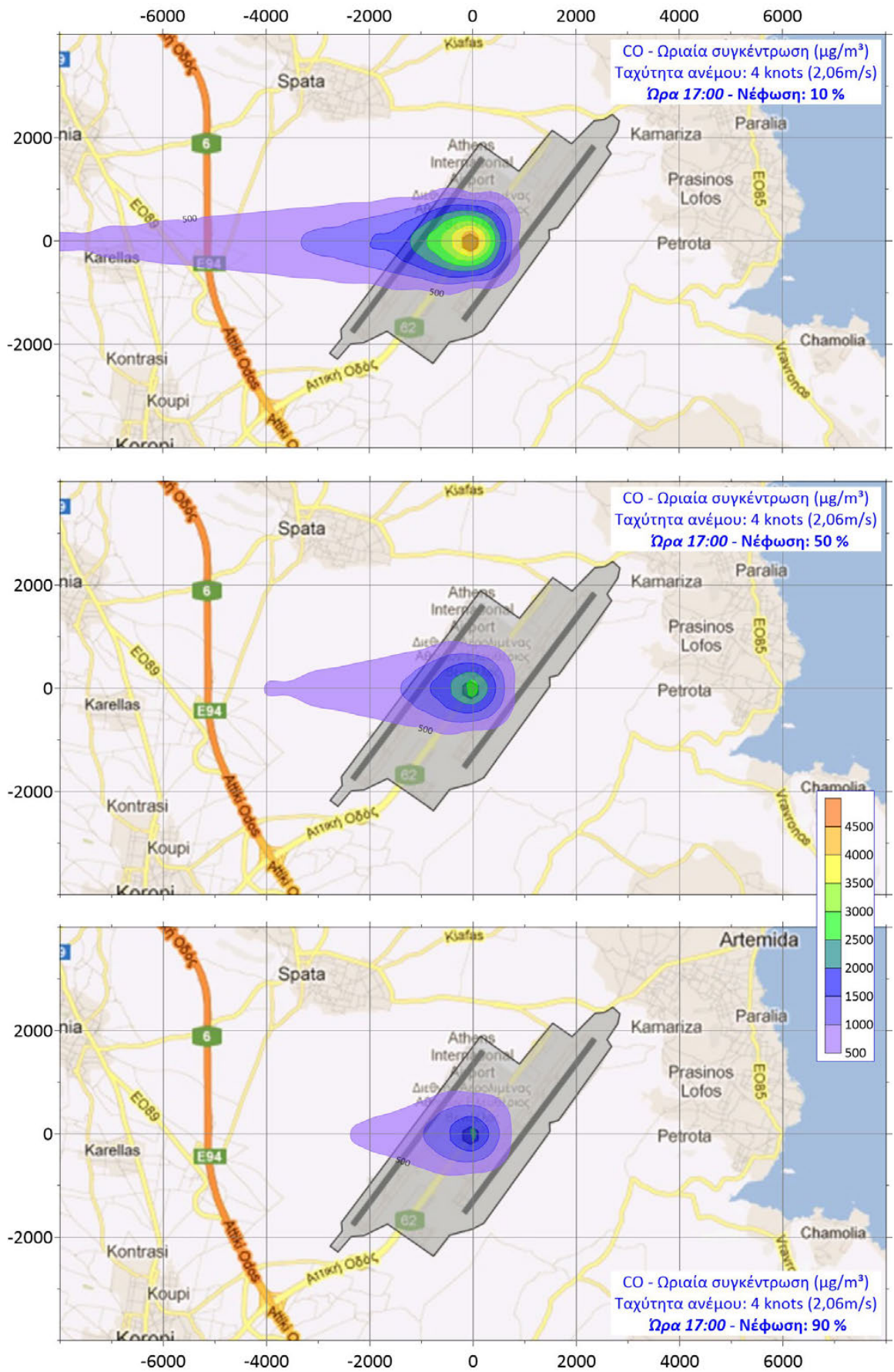
Ο δεύτερος τύπος επίδρασης εμφανίζεται στη διάρκεια των απογευματινών ωρών, όταν η ένταση της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας μειώνεται και παράλληλα η εκπομπή θερμότητας από το έδαφος αυξάνεται. Στη διάρκεια των ωρών αυτών διαφαίνεται ότι η νέφωση επιδρά εντονότερα και κατά τρόπο αντίστροφο απ' ότι προηγουμένως: η αύξησή της οδηγεί σε μείωση της υπολογιζόμενης συγκέντρωσης και με βαθμό διαφοροποίησης σαφώς μεγαλύτερο από των πρωϊνών και μεσημεριανών ωρών, όπως φαίνεται στο επόμενο γράφημα, το οποίο αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα για τις απογευματινές ώρες.



Γράφημα 158: Μέση ωριαία συγκέντρωση CO και NO_x πάνω στην κεντρική γραμμή διασποράς, υπό μεταβαλλόμενη νεφοκάλυψη, στις 17:00 (μέτρια εισερχόμενη ακτινοβολία, θερμό έδαφος).

Πέραν της εντονότερης διαφοροποίησης των αποτελεσμάτων που προκαλεί η αλλαγή στο ποσοστό νεφοκάλυψης, σημειώνεται επιπρόσθετα μια ακόμη διαφορά ανάμεσα στο παραπάνω γράφημα και στο γράφημα 157: στις απογευματινές ώρες τα μεγέθη των συγκεντρώσεων είναι σαφώς μεγαλύτερα, τείνοντας προς το σχεδόν διπλάσιο αυτών που υπολογίζονται για τις πρωινές ώρες. Τα αίτια των συγκεκριμένων διαφορών αναλύθηκαν

στην ενότητα 7.1 (σελ. 235 κ.ε.). Χωρικά, η επίδραση της νέφωσης στην κατανομή των συγκεντρώσεων παρουσιάζεται στο ακόλουθο γράφημα.



Γράφημα 159: Επίδραση της νέφωσης στη χωρική διασπορά του CO στη διάρκεια μιας απογευματινής ώρας.

Συνοψίζοντας τις διαπιστώσεις από την ανάλυση ευαισθησίας ως προς τη νέφωση, προκύπτουν τα εξής:

- Βρέθηκαν δύο διαφορετικοί τύποι συμπεριφοράς των αποτελεσμάτων.
- Ο πρώτος τύπος εμφανίζεται κατά τις πρωινές ώρες και ως το απόγευμα. Στο διάστημα αυτό, η μεταβολή του ποσοστού νεφοκάλυψης έχει πολύ μικρή επίδραση στα αποτελέσματα, η οποία πάντως είναι προς την όμοια κατεύθυνση (αύξηση νέφωσης → αύξηση συγκέντρωσης).
- Ο δεύτερος τύπος εμφανίζεται τις απογευματινές ώρες. Στο διάστημα αυτό, η μεταβολή της νέφωσης έχει ορατή επίδραση στα αποτελέσματα υπολογισμού των συγκεντρώσεων, τόσο ως προς το ύψος των μέγιστων τιμών, όσο και ως προς τη χωρική κατανομή. Η επίδραση αυτή χαρακτηρίζεται από αντίστροφη αναλογία. Όσο αυξάνεται η νέφωση, τόσο περιορίζεται το ύψος και η εξάπλωση της συγκέντρωσης.

7.5. Ύψος νέφωσης

Το ύψος της νέφωσης (cloud ceiling ή cloud base) περιλαμβάνεται μεταξύ των μετεωρολογικών δεδομένων που ζητούνται από αρκετά μοντέλα διασποράς αέριων ρύπων, όπως και από το AERMOD, ενώ παράλληλα, επηρεάζει τις αεροπορικές κινήσεις, μέσω της συμμετοχής του στις συνθήκες διαμόρφωσης του αερολιμένα (airport configuration) από το EDMS. Στην ενότητα αυτή εξετάζεται η ευαισθησία των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται από το σύστημα EDMS (το οποίο χρησιμοποιεί το AERMOD) στις αλλαγές του ύψους νέφωσης.

7.5.1. Μηχανισμός επίδρασης του ύψους νέφωσης στη διασπορά των αέριων ρύπων

Η χρήση του ύψους νέφωσης στη διαμόρφωση των αεροπορικών κινήσεων από τον προσομοιωτή λειτουργίας αερολιμένα του EDMS, δεν είναι αυτόματη· αντίθετα, ζητείται από το χρήστη να ορίσει τους διαδρόμους που θα εξυπηρετούν τις κινήσεις ανάλογα με το πόσο χαμηλά είναι τα σύννεφα, επηρεάζοντας έτσι τα ίχνη πτήσης, όπως άλλωστε συμβαίνει και κατά την πραγματική λειτουργία ενός αεροδρομίου. Ο ρόλος πάντως αυτός του ύψους νέφωσης αφορά τα σημεία και τα ύψη των εναέριων εκπομπών και σχετίζεται αποκλειστικά με ζητήματα αεροναυτιλίας και ελέγχου της εναέριας κυκλοφορίας. Επομένως, δεν

διαφαίνεται σκόπιμη η διεξαγωγή ανάλυσης ευαισθησίας των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων αέριων ρύπων ως προς το ρόλο αυτό.

Παράλληλα, το ύψος νέφωσης περιλαμβάνεται στα μετεωρολογικά δεδομένα που ζητούνται για τη λειτουργία του AERMOD. Όμως, τόσο στην περιγραφή λειτουργίας του μοντέλου,^[104] όσο και στην αναλυτικότερη περιγραφή του μετεωρολογικού προεπεξεργαστή AERMET^[109] δεν δίνονται πληροφορίες για τον τρόπο που το ύψος νέφωσης υπεισέρχεται στις εξισώσεις. Η ίδια έλλειψη στοιχείων παρατηρείται και στα δύο κύρια άρθρα τεκμηρίωσης του AERMOD.^[80,110]

Η ευρύτερη έρευνα για το ρόλο του ύψους νέφωσης στη διασπορά αέριων ρύπων εντοπίζει πεπαλαιωμένες κυρίως αναφορές,^[111,112] οι οποίες αναφέρονται στη χρήση της συγκεκριμένης παραμέτρου, μαζί με το ποσοστό νεφοκάλυψης, για τον προσδιορισμό της κατάστασης ευστάθειας της ατμόσφαιρας κατά Pasquill - Gifford. Δεδομένης της αποστασιοποίησης του AERMOD από αυτή την προσέγγιση και την υιοθέτηση του μήκους Monin-Obukhov ως μέτρου της δυναμικότητας διασποράς του επιφανειακού ατμοσφαιρικού στρώματος (βλ. ενότητα 7.2.1, σελ. 242 κ.ε.), διαφαίνεται ότι το ύψος νέφωσης δεν θα έχει ιδιαίτερη επίδραση στα αποτελέσματα υπολογισμού συγκεντρώσεων.

7.5.2. Διαμόρφωση δεδομένων εισόδου

Για να αναλυθεί η ενδεχόμενη επίδραση των αλλαγών του ύψους νέφωσης στα αποτελέσματα, επιλέγεται η διαμόρφωση μιας υπόθεσης εργασίας όπου το ύψος αυτό λαμβάνεται ως μεταβαλλόμενη παράμετρος, ενώ όλα τα άλλα δεδομένα εισόδου προκαθορίζονται σε σταθερές τιμές, οι οποίες γενικώς ευνοούν την εμφάνιση υψηλών συγκεντρώσεων.

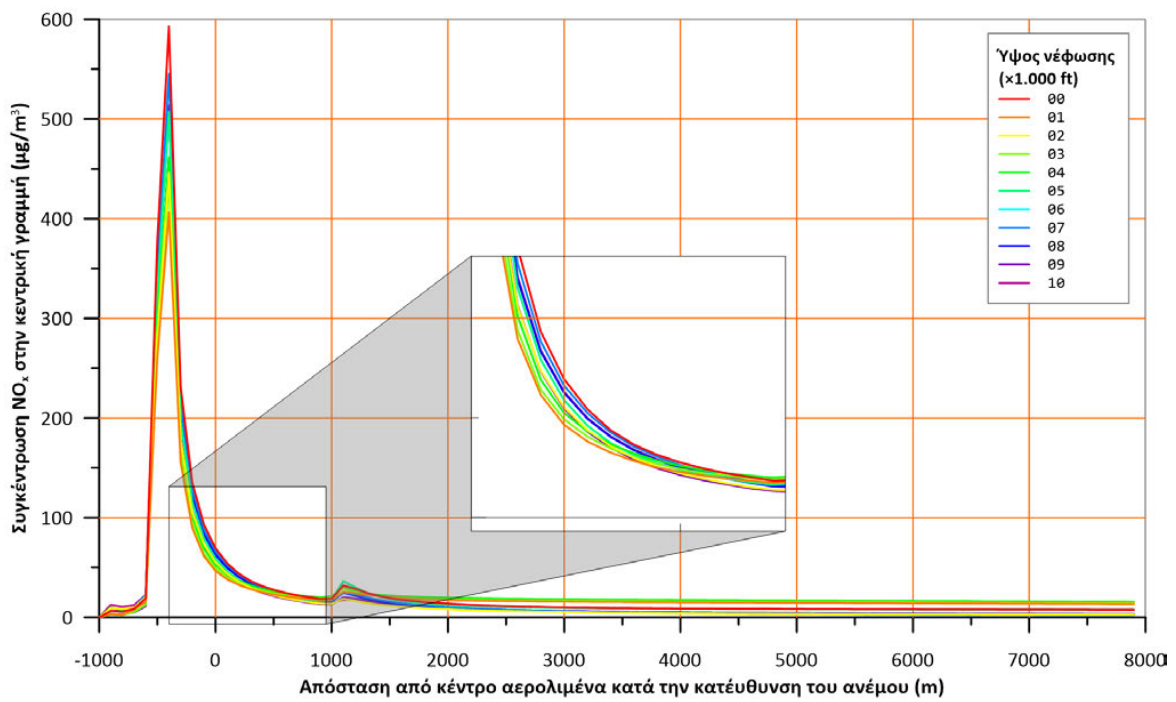
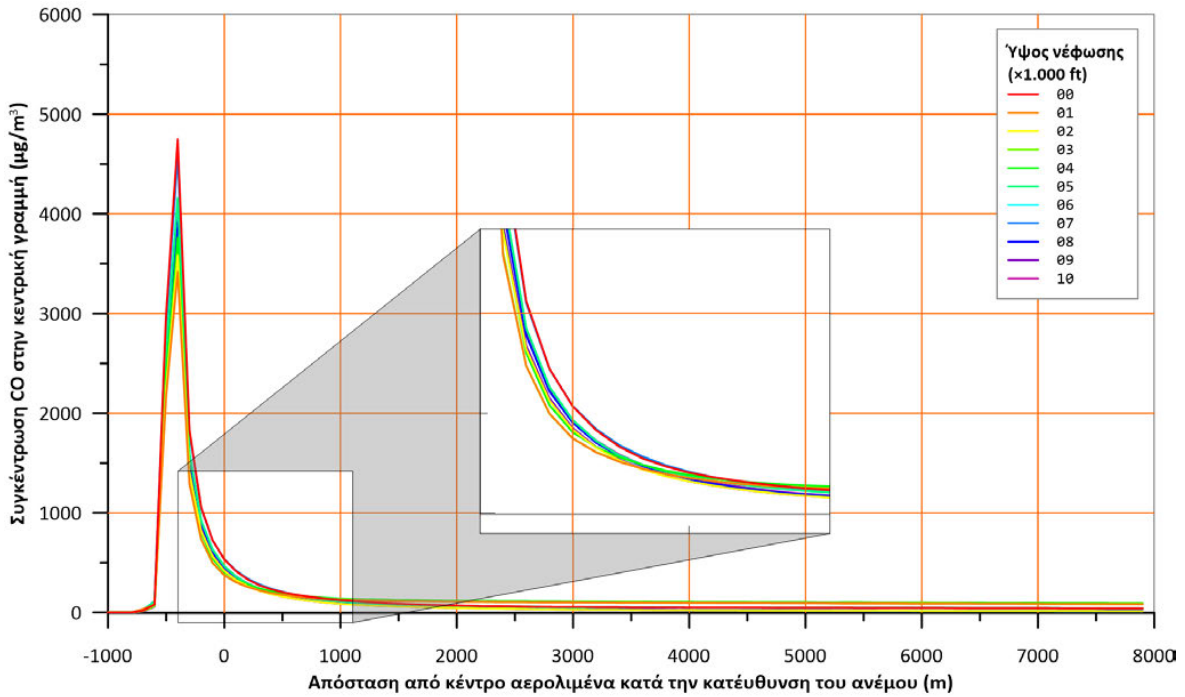
Έτσι, η υπόθεση εργασίας διαμορφώνεται με τα εξής δεδομένα εισόδου:

- Αερολιμένας:..... Διεθνής Αερολιμένας Αθηνών.
- Ρυθμός κίνησης αεροσκαφών: Σταθερός, 15 κύκλοι LTO ανά ώρα, 30% μεγάλα ελικοφόρα (ATR 72-500) και 70% μεγάλα αεριωθούμενα (Airbus 320-200 και Boeing 747-400).
- Χωρική κατανομή κινήσεων: Ομοιόμορφα και στους δύο διαδρόμους, με αφητηρία και κατάληξη στον κεντρικό αεροσταθμό.
- Εποχή: Χειμώνας
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος:..... 10 °C (50 °F).
- Ώρα της ημέρας:..... Όλες, ώστε να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα για τις πιο χαρακτηριστικές.
- Κατεύθυνση ανέμου: Από ανατολικά.
- Ταχύτητα ανέμου: 4 knots (2,06 m/s).
- Νέφωση:..... 100%.
- Ύψος νέφωσης: 0 – 10.000 ft με βήμα 1.000 ft (0 – 3.000 m, με βήμα 300 m περίπου).

7.5.3. Αποτελέσματα

Έχοντας εισάγει την παραπάνω υπόθεση εργασίας στο EDMS, υπολογίστηκαν για κάθε βήμα 1.000 ft του ύψους της νέφωσης οι συγκεντρώσεις των βασικών αέριων ρύπων, ως μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις για καθεμία από τις ώρες του εικοσιτετραώρου.

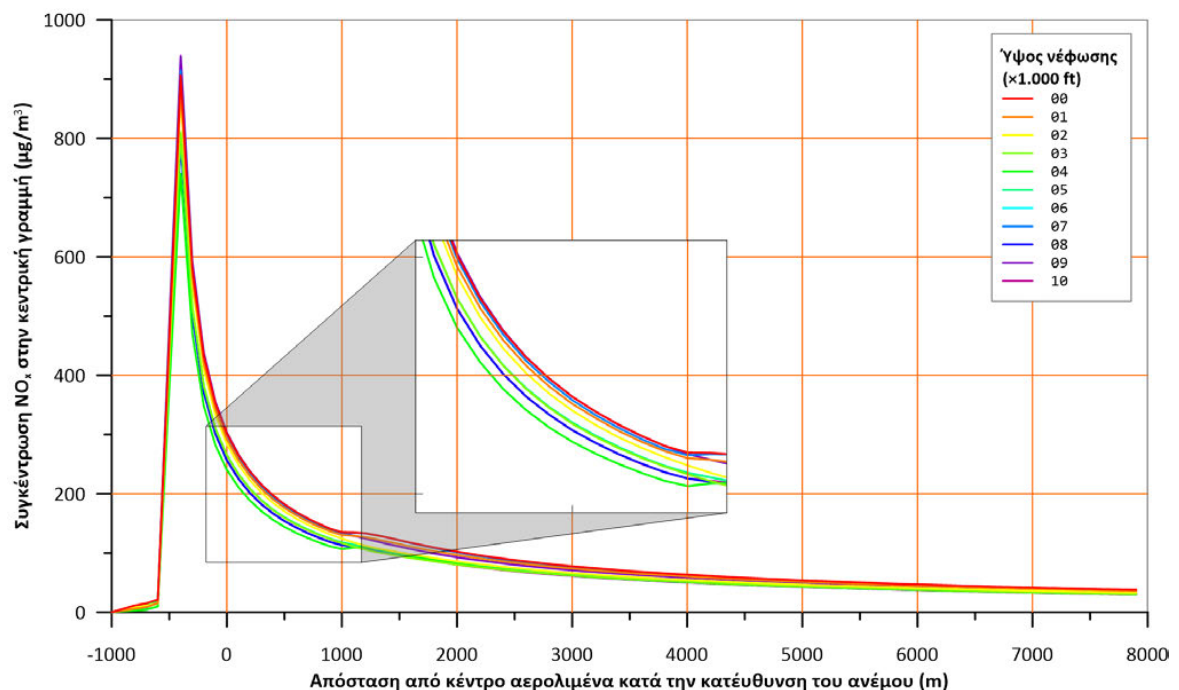
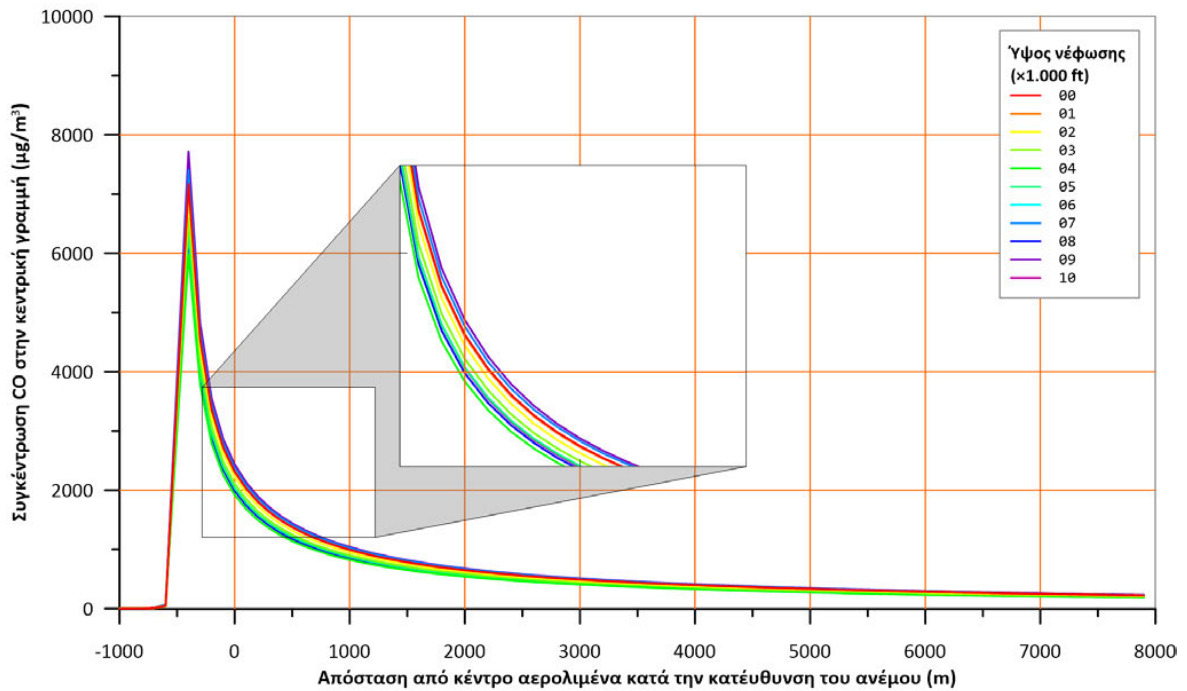
Στη διάρκεια των πρωινών ωρών, από την ανατολή του ήλιου μέχρι την έναρξη του απογεύματος, η μεταβολή του ύψους νέφωσης έχει αδιόρατη επίδραση στα αποτελέσματα υπολογισμού των συγκεντρώσεων, όπως φαίνεται στο ακόλουθο γράφημα, όπου παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των δύο χαρακτηριστικών αέριων ρύπων, CO και NO_x, επί της κεντρικής γραμμής διάδοσης για την ώρα 12:00.



Γράφημα 160: Μέση ωριαία συγκέντρωση CO και NO_x πάνω στην κεντρική γραμμή διασποράς, υπό μεταβαλλόμενο ύψος νέφωσης, στις 12:00 (υψηλή εισερχόμενη ακτινοβολία, κρύο έδαφος).

Το παραπάνω γράφημα είναι αντιπροσωπευτικό των αποτελεσμάτων για όλο το εύρος των ωριαίων τιμών από τις 09:00 ως και τις 15:00.

Στη διάρκεια των απογευματινών ωρών, η επίδραση της μεταβολής του ύψους νέφωσης είναι και πάλι πολύ μικρή, αλλά κάπως εμφανέστερη απ’ ότι προηγουμένως, όπως προκύπτει από το ακόλουθο γράφημα, όπου παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των δύο χαρακτηριστικών αέριων ρύπων, CO και NO_x, επί της κεντρικής γραμμής διάδοσης για την ώρα 17:00.



Γράφημα 161: Μέση ωριαία συγκέντρωση CO και NO_x πάνω στην κεντρική γραμμή διασποράς, υπό μεταβαλλόμενο ύψος νέφωσης, στις 17:00 (μέτρια εισερχόμενη ακτινοβολία, θερμό έδαφος).

Διαπιστώνεται επομένως ότι, τόσο κατά τις πρωινές όσο και κατά τις απογευματινές ώρες, το ύψος της νέφωσης έχει ιδιαίτερα περιορισμένη, σχεδόν αδιόρατη, επίδραση στα αποτελέσματα υπολογισμού των συγκεντρώσεων με το EDMS.

Αυτό το εύρημα αποτελεί μια θετική συγκυρία, καθότι τις περισσότερες φορές τα διαθέσιμα μετεωρολογικά δεδομένα δεν περιλαμβάνουν μετρήσεις του ύψους νέφωσης. Το συμπέρασμα της παραπάνω ανάλυσης είναι ότι η έλλειψη αυτή δεν χρειάζεται να εγείρει ανησυχίες: η συγκεκριμένη μετεωρολογική παράμετρος μπορεί να υποκατασταθεί από αδρές εμπειρικές μέσες τιμές και τα αποτελέσματα προσομοίωσης των συγκεντρώσεων με το EDMS δεν πρόκειται να επηρεασθούν ιδιαίτερα.

7.6. Διαπιστώσεις από την ανάλυση ευαισθησίας

Στις πέντε ενότητες που προηγήθηκαν, αναλύθηκε η ευαισθησία των αποτελεσμάτων υπολογισμού των συγκεντρώσεων με το EDMS ως προς τη μεταβολή πέντε βασικών παραμέτρων: ώρα της ημέρας, ταχύτητα ανέμου, θερμοκρασία περιβάλλοντος, ποσοστό νεφοκάλυψης και ύψος νεφών.

Ως αερολιμένας αναφοράς επελέγη ο Διεθνής Αερολιμένας Αθηνών και η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε για την ανάλυση ευαισθησίας ήταν απλή: η εξεταζόμενη παράμετρος μεταβαλλόταν κατά μικρά βήματα σε ένα εύρος τιμών που αντιστοιχεί σε ρεαλιστικές συνθήκες, ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρούνταν σταθερές, σε τιμές που ευνοούν την εμφάνιση υψηλών συγκεντρώσεων. Για κάθε ένα από τα βήματα αυτά, υπολογιζόταν το πεδίο συγκεντρώσεων, περιλαμβανόμενων των αποτελεσμάτων επί της κεντρικής γραμμής διάδοσης, δηλαδή της γραμμής με αφετηρία το κέντρο του αεροδρομίου και κατεύθυνση αυτή του ανέμου.

Τα βασικότερα συμπεράσματα από την ανάλυση ευαισθησίας είναι τα εξής:

- *Η παράμετρος με την εντονότερη επίδραση στα αποτελέσματα είναι η ταχύτητα του ανέμου, όπως άλλωστε αναμενόταν. Μικρές μεταβολές της προκαλούν σημαντικές διαφοροποιήσεις στις μέγιστες τιμές των συγκεντρώσεων, καθώς και στην έκταση των ισορροπαντικών γραμμών. Από έμπρακτης περιβαλλοντικής σκοπιάς, αυτό σημαίνει ότι, ακόμη και ένα ελαφρύ αεράκι είναι επαρκές για να διασπείρει τους αέριους ρύπους του ΔΑΑ και να μειώσει τις συγκεντρώσεις εδάφους σε επίπεδα πολύ κάτω των οριακών· αντίθετα, η άπνοια και οι πολύ χαμηλές ταχύτητες ανέμου (μικρότερες του 1 m/s) αποτελούν αναγκαία - και συχνά και ικανή - συνθήκη για την εμφάνιση υψηλών*

συγκεντρώσεων. Παράλληλα, ο εντοπισμός της υψηλής ευαισθησίας των αποτελεσμάτων συγκέντρωσης ως προς την ταχύτητα του ανέμου, καταδεικνύει τον κρίσιμο ρόλο του συγκεκριμένου μεγέθους κατά τη διεξαγωγή εκτιμήσεων σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Δεδομένου ότι στις σχετικές μελέτες χρησιμοποιούνται εξ αντικειμένου πολυάριθμες παραδοχές, ο ρεαλισμός στην επιλογή κατάλληλης ταχύτητας ανέμου και η τεκμηρίωση της επιλογής αυτής σε σχέση με την τοπική μετεωρολογία, καθίστανται μείζονες προϋποθέσεις διασφάλισης της αξιοπιστίας των υπολογιστικών αποτελεσμάτων. Επίσης, η διεξαγωγή πολλαπλών εκτιμήσεων, με διαφορετική κάθε φορά ταχύτητα ανέμου, διαφαίνεται ως χρήσιμη πρακτική, ιδίως όταν χρειάζεται να οριοθετηθεί το πλήθος και ύψος των αναμενόμενων υπερβάσεων σε σχέση με τα επιτρεπόμενα από τη νομοθεσία.

- *Η ώρα της ημέρας επηρεάζει έντονα τα αποτελέσματα των υπολογισμών συγκέντρωσης.* Αυτό είναι ένα αξιοσημείωτο συμπέρασμα, με την έννοια ότι η συγκεκριμένη παράμετρος δεν αναφέρεται ιδιαιτέρως συχνά μεταξύ εκείνων που επηρεάζουν τα αποτελέσματα μοντέλων διασποράς. Η αλλαγή των αποτελεσμάτων, αναλόγως του εάν αυτά λαμβάνονται για πρωινή, απογευματινή ή βραδινή ώρα, οφείλεται στη μετάπτωση του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος από διαμεταγωγικό σε σταθεροποιημένο στη διάρκεια του εικοσιτετραώρου. Η επίδραση αυτών των φαινομένων εισάγεται στους υπολογισμούς του EDMS μέσω δύο χαρακτηριστικών του AERMOD που χρησιμοποιείται για τους υπολογισμούς διασποράς: των σχετικών δυνατοτήτων του μετεωρολογικού προεπεξεργαστή AERMET και της χρήσης δι-κανονικής κατανομής ως προς τον κατακόρυφο άξονα σε συνθήκες διαμεταγωγικού στρώματος. Ως προς τα τελικά αποτελέσματα, βρέθηκε ότι μεταξύ των ωρών 11:00 – 15:00, οι υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις είναι σχεδόν μηδενικές, λόγω της διασποράς που προκαλείται από τις κατακόρυφες κινήσεις στο επιφανειακό στρώμα, παρά τη χαμηλή ένταση του διατμητικού ανέμου. Επομένως, κατά τη διεξαγωγή εκτιμήσεων σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όταν η έμφαση μετατοπίζεται προς τις δυσμενείς πιθανότερες καταστάσεις, αυτό το χρονικό διάστημα του εικοσιτετραώρου θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη με μικρό συντελεστή βαρύτητας.
- *Η θερμοκρασία περιβάλλοντος επηρεάζει μόνο υπό συγκεκριμένες συνθήκες τα αποτελέσματα υπολογισμού των συγκεντρώσεων.* Συγκεκριμένα, οι αλλαγές της θερμοκρασίας προκαλούν ορατές αλλαγές στα αποτελέσματα των συγκεντρώσεων που υπολογίζει το EDMS κυρίως κατά τις ώρες μετάβασης από διαμεταγωγικό σε σταθεροποιημένο επιφανειακό στρώμα και αντιστρόφως: κατά τις υπόλοιπες ώρες, οι αλλαγές θερμοκρασίας οδηγούν σε πολύ μικρή μεταβολή των αποτελεσμάτων. Κατά τις ώρες μετάβασης του επιφανειακού στρώματος, η επίδραση της θερμοκρασίας δεν

είναι απλή: χαρακτηρίζεται από μια γενική τάση μείωσης της συγκέντρωσης με την αύξηση της θερμοκρασίας, η οποία όμως δεν έχει ομοιόμορφο ρυθμό και διακόπτεται από διακυμάνσεις. Για την αποφυγή των παραπάνω επιδράσεων σε αποτελέσματα συγκεντρώσεων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για κανονιστικούς σκοπούς, διαφαίνεται ως ορθή πρακτική να διεξάγονται οι υπολογισμοί για ώρες που δεν περιέχουν μεταβάσεις της κατάστασης του ατμοσφαιρικού στρώματος, και οι οποίες για την Ελλάδα στην πλειονότητα των περιπτώσεων είναι το διάστημα 08:00-09:00 (από σταθεροποιημένο σε διαμεταγωγικό στρώμα) και 16:00-17:00 (από διαμεταγωγικό σε σταθεροποιημένο στρώμα).

- *Το ποσοστό νεφοκάλυψης επηρεάζει με διαφορετικό τρόπο τα αποτελέσματα συγκεντρώσεων κατά τις απογευματινές ώρες σε σχέση με τις πρωινές.* Το απόγευμα, όσο αυξάνεται η νέφωση, τόσο περιορίζεται το ύψος και η εξάπλωση της συγκέντρωσης, ενώ το πρωί η μεταβολή της νέφωσης δεν προκαλεί ορατές αλλαγές στα αποτελέσματα υπολογισμού των συγκεντρώσεων.
- *Το ύψος των νεφών επηρεάζει ελάχιστα τα αποτελέσματα υπολογισμού των συγκεντρώσεων.* Αυτό αποτελεί μια θετική σύμπτωση, διότι το ύψος νέφωσης σπανίως είναι διαθέσιμο. Διαπιστώνεται όμως ότι, όταν λείπει, μπορεί να υποκατασταθεί από μια αδρή εμπειρική τιμή, χωρίς ιδιαίτερη επίδραση στα αποτελέσματα προσομοίωσης των συγκεντρώσεων με το EDMS.

8. Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό, με το οποίο ολοκληρώνεται το κύριο μέρος της παρούσας διδακτορικής διατριβής, συλλέγονται τα συμπεράσματα των αναλύσεων και ευρημάτων από τα κεφάλαια που προηγήθηκαν και διασυνδέονται μεταξύ τους, προκειμένου να αποδοθεί με συνεκτικό, και κατά το δυνατόν αξιοποιήσιμο από την επιστημονική κοινότητα τρόπο, το σύνολο των αποτελεσμάτων της εργασίας.

8.1. Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που διαμορφώθηκε για τον υπολογιστικό προσδιορισμό εκπομπών και συγκεντρώσεων αέριων ρύπων στα τρία μεγαλύτερα αεροδρόμια της Ελλάδας, αξιοποιεί τόσο τις αναλυτικές μετεωρολογικές καταγραφές όσο και την ευχερώς διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ των σύγχρονων συστημάτων προκειμένου να καταλήξει στις δυσμενέστερες *ρεαλιστικά αναμενόμενες* εκτιμήσεις, περιορίζοντας κατά το δυνατόν την επίδραση παραδοχών που θα προκαταλάμβαναν τα αποτελέσματα, οδηγώντας εξαρχής είτε σε υπερ- είτε σε υπο-εκτιμήσεις. Για το σκοπό αυτό, διαρθρώθηκε η εξής προσέγγιση:

α) Υπολογίστηκαν οι εκπομπές και συγκεντρώσεις, με βάση τα πραγματικά στοιχεία μετεωρολογίας και πτήσεων για κάθε ώρα ενός πραγματικού έτους. Τέτοιας έκτασης υπολογισμοί για ελληνικά αεροδρόμια δεν έχουν διεξαχθεί στο παρελθόν, επομένως το βήμα αυτό δείχνει εμπράκτως ότι, με βάση τη σημερινή διαθεσιμότητα στοιχείων και υπολογιστικής ισχύος, είναι πλέον εφικτό να παρακολουθούνται και στην Ελλάδα υπολογιστικά με τη μέγιστη δυνατή ρεαλιστικότητα οι επιδράσεις των αεροδρομίων στο ατμοσφαιρικό περιβάλλον. Ως έτος μελέτης επελέγη το 2009, διότι στη διάρκεια του

καταγράφηκε αριθμός πτήσεων στους τρεις υπό μελέτη αερολιμένες που είναι αντιπροσωπευτικός των μέγιστων αναμενόμενων.

β) Εντοπίστηκε, εντός αυτού του έτους, το δυσμενέστερο από πλευράς συγκεντρώσεων δίμηνο, που σε όλες τις περιπτώσεις ήταν το ευλόγως αναμενόμενο δίμηνο Ιουλίου-Αυγούστου. Στη διάρκεια της περιόδου αυτής, υπό την επίδραση του τουριστικού ρεύματος, καταγράφεται ο πλέον αυξημένος αριθμός πτήσεων, είτε σε μικρότερο βαθμό, όπως σε Αθήνα και Θεσσαλονίκη, είτε σε μεγαλύτερο, όπως στο Ηράκλειο. Επομένως, σημειώνονται αυξημένες εκπομπές και - σε συνδυασμό με τις όχι ιδιαίτερα ευνοϊκές συνθήκες διασποράς - οι συγκεντρώσεις είναι οι μεγαλύτερες του έτους.

γ) Σε αυτό το δυσμενές από πλευράς συγκεντρώσεων χρονικά διάστημα, εντοπίστηκαν οι περιπτώσεις εκείνες που σημειώθηκαν οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις. Η αναζήτηση αφορούσε σε χρονικές διάρκειες που χρησιμοποιούνται στις οριακές τιμές κάθε ρύπου, δηλαδή οκτάωρο για το CO, ώρα για τα NO_x και SO_x, και εικοσιτετράωρο για τα PM₁₀. Στο πλαίσιο της αντιπροσωπευτικότητας, επελέγη η δυσμενέστερη περίπτωση κάθε δεκαήμερου, ώστε τελικά να επιλεγούν έξι περιπτώσεις σε κάθε αεροδρόμιο, οι οποίες καλύπτουν όλες τις ευλόγως πιθανές περιπτώσεις εμφάνισης υψηλών συγκεντρώσεων και επομένως προσφέρονται για κανονιστικό έλεγχο, δηλαδή για εξέταση ύπαρξης υπερβάσεων ή ανησυχητικών προσεγγίσεων της συγκέντρωσης κάποιου ρύπου προς την οριακή του τιμή.

8.2. Αποτελέσματα

Με την εφαρμογή της παραπάνω μεθοδολογικής προσέγγισης, υπολογίστηκαν οι ετήσιες εκπομπές σε κάθε αεροδρόμιο καθώς και οι χωρικές κατανομές των συγκεντρώσεων τους.

Τα αποτελέσματα υπολογισμού των *εκπομπών*, ενέχουν κατά πρώτον μια αυτοτελή χρησιμότητα για την παρακολούθηση της επίδρασης των αεροδρομίων στη μικρο- και μακρο-κλίμακα της ποιότητας της ατμόσφαιρας· κατά δεύτερον μπορούν να αξιοποιηθούν στο πλαίσιο της εθνικής απογραφής εκπομπών, βελτιώνοντας την ακρίβεια των σχετικών με την αεροπορία μεγεθών.

Τα αποτελέσματα του υπολογιστικού προσδιορισμού των *συγκεντρώσεων* για καθένα από τους μελετώμενους ρύπους, αποτελούν μια ρεαλιστική χαρτογράφηση της ποιότητας του αέρα γύρω από τα τρία μεγαλύτερα αεροδρόμια της χώρας. Η αξιοποίησή τους μπορεί να αποβεί χρήσιμη σε τρία τουλάχιστον επίπεδα. Πρώτον, στο να διαπιστωθεί ο βαθμός και η εμβέλεια επίδρασης του αεροδρομίου στο ατμοσφαιρικό περιβάλλον της περιοχής του,

εξετάζοντας εάν υπάρχουν ή επαπειλούνται υπερβάσεις οριακών τιμών και σε ποιες θέσεις. Δεύτερον, στο να ιεραρχηθούν οι επιπτώσεις στην ποιότητα του αέρα από τη λειτουργία του αεροδρομίου στην κατάλληλη θέση της κλίμακας σημαντικότητας των περιβαλλοντικών απειλών της περιοχής. Είναι γνωστό ότι τα αεροδρόμια αποτελούν συχνά στόχο σχετικής υπερβολικών διαμαρτυριών για τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις, αλλά επίσης συχνά οι επικοινωνιακές τους πολιτικές προκαταλαμβάνουν θετικά τις τοπικές κοινωνίες με αποτέλεσμα η αντιληπτή επίδραση τους στο περιβάλλον να υπολείπεται της πραγματικής. Με την ποσοτικοποίηση των συγκεντρώσεων και τη χωρική τους αναπαράσταση, ενισχύεται η αντικειμενικότητα της σημασίας που αποδίδεται στην προκαλούμενη από το αεροδρόμιο ρύπανση και καθίσταται ευκρινέστερη η σύγκριση με άλλες πηγές υποβάθμισης, όπως η ρύπανση από την κυκλοφορία σε μεγάλους οδικούς άξονες ή από βιομηχανικές μονάδες, περιλαμβανόμενης της ηλεκτροπαραγωγής. Τρίτον, ο υπολογιστικός προσδιορισμός και η χαρτογράφηση των συγκεντρώσεων αέριων ρύπων γύρω από τα μεγάλα αεροδρόμια της χώρας έχει τη δυνατότητα να χρησιμεύσει στο σχεδιασμό των κατάλληλων μέτρων για τη μείωσή τους, όπου χρειάζονται, με βάση αντικειμενικές και λεπτομερείς εικόνες της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, αλλά και στο να τεκμηριωθεί η μη αναγκαιότητα λήψης μέτρων, όπου αυτά δεν έχουν να προσφέρουν ουσιαστικό όφελος.

8.3. Ανάλυση αποτελεσμάτων

Η ανάλυση αποτελεσμάτων διεξήχθη τόσο ως προς τις εκπομπές όσο και ως προς τις συγκεντρώσεις.

8.3.1. Εκπομπές

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων υπολογιστικού προσδιορισμού των εκπομπών θεωρείται σημαντική αφενός επειδή αυτές αποτελούν τη γενεσιουργό αιτία των συγκεντρώσεων, αφετέρου επειδή η χρήση των μοντέλων ενθαρρύνεται μεταξύ άλλων με σκοπό να διερευνάται η αιτιοκρατική συσχέτιση εκπομπών και συγκεντρώσεων, ή ισοδύναμα, να εκτιμάται το ποσοστό της συγκέντρωσης που αντιστοιχεί σε κάθε πηγή (source apportionment). Τα αποτελέσματα των εκπομπών αναλύονται σε τρία επίπεδα.

Στο πρώτο επίπεδο, αντιπαραβάλλονται τα αποτελέσματα εκπομπών που υπολογίστηκαν στην παρούσα εργασία για το ΔΑΑ με εκείνα που έχει δημοσιεύσει η Υπηρεσία

Περιβάλλοντος του αερολιμένα. Η αντιπαραβολή αυτή για τους τρεις κύριους ρύπους (CO, NO_x και HC) καταλήγει στη διαπίστωση μιας αξιοσημείωτα καλής προσέγγισης μεταξύ των αποτελεσμάτων υπολογισμού με το EDMS και αυτών που προέρχονται από την παρακολούθηση της πραγματικής λειτουργίας του ΔΑΑ, με τις διαφορές να κυμαίνονται από -3,1% ως 6,9%. Το εύρημα αυτό αποτελεί σοβαρή ένδειξη ότι το τμήμα του EDMS που αφορά στον υπολογισμό εκπομπών, όταν τροφοδοτείται με λεπτομερή στοιχεία περιγραφής της λειτουργίας ενός αεροδρομίου, μπορεί να υπολογίσει με ιδιαίτερα αξιόπιστο τρόπο τις εκπομπές αέριων ρύπων από τη συνολική αεροπορική δραστηριότητα. Επιπλέον, η συγκεκριμένη ένδειξη αξιοπιστίας του EDMS ως προς τα αποτελέσματα του ΔΑΑ λειτουργεί ενισχυτικά ως προς την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων για τις εκπομπές στους υπόλοιπους δύο αερολιμένες της εργασίας αυτής, στους οποίους δεν είναι δυνατή η διεξαγωγή συγκρίσεων, αφού δεν υφίστανται καταγραφές εκπομπών.

Στο δεύτερο επίπεδο, τα αποτελέσματα εκπομπών και για τα τρία αεροδρόμια της εργασίας αυτής αντιπαραβάλλονται με τα ευρήματα προηγούμενων εργασιών, μετά από κατάλληλες αναγωγές. Συγκεκριμένα, αποδελτιώνονται οι ετήσιες εκπομπές που έχουν υπολογιστεί για το αεροδρόμιο της Ζυρίχης μέσω τεσσάρων διαφορετικών μεθοδολογιών, καθώς και αυτές που υπολογίστηκαν για το ΔΑΑ για το έτος 2006. Τα μεγέθη αυτά, καθώς και οι ετήσιες εκπομπές που υπολογίστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, διαιρούνται με τον ετήσιο αριθμό αεροπορικών κινήσεων, ώστε να προκύψουν οι ανηγμένες στον κύκλο πτήσης εκπομπές (kg/LTO). Η σύγκριση των ανηγμένων εκπομπών οδηγεί στη διαπίστωση ότι υπάρχουν κατά περίπτωση σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των υπολογισμών εκπομπών που έχουν διεξαχθεί με διαφορετικές μεθόδους ή/και σε διαφορετικά αεροδρόμια. Οι διαφορές αυτές αποδίδονται κατά πρώτο λόγο στο διαφορετικό μίγμα αεροσκαφών (περισσότερα αεριωθούμενα αυξάνουν τις μέσες μοναδιαίες εκπομπές σε σχέση με τα ελικοφόρα), κατά δεύτερον στο βαθμό αναλυτικότητας που είχαν τα δεδομένα εισόδου (ακριβείς χρόνοι των κινήσεων και λεπτομερή μετεωρολογικά στοιχεία έναντι χρήσης σταθερών μέσων τιμών για όλο το έτος) και κατά τρίτο λόγο στις διαφοροποιήσεις μεταξύ των μεθόδων υπολογισμού.

Η μικρότερη διακύμανση παρατηρείται στις ανηγμένες εκπομπές οξειδίων του αζώτου, με τη σύγκλιση των εκτιμήσεων να εμφανίζεται κυρίως στις εκπομπές από τα αεροσκάφη και λιγότερο σε αυτές των επίγειων δραστηριοτήτων. Και στις οκτώ περιπτώσεις, η εκπεμπόμενη ποσότητα NO_x υπολογίζεται από 3,82 έως 4,75 kg/LTO, επιτρέποντας τη διατύπωση ενός εμπειρικού κανόνα για την αδρή εκτίμηση των μέσων εκπομπών ανά κίνηση αεροσκάφους, ως εξής: «στα αεροδρόμια με πλειοψηφία αεριωθούμενων, αναμένεται κατά μέσο όρο εκπομπή 4 - 5 kg NO_x ανά κίνηση αεροσκάφους». Δεδομένου ότι, κατά μια αδρή και ιδιαίτερα γενικευμένη προσέγγιση, στη διάρκεια μιας μέσης πτήσης εκπέμπονται γύρω στα 93 kg NO_x, καθίσταται σαφές ότι μόνο ένα μικρό μέρος των NO_x από την εναέρια κυκλοφορία

εκπέμπεται κοντά στα αεροδρόμια. Αυτό φυσικά δεν αναιρεί το γεγονός ότι, επειδή αυτό το μικρό μέρος των NO_x εκπέμπεται κοντά στο έδαφος ενδέχεται να οδηγεί σε σημαντικές συγκεντρώσεις τους και συνακόλουθα σε ανησυχητικές ενδεχόμενες επιπτώσεις στην υγεία του επηρεαζόμενου πληθυσμού.

Η διακύμανση των ανηγμένων εκπομπών CO προκύπτει μεγαλύτερη από αυτή των NO_x , με ενδείξεις ότι οι διαφορές οφείλονται κυρίως στη μέθοδο υπολογισμού και λιγότερο σε πραγματικές συνθήκες. Τέλος, παρατηρείται επίσης μεγάλη διακύμανση στις ανηγμένες εκπομπές HC, η οποία και πάλι διαφαίνεται να σχετίζεται με τη μέθοδο υπολογισμού περισσότερο και λιγότερο με τις πραγματικές συνθήκες.

Στο τρίτο επίπεδο, επιχειρείται η αντιπαραβολή των εκπομπών των τριών αεροδρομίων με τα δεδομένα της εθνικής απογραφής εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και ειδικότερα με το σκέλος εκείνο που αφορά τις συνολικές εκπομπές της αεροπορικής κυκλοφορίας σε CO, NMVOC, NO_x και SO_x , οι οποίες όμως σχετίζονται μόνο με τις εσωτερικές πτήσεις μόνο, χωρίς να συμπεριλαμβάνονται οι διεθνείς. Μετά τις κατάλληλες αναγωγές, η σύγκριση υποδεικνύει ότι τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας ως προς τις εκπομπές είναι συμβατά με τα αποτελέσματα της εθνικής απογραφής των εκπομπών.

8.3.2. Συγκεντρώσεις

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων υπολογιστικού προσδιορισμού των συγκεντρώσεων αέριων ρύπων θεωρείται κομβικής σημασίας, αφενός από περιβαλλοντικής πλευράς, επειδή οι συγκεντρώσεις αυτές είναι οι τελικές αιτίες πρόκλησης επιπτώσεων στη δημόσια υγεία και στα οικοσυστήματα, αφετέρου από υπολογιστικής σκοπιάς, αφού στο επίπεδο των τελικών συγκεντρώσεων αντανakλώνται οι δυνατότητες και αδυναμίες ολόκληρης της προσομοίωσης του φαινομένου λειτουργίας του αερολιμένα και επίδρασής του στην ποιότητα του αέρα. Στο πλαίσιο αυτό, τα αποτελέσματα προσδιορισμού των συγκεντρώσεων αναλύονται σε τρία επίπεδα.

Στο πρώτο επίπεδο, συγκρίνονται οι συγκεντρώσεις που εξάγει το EDMS με τις οριακές τιμές της εθνικής και ενωσιακής νομοθεσίας. Για να καταστεί εφικτή η σύγκριση αυτή, χρειάζεται να διευκρινιστεί το ποσοστό του NO_2 με τα NO_x , που μέσω μιας αναλυτικής προσέγγισης λαμβάνεται κατά ασφαλή παραδοχή ίσο με 70%, καθώς και η σχέση SO_2 με τα SO_x , όπου θεωρείται ισοδυναμία.

Στο Διεθνή Αερολιμένα Αθηνών, οι συγκεντρώσεις CO, $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} και SO_2 διαπιστώνεται ότι κινούνται σε καθησυχαστικά επίπεδα, πολύ χαμηλότερα των οριακών τιμών. Αντίθετα, οι συγκεντρώσεις NO_2 υποδεικνύουν ενδεχόμενα υπερβάσεων του οριακού επιπέδου ωριαίας

μέσης συγκέντρωσης ($200 \mu\text{g}/\text{m}^3$), αλλά όχι της ετήσιας μέσης συγκέντρωσης. Οι υπερβάσεις αυτές αναμένεται να εμφανίζονται σε περιοχές σημαντικής έκτασης, αλλά με ιδιαίτερα περιορισμένη συχνότητα, αφού η εκδήλωσή τους προϋποθέτει πολύ συγκεκριμένες συνθήκες υψηλού ρυθμού αεροπορικών κινήσεων και ειδικών τιμών ως προς τις μετεωρολογικές παραμέτρους, οι οποίες να οδηγούν σε μεγάλη ευστάθεια του επιφανειακού ατμοσφαιρικού στρώματος και εγκλωβισμό των NO_x σε χαμηλό ύψος. Οι συνθήκες αυτές δεν είναι τελείως σπάνιες στη διάρκεια του διμήνου Ιουλίου – Αυγούστου, αλλά απέχουν πολύ από το να αποτελούν τον κανόνα, οπότε οι δεκαοκτώ φορές που, σύμφωνα με την ευρωπαϊκή και εθνική νομοθεσία, είναι δυνατή η υπέρβαση των $200 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{NO}_2$ πριν θεωρηθεί ότι συντελείται παραβίαση του ορίου, είναι μάλλον επαρκείς, έστω και οριακά, για να καλύψουν τις πιθανές εμφανίσεις των υψηλών συγκεντρώσεων NO_x .

Στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης, οι συγκεντρώσεις CO , $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} και SO_2 διαπιστώνεται ότι επίσης κινούνται σε καθησυχαστικά επίπεδα, πολύ χαμηλότερα των οριακών τιμών. Οι συγκεντρώσεις NO_2 όμως, υποδεικνύουν ενδεχόμενα υπερβάσεων του οριακού επιπέδου ωριαίας μέσης συγκέντρωσης. Οι υπερβάσεις αυτές αναμένεται να εμφανίζονται σε περιοχές μικρής έκτασης και με ιδιαίτερα περιορισμένη συχνότητα, αφού η εκδήλωσή τους προϋποθέτει και εδώ πολύ συγκεκριμένες συνθήκες υψηλού ρυθμού αεροπορικών κινήσεων και ειδικής μετεωρολογίας εγκλωβισμού των NO_x σε χαμηλό ύψος. Η περιορισμένη συχνότητα εμφάνισης τέτοιων συνθηκών στη διάρκεια του διμήνου Ιουλίου – Αυγούστου, καθιστούν επαρκείς τις δεκαοκτώ φορές που, σύμφωνα με την ευρωπαϊκή και εθνική νομοθεσία, είναι δυνατή η υπέρβαση των $200 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{NO}_2$ πριν θεωρηθεί ότι συντελείται παραβίαση του ορίου. Αξίζει πάντως να σημειωθεί ότι, παρά το γεγονός ότι η αεροπορική κυκλοφορία στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης είναι περίπου τέσσερις φορές μικρότερη από αυτή του ΔΑΑ, οι υπερβάσεις του οριακού επιπέδου NO_x δεν αποφεύγονται, απλώς εκτείνονται σε σημαντικά μικρότερες περιοχές.

Στον αερολιμένα Ηρακλείου, οι συγκεντρώσεις CO , $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} και SO_2 διαπιστώνεται ότι επίσης κινούνται σε καθησυχαστικά επίπεδα, πολύ χαμηλότερα των οριακών τιμών. Οι συγκεντρώσεις NO_2 είναι υψηλές αλλά τα ενδεχόμενα υπερβάσεων του οριακού επιπέδου ωριαίας μέσης συγκέντρωσης είναι περιορισμένα και σαφώς λιγότερα από ότι στον αερολιμένα Θεσσαλονίκης. Και στην περίπτωση του αερολιμένα Ηρακλείου, όπως και στους δύο προηγούμενους αερολιμένες, τέτοιες υπερβάσεις αναμένεται να εμφανίζονται όταν συντρέχουν πολύ συγκεκριμένες συνθήκες υψηλού ρυθμού αεροπορικών κινήσεων και ειδικής μετεωρολογίας εγκλωβισμού των NO_x σε χαμηλό ύψος. Η περιορισμένη συχνότητα εμφάνισης τέτοιων συνθηκών στη διάρκεια του διμήνου Ιουλίου – Αυγούστου, καθιστούν επαρκείς τις δεκαοκτώ φορές που, σύμφωνα με την ευρωπαϊκή και εθνική νομοθεσία, είναι δυνατή η υπέρβαση των $200 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{NO}_2$ πριν θεωρηθεί ότι συντελείται παραβίαση του

ορίου. Αξίζει τέλος να σημειωθεί ότι, παρά το γεγονός ότι η αεροπορική κυκλοφορία μεταξύ αερολιμένων Ηρακλείου και Θεσσαλονίκης είναι ίδια, στο Ηράκλειο η συχνότητα και η έκταση των υπερβάσεων του οριακού επιπέδου μέσης ωριαίας συγκέντρωσης NO_2 είναι σαφώς μικρότερες, αντανακλώντας την επιρροή των άλλων παραμέτρων – πλην του ετήσιου αριθμού πτήσεων – που διαμορφώνουν τις τελικές συγκεντρώσεις.

8.3.3. Σύγκριση υπολογιστικών αποτελεσμάτων – μετρήσεων

Στην περιοχή των Μεσογείων λειτουργεί υπό την ευθύνη του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών ένα δίκτυο πέντε σταθμών μέτρησης συγκεντρώσεων αέριων ρύπων, εκ των οποίων οι τέσσερις εγγύτεροι στο αεροδρόμιο θεωρείται ότι αντιπροσωπεύουν την επίδραση του έργου στην ποιότητα του αέρα της περιοχής του. Η σύγκριση των μετρήσεων από τους σταθμούς αυτούς για το δίμηνο Ιουλίου – Αυγούστου 2009 με τα αποτελέσματα των μετρήσεων αποτελεί κρίσιμη δοκιμασία για την αξιοπιστία της προσομοίωσης, αλλά κυρίως για τον εντοπισμό παραγόντων που μπορούν να διαταράξουν τη συμφωνία πρόλεξης – μέτρησης. Για το λόγο αυτό, επελέγη μια τριπλή προσέγγιση: πρώτα αντιπαρατάχθηκαν σε γραφήματα με οριζόντιο άξονα το χρόνο οι μετρήσεις και οι προλέξεις για κάθε ρύπο, κατόπιν εξετάστηκε η απόκλισή τους με γραφήματα διασποράς και τέλος διεξήχθη στατιστική ανάλυση με χρήση των κατάλληλων εργαλείων περιγραφικής στατιστικής, που είναι τα ιστογράμματα σχετικής συχνότητας και τα γραφήματα ποσοστημορίων.

Σε ότι αφορά στο CO , η γενική διαπίστωση είναι ότι οι μετρήσεις σε όλους τους σταθμούς, παρότι σε απόλυτους αριθμούς πολύ μικρές ($0,1 - 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) είναι αρκετά υψηλότερες συγκριτικά με τα αποτελέσματα των υπολογισμών, τα οποία στη μεγάλη τους πλειονότητα είναι μηδενικά. Αυτό σημαίνει ότι σε όλη την περιοχή των Μεσογείων εμφανίζονται συγκεντρώσεις υποβάθρου CO που δεν μπορούν να αποδοθούν στη λειτουργία του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών. Για το χρονικό διάστημα αναφοράς, οι συγκεντρώσεις υποβάθρου CO αποδίδονται κυρίως στην οδική κυκλοφορία, ενώ τους χειμερινούς μήνες ενδέχεται να συμβάλλει και η θέρμανση.

Ανάλογη εικόνα σχηματίζεται και για τα SO_x . Οι συγκεντρώσεις υποβάθρου, προερχόμενες από πηγές του τοπικού ανθρωπογενούς περιβάλλοντος άσχετες από το αεροδρόμιο, παρότι μικρές σε απόλυτους αριθμούς (π.χ. $5 - 9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ για το σταθμό των Σπάτων) οδηγούν σε μετρήσεις που είναι αρκετά μεγαλύτερες από τα αποτελέσματα των υπολογισμών, τα οποία κινούνται σε τιμές κατά πολύ μικρότερες της μονάδας.

Ακόμη πιο έντονο είναι το φαινόμενο των υψηλών τιμών υποβάθρου στην περίπτωση των συγκεντρώσεων PM_{10} , όπου φαινόμενα όπως η αλατονέφωση που προέρχεται από τη

γειτονική θάλασσα, η μεταφορά σκόνης από την Αφρική, η αιώρηση σκόνης από αγροτικές εκτάσεις και ανενεργά λατομεία, καθώς και η πυκνή θερινή κυκλοφορία σε παρακείμενες των σταθμών οδούς οδηγούν σε μετρήσεις 20 - 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ενώ τα αποτελέσματα του EDMS κινούνται σε πολύ χαμηλές τιμές και στην πλειονότητά τους είναι μηδενικές.

Αυτή η επικρατούσα επίδραση των μη σχετιζόμενων με το αεροδρόμιο πηγών στις τιμές των μετρήσεων, ματαιώνει μεταξύ άλλων και την οποιαδήποτε προσδοκία χρονικών συσχέτισεων μεταξύ μετρήσεων και αποτελεσμάτων EDMS (όπως π.χ. ταυτοχρονισμοί ανοδικών και καθοδικών τάσεων). Πράγματι, κατά τη στατιστική ανάλυση των σχετικών κατανομών δεν εντοπίζονται συσχετίσεις. Πάντως, οι υποεκτιμήσεις των υπολογιστικών αναλύσεων σε σχέση με τις μετρήσεις πεδίου είναι αρκετά συνηθισμένες, ακόμη και σε πολύ πρόσφατες εργασίες, όπου μέσω αντίστροφης μοντελοποίησης διαπιστώνεται ότι, για να ανέλθουν οι υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις στο επίπεδο των μετρούμενων, χρειάζεται να αυξηθεί σοβαρά ρυθμός εκπομπής που εισάγεται στους υπολογισμούς του μοντέλου διασποράς από 14 έως 55%.

Ως προς τις συγκεντρώσεις των NO_x , τα συμπεράσματα από τη σύγκριση μετρήσεων και υπολογιστικών αποτελεσμάτων είναι κάπως πιο σύνθετα. Το πρώτο συμπέρασμα είναι ότι, όπως και στις περιπτώσεις των άλλων ρύπων, οι μετρήσεις διαφέρουν συστηματικά από τα αποτελέσματα του EDMS, τόσο στη χρονική εξέλιξη των ωριαίων τιμών, όσο και στη στατιστική κατανομή τους. Η εικόνα απόκλισης στο επίπεδο των συγκεντρώσεων είναι αντίστροφη από την πολύ καλή σύγκλιση που παρατηρήθηκε στο επίπεδο των εκπομπών και οφείλεται σε μια σειρά λόγων, όπως η στοχαστικότητα του μοντέλου, η χρήση σταθερών προτύπων κατανομής πτήσεων ανά ώρα και ημέρα στο μοντέλο αντί του επακριβούς χρόνου στον οποίο διεξήχθη η κάθε κίνηση, και κυρίως στη σημαντική απόσταση μεταξύ σημείου εκπομπής (αεροδρομίου) και σταθμών μέτρησης συγκέντρωσης (4 - 9,35 km) και στη συνακόλουθη μεταβλητότητα των συνθηκών διασποράς εντός της απόστασης αυτής, ενώ το μοντέλο λειτουργεί υπό την παραδοχή ότι οι συνθήκες διασποράς είναι σταθερές σε όλο το πεδίο μελέτης. Τέλος, το σημαντικότερο μέρος των αποκλίσεων αποδίδεται στην επίδραση πηγών του τοπικού ανθρωπογενούς περιβάλλοντος, άσχετων από το αεροδρόμιο, όπως η οδική κυκλοφορία σε παρακείμενες των σταθμών οδούς.

Το δεύτερο συμπέρασμα είναι ότι οι εκτιμήσεις συγκέντρωσης NO_x βάσει του EDMS είναι γενικά μικρότερες των μετρήσεων. Αυτό δεν οφείλεται σε κάποια συστηματική τάση υποεκτίμησης του μοντέλου, αλλά κατά μείζονα λόγο στη συνεισφορά και άλλων πηγών NO_x , πέραν του αεροδρομίου, ενώ όπως προαναφέρθηκε, δεν αποτελεί ασυνήθιστο εύρημα.

Το τρίτο συμπέρασμα σχετίζεται με το ρόλο των NO_x ως κύριου ρύπου του αεροδρομίου. Ενώ στους άλλους τρεις ρύπους (CO , PM_{10} και SO_x) η συνεισφορά των εκπομπών του

αεροδρομίου στις συγκεντρώσεις που μέτρησαν οι σταθμοί ποιότητας του αέρα ήταν πολύ μικρή, στα NO_x ένα σημαντικό τμήμα των μετρούμενων συγκεντρώσεων προέρχεται από το αεροδρόμιο. Έτσι, υπάρχει η προοπτική καλύτερης συσχέτισης μεταξύ μετρήσεων και αποτελεσμάτων EDMS σε σχέση με τους άλλους ρύπους, κάτι που επιβεβαιώνεται από τη στατιστική ανάλυση (διάγραμμα διασποράς).

Από τη ίδια ανάλυση εξάγεται και το τέταρτο συμπέρασμα σχετικά με τα NO_x , που αφορά στη διαπίστωση ότι όλες οι περιπτώσεις προσέγγισης μεταξύ υπολογιστικών αποτελεσμάτων και ωριαίων μετρήσεων εντοπίζονται σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου, κάτω των 3 m/s. Αυτό συμβαίνει διότι για υψηλότερες ταχύτητες ανέμου, η υπολογιζόμενη από το EDMS διασπορά είναι αρκετά έντονη και οδηγεί σε σχεδόν μηδενικές συγκεντρώσεις NO_x σε μεγάλες αποστάσεις, π.χ. 4 km που απέχει ο σταθμός των Σπάτων, οπότε οτιδήποτε και αν καταγράφει ο σταθμός προέρχεται από τοπικές πηγές, εκτός αεροδρομίου.

8.3.4. Ανάλυση ευαισθησίας

Ένα σύνθετο σύστημα προσομοίωσης όπως το EDMS παράγει αποτελέσματα που εξαρτώνται από τις συνθήκες εισόδου κατά μη-γραμμικό τρόπο, επομένως είναι σημαντικό να αναλυθεί η απόκρισή του καθώς μεταβάλλονται οι συνθήκες αυτές. Οι παράμετροι που αναμένεται να επηρεάζουν τα αποτελέσματα κατά περίπλοκο τρόπο είναι κυρίως οι μετεωρολογικές, οι οποίες επιδρούν στο υπολογιστικό άρθρωμα της διασποράς (AERMOD), ενώ οι παράμετροι που επηρεάζουν τις εκπομπές, όπως ο αριθμός πτήσεων και τα είδη των αεροσκαφών αναμένεται να έχουν μια σαφώς γραμμικότερη επιρροή. Στο πλαίσιο αυτό, αναλύθηκε η ευαισθησία του EDMS για τις πέντε κυριότερες μετεωρολογικές παραμέτρους εισόδου, δηλαδή την ώρα της ημέρας, την ταχύτητα του ανέμου, τη θερμοκρασία, η νεφοκάλυψη και το ύψος των νεφών.

Η ώρα της ημέρας επιδρά σημαντικά στο βαθμό με τον οποίο οι κινήσεις του αέρα στο επιφανειακό οριακό στρώμα της ατμόσφαιρας αραιώνουν τους εκπεμπόμενους ρύπους, επηρεάζοντας έτσι, εμμέσως αλλά καθοριστικά, τα τελικά αποτελέσματα. Το σύστημα του EDMS διαχειρίζεται το συγκεκριμένο θέμα με ιδιαίτερη αναλυτικότητα μέσω του AERMOD, το οποίο βασίζεται στην ώρα του εικοσιτετραώρου για να υπολογίσει μια εκτενή σειρά μεγεθών σχετικών με την οριζόντια και κατακόρυφη κατανομή των ταχυτήτων και θερμοκρασιών του αέρα στο πεδίο μελέτης. Η ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων του EDMS ως προς την ώρα της ημέρας δείχνει ότι, με σταθερές όλες τις τιμές των μεταβλητών εισόδου, οι υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις διαφοροποιούνται κατά μεγάλο βαθμό. Συγκεκριμένα, στη διάρκεια των πρωινών και μεσημεριανών ωρών με ηλιοφάνεια,

συγκεκριμένα από τις 10:00 μέχρι τις 15:00, οι υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις παρουσιάζονται ιδιαίτερα μειωμένες, πρακτικά μηδενικές για το επίπεδο εκπομπών που χρησιμοποιήθηκε και αντιστοιχεί αδρά σε αυτό του ΔΑΑ. Αυτό είναι ένα σημαντικό εύρημα, που δεν έχει εντοπιστεί δημοσιευμένο ως τώρα, αφενός επειδή αποκαλύπτει ένα κεντρικό χαρακτηριστικό του σύνθετου τρόπου με τον οποίο υπολογίζονται οι συγκεντρώσεις και αφετέρου διότι το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα αποδεικνύεται τελείως ακατάλληλο για υπολογισμούς συγκεντρώσεων κανονιστικού χαρακτήρα, όταν δηλαδή επιχειρείται να ελεγχθεί η συμμόρφωση της λειτουργίας του αεροδρομίου με τα όρια ποιότητας αέρα. Η μεγάλη μείωση των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων στη διάρκεια των πρωινών και μεσημεριανών ωρών με ηλιοφάνεια συμβαίνει διότι το μοντέλο AERMOD θεωρεί ότι στο στρώμα μίξης έχουν επικρατήσει συνθήκες έντονης συναγωγής και οι κατακόρυφες κινήσεις του αέρα αραιώνουν και απομακρύνουν προς τα πάνω τους ρύπους, ελαχιστοποιώντας έτσι τις συγκεντρώσεις τους στο επίπεδο του εδάφους. Στη διάρκεια του απογεύματος και της νύχτας, η ώρα του εικοσιτετραώρου επιδρά στις υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις με πολύ πιο ήπιο, αλλά ορατό τρόπο. Μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση εδώ είναι πως όσο χαμηλότερη είναι η ταχύτητα του ανέμου, τόσο εντονότερες διακυμάνσεις προκαλεί η ώρα του εικοσιτετραώρου. Από τα παραπάνω ευρήματα, συνάγεται ότι κατά την εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός έργου, όταν χρησιμοποιούνται υπολογιστικές μέθοδοι προσδιορισμού των συγκεντρώσεων αέριων ρύπων, οι συνθήκες προσομοίωσης θα πρέπει να εστιάζονται σε ώρες που το οριακό ατμοσφαιρικό στρώμα βρίσκεται σε ευσταθή κατάσταση (νωρίς το πρωί, αργά το απόγευμα και νύκτα), ενώ θα πρέπει να αποφεύγονται οι μεσημεριανές ώρες,

Η ταχύτητα του ανέμου αποτελεί επίσης παράμετρο με σημαντική επίδραση στις υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις. Αυτό είναι αναμενόμενο διότι ο άνεμος αποτελεί βασικό παράγοντα διάχυσης και αραιώσης των ρύπων που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα, λειτουργώντας κατά δύο συμπληρωματικούς τρόπους. Πρώτον, δημιουργεί ρεύματα συναγωγής που μεταφέρουν την αέρια μάζα υποδοχής των εκπεμπόμενων ρύπων, συμπαρασύροντάς τους και ταυτόχρονα διανέμοντάς τους σε μεγαλύτερο όγκο αέρα. Δεύτερον, διότι η διάτμηση του επιφανειακού στρώματος από τον οριζόντιο άνεμο δημιουργεί τύρβη, επαυξάνοντας κατά πολύ την ανάμιξη και αραιώση των αέριων ρύπων, τόσο κατά την οριζόντια όσο και κατά την κατακόρυφη διάσταση. Το EDMS μέσω του AERMOD προβαίνει σε λεπτομερείς υπολογισμούς μιας εκτενούς σειράς εσωτερικών παραμέτρων με βάση την ταχύτητα του ανέμου, ώστε να καταλήξει στον προσδιορισμό του μήκος Monin-Obukhov που αποτελεί το χαρακτηριστικό ύψος του επιμέρους στρώματος της δυναμικής τύρβης. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας επιβεβαιώνουν τη σημαντική επίδραση της ταχύτητας ανέμου στις υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις· μικρές

αλλαγές της οδηγούν σε μεγάλες διαφοροποιήσεις των αποτελεσμάτων. Στις πολύ χαμηλές ταχύτητες, από 1 ως 4 κόμβους (0,51 - 2,06 m/s), κάθε αύξηση της ταχύτητας ανέμου οδηγεί σε ραγδαία μείωση των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων, ενώ μεγάλες - αλλά όχι τόσο ραγδαίες - είναι και οι μειώσεις των συγκεντρώσεων καθώς η ταχύτητα αυξάνει, έστω και κατά λίγο, στο διάστημα από 5 ως 9 κόμβους (2,57 - 4,63 m/s). Ειδικότερα, διαπιστώνεται ότι η μείωση των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων είναι περίπου λογαριθμική σε σχέση με την αύξηση της ταχύτητας ανέμου. Εξάιρεση αποτελεί το διάστημα μετάβασης από τα 4 στα 5 knots, όπου οι συγκεντρώσεις παραμένουν σχεδόν αμετάβλητες, πιθανά λόγω μετάβασης του υπολογιστικού κώδικα του AERMOD από τις σχέσεις του σταθεροποιημένου στρώματος σε αυτές του διαμεταγωγικού. Συνάγεται επομένως το γενικότερο συμπέρασμα ότι, κατά την εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός έργου, όταν οι συγκεντρώσεις αέριων ρύπων προσδιορίζονται με υπολογιστικές μεθόδους, οι συνθήκες προσομοίωσης θα πρέπει να εστιάζονται σε ταχύτητες ανέμου έως 2 m/s.

Η θερμοκρασία περιβάλλοντος αποτελεί επίσης παράμετρο που αναμένεται να επιδρά στις υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις, διότι καθορίζει την πυκνότητα του μέσου αραίωσης, και επακόλουθα της διαφοράς με την πυκνότητα του μίγματος απαερίων που εκπέμπονται από τις πηγές, η οποία διαφορά με τη σειρά της καθορίζει το ύψος στο οποίο θα ανέλθουν οι εκπεμπόμενες ουσίες και η αραίωση που θα υποστούν σε αυτό το πρώτο στάδιο διάχυσης. Από υπολογιστική άποψη, η θερμοκρασία περιβάλλοντος υπεισέρχεται με μια πλειάδα τρόπων στην πορεία των υπολογισμών του EDMS μέσω των σχέσεων που χρησιμοποιεί το μοντέλο διασποράς AERMOD. Η ανάλυση ευαισθησίας των υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων ως προς τη θερμοκρασία αποκαλύπτει μια ενδιαφέρουσα συμπεριφορά, η οποία επίσης δεν έχει εντοπιστεί δημοσιευμένη ως τώρα. Στη διάρκεια των ωρών που αντιστοιχούν σε σταθεροποιημένο επιφανειακό στρώμα, η ευαισθησία των αποτελεσμάτων είναι πολύ περιορισμένη σε διαφοροποιήσεις της θερμοκρασίας. Μεγάλες αλλαγές στην είσοδο, από 0 ως 40 °C, προκαλούν μικρές αλλαγές στην έξοδο, το πολύ $\pm 10\%$. Όμως, στη διάρκεια των μεταβατικών ωρών, όταν το EDMS υπολογίζει ότι πραγματοποιείται η μετάβαση από το σταθεροποιημένο στο διαμεταγωγικό επιφανειακό στρώμα και αντιστρόφως, η επίδραση της θερμοκρασίας είναι σημαντική. Ο τρόπος επίδρασης της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια τέτοιων ωρών δεν είναι απλός, αλλά διακρίνεται από μια γενική τάση μείωσης της συγκέντρωσης με την αύξηση της θερμοκρασίας, η οποία όμως δεν έχει ομοιόμορφο ρυθμό και διακόπτεται από διακυμάνσεις. Αυτή η ενδιαφέρουσα συμπεριφορά (ελάχιστη επίδραση κατά τις μη-μεταβατικές ώρες και σημαντική επίδραση κατά τις μεταβατικές) αποδίδεται σε ένα συνδυασμό φυσικών και υπολογιστικών αιτιών. Τα φυσικά αίτια αφορούν κυρίως τη μεταβολή στην πυκνότητα του αέρα και το ύψος στο οποίο ανέρχονται κατά το πρώτο στάδιο αραίωσής τους οι εκπεμπόμενοι ρύποι, ενώ τα υπολογιστικά αίτια εντοπίζονται αφενός στο

ότι η θερμοκρασία επηρεάζει το «κατώφλι» πέραν του οποίου αλλάζει η μέθοδος υπολογισμού ορισμένων εσωτερικών μεταβλητών (με κυριότερη την ταχύτητα τριβής u^*), αφετέρου στις επαναληπτικές διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του μήκους Monin Obukhov. Πάντως, για την αποφυγή των παραπάνω επιδράσεων σε αποτελέσματα συγκεντρώσεων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για κανονιστικούς σκοπούς, διαφαίνεται ως ορθή πρακτική να αποφεύγονται οι ώρες που περιέχουν μεταβάσεις της κατάστασης του ατμοσφαιρικού στρώματος, και οι οποίες για την Ελλάδα στην πλειονότητα των περιπτώσεων είναι το διάστημα 08:00-09:00 (από σταθεροποιημένο σε διαμεταγωγικό στρώμα) και 16:00-17:00 (από διαμεταγωγικό σε σταθεροποιημένο στρώμα). Κατ' αναλογία, για κανονιστικούς σκοπούς που απαιτούν προσέγγιση δυσμενούς σεναρίου, διαφαίνεται ως ορθή πρακτική να χρησιμοποιούνται τιμές θερμοκρασιών που κινούνται στο κάτω άκρο του εύρους θερμοκρασιακής διακύμανσης της περιοχής.

Η νεφοκάλυψη επιδρά στην ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος, η οποία είναι η βασική αιτία κίνησης των αέριων μαζών του επιφανειακού ατμοσφαιρικού στρώματος, μέσω της θερμικής ενέργειας που εισφέρει. Το EDMS και ειδικότερα το AERMOD περιλαμβάνουν λεπτομερείς υπολογισμούς της ενέργειας αυτής, οπότε είναι εύλογο να αναμένεται ότι το ποσοστό νεφοκάλυψης θα επηρεάζει τα τελικά αποτελέσματα. Πράγματι, η ανάλυση ευαισθησίας ως προς την παράμετρο αυτή αποκαλύπτει δύο διαφορετικούς τύπους επίδρασης. Ο πρώτος τύπος εμφανίζεται κατά τις πρωινές ώρες και ως το απόγευμα. Στο διάστημα αυτό, η μεταβολή του ποσοστού νεφοκάλυψης έχει πολύ μικρή επίδραση στα αποτελέσματα, η οποία πάντως είναι προς την όμοια κατεύθυνση, δηλαδή αύξηση νέφωσης οδηγεί σε μικρή αύξηση της συγκέντρωσης. Ο δεύτερος τύπος εμφανίζεται τις απογευματινές ώρες. Στο διάστημα αυτό, η μεταβολή της νέφωσης έχει αισθητή επίδραση στα αποτελέσματα υπολογισμού των συγκεντρώσεων, τόσο ως προς το ύψος των μέγιστων τιμών, όσο και ως προς τη χωρική τους κατανομή. Η επίδραση αυτή χαρακτηρίζεται από αντίστροφη αναλογία. Όσο αυξάνεται η νέφωση, τόσο περιορίζεται το ύψος και η εξάπλωση της συγκέντρωσης.

Το ύψος της νέφωσης επιδρά στα αποτελέσματα του EDMS μέσω δύο μηχανισμών. Πρώτον, επηρεάζει τις αεροπορικές κινήσεις, μέσω της συμμετοχής του στις συνθήκες διαμόρφωσης του αερολιμένα (airport configuration) από το EDMS, λαμβάνεται δηλαδή υπόψη το ύψος των νεφών για να καθοριστεί πότε χρησιμοποιείται ο κάθε διάδρομος. Η επίδραση αυτή αφορά τα σημεία και τα ύψη των εναέριων εκπομπών και σχετίζεται αποκλειστικά με ζητήματα αεροναυτιλίας και ελέγχου της εναέριας κυκλοφορίας. Δεύτερον, το ύψος νέφωσης λαμβάνεται υπόψη κατά τους μετεωρολογικούς υπολογισμούς από το άρθρωμα της διασποράς, αλλά για τον τρόπο με τον οποίο υπεισέρχεται στις σχετικές εξισώσεις δεν υπάρχουν δημοσιευμένα στοιχεία. Πάντως, ενώ παλαιότερα η επίδραση του ύψους νέφωσης

ήταν σημαντική, λόγω της συμμετοχής του στον προσδιορισμό της κατάστασης ευστάθειας της ατμόσφαιρας κατά Pasquill – Gifford, η αποστασιοποίηση από την προσέγγιση αυτή και η υιοθέτηση του μήκους Monin Obukhov ως μέτρου της δυναμικότητας διασποράς του επιφανειακού ατμοσφαιρικού στρώματος αναμένεται να έχει περιορίσει τη σημαντικότητα της επίδρασής του. Πράγματι, η ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων του EDMS ως προς το ύψος νέφωσης καταλήγει στο συμπέρασμα ότι τόσο κατά τις πρωινές όσο και κατά τις απογευματινές ώρες, η παράμετρος αυτή έχει ιδιαίτερα περιορισμένη, σχεδόν αδιόρατη, επίδραση στα αποτελέσματα. Το εύρημα αυτό αποτελεί μια θετική συγκυρία, καθότι τις περισσότερες φορές τα διαθέσιμα μετεωρολογικά δεδομένα δεν περιλαμβάνουν μετρήσεις του ύψους νέφωσης, αλλά η έλλειψη αυτή δεν χρειάζεται να εγείρει ανησυχίες: η συγκεκριμένη μετεωρολογική παράμετρος μπορεί να υποκατασταθεί από αδρές εμπειρικές μέσες τιμές και τα αποτελέσματα προσομοίωσης των συγκεντρώσεων με το EDMS δεν πρόκειται να επηρεασθούν ιδιαίτερα.

9. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η εκτίμηση της ποιότητας αέρα έχει τα τελευταία χρόνια εμπλουτιστεί με νέες μεθοδολογικές τάσεις, οι οποίες προέρχονται από τις γενικότερες τεχνολογικές εξελίξεις. Οι τάσεις αυτές αφορούν τόσο στις μεθόδους που βασίζονται σε μετρήσεις όσο και στις υπολογιστικές μεθόδους.

Οι μετρήσεις της ποιότητας αέρα διενεργούνται ως επί το πλείστον σε σταθμούς ποιότητας αέρα, δηλαδή κλωβούς, εγκατεστημένους σε σταθερές θέσεις, εντός των οποίων φιλοξενείται ογκώδης εξοπλισμός ανάλυσης συγκεντρώσεων. Σήμερα, αντί, ή επιπροσθέτως των σταθμών αυτών, τίθενται σε χρήση αισθητήρες μέτρησης συγκεντρώσεων μικρού μεγέθους και χαμηλού κόστους, οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε μεγάλους αριθμούς όταν χρειάζεται. Οι αισθητήρες αυτοί επικοινωνούν μεταξύ τους και με τον κεντρικό κόμβο δεδομένων μέσω του Internet of Things (IoT), σχηματίζοντας ευέλικτα δίκτυα με δυνατότητα κάλυψης μεγάλων εκτάσεων και σημαντική ακρίβεια. Σε μια πρόσφατη εργασία, δημιουργήθηκε ένα τέτοιο δίκτυο, συλλέχθηκαν δεδομένα και παρήχθη μια επαρκώς αξιόπιστη εικόνα της ποιότητας του αέρα βάσει 5 ατμοσφαιρικών ρύπων, με δυνατότητες πρόβλεψης.^[113] Μια σχετική ανασκόπηση^[114] εντόπισε ήδη 37 σχετικές δημοσιεύσεις, με ποικιλία μεθόδων, εκτεταμένη αξιοποίηση της μηχανικής μάθησης (machine learning), παραγωγή χρήσιμων αποτελεσμάτων αλλά και καταγραφή προβληματισμών. Σε μια άλλη περίπτωση,^[115] τοποθετήθηκαν σε κατάλληλα επιλεγμένες θέσεις αισθητήρες χαμηλού κόστους, οι οποίοι βαθμονομήθηκαν μέσω βελτιστοποιημένου νευρωνικού δικτύου, ενώ παράλληλα ανακτήθηκαν δορυφορικές αποτυπώσεις και καταγραφές από εναέριο LiDAR. Αυτά τα πολυποίκιλα δεδομένα τροφοδότησαν ένα εξελιγμένο μοντέλο πρόβλεψης συγκεντρώσεων υπέρλεπτων σωματιδίων, το οποίο προσέφερε εκτιμήσεις σε πολλαπλές κλίμακες, τοπικές και ευρύτερες. Τα κοινά στοιχεία των παραπάνω περιπτώσεων, ήτοι η χρήση δικτύων από αισθητήρες χαμηλού κόστους βασισμένων στο IoT, η σύνθεση μετρήσεων εδάφους με καταγραφές τηλεπισκόπησης και η επεξεργασία τους με μηχανική μάθηση, είναι βέβαιο ότι θα αξιοποιούνται όλο και συχνότερα στο μέλλον.

Η σημαντικότερη όμως τεχνολογική εξέλιξη που εμπλουτίζει τις μεθόδους πρόβλεψης της ποιότητας αέρα, είναι η τεχνητή νοημοσύνη. Η σημερινή μορφή τεχνητής νοημοσύνης (artificial intelligence, AI), η οποία βασίζεται σε μοντέλα επεξεργασίας και συσχέτισης

δεδομένων μεγάλου όγκου, καθώς και το ευρύτερο πεδίο της ανάλυσης μεγάλων δεδομένων (Big Data Analytics), βρίσκουν ευθεία εφαρμογή σε περιπτώσεις όπου τα αποτελέσματα βασίζονται σε επεξεργασία αλληλοεξαρτώμενων δεδομένων, όπως είναι οι χωρικές κατανομές εκπομπών και διασποράς αέριων ρύπων, καθώς και οι μετεωρολογικές και μορφολογικές συνθήκες. Μια πρόσφατη ανασκόπηση^[116] αποδίδει την ισχύ και τον πρωτοποριακό χαρακτήρα που διαπιστώνει στις μεθόδους πρόβλεψης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στα ειδικά χαρακτηριστικά τους, όπως η οργανική μάθηση, η υψηλή ακρίβεια, η ανώτερες δυνατότητες γενίκευσης, η μεγάλη ανοχή σε σφάλματα και η ευκολία στη διαχείριση πολυδιάστατων δεδομένων. Μέσα από τη μελέτη 90 δημοσιεύσεων που χρονολογούνται από το 2003 έως το 2021, η εργασία καταγράφει ότι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνικές ΑΙ για την πρόβλεψη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, τα βαθιά νευρωνικά δίκτυα, οι μηχανές μάθησης με διανυσματική υποστήριξη και η ασαφής λογική. Σε μια πρόσφατη εφαρμογή ορισμένων από τις τεχνικές αυτές,^[117] αναπτύχθηκε ένα βελτιστοποιημένο μοντέλο πρόβλεψης και ταξινόμησης της ποιότητας του αέρα βασισμένο σε τεχνητή νοημοσύνη σε περιβάλλον μεγάλων δεδομένων. Το μοντέλο πρόβλεψης βασίστηκε στον συνδυασμό των μεθόδων ARIMA και νευρωνικών δικτύων (NN), γνωστό ως ARIMA-NN, ενώ για τη βελτίωση της απόδοσης πραγματοποιήθηκε ρύθμιση παραμέτρων με τη χρήση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης αντίθετων σμηνών. Τέλος, για την ταξινόμηση της ποιότητας του αέρα σε κατηγορίες ρύπανσης χρησιμοποιήθηκε ταξινομητής προσαρμοστικού νευροασαφούς συστήματος συμπερασμού. Η πειραματική ανάλυση κατέληξε ότι η μέθοδος αυτή έχει πολύ καλή απόδοση. Σε μια άλλη περίπτωση,^[118] για την πρόβλεψη των χρονοσειρών συγκέντρωσης PM_{2.5} αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος υβριδικής ολοκλήρωσης ο οποίος συνδυάζει προεπεξεργασία δεδομένων, αποσύνθεση χρονοσειρών, αποσύνθεση σημάτων, ένα μοντέλο πρόβλεψης, μια στρατηγική αντιστοίχισης και έναν υβριδικό ενσωματωμένο αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Τα αποτελέσματα του αλγόριθμου έδειξαν ότι μπορεί να δώσει βελτιωμένες προβλέψεις και να αξιοποιηθεί ως ισχυρό εργαλείο διαμόρφωσης και διαχείρισης πολιτικών για τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα.

Η παραπάνω συνοπτική ανάλυση δείχνει την κατεύθυνση προς την οποία πρέπει να στραφεί η μελλοντική έρευνα επί του θέματος της εργασίας αυτής. Η κατεύθυνση αυτή συνίστανται στην αξιοποίηση των μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης, ιδίως μηχανικής μάθησης και ανάλυσης μεγάλων δεδομένων, σε συνδυασμό με δίκτυα αισθητήρων βασιζόμενα στο IoT, γύρω από αεροδρόμια, ώστε να διερευνηθούν νέες δυνατότητες έγκαιρης και ολοκληρωμένης πρόβλεψης της ποιότητας του αέρα στις επηρεαζόμενες από αεροδρόμια περιοχές.

10. Κατάλογος συντομογραφιών

- AI** **Artificial Intelligence.** Τεχνητή Νοημοσύνη.
- APU** **Auxiliary Power Unit.** Βοηθητική μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας επί του αεροσκάφους, που τίθεται σε λειτουργία στο έδαφος, όταν δεν διατίθεται παροχή ηλεκτρικής ισχύος από το αεροδρόμιο.
- CO** **Μονοξείδιο του άνθρακα.** Θεωρείται ατμοσφαιρικός ρύπος, τόσο διότι οι υψηλές του συγκεντρώσεις επηρεάζουν την υγεία του πληθυσμού όσο και διότι ρυθμίζεται κανονιστικά από τη νομοθεσία για την ποιότητα του αέρα.
- CO₂** **Διοξείδιο του άνθρακα.** Δεν θεωρείται ατμοσφαιρικός ρύπος, δεδομένου ότι πρόκειται για ουσία παραγόμενη από φυσικές διεργασίες, παρούσα στην ατμόσφαιρα σε επίπεδα του 4%. Η αύξηση του CO₂ στην ατμόσφαιρα, με προέλευση κυρίως τις ανθρωπογενείς εκπομπές, θεωρείται η βασική αιτία του φαινομένου του θερμοκηπίου, δηλαδή της βαθμιαίας αύξησης στη μέση θερμοκρασία της Γης.
- EDMS** **Emissions and Dispersion Modeling System.** Το βασικό σύστημα υπολογιστικών ομοιωμάτων (μοντέλων) που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία για την εκτίμηση των εκπομπών και συγκεντρώσεων αέριων ρύπων στα αεροδρόμια.
- FAA** **Federal Aviation Administration.** Η Ομοσπονδιακή Αρχή Πολιτικής Αεροπορίας των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής (<http://www.faa.gov>)

- GPU** **Ground Power Unit.** Αυτόνομη φορητή μονάδα ηλεκτροπαραγωγής με γεννήτρια και κινητήρα εσωτερικής καύσης, η οποία χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία των σταθμευμένων αεροσκαφών με ηλεκτρική ενέργεια.
- GSE** **Ground Support Equipment.** Εξοπλισμός επίγειας υποστήριξης των αεροσκαφών στα αεροδρόμια. Αποτελείται κυρίως από πετρελαιοκίνητα οχήματα έλξης των αεροσκαφών, μεταφοράς επιβατών ή αποσκευών, διακίνησης καυσίμων ή τροφίμων κ.ά.
- HCS** **Υδρογονάνθρακες.** Οι οργανικές ενώσεις του άνθρακα με υδρογόνο, με γενικό τύπο C_xH_y . Διακρίνονται σε κορεσμένους, όπου όλοι οι δεσμοί μεταξύ των ατόμων άνθρακα είναι απλοί, και σε ακόρεστους, όπου κάποιοι δεσμοί είναι διπλοί ή τριπλοί. Ανάλογα με τη δομή τους, διακρίνονται επίσης σε άκυκλους και κυκλικούς υδρογονάνθρακες.
- IATA** **International Air Transport Association.** Διεθνής Ένωση Αερομεταφορών, διεθνής μη κρατικός οργανισμός αερομεταφορέων, με ευθύνη ισόρροπης ρύθμισης του κόστους.
- ICAO** **International Civil Aviation Organization.** Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας, ο οποίος αποτελεί το βασικό ρυθμιστή των διεθνών αερομεταφορών. Αποτελεί μέρος του ΟΗΕ, εδρεύει στο Μόντρεαλ του Καναδά και έχει μέλη 191 χώρες.
- IoT** **Internet of Things.** Δίκτυο φυσικών συσκευών (αισθητήρες, οικιακές συσκευές, οχήματα και άλλες "έξυπνες" συσκευές) που είναι συνδεδεμένες στο διαδίκτυο, επιτρέποντας την ανταλλαγή δεδομένων και την αλληλεπίδραση μεταξύ τους χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση.
- LTO** **Landing and TakeOff cycle.** Κύκλος προσγείωσης - απογείωσης, χρησιμοποιείται ως μονάδα μέτρησης της αεροπορικής κίνησης σε ένα αεροδρόμιο.
- NMHC** **Υδρογονάνθρακες πλην μεθανίου (Non-Methane HydroCarbons).** Το τμήμα των συνολικών υδρογονανθράκων (βλ. THC παρακάτω) μετά την αφαίρεση του μεθανίου (CH_4).
- NO₂** **Διοξείδιο του αζώτου.** Θεωρείται ατμοσφαιρικός ρύπος, κυρίως υπεύθυνος για επιδράσεις στην υγεία του πληθυσμού, στο pH της βροχής και κατ' επέκταση στη

βλάστηση και στα οικοσυστήματα, καθώς και στο σχηματισμό τροποσφαιρικού όζοντος.

- NO_x** **Οξείδια του αζώτου**, μίγμα μονοξειδίου και διοξειδίου (NO και NO₂). Τα NO_x που εξετάζονται στο πλαίσιο μελετών ποιότητας αέρα, συνήθως εκπέμπονται από διεργασίες καύσης· η πρωτογενής εκπομπή αποτελείται στο μεγαλύτερο μέρος ή στο σύνολο από NO, το οποίο σε χρονική κλίμακα λεπτών μετατρέπεται κατά ένα μέρος σε NO₂. Το τελευταίο έχει καφετί χρώμα, χαρακτηριστικό του φωτοχημικού νέφους. Η μετατροπή NO σε NO₂ συμβάλλει στη μετατροπή O₂ σε O₃: για το λόγο αυτό τα NO_x θεωρούνται πρόδρομες ουσίες του τροποσφαιρικού όζοντος και ενώσεις που εμμέσως επηρεάζουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου.
- PM₁₀** **Αιωρούμενα σωματίδια (particulate matter) με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερη των 10 μm**. Είναι εισπνεύσιμα και θεωρούνται ρυπαντές της ατμόσφαιρας με επίδραση κυρίως στο αναπνευστικό σύστημα. Σημαντικό μέρος της συγκέντρωσης τους στην ατμόσφαιρα είναι δυνατόν να προέρχεται από φυσικές πηγές, ιδίως στον ευρωπαϊκό νότο.
- PM_{2,5}** **Αιωρούμενα σωματίδια (particulate matter) με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερη των 2,5 μm**, αποκαλούμενα και λεπτά αιωρούμενα σωματίδια. Είναι εισπνεύσιμα και θεωρούνται ρυπαντές της ατμόσφαιρας με επίδραση κυρίως στο αναπνευστικό σύστημα. Το όριο στη συγκέντρωσή τους τέθηκε πρόσφατα με την Οδηγία 2008/50/ΕΚ.
- SC** **Stability Class, κατάσταση ευστάθειας της ατμόσφαιρας** (το αρκτικόλεξο χρησιμοποιείται κυρίως στις σημειώσεις εντός των γραφημάτων).
- SO₂** **Διοξείδιο του θείου**. Θεωρείται ατμοσφαιρικός ρύπος, υπεύθυνος για επιδράσεις στην υγεία του πληθυσμού, στο pH της βροχής (σε συνέργεια με το NO₂) και κατ' επέκταση στη βλάστηση και στα οικοσυστήματα, ενώ ενεργεί και ως πρόδρομος παράγων σχηματισμού σωματιδίων στην ατμόσφαιρα.
- SO_x** **Οξείδια του θείου**, κυρίως μίγμα κυρίως διοξειδίου του θείου και θειικών ανιόντων ή ριζών (SO₂ και SO₄²⁻) με κυρίαρχο το SO₂. Προέρχεται από την οξείδωση του θείου που περιέχεται στα καύσιμα και, δεδομένου ότι στα αεροπορικά καύσιμα το ποσοστό θείου είναι ιδιαίτερα μικρό, οι εκπομπές SO_x από τη λειτουργία των αεροδρομίων είναι περιορισμένες.

- THC** **Ολικοί υδρογονάνθρακες (Total HydroCarbons).** Ενώσεις άνθρακα με υδρογόνο, οι οποίες αποτελούν την πλειονότητα των καύσιμων μιγμάτων. Εκπέμπονται λόγω ατελούς καύσης ή εξάτμισης. Στην εργασία αυτή, η συντομογραφία αντιστοιχεί στους ολικούς υδρογονάνθρακες που εμφανίζονται στα απαέρια, όπως μετρώνται με ανιχνευτή ιονισμού φλόγας (flame ionization detector, FID) κατά τα αναφερόμενα στο annex 16 του ICAO. Η ποσότητα των THC εκφράζεται σε ισοδύναμο μεθάνιο. Σημειώνεται ότι ο FID δεν μετρά την πλήρη μάζα των οξυγονωμένων υδρογονανθράκων.
- TOG** **Σύνολο οργανικών αέριων ουσιών (Total Organic Gas compounds).** Οργανικές ενώσεις του άνθρακα που διαχέονται στην ατμόσφαιρα μέσω εξάτμισης, εξάχνωσης ή κολλοειδούς διασποράς. Εξαιρούνται, επειδή δεν θεωρούνται οργανικά, τα μόρια μονοξειδίου και διοξειδίου, το ανθρακικό οξύ και τα άλατά του (περιλαμβανόμενου του ανθρακικού αμμωνίου), καθώς και τα μεταλλικά καρβίδια. Ο όρος έχει ιδιαίτερα συγγενές περιεχόμενο με τα VOCs.
- VOC** **Πτητικές οργανικές ουσίες (Volatile Organic Compounds).** Οργανικές ενώσεις με κοινό χαρακτηριστικό την υψηλή τάση ατμών, λόγω της οποίας εξατμίζονται σε θερμοκρασία δωματίου. Ο όρος VOC υπόκειται σε διαφορετικούς ορισμούς, όπως «*κάθε οργανική ένωση της οποίας το αρχικό σημείο βρασμού, μετρούμενο σε σταθερή πίεση 101,3 kPa, είναι μικρότερο ή ίσο των 250 °C*» (Οδηγία 2004/42/EK για τον περιορισμό των εκπομπών VOC από τη χρήση οργανικών διαλυτών σε χρώματα και βερνίκια) ή «*όλες οι ενώσεις του άνθρακα που συμμετέχουν σε ατμοσφαιρικές χημικές αντιδράσεις, πλην μονοξειδίου και διοξειδίου, ανθρακικού οξέος και αλάτων του, μεταλλικών καρβιδίων, καθώς και των αέριων οργανικών ουσιών με αμελητέο φωτοχημικό δυναμικό, όπως CH₄, CH₃Cl, C₂H₆, CH₃CHCl₂, πολλοί χλωροφθοράνθρακες και φθοράνθρακες*» (US EPA).
- WD** **Wind Direction, κατεύθυνση ανέμου** (το αρκτικόλεξο χρησιμοποιείται κυρίως στις σημειώσεις εντός των γραφημάτων).
- WS** **Wind Speed, ταχύτητα ανέμου** (το αρκτικόλεξο χρησιμοποιείται κυρίως στις σημειώσεις εντός των γραφημάτων).
- ΔΑΑ** **Διεθνής Αερολιμένας Αθηνών «Ελευθέριος Βενιζέλος».** Το νέο αεροδρόμιο της Αττικής, βρίσκεται 21 km ανατολικά του κέντρου της Αθήνας, στην περιοχή των Σπάτων. Αποτελεί το μεγαλύτερο και το μόνο μη-κρατικό αεροδρόμιο της

Ελλάδας· ξεκίνησε τη λειτουργία του τον Μάρτιο του 2001 και αντικατέστησε το αεροδρόμιο του Ελληνικού που εξυπηρετούσε για 6 δεκαετίες την Αθήνα.

- ΚΑΗΚ** **Κρατικός Αερολιμένας Ηρακλείου «Νίκος Καζαντζάκης».** Ο δεύτερος σε κινήσεις ελληνικός αερολιμένας, βρίσκεται 4 km ανατολικά της πόλης, στην περιοχή της Νέας Αλικαρνασσού.
- ΑΘΜ** **Αερολιμένας Θεσσαλονίκης «Μακεδονία».** Ο τρίτος σε κινήσεις ελληνικός αερολιμένας, βρίσκεται 14 km νότια της πόλης, στην περιοχή της Μίκρας.
- ΜΠΕ** **Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων.** Διεπιστημονική εργασία που εκπονείται για να εκτιμηθούν, αξιολογηθούν και αντιμετωπισθούν οι επιπτώσεις ενός έργου ή δραστηριότητας στο περιβάλλον, στο πλαίσιο της διαδικασίας Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων (Ν. 1650/86 όπως τροποποιήθηκε από Ν. 3010/2002).
- ΠΟΥ** **Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας.** Γνωστός με το διεθνές αρκτικόλεξο WHO (World Health Organization), είναι ο αυτόνομος διεθνής διακρατικός οργανισμός που ασχολείται με τη διεθνή δημόσια υγεία, αποτελώντας εξειδικευμένη υπηρεσία του Οργανισμού Ηνωμένων Εθνών.
- ΥΠΑ** **Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας.** Η δημόσια Αρχή που είναι υπεύθυνη για την οργάνωση, την ανάπτυξη και τον έλεγχο των αερομεταφορών στην Ελλάδα.

11. Παράρτημα Α: Στοιχεία τεκμηρίωσης κεφαλαίου 1.

11.1. Βασικές έννοιες

11.1.1. Ατμόσφαιρα

Η ατμόσφαιρα αποτελεί το αέριο περίβλημα της γης που συγκρατείται σε αεροστατική ισορροπία γύρω από αυτή, λόγω των βαρυτικών δυνάμεων του πλανήτη. Το ύψος της ατμόσφαιρας κυμαίνεται από 800 έως 1000 km, μεγαλύτερο στον ισημερινό και μικρότερο στους πόλους, αλλά το μακράν μεγαλύτερο μέρος των αερίων, περίπου το 99,9% της ολικής μάζας της ατμόσφαιρας, βρίσκεται στα πρώτα 50 km και το 0,099% στη ζώνη ύψους μεταξύ 50 και 100 km.

Η ατμόσφαιρα υποδιαιρείται στις ακόλουθες ζώνες,^[119] κυρίως με βάση την κατανομή της θερμοκρασίας με το ύψος:

- Τροπόσφαιρα (H: 0 – 11 km): Στην τροπόσφαιρα η θερμοκρασία μειώνεται με το ύψος με ρυθμό 6,5 °C/km και η ελάχιστη θερμοκρασία στην ζώνη αυτή είναι -56 °C.
- Τροπόπαυση (H: 11 km ± 1 km): Οριακή περιοχή μεταξύ τροπόσφαιρας και στρατόσφαιρας.
- Στρατόσφαιρα (H: 11 – 50 km): Η θερμοκρασία παραμένει σταθερή στη ζώνη από 11 έως 20 km και στη συνέχεια αυξάνει μέχρι τα 50 km ως τους -2 °C.
- Στρατόπαυση (H: 50 km ± 1 km): Οριακή περιοχή μεταξύ στρατόσφαιρας και μεσόσφαιρας.
- Μεσόσφαιρα (H: 50 – 80 km): Η θερμοκρασία μειώνεται με το ύψος.
- Θερμόσφαιρα (H: 80 – 400 km): Αρχικώς απότομη και στη συνέχεια αργή αύξηση της θερμοκρασίας με το ύψος.
- Εξώσφαιρα (H > 400 km): Ζώνη μη οριζόμενη από την θερμοκρασία.

Η ατμόσφαιρα αποτελεί ένα δυναμικό σύστημα, του οποίου τα αέρια συστατικά αναμιγνύονται και αντιδρούν μεταξύ τους υπό την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ η παραγωγή και η κατανάλωσή τους συνδέεται με τους ωκεανούς, τα ηφαίστεια, τη βλάστηση και πολυάριθμους άλλους αβιοτικούς και βιοτικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες.

11.1.2. Κυριότεροι ατμοσφαιρικοί ρύποι

Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι, ανάλογα με τον τρόπο παραγωγής τους διακρίνονται σε πρωτογενείς, που απελευθερώνονται άμεσα από τις πηγές ρύπανσης και δευτερογενείς, που προκύπτουν από χημικές αντιδράσεις μεταξύ των πρωτογενών ρύπων ή και των συστατικών της ατμόσφαιρας υπό την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας.^[120]

Οι κυριότεροι ατμοσφαιρικοί ρύποι είναι οι εξής:

- Διοξείδιο του θείου (SO_2): Παράγεται κυρίως από την καύση υγρών και στερεών καυσίμων τα οποία περιέχουν θείο και χρησιμοποιούνται στις μεταφορές, στη θέρμανση, στην παραγωγή ενέργειας και σε άλλες βιομηχανικές δραστηριότητες. Θεωρείται υπεύθυνο για το φαινόμενο της όξινης βροχής και σε σημαντικές συγκεντρώσεις προκαλεί προβλήματα στο αναπνευστικό και καρδιαγγειακό σύστημα, όπως και ερεθισμό στα μάτια.
- Μονοξείδιο του άνθρακα (CO). Προέρχεται από ατελή καύση με κυριότερες πηγές ανθρωπογενούς παραγωγής του τους βενζινοκινητήρες των αυτοκινήτων και ορισμένες βιομηχανικές δραστηριότητες. Παράγεται επίσης από φυσικές πηγές όπως ηφαίστεια, πυρκαγιές και αποσύνθεση οργανικών ενώσεων. Η επίδραση του στον άνθρωπο και γενικότερα στους οργανισμούς των θηλαστικών έγκειται στη μείωση της ικανότητας του αίματος να μεταφέρει οξυγόνο. Για το λόγο αυτό, η έκθεση σε μεγάλες συγκεντρώσεις CO προκαλεί απώλεια των αισθήσεων και μπορεί να προκαλέσει το θάνατο.
- Οξείδια του αζώτου (NO_x): Τα κυριότερα είναι το μονοξείδιο (NO) και το διοξείδιο του αζώτου (NO_2). Παράγονται κυρίως από την καύση στους κινητήρες των μέσων μεταφοράς, στους καυστήρες των κεντρικών θερμάνσεων και στη βιομηχανία, μέσω της οξειδωσης τόσο του ατμοσφαιρικού όσο και του περιεχομένου στα καύσιμα αζώτου. Οι μεγαλύτερες ποσότητες του διοξειδίου του αζώτου παράγονται με φωτοχημικές αντιδράσεις από την οξειδωση του μονοξειδίου του αζώτου.
- Όζον (O_3): Πρόκειται για την τριατομική, δραστική διαμόρφωση του μορίου του οξυγόνου και αποτελεί ρύπο μόνο όταν βρίσκεται σε πολύ χαμηλά ύψη και είναι αναπνεύσιμο από τον άνθρωπο. Το τροποσφαιρικό αυτό όζον προέρχεται από σειρά

φωτοχημικών αντιδράσεων όπου συμμετέχουν πρωτογενείς ρύποι μεταξύ των οποίων τα οξείδια του αζώτου και οι υδρογονάνθρακες.

- Υδρογονάνθρακες (HCs): Παράγονται κυρίως από την καύση υγρών και στερεών καυσίμων (βιομηχανία, κεντρικές θερμάνσεις, αυτοκίνητα) και από τα διυλιστήρια πετρελαίου. Επίσης σημαντικές ποσότητες πτητικών υδρογονανθράκων διαφεύγουν στην ατμόσφαιρα κατά τη μεταφορά, αποθήκευση και διακίνηση προϊόντων του πετρελαίου. Οι υδρογονάνθρακες και ιδιαίτερα οι ακόρεστοι κυκλικοί, όπως το βενζόλιο, θεωρείται ότι προκαλούν καρκίνο.
- Αιωρούμενα Σωματίδια (ΑΣ ή PM). Τα σωματίδια ανάλογα με το μέγεθος τους διακρίνονται στις σκόνες, τα αιωρούμενα σωματίδια και τον καπνό. Το μέγεθος τους επίσης καθορίζει τη συμπεριφορά τους και το χρόνο παραμονής στην ατμόσφαιρα που κυμαίνεται από λίγα λεπτά έως και μήνες. Οι σημαντικότερες πηγές τους είναι οι καύσεις, οι βιομηχανίες παραγωγής τσιμέντου καθώς και η παραγωγή και διακίνηση αδρανών υλικών. Ο βαθμός επικινδυνότητας των σωματιδίων εξαρτάται από το μέγεθος τους, και από τη χημική τους σύσταση. Η νομοθεσία επικεντρώνεται στη θέσπιση ορίων για τα αιωρούμενα σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο έως 10 μm (PM₁₀) και πιο πρόσφατα σε αυτά με αεροδυναμική διάμετρο έως 2,5 μm (PM_{2.5}).

11.1.3. Επίδραση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στη δημόσια υγεία και στο περιβάλλον

Η αυξημένη συγκέντρωση αέριων ρύπων στην ατμόσφαιρα, δηλαδή η κακή ποιότητα του αέρα, έχει αρνητικές επιπτώσεις στη δημόσια υγεία και στο φυσικό περιβάλλον.

Η επιδείνωση της υγείας γίνεται αντιληπτή από τα στοιχεία του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας, σύμφωνα με τα οποία η ατμοσφαιρική ρύπανση είναι υπεύθυνη για περίπου 4,2 εκατομμύρια θανάτους ή για το 1/9 της παγκόσμιας θνησιμότητας. Ειδικότερα, στην ατμοσφαιρική ρύπανση αποδίδεται το 16% των θανάτων από καρκίνο του πνεύμονα, το 11% των θανάτων από χρόνια αποφρακτική πνευμονοπάθεια, το 20% των θανάτων από ισχαιμική καρδιοπάθεια και εγκεφαλικά επεισόδια και τέλος το 13% των θανάτων από λοιμώξεις του αναπνευστικού συστήματος.^[121-123] Τα προβλήματα αυτού του είδους εμφανίζονται πλέον με μεγαλύτερη ένταση στις ραγδαία αναπτυσσόμενες βιομηχανικά χώρες,^[124] όπως η Κίνα,^[125-128] αλλά στο πρόσφατο παρελθόν αποτέλεσαν ενδημικά φαινόμενα στη μεγάλη πλειοψηφία των μεγάλων πόλεων της Ευρώπης, καθώς και σε αρκετές περιοχές της Ευρωπαϊκής υπαίθρου οι οποίες βρίσκονται εντός της εμβέλειας επίδρασης μεγάλων βιομηχανικών μονάδων. Εκτενή στοιχεία συσχετισμού μεταξύ φαινομένων ατμοσφαιρικής ρύπανσης και

νοσηρότητας ή/και θνησιμότητας σε πόλεις της Ελλάδας δείχνουν ότι η υποβάθμιση της ποιότητας του αέρα εξακολουθεί να επιδρά αρνητικά στη δημόσια υγεία του αστικού πληθυσμού της χώρας.^[129-131] Τα τελευταία στοιχεία^[132] εκτιμούν ότι περίπου 8.500 θάνατοι θα μπορούσαν να είχαν αποφευχθεί στην Ελλάδα, εάν η συγκέντρωση των υπέρλεπτων αιωρούμενων σωματιδίων (PM_{2.5}) μειωνόταν στο επίπεδο των 10μg/m³.

Οι επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στο φυσικό περιβάλλον^[133] έχουν έκδηλες και λιγότερο έκδηλες μορφές. Στις πρώτες ανήκουν οι επιπτώσεις στα φυτά, είτε των φυσικών είτε των αγροτικών οικοσυστημάτων, ορισμένα εκ των οποίων μπορεί να παρουσιάσουν από ασθενική όψη έως αραίωση των φυλλώματος, και από αλλαγές στο μεταβολισμό έως επιδεινώσεις του αναπαραγωγικού δυναμικού τους. Η όξινη βροχή, η οποία αποτελεί το μηχανισμό πρόκλησης των εντονότερων επιπτώσεων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στο φυσικό περιβάλλον, προκύπτει από την έκπλυση των οξειδίων αζώτου και θείου από την αέρια φάση στα σταγονίδια της βροχής και επιφέρει μια σειρά βλαβών στα φυτά, αλλοιώνοντας την προστατευτική επιφάνεια των φύλλων με αποτέλεσμα τη μείωση της αντίστασης σε ασθένειες, αυξάνοντας τη διαλυτότητα στοιχείων του εδάφους με επακόλουθη τοξικότητα για τις ρίζες, επιταχύνοντας τη διάβρωση του εδάφους κ.ά. Η υποβάθμιση των φυτών προκαλεί αλυσιδωτές επιδεινώσεις στις παραμέτρους τροφοληψίας και αναπαραγωγής της πανίδας των οικοσυστημάτων, οδηγώντας τελικά στην επιδείνωση της ευρωστίας τους.

11.2. Η ρύπανση του αέρα ως πρόβλημα στο διεθνές επίπεδο

Η ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελεί πρόβλημα διεθνούς κλίμακας, το οποίο εμφανίζεται στις περισσότερες πυκνοκατοικημένες περιοχές της Γης ως συνέπεια της αυξημένης παραγωγής ενέργειας από καύσεις, η οποία συνδέεται με τη γρήγορη ανάπτυξη της οικονομίας ή το μετασχηματισμό της παραγωγικής δομής.

Στο πρόσφατο παρελθόν, η ρύπανση του αέρα ενδημούσε στις περισσότερες μεγάλες πόλεις της Ευρώπης και αργότερα της Αμερικής, ως περιβαλλοντική συνέπεια της παραγωγικής μεγέθυνσης και της ραγδαίας αστικοποίησης που ξεκίνησε με τη Βιομηχανική Επανάσταση. Η ατμοσφαιρική ρύπανση στις μεγάλες πόλεις οδήγησε αρκετές φορές σε ιστορικής εμβέλειας επεισόδια προσβολής της δημόσιας υγείας και μείωσης της ορατότητας, όπως η

Μεγάλη Αιθαλομίχλη του Λονδίνου το Δεκέμβριο του 1952 (The Great London Smog)^[134] και οι συνεχές εμφανίσεις φωτοχημικής ρύπανσης στο Los Angeles το 1948.^[135]



Σχήμα 14: Φωτογραφία από τη Μεγάλη Αιθαλομίχλη του Λονδίνου το 1952 (αριστερά) και τη θολή ατμόσφαιρα του Los Angeles την παραμονή Χριστουγέννων του 1948 (δεξιά).

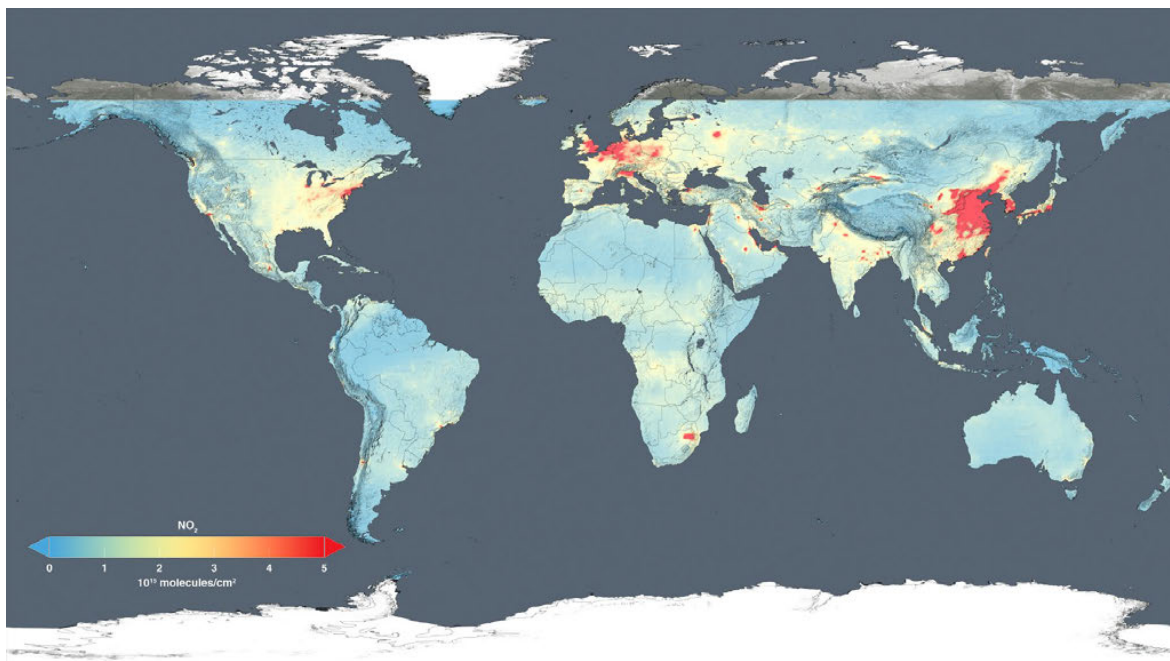
Καθώς οι μητροπόλεις του δυτικού κόσμου άρχισαν να βλέπουν την ποιότητα της ατμόσφαιράς τους να βελτιώνεται μετά από δεκαετίες εφαρμογής εκτεταμένων πολιτικών καθαρότερου αέρα, το πρόβλημα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης εμφανίστηκε ξανά, με ακόμη μεγαλύτερη ένταση αυτή τη φορά, στις μητροπόλεις της Ασίας. Οι πιο χαρακτηριστικές περιπτώσεις πόλεων στις οποίες η ποιότητα του αέρα που αναπνέουν οι κάτοικοί τους είναι ιδιαίτερα υποβαθμισμένη είναι το Πεκίνο στην Κίνα και το Νέο Δελχί στην Ινδία, όπου εικόνες όπως οι ακόλουθες δεν είναι καθόλου σπάνιες.



Σχήμα 15: Η ατμοσφαιρική ρύπανση στο Πεκίνο (αριστερά) και στο Νέο Δελχί (δεξιά).

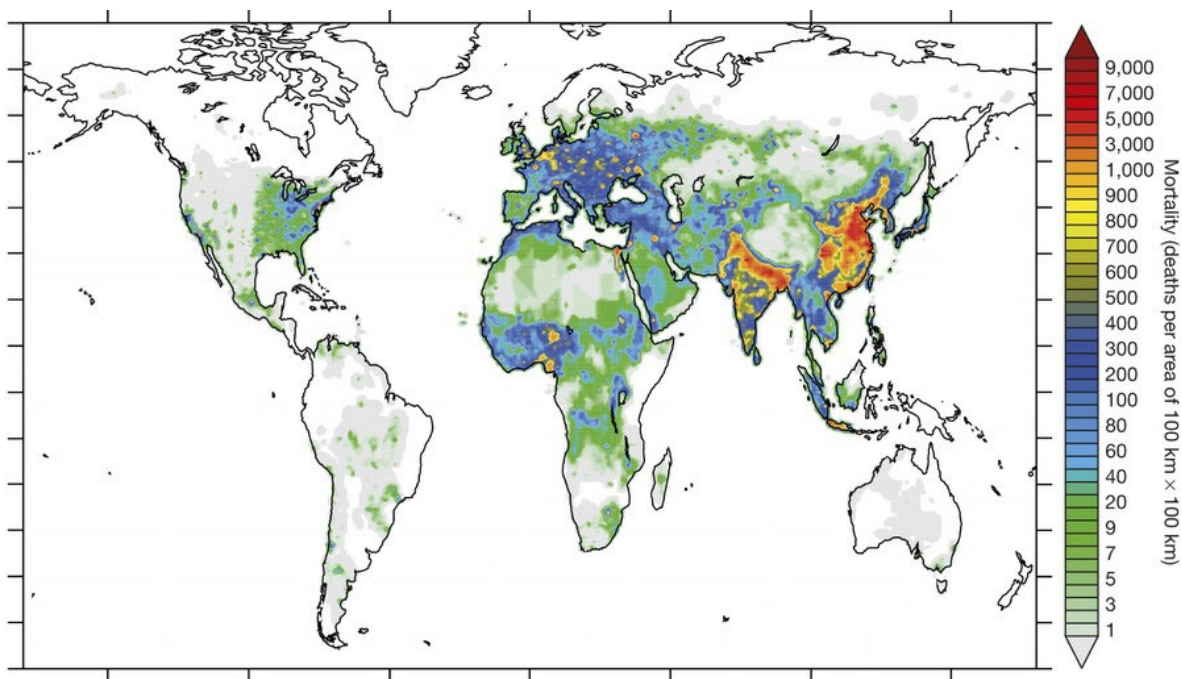
Οι πρωτοβουλίες για την αντιμετώπιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης παρουσιάζουν επίσης παγκόσμια χαρακτηριστικά και εκτείνονται σε ένα ευρύ φάσμα, από το υπερεθνικό έως το τοπικό επίπεδο και από την καταγραφή των συγκεντρώσεων έως την ανάπτυξη καθαρών τεχνολογιών. Η απόσταση ωστόσο από τη διασφάλιση ικανοποιητικής ποιότητας αέρα για την πλειοψηφία του παγκόσμιου πληθυσμού είναι ακόμη μεγάλη, όπως προκύπτει από την αυξημένη ένταση του προβλήματος της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην Ασία και την Ινδική

Χερσόνησο, αλλά και τη μικρή μόνο εξομάλυνσή του στις μεγάλες πόλεις της Ευρώπης και της Αμερικής, όπως αυτές αποτυπώνονται ανάγλυφα στις πρόσφατες απεικονίσεις των επιπέδων συγκέντρωσης ενός από τους κύριους ατμοσφαιρικούς ρύπους, του NO_2 , από τους δορυφόρους της NASA.^[136]



Σχήμα 16: Δορυφορική αποτύπωση των μέσων επιπέδων NO_2 στην τροπόσφαιρα του πλανήτη στη διάρκεια του 2014.

Σήμερα, σύμφωνα με τον ΠΟΥ, η ρύπανση του ατμοσφαιρικού αέρα αποτελεί τη σημαντικότερη αιτία πρόωρων θανάτων σε παγκόσμια κλίμακα^[121,122,137] και η γεωγραφική κατανομή της έντασης αυτού του επαχθούς φαινομένου, που παρουσιάζεται στο χάρτη του επόμενου σχήματος,^[138] εμφανίζει πλήρη αναλογία με την παγκόσμια κατανομή αυξημένων επιπέδων αέριων ρύπων του σχήματος που προηγήθηκε.



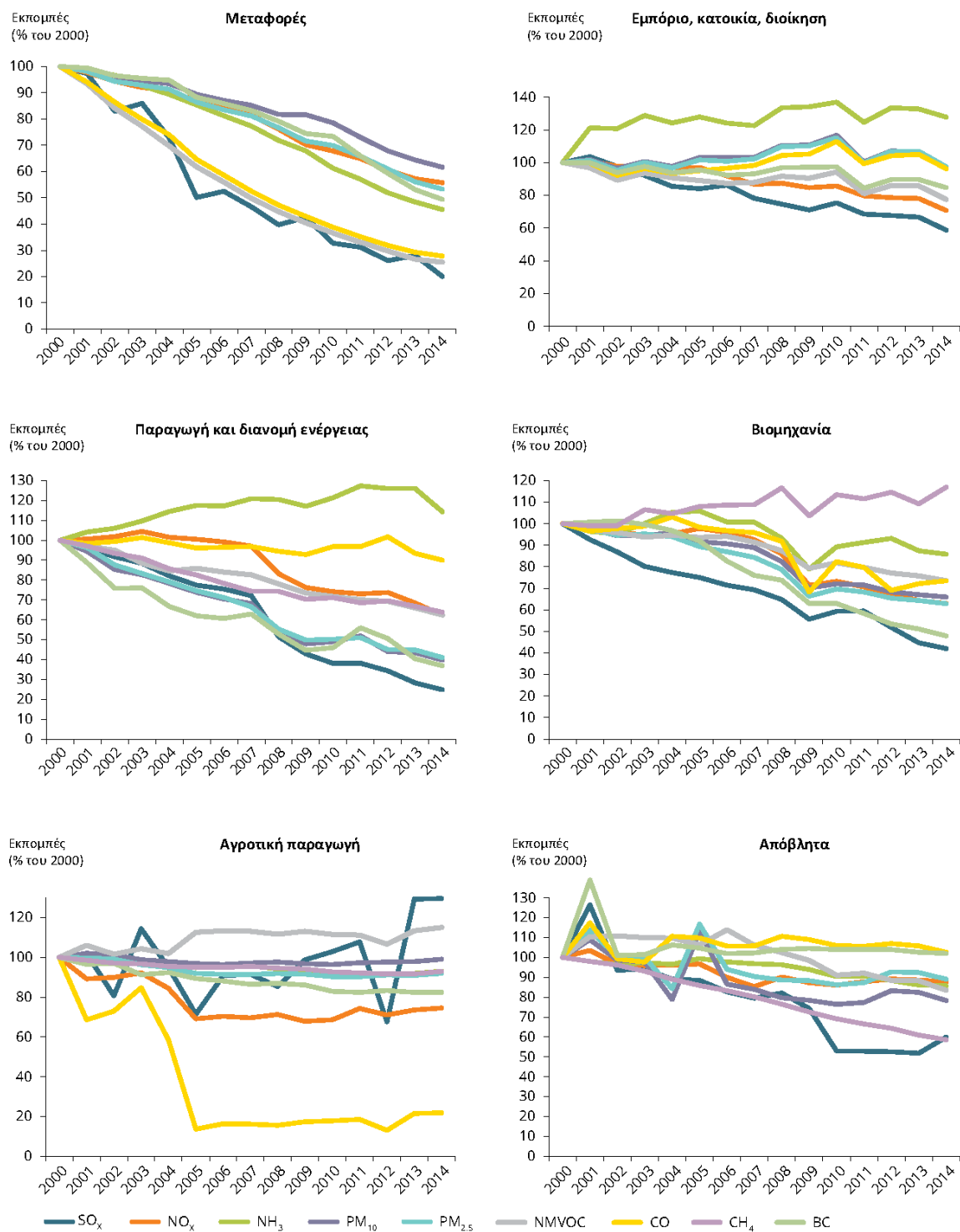
Σχήμα 17: Γεωγραφική κατανομή της θνησιμότητας που συνδέεται με την ατμοσφαιρική ρύπανση το 2010.

11.3. Η ποιότητα του αέρα στην Ευρώπη

Οι εικόνες των μεγάλων ευρωπαϊκών πόλεων καλυμμένων από την αιθαλομίχλη που προκαλούσε η ρύπανση του αέρα από τις περιστατικές βιομηχανίες και τις οικιακές καύσεις, καθώς και τα αναπνευστικά προβλήματα χιλιάδων κατοίκων τους, αποτέλεσαν πολύ ισχυρά κίνητρα για την ανάληψη πρωτοβουλιών αντιμετώπισης του προβλήματος της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε όλη τη διάρκεια του τελευταίου μισού του 20^{ου} αιώνα, είτε από τις εθνικές κυβερνήσεις είτε κατόπιν από την όλο και συστηματικότερα ενοποιούμενη Ευρώπη. Ειδικότερα από τη δεκαετία του 1980 και έως σήμερα, τα θέματα περιβάλλοντος αποτέλεσαν έναν από τους τομείς προτεραιότητας για την ενιαία άσκηση πολιτικής στην ενωμένη Ευρώπη, και στο πλαίσιο αυτό οι ρυθμιστικοί περιορισμοί και οι ενεργητικές πρωτοβουλίες για την ποιότητα του αέρα εκπορεύονται κυρίως από το επίπεδο των Βρυξελλών, ενώ στη συνέχεια υιοθετούνται με αξιοσημείωτη ομοιογένεια από τα κράτη-μέλη.

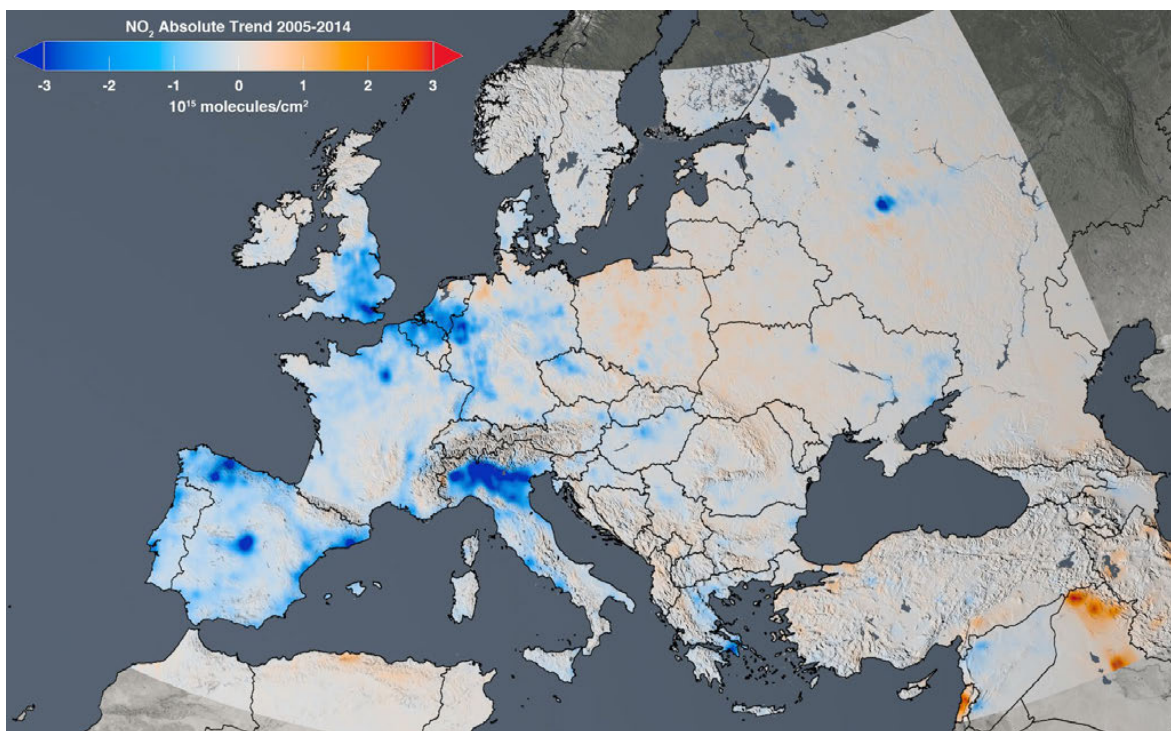
Η προσπάθεια τόνωσης των πρωτοβουλιών βελτίωσης της ποιότητας του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος στην Ευρώπη κορυφώθηκε το 2013, το οποίο ανακηρύχθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή ως «Ευρωπαϊκό Έτος Καθαρού Αέρα». Στη διάρκειά του, υιοθετήθηκε το πρόγραμμα «Καθαρός αέρας για την Ευρώπη»^[139] και ξεκίνησε η εφαρμογή μιας ευρύτερης δέσμης για τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα,^[140] στην οποία περιλαμβάνονται αναθεωρήσεις των εθνικών ορίων εκπομπών, τη διασυνοριακή ατμοσφαιρική ρύπανση κ.ά. Εξετάζοντας την ατμοσφαιρική ρύπανση, η οποία όπως αναφέρθηκε αποτελεί σημαντικό περιβαλλοντικό πρόβλημα, στο γενικότερο πλαίσιο των αναπτυξιακών και κοινωνικών κατευθύνσεων της Ευρώπης, καθώς και του ανταγωνισμού της Ευρωπαϊκής οικονομίας με τις μεγάλες οικονομίες του κόσμου, διαπιστώνεται ότι η προσπάθεια βελτίωσης της ποιότητας του αέρα είναι ένα ιδιαίτερα σύνθετο πρόβλημα, το οποίο εγείρει πολλαπλές προκλήσεις ως προς τους τρόπους μείωσης των εκπομπών αέριων ρύπων, χωρίς υπέρμετρη επιβάρυνση της ανταγωνιστικότητας. Οι προκλήσεις αυτές εκτείνονται σε μια ευρεία σειρά τομέων που χαρακτηρίζονται από αυξημένες εκπομπές αέριων ρύπων, στους οποίους περιλαμβάνονται οι αερομεταφορές, που συγκεντρώνουν το ενδιαφέρον αυτής της εργασίας.

Οι πολιτικές της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα, καθώς και οι εφαρμογές τους στην Ελλάδα, στοχεύουν στον περιορισμό των εκπομπών από όλους τους τομείς και έχουν επιφέρει σημαντικά αποτελέσματα στον τομέα των μεταφορών, της βιομηχανίας και των αποβλήτων, όπως φαίνεται στο ακόλουθο γράφημα.^[141]



Γράφημα 162: Εκπομπές αέριων ρύπων στην Ευρωπαϊκή Ένωση.

Η διαχρονική μείωση των εκπομπών ρύπων στην ατμόσφαιρα της Ευρώπης, έχει ως αποτέλεσμα την ορατή βελτίωση της ποιότητας του αέρα, όπως αποτυπώνεται ανάγλυφα στην ακόλουθη δορυφορική καταγραφή.^[142]



Σχήμα 18: Δορυφορική αποτύπωση της τάσης των μέσων επιπέδων NO₂ στην τροπόσφαιρα της Ευρώπης από το 2005 ως το 2014.

Εκτός από τη θεαματική βελτίωση στη βόρεια Ιταλία και τις Ισπανικές και Γερμανικές μεγάλες πόλεις, αξίζει να σημειωθούν και οι βελτιώσεις που αποτυπώθηκαν στον ελληνικό χώρο, με εμφανέστερες αυτές στην Αττική.

11.4. Η ατμοσφαιρική ρύπανση στην Ελλάδα

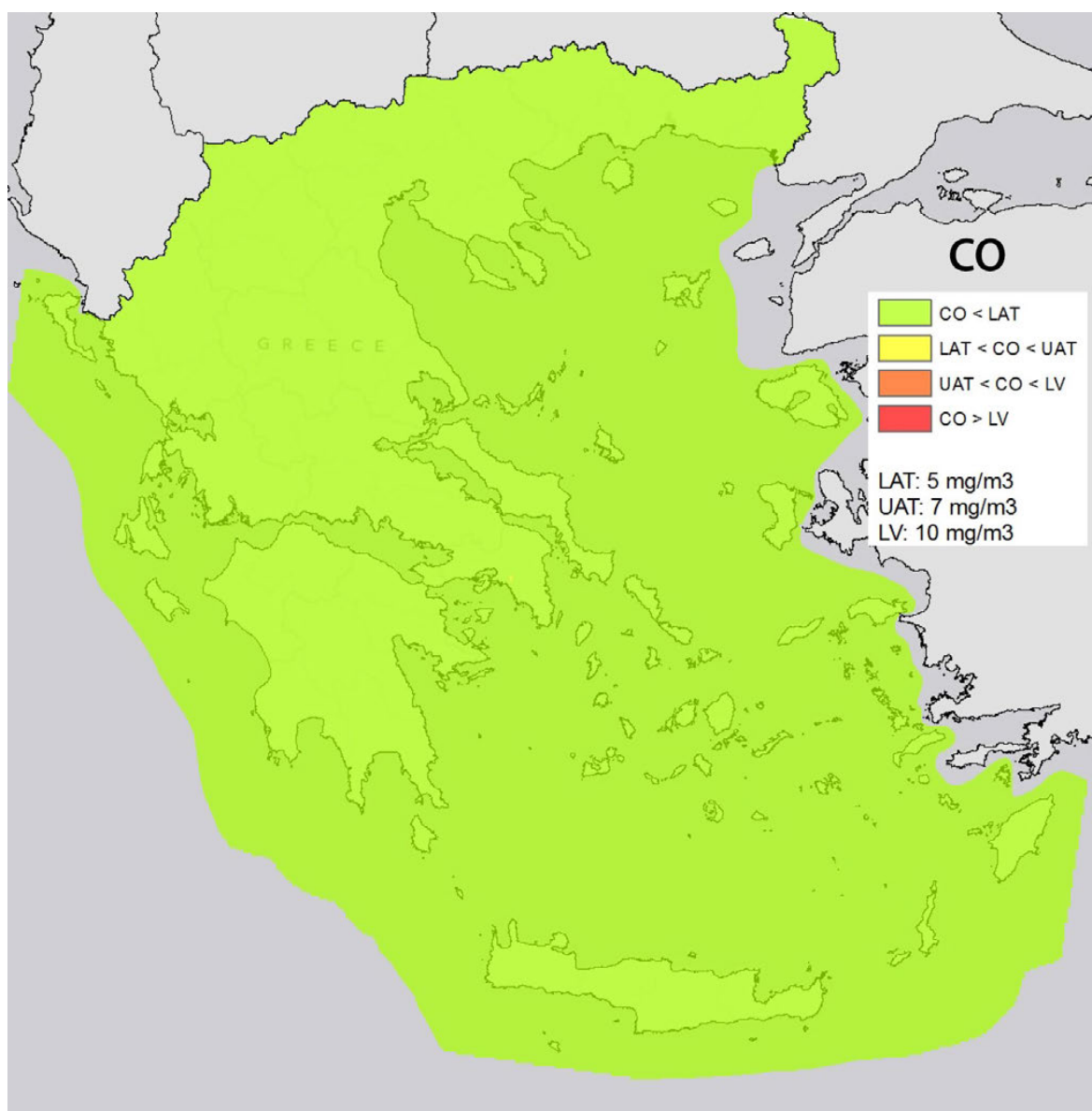
11.4.1. Η κατάσταση σε όλη τη χώρα

Η ποιότητα του αέρα σε όλη την έκταση της Ελληνικής επικράτειας διερευνάται κατά την τελευταία δεκαετία σε τακτική βάση. Συγκεκριμένα στο πλαίσιο εφαρμογής της εθνικής και ενωσιακής νομοθεσίας, το Υπουργείο Περιβάλλοντος αναθέτει σε κοινοπραξίες επιστημονικών σχηματισμών τη χαρτογράφηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε όλη την έκταση του ελληνικού χώρου, με τη χρήση των κατάλληλων για την κλίμακα αυτή μεθόδων, οι οποίες αποτελούνται από ένα συνδυασμό υπολογιστικών εκτιμήσεων και μετρήσεων πεδίου.

Τα αποτελέσματα της διερεύνησης αυτής αποτυπώνονται σε κατάλληλους χάρτες, που αναπαριστούν την επικρατούσα κατάσταση με βάση τα ακόλουθα επίπεδα, τα οποία προβλέπονται από τη νομοθεσία:^[45]

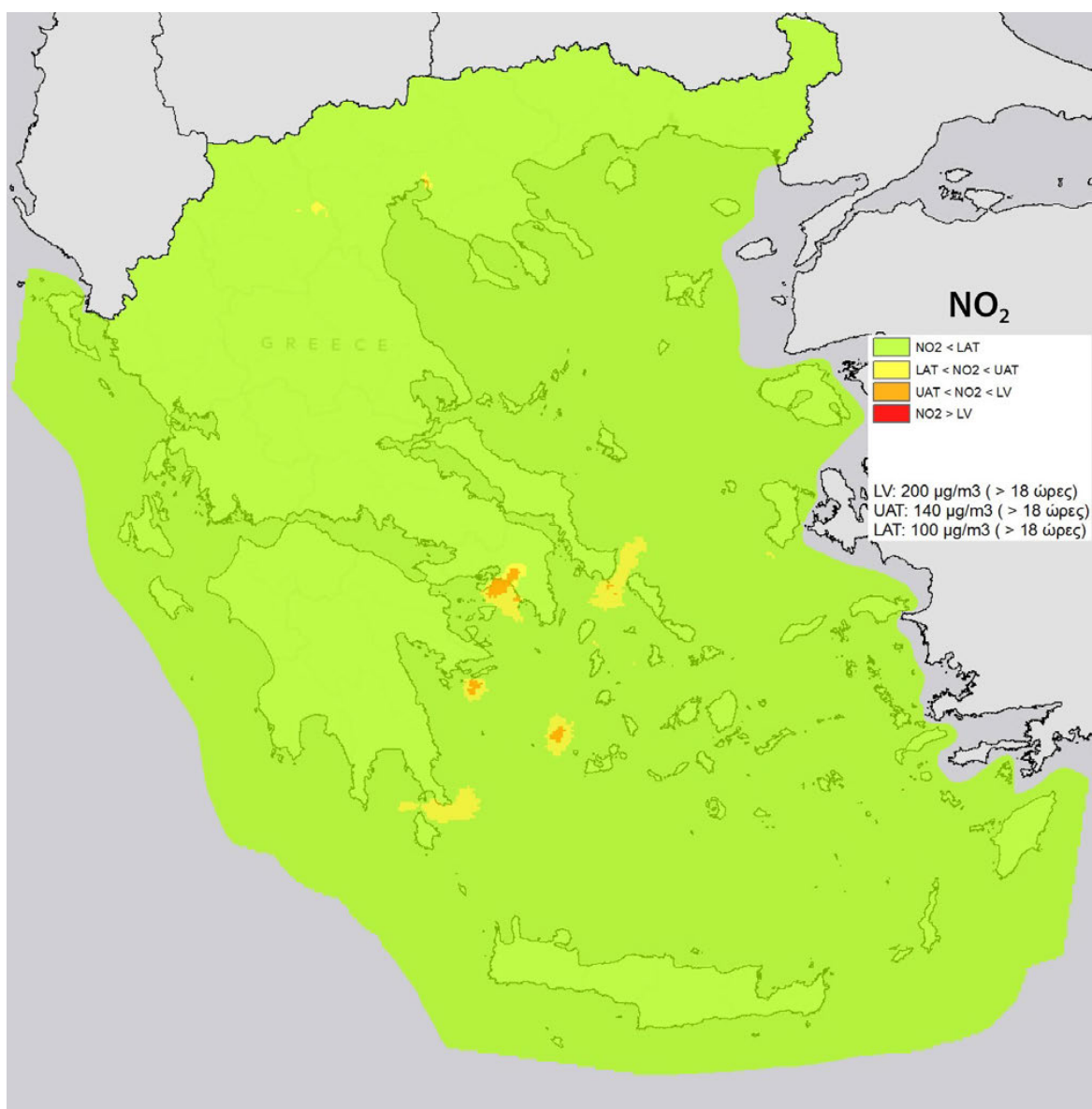
- LAT, Lower Assessment Threshold: «Κατώτερο όριο εκτίμησης», δηλαδή το επίπεδο κάτω από το οποίο μπορούν να χρησιμοποιούνται μόνο τεχνικές προσομοίωσης ή αντικειμενικής εκτίμησης για την εκτίμηση της ποιότητας του αέρα. Πρακτικά το LAT σηματοδοτεί εκείνα τα επίπεδα συγκέντρωσης κάθε ρύπου για τα οποία δεν εγείρεται καμία ανησυχία επιπτώσεων στη δημόσια υγεία ή στο περιβάλλον και επομένως δεν απαιτείται η λήψη μέτρων για τη λεπτομερή παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα.
- UAT, Upper Assessment Threshold: «Ανώτερο όριο εκτίμησης», δηλαδή το επίπεδο έως το οποίο μπορεί να χρησιμοποιείται συνδυασμός σταθερών μετρήσεων και τεχνικών προσομοίωσης ή/και ενδεικτικών μετρήσεων για την εκτίμηση της ποιότητας του αέρα. Πρακτικά το UAT σηματοδοτεί εκείνα τα επίπεδα συγκέντρωσης κάθε ρύπου για τα οποία θα πρέπει να αναληφθεί κάποια πρωτοβουλία μετρήσεων, ώστε να παρακολουθείται λεπτομερέστερα η εξέλιξη της συγκέντρωσης και να εντοπίζονται εγκαίρως ενδεχόμενες αυξητικές τάσεις που θα οδηγούσαν σε υπερβάσεις.
- LV, Limit Value: «Οριακή τιμή», δηλαδή το επίπεδο που καθορίζεται βάσει επιστημονικών γνώσεων, με σκοπό να αποφεύγονται, να προλαμβάνονται ή να μειώνονται οι επιβλαβείς επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και/ή στο σύνολο του περιβάλλοντος.

Τα αποτελέσματα της τελευταίας χαρτογράφησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην Ελλάδα, τα οποία αφορούν στους τέσσερις ρύπους με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την εργασία αυτή, δηλαδή το CO, τα NO_x, τα PM₁₀ και τα SO_x παρουσιάζονται στα επόμενα σχήματα.^[70]



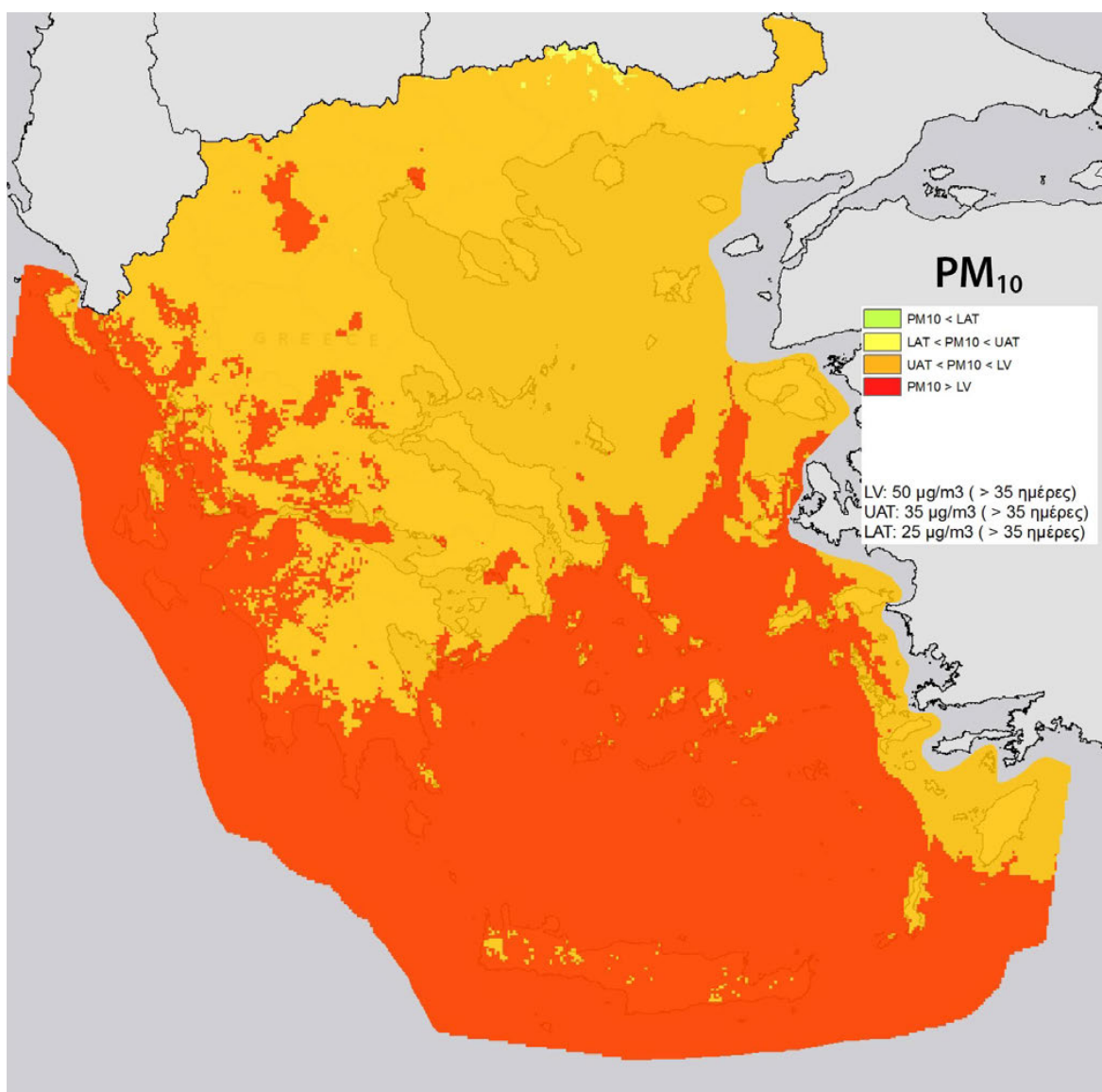
Σχήμα 19: Επίπεδα της μέγιστης ετήσιας τιμής των μεγίστων ημερησίων οκτάωρων συγκεντρώσεων του CO στην Ελλάδα.

Όπως διαπιστώνεται από το παραπάνω σχήμα, οι ημερησίως μέγιστες οκτάωρες μέσες συγκεντρώσεις του CO δεν ξεπερνούν ποθενά το LAT. Ορισμένες υπερβάσεις του επιπέδου αυτού έχουν υπολογιστεί στο κέντρο της Αθήνας, όπου ωστόσο δεν έχει υπολογιστεί υπέρβαση ούτε του UAT ούτε της οριακής τιμής.^[70]



Σχήμα 20: Επίπεδα της μέσης ετήσιας συγκέντρωσης NO₂ στην Ελλάδα.

Όπως προκύπτει από τον παραπάνω χάρτη, η οριακή τιμή για τις ωριαίες συγκεντρώσεις του NO₂ δεν υπερβαίνεται περισσότερες φορές από τις προβλεπόμενες στην νομοθεσία σε καμία περιοχή του Ελλαδικού χώρου. Οι ωριαίες συγκεντρώσεις του NO₂ υπερβαίνουν την τιμή του UAT και LAT περισσότερες φορές από αυτές που προβλέπει η νομοθεσία στην Αθήνα, στον Σαρωνικό κόλπο και στην Θεσσαλονίκη ενώ η τιμή του LAT υπερβαίνεται περισσότερες φορές από αυτές που προβλέπει η νομοθεσία και στην ευρύτερη περιοχή των θερμοηλεκτρικών εργοστασίων του νομού Κοζάνης δεδομένων και των υψηλότερων εκπομπών NO_x στις προαναφερόμενες περιοχές αυτές.

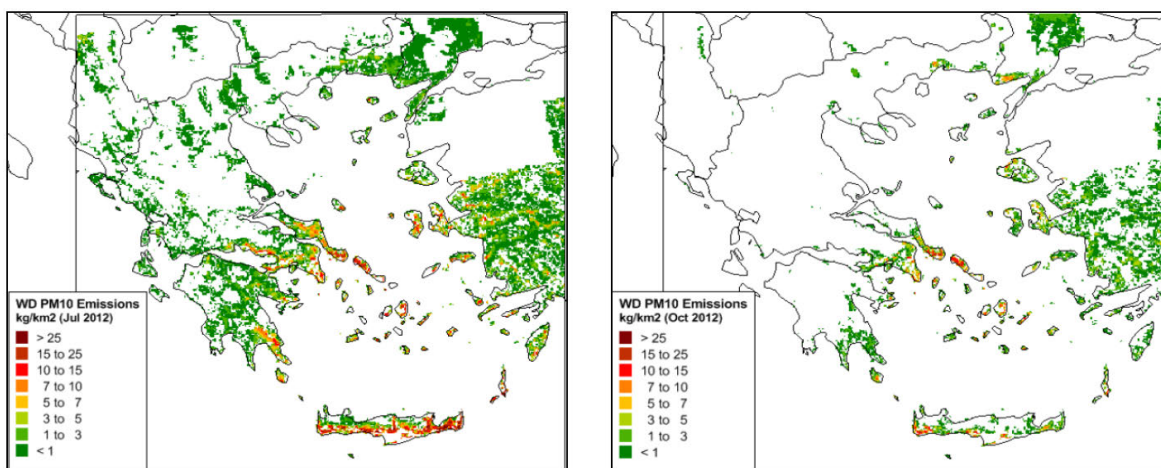


Σχήμα 21: Επίπεδα ημερήσιας συγκέντρωσης PM_{10} στην Ελλάδα.

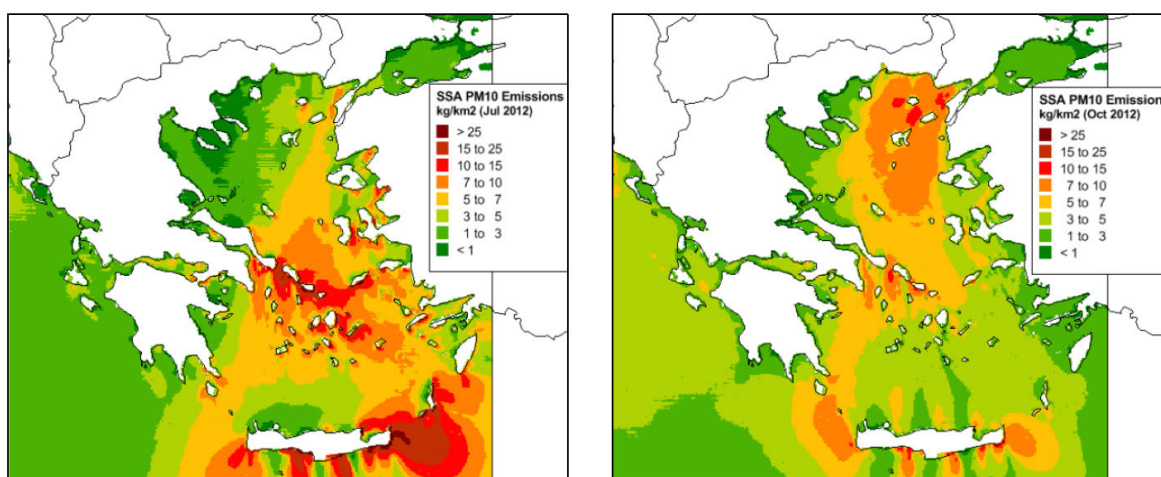
Όπως διαπιστώνεται από τον παραπάνω χάρτη, οι ημερήσιες συγκεντρώσεις των PM_{10} υπερβαίνουν την οριακή τιμή περισσότερες φορές από αυτές που προβλέπει η νομοθεσία κυρίως στο νότιο και δυτικό τμήμα της χώρας ως αποτέλεσμα τόσο της μεταφοράς ρύπανσης από πηγές εκτός του Ελλαδικού χώρου, όσο και φυσικής εκπομπής σωματιδίων από τις γυμνές επιφάνειες του εδάφους (σχήμα 22) και από τη θάλασσα (σχήμα 23),^[70] οι οποίες είναι σημαντικού μεγέθους.

Υπερβάσεις της οριακής τιμής παρατηρούνται επίσης και στα μεγάλα αστικά κέντρα της Αθήνας και Θεσσαλονίκης, αλλά και στην περιοχή των θερμοηλεκτρικών εργοστασίων του νομού Κοζάνης.

Τέλος, οι ημερήσιες συγκεντρώσεις των PM_{10} υπερβαίνουν την τιμή του LAT και UAT περισσότερες φορές από αυτές που προβλέπει η νομοθεσία στο σύνολο της χώρας.

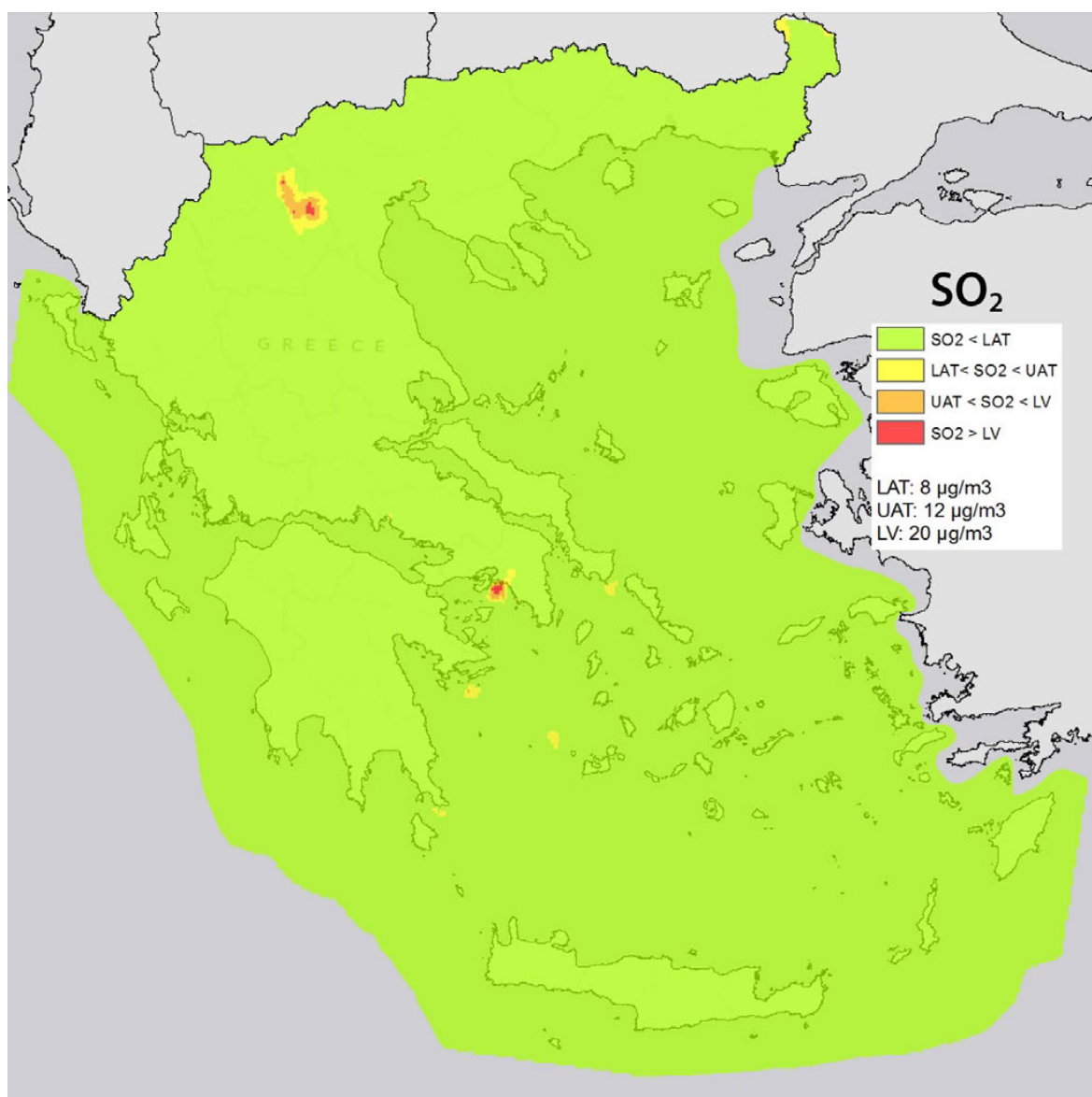


Σχήμα 22: Φυσικές εκπομπές PM₁₀ από την επίδραση του ανέμου στο έδαφος.



Σχήμα 23: Φυσικές εκπομπές PM₁₀ από θαλάσσιο αλάτι που παράγεται από την επίδραση του ανέμου στις θαλάσσιες επιφάνειες.

Ως προς τον τελευταίο από τους ρύπους ενδιαφέροντος αυτής της εργασίας, το SO₂, όπως προκύπτει από τον παρακάτω χάρτη, οι οριακές τιμές του SO₂ φαίνεται να υπερβαίνονται περισσότερες φορές από αυτές που προβλέπει η νομοθεσία στην περιοχή των θερμοηλεκτρικών εργοστασίων του νομού Κοζάνης και συγκεκριμένα στη θέση των εργοστασίων ή πολύ κοντά σε αυτές, σε ακτίνα 2 - 4 km. Η τιμή LAT για τις ημερήσιες συγκεντρώσεις του SO₂ υπερβαίνεται περισσότερες φορές από αυτές που προβλέπει η νομοθεσία και στην Αθήνα αλλά και στην θαλάσσια περιοχή κοντά στο λιμάνι του Πειραιά.



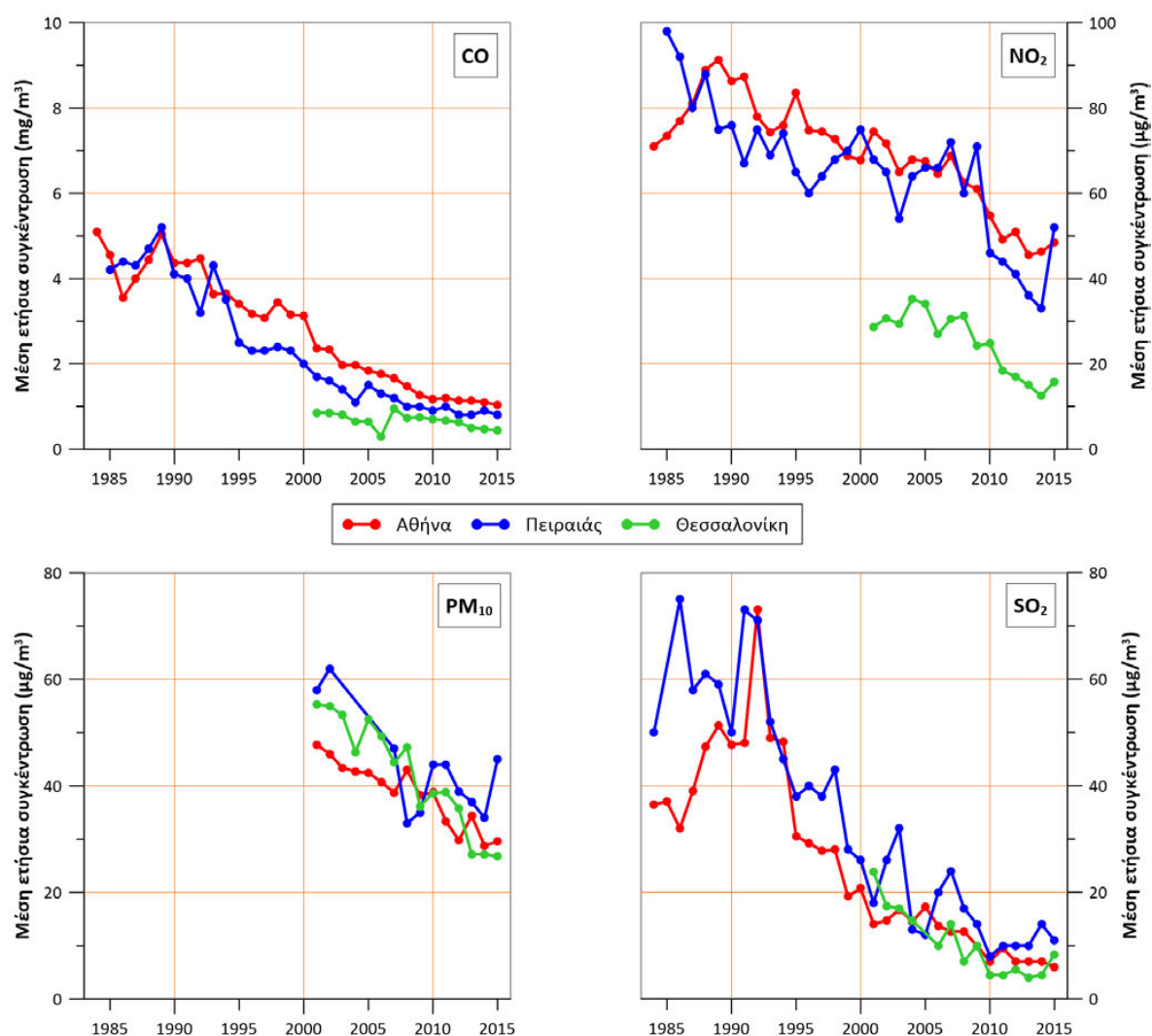
Σχήμα 24: Επίπεδα της μέσης ετήσιας τιμής της συγκέντρωσης SO₂ στην Ελλάδα.

11.4.2. Η κατάσταση στις μεγάλες πόλεις

Μεταθέτοντας τώρα την εστίαση από ολόκληρο τον ελληνικό χώρο στα μεγάλα αστικά συγκροτήματα, όπου ζει περίπου ο μισός πληθυσμός της χώρας, διαπιστώνεται ότι η ποιότητα του αέρα στις μεγάλες πόλεις της Ελλάδας ακολούθησε σε γενικές γραμμές τις εξελίξεις που παρατηρήθηκαν στις ευρωπαϊκές μεγαλουπόλεις, δηλαδή την επιδείνωση και τη διατήρηση σε χαμηλά επίπεδα για αρκετά χρόνια, καθώς και τη σταδιακή βελτίωση στη συνέχεια· τα φαινόμενα αυτά ωστόσο παρουσιάστηκαν με τη χρονική καθυστέρηση που χαρακτηρίζει και άλλες εξελίξεις στη χώρα μας, όπως η οικονομική ανάπτυξη και η αστικοποίηση, δηλαδή με μια διαφορά 8 - 15 ετών μετά την εμφάνισή τους στις δυτικές μητροπόλεις.

Παρά τις ειδικές διαφορές που η ατμοσφαιρική ρύπανση παρουσιάζει μεταξύ ελληνικού και ευρύτερου ευρωπαϊκού χώρου, όπως οι τοπικές οξύνσεις στις πόλεις που γειτνιάζουν με τους λιγνιτικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής και η εντονότερη φωτοχημεία, οι ομοιότητες των ζητημάτων ποιότητας αέρα μεταξύ Ελλάδας και Ευρώπης είναι εμφανείς, τόσο στο κανονιστικό επίπεδο, με την εφαρμογή της σχετικής ενωσιακής νομοθεσίας, όσο και στο φάσμα των τεχνολογικών μέτρων μείωσης των εκπομπών από τη βιομηχανία, την οδική κυκλοφορία και την κεντρική θέρμανση.

Τα μέτρα αυτά είχαν ως αποτέλεσμα τις μεγάλες μειώσεις στις συγκεντρώσεις των κύριων αέριων ρύπων που απεικονίζονται στο ακόλουθο γράφημα.^[143]

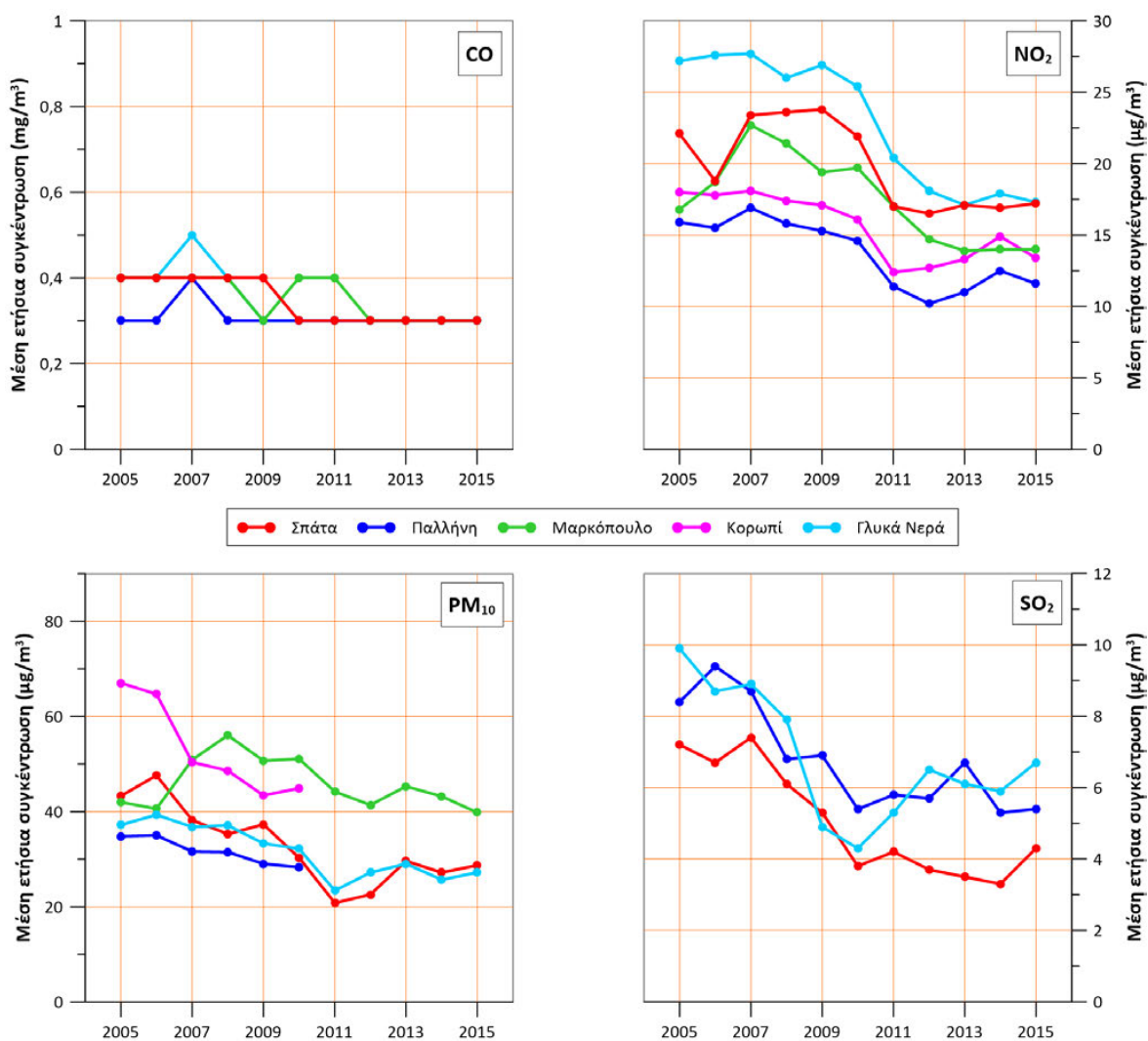


Γράφημα 163: Εξέλιξη συγκεντρώσεων αέριων ρύπων σε κεντρικά σημεία μεγάλων πόλεων της Ελλάδας.

11.4.3. Η κατάσταση γύρω από τα αεροδρόμια

Δεδομένου ότι συστηματική παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα διεξάγεται μόνο γύρω από το μεγαλύτερο αεροδρόμιο της χώρας, το Διεθνές Αερολιμένα Αθηνών στα Σπάτα, η εικόνα για την εξέλιξη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης γύρω από τα ελληνικά αεροδρόμια δεν μπορεί παρά να βασιστεί στα δεδομένα της περιοχής αυτής.

Ενώ η πτωτική τάση των συγκεντρώσεων αέριων ρύπων στα κεντρικά σημεία της Αθήνας, του Πειραιά και της Θεσσαλονίκης είναι συνεχής, έντονη και διαρκεί για δύο τουλάχιστον δεκαετίες, η αντίστοιχη τάση γύρω από το ΔΑΑ παρουσιάζει διαφορετικά χαρακτηριστικά, όπως προκύπτει από το επόμενο γράφημα που βασίζεται στα δεδομένα των εκθέσεων περιβάλλοντος του αεροδρομίου (ετήσιες εκθέσεις «Φροντίδα για το Περιβάλλον» 2006-2016).



Γράφημα 164: Εξέλιξη συγκεντρώσεων αέριων ρύπων σε κεντρικά σημεία μεγάλων πόλεων της Ελλάδας.

Όπως φαίνεται από το παραπάνω γράφημα, το NO₂ που αποτελεί το χαρακτηριστικότερο αέριο ρύπο λειτουργίας των αεροδρομίων, εμφανίζει μικτές τάσεις, με αύξηση και διατήρηση σε υψηλά επίπεδα το διάστημα 2007-2009, μείωση για τα επόμενα δύο χρόνια και διατήρηση σε χαμηλότερα επίπεδα από το 2012 και εξής, με ορατές πάντως αυξητικές τάσεις.

11.5. Οριακές τιμές για την ποιότητα του αέρα

Ένα από τα εργαλεία που χρησιμοποιεί η διακυβέρνηση της Ευρωπαϊκής Ένωσης στην προσπάθεια για βελτίωση της ποιότητας του αέρα είναι η θέσπιση και εφαρμογή οριακών τιμών στις συγκεντρώσεις των κρίσιμων αέριων ρύπων.

Ιστορικά, η πρώτη Οδηγία για την θέσπιση ορίων συγκέντρωσης ρύπων στην ατμόσφαιρα εκδόθηκε το 1980 και αφορούσε το διοξείδιο του θείου και τα αιωρούμενα σωματίδια,^[144] ενώ μετά από πέντε χρόνια ακολούθησε η θέσπιση ορίων για το διοξείδιο του αζώτου.^[145]

Από τότε έως σήμερα, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει σε εφαρμογή ένα πλήρες πλέγμα ρυθμίσεων για την ποιότητα του αέρα, το οποίο αφορά τόσο στις συγκεντρώσεις αέριων ρύπων όσο και στις εκπομπές τους από τις σημαντικότερες κατηγορίες πηγών, αποτελούμενο από τα ακόλουθα νομικά κείμενα:

- Συγκεντρώσεις αέριων ρύπων
 1. Οδηγία 2008/50/ΕΚ για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και για καθαρότερο αέρα για την Ευρώπη,^[44] τα κυριότερα στοιχεία της οποίας είναι η ενοποίηση των σημαντικότερων στοιχείων των επιμέρους προγενέστερων Οδηγιών (δηλαδή της Οδηγίας-πλαίσιου 1996/62/ΕΚ και των τριών πρώτων «θυγατρικών» της 1999/30/ΕΚ, 2000/69/ΕΚ, 2002/3/ΕΚ), η υιοθέτηση στόχων για τα υπέρλεπτα αιωρούμενα σωματίδια PM_{2.5} κ.ά.
 2. Οδηγία 2004/107/ΕΚ σχετικά με το αρσενικό, το κάδμιο, τον υδράργυρο, το νικέλιο και τους πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες στον ατμοσφαιρικό αέρα.^[146]
 3. Αποφάσεις της Ευρωπαϊκής Επιτροπής 1997/101/ΕΚ για την αμοιβαία ανταλλαγή πληροφοριών μέτρησης της ρύπανσης του αέρα και 2004/461/ΕΚ για την ετήσια έκθεση εκτίμησης της ποιότητας του αέρα του περιβάλλοντος.
- Ολοκληρωμένη Πρόληψη και Αντιμετώπιση της Ρύπανσης
 4. Οδηγία 2008/1/ΕΚ σχετικά με την ολοκληρωμένη πρόληψη και έλεγχο της ρύπανσης.^[147]

- Μεγάλες εγκαταστάσεις καύσης
 5. Οδηγία 2001/80/EK για τον περιορισμό των εκπομπών στην ατμόσφαιρα ορισμένων ρύπων από εγκαταστάσεις καύσης με θερμική ισχύ 50 MW και άνω.
- Αποτέφρωση αποβλήτων
 6. Οδηγία 2000/76/EK για την αποτέφρωση των αποβλήτων.
- Εκπομπές πτητικών οργανικών ουσιών
 7. Οδηγία 94/63/EK για τον έλεγχο των εκπομπών πτητικών οργανικών ουσιών (VOC) που προέρχονται από την αποθήκευση βενζίνης και τη διάθεσή της από τις τερματικές εγκαταστάσεις στους σταθμούς διανομής καυσίμων.
 8. Οδηγία 1999/13/EK για τον περιορισμό των εκπομπών πτητικών οργανικών ενώσεων που οφείλονται στη χρήση οργανικών διαλυτών σε ορισμένες δραστηριότητες και εγκαταστάσεις.
- Περιεκτικότητα καυσίμων σε θείο
 9. Οδηγία 1999/32/EK σχετικά με τη μείωση της περιεκτικότητας ορισμένων υγρών καυσίμων σε θείο.
 10. Οδηγία 2012/33/EE για την τροποποίηση της οδηγίας 1999/32/EK σχετικά με την περιεκτικότητα των καυσίμων πλοίων σε θείο.
- Εθνικά όρια εκπομπών
 11. Οδηγία 2001/81/EK σχετικά με εθνικά ανώτατα όρια εκπομπών για ορισμένους ατμοσφαιρικούς ρύπους.
- Ποιότητα καυσίμων αυτοκίνησης
 12. Οδηγία 98/70/EK σχετικά με την ποιότητα των καυσίμων βενζίνης και ντίζελ, όπως τροποποιήθηκε από τις Οδηγίες 2000/71/EK και 2003/17/EK.

Η ελληνική νομοθεσία ακολουθεί πλήρως τις εξελίξεις της ευρωπαϊκής νομοθεσίας αναφορικά με τα όρια ποιότητας του αέρα. Στο πλαίσιο αυτό, οι οριακές τιμές ποιότητας του αέρα στο εθνικό δίκαιο καθορίζονται στα ακόλουθα δύο νομοθετήματα:

- ΚΥΑ με α.η.π. 14122/549/Ε103/2011 (φ.ε.κ. Β' 488), με την οποία καθορίζονται μέτρα για τη βελτίωση της ποιότητας της ατμόσφαιρας, σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της οδηγίας 2008/50/EK,
- ΚΥΑ με α.η.π. 22306/1075/Ε103/2007 (φ.ε.κ. Β' 920), με την οποία καθορίζονται τιμές – στόχοι και όρια εκτίμησης των συγκεντρώσεων του αρσενικού, του καδμίου, του υδραργύρου, του νικελίου και των πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων στον ατμοσφαιρικό αέρα, σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της οδηγίας 2004/107/EK.

Οι οριακές τιμές των παραπάνω κανονιστικών πράξεων^[45,148] συγκεντρώνονται στον ακόλουθο πίνακα.













Πίνακας 18: Οριακές τιμές ποιότητας της ατμόσφαιρας στην ελληνική νομοθεσία

Ρύπος	Οριακή τιμή	Περίοδος αναφοράς	Επιτρεπόμενες υπερβάσεις ανά έτος
CO	10 mg/m ³	Οκτάωρη μέση τιμή	-
SO ₂	350 μg/m ³	Ωριαία μέση τιμή	24 φορές
	125 μg/m ³	Ημερήσια μέση τιμή	3 φορές
NO ₂	200 μg/m ³	Ωριαία μέση τιμή	18 φορές
	40 μg/m ³	Ετήσια μέση τιμή	-
PM ₁₀	50 μg/m ³	Ημερήσια μέση τιμή	35 φορές
	40 μg/m ³	Ετήσια μέση τιμή	-
O ₃	50 μg/m ³	Οκτάωρη μέση τιμή	25 φορές
Pb	0,5 μg/m ³	Ετήσια μέση τιμή	-
C ₆ H ₆	5 μg/m ³	Ετήσια μέση τιμή	-
As	6 ng/m ³	Ετήσια μέση τιμή	-
Cd	5 ng/m ³	Ετήσια μέση τιμή	-
Ni	20 ng/m ³	Ετήσια μέση τιμή	-
PAH [ως βενζο(α)πυρένιο]	1 ng/m ³	Ετήσια μέση τιμή	-

Οι οριακές τιμές που έχουν θεσπιστεί στην Ευρωπαϊκή Ένωση και στην Ελλάδα αποτελούν μια νομοθετική εξισορρόπηση μεταξύ των θεωρητικά απαιτούμενων συγκεντρώσεων που θα απέτρεπαν την εμφάνιση επιδημιολογικά ανιχνεύσιμων υποβαθμίσεων της δημόσιας υγείας και των επιπέδων που μπορούν να επιτευχθούν με έντονη, αλλά λογικού βαθμού, προσπάθεια της κοινωνίας, του κράτους και της οικονομίας. Επομένως, η επίτευξη συγκεντρώσεων χαμηλότερων από τις οριακές τιμές αποτελεί μεν σοβαρή ένδειξη αποφυγής επιπτώσεων στην υγεία του γενικού κοινού και των ευαίσθητων ομάδων, καθώς και αποφυγής επιπτώσεων στα οικοσυστήματα, δεν διασφαλίζει δε ότι ο αέρας είναι εγγυημένα αβλαβής.

Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας έχει προτείνει πολύ χαμηλότερα όρια, αφενός επειδή το ενδιαφέρον του εστιάζεται μόνο στη δημόσια υγεία και όχι στα μέσα για την επίτευξη αυτών των ορίων ή στον οικονομικό αντίκτυπό τους που ενδεχομένως θα ήταν παραγωγικά και κοινωνικά δυσβάστακτος, αφετέρου επειδή σκοπεύει με τον τρόπο αυτό να κινητοποιήσει τα νομοθετικά όργανα των μεγάλων οικονομιών του πλανήτη προς την κατεύθυνση βελτίωσης, δηλαδή περαιτέρω μείωσης, των οριακών τιμών για αρκετούς αέριους ρύπους. Αξίζει στο πλαίσιο αυτό να αναφερθεί η διαπίστωση του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος ότι, εάν η έκθεση του αστικού πληθυσμού της Ευρωπαϊκής Ένωσης στην ατμοσφαιρική ρύπανση αποτιμηθεί με βάση τις κατευθύνσεις του ΠΟΥ, τα ποσοστά του πληθυσμού που βρίσκεται σε κίνδυνο είναι πολύ μεγαλύτερα, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.^[149]

Έκθεση αστικού πληθυσμού Ευρωπαϊκής Ένωσης σε επιβλαβείς συγκεντρώσεις αέριων ρύπων το διάστημα 2012-2014, σύμφωνα με:

	Οριακές τιμές Ευρωπαϊκής Ένωσης	Κατευθύνσεις Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας
PM _{2,5}	8-12 % 	85-91 % 
PM ₁₀	16-21 % 	50-63 % 
O ₃	8-17 % 	96-98 % 
NO ₂	7-9 % 	7-9 % 
BaP	20-24 % 	88-91 % 
SO ₂	<1 % 	35-49 % 

Σχήμα 25: Διαφοροποιήσεις των ποσοστών πληθυσμού που εκτίθεται σε κίνδυνο λόγω ρύπανσης του αέρα αναλόγως των οριακών τιμών.

11.6. Οι εναέριες μεταφορές

Οι αερομεταφορές αποτελούν μια βασική συνιστώσα του σύγχρονου τρόπου ζωής, μια εξέλιξη που, ξεκινώντας στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, επέδρασε στη διαμόρφωση της σημερινής εικόνας του κόσμου κατά πολλούς και σημαντικούς τρόπους.

Τα τελευταία χρόνια, ο συνολικός αριθμός επιβατών κυμαίνεται στα τρία δισεκατομμύρια σε ετήσια βάση, υπογραμμίζοντας άμεσα τη σημασία των αερομεταφορών, ενώ έμμεση αλλά εξίσου έντονη υπογράμμιση της σημασίας τους αποτελεί η διάδοση του διεπαιρωτικού εμπορίου, ο τουρισμός, η κινητικότητα της επιχειρηματικής δράσης και η τόνωση των τοπικών οικονομιών από τις θέσεις εργασίας που συνδέονται ευθέως ή έμμεσα με τη λειτουργία των εναέριων συγκοινωνιών.

Το 2014 συμπληρώθηκαν 100 χρόνια από τη γέννηση του τομέα των αερομεταφορών, η οποία θεωρείται ότι σηματοδοτήθηκε από την πρώτη επ' αμοιβή μεταφορά επιβάτη στην ιστορία, του Abram C. Pheil, δημάρχου του St. Petersburg της Florida των ΗΠΑ, την 1^η Ιανουαρίου 1914.^[150] Η σημερινή δυναμική του τομέα αντανακλάται στην εκτίμηση ότι, ενώ σε αυτά τα 100 χρόνια η πολιτική αεροπορία μετέφερε 65 δισεκατομμύρια επιβάτες, τα επόμενα 65 δισεκατομμύρια θα καταγραφούν στα επρχόμενα 15 χρόνια.^[151]

Ο τομέας των αερομεταφορών διαδραματίζει ένα κομβικό ρόλο στην υποστήριξη του σύγχρονου τρόπου ζωής, προσφέροντας μια εκτενή σειρά δυνατοτήτων, οι κυριότερες των οποίων συμπυκνώνονται στις ενότητες 11.6.1 και 11.6.2. Το κόστος υπό το οποίο παρέχονται οι δυνατότητες αυτές δεν είναι μόνον οικονομικό αλλά και περιβαλλοντικό: οι εκπομπές αέριων ρύπων από τις αερομεταφορές, ιδίως στις περιοχές γύρω από τα αεροδρόμια, όπως περιγράφονται στο κεφάλαιο 2 (σελ. 10 και εξής) επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα του αέρα. Οι τρόποι μελέτης της επίδρασης αυτής περιγράφονται στο κεφάλαιο 3 (σελ. 11 και εξής), όπου διαπιστώνεται μεταξύ άλλων οι ποικιλομορφία τους, αλλά και η προσπάθεια που καταβάλλεται σε ερευνητικό επίπεδο για την ανταπόκριση της επιστημονικής κοινότητας στις προκλήσεις που δημιουργεί η αυξανόμενη αεροπορική κίνηση σε συνδυασμό με την αυξανόμενη περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση των σύγχρονων κοινωνιών.

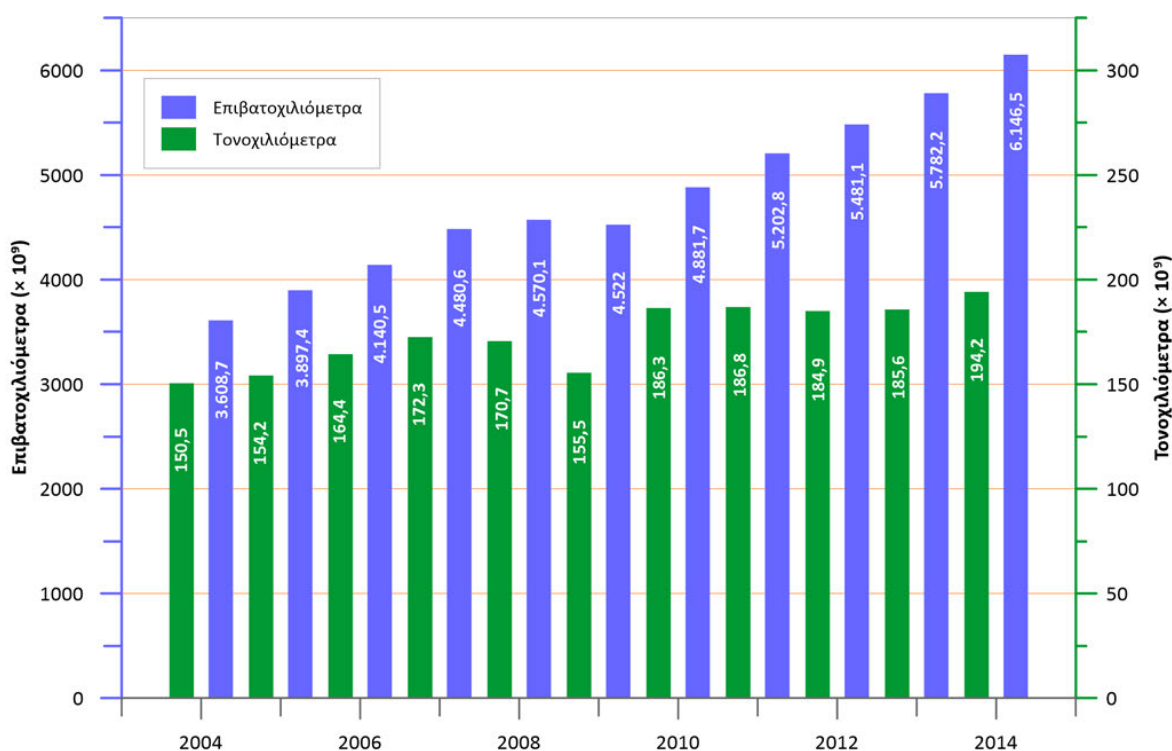
Τα στοιχεία αυτά, σε συνδυασμό με την έλλειψη μιας συνεκτικής και αναλυτικής μελέτης των ζητημάτων ατμοσφαιρικής ρύπανσης στα κύρια ελληνικά αεροδρόμια, καθιστούν εμφανή το σκοπό της παρούσας εργασίας, που δεν είναι άλλος από την κάλυψη της έλλειψης αυτής.

11.6.1.Ο τομέας αερομεταφορών στο διεθνές και στο ευρωπαϊκό επίπεδο

Μια συνοπτική αλλά αντιπροσωπευτική εικόνα των αερομεταφορών, αφενός στο διεθνές επίπεδο και αφετέρου στο επίπεδο της Ευρωπαϊκής Ένωσης των 28 κρατών-μελών, διαμορφώνεται με την αναδρομή στα ακόλουθα μεγέθη:^[151,152]

- Ο τομέας των αερομεταφορών υποστηρίζει 58,1 εκατομμύρια εργαζόμενους σε όλο τον κόσμο, εκ των οποίων τα 8,7 εκατομμύρια αφορούν σε άμεσες θέσεις εργασίας, περίπου 10 εκατομμύρια θέσεων συνδέονται εμμέσως με τις αερομεταφορές, ενώ οι υπόλοιπες 39,5 εκατομμύρια θέσεις εντοπίζονται σε τομείς όπου η επίδραση των αερομεταφορών είναι καταλυτική, όπως ο τουρισμός και το παγκόσμιο εμπόριο. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, οι συνολικές θέσεις εργασίας στον τομέα των αερομεταφορών υπολογίζονται στα 9,3 εκατομμύρια, εκ των οποίων τα 2 εκατομμύρια αφορούν σε άμεσες θέσεις εργασίας, άλλα 2,4 εκατομμύρια συνδέονται εμμέσως με τις αερομεταφορές, ενώ οι υπόλοιπες 4,9 εκατομμύρια θέσεις εντοπίζονται σε τομείς στενά συνδεδεμένους με την πολιτική αεροπορία.
- Η επίδραση της αεροπορίας στην παγκόσμια οικονομία εκτιμάται ετησίως στα \$ 2,4 τρισεκατομμύρια, ή 3,4% του παγκόσμιου ακαθάριστου εγχώριου προϊόντος. Εξ αυτών, περισσότερα από 600 δισ. συνδέονται ευθέως με την αεροπορία, άλλα 700 δισ. αφορούν στις εμμέσως σχετιζόμενες δραστηριότητες και τα υπόλοιπα 1,1 τρισ. εντοπίζονται στους τομείς όπου η επίδραση των αερομεταφορών είναι καταλυτική. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, ο τομέας των αερομεταφορών συμβάλλει ετησίως στο ακαθάριστο εγχώριο προϊόν κατά \$ 658 δισεκατομμύρια (~ € 512 δισ.), εκ των οποίων τα \$ 228 δισ. (~ € 177 δισ.) αφορούν σε άμεση συμμετοχή, ενώ τα \$ 430 (€ 335) αφορούν σε εμμέσως σχετιζόμενες δραστηριότητες και σε τομείς στενά συνδεδεμένους με τις αερομεταφορές.
- Ο αριθμός επιβατών παγκοσμίως είναι περίπου 3 δισεκατομμύρια ετησίως (2,97 το 2014, 3,1 το 2013), εκ των οποίων το 61% κατευθύνθηκαν σε εγχώριους και το 39% σε διεθνείς προορισμούς. Το 31,8% του ετήσιου αριθμού επιβατών κινήθηκε προς και από χώρες της Ασίας και του Ειρηνικού Ωκεανού, το 27,1% από και προς τη Βόρεια Αμερική, το 26,2% διακινήθηκε σε αεροδρόμια της Ευρώπης (περιλαμβανόμενης της Ρωσίας και των χωρών εκτός ΕΕ) και το υπόλοιπο προς Μέση Ανατολή, Καραϊβική και Αφρική. Το 18% του παγκόσμιου αριθμού επιβατών, περίπου 534 εκατομμύρια διακινείται στα αεροδρόμια των 28 κρατών-μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

- Τα επιβατοχιλιόμετρα που διανύονται ετησίως υπερβαίνουν σημαντικά τα 5 τρισεκατομμύρια (6,1 το 2014 και 5,8 το 2013), όπως φαίνεται στο Γράφημα 165. Οι εμπορικές πτήσεις σε όλο τον κόσμο ήταν 37,4 εκατομμύρια.
- Ο αριθμός των αεροπορικών εταιριών που λειτουργούν παγκοσμίως ανέρχεται στις 1.397, εκ των οποίων οι 227 έχουν έδρα σε κράτος-μέλος της ΕΕ-28.
- Τα αεροδρόμια που εξυπηρετούν πλήρως τις δραστηριότητες διακίνησης επιβατών και εμπορευμάτων προγραμματισμένων πτήσεων πολιτικής αεροπορίας («εμπορικοί αερολιμένες») είναι 3.864 σε όλο τον κόσμο, ενώ εάν συνυπολογιστούν τα μικρά αεροδρόμια γενικής αεροπορίας, τα απλά πεδία προσγείωσης/απογείωσης και οι στρατιωτικές αεροπορικές βάσεις, ο συνολικός αριθμός ανέρχεται στα 41.821 σημεία εξυπηρέτησης αεροπορικών δραστηριοτήτων.
- Ο αριθμός αεροσκαφών πολιτικής αεροπορίας παγκοσμίως ανέρχεται στα 25.332, η μεγάλη πλειονότητα των οποίων (79%) είναι αεριωθούμενα, ενώ τα υπόλοιπα είναι ελικοφόρα.



Γράφημα 165: Παγκόσμια αεροπορική κυκλοφορία επιβατών και εμπορευμάτων.

Στο τρίπτυχο οικονομική ανάπτυξη – περιβαλλοντική προστασία – κοινωνική συνοχή του διακηρυγμένου στόχου της αιεφόρου ανάπτυξης,^[1] οι εναέριες μεταφορές διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο, κυρίως για τους εξής λόγους:

- Πέρα από τα οικονομικά μεγέθη που αναφέρθηκαν παραπάνω, οι αερομεταφορές αποτελούν το βασικό παγκόσμιο δίκτυο διακίνησης επιβατών, υποστηρίζοντας με

θεμελιώδη τρόπο τον τουρισμό, αλλά και μια μεγάλη σειρά επιχειρηματικών μορφών διεθνούς εμβέλειας, μέσω των οποίων συχνά τονώνονται οι ρυθμοί εξέλιξης αναπτυσσόμενων ή υπανάπτυκτων οικονομιών. Πιο συγκεκριμένα, το 52% των ανθρώπων που ταξιδεύουν προς διεθνείς τουριστικούς προορισμούς, κινούνται αεροπορικώς, ενώ το 35% περίπου του ετήσιου όγκου προϊόντων του διεθνούς εμπορίου μεταφέρονται επίσης αεροπορικώς.

- Η διαθεσιμότητα ενός τόσο αποτελεσματικού τρόπου μεταφοράς προσώπων και αγαθών ανάμεσα σε χώρες ή πόλεις που βρίσκονται σε διαφορετικά σημεία του πλανήτη, συμβάλλει έμμεσα αλλά πολύ ουσιαστικά στην παγκοσμιοποίηση της επιχειρηματικότητας και στη διάδοση αναπτυξιακών τάσεων σε απομακρυσμένες περιοχές, με άμεσα οφέλη για τις τοπικές κοινωνίες και τη συνοχή τους.
- Στο εσωτερικό κρατών με γεωγραφικές ιδιαιτερότητες, όπως η Αυστραλία με τις μεγάλες ερήμους της ενδοχώρας, οι ΗΠΑ με την πολύ μεγάλη έκταση και τις πολυάριθμες μεγάλες πόλεις, αλλά και η Ελλάδα με το νησιωτικό χαρακτήρα μεγάλου μέρους της επικράτειάς της, οι αερομεταφορές αποτελούν σημαντική προϋπόθεση κοινωνικής και αναπτυξιακής συνοχής.

11.6.2. Ο τομέας αερομεταφορών στην Ελλάδα

Οι αερομεταφορές άρχισαν να συγκροτούνται στην Ελλάδα την εποχή του Ελευθέριου Βενιζέλου και απέκτησαν γρήγορα υψηλή αναπτυξιακή δυναμική αλλά και γεωστρατηγική σημασία, δεδομένου ότι τα αεροσκάφη εκείνης της εποχής χρειαζόταν ενδιάμεσες σταθμεύσεις και η θέση της χώρας μας ήταν κομβική.^[153]

Τα αεροδρόμια της Ελλάδας αναπτύχθηκαν κυρίως στη μεταπολεμική περίοδο, αποκλειστικά με πρωτοβουλία και δαπάνες του κράτους. Η θέση των πρώτων 12 αεροδρομίων βρίσκεται κοντά στα μεγάλα αστικά κέντρα της χώρας και στον ίδιο συνήθως χώρο με τις εγκαταστάσεις της πολεμικής αεροπορίας.^[154] Στην αρχή της δεκαετίας του '90 η Ελλάδα βρίσκεται να έχει 40 πολιτικά αεροδρόμια ή πολεμικά που στεγάζουν και λειτουργίες πολιτικών. Ο αριθμός των αεροδρομίων, σε σχέση με τον πληθυσμό, την έκταση και τα οικονομικά μεγέθη της χώρας και συγκριτικά με τα αεροδρόμια των άλλων ευρωπαϊκών χωρών δείχνει εν πρώτοις μεγάλος, αλλά οφείλεται στη μεγάλη και πολυδιασπασμένη νησιωτική περιοχή της Ελλάδας.^[154]

Ένας από τους πλέον αξιοσημείωτους ρόλους των ελληνικών αεροδρομίων σχετίζεται με την κρισιμότητά τους για τον τουρισμό. Σε αδρές γραμμές, περίπου το 80% των επισκεπτών της Ελλάδας από το εξωτερικό φτάνουν στη χώρα αεροπορικώς· επομένως η επαρκής

δυναμικότητα και η αποτελεσματική λειτουργία των αεροδρομίων καταρχήν και η ελκυστικότητά τους μαζί με τον εμπλουτισμό των δραστηριοτήτων εντός αυτών κατά δεύτερο λόγο αποτελούν παράγοντες που επηρεάζουν καθοριστικά το οικονομικό αποτύπωμα του τουρισμού στο ΑΕΠ της χώρας. Ταυτόχρονα, η διακύμανση των τουριστικών ροών λόγω γενικότερων επιδράσεων, όπως η προσπάθεια της Ελλάδας να καταστεί ελκυστικότερη ή/και οι ασταθείς καταστάσεις που κατά καιρούς εμφανίζονται σε ανταγωνιστικούς προορισμούς, επιδρά στη φόρτιση των ελληνικών αεροδρομίων, μεταβάλλοντας τόσο τις οικονομικές όσο και τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις.

Από το 2013 και εξής, έχει ξεκινήσει μια συντονισμένη προσπάθεια αποκρατικοποίησης 14 αεροδρομίων, προκειμένου αφενός να εξασφαλισθούν έσοδα για το ελληνικό κράτος αφετέρου να τονωθεί η δραστηριότητά τους μέσω των παρεμβάσεων που θα αναλάβει ο ιδιωτικός επενδυτικός φορέας στον οποίο θα ανατεθεί η λειτουργία και ανάπτυξή τους.

Τα εν λειτουργία αεροδρόμια της Ελλάδας σήμερα παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 19: Τα αεροδρόμια της Ελλάδας

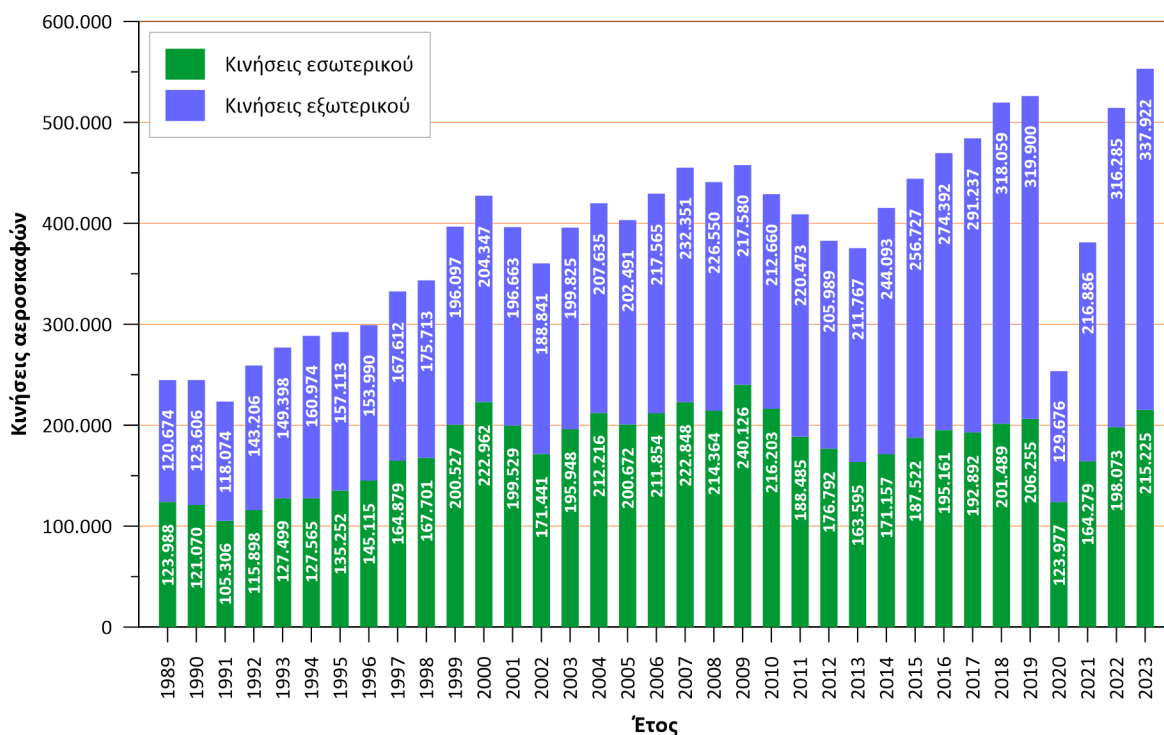
α/α	Περιοχή / Τοποθεσία	Περιφέρεια	Κωδικός		
			IATA	ICAO	ΥΠΑ
1	Αθήνα / Σπάτα	Αττική	ATH	LGAV	ΔΑΑ
2	Αλεξανδρούπολη	Αν. Μακεδονία - Θράκη	AXD	LGAL	ΚΑΑΛΔ
3	Ζάκυνθος	Ιόνιοι Νήσοι	ZTH	LGZA	ΚΑΖΑΣ
4	Ηράκλειο	Κρήτη	HER	LGIR	ΚΑΗΚ
5	Θεσσαλονίκη / Θέρμη	Κεντρική Μακεδονία	SKG	LGTS	ΚΑΘΜ
6	Καβάλα / Χρυσούπολη	Αν. Μακεδονία - Θράκη	KVA	LGKV	ΚΑΚΒΑ
7	Καλαμάτα / Μεσσήνη	Πελοπόννησος	KLX	LGKL	ΚΑΚΛ
8	Κέρκυρα	Ιόνιοι Νήσοι	CFU	LGKR	ΚΑΚΚ
9	Κεφαλονιά	Ιόνιοι Νήσοι	EFL	LGKF	ΚΑΚΦ
10	Κως	Νότιο Αιγαίο	KGS	LGKO	ΚΑΚΩΙ
11	Λήμνος	Βόρειο Αιγαίο	LXS	LGLM	ΚΑΛΜΗ
12	Μυτιλήνη	Βόρειο Αιγαίο	MJT	LGMT	ΚΑΜΤΕ
13	Ρόδος / Παραδείσι	Νότιο Αιγαίο	RHO	LGRP	ΚΑΡΔ
14	Σάμος / Πυθαγόρειο	Βόρειο Αιγαίο	SMI	LGSM	ΚΑΣΜ
15	Χανιά / Σούδα	Κρήτη	CHQ	LGSA	ΚΑΧΝΔ
16	Αστυπάλαια	Νότιο Αιγαίο	JTY	LGPL	ΚΑΠΛ
17	Βόλος / Νέα Αγχίαλος	Θεσσαλία	VOL	LGBL	ΚΑΝΑ
18	Ικαρία	Βόρειο Αιγαίο	JIK	LGIK	ΚΑΙΡ
19	Ιωάννινα	Ήπειρος	IOA	LGIO	ΚΑΙΩΠ
20	Κάλυμνος	Νότιο Αιγαίο	JKL	LGKY	ΚΑΚΜ
21	Κάρπαθος	Νότιο Αιγαίο	AOK	LGKP	ΚΑΚΠ
22	Καστοριά	Δυτική Μακεδονία	KSO	LGKA	ΚΑΚΤΑ

23	Κοζάνη	Δυτική Μακεδονία	KZI	LGKZ	ΚΑΚΖΦ
24	Κύθηρα	Αττική	KIT	LGKC	ΚΑΚΘΩ
25	Μέγαρα	Αττική	---	LGMG	ΜΕΓΑΠ
26	Μήλος	Νότιο Αιγαίο	MLO	LGML	ΚΑΜΛ
27	Μύκονος	Νότιο Αιγαίο	JMK	LGMK	ΚΑΜΚ
28	Νάξος	Νότιο Αιγαίο	JNX	LGNX	ΚΑΝΞ
29	Πάρος	Νότιο Αιγαίο	PAS	LGPA	ΚΑΠΑ
30	Πάτρα / Άραξος	Δυτική Ελλάδα	GPA	LGRX	ΚΑΑΞ
31	Πρέβεζα / Άκτιο	Ήπειρος / Δυτική Ελλάδα	PVK	LGPZ	ΚΑΑΚ
32	Σαντορίνη / Καμάρι	Νότιο Αιγαίο	JTR	LGSR	ΚΑΣΡ
33	Σκιάθος	Θεσσαλία	JSI	LGSK	ΚΑΣΚ
34	Σκύρος	Στερεά Ελλάδα	SKU	LGSY	ΚΑΣΥ
35	Σύρος	Νότιο Αιγαίο	JSY	LGSO	ΚΑΣΟΒ
36	Χίος	Βόρειο Αιγαίο	JKH	LGHI	ΚΑΧΙΟ
37	Κάσος	Νότιο Αιγαίο	KSJ	LGKS	ΔΑΚΑ
38	Καστελόριζο / Μεγίστη	Νότιο Αιγαίο	KZS	LGKJ	ΔΑΖΟ
39	Λέρος	Νότιο Αιγαίο	LRS	LGLE	ΔΑΛΕ
40	Σητεία	Κρήτη	JSH	LGST	ΔΑΣΤ

Η συνολική αεροπορική κυκλοφορία στα αεροδρόμια της Ελλάδας από το 1989 έως και το 2023^[21] αναπαρίσταται στο επόμενο γράφημα. Ο συνολικός αριθμός αεροπορικών κινήσεων παρουσίασε μια γενική αυξητική τάση έως το 2009, παρά τις όποιες διακυμάνσεις που προκλήθηκαν από γεγονότα παγκόσμιας εμβέλειας όπως αυτά της 11^{ης} Σεπτεμβρίου 2001 ή από τη διεθνή οικονομική κρίση του 2007-2008.

Το 2009 καταγράφηκαν συνολικά στη χώρα αλλά και στο καθένα από τα υπό μελέτη αεροδρόμια, οι υψηλότερες τιμές ετήσιων κινήσεων αεροσκαφών.

Το 2010 παρουσιάστηκε μια σαφής πτωτική τάση, η οποία συνεχίσθηκε και τα επόμενα τρία έτη, με σαφή σημεία επιβράδυνσης το 2013, ενώ διαφαίνεται αντιστροφή της τα έτη 2014 και 2015. Η αυξητική τάση συνεχίζεται ως και το 2019, όπου η πανδημία του COVID-19 περιορίζει δραματικά τις αεροπορικές μετακινήσεις. Το 2020 και 2021 ο αριθμός πτήσεων είναι ιδιαίτερα μικρός ενώ το 2023 εκτοξεύεται το 2022 και 2023 στα προ πανδημίας επίπεδα.



Γράφημα 166: Εξέλιξη του συνολικού ετήσιου αριθμού κινήσεων αεροσκαφών στην Ελλάδα.

Στο άμεσο μέλλον, η αεροπορική κυκλοφορία στην Ελλάδα αναμένεται να επηρεαστεί από ένα σημαντικό πλήθος παραγόντων, που είτε υφίστανται και θα μεταβληθούν είτε θα αποτελούν πρωτοεμφανιζόμενες εξελίξεις. Σε αυτές τις τελευταίες, σημαντική θέση κατέχει η ιδιωτικοποίηση δεκαεσσάρων ελληνικών αερολιμένων, η οποία έχει τονώσει την ελκυστικότητα τους και συνεπώς επιδρά αυξητικά στην συνολική αεροπορική κυκλοφορία. Μεταξύ των παραγόντων που ήδη επιδρούν αλλά αναμένεται να μεταβληθούν, σημαντική θέση κατέχει η προοπτική περαιτέρω ανάκαμψης της ελληνικής οικονομικής δραστηριότητας, η περαιτέρω αύξηση του τουρισμού, αλλά και εξελίξεις στο ευρωπαϊκό και διεθνές περιβάλλον των αερομεταφορών, όπως η αυξανόμενη ζήτηση μετακινήσεων προς ανατολικούς προορισμούς, η ελκυστικότητα ανταγωνιστικών αερολιμένων όπως της Κωνσταντινούπολης κ.ά.

12. Παράρτημα Β: Στοιχεία τεκμηρίωσης κεφαλαίου 2.

Οι αερομεταφορές εκπέμπουν σημαντικές ποσότητες αέριων ρύπων στην ατμόσφαιρα, τόσο τοπικά, στις περιοχές των αεροδρομίων, επηρεάζοντας σημαντικά την ποιότητα του αέρα, όσο και υπερτοπικά, στη διάρκεια των πτήσεων, επηρεάζοντας ελαφρώς τη σύσταση της ατμόσφαιρας και τους παράγοντες που σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή.

Οι εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων και αερίων του θερμοκηπίου στο υπερτοπικό επίπεδο αποτελούν ένα ενεργό πεδίο επιστημονικής έρευνας και εφαρμογής πολιτικών για το κλίμα,^[155,156] αλλά το ενδιαφέρον της παρούσας εργασίας εστιάζεται περισσότερο στην τοπική εμβέλεια της λειτουργίας των αεροδρομίων και συγκεκριμένα στην επίδρασή τους στην ποιότητα του αέρα της περιοχής τους.

Λόγω των αρνητικών συνεπειών στην υγεία που είναι γνωστό ότι προκαλεί η ρύπανση της ατμόσφαιρας, αλλά και λόγω των επιπτώσεων στα μνημεία και στο πράσινο, η ποιότητα του αέρα σε κατοικημένες περιοχές αποτελεί σταθερά ένα πεδίο που έλκει έντονο επιστημονικό αλλά και κανονιστικό ενδιαφέρον. Στο πλαίσιο αυτό, ειδικό ενδιαφέρον έχουν προκαλέσει τις τελευταίες δεκαετίες οι εκπομπές που προκαλούνται από τη λειτουργία των αεροδρομίων.^[35,56,157-159] Το ενδιαφέρον αυτό βαίνει εντεινόμενο, λόγω της αυξητικής τάσης που παρουσιάζει ο τομέας των αερομεταφορών παγκοσμίως, η οποία μεταφράζεται σε εντατικότερη λειτουργία των αεροδρομίων αλλά και σε ανάγκη επέκτασης αρκετών από αυτά.

12.1. Κατηγορίες πηγών εκπομπής αέριων ρύπων

Η σημαντικότερη πηγή εκπομπών αέριων ρύπων κατά τη λειτουργία των αεροδρομίων είναι οι κινητήρες των αεροσκαφών που θα παρουσιαστούν αναλυτικά στην ενότητα 12.2. Για τη συγκράτηση των εκπομπών αυτών, ο Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας (ICAO), ήδη από τη δεκαετία του '70 θέσπισε συγκεκριμένες απαιτήσεις για τους νέους κινητήρες,

εισάγοντας συγκεκριμένες σχετικές προβλέψεις στο Παράρτημα 16 για την Προστασία του Περιβάλλοντος της Διεθνούς Σύμβασης Πολιτικής Αεροπορίας («Σύμβαση του Σικάγο»).[160] Οι απαιτήσεις αυτές, που αφορούν κυρίως σε πρωτόκολλα μέτρησης του CO, των NO_x, των άκαυστων υδρογονανθράκων και του καπνού, κατέστησαν συγκρίσιμες τις επιδόσεις των κινητήρων και οδήγησαν τα επόμενα χρόνια σε σημαντικές βελτιώσεις της απόδοσής τους, με συνακόλουθες μειώσεις των εκπομπών. Παρά τις μειώσεις αυτές όμως, το πρόβλημα της ποιότητας του αέρα γύρω από τα αεροδρόμια παραμένει ενεργό, καθώς η αύξηση των εκπομπών λόγω της αυξητικής τάσης του τομέα των αερομεταφορών που προαναφέρθηκε ενδέχεται να υπερκαλύψει τη βελτίωση λόγω των εξελίξεων στα αεροσκάφη.

Πέρα από τους κινητήρες των αεροσκαφών, οι οποίοι ευθύνονται για το μακράν μεγαλύτερο μέρος των εκπομπών αέριων ρύπων, η λειτουργία ενός αερολιμένα συμπεριλαμβάνει και άλλες πηγές ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Σημαντικές εκπομπές, αν και πολύ χαμηλότερες σε σχέση με τις κινήσεις των αεροσκαφών, οφείλονται στον εξοπλισμό επίγειας εξυπηρέτησης, ο οποίος σε αδρές γραμμές μπορεί να διακριθεί σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη από αυτές περιλαμβάνει τις μονάδες παροχής ηλεκτρικής ισχύος στα σταθμευμένα αεροσκάφη, οι οποίες διακρίνονται σε αυτές που βρίσκονται εντός του αεροσκάφους και τίθενται σε λειτουργία επί του εδάφους (Auxiliary Power Units, APUs) και στις αυτόνομες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής με γεννήτρια και κινητήρα εσωτερικής καύσης (Ground Power Units, GPUs). Η δεύτερη κατηγορία αφορά στον εξοπλισμό επίγειας υποστήριξης (Ground Support Equipment, GSE), που αποτελείται κυρίως από πετρελαιοκίνητα οχήματα έλξης αεροσκαφών, μεταφοράς επιβατών ή αποσκευών, διακίνησης καυσίμων ή τροφίμων κ.ά. Πρόσθετες εκπομπές αέριων ρύπων ενδέχεται να οφείλονται σε άλλες επίγειες δραστηριότητες, όπως η διαρροή ατμών υδρογονανθράκων κατά τον ανεφοδιασμό αεροσκαφών και οχημάτων, οι μονάδες θέρμανσης κ.ά. Τέλος, μια σημαντική πηγή αιωρούμενων σωματιδίων είναι τα υπολείμματα ελαστικών, φρένων και ασφάλτου που αφήνει η διαδικασία προσγείωσης, τα οποία τίθενται σε αιώρηση από τις τυρβώδεις περιδινήσεις του αέρα που δημιουργούν οι απογειώσεις των επόμενων αεροσκαφών.

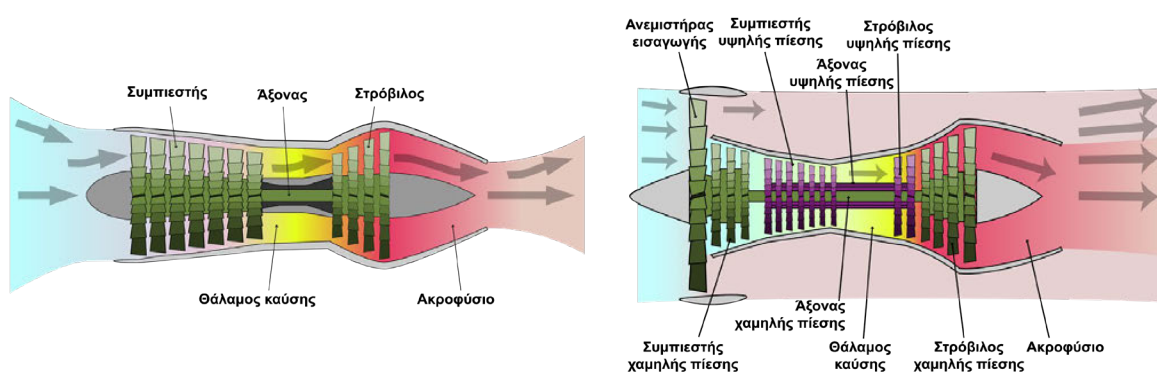
12.2. Οι εκπομπές από τους κινητήρες των αεροσκαφών

Τα σύγχρονα αεριωθούμενα αεροσκάφη της πολιτικής αεροπορίας χρησιμοποιούν στην πλειονότητά τους στροβιλοκινητήρες αεριώθησης διπλής ροής, οι οποίοι τροφοδοτούνται με αεροπορική κηροζίνη (jet fuel), ενώ στα μικρότερα ελικοφόρα αεροσκάφη συναντώνται

και εμβολοφόροι κινητήρες εσωτερικής καύσης που τροφοδοτούνται με αεροπορική βενζίνη (avgas).

Η αρχή λειτουργίας των κινητήρων αερίωσης στηρίζεται στη συμπίεση του εισερχόμενου αέρα, στον οποίο προστίθεται καύσιμο και στην ανάφλεξη αυτού του μίγματος. Τα υπέρθερμα καυσαέρια εκτονώνονται κατά ένα μέρος στο στρόβιλο, ο οποίος κινεί το συμπιεστή και άλλους μηχανισμούς, ενώ το μεγαλύτερο μέρος τους εκτονώνεται στην έξοδο οπότε, σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ορμής, ασκείται στον κινητήρα προωθητική δύναμη.

Οι στροβιλοκινητήρες αερίωσης διπλής ροής (turbofan) αποτελούν εξέλιξη των παλαιότερων απλών στροβιλοκινητήρων αερίωσης (turbojet) και επιτυγχάνουν σημαντικά υψηλότερες επιδόσεις με την ίδια ή μικρότερη κατανάλωση καυσίμου.



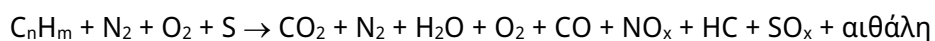
Σχήμα 26: Στροβιλοκινητήρας απλής αερίωσης (turbojet) στα αριστερά και διπλής ροής (turbofan) στα δεξιά.

Ειδικά στους κινητήρες turbofan υψηλού λόγου παράκαμψης, μικρό μέρος μόνο του εισερχόμενου αέρα περνά μέσα στη διπλή βαθμίδα συμπίεσης, δηλαδή πρώτα στον συμπιεστή χαμηλής πίεσης και κατόπιν σε αυτόν της υψηλής πίεσης (βλ. σχήμα 26) και στη συνέχεια υφίσταται τη διαδικασία ανάμιξης, καύσης κ.λπ. Το μεγαλύτερο μέρος, αφού υποστεί μικρή συμπίεση και επιταχυνθεί από τη μία ή τις δύο σειρές πτερυγίων του ανεμιστήρα εισαγωγής που ονομάζεται fan, εκτονώνεται προς τα πίσω από την εξαγωγή του ρεύματος παράκαμψης, χωρίς να περάσει από τον συμπιεστή, τους θαλάμους καύσης, το στρόβιλο κ.λπ., σε μια διαδικασία ανάλογη με αυτήν της έλικας, αλλά μέσα από έναν δακτύλιο ή κέλυφος, το ονομαζόμενο fan case.

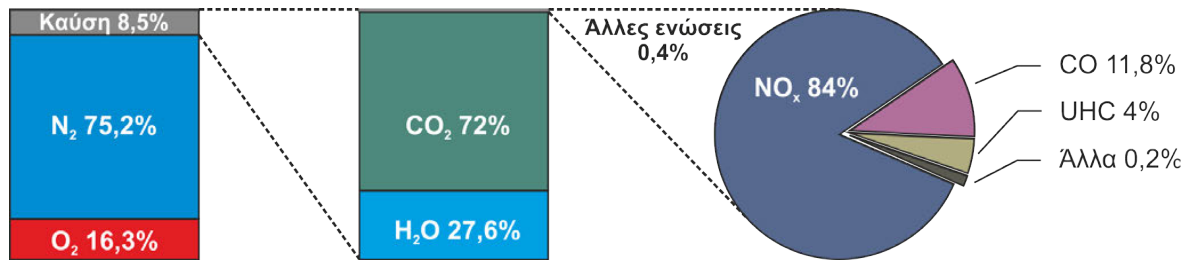
Με τη διαδικασία αυτή παράγεται ώση χωρίς καύση, εξοικονομώντας καύσιμα, δεδομένου ότι η περιστροφή του fan αποδίδει σημαντικά μεγαλύτερη ώση σε σχέση με την απορροφούμενη ενέργεια. Έτσι ο κινητήρας παράγει ταυτόχρονα ώση και από τον κυρίως κινητήρα (core engine) και από το fan. Στους κινητήρες υψηλού λόγου παράκαμψης, η ώση που παράγεται από τη βαθμίδα του fan μπορεί να πλησιάζει το 75-80% της συνολικά αποδιδόμενης ώσης του κινητήρα και μόνο το υπόλοιπο 20-25% να παράγεται από την core engine. Επιπλέον, το fan αποδίδει το μέγιστο της ώσης σε χαμηλές ταχύτητες, όπως στη φάση της απογείωσης, καθιστώντας τους κινητήρες αυτούς ιδιαίτερα κατάλληλους για εμπορικά αεροσκάφη. Αντιθέτως, οι κινητήρες turbojet ή turbofan χαμηλού λόγου παράκαμψης χρησιμοποιούνται στα μαχητικά αεροσκάφη υψηλών επιδόσεων και αποδίδουν το μέγιστο της ισχύος τους σε υψηλές ταχύτητες.

Το προϊόν της καύσης στην έξοδο των κινητήρων αεροσκαφών αποτελείται κυρίως από CO₂ και H₂O, με την αναλογία ανάμεσά τους να εξαρτάται από το λόγο άνθρακα προς υδρογόνο στο καύσιμο, ο οποίος ποικίλει αλλά μόνο μέσα σε ένα πολύ στενό εύρος διακυμάνσεων. Ο ρυθμός εκπομπής είναι ευθέως ανάλογος της κατανάλωσης καυσίμου, η οποία με τη σειρά της είναι ανάλογη με την ώση που ζητείται από τον κινητήρα.

Η οξειδωση του ατμοσφαιρικού αζώτου στις υψηλές θερμοκρασίες του θαλάμου καύσης οδηγεί σε σχηματισμό οξειδίων του αζώτου, ενώ η παρουσία ιχνών θείου και ορισμένων μετάλλων (π.χ. Fe, Cu και Zn) στο καύσιμο, σε συνδυασμό με μη-ιδανικές συνθήκες καύσης, μπορεί να οδηγήσει στο σχηματισμό παραπροϊόντων όπως τα οξειδία του θείου, οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες και τα σωματίδια αιθάλης. Περαιτέρω, το μίγμα αερίων στην έξοδο των κινητήρων μπορεί να περιέχει μόρια από ημιτελή καύση, υπολείμματα λιπαντικών και ίχνη μετάλλων από τη φθορά των εξαρτημάτων. Για το λόγο αυτό, μια πιο ρεαλιστική αλλά και πάλι απλοποιημένη αναπαράσταση της καύσης στους στροβιλοκινητήρες αερίωσης διπλής ροής είναι η εξής:^[161]

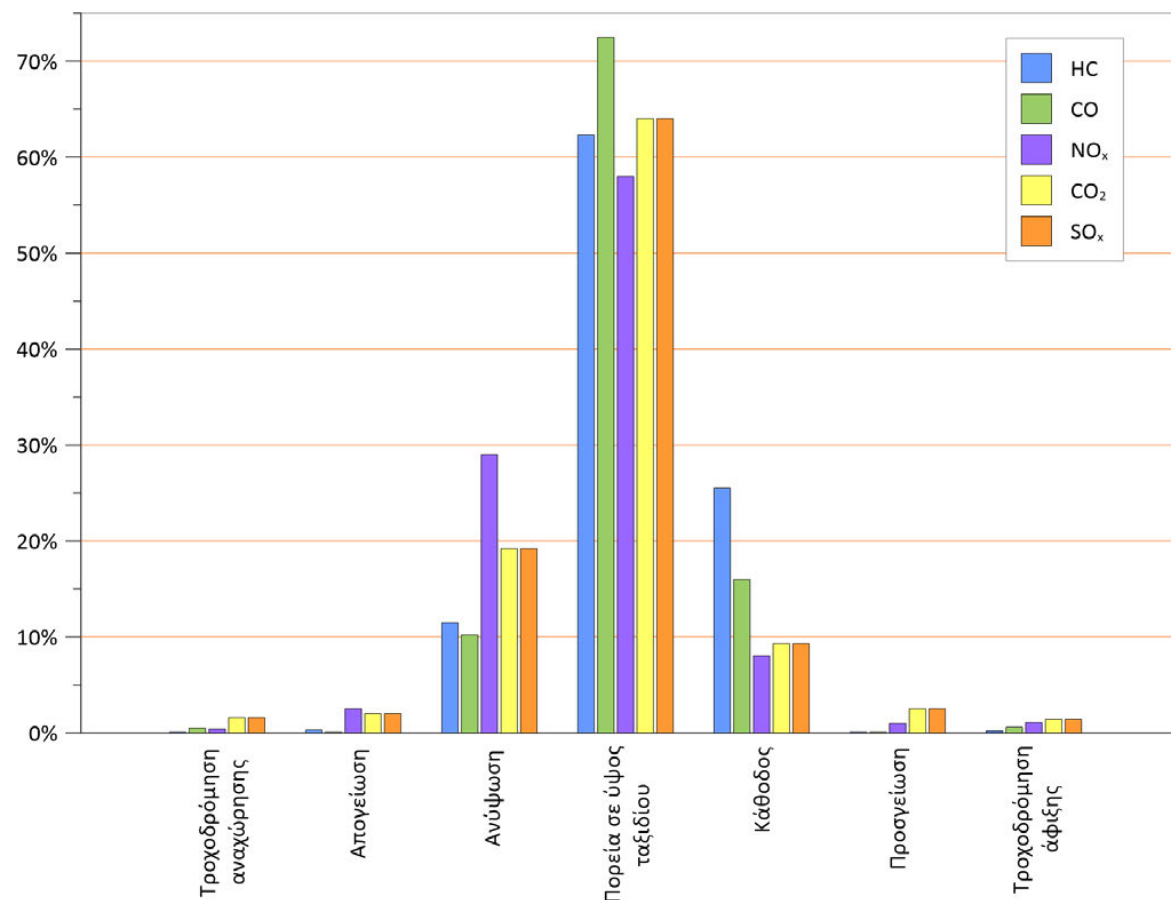


Σε ποσοστό 99,5-99,9% τα μόρια ενός τυπικού μίγματος στην έξοδο του κινητήρα είναι CO₂, N₂, H₂O και O₂, ενώ τα NO_x και SO_x, το CO και οι υπόλοιπες ουσίες αποτελούν λιγότερο από το 0,5% των απαερίων, όπως παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα.^[155,35,161-163]



Σχήμα 27: Γραφική αναπαράσταση της σύστασης των απαερίων στην έξοδο ενός τυπικού στροβιλοκινητήρα εμπορικού αεροσκάφους.

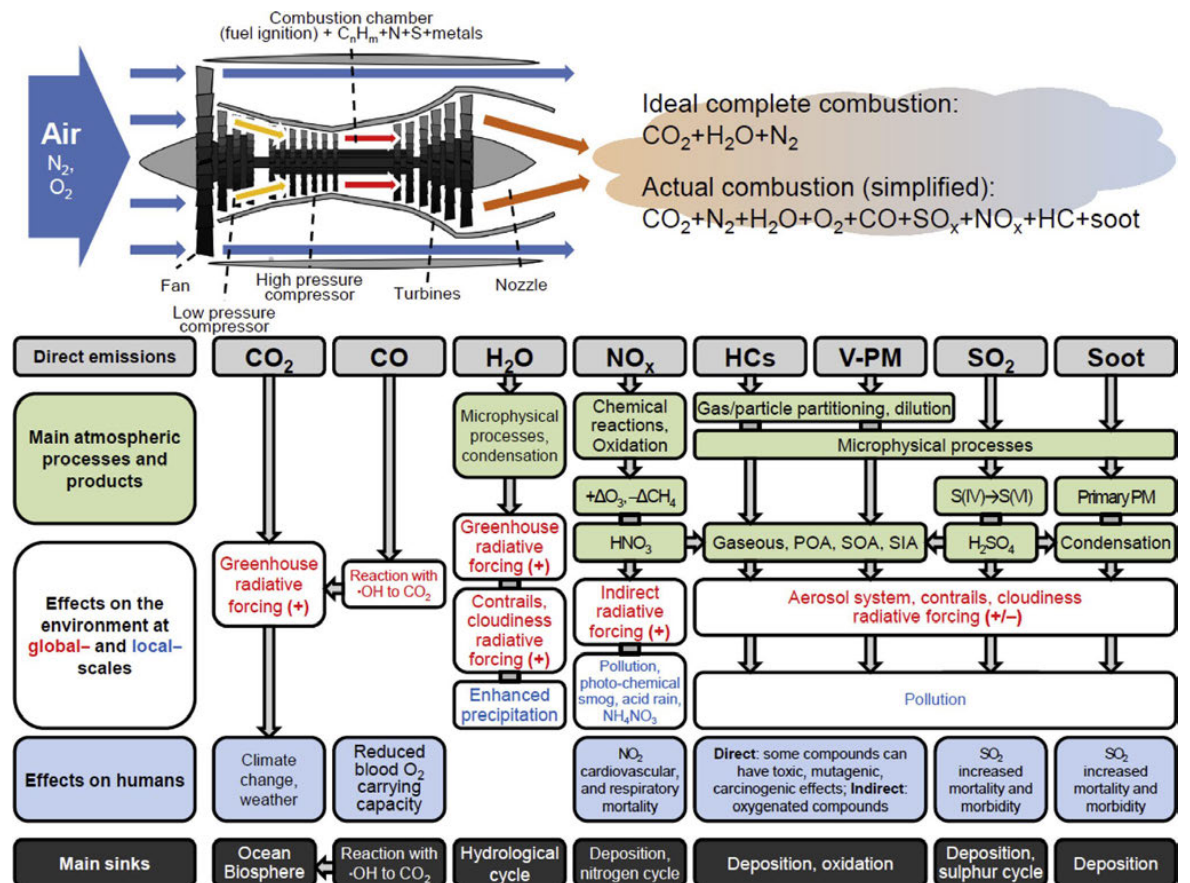
Έχει εκτιμηθεί ότι περίπου το 90% των εκπομπών από τα αεροσκάφη εκπέμπονται κατά την πορεία τους σε ύψος ταξιδιού και μόνο το υπόλοιπο εκπέμπεται κοντά στο έδαφος, κατά τη διάρκεια της απογείωσης και προσγείωσης ή και των επίγειων δραστηριοτήτων, ενώ για το CO και HC, το ποσοστό εκπομπής εν πτήση είναι περίπου 70% και το αντίστοιχο κοντά στο έδαφος είναι περίπου 30%.^[35,36] Τα ποσοστά αυτά είναι ενδεικτικά και παρουσιάζουν διακυμάνσεις ανάλογα με την απόσταση που διανύει η πτήση, η εποχή του έτους κ.ά. Για παράδειγμα, σε μια από τις σχετικές δημοσιεύσεις, η οποία άντλησε δεδομένα από 492 χιλιάδες πτήσεις στην Αυστραλία, δίνεται η κατανομή που παρουσιάζεται στο ακόλουθο γράφημα.^[33]



Γράφημα 167: Ποσοστιαία κατανομή εκπομπών στις φάσεις πτήσης.

Η εκπομπή άκαυστων υδρογονανθράκων είναι εντονότερη όταν ο κινητήρας λειτουργεί σε χαμηλή ισχύ και μειώνεται σημαντικά όταν η ισχύς αυξάνεται, ενώ το μίγμα τους αποτελείται κυρίως από ελαφρά μόρια (C2 - C6), περιλαμβάνοντας αλκάνια και αλκένια, καθώς και φορμαλδεΐδη, μεθανόλη, ακεταλδεΐδη, οξικό οξύ, βενζόλιο, τολουόλιο, φαινόλη, στυρένιο, ναφθαλίνη κ.ά.^[156]

Στο Σχήμα 28^[35,161] παρουσιάζεται μια λεπτομερέστερη ανάλυση των απαερίων και των επιδράσεών τους στο περιβάλλον.



Σχήμα 28: Απλοποιημένο διάγραμμα λειτουργίας τυπικού στροβιλοκινητήρα εμπορικού αεροσκάφους, ουσίες που εκπέμπονται στην έξοδο του και βασικές επιδράσεις των ουσιών αυτών.

Οι εκπομπές των αεροσκαφών έχουν μελετηθεί εκτενώς από τη δεκαετία του '60. Το αρχικό ενδιαφέρον στράφηκε στις άμεσες και έμμεσες επιδράσεις τους στις μετεωρολογικές συνθήκες και στο κλίμα, καθώς και στα ίχνη συμπύκνωσης. Για το λόγο αυτό, οι περισσότερες πρώιμες μελέτες επικεντρώνονταν στις εκπομπές μεγάλου ύψους.

Το ενδιαφέρον για τις εκπομπές κοντά στα αεροδρόμια είναι κάπως πιο πρόσφατο, αλλά έχει και αυτό περίπου τρεις δεκαετίες ερευνητικής ιστορίας. Ειδικά όμως τα τελευταία δέκα χρόνια, η έμφαση που δίνεται στα ζητήματα των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που

προκαλούν τα μεγάλα έργα, έχει εντείνει σημαντικά τη μελέτη των εκπομπών αεροσκαφών κοντά στο έδαφος.

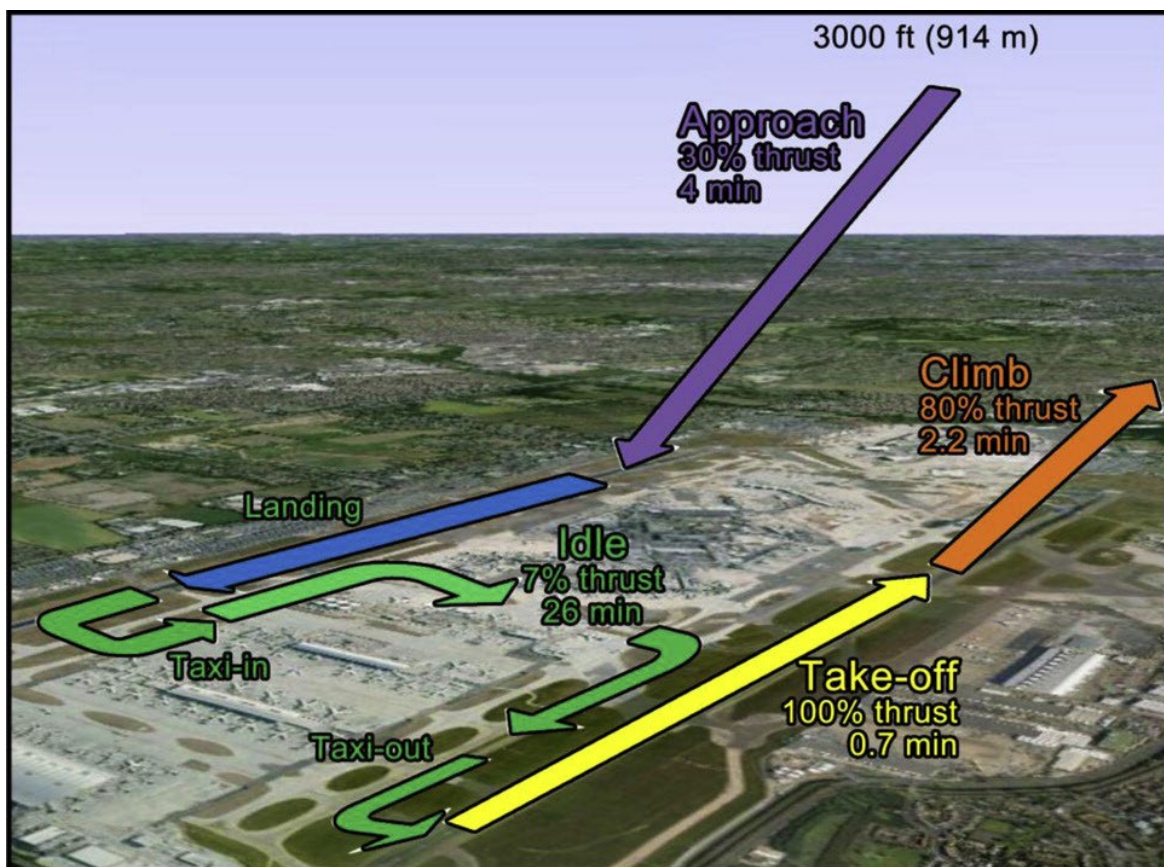
12.3. Κύκλος προσγείωσης – απογείωσης (LTO)

Οι εκπομπές από τους κινητήρες των αεροσκαφών τα οποία εξυπηρετούνται σε ένα αεροδρόμιο υπολογίζονται με βάση μια προτυποποιημένη διαδικασία προσέγγισης – προσγείωσης – τροχοδρομήσεων – απογείωσης – ανόδου, η οποία καλείται κύκλος LTO (Landing and Take Off cycle).

Ο κύκλος LTO αναφέρεται σε όλες τις δραστηριότητες ενός αεροσκάφους κάτω από τα 3.000 ft ή τα περίπου 915 m, ύψος το οποίο αντιστοιχεί σε αδρές γραμμές στο πάχος του στρώματος μίξης, δηλαδή του κατώτερο στρώματος της τροπόσφαιρας, εντός του οποίου οι ουσίες που εκπέμπονται από το επίπεδο του εδάφους αναμιγνύονται πολύ γρήγορα με τον αέρα. Για τον υπολογισμό των εκπομπών κατά τις δραστηριότητες αυτές, πραγματοποιούνται μετρήσεις στους κινητήρες των αεροσκαφών επί του εδάφους, με ισχύ και διάρκεια που προσομοιώνει τις δυσμενέστερες περιπτώσεις των πραγματικών συνθηκών.^[157] Συγκεκριμένα:

- Η πρώτη φάση του κύκλου LTO προσομοιώνει την κάθοδο του αεροσκάφους από το ύψος ταξιδιού προς το επίπεδο του αεροδρομίου, καθώς και την προσγείωσή του στο διάδρομο. Η φάση αυτή, που ονομάζεται προσέγγιση (approach), θεωρείται ότι διαρκεί 4 λεπτά με τους κινητήρες σε ισχύ 30% της μέγιστης.
- Η δεύτερη φάση προσομοιώνει τις δραστηριότητες του αεροσκάφους επί του εδάφους, οι οποίες περιλαμβάνουν την τροχοδρόμηση προς την πύλη (taxi-in), την παραμονή για φόρτωση και αποφόρτωση σε κατάσταση αναμονής και τέλος την τροχοδρόμηση από την πύλη προς τη θέση έναρξης απογείωσης (taxi-out). Η φάση αυτή, που καλείται αδρανής (“idle”), θεωρείται ότι διαρκεί 26 λεπτά με τους κινητήρες σε ισχύ 7% της μέγιστης.
- Η τρίτη φάση του κύκλου LTO προσομοιώνει την απογείωση (take-off), με τους κινητήρες στο 100% της μέγιστης ισχύος για 42 δευτερόλεπτα (0,7 λεπτά).
- Η τελευταία φάση προσομοιώνει την ανύψωση του αεροσκάφους μέχρι τα 3.000 ft (climb), με τους κινητήρες στο 85% της μέγιστης ισχύος για 132 δευτερόλεπτα (2,2 λεπτά).

Μια αναπαράσταση του κύκλου LTO παρουσιάζεται στο Σχήμα 29.^[35]



Σχήμα 29: Αναπαράσταση κύκλου LTO.

Οι δραστηριότητες του αεροσκάφους στην περιοχή του αεροδρομίου εμπίπτουν σχεδόν στο σύνολό τους στις φάσεις του κύκλου LTO, παρότι υπάρχουν σποραδικές ανάγκες περαιτέρω επίγειας λειτουργίας των κινητήρων (ground running procedures, GRP) π.χ. για λόγους δοκιμών. Ωστόσο, έχει διαπιστωθεί ότι οι εκπομπές αέριων ρύπων που σχετίζονται με τις GRP είναι λιγότερες του 3%.^[164]

Οι παράμετροι του κύκλου LTO έχουν επιλεγεί διασταλτικά, με τρόπο που να εξασφαλίζουν ότι σχεδόν το σύνολο των κινητήρων αεροσκαφών που κατασκευάστηκαν μετά το 1985 εμπίπτουν εντός των ορίων ισχύος και διάρκειας της κάθε φάσης· επομένως, ο υπολογισμός των εκπομπών αέριων ρύπων και θορύβου με βάση τον κύκλο LTO αντί των λεπτομερών χρόνων και εντάσεων ισχύος κάθε αεροπορικής κίνησης θα δίνει αποτελέσματα που θα υπερβαίνουν, έστω και ελαφρώς τα πραγματικά.

Οι κινητήρες των εμπορικών αεροσκαφών υπόκεινται σε λεπτομερείς ελέγχους και δοκιμές, τα αποτελέσματα των οποίων καταχωρούνται σε κεντρικές βάσεις δεδομένων, όπως π.χ. αυτή της EASA (European Aviation Safety Agency).^[165]

Με βάση τα στοιχεία αυτά, ο Πίνακας 20 παρουσιάζει την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές των κύριων ρύπων ανά κύκλο LTO από τους τύπους κινητήρων που χρησιμοποιούνται σε άνω του 75% του σημερινού στόλου εμπορικών αεροσκαφών.^[35]

Πίνακας 20: Κατανάλωση καυσίμου και εκπομπές ανά κύκλο LTO των ευρύτερα χρησιμοποιούμενων εμπορικών αεροσκαφών

Κατασκευαστής	Σειρά κινητήρων	Κύρια αεροσκάφη και (αριθμός κινητήρων) A: Airbus B: Boeing MD: McDonnell Douglas L: Lockheed Tu: Tupolev	Κατανάλωση καυσίμου και εκπομπές ανά κύκλο LTO (kg)			
			Κατανάλωση καυσίμου	CO	NO _x	HC
General Electric	CF6	A300 (2), A310 (2), A330 (2), B747 (4), B767 (2), MD DC-10 (3), MD-11 (3)	811 ± 76	11 ± 5	12 ± 2	2,3 ± 2,2
	GE90	B777 (2)	1159 ± 141	14 ± 7	25 ± 5	1,1 ± 0,8
	GEEx	B747 (4), B787 (2), αντικατάσταση σειράς CF6	827 ± 74	7 ± 1	10 ± 3	0,2 ± 0,1
CMF International	CFM56	A318 (2), A319 (2), A320 (2), A321 (2), A340 (4), B737 (2), MD DC-8 (4)	419 ± 46	6 ± 2	5 ± 1	0,6 ± 0,4
Pratt & Whitney	JT8D	B707 (4), B727 (3), B737 (2), MD DC-9 (2), MD80 (2)	477 ± 35	5 ± 2	4 ± 1	1 ± 0,9
	JT9D	A300 (2), A310 (2), B747 (4), B767 (2), MD DC-10 (3)	842 ± 45	19 ± 10	13 ± 1	7 ± 4,8
	PW 4000	A300 (2), A310 (2), B747 (4), B767 (2), B777 (2), MD DC-11 (3)	966 ± 150	8 ± 3	17 ± 6	1 ± 0,8
Rolls-Royce	RB211	B747 (4), B757 (2), B767 (2), L1011 (3), Tu-204 (2)	852 ± 128	15 ± 15	15 ± 5	7,1 ± 11,1
	Trent	A330 (2), A340 (4), A380 (4), B777 (2), B787 (2)	817 ± 370	5 ± 2	19 ± 4	0,2 ± 0,3
BMW Rolls-Royce	BR700	B717 (2)	332 ± 32	4 ± 1	4 ± 1	0,1 ± 0,1
International Aero Engines	V2500	A319 (2), A320 (2), A321 (2), MD-90 (2)	452 ± 35	3 ± 0,4	6 ± 1	0,04 ± 0,01

Aviadvigatel Solovev	D30	Tu-154 (3)	622 ± 110	21 ± 6	5 ± 1	5,5 ± 2,4
-------------------------	-----	------------	-----------	--------	-------	-----------

Η κατανομή των εκπομπών στις φάσεις του LTO σχετίζεται με την ισχύ και το χρόνο λειτουργίας των κινητήρων των αεροσκαφών. Η διαδικασία αναχώρησης ευθύνεται για σημαντικά μεγαλύτερες εκπομπές απ' ό τι η άφιξη, ενώ ανάμεσα στα δύο στάδια της αναχώρησης, δηλαδή την απογείωση και την άνοδο, η τελευταία ευθύνεται για το μεγαλύτερο μερίδιο των εκπομπών.^[164]

12.4. Επίγειες πηγές εκπομπής ρύπων στην ατμόσφαιρα

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, πέραν των εκπομπών αέριων ρύπων από τους κινητήρες των αεροσκαφών, στα περισσότερα αεροδρόμια συνυπάρχουν αρκετές ακόμη πηγές εκπομπής ρύπων στην ατμόσφαιρα, όπως οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τα οχήματα του εξοπλισμού επίγειας εξυπηρέτησης, τα υπολείμματα από τη φθορά των φρένων και ελαστικών κ.ά.

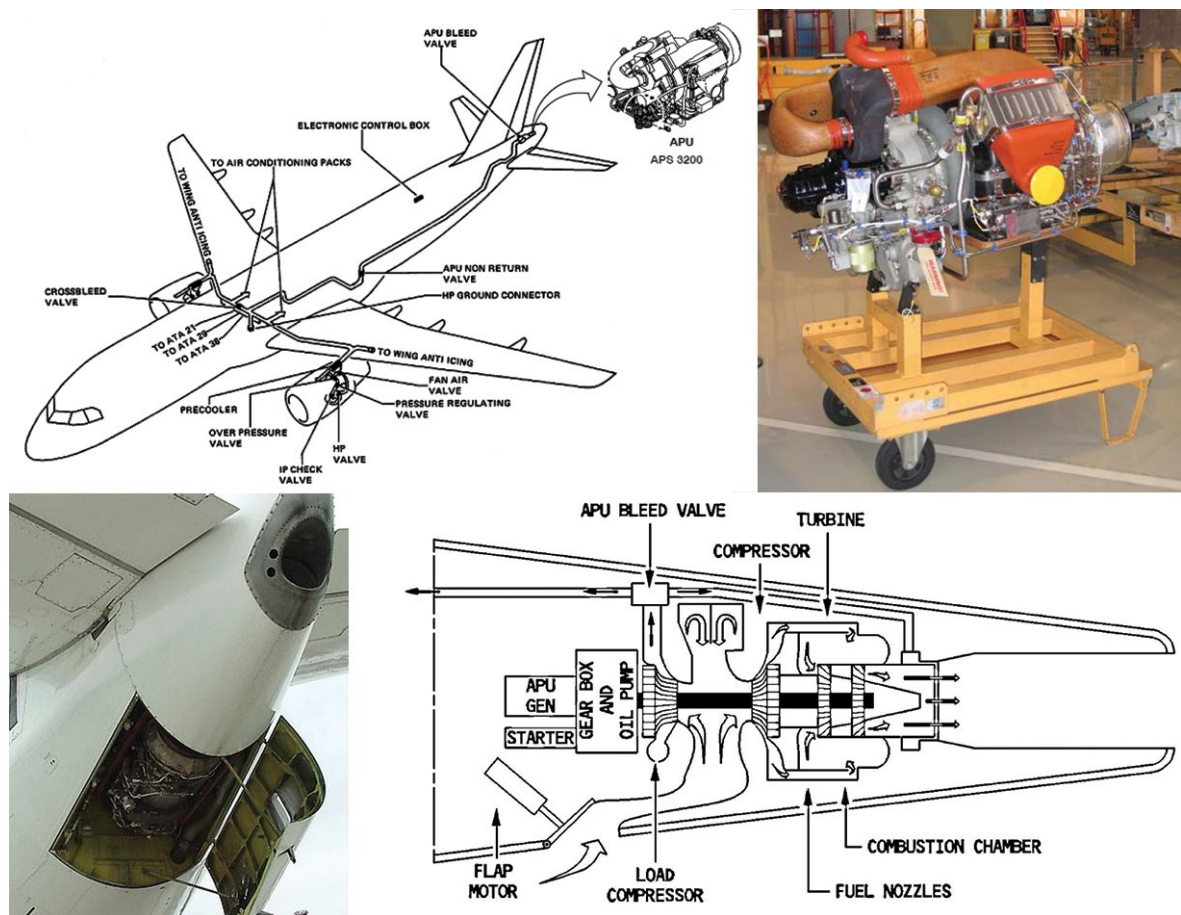
Τα κυριότερα χαρακτηριστικά αυτών των πηγών εκπομπής συνοψίζονται στις επόμενες ενότητες.

12.4.1. Μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος

Σε κάθε εμπορικό αεριωθούμενο αεροσκάφος υπάρχει η βοηθητική μονάδα ισχύος (Auxiliary Power Unit, APU), η οποία αποτελείται από μια μικρή στοβιλομηχανή συζευγμένη με μια ηλεκτρογεννήτρια. Το σύστημα αυτό είναι τοποθετημένο στο πίσω μέρος του αεροσκάφους και τίθεται σε λειτουργία για να παράσχει ηλεκτρική ενέργεια στα συστήματα του σκάφους όταν αυτό βρίσκεται στο έδαφος, καθώς και ηλεκτρική ή υδραυλική ενέργεια για την εκκίνηση των κύριων μηχανών. Η τυπική θέση και διάταξη μιας APU παρουσιάζεται στο Σχήμα 30.

Η επίδραση των APUs στην ποιότητα αέρα των αεροδρομίων συζητείται πλέον εκτενώς και ένας αυξανόμενος αριθμός μελετών προβαίνει σε εκτιμήσεις των εκπομπών τους, με αποκλίνουσες (ορισμένες φορές) διαπιστώσεις.^[35] Η αποτίμηση εκπομπών στο αεροδρόμιο της Ζυρίχης ανέφερε πως, παρότι τα απαέρια των κινητήρων των αεροσκαφών ευθύνονται για τα μεγαλύτερα ποσοστά του CO, των HC και των NO_x (89%, 45% και 82% αντιστοίχως των

συνολικών εκπομπών), ένα σημαντικό ποσοστό οφειλόταν στο σύνολο των επίγειων δραστηριοτήτων (δηλαδή στις μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τα οχήματα του airside κ.ά.) με τις APUs να ευθύνονται για το ήμισυ περίπου αυτού του ποσοστού.^[28] Στο αεροδρόμιο του Heathrow αναφέρεται ότι το 19% περίπου της συνολικής εκπομπής NO_x οφείλεται στη χρήση APUs,^[166] η μείωση της οποίας έχει ενταχθεί στη στρατηγική βελτίωσης της ποιότητας του αέρα που έχει υιοθετήσει η εταιρεία διαχείρισης του αερολιμένα. Πρόσφατη έρευνα σε 325 αεροδρόμια των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής^[50] κατέληξε στο ότι το μεγαλύτερο ποσοστό συμμετοχής των APUs στις συνολικές εκπομπές κινείται στο 10-15% για το CO και μεταξύ 15 και 30% για τα NO_x και τα SO_x . Στα μεγάλα αεροδρόμια της Βρετανίας, τα οποία εξυπηρετήσαν το 95% περίπου των επιβατών, εκτιμήθηκε ότι η χρήση των APUs συμμετείχε κατά 6% στις εκπομπές των υπέρλεπτων αιωρούμενων σωματιδίων $\text{PM}_{2.5}$. Μια πρόσφατη εκτίμηση των επιπτώσεων των APUs στη δημόσια υγεία αναφέρει ότι η απαγόρευση της χρήσης τους στα μεγάλα αεροδρόμια της Βρετανίας θα απέτρεπε περίπου 11 πρόωρους θανάτους ετησίως.^[35,167]



Σχήμα 30: Εικόνες τυπικής θέσης και διάταξης της βοηθητικής μονάδας ισχύος στα εμπορικά αεροσκάφη.

Παρότι όλα τα αεροσκάφη φέρουν βοηθητική μονάδα ισχύος προκειμένου να είναι ενεργειακά αυτόνομα, ο βαθμός χρήσης των APUs μειώνεται σταδιακά λόγω της αυξανόμενης χρήσης ηλεκτροπαραγωγών μονάδων εδάφους (Ground Power Units, GPUs). Οι μονάδες αυτές παρέχονται από το αεροδρόμιο και συνήθως αποτελούνται από έναν εμβολοφόρο κινητήρα εσωτερικής καύσης συζευγμένο με μια ηλεκτρογεννήτρια και φερόμενο επί συρόμενης τροχοφόρας κατασκευής, ενώ υπάρχουν και παραλλαγές με στροβιλοκινητήρα που προσομοιάζουν με αυτόνομες APUs. Μια τυπική τέτοια GPU και η σύνδεσή της με το αεροσκάφος παρουσιάζονται στο Σχήμα 30.

Σε γενικές γραμμές, οι εκπομπές από τις GPUs θεωρούνται χαμηλότερες από αυτές των APUs και ορισμένα αεροδρόμια εφαρμόζουν πολιτικές περιβαλλοντικής διαχείρισης που περιλαμβάνουν συστάσεις ή/και υποχρεώσεις χρήσης των GPUs που παρέχουν αντί των APUs των αεροσκαφών που εξυπηρετούν.

Αρκετά αεροδρόμια προσφέρουν επίσης τη δυνατότητα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας στα αεροσκάφη με σύνδεσή τους σε κατάλληλες υποδοχές εδάφους, οι οποίες αντλούν ρεύμα από το δίκτυο. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται πλήρως η επιτόπου ηλεκτροπαραγωγή και οι συνεπαγόμενες εκπομπές αέριων ρύπων.



Σχήμα 31: Εικόνες τυπικής ηλεκτροπαραγωγού μονάδας εδάφους (GPU) και σύνδεσής της με το αεροσκάφος.

Σε αντίθεση με τους κινητήρες των αεροσκαφών, οι εκπομπές των APUs και GPUs δεν πιστοποιούνται από τον ICAO και οι κατασκευαστές δεν είναι υποχρεωμένοι να

δημοσιεύουν τα σχετικά στοιχεία. Για το λόγο αυτό, τα δεδομένα γύρω από τις εκπομπές των APUs είναι σχετικώς περιορισμένα.

Το σκέλος των εκπομπών λειτουργίας ενός αεροδρομίου που οφείλεται στις APUs εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες (όπως π.χ. η πολιτική χρήσης ενέργειας από το δίκτυο ή από GPUs) και επομένως παρουσιάζει μεταβλητότητα.

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας πάντως, χρησιμοποιείται η δυσμενής παραδοχή μέγιστης χρήσης των APUs σε όλα τα αεροδρόμια που μελετώνται, ώστε τα αποτελέσματα των υπολογισμών να υπερκαλύπτουν τις πραγματικές εκπομπές.

12.4.2. Οχήματα εξοπλισμού επίγειας υποστήριξης

Ο εξοπλισμός επίγειας υποστήριξης (Ground Support Equipment, GSE) που χρησιμοποιείται στα αεροδρόμια περιλαμβάνει ένα μεγάλο εύρος μηχανημάτων, εξαρτημάτων και οχημάτων. Τα οχήματα του GSE παρουσιάζουν σημαντική πολυτυπία, περιλαμβάνοντας βυτιοφόρα νερού και καυσίμων, μικρά φορτηγά οχήματα, ειδικούς φορτωτές και ανυψωτές, αυτοκινούμενους ταινιόδρομους, ρυμουλκά αεροσκαφών, λεωφορεία επιβατών και πληρωμάτων, επιβατικά οχήματα, συρόμενες ή αυτοκινούμενες κλίμακες κ.ά. Μια αντιπροσωπευτική εικόνα της πολυτυπίας των οχημάτων GSE δίνεται στο ακόλουθό σχήμα.



Σχήμα 32: Εικόνες οχημάτων που ανήκουν στον εξοπλισμό επίγειας υποστήριξης.

Ο αριθμός και ο ρυθμός χρήσης των οχημάτων GSE εξαρτάται έντονα από την κυκλοφορία και τη διάταξη του κάθε αεροδρομίου, καθιστώντας δυσχερή τον τυποποιημένο τρόπο υπολογισμού των εκπομπών τους. Σημαντική επίδραση στις εκπομπές ασκούν επίσης παράγοντες όπως η ηλικία των οχημάτων, ο τύπος των κινητήρων τους, οι προδιαγραφές των καυσίμων κ.ά., ενώ πρόσφατα αρχίζουν να επιδρούν περιοριστικά στις εκπομπές

ορισμένες περιβαλλοντικές πολιτικές των εταιριών διαχείρισης μεγάλων αερολιμένων που ωθούν στην απόκτηση και χρήση οχημάτων με μειωμένες εκπομπές ή/και μηδενικές, όπως τα ηλεκτρικά οχήματα.

Ορισμένες μελέτες υποδεικνύουν ότι ο GSE ενδέχεται να συμβάλλει σημαντικά στις συνολικές εκπομπές αέριων ρύπων ενός αεροδρομίου^[35] όπως για παράδειγμα στο αεροδρόμιο McCarran του Las Vegas, όπου το 2000 υπολογίστηκε^[168] ότι το 60% των συνολικών εκπομπών οφείλονταν στον GSE. Στο αεροδρόμιο της Ζυρίχης υπολογίστηκε ότι οι συγκεντρώσεις NO οφείλονταν κατά μείζονα λόγο στις εκπομπές του GSE,^[57] ενώ στο αεροδρόμιο Hartsfield-Jackson της Atlanta εκτιμήθηκε ότι η επίδραση του επίγειου εξοπλισμού στα PM_{2.5} και στο O₃ ήταν μικρή σε σχέση με αυτή των αεροσκαφών.^[53]

12.4.3. Υπολείμματα φθοράς των φρένων και ελαστικών των αεροσκαφών

Τα τρίμματα από τη φθορά των ελαστικών στους τροχούς των αεροσκαφών κατά την προσγείωση, καθώς και των φρένων, αποτελούν πηγή αιωρούμενων σωματιδίων. Οι ποσότητες των σωματιδίων αυτών δεν μπορούν να θεωρηθούν ασήμαντες, ακόμη και για τον εμπειρικό λόγο ότι προκαλούν ορατά αποτελέσματα σε αρκετές περιπτώσεις, όπως αυτές της ακόλουθης εικόνας.



Σχήμα 33: Εικόνες από το σύστημα τροχών/φρένων σε αεροσκάφη κατά την προσγείωση.

Οι ποσότητες ελαστικού και κεραμικού υλικού που αποκολλώνται από το σύστημα τροχών/φρένων των αεροσκαφών κατά την επαφή του με το έδαφος και κατόπιν επαναιωρούνται από τις δίνες του αέρα που θα δημιουργήσει η επόμενη απογείωση από το ίδιο άκρο του διαδρόμου, δεν έχουν μελετηθεί εκτενώς. Τα σχετικώς περιορισμένα στοιχεία αναφέρουν ποσότητες ελαστικού που ποικίλουν από λίγα γραμμάρια έως 0,8 kg ανά προσγείωση.^[35,169]

Η μάζα των ελαστικών που μετατρέπεται σε αιωρούμενα σωματίδια έχει προταθεί ότι εξαρτάται από το μέγιστο βάρος απογείωσης, αλλά ενδέχεται να επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες όπως ο αριθμός των τροχών, οι καιρικές συνθήκες, το μήκος του διαδρόμου κ.ά.,^[170] ενώ και η ταχύτητα περιστροφής των τροχών πριν την επαφή τους με το έδαφος ασκεί σημαντική επιρροή.^[171] Η επακόλουθη ενεργοποίηση των φρένων ώστε να ακινητοποιηθεί βαθμιαία το σκάφος οδηγεί σε αποβολή υλικών από τους δίσκους και τα πέδιλα. Από φυσικοχημικής πλευράς, είναι εύλογο να αναμένεται ότι το υλικό αυτό θα περιλαμβάνει τόσο μεταλλικά σωματίδια από τους δίσκους όσο και σωματίδια από την εξάχνωση και επανασυμπύκνωση του κεραμικού υλικού των πεδίων, ενώ κάποια ποσότητα

πρόσθετης αιθάλης θα προστίθεται στο μίγμα από τη θερμική αποδόμηση των σωματιδίων πολυμερούς που προέρχονται από την τριβή του ελαστικού στο διάδρομο, ακριβώς κάτω από τα φρένα. Η εκτίμηση αυτή φαίνεται να επιβεβαιώνεται και από μετρήσεις πεδίου στο διεθνή αερολιμένα της Βαρκελώνης "El Prat",^[172] στις οποίες διαπιστώθηκαν ασυνήθιστα υψηλά επίπεδα οργανικού άνθρακα και μετάλλων στα σωματίδια PM₁₀. Τα επίπεδα αυτά πιθανότατα συνδέονται με τα τρίμματα ελαστικών, σε ότι αφορά στο Ba, στον Zn και στο Mo, και με τα σωματίδια από τα φρένα ως προς τον Cu και το Sb.

Σε επίπεδο ολόκληρης της λειτουργίας ενός αερολιμένα, μια αίσθηση συμβολής στις συνολικές εκπομπές μπορεί να διαμορφωθεί με βάση μελέτες στο αεροδρόμιο Gatwick, οι οποίες εκτιμούν ότι τα τρίμματα ελαστικών και φρένων αποτελούν την κύρια πηγή PM₁₀, με εκπομπές που φτάνουν τους 22 και 4,5 τόνους ετησίως αντιστοίχως και οι οποίες ποσοστιαία αναλογούν περίπου στο 60% και 12% του συνόλου των σχετιζόμενων με τα αεροσκάφη εκπομπών.^[35] Ανάλογης τάξεως ποσότητες αναφέρονται και σε μεταγενέστερες μελέτες για το Gatwick και το Heathrow.^[173]

Στα αιωρούμενα σωματίδια που προέρχονται από τη φθορά των ελαστικών και των φρένων προστίθενται και αυτά που προέρχονται από τη φθορά της επίστρωσης του διαδρόμου, που συνήθως αποτελείται από ασφαλτόμιγμα και χαλίκι ασβεστολιθικής σύστασης.

12.5. Η επίδραση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης των αεροδρομίων στη δημόσια υγεία

Η ατμοσφαιρική ρύπανση που οφείλεται στη λειτουργία των αεροδρομίων επηρεάζει πολλές πτυχές του περιβάλλοντος στην ευρύτερη περιοχή αυτών των μεγάλων έργων, αλλά η κυριότερη από αυτές αφορά στην επίδραση των αέριων ρύπων στη δημόσια υγεία. Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 1.4.2 (σελ. 6 κ.ε.), οι περισσότερες από τις ουσίες που νοούνται ως ατμοσφαιρικοί ρύποι έχουν συγκεκριμένες επιδράσεις στην ανθρώπινη υγεία όταν οι συγκεντρώσεις τους υπερβαίνουν τα οριακά επίπεδα, τα οποία έχουν αναφερθεί στην ενότητα 1.6 (σελ. 8 κ.ε.). Οι επιδράσεις αυτές παρουσιάζουν μεγάλο εύρος διακύμανσης στις περισσότερες από τις κύριες παραμέτρους τους, όπως η πιθανότητα και η συχνότητα εμφάνισης, οι ομάδες του πληθυσμού με τη μεγαλύτερη ευπάθεια, ο κρίσιμος χρόνος έκθεσης κ.ά.

Στο μικροπεριβάλλον των αεροδρομίων, οι επιδράσεις των συνθηκών στις οποίες εκτίθενται οι εργαζόμενοι, οι επιβάτες και οι επισκέπτες, δεν έχουν μελετηθεί εκτεταμένα, αλλά

ορισμένα πρόσφατα αποτελέσματα για τα αιωρούμενα σωματίδια άνθρακα δείχνουν ότι η έκθεση αυτή και τα αποτελέσματα στην υγεία των παραπάνω ομάδων πληθυσμού δεν πρέπει να αγνοούνται.^[174]

Αντίθετα, οι επιδράσεις της συγκέντρωσης των αέριων ρύπων των αεροδρομίων στη δημόσια υγεία του πληθυσμού της ευρύτερης περιοχής τους έχουν ερευνηθεί εκτεταμένα, αλλά περισσότερο σε τοπική κάθε φορά βάση, παρά συστηματικά ή επιδημιολογικά. Τα αποτελέσματα της έρευνας αυτής συνοψίστηκαν πρόσφατα σε μια εργασία ανασκόπησης υπό την αιγίδα των Εθνικών Ακαδημιών Επιστημών των ΗΠΑ^[175] και τα κυριότερα από αυτά είναι τα εξής:

- Η εξαγωγή γενικών συμπερασμάτων, σύμφωνα με την εργασία αυτή, είναι πολύ δύσκολη, δεδομένης της μεγάλης ποικιλότητας των αεροδρομίων και της εξάρτησης που παρουσιάζει η επίδρασή τους στην ποιότητα του αέρα από την αεροπορική κυκλοφορία και το μίγμα των αεροσκαφών, από τις επίγειες δραστηριότητες, αλλά και από τη θέση, τη γεωγραφία και τη μετεωρολογία της περιοχής. Επιπλέον, η τελική επίδραση στην υγεία του πληθυσμού εξαρτάται, επιπροσθέτως των προηγούμενων παραγόντων, και από την κατανομή της πυκνότητας των αστικών θυλάκων, αλλά και από σειρά παραγόντων που επηρεάζουν την ευπάθεια είτε του γενικού πληθυσμού είτε επιμέρους ομάδων του.
- Μια βασική διαπίστωση από την ανασκόπηση των έως τώρα εργασιών της επίδρασης που προκαλεί η ατμοσφαιρική ρύπανση από τα αεροδρόμια στη δημόσια υγεία είναι η αναγκαιότητα περισσότερης έρευνας: τα σημερινά αποτελέσματα επιτρέπουν τη σκιαγράφηση μιας εικόνας, αλλά η εικόνα αυτή θα πρέπει να θεωρηθεί ως ένα στιγμιότυπο μόνο, καθώς η μελλοντική έρευνα ενδέχεται να προσθέσει λεπτομέρειες που θα μεταβάλλουν ορισμένα χαρακτηριστικά της.
- Το ενδιαφέρον των περισσότερων σύγχρονων ερευνών έχει ευθυγραμμιστεί με τη γενικότερη τάση εστίασης στους ρύπους που θεωρούνται ως οι πλέον επικίνδυνοι για την ανθρώπινη υγεία, δηλαδή στα αιωρούμενα σωματίδια, τις επικίνδυνες αέριες ουσίες (Hazard Air Pollutants, HAPs) όπως η φορμαλδεΐδη και στο τροποσφαιρικό όζον.
- Ένα βασικό εύρημα της ανασκόπησης, το οποίο θεμελιώνει τη σκοπιμότητα της παρούσας εργασίας, είναι ότι η δραστηριότητα του αεροδρομίου μπορεί να συσχετισθεί συστηματικά τόσο με τις εκπομπές αέριων ρύπων στην περιοχή επιρροής του (κάτι που θεωρείται εύλογο) αλλά και με τις συγκεντρώσεις (κάτι που θα μπορούσε να μην συμβαίνει)· ωστόσο, η συσχέτιση αυτή δεν προκύπτει πάντα με πρόδηλο τρόπο και συχνά χρειάζεται πρόσθετη εργασία αναγνώρισης των πηγών εκπομπής και υπολογισμού της συνεισφοράς της καθεμιάς στις συνολικές συγκεντρώσεις.

- Οι αναλύσεις επικινδυνότητας δείχνουν ότι τα λεπτά αιωρούμενα σωματίδια ($PM_{2.5}$) κατέχουν την πρώτη θέση ως προς την επικινδυνότητα των εκπεμπόμενων από τα αεροδρόμια ρύπων, η οποία είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από την επικινδυνότητα της δεύτερης κατά σειρά εκπεμπόμενης ουσίας, της φορμαλδεΐδης, παρότι η δυνατότητα ποσοτικοποίησης των μη-μεταλλαξογόνων επιδράσεων της, όπως και όλων των HAPs, είναι περιορισμένη. Τα PM_{10} , που θεωρούνται επίσης ανησυχητικά για την ανθρώπινη υγεία, συγκρατούνται σε μεγάλο βαθμό από τους μηχανισμούς προστασίας του ανώτερου αναπνευστικού, οπότε αποτελούν παράγοντα χαμηλότερης επικινδυνότητας. Τα επίπεδα των $PM_{2.5}$ βρέθηκε ότι ποικίλουν σε πολύ μεγάλο εύρος γύρω από διάφορα αεροδρόμια. Σε μικρή απόσταση από το διάδρομο, εντός του αεροδρομίου, αλλά και σε αποστάσεις έως και 600 κατά τη φορά του ανέμου, οι μετρήσεις δείχνουν αισθητά αυξημένες συγκεντρώσεις $PM_{2.5}$ καθιστώντας την ακτίνα επίδρασης των αεροδρομίων ως προς το ζήτημα αυτό σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή των αυτοκινητοδρόμων.
- Με βάση τις μελέτες που ανασκοπήθηκαν, διαφαίνεται ότι οι βασικοί αέριοι ρύποι των αεροδρομίων, δηλαδή το CO , το NO_2 και το SO_2 , τείνουν να εμφανίζουν συγκεντρώσεις παρόμοιου επιπέδου με αυτές του υποβάθρου ή του αστικού περιβάλλοντος στους οικισμούς γύρω από το αεροδρόμιο, παρότι η συνεισφορά των εκπομπών του αεροδρομίου είναι ευδιάκριτη σε μικρές αποστάσεις από αυτό. Τελικά, λόγω αυτής της ομοιότητας των επιπέδων συγκέντρωσης των ρύπων αυτών (των οποίων οι επιδράσεις στην ανθρώπινη υγεία είναι καλά ορισμένες) μεταξύ του άμεσου περιβάλλοντος του αεροδρομίου και του περιβάλλοντος εντός των παρακείμενων οικιστικών πόλων, είναι ιδιαίτερα δύσκολη η εξαγωγή ποσοτικών συμπερασμάτων για την επίδραση των εκπεμπόμενων από το αεροδρόμιο ρύπων στη δημόσια υγεία των κατοίκων στους πόλους αυτούς.
- Ένα ενδιαφέρον εύρημα της ανασκόπησης είναι ότι στην εγγύς περιοχή των αεροδρομίων, η συγκέντρωση του τροποσφαιρικού όζοντος μειώνεται λόγω των ιδιοτήτων της φωτοχημείας του, μέρος του O_3 καταστρέφεται κοντά στα αεροδρόμια. Ωστόσο, σε μεγαλύτερη ακτίνα η συνεισφορά των αεροδρομίων στο σχηματισμό O_3 οδηγεί σε αύξηση των επιδράσεων του συγκεκριμένου ρύπου στη δημόσια υγεία.
- Ο μόλυβδος αποτελεί πηγή ανησυχίας σε αεροδρόμια γενικής αεροπορίας, δηλαδή σε αυτά που εξυπηρετούν πτητικά μέσα μικρότερης δυναμικότητας, ελικοφόρα στη μεγάλη τους πλειοψηφία, οι κινητήρες των οποίων χρησιμοποιούν ως καύσιμο το AvGas. Όσο συνεχίζεται η χρήση του καυσίμου αυτού, θα αναμένονται ίχνη μολύβδου, αλλά οι σχετιζόμενες με αυτά επιδράσεις στην υγεία, στον αέρα εκτάσεων που

βρίσκονται έως και 1 km κατάντη του αεροδρομίου, ως προς την εκάστοτε φορά του ανέμου.

- Σε μεγάλες αποστάσεις από τα αεροδρόμια, οι εκπομπές τους είναι πιθανόν να οδηγήσουν σε σχηματισμό δευτερογενών αιωρούμενων σωματιδίων και να προκαλέσουν έτσι τις σχετιζόμενες με αυτά επιπτώσεις στην υγεία. Για το λόγο αυτό, σε μεγάλα αεροδρόμια είναι απαραίτητη η διερεύνηση τέτοιων ενδεχομένων, με υπολογιστικές προσομοιώσεις μεγάλης κλίμακας, οι οποίες θα εκτιμούν επιπρόσθετα τα συστατικά τέτοιων σωματιδίων, όπως ο άνθρακας, οι νιτρικές και οι θειικές ενώσεις, αλλά και το μέγεθός τους.
- Οι συστηματικές εκτιμήσεις των επιπτώσεων στην υγεία, εκείνες δηλαδή που εξετάζουν πολλά αεροδρόμια μαζί, διαφαίνεται ότι παρέχουν χρήσιμα στατιστικά συμπεράσματα τόσο ως προς το μέσο όρο όσο και ως προς το συνολικό κίνδυνο, αλλά πάντα υπό την προϋπόθεση ότι οι ειδικές για κάθε αεροδρόμιο αναλύσεις είναι απαραίτητες και ότι τα αποτελέσματά τους ενδέχεται να διαφέρουν σημαντικά από αυτά τα στατιστικά ευρήματα.

Ο μηχανισμός ανάμεσα στις εκπομπές αέριων ρύπων που οφείλονται στη λειτουργία ενός αεροδρομίου και στις επιδράσεις των ουσιών αυτών στη δημόσια υγεία είναι η διασπορά τους στον αέρα της περιοχής και η δημιουργία των συγκεντρώσεων στις οποίες εκτίθενται οι γύρω περιοχές. Η μελέτη των συγκεντρώσεων αυτών περιγράφεται στο κεφάλαιο που ακολουθεί.

13. Παράρτημα Γ: Στοιχεία τεκμηρίωσης κεφαλαίου 3.

Η εκπομπή καυσαερίων με υψηλά φορτία αέριων ρύπων είναι σύμφυτη με τη λειτουργία των αεροσκαφών και κατ' επέκταση των αεροδρομίων: τα αεριωθούμενα σκάφη πετούν ακριβώς λόγω της ώσης που δημιουργούν τα καυσαέρια που εκπέμπουν οι κινητήρες τους με υψηλό ρυθμό, ενώ τα ελικοφόρα σκάφη εξασφαλίζουν τη μηχανική ενέργεια για την περιστροφή των ελίκων τους από τις εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης που επίσης εκπέμπουν σημαντικές, αν και μικρότερες, ποσότητες καυσαερίων. Η εποχή που οι εμπορικές πτήσεις θα διεξάγονται χωρίς καυσαέρια, για παράδειγμα με τη χρήση ηλεκτροκίνητων αεροσκαφών, προς το παρόν διαφαίνεται ότι βρίσκεται δεκαετίες μακριά, παρότι οι πρόσφατες εξελίξεις δείχνουν ότι κάτι τέτοιο δεν είναι ανέφικτο.

Για παράδειγμα, το καλοκαίρι του 2016 το πειραματικό ηλιακό ηλεκτρικό αεροσκάφος Solar Impulse 2 ολοκλήρωσε το γύρο της γης, μεταφέροντας βέβαια μόνο τον πιλότο του,^[176] ενώ ο διαδικτυακός όμιλος του Facebook κατάφερε να θέσει σε πτήση το μη-επανδρωμένο ηλιακό ηλεκτρικό αεροσκάφος Aquila για την παροχή εναέριων διαδικτυακών συνδέσεων, κυρίως στην Αφρική^[177] (επόμενο σχήμα, αριστερή και δεξιά εικόνα αντίστοιχα). Οι προσπάθειες αυτές δεν είναι οι μόνες: η Airbus έχει αρχίσει να υλοποιεί ένα πιλοτικό πρόγραμμα ανάπτυξης μικρών αεροσκαφών με πρωτότυπους ηλεκτροκίνητους E-Fan,^[178] ενώ και η NASA είναι παρούσα στις εξελίξεις με το πειραματικό μικρό σκάφος X-57 με δεκατέσσερις κινητήρες.^[179]



Σχήμα 34: Εικόνες από το ηλιακό ηλεκτροκίνητο μέλλον της αεροπορίας, το οποίο όμως απέχει ακόμη αρκετές δεκαετίες.

Ωστόσο, μέχρι τη μετάβαση από τους σημερινούς κινητήρες καύσης στην ηλεκτροκίνητη αεροπορία, δηλαδή για αρκετές δεκαετίες ακόμη, η μελέτη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης που προκαλούν τα αεροδρόμια ήταν και παραμένει ένα ενεργό πεδίο έρευνας, με επιστημονικό αλλά και ρυθμιστικό ενδιαφέρον, δεδομένου ότι στις περιοχές γύρω από τα αεροδρόμια αναπτύσσονται σημαντικοί, πυκνοί θύλακες ανθρωπογενών δραστηριοτήτων των τοπικών κοινωνιών.

Οι τρόποι μελέτης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στα αεροδρόμια παρουσιάζουν αξιοσημείωτη ποικιλότητα και μπορεί να θεωρηθεί ότι σχηματίζουν ένα φάσμα, στο ένα άκρο του οποίου βρίσκονται οι συνεχείς μετρήσεις συγκεντρώσεων με σταθερούς σταθμούς παρακολούθησης και στο άλλο άκρο οι πλήρως υπολογιστικές προσεγγίσεις, με βάση μόνο τα στοιχεία κίνησης των αεροσκαφών. Μεταξύ αυτών των άκρων περιλαμβάνονται ενδιαμέσες παραλλαγές, όπως οι μετρήσεις πραγματικού χρόνου με κινητούς σταθμούς ή η συλλογή δειγμάτων αέρα και η εκ των υστέρων ανάλυσή τους, αλλά και συνδυαστικές προσεγγίσεις μετρήσεων – υπολογιστικών προσεγγίσεων, όπως οι υπολογισμοί διασποράς με χρήση πραγματικής μετεωρολογίας ή η βαθμονόμηση των υπολογιστικών ομοιωμάτων με βάση μετρήσεις συγκεντρώσεων.

13.1. Μέθοδοι βασιζόμενες σε μετρήσεις

Η μελέτη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης μέσα από μεθόδους που βασίζονται σε μετρήσεις έχει σημαντική διαγνωστική αξία, αφού καταγράφει με ακρίβεια τα συμπτώματα του προβλήματος εκπομπής και διασποράς αέριων ρύπων στην ατμόσφαιρα. Ενώ αυτή η καταγραφή των συμπτωμάτων αποτελεί τη βάση της διάγνωσης, δεν αρκεί για να φωτίσει

την αιτιακή διαδρομή από τις πηγές εκπομπής αέριων ρύπων, οι οποίες σε ένα περιβάλλον υψηλών συγκεντρώσεων είναι συνήθως πολλές (οδική κυκλοφορία, θέρμανση, βιομηχανία και στις περιπτώσεις ενδιαφέροντός μας, εναέριες και επίγειες δραστηριότητες αεροδρομίων) στις τελικά καταγραφόμενες συγκεντρώσεις. Είναι όμως σημαντική η αποτύπωση των συγκεντρώσεων με μετρήσεις, προκειμένου να διαπιστώνεται με τον ακριβέστερο δυνατό τρόπο η αναγκαιότητα ή μη λήψης μέτρων προστασίας του πληθυσμού σε περιπτώσεις έξαρσης των συγκεντρώσεων, είτε αυτή η έξαρση οφείλεται στην αύξηση των εκπομπών, είτε σε ατμοσφαιρικά καθηλωτικές συνθήκες, είτε σε συνδυασμό αυτών των αιτιών.

Οι μέθοδοι ανάλυσης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης που βασίζονται σε μετρήσεις συγκεντρώσεων, διακρίνονται σε δύο γενικές κατηγορίες: αυτές που χρησιμοποιούν σταθερούς σταθμούς και αυτές που βασίζονται σε κινητούς σταθμούς ή φορητά όργανα.

13.1.1. Δίκτυα σταθερών σταθμών παρακολούθησης συγκεντρώσεων αέριων ρύπων

Μεταξύ των τρόπων μελέτης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από αεροδρόμια που βασίζονται σε μετρήσεις σταθερών σταθμών, η χαρακτηριστικότερη περίπτωση είναι αυτή του δικτύου παρακολούθησης ποιότητας του αέρα γύρω από το Διεθνή Αερολιμένα Αθηνών (ΔΑΑ). Πρόκειται για ένα σύνολο πέντε σταθμών, τοποθετημένων στα Γλυκά Νερά, στο Κορωπί, στο Μαρκόπουλο, στην Παλλήνη και στα Σπάτα, καθώς και ενός κινητού σταθμού ο οποίος αλλάζει θέση κατά περιόδους και τα τελευταία χρόνια βρίσκεται εντός του αερολιμένα. Το δίκτυο αυτό παρουσιάζεται αναλυτικά στην ενότητα 6.4.1 της παρούσας εργασίας (σελ. 185 κ.ε.) και τα αποτελέσματά του αξιοποιούνται εκτενώς. Στην Ελλάδα, ο ΔΑΑ είναι ο μόνος αερολιμένας που διαθέτει δίκτυο παρακολούθησης με σταθερούς σταθμούς εκτός της έκτασής του. Ο αερολιμένας Ηρακλείου διαθέτει ένα σταθμό μόνο, τοποθετημένο εντός της έκτασής του, ενώ στα άλλα αεροδρόμια της χώρας δεν υπάρχουν σταθερά σημεία παρακολούθησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Στην ευρύτερη περίπτωση δικτύων από σταθερούς σταθμούς παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, η χαρακτηριστικότερη περίπτωση είναι αυτή του Εθνικού Δικτύου Παρακολούθησης της Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης (ΕΔΠΑΡ), το οποίο ξεκίνησε τη λειτουργία του το 2000 και αποτελείται σήμερα από δεκατέσσερις σταθμούς στην Αττική, ένα σταθμό στην Αλιάρτο Βοιωτίας για τη μελέτη της διασυνοριακής μεταφοράς αέριων ρύπων στην Ευρώπη, επτά σταθμούς στη Θεσσαλονίκη, δύο σταθμούς στην Πάτρα και από ένα σταθμό στο Βόλο, στη Λάρισα, στο Ηράκλειο και στα Ιωάννινα.^[143] Οι σταθμοί της Αττικής και της

Αλιάρτου λειτουργούν υπό την ευθύνη του Υπουργείου Περιβάλλοντος ενώ οι άλλοι σταθμοί του δικτύου λειτουργούν υπό την ευθύνη της οικείας Περιφέρειας.

Η συνήθης μορφή των σταθερών σταθμών παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα είναι αυτή ενός μικρού προκατασκευασμένου οικίσκου, εντός του οποίου φιλοξενείται ο δειγματοληπτικός και αναλυτικός εξοπλισμός. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων ο σταθμός περιλαμβάνει και εξοπλισμό μετεωρολογικών μετρήσεων. Η λειτουργία του σταθμού είναι συνήθως αυτόνομη και οι επισκέψεις προσωπικού είναι απαραίτητες μόνο σε περίπτωση βλάβης ή για τη βαθμονόμηση των οργάνων. Τα αποτελέσματα που καταγράφει κάθε σταθμός διαβιβάζονται με διαδικτυακό πλέον τρόπο στο κέντρο ελέγχου του δικτύου παρακολούθησης.

Η παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα με σταθερούς σταθμούς αποδίδει ακριβή αποτελέσματα για τις θέσεις στις οποίες έχουν εγκατασταθεί οι σταθμοί, καθώς και για μια περιοχή σχετικά μικρής ακτίνας γύρω από τον κάθε σταθμό. Αυτό το σημαντικό πλεονέκτημα αξιοποιείται με την εγκατάσταση των σταθμών σε περιοχές πυκνών ή ευαίσθητων ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, όπως τα κέντρα οικισμών ή τα σχολεία, ώστε να παρακολουθείται επακριβώς η ποιότητα του αέρα που αναπνέει η πλειονότητα του πληθυσμού. Πρόσθετο πλεονέκτημα των σταθερών σταθμών αποτελεί η υψηλή συχνότητα μετρήσεων, με καταγραφές σε σχεδόν συνεχή χρόνο, με τις οποίες μπορούν να υπολογίζονται ακριβείς μέσοι όροι συγκεντρώσεων ανά ώρα, οκτάωρο ή εικοσιτετράωρο.

Βασικό μειονέκτημα των σταθερών σταθμών αποτελεί η σημειακότητα των καταγραφών τους, οι οποίες απεικονίζουν την κατάσταση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης μόνο στη θέση μέτρησης και όχι σε μια ευρύτερη ζώνη. Δεδομένου μάλιστα του υψηλού κόστους κάθε σταθμού, το μειονέκτημα αυτό δεν μπορεί να αντισταθμιστεί από την εγκατάσταση πολλών σταθμών σε επαρκές πλήθος σημείων της περιοχής ενδιαφέροντος. Η έμπρακτη αντιστάθμιση της σημειακότητας των μετρήσεων συνήθως διεξάγεται με βάση την αρχή της προφύλαξης:^[1] επιλέγεται μια θέση εγκατάστασης του σταθμού που, πέραν της αντιπροσωπευτικότητάς της ως προς τον εκτιθέμενο πληθυσμό, να βρίσκεται σε σημείο που αναμένεται η εμφάνιση των δυσμενέστερων αναμενόμενων συγκεντρώσεων, ώστε σε όλα – ή τουλάχιστον στα περισσότερα από – τα άλλα σημεία της περιοχής, οι αναμενόμενες συγκεντρώσεις να μπορούν με ασφάλεια να θεωρηθούν μικρότερες των μετρούμενων. Αυτή η επιλογή φυσικά δεν είναι πάντα διαθέσιμη (υπό την έννοια ότι δεν υφίστανται πάντα σημεία που να είναι και αντιπροσωπευτικά της έκθεσης του πληθυσμού και δυσμενή ως προς τις συγκεντρώσεις), αλλά και όταν υφίσταται, η επιτυχής εφαρμογή εξαρτάται από τη μελέτη σχεδιασμού του δικτύου των σταθμών, σε σχέση με τις κύριες πηγές αέριων ρύπων και τις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες στην περιοχή.

13.1.2. Κινητοί σταθμοί ποιότητας αέρα, φορητά όργανα μέτρησης συγκεντρώσεων αέριων ρύπων και βιοενδεικτικές προσεγγίσεις

Η σηματικότητα των μετρήσεων και το υψηλό κόστος των σταθερών σταθμών, καθιστούν αναγκαία μερικές φορές τη χρήση κινητών σταθμών, όταν για παράδειγμα χρειάζονται μετρήσεις σε διαφορετικά σημεία της ίδιας περιοχής για ορισμένο χρονικό διάστημα, ή όταν οι μετρήσεις γίνονται από ανεξάρτητο φορέα ο οποίος μεταφέρει και εγκαθιστά το σταθμό του κατά παραγγελία. Στις περιπτώσεις αυτές, οι κινητοί σταθμοί καλύπτουν με ιδιαίτερη επάρκεια τις ανάγκες μέτρησης των συγκεντρώσεων αέριων ρύπων και μετεωρολογικών παραμέτρων, αλλά μόνο εφόσον έχουν συντηρηθεί και βαθμονομηθεί ορθά, αφού θεωρούνται ευπαθέστεροι σε βλάβες και σφάλματα εξοπλισμού σε σύγκριση με τους σταθερούς.

Οι κινητοί σταθμοί στην πλειονότητά τους έχουν τη μορφή ενός μικρού συρόμενου τροχόσπιτου, αν και οι πιο σύγχρονες συνθέσεις χωρούν πλέον στο χώρο μεταφοράς ενός μικρού φορητού.

Το πλεονέκτημα της λήψης μετρήσεων σε διαφορετικές θέσεις με χρήση του ίδιου εξοπλισμού μετά από μεταφορά του είναι ιδιαίτερα σημαντικό, αρκεί η μελέτη του προβλήματος να επιδέχεται τη διεξαγωγή διαδοχικών και όχι ταυτόχρονων μετρήσεων. Επιπλέον, οι κινητοί σταθμοί είναι καταλληλότεροι των σταθερών για περιπτώσεις που η εκπομπή αέριων ρύπων παρουσιάζει έντονη εποχικότητα, όπως για παράδειγμα γύρω από αεροδρόμια της νησιωτικής Ελλάδας στη διάρκεια της έξαρσης των τουριστικών μετακινήσεων. Σε τέτοιες περιπτώσεις, από την άποψη της αποτελεσματικότητας της επένδυσης κονδυλίων για περιβαλλοντική παρακολούθηση, ένας κινητός σταθμός μοιάζει προτιμότερος, ιδίως εάν έχει βρεθεί τρόπος αξιοποίησής του σε άλλη θέση κατά την περίοδο που οι μειωμένες εκπομπές καθιστούν περιττή τη λειτουργία του στην κύρια θέση.

Μειονεκτήματα των κινητών σταθμών, πέραν της ευπάθειας του εξοπλισμού τους σε βλάβες και σφάλματα, αποτελεί και πάλι η σηματικότητα των μετρήσεων, δεδομένου ότι τα αποτελέσματά τους αφορούν στενά στη θέση μέτρησης, χωρίς να πληροφορούν για την κατάσταση στην ευρύτερη περιοχή της. Πρόσθετο μειονέκτημα, συναφές και πάλι με το αντίστοιχο των σταθερών σταθμών, είναι η καταγραφή της συνολικής συγκέντρωσης κάθε ρύπου, αλλά όχι των ποσοστών της που συνδέονται με κάθε κύρια πηγή εκπομπής του ρύπου.

Μέρος των μειονεκτημάτων αυτών μπορεί να αντισταθμιστεί με τη χρήση φορητών οργάνων ή παθητικών δειγματοληπτών, μέσω της οποίας μπορεί να επιτευχθεί σημαντική διασπορά των σημείων μέτρησης σε μια περιοχή. Τα φορητά όργανα βασίζονται συνήθως σε μεθόδους

οπτικής απορρόφησης και επομένως είναι κατάλληλα για συγκεκριμένους μόνο ρύπους, όπως κυρίως τα αιωρούμενα σωματίδια ή το όζον, αλλά τα τελευταία χρόνια έχουν εμφανιστεί φορητοί αναλυτές για υδρογονάνθρακες, οξείδια του αζώτου κ.ά. Τα φορητά όργανα είναι πλήρεις μετρητικές συσκευές που διεξάγουν τη δειγματοληψία και τη μέτρηση της συγκέντρωσης επιτόπου και αμέσως, σε πραγματικό χρόνο· όταν όμως η αμεσότητα δεν είναι απαραίτητη, τα πλεονεκτήματα της φορητότητας μπορούν να επιτευχθούν με πολύ μικρότερο κόστος με τη χρήση παθητικών δειγματοληπτών. Οι μικρές αυτές συσκευές προσροφούν δείγμα ατμοσφαιρικού αέρα, το διακρατούν με τρόπο που να διατηρεί τη σύσταση που είχε κατά τη λήψη του και επιτρέπουν την ανάλυσή του εκ των υστέρων, σε κατάλληλο εργαστήριο, το οποίο λόγω της μαζικής επεξεργασίας δειγμάτων μπορεί να συγκρατεί το μοναδιαίο κόστος χαμηλά.

Σημαντική διασπορά των σημείων παρακολούθησης, ανάλογη με αυτή που επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας παθητικούς δειγματολήπτες, μπορεί να επιτευχθεί με τη μέθοδο των βιοδεικτών. Αυτή η προσέγγιση βασίζεται στις αλλαγές που παρουσιάζουν ορισμένοι οργανισμοί, με κυριότερους τους λειχήνες, όταν εκτίθενται σε φορτισμένο με ρύπους ατμοσφαιρικό αέρα^[180] και εντάσσεται στο ευρύτερο πλαίσιο μελέτης της ποικιλότητας των λειχήνων ως δεικτών περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων.^[181] Οι λειχήνες είναι συμβιωτικοί οργανισμοί που δημιουργούνται από τον σύνδεσμο μικροσκοπικών πράσινων φυκών ή κυανοβακτηρίων και νηματοειδών μυκήτων. Η μέθοδος δίνει ποιοτικά αποτελέσματα με οπτική παρατήρηση των αλλαγών στις κοινότητες των λειχήνων, αλλά μπορεί να εξαγάγει και ποσοτικά συμπεράσματα μετά από ανάλυση αποξηραμένων δειγμάτων. Στον ελληνικό χώρο, η πιο γνωστή εφαρμογή της μεθόδου ανάλυσης λειχήνων για τη διαπίστωση του βαθμού ρύπανσης του αέρα πραγματοποιήθηκε στην περιοχή της Μεγαλόπολης^[182] σε μεσογειακό περιβάλλον η πλέον πρόσφατη ανάλογη εφαρμογή εντοπίζεται στην Tiaret της Αλγερίας,^[183] ενώ η έρευνα για τη βελτίωση και επιχειρησιακή διάδοση της μεθόδου είναι ενεργή.^[184] Πάντως, η βιβλιογραφική έρευνα δεν εντόπισε εφαρμογές βιοδεικτών - βιομετρητών αέριας ρύπανσης σε περιοχές αεροδρομίων.

13.1.3. Περιπτώσεις αξιοποίησης μεθόδων βασιζόμενων σε μετρήσεις για τη μελέτη αέριας ρύπανσης σε αεροδρόμια

Τα δίκτυα σταθερών σταθμών μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης αποτελούν μια διαδεδομένη προσέγγιση για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα στο αστικό περιβάλλον μεγάλων πόλεων, όπου οι υψηλές πυκνότητες πληθυσμού και οι διάχυτες πηγές αέριων ρύπων όπως η κυκλοφορία, η θέρμανση, οι μεγάλες υποδομές όπως τα λιμάνια και

οι πολυάριθμες μικρές βιοτεχνικές ή βιομηχανικές εγκαταστάσεις στην περίμετρο της πόλης δημιουργούν μια κατάσταση στην οποία πρωτεύει η μέριμνα για την προστασία της δημόσιας υγείας, και ιδίως των ευπαθέστερων ομάδων, παρά η αιτιοκρατική συσχέτιση εκπομπών – συγκεντρώσεων. Επιπλέον, το αυξημένο ενδιαφέρον των αρμόδιων αρχών για λήψη μέτρων παρακολούθησης και βελτίωσης του αέρα στις πόλεις κατά τις δεκαετίες του '80 και του '90, οδήγησε στην εγκατάσταση πολλών σταθερών ή κινητών σταθμών μέτρησης, δεδομένου ότι την περίοδο εκείνη οι υπολογιστικές μέθοδοι ήταν αρκετά ανώριμες και κυρίως απαιτούσαν δυσεύρετα μεγάλη υπολογιστική ισχύ. Έτσι, τόσο στην Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη,^[143] όσο και στη μεγάλη πλειονότητα των ευρωπαϊκών μητροπόλεων, όπως το Λονδίνο,^[185] το Παρίσι,^[186] το Βερολίνο^[187] κ.ά. έχουν εγκατασταθεί και λειτουργούν εκτεταμένα δίκτυα σταθμών, που στην περίπτωση του Λονδίνου^[188] και άλλων πόλεων εμπλουτίζεται με κινητά όργανα μέτρησης.

Οι εφαρμογές δικτύων από σταθερούς σταθμούς που λειτουργούν υπό την ευθύνη των αεροδρομίων ωστόσο, είναι αρκετά λιγότερες. Στην Ελλάδα, όπως προαναφέρθηκε, μόνο ο Διεθνής Αερολιμένας Αθηνών περιβάλλεται από ένα δίκτυο πέντε σταθερών και ενός μετακινούμενου σταθμού, ενώ μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα στην Ευρώπη περιλαμβάνουν το αεροδρόμιο της Φρανκφούρτης με τρεις σταθμούς,^[189] του Μονάχου με δύο σταθμούς εντός αερολιμένα και ένα κινητό στην ευρύτερη περιοχή του^[190] και του Βερολίνου με έναν σταθμό εντός αερολιμένα.^[191] Συχνότερη είναι η περίπτωση που οι επιπτώσεις των μεγάλων αεροδρομίων στην ποιότητα του αέρα υπόκεινται σε παρακολούθηση μέσω του οργανισμού που είναι υπεύθυνος για το δίκτυο των σταθμών της πόλης, όπως στην περίπτωση του Heathrow στο Λονδίνο^[192] και των δύο αεροδρομίων, Charles de Gaulle Le Bourget και Orly του Παρισιού.^[193]

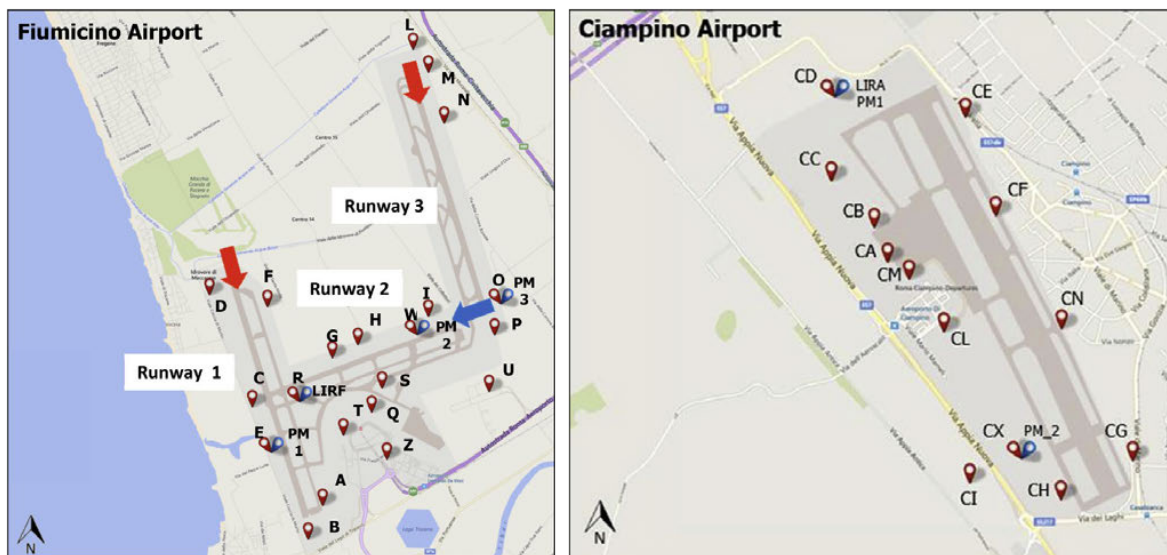
Ενώ οι σταθεροί σταθμοί μέτρησης συγκεντρώσεων αέριων ρύπων θα μπορούσαν να θεωρηθούν ως η παραδοσιακή προσέγγιση στην παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα, οι μετρήσεις σε δίκτυα σημείων, είτε με κινητούς σταθμούς, είτε με φορητά όργανα ή δειγματολήπτες, αποτελούν μια πιο σύγχρονη προσέγγιση.

Για να καλυφθούν και οι δύο προσεγγίσεις, στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται δύο χαρακτηριστικές έμπρακτες εφαρμογές παρακολούθησης ποιότητας αέρα γύρω από αεροδρόμια βάσει μετρήσεων. Στη μεν περίπτωση της Ρώμης οι μετρήσεις διεξήχθησαν με δειγματοληψίες από πολυάριθμα σημεία, στη δε περίπτωση των Μεσογείων οι συγκεντρώσεις μετρήθηκαν στα σημεία των σταθμών παρακολούθησης ποιότητας αέρα του ΔΑΑ.

13.1.3.1. Αποτελέσματα παρακολούθησης στα αεροδρόμια της Ρώμης Fiumicino και Ciampino

Στην ευρύτερη περιοχή της πρωτεύουσας της Ιταλίας, λειτουργούν δύο αεροδρόμια: το ιδιαίτερα μεγάλης δυναμικότητας, διεθνούς χαρακτήρα Fiumicino, και το πολύ μικρότερο Ciampino. Το Fiumicino, που η επίσημή του ονομασία είναι Leonardo da Vinci International Airport (στα ιταλικά Fiumicino – Aeroporto Internazionale Leonardo da Vinci) βρίσκεται δίπλα στη θάλασσα, έχει τρεις κύριους διαδρόμους και έναν βοηθητικό, εξυπηρετεί πάνω από 320.000 πτήσεις ετησίως,^[194] με τις οποίες μετακινούνται πάνω από 41 εκατομμύρια επιβάτες κάθε χρόνο. Το Ciampino είναι ένα μικρό αεροδρόμιο στην ενδοχώρα της Ρώμης, με έναν διάδρομο, χρησιμοποιείται κυρίως από τις αεροπορικές εταιρίες χαμηλού κόστους και τη γενική αεροπορία, εξυπηρετώντας πάνω από 50.000 πτήσεις ετησίως,^[195] τις οποίες μετακινούνται περισσότεροι από 5 εκατομμύρια επιβάτες κάθε χρόνο.

Πρόσφατα, δημοσιεύθηκαν τα αποτελέσματα ενός εκτενούς προγράμματος παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα στην περιοχή επιρροής των δύο αυτών αεροδρομίων^[196] που πραγματοποιήθηκε με μετρήσεις συγκεντρώσεων κυρίως με τη χρήση παθητικών δειγματοληπτών, επιτρέποντας τη διεξαγωγή μετρήσεων σε μια μεγάλη σειρά σημείων, που παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 35: Τα αεροδρόμια της Ρώμης και το εκτενές δίκτυο σημείων παθητικής δειγματοληψίας για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα.

Το πρόγραμμα παρακολούθησης διήρκεσε πέντε χρόνια (2008 – 2012) και εκτυλίχθηκε σε στάδια. Το 2008 και το 2009, διεξήχθη μια προκαταρκτική εκτίμηση των ετήσιων μέσων επιπέδων συγκέντρωσης των αέριων ρύπων για τους οποίους η περιβαλλοντική νομοθεσία προβλέπει οριακές τιμές. Το 2010 πραγματοποιήθηκε πιο λεπτομερής έρευνα,

συμπεριλαμβάνοντας και αρκετά νέα σημεία και αντικαθιστώντας την τακτική του πλέγματος σημείων από ένα εναλλακτικό σχήμα. Για να εκτιμηθεί η άμεση επίδραση των δραστηριοτήτων που διεξάγονται εντός των αεροδρομίων, οι συσκευές δειγματοληψίας αναπτύχθηκαν κατά μήκος των διαδρόμων, σε περίπου κανονικές αποστάσεις, κοντά στο δάπεδο στάθμευσης και ελιγμών των αεροσκαφών, καθώς και δίπλα στους ελαιοδιαχωριστές όμβριων υδάτων, τους κρουνοί νερού και σε άλλες εγκαταστάσεις του χώρου κίνησης των αεροσκαφών (airside). Επιπλέον, τοποθετήθηκαν δειγματολήπτες σε θέσεις ενδεικτικές των συγκεντρώσεων υποβάθρου της περιοχής. Κατά τη διάρκεια του 2011 και του 2012, η παρακολούθηση συνεχίστηκε μόνο σε ορισμένες θέσεις, που επελέγησαν με βάση τα αποτελέσματα της προηγούμενης φάσης. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε διαφορετικές περιόδους κάθε χρόνο, προκειμένου να αποτυπωθεί η επίδραση των εποχικών διακυμάνσεων.

Οι μετρήσεις συγκεντρώσεων πραγματοποιήθηκε με παθητικούς δειγματολήπτες, εξειδικευμένους για τον κάθε αέριο ρύπο, οι οποίοι εκτέθηκαν στον αέρα για διάστημα από 15 έως 30 ημέρες. Λαμβάνοντας υπόψη ότι, με βάση προγενέστερες εργασίες, η ακρίβεια της παθητικής δειγματοληψίας σε σχέση με την ενεργητική, ως ποσοστιαίο σχετικό σφάλμα, είναι μικρότερη του $\pm 20\%$, εφαρμόστηκε μια διαδικασία ελέγχου για τη διασφάλιση ποιότητας, με τυχαία κατανομή διπλών δειγματοληψιών (~15% των συνολικών δειγμάτων) και κλειστών δειγματοληπτών (~10% των συνολικών δειγμάτων) στα σημεία μέτρησης. Η δειγματοληψία PM_{10} διεξήχθη με ειδικό όργανο, πιστοποιημένης καταλληλότητας.

Τα κυριότερα αποτελέσματα της εργασίας αυτής συνοψίζονται ως εξής:

- Στην περιοχή του μικρού αεροδρομίου Ciampino βρέθηκαν αρκετά υψηλότερες συγκεντρώσεις NO_2 από αυτές στην περιοχή του Fiumicino, περίπου κατά 18%, αλλά αρκετά χαμηλότερες συγκεντρώσεις SO_2 , περίπου κατά 20%. Επίσης, στο Ciampino μετρήθηκαν σχεδόν διπλάσιοι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες από ότι στο Fiumicino (4,3 και 2,2 $\mu g/m^3$ αντίστοιχα), με παρεμφερή μοριακή σύσταση.
- Από όλα τα έτη του προγράμματος, η υψηλότερη συγκέντρωση SO_2 μετρήθηκε και στα δύο αεροδρόμια το 2011, σε επίπεδα 13,4 $\mu g/m^3$ στο Fiumicino και 10,8 $\mu g/m^3$ στο Ciampino, παρά τη σχετικά μειωμένη αεροπορική κυκλοφορία που καταγράφηκε κατά το συγκεκριμένο έτος. Το εύρημα αυτό αποδίδεται σε περιορισμό των διεργασιών ατμοσφαιρικής μίξης, οφειλόμενο στις μετεωρολογικές συνθήκες που επικράτησαν στην περιοχή της Ρώμης το Δεκέμβριο του 2011.
- Υπήρξαν σημεία μέτρησης όπου οι συγκεντρώσεις καθοριζόταν από τις απολύτως τοπικές εκπομπές και όχι από την ευρύτερη λειτουργία του αεροδρομίου. Ένα τέτοιο σημείο βρισκόταν πολύ κοντά σε χώρο στάθμευσης πετρελαιοκίνητων οχημάτων μεταφοράς των επιβατών από τις πύλες του αεροσταθμού στα αεροσκάφη, ενώ ένα

άλλο βρισκόταν πολύ κοντά σε θέση προσωρινής στάσης των βυτιοφόρων εφοδιασμού των αεροσκαφών με νερό. Η μη καταλληλότητα των μετρήσεων στα δύο αυτά σημεία δεν ήταν εξαρχής προφανής και εντοπίστηκε μονό μετά από στατιστική ανάλυση.

- Η ποιότητα του αέρα γύρω από το μικρό αεροδρόμιο Ciampino φαίνεται ότι επηρεάζεται αρνητικά από τις δραστηριότητες της περιοχής που το περιβάλλει και συγκεκριμένα από την οδική κυκλοφορία στους δύο μεγάλους αυτοκινητοδρόμους που διέρχονται κοντά του, καθώς και στο τοπικό δίκτυο του οικισμού που βρίσκεται κοντά στο ανατολικό του όριο. Αυτό το εύρημα επιβεβαιώνεται από την υψηλότερη συγκέντρωση NO₂ και PAHs στο Ciampino, παρά την πολύ μικρότερη αεροπορική κυκλοφορία που εξυπηρετεί σε σχέση με το Fuimicino.
- Συγχρόνως, η περιοχή του αεροδρομίου Fiumicino ευνοεί την ταχεία ανάμιξη και διάχυση των εκπεμπόμενων ρύπων, λόγω της θέσης της κοντά στη θάλασσα και του ημιαγροτικού της χαρακτήρα, με αποτέλεσμα οι συγκεντρώσεις αέριων ρύπων να διατηρούνται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα, παρά τους υψηλούς ρυθμούς εκπομπής τους βάσει της μεγάλης εξυπηρετούμενης αεροπορικής κίνησης.
- Η αιτιοκρατική συσχέτιση των εκπομπών από τα αεροδρόμια με τις μετρούμενες συγκεντρώσεις παραμένει δύσκολη. Παρότι δόθηκε μεγάλη έμφαση στον προσδιορισμό του λόγου βενζο(b)φλουορανθενίου προς βενζο(j)φλουορανθένιο (benzo[b]fluoranthene to benzo[j]fluoranthene, BbF/BjF), ο οποίος έχει αναφερθεί ότι υποδηλώνει αεροπορικές εκπομπές όταν κυριαρχεί το πρώτο ισομερές,^[197,198] οι σχετικές μετρήσεις δεν οδήγησαν σε σαφή συμπεράσματα.
- Οι τάσεις που ακολούθησαν οι συγκεντρώσεις από έτος σε έτος, δεν συσχετίζονται ευθέως στις αυξομειώσεις της αεροπορικής κίνησης.

13.1.3.2. Μετρήσεις σωματιδίων με κινητό σταθμό κατάντη του αεροδρομίου του Los Angeles

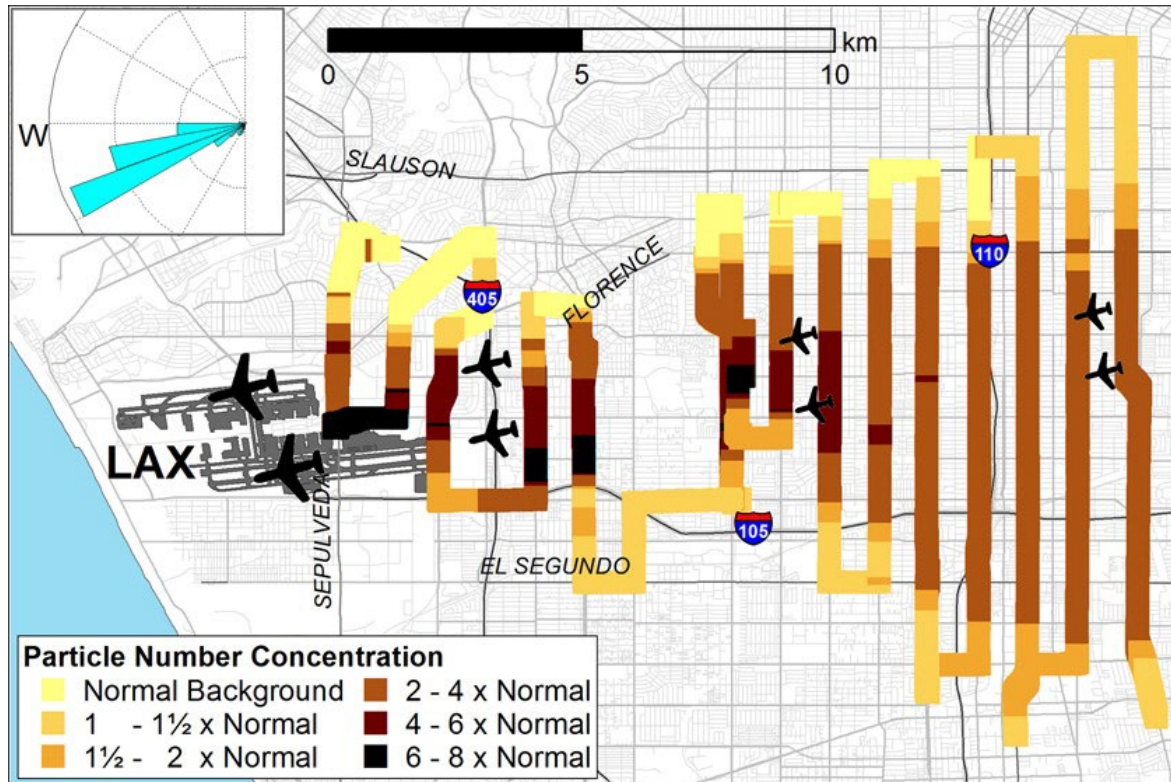
Το Διεθνές Αεροδρόμιο του Los Angeles (LAX) είναι το έκτο παγκοσμίως αεροδρόμιο με βάση τον αριθμό πτήσεων που εξυπηρετεί και ο οποίος υπερβαίνει τις 600.000 ετησίως. Οι διάδρομοί του θεωρούνται ιδανικά προσανατολισμένοι σε σχέση με τους ανέμους που επικρατούν, ενώ το δυτικό τους άκρο βρίσκεται πολύ κοντά στη θάλασσα.

Σε μια πρόσφατη εργασία,^[199] χρησιμοποιήθηκε ένα όχημα εξοπλισμένο με τα απαραίτητα όργανα παρακολούθησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης προκειμένου να ληφθούν διαδοχικές μετρήσεις κατάντη του αεροδρομίου. Συγκεκριμένα μετρήθηκε ο αριθμός των αιωρούμενων σωματιδίων ανατολικά του LAX, σε μια σειρά γραμμών μήκους από 4 ως 16 km

οι οποίες τέμνουν σχεδόν κάθετα τα ίχνη πτήσεων και τον προσανατολισμό των διαδρόμων, σε αποστάσεις αυξανόμενης απομάκρυνσης από το αεροδρόμιο έως και 20 km, με ανέμους που έπνεαν από δυτικές προελεύσεις και ως εκ τούτου, κατά πρώτον ανάγκαζαν τα αεροσκάφη να προσγειώνονται στο ανατολικό άκρο και κατά δεύτερον ωθούσαν προς τα σημεία μέτρησης τους ρύπους των διαδρόμων και ειδικότερα τα σωματίδια που εκπέμπονταν κατά τις απογειώσεις.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων, τα οποία παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα, συνοψίζονται ως εξής:

- Με βάση τον αριθμό σωματιδίων, η εργασία συμπεραίνει ότι οι αρνητικές επιδράσεις στην ποιότητα του αέρα από τις εκπομπές που οφείλονται στη λειτουργία του LAX εκτείνονται σε μεγάλη απόσταση κατάντη του αεροδρομίου, αρκετά μεγαλύτερη από ότι θεωρούνταν στο παρελθόν. Συγκεκριμένα, μετρήθηκε ότι η περιοχή όπου η συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων είναι τουλάχιστον διπλάσια του υποβάθρου, τις περισσότερες ώρες της ημέρας έχει έκταση περίπου 60 km² και εκτείνεται ως και τα 16 km κατάντη του αεροδρομίου, ενώ εντός της περιοχής αυτής εμφανίζονται συγκεντρώσεις 4 ως 5 φορές μεγαλύτερες του υποβάθρου σε αποστάσεις 8 - 10 km από το αεροδρόμιο.



Σχήμα 36: Οι μετρήσεις συγκέντρωσης αριθμού σωματιδίων με τον κινητό σταθμό κατάντη του αεροδρομίου του Los Angeles.

- Οι θέσεις όπου η συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων παρουσίασε μέγιστες τιμές βρίσκονται κάτω από τα ανατολικά ίχνη πτήσης στη διάρκεια επικράτησης δυτικών ανέμων. Ο αριθμός σωματιδίων στις θέσεις αυτές ήταν μεγαλύτερος από 75.000 σωματίδια ανά cm^3 , μεγαλύτερος από τη μέση συγκέντρωση σωματιδίων σε αυτοκινητοδρόμους του Los Angeles.
- Στη διάρκεια των σχετικά σπάνιων βόρειων ανέμων, η επηρεαζόμενη περιοχή παρέμενε μεγάλη αλλά μετατοπιζόταν προς τα νότια του αεροδρομίου.
- Το μήκος αυτοκινητοδρόμου που θα προκαλούσε ισοδύναμη επίδραση, δηλαδή αύξηση του αριθμού σωματιδίων σταθμισμένη με την επηρεαζόμενη περιοχή, εκτιμάται από 280 ως 790 km. Τα μεγέθη αυτά μπορούν να αντιπαραβληθούν με το συνολικό μήκος αυτοκινητοδρόμων του Los Angeles που είναι περίπου 1500 km.
- Τα αποτελέσματα αυτά υποδεικνύουν ότι οι εκπομπές του αεροδρομίου αποτελούν μια από τις κύριες πηγές αιωρούμενων σωματιδίων στο Los Angeles, παρόμοιας τάξης μεγέθους με αυτή ολόκληρου του δικτύου αυτοκινητοδρόμων. Παράλληλα, δημιουργούνται ενδείξεις ότι η έκταση των περιοχών στις οποίες η ποιότητα του αέρα επηρεάζεται από τη λειτουργία ενός μεγάλου αεροδρομίου ενδέχεται να έχει υποεκτιμηθεί σοβαρά.

Πάντως, η αντιστοίχιση των συγκεντρώσεων που μετρήθηκαν με τις εκπομπές των αεροσκαφών και των επίγειων δραστηριοτήτων του αεροδρομίου, δεν πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παραπάνω εργασίας, αφήνοντας ανοικτά ζητήματα προς μελλοντική διερεύνηση, ιδίως εάν ληφθεί υπόψη ότι το σύνολο των έως τώρα γνωστών στοιχείων υπογραμμίζουν τις ιδιαίτερα μικρές εκπομπές σωματιδίων από τις αερολιμενικές δραστηριότητες.

13.1.3.3. Μετρήσεις ποιότητας αέρα στα Μεσόγεια Αττικής πριν και μετά την έναρξη λειτουργίας του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών στα Σπάτα

Η χωροθέτηση του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών στην περιοχή των Σπάτων τη δεκαετία του '90 δημιούργησε ανησυχίες για πιθανή επιδείνωση της ποιότητας του αέρα λόγω των εκπομπών από τη λειτουργία του. Για τη διερεύνηση του ενδεχομένου αυτού, η Υπηρεσία Περιβάλλοντος του ΔΑΑ διεξήγαγε μακροχρόνιες μετρήσεις πριν και μετά την έναρξη λειτουργίας του νέου αεροδρομίου. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών, με τη μορφή συγκεντρώσεων «πριν» που αντιστοιχούν στη μέση τιμή της διετίας 1-Απρ-1999 ως 31-Μαρ-2001 και «μετά» που αντιστοιχούν στη μέση τιμή της διετίας 1-Απρ-2001 ως 31-Μαρ-2003 όπως δημοσιεύθηκαν από την ομάδα ειδικών του ΔΑΑ,^[74] συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 21: Μέσες συγκεντρώσεις αέριων ρύπων πριν και μετά την έναρξη λειτουργίας του ΔΑΑ.

Σταθμός ►		Γλυκά Νερά	Μαρκόπουλο	Αρτέμιδα	Παλλήνη	Σπάτα	Μέση τιμή
CO	Πριν	0,4	-	0,2	0,4	0,5	0,4
	Μετά	0,5	-	0,3	0,3	0,5	0,4
NO ₂	Πριν	28,9	20,0	14,6	16,7	22,7	21,0
	Μετά	26,0	22,9	15,8	17,3	22,0	20,8
O ₃	Πριν	63,3	73,4	66,1	82,5	63,2	73,0
	Μετά	59,5	71,4	62,8	102,9	70,3	73,4
PM ₁₀	Πριν	47,9	47,3	35,3	41,1	46,5	44,8
	Μετά	59,4	39,7	35,5	37,2	33,1	41,0
SO ₂	Πριν	9,3	-	6,7	8,6	4,4	7,7
	Μετά	9,9	-	6,6	7,6	8,0	8,0

Το γαλάζιο χρώμα αντιστοιχεί στις συγκεντρώσεις που μετρήθηκαν κατά τη διετία πριν την έναρξη λειτουργίας του ΔΑΑ, το κόκκινο χρώμα συμβολίζει αύξηση της συγκέντρωσης στη διετία μετά τη λειτουργία, το πράσινο χρώμα αντιστοιχεί σε μείωση και το κίτρινο χρώμα αντιστοιχεί στην παραμονή στο ίδιο επίπεδο.

Οι βασικές διαπιστώσεις από τις μετρήσεις αυτές, συνοψίζονται ως εξής:

- Η μέση τιμή συγκέντρωσης NO₂ στα Μεσόγεια δεν διαφοροποιήθηκε ιδιαίτερα μετά τη λειτουργία του ΔΑΑ. Καταγράφονται μικρές μειώσεις στα Γλυκά Νερά και στα Σπάτα, μικρές αυξήσεις στο Μαρκόπουλο, στην Αρτέμιδα και στην Παλλήνη, αλλά το συνολικό επίπεδο παραμένει σχεδόν αμετάβλητο, καταγράφοντας μικρή μείωση της τάξης του 1%.
- Ομοίως αμετάβλητη παρέμεινε η μέση συγκέντρωση CO.
- Η μέση τιμή συγκέντρωσης O₃ στα Μεσόγεια ομοίως δεν διαφοροποιήθηκε ιδιαίτερα μετά τη λειτουργία του ΔΑΑ. Καταγράφονται μικρές μειώσεις στα Γλυκά Νερά, στο Μαρκόπουλο και στην Αρτέμιδα, ενώ αυξήσεις παρατηρήθηκαν στην Παλλήνη και στα Σπάτα, αλλά το συνολικό επίπεδο παραμένει σχεδόν αμετάβλητο, καταγράφοντας μικρή αύξηση της τάξης του 0,5%.
- Η μέση τιμή συγκέντρωσης PM₁₀ στα Μεσόγεια παρουσίασε μείωση κατά περίπου 8,5%. Στα Γλυκά Νερά καταγράφεται μια αξιοσημείωτη αύξηση, η οποία πιθανότατα οφείλεται στις εκτεταμένες χωματουργικές εργασίες κατασκευής της Αττικής Οδού που διεξάγονταν εκείνη την περίοδο, στην Αρτέμιδα σημειώνεται μια πολύ μικρή αύξηση, ενώ στο Μαρκόπουλο, στα Σπάτα και στην Παλλήνη παρατηρείται σαφής μείωση.

- Η μέση τιμή συγκέντρωσης SO₂ στα Μεσόγεια παρουσίασε αύξηση κατά περίπου 4%. Στα Σπάτα καταγράφεται μια σημαντική αύξηση, αλλά τα επίπεδα SO₂ παραμένουν πολύ κάτω από τα όρια, ενώ τα αίτια της αύξησης πιθανότατα δεν συνδέονται με τη λειτουργία του αεροδρομίου, αφού με βάση την ανεμολογική ανάλυση το μεγαλύτερο μέρος του SO₂ μεταφέρθηκε στα Σπάτα από πηγές στα δυτικά και βορειοδυτικά, ενώ το αεροδρόμιο βρίσκεται νοτιοανατολικά της θέσης μέτρησης. Στα Γλυκά Νερά παρατηρήθηκε μια μικρή αύξηση, ενώ στην Αρτέμιδα και στην Παλλήνη οι συγκεντρώσεις SO₂ κατέγραψαν μικρές μειώσεις.
- Αξιολογώντας συνολικά τις παραπάνω μεταβολές, διαπιστώνεται ότι η πρώτη διετία λειτουργίας του ΔΑΑ δεν επιβάρυνε συστηματικά την ποιότητα του αέρα στην περιοχή των Μεσογείων.

13.2. Μέθοδοι βασιζόμενοι σε υπολογισμούς

Ιστορικά, η μελέτη της ρύπανσης του αέρα βασίστηκε στα αποτελέσματα μετρήσεων συγκέντρωσης, καθώς αυτή η προσέγγιση θεωρούνταν ως η πλέον αντιπροσωπευτικότερη της πραγματικής κατάστασης. Επιπλέον, οι μετρούμενες συγκεντρώσεις θεωρούνταν ως οι αιτιώδεις παράμετροι, βάσει των οποίων αναλύονταν οι επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην ανθρώπινη υγεία και στα οικοσυστήματα. Καθώς όμως, προϊόντος του χρόνου, η περιβαλλοντική ευθύνη άρχισε να υιοθετείται ως μια από τις βασικές αρχές προστασίας του περιβάλλοντος, μαζί με τις αρχές της προφύλαξης και της προληπτικής δράσης, οι πηγές εκπομπής των ρύπων που υποβάθμιζαν την ποιότητα του αέρα άρχισαν να συγκεντρώνουν εξίσου έντονο ενδιαφέρον με τις τελικές συγκεντρώσεις. Επιπλέον, το ενδιαφέρον για την ποιότητα του αέρα επεκτάθηκε χωρικά, από τις ζώνες με ιδιαίτερως υψηλές συγκεντρώσεις σε ευρύτερες περιοχές που είτε παρουσίαζαν ενδείξεις υποβάθμισης είτε διακρίνονταν από πολύ ικανοποιητική ποιότητα που έπρεπε να διαφυλαχθεί. Έτσι, οι υπολογιστικές μέθοδοι για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα άρχισαν να αξιοποιούνται όλο και εντονότερα για τρεις λόγους. Ο πρώτος λόγος αφορά στην όλο και μεγαλύτερη ευχερώς διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ. Ο δεύτερος λόγος συνδέεται με την ανάγκη αιτιώδους διασύνδεσης μεταξύ εκπομπών αέριων ρύπων από κάθε συγκεκριμένη πηγή και ποσοστού της τελικής συγκέντρωσης που αναλογεί στην πηγή αυτή. Και ο τρίτος λόγος αφορά την επέκταση των εκτιμήσεων ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε εκτεταμένες περιοχές, των οποίων η σχετικώς καλή ποιότητα αέρα δεν δικαιολογούσε την εγκατάσταση σταθμών παρακολούθησης ή τη διεξαγωγή μετρήσεων με κινητό σταθμό.

13.2.1. Οι υπολογιστικές μέθοδοι και η νέα Οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την Ποιότητα του Αέρα

Στο πλαίσιο αυτών των εξελίξεων στην προσέγγιση της αέριας ρύπανσης, η νέα Οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης^[44] που αντικατέστησε τη σειρά παλαιότερων οδηγιών για την ποιότητα του αέρα, ενθαρρύνει τη χρήση υπολογιστικών μεθόδων αντί μετρήσεων ή σε συνδυασμό με αυτές, τόσο στο επίπεδο καταγραφής και αναφοράς των επιπέδων ρύπανσης όσο και στο σχεδιασμό των μέτρων πρόληψης ή αντιμετώπισης της υποβάθμισης της ποιότητας της ατμόσφαιρας.

Παρότι οι υπολογιστικές προσομοιώσεις εκπομπής και διασποράς αέριων ρύπων, τα λεγόμενα μοντέλα, θεωρείται ότι περιέχουν μεγαλύτερες αβεβαιότητες από ότι τα αποτελέσματα μετρήσεων, η χρήση τους είναι απαραίτητη, είτε αυτοτελώς είτε σε συνδυασμό με καταγραφές πεδίου, για τους εξής κυρίως λόγους:^[200]

- Η χωρική κάλυψη που μπορεί να επιτευχθεί μέσω μετρήσεων είναι περιορισμένη. Όπως προαναφέρθηκε, οι σταθεροί σταθμοί παράγουν αποτελέσματα που αφορούν σε μια μικρή ακτίνα γύρω από τη θέση τους, ενώ οι κινητοί σταθμοί ή οι φορητές μέθοδοι καλύπτουν μεγαλύτερη έκταση, η οποία πάντως παραμένει σχετικώς μικρή. Αντιθέτως, οι υπολογιστικές προσομοιώσεις καλύπτουν πλήρως την περιοχή μελέτης, όσο μεγάλη κι αν είναι αυτή, με χωρική ανάλυση που μπορεί να επιλεγεί ανάλογα με την επιθυμητή ακρίβεια και τους διαθέσιμους υπολογιστικούς πόρους.
- Οι υπολογιστικές προσομοιώσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν προγνωστικά, εκτιμώντας τις μελλοντικές καταστάσεις που θα προκύψουν από διάφορους συνδυασμούς εκπομπής αέριων ρύπων και μετεωρολογικών συνθηκών, επιτρέποντας έτσι το σχεδιασμό μέτρων πρόληψης ή αντιμετώπισης υπερβάσεων των οριακών τιμών ποιότητας του αέρα. Αντίθετα, οι μετρήσεις καταγράφουν αποτελέσματα συντελεσμένων καταστάσεων, που δεν επιδέχονται πρόληψη, παρότι βέβαια ωθούν για λήψη κατάλληλων μέτρων αποφυγής ανάλογων καταστάσεων στο μέλλον.
- Ενώ οι μετρήσεις αποτυπώνουν τις συγκεντρώσεις αέριων ρύπων συνολικά, χωρίς δυνατότητα διάκρισης της προέλευσής τους, οι υπολογιστικές προσομοιώσεις επιτρέπουν την αναλυτική συσχέτιση αποτελέσματος – αιτίου, επιτρέποντας όσο λεπτομερέστερες αναλύσεις χρειάζονται προκειμένου να κατανοηθεί η συσχέτιση κάθε πηγής εκπομπής αέριων ρύπων με τις διεργασίες μεταφοράς και διασποράς τους και τελικά η επίδραση όλων αυτών των φαινομένων στις συνολικές συγκεντρώσεις.

Ο τελευταίος από τους τρεις παραπάνω λόγους, έχει ιδιαίτερη βαρύτητα στην ειδικότερη περίπτωση μελέτης της ποιότητας του αέρα γύρω από αεροδρόμια, διότι επιτρέπει την

αιτιώδη συσχέτιση μεταξύ των εκπεμπόμενων από τις δραστηριότητές τους ρύπων και των παρατηρούμενων ή εκτιμώμενων συγκεντρώσεων, οι οποίες συνήθως προκύπτουν συνδυαστικά με άλλες πηγές, όπως η οδική κυκλοφορία.

Έτσι, στο γενικότερο πλαίσιο εφαρμογής της Οδηγίας για την ποιότητα του αέρα, οι υπολογιστικές προσομοιώσεις πλεονεκτούν επειδή παρέχουν βελτιωμένες δυνατότητες κατανόησης της συμβολής και του ρόλου κάθε πηγής εκπομπής αέριων ρύπων, επιτρέπουν το σχηματισμό μιας ευκρινούς εικόνας για την ποιότητα του αέρα σε χωρικές ζώνες ή σε χρονικές περιόδους που δεν διεξάγονται μετρήσεις πεδίου, συμβάλλουν στη μείωση των αναγκαιών σταθμών ή θέσεων μέτρησης, ενώ παράλληλα μπορούν να αξιοποιηθούν για να αναπτυχθούν και να αξιολογηθούν μελλοντικά σχέδια για τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα.

Θα πρέπει ωστόσο να σημειωθεί ότι οι υπολογιστικές προσομοιώσεις συνοδεύονται από ορισμένους περιορισμούς· ο κυριότερος από αυτούς είναι η εκτεταμένη απαίτηση στοιχείων εισόδου, κυρίως ως προς τις εκπομπές και τις μετεωρολογικές συνθήκες, τα οποία ορισμένες φορές δεν είναι ευχερώς διαθέσιμα ενώ άλλες φορές ίσως δεν είναι αξιόπιστα. Ένας ακόμη λόγος αφορά στην αβεβαιότητα των προβλέψεων που προκύπτουν από τα μοντέλα, είτε λόγω χρήσης στοχαστικών μεθόδων στους υπολογισμούς, οι οποίες εμπεριέχουν από τη φύση τους αβεβαιότητες σε βραχυπρόθεσμους ορίζοντες παρότι επιβεβαιώνονται σε μεσοπρόθεσμη βάση, είτε λόγω ασαφειών στα στοιχεία εισόδου. Για την ενίσχυση της εμπιστοσύνης προς τα αποτελέσματα των μοντέλων, χρειάζεται η επικύρωσή τους, η οποία συνήθως γίνεται είτε μέσω μετρήσεων είτε μέσω αναδρομής σε περιπτώσεις όπου το συγκεκριμένο μοντέλο έχει εφαρμοστεί επιτυχώς σε ανάλογες συνθήκες. Επιπλέον, θα πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη ότι οι υπολογιστικές προσομοιώσεις είναι μια απλοποιημένη, και ως εκ τούτου ατελής, αντιπροσώπευση της πραγματικότητας. Από την χωρική ανάλυση έως τη φωτοχημεία, οι παραδοχές που ενσωματώνονται στα μοντέλα περιορίζουν την αντιπροσωπευτικότητα των αποτελεσμάτων χάριν της λειτουργικότητας του κώδικα και της προσαρμογής στη διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ.

Στο πλαίσιο αυτών των πλεονεκτημάτων, αλλά και των αδυναμιών, που χαρακτηρίζουν τη χρήση υπολογιστικών μεθόδων για τη μελέτη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, η αξιοποίηση των μοντέλων κατά την εφαρμογή της νέας Οδηγίας για την ποιότητα του αέρα στοχεύει κυρίως στη διεξαγωγή τριών εκτιμήσεων και αξιολογήσεων: της διαπίστωσης και αναφοράς υπερβάσεων των οριακών τιμών, του υπολογισμού των παραμέτρων έκθεσης του πληθυσμού και των επιδράσεων στη δημόσια υγεία και, τέλος, τον προσδιορισμό της επίδρασης κάθε πηγής εκπομπών στις τελικές συγκεντρώσεις.

Η χρήση υπολογιστικών μεθόδων για τη μελέτη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στο πλαίσιο της νέας Οδηγίας μπορεί να λάβει τις διακριτές μορφές που περιγράφονται στις ακόλουθες ενότητες.

13.2.1.1. Εκτιμήσεις και αξιολογήσεις μόνο με τη χρήση μοντέλων.

Όταν οι συγκεντρώσεις παραμένουν χαμηλότερα από το «κατώτερο όριο εκτίμησης» της Οδηγίας, το οποίο αποτελεί ένα ασφαλές κατώφλι (π.χ. για το NO₂ είναι το 50% της οριακής τιμής) τότε η εκτίμηση των συγκεντρώσεων μπορεί να γίνεται μόνο μέσω υπολογιστικών προσομοιώσεων. Αυτή είναι μια σημαντική δυνατότητα, δεδομένου ότι για ένα πολύ μεγάλο μέρος της έκτασης της χώρας η συνθήκη αυτή ικανοποιείται, όπως προκύπτει από όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα 11.4 (σελ. 306 κ.ε.). Σημειώνεται βέβαια ότι σε περιπτώσεις αποκλειστικής εφαρμογής υπολογιστικών προσομοιώσεων, χωρίς αποτελέσματα παρακολούθησης, θα πρέπει να εξασφαλίζεται ότι το μοντέλο που χρησιμοποιείται έχει επικυρωθεί υπό παρόμοιες συνθήκες με αυτές της συγκεκριμένης εφαρμογής του.

13.2.1.2. Ολοκληρωμένη εκτίμηση με χρήση υπολογιστικών προσομοιώσεων και μετρήσεων.

Σε περιπτώσεις που υφίστανται υπερβάσεις του κατώτερου ορίου εκτίμησης, τα μοντέλα θα πρέπει να χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τις μετρήσεις παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, ενώ όταν υπερβαίνεται και το ανώτερο όριο εκτίμησης οι υπολογιστικές μέθοδοι θα πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο ως συμπλήρωμα των αποτελεσμάτων από τις μετρήσεις. Στην πρώτη περίπτωση, του συνδυασμού μοντέλων και μετρήσεων, τα αποτελέσματά τους θεωρούνται ισοδύναμα και χρησιμοποιούνται από κοινού για να σχηματιστεί μια συνεκτική εικόνα της ποιότητας του αέρα στην περιοχή επιρροής. Στη δεύτερη περίπτωση, δηλαδή στην περίπτωση συμπληρωματικής χρήσης των αποτελεσμάτων των μοντέλων, οι τιμές των μετρήσεων θεωρούνται ως πρωτεύοντα δεδομένα ενώ οι υπολογιστικές εκτιμήσεις χρησιμοποιούνται ως δευτερεύουσες τιμές, για τη συμπλήρωση των μετρήσεων.

Αρκετές εφαρμογές υπολογιστικών εκτιμήσεων χρησιμοποιούν τα δεδομένα των μετρήσεων για να επικυρώσουν τα αποτελέσματα των μοντέλων. Όταν το μοντέλο αποδίδει εντός των ποιοτικών στόχων που θέτουν οι ισχύουσες απαιτήσεις, τα αποτελέσματά του χρησιμοποιούνται για να συμπληρωθεί η εκτίμηση και αξιολόγηση της ποιότητας του αέρα στις γεωγραφικές εκτάσεις που δεν καλύπτονται από δεδομένα μετρήσεων, δηλαδή συνήθως στο μακράν μεγαλύτερο ποσοστό της περιοχής μελέτης. Με τον τρόπο αυτό, δηλαδή με τη

συμπληρωματική χρήση των αποτελεσμάτων των μοντέλων, είναι για παράδειγμα δυνατόν να εκτιμηθεί ο βαθμός έκθεσης του πληθυσμού σε ακατάλληλης ποιότητας αέρα. Η προσέγγιση αυτή είναι αρκετά διαδεδομένη και μερικά από τα παραδείγματα εφαρμογής της που έχουν αναφερθεί στην Ευρωπαϊκή Επιτροπή^[201] περιλαμβάνουν την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα στην Κοπεγχάγη της Δανίας, όπου μοντέλα και μετρήσεις χρησιμοποιούνται μαζί ώστε να επιτευχθεί εκτενής γεωγραφική κάλυψη, τον υπολογισμό της έκθεσης του πληθυσμού του Όσλο της Νορβηγίας σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες των ορίων, καθώς και την αρχική αποτίμηση της ποιότητας του αέρα σε όλη την έκταση της Πορτογαλίας σε κάρναβο 10×10 km.

13.2.1.3. Συνδυασμός υπολογιστικών αποτελεσμάτων και μετρήσεων

Οι μέθοδοι που βασίζονται στο συνδυασμό αποτελεσμάτων από υπολογιστικές προσομοιώσεις με δεδομένα από μετρήσεις ή από οποιοδήποτε άλλο σύνολο δεδομένων, προκειμένου να καταλήξουν σε βελτιωμένα χωρικά πεδία συγκεντρώσεων, ονομάζονται συχνά «συντήξεις δεδομένων» (data fusion) ή «αφομοιώσεις δεδομένων» (data assimilation). Όταν δεδομένα από ποικίλες πηγές συνδυάζονται ισότιμα, χωρίς να αποδίδεται προτεραιότητα σε κάποια από αυτά, η προσέγγιση θεωρείται ως «σύντηξη δεδομένων» ή «ολοκλήρωση δεδομένων» και περιλαμβάνει το συνδυασμό των δεδομένων αυτών με ένα φάσμα μεθόδων, από γεωμετρικούς μέσους όρους έως μεθόδους στατιστικής βελτιστοποίησης. Για παράδειγμα, είναι εφικτό να συνδυαστούν αποτελέσματα μετρήσεων, εκτεταμένα στο χώρο με παρεμβολή, δορυφορικά δεδομένα και αποτελέσματα από υπολογιστικές μεθόδους, προκειμένου να παραχθεί ένας ενιαίος, ολοκληρωμένος χάρτης ποιότητας αέρα.^[202–204] Η σύντηξη των δεδομένων παίρνει συχνά τη μορφή ενός σταθμισμένου γραμμικού συνδυασμού των δεδομένων από τις διαφορετικές πηγές, με τους συντελεστές στάθμισης να εξαρτώνται από την εκτιμώμενη αβεβαιότητα κάθε πηγής.

Ένας από τους πιο ευθείς τρόπους συνδυασμού των δεδομένων από μετρήσεις και από μοντέλα είναι η πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση, με την οποία οι εκτιμώμενες από το μοντέλο συγκεντρώσεις, καθώς και άλλα συμπληρωματικά δεδομένα, προσαρμόζονται στις διαθέσιμες τιμές μετρήσεων χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Παρότι ο τρόπος αυτός οδηγεί σε ένα απροκατάληπτο πεδίο συγκεντρώσεων, όπου μετρήσεις και υπολογιστικά αποτελέσματα σταθμίστηκαν ισοδύναμα, είναι πιθανόν να υπάρξουν σημαντικές αποκλίσεις από τις μετρούμενες συγκεντρώσεις. Οι διαφοροποιήσεις αυτές μπορούν να ληφθούν υπόψη μέσω παρεμβολής των υπολοίπων των αποκλίσεων, καταλήγοντας σε ένα χάρτη συγκεντρώσεων με βάση το πεδίο συγκεντρώσεων, συνοδευόμενο ενδείξεις των διαφοροποιήσεων. Παρότι αυτός ο τρόπος φαίνεται να είναι

πιο αποτελεσματικός από την «αφομοίωση δεδομένων», πρέπει να επισημανθεί ότι δεν υπόκειται σε φυσικές ή φωτοχημικές αιτιοκρατίες, αλλά μόνο σε στατιστικούς περιορισμούς.

Οι προσεγγίσεις «αφομοίωσης δεδομένων» από την άλλη μεριά, είναι φυσικοχημικά πιο συνεπείς, επειδή χρησιμοποιούν τεχνικές προσομοίωσης που ενσωματώνουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων απευθείας μέσα στους υπολογισμούς του μοντέλου ποιότητας αέρα. Οι μετρήσεις αυτές καθοδηγούν το μοντέλο προς μια βέλτιστη λύση, η οποία θα παραμένει κατά το δυνατόν πλησιέστερα στα αποτελέσματα πεδίου αλλά θα είναι συνεπής με τη φυσική περιγραφή στην οποία βασίζεται η προσομοίωση. Ο συνηθέστερος τύπος «αφομοίωσης δεδομένων» βασίζεται σε μεταβολικές (variational) μεθόδους, οι οποίες ήδη χρησιμοποιούνται εκτενώς στις μετεωρολογικές προβλέψεις, αλλά υπάρχουν και άλλες μέθοδοι όπως τα φίλτρα συλλογών Kalman (ensemble Kalman filters). Η «αφομοίωση δεδομένων» χρησιμοποιείται πλέον στις προγνώσεις ποιότητας αέρα που στοχεύουν στην έγκαιρη πρόβλεψη υπερβάσεων και την ειδοποίηση του κοινού. Εφαρμόζεται επίσης στις αξιολογήσεις της ποιότητας αέρα σε μεγάλη κλίμακα, π.χ. σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης, αλλά σπανίως σε κλίμακα πόλης, λόγω της περιπλοκότητας του αστικού περιβάλλοντος και της μεγάλης μεταβλητότητας των εκπομπών αέριων ρύπων εντός αυτού.

13.2.2. Περιπτώσεις αξιοποίησης υπολογιστικών μεθόδων για τη μελέτη αέριας ρύπανσης σε αεροδρόμια

Στις ενότητες που προηγήθηκαν παρουσιάστηκε η ενθάρρυνση, αλλά και οι προϋποθέσεις, της νέας Οδηγίας ποιότητας του αέρα για την αξιοποίηση υπολογιστικών μεθόδων, αυτοτελώς ή σε συνδυασμό με μετρήσεις. Η αξιοποίηση αυτή αφορά σε όλο το φάσμα περιπτώσεων ατμοσφαιρικής ρύπανσης, από τις διάχυτες πηγές του αστικού περιβάλλοντος μιας πόλης ή και μιας ολόκληρης χώρας, έως γραμμικές ή σημειακές πηγές αέριων ρύπων, όπως π.χ. οι αυτοκινητόδρομοι ή οι βιομηχανίες αντιστοίχως, των οποίων οι εκπομπές επηρεάζουν μια πεπερασμένου μεγέθους περιοχή.

Σε αυτό το γενικό πλαίσιο, η περίπτωση των αεροδρομίων τοποθετείται περίπου στη μέση. Από την άποψη της έκτασης, η λειτουργία ενός αεροδρομίου επηρεάζει μια μεσαίου μεγέθους περιοχή, της οποίας οι διαστάσεις σπανίως υπερβαίνουν τα 20×10 km. Από την άποψη της έντασης, οι εκπομπές αέριων ρύπων μέσα σε ένα αεροδρόμιο και οι συγκεντρώσεις που αυτές προκαλούν στη γύρω περιοχή κινούνται σε μέτρια επίπεδα, τα οποία από τη μια δεν προϊδεάζουν για δραματικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, όπως π.χ. θα συνέβαινε σε μια εντόνως ρυπογόνο βιομηχανία, αλλά από την άλλη δημιουργούν

ανησυχίες για ενδεχόμενες υπερβάσεις ορίων, μικρής συνήθως κλίμακας και σε μάλλον σποραδική χρονική βάση. Έτσι, από κανονιστικής πλευράς, οι συγκεντρώσεις αέριων ρύπων γύρω από ένα αεροδρόμιο είναι σαφώς πιθανότερο να κυμαίνονται κάτω από το ανώτερο όριο εκτίμησης (UAT) παρά πάνω από αυτό, ενώ συχνά ενδέχεται να κινούνται και κάτω από το κατώτερο όριο εκτίμησης (LAT).

Για το λόγο αυτό, τα αεροδρόμια αποτελούν ιδιαιτέρως πρόσφορες περιπτώσεις εφαρμογής υπολογιστικών μεθόδων για τη μελέτη της αέριας ρύπανσης, είτε αυτοτελώς είτε σε συνδυασμό με μετρήσει (για συγκεντρώσεις μικρότερες ή μεγαλύτερες του LAT αντιστοίχως). Αξίζει βέβαια να αναφερθούν δύο πρόσθετοι λόγοι που ευνοούν σημαντικά την καταλληλότητα χρήσης υπολογιστικών μεθόδων για τη μελέτη της αέριας ρύπανσης στα αεροδρόμια. Ο πρώτος λόγος είναι γενικός και αφορά την ευρύτατη διαθεσιμότητα άφθονης υπολογιστικής ισχύος, αφού ακόμη και σχετικά απλοί σημερινοί υπολογιστές γραφείου, μπορούν να ανταπεξέλθουν στις απαιτήσεις των σύγχρονων μοντέλων. Ο δεύτερος λόγος είναι ειδικός και σχετίζεται με την ακρίβεια και προβλεψιμότητα της λειτουργίας ενός αεροδρομίου, στο οποίο τα αεροσκάφη πετούν σε συγκεκριμένες πορείες, χρησιμοποιώντας συγκεκριμένους κινητήρες γνωστών ρυθμών εκπομπής, με χρονικό προγραμματισμό που παρουσιάζει μεγάλες κανονικότητες και με επίγειο εξοπλισμό που συντηρείται τακτικά. Όλα αυτά επιτρέπουν την πρόβλεψη των εκπομπών με αξιοσημείωτη ακρίβεια, ενώ αν συνυπολογιστεί και το συνήθως ομαλότατο ανάγλυφο της περιοχής, μαζί με την καθημερινά καταγραφόμενη ανεμολογία, δημιουργούνται ιδανικές συνθήκες για την υπολογιστική προσομοίωση των συγκεντρώσεων.

Έτσι, δεν προκαλεί έκπληξη ότι τα τελευταία χρόνια έχουν δημοσιευτεί πολυάριθμες εργασίες πάνω στα ζητήματα αυτά. Στις επόμενες ενότητες, συνοψίζονται τα κυριότερα ευρήματα ορισμένων από τις εργασίες αυτές, οι οποίες επελέγησαν κυρίως λόγω συνάφειας με το θέμα της παρούσας εργασίας.

13.2.2.1. Αεροδρόμιο Φλωρεντίας «Amerigo Vespucci»

Η Φλωρεντία, μια πόλη 400.000 κατοίκων, λίκνο της ιταλικής Αναγέννησης και πασίγνωστη για τους καλλιτεχνικούς της θησαυρούς, προσελκύει περίπου 16.500.000 εκατομμύρια τουρίστες το χρόνο, αρκετοί από τους οποίους φτάνουν εκεί μέσω του τοπικού αεροδρομίου, που ονομάζεται «Amerigo Vespucci». Πρόκειται για ένα μεσαίου μεγέθους αεροδρόμιο, με έναν διάδρομο εν λειτουργία και προοπτική κατασκευής ενός νέου, το οποίο εξυπηρετεί περίπου 25.000 κινήσεις αεροσκαφών ετησίως. Το κυριότερο, από περιβαλλοντικής πλευράς, χαρακτηριστικό του αεροδρομίου της Φλωρεντίας είναι η μικρή του απόσταση από το κέντρο της πόλης, αφού η ευθεία απόσταση από τον αεροσταθμό του ως το κεντρικότερο

μνημείο της πόλης, τον καθεδρικό ναό Duomo δεν υπερβαίνει τα 6 km. Το αεροδρόμιο περιβάλλεται από αστικοποιημένες περιοχές και εφάπτεται με ένα μεγάλο αυτοκινητόδρομο από τη μία του πλευρά και μια σιδηροδρομική γραμμή σημαντικής κυκλοφορίας από την άλλη.

Πρόσφατα, η επίδραση του αεροδρομίου της Φλωρεντίας στην ποιότητα του αέρα της περιοχής επιρροής του μελετήθηκε με τη βοήθεια του EDMS από ερευνητές του Πανεπιστημίου της Φλωρεντίας και της Υπηρεσίας Προστασίας Περιβάλλοντος της Τοσκάνης^[205] και οι βασικές επιλογές του υπολογιστικού τους σεναρίου μοιάζουν αρκετά με τις επιλογές της παρούσας εργασίας. Συγκεκριμένα μελετήθηκε μια τετράγωνη περιοχή με πλευρά 14 km και κέντρο στο νότιο άκρο του υφιστάμενου διαδρόμου, από όπου εξυπηρετείται το μεγαλύτερο ποσοστό των απογειώσεων, και με κάρναβο των σημείων υπολογισμού των συγκεντρώσεων 250×250 m. Από πλευράς αριθμού αεροπορικών κινήσεων θεωρήθηκαν δύο σενάρια, ένα με 25.588 πτήσεις που αντιστοιχεί στην παρούσα κατάσταση βάσει στοιχείων από τα έτη 2007-2008 και ένα με 35.822 πτήσεις πολιτικής αεροπορίας και 10.703 πτήσεις γενικής αεροπορίας, που αντιστοιχεί στο μεσοπρόθεσμο μέλλον, όπου ο υφιστάμενος διάδρομος θα λειτουργεί σε συνδυασμό με τον σχεδιαζόμενο νέο διάδρομο. Η κατανομή των αεροπορικών κινήσεων στους μήνες του έτους αποτυπώνει τη θερινή αιχμή και το μίγμα των αεροσκαφών κυριαρχείται από τα αεριωθούμενα Airbus A319-100 (30%), Avro RJ85 και RJ100 (25% και 8% αντίστοιχα) και Boeing 737-700 (2%), ενώ ως κυριότερα ελικοφόρα αεροσκάφη θεωρούνται τα ATR 72-200 (7%) και τα DCH-8-Q400 (6%). Τα βασικότερα ευρήματα της εργασίας αυτής συνοψίζονται ως εξής:

- Τα όρια συγκεντρώσεων των κυριότερων ρύπων, δηλαδή τον NO₂ του CO και του SO₂ δεν υπερβαίνονται, τόσο στο πρώτο όσο και στο δεύτερο σενάριο λειτουργίας του αεροδρομίου, παρότι στο τελευταίο οι εκπομπές υπολογίζονται σημαντικά αυξημένες, π.χ. κατά 86% για τα NO_x.
- Η αναμενόμενη αύξηση της λειτουργικότητας του αεροδρομίου μετά την έναρξη λειτουργίας του νέου διαδρόμου στο μέλλον, οδηγεί σε μείωση εκπομπών εκείνων των φάσεων του κύκλου LTO που σχετίζονται με την αναμονή ή την τροχοδρόμηση. Ωστόσο, η μείωση αυτή είναι σχετικά περιορισμένη σε σύγκριση με την αύξηση των εκπομπών που προκαλεί ο αυξημένος αριθμός απογειώσεων, οπότε η αύξηση των συνολικών εκπομπών είναι σχεδόν αναλογική με την αύξηση των κινήσεων.
- Η σύγκριση των εκπομπών από τη τρέχουσα λειτουργία του αεροδρομίου με τις εκπομπές ενός γειτονικού τμήματος αυτοκινητοδρόμου μήκους 2 km δείχνει ότι ως προς το CO οι ετήσιες ποσότητες είναι παρόμοιες, οι εκπομπές NO_x από το αεροδρόμιο είναι κατά 20% περίπου χαμηλότερες από του αυτοκινητοδρόμου, οι εκπομπές PM₁₀ πολύ χαμηλότερες, σχεδόν κατά 80%, ενώ οι εκπομπές SO_x είναι πολύ υψηλότερες,

λόγω της σημαντικά αυξημένης περιεκτικότητας σε θείο των αεροπορικών καυσίμων συγκριτικά με αυτά των οδικών μετακινήσεων.

- Σε επίπεδο μέσων ετήσιων συγκεντρώσεων, η οφειλόμενη στο αεροδρόμιο αέρια ρύπανση είναι συγκρίσιμη με τις συγκεντρώσεις υποβάθρου (περιλαμβανόμενων αυτών που οφείλονται στον αυτοκινητόδρομο) μόνο στο NO₂ και στο SO₂, ενώ ως προς τα PM₁₀ η εργασία επιβεβαιώνει ότι η συνεισφορά του αεροδρομίου είναι πολύ μικρή.

13.2.2.2. Διεθνές Αεροδρόμιο του Los Angeles

Όπως προαναφέρθηκε, το Διεθνές Αεροδρόμιο του Los Angeles (LAX) είναι ένα από πλέον πολυσύχναστα, με πάνω από 600.000 πτήσεις ετησίως, και με διαδρόμους ιδανικά προσανατολισμένους σε σχέση με τους ανέμους που επικρατούν.

Στο πλαίσιο μας πρόσφατης εργασίας, τέθηκαν σε αντιπαραβολή δύο υπολογιστικές προσεγγίσεις: η βασιζόμενη σε μετρήσεις παλινδρόμηση (regression modeling) και η καθαρά υπολογιστική πρόγνωση με το EDMS.^[87]

Η βασιζόμενη σε μετρήσεις παλινδρόμηση διεξάγεται για κάθε ρύπο ξεχωριστά και βασίζεται στην ανάλυση της σχέσης μεταξύ της πτητικής δραστηριότητας, της μετεωρολογίας και της συγκέντρωσης του ρύπου μεμονωμένα σε κάθε σημείο παρακολούθησης. Οι προβλέψεις συγκεντρώσεων δημιουργούνται προσαρμόζοντας γραμμικά μοντέλα παλινδρόμησης με τη χρήση δεδομένων που αφορούν αφενός την πτητική δραστηριότητα, ήτοι τις εκτελούμενες πτήσεις σταθμισμένες με την κατανάλωση καυσίμου καθεμιάς, αφετέρου τις μετεωρολογικές συνθήκες. Τα στοιχεία αυτά χρησιμοποιούνται ως προγνωστικοί παράγοντες για τις μετρούμενες συγκεντρώσεις σε κάθε σημείο παρακολούθησης και περιλαμβάνουν όρους αλληλεπίδρασης, ώστε να συνοψολογίζεται το μετεωρολογικό καθεστώς που επικρατεί κατά την πρόβλεψη της συγκέντρωσης που δημιουργούν οι εκπομπές.

Η αντιπαραβολή regression modeling και EDMS εστιάσθηκε στα οξείδια του αζώτου και στα σωματίδια άνθρακα (black carbon, BC). Τα σημεία παρακολούθησης, στα οποία διεξήχθησαν τόσο οι μετρήσεις όσο και οι προγνώσεις, ήταν τρία, διαδοχικά τοποθετημένα στη νοητή επέκταση των διαδρόμων κατά τη φορά του ανέμου. Τα αποτελέσματά της σύγκρισης συνοψίζονται ως εξής:

- Η σύγκριση των συγκεντρώσεων του ίδιου ρύπου στα διαφορετικά σημεία παρακολούθησης βοήθησε στο να κατανοηθεί η εξέλιξη και μεταφορά του συγκεκριμένου ρύπου· βοήθησε επίσης στο να αναγνωριστούν οι πιθανοί περιορισμοί τόσο του regression modeling όσο και των υπολογισμών διάχυσης με το EDMS σε διάφορες αποστάσεις από τις πηγές εκπομπής των μελετώμενων ρύπων.

- Η σύγκριση των συγκεντρώσεων πολλών ρύπων στο σημείο παρακολούθησης που ήταν πολύ κοντά σε σημαντικές πηγές εκπομπής, συγκεκριμένα στο πέρας του κύριου διαδρόμου απογειώσεων, επιτρέπει τον έλεγχο του καταλόγου τυπικών εκπομπών που χρησιμοποιείται από μοντέλα όπως το EDMS.
- Παρά τους περιορισμούς της συγκεκριμένης συγκριτικής ανάλυσης, όπως η εστίαση της μόνο σε μικρές αποστάσεις διάχυσης των ρύπων, εντοπίζονται αρκετά θέματα προς συζήτηση. Για παράδειγμα, ενώ οι υπολογισμοί εκπομπών NO_x από το EDMS διαπιστώνεται ότι είναι αξιόπιστοι, στην εκτίμηση εκπομπών σωματιδίων άνθρακα προκύπτουν ασυμφωνίες ανάμεσα στα αποτελέσματα των υπολογισμών και στις μετρήσεις στο άκρο του διαδρόμου.
- Τέλος, διαπιστώνεται ότι είναι δύσκολο να συσχετισθεί η επίδραση συγκεκριμένων παραδοχών του EDMS, οι οποίες προέρχονται από τη φυσικοχημεία των μηχανισμών που προσομοιώνουν, με τις εμπειρικές συσχετίσεις μεταξύ προγνωστικών παραγόντων και συγκεντρώσεων που υπολογίζονται με την μοντελοποίηση παλινδρόμησης.

13.3. Η θέση της παρούσας εργασίας εντός του φάσματος των τρόπων μελέτης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στα αεροδρόμια

Η προσέγγιση που ακολουθείται στην παρούσα εργασία για τη μελέτη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στα τρία μεγαλύτερα αεροδρόμια της Ελλάδας ανήκει στις υπολογιστικές μεθόδους που αναφέρθηκαν στην ενότητα 13.2.1.1 (σελ. 361 και εξής). Συγκεκριμένα, αξιοποιείται ένα εγνωσμένης αξίας σύστημα υπολογιστικής προσομοίωσης των εκπομπών αέριων ρύπων από τις αερολιμενικές δραστηριότητες και των συγκεντρώσεων που προκαλεί η διασπορά τους στην επηρεαζόμενη περιοχή. Το σύστημα αυτό, που παρουσιάζεται αναλυτικότερα στο επόμενο κεφάλαιο, είναι το EDMS και αποτελεί το προτεινόμενο από την US EPA μοντέλο κανονιστικής χρήσης, δηλαδή ελέγχου συμμόρφωσης υφιστάμενων ή σχεδιαζόμενων αεροδρομίων με τα ισχύοντα όρια ποιότητας αέρα. Πρόκειται επομένως για ένα εξειδικευμένο μοντέλο, που σχεδιάστηκε για χρήση σε περιπτώσεις αεροδρομίων, και το οποίο ενσωματώνει δύο αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά. Πρώτον, ως προς τον υπολογισμό των εκπομπών, το EDMS αξιοποιεί τη βάση δεδομένων των εκπομπών από κάθε κινητήρα αεροσκαφών που καταχωρείται στον ICAO, μαζί με λεπτομερείς προσεγγίσεις του χρόνου

και της έντασης λειτουργίας των κινητήρων στις διάφορες φάσεις του LTO. Δεύτερον, ως προς τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων, το EDMS χρησιμοποιεί ένα καθιερωμένο μοντέλο διασποράς, το AERMOD, το οποίο συνδυάζει ισορροπημένα φυσικές προσεγγίσεις με στοχαστικές εκτιμήσεις και έχει δοκιμαστεί σε σημαντικό εύρος περιπτώσεων με καλά αποτελέσματα.

Η ιδιαιτερότητα της προσέγγισης που υιοθετεί η παρούσα εργασία είναι η εφαρμογή του EDMS με τον ρεαλιστικότερο δυνατό τρόπο, δηλαδή με πραγματικά μετεωρολογικά στοιχεία ωριαίας συχνότητας, με πραγματικό μίγμα αεροσκαφών και με πραγματικές χρονικές κατανομές των κινήσεών τους. Επιπλέον, αυτό το καθαρά υπολογιστικό σκέλος που αφορά και στα τρία αεροδρόμια, συμπληρώνεται με άλλα δύο σκέλη που επεκτείνουν την εμβέλεια της παρούσας εργασίας πέρα από τις εκτιμήσεις ατμοσφαιρικής ρύπανσης γύρω από αεροδρόμια και τις αξιολογήσεις της ποιότητας αέρα στις επηρεαζόμενες περιοχές.

Το πρώτο πρόσθετο σκέλος είναι η αντιπαραβολή που επιχειρείται μεταξύ υπολογιστικών εκτιμήσεων και μετρήσεων, εκεί όπου είναι δυνατόν, δηλαδή μόνο στην περίπτωση του ΔΑΑ. Αυτή η περίπτωση ωστόσο, χαρακτηρίζεται από επαρκές πλήθος στοιχείων πεδίου (τέσσερις σταθμοί με ωριαίες καταγραφές για το μεγαλύτερο μέρος του έτους αναφοράς) ώστε η αντιπαραβολή τους με τα υπολογιστικά αποτελέσματα να καταλήξει σε ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Επισημαίνεται πάντως ότι το συγκεκριμένο σκέλος δεν αλλάζει το χαρακτήρα της μεθόδου από καθαρά υπολογιστική προσέγγιση σε συνδυαστική χρήση υπολογισμών-μετρήσεων, όπως αυτές που παρουσιάστηκαν στις ενότητες 13.2.1.2 και 13.2.1.3, δεδομένου ότι οι μετρήσεις συγκεντρώσεων δεν χρησιμοποιήθηκαν για την αλλαγή των αποτελεσμάτων των υπολογισμών, παρά μόνο για τον έλεγχό τους.

Το δεύτερο πρόσθετο σκέλος είναι η ανάλυση ευαισθησίας του EDMS, που εφαρμόστηκε στο σύνολο του συστήματος, προκειμένου να εξετασθεί η απόκρισή του υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες εισόδου. Συγκεκριμένα, κρατώντας ως βάση το πραγματικό υπόβαθρο του ΔΑΑ, και εισάγοντας ένα ρεαλιστικό σενάριο πτήσεων, ζητήθηκε από το EDMS να υπολογίσει τις συγκεντρώσεις, τόσο σε ολόκληρη την περιοχή επιρροής όσο και σε συγκεκριμένα σημεία, υπό μεταβαλλόμενες τιμές μιας σημαντικής παραμέτρου, ενώ όλες οι άλλες διατηρούνταν σταθερές. Με τον τρόπο αυτό εξήχθησαν δύο είδη συμπερασμάτων: το πρώτο αφορά την απόκριση του μοντέλου υπό διαφορετικές συνθήκες εισόδου, όπως προαναφέρθηκε· επομένως αυτό το είδος συμπερασμάτων αφορά κυρίως στις προσομοιώσεις και την αξιοπιστία του. Το δεύτερο όμως είδος συμπερασμάτων αφορά και στις πραγματικές καταστάσεις, δείχνοντας για παράδειγμα ότι η κάθετη κυκλοφορία στο επιφανειακό οριακό στρώμα, η οποία παρότι είναι έντονη στα μεσογειακά γεωγραφικά πλάτη σπανίως γίνεται αισθητή, προκαλεί εξίσου σημαντική ανάμιξη με την οριζόντια κυκλοφορία που γίνεται αισθητή ως άνεμος, και η ανάμιξη αυτή αραιώνει γρήγορα τις εκπομπές ρύπων στην

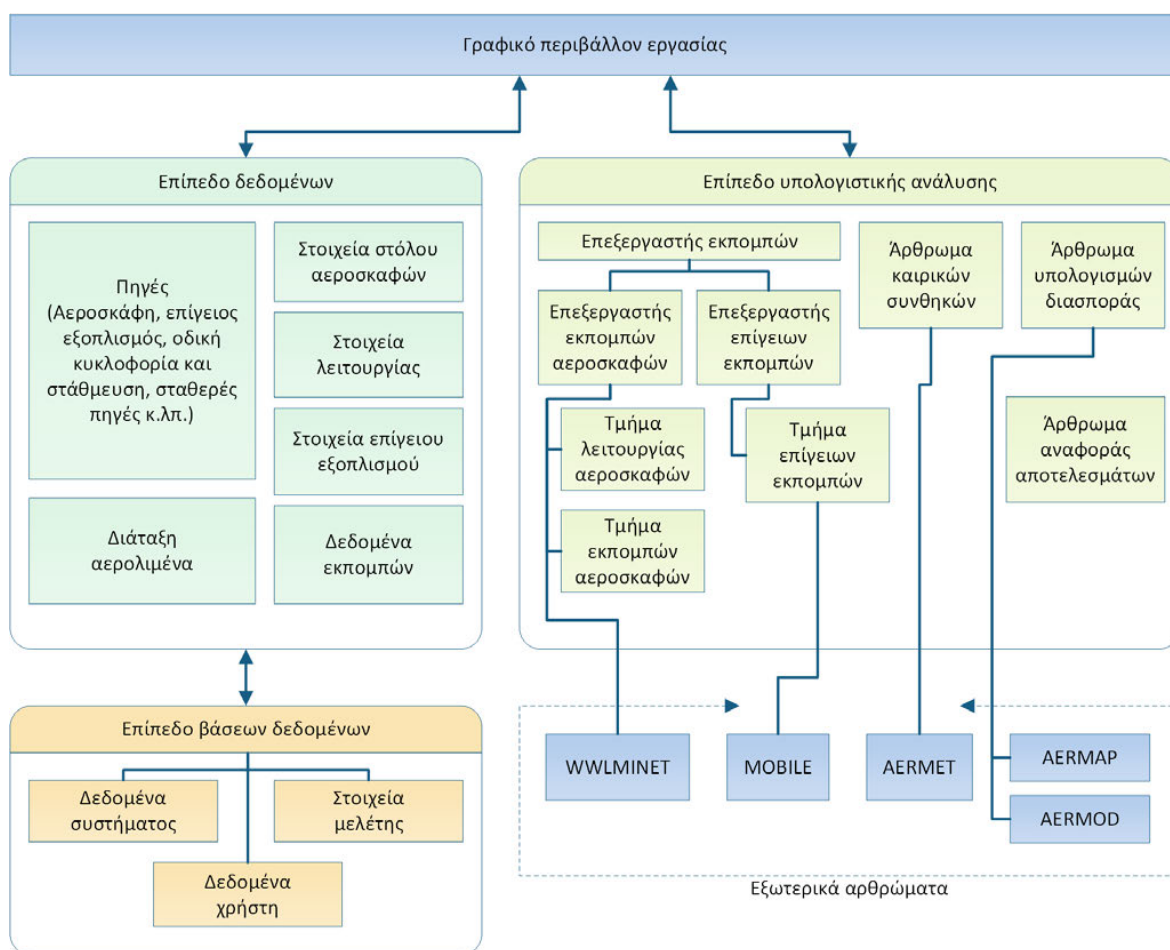
ατμόσφαιρα, διατηρώντας χαμηλά τις συγκεντρώσεις τους στη διάρκεια των περισσότερων ωρών της ημέρας, ιδιαίτερα κατά τη θερινή περίοδο.

14. Παράρτημα Δ: Στοιχεία τεκμηρίωσης κεφαλαίου 4.

Το EDMS (Emissions and Dispersion Modeling System) είναι ένα σύστημα συνδυασμένων μοντέλων εκπομπών και συγκεντρώσεων για την εκτίμηση και αξιολόγηση των επιπτώσεων στην ποιότητα του αέρα από τη λειτουργία αεροδρομίων. Το σύστημα αναπτύχθηκε για την FFA, την Ομοσπονδιακή Αρχή Πολιτικής Αεροπορίας των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής, σε συνεργασία με την Πολεμική Αεροπορία των ΗΠΑ.

Η ανάπτυξη του EDMS άρχισε το 1991, ως συνέχεια προσπαθειών υπολογιστικών προσομοιώσεων της ποιότητας του αέρα γύρω από αεροδρόμια που είχαν ξεκινήσει από το 1985. Σήμερα, το σύστημα EDRMS έχει φθάσει στην έκδοση 5.x και αξιοποιεί τις δυνατότητες των σύγχρονων προσωπικών υπολογιστών για την απογραφή των εκπομπών από όλες τις κύριες πηγές εντός και γύρω από ένα αεροδρόμιο, καθώς και για να υπολογιστούν οι συγκεντρώσεις των αέριων ρύπων στην περιοχή.

Η δομή και τα βασικά συστατικά του EDMS παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα.^[206] Ακολουθώντας μια αρχιτεκτονική που είναι συνήθης στα πολυεπίπεδα συστήματα προσομοιώσεων, στο EDMS έχει διαχωριστεί το επίπεδο αλληλεπίδρασης με το χρήστη, το επίπεδο υπολογιστικής ανάλυσης, το επίπεδο των βάσεων δεδομένων και τέλος τα εξωτερικά αρθρώματα που χρησιμοποιούνται για αυτοτελείς εργασίες. Συγκεκριμένα, η ομάδα ανάπτυξης του EDMS επέλεξε να αξιοποιήσει τα αποτελέσματα των εργασιών άλλων ομάδων της US-EPA που ειδικεύονται στις μετεωρολογικές υπολογιστικές προσεγγίσεις και στους υπολογισμούς συγκεντρώσεων κατόπιν διασποράς ρύπων στην ατμόσφαιρα, ενσωματώνοντας στο σύστημα τα κατάλληλα αρθρώματα, στις πλέον πρόσφατες κάθε φορά εκδόσεις. Με τον τρόπο αυτό, αφενός η πρωτογενής συνεισφορά της ομάδας του EDMS εστιάζεται στα συγγενέστερα προς αυτή πεδία, που είναι οι μέθοδοι υπολογισμού των εκπομπών από τις πηγές ενός αεροδρομίου, αφετέρου εξασφαλίζεται ότι οι υπολογισμοί μετεωρολογικών συνθηκών και διασποράς θα διεξάγονται από εξειδικευμένους προς τούτο κώδικες που έχουν αναπτυχθεί και εξελίσσονται υπό την αιγίδα της Υπηρεσίας που έχει την ευθύνη του περιβάλλοντος στις ΗΠΑ.



Σχήμα 37: Η αρχιτεκτονική του EDMS

Οι αέριοι ρύποι των οποίων τις εκπομπές και συγκεντρώσεις μπορεί να υπολογίσει το EDMS είναι οι εξής:

1. CO₂ (διοξείδιο του άνθρακα) μόνο για τα αεροσκάφη,
2. CO (μονοξείδιο του άνθρακα),
3. THC (ολικοί υδρογονάνθρακες) μόνο για τα αεροσκάφη και τις βοηθητικές μονάδες ισχύος,
4. NMHC (υδρογονάνθρακες πλην μεθανίου),
5. VOC (πτητικές οργανικές ουσίες),
6. TOG (σύνολο οργανικών αέριων ουσιών),
7. NO_x (οξειδία του αζώτου),
8. SO_x (οξειδία του θείου),
9. PM₁₀ (αιωρούμενα σωματίδια διαμέτρου μικρότερης των 10 μm)
10. PM_{2.5} (αιωρούμενα σωματίδια διαμέτρου μικρότερης των 2,5 μm)
11. Οργανικά αέρια 394 ειδών που απαντώνται σε ίχνη (Speciated Organic Gases),^[207] εκ των οποίων:

- τα 45 ανήκουν στους επικίνδυνους ρύπους (Hazardous Air Pollutants, HAPs) ενώ
- τα άλλα 349 δεν είναι τοξικά μόρια.

14.1. Μέθοδος υπολογισμού εκπομπών από αεροσκάφη

Στο σύστημα του EDMS περιλαμβάνεται το γραφικό περιβάλλον σχεδιασμού και εισαγωγής δεδομένων για τη διάταξη και τη λειτουργία ενός αερολιμένα. Με βάση τα δεδομένα αυτά, το EDMS υπολογίζει τις εκπομπές κάθε αεροσκάφους βάσει του κύκλου προσγείωσης-απογείωσής του (LTO cycle).

Ο τυπικός κύκλος LTO κατά ICAO παρουσιάστηκε στην ενότητα 12.3 (σελ. 332 και εξής), αλλά το EDMS χρησιμοποιεί τα ακόλουθα έξι στάδια αντί των τυπικών τεσσάρων προκειμένου να αυξήσει την ακρίβεια του υπολογισμού εκπομπών.^[208]

1. Προσέγγιση (approach): το εναέριο τμήμα της άφιξης του αεροσκάφους, το οποίο ξεκινά από την αρχή του προφίλ πτήσης ή του ύψους μίξης[†] (όποιο είναι χαμηλότερα) και φθάνει μέχρι την επαφή του αεροσκάφους με το διάδρομο.
2. Τροχοδρόμηση άφιξης (taxi-in): το επίγειο τμήμα της άφιξης, το οποίο ξεκινά με την επιβράδυνση του αεροσκάφους στο διάδρομο, περιλαμβανόμενης της χρήσης ανάστροφης ώσης, και ολοκληρώνεται με την πορεία του σκάφους από την έξοδο του διαδρόμου μέχρι την πύλη του αεροσταθμού.
3. Εκκίνηση μηχανών (startup): η έναυση και έναρξη λειτουργίας των μηχανών του αεροσκάφους στο χώρο της πύλης του αεροσταθμού, που αποτελεί το πρώτο βήμα της διαδικασίας αναχώρησης. Οι εκπομπές της εκκίνησης υπολογίζονται μόνο για σκάφη με μηχανές πιστοποιημένες κατά ICAO και αφορούν κυρίως σε υδρογονάνθρακες και άλλα οργανικά μόρια, δηλαδή συνυπολογίζονται στις ποσότητες THC, VOC, NMHC και TOG.
4. Τροχοδρόμηση αναχώρησης (taxi-in): το επίγειο τμήμα της αναχώρησης, το οποίο ξεκινά με την τροχοδρόμηση από την πύλη του αεροσταθμού μέχρι το άκρο του διαδρόμου.
5. Απογείωση (takeoff): το κύριο τμήμα της αναχώρησης, που ξεκινά από την επιτάχυνση στο διάδρομο και ολοκληρώνεται με την άνοδο του σκάφους έως το ύψος περικοπής ισχύος. Σε όλη τη διάρκεια της απογείωσης, οι μηχανές θεωρείται ότι παρέχουν τη μέγιστη ώση.

[†] Το EDMS θεωρεί ότι το ύψος μίξης δεν υπερβαίνει τα 1.000 ft (~305 m).

6. Ανύψωση (climb): το τελικό τμήμα της αναχώρησης, το οποίο ολοκληρώνεται με την ανύψωση του σκάφους είτε στο τέλος του προφίλ πτήσης είτε στο ύψος μίξης (όποιο είναι χαμηλότερα).

Ο υπολογισμός των εκπομπών από τα εναέρια τμήματα κάθε αεροπορικής κίνησης, καθώς και από την επιβράδυνση του σκάφους στο διάδρομο κατά την τροχοδρόμηση άφιξης, μπορεί να πραγματοποιείται με έναν από τους εξής δύο τρόπους:

- Στατιστική προσέγγιση: Με βάση τη μέθοδο Times in Mode (TIM) των ICAO και EPA, λαμβάνεται υπόψη η μέση διάρκεια κάθε μέρους της κίνησης, καθώς και οι μέσες εκπομπές ανά δευτερόλεπτο. Τα στοιχεία αυτά αντλούνται από πίνακες που αφορούν σε γενικευμένες κατηγορίες αεροσκαφών και αεροδρομίων· η γενικότητά τους αυτή μειώνει αναπόφευκτα την αντιπροσωπευτικότητά τους ως προς το εκάστοτε υπό μελέτη αεροδρόμιο, αλλά επιταχύνει πολύ τους υπολογισμούς.
- Δυναμική προσέγγιση: Βάσει της μεθόδου που περιγράφεται στο πρότυπο AIR1845 της Society of Automotive Engineers^[209] προσομοιώνονται τα εναέρια τμήματα κάθε πτήσης καθώς και η επίγεια επιβράδυνση, λαμβάνοντας υπόψη τα ειδικά χαρακτηριστικά κάθε σκάφους, όπως ο τύπος, οι μηχανές και το βάρος του, καθώς και την τοπική μετεωρολογία. Τα αποτελέσματα επομένως είναι σαφώς αντιπροσωπευτικότερα, παρότι ο υπολογιστικός χρόνος είναι σημαντικά μεγαλύτερος.

Σε όλες τις προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε η δεύτερη μέθοδος, λόγω της αυξημένης ρεαλιστικότητάς της.

Για τις εκπομπές του αεροπορικού εξοπλισμού, ιπτάμενου και μη, όπως π.χ. οι μηχανές των αεροσκαφών και οι μονάδες ή τα οχήματα επίγεια υποστήριξης, χρησιμοποιούνται οι συντελεστές εκπομπών του ICAO, οι οποίοι αντλούνται από τη βάση δεδομένων που διαχειρίζεται το EUROCONTROL.^[210] Αξίζει να σημειωθεί ότι για τον κύριο αέριο ρύπο που σχετίζεται με τη λειτουργία των αερολιμένων, τα NO_x, έχει βρεθεί πειραματικά (με μεθόδους φασματικής ανάλυσης)^[211] ότι η χρήση των συντελεστών αυτών για ορισμένα αεροσκάφη δίνει υψηλότερες από τις πραγματικές εκπομπές για το στάδιο που το αεροσκάφος μένει ακίνητο, παρότι για το CO οι πραγματικές εκπομπές είναι μεγαλύτερες από αυτές των συντελεστών ICAO.

14.2. Μέθοδος υπολογισμού συγκεντρώσεων

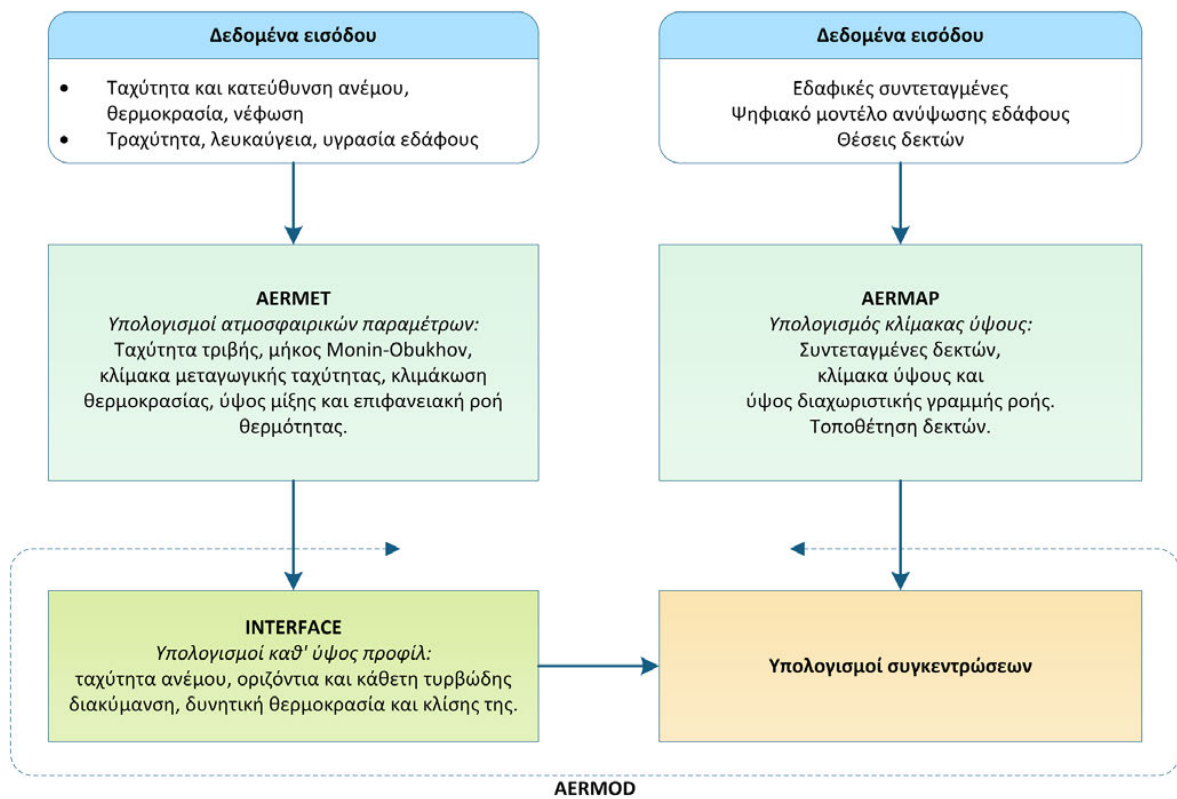
Μετά τον υπολογισμό των εκπομπών, το EDMS χρησιμοποιεί το σύστημα AERMOD για τον υπολογισμό της διασποράς των εκπεμπόμενων ουσιών και τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεών τους στα σημεία ενδιαφέροντος. Σύμφωνα με τη βασική περιγραφή της διαμόρφωσής του,^[104] τα κύρια χαρακτηριστικά του AERMOD συνοψίζονται ως εξής:

- Το AERMOD είναι ένα μοντέλο πλουμίου σταθερής κατάστασης, υπό την έννοια ότι οι υπολογισμοί του βασίζονται στην παραδοχή ότι το πεδίο συγκεντρώσεων στη διάρκεια της εξεταζόμενης ώρας καθορίζεται από το χρονικό μέσο όρο των μετεωρολογικών παραμέτρων της ώρας εκείνης. Η υπόθεση σταθερής κατάστασης αποδίδει χρήσιμα αποτελέσματα, δεδομένου ότι το πρωταρχικό ενδιαφέρον, ιδίως από κανονιστικής πλευράς, εστιάζεται στα στατιστικά χαρακτηριστικά της κατανομής συγκεντρώσεων και όχι τόσο σε συγκεκριμένες τιμές που εμφανίζονται σε ορισμένες θέσεις ή χρονικές στιγμές. Ο υπολογισμός συγκέντρωσης του AERMOD βασίζεται στην παραδοχή ότι στο μεν σταθεροποιημένο οριακό στρώμα (SBL) η συγκέντρωση ακολουθεί κατανομή Gauss τόσο στην οριζόντια όσο και στην κάθετη διεύθυνση, στο δε διαμεταγωγικό στρώμα (CBL) η οριζόντια κατανομή ακολουθεί την καμπύλη Gauss αλλά στην κάθετη διάσταση η συγκέντρωση κατανέμεται βάσει μιας συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας διπλής καμπύλης Gauss. Επιπρόσθετα, το AERMOD λαμβάνει υπόψη του το “plume lofting”, δηλαδή το φαινόμενο εκείνο που ένα μέρος της μάζας του πλουμίου, εκπεμπόμενου από πηγή με σημαντική άνωση, ανέρχεται και παραμένει κοντά στην κορυφή του σταθεροποιημένου στρώματος πριν αρχίσει να αναμιγνύεται εντός του διαμεταγωγικού στρώματος. Επίσης, το AERMOD παρακολουθεί εάν κάποιο μέρος της μάζας του πλουμίου διεισδύει στο υπερυψωμένο σταθερό στρώμα και κατόπιν επιτρέπει την επιστροφή του, αν και όταν χρειάζεται. Για πηγές που βρίσκονται τόσο στο διαμεταγωγικό όσο και στο σταθερό ατμοσφαιρικό στρώμα, το AERMOD συνυπολογίζει την ενίσχυση της πλευρικής διασποράς που προκαλεί ο μαιανδρισμός του πλουμίου.
- Χρησιμοποιώντας μια σχετικώς απλή προσέγγιση, το AERMOD ενσωματώνει τις σύγχρονες αντιλήψεις αναφορικά με τη ροή και τη διάχυση σε περίπλοκα εδαφικά ανάγλυφα. Ανάλογα με την κατάσταση, το πλούμιο μοντελοποιείται είτε να ακολουθεί το ανάγλυφο είτε να το συναντά. Η προσέγγιση αυτή σχεδιάστηκε με σκοπό να είναι ρεαλιστική από φυσικής άποψης και σχετικά απλή στην υλοποίησή της, αποφεύγοντας συγχρόνως τη διάκριση των εδαφικών αναγλύφων σε απλά, ενδιάμεσα και περίπλοκα, όπως απαιτούν άλλα μοντέλα κανονιστικής χρήσης. Με τον τρόπο αυτό, το AERMOD

δεν έχει ανάγκη χαρακτηρισμού των μερών του αναγλύφου, αφού όλη η επιφάνεια αντιμετωπίζεται με συνεκτικό και συνεχή τρόπο, λαμβάνοντας υπόψη τη διαχωριστική γραμμή ροής σε σταθερά στρωματοποιημένες συνθήκες.

- Μια από τις σημαντικές βελτιώσεις που εισάγει το AERMOD στην εφαρμοσμένη υπολογιστική προσομοίωση διασποράς αέριων ρύπων είναι η ικανότητά του να χαρακτηρίζει το οριακό στρώμα της ατμόσφαιρας διαμέσου της κλιμάκωσης του επιφανειακού και του διαμεταγωγικού στρώματος. Το μοντέλο κατασκευάζει τις καθ' ύψος ατμοσφαιρικές κατατομές των μετεωρολογικών παραμέτρων που απαιτούνται για τους υπολογισμούς διασποράς με βάση μετρήσεις και προεκβολές αυτών των μετρήσεων χρησιμοποιώντας σχέσεις ομοιότητας για την κλιμάκωση. Οι καθ' ύψος της ταχύτητας ανέμου, της κατεύθυνσής του, της τύρβης, της θερμοκρασίας και της θερμοκρασιακής κλίσης υπολογίζονται χρησιμοποιώντας όλες τις μετεωρολογικές καταγραφές. Το AERMOD σχεδιάστηκε να λειτουργεί με τις κατά το δυνατόν ελάχιστες μετεωρολογικές παρατηρήσεις. Για παράδειγμα, το μοντέλο απαιτεί μόνο μια επιφανειακή μέτρηση θερμοκρασίας και κατεύθυνσης και ταχύτητας ανέμου, σε ύψος από $7 \times z_0$ ως 100 m, όπου z_0 το ύψος της τραχύτητας του εδάφους. Χρειάζεται επίσης την παρατηρούμενη νεφοκάλυψη, αλλά αν η παράμετρος αυτή δεν είναι διαθέσιμη, μπορεί να υποκατασταθεί από δύο καθ' ύψος μετρήσεις της θερμοκρασίας, τυπικά στα 2 και στα 10 m, και μια μέτρηση ηλιακής ακτινοβολίας. Για τον υπολογισμό του ύψους του διαμεταγωγικού στρώματος στη διάρκεια όλης της ημέρας απαιτείται μια πλήρης πρωινή ραδιοβόλιση. Επίσης, απαιτούνται τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας (τραχύτητα, λόγος Bowen που αφορά στην υγρασία του εδάφους και λευκαύγεια) για την κατασκευή των προφίλ ομοιότητας των σχετικών παραμέτρων του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος. Σε αντίθεση με παλαιότερα μοντέλα, το AERMOD συνεκτιμά την καθ' ύψος ανομοιογένεια του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος στους υπολογισμούς διασποράς. Αυτό επιτυγχάνεται με την εξαγωγή μέσω των παραμέτρων του πραγματικού οριακού στρώματος και τη χρήση τους ως «ενεργές» παραμέτρους σε ένα ισοδύναμο ομογενές οριακό στρώμα.
- Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται η δομή του συστήματος του AERMOD και η ροή δεδομένων μέσα σε αυτό. Το σύστημα αποτελείται από δύο προεπεξεργαστές, το AERMET και το AERMAP, και το κύριο πρόγραμμα, το AERMOD. Ο κύριος στόχος του AERMET είναι να υπολογίζει τις παραμέτρους του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος προκειμένου να χρησιμοποιηθούν στο AERMOD. Το άρθρωμα INTERFACE, εσωτερικό συστατικό του συστήματος, μετατρέπει της παραμέτρους αυτές σε καθ' ύψος κατατομές των αναγκαίων μετεωρολογικών παραμέτρων, ενώ επιπρόσθετα, το AERMET μεταβιβάζει στο AERMOD όλες τις μετεωρολογικές παρατηρήσεις. Τα

δεδομένα εισόδου του AERMET είναι τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του εδάφους, υπό τη μορφή της λευκαύγειας, της τραχύτητας και του λόγου Bowen για την υγρασία, μαζί με τις μετεωρολογικές καταγραφές ταχύτητας και κατεύθυνσης ανέμου, θερμοκρασίας και νέφωσης. Με βάση αυτά, το AERMET υπολογίζει τις παραμέτρους του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος: ταχύτητα τριβής, μήκος Monin-Obukhov, κλίμακα μεταγωγικής ταχύτητας, κλιμάκωση θερμοκρασίας, ύψος μίξης και επιφανειακή ροή θερμότητας. Αυτές οι παράμετροι μεταβιβάζονται στη συνέχεια στο INTERFACE όπου, με τη χρήση σχέσεων ομοιότητας και σε συνδυασμό με τις μετρήσεις, υπολογίζονται οι καθ' ύψος κατατομές της ταχύτητας ανέμου, της οριζόντιας και κάθετης τυρβώδους διακύμανσης, της δυνητικής θερμοκρασίας και της κλίσης της.



Σχήμα 38: Η δομή του AERMOD

- Ο προεπεξεργαστής εδαφικού αναγλύφου AERMAP χρησιμοποιεί τα δεδομένα από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους για να υπολογίσει τα αντιπροσωπευτικά ύψη, επίσης γνωστά ως κλιμακες ύψους του αναγλύφου. Η κλιμακα ύψους του αναγλύφου υπολογίζεται για κάθε θέση δέκτη και χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί το ύψος της διαχωριστικής γραμμής ροής. Το AERMAP χρησιμοποιείται επίσης για τη δημιουργία δικτύων από δέκτες, στα οποία η ανύψωση κάθε δέκτη υπολογίζεται αυτόματα.

Ως κατακλείδα, αξίζει να σημειωθεί ότι, το AERMOD συνδυάζει ισορροπημένα φυσικές προσεγγίσεις με στοχαστικές εκτιμήσεις και έχει δοκιμαστεί επανειλημμένα με καλά αποτελέσματα.^[72,73,80]

15. Βιβλιογραφικές αναφορές

1. Ευρωπαϊκή Ένωση. Ενοποιημένη απόδοση της Συνθήκης για την Ευρωπαϊκή Ένωση και της Συνθήκης για τη λειτουργία της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Άρθρο 191 (πρώην άρθρο 174 της ΣΕΚ). [Internet]. 2010 [cited 2011 Jan 10]. Available from: <http://goo.gl/vyz1wY>
2. Διεθνής Αερολιμένας Αθηνών Α.Ε. Κινήσεις Αεροσκαφών 2011 [Internet]. 2012; Available from: <http://goo.gl/h2Wkkg>
3. Athens International Airport S.A. Aerostat Handbook 2010 [Internet]. 2011 [cited 2011 Oct 22]; Available from: <http://bit.ly/2Jq3Xg3>
4. Athens International Airport S.A. Aerostat Handbook 2009 [Internet]. 2010 [cited 2011 Oct 22]; Available from: <http://bit.ly/2JpMi8w>
5. Athens International Airport S.A. Aerostat Handbook 2008 [Internet]. 2009 [cited 2011 Oct 22]; Available from: <http://bit.ly/2JsqnXP>
6. Athens International Airport S.A. Aerostat Handbook 2007 [Internet]. 2008 [cited 2011 Oct 22]; Available from: <http://bit.ly/2stIj7v>
7. Athens International Airport S.A. Aerostat Handbook 2006 [Internet]. 2007 [cited 2011 Oct 22]; Available from: <http://bit.ly/2Ju0BsM>
8. Athens International Airport S.A. Aerostat Handbook 2005 [Internet]. 2006 [cited 2011 Oct 22]; Available from: <http://bit.ly/2sszgx1>
9. Athens International Airport S.A. Aerostat Handbook 2004 [Internet]. 2005 [cited 2011 Oct 22]; Available from: <http://bit.ly/2JmqWZF>
10. Athens International Airport S.A. Aerostat Handbook 2003 [Internet]. 2004 [cited 2011 Oct 22]; Available from: <http://bit.ly/2Jn27N1>
11. Athens International Airport S.A. Aerostat Handbook 2002 [Internet]. 2003 [cited 2011 Oct 22]; Available from: <http://bit.ly/2JpyRoZ>

12. Ν.2338/1995. Κύρωση Σύμβασης Ανάπτυξης του νέου Διεθνούς Αεροδρομίου της Αθήνας στα Σπάτα, ίδρυση της εταιρίας "Διεθνής Αερολιμένας Αθηνών Α.Ε.", έγκριση περιβαλλοντικών όρων και άλλες διατάξεις (Α' 202). 1995;
13. Athens International Airport S.A. Annual Report 2012 [Internet]. 2013;Available from: <http://bit.ly/2Jg2PbL>
14. Athens International Airport S.A. Aerostat Handbook 2011 [Internet]. 2012 [cited 2011 Oct 22];Available from: <http://bit.ly/2stOkL6>
15. Athens International Airport S.A. Care for the Environment 11 [Internet]. 2009 [cited 2011 Oct 30];Available from: <http://bit.ly/2JmFOat>
16. Διεθνής Αερολιμένας Αθηνών Α.Ε. Αναλυτικά Μετεωρολογικά Δεδομένα 2009. 2011;
17. Διεθνής Αερολιμένας Αθηνών Α.Ε., Υπηρεσία Περιβάλλοντος. Ηχητικό Ραντάρ (SODAR) Ηλεκτρομαγνητικό Ραντάρ (RASS) Έκθεση Δεδομένων Ιανουάριος έως Ιούνιος 2009. 2009;
18. Διεθνής Αερολιμένας Αθηνών Α.Ε., Υπηρεσία Περιβάλλοντος. Ηχητικό Ραντάρ (SODAR) Ηλεκτρομαγνητικό Ραντάρ (RASS) Έκθεση Δεδομένων Ιούλιος έως Δεκέμβριος 2009. 2010;
19. Lawrence MG. The Relationship between Relative Humidity and the Dewpoint Temperature in Moist Air: A Simple Conversion and Applications. Bull Amer Meteor Soc 2005;86(2):225-33.
20. ΥΠΑ. Στατιστικά στοιχεία αερολιμένα Θεσσαλονίκης 1994-2013 [Internet]. 2014;Available from: <http://goo.gl/Lsak6F>
21. ΥΠΑ. Ετήσια και μηνιαία στατιστικά στοιχεία αεροπορικής κίνησης [Internet]. 2015 [cited 2015 Jan 6];Available from: <http://goo.gl/MjsDSt>
22. ΥΠΑ. Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων Κρατικού Αερολιμένα Ηρακλείου «Ν. Καζαντζάκης». (Εκπονήθηκε για την Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας από την ΑΔΚ Σύμβουλοι Μηχανικοί Α.Ε. και το Γραφείο Περιβαλλοντικών & Συγκοινωνιακών Μελετών Φωτεινή Χωνιανάκη & Συνεργάτες). 2008;
23. ΥΠΑ. Περιβαλλοντικό Δελτίο Κρατικού Αερολιμένα Ηρακλείου Κρήτης 2009 [Internet]. 2010;Available from: <http://www.tcdn.teiher.gr/hcaa/DesktopDefault.aspx?TabId=352>
24. ΥΠΑ. Περιβαλλοντικό Δελτίο Κρατικού Αερολιμένα Ηρακλείου Κρήτης έτους 2008. 2009;
25. ΥΠΑ. Στατιστικά στοιχεία αερολιμένα Ηρακλείου 1994-2013 [Internet]. 2014;Available from: <http://goo.gl/esKk93>
26. ΥΠΑ. Μετεωρολογικά δεδομένα Ηρακλείου 2009 [Internet]. 2010 [cited 2011 Jan 10];Available from: <http://www.tcdn.teiher.gr/hcaa/DesktopDefault.aspx?TabId=355>
27. NOAA/ESRL. Radiosonde Database [Internet]. 2010 [cited 2011 Jan 10];Available from: <http://bit.ly/2ReYtbY>
28. Duchene N, Celikel A, Fleuti E, Fuller I, Hofmann P, Moore T, et al. Emission Inventory for Zurich Airport with Different Methodologies [Internet]. EUROCONTROL; 2004. Available from:

- http://www.eurocontrol.int/eec/gallery/content/public/document/eec/report/2004/034_AL_AQS_Emission_Inventory_for_Zurich_Airport.pdf
29. Θεοφανίδης Μ. Ατμοσφαιρική χημεία: Επίδραση των ακτινοβολιών - Προσομοίωση [Internet]. 2008 [cited 2012 Jan 21]; Available from: <http://bit.ly/2ITjbyj>
 30. Fleuti E, Hofmann P, Talerico C. Airport Local Air Quality, Sensitivity Analysis Zurich Airport [Internet]. 2006. Available from: http://www.eurocontrol.int/eec/public/standard_page/DOC_Report_2006_033.html
 31. EUROCONTROL. Airport Local Quality Studies Concept Document [Internet]. 2005 [cited 2012 Feb 11]; Available from: <http://bit.ly/2ITfaKe>
 32. Janicke Consulting. LASPORT, a program system for the calculation of airport-related pollutant emissions and concentrations in the lower atmosphere. [Internet]. 2012 [cited 2012 Feb 11]; Available from: <http://bit.ly/2ITnfP0>
 33. Pham VV, Tang J, Alam S, Lokan C, Abbass HA. Aviation emission inventory development and analysis. *Environmental Modelling & Software* 2010;25(12):1738–53.
 34. Ministry of Environment, Energy and Climate Change. Annual Inventory Submission under the Convention and the Kyoto Protocol for Greenhouse and Other Gases for the years 1990-2009 [Common Reporting Format data] [Internet]. 2011. Available from: http://unfccc.int/files/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/application/zip/grc-2011-crf-18oct.zip
 35. Masiol M, Harrison RM. Aircraft engine exhaust emissions and other airport-related contributions to ambient air pollution: A review. *Atmospheric Environment* 2014;95:409–55.
 36. Federal Aviation Administration. Aviation & Emissions - A Primer [Internet]. 2005 [cited 2016 May 1]. Available from: http://www.faa.gov/regulations_policies/policy_guidance/envir_policy/media/aeprimer.pdf
 37. Mavroidis I, Chaloulakou A. Long-term trends of primary and secondary NO₂ production in the Athens area. Variation of the NO₂/NO_x ratio. *Atmospheric Environment* 2011;45(38):6872–9.
 38. Delfino RJ. Epidemiologic evidence for asthma and exposure to air toxics: linkages between occupational, indoor, and community air pollution research. *Environ Health Perspect* 2002;110(Suppl 4):573–89.
 39. Peace H, Owen B, Raper DW. Identifying the contribution of different urban highway air pollution sources. *Sci Total Environ* 2004;334–335:347–57.
 40. Stedman J, Linehan E, King K. Quantification of the health effects of air pollution in the UK for the review of the National Air Quality Strategy [Internet]. UK: 1999. Available from: <http://j.mp/1gidoVo>
 41. Kraft M, Eikmann T, Kappos A, Künzli N, Rapp R, Schneider K, et al. The German view: Effects of nitrogen dioxide on human health - Derivation of health-related short-term and

- long-term values. *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 2005;208(4):305–18.
42. Curtis L, Rea W, Smith-Willis P, Fenyves E, Pan Y. Adverse health effects of outdoor air pollutants. *Environment International* 2006;32(6):815–30.
 43. Latza U, Gerdes S, Baur X. Effects of nitrogen dioxide on human health: Systematic review of experimental and epidemiological studies conducted between 2002 and 2006. *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 2009;212(3):271–87.
 44. Οδηγία 2008/50/ΕΚ. Ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και καθαρότερος αέρας για την Ευρώπη [Internet]. 2008 [cited 2013 Sep 15]. Available from: <https://goo.gl/gIbVwr>
 45. ΚΥΑ 14122/549/Ε.103/2011. Μέτρα για τη βελτίωση της ποιότητας της ατμόσφαιρας, σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της Οδηγίας 2008/50/ΕΚ (φ.ε.κ. Β' 488) [Internet]. 2011 [cited 2016 Nov 5]. Available from: <http://goo.gl/jHjhqc>
 46. Transportation Research Board of the National Academies. Development of a NO_x Chemistry Module for EDMS/AEDT to Predict NO₂ Concentrations [Internet]. 2017 [cited 2013 Apr 21]; Available from: <http://goo.gl/8eDuHc>
 47. Denby BR. Modelling of Nitrogen Dioxide (NO₂) for air quality assessment and planning relevant to the European Air Quality Directive [Internet]. Bilthoven, The Netherlands: European Topic Centre on Air and Climate Change (ETC/ACC); 2012. Available from: <http://goo.gl/FtQwu>
 48. Chaloulakou A, Mavroidis I, Gavriil I. Compliance with the annual NO₂ air quality standard in Athens. Required NO_x levels and expected health implications. *Atmospheric Environment* 2008;42(3):454–65.
 49. Mazzeo NA, Venegas LE, Choren H. Analysis of NO, NO₂, O₃ and NO_x concentrations measured at a green area of Buenos Aires City during wintertime. *Atmospheric Environment* 2005;39(17):3055–68.
 50. Ratliff G, Sequeira C, Waitz I, Ohsfeldt M, Thrasher T, Graham M, et al. Aircraft Impacts on Local and Regional Air Quality in the United States [Internet]. Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology; 2009. Available from: <http://j.mp/17Ypu6V>
 51. Pham VV, Tang J, Alam S, Lokan C, Abbass HA. Aviation emission inventory development and analysis. *Environmental Modelling & Software* 2010;25(12):1738–53.
 52. Starik AM. Gaseous and Particulate Emissions with Jet Engine Exhaust and Atmospheric Pollution [Internet]. In: *Advances on Propulsion Technology for High-Speed Aircraft*. Educational Notes RTO-EN-AVT-150, Paper 15. 2008. page 15-1-15–22. Available from: <http://goo.gl/MI3MEo>
 53. Unal A, Hu Y, Chang ME, Talat Odman M, Russell AG. Airport related emissions and impacts on air quality: Application to the Atlanta International Airport. *Atmospheric Environment* 2005;39(32):5787–98.
 54. Farias F, ApSimon H. Relative contributions from traffic and aircraft NO_x emissions to exposure in West London. *Environmental Modelling & Software* 2006;21(4):477–85.

55. Jones AM, Harrison RM, Baker J. The wind speed dependence of the concentrations of airborne particulate matter and NO_x. *Atmospheric Environment* 2010;44(13):1682–90.
56. Lin S, Munsie JP, Herdt-Losavio M, Hwang SA, Civerolo K, McGarry K, et al. Residential proximity to large airports and potential health impacts in New York State. *Int Arch Occup Environ Health* 2007;81(7):797–804.
57. Schürmann G, Schäfer K, Jahn C, Hoffmann H, Bauerfeind M, Fleuti E, et al. The impact of NO_x, CO and VOC emissions on the air quality of Zurich airport. *Atmospheric Environment* 2007;41(1):103–18.
58. Leighton PA. Photochemistry of air pollution [Internet]. New York: Academic Press; 1961 [cited 2013 Sep 15]. Available from: <http://goo.gl/jqgkpo>
59. Kondo Y. STRATOSPHERIC CHEMISTRY AND COMPOSITION | Reactive Nitrogen (NO_x and NO_y) [Internet]. In: *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*. Oxford: Academic Press; 2003 [cited 2011 Jan 11]. page 2193–202. Available from: <http://goo.gl/o27BYu>
60. Ehhalt DH, Wahner A. TROPOSPHERIC CHEMISTRY AND COMPOSITION | Oxidizing Capacity [Internet]. In: *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*. Oxford: Academic Press; 2003 [cited 2011 Jan 10]. page 2415–24. Available from: <http://goo.gl/Yuzd3N>
61. Jaffe D. Nitrogen Cycle, Atmospheric [Internet]. In: *Encyclopedia of Physical Science and Technology*. New York: Academic Press; 2001 [cited 2011 Jan 12]. page 431–40. Available from: <http://goo.gl/Qut3P3>
62. Jaffe DA, Weiss-Penzias PS. BIOGEOCHEMICAL CYCLES | Nitrogen Cycle. In: *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*. Elsevier; 2003. page 205–13.
63. Wood EC, Herndon SC, Timko MT, Yelvington PE, Miake-Lye RC. Speciation and chemical evolution of nitrogen oxides in aircraft exhaust near airports. *Environmental Science and Technology* 2008;42(6):1884–91.
64. European Commission WG-NO₂. Position paper on air quality: nitrogen dioxide [Internet]. 1997; Available from: <http://goo.gl/xrENLi>
65. Foster TJ, Wilson CW, Pourkashanian M, Williams A. Measurement and prediction of NO and NO₂ emissions from aero engines [Internet]. Lisbon, Portugal, 12-16 October 1998: NATO/RTO; 1998 [cited 2011 Jan 10]. Available from: <http://goo.gl/Dacgs4>
66. Herndon SC, Shorter JH, Zahniser MS, Nelson DD, Jayne J, Brown RC, et al. NO and NO₂ emission ratios measured from in-use commercial aircraft during taxi and takeoff. *Environmental Science and Technology* 2004;38(22):6078–84.
67. Pison I, Menut L. Quantification of the impact of aircraft traffic emissions on tropospheric ozone over Paris area. *Atmospheric Environment* 2004;38(7):971–83.
68. Owen RC, Brode R. Clarification on the Use of AERMOD Dispersion Modeling for Demonstrating Compliance with the NO₂ National Ambient Air Quality Standard [Internet]. 2014 [cited 2017 Jul 31]; Available from: <https://goo.gl/sVNdke>
69. U.S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division. Technical support document for NO₂-

- related AERMOD modifications [Internet]. 2015 [cited 2017 Jul 31]; Available from: <https://goo.gl/BbM7S3>
70. Κοινοπραξία HPC PASECO, DRAXIS & ΑΞΩΝ για το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. επικαιροποίηση της χαρτογραφικής απεικόνισης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης μέσω της καταγραφής ατμοσφαιρικών εκπομπών των πηγών και ανάπτυξης κατάλληλου υπολογιστικού εργαλείου. Αθήνα: 2015.
 71. CSSI Inc. Section "6.2.1.2 Scenario Properties" [Internet]. In: Emissions and Dispersion Modeling System (EDMS) 5.1.3 User's Manual. 2010. page 6–7. Available from: <http://goo.gl/5U3ZtT>
 72. Zou B, Benjamin Zhan F, Gaines Wilson J, Zeng Y. Performance of AERMOD at different time scales. *Simulation Modelling Practice and Theory* 2010;18(5):612–23.
 73. Rood AS. Performance evaluation of AERMOD, CALPUFF, and legacy air dispersion models using the Winter Validation Tracer Study dataset. *Atmospheric Environment* 2014;89:707–20.
 74. C. M. O'Connor, E. P. Anamaterou, E. G. Leivaditis. Air quality in the Mesogaia Plain in Eastern Attica before and after the opening of the Athens International Airport. *WIT Transactions on Ecology and the Environment* 2004;74:10.
 75. Pateraki St, Assimakopoulos VD, Maggos Th, Fameli KM, Kotroni V, Vasilakos Ch. Particulate matter pollution over a Mediterranean urban area. *Science of The Total Environment* 2013;463–464:508–24.
 76. Progiou AG, Ziomas IC. Predicting annual average particulate concentration in urban areas. *Science of The Total Environment* 2015;532:353–9.
 77. Pateraki St, Assimakopoulos DN, Flocas HA, Maggos Th, Vasilakos Ch. The role of meteorology on different sized aerosol fractions (PM10, PM2.5, PM2.5–10). *Science of The Total Environment* 2012;419:124–35.
 78. Grivas G, Chaloulakou A, Kassomenos P. An overview of the PM10 pollution problem, in the Metropolitan Area of Athens, Greece. Assessment of controlling factors and potential impact of long range transport. *Science of The Total Environment* 2008;389(1):165–77.
 79. Pikridas M, Tasoglou A, Florou K, Pandis SN. Characterization of the origin of fine particulate matter in a medium size urban area in the Mediterranean. *Atmospheric Environment* 2013;80:264–74.
 80. Perry SG, Cimorelli AJ, Paine RJ, Brode RW, Weil JC, Venkatram A, et al. AERMOD: A Dispersion Model for Industrial Source Applications. Part II: Model Performance against 17 Field Study Databases. *Journal of Applied Meteorology* 2005;44(5):694–708.
 81. Helmis CG, Sgouros G, Flocas H, Schäfer K, Jahn C, Hoffmann M, et al. The role of meteorology on the background air quality at the Athens International Airport. *Atmospheric Environment* 2011;45(31):5561–71.

82. Kanakidou M, Mihalopoulos N, Kindap T, Im U, Vrekoussis M, Gerasopoulos E, et al. Megacities as hot spots of air pollution in the East Mediterranean. *Atmospheric Environment* 2011;45(6):1223–35.
83. Klemm O, Ziomas IC, Balis D, Suppan P, Slemr J, Romero R, et al. A summer air-pollution study in Athens, Greece. *Atmospheric Environment* 1998;32(12):2071–87.
84. Melas D, Ziomas I, Klemm O, Zerefos CS. Anatomy of the sea-breeze circulation in Athens area under weak large-scale ambient winds. *Atmospheric Environment* 1998;32(12):2223–37.
85. Melas D, Ziomas I, Klemm O, Zerefos CS. Flow dynamics in Athens area under moderate large-scale winds. *Atmospheric Environment* 1998;32(12):2209–22.
86. Kumar A, Patil RS, Dikshit AK, Kumar R, Brandt J, Hertel O. Assessment of impact of unaccounted emission on ambient concentration using DEHM and AERMOD in combination with WRF. *Atmospheric Environment* 2016;142:406–13.
87. Penn SL, Arunachalam S, Tripodis Y, Heiger-Bernays W, Levy JI. A comparison between monitoring and dispersion modeling approaches to assess the impact of aviation on concentrations of black carbon and nitrogen oxides at Los Angeles International Airport. *Science of The Total Environment* 2015;527–528:47–55.
88. Saltelli A, Chan K, Scott EM. *Sensitivity Analysis*. Wiley; 2009.
89. Olivi M. *Sensitivity Analysis* [Internet]. EU Science Hub - European Commission 2015 [cited 2019 Jan 15]; Available from: <https://ec.europa.eu/jrc/en/samo>
90. European Commission. *Impact Assessment Guidelines* [Internet]. 2009. Available from: <http://bit.ly/2ssnTVs>
91. Zou B, Zeng Y, Liu H, Zhang H, Qiu Y, Zhan BF. Sensitivity Analysis of AERMOD in Modeling Local Air Quality under Different Model Options. In: 2010 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. 2010. page 1–4.
92. Grosch TG, Lee RF. Sensitivity of the AERMOD Air Quality Model to the Selection of Land Use Parameters. *WIT Transactions on Ecology and the Environment* 1999;37:10.
93. Sax T, Isakov V. A case study for assessing uncertainty in local-scale regulatory air quality modeling applications. *Atmospheric Environment* 2003;37(25):3481–9.
94. Faulkner WB, Shaw BW, Grosch T. Sensitivity of Two Dispersion Models (AERMOD and ISCST3) to Input Parameters for a Rural Ground-Level Area Source. *Journal of the Air & Waste Management Association* 2008;58(10):1288–96.
95. Dimov I, Georgieva R, Ostromsky Tz. Monte Carlo sensitivity analysis of an Eulerian large-scale air pollution model. *Reliability Engineering & System Safety* 2012;107:23–8.
96. Ostromsky T, Alexandrov V, Dimov I, Zlatev Z. On the Performance, Scalability and Sensitivity Analysis of a Large Air Pollution Model. *Procedia Computer Science* 2016;80:2053–61.

97. Ostromsky T, Dimov I, Alexandrov V, Zlatev Z. Preparing input data for sensitivity analysis of an air pollution model by using high-performance supercomputers and algorithms. *Computers & Mathematics with Applications* 2015;70(11):2773–82.
98. Pisoni E, Albrecht D, Mara TA, Rosati R, Tarantola S, Thunis P. Application of uncertainty and sensitivity analysis to the air quality SHERPA modelling tool. *Atmospheric Environment* 2018;183:84–93.
99. Federal Aviation Administration. Aviation Environmental Design Tool [Internet]. [cited 2017 Mar 11]; Available from: <https://aedt.faa.gov/>
100. Stull R. The Atmospheric Boundary Layer [Internet]. In: Wallace JM, Hobbs PV, editors. *Atmospheric Science: An Introductory Survey: Second Edition*. 2006 [cited 2019 Dec 30]. page 504. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780127329512500144?via%3Dihub>
101. Planetary boundary layer [Internet]. In: Wikipedia, the free encyclopedia. 2012 [cited 2012 Dec 26]. Available from: http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Planetary_boundary_layer&oldid=517409669
102. Mahrt L. BOUNDARY LAYERS | Stably Stratified Boundary Layer [Internet]. In: Holton JR, editor. *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*. Oxford: Academic Press; 2003. page 298–305. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B0122270908000919>
103. LeMone MA. BOUNDARY LAYERS | Convective Boundary Layer [Internet]. In: Holton JR, editor. *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*. Oxford: Academic Press; 2003. page 244–53. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B0122270908000853>
104. Cimorelli AJ, Perry SG, Venkatram A, Weil JC, Paine RJ, Wilson RB, et al. AERMOD: Description of Model Formulation. 2004;
105. Schnelle Jr. KB. Atmospheric Diffusion Modeling [Internet]. In: Robert A. Meyers, editor. *Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition)*. New York: Academic Press; 2003 [cited 2013 Jan 1]. page 679–705. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B0122274105000363>
106. Vallero DA. The Meteorological Bases of Atmospheric Pollution [Internet]. In: *Fundamentals of Air Pollution (Fourth Edition)*. Burlington: Academic Press; 2007. page 537–51. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123736154500212>
107. Nepf H. Velocity profiles and turbulence [Internet]. In: *Transport Processes in the Environment (Lecture Notes)*, MIT Open Courseware. 2008. Available from: <http://goo.gl/YZCqW>
108. Carslaw DC, Beevers SD, Ropkins K, Bell MC. Detecting and quantifying aircraft and other on-airport contributions to ambient nitrogen oxides in the vicinity of a large international airport. *Atmospheric Environment* 2006;40(28):5424–34.
109. US-EPA. AERMET: User’s Guide for the AERMOD Meteorological Preprocessor [Internet]. 2004; Available from: <http://www.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/aermetugb.pdf>

110. Cimorelli AJ, Perry SG, Venkatram A, Weil JC, Paine RJ, Wilson RB, et al. AERMOD: A Dispersion Model for Industrial Source Applications. Part I: General Model Formulation and Boundary Layer Characterization. *Journal of Applied Meteorology* 2005;44(5):682–93.
111. Turner DB. *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates: An Introduction to Dispersion Modeling*. Lewis; 1994.
112. Turner DB. Relationships Between 24-Hour Mean Air Quality Measurements and Meteorological Factors in Nashville, Tennessee. *Journal of the Air Pollution Control Association* 1961;11(10):483–9.
113. Almalawi A, Alsolami F, Khan AI, Alkhatlan A, Fahad A, Irshad K, et al. An IoT based system for magnify air pollution monitoring and prognosis using hybrid artificial intelligence technique. *Environmental Research* 2022;206:112576.
114. Gryech I, Asaad C, Ghogho M, Kobbane A. Applications of machine learning & Internet of Things for outdoor air pollution monitoring and prediction: A systematic literature review. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 2024;137:109182.
115. Liang L, Daniels J, Bailey C, Hu L, Phillips R, South J. Integrating low-cost sensor monitoring, satellite mapping, and geospatial artificial intelligence for intra-urban air pollution predictions. *Environmental Pollution* 2023;331:121832.
116. Masood A, Ahmad K. A review on emerging artificial intelligence (AI) techniques for air pollution forecasting: Fundamentals, application and performance. *Journal of Cleaner Production* 2021;322:129072.
117. Hamza M, Shaiba H, Marzouk R, Alhindi A, Asiri M, Yaseen I, et al. Big Data Analytics with Artificial Intelligence Enabled Environmental Air Pollution Monitoring Framework. *CMC* 2022;73(2):3235–50.
118. Zhao L, Li Z, Qu L. A novel machine learning-based artificial intelligence method for predicting the air pollution index PM2.5. *Journal of Cleaner Production* 2024;468:143042.
119. Vallero D. The Earth's Atmosphere [Internet]. In: *Fundamentals of Air Pollution (Fourth Edition)*. Burlington: Academic Press; 2008 [cited 2016 Oct 28]. page 52–76. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123736154500030>
120. Thurston GD. Outdoor Air Pollution: Sources, Atmospheric Transport, and Human Health Effects A2 - Quah, Stella R. [Internet]. In: *International Encyclopedia of Public Health (Second Edition)*. Oxford: Academic Press; 2017 [cited 2016 Oct 28]. page 367–77. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128036785003209>
121. World Health Organization. Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease [Internet]. 2016 [cited 2016 Dec 20]. Available from: <http://bit.ly/2Re8yWG>
122. World Health Organization. Burden of disease from Ambient Air Pollution for 2012 [Internet]. 2014 [cited 2016 May 8]; Available from: <https://goo.gl/1YOFjS>
123. Babatola SS. Global burden of diseases attributable to air pollution. *J Public Health Afr* 2018;9(3):813.

124. VN L, M P, K M, A C, D H, M V, et al. A multi-scale health impact assessment of air pollution over the 21st century. *Science of the Total Environment* 2015;514:439–49.
125. Yin P, Brauer M, Cohen AJ, Wang H, Li J, Burnett RT, et al. The effect of air pollution on deaths, disease burden, and life expectancy across China and its provinces, 1990–2017: an analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. *The Lancet Planetary Health* 2020;4(9):e386–98.
126. Shi X. Acute Effects of Air Pollution on Human Health in China: Evidence and Prospects. *CCDCW* 2021;3(45):941–2.
127. Chen X, Shao S, Tian Z, Xie Z, Yin P. Impacts of air pollution and its spatial spillover effect on public health based on China’s big data sample. *Journal of Cleaner Production* 2017;142:915–25.
128. Kan H. Climate change and human health in China. *Environmental Health Perspectives* [Internet] 2011 [cited 2021 Apr 11];119(2). Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21288808/>
129. Κατσούλης Μ. Επίδραση της μακροχρόνιας έκθεσης σε ατμοσφαιρική ρύπανση, σχετιζόμενη με κυκλοφοριακή κίνηση, στη νοσηρότητα και τη θνησιμότητα απο καρδιαγγειακά νοσήματα, στο Λεκανοπέδιο της Αττικής [Internet]. 2015; Available from: <http://bit.ly/2GQwLhM>
130. Anezakis VD, Iliadis L, Demertzis K, Mallinis G. Hybrid Soft Computing Analytics of Cardiorespiratory Morbidity and Mortality Risk Due to Air Pollution. In: Dokas IM, Bellamine-Ben Saoud N, Dugdale J, Díaz P, editors. *Information Systems for Crisis Response and Management in Mediterranean Countries*. Cham: Springer International Publishing; 2017. page 87–105.
131. Samoli E, Stafoggia M, Rodopoulou S, Ostro B, Declercq C, Alessandrini E, et al. Associations between Fine and Coarse Particles and Mortality in Mediterranean Cities: Results from the MED-PARTICLES Project. *Environ Health Perspect* 2013;121(8):932–8.
132. Εθνικό Κέντρο Περιβάλλοντος και Αειφόρου Ανάπτυξης. *Περιβάλλον και Υγεία 2019* [Internet]. 2020. Available from: <https://bit.ly/31yPMhH>
133. Vallero D. Chapter 14 - Air Pollution’s Impact on Ecosystems [Internet]. In: *Fundamentals of Air Pollution (Fifth Edition)*. Boston: Academic Press; 2014 [cited 2016 Oct 30]. page 341–68. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124017337000141>
134. Kim Y, Platt U, Gu MB, Iwahashi H. *Atmospheric and Biological Environmental Monitoring* [Internet]. Springer Science & Business Media; 2009. Available from: https://books.google.gr/books?id=giINz_IVOwAC
135. Jacobs C, Kelly WJ. *Smogtown: the Lung-Burning History of Pollution in Los Angeles* [Internet]. Woodstock: The Overlook Press; 2008. Available from: <http://chipjacobs.com/book/smogtown-book/>
136. NASA. *Aura Shows Human Fingerprint on Global Air Quality* [Internet]. 2015 [cited 2016 Dec 20]; Available from: <https://goo.gl/zbq9QF>

137. World Health Organization. Ambient (outdoor) air quality and health factsheet [Internet]. WHO2016 [cited 2016 Dec 18]; Available from: <https://goo.gl/ijomX>
138. Lelieveld J, Evans JS, Fnais M, Giannadaki D, Pozzer A. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature* 2015;525(7569):367–71.
139. Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Πρόγραμμα “Καθαρός αέρας για την Ευρώπη” [Internet]. 2013 [cited 2016 Dec 21]; Available from: <https://goo.gl/V7HNIn>
140. Ευρωπαϊκό Συμβούλιο. Δέσμη “καθαρός αέρας”: Καλύτερη ποιότητα αέρα για την Ευρώπη [Internet]. 2013 [cited 2016 Dec 21]; Available from: <https://goo.gl/BTGnMu>
141. European Environment Agency. Air quality in Europe - 2016 report [Internet]. Copenhagen, Denmark: 2016 [cited 2016 Dec 3]. Available from: <http://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2016>
142. NASA. NASA Images Show Human Fingerprint on Global Air Quality – Release Materials [Internet]. 2015 [cited 2016 Dec 19]; Available from: <http://svs.gsfc.nasa.gov/12094>
143. Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. Ετήσια Έκθεση Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης 2015 [Internet]. Αθήνα: 2016 [cited 2016 Dec 4]. Available from: <https://goo.gl/9OvPtU>
144. Οδηγία 80/779/ΕΟΚ. Οριακές τιμές και καθοδηγητικές τιμές ποιότητας της ατμόσφαιρας για το διοξείδιο του θείου και τα αιωρούμενα σωματίδια [Internet]. 1980 [cited 2016 May 8]. Available from: <http://goo.gl/AQpKbD>
145. Οδηγία 85/203/ΕΟΚ. Προδιαγραφές ποιότητας του αέρα για το διοξείδιο του αζώτου [Internet]. 1985 [cited 2016 May 10]. Available from: <http://goo.gl/2Qxyjf>
146. Οδηγία 2004/107/ΕΚ. Αρσενικό, κάδμιο, υδράργυρος, νικέλιο και πολυκυκλικό αρωματικό υδρογονάνθρακες στον ατμοσφαιρικό αέρα [Internet]. 2004 [cited 2016 May 10]. Available from: <http://goo.gl/W9Tn3s>
147. Οδηγία 2008/1/ΕΚ. Ολοκληρωμένη πρόληψη και έλεγχος της ρύπανσης [Internet]. 2008 [cited 2016 May 10]. Available from: <http://goo.gl/cf8VGZ>
148. ΚΥΑ 22306/1075/Ε103/2007. Τιμές-στόχοι και όρια εκτίμησης των συγκεντρώσεων του αρσενικού, του καδμίου, του υδραργύρου, του νικελίου και των πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων στον ατμοσφαιρικό αέρα, σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της οδηγίας 2004/107/ΕΚ (φ.ε.κ. Β’ 920) [Internet]. 2007. Available from: <http://goo.gl/YbxcHs>
149. European Environment Agency. EU urban population exposed to harmful levels of air pollutants in 2012-2014 [Internet]. 2016 [cited 2016 Dec 23]; Available from: <https://goo.gl/pvuxym>
150. Iatrou K. 100 Years of Commercial Aviation [Internet]. 2014 [cited 2016 Oct 22]; Available from: <https://goo.gl/Qas9wh>
151. Air Transport Action Group. Aviation Benefits Beyond Borders 2014 Report [Internet]. 2014. Available from: <http://goo.gl/iAR1E3>

152. Air Transport Action Group. Aviation Benefits Beyond Borders 2014 Report - EU28 [Internet]. 2014. Available from: <http://goo.gl/2xZDaG>
153. Παπανδρώνου Γ. Η γέννηση και η ανάπτυξη της πολιτικής αεροπορίας στην Ελλάδα του μεσοπολέμου [Internet]. 2005; Available from: <http://bit.ly/2GQnVI8>
154. Κωστάκη Ι. Τα ελληνικά περιφερειακά αεροδρόμια: χωρική διάρθρωση και ανάπτυξη [Internet]. 2009 [cited 2016 Apr 28]; Available from: <http://bit.ly/2GSnpLL>
155. Penner JE, Lister DH, Griggs DJ, Dokken DJ, McFarland M. Aviation and the Global Atmosphere [Internet]. IPCC; 1999. Available from: <http://goo.gl/XLG4eH>
156. Lee DS, Pitari G, Grewe V, Gierens K, Penner JE, Petzold A, et al. Transport impacts on atmosphere and climate: Aviation. *Atmospheric Environment* 2010;44(37):4678–734.
157. ICAO. Airport Air Quality Manual [Internet]. 2011 [cited 2016 Apr 29]. Available from: <https://goo.gl/jgFUQ9>
158. Stettler MEJ, Eastham S, Barrett SRH. Air quality and public health impacts of UK airports. Part I: Emissions. *Atmospheric Environment* 2011;45(31):5415–24.
159. Airports Council International - Europe Environmental Strategy Committee. Effects of Air Traffic on Air Quality in the Vicinity of European Airports. Local air quality assessments at and around European airports based on the airspace closure in Europe during the volcano eruption in Iceland in April 2010. [Internet]. 2010. Available from: www.aci-europe.org/component/downloads/downloads/1467.html
160. International Civil Aviation Organization. Environmental Protection, Volume II - Aircraft Engine Emissions, Annex 16 to the Convention on the International Civil Aviation [Internet]. 2008 [cited 2016 Apr 29]; Available from: <https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/004/icao.annex.16.v2.2008.pdf>
161. Lee DS, Fahey DW, Forster PM, Newton PJ, Wit RCN, Lim LL, et al. Aviation and global climate change in the 21st century. *Atmospheric Environment* 2009;43(22–23):3520–37.
162. Archer D, Saarlans M. Introduction to aerospace propulsion. Prentice Hall; 1996.
163. Aloysius S, Pearce D, Wrobel L. Comparison of CFD and Lagrangian Dispersion Methods – Simple Scenario during Take-off [Internet]. EUROCONTROL Experimental Centre; 2007. Available from: <http://goo.gl/MCI9gR>
164. Mazaheri M, Johnson GR, Morawska L. An inventory of particle and gaseous emissions from large aircraft thrust engine operations at an airport. *Atmospheric Environment* 2011;45(20):3500–7.
165. European Aviation Safety Agency. ICAO Aircraft Engine Emissions Databank [Internet]. 2016 [cited 2016 May 2]; Available from: <https://www.easa.europa.eu/document-library/icao-aircraft-engine-emissions-databank>
166. Heathrow Airport Ltd. Heathrow Air Quality Strategy 2011-2020 [Internet]. 2010 [cited 2016 May 3]. Available from: <http://goo.gl/Y4yx5C>

167. Yim SHL, Stettler MEJ, Barrett SRH. Air quality and public health impacts of UK airports. Part II: Impacts and policy assessment. *Atmospheric Environment* 2013;67:184–92.
168. Nambisan SS, Kajkowski J, Menon R. A Preliminary Survey of Ground Service Equipment Running Times and Its Implications for Air Quality Estimates at Airports [Internet]. In: *The 2020 Vision of Air Transportation*. American Society of Civil Engineers; 2000 [cited 2016 May 4]. page 144–52. Available from: <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40530%28303%2911>
169. Bennett M, Christie SM, Graham A, Thomas BS, Vishnyakov V, Morris K, et al. Composition of Smoke Generated by Landing Aircraft. *Environ Sci Technol* 2011;45(8):3533–8.
170. Morris KM. An estimation of the tyre material erosion from measurements of aircraft. In: *British Airways Environmental Affairs, British Airways Technical Documents Relating to the Aircraft Operations Supporting the Project for the Sustainable Development of Heathrow*. [Internet]. 2005 [cited 2016 May 2]; Available from: http://www.britishairways.com/cms/global/pdfs/csr/PSDH_Technical_Reports.pdf
171. Alroqi AA, Wang W. Comparison of Aircraft Tire Wear with Initial Wheel Rotational Speed. *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace* [Internet] 2015;2(1). Available from: <http://goo.gl/zxjdoo>
172. Amato F, Moreno T, Pandolfi M, Querol X, Alastuey A, Delgado A, et al. Concentrations, sources and geochemistry of airborne particulate matter at a major European airport. *J Environ Monit* 2010;12(4):854–62.
173. Jacobs U.K. Limited. Module 6: Air Quality Local Assessment - Detailed Emissions Inventory and Dispersion Modelling [Internet]. 2015 [cited 2016 May 2]. Available from: <https://goo.gl/vxhu0v>
174. Targino AC, Machado BLF, Krecl P. Concentrations and personal exposure to black carbon particles at airports and on commercial flights. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 2017;52:128–38.
175. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. *Understanding Airport Air Quality and Public Health Studies Related to Airports* [Internet]. 2015 [cited 2017 Jan 22]. Available from: <http://nap.edu/22119>
176. Carrington D. Solar plane makes history after completing round-the-world trip [Internet]. *The Guardian* 2016 [cited 2017 Jan 22]; Available from: <https://goo.gl/5fb1Ov>
177. Metz C. Facebook's Giant Internet-Beaming Drone Finally Takes Flight [Internet]. *WIRED* 2016 [cited 2017 Jan 22]; Available from: <https://goo.gl/C27RWN>
178. Airbus. E-Fan Electric Aircraft [Internet]. *airbusgroup* 2016 [cited 2017 Jan 22]; Available from: <https://goo.gl/PxrSfV>
179. Loff S. NASA's X-57 Electric Research Plane [Internet]. *NASA* 2016 [cited 2017 Jan 22]; Available from: <https://www.nasa.gov/image-feature/nasas-x-57-electric-research-plane>

180. Conti ME, Cecchetti G. Biological monitoring: lichens as bioindicators of air pollution assessment — a review. *Environmental Pollution* 2001;114(3):471-92.
181. Asta J, Erhardt W, Ferretti M, Fornasier F. European guideline for mapping lichen diversity as an indicator of environmental stress. *ResearchGate* [Internet] 2016 [cited 2017 Jan 29]; Available from: <http://bit.ly/2IT55wD>
182. Καρανδεινού-Ρήγα Α. Οι επίφλοιοι λειχήνες των δρυοσυστάδων *Quercus* spp. βιοδείκτες - βιομετρητές της ατμοσφαιρικής ρύπανσης [Internet]. 1992 [cited 2017 Jan 29]; Available from: <http://bit.ly/2GRCjZq>
183. Ait HM, Maatoug M, Mihoub F, Benouadah MH. Air Pollution Mapping with Bio-Indicators in Urban Areas [Internet]. In: *Air Quality - Measurement and Modeling*. 2016. Available from: <https://goo.gl/c6g4SB>
184. Concha-Graña E, Muniategui-Lorenzo S, De Nicola F, Aboal JR, Rey-Asensio AI, Giordano S, et al. Matrix solid phase dispersion method for determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in moss. *Journal of Chromatography A* 2015;1406:19-26.
185. Environmental Research Group at King's College London. London Air Quality Network [Internet]. 2016 [cited 2017 Feb 26]; Available from: <http://www.londonair.org.uk>
186. Airparif. Air quality monitoring network in Île-de-France [Internet]. 2017 [cited 2017 Feb 26]; Available from: <https://www.airparif.asso.fr>
187. Senate Department of Urban Development and Environment. Berlin Air Quality Monitoring Network [Internet]. 2017 [cited 2017 Feb 26]; Available from: <http://bit.ly/2IT8UCe>
188. City of London. Air quality monitoring [Internet]. 2016 [cited 2017 Feb 26]; Available from: <http://bit.ly/2IT9e3z>
189. Fraport AG. Air Quality [Internet]. 2017 [cited 2017 Feb 26]; Available from: <http://bit.ly/2ITacga>
190. Munich Airport. Air quality [Internet]. 2017 [cited 2017 Feb 26]; Available from: <http://bit.ly/2ITa5S7>
191. Berlin Brandenburg Airport. Air quality monitoring [Internet]. Berlin Brandenburg Airport 2017 [cited 2017 Feb 26]; Available from: <http://bit.ly/2ITenZE>
192. Heathrow Airwatch. Monitoring data [Internet]. 2017 [cited 2017 Feb 26]; Available from: <http://bit.ly/2IT8Br2>
193. Airparif. Survol [Internet]. 2016 [cited 2017 Jun 24]; Available from: <http://survol.airparif.fr/>
194. Aeroporti di Roma. Fiumicino Traffic data [Internet]. 2017 [cited 2017 Feb 20]; Available from: <http://bit.ly/2mf1sOy>
195. Aeroporti di Roma. Ciampino Traffic data [Internet]. 2017 [cited 2017 Feb 20]; Available from: <http://bit.ly/2mfcdjL>

196. Vichi F, Frattoni M, Imperiali A, Balducci C, Cecinato A, Perilli M, et al. Civil aviation impacts on local air quality: A survey inside two international airports in central Italy. *Atmospheric Environment* 2016;142:393–405.
197. Tesseraux I. Risk factors of jet fuel combustion products. *Toxicology Letters* 2004;149(1–3):295–300.
198. Lai CH, Chuang KY, Chang JW. Characteristics of nano-/ultrafine particle-bound PAHs in ambient air at an international airport. *Environ Sci Pollut Res* 2013;20(3):1772–80.
199. Hudda N, Gould T, Hartin K, Larson TV, Fruin SA. Emissions from an international airport increase particle number concentrations 4-fold at 10 km downwind. *Environ Sci Technol* 2014;48(12):6628–35.
200. European Environment Agency. The application of models under the European Union's Air Quality Directive: A technical reference guide [Internet]. Copenhagen: 2011 [cited 2017 Jan 29]. Available from: <https://goo.gl/Q24QFG>
201. Bruce Denby. Guidance on the use of models for the European Air Quality Directive, ETC/ACC Report Version 6.2. 2010.
202. Kassteele J van de, Koelemeijer RBA, Dekkers ALM, Schaap M, Homan CD, Stein A. Statistical mapping of PM10 concentrations over Western Europe using secondary information from dispersion modeling and MODIS satellite observations. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 2006;21(2):183–94.
203. Sarigiannis DA, Soulakellis NA, Sifakis NI. Information Fusion for Computational Assessment of Air Quality and Health Effects. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 2004;70(2):235–45.
204. Sarigiannis DA, A. Gotti. Satellite-assisted air-quality assessment: an integrated computational tool for air quality management [Internet]. Thessaloniki: 2012 [cited 2017 Feb 16]. Available from: <http://bit.ly/2lQ1Wi3>
205. Simonetti I, Maltagliati S, Manfreda G. Air quality impact of a middle size airport within an urban context through EDMS simulation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 2015;40:144–54.
206. CSSI Inc. Section "1.3 System Architecture" [Internet]. In: Emissions and Dispersion Modeling System (EDMS) 5.1.3 User's Manual. 2010. page 1–5. Available from: <http://goo.gl/5U3ZtT>
207. California Air Resources Board, Planning and Technical Support Division. Development of Organic Emission Estimates for California's Emission Inventory and Air Quality Models [Internet]. 2000; Available from: <http://goo.gl/MhqXhV>
208. CSSI Inc. Section "2.3 Aircraft Activity" [Internet]. In: Emissions and Dispersion Modeling System (EDMS) 5.1.3 User's Manual. 2010. page 2–5. Available from: <http://goo.gl/5U3ZtT>
209. Society of Automotive Engineers. Procedure for the Calculation of Airplane Noise in the Vicinity of Airports (Aerospace Information Report, Standard: AIR1845 Revision: A) [Internet]. 2012; Available from: <http://j.mp/1tzRu7w>

210. EUROCONTROL. Base of Aircraft Data Factsheet [Internet]. 2015; Available from: <http://bit.ly/2Re0tRV>
211. Schäfer K, Jahn C, Sturm P, Lechner B, Bacher M. Aircraft emission measurements by remote sensing methodologies at airports. *Atmospheric Environment* 2003;37(37):5261–71.