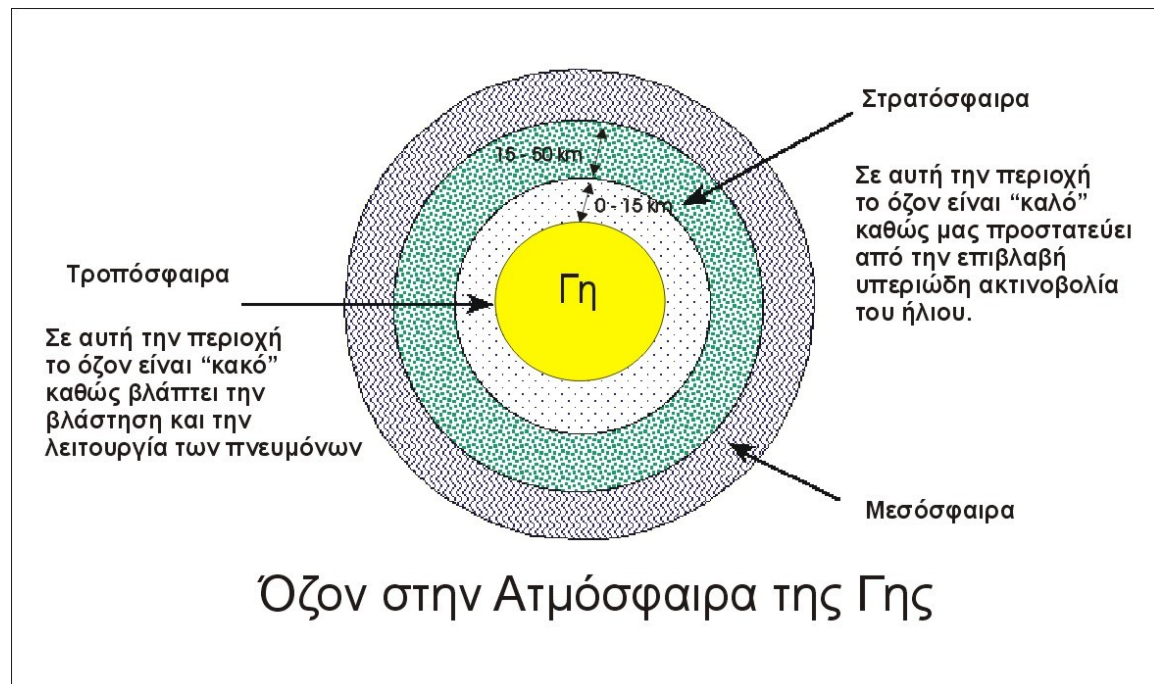


Τροποσφαιρικό Όζον Αστικό ή Παγκόσμιο πρόβλημα ρύπανσης;

Δρ. Πρόδρομος Ζάνης
Εργαστήριο Φυσικής Ατμόσφαιρας, ΑΠΘ

1. Εισαγωγή

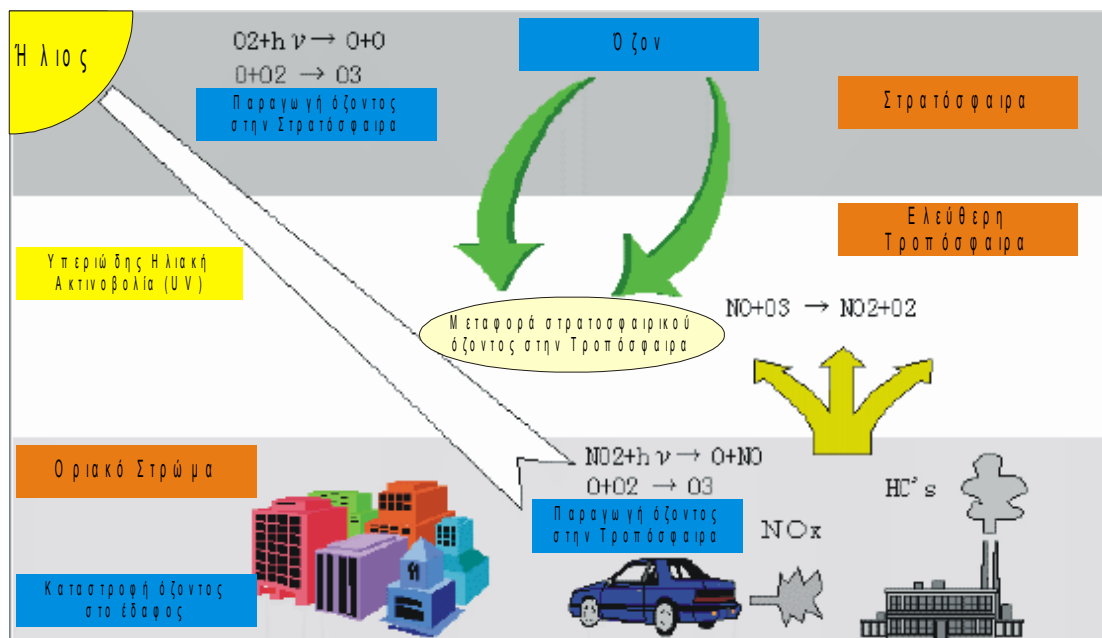
Στο ευρύ κοινό είναι γενικά γνωστό ότι το όζον είναι ένα αέριο στοιχείο που παράγεται στην στρατόσφαιρα (15-50 km) όπου και βρίσκεται περίπου το 90% του ολικού όζοντος της ατμόσφαιρας της γης. Το στρατοσφαιρικό όζον είναι το λεγόμενο «καλό» όζον γιατί δρα ως φίλτρο που μας προστατεύει από τις επιβλαβείς υπεριώδεις ακτινοβολίες. Η μείωση του όζοντος στην στρατόσφαιρα από την χρήση ανθρωπογενών χημικών στοιχείων όπως οι χλωροφθοράνθρακες τις τελευταίες δεκαετίες του 20^{ου} αιώνα είναι ένα πρόβλημα σε παγκόσμια κλίμακα και έχει απασχολήσει ιδιαίτερα αλλά και συνεχίζει να απασχολεί τόσο την επιστημονική κοινότητα όσο και την κοινή γνώμη και τις κυβερνήσεις των κρατών. Το υπόλοιπο 10% του όζοντος βρίσκεται στο χαμηλότερο στρώμα της ατμόσφαιρας, την τροπόσφαιρα (0-15 km). Το όζον χαμηλά στο έδαφος είναι ένας ρύπος που συνδέεται με επεισόδια φωτοχημικού νέφους σε αστικά κέντρα και γύρω από αυτά, όπου μπορεί να προκαλέσει ποικίλα προβλήματα στον άνθρωπο και την φύση όταν ξεπεραστούν κάποιες οριακές τιμές. Για αυτό τον λόγο έχει επικρατήσει να αποκαλούμε το τροποσφαιρικό όζον ως το «κακό» όζον. Είναι χαρακτηριστική η φράση για το όζον «good up high, bad nearby» που σημαίνει καλό εκεί ψηλά, κακό εδώ γύρω (Σχήμα 1). Το ερώτημα που τίθεται είναι εάν η αύξηση του τροποσφαιρικού όζοντος είναι ένα πρόβλημα που αφορά μόνο το αστικό περιβάλλον ή είναι ένα πρόβλημα που εκτείνεται σε παγκόσμια κλίμακα.



Σχήμα 1: Το όζον στην ατμόσφαιρα της Γης.

2. Η προέλευση του όζοντος της τροπόσφαιρας και η σημασία του

Σήμερα γνωρίζουμε ότι η προέλευση του τροποσφαιρικού όζοντος (όπως φαίνεται στο Σχήμα 2) αφενός είναι η φωτοχημική παραγωγή υπό την παρουσία διάφορων πρωτογενών ρύπων (π.χ. οξείδια του αζώτου, υδρογονάνθρακες) και του φωτός, και αφετέρου η μεταφορά στρατοσφαιρικού όζοντος προς την τροπόσφαιρα.



Σχήμα 2: Σχηματική παράσταση που δείχνει την προέλευση του όζοντος της τροπόσφαιρας.

Θα πρέπει να επισημανθεί ότι μέχρι περίπου και τα τέλη της δεκαετίας του '70 η επιστημονική κοινότητα θεωρούσε ότι το όζον στην τροπόσφαιρα είναι ένα αδρανές αέριο που δεν αντιδρά με άλλα στοιχεία και ότι προέρχεται σχεδόν αποκλειστικά από την κατώτερη στρατόσφαιρα (από διεισδύσεις στρατοσφαιρικού όζοντος στην τροπόσφαιρα) και καταστρέφεται στο έδαφος. Ήταν στα τέλη της δεκαετίας του '70 και '80 που τέθηκαν οι βάσεις της θεωρίας της φωτοχημικής παραγωγής του τροποσφαιρικού όζοντος. Το έναυσμα δόθηκε από την προσπάθεια για την εξήγηση του φωτοχημικού νέφους του Λος Άντζελες στην δεκαετία του '60 από όπου διαπιστώθηκε ότι το φωτοχημικό νέφος (ή ρύπανση του όζοντος) δημιουργείται από μία πολύπλοκη σειρά χημικών αντιδράσεων που περιλαμβάνουν πτητικούς υδρογονάνθρακες και οξείδια του αζώτου από βιομηχανικές πηγές και αυτοκίνητα υπό την δράση του ηλιακού φωτός. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνει κατά την διάρκεια της ημέρας, η ηλιακή ενέργεια επιταχύνει αυτές τις χημικές αντιδράσεις με αποτέλεσμα την αύξηση της ποσότητας όζοντος που παράγεται. Αντίστροφα, όταν η θερμοκρασία μειώνεται οι χημικές αντιδράσεις επιβραδύνουν και το φωτοχημικό νέφος σπάνια δημιουργείται. Η παραγωγή του τροποσφαιρικού όζοντος είναι λοιπόν ένα φαινόμενο που ευνοείται κατά την διάρκεια της ημέρας και των θερμών μηνών του έτους (τέλη ανοίξεως και καλοκαίρι).

Το τροποσφαιρικό όζον έχει πολλαπλή σημασία για την ατμόσφαιρα της γης. Καταρχήν το τροποσφαιρικό όζον κατέχει κεντρικό ρόλο στην χημεία της τροπόσφαιρας καθώς αποτελεί την βασική πηγή του πιο σημαντικού οξειδωτικού

μέσου στην τροπόσφαιρα, της ρίζας του υδροξυλίου (OH). Με πιο απλά λόγια το υδροξύλιο αποτελεί το ισχυρότερο «απορρυπαντικό» της ατμόσφαιρας που την καθαρίζει από μια σειρά οργανικών και ανόργανων ενώσεων που εκπέμπονται από φυσικές ή ανθρωπογενείς πηγές. Φαντασθείτε πως υπό την έλλειψη της ρίζας του υδροξυλίου όλες αυτές οι ενώσεις θα είχαν πολύ μεγάλο χρόνο ζωής και θα συσσωρεύονταν στα ανώτερα στρώματα της τροπόσφαιρας δρώντας επικουρικά στο γνωστό φαινόμενο του θερμοκηπίου που προκαλείται από ενώσεις όπως το CO₂, το μεθάνιο και βέβαια οι υδρατμοί. Αυτό θα είχε σαν συνέπεια ότι μια σειρά από αέριες ενώσεις που δεν συνεισφέρουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου θα συνέβαλλαν σε ακόμα μεγαλύτερες θερμοκρασίες στο πλανήτη μας.

Κατά δεύτερο λόγο το τροποσφαιρικό όζον που βρίσκεται στα υψηλότερα στρώματα της τροπόσφαιρας είναι από μόνο του ένα θερμοκηπικό αέριο που σημαίνει ότι δρα και αυτό επικουρικά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Πρέπει να επισημανθεί ότι η αύξηση του τροποσφαιρικού όζοντος παγκοσμίως συνεισφέρει περίπου το 1/3 από την αύξηση του CO₂ στην ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου από το προβιομηχανικά χρόνια έως σήμερα. Δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι το CO₂ είναι το βασικότερο αέριο που συνεισφέρει στην ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου σε σχέση με τα προβιομηχανικά χρόνια.

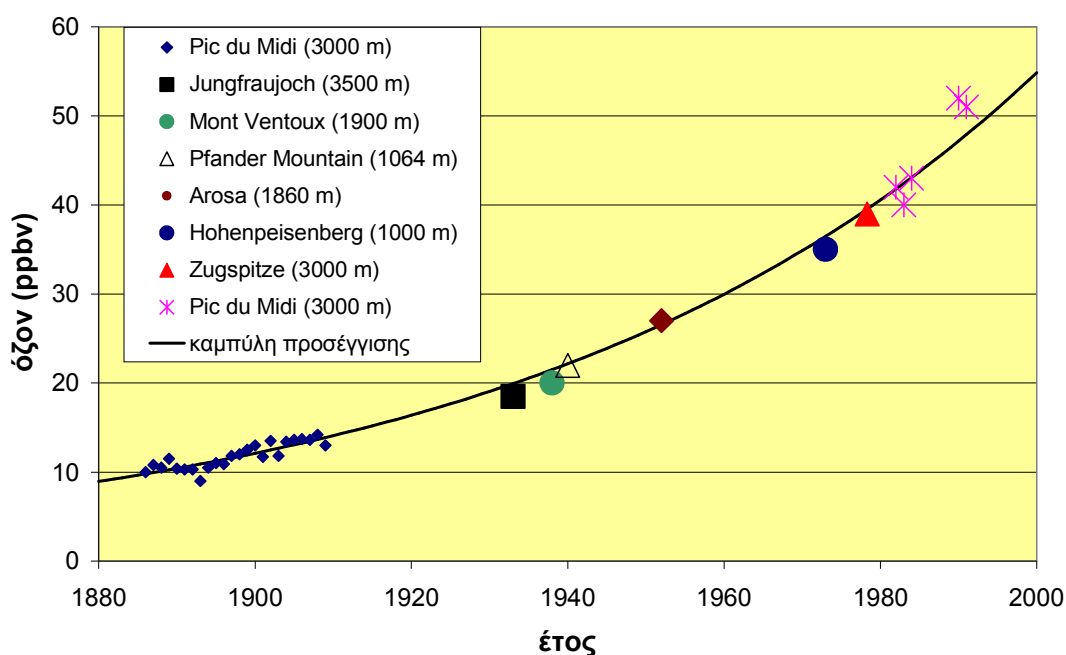
Η σημασία του τροποσφαιρικού όζοντος έγκειται όμως και στις συνέπειες που έχει τόσο στον άνθρωπο όσο και στο φυτικό βασίλειο και τα διάφορα υλικά. Ως αναφορά τις επιπτώσεις του όζοντος στον άνθρωπο η συνεχής έκθεση του ανθρώπου σε υψηλές τιμές όζοντος μπορεί να του προκαλέσει μόνιμη βλάβη στους πνεύμονες. Ακόμα και όταν το όζον είναι σε σχετικά χαμηλές συγκεντρώσεις η εισπνοή του μπορεί να προκαλέσει μια σειρά από προβλήματα υγείας όπως πόνους στο στήθος, βήχα, ερεθισμό του λαιμού, συμφόρηση, και να επιδεινώσει καρδιακά προβλήματα, βρογχίτιδα, εμφύσημα και άσθμα.

Το όζον είναι από μόνο του ένα οξειδωτικό μέσο και είναι φυτο-τοξικό στοιχείο που σημαίνει ότι όταν βρίσκεται σε μεγάλες συγκεντρώσεις γίνεται επικίνδυνο για τα φυτά και δάση καθώς επηρεάζει την ικανότητα τους να παράγουν και να αποθηκεύουν τροφή κάνοντας τα έτσι πιο ευάλωτα στις αρρώστιες, τα έντομα και τις άσχημες καιρικές συνθήκες. Σύμφωνα με την U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency - <http://www.epa.gov/oar/oaqps/gooduphigh/>) η ρύπανση του όζοντος προκαλεί καταστροφές στη σοδειά που αντιστοιχεί σε μείωση της αγροτικής παραγωγής πάνω από 0.5 δισεκατομμύριο δολάρια κάθε έτος σε πανεθνικό επίπεδο. Σαν όριο φυτο-τοξικότητας η Ευρωπαϊκή Ένωση θέτει το όριο των 32 ppbv (μέρη ανά δισεκατομμύριο). Η υπέρβαση αυτού του ορίου δεν σημαίνει απαραίτητα ότι θα υπάρξει καταστροφή στη βλάστηση αλλά ότι βρισκόμαστε σε επίπεδα επικινδυνότητας για την βλάστηση, δηλαδή ότι είναι υπαρκτό το ρίσκο της καταστροφής για ευαίσθητα είδη φυτών και ιδιαίτερες συνθήκες.

Το όζον ως οξειδωτικό μέσο επιδρά και σε διάφορα οργανικά υλικά, όπως οργανικά χρώματα που χρησιμοποιούνται στην ζωγραφική, στις εξωτερικές ζωγραφισμένες διακοσμήσεις κτιρίων, ή για βαφή υφασμάτων, το φυσικό καουτσούκ, τα συνθετικά ελαστικά υλικά από κυτταρίνη όπως το χαρτί, διάφορα εκθέματα των μουσείων φυσικής ιστορίας όπως φτερά, δέρμα ζώων, πάπυρο. Επομένως η ρύπανση του όζοντος συνδέεται άρρηκτα και με προβλήματα υποβίβασμού της πολιτισμικής μας κληρονομιάς.

3. Η αύξηση του τροποσφαιρικού όζοντος

Από την στιγμή που τέθηκαν οι βάσεις της θεωρίας της φωτοχημικής παραγωγής του όζοντος και έγινε αξιολόγηση των μετρήσεων του τροποσφαιρικού όζοντος κατά την διάρκεια του 20^{ου} αιώνα, έγινε αντιληπτό ότι η αύξηση του τροποσφαιρικού όζοντος δεν είναι ένα πρόβλημα που αφορά μόνο τα αστικά κέντρα και τις γύρω περιοχές αλλά ένα πρόβλημα που αφορά ευρύτερες περιοχές. Ιδιαίτερο επιστημονικό ενδιαφέρον έχει δοθεί την τελευταία δεκαετία όχι μόνο στο όζον των αστικών περιοχών αλλά και στο υποβάθρο όζον δηλαδή στο όζον που δεν επηρεάζεται από κοντινές ανθρωπογενείς εκπομπές ρύπων. Υπάρχει σημαντική πειραματική ένδειξη από την σύγκριση ιστορικών τιμών όζοντος στα τέλη του 19^{ου} και αρχές του 20^{ου} αιώνα με σύγχρονες τιμές όζοντος υποβάθρου ότι το υποβάθρο όζον της τροπόσφαιρας σχεδόν υπερδιπλασιάστηκε στο μεγαλύτερο μέρος του Βορείου Ημισφαιρίου με το μεγαλύτερο ποσοστό της αύξησης να έχει συμβεί μετά το 1950. Το Σχήμα 3 που περιλαμβάνει τιμές από μετρήσεις υποβάθρου όζοντος σε διάφορες τοποθεσίες της Δυτικής Ευρώπης απομακρυσμένες από κοντινές πηγές ρύπανσης επιδεικνύει χαρακτηριστικά τον υπερδιπλασιασμό των συγκεντρώσεων όζοντος κατά την διάρκεια του 20^{ου} αιώνα.



Σχήμα 3: Χρονική εξέλιξη των συγκεντρώσεων όζοντος κατά την διάρκεια του 20^{ου} αιώνα σε διάφορες τοποθεσίες της Δυτικής Ευρώπης απομακρυσμένες από κοντινές πηγές ρύπανσης (πηγή: Marengo et al., 1994)

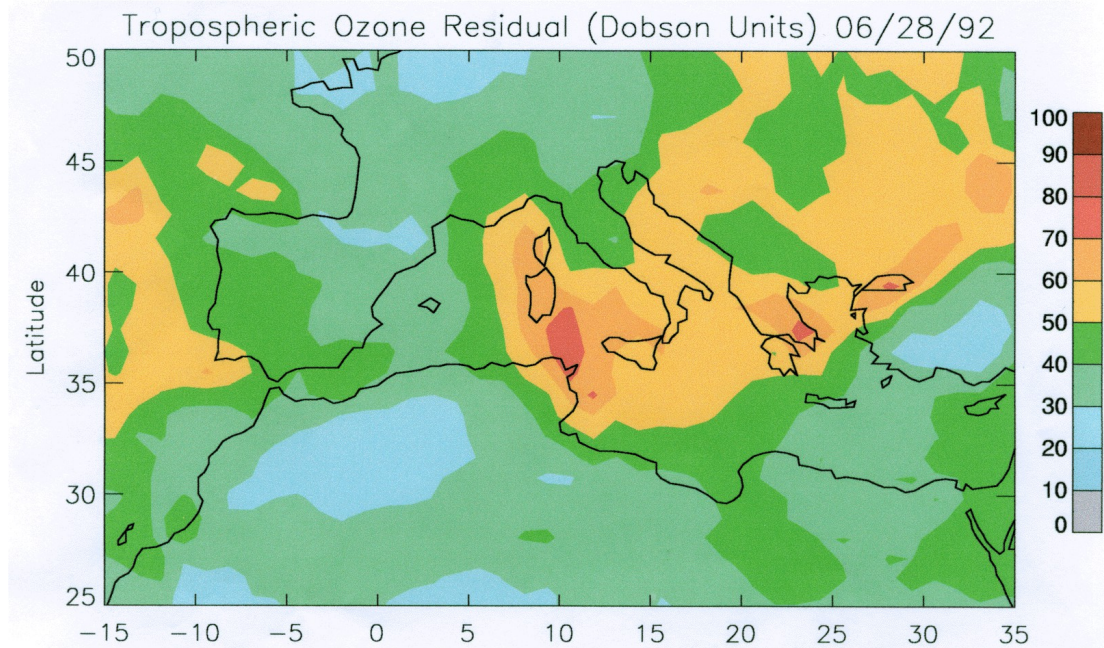
Ιδιαίτερη συμβολή στην διαπίστωση της αύξησης του υποβάθρου όζοντος της τροπόσφαιρας έδωσε και η αξιολόγηση των μετρήσεων όζοντος στο Παρίσι (Montsouris) στα τέλη του περασμένου αιώνα. Η πιθανότερη αιτία για την αύξηση του υποβάθρου όζοντος της τροπόσφαιρας θεωρείται η φωτοχημική παραγωγή όζοντος λόγω της σταδιακής αύξησης των ανθρωπογενών εκπομπών πρωτογενών ρύπων (οξείδια του αζώτου, CO, υδρογονάνθρακες) και η σταθερή ανάμειξη των πρόδρομων αυτών ενώσεων σε ευρύτερες περιοχές. Πολλές άλλες ερευνητικές

εργασίες σε διάφορες τοποθεσίες στην Ευρώπη και Βόρεια Αμερική έδειξαν ότι υπάρχει αύξηση του όζοντος της τροπόσφαιρας κατά την διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών της τάξης του 1% ανά έτος. Όλες αυτές οι διαπιστώσεις της αύξησης του τροποσφαιρικού όζοντος τόσο κοντά στο έδαφος όσο και στην ελεύθερη τροπόσφαιρα (πάνω από το οριακό στρώμα της ατμόσφαιρας όπου ζούμε και αναπνέουμε) δείχνουν ότι είναι ένα πρόβλημα που δεν περιορίζεται μόνο σε τοπική κλίμακα αλλά επεκτείνεται σε διακρατική και ημισφαιρική κλίμακα. Αυτό σημαίνει ότι η λύση ενός τέτοιου προβλήματος μπορεί να δοθεί μόνο κάτω από την συντονισμένη προσπάθεια όλων των κρατών.

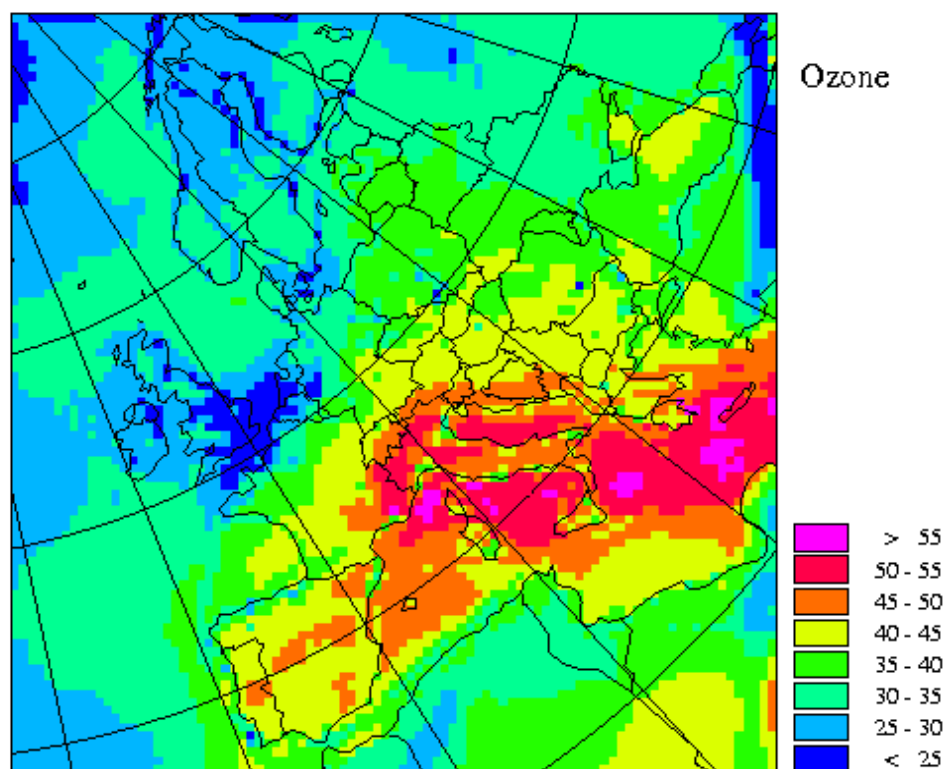
4. Το τροποσφαιρικό όζον στην Ελλάδα

Το πρόβλημα της ρύπανσης του όζοντος αφορά ιδιαίτερα την Ελλάδα και την Μεσόγειο που είναι μια περιοχή πλούσια σε φως του ήλιου. Ένα από τα σημαντικά ευρήματα του Ευρωπαϊκού προγράμματος PAUR που συντονίστηκε από το Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (Διευθυντής, καθ. Χρήστος Ζερεφός) ήταν η επιβεβαίωση της ύπαρξης υψηλών επιπέδων υποβάθρου όζοντος πάνω από ολόκληρη την Ανατολική Μεσόγειο (40-80 ppb). Αυτά τα επίπεδα όζοντος υπερβαίνουν κατά την διάρκεια όλου του έτους το όριο φυτο-τοξικότητας των 32 ppb που θέτει η Ευρωπαϊκή Ένωση. Βέβαια θα πρέπει να τονιστεί το γεγονός ότι δεν παρουσιάζονται έντονα φαινόμενα βλαβών στη βλάστηση που θα αναμένονταν με βάση τις μετρηθείσες τιμές όζοντος πάνω από το Αιγαίο. Αυτό δείχνει ίσως την πιθανή ακαταλληλότητα τέτοιων ορίων για την Νότια Ευρώπη καθώς τα όρια αυτά έχουν θεσπιστεί με βάση αποτελέσματα πειραμάτων σε βορειότερα κλίματα. Θα ήταν εύλογο να υποθέσει κανείς ότι η χλωρίδα ίσως έχει αναπτύξει προσαρμοστικούς μηχανισμούς που λειτουργούν στις κλιματικές συνθήκες της Μεσογείου. Χαρακτηριστικά φαίνεται στο Σχήμα 4 από δορυφορικές μετρήσεις της ολικής στήλης τροποσφαιρικού όζοντος ότι μέγιστες τιμές τροποσφαιρικού όζοντος παρατηρούνται πάνω από την περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου και όλο τον Ελλαδικό χώρο.

Η ανάλυση των πειραμάτων PAUR έδειξε επίσης, ότι κατά τους θερμούς μήνες, τα επίπεδα όζοντος υπερβαίνουν και το Όριο Ενημέρωσης Πληθυσμού που έχει θεσπίσει η Ευρωπαϊκή Ένωση (53 ppb). Αυτό είναι ένα γεγονός που πρέπει να μας επιστήσει ιδιαίτερα την προσοχή καθώς το πρόβλημα της ρύπανσης του όζοντος παρουσιάζεται ιδιαίτερα έντονο στην περιοχή της ανατολικής Μεσογείου. Εκτεταμένες προσομοιώσεις με τρισδιάστατο μαθηματικό μοντέλο (Σχήμα 5) που καλύπτει όλη την Ευρώπη και την Μεσόγειο, έδειξαν ότι ακόμη και αν περιοριστούν σημαντικά οι ανθρωπογενείς (βιομηχανία, μεταφορές, θέρμανση κλπ.) εκπομπές προδρόμων ενώσεων του όζοντος στην Ελλάδα, οι τιμές του όζοντος στην περιοχή δεν πρόκειται να μειωθούν σημαντικά. Αυτό συμβαίνει γιατί το μεγαλύτερο ποσοστό του υποβάθρου του όζοντος στην περιοχή προέρχεται από τις εκπομπές της Ηπειρωτικής Ευρώπης. Τα αποτελέσματα αυτά έχουν σημαντική πολιτική αξία για τη Ελλάδα καθώς για τον αποτελεσματικό έλεγχο των επιπέδων όζοντος στην περιοχή απαιτούνται ρυθμίσεις των εκπομπών όχι μόνο σε τοπική και εθνική κλίμακα αλλά και σε διακρατική και Ευρωπαϊκή κλίμακα.



Σχήμα 4: Κατανομή της ολικής στήλης του τροποσφαιρικού όζοντος στις 28/6/1992 από μετρήσεις δορυφόρου πάνω από την Μεσόγειο (πηγή: J. Fishman, NASA Langley Research Center, Hampton, Virginia, USA). Η ολική στήλη όζοντος μετριέται σε Dobson Units (DU) όπου 1 DU αντιστοιχεί σε μήκος 0.001 cm υπό κανονικές συνθήκες. Για παράδειγμα ολική στήλη τροποσφαιρικού όζοντος 100 DU σημαίνει ότι εάν είχαμε την δυνατότητα να συμπιέσουμε όλο το όζον αυτής της στήλης (μοναδιαίου εμβαδού) κοντά στην επιφάνεια η στήλη θα είχε ύψος 0.1 cm.



Σχήμα 5: Αποτελέσματα τρισδιάστατου μαθηματικού μοντέλου για την κατανομή του όζοντος κοντά στο έδαφος πάνω από την Ευρώπη τον μήνα Ιούλιο (πηγή: I. Isaksen, University of Oslo, Norway). Οι μονάδες όζοντος είναι ppbv δηλαδή μέρη ανά δισεκατομμύριο όγκου.