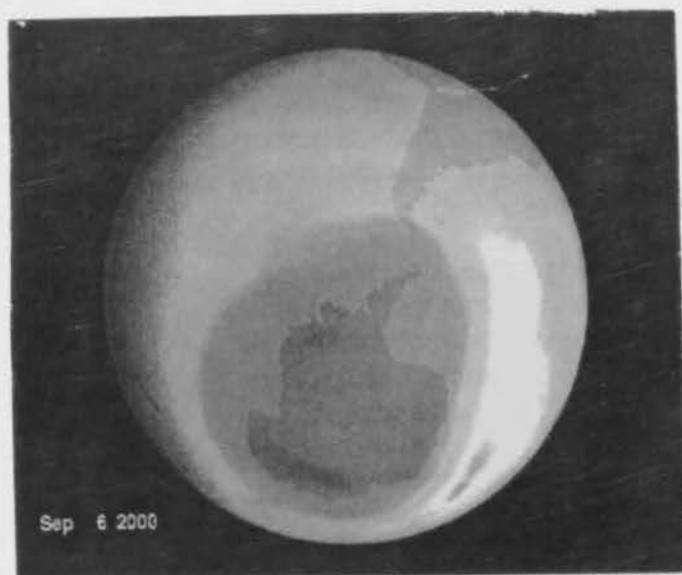


**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΘΕΜΑ:
ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΟΥ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ ΚΑΙ
ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ**

ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΣΧΕΤΙΚΩΝ ΑΠΟΨΕΩΝ



Εισηγητής: Αθαν. Γ. Παλιατσός

**Σπουδαστές: Σταύρου Ανθή
Αποστολίδου Άννα**

ΑΘΗΝΑ 2000

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στην πτυχιακή αυτή εργασία γίνεται προσπάθεια προσέγγισης του προβλήματος της αραίωσης του στρώματος του στρατοσφαιρικού όζοντος, παραθέτοντας ταυτόχρονα και τις πιο πρόσφατες απόψεις για πιθανές επιπτώσεις.

Η ανάθεση και η επίβλεψη της πτυχιακής εργασίας έγινε από τον καθηγητή Δρα. Αθαν. Γ. Παλιατσό τον οποίο και ευχαριστούμε θερμά για την πολύτιμη βοήθεια και υποστήριξή του σε ολόκληρη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας μας.

Επίσης, από τη θέση αυτή επιθυμούμε να ευχαριστούμε τον Τμηματάρχη της ΕΑΡΘ/ΥΠΕΧΩΔΕ Δρα. Λ. Βύρα για τις πολύ χρήσιμα στοιχεία που μας παρεχώρησε.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το προστατευτικό στρώμα του όζοντος περιβάλλει ολόκληρο τον πλανήτη μας. Το στρώμα αυτό περιέχει μόρια όζοντος που το καθένα τους αποτελείται από τρία άτομα οξυγόνου και εκτείνεται σε ύψη που κυμαίνονται μεταξύ των 15 και των 35 km πάνω από τη στάθμη της θάλασσας.

Το στρώμα αυτό ονομάζεται οζονόσφαιρα και το πάχος του μεταβάλλεται. Η μεταβολή αυτή εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, από την εποχή του έτους και από άλλους παράγοντες, όπως π.χ. τα καιρικά συστήματα.

Το στρώμα του όζοντος πιστεύεται ότι δημιουργήθηκε στη σημερινή μορφή του περίπου πριν από 3 δισεκατομμύρια χρόνια, όταν δηλαδή η φωτοσύνθεση ήταν σε πλήρη εξέλιξη και είχε συσσωρευτεί αρκετό οξυγόνο στην ατμόσφαιρα της γης, από το οποίο παράγεται το όζον. Έτσι, από τότε περίπου και μέχρι σήμερα, η ατμόσφαιρα της γης αποτελείται από 78% άζωτο, 21% οξυγόνο και από ίχνη πολλών άλλων αερίων, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.

Αέριο	Όγκος ξηρού αέρα (%)
Άζωτο (N ₂)	78.08
Οξυγόνο (O ₂)	20.95
Αργό (Ar)	0.93
Διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂)	0.03
Νέο (Ne)	0.0018
Ήλιο (He)	0.0005
Κρυπτό (Kr)	0.0001
Υδρογόνο (H ₂)	0.0005
Όζον (O ₃)	0.00006
Υδρατμοί	0-0.04

Πίνακας 1. Μέση σύσταση της γήινης ατμόσφαιρας από το έδαφος μέχρι των 100 Km.

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 1, ειδικά το όζον είναι τόσο λίγο, ώστε αν όλα τα μόρια όζοντος του πλανήτη μας τα μεταφέραμε συμπιέζοντάς τα κάτω στο έδαφος υπό κανονικές συνθήκες, τότε το στρώμα που

θα δημιουργούσαμε θα κάλυπτε κατά μέσον όρο όλη τη γη σε πάχος μόλις 3 mm.

Παρά τη μικρή του συγκέντρωση, το όζον έχει χαρακτηριστικές ιδιότητες, διότι απορροφά έντονα πολλές επικίνδυνες ακτινοβολίες που προέρχονται είτε από τον ήλιο, είτε από τη γη. Πρώτα απ' όλα το όζον δημιουργείται από τη φωτολυτική δράση μέρους της υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας, στην περιοχή του φάσματος 180-320 nm (UV-C), η οποία διασπά το μοριακό οξυγόνο, ενώ το ίδιο το παραγόμενο όζον απορροφά έντονα την υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία τόσο στη φασματική περιοχή 180-320 nm, όσο και στην περιοχή 280-320 nm (UV-B) του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτή η τελευταία συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας είναι εκείνη που μπορεί και διεισδύει μέχρι το έδαφος και γι' αυτό η κατακράτησή της από το στρώμα του όζοντος έχει τόσο μεγάλη σημασία, διότι η UV-B ηλιακή ακτινοβολία έχει έντονη βιολογική δράση και μπορεί να προξενήσει σημαντικές βλάβες στη βιόσφαιρα. Το όζον όμως έχει επίσης εξαιρετική ικανότητα να απορροφά και κάποιες ακτινοβολίες με τις οποίες η γη ψύχεται ακτινοβολώντας προς το διάστημα (9.6 nm). Έτσι, το στρώμα αυτό όχι μόνο προστατεύει τα έμβια όντα από την καταστρεπτική συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά ταυτόχρονα συμμετέχει στη διατήρηση της θερμικής ισορροπίας του συστήματος ατμόσφαιρα – γη, αποτελώντας ένα σημαντικό θερμοκηπικό αέριο. Η τελευταία αυτή ιδιότητα είναι ανάλογη με εκείνη που έχουν άλλα αέρια του θερμοκηπίου, το σπουδαιότερο από τα οποία είναι το διοξείδιο του άνθρακα.

Από τα παραπάνω είναι προφανές ότι η διαταραχή των συγκεντρώσεων του όζοντος έχει σημαντικές συνέπειες όχι μόνο στη βιόσφαιρα αλλά και στην ίδια την ατμόσφαιρα. Πράγματι, το αέριο αυτό είναι μια από τις αιτίες που συντελούν στο να παύει να ελαττώνεται η θερμοκρασία του αέρα με το ύψος, γεγονός που συμβαίνει στη στρατόσφαιρα. Αυτό επιτυγχάνεται με την απορρόφηση τόσο της ηλιακής όσο και της γήινης ακτινοβολίας από το όζον, το διοξείδιο του άνθρακα και τα άλλα αέρια που υπάρχουν σε

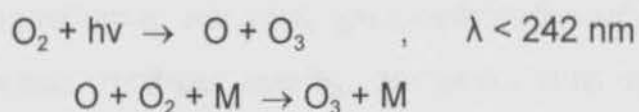
σχετικά μεγάλα ύψη. Η υποτιθέμενη σταθερότητα του όζοντος μέσα στους αιώνες υπήρξε η αιτία που μόλις ένας πολύ μικρός αριθμός επιστημόνων ασχολήθηκε με αυτό το αέριο πριν από τη δεκαετία του '70.

Από την ανακάλυψή του, το έτος 1839, από τον Schonbein (που του έδωσε και το ελληνικό όνομα από το «όζειν» λόγω της χαρακτηριστικής του οσμής), μέχρι το τέλος της δεκαετίας του '60 οι ασχολούμενοι επαγγελματικά με το όζον, σε παγκόσμια κλίμακα, δεν υπερέβαιναν τους 30 ή 40 επιστήμονες. Σήμερα ο αριθμός αυτός έχει εκατονταπλασιασθεί και αιτία αυτής της αύξησης είναι προφανώς η απειλούμενη καταστροφή του από ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Φαίνεται ίσως απίστευτο αλλά είναι σήμερα γεγονός πως, ότι η φύση χρειάστηκε εκατοντάδες εκατομμύρια χρόνια για να δημιουργήσει, ο άνθρωπος μπόρεσε να το καταστρέψει, κατά ένα σημαντικό ποσοστό, μέσα σε δύο δεκαετίες.

2. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΗΣ ΤΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ - ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΔΙΚΤΥΟ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΟΥ

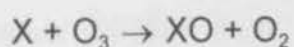
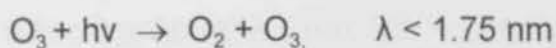
Η UV-C ηλιακή ακτινοβολία αποτελείται από πολύ ισχυρά φωτόνια τα οποία όμως έχουν μικρή ροή, δηλαδή πολύ λίγα από αυτά προσπίπτουν κάθε δευτερόλεπτο πάνω σε κάθε τετραγωνικό μέτρο στην ανώτερη ατμόσφαιρα της γης. Έτσι η διάσπαση του οξυγόνου από αυτά τα φωτόνια ($h\nu$) οδηγεί σε περιορισμένη παραγωγή όζοντος, η συγκέντρωση του οποίου καθορίζεται κάθε στιγμή από τις διεργασίες παραγωγής και καταστροφής του, σύμφωνα με το παρακάτω απλοποιημένο σύστημα εξισώσεων:

Εξισώσεις παραγωγής όζοντος



όπου το μόριο M είναι ένα οποιοδήποτε ατμοσφαιρικό μόριο (π. χ. N₂, O₂ ή κάποιο άλλο).

Εξισώσεις καταστροφής όζοντος



όπου X μπορεί να είναι H, OH, NO, Cl και Br. Σημειώνουμε ότι οι πρώτοι που επισήμαναν τη σημασία του οξειδίου του αζώτου και του χλωρίου, ανθρωπογενούς προέλευσης, στη στρατόσφαιρα τιμήθηκαν με το βραβείο Nobel Χημείας (P. Crutzen, M. Molina και S. Rowland) το έτος 1995.

Ήδη από το 1970, μετά την απόδειξη της σημασίας των οξειδίων του αζώτου στην ισορροπία του στρώματος του όζοντος από τις εργασίες του P. Crutzen (1970), νέοι κίνδυνοι φάνηκαν στον ορίζοντα από τις υπερηχητικές πτήσεις. Σύμφωνα με την υπόθεση αυτή, ένας μεγάλος στόλος υπερηχητικών αεροπλάνων που πετούν σε μεγάλα ύψη, με τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου θα μπορούσαν να ελαττώσουν το στρώμα του όζοντος ενισχύοντας τις διεργασίες καταστροφής. Ελάχιστα χρόνια αργότερα οι Stolarski και Cicevone (1974) θεώρησαν ότι, τα οξείδια του χλωρίου (ClO_x) επιδρούν σημαντικά στο ατμοσφαιρικό όζον. Οι Molina και Rowland (1974) απέδειξαν ότι οι ευρύτατα χρησιμοποιούμενοι αδρανείς χλωροφθοράνθρακες, μεταφερόμενοι στη στρατόσφαιρα και διασπώμενοι από το φως, αποδεσμεύουν ελεύθερο χλώριο. Οι χλωροφθοράνθρακες είναι υδρογονάνθρακες στους οποίους όλα τα υδρογόνα έχουν αντικατασταθεί από χλώριο ή φθόριο. Αυτή ακριβώς η αντικατάσταση κάνει τους χλωροφθοράνθρακες και τους χλωροφθοροβρωμάνθρακες (χρήση βρωμίου) εξαιρετικά σταθερές ουσίες, ορισμένες από τις οποίες έχουν εξαιρετικές θερμοδυναμικές ιδιότητες.

Οι χλωροφθοράνθρακες (CFC) παρασκευάστηκαν για πρώτη φορά το έτος 1928 και λόγω των ιδιοτήτων τους (μη τοξικοί, άφλεκτοι, άοσμοι, άγευστοι, με ιδιαίτερα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά) χρησιμοποιήθηκαν ευρύτατα μέχρι το τέλος της δεκαετίας του '80. Η χρήση τους πριν από την έναρξη λήψης μέτρων (1988) ήταν 28% ως προωθητικά σε δοχεία ψεκασμού, 26% στη βιομηχανία αφρώδους πλαστικού, 23% στη ψυκτική βιομηχανία, 21% ως οργανικοί διαλύτες και 2% για άλλες χρήσεις. Η άλλη κατηγορία των επικίνδυνων ουσιών, των βρωμανθράκων, που χρησιμοποιούνται για την πυρόσβεση, έχει επίσης μεγάλο δυναμικό επικινδυνότητας για το στρώμα του όζοντος. Το προερχόμενο από αυτές τις ουσίες βρώμιο (με την εμπορική ονομασία halons) στη στρατόσφαιρα έχει πιο καταστρεπτική επίδραση στο όζον ακόμα και από το ελεύθερο χλώριο ή φθόριο των χλωροφθορανθράκων (WMO, 1991). Τόσο οι χλωροφθοράνθρακες, όσο και τα halons έχουν χρόνο ζωής, στη στρατόσφαιρα, πολύ μεγάλο. Μερικά δε από αυτά μπορούν να διατηρηθούν περισσότερο από 100 χρόνια. Έτσι, ακόμα και σήμερα αλλά και για τις προσεχείς δεκαετίες υπάρχουν χιλιάδες τόνοι χλωρίου και βρωμίου που συσσωρεύθηκαν στη στρατόσφαιρα κατά τα τελευταία 60 χρόνια. Οι ποσότητες αυτές ξεπερνούν κατά πολύ τις φυσικές πηγές του χλωρίου και των άλλων «οζονοκτόνων» αερίων που υπάρχουν στη στρατόσφαιρα.

Δυστυχώς, μολονότι το Παγκόσμιο Δίκτυο Παρακολούθησης του όζοντος ήταν επαρκές διαθέτοντας στις δεκαετίες του '70 και του '80 περισσότερους από 100 σταθμούς σε όλο τον κόσμο και παρά την πολύ καλή δορυφορική παρακολούθηση της δεκαετίας του '80, οι θεωρίες για την καταστροφή του όζοντος δεν έγινε δυνατόν να επιβεβαιωθούν πριν από το τέλος του 1984. Το 1984 αποτελεί το έτος σταθμό για την παρακολούθηση του όζοντος, διότι στο Διεθνές Συνέδριο Όζοντος που έγινε στη Χαλκιδική, ο Ιάπωνας ερευνητής S. Chubachi πρώτος παρατήρησε μια σημαντική αραίωση του στρώματος του όζοντος στο

σταθμό Syowa της Ανταρκτικής. Η ανακοίνωσή του ανέφερε ότι στην Ανταρκτική κατά την άνοιξη του 1982 είχαν παρατηρηθεί εξαιρετικά χαμηλές συγκεντρώσεις όζοντος (μικρότερες από 2 nm σε κανονικές συνθήκες). Η σημαντικότερη αυτή αραίωση (πάνω από 30% - 50%) επιβεβαιώθηκε λίγους μήνες αργότερα από Άγγλους επιστήμονες της Βρετανικής Ανταρκτικής Αποστολής (Farman et al., 1985), οι οποίοι και απέδωσαν την αραίωση αυτή στους συσσωρευμένους χλωροφθοράνθρακες στην κατώτερη στρατόσφαιρα και οι οποίοι τελικά πήραν και την αίγλη της ανακάλυψης.

Τα έτη 1986, 1987 και 1988 αποτέλεσαν έτη μεγάλων επιστημονικών εξερευνήσεων στην Ανταρκτική (WMO, 1991), που σκοπό είχαν να κατανοηθούν οι φυσικοί και χημικοί μηχανισμοί που δημιουργούν αυτή τη σημαντική αραίωση του στρώματος του όζοντος, η οποία επικράτησε να λέγεται και «τρύπα του όζοντος» της Ανταρκτικής. Τα επιστημονικά αυτά πειράματα, που έγιναν τότε με κύριο συντονιστή τη NASA, απέδειξαν ότι στην στρατόσφαιρα κατά την περίοδο της άνοιξης στην περιοχή της Ανταρκτικής υπάρχουν σημαντικές ποσότητες ενώσεων του χλωρίου (π. χ. ClO) οι οποίες καταλυτικά καταστρέφουν όζον. Η ύπαρξη αυτών των ενώσεων, η απουσία άλλων ενώσεων του αζώτου και βεβαίως η εμφάνιση αυτής της σημαντικής αραίωσης, κυρίως κατά την περίοδο της άνοιξης στην περιοχή της Ανταρκτικής, οδήγησαν σε σημαντική βελτίωση της γνώσης για τις ατμοσφαιρικές φυσικές και χημικές διεργασίες που προκαλούν την αραίωση του όζοντος στην Ανταρκτική (Solomon, 1990).

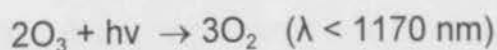
3. Η ΑΡΑΙΩΣΗ ΤΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ ΤΗΣ ΑΝΤΑΡΚΤΙΚΗΣ

Όπως αναφέρθηκε, το στρώμα του όζοντος διατηρείται στην ατμόσφαιρα, όταν εξισορροπούνται οι μηχανισμοί παραγωγής του όζοντος με τους μηχανισμούς καταστροφής του. Ταυτόχρονα όμως το όζον, όπως και τα άλλα ατμοσφαιρικά αέρια, μεταφέρεται με τον άνεμο και γενικά, μολονότι

παράγεται στην περιοχή των τροπικών από την υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία, οι μεγάλης κλίμακας κινήσεις της ατμόσφαιρας το μεταφέρουν προς τα μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη μέχρι και την Αρκτική και βεβαίως την Ανταρκτική. Η μεταφορά αυτή του όζοντος από τις μεγάλης κλίμακας κινήσεις της ατμόσφαιρας δεν γίνεται μέσα στη διάρκεια του έτους με την ίδια πάντοτε ευκολία. Μάλιστα κατά τις αρχές του θέρους οι επικρατούντες άνεμοι είναι τέτοιοι, ώστε η μεταφορά αυτή να ελαττώνεται σημαντικά. Έτσι, σε οποιοδήποτε ημισφαίριο το χειμώνα, που είναι εποχή με έντονη μεταφορά, το όζον μεταφέρεται από τους τροπικούς προς τα μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη. Η συσσώρευση αυτή όμως δεν συνεχίζεται κατά το θέρος και γι' αυτό το όζον εμφανίζει μέγιστη συγκέντρωση την άνοιξη του κάθε ημισφαιρίου. Κατά το τέλος της άνοιξης και προς το θέρος η μεταφορά του όζοντος από την πηγή του ελαττώνεται, για να πάρει τις χαμηλότερες τιμές το φθινόπωρο, μετά το οποίο αρχίζει πάλι να αυξάνεται η μεταφορά καθώς προχωρούμε προς τη ψυχρή περίοδο του έτους και ο κύκλος επαναλαμβάνεται.

Το όζον λοιπόν συσσωρεύεται στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη, όπου εμφανίζει και μεγαλύτερες τιμές, ενώ η πηγή του είναι κοντά στον Ισημερινό, γεγονός που οφείλεται στη γενική ατμοσφαιρική κυκλοφορία (Zerefos, 1983). Ειδικά στην περίπτωση της στρατόσφαιρας, πάνω από την περιοχή της Ανταρκτικής, το χειμώνα επικρατούν πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, οι χαμηλότερες του πλανήτη. Έτσι, κατά τον πολικό χειμώνα της Ανταρκτικής δημιουργείται ένας σχεδόν αδιατάρακτος στρόβιλος γύρω από τον νότιο πόλο, παγωμένος, με θερμοκρασίες ψυχρότερες και από $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$, ο οποίος εμποδίζει την ανταλλαγή αέρα με τα μέσα γεωγραφικά πλάτη. Κάτω από αυτές τις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες δημιουργούνται υπερκατεψυγμένα πολικά στρατοσφαιρικά σύννεφα που αποτελούνται από παγοκρυστάλλους. Αυτοί οι υπερκατεψυγμένοι παγοκρύσταλλοι διαδραματίζουν ένα σπουδαίο ρόλο, διότι εγκλωβίζουν τα όποια ίχνη υδρατμών και προσφέρουν ταυτόχρονα επιφάνεια στην οποία

πολύ εύκολα προσκολλώνται ενώσεις του αζώτου (π. χ. HNO_3), δηλαδή αφαιρούν από την κατώτερη στρατόσφαιρα ύδωρ και ενώσεις του αζώτου. Η απομάκρυνση των ενώσεων του αζώτου αφήνει ελεύθερο το πεδίο στις δραστικές ενώσεις του χλωρίου (π. χ. ClO) που είτε είναι προσκολλημένες στους παγοκρυστάλλους, είτε όχι. Οι δραστικές αυτές ενώσεις σε διαφορετική περίπτωση, παρουσία των οξειδίων του αζώτου, θα ήταν ακίνδυνες για το όζον, οπότε και θα δημιουργούσαν σταθερά μόρια, όπως για παράδειγμα το ClONO_2 . Η συνεχιζόμενη όμως στη διάρκεια του πολικού χειμώνα απαζωτοποίηση και αφυδάτωση της στρατόσφαιρας προσφέρει ταυτόχρονα σημαντική επιφάνεια για τις δραστικές ενώσεις του χλωρίου και του βρωμίου, οι οποίες με την εμφάνιση του ηλίου μετατρέπουν καταλυτικά δύο μόρια όζοντος σε τρία μόρια οξυγόνου, όπως φαίνεται στην αντίδραση:



όπου το μήκος κύματος αντιπροσωπεύει την ελάχιστη ενέργεια που πρέπει να έχουν τα φωτόνια για να επιτευχθεί η φωτοδιάσπαση του όζοντος.

Με το τέλος της άνοιξης στην περιοχή της Ανταρκτικής, ο πολικός στρόβιλος καταρρέει και άφθονος αέρας μεταφέρεται στην Ανταρκτική από τα μέσα γεωγραφικά πλάτη, αέρας ο οποίος αναπληρώνει το όζον που χάθηκε στη διάρκεια της άνοιξης μέσα στον πολικό στρόβιλο με τις διεργασίες που μόλις περιγράφηκαν (Rowland, 1991).

Ήδη από τον Οκτώβριο του 1987 είχε παρατηρηθεί σημαντική μείωση του όζοντος πάνω από την περιοχή της Ανταρκτικής. Κατά την περίοδο της άνοιξης στην περιοχή αυτή είχε μείνει μόλις το μισό όζον και η περίφημη αυτή περιοχή μεγάλης αραίωσης του όζοντος, που ονομάσθηκε «τρύπα του όζοντος της Ανταρκτικής», είχε καταλάβει έκταση με εμβαδόν μεγαλύτερο από εκείνο της Ευρώπης. Μέχρι σήμερα οι χειρότερες χρονιές για την τρύπα του όζοντος της Ανταρκτικής ήταν το 1987, το 1993 και το

1995. Η μεγαλύτερη έκταση που είχε η «τρύπα του όζοντος» ήταν περίπου $24 \cdot 10^6 \text{ Km}^2$ και οι χαμηλότερες τιμές όζοντος που παρατηρήθηκαν ήταν το έτος 1993 και ήταν ίσες με το $1/3$ του μέσου όρου όλων των ετών, πριν από την εμφάνιση του θεαματικού αυτού φαινομένου.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι ορισμένες από τις πρόσφατες απώλειες όζοντος μπορεί να οφείλονται σε ευνοϊκά φαινόμενα όπως η έξαρση των ηλιακών κηλίδων που παρατηρήθηκε το έτος 1989, η έκρηξη του ηφαιστείου El Chichon το έτος 1982 και η έκρηξη του ηφαιστείου Pinatubo το έτος 1991 (Παλιατσός, 1999).

4. ΑΡΑΙΩΣΗ ΤΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ ΣΤΗΝ ΑΡΚΤΙΚΗ ΚΑΙ ΣΕ ΑΛΛΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ

Είδαμε λοιπόν ότι η εμφάνιση της σημαντικής αραίωσης του όζοντος στην περιοχή της Ανταρκτικής κατά την περίοδο της άνοιξης στην περιοχή αυτή, οφείλεται στη σύμπτωση ιδιαίτερων και σπουδαίων γεγονότων. Πρώτα απ' όλα στις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες, που απομονώνουν τον πολικό αέρα, στη δημιουργία των πολικών στρατοσφαιρικών νεφών, στις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και βεβαίως στην ύπαρξη των οζονοκτόνων ενώσεων. Εκτεταμένες μετρήσεις που έγιναν κυρίως στη δεκαετία του '90 με πρωτοβουλία της στρατοσφαιρικής επιστημονικής ομάδας της E.E., της NASA και άλλων οργανισμών, έδειξαν ότι και στην Αρκτική οι συνθήκες, αν και είναι διαφορετικές από τις συνθήκες της Ανταρκτικής, εμφανίζουν σημαντικά διαταραγμένη χημική σύσταση (Pyle et al., 1991).

Πρώτα απ' όλα η στατιστική μελέτη όλων των μακροχρόνιων μετρήσεων του όζοντος έδειξε μια επιτάχυνση στην ήδη παρατηρούμενη αραίωση του στρώματος του όζοντος, η οποία πριν από το 1990 ήταν περίπου 4 - 5% ανά δεκαετία και τώρα έχει ξεπεράσει το 6 - 7% για το βόρειο ημισφαίριο και το 10% για το νότιο ημισφαίριο, πάνω από τις εύκρατες περιοχές του πλανήτη. Το έτος 1993 παρατηρήθηκαν οι χαμηλότερες τιμές του όζοντος

πάνω από την Ευρώπη και τον Καναδά. Το έτος 1995 υπήρξαν ημέρες κατά τις οποίες στη Σιβηρία το όζον ελαττώθηκε περισσότερο από 35%. Το ίδιο έτος, το 1995, η «τρύπα» του όζοντος της Ανταρκτικής είχε τη μεγαλύτερη διάρκεια και οι χαμηλότερες τιμές όζοντος διατηρήθηκαν μέχρι τις αρχές Νοεμβρίου (Bojkov et al., 1993, 1995). Χαρακτηριστικά αναφέρουμε ότι η τρύπα του όζοντος της Ανταρκτικής το έτος 1999, καλύπτει έκταση $25 \cdot 10^6 \text{ Km}^2$, όταν ο αντίστοιχος αριθμός το έτος 1988 ήταν $5 \cdot 10^6 \text{ Km}^2$.

Η ανησυχητική διεύρυνση της αραίωσης του όζοντος πάνω από πυκνοκατοικημένες περιοχές του πλανήτη ακόμα και κατά τη διάρκεια του θέρους και οι συνέπειές της αποτελούν σήμερα αντικείμενο εντατικής έρευνας (Zerefos, 1983). Από την εντατική αυτή έρευνα έχουν προκύψει τα εξής συμπεράσματα: η «τρύπα» του όζοντος είναι φαινόμενο αποκλειστικό της Ανταρκτικής, αλλά υπό κατάλληλες συνθήκες ανάλογη αραίωση του στρώματος του όζοντος μπορεί να παρατηρηθεί, και έχει παρατηρηθεί, και στην Αρκτική ακόμα δε και στη Βόρεια Ευρώπη. Το 1993 παρατηρήθηκε έλλειμμα όζοντος περισσότερο από 10 – 15% στις περισσότερες περιοχές των εύκρατων πλατών του βορείου ημισφαιρίου, συμπεριλαμβανομένης και της Ελλάδας και της ευρύτερης περιοχής της Μεσογείου καθώς βεβαίως και του νότιου ημισφαιρίου. Από τις μετρήσεις του Ευρωπαϊκού και Αρκτικού Δικτύου του Εργαστηρίου Φυσικής της Ατμόσφαιρας του ΑΠΘ προέκυψε ότι μέχρι το 1993 η υπεριώδης ηλιακή ακτινοβολία πάνω από τη Βόρεια Ευρώπη και πάνω από την Ελλάδα εμφάνισε μια σημαντική αύξηση, αύξηση που συνεχίζεται μέχρι σήμερα με βραδύτερους ευτυχώς ρυθμούς (Zeferos et al., 1995a, 1995b, 1996). Η αύξηση αυτή εξαρτάται από το μήκος κύματος, φαίνεται όμως ότι η λεγόμενη ερυθματώδης δόση (δόση απαραίτητη για το κοκκίνισμα ενός μέσου δέρματος) είχε αυξηθεί μέχρι το 1993 πάνω από το 10% της τιμής που είχε πριν αρχίσουν οι μετρήσεις.

Εκτός όμως από τις παρατηρηθείσες συνθήκες διαταραγμένης χημείας, τόσο στο βόρειο όσο βεβαίως και στο νότιο ημισφαίριο, στις αρχές της δεκαετίας του '90 είχαμε ρεκόρ χαμηλών θερμοκρασιών και στις δύο πολικές περιοχές του πλανήτη καθώς και ρεκόρ εμφάνισης πολικών στρατοσφαιρικών νεφών. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα νέφη αυτά υποβοηθούν τις οζονοκτόνες ενώσεις να δράσουν αποτελεσματικά και να καταστρέψουν καταλυτικά το όζον, παρουσία χαμηλών θερμοκρασιών και πολικών στρατοσφαιρικών νεφών και βεβαίως με την εμφάνιση του ηλιακού φωτός. Έτσι η μεταφορά στρατοσφαιρικού αέρα από περιοχές με ψυχρά στρατοσφαιρικά σύννεφα, πάνω από περιοχές με ήλιο, οδηγεί πολλές φορές στην εμφάνιση σημαντικά χαμηλών τιμών όζοντος. Τέτοιες περιπτώσεις έχουν παρατηρηθεί και στην Ελλάδα (π.χ. Μάρτιος 1993) (Ζερεφός, 1996).

Βεβαίως ο πολικός στρόβιλος της Αρκτικής δεν έχει ούτε το ίδιο σχήμα ούτε την ίδια έκταση ούτε τις τόσο χαμηλές θερμοκρασίες που παρατηρούνται στην Ανταρκτική. Για το λόγο αυτό, μολονότι οι οζονοκτόνες ενώσεις του χλωρίου, του βρωμίου, κ.λ.π. υπάρχουν και στο βόρειο, όπως και στο νότιο ημισφαίριο, οι συνθήκες ευτυχώς του βορείου ημισφαιρίου δεν ευνοούν την τόσο συχνή εμφάνιση πολικών στρατοσφαιρικών νεφών και η αραίωση του όζοντος στο βόρειο ημισφαίριο είναι σαφώς μικρότερη από εκείνη του νότιου ημισφαιρίου, ο δε αρκτικός στρόβιλος διασπάται νωρίτερα από εκείνον της Ανταρκτικής. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειώσουμε ότι πάνω από τους τροπικούς η αραίωση του στρώματος του όζοντος είναι πολύ μικρή, σχεδόν αμελητέα, καθώς και ότι η μεγαλύτερη αραίωση του στρώματος του όζοντος εμφανίζεται στα χαμηλότερα στρώματα της στρατόσφαιρας κατά την περίοδο χειμώνα – άνοιξης των εύκρατων και μεγάλων γεωγραφικών πλατών και η μικρότερη το καλοκαίρι και στα δύο ημισφαίρια (WMO, 1995; Stolarski et al., 1991; Harris et al., 1996).

5. Η ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ΟΖΟΝ ΚΑΙ Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ

Όπως αναφέρθηκε, το όζον αποκόπτει ένα σημαντικό μέρος της UV-B ηλιακής ακτινοβολίας και πρακτικά απορροφά όλα τα φωτόνια με μήκη κύματος μικρότερα περίπου των 285 nm (Bais et al., 1993). Η UV-B ακτινοβολία αντιπροσωπεύει μόλις το 1.7% της ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στο ανώτατο όριο της ατμόσφαιρας (ηλιακή σταθερά, 1367 W/m^2) απορροφάται μερικώς από το όζον και μόνο ακτινοβολία με μήκη κύματος μεγαλύτερα από 290 nm παρατηρείται στο έδαφος. Εκτός από την απορρόφηση από το όζον η UV-B ηλιακή ακτινοβολία αποκόπτεται από τα νέφη, τα μόρια διαφόρων αερίων ρύπων και τα αερολύματα, με αποτέλεσμα η εξασθένιση της UV-B ακτινοβολίας που φθάνει στο έδαφος να ανέρχεται γενικά σε 75% ή και μέχρι σχεδόν 100% σε περιπτώσεις πλήρους νεφοκάλυψης από μεγάλα πυκνά νέφη. Οι ζωντανοί οργανισμοί είναι πολύ ευαίσθητοι στην UV-B ακτινοβολία (Mantis et al., 1997).

Η παρατηρούμενη τόση μείωση του στρατοσφαιρικού όζοντος κατά τα τελευταία έτη αναμένεται να προκαλέσει αύξηση της υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας UV-B που φθάνει στην επιφάνεια της γης, με βλαβερές συνέπειες για τα έμβια όντα. Η ανίχνευση όμως σημαντικής μεταβολής στα επίπεδα της UV απαιτεί μακροχρόνιες ακριβείς μετρήσεις και σε διάφορα κλιματικά καθεστώτα. Επίσης είναι γνωστό ότι η ηλεκτρομαγνητική ροή από τον ήλιο δεν είναι τελείως σταθερή αλλά μεταβάλλεται ελαφρά, ιδιαίτερα στα μικρά μήκη κύματος. Στην UV-B όμως περιοχή του φάσματος και ιδιαίτερα στην περιοχή 282–303 nm η μεταβολή, από το ηλιακό μέγιστο στο ηλιακό ελάχιστο της ενδεκαετούς μεταβολής της ηλιακής δραστηριότητας, υπολογίζεται ότι είναι μικρότερο του 1%.

Ερύθημα του εκτιθέμενου στον ήλιο ανθρώπινου δέρματος προκαλούν οι ακτινοβολίες που ανήκουν στη φασματική περιοχή με μήκη κύματος 280–400 nm (UV). Η δραστηριότητα όμως της ακτινοβολίας μεταβάλλεται

με το μήκος κύματος. Η συνολική ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας που ανήκει στη φασματική αυτή περιοχή, βεβαρυμένη με το φάσμα δραστηριότητας (action spectrum) της υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας για την πρόκληση ερυθήματος στο ανθρώπινο δέρμα, ονομάζεται «ερυθηματώδης δόση» (erythemal dose). Το διεθνώς σήμερα αποδεκτό φάσμα δραστηριότητας είναι το «CIE (Commission Internationale d' Eclairage) erythemal action spectrum» όπως αυτό καθορίστηκε από τους Mckinlay και Diffey (1987).

Συνεπώς, παρά το μικρό της μέγεθος, η σημασία της UV-B ακτινοβολίας είναι μεγάλη, διότι βρίσκεται κοντά στην περιοχή της μέγιστης απορρόφησης του DNA. Έχει αποδειχθεί από πειράματα ότι αυξημένες δόσεις UV-B ακτινοβολίας έχουν σοβαρές συνέπειες στα οικοσυστήματα και στον άνθρωπο. Έτσι η παρατεταμένη έκθεση μπορεί να μειώσει τη φωτοσυνθετική ικανότητα ορισμένων καλλιεργειών και φυτών, να αποπροσανατολίσει έντονα ζωικούς οργανισμούς, να επιδράσει στο φυτοπλαγκτόν κ.ο.κ. Στον άνθρωπο οι πλέον γνωστοί κίνδυνοι είναι η αύξηση μορφών καρκίνου του δέρματος, η αύξηση της πιθανότητας εμφάνισης καταρράκτη στα μάτια και η γενική μείωση της αντοχής του ανθρώπινου οργανισμού.

Δυστυχώς, ακριβείς μετρήσεις στις διάφορες περιοχές του υπεριώδους ηλιακού φάσματος υπάρχουν μόνο μετά το 1989 και σε ελάχιστους σταθμούς στον κόσμο. Ένα αμερικανικό δίκτυο με πολύ μικρό αριθμό σταθμών και ένα ευρωπαϊκό με επίσης ελάχιστο αριθμό σταθμών, τις πιο μακροχρόνιες μετρήσεις του οποίου έχει ο σταθμός της Θεσσαλονίκης και τέλος ένα σταθμό στη Νέα Ζηλανδία σε λειτουργία από το 1988/89. Όλοι αυτοί οι σταθμοί καθώς και μια πλειάδα δεύτερης τάξης σταθμών, όχι όμως μεγάλης ακρίβειας, δείχνουν μια στατιστικά σημαντική αύξηση της υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας στα μικρότερα μήκη κύματος κατά την τελευταία πενταετία των μετρήσεων. Στα μήκη κύματος κοντά στα 305 nm οι αυξητικές τάσεις που έχουν μετρηθεί μέχρι σήμερα δείχνουν αύξηση

που ξεπερνά το 40% τη δεκαετία. Βέβαια η γνωστή ερυθματώδης δόση, την οποία προαναφέραμε, υπολογίζεται ότι έχει αυξηθεί κατά περίπου 15% κατά την τελευταία δεκαετία, αν και οι υπολογισμοί αυτοί είναι σχετικοί και δεν πρέπει να θεωρούνται τελικά, προς το παρόν τουλάχιστον, λόγω του μικρού δείγματος στο οποίο στηρίζονται.

Οι επιπτώσεις της αυξημένης υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας στα υδάτινα οικοσυστήματα και κυρίως στο πλαγκτόν έχει αξία και για το γνωστό φαινόμενο του θερμοκηπίου, διότι το φυτοπλαγκτόν αφαιρεί και αυτό (όπως και τα δάση) μέρος του διοξειδίου του άνθρακα της ατμόσφαιρας, μετριάζοντας την αυξητική του τάση. Από την άλλη μεριά το ίδιο το όζον τελικά λειτουργεί και αυτό σαν θερμοκηπικό αέριο απορροφώντας μέρος της γήινης ακτινοβολίας στη φασματική περιοχή του υπέρυθρου. Και το μεν όζον της στρατόσφαιρας, το οποίο ελαττώνεται, μετριάζει το φαινόμενο του θερμοκηπίου ενώ το όζον της τροπόσφαιρας, το οποίο αυξάνεται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες (π. χ. φωτοχημικό νέφος), δρα έτσι, ώστε να αυξάνει το αποτέλεσμα του φαινομένου του θερμοκηπίου. Οι θεωρητικοί υπολογισμοί δείχνουν σήμερα ότι με τους ρυθμούς μεταβολής του όζοντος και των άλλων θερμοκηπικών αερίων το τελικό αποτέλεσμα είναι ότι το όζον συνεισφέρει κατά 20% στη θέρμανση του πλανήτη την οποία προκαλούν όλα τα αέρια μαζί (CO_2 , CH_4 , N_2O , CFC).

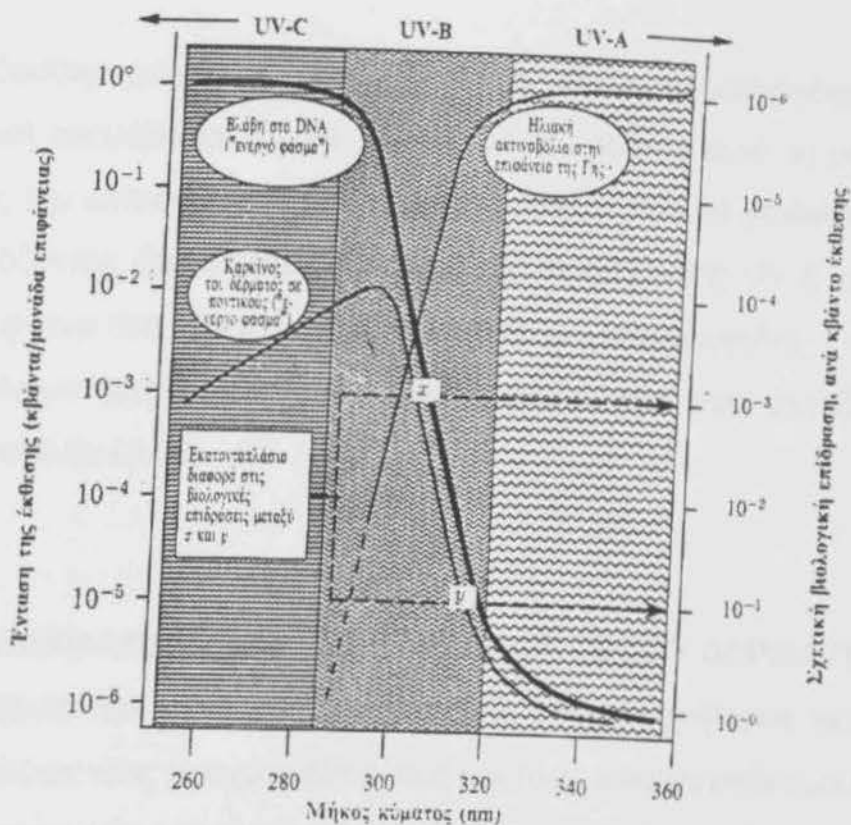
Σημειώνουμε εδώ ότι οι χλωροφθοράνθρακες (CFC) που συντελούν στην καταστροφή του όζοντος συνεισφέρουν και αυτοί στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και για το λόγο αυτό η απαγόρευσή τους αναμένεται να οδηγήσει και σε βραδύτερη εξέλιξη του φαινομένου του θερμοκηπίου.

6. ΑΜΕΣΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΚΘΕΣΗ ΣΕ ΑΥΞΗΜΕΝΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΥΠΕΡΙΩΔΟΥΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Είναι γνωστό ότι η υπεριώδης ηλιακή ακτινοβολία ασκεί ποικίλες άμεσες δυσμενείς επιδράσεις στην ανθρώπινη υγεία. Επίσης, οι επιπτώσεις της υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας στη βιολογία των ζώων και των φυτών είναι επίσης σχετικά καλά κατανοητές. Αν δε στο μέλλον αυξηθεί σημαντικά η έκθεσή τους στην UV (λόγω της μείωσης του όζοντος), μπορεί να επηρεαστεί έμμεσα η ανθρώπινη υγεία, επειδή θα διαταραχθεί η τροφική αλυσίδα ξηράς και θάλασσας. Έμμεσες επιπτώσεις μπορεί να προέλθουν επίσης από τη μείωση της ποιότητας του αέρα, λόγω μεταβολών στη χημική σύσταση της τροπόσφαιρας.

Πριν εξεταστούν λεπτομερέστερα οι άμεσες επιπτώσεις, θα πρέπει να γίνει επιλογή της οπτικής γωνίας από την οποία θα μελετηθεί η αυξημένη έκθεση, αφού τα είδη του πλανήτη είναι ήδη εκτεθειμένα στην υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία σε κάποια επίπεδα «υποβάθρου». Επιπλέον, αυτή η έκθεση είναι, κατά φυσικό τρόπο, πολύ μεγαλύτερη στις περιοχές του ισημερινού και στα μεγάλα υψόμετρα. Επομένως, μπορεί να μη φαίνεται εντυπωσιακή η προβλεπόμενη αύξηση της έκθεσης στην υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία κατά 10%, 20% ή και 50% λόγω της μείωσης του όζοντος. Ωστόσο, το σημαντικό σημείο είναι ότι η αύξηση της έκθεσης θα επηρεάσει πληθυσμούς και είδη τα οποία, από βιολογικής απόψεως (στην περίπτωση του ανθρώπου και από απόψεως συμπεριφοράς), έχουν προσαρμοστεί σε τοπικά επίπεδα έκθεσης. Ορισμένοι, λοιπόν, επιστήμονες υποστηρίζουν πως δεν είναι λογικό να θεωρείται ότι, επειδή πολλά είδη φυτών ευδοκιμούν στους τροπικούς, τυχόν μέτρια αύξηση της έκθεσης στην υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία θα έχει αμελητέα επίδραση σε φυτά των εύκρατων περιοχών (Crutzen, 1992). Εξ άλλου, μπορούμε να αναλογιστούμε την τεράστια αύξηση των περιπτώσεων καρκίνου του δέρματος σε ανοιχτόχρωμους ανθρώπους, οι οποίοι εξελίχθηκαν βιολογικά

για διαβίωση σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη, όταν μετανάστευσαν σε μικρότερα πλάτη όπου προηγουμένως ζούσαν μόνο σκουρόχρωμα άτομα. Η φασματική περιοχή UV-C είναι πολύ βλαβερή για το κυτταρικό DNA (δηλαδή το γενετικό υλικό). Ωστόσο, όπως αναφέραμε προηγουμένως, η ακτινοβολία UV-C δεν διαπερνά την ατμόσφαιρα. Η φασματική περιοχή UV-B, η οποία περιλαμβάνει τα μήκη κύματος 280-315 nm, είναι η καταστροφικότερη, από βιολογική άποψη, ακτινοβολία που φτάνει τελικά στην επιφάνεια της γης, κάτω δε από πειραματικές συνθήκες προκαλεί βλάβες στο κυτταρικό DNA ευθέως ανάλογες προς τη δόση της λαμβανόμενης ακτινοβολίας (Russel, 1989; Sterenborg et al., 1987). Εργαστηριακά πειράματα δείχνουν ότι η ακτινοβολία UV-B είναι πολλές χιλιάδες φορές δραστικότερη, σε σύγκριση με την UV-A, ως αίτιο καρκίνου (Σχήμα 2). Η συζήτηση, λοιπόν, για τις βιολογικές επιπτώσεις από τη μείωση του όζοντος εστιάζεται κυρίως στις εκτιμήσεις για την έκθεση στην ακτινοβολία UV-B. Όμως, η μεγαλύτερου μήκους κύματος ακτινοβολία UV-A δεισδύει βαθύτερα στο δέρμα απ' ότι η UV-B, φτάνοντας στους υποκείμενους δομικούς ινώδεις ιστούς και επομένως ίσως ευθύνεται περισσότερο για τη «γήρανση» του δέρματος (Lancet, 1991). Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2, το δραστικό τμήμα του φάσματος της υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας για την πρόκληση μεταλλάξεων στο ανθρώπινο δέρμα είναι παρόμοιο με εκείνο που ευθύνεται για τον καρκίνο του δέρματος σε αλφιτικούς ποντικούς (Freeman et al., 1989).



Σχήμα 2. Η σύνθεση του φάσματος της υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της Γης και το τμήμα του «ενεργού φάσματος» που προκαλεί (γενετικές) βλάβες στο DNA και καρκίνο του δέρματος στους ποντικούς (Sternberg and Leun, 1987).

Η αναλογία της υπεριώδους ακτινοβολίας που απορροφάται από το στρώμα του όζοντος είναι μικρότερη στον ισημερινό και στα μικρά γεωγραφικά πλάτη (όπου η ακτινοβολία διαπερνά κάθετα το στρώμα του όζοντος), απ' ότι στα μεγαλύτερα πλάτη (όπου η ακτινοβολία διαπερνά πλάγια μεγαλύτερο στρώμα όζοντος). Το γεγονός αυτό ευθύνεται για τη φυσική γεωγραφική διακύμανση της έκθεσης σε υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια του εδάφους. Στη διακύμανση αυτή συνεισφέρουν διάφορες τοπικές επιδράσεις της κατώτερης τροπόσφαιρας, που οφείλονται στην ικανότητα απορρόφησης της υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας από το τροποσφαιρικό όζον (όπως π.χ. οι αέριοι φωτοχημικοί ρύποι). Το φαινόμενο αυτό ενισχύεται από προηγούμενη

επίδραση ορισμένων ρύπων που σκεδάζουν την εισερχόμενη υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία, επιμηκύνοντας με τον τρόπο αυτό τη μέση διαδρομή προς την επιφάνεια της Γης. Όμως, επειδή σταδιακά μειώνεται το στρώμα του όζοντος, θα αυξηθεί το πηλίκιο της ακτινοβολίας UV-B προς τη UV-A που φτάνει στο έδαφος, με αποτέλεσμα να δικαιολογείται η πρόβλεψη ότι θα γίνουν εντονότερες οι βιολογικές επιδράσεις που σχετίζονται με την ακτινοβολία UV-B.

6.1. ΔΕΡΜΑΤΙΚΕΣ ΒΛΑΒΕΣ ΚΑΙ ΚΑΡΚΙΝΟΣ ΤΟΥ ΔΕΡΜΑΤΟΣ

Η αύξηση του επιπέδου έκθεσης στην υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία θα επιβαρύνει τους βραχυπρόθεσμους και τους μακροπρόθεσμους κινδύνους βλάβης που διατρέχει το ανθρώπινο δέρμα. Η οξεία έκθεση σε εντονότερη ηλιακή ακτινοβολία είναι πιθανό να προκαλέσει σοβαρότερα ηλιακά εγκαύματα. Η άνοδος του επιπέδου αθροιστικής έκθεσης θα μπορούσε αφενός να προκαλέσει μεγαλύτερη πάχυνση, ρυτίδωση και απώλεια της ελαστικότητας του δέρματος, αφετέρου να αυξήσει τον κίνδυνο καρκίνου του δέρματος. Παρότι το ηλιακό έγκαυμα (ερύθημα) και ο καρκίνος του δέρματος οφείλονται κατά κύριο λόγο στην ακτινοβολία UV-B, η δραστηριότητα της οποίας μεγιστοποιείται στη φασματική περιοχή των 300 nm, οι υπόλοιπες εκφυλιστικές επιδράσεις συνδέονται περισσότερο με την ακτινοβολία UV-A (Mantis et al., 1997).

Ο καρκίνος του δέρματος είναι μεγαλύτερος στους πληθυσμούς Καυκάσιου τύπου, μεταξύ δε αυτών ο κίνδυνος είναι μεγαλύτερος για τα ανοιχτόχρωμα άτομα. Το γεγονός αυτό μπορεί να κατανοηθεί στα πλαίσια της εξελικτικής διαδικασίας. Η μετανάστευση των σκουρόχρωμων προγόνων μας από τον τόπο προέλευσής τους (πιθανώς η ζεστή και ηλιόλουστη Ανατολική Αφρική) σε ζώνες μεγαλύτερου γεωγραφικού πλάτους της Ευρώπης, της Κίνας και άλλων περιοχών, είχε σαν αποτέλεσμα τη μειωμένη έκθεση στο ηλιακό φως. Για να διατηρηθεί σε επαρκές επίπεδο η παραγωγή βιταμίνης

D, η οποία συντίθεται με τη βοήθεια του ηλιακού φωτός στο δέρμα, είναι πιθανό ότι η διαδικασία της φυσικής επιλογής ευνόησε τη μειωμένη χρώση του δέρματος ώστε να επιτραπεί η διείσδυση μεγαλύτερης ποσότητας υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας (Russell, 1983; Loomis, 1967). Πράγματι, ο μηχανισμός της φυσικής επιλογής μπορεί να ήταν ανελέητα αποτελεσματικός επειδή η έλλειψη της βιταμίνης D προκαλεί ραχίτιδα (μαλακά και παραμορφωμένα οστά), οι δυσπλασίες όμως των οστών της λεκάνης στις περισσότερο σκουρόχρωμες γυναίκες που ζούσαν σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη μπορεί άμεσα, κατά φυσικό τρόπο, να μείωσε την ικανότητα τεκνοποίησης που είναι βασικό κριτήριο της φυσικής επιλογής. Κατά συνέπεια, θα κυριάρχησαν τελικά οι ανοιχτόχρωμες «μεταλλάξεις» στη δεξαμενή των γονιδίων. Είναι ενδιαφέρον ότι, κατά τη σύγχρονη μετανάστευση από τη Νότια Ασία, την Αφρική και τις Δυτικές Ινδίες προς τα Ευρωπαϊκά κράτη, υπάρχουν ενδείξεις «επανάληψης» αυτού του αρχαίου προβλήματος. Έχουν καταγραφεί περιπτώσεις ραχίτιδας στις ομάδες των σκουρόχρωμων μεταναστών (Dunnigan, 1985). Η διαδικασία μείωσης της μελάγχρωσης του δέρματος (μέσω της φυσικής επιλογής) στους πρώτους ανθρώπινους πληθυσμούς που μετακινήθηκαν σε μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη, αύξησε μακροπρόθεσμα τον κίνδυνο προσβολής τους από καρκίνο του δέρματος. Ωστόσο, ο αυξημένος κίνδυνος καρκίνου του δέρματος στις μετα-αναπαραγωγικές ηλικίες έχει μικρή σημασία για τη φυσική επιλογή. Κατά τη διάρκεια των δύο τελευταίων αιώνων, η μετανάστευση μέρους των ανοιχτόχρωμων ατόμων σε περιοχές υψηλής έκθεσης σε υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία, όπως στην Αυστραλία, την Νέα Ζηλανδία, την Νότια Αφρική και τις νότιες περιοχές των ΗΠΑ, είχε ως αποτέλεσμα σημαντική περαιτέρω αύξηση του κινδύνου προσβολής τους από καρκίνο του δέρματος. Στην Αυστραλία, η οποία εμφανίζει τη μεγαλύτερη συχνότητα καρκίνου του δέρματος, πρόσφατες μελέτες δείχνουν ότι η συχνότητα κακοήθους μελανώματος αυξάνει πολύ περισσότερο στους ανοιχτόχρωμους μετανάστες από τη Βρετανία παρά στους σταράτους

Ιταλούς ή Έλληνες (Mc Michael et al., 1988; NH and MRC, 1989). Αυτή η διαφορά στον κίνδυνο εμφάνισης κακοήθους μελανώματος τονίζει ένα σημαντικό σημείο: η αυξημένη έκθεση ανοιχτόχρωμων πληθυσμών σε ακτινοβολία UV-B είναι δυνατό να προκαλέσει σημαντική αύξηση των περιπτώσεων καρκίνου του δέρματος. Η Αφρική εκτείνεται κατά 35° βόρεια και νότια του ισημερινού. Η Ινδία βρίσκεται σε ζώνη μεταξύ του ισημερινού και 30° Β. Αντίθετα, η Δυτική Ευρώπη (αν εξαιρέσουμε την Ισπανία και την Πορτογαλία), η Σκανδιναβία και η Ρωσία βρίσκονται κυρίως σε ζώνη μεταξύ 45° και 70° Β. Οι κάτοικοι των χωρών που βρίσκονται σε μικρά γεωγραφικά πλάτη είναι σκουρόχρωμοι, ενώ σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη κατοικούν ανοιχτόχρωμοι άνθρωποι. Ωστόσο, με μικρές εξαιρέσεις, η Αυστραλία βρίσκεται στη ζώνη μεταξύ 10° και 40° Ν, και οι ΗΠΑ (με εξαίρεση την Αλάσκα) στη ζώνη μεταξύ 25° και 45° Β. Δηλαδή, οι δύο αυτές χώρες λευκών αποίκων βρίσκονται σε πολύ μικρότερα γεωγραφικά πλάτη απ' ό,τι οι Ευρωπαϊκές χώρες προέλευσης των ανοιχτόχρωμων μεταναστών, οι οποίοι και στις δυο περιπτώσεις εκτόπισαν τους σκουρόχρωμους γηγενείς πληθυσμούς.

Υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι καρκίνου του δέρματος: το επιθηλιακό καρκίνωμα (SCC - προέρχεται από την εξωτερική στοιβάδα του δέρματος), το βασικοκυτταρικό καρκίνωμα (BCC - προέρχεται από την υποκειμενική βασική στοιβάδα, από την οποία σχηματίζονται τα επιθηλιακά κύτταρα), και το κακοήθες μελάνωμα (προέρχεται από μελανοκύτταρα στη βασική στοιβάδα). Συνολικά, ο καρκίνος του δέρματος είναι η συχνότερη μορφή καρκίνου στον ανοιχτόχρωμο πληθυσμό του πλανήτη. Ωστόσο, η ακριβής καταγραφή της συχνότητας των κύριων τύπων καρκίνου του δέρματος, BCC και SCC, στους διάφορους πληθυσμούς είναι εξαιρετικά δύσκολη. Κατά τη διάρκεια των τεσσάρων τελευταίων δεκαετιών, η συχνότητα του κακοήθους μελανώματος στο λευκό πληθυσμό αυξάνει ετησίως κατά 5% περίπου. Φαίνεται πως έχει αυξηθεί επίσης η συχνότητα του βασικοκυτταρικού και επιθηλιακού καρκινώματος. Οι επιδημιολόγοι

αποδίδουν αυτές τις εδραιωμένες πλέον τάσεις στις αλληπάλληλες μεταβολές του τρόπου έκθεσης στον ήλιο, από γενιά σε γενιά. Εκτεταμένες επιδημιολογικές μελέτες έχουν δείξει ότι η έκθεση στο ηλιακό φως είναι το κύριο περιβαλλοντικό αίτιο αυτών των καρκίνων, ευθυνόμενο για το 70% περίπου του συνόλου των περιπτώσεων καρκίνου του δέρματος στις ΗΠΑ (Hoffman, 1987). Η υπεριώδης ηλιακή ακτινοβολία προκαλεί χαρακτηριστικές βλάβες στο DNA των αναπτυσσόμενων κυττάρων του δέρματος (όπως π.χ. κατά τη σύνδεση γειτονικών βάσεων πυριμιδίνης στο μόριο του DNA). Κατά συνέπεια, είναι πιθανό να προκαλεί καρκίνο του δέρματος με τη δημιουργία χαρακτηριστικών γενετικών μεταλλάξεων στα κύτταρα αυτά. Συνεπώς, η ακτινοβολία UV-B ενδέχεται να παίζει ρόλο στην «έναρξη» και των τριών τύπων καρκίνου του δέρματος, ενώ στην περίπτωση του κακοήθους μελανώματος ίσως υποβοηθάει, επίσης, τα μετέπειτα στάδια της καρκινογένεσης (Romerdahl et al., 1988).

Τα βασικοκυτταρικά καρκινώματα είναι τέσσερις φορές περίπου συχνότερα από τα επιθηλιακά. Αυτές οι δυο μη μελανοκυτταρικές μορφές καρκίνου του δέρματος είναι αποτέλεσμα υψηλής αθροιστικής έκθεσης στο ηλιακό φως (Kricke et al., 1991) και, επομένως, τείνουν να εμφανίζονται σε ανθρώπους που αναλώνουν πολλές ώρες στον ήλιο. Στην Αυστραλία, η συχνότητα αυτών των καρκίνων αυξάνει καθώς μειώνεται το γεωγραφικό πλάτος, η δε συχνότητα εμφάνισής τους στο Κουίνσλαντ είναι σχεδόν τριπλάσια απ' ό τι στην Τασμανία. Από τους δυο τύπους, το επιθηλιακό καρκίνωμα φαίνεται να είναι στενότερα συνδεδεμένο με την υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία απ' ό τι το βασικοκυτταρικό. Οι δυο παραπάνω τύποι καρκίνοι σπάνια αποβαίνουν μοιραίοι, διότι μόνο 1-2% του συνόλου των ασθενών πεθαίνουν από καρκίνο. Και για τους δυο τύπους, η «λανθάνουσα» περίοδος ανάμεσα στην πρώτη ουσιαστική έκθεση και τα κλινικά συμπτώματα καρκίνου είναι περίπου τρεις έως τέσσερις δεκαετίες. Από τους τρεις τύπους καρκίνου που προαναφέραμε, ο λιγότερο συχνός, αλλά περισσότερο σοβαρός είναι το κακοήθες μελάνωμα. Ο καρκίνος

αυτός προέρχεται από τα κύτταρα που παράγουν μελανίνη, τα μελανοκύτταρα, μέσα στη βασική στοιβάδα του δέρματος και, σε λιγότερες περιπτώσεις, στο μελάγχρουν επιθήλιο που καλύπτει τον αμφιβληστροειδή χιτώνα. Αν δεν αντιμετωπιστεί στα πρώιμα στάδια, ο καρκίνος αυτός έχει την τάση να διασπείρεται μέσω της κυκλοφορίας του αίματος στα εσωτερικά όργανα του σώματος, όπως στο ήπαρ και τον εγκέφαλο, και συχνά αποβαίνει μοιραίος. Το ποσοστό των περιπτώσεων που καταλήγουν ανέρχεται σε 25% περίπου. Η σχέση ανάμεσα στο κακοήθες μελάνωμα και την ακτινοβολία UV-B φαίνεται να είναι περισσότερο πολύπλοκη από εκείνη των άλλων δύο τύπων καρκίνου του δέρματος. Το κακοήθες μελάνωμα δεν περιορίζεται σε περιοχές του σώματος που εκτίθενται περισσότερο στην υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία. Εκτός αυτού, εμφανίζει την τάση να πλήττει περισσότερο άτομα που εργάζονται σε κλειστούς χώρους (γιατρούς, οδοντιάτρους, δικηγόρους, κ.ά. δηλαδή άτομα που εκτίθενται περιστασιακά στον ήλιο «για να τον απολαύσουν»), απ' ό,τι τα συνεχώς εκτεθειμένα, «μαυρισμένα» από τον ήλιο άτομα που εργάζονται στο ύπαιθρο. Αυτά, τα φαινομενικά παράδοξα στοιχεία οδήγησαν στην υπόθεση ότι ο κίνδυνος εμφάνισης κακοήθους μελανώματος αυξάνει με τη διακεκομμένη έκθεση στο ηλιακό φως, ιδέα με την οποία συμφωνούν οι περισσότερες από τις πρόσφατες επιδημιολογικές παρατηρήσεις (Armstrong, 1988). Η λανθάνουσα περίοδος ανάμεσα στην πρώτη ουσιαστική έκθεση και την εμφάνιση του μελανώματος είναι 15-25 χρόνια περίπου. Ο πολλαπλασιασμός των περιπτώσεων κακοήθους μελανώματος στις αναπτυγμένες χώρες, κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, έχει αποδοθεί κυρίως σε αλλαγές στον τρόπο ένδυσης και έκθεσης για ψυχαγωγικούς λόγους, ιδίως στην ηλιοθεραπεία. Λαμβάνοντας υπόψη αυτή τη λανθάνουσα περίοδο, η οποία μεσολαβεί από την έκθεση μέχρι την εμφάνιση του καρκίνου του δέρματος, δεν φαίνεται πιθανό να έχει συνεισφέρει αισθητά η πρόσφατη μείωση του

στρώματος του όζοντος στην αυξημένη συχνότητα εμφάνισης του κακοήθους μελανώματος ή των άλλων τύπων καρκίνου του δέρματος.

Αν λάβουμε υπόψη τις ενδείξεις, σύμφωνα με τις οποίες η ηλιακή ακτινοβολία είναι κύριο αίτιο του καρκίνου του δέρματος, η αύξηση της έκθεσης στην ακτινοβολία UV-B (λόγω της μείωσης του όζοντος) αναμένεται να προκαλέσει αύξηση των περιπτώσεων καρκίνου του δέρματος. Προκαλείται όμως το ερώτημα: πόση θα είναι η αύξηση; Είναι ένα ερώτημα που έχει απασχολήσει πολλές επιστημονικές ομάδες κατά τα τελευταία χρόνια. Παρότι οι παραδοσιακοί επιδημιολόγοι θα προτιμούσαν, ίσως, την πρακτική της αναμονής και παρακολούθησης των ασθενών, παρόλα αυτά η χρήσιμη για την κοινωνία απάντηση στο ερώτημα πρέπει να προέλθει από εκτιμήσεις που πραγματοποιούνται σήμερα, παρά από ακριβείς κλινικές παρατηρήσεις, τα αποτελέσματα των οποίων θα αρχίσουν να εμφανίζονται στις αρχές του επόμενου αιώνα.

Γνωρίζοντας, πρώτον, τη σχέση ανάμεσα σε δεδομένη μείωση του στρατοσφαιρικού όζοντος και στη συνεπαγόμενη μεταβολή της έκθεσης σε ακτινοβολία UV-B στην επιφάνεια της Γης (τον «παράγοντα ενίσχυσης της ακτινοβολίας», όπως ονομάζεται), και δεύτερον, το συντελεστή δόσης - αντίδρασης (τον «παράγοντα βιολογικής ενίσχυσης») ανάμεσα σε αυξημένη έκθεση σε ακτινοβολία UV-B και στον αυξημένο κίνδυνο εμφάνισης καρκίνου του δέρματος, τότε είναι δυνατόν να εκτιμηθεί η μελλοντική αύξηση του κινδύνου προσβολής από καρκίνο του δέρματος σε σχέση με τη μείωση του όζοντος. Η πρώτη σχέση μπορεί να προσδιοριστεί με άμεσες περιβαλλοντικές μετρήσεις, θα πρέπει δε να διευκρινιστεί ο ρόλος των παρεμβολών που προέρχονται από τους ρύπους της τροπόσφαιρας. Η εκτίμηση της δεύτερης σχέσης μπορεί να επιτευχθεί με αρκετούς τρόπους, ιδιαίτερα με τη μέτρηση της γεωγραφικής διακύμανσης στη συχνότητα του καρκίνου του δέρματος στους ανοιχτόχρωμους πληθυσμούς, σε σχέση με τη διακύμανση της έκθεσης του αντίστοιχου περιβάλλοντος στην υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία. Θα πρέπει, όμως, εδώ

να είμαστε προσεκτικοί. Σε ποιο βαθμό η παρατηρούμενη διαφορά στη συχνότητα εμφάνισης περιπτώσεων καρκίνου του δέρματος (που σχετίζεται με το γεωγραφικό πλάτος) οφείλεται σε διαφορές στο επίπεδο έκθεσης του περιβάλλοντος στην υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία, και σε ποιο βαθμό οφείλεται σε σχετιζόμενες διαφορές στην ανθρώπινη συμπεριφορά, όπως π.χ., στο επάγγελμα, στη διασκέδαση και στην ένδυση; Λόγω αυτών των εμπλεκόμενων παραγόντων συμπεριφοράς, οι οποίοι διαμορφώνουν τη μέση κατά τόπους έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία (αναγνωρίζονται δε από τους επιδημιολόγους ως μορφές «συγχυτικών» παραγόντων, που υπεισέρχονται συχνά σε μη πειραματικές μελέτες πληθυσμών ελεύθερης διαβίωσης), τα δεδομένα από ανθρώπινους πληθυσμούς ελεύθερης διαβίωσης να μην αντιπροσωπεύουν την ισχύ της πραγματικής σχέσης δόσης - αντίδρασης. Ας θεωρήσουμε, για παράδειγμα, ότι οι κάτοικοι του Κουίνσλαντ (το οποίο βρίσκεται σε μικρό γεωγραφικό πλάτος) φορούν καπέλα με πλατύ γείσο, ενώ της Τασμανίας (η οποία βρίσκεται σε μεγάλο γεωγραφικό πλάτος) δεν ακολουθούν αυτή τη συνήθεια. Αν συγκρίνουμε μόνο τη συχνότητα εμφάνισης περιπτώσεων καρκίνου του δέρματος στις δύο παραπάνω περιοχές, θα υποεκτιμήσουμε τον πραγματικό (και σχετιζόμενο με το γεωγραφικό πλάτος) κίνδυνο προσβολής από τον καρκίνο του δέρματος στην Αυστραλία.

Αρχικά επιθυμούμε να γνωρίσουμε ποια θα είναι η αύξηση του κινδύνου εμφάνισης καρκίνου του δέρματος αν το όζον της στρατόσφαιρας μειωθεί κατά Χ% στις επόμενες Ψ δεκαετίες. Οι επιστήμονες της ατμόσφαιρας μπορούν να εκτιμήσουν τις υπάρχουσες και μελλοντικές στρατοσφαιρικές συγκεντρώσεις των αερίων που καταστρέφουν το όζον, στη συνέχεια δε να εκτιμήσουν τον καταστροφικό αντίκτυπο αυτών των αερίων στο όζον, με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η εκτίμηση της ποσότητας της επιπρόσθετης υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας που θα φτάνει στην επιφάνεια της Γης. Πράγματι, και τα δύο αυτά δεδομένα μετρούνται απευθείας στα πλαίσια

του Παγκόσμιου Ερευνητικού Προγράμματος για το Κλίμα, με τη βοήθεια διεθνούς δικτύου σταθμών. Οι συλλεγόμενες πληροφορίες θα δώσουν τη δυνατότητα να εκτιμηθούν, συμπερασματικά, οι μελλοντικές μεταβολές. Αφού εκτιμηθεί η αύξηση της έκθεσης σε υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία, οι επιδημιολόγοι θα είναι σε θέση να προβλέψουν την αύξηση της συχνότητας του καρκίνου του δέρματος.

Το 1991, το Περιβαλλοντικό Πρόγραμμα του ΟΗΕ (UNEP) υπολόγισε ότι, για κάθε μείωση κατά 1% του στρατοσφαιρικού όζοντος, η καρκινογόνος δόση της ακτινοβολίας UV-B θα αυξηθεί κατά 1.4%, προκαλώντας αύξηση στη συχνότητα του βασικοκυτταρικού (BCC) και του επιθηλιακού (SCC) καρκινώματος κατά 2.0% και 3.5% αντίστοιχα (UNEP, 1991). Συνολικά, το UNEP εκτιμά ότι τυχόν απώλεια στρατοσφαιρικού όζοντος κατά 1% θα προκαλέσει αύξηση των μη μελανοκυτταρικών καρκινωμάτων του δέρματος κατά 2.3%. Όπως και στην εκτίμηση της αύξησης της θερμοκρασίας του πλανήτη από τη Διεθνή Επιτροπή για τη Μεταβολή του Κλίματος (IPCC), στις παραπάνω εκτιμήσεις των παραγόντων ενίσχυσης (βιολογικής και ακτινοβολίας) υπάρχει αβεβαιότητα κατά ένα τέταρτο (συν ή πλην) περίπου (Armstrong, 1993). Στην εκτίμηση του βιολογικού παράγοντα ενίσχυσης για το κακόηθες μελάνωμα υπάρχει ακόμη μεγαλύτερη αβεβαιότητα που κυμαίνεται μεταξύ 0.5% και 1.0%. Το UNEP προβλέπει ότι, αν διατηρηθεί σε παγκόσμιο επίπεδο για τρεις ή τέσσερις δεκαετίες μέση μείωση του όζοντος κατά 10% (όπως η παρατηρούμενη κατά τα τελευταία χρόνια στα μέσα προς μεγάλα γεωγραφικά πλάτη), θα μπορούσαν να προκληθούν τουλάχιστον 300.000 επιπρόσθετες περιπτώσεις μη μελανοκυτταρικού καρκίνου του δέρματος παγκοσμίως κάθε χρόνο, 4.500 δε επιπλέον περιπτώσεις κακοήθους μελανώματος με ενδεχόμενο ο αριθμός αυτός να διπλασιαστεί.

Η επίδραση της αυξημένης έκθεσης σε υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία και ιδιαίτερα στη φασματική περιοχή που ευθύνεται για τον καρκίνο του δέρματος, θα ισοδυναμούσε με μετακίνηση του πληθυσμού σε μικρότερο

γεωγραφικό πλάτος. Για παράδειγμα, στην Τασμανία της Αυστραλίας (περίπου 40° N), όπου με βάση τις εμφανιζόμενες τάσεις θα μπορούσε να μειώνεται ετησίως το όζον κατά 15% περίπου και στις δύο επόμενες δεκαετίες (2000-2020). Η μείωση αυτή θα αύξανε κατά 20% την έκθεση σε ακτινοβολία UV-B στην επιφάνεια της Γης, με αποτέλεσμα να προκληθεί αύξηση στη συχνότητα των μη μελανοκυτταρικών καρκινωμάτων του δέρματος κατά το ένα τρίτο περίπου. Για τους Τασμανούς, αυτό θα ισοδυναμούσε με μετανάστευση προς βορρά, στο μεσαίο τμήμα των ανατολικών ακτών της Αυστραλίας, σε γεωγραφικό πλάτος 30° N. Όσον αφορά το απώτερο μέλλον, η συνεχιζόμενη μείωση του όζοντος της στρατόσφαιρας μπορεί να προκαλέσει αύξηση κατά 50-100% της συχνότητας εμφάνισης κρουσμάτων καρκίνου του δέρματος στους ανοιχτόχρωμους πληθυσμούς που ζουν σε μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη (και στα δύο ημισφαίρια) μέχρι τα μέσα του επόμενου αιώνα.

Προς το παρόν, όλες οι παραπάνω εκτιμήσεις σκιάζονται από αβεβαιότητα τεχνικής ή στατικής υφής, από την απρόβλεπτη επίδραση των προσαρμοστικών αλλαγών στην ανθρώπινη συμπεριφορά (καθώς, για παράδειγμα, οι αναφορές για τη μείωση του όζοντος αποτελούν τμήμα της καθημερινής πρόβλεψης του καιρού) και από τις τοπικές διακυμάνσεις της ρύπανσης της τροπόσφαιρας. Η καταγραφή της συχνότητας πραγματικών περιπτώσεων καρκίνου του δέρματος σε δείγματα πληθυσμών ανά τον κόσμο δεν θα μπορούσε να προσφέρει σαφείς ενδείξεις για τη μεταβολή του κινδύνου αν δεν περάσουν αρκετές δεκαετίες. Για να αποφευχθεί μια τόσο μεγάλη καθυστέρηση, η Διεθνής Υπηρεσία Έρευνας για τον Καρκίνο (φορέας του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (ΠΟΥ)) διερευνά τρόπους για την καθιέρωση ενός συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης του πληθυσμού. Αυτό το σύστημα μπορεί να περιλαμβάνει τη μέτρηση πρώιμων βλαβών σε κύτταρα του δέρματος, οι οποίες σχετίζονται με τον καρκίνο (όπως π.χ., εμφάνιση συγκεκριμένων γενετικών μεταλλάξεων), σε επιλεγμένους πληθυσμούς που ζουν σε διαφορετικές γεωγραφικές

περιοχές και επομένως είναι εκτεθειμένοι σε διαφορετικού βαθμού μεταβολές της ακτινοβολίας UV-B.

6.2. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΟΥΣ ΟΦΘΑΛΜΟΥΣ

Το μοναδικό μέρος του σώματος, από το οποίο η υπεριώδης ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να διεισδύσει σχετικά ελεύθερα, είναι το πρόσθιο τμήμα του οφθαλμού. Αυτό είναι το αναπόφευκτο τμήμα που πληρώνουμε για να μπορούμε να βλέπουμε.

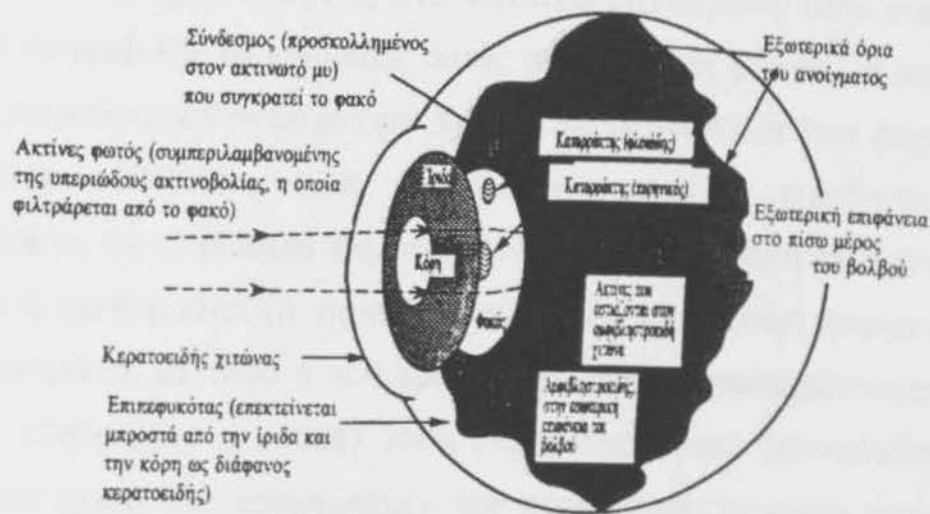
Ο κερατοειδής χιτώνας (η διάφανη εξωτερική στοιβάδα που βρίσκεται μπροστά από την έγχρωμη ίριδα και την κόρη) και ο φακός που εστιάζει το φως (βρίσκεται πίσω από την ίριδα), φιλτράρουν την υψηλής ενέργειας υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία, η οποία διαφορετικά θα προκαλούσε βλάβη στον αμφιβληστροειδή χιτώνα που δέχεται το φως στο πίσω μέρος του οφθαλμικού θαλάμου. Με τον τρόπο αυτό, ποσοστό μικρότερο από 1% της υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στον κερατοειδή, φτάνει πραγματικά στον αμφιβληστροειδή χιτώνα. Παρ' όλα αυτά, η έκθεση στην υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να προκαλέσει βαθμιαία μείωση της όρασης, καταστρέφοντας τον κερατοειδή χιτώνα, το φακό και τον αμφιβληστροειδή χιτώνα (Taylor, 1989). Επιπλέον, επειδή με την ηλικία μειώνεται το ποσοστό της υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας που διαπερνά το φακό, ο αμφιβληστροειδής χιτώνας των παιδιών μπορεί να είναι ιδιαίτερα ευάλωτος.

Κατά τη διάρκεια πολλών δεκαετιών, αυτή η προστατευτική απορρόφηση της υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας προκαλεί κάποιου βαθμού δυσχρωματισμό (γαλακτώδες κιτρίνισμα) των κατά τα άλλα διάφανων ιστών, ιδιαίτερα των πρωτεϊνούχων κρυστάλλων στο φακό. Η ακτινοβολία UV-B έχει ενέργεια ικανή να διασπάσει τα οργανικά υπεροξειδικά μόρια στον κερατοειδή χιτώνα και στο φακό, απελευθερώνοντας κατ' αυτό τον τρόπο μικρότερες, πολύ ενεργές ελεύθερες ρίζες, στις οποίες

συμπεριλαμβάνονται και ρίζες υδροξυλίου. Μέσα στα μεταβολικώς ενεργά κύτταρα του κερατοειδούς, το ένζυμο αλδεϋδική διυδρογενάση απομακρύνει τις αλδεϋδες που παράγονται από αυτές τις χημικές αντιδράσεις. Στο περισσότερο αδρανές υλικό του φακού, οι ελεύθερες ρίζες προκαλούν φωτοοξειδωτική διάσπαση και σύνδεση των πρωτεϊνικών μορίων του φακού, η οποία οδηγεί στην απώλεια της διαφάνειάς του. Πιστεύεται ότι η παραπάνω διαδικασία ενισχύεται από διατροφικές ελλείψεις, τόσο πρωτεϊνών όσο και αρκετών βιταμινών (ιδιαίτερα Α, C και Ε) που παρέχουν αντιοξειδωτική προστασία έναντι της ταχύτατης και βλαπτικής επίδρασης των ελεύθερων ριζών στα μόρια. Το γεγονός αυτό θα μπορούσε να εξηγήσει την πολύ υψηλή συχνότητα σε ορισμένους υποσιτιζόμενους πληθυσμούς της Αφρικής.

Η πάθηση του καταρράκτη εμφανίζεται κυρίως σε μεγάλη ηλικία και ευθύνεται για τις μισές και πλέον από τα 25-35 εκατομμύρια περιπτώσεις τύφλωσης σε ολόκληρο τον κόσμο (Kupfer, 1984; Foster, 1991). Ο συνολικός αυτός αριθμός αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά, καθώς αυξάνει το προσδόκιμο επιβίωσης στα αναπτυσσόμενα κράτη. Περίπου ένας στους δέκα Αυστραλούς, ηλικίας άνω των 65 ετών, έχει καταρράκτη. Στις ΗΠΑ, πραγματοποιούνται περισσότερες από 600.000 εγχειρήσεις καταρράκτη κάθε χρόνο, αποτελούν δε το συχνότερο είδος χειρουργικής επέμβασης που παρέχεται από την κοινωνική ιατροφαρμακευτική περίθαλψη και κοστίζει συνολικά στην αμερικάνικη κοινωνία 2.5 δισεκατομμύρια δολάρια ετησίως. Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι γεροντικού καταρράκτη: ο πυρηνικός καταρράκτης, ο οποίος αναπτύσσεται στο κέντρο του φακού (πίσω από την κόρη) και προκαλεί τύφλωση, και ο φλοιώδης καταρράκτης, ο οποίος επηρεάζει την περιφέρεια του φακού και δεν εμποδίζει συνήθως την όραση (Σχήμα 3). Στις αναπτυγμένες χώρες, ο πυρηνικός καταρράκτης είναι συνήθως πολύ συχνότερος από τον φλοιώδη, αν και συχνά υπάρχουν και οι δύο μορφές στο ίδιο άτομο. Εμφανίζονται και άλλοι τύποι της πάθησης (όπως π.χ., ο οπίσθιος κυπελοειδής καταρράκτης στον οποίο η

θολερότητα εντοπίζεται στο πίσω τμήμα του φακού, αμέσως μπροστά από το οπίσθιο περιφάκιο, ενώ οι υπόλοιπες στοιβάδες του φακού παραμένουν διαφανείς).



Σχήμα 3. Όψη του εσωτερικού οφθαλμού, μέσω ανοίγματος, όπως θα φαινόταν αν το εξετάζαμε από εμπρός και πλαγίως. Ο καταρράκτης (θολερότητα) παρουσιάζεται σχηματικά στο φακό, ο οποίος βρίσκεται πίσω από την κόρη που επιτρέπει την είσοδο του φωτός (Mc Michael, 1997).

Ο καταρράκτης εμφανίζεται συχνότερα στις ηλιόλουστες και τροπικές περιοχές. Ωστόσο, σπάνια υπάρχουν επιδημιολογικές ενδείξεις που θα μπορούσαν να συνδέσουν ποσοτικά το γεωγραφικό πλάτος και τα επίπεδα υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας στο περιβάλλον με την εμφάνιση καταρράκτη. Υπάρχουν ορισμένες ενδείξεις, στις οποίες περιλαμβάνονται και τα αποτελέσματα μεγάλης έρευνας που έγινε σε 10.000 Αμερικανούς,

ότι η συχνότητα του πυρηνικού καταρράκτη αυξάνει με τη μείωση του γεωγραφικού πλάτους (Hiller et al., 1983). Από σχετικές μελέτες έχει διαπιστωθεί ότι η εμφάνιση καταρράκτη είναι πολύ συχνότερη στους Αυστραλούς Αβορίγινες που ζουν στην ύπαιθρο, απ' ό,τι στους λευκούς Αυστραλούς. Στους Αβορίγινες δε, η συχνότητα εμφάνισης της πάθησης, στις κεντρικές και βορειοδυτικές περιοχές, είναι διπλάσια απ' ό,τι σε νοτιότερες περιοχές, οι οποίες είναι λιγότερο εκτεθειμένες στην υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία, αν και μέρος αυτής της διαφοράς μπορεί να οφείλεται στην επαγγελματική απασχόληση παρά στην ακτινοβολία που δέχεται το περιβάλλον (Hollows et al., 1981). Η συχνότητα εμφάνισης του καταρράκτη, σε παγκόσμια κλίμακα, δεν παρουσιάζει σαφή συσχέτιση με το χρώμα του δέρματος (ή της ίριδας), αν και μια αμερικανική έρευνα έδειξε ότι τα άτομα με καστανό ή μελί χρώμα ματιών αντιμετωπίζουν αυξημένο κίνδυνο (Collman et al., 1988). Αν η υπεριώδης ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται μέσω του «ανοίγματος» της κόρης είναι το κύριο αίτιο της θολερότητας του φακού, τότε δεν είναι πολύ πιθανό να σχετίζεται το χρώμα του δέρματος ή της ίριδας με τη συχνότητα εμφάνισης καταρράκτη. Λεπτομερέστερες επιδημιολογικές μελέτες διερεύνησαν τη σχέση ανάμεσα στην εκτιμώμενη ατομική έκθεση σε υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία και στην εμφάνιση καταρράκτη. Επειδή, όμως, είναι δύσκολο να εκτιμηθεί η έκθεση στην υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια ολόκληρης της ζωής κάθε ατόμου, παρόμοιες μελέτες πιθανώς δεν αποκαλύπτουν με μεγάλη ακρίβεια την πραγματική ισχύ της σχέσης. Μια μελέτη σε «ανθρώπους της Θάλασσας» (κυρίως ψαράδες) που εργάζονταν στην περιοχή του Κόλπου Τσέσαπικ των ΗΠΑ, έδειξε ότι η υπολογιζόμενη έκθεση ενός ατόμου σε ακτινοβολία UV-B, καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του, ήταν ευθέως ανάλογη με την εμφάνιση φλοιώδους καταρράκτη (όχι, όμως, πυρηνικού), ο δε διπλασιασμός της συνολικής έκθεσης σε ακτινοβολία UV-B προκάλούσε κατά 60% αύξηση στην πιθανότητα εμφάνισης φλοιώδους καταρράκτη (Taylor et al., 1988). Μερικές ανάλογες μελέτες στις ΗΠΑ, την

Ιταλία και την Ινδία αποκάλυψαν παρόμοιες σχέσεις, τόσο για τον πυρηνικό όσο και για το φλοιώδη καταρράκτη (Taylor, 1989; Mohan et al., 1991), αρκετές άλλες όμως δεν αποκάλυψαν καμία συσχέτιση (Leske et al., 1991; Dolezal et al., 1989). Καταρράκτης έχει προκληθεί επίσης σε πειραματόζωα, ιδίως σε ποντικούς, οι οποίοι εκτέθηκαν σε υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία (Taylor, 1989).

Με βάση διάφορες επιδημιολογικές μελέτες, η Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος (EPA) των ΗΠΑ προβλέπει ότι η κατά 10% αύξηση της έκθεσης σε ακτινοβολία UV-B θα αυξήσει τη συχνότητα εμφάνισης γεροντικού καταρράκτη κατά 4% έως 6%, η αύξηση δε αυτή θα είναι μεγαλύτερη στην ηλικία των 50 παρά των 70 ετών (Hoffman, 1987). Η εκτίμηση αυτή αφορά το σύνολο των περιπτώσεων καταρράκτη (πυρηνικού και φλοιώδους), αν και ενδέχεται να διαφέρει η σχέση της κάθε μορφής της πάθησης με την έκθεση στην ακτινοβολία UV-B. Εφόσον δεν είμαστε βέβαιοι για τη σχέση ανάμεσα στον καταρράκτη και την υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία, αλλά και για τις επικείμενες τάσεις μείωσης του στρώματος του όζοντος, οι εκτιμήσεις για τη μελλοντική αύξηση των περιπτώσεων καταρράκτη είναι πολύ προσεγγιστικές. Η Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος των ΗΠΑ έχει υπολογίσει τον αριθμό των επιπρόσθετων περιπτώσεων καταρράκτη που θα πλήξει τον υπάρχοντα πληθυσμό των ΗΠΑ κατά τη διάρκεια της ζωής του, σύμφωνα με έξι διαφορετικά σενάρια για διάφορα επίπεδα παγκόσμιας εκπομπής χλωροφθορανθράκων. Οι εκτιμήσεις αυτές κυμαίνονται από 10.000 έως 3.239.000 άτομα επιπλέον (Hoffman, 1987). Πιο πρόσφατα, το Περιβαλλοντικό Πρόγραμμα του ΟΗΕ (UNEP) προέβλεψε ότι τυχόν επιμέρους μείωση του όζοντος της στρατόσφαιρας κατά 10%, θα είχε ως συνέπεια έως και 1.750.000 επιπρόσθετες περιπτώσεις καταρράκτη ετησίως, σε παγκόσμιο επίπεδο (UNEP, 1991). Το UNEP παρουσίασε πρόσφατες ενδείξεις, σύμφωνα με τις οποίες η μακροχρόνια έκθεση στο ηλιακό φως μπορεί να μειώσει την όραση, συμβάλλοντας στην εμφάνιση

πρεσβυωπίας (αδυναμίας να εστιάσει ο φακός σε μικρές αποστάσεις) και στην παραμόρφωση του πρόσθιου περιφάκιου. Θεωρητικά, αν επιβεβαιωθούν αυτές οι επιδράσεις, θα ήταν αποτέλεσμα δομικής μοριακής βλάβης από την ακτινοβολία UV-B.

Υπάρχουν και άλλες, δευτερεύουσας σημασίας επιδράσεις της ακτινοβολίας UV-B στον επιπεφυκότα, δηλαδή τη διάφανη στοιβάδα που καλύπτει το «λευκό» του ματιού και τον κερατοειδή χιτώνα. Οξεία έκθεση σε ακτινοβολία UV-B μπορεί να προκαλέσει φωτοκερατοεπιπεφυκίτιδα («τύφλωση του χιονιού», όπως συχνά αναφέρεται), ενώ η παρατεινόμενη αύξηση στην έκθεση μπορεί να αυξήσει τη συχνότητα εμφάνισης πτερυγίου. Όπως φανερώνει το όνομά του, το πτερύγιο είναι πάχυνση του επιθηλίου του επιπεφυκότος σε σχήμα πτερυγίου. Είναι συχνή πάθηση των ανθρώπων που εργάζονται στο ύπαιθρο σε ηλιόλουστες περιοχές, αποτελεί δε αίτιο μειωμένης όρασης, μερικές δε φορές και τύφλωσης. Η προαναφερόμενη μελέτη σε «ανθρώπους της θάλασσας» αποκάλυψε ισχυρή θετική συσχέτιση ανάμεσα στην έκθεση ενός ατόμου σε ακτινοβολία UV-B και την εμφάνιση πτερυγίου, καθώς επίσης κλιματολογική κερατοπάθεια (απόθεση τροποποιημένων πρωτεϊνών στον κερατοειδή, που προκαλούν θολρότητα) (Taylor, 1989). Στον ενήλικο πληθυσμό της Αυστραλίας, η συχνότητα εμφάνισης πτερυγίου είναι περίπου 3% στους Αβορίγινες και 10% στον υπόλοιπο πληθυσμό. Από τα μάλλον σπάνια δεδομένα, εκτιμάται ότι αύξηση της υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας κατά 1%, θα προκαλούσε αύξηση της συχνότητας εμφάνισης του πτερυγίου κατά 2.5% στους Αβορίγινες και κατά 14% στον υπόλοιπο πληθυσμό (NH and MRC, 1989).

Ο αμφιβληστροειδής χιτώνας, δηλαδή η μεμβράνη που σχηματίζεται από τις απολήξεις του οπτικού νεύρου στο οπίσθιο μέρος του οπτικού θαλάμου, είναι ευαίσθητος στην υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία. Αν και, υπό φυσιολογικές συνθήκες, η υπεριώδης ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στον αμφιβληστροειδή είναι ουσιαστικά μηδαμινή, τυχόν σημαντική μείωση του

στρατοσφαιρικού όζοντος πιθανώς θα αύξανε την έκθεση του αμφιβληστροειδούς στην ακτινοβολία αυτή. Η συνεπαγόμενη φωτοχημική βλάβη θα προκαλούσε εκφυλιστική πάθηση του αμφιβληστροειδούς και επομένως, πρόβλημα στην όραση. Πράγματι, υπάρχουν ενδείξεις, αν και αντιφατικές, σύμφωνα με τις οποίες αυτός ο τύπος εκφύλισης της ωχράς κηλίδας σχετίζεται με αθροιστική έκθεση στο ηλιακό φως (Taylor, 1989; Young, 1988). Τέλος, ο αμφιβληστροειδής είναι μαύρος λόγω του προστατευτικού χοριοειδούς χιτώνα ο οποίος περιέχει μελανοκύτταρα παρόμοια με αυτά που παράγουν μελανίνη στο δέρμα. Τα μελανοκύτταρα αυτά, σε παθολογική κατάσταση, αποτελούν την εστία για τη δημιουργία κακοήθους μελανώματος. Μελάνωμα στο μάτι εμφανίζεται πολύ σπάνια (περίπου έξι περιπτώσεις ανά εκατομμύριο ετησίως στην Αυστραλία), οι ενδείξεις δε που συσχετίζουν αυτόν τον τύπο καρκίνου με το βαθμό έκθεσης του αμφιβληστροειδούς στην υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία, παραμένουν ισχνές.

6.3. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΑΝΟΣΟΠΟΙΗΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Το ανοσοποιητικό σύστημα είναι η πρωταρχική άμυνα του οργανισμού μας έναντι ξένων «αντιγονικών» στοιχείων, συνήθως πρωτεϊνικών μορίων, που υπάρχουν σε ζωντανούς μικροοργανισμούς και σε αδρανή υλικά, όπως π.χ. σκόνη, τρίχες και γύρη. Το ανοσοποιητικό σύστημα αποτελείται από ένα καλώς συντονισμένο δίκτυο ιστών, γενικών αμυντικών κυττάρων (μακροφάγων και «φονικών κυττάρων») και εξειδικευμένων, συχνά ευκίνητων, που παράγουν αντισώματα και «περιπολούν» στο σώμα για να ανακαλύψουν και να επιτεθούν σε ξένα προς τον οργανισμό μόρια. Η αυξημένη έκθεση σε υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία καταστέλλει ορισμένες λειτουργίες του αμυντικού συστήματος. Στους ανθρώπους, το φαινόμενο αυτό φαίνεται να είναι ανεξάρτητο από το χρώμα του δέρματος (και το εκ

γενετής και το επίκτητο) και επομένως έχει δυνητικά παγκόσμιες συνέπειες.

Όμως, το συγκεκριμένο πεδίο έρευνας είναι σχετικά νέο και υπάρχουν πολλά στοιχεία αβεβαιότητας (Morison, 1988). Πράγματι, ο βιολογικός εξελικτικός «σκοπός», εάν υπάρχει, οποιασδήποτε παρόμοιας ανοσοκατασταλτικής επίδρασης από την αυξημένη έκθεση σε υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία, παραμένει μυστήριο. Επίσης, δεν υπάρχουν συστηματικές επιδημιολογικές ενδείξεις ότι οι ανοσολογικές διαταραχές, οι οποίες σχετίζονται με την υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία, επηρεάζονται από τη γεωγραφική θέση. Παρ' όλα αυτά, πειράματα που διεξήχθησαν τόσο σε ποντικούς όσο και (σε μικρότερη έκταση) σε ανθρώπους, δείχνουν ότι η ακτινοβολία του δέρματος με UV-B ακτινοβολία καταστέλλει την υπερευαισθησία επαφής («αλλεργία επαφής»), μειώνει τον αριθμό και τη λειτουργία των ανοσολογικά ενεργών κυττάρων (των κυττάρων Langerhans) στο δέρμα, διεγείρει την παραγωγή ανοσοκατασταλτικών κυττάρων «T-καταστολέων», και μεταβάλλει την κατανομή των ανοσολογικά ενεργών λεμφοκυττάρων (λευκών αιμοσφαιρίων) που κυκλοφορούν στο αίμα. Αυτές οι διαταραχές στον αριθμό και τις λειτουργίες των κυττάρων που σχετίζονται με την αμυντική ικανότητα του οργανισμού επιμένουν για λίγες μόνο ημέρες ή εβδομάδες μετά τη διακοπή της έκθεσης σε υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία. Ουσιαστικά, αποτελούν επιλεκτικές επιπτώσεις, και δεν μοιάζουν με τη γενικευμένη ανοσοκαταστολή που μπορούν να προκαλέσουν στον άνθρωπο οι ιοί ή ορισμένα φάρμακα.

Αν το ανοσοποιητικό σύστημα υποστεί σοβαρή βλάβη, το σώμα δεν είναι δυνατόν να επιβιώσει κατά τις συνήθεις, καθημερινές επαφές του με τους λοιμογόνους μικροοργανισμούς του περιβάλλοντος. Συνεπώς μια πιθανή συνέπεια από τη μείωση του στρώματος του όζοντος θα ήταν η μειωμένη προστασία έναντι δερματικών μολύνσεων και μυκητιάσεων, οι οποίες φυσιολογικά ελέγχονται από την κυτταρική ανοσία στο δέρμα (Morison,

1988). Το δέρμα είναι ιστός με υψηλή ανοσολογική δραστηριότητα. Η αυξημένη συχνότητα εμφάνισης βλαβών στο πρόσωπο, τις οποίες προκαλεί ο ιός του απλού (επιχείλιου) έρπητα κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, σκιαγραφεί με σαφήνεια την επίδραση της υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας στην ανοσολογική δραστηριότητα του δέρματος. Μελέτες σε ποντικούς έδειξαν ότι η ενεργοποίηση και πολλαπλασιασμός του ιού του απλού έρπητα είναι επακόλουθο τοπικής καταστολής της ανοσολογικής άμυνας λόγω της έκθεσης σε υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία. Σύμφωνα με πρόσφατες ενδείξεις, η υπεριώδης ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να προκαλέσει γενικευμένη καταστολή του ανοσοποιητικού συστήματος. Ωστόσο, παρά τη δυνητική σημασία του φαινομένου για τη δημόσια υγεία, αφού διευκολύνει τη διάδοση των λοιμωδών ασθενειών, έχουν διεξαχθεί ελάχιστες έρευνες σε ανθρώπους. Ποντικοί που έχουν εκτεθεί σε υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία εμφανίζουν μειωμένη ανοσολογική αντίδραση στο βακτήριο της φυματίωσης και ελαττωμένη ικανότητα να το εξαλείψουν από τα εσωτερικά τους όργανα. Επιπλέον, όταν εγχυθούν σε ποντικούς υδατοδιαλυτές ουσίες («κυτοκίνες»), τις οποίες εκκρίνουν κύτταρα δέρματος σε καλλιέργειες που έχουν εκτεθεί στην υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία, καταστέλλεται η βακτηριοκτόνος δράση των μακροφάγων κυττάρων (η πρώτη γραμμή ανοσολογικής άμυνας), όπως επίσης ο όψιμος ή επιβραδυνόμενος τύπος αντίδρασης υπερευαισθησίας (Jeevan et al., 1992). (Δυστυχώς, η σημασία της ακεραιότητας του ανοσολογικού συστήματος για τον περιορισμό του βακτηρίου της φυματίωσης έχει πλέον επιβεβαιωθεί σε περιπτώσεις ατόμων που μολύνθηκαν από τον «ανοσοκαταστροφέα» ιό του AIDS. Η συχνότητα της κλινικά ενεργού φυματίωσης έχει αυξηθεί σημαντικά σε ανθρώπους που έχουν μολυνθεί από τον ιό HIV, ιδιαίτερα στην Αφρική και, πιο πρόσφατα, στην Ινδία). Αυτή η ευπάθεια προς τις λοιμώξεις, την οποία προκαλεί η έκθεση στην υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία, θα μπορούσε να αποδειχθεί σημαντική σε φτωχές χώρες που πλήττονται από υψηλά ποσοστά διαρροϊκών

ασθενειών και αντιμετωπίζουν έντονα προβλήματα από μεταδοτικές νόσους, όπως η φυματίωση, η λέπρα και η δερματική λείσμανίαση, ασθένεια του δέρματος, συνηθισμένη στις τροπικές και υποτροπικές χώρες, η οποία μεταδίδεται με φλεβοτόμους (σκνίπες) και προκαλεί μεγάλες και επίμονες πληγές, με αποτέλεσμα την αυξημένη νοσηρότητα και θνητότητα. Πράγματι, πειραματικές μελέτες σε ποντικούς δείχνουν ότι οι χρόνιες λοιμώξεις του δέρματος, όπως η λέπρα και η λείσμανίαση, μπορεί να επηρεαστούν ιδιαίτερα από την υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία, λόγω της καταστολής της τοπικής κυτταρικής ανοσίας στο δέρμα (Giannini, 1986). Στο σύνολό τους, οι αναφορές από τις προηγούμενες και διάφορες άλλες έρευνες δείχνουν ότι η ανοσοκαταστολή, την οποία προκαλεί η έκθεση στην υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία, θα οδηγήσει σε έξαρση των λοιμωδών ασθενειών που οφείλονται σε βακτήρια, μύκητες, ιούς και πρωτόζωα (Morison, 1989; Mackie et al., 1988). Προκαλεί επίσης ανησυχία η προειδοποίηση του Περιβαλλοντικού Προγράμματος του ΟΗΕ (UNEP) ότι η αυξημένη έκθεση στην υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να διευκολύνει την κλινική εκδήλωση του AIDS.

Μια άλλη σχετιζόμενη με τα παραπάνω, αλλά και δυνητικά σοβαρή συνέπεια θα ήταν η μειωμένη αποτελεσματικότητα των εμβολιασμών. Για να επιτευχθεί ικανοποιητικό επίπεδο ενεργού ανοσίας, το σώμα πρέπει να παρουσιάσει έντονη αντίδραση στα αντιγόνα τα οποία υπάρχουν στα εμβόλια. Για τους εμβολιασμούς που πραγματοποιούνται με ενοφθαλμισμό στο δέρμα (π.χ. της φυματίωσης) η αντίδραση του οργανισμού θα μπορούσε να είναι μειωμένη λόγω της καταστολής που προκαλεί η υπεριώδης ηλιακή ακτινοβολία στην τοπική απόκριση των κυττάρων προς το αντιγόνο. Αν και οι υπάρχουσες ενδείξεις είναι περιορισμένες, πρόσφατη πειραματική μελέτη σε νέους, ενήλικες εθελοντές έδειξε ότι τυχόν σχετικά μικρή αύξηση της έκθεσης στην υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία μειώνει την ανοσολογική απόκριση του δέρματος προς τα αντιγόνα. Επιπλέον, η μελέτη αυτή αποκάλυψε ότι ακόμη και επίπεδο

έκθεσης ικανό να προκαλέσει περιορισμένο τοπικά ηλιακό έγκαυμα, μπορεί να καταστείλει την ικανότητα απόκρισης σε απομακρυσμένα σημεία του σώματος, τα οποία δεν έχουν εκτεθεί στην ακτινοβολία (Cooper et al., 1992). Επιπλέον, φαίνεται ότι τόσο οι ανοιχτόχρωμες όσο και οι σκουρόχρωμες φυλές επηρεάζονται κατά παρόμοιο τρόπο (Morison, 1989; Mackie et al., 1988). Είναι πιθανό, αν και υποθετικό, ότι ενώ ο ΠΟΥ αγωνίζεται να εμβολιάσει τα παιδιά του πλανήτη κατά των κύριων λοιμωδών νοσημάτων, οποιαδήποτε επιπλέον παρόμοια μείωση στην ανοσολογική απόκριση των πληθυσμών, οι οποίοι είναι ήδη εξασθενημένοι από τον υποσιτισμό και τις λοιμώξεις, θα μπορούσε να δυσχεράνει αυτή την ηρωική προσπάθεια.

Επίσης, το ανοσοποιητικό σύστημα συνεισφέρει στην άμυνα του σώματος εναντίον του καρκίνου. Ισχυρές ενδείξεις υπέρ αυτής της άποψης προέρχονται από μελέτες σε ανθρώπους που γεννήθηκαν με προβλήματα ανοσολογικής ανεπάρκειας, σε δέκτες οργάνων οι οποίοι υποβάλλονται σε ανοσοκαταστολή και σε ασθενείς του AIDS με κατεστραμμένο ανοσοποιητικό σύστημα. Όλοι οι παραπάνω ασθενείς έχουν αυξημένες πιθανότητες να αναπτύξουν καρκίνο, ιδιαίτερα καρκίνο του δέρματος (εξαιρουμένου του μελανώματος), των λεμφαδένων και πολλούς άλλους τύπους καρκίνου οι οποίοι θεωρείται ότι προκαλούνται από ιούς. Υπό το φως των νέων τεχνικών της Μοριακής Βιολογίας, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση DNA-ιών σε ανθρώπινα κύτταρα, φαίνεται πολύ πιθανό ότι οι ιοί ενέχονται σε ευρύ φάσμα καρκίνων. Επομένως, η καταστολή του ανοσοποιητικού συστήματος, λόγω υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας, θα μπορούσε να έχει πολλές και σοβαρές συνέπειες. Ο ιός Epstein-Barr (EBV) προσφέρει σημαντικό και ενδιαφέρον παράδειγμα, αφού φαίνεται να ευθύνεται για την εμφάνιση λεμφωμάτων σε άτομα με ανοσοκαταστολή. Ο ιός αυτός υπάρχει από αρχαιότατων χρόνων και εξελίχθηκε παράλληλα με το ανθρώπινο είδος. Συνήθως απαντάται σε ισόβιους φορείς, οι οποίοι δεν εμφανίζουν

συμπτώματα επειδή ο ιός ελέγχεται από τα T-λεμφοκύτταρα του ανοσοποιητικού συστήματος. Ωστόσο, η ανοσοκαταστολή, είτε λόγω θεραπειών με φάρμακα σε ασθενείς που έχουν υποβληθεί σε μεταμόσχευση, είτε λόγω του νέου (από εξελικτικής άποψης) ιού HIV, διαταράσσει αυτή την καλοήγη σχέση και μεταμορφώνει τον EBV σε καρκινογόνο ιό.

Μετά από πειραματική έκθεση των ποντικών σε υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία, καταστέλλεται το αμυντικό τους σύστημα και καθίστανται περισσότερο ευάλωτοι προς καρκινογόνες χημικές ουσίες. Επίσης, εάν μεταμοσχευτεί καρκίνος του δέρματος σε ποντικούς, ο καρκίνος αναπτύσσεται ταχύτερα σε εκείνους που είχαν προηγουμένως ακτινοβοληθεί με υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία, απ' ότι στους ποντικούς που δεν είχαν εκτεθεί στην ακτινοβολία αυτή (Kripke, 1981). Είναι πιθανό ότι το φαινόμενο αυτό οφείλεται σε αυξημένη (λόγω της υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας) παραγωγή ορισμένων λευκών αιμοσφαιρίων, των ονομαζομένων «κατασταλτικών T-λεμφοκυττάρων», τα οποία παρεμποδίζουν τη λειτουργία των φυσιολογικών μηχανισμών άμυνας του οργανισμού εναντίον της δημιουργίας όγκων (Roberts et al., 1986). Η υπεριώδης ηλιακή ακτινοβολία, κατά συνέπεια, εκτός του ότι προκαλεί άμεσα καρκίνο του δέρματος, μπορεί έμμεσα να διευκολύνει την εξέλιξη και άλλων μορφών καρκίνου οι οποίοι, υπό φυσιολογικές συνθήκες, καταστέλλονται από το υγιές ανοσοποιητικό σύστημα.

6.4. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΕ ΑΛΛΑ ΕΙΔΗ ΤΟΥ ΠΛΑΝΗΤΗ

Η αύξηση της έκθεσης στην ακτινοβολία UV-B θα προκαλέσει επίσης ποικίλες αρνητικές επιδράσεις στην πανίδα και τη χλωρίδα της ξηράς και της θάλασσας. Το γεγονός αυτό δεν θα πρέπει να μας εκπλήσσει, αφού τα φυτά και τα ζώα της ξηράς και οι οργανισμοί που ζουν στο επιφανειακό στρώμα της θάλασσας εξελίχθηκαν μόνο μετά το σχηματισμό του

προστατευτικού στρώματος του όζοντος. Η αυξημένη έκθεση στην ακτινοβολία UV-B μπορεί να διαταράξει τη φωτοσύνθεση στα φυτά και επομένως, να παρεμποδίσει την ανάπτυξή τους. Σε ευαίσθητες καλλιέργειες, αυτό θα είχε σαν αποτέλεσμα μειωμένη γεωργική παραγωγή. Από τα περιορισμένα στοιχεία που υπάρχουν, φαίνεται ότι η απόκριση στην ακτινοβολία UV-B διαφέρει ανάλογα με το είδος και την ποικιλία του φυτού.

Τα κύτταρα στις εξωτερικές (επιδερμικές) στοιβάδες των φύλλων των φυτών περιέχουν φαιολικές ενώσεις που απορροφούν την υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία. Κατ' αυτό τον τρόπο, οι εσωτερικές στοιβάδες των πράσινων φωτοσυνθετικών κυττάρων προστατεύονται από τη βλαπτική επίδραση της υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ δέχονται όλη την ακτινοβολία που χρησιμοποιείται στη φωτοσύνθεση, η οποία διαπερνά τις εξωτερικές κυτταρικές στοιβάδες. Η υπεριώδης ηλιακή ακτινοβολία φαίνεται να παρεμποδίζει τη φωτοσύνθεση μέσω διεργασιών που συμβαίνουν σε ολόκληρο το φυτό, σε κυτταρικό και μοριακό επίπεδο. Για παράδειγμα, μπορεί να διαταραχθεί η διαδικασία μεταφοράς ηλεκτρονίων («Φωτοσύστημα 2»), η οποία μετατρέπει το φως σε χημική ενέργεια. Κατά ανάλογο τρόπο, οι φυσικοί μηχανισμοί κυτταρικής άμυνας, οι οποίοι επιδιορθώνουν τις βλάβες σε σημαντικά μακρομόρια, όπως είναι το DNA, μπορεί να μην είναι αποτελεσματικοί εξ αιτίας της επιπρόσθετης βλάβης που προκαλείται από την αυξημένη έκθεση στην υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία. Μέσω άλλων βιολογικών μηχανισμών, η ακτινοβολία UV-B μπορεί να μειώσει την ποιότητα της σοδειάς. Για παράδειγμα, μπορεί να μειωθεί η περιεκτικότητα σε πρωτεΐνες και/ή λίπη διαφόρων γεωργικών προϊόντων, όπως της τομάτας, της πατάτας, του σακχαρότευτλου και της σόγιας (Worrest et al., 1989).

Από τα 200 και πλέον είδη και ποικιλίες καλλιεργούμενων φυτών, των οποίων εξετάστηκε η ανθεκτικότητα προς την υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία, αποδείχθηκε πειραματικά ότι τα δύο τρίτα περίπου αυτών

είναι ευαίσθητα στην ακτινοβολία αυτή (Worrest et al., 1989). Στις πιο ευπαθείς ομάδες φυτών περιλαμβάνονται ο αρακάς, τα φασόλια, το πεπόνι, το λάχανο και το σινάπι. Υπάρχουν, επίσης, ενδείξεις ότι η ανάπτυξη του αραβοσίτου, της σίκαλης και του ηλίανθου επηρεάζονται δυσμενώς από την ακτινοβολία UV-B (UNEP, 1991). Πειραματικά δεδομένα αποκαλύπτουν ότι η παραγωγή ορισμένων ποικιλιών σόγιας (της πέμπτης κατά σειρά καλλιέργειας παγκοσμίως) μειώνεται μέχρι και κατά το ένα τέταρτο όταν η έκθεση σε ακτινοβολία UV-B αυξηθεί κατά 25%, αν και οι συνέπειες χαμηλότερου βαθμού έκθεσης φαίνεται να είναι μικρές. Άλλα είδη φυτών, τα οποία είναι ευαίσθητα στην ακτινοβολία UV-B, αναπτύσσονται με βραδύτερους ρυθμούς όταν αυξηθεί η έκθεσή τους στην ακτινοβολία αυτή. Έχουν διεξαχθεί πειραματικές έρευνες, οι οποίες μελέτησαν την ανάπτυξη του σίτου, της σόγιας και του ρυζιού σε συνθήκες αυξημένου διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα και ταυτόχρονα, αυξημένης ακτινοβολίας UV-B (στα επίπεδα που αναμένουμε να αυξηθούν το 2050). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι δυσμενείς συνέπειες της αυξημένης ακτινοβολίας UV-B υποσκελίζουν την ευεργετική επίδραση της αφθονίας του διοξειδίου του άνθρακα (Teramura et al., 1990). Τα ίδια πειράματα υποδεικνύουν ότι η ακτινοβολία UV-B παρεμποδίζει τη διαδικασία φωτοσύνθεσης και παραγωγής ορμονών ανάπτυξης. Επιπλέον, τα κύτταρα της γύρης των φυτών και πολλά είδη αζωτοδεσμευτικών βακτηρίων στο έδαφος μπορεί να κινδυνεύσουν από την αυξημένη έκθεση στην υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία (UNEP, 1991). Τα αποτελέσματα, όμως, των παραπάνω μελετών δεν ταυτίζονται για όλα τα είδη φυτών. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι τα φυτά των οποίων οι «άγριοι» πρόγονοι προέρχονται από τροπικά κλίματα είχαν πάντοτε να αντιμετωπίσουν εντονότερη ακτινοβολία UV-B, σε σύγκριση με τα φυτά που προέρχονται από εύκρατες ζώνες, με αποτέλεσμα η βιολογική τους άμυνα είναι ενδεχομένως ισχυρότερη. Επομένως, τα φυτά που προέρχονται από τη Μέση Ανατολή (γεωγραφικό πλάτος 30° Β περίπου),

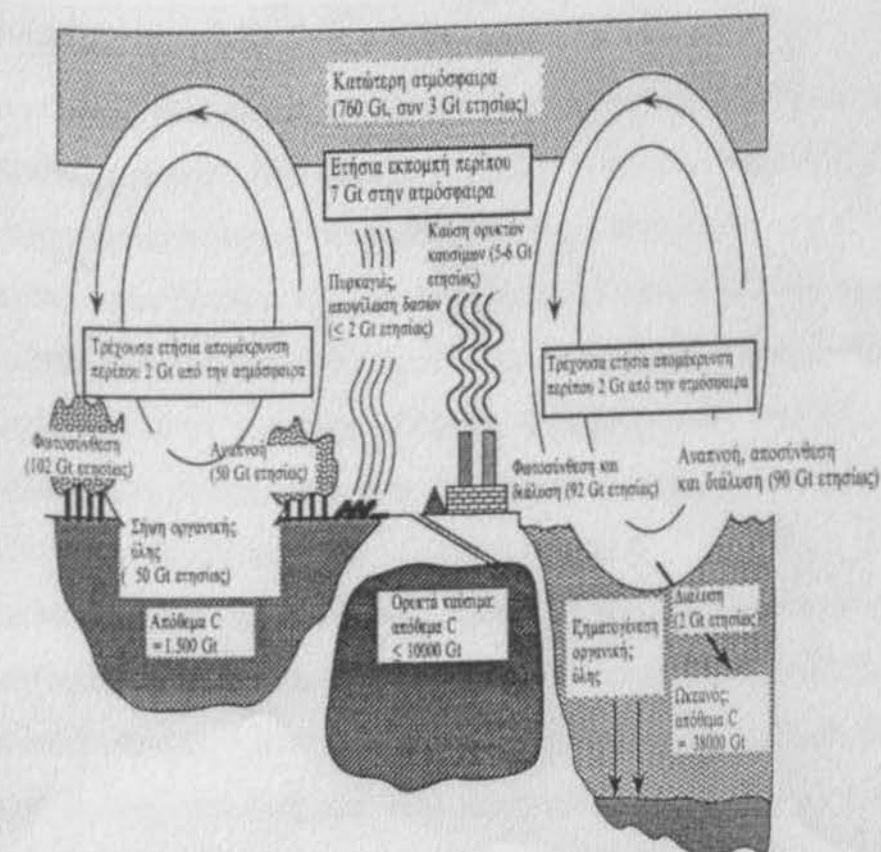
τη Βόρεια Κίνα (περίπου 45° Β) και την Κεντρική Αμερική (περίπου 20° Β) είναι περισσότερο ευάλωτα απ' ό,τι εκείνα που προέρχονται από την κεντρική Αφρική, τη νοτιοανατολική Ασία και την ισημερινή ζώνη της Νότιας Αμερικής. Επιπλέον, ορισμένες ποικιλίες φυτών φαίνεται ότι διαθέτουν ικανότητα αντίδρασης, παράγοντας ενώσεις που φιλτράρουν την ακτινοβολία UV-B.

Προς το παρόν, υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα όσον αφορά το βαθμό κατά τον οποίο θα μειωθεί η γεωργική παραγωγή ή η ανάπτυξη των δασών από την αύξηση της υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας. Είναι μάλιστα πιθανό να υπάρχουν περαιτέρω επιπτώσεις από το συνδυασμό της αυξημένης υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας με άλλες δυσμενείς κλιματολογικές επιδράσεις. Η υπεριώδης ηλιακή ακτινοβολία ενισχύει επίσης το σχηματισμό φωτοχημικών οξειδωτικών ουσιών (κυρίως όζοντος) από τους αέριους ρύπους που δημιουργούνται σε πόλεις με μεγάλη κυκλοφορία αυτοκινήτων, και οι οποίες προκαλούν βλάβες στις καλλιέργειες. Μακροπρόθεσμα, οι επιλεκτικές επιπτώσεις της ακτινοβολίας UV-B σε ορισμένα φυτά θα μπορούσαν να μεταβάλουν την κατανομή των φυτικών ειδών στα οικοσυστήματα. Ακόμη και μικρές μεταβολές στην ανταγωνιστική ισορροπία των ειδών είναι ικανές, με την πάροδο του χρόνου, να προκαλέσουν μεγάλες αλλαγές στη δομή των οικοσυστημάτων (Gold et al., 1983).

6.5. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΑ ΥΔΡΟΒΙΑ ΕΙΔΗ

Όσον αφορά τη φωτοσυνθετική δραστηριότητα, η σημαντικότερη ομάδα πρωτογενών παραγωγικών ειδών είναι το φυτοπλαγκτόν (μικροσκοπικά φυτά και φύκη). Αποτελούν, με μεταφορική βέβαια έννοια, το «γρασίδι» της θάλασσας και μετατρέπουν κάθε χρόνο 100 περίπου δισεκατομμύρια τόνους άνθρακα σε οργανική ύλη (Σχήμα 4). Συνιστούν τη βάση του

τροφικού δικτύου ωκεανών και ακτών, το οποίο παρέχει το ένα τέταρτο περίπου των ζωικών πρωτεϊνών που καταναλώνουν οι άνθρωποι.



Σχήμα 4. Ο κύκλος του άνθρακα στη βιόσφαιρα (Leggett, 1990; UNEP, 1991).

Η αυξημένη έκθεση σε ακτινοβολία UV-B επηρεάζει δυσμενώς το φυτοπλαγκτόν των υδρόβιων οικοσυστημάτων. Στο φυτοπλαγκτόν ανήκουν εκατοντάδες τύποι οργανισμών, οι οποίοι διαφέρουν σε μέγεθος, σε φωτοσυνθετικούς ρυθμούς, σε σύσταση θρεπτικών συστατικών και σε ευαισθησία προς την υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία. Το φυτοπλαγκτόν ζει κοντά στην επιφάνεια του νερού και γενικά δεν διαθέτει μηχανισμούς άμυνας έναντι της αυξημένης έκθεσης στην υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία.

Για παράδειγμα, οι περισσότεροι οργανισμοί που αποτελούν το φυτοπλαγκτόν δεν μπορούν να μεταβάλουν τη θέση τους μέσα στο νερό ώστε να προστατευτούν. Συνεπώς, αν αυξηθεί η ποσότητα της ακτινοβολίας UV-B που διεισδύει σε βάθος αρκετών μέτρων κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, θα προκληθούν βλάβες σε αυτά τα είδη, κυρίως επειδή θα μειωθεί η φωτοσύνθεση (UNEP, 1991).

Κατά την αρχή του καλοκαιριού στις πολικές περιοχές, καθώς η τήξη των θαλάσσιων πάγων δημιουργεί ευνοϊκό υδάτινο μικροπεριβάλλον με μικρότερη περιεκτικότητα σε αλάτι, αυξάνουν σημαντικά οι πληθυσμοί των φυκών που συνθέτουν το φυτοπλαγκτόν. Η διαδικασία αυτή δημιουργεί αποθέματα θρεπτικών συστατικών και ηλιακής ενέργειας, τα οποία θα χρησιμεύσουν στην τροφική αλυσίδα της θαλάσσιας πανίδας. Η βλάβη που προκαλεί η υπεριώδης ηλιακή ακτινοβολία στο φυτοπλαγκτόν και στο ασπόνδυλο ζωοπλαγκτόν (μικροσκοπικοί ζωικοί οργανισμοί, συμπεριλαμβανομένου του γαριδόμορφου κριλ), το οποίο αφενός τρέφεται με φυτοπλαγκτόν αφετέρου δε μπορεί να πληγεί άμεσα από την ακτινοβολία UV-B, μπορούσε να μειώσει τους πληθυσμούς των προνυμφών της γαρίδας και των καβουριών, με τελικό επακόλουθο τη μείωση των αποθεμάτων ψαριών. Η αυξημένη έκθεση σε ακτινοβολία UV-B ελαττώνει τη διάρκεια της εποχής κατά την οποία οι πληθυσμοί που αποτελούν το ασπόνδυλο ζωοπλαγκτόν διαμένουν κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας, όπου τρέφονται και αναπαράγονται, φαινόμενο που θα μπορούσε να ελαττώσει τη συνηθισμένη αφθονία αυτών των πληθυσμών (Damkaer et al., 1980).

Σύμφωνα με πρόσφατες εκτιμήσεις, οι κίνδυνοι από τη μείωση του όζοντος για τους οργανισμούς που ζουν στα επιφανειακά στρώματα της θάλασσας, μπορούν να χαρακτηρισθούν από ασήμαντοι έως καταστροφικοί. Έχουν παρατηρηθεί δυσμενείς επιδράσεις στο φυτοπλαγκτόν, από την έκθεσή του στην ηλιακή ακτινοβολία UV-B, σε βάθος μεγαλύτερο των είκοσι μέτρων σε διαυγές νερό και των πέντε μέτρων σε θολό νερό. Σύμφωνα με

μελέτη, οι πληθυσμοί του φυτοπλαγκτόν σε περιοχές κάτω από την «τρύπα» του όζοντος της Ανταρκτικής μείωσαν τη φωτοσυνθετική τους δραστηριότητα κατά 6-12%, σε σύγκριση με το φυτοπλαγκτόν άλλων σημείων του πλανήτη (Smith et al., 1992). Λόγω της ικανότητας διείσδυσης της υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας στο περιβάλλον, πολλοί οργανισμοί στη βιόσφαιρα ανέπτυξαν προσαρμοστικούς μηχανισμούς άμυνας, κατάλληλους για διάφορες φυσικές συνθήκες. Ειδικότερα, πολλοί θαλάσσιοι οργανισμοί παράγουν ουσίες που απορροφούν την ακτινοβολία UV-B, όπως π.χ. φλαβονοειδή (δηλαδή ομάδα μη αζωτούχων βιολογικών χρωστικών βιοχρωμάτων) και αμινοξέα τύπου μυκοσπορίνης που συναντώνται κυρίως στα φυτά (είναι χρωστικές των ανθέων, προσδίδουν το πορφυροκόκκινο χρώμα στα φθινοπωρινά φύλλα, κλπ.). Όμως, είναι άγνωστο κατά πόσον αυτοί οι μηχανισμοί μπορούν να αντιμετωπίσουν την αυξημένη έκθεση στην υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία, μολονότι ορισμένα πειράματα δείχνουν ότι η παραγωγή των προστατευτικών ουσιών ενισχύεται όταν αυξηθεί η έκθεση σε ακτινοβολία UV-B. Είναι σχεδόν βέβαιο ότι οποιαδήποτε παρόμοια αντισταθμιστική ενέργεια θα απέβαινε σε βάρος της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας.

Η καταστολή της δραστηριότητας του φυτοπλαγκτόν, λόγω της υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας, θα μπορούσε να ελαττώσει την απορρόφηση του ατμοσφαιρικού διοξειδίου του άνθρακα από τους ωκεανούς, επειδή το φυτοπλαγκτόν, όπως και τα φυτά της ξηράς, χρησιμοποιεί το διοξείδιο του άνθρακα ως μεταβολικό υπόστρωμα. Πράγματι, οι ωκεανοί είναι οι μεγαλύτερες δεξαμενές του χημικά ενεργού άνθρακα στη γη, το δε φυτοπλαγκτόν αποτελεί την απαραίτητη «βιολογική αντλία» η οποία μεταφέρει τον άνθρακα από τα επιφανειακά υδάτινα στρώματα στα βαθύτερα. Κατά συνέπεια, η ελάττωση του όζοντος θα ενίσχυε το φαινόμενο του θερμοκηπίου, μειώνοντας την ικανότητα των ωκεανών να λειτουργούν ως «καταβόθρες» του διοξειδίου του άνθρακα. Το Περιβαλλοντικό Πρόγραμμα του ΟΗΕ (UNEP) εκτιμά ότι, τυχόν

απώλεια του φυτοπλακτόν κατά 10%, θα μείωνε την ετήσια απορρόφηση διοξειδίου του άνθρακα από τους ωκεανούς κατά πέντε γιγατόνους, ποσότητα που είναι ίση με τις ετήσιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που εκλύει ο άνθρωπος με την καύση των ορυκτών καυσίμων.

Υπάρχει και άλλη, περισσότερο υποθετική, οικολογική διαταραχή που μπορεί να την προκαλέσει (μέσω των ωκεανών) η μείωση του όζοντος. Το φυτοπλακτόν απελευθερώνει τεράστιες ποσότητες αερίου διμεθυλοσουλφιδίου στην ατμόσφαιρα, με ρυθμό ανάλογο προς αυτόν της ημερήσιας μεταβολικής του δραστηριότητας. Το διμεθυλοσουλφίδιο σχηματίζει αερολύματα θειικών αλάτων, τα οποία ενεργούν ως πυρήνες συμπύκνωσης στα νέφη. Με τον τρόπο αυτό σχηματίζονται σύννεφα και εξαιτίας τους εμποδίζεται η υπεριώδης ηλιακή ακτινοβολία να φτάσει στην επιφάνεια των ωκεανών (Charlson et al., 1987). Αν όμως, ελαττωθεί ο πληθυσμός των θαλάσσιων μικροοργανισμών λόγω της μείωσης του όζοντος, θα μειωθεί και η εκλυόμενη ποσότητα διμεθυλοσουλφιδίου, με αποτέλεσμα να σχηματίζονται λιγότερα σύννεφα, άρα να προσπίπτει ακόμη περισσότερη υπεριώδης ηλιακή ακτινοβολία στους ωκεανούς. Τότε θα υπάρξει θετική ανάδραση. Όπως θα παρατηρήσουμε πολλές φορές, όταν αναφερόμαστε σε διαταραχές οικοσυστημάτων, οι προβλέψεις είναι δυσοίωνες.

7. Η ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΗΣ ΣΤΟΙΒΑΔΑΣ ΤΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ

Στα μέσα της δεκαετίας του 1970, οι περισσότεροι επιστήμονες διατηρούσαν κάποιες επιφυλάξεις απέναντι στο ενδεχόμενο της ανάληψης δράσης σχετικά με την απαγόρευση χρήσεων κάποιων ουσιών όπως οι χλωροφθοράνθρακες (CFC), μια και δεν υπήρχαν άμεσες ενδείξεις για τη βλάβη που προκαλούν στη στοιβάδα του όζοντος.

Οι χλωροφθοράνθρακες (CFC) είναι αέρια που χρησιμοποιούνται ως ψυκτικά σε ηλεκτρικά ψυγεία και κλιματιστικές συσκευές, ως προωθητικά

αέρια (aerosol), στην κατασκευή μονωτικών υλικών όπως το διογκωμένο πλαστικό (π.χ. φελιζόλ, πλαστικά ποτήρια), καθώς και στην κατασκευή Η/Υ για το καθάρισμα των μικροκυκλωμάτων τους (microchips).

Κατά τα τέλη της ίδιας δεκαετίας, όλα άρχισαν να δείχνουν ότι τελικά το πρόβλημα της χρήσης των χλωροφθορανθράκων θα έμπαινε κάτω από έλεγχο. Η νομοθεσία των ΗΠΑ περιόρισε δραστικά τη χρήση των σπρέι που βλάπτουν το όζον, ενώ η ΕΟΚ υιοθέτησε μια εθελοντική συμφωνία για τη μείωση της χρήσης αυτών των σπρέι κατά 30% σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1976. Έτσι, οι εκλύσεις των χλωροφθορανθράκων στην ατμόσφαιρα άρχισαν να μειώνονται. Οι χώρες που συνδέονται με την Ένωση Χημικών Βιομηχανιών σημείωσαν μια μείωση της παραγωγής ορισμένων προϊόντων που περιείχαν χλωροφθοράνθρακες, κατά τη χρονική περίοδο 1974-1982. Παράλληλα όμως αναπτύχθηκαν άλλες χρήσεις των χλωροφθορανθράκων, οπότε προς τα τέλη της δεκαετίας του '70, οι περιβαλλοντολόγοι προσπάθησαν να αναλάβουν δράση, ώστε το ευνοϊκό αποτέλεσμα που προέκυπτε από τους περιορισμούς της χρήσης των σπρέι να μην αναιρεθεί από άλλες εφαρμογές. Τον Απρίλιο του 1980, το Περιβαλλοντικό Πρόγραμμα των Ηνωμένων Εθνών (UNEP) ζήτησε από τις κυβερνήσεις όλου του κόσμου να περιορίσουν τόσο την παραγωγή όσο και τη χρήση των χλωροφθορανθράκων χωρίς, όμως, το αίτημα αυτό να τύχει ιδιαίτερης ανταπόκρισης. Μέχρι το Διεθνές Συνέδριο Όζοντος της Χαλκιδικής που έγινε το Σεπτέμβριο του 1984, οι ομάδες αυτές των επιστημόνων δεν είχαν καταλήξει σε θετικό ή αρνητικό συμπέρασμα, σχετικά με την επιβεβαίωση των θεωριών καταστροφής του όζοντος σε παγκόσμια κλίμακα. Όμως με την αποκάλυψη της γνωστής τρύπας του όζοντος της Ανταρκτικής, τα γεγονότα εξελίχθηκαν ραγδαία. Η προσπάθεια κατανόησης της τρύπας και της λήψης μέτρων οδήγησε στην πραγματοποίηση του Συνεδρίου της Βιέννης για τη διατήρηση του στρώματος του όζοντος, το 1985. Η Σύμβαση της Βιέννης που αρχικά υπογράφηκε από 20 χώρες, αργότερα δε και από άλλες, περιλάμβανε

γενικότητες. Μέσα σε 21 άρθρα καλούσε τις κυβερνήσεις να αναλάβουν τον έλεγχο των δραστηριοτήτων που επιδρούν βλαβερά σε βάρος του στρώματος του όζοντος. Ένα από τα άμεσα αποτελέσματα της Σύμβασης της Βιέννης ήταν ότι για πρώτη φορά το 1986 η πρώην Σοβιετική Ένωση δημοσίευσε τις ποσότητες των χλωροφθορανθράκων που παράγονται στο έδαφός της.

Μετά από δύο χρόνια, το Σεπτέμβριο του 1987, στο Μόντρεαλ του Καναδά, οι κυβερνήσεις μερικών δεκάδων χωρών υιοθέτησαν ένα πρόγραμμα για τη διακοπή της παραγωγής και της χρήσης των χλωροφθορανθράκων, καθώς και των βρωμιούχων αλογονανθράκων («halons») που χρησιμοποιούνται ως προωθητικά των πυροσβεστήρων, οι οποίοι αν και αντιπροσωπεύουν μόνο το ένα εκατοστό όλων των αερίων που συμβάλλουν στην καταστροφή του όζοντος, ενδέχεται να ευθύνονται ακόμη και για το 1/3 της σημερινής φθοράς του. Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι το βρώμιο είναι σαράντα φορές πιο καταστροφικό για το όζον, σε σχέση με το χλώριο. Αντίθετα, οι αναπτυσσόμενες χώρες δεσμεύτηκαν να υλοποιήσουν τη συμφωνία μέσα στο χρονικό διάστημα των επόμενων 10 ετών. Με την υπογραφή του Πρωτοκόλλου του Μόντρεαλ οι συμβληθείσες κυβερνήσεις έθεσαν προηγούμενο για περαιτέρω διεθνή συνεργασία, όσον αφορά τα παγκόσμια περιβαλλοντικά θέματα, λαμβάνοντας προληπτικά μέτρα για την αποφυγή μιας πιθανής γενικότερης περιβαλλοντικής κρίσης. Οι κυβερνήσεις στο Μόντρεαλ συμφώνησαν σε μια σειρά μακροπρόθεσμων και πολυδάπανων μέτρων, που σκοπό είχαν να προλάβουν την ανεπανόρθωτη καταστροφή του στρώματος του όζοντος.

Η καθιέρωση της 16^{ης} Σεπτεμβρίου ως Παγκόσμιας Ημέρας Όζοντος από τα Ηνωμένα Έθνη αποτελεί το ορόσημο για την υιοθέτηση των αποφάσεων του Πρωτοκόλλου του Μόντρεαλ (της 16^{ης} Σεπτεμβρίου 1987), που αφορά στον έλεγχο των ουσιών που συντελούν στην καταστροφή του στρώματος του όζοντος. Ως αναγνώριση της επιτυχίας αυτής, που ήταν

αποτέλεσμα παγκόσμιας συνεργασίας, και με σκοπό τη διεύρυνση της ενημέρωσης, η Γενική Συνέλευση του ΟΗΕ όρισε τη 16^η Σεπτεμβρίου ως Παγκόσμια Ημέρα για τη Διατήρηση του στρώματος του όζοντος. Το Πρωτόκολλο αποτελεί ιστορικό γεγονός επίδειξης ενός παραδειγματικού πνεύματος συνεργασίας των κυβερνήσεων, του επιστημονικού και του βιομηχανικού κόσμου, των μη κυβερνητικών οργανώσεων και του απλού πολίτη απέναντι στην απειλή που διαφαίνεται από την καταστροφή του στρώματος του όζοντος.

Το Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ τροποποιήθηκε δύο φορές από τότε. Η πρώτη τροποποίηση του Πρωτοκόλλου υπεγράφη το 1990 στο Λονδίνο. Η τροποποίηση πρόσθεσε νέες ελεγχόμενες ουσίες, τους «άλλους πλήρως αλογονωμένους χλωροφθοράνθρακες», τον τετραχλωράνθρακα και το 1,1,1 τριχλωροαιθάνιο. Επιπλέον, έθεσε αυστηρότερο χρονοδιάγραμμα για τη μείωση και εξάλειψη των ήδη ελεγχόμενων ουσιών. Ως μεταβατικές ουσίες, για τις οποίες ορίστηκε παρακολούθηση, χαρακτηρίστηκαν οι λεγόμενοι ως υδροχλωροφθοράνθρακες (HCFC). Με την τροποποίηση αυτή καθιερώθηκε χρηματοδοτικός μηχανισμός και πολυμερές ταμείο για την παροχή οικονομικής και τεχνικής βοήθειας προς τις αναπτυσσόμενες χώρες.

Η δεύτερη τροποποίηση του Πρωτοκόλλου του Μόντρεαλ υπεγράφη το 1992 στην Κοπεγχάγη από εκπροσώπους 93 χωρών. Με αυτήν τέθηκε αυστηρότερο χρονοδιάγραμμα και προστέθηκαν νέες κατηγορίες ελεγχόμενων ουσιών. Πιο αναλυτικά το αναθεωρημένο Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ προβλέπει:

1. για τους χλωροφθοράνθρακες πλήρη κατάργησή τους έως 1/1/96,
2. για τους βρωμιούχους αλογονάνθρακες (Halons) πλήρη κατάργηση ως το 1995,
3. για τους τετραχλωράνθρακες (φάρμακα, βαφές, ζιζανιοκτόνα) μείωση κατά 85% ως το 1995 και πλήρη κατάργησή τους ως το 1996,
4. για το μεθυλοχλωροφόρμιο (διαλυτικό για καθάρισμα μετάλλων,

- πλαστικών) μείωση κατά 50% ως το 1995 και πλήρη κατάργησή του ως το 1996 και
5. για τους υδροχλωροφθοράνθρακες (HCFC) σταθεροποίηση της παραγωγής το 1996, μείωση 35% ως το 2004, μείωση 90% ως το 2015 και πλήρη κατάργηση ως το 2030.

Ο κανονισμός 3093/94/ΕΟΚ, ο οποίος κατέργησε τους προηγούμενους κανονισμούς και βρίσκεται σε ισχύ σήμερα, υιοθέτησε τις τροποποιήσεις της Κοπεγχάγης με αυστηρότερο χρονοδιάγραμμα για τις ελεγχόμενες ουσίες. Μια σειρά αποφάσεων των Διασκέψεων των Συμβαλλόμενων Μερών εξειδικεύουν ρυθμίσεις του Πρωτοκόλλου. Η έβδομη Διάσκεψη των Μερών, η οποία αποτελεί την τελευταία αναθεώρηση του Πρωτοκόλλου, έγινε το Δεκέμβριο του 1995 στη Βιέννη και έθεσε αυστηρότερο χρονοδιάγραμμα εξάλειψης για τους υδροχλωροφθοράνθρακες και το βρωμιούχο μεθύλιο.

Η σταδιακή αραίωση του στρώματος του όζοντος συνεχίζεται και ο ρυθμός αυτής της καταστροφής αναμένεται να μεγιστοποιηθεί πριν το τέλος του αιώνα μας, ενώ το όζον θα αρχίσει να ανακάμπτει στην αρχή του 21^{ου} αιώνα, σύμφωνα με την εκτίμηση επιστημονικής επιτροπής για τη μείωση του όζοντος που εκδόθηκε από κοινού από τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό (WMO), το Πρόγραμμα Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Εθνών (UNEP) και τη NASA. Αυτή η επιστημονική έκθεση ετοιμάστηκε από 226 επιστήμονες από 29 χώρες και αποτελεί τη βάση για την επικείμενη αναθεώρηση του Πρωτοκόλλου του Μόντρεαλ που έγινε στη Βιέννη (Δεκέμβριος 1995).

Σύμφωνα με την ογκώδη αυτή έκθεση, γίνεται φανερό ότι οι διεθνείς προσπάθειες για τη μείωση των επιπτώσεων των ουσιών που προκαλούν αραίωση του στρώματος όζοντος αρχίζουν να έχουν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Παρ' όλα αυτά τα μέτρα ελέγχου, τα οποία αναμένεται ότι θα βελτιώσουν σταδιακά την κατάσταση του στρώματος του όζοντος τον επόμενο αιώνα, παρατηρήθηκαν ακρότατες, πολύ χαμηλές ποσότητες του

προστατευτικού στρώματος του όζοντος κατά τα τελευταία χρόνια, και ιδίως το 1993 και το 1995, ενώ η πλέον ευαίσθητη περίοδος περαιτέρω αραίωσης του στρώματος του όζοντος βρίσκεται ακόμα μπροστά μας. Η έκθεση αποκαλύπτει μια συνεχή μείωση του στρατοσφαιρικού όζοντος και μερική αύξηση του τροποσφαιρικού όζοντος στο βόρειο ημισφαίριο. Και οι δύο αυτές αλλαγές είναι δυνατόν να επιδράσουν στην ισορροπία του κλιματικού συστήματος.

Τα βασικά πορίσματα που τονίζονται στην έκθεση αυτή μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- Οι ρυθμοί συσσώρευσης των ανθρωπογενών συστατικών που προκαλούν την αραίωση του όζοντος στην ατμόσφαιρα, όπως οι χλωροφθοράνθρακες (CFCs) και τα halons, μειώθηκαν τα τελευταία χρόνια ως άμεσο αποτέλεσμα της μείωσης των εκπομπών αυτών των συστατικών. Οι μετρήσεις φανερώνουν ότι το Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ και οι τροποποιήσεις και ρυθμίσεις του μειώνουν τις επιπτώσεις των ανθρωπογενών αυτών ουσιών στο στρώμα του όζοντος και θα πρέπει να αναμένουμε ότι σταδιακά η αραίωση αυτή θα σταματήσει τελείως στις αρχές του επόμενου αιώνα.
- Οι μέγιστες τιμές μείωσης του ολικού όζοντος αναμένεται να παρατηρηθούν κατά τα προσεχή χρόνια. Το στρώμα του όζοντος θα επηρεαστεί περισσότερο από τις ανθρωπογενείς διαταραχές και θα είναι πιο ευπαθές κοντά στην αλλαγή του αιώνα. Αυτή την περίοδο αναμένεται να μειωθούν αργά τα επίπεδα των χημικών ουσιών που προκαλούν αραίωση του όζοντος, του χλωρίου και του βρωμίου, και το στρώμα του όζοντος αναμένεται να αναρρώσει σε περίπου 50 χρόνια, ως αποτέλεσμα των συνεχών προγραμματισμένων διεθνών ενεργειών για το σταμάτημα της επικίνδυνης αραίωσης.
- Η σημερινή μείωση του όζοντος γίνεται με ρυθμό 4 έως 5% ανά δεκαετία στα μέσα γεωγραφικά πλάτη και στα δύο ημισφαίρια, με μεγαλύτερους ρυθμούς κατά την περίοδο χειμώνα – άνοιξη παρά κατά

τη διάρκεια του καλοκαιριού. Στους τροπικούς (20° B - 20° N) οι τάσεις για αραιώση του στρώματος του όζοντος είναι ασήμαντες.

- Εξαιρετικά χαμηλές τιμές όζοντος παρατηρήθηκαν σχεδόν παγκόσμια κατά την περίοδο 1992 – 1993, με την πιο έντονη τρύπα του όζοντος στην Ανταρκτική και τον πιο χαμηλό εποχικό μέσο όρο όζοντος που μετρήθηκε ποτέ πάνω από κατοικημένες περιοχές του βόρειου ημισφαιρίου. Αυτή η σημαντική αραιώση οφειλόταν, τουλάχιστον εν μέρει, σε προσωρινή αύξηση της ευπάθειας του όζοντος στα ανθρωπογενούς προέλευσης χλώριο και βρώμιο, τα οποία με χημικές διεργασίες και με τη βοήθεια αυξημένων συγκεντρώσεων των θειικών αιωρημάτων που προήλθαν από την έκρηξη του ηφαιστείου Pinatubo στις Φιλιππίνες το 1991, υποβοηθήσαν και επιτάχυναν την παρατηρηθείσα αραιώση. Όμως, μολονότι τα κατάλοιπα της τεράστιας αυτής ηφαιστειακής έκρηξης εξέλιπταν, η επιτάχυνση της αραιώσης του στρώματος του όζοντος συνεχίζεται.
- Το βρωμιούχο μεθύλιο εξακολουθεί να θεωρείται ως ένας σημαντικός χημικός παράγοντας αραιώσης του όζοντος. Αναγνωρίστηκαν τρεις πιθανόν σημαντικές ανθρώπινες πηγές του βρωμιούχου μεθυλίου στην ατμόσφαιρα, οι οποίες σχετίζονται είτε με το έδαφος, είτε με την καύση βιομάζας, είτε με τις εκπομπές από τις εξατμίσεις των αυτοκινήτων που χρησιμοποιούν μολυβδούχα βενζίνη. Αυτά προστίθενται στη φυσική ωκεάνεια πηγή αυτής της χημικής ουσίας. Η καλύτερη εκτίμηση του δυναμικού αραιώσης του όζοντος για το βρωμιούχο μεθύλιο είναι 0.6, πράγμα που σημαίνει ότι καταστρέφει 60% όζον ανά εκπεμπόμενο χιλιόγραμμο εκείνου που καταστρέφει το CFC-11, το οποίο αποτελεί και τον μεγαλύτερο καταστροφέα του όζοντος.
- Οι προσπάθειες μείωσης των μελλοντικών στρατοσφαιρικών συγκεντρώσεων του χλωρίου και του βρωμίου είναι περιορισμένες. Οι μελλοντικοί έλεγχοι των ουσιών που προκαλούν αραιώση του όζοντος

δεν αναμένεται να αλλάξουν σημαντικά το χρόνο ή το μέγεθος των μέγιστων στρατοσφαιρικών συγκεντρώσεων των χλωροφθορανθράκων και επομένως της μέγιστης απώλειας του όζοντος. Παρ' όλα αυτά, σε αυτή την εκτίμηση αξιολογούνται τέσσερις προσεγγίσεις οι οποίες θα μειώσουν ταχύτερα τα μέγιστα επίπεδα των χλωροφθορανθράκων κατά τις πρώτες δεκαετίες του επόμενου αιώνα: μειώσεις των εκπομπών του ανθρωπογενούς προέλευσης βρωμιούχου μεθυλίου, μειώσεις των εκπομπών των HCFCs και πλήρης επαναπόκτηση (σε αντίθεση με την ανακύκλωση) των CFCs και των halons που βρίσκονται αποταμιευμένα στον υπάρχοντα εξοπλισμό. Επιπλέον η έκθεση προτείνει την ποσοτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, των μέτρων, καθώς και της καθυστερούμενης ανάρρωσης του στρώματος του όζοντος, η οποία θα μπορούσε να είναι το αποτέλεσμα της αδυναμίας τήρησης (καταστρατήγησης) των διεθνών συμφωνιών.

Αυτή άλλωστε η πιθανή αδυναμία εφαρμογής των διεθνών συμφωνιών, και ιδίως του Πρωτοκόλλου του Μόντρεαλ, καταγγέλθηκε ομόφωνα από 300 διαπρεπείς επιστήμονες που συμμετείχαν στο Διεθνές Συνέδριο Όζοντος της Χαλκιδικής τον Μάιο του 1995. Πιστεύεται ότι οι πρόσφατες ανησυχητικές εξελίξεις που ανακοίνωσαν στις 21/11/95 τα Ηνωμένα Έθνη επέδρασαν καταλυτικά στις αποφάσεις που πάρθηκαν το Δεκέμβριο για την αναθεώρηση του Πρωτοκόλλου του Μόντρεαλ. Οι εξελίξεις αφορούν στην πρόσφατα παρατηρηθείσα, σχεδόν ολική, καταστροφή του στρώματος του στρώματος του όζοντος σε υψόμετρα μεταξύ 14-19 km πάνω από την Ανταρκτική, η οποία διήρκεσε, το έτος 1995, για 9 συνεχείς εβδομάδες, ενώ οι θερμοκρασίες του πολικού στροβίλου στην κατώτερη στρατόσφαιρα συνεχίζουν να είναι περίπου 10 °C κάτω από το μέσο όρο των ετών προ της εμφάνισης της τρύπας του όζοντος και η Ανταρκτική συνεχίζει να γίνεται ψυχρότερη. Το γεγονός αυτό

διευκολύνει τη διαδικασία καταστροφής του όζοντος και συντηρεί τον ισχυρό πολικό στρόβιλο, ο οποίος εμποδίζει την είσοδο όζοντος από τα μέσα γεωγραφικά πλάτη και έτσι με πολύπλοκους μηχανισμούς, φυσικούς και χημικούς, η καταστροφή του όζοντος συνεχίζεται.

Το μέγεθος της τρύπας στα μέσα του Νοεμβρίου του 1995, σε μια περιοχή έκτασης περίπου 15 εκατομμυρίων τετραγωνικών km, είναι το μεγαλύτερο που έχει παρατηρηθεί μέχρι σήμερα.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση και βεβαίως η Ελλάδα ως μέλος της, όχι μόνο ήταν από τους πρώτους που προσυπέγραψαν το Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ, αλλά και πρόσφατα η Επιτροπή πρότεινε στο Συμβούλιο να λάβει απόφαση, ώστε να πιεστεί για περισσότερο αυστηρούς ελέγχους στις ουσίες που καταστρέφουν τη στοιβάδα του όζοντος, όπως το μονοβρωμομεθάνιο και οι υδροχλωροφθοράνθρακες. Στην πρότασή της η Επιτροπή καλεί τα κράτη-μέλη πρώτον να πιέσουν για μια μείωση κατά 50% όσο το δυνατό συντομότερα και στη συνέχεια για την πλήρη εξάλειψη του μονοβρωμομεθανίου. Το μονοβρωμομεθάνιο χρησιμοποιείται κυρίως για την απολύμανση του εδάφους στον αγροτικό τομέα. Είναι μια πολύ τοξική ουσία που επιδρά καταστροφικά στη στοιβάδα του όζοντος. Πρέπει να γίνουν κάθε είδους προσπάθειες για να βοηθηθούν, κυρίως οι γεωργοί, να αντικαταστήσουν το μονοβρωμομεθάνιο με λιγότερο επικίνδυνες ουσίες. Ήδη έχουν βρεθεί εναλλακτικές λύσεις και θα πρέπει να χρησιμοποιούνται όσο το δυνατό περισσότερο. Κατά δεύτερο λόγο η Επιτροπή προτείνει αυστηρότερα μέτρα για τον έλεγχο της χρήσης υδροχλωροφθορανθράκων και θα προχωρήσει πέρα από τις παρούσες κοινοτικές ρυθμίσεις, που απαιτούν πλήρη εξάλειψή τους ως το 2015. Για τα μέτρα που θα ληφθούν στις αναπτυσσόμενες χώρες, η Επιτροπή δίνει προτεραιότητα στην πλήρη εξάλειψη και όσο πιο σύντομα γίνεται, των υδροχλωροφθορανθράκων. Θα ζητήσει επίσης να γίνουν σε αυτές τις χώρες έλεγχοι στους υδροχλωροφθοράνθρακες και στο μονοβρωμομεθάνιο. Με σκοπό να βοηθήσει τις αναπτυσσόμενες αυτές χώρες να ανταπεξέλθουν στο κόστος

της συμμόρφωσης με τις αποφάσεις του αναθεωρημένου Πρωτοκόλλου του και να παρέχει την απαραίτητη τεχνολογία στις χώρες αυτές, ιδρύθηκε το 1990 ένας νέος θεσμός. Αυτός περιλαμβάνει την UNEP, την UNDP (Αναπτυξιακό Πρόγραμμα των ΗΕ), την UNIDO (Οργανισμός Βιομηχανιών ΗΕ) και την World Bank, ως εκτελεστικά όργανα, με σκοπό να βοηθήσει τις αναπτυσσόμενες χώρες να ανταπεξέλθουν στο κόστος της συμμόρφωσης με τις αποφάσεις του αναθεωρημένου Πρωτοκόλλου και να παρέχει την απαραίτητη τεχνολογία στις χώρες αυτές. Μέχρι το έτος 1996 έχουν διατεθεί περίπου 350 εκατομμύρια δολάρια σε περισσότερες από 700 δραστηριότητες, σε 80 αναπτυσσόμενες χώρες (Ζερεφός, 1996).

Το Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας του ΑΠΘ, μαζί με το Παγκόσμιο Κέντρο Χαρτογράφησης Όζοντος του Διεθνούς Μετεωρολογικού Οργανισμού (WMO) του ΟΗΕ, σε συνεργασία με την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (EMY) και άλλους διεθνείς οργανισμούς, συμμετέχει ενεργά στην παγκόσμια παρακολούθηση και στη μελέτη του στρώματος του όζοντος τόσο από επίγειες, όσο και από δορυφορικές παρατηρήσεις. Το Κέντρο αυτό αποτελεί το μόνο επιτελικό κέντρο του WMO του ΟΗΕ και από το 1991, που άρχισε να λειτουργεί, μέχρι σήμερα έχει προσφέρει υπηρεσίες και χάρτες όζοντος από όλο το βόρειο ημισφαίριο σε πολλές δεκάδες ερευνητικά εργαστήρια και άλλους οργανισμούς. Ήδη από το 1995, με τη βοήθεια της EMY, το Κέντρο Χαρτογράφησης Όζοντος λειτουργεί μόνιμα πλέον στη Θεσσαλονίκη και του έχει ανατεθεί εκτός από την παγκόσμια χαρτογράφηση και μέρος της ενημέρωσης για την ετήσια έκθεση του όζοντος της Ανταρκτικής. Επιπλέον, οι επιστήμονες του Εργαστηρίου Φυσικής της Ατμόσφαιρας, σε όλες τις φάσεις αναθεώρησης του Πρωτοκόλλου του Μόντρεαλ, έχουν συμμετάσχει με επιστημονικές εισηγήσεις στις διεθνείς επιτροπές της NASA/WMO και UNEP, καθώς και το σχεδιασμό και την εκτέλεση των δυο Αρκτικών Ευρωπαϊκών Προγραμμάτων για το όζον και όλων των ευρωπαϊκών προγραμμάτων για την υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία.

Έχει διαπιστωθεί από τις μετρήσεις που πραγματοποιούνται ότι η παγκόσμια μέση τιμή ολικού όζοντος είναι 300 D.U., όπου D.U. ή Dobson Unit είναι η μονάδα μέτρησης του στρατοσφαιρικού όζοντος. Οι τιμές στρατοσφαιρικού όζοντος ποικίλουν ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος από 230 έως 500 D.U. Η ολική ποσότητα όζοντος έχει τις μικρότερες τιμές της στην ισημερινή ζώνη και αυξάνει όσο αυξάνει το γεωγραφικό πλάτος.

8. ΠΙΘΑΝΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΕΝΔΕΧΟΜΕΝΗ ΜΕΙΩΣΗ ΤΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ

Ιδιαίτερα για την Ελλάδα, η οποία χαρακτηρίζεται από μεγάλη διάρκεια ηλιοφάνειας μέσα σε ένα έτος, η δόση της ηλιακής ακτινοβολίας η οποία προκαλεί το ηλιακό ερύθημα, προστάδιο του επιδερμικού καρκίνου, είναι μέσα σ' ένα έτος πενταπλάσια στη χώρα μας σε σχέση με τη δόση στις Σκανδιναβικές χώρες. Η επικινδυνότητα για επιδερμικό καρκίνο στα μικρά γεωγραφικά πλάτη είναι έως οκτώ φορές μεγαλύτερη απ' ότι στα αρκτικά γεωγραφικά πλάτη (Zerefos et al., 1995a, 1995b, 1996; Mantis et al., 1997). Συνεπώς, εάν το όζον μειωθεί κατά 10% και στις δύο περιοχές, τότε στις Σκανδιναβικές χώρες η ερυθματώδης δόση θα αυξηθεί κατά 1%, ενώ στην Ελλάδα θα αυξηθεί κατά 15%.

Το κρίσιμο ερώτημα για την Ελλάδα είναι όχι εάν ελαττώθηκε το όζον κατά 2.5% ή 4.5%, ποσοστό που φαίνεται συγκριτικά μικρό σε σχέση με τη μείωση στις βορειότερες περιοχές, αλλά αν προκλήθηκε αύξηση της ερυθματώδους δόσης.

Εάν καταστραφεί το 10% του στρώματος του όζοντος στο Βόρειο Ημισφαίριο, θα υπάρχουν 300.000 επιπλέον κρούσματα καρκίνου του δέρματος κάθε χρόνο στις βόρειες περιοχές του πλανήτη (UNEP, 1991). Όμως οι συνέπειες μιας «τρύπας» του όζοντος δεν σταματούν εκεί. Επεκτείνονται στο φυσικό κόσμο, επηρεάζοντας έμμεσα τον άνθρωπο. Στις έμμεσες επιπτώσεις περιλαμβάνονται φαινόμενα όπως η μείωση ή

καταστροφή ορισμένων καλλιεργειών, η εξαφάνιση θαλάσσιων οργανισμών και οι ζημιές στην κτηνοτροφία.

Η αύξηση της υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας στις επόμενες δεκαετίες, εάν δεν ληφθούν άμεσα μέτρα, θα συμβεί τόσο γρήγορα ώστε τα φυτά δεν θα προφτάσουν να προσαρμοστούν στις νέες συνθήκες. Το κριθάρι, η βρώμη, η σόγια, τα μπιζέλια, η τομάτα, το αγγούρι, οι μπάμιες, η κολοκύθα, το πεπόνι, το κουνουπίδι, το μπρόκολο, το σπανάκι, το καρότο και το παντζάρι είναι από τα πλέον ευαίσθητα και ακολουθούν ως λίγο ανθεκτικά το ρύζι, η σίκαλη, τα φασόλια, η πιπεριά, το μαρούλι και οι πατάτες. Αντίθετα, μεγαλύτερη ανθεκτικότητα παρουσιάζουν το σιτάρι, ο ηλιόσπορος, το καλαμπόκι, οι μελιτζάνες και οι αγκινάρες (Teramura et al., 1990).

Οι κίνδυνοι έχουν επιβεβαιωθεί από επανειλημμένες έρευνες: σε άλλες περιπτώσεις μπορεί να ανασταλεί η ζωτική λειτουργία της φωτοσύνθεσης, σε ορισμένα φυτά να αλλάξει η μορφολογία τους, ενώ άλλα να εμφανίσουν μειωμένη ανάπτυξη και προβλήματα πολλαπλασιασμού (Worrest et al., 1989).

Αντίστοιχους κινδύνους θα αντιμετωπίσουν και οι θαλάσσιοι οργανισμοί. Από τις αυξημένες δόσεις ακτινοβολίας θα επηρεαστούν όχι τόσο τα μεγάλα ψάρια, όσο τα αυγά και οι νύμφες τους. Απειλούνται τα κυριότερα είδη από τα οποία ζουν οι επαγγελματίες αλιείς, όπως ο τόνος, ο μπακαλιάρος, η αντσούγια, το σκουμπρί και άλλα είδη που κινούνται κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας (Damkaer et al., 1980).

Εάν το στρώμα του όζοντος μειωθεί κατά 16%, θα ελαττωθεί κατά 5% η πρωτογενής παραγωγή, δηλαδή σε παγκόσμια κλίμακα θα χάνονται 10 εκατομμύρια τόνοι ψαριών ετησίως. Αυτό δεν θα καταστρέψει μόνο την παραγωγή της αλιείας, αλλά θα επηρεάσει και θαλάσσια είδη, όπως φάλαινες και φώκιες, που ζουν τρώγοντας ψάρια. Η στενή εξάρτηση των ειδών στην αλυσίδα της ζωής είναι μοιραία (UNEP, 1991).

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Armstrong, B.K. (1988) "Sunlight and malignant melanoma: Intermittent or total accumulated exposure to the sun", *J. Dermatol. Surg. Oncol.*, 14, 835-849.
- Armstrong, B.K. (1993) "Implications of increased solar UV-B for cancer incidence". In: Chanin, M.L. (ed) *The role of the Stratosphere in Global Change*, NATO-ASI Series, Series I: Global Environmental Change, 8.
- Bais, A.F., C.S. Zerefos, C. Meleti, I. Ziomas, and K. Tourpali (1993) "Spectral UV radiation measurements and its relations to total ozone, SO₂ and clouds", *J. Geophys. Res.*, 98 (D3), 5199-5204.
- Bojkov, R.D., C.S. Zerefos, D.S. Balis, I.C. Ziomas, A.F. Bais (1993) "Record low total ozone during northern winters 1992 and 1993", *Geophys. Res. Lett.*, 20, 13, 1351-1354.
- Bojkov, R.D., V.E. Fioletov, D.S. Balis, C.S. Zerefos, T.V. Kadygrova, and A.M. Shalamjansky (1995), "Further ozone decline during northern hemisphere winter-spring of 1994-1995 and the new record low ozone over Siberia", *Geophys. Res. Lett.*, 22, 2729-2732.
- Charlson, R., J. Lovelock, M. Andreae, and S. Warren (1987), "Ocean phytoplankton, atmospheric sulfur, cloud albedo and climate", *Nature*, 329, 321-323.
- Chubachi, S. (1985) "A special ozone observation at Syowa Station, Antarctica from February 1982 to January 1983", In: *Atmospheric Ozone*, (eds Zerefos, C.S. and A. Ghazi), Reidel Publ. Co, Norwell, Mass., 285-289.
- Collman, G.W. et al. (1988) "Sunlight and other risk factors for cataracts: An epidemiologic study", *American Journal of Public Health*, 78, 1459-1462.

- Cooper, K.D. et al. (1992) "UV exposure reduces immunization rates and promotes tolerance to epicutaneous antigens in humans; relationship to dose, Cdla⁻DR⁺ epidermal macrophage induction and Langerhans cell depletion", *Proc. National Academy of Sciences*, 89, 8497-8501.
- Crutzen, P.J. (1970) "The influence of nitrogen oxides on the atmospheric ozone content", *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 96, 320-325.
- Crutzen, P.J. (1992) "Ultraviolet on the increase", *Nature*, 356, 104-105.
- Damkaer, D.M., D.M. Dey, G.A. Heron, and E.F. Prentice (1980) "Effects of UV-B radiation on near-surface zooplankton of Puget Sound", *Oceanologia*, 44, 149-158.
- Dolezal, J.M., E.S. Perkins, and R.B. Wallace (1989) "Sunlight, skin sensitivity and cataract", *Americ. J. Epidemiol.*, 129, 559-568.
- Dunnigan, M.G. et al. (1985) "Prevention of rickets in Asian children: assessment of the Glasgow campaign", *British Medical Journal*, 291, 239-242.
- Farman, J.C., B.G. Gardiner, and J.D. Shanklin (1985) "Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal Cl_x/NO_x interaction", *Nature*, 315, 207-210.
- Foster, A. (1991) "Who will operate on Africa's 3 million curably blind people?", *Lancet*, 337, 1267-1269.
- Freeman, S.E. et al. (1989) "Wavelength dependence of pyrimidine dimer formation in DNA of human skin irradiated in situ with ultraviolet light", *Proc. National Academy of Sciences*, 86, 5605-5609.
- Giannini, M. (1986) "Suppression of pathogenesis in cutaneous leishmaniasis by UV irradiation", *Infection and Immunity*, 51, 838-843.
- Gold, W.G. and M.M. Caldwell (1983) "The effects of ultraviolet-B radiation on plant competition in terrestrial ecosystems", *Physiologia Plantarum*, 58, 435-444.
- Gribbin, J. (1988) "Το όζον και η ανθρώπινη απειλή – Τρύπα στον ουρανό", Εκδόσεις Ωρόρα, 223 σ.

- Harris, N., J. Ancellet, L. Bishop, D.J. Hofmann, J.B. Kerr, R.D. McPeters, M. Prendez, W.I. Randel, J. Stahelin, B.H. Subbaraya, A. Woltz-Thomas, I. Zawodny, and C.S. Zerefos (1996), *Trends in stratospheric and tropospheric ozone*.
- Hiller, R., R. Sperduto, and F. Ederer (1983) "Epidemiologic associations with cataract in the 1971-1972 National Health and Nutrition Examination Survey", *Americ. J. Epidemiol.*, 118, 239-249.
- Hoffman, J.S. (ed) (1987) "Assessing the risks of trace gases that can modify the Stratosphere", EPA 400/1-87/001, *Environmental Protection Agency*, Washington DC.
- Hollows, F. and D. Moran (1981) "Cataract: the ultraviolet risk factor", *Lancet*, 327, 1249-1251.
- Jeevan, A., S.E. Ullrich, V.V. Dizon, and M.L. Kripke (1992) "Supernatants from UV-irradiated keratinocytes decrease the resistance and delayed type hypersensitivity response to Mycobacterium bovis BCG in mice and impair the phagocytic ability of macrophages", *Photodermatology, Photoimmunology and Photomedicine*, 9, 255-263.
- Kricker, A., B.K. Armstrong, D.R. English, and P.J. Heenan (1991) "Pigmentary and cutaneous risk factors for non-melanocytic skin cancer - a case-control study", *Int. J. Cancer*, 48, 650-662.
- Kripke, M.L. (1981) "Immunologic mechanisms in UV radiation carcinogenesis", *Advances in Cancer Research*, 34, 69-81.
- Kupfer, C. (1984) "The conquest of cataract: a global challenge", *Transactions of the Ophthalmology Society of UK*, 104, 1-10.
- Lancet (Editorial) (1991) "Protecting man from UV exposure", *Lancet*, 337, 1258-1259.
- Leggett, J. (1990) "The nature of Greenhouse Treat". In: Leggett, J. (ed). *Global Warming. The Greenpeace Report*, Oxford, Oxford University Press, 14-43.
- Leske, M.C., L.T. Chylack, and W. Suh-Yuh (1991) "The lens opacities case-control study. Risk factors for cataract", *Arch. Ophthalmol.*, 109, 244-251.

- Loomis, W.F. (1967) "Skin-pigment regulation of vitamin-D biosynthesis in man", *Science*, 157, 501-506.
- Mackie, R. and M.J. Rycroft (1988) "Health and the ozone layer", *British Medical Journal*, 297, 369-370.
- Mantis, H.T., C.C. Repapis, C.M. Philandras, A.G. Paliatsos, C.S. Zerefos, A.F. Bais, C. Meleti, and D.S. Balis (1997) "Climatology of the solar erythematous UV in Athens, Greece", *Proc. Academy of Athens*, 72, 147-171.
- McKinlay, A.F. and B.L. Diffey (1987) "A reference action spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin", *Commission Internationale de l'Eclairage (CIE)*, J. 6, 17-22.
- McMichael, A.J. and G.G. Giles (1988) "Cancer in migrants to Australia: Extending the descriptive epidemiological data", *Cancer Research*, 48, 751-756.
- McMichael, A.J. (1997) "Ο πλανήτης σε κρίσιμη καμπή", Εκδόσεις Λύχνος, 207-237.
- Mohan, M. et al. (1991) "India-US case-control study of age related cataracts", *Arch. Ophthalmol.*, 107, 670-676.
- Molina, M.J. and F.S. Rowland (1974) "Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: Chlorine atom-catalysed destruction of ozone", *Nature*, 249, 810-812.
- Morison, W.L. (1989) "Effects of ultraviolet radiation on the immune system in humans", *Photochem. Photobiol.*, 50, 515-524.
- NH and MRC (1989) "Health effects of ozone layer depletion", *Report of the National Health and Medical Research Council*, Australian Government Publishing Service, Canberra.
- Παλιατσός, Α.Γ. (1999) "Σημειώσεις του Μαθήματος: Περιβαντολογία και Φυσικά Διαθέσιμα", Αθήνα, σ. 103.

Pyle, J. et al. (1994) "An overview of EASOE campaign", *Geophys. Res. Lett.*, 21, 1191-1194.

Roberts, L.K., W.E. Samlowski, and R.A. Daynes (1986) "The immunological consequences of ultraviolet radiation exposure", *Photodermatol.*, 3, 284-298.

Romerdahl, C.A., C. Donawho, I.J. Fidler, and M.L. Kripke (1988) "Effects of ultraviolet-B radiation on the in vivo growth of murine melanoma cells", *Cancer Research*, 48, 4007-4010.

Rowland, F.S. (1991) "Stratospheric ozone depletion", *Annual Reviews of Physical Chemistry*, 42, 731-768.

Russel, W.M.S. and C. Russel (1983) "Evolutionary and social aspects of disease", *Ecology of Disease*, 2, 95-106.

Russel, J.R. (1989) "Consequences for human health of stratospheric ozone depletion". In: Russel, J.R. and T. Wigley (eds) *Ozone Depletion: Health and Environmental Consequences*, London, John Wiley and Sons Ltd, 207-227.

Smith, R.C. et al. (1992) "Ozone depletion: Ultraviolet radiation and phytoplankton biology in Antarctic waters", *Science*, 255, 952-959.

Solomon, S. (1990) "Progress toward a quantitative understanding of Antarctic ozone depletion", *Nature*, 347, 347-354.

Sterenborg H.J.C.M. and van der Leun J.C. (1987) "Action spectra for tumorigenesis by ultraviolet radiation". In: Passchier, W.F. and B.F.M. Bosnjacovic (eds) *Human Exposure to Ultraviolet Radiation: Risks and Regulations*, Amsterdam, Elsevier, 173-195.

Stolarski, R., R. Bojkov, L. Bishop, C.S. Zerefos, J. Stahelin, and J. Zawodny (1992) "Measured trends in stratospheric ozone", *Science*, 256, 342-349.

Taylor, H.R. et al. (1988) "Effect of ultraviolet radiation on cataract formation", *New England Journal of Medicine*, 319, 1429-1433.

Taylor, H.R. (1989) "The biological effects of UV-B on the eye", *Photochem. Photobiol.*, 50, 489-492.

Teramura, A.H., J.H. Sullivan, and L.H. Ziska (1990) "Interaction of elevated UV-B radiation and CO₂ on productivity and photosynthetic characteristics in wheat, rice and soybean", *Plant Physiology*, 94, 470-475.

UNI Environment Programme (UNEP) (1991) "Environmental Effects of Ozone Depletion: 1991 Update", Nairobi.

Worrest, R.C. and L.D. Grant (1989) "Effects of ultraviolet-B radiation on terrestrial plants and marine organisms". In: Russel, J.R. and T. Wigley (eds), *Ozone Depletion: Health and Environmental Consequences*, John Wiley and Sons, Chichester, 197-206.

World Meteorological Organization (WMO) (1991) "Scientific assessment of ozone depletion: 1991", *World Meteorological Organization Global Ozone Research and Monitoring Project*, Report No. 25.

Young, R.W. (1988) "Solar radiation and age-related macular degeneration", *Survey of Ophthalmology*, 32, 252-269.

Zerefos, C.S. (1983) "On the quasi-biennial oscillation in stratospheric temperatures and total ozone", *Adv. Space Res.*, 2, 177-181.

Zerefos, C.S., A.F. Bais, C. Meleti, and I.C. Ziomas (1995a) "A note on the recent increase of solar UV-B radiation over northern middle latitudes", *Geophys. Res. Lett.*, 22, 1245-1247.

Zerefos, C.S., C. Meleti, A.F. Bais, and A. Lambros (1995b) "The recent UV-B variability over Southeastern Europe", *Photochem. Photobiol., B: Biology*, 20, 15-19.

ΕΠΙΣΗΜΑΙ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Zerefos, C.S. and A.F. Bais (eds) (1996) "Solar Ultraviolet Radiation, Modelling, Measurements and Effects", *NATO-ASI Series, Series I: Global Environmental Change*, 52, pp. 332.

Ζερεφός, Χ. (1996) "Το στρώμα του όζοντος και η σημασία του", Το Ελληνικό Περιβάλλον: Μια έκδοση της Συνόδου Πρυτάνεων και Προέδρων Διοικουσών Επιτροπών των Ελληνικών Πανεπιστημίων, Εκδόσεις Σαββάλα, 135-155.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
2. ΕΠΙΣΗΜΑΙ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	2
3. ΕΠΙΣΗΜΑΙ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	3
4. ΕΠΙΣΗΜΑΙ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	4
5. ΕΠΙΣΗΜΑΙ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	5
6. ΕΠΙΣΗΜΑΙ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	6
7. ΕΠΙΣΗΜΑΙ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	7
8. ΕΠΙΣΗΜΑΙ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	8
9. ΕΠΙΣΗΜΑΙ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	9
10. ΕΠΙΣΗΜΑΙ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	10

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	1
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	2
2. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΗΣ ΤΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ-ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΔΙΚΤΥΟ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΟΥ	4
3. Η ΑΡΑΙΩΣΗ ΤΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ ΤΗΣ ΑΝΤΑΡΚΤΙΚΗΣ	7
4. ΑΡΑΙΩΣΗ ΤΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ ΣΤΗΝ ΑΡΚΤΙΚΗ ΚΑΙ ΣΕ ΑΛΛΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ	10
5. Η ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ΟΖΟΝ ΚΑΙ Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ	13
6. ΑΜΕΣΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΚΘΕΣΗ ΣΕ ΑΥΞΗΜΕΝΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΥΠΕΡΙΩΔΟΥΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	16
6.1 ΔΕΡΜΑΤΙΚΕΣ ΒΛΑΒΕΣ ΚΑΙ ΚΑΡΚΙΝΟΣ ΤΟΥ ΔΕΡΜΑΤΟΣ	19
6.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΟΥΣ ΟΦΘΑΛΜΟΥΣ	28
6.3 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΑΝΟΣΟΠΟΙΗΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	34
6.4 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΕ ΑΛΛΑ ΕΙΔΗ ΤΟΥ ΠΛΑΝΗΤΗ	39
6.5 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΑ ΥΔΡΟΒΙΑ ΕΙΔΗ	42
7. Η ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΗΣ ΣΤΟΙΒΑΔΑΣ ΤΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ	46
8. ΠΙΘΑΝΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΕΝΔΕΧΟΜΕΝΗ ΜΕΙΩΣΗ ΤΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ	56
9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	58