

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος νέας έκδοσης	19
Πρόλογος παλαιάς έκδοσης	21

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ 25

1. ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ	26
1.1 Εισαγωγή στο πρόβλημα	27
1.1.1 Σύντομη περιγραφή	27
1.1.2 Επιπτώσεις της Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης	31
Επιδράσεις στην ανθρώπινη υγεία	31
Επιδράσεις στην πανίδα	34
Επιδράσεις στην χλωρίδα	35
Μετεωρολογικές επιδράσεις	38
1.2 Ποια η στάση μας στο θέμα;	39
1.3 Ερωτήσεις, προβλήματα	41
1.4 Βιβλιογραφία	42

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ 43

2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	44
2.1 Πριν τη Βιομηχανική Επανάσταση	45
2.2 Μετά τη Βιομηχανική Επανάσταση	46
2.3 Το κοντινό παρελθόν (20ος αιώνας)	48

2.3.1	Περίοδος 1900-1925	48
2.3.2	Περίοδος 1925-1950	50
2.3.3	Περίοδος 1950-1980	51
2.4	Το εγγύς παρελθόν: 1980-1990	54
2.5	Το παρόν: 1990-σήμερα	56
2.6	Το Μέλλον (;)	61
2.7	Ερωτήσεις, προβλήματα	65
2.8	Βιβλιογραφία	67
	Συντομογραφίες	69

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ ΤΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ

71

3.	ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ ΤΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ	72
3.1	Τοπική κλίμακα	73
3.2	Αστική κλίμακα	74
3.3	Περιφερειακή κλίμακα	76
3.4	Διηπτερωτική κλίμακα	78
3.5	Παγκόσμια κλίμακα	80
3.6	Εναλλακτική κλίμακα έκτασης επιρροής	82
3.7	Ερωτήσεις, προβλήματα	84
3.8	Βιβλιογραφία	85
	Συντομογραφίες	86

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ, ΡΥΠΟΙ, ΒΙΟΓΕΩΧΗΜΙΚΟΙ ΚΥΚΛΟΙ

87

4.	ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ, ΡΥΠΟΙ, ΒΙΟΓΕΩΧΗΜΙΚΟΙ ΚΥΚΛΟΙ	89
4.1	Η Ατμόσφαιρα	89
4.2	Χρήσιμες έννοιες και ορισμοί	93
4.2.1	Ο καθαρός αέρας	93
4.2.2	Οι ρύποι της ατμόσφαιρας (πρωτογενείς και δευτερογενείς)	97
4.2.3	Βιογεωχημικοί κύκλοι	100
4.2.4	Πηγές, κατακρατητές και χρόνος ημιζωής ρύπων	101
4.2.5	Αποδέκτες	102
4.2.6	Μεταφορά και διασπορά ρύπων	102

4.3	Οι κυριότεροι ρύποι - λεπτομερής περιγραφή	105
4.3.1	Ενώσεις που περιέχουν άνθρακα	105
	Το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2)	105
	Το μονοξείδιο του άνθρακα (CO)	109
	Υδρογονάνθρακες (H/Cs) και παράγωγα	118
4.3.2	Ενώσεις που περιέχουν άζωτο	125
	Το υποξείδιο του αζώτου (N_2O)	127
	Το οξείδιο και διοξείδιο του αζώτου (NO και NO_2)	132
	Η Αμμωνία	136
	Δραστικό άζωτο (NO_y)	137
4.3.3	Ενώσεις που περιέχουν θείο	138
	Το διοξείδιο του θείου (SO_2)	140
	Το υδρόθειο (H_2S)	144
	Το καρβονυλοσουλφίδιο, OCS (<i>carbonyl sulfide</i>)	144
	Το διμεθυλοσουλφίδιο (<i>dimethyl sulfide</i> , CH_3SCH_3 , DMS)	145
4.3.4	Αλογονούχες ενώσεις	146
	Χλώριο και παράγωγα	148
	Φθόριο και παράγωγα	149
4.3.5	Φωτοχημικά Οξειδωτικά	150
4.3.6	Σωματιδιακοί ρύποι, αερολύματα (<i>particulate matter, aerosols</i>)	156
4.3.7	Επικίνδυνοι και τοξικοί ρύποι	162
4.3.8	Οι βιογεωχημικοί κύκλοι των στοιχείων C, N και S	170
	Ο κύκλος του άνθρακα στη φύση	170
	Ο κύκλος του αζώτου στη φύση	172
	Ο κύκλος του θείου στη φύση	175
4.4	Τρόποι καταγραφής της ατμοσφαιρικής ρύπανσης	177
4.4.1	Χρονομέσες τιμές και χρονοκύκλοι	177
4.5	Λυμένα παραδείγματα	181
4.6	Ερωτήσεις, προβλήματα	185
4.7	Βιβλιογραφία	187
	Σύμβολα	189
	Ελληνικά γράμματα	189
	Συντομογραφίες	190

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΗΓΕΣ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ

191

5.	ΠΗΓΕΣ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ	193
5.1	Φυσικές πηγές	194
5.2	Ανθρωπογενείς Πηγές	199
5.2.1	Η Βιομηχανία	199
5.2.2	Οι υπηρεσίες κοινής ωφελείας	200
5.2.1	Η προσωπική συνεισφορά	201
5.3	Η Καύση	203
5.4	Στατικές πηγές	208
5.4.1	Ρητίνες και πλαστικά	209
5.4.2	Γυαλιστικά και βαφές	209
5.4.3	Οξέα	210
5.4.4	Σαπούνια και απορρυπαντικά	210
5.4.5	Φωσφορικά λιπάσματα	210
5.4.6	Άλλα ανόργανα χημικά	211
5.4.7	Πετρέλαιο και άνθρακας	211
	Πετρέλαιο	212
	Άνθρακας	212
5.4.8	Μεταλλουργική βιομηχανία	213
	Σιδηρούχα μέταλλα	213
	Μη σιδηρούχα μέταλλα	214
5.4.9	Βιομηχανίες τσιμέντου, γυαλιών και κεραμικών	214
5.4.10	Χαρτοβιομηχανίες	215
5.5	Κινητές Πηγές	216
5.6	Λυμένα παραδείγματα	219
5.7	Ερωτήσεις, προβλήματα	224
5.8	Βιβλιογραφία	225

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ

227

6.	ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ	229
6.1	Επιδράσεις στην Ανθρώπινη Υγεία	232
6.1.1	«Επείσοδια» και «χρόνιες» επιδράσεις ατμοσφαιρικής ρύπανσης	231

6.1.2	Επιδράσεις από ειδικές βιομηχανικές εκπομπές	237
	Αμίαντος (<i>asbestos</i>)	239
	Βηρύλλιο	239
	Φθοριούχες ενώσεις	240
	Μόλυβδος	240
	Υδράργυρος	241
	Βανάδιο	241
	CO, SO _x , NO _x και πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs)	241
6.2	Επιδράσεις στη Χλωρίδα και την Πανίδα	242
6.2.1	Μηχανισμοί αλληλεπίδρασης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης με τις λειτουργίες των φυτών και επιπτώσεις	242
6.2.2	Επιδράσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην πανίδα	253
6.3	Επιδράσεις στα υλικά	256
	Αιωρούμενα σωματίδια	256
	SO _x , H ₂ S και CO ₂	257
	Φωτοχημικά οξειδωτικά	258
6.4	Λυμένα παραδείγματα	259
6.5	Ερωτήσεις, προβλήματα	261
6.6	Βιβλιογραφία	263
	Συνομογραφίες	265

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΠΛΑΝΗΤΙΚΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ 267

7.	ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΠΛΑΝΗΤΙΚΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ	268
7.1	Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου	269
7.1.1	Ο βαθμός συμβολής των διαφόρων αερίων του θερμοκηπίου στο φαινόμενο	272
7.1.2	Έμμεσος ρόλος άλλων αερίων ρύπων ή οντοτήτων στο φαινόμενο.	274
7.1.3	Κλιματικές αλλαγές: τι μας διδάσκει το παρελθόν, τι μπορεί να συμβεί στο μέλλον, ποια μέτρα επιβάλλεται να ληφθούν	276
7.1.4	Προληπτικά μέτρα για την αντιμετώπιση της ενίσχυσης του φαινομένου του θερμοκηπίου	280
	Μείωση της χρήσης χλωροφθορανθράκων (CFCs)	280
	Μείωση του όζοντος της τροπόσφαιρας	281
	Μείωση του N ₂ O	281
	Ελάττωση του μεθανίου	282
	Ελάττωση του CO ₂	282

7.2	Η καταστροφή του στρατοσφαιρικού όζοντος	286
7.3	Ερωτήσεις, προβλήματα	295
7.4	Βιβλιογραφία	297
	Συντομογραφίες	298

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Η ΧΗΜΕΙΑ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ 299

8.	Η ΧΗΜΕΙΑ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ	300
8.1	Χημικές αλληλεπιδράσεις στην ατμόσφαιρα και ο ρόλος της ηλιακής ακτινοβολίας	302
8.1.1	Γενικά στοιχεία, ορισμοί και ταξινομήσεις	302
8.1.2	Τροπόσφαιρα: Μηχανισμοί βασικών χημικών μεταβολών	306
8.1.3	Τροπόσφαιρα: Απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας	310
8.1.4	Τροπόσφαιρα: Το σύστημα NO/NO ₂ /O ₃ και ο ρόλος των H/Cs	313
	Το σύστημα NO/NO ₂ /O ₃	313
	Ο ρόλος των υδρογονανθράκων (H/Cs)	316
8.1.5	Τροπόσφαιρα: Ετερογενείς ατμοσφαιρικές αντιδράσεις	320
8.1.6	Τροπόσφαιρα: Μηχανισμοί αυτο-απομάκρυνσης ρύπων	320
8.2	Τροπόσφαιρα: χημεία και μηχανισμός της όξινης βροχής	324
8.2.1	Το pH των υδάτων. Το «ανθρακικό σύστημα»	329
8.3	Στρατόσφαιρα: η χημεία του στρατοσφαιρικού όζοντος	332
8.4	Λυμένα παραδείγματα	335
8.5	Ερωτήσεις, προβλήματα	339
8.6	Βιβλιογραφία	341
	Σύμβολα	342
	Ελληνικά γράμματα	343
	Συντομογραφίες	344

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗ ΡΥΠΩΝ 345

9.	ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗ ΡΥΠΩΝ	346
9.1	Μέτρηση μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα (CO, CO ₂)	349
9.2	Μέτρηση όζοντος (O ₃)	351
9.3	Μέτρηση των οξειδίων του αζώτου (NO _x)	352
9.4	Μέτρηση διοξειδίου του θείου (SO ₂)	355
9.5	Μέτρηση πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs)	357
9.6	Ανάλυση και μέτρηση σωματιδιακών ρύπων	364

9.7	Ανάλυση και μέτρηση της όξινης εναπόθεσης	368
9.8	Μέτρηση της ορατότητας	370
9.9	Ανάλυση και μέτρηση οσμών	371
9.10	Τηλεπαρατήρηση (τηλεπισκόπηση) & μέτρηση ρύπων	372
	9.10.1 Ιδιότητες και τρόπος λειτουργίας των λέιζερ	372
	9.10.2 Τηλεπαρατήρηση ρύπων με τη χρήση λέιζερ: μέθοδος LIDAR	377
	9.10.3 Οργανολογία ενός συστήματος LIDAR	387
9.11	Ερωτήσεις, προβλήματα	391
9.12	Βιβλιογραφία	393
	Σύμβολα	394
	Ελληνικά γράμματα	394
	Συντομογραφίες	395

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

Η ΦΥΣΙΚΗ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ, ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ 397

10.	Η ΦΥΣΙΚΗ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ, ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ	398
10.1	Χρήσιμες έννοιες φυσικής και αστρονομίας	400
	10.1.1 Μέλαν σώμα	400
	10.1.2 Συμπεριφορά των υλικών στην ακτινοβολία	400
	10.1.3 Θέση και κίνηση της Γης ως προς τον Ήλιο - Εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία	402
10.2	Λευκαύγεια και γωνία πρόσπτωσης	412
10.3	Εξερχόμενη ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος	415
10.4	Ενεργειακό Ισοζύγιο	416
10.5	Σταθερότητα της ατμόσφαιρας	420
	10.5.1 Μεταβολή της θερμοκρασίας και της πίεσης της ατμόσφαιρας με το ύψος	421
10.6	Προσδιορισμός της σταθερότητας	426
10.7	Αναστροφές θερμοκρασίας και επιπτώσεις	430
10.8	Λυμένα παραδείγματα	440
10.9	Ερωτήσεις, προβλήματα	442
10.10	Βιβλιογραφία	443
	Σύμβολα	443
	Ελληνικά γράμματα	444
	Συντομογραφίες	446

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΩΝ

447

11.	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΩΝ	449
11.1	Περιβαλλοντική Κατάλυση	450
11.1.1	Έλεγχος εκπομπών αυτοκινήτων - τριοδικός καταλυτικός μετατροπέας	452
	Η μορφολογία του τριοδικού καταλυτικού μετατροπέα	457
	Βασικά στοιχεία της τριοδικής καταλυτικής χημείας	460
	Ρύθμιση των τριοδικών καταλυτικών μετατροπέων	462
	Απενεργοποίηση των καταλυτικών μετατροπέων	465
	Σύγχρονες τάσεις έρευνας στους καταλυτικούς μετατροπείς	467
11.2	Εναλλακτικές λύσεις για κινητές πηγές ρύπανσης	482
11.3	Έλεγχος στατικών πηγών	484
11.3.1	Βασικές διεργασίες και τεχνικές για τον έλεγχο βιομηχανικών εκπομπών	484
	Συσκευές απορρόφησης	484
	Συσκευές προσρόφησης	486
	Συμπυκνωτές	486
	Χημική μετατροπή ρύπων (καυστήρες και καταλυτικά φίλτρα)	489
11.3.2	Εξειδίκευση τεχνικών ελέγχου ρύπων ανάλογα με τη βιομηχανική μονάδα	489
	Βιομηχανίες παραγωγής θερμότητας, ηλεκτρικής ισχύος και αποτέφρωση απορριμμάτων	489
	Χημικές βιομηχανίες	493
11.4	Ερωτήσεις, προβλήματα	501
11.5	Βιβλιογραφία	503
	Σύμβολα	507
	Ελληνικά γράμματα	507
	Συντομογραφίες	508

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΩΝ ΡΥΠΩΝ

509

12.	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΩΝ ΡΥΠΩΝ	510
12.1	Μηχανικοί συλλέκτες	512
12.1.1	Βαρυτικοί συλλέκτες	512
12.1.2	Συλλέκτης εκτροπής με ανακυκλοφορία	513
12.1.3	Κυκλώνες υψηλής απόδοσης	514
12.2	Φίλτρα από ύφασμα (σακόφιλτρα)	520
12.3	Εκπλυτές (υγροί καθαριστές, πλημμυρίδες)	524
12.4	Ηλεκτροστατικά φίλτρα	527
12.5	Ερωτήσεις, προβλήματα	531
12.6	Βιβλιογραφία	533

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 13

ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

535

13.	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ	537
13.1	Το Φυσικό Αέριο, μια καθαρότερη πηγή ενέργειας	539
13.1.1	Παραγωγή, ιδιότητες φυσικού αερίου και άλλα στοιχεία	540
	Γενικά στοιχεία	540
	Το φυσικό αέριο στην Ελλάδα	546
	Μεταφορά και αποθήκευση του φυσικού αερίου	549
13.1.2	Φιλικές προς το περιβάλλον τεχνολογίες αναβάθμισης του φυσικού αερίου	554
	Αναμόρφωση φυσικού αερίου	
	(παραγωγή H_2 , αερίου σύνθεσης ή ηλεκτρισμού)	555
	Διμερισμός ή σύζευξη του μεθανίου (<i>methane coupling</i>).	562
13.2	Κυψέλες καυσίμου	569
13.2.1	Γενικά στοιχεία	569
13.2.2	Μορφολογικά, λειτουργικά χαρακτηριστικά κυψελών καυσίμου	572
	Μορφολογικά χαρακτηριστικά	572
	Απόδοση κυψέλης καυσίμου	575
	Λειτουργικότητα κυψελών καυσίμου	578
	Ανάλυση των υπερτάσεων που εμφανίζει ένα κελί καυσίμου	582

13.2.3	Η πορεία της ανάπτυξης των κυψελών καυσίμου	585
13.2.4	Τύποι κυψελών καυσίμου - επίπεδο ανάπτυξης και εξέλιξης	589
	Κυψέλες καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης	591
	Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου	595
	Κυψελίδες καυσίμου φωσφορικού οξέος	596
	Κυψέλες καυσίμου απευθείας χρήσης αλκοόλης (μεθανόλης, αιθανόλης)	597
	Κυψέλες καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων	600
	Κυψέλες καυσίμου στερεού ηλεκτρολύτη	602
	Κυψέλες καυσίμου με άνοδο τηγμένο μέταλλο/SOFCs	604
	Κυψέλες καυσίμου για αυτοκίνητα	606
12.3.5	Χημική συμπαράγωγή	610
13.2.6	Στερεοί ηλεκτρολύτες και οι εφαρμογές του στην ηλεκτροχημεία και κατάλυση	614
	Γενικά στοιχεία	614
	Ηλεκτροχημικά στοιχεία στερεού ηλεκτρολύτη	617
	Ποτενσιομετρία στερεού ηλεκτρολύτη	619
	Ηλεκτροχημική Προώθηση ή φαινόμενο NEMCA	623
13.3	Λυμένα παραδείγματα	637
13.4	Ερωτήσεις, προβλήματα	642
13.5	Βιβλιογραφία, αναφορές	644
	Σύμβολα	649
	Ελληνικά γράμματα	650
	Συντομογραφίες	652

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 14

ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

653

14.	ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	654
14.1	Ενέργεια από βιομάζα	661
14.2	Ενέργεια από τον άνεμο (αιολική ενέργεια)	685
	14.2.1 Εισαγωγικά στοιχεία	685
	14.2.2 Ανεμογεννήτριες (ή ανεμοκινητήρες)	691
	14.2.3 Χαρακτηριστικά σχεδιασμού πτερυγίων	694
	14.2.4 Ηλεκτρική γεννήτρια και παραγόμενη ισχύς	696
14.3	Ενέργεια από τον Ήλιο (ηλιακή ή φωτοβολταϊκή ενέργεια)	703
	14.3.1 Γενικά στοιχεία	703
	14.3.2 Φωτοβολταϊκά συστήματα	705
	14.3.3 Ηλιακοί αντιδραστήρες	717

14.4	Λυμένα παραδείγματα	721
14.5	Βιβλιογραφία, αναφορές	724
	Σύμβολα	728
	Ελληνικά γράμματα	730
	Συντομογραφίες	731

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ 733

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ I

ΠΕΡΙΟΔΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ 735

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II

ΜΕΓΕΘΗ, ΦΥΣΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ, ΜΟΝΑΔΕΣ & ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΣ ΜΟΝΑΔΩΝ 741

ΕΥΤΕΤΗΡΙΟ 747

7. ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΠΛΑΝΗΤΙΚΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ

Η ατμοσφαιρική ρύπανση ενοχοποιείται σήμερα, γεγονός που αποδεικνύεται και με αδιάψευστα στοιχεία, ως υπεύθυνη για εκτεταμένες, πλανητικής εμβέλειας επιδράσεις που έχουν σοβαρές επιπτώσεις στην εξέλιξη της ζωής στον πλανήτη. Η ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου που συνοδεύεται και από έντονες κλιματικές αλλαγές και η «τρύπα του όζοντος», η σημαντική μείωση δηλαδή του στρατοσφαιρικού στρώματος του όζοντος που λειτουργεί ως ασπίδα του πλανήτη από τη βλαβερή υπεριώδη ακτινοβολία που δέχεται από τον Ήλιο, είναι δύο από τις βασικότερες, μεγάλης κλίμακας, επιδράσεις που θα αναλυθούν διεξοδικά στο παρόν κεφάλαιο.

7.1 Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

Το **φαινόμενο του θερμοκηπίου** (*global warming* ή *greenhouse effect*) αναφέρθηκε αρχικά από τον *Joseph Fourier*¹ το 1824. Περίπου ένα αιώνα αργότερα, το 1896, ο *Svante Arrhenius*² μας δίνει μια πληρέστερη περιγραφή του φαινομένου, του μηχανισμού και των φυσικοχημικών αρχών που το διέπουν: Ορισμένα αέρια της ατμόσφαιρας έχουν την ιδιότητα να επιτρέπουν τη διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας προς τη Γη, ενώ ταυτόχρονα παρεμποδίζουν και αντανακλούν προς το έδαφος σημαντικό ποσοστό της υπέρυθρης ακτινοβολίας που ανακλάται από την επιφάνεια της Γης. Στο Σχήμα 7.1 παρουσιάζεται μια εικονική αναπαράσταση του φαινομένου. Ως αποτέλεσμα του φαινομένου είναι η επικράτηση σχετικά υψηλών επιπέδων θερμοκρασίας στην επιφάνεια του πλανήτη. Εν πολλοίς, τα εν λόγω αέρια λειτουργούν με έναν τρόπο ακριβώς ανάλογο με αυτόν που λειτουργεί η διαφανής πλαστική επένδυση των θερμοκηπίων (εξού και το όνομα του φαινομένου) ή τα τζάμια των αυτοκινήτων που προκαλούν το καλοκαίρι υπερθέρμανση του εσωτερικού τους χώρου. Με άλλα λόγια το στρώμα αυτό των αερίων είναι κατά μία έννοια «διαφανές» (διαπερατό) από την ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος και **ημιδιαφανές** (σχεδόν αδιαπέραστο) από την ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος (προς το ερυθρό του φάσματος) που επανεκπέμπεται από τη Γη. Χωρίς αυτό το μηχανισμό η

1



Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830).

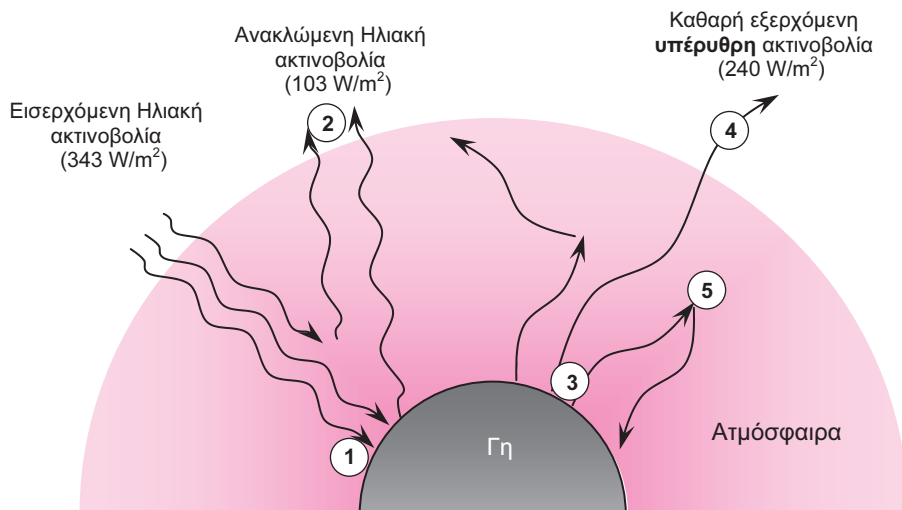
Γάλλος μαθηματικός και φυσικός στον οποίο οφείλονται οι γνωστές μας στα μαθηματικά φερώνυμες «σειρές *Fourier*» και «μετασχηματισμοί *Fourier*» με τις πολλαπλές εφαρμογές τους και ο φερώνυμος «νόμος *Fourier*» που αφορά την αγωγή θερμότητας στα υλικά. Σε αυτόν επίσης οφείλεται η «ανακάλυψη» της επενέργειας ενός φαινομένου που διατηρεί τη θερμοκρασία της Γης στα επίπεδα που γνωρίζουμε (~15°C), το γνωστό «φαινόμενο του θερμοκηπίου».

2



Svante August Arrhenius (1859-1927). Βραβείο Νόμπελ Χημείας 1903.

Σουηδός Χημικός, ένας εκ των πρωτεργατών στην εδραίωση του επιστημονικού κλάδου της «Φυσικοχημείας», γνωστός για την επιστημονική προσφορά του στη χημική κινητική (πχ φερώνυμη εξίσωση *Arrhenius*) και στη θεωρία της διάστασης των ηλεκτρολυτών (βραβείο *Nobel* 1903). Το 1991 εξελέγη ως μέλος της Βασιλικής Ακαδημίας Επιστημών του Ηνωμένου Βασιλείου (ως *Foreign member*). Η επιστημονική του καριέρα συνοδεύεται από πολλούς τιμητικούς τίτλους, πχ επίτιμος διδάκτωρ των πανεπιστημίων *Birmingham*, *Cambridge*, *Edinburgh*, *Greifswald*, *Groningen*, *Heidelberg*, *Leipzig* και *Oxford*.



Σχήμα 7.1 Εικονική αναπαράσταση της προσπίπτουσας και επανεκπεμπόμενης ακτινοβολίας στη Γη. Τονίζεται η διαδικασία που οδηγεί στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. (1) Μεγάλο ποσοστό της προσπίπτουσας Ηλιακής ακτινοβολίας απορροφάται από τη γήινη επιφάνεια, θερμαίνοντάς την. (2) Κάποια ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας (103 W/m^2) ανακλάται από την επιφάνεια της Γης και την ατμόσφαιρα. (3) Υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπεται από την επιφάνεια της Γης. (4) Καθαρή (net) εξερχόμενη υπέρυθρη ακτινοβολία στο διάστημα. (5) Μερικό ποσοστό της υπέρυθρης ακτινοβολίας της Γης απορροφάται από τα αέρια του θερμοκηπίου και επανεκπέμπεται προς όλες τις διευθύνσεις.

θερμοκρασία της Γης θα ήταν κατά 35°C χαμηλότερη, δηλαδή περίπου -20°C **αντί για $+15^\circ\text{C}$** που είναι σήμερα, και η ύπαρξη ζωής θα ήταν αδύνατη, τουλάχιστον στη μορφή που τη γνωρίζουμε σήμερα.

Τα κυριότερα αέρια που συμμετέχουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, τα ονομαζόμενα «αέρια του θερμοκηπίου» (*greenhouse gases*), και το εκτιμώμενο ποσοστό συνεισφοράς τους, αναφέρονται στον Πίνακα 7.1

Προς αποφυγή σύγχυσης, θα πρέπει να τονιστεί ότι τα ποσοστά συνεισφοράς των διαφόρων αερίων του θερμοκηπίου στον Πίνακα 7.1 δεν αντικατοπτρίζουν και την αναλογία τους στην ατμόσφαιρα, καθώς ο σχετικός βαθμός (ένταση) επίδρασης του κάθε μορίου στο φαινόμενο είναι πολύ διαφορετικός όπως θα διευκρινιστεί παρακάτω.

Πίνακας 7.1 «Αέρια του θερμοκηπίου» και η συνεισφορά τους στο φαινόμενο

Αέριο	Συνεισφορά (%)
Διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂)	48
(Υδρογονο-)χλωροφθοράνθρακες (H-)CFCs	18
Μεθάνιο (CH ₄)	17
Υποξείδιο του αζώτου (N ₂ O)	6
Όζον (O ₃) και άλλα αέρια	11

Θα έγινε ελπίζουμε κατανοητό το γεγονός ότι το φαινόμενο του θερμοκηπίου, αυτό καθ' εαυτό, δεν είναι επιβλαβές. Εξάλλου υφίστατο από ανέκαθεν. Αντίθετα, είναι ουσιώδες και απαραίτητο για την ύπαρξη, τη διατήρηση και την εξέλιξη της ζωής στον πλανήτη υπό τη μορφή που τη γνωρίζουμε. Το ανησυχητικό είναι η **ενίσχυση** του φαινομένου -και μάλιστα με ραγδαίο ρυθμό- ως αποτέλεσμα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενα κεφάλαια, συνέπεια της τεχνολογικής ανάπτυξης, η ατμοσφαιρική συγκέντρωση των αερίων που συμβάλλουν στο φαινόμενο έχει αυξηθεί κατά 30% πχ για το CO₂ και σχεδόν κατά 100% για το CH₄. Οι υπολογισμοί δείχνουν ότι αν δεν ληφθούν κατάλληλα μέτρα όσον αφορά τις ανθρώπινες δραστηριότητες που σχετίζονται με την ανεξέλεγκτη διοχέτευση στην ατμόσφαιρα αερίων του θερμοκηπίου, η ισχύς του φαινομένου θα διπλασιαστεί σε λιγότερο από 50 χρόνια. Ποιο θα ήταν το αποτέλεσμα μιας τέτοιας εξέλιξης των πραγμάτων; Πρώτο και βασικό, η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη κατά 1,5 έως 6°C, μια αύξηση χωρίς προηγούμενο εδώ και 125.000 χρόνια (!). Ποια τα επακόλουθα μιας τέτοιας εξέλιξης(:): τήξη των πάγων των αρκτικών ζωνών, άνοδος της στάθμης των θαλασσών κατά 0,5 έως 1,5 m, διατάραξη του κύκλου βροχοπτώσεων και χιονοπτώσεων, πολλαπλασιασμός των ακραίων κλιματικών φαινομένων, μετατόπιση των καλλιεργήσιμων και δασικών ζωνών της Γης, μετακίνηση πληθυσμών, έντονες οικονομικές επιπτώσεις, κλπ.

Βέβαια υπάρχουν σχετικές αβεβαιότητες για το πού θα είναι εντονότερη η υπερθέρμανση. Η υπερθέρμανση θα αυξήσει τις νεφώσεις (μεγαλύτερος ρυθμός εξάτμισης των υδάτων), αλλά παραμένει άγνωστο αν αυτές θα αυξηθούν στα ανώτερα ατμοσφαιρικά στρώματα -όπου με τη σειρά τους θα συμβάλουν στο

φαινόμενο του θερμοκηπίου- ή στα χαμηλότερα, πράγμα που θα ενεργούσε αντίστροφα, υποβαθμίζοντας τη διαδικασία της υπερθέρμανσης.

Η ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου είναι σήμερα το υπ' αριθμόν ένα, πλανητικού επιπέδου πρόβλημα, παρά τις όποιες ακόμα αβεβαιότητες για τις επιδράσεις που θα έχει. Η τεχνολογία και οι γνώσεις του ανθρώπου είναι ικανές για να παρέμβουν δραστικά στην παρεμπόδιση της ενίσχυσής του, αρκεί να υπάρξει μαζική συνειδητοποίηση.

7.1.1 Ο βαθμός συμβολής των διαφόρων αερίων του θερμοκηπίου στο φαινόμενο

Από το Κεφάλαιο 4 μας είναι γνωστή η σύσταση της ατμόσφαιρας και η περιεκτικότητά της στα βασικά αέρια N_2 και O_2 , αλλά και σε αέρια που συνυπάρχουν σε πολύ μικρότερα ποσοστά. Κάποια από αυτά όπως το CO_2 , το CH_4 , το N_2O , το O_3 και οι χλωροφθοράνθρακες (CFCs) ή υδρογονοχλωροφθοράνθρακες (HCFCs), αποτελούν τους κυριότερους αντιπροσώπους των ονομαζόμενων **αερίων του θερμοκηπίου** (*greenhouse gases*, GHGs) που είναι υπεύθυνα για το φαινόμενο. Δηλαδή την απορρόφηση της υπέρυθρης ακτινοβολίας της Γης και την επανεκπομπή (επιστροφή) ποσοστού αυτής ξανά στο έδαφος (Σχήμα 7.1). Η απορροφητική τους ικανότητα είναι αποτέλεσμα των χαρακτηριστικών του φάσματος απορρόφησής τους που οφείλεται στη δομή των μορίων τους. Την ανά μόριο απορροφητική ικανότητα του κάθε αερίου, σε σύγκριση με αυτή του CO_2 , την ονομάζουμε **απόδοση θερμοκηπίου, Α.Θ.**, (*greenhouse efficiency*) του αερίου στο φαινόμενο. Εν ολίγοις η απόδοση θερμοκηπίου είναι ένα σχετικό μέγεθος. Δεδομένα Α.Θ. παρέχονται στον Πίνακα 7.2. Ο πίνακας παρέχει λίστα των σπουδαιότερων ενώσεων που συνεισφέρουν στο φαινόμενο (αέρια θερμοκηπίου), τη μέση συγκέντρωσή τους στην ατμόσφαιρα, το χρόνο ζωής τους σε αυτήν, τις πηγές από τις οποίες προέρχονται, αλλά και τον μηχανισμό καταστροφής τους στην ατμόσφαιρα.

Το θετικό (αν μπορούμε να το αποκαλέσουμε έτσι) στην όλη υπόθεση είναι ότι η εξαιρετικά υψηλή απόδοση θερμοκηπίου που επιδεικνύουν κάποιες από τις παραπάνω ενώσεις εξισορροπείται από τη μικρή τους συγκέντρωση στην ατμόσφαιρα, έτσι ώστε τελικώς σχεδόν όλα τα αέρια να έχουν παραπλήσια συνεισφορά στο φαινόμενο.

Πίνακας 7.2 Οι κυριότερες ενώσεις που συμβάλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου

Ένωση*	Μέση συγκέντρωση το 1992 (ppbv)	Χρόνος ζωής (years)	Α.Θ.	Είδος κύριας πηγής [†]	Βασικοί τρόποι απομάκρυνσης
CO ₂	356.000	~200	1	A, Φ	Ωκεανοί/φωτοσύν- θεση
CH ₄	1714	11	21	A, Φ	ΟΗ/τροπόσφαιρα
O ₃	10-200	°	2.000	A, Φ	Διάφοροι
N ₂ O	310	120	206	A, Φ	hν/στρατόσφαιρα
CFCI ₃ (CFC-11)	0,268	50±5	12.400	A	hν/στρατόσφαιρα
CF ₂ Cl ₂ (CFC-12)	0,503	102	15.800	A	hν/στρατόσφαιρα
CF ₂ HCl (HCFC-22)	0,105	13,3	10.660	A	ΟΗ/τροπόσφαιρα
CH ₃ CCl ₃	0,160	5,4±0,6	2.730	A	ΟΗ/τροπόσφαιρα
CF ₃ Br (H-1301)	0,002	65	16.000	A	hν/στρατόσφαιρα
C ₂ F ₃ Cl ₃ (CFC-113)	0,082	85	-	A	hν/στρατόσφαιρα
CF ₂ ClCF ₂ Cl (CFC-114)	0,02	300	-	A	hν/στρατόσφαιρα
C ₂ F ₅ Cl (CFC-115)	<0,01	1.700	-	A	O(¹ D)/στρατόσφ.
CH ₃ CFCl ₂ (HCFC-141b)	-	9,4	-	A	ΟΗ/τροπόσφαιρα
CH ₃ CF ₂ Cl (HCFC-142b)	0,0035	19,5	-	A	ΟΗ/τροπόσφαιρα
CF ₃ CH ₂ F (HFC-134a)	-	14	-	A	ΟΗ/τροπόσφαιρα
CH ₂ F ₂ (HFC-32)	-	6	-	A	ΟΗ/τροπόσφαιρα
CCl ₄	0,132	42	-	A	ΟΗ/τροπόσφαιρα

* Όλες οι ενώσεις που αναφέρονται στον πίνακα απορροφούν στο υπέρυθρο (IR), και πλείστες εξ αυτών αποτελούν επίσης καταστροφικές ενώσεις για το στρατοσφαιρικό όζον. Το όζον απορροφά τόσο στην υπέρυθρη (IR), όσο και στην υπεριώδη (UV) περιοχή του φάσματος.

[†] A: ανθρωπογενής πηγή, Φ: φυσική πηγή.

° Εξαρτάται από τη θέση του. Λίγες ώρες στην τροπόσφαιρα, περίπου 1 ώρα στην άνω στρατόσφαιρα και μήνες στην κάτω στρατόσφαιρα.

Αν οι τάσεις που σκιαγραφούν σήμερα τις ανθρώπινες δραστηριότητες συνεχιστούν αμετάβλητες, η ισχύς του φαινομένου του θερμοκηπίου εκτιμάται ότι θα διπλασιαστεί μέσα στα επόμενα 50 χρόνια. Για τις εκτιμήσεις αυτές λαμβάνεται υπόψη και ο μέσος χρόνος ζωής των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα. Δεδομένα και προβλέψεις για το 2040 για μερικά από τα αέρια του θερμοκηπίου παρέχονται στον Πίνακα 7.3.

Πίνακας 7.3 Συμμετοχή των αερίων του θερμοκηπίου στο φαινόμενο και μελλοντικές εκτιμήσεις

Αέριο	Μέσος χρόνος ζωής	% συμμετοχή στο Φ.Θ. (βάσει στοιχείων του 1988)	% συμμετοχή στο Φ.Θ. (εκτίμηση για το 2040)
CO ₂	200 χρόνια	48	37
CH ₄	11 χρόνια	17	12
N ₂ O	120 χρόνια	6	9
O ₃ και άλλα	~3 μέρες	11	20
CFC-11	65 χρόνια	18	22
CFC-12	110 χρόνια		

7.1.2 Έμμεσος ρόλος άλλων αέριων ρύπων ή οντοτήτων στο φαινόμενο.

Το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) συνεισφέρει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου με έναν έμμεσο, τριών όμως συνιστωσών, τρόπο:

- αντιδρά με τις ρίζες OH[•] που υφίστανται στην ατμόσφαιρα παράγοντας CO₂, ενός σημαντικού αερίου του θερμοκηπίου.
- Η κατ' αυτό το τρόπο μείωση των ριζών OH[•] έχει ως επακόλουθο την ελάττωση της οξειδωσης του CH₄, άλλου σημαντικού αερίου του θερμοκηπίου, διατηρώντας την συγκέντρωσή του σε υψηλά επίπεδα, και τέλος
- η μείωση των ριζών OH[•] μειώνει και τον ρυθμό διάσπασης του όζοντος της τροπόσφαιρας, επίσης σημαντικού αερίου του θερμοκηπίου.

Ως αποτέλεσμα των τριών αυτών παραγόντων είναι η αύξηση των επιπέδων και των τριών βασικών αερίων του θερμοκηπίου (CO₂, CH₄ και O₃).

Το διοξείδιο του αζώτου (NO₂) σε συνδυασμό με υδρογονάνθρακες και ηλιακή ακτινοβολία, ως γνωστόν, συμμετέχει στις φωτοχημικές αντιδράσεις που οδηγούν στην δημιουργία του φωτοχημικού νέφους, το οποίο έχει υψηλή περιεκτικότητα σε O₃.

Η επίδραση των υδρατμών (*water vapor*) είναι πιο πολύπλοκη: Τα σύννεφα των χαμηλών ατμοσφαιρικών στρωμάτων αντανακλούν προς το σύμπαν την

προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία μειώνοντας την υπερθέρμανση. Αντίθετα οι υδρατμοί στα ανώτερα στρώματα επιτρέπουν τη διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά εμποδίζουν την αντίστροφη πορεία της υπέρυθρης, ενισχύοντας το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Το όζον (O_3) εμφανίζει μια ιδιαιτερότητα σε σχέση με το φαινόμενο θερμοκηπίου, η οποία αξίζει να σημειωθεί: είναι ένας σπουδαίος απορροφητής τόσο της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (στην περιοχή συχνοτήτων της υπεριώδους, UV), όσο και της επανεκπεμπόμενης υπέρυθρης από την Γη. Έτσι μια αύξηση της συγκέντρωσης του όζοντος στα χαμηλά στρώματα της ατμόσφαιρας (τροπόσφαιρα), όπως και μια μείωση του στρατοσφαιρικού όζοντος θα οδηγούν σε αύξηση της θερμοκρασίας της Γης. Τονίζεται ότι η ρύπανση της ατμόσφαιρας προκαλεί τόσο τη μείωση του στρατοσφαιρικού όσο και την αύξηση του τροποσφαιρικού όζοντος, συμβάλλοντας έτσι με διπλό τρόπο στην ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Αν και οι εκτιμήσεις δείχνουν ότι μόνο το 10% της ολικής ποσότητας του όζοντος της ατμόσφαιρας βρίσκεται στην τροπόσφαιρα, αυτό το ποσοστό έχει τελικά σημαντικά μεγαλύτερη επίδραση στη θερμοκρασία της Γης από αυτή που έχει το στρατοσφαιρικό όζον.

Αλλά και **το μεθάνιο** (CH_4) εμφανίζει έμμεσες επιδράσεις. Όπως είδαμε από τη χημεία του (Κεφάλαιο 4), εκτός του ότι απορροφά υπέρυθρη (IR) ακτινοβολία, επιδρά επίσης στη συγκέντρωση του τροποσφαιρικού όζοντος και στην οξειδωτική ικανότητα της ατμόσφαιρας, καθόσον αντιδρά με σημαντικές ποσότητες ριζών $OH\cdot$.

Τέλος, οι **χλωροφθοράνθρακες** (CFCs) και οι **υδρογονοχλωροφθοράνθρακες** (HCFCs), εκτός της άμεσης συμβολής τους στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, καθώς απορροφούν έντονα στο υπέρυθρο, ευθύνονται και για τη μείωση του στρατοσφαιρικού όζοντος, μια έμμεση επίδραση προς την κατεύθυνση της αύξησης της θερμοκρασίας της Γης που θα πρέπει να συνυπολογιστεί. Πράγματι, μείωση του στρατοσφαιρικού O_3 , σημαίνει περισσότερη διαπερνούσα υπεριώδους (UV) ακτινοβολία προς την επιφάνεια της Γης, δηλαδή, περαιτέρω αύξηση της επιφανειακής θερμοκρασίας αυτής.

7.1.3 Κλιματικές αλλαγές: τι μας διδάσκει το παρελθόν, τι μπορεί να συμβεί στο μέλλον, ποια μέτρα επιβάλλεται να ληφθούν

Εφόσον η ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου, ως αποτέλεσμα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, καταδεικνύεται από τους επιστήμονες ως ο βασικός «ένοχος» των παρατηρούμενων εκτεταμένων κλιματικών αλλαγών του πλανήτη, λόγω της σχέσης αιτίας-αιτιατού, το θέμα των κλιματικών αλλαγών αναλύεται συνοπτικά κάτω από την παρούσα ενότητα, παρότι θα μπορούσε να αποτελέσει περιεχόμενο ξεχωριστού κεφαλαίου ή ακόμα και βιβλίου.

Αν και οι θερμοκρασίες καταγράφονται μόλις από τα τέλη του 17^{ου} αιώνα, διάφορες επιστημονικές μέθοδοι μας επιτρέπουν να ανατρέξουμε βαθιά μέσα στο παρελθόν εκτιμώντας τις παρελθούσες διακυμάνσεις της μέσης θερμοκρασίας της Γης. Έχει αποδειχθεί σχεδόν με βεβαιότητα ότι η Γη πέρασε από τις παρακάτω κλιματικές φάσεις:

- 950 μ.Χ.-1350 μ.Χ.: Μια **κλιματικά ιδανική** περίοδος, όπου η μέση θερμοκρασία του πλανήτη προσέγγιζε αυτή των πιο θερμών περιόδων του 20ου αιώνα.
- 1350-1890: Μια **μικρή παγετώδης** εποχή. Συνοδεύτηκε από τους μεγάλους λιμούς της βασιλείας του Λουδοβίκου 14^{ου} και από την επέκταση των ορεινών παγετώνων. Η μέση θερμοκρασία της Γης ήταν κατά 0,5-0,7°C χαμηλότερη από τη μέση σημερινή.

Για τις παλαιότερες περιόδους όπου δεν διαθέτουμε ανθρώπινες μαρτυρίες, οι γνώσεις μας προέρχονται από διάφορες μεθόδους που ανέπτυξε η επιστήμη της **παλαιοκλιματολογίας**. Έτσι εκτιμούμε ότι τα τελευταία 2 εκατομμύρια χρόνια ο πλανήτης πέρασε από είκοσι **παγετώδεις** και **μεσοπαγετώδεις** περιόδους. Οι κλιματικές αυτές διαφοροποιήσεις αποδόθηκαν σε αστρονομικά αίτια αφού η περιοδικότητα των φαινομένων σχετιζόταν με καθορισμένα αστρονομικά φαινόμενα και σταθερές. Όμως, οι εν λόγω διαφοροποιήσεις δεν μπορούν να μεταφραστούν σε θερμοκρασιακές μεταβολές μεγαλύτερες του 1°C και δεν εξηγούν επαρκώς τα φαινόμενα που εξελίχθηκαν στις περιόδους αυτές τα οποία διαπιστώνονται με την παλαιοκλιματολογία.

Η πιο πρόσφατη παγετώδης εποχή, που έληξε πριν από 12.000 χρόνια περίπου, κάλυψε το βόρειο τμήμα της Ευρώπης και Αμερικής με στρώμα πάγου δύο έως τριών χιλιομέτρων, ενώ η μέση θερμοκρασία του αέρα δεν ήταν παρά μόνο 3 με 4 βαθμούς χαμηλότερη της σημερινής. Ακολούθησε η μεσοπαγετώδης περίοδος με εναλλαγές ανάμεσα σε ιδανικές κλιματικές συνθήκες και σε μικρές παγετώδεις εποχές, περίοδος την οποία διανύουμε και σήμερα. Η πιο θερμή της εποχή εντοπίζεται γύρω στα 6.000 χρόνια πριν, με μια θερμοκρασία περίπου $1,5^{\circ}\text{C}$ υψηλότερη της μέσης σημερινής. Θερμότερες περιόδους (με $2-2,5^{\circ}\text{C}$ υψηλότερες της μέσης σημερινής θερμοκρασίας) εντοπίζονται μόνο αν ανατρέξουμε 125.000 χρόνια πίσω. Την εποχή εκείνη η στάθμη της θάλασσας βρισκόταν 5-7 m ψηλότερα της σημερινής.

Βασιζόμενοι λοιπόν σε αυτά που μας διδάσκει το παρελθόν και αναζητώντας τι μπορεί να συμβεί στο μέλλον από μια υπερθέρμανση του πλανήτη κατά λίγους βαθμούς, έχουμε σήμερα αναπτύξει διάφορα ειδικά μαθηματικά μοντέλα που προσπαθούν να περιγράψουν το φαινόμενο και να καταλήξουν σε προβλέψεις. Τα μοντέλα παίρνουν υπόψη τους όλους τους πιθανούς παράγοντες που ενδέχεται να έχουν είτε θετική είτε αρνητική επίδραση στο φαινόμενο. Οι τελευταίοι παράγοντες (αυτοί που τείνουν να ελαττώσουν τη θερμοκρασία) αποτελούν, τρόπον τινά, τους αμυντικούς, αυτο-προστατευτικούς, μηχανισμούς της ατμόσφαιρας για τη διατήρηση της θερμοκρασίας σε σταθερά επίπεδα. Πράγματι, οι μαθηματικές αυτές προσομοιώσεις που εφοδιάζονται με αρχικές συνθήκες τις θερμοκρασίες παρελθόντων ετών, προβλέπουν, εν γένει, θερμοκρασίες της επιφάνειας της Γης μεγαλύτερες από τη σημερινή εάν βασιστούν μόνο σε παράγοντες αυξητικών επιδράσεων της θερμοκρασίας. Ο εμπλουτισμός των μοντέλων με παράγοντες αρνητικής επίδρασης, οδηγεί σε καλύτερες εκτιμήσεις. Κάποιοι από τους δευτερεύοντες παράγοντες, θετικής ή αρνητικής επίδρασης, που εισάγονται στα πλέον πρόσφατα και εμπειριστατωμένα μοντέλα, είναι περιγραφικά οι ακόλουθοι:

Πέραν της σαφώς θετικής επίδρασης της αύξησης της συγκέντρωσης του CO_2 στην ατμόσφαιρα μέσω της συμβολής του στην ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου, υφίσταται και μια ελάχιστονης σημασίας αλλά όχι εντελώς αμελητέα αντισταθμιστική αρνητική επίδραση: Η αύξηση του CO_2 στην ατμόσφαιρα ευνοεί τη φωτοσύνθεση με συνέπεια την αύξηση της χλωρίδας που θα απορροφά ακόμα περισσότερο CO_2 . Επιπρόσθετα, περισσότερο CO_2 σημαίνει και με-

γαλύτερο ποσοστό διάλυσής του στους ωκεανούς. Η διαλυτότητα του αερίου στους ωκεανούς ευνοείται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, άρα μια υπερθέρμανση θα μείωνε αποτελεσματικά την δράση των υδάτων του πλανήτη ως «κατακρατητή» CO_2 .

Η αύξηση της θερμοκρασίας θα ευνοούσε την αποσύνθεση περίπου 1.600 δισεκατομμυρίων τόνων οργανικών ενώσεων του εδάφους και άρα θα αύξανε περαιτέρω την έκλυση CO_2 και μεθανίου (θετική επιρροή στο φαινόμενο). Μια επίσης θετική επιρροή θα προέρχεται και από τον εμπλουτισμό της ατμόσφαιρας σε υδρατμούς, ως επακόλουθο της αύξησης της θερμοκρασίας. Αυτό, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, μπορεί να ενεργήσει και αντίστροφα, ανάλογα με το ποια στρώματα της ατμόσφαιρας θα εμπλουτιστούν περισσότερο σε υδρατμούς.

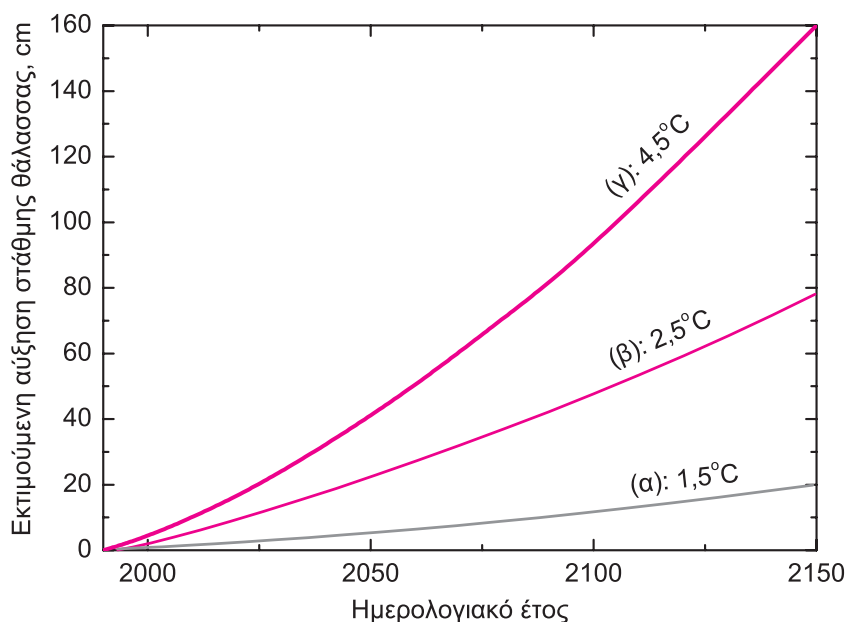
Οι προβλέψεις που δίνουν τελικώς τα μοντέλα είναι οι ακόλουθες:

Άνοδος της θερμοκρασίας κατά 1,5-4,5°C για κάποια μοντέλα, και 3-5,5°C για κάποια άλλα. Είναι αξιοσημείωτο ότι τέτοιες θερμοκρασιακές προσαυξήσεις προβλέπεται να προκληθούν εντός του περιορισμένου χρονικού διαστήματος των μερικών δεκαετιών, αντίθετα με ανάλογου μεγέθους φυσικές αυξομειώσεις της θερμοκρασίας που χρειάστηκαν χιλιετίες για να εξελιχθούν. Οι συνέπειες από μια τέτοια εξέλιξη; Ορατές:

- Αύξηση των βροχο-χιονοπτώσεων στα υψηλά γεωγραφικά πλάτη. Στην Ανταρκτική οι χιονοπτώσεις θα αυξηθούν δραστικά με πιθανό σενάριο την συσσώρευση πάγου σε αυτήν, νερό το οποίο θα ετίθετο εκτός κύκλου.
- Τα μέσα γεωγραφικά πλάτη θα καταστούν πιθανόν πιο ξηρά, ιδιαίτερα στις καλοκαιρινές περιόδους.
- Τα μοντέλα επίσης προβλέπουν ένταση των βροχοπτώσεων και των μουσώνων που πλήττουν τη Νότια Ασία.
- Ακραίες καιρικές συνθήκες σε περισσότερα σημεία του πλανήτη με επικράτηση καταστροφικών φαινομένων, όπως καταιγίδες, πλημμύρες, τυφώνες, κλπ.
- Προβλέπεται μια άνοδος της στάθμης της θάλασσας κατά περίπου 40 έως και 150 cm για τα επόμενα 50 έως 150 χρόνια αντίστοιχα (βλ. Σχή-

μα 7.2), όχι όπως συχνά ακούγεται ότι θα είχαμε μια καθολική τήξη των πάγων της Ανταρκτικής, γεγονός που αν συνέβαινε θα σήμαινε μια άνοδο των υδάτων κατά 65-70 m. Αλλά, άνοδος του επιπέδου της θάλασσας κατά λίγα εκατοστά δεν σημαίνει ότι οι καταστροφές θα είναι μικρές. Τεράστιες εκτάσεις γης προβλέπεται να βρεθούν κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Περιοχές που θα πληγούν εντονότερα από μια τέτοια εξέλιξη είναι για παράδειγμα το Μπαγκλαντές, η Ολλανδία, το Δέλτα του Νείλου, η Λουϊζιάνα, αλλά και πολλά άλλα μέρη της Γης με υψόμετρο συγκρίσιμο αυτού της επιφάνειας της θάλασσας.

- Η υπερθέρμανση θα προκαλέσει τεράστιες μεταβολές στη βλάστηση και μετατόπιση των εύφορων περιοχών σε υψηλότερα γεωγραφικά πλάτη. Μια προβλεπόμενη εξέλιξη σε πλανητικό επίπεδο της συνολικής κατανομής της βλάστησης, σε σύγκριση με τη σημερινή κατάσταση, παρουσιάζεται στον Πίνακα 7.4.



Σχήμα 7.2 Προβλέψεις μοντέλων για την αύξηση της στάθμης της θάλασσας ανάλογα με την τιμή της ενδεχόμενης αύξησης της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη κατά (α) 1,5°C, (β) 2,5°C και (γ) 4,5°C. (Πηγή: IPCC, 1996).

Πίνακας 7.4 Πρόβλεψη της επίδρασης που θα έχει η ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου στην κατανομή της βλάστησης του πλανήτη από τις επακόλουθες κλιματικές αλλαγές

Είδος βλάστησης	Κατανομή βλάστησης με δεδομένα του 2000	Κατανομή βλάστησης μετά από διπλασιασμό της έντασης του φαινομένου του θερμοκηπίου
Δάση	58,4%	47,4%
Λιβάδια, καλλιέργειες	17,7%	28,9%
Έρημοι	20,6%	23,8%
Τούνδρες	3,3%	0,0%

7.1.4 Προληπτικά μέτρα για την αντιμετώπιση της ενίσχυσης του φαινομένου του θερμοκηπίου

Θα αναφερθούμε περιληπτικά στα κυριότερα σχετικά μέτρα που επιβάλλεται να ληφθούν για την αντιμετώπιση του φαινομένου, παρότι το αντικείμενο θα μπορούσε να έχει μεγάλη έκταση.

Μείωση της χρήσης χλωροφθορανθράκων (CFCs)

Το μέτρο αυτό παρουσιάζει τις μικρότερες δυσκολίες για να επιτευχθεί, εφόσον η παραγωγή των CFCs είναι ήδη περιορισμένη, επιβάλλεται από διεθνείς συνθήκες και εν πάση περιπτώσει γίνονται προσπάθειες να αναπτυχθούν εναλλακτικά υλικά αντικατάστασής τους, όπου αυτοί χρησιμοποιούνται. Οι κυριότερες χρήσεις των CFCs είναι στα αεροζόλ (32%), στα διογκούμενα πλαστικά που χρησιμοποιούνται ως μονωτικά (31%), στα ψυκτικά υγρά (31%) και στα διαλυτικά (6%). Δεν πρέπει βέβαια να ξεχνάμε ότι το **δυναμικό συμβολής** των CFCs στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, μέγεθος που θα ορίσουμε παρακάτω, είναι τεράστιο, ήτοι μέχρι και 12.000-15.000 φορές μεγαλύτερο από αυτό του CO₂ (Πίνακας 7.5). Εκτιμάται ότι η πλήρης κατάργηση της χρήσης τους από το 2000 και μετά θα υποβίβαζε κατά 25% (!! διόλου ευκαταφρόνητο ποσοστό) τις εκτιμήσεις των μοντέλων για παγκόσμια υπερθέρμανση.

Έχουν παρθεί ήδη σχετικές αποφάσεις για την ελάττωση της παραγωγής τους. Το Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ (17 Σεπτεμβρίου 1987) επιβάλει μια ελάττωση σε παγκόσμιο επίπεδο της τάξης του 40%. Οι στόχοι που θέτονται σήμερα από τα κράτη του κόσμου είναι ακόμη πιο δραστικοί εφόσον είναι αποδειγμένη η αρνητική επίδραση των ενώσεων αυτών σε ένα ακόμη παγκόσμιας κλίμακας

καταστροφικό φαινόμενο: συμβάλουν στη καταστροφή του στρατοσφαιρικού όζοντος, το γνωστό φαινόμενο ως «τρύπα του όζοντος» που παρατηρήθηκε αρχικά στην Ανταρκτική, αλλά σήμερα εμφανίζεται σε πολλά σημεία του πλανήτη (φαινόμενο που θα αναλυθεί ενδελεχώς στην ενότητα 7.2).

Παρά τους περιορισμούς, η χρήση των χλωροφθορανθράκων (CFCs) σε ορισμένες περιπτώσεις φαίνεται δύσκολο να αντικατασταθεί, με αποτέλεσμα οι βιομηχανίες να παρουσιάζουν μια δυσκαμψία στο να δεχτούν την οριστική κατάργησή τους, ιδιαίτερα εκείνων των CFCs που χρησιμοποιούνται ως διαλύτες. Ως προσωπική συμβολή του καθενός μας στο θέμα θα πρέπει να είναι το συνειδητό μοϊκοτάζ της χρήσης προϊόντων που εμπεριέχουν CFCs.

Μείωση του όζοντος της τροπόσφαιρας

Αυτό είναι ένα μάλλον πιο σύνθετο πρόβλημα, καθότι το «κακό» αυτό όζον δημιουργείται, όπως έχει αναλυθεί, δευτερογενώς από διάφορους πρωτογενείς ρύπους της βιομηχανίας και των αυτοκινήτων (πχ NO_x , υδρογονάνθρακες, κλπ), με τη συμβολή και της ηλιακής ακτινοβολίας. Εντούτοις έχουν παρθεί πολλά μέτρα για την ελάττωση των πρωτογενών αυτών ρύπων, ιδιαίτερα αυτών που προέρχονται από τα αυτοκίνητα (χρήση καταλυτικών μετατροπέων), και εκτός των άλλων, η εποχή του αυτοκινήτου μηδενικών εκπομπών (*zero emissions cars*) όπου η ενέργεια για την κίνησή του θα παράγεται από κυψέλες καυσίμου υδρογόνου (H_2 fuel cells), δεν φαίνεται να αργεί (Κεφάλαιο 13).

Μείωση του N_2O

Το υποξείδιο του αζώτου παράγεται κατά σημαντικό ποσοστό από την καύση υδρογονανθράκων για παραγωγή ενέργειας και από το αυτοκίνητο ως παραπροϊόν του καταλυτικού μετατροπέα κατά τη λειτουργία του για την αναγωγή των NO_x ($=\text{NO}$ και NO_2). Τα μέτρα που αναφέραμε παραπάνω σίγουρα θα έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση της παραγωγής του. Παρόλα αυτά, η μείωση της χρήσης αζωτούχων λιπασμάτων για την αποφυγή μαζικής έκλυσης ουρίας μπορούν να ελαττώσουν περαιτέρω την παραγωγή αυτού του αερίου. Ας αναφερθεί ξανά εδώ η σοβαρή επίδραση του N_2O και στην καταστροφή του όζοντος της στρατόσφαιρας.

Ελάττωση του μεθανίου

Εδώ τα πράγματα περιπλέκονται εφόσον εμφανίζονται αντικρουόμενες τάσεις. Το μεθάνιο εμφανίζει 20πλάσιο δυναμικό από εκείνο του CO₂ στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Από την άλλη μεριά η χρήση του ως καύσιμο (χρήση Φυσικού Αερίου) είναι εκείνη με τη μικρότερη παραγωγή CO₂ σε σχέση με οποιοδήποτε άλλο ορυκτό καύσιμο, δηλαδή, ανώτερο υδρογονάνθρακα (πετρέλαιο, βενζίνες) ή γαιάνθρακα.

Προκειμένου λοιπόν να περιοριστεί το φαινόμενο του θερμοκηπίου σε σχέση με το μεθάνιο πρέπει μάλλον να ακολουθηθούν οι παρακάτω ενέργειες:

- ελάττωση των μη ελεγχόμενων πηγών έκλυσης μεθανίου στην ατμόσφαιρα. Το μεθάνιο παράγεται κυρίως από αναερόβιες ζυμώσεις που έχουν να κάνουν με ανθρώπινες δραστηριότητες (ορυζώνες, καύση βιομάζας, απορρίμματα, απώλειες κατά την παραγωγή Φυσικού Αερίου, κλπ)
- στροφή στη χρήση του Φυσικού Αερίου ως καυσίμου για παραγωγή ενέργειας, με σοβαρή βεβαίως μέριμνα για την αποφυγή διαρροών του στην ατμόσφαιρα.

Ελάττωση του CO₂

Εδώ εντοπίζεται το πολυπλοκότερο και πλέον δισεπίλυτο πρόβλημα. Η παραγωγή CO₂ σχετίζεται άμεσα με τις περισσότερες ανθρώπινες δραστηριότητες: τις διάφορες τεχνολογίες παραγωγής προϊόντων, την παραγωγή ενέργειας, κλπ. Από την άλλη μεριά, η κατοίκηση όλο και μεγαλύτερων εκτάσεων της Γης από τον άνθρωπο ως αποτέλεσμα της αύξησης του πληθυσμού, η καταστροφή των δασών και γενικότερα η μείωση της χλωρίδας του πλανήτη, εντείνουν το πρόβλημα. Η φωτοσύνθεση είναι ένας από τους σημαντικότερους μηχανισμούς μείωσης του ατμοσφαιρικού CO₂.

Πρέπει να ληφθούν δρακόντεια μέτρα για την ελάττωση των εκπομπών CO₂ από τις δραστηριότητες (προσωπικές και βιομηχανικές) του ανθρώπου. Πρέπει να αναπτυχθούν από τη χημική βιομηχανία νέες τεχνολογίες διάθεσης και αξιοποίησης του CO₂ ώστε να καταστεί οικονομικά ελκυστική η συγκράτησή του. Είναι αξιοσημείωτο ότι γίνεται μια παγκόσμια προσπάθεια για να περιοριστεί σημαντικά η παγκόσμια εκπομπή CO₂ με την καθιέρωση συγκεκριμένων

υποχρεώσεων μείωσης των εκπομπών του από κάθε κράτος μέλος του Ο.Η.Ε., ενώ από την άλλη, η κοινότητα των επιστημόνων της κατάλυσης και των τεχνολόγων αναζητεί τρόπους διάθεσης του αερίου αυτού, διοργανώνοντας ειδικά συνέδρια επί του θέματος. Η στροφή της τεχνολογίας για την ανεύρεση και εκμετάλλευση άλλων πηγών ενέργειας, αντί της καύσης υδρογονανθράκων, θα επιφέρει τεράστια οφέλη στην επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος. Τέτοιες καθαρές πηγές ενέργειας μπορούν να είναι η ηλιακή, η αιολική, η γεωθερμική, η ενέργεια των ωκεανών κλπ. Αυτές οι ενεργειακές πηγές ονομάζονται **Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας**, ΑΠΕ (*renewable energy sources*) και είναι οι μόνες που δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον με CO₂. Στη συνδιάσκεψη κορυφής για την προστασία του περιβάλλοντος στο Κιότο της Ιαπωνίας, τα κράτη μέλη συμφώνησαν να εξαντλήσουν τα περιθώρια για την ευρύτερη χρήση των ΑΠΕ με ποσοτικοποιημένες δεσμεύσεις. Σήμερα επιβάλλεται οι στόχοι αυτοί να αναπροσαρμοστούν προς το καλύτερο.

Πριν κλείσουμε το θέμα του φαινομένου του θερμοκηπίου, ας αναφέρουμε κάποιους ορισμούς που έχουν εισαχθεί, και χρησιμοποιούνται πλέον ευρέως, για να χαρακτηρίζουν και να κατατάσσουν τα αέρια του θερμοκηπίου (*greenhouse gases*, GHGs) σε μια κλίμακα, ανάλογα με την συμβολή τους στο φαινόμενο.

Όπως θα αναπτυχθεί αναλυτικότερα στο Κεφάλαιο 10, η Γη δέχεται συνεχώς ενέργεια από τον Ήλιο υπό μορφή ακτινοβολίας και ταυτόχρονα επανεκπέμπει μέρος αυτής προς το διάστημα, με αποτέλεσμα να υφίσταται μια καθαρή (*net*) διαφορά ακτινοβολούμενης ενέργειας στην τροπόπαυση, μετρούμενη σε Wm^{-2} . Στην προκειμένη περίπτωση, εάν διαταράξουμε τη συγκέντρωση ενός αερίου του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, αναμένεται μια μεταβολή σε αυτή την καθαρή διαφορά εισερχόμενης-εξερχόμενης ακτινοβολίας λόγω της ικανότητας που εμφανίζει το αέριο αυτό να απορροφά και να επανεκπέμπει προς όλες τις κατευθύνσεις (άρα και επιστρέφουσα προς τη Γη) ακτινοβολία. Αυτή η επαγόμενη μεταβολή (σε μονάδες Wm^{-2}) στην τροπόπαυση, θεωρώντας ότι οι θερμοκρασίες της στρατόσφαιρας αναπροσαρμόζονται στην νέα ενεργειακή ισορροπία, ενώ η θερμοκρασία της επιφάνειας της Γης και της τροπόσφαιρας παραμένουν αμετάβλητες, θα λέγεται **ακτινοβολούμενη ένταση** (*radiative forcing*, RF) του συστήματος γήινης επιφάνειας-τροπόσφαιρας.

Βάσει της παραπάνω θεώρησης, αναπτύχθηκε μια κλίμακα κατάταξης (σε μονάδες $\text{Wm}^{-2}\text{kg}^{-1}$) των αερίων του θερμοκηπίου ανάλογα με την ανά μονάδα

μάζας επίδραση που έχουν στον παράγοντα RF. Αυτή η κατάταξη θα επηρεάζεται προφανώς από τα παρακάτω χαρακτηριστικά του αερίου:

- την ένταση με την οποία το αέριο απορροφά υπέρυθρη (IR) ακτινοβολία,
- το μήκος κύματος αυτής της ακτινοβολίας, και
- τη διάρκεια ζωής του αερίου στην ατμόσφαιρα.

Κατόπιν των ανωτέρω, θα ονομάζουμε **δυναμικό συμβολής** ενός αερίου A στο φαινόμενο του θερμοκηπίου (*Global Warming Potential*, GWP), «τη δυναμικότητα που εμφανίζει 1 kg από το αέριο να συνεισφέρει στον παράγοντα RF, σε σχέση με εκείνη που εμφανίζει 1 kg ενός άλλου αερίου αναφοράς, που καθιερώθηκε να είναι το CO₂». Έτσι προκύπτει:

$$\text{Δυναμικό συμβολής (GWP)} = \frac{\int_0^{t_f} a_A[A(t)]dt}{\int_0^{t_f} a_R[R(t)]dt} \quad (7.1)$$

όπου t_f είναι χρονικός ορίζοντας στον οποίο αναφερόμαστε, a_A είναι η ακτινοβολούμενη ένταση που προκαλείται από την αύξηση του αερίου A κατά 1 kg, $[A(t)]$ είναι η συνάρτηση χρονικής μεταβολής της ποσότητας του συστατικού A κατά την παλμική αύξησή του, και a_R , $[R(t)]$ οι ανάλογες παράμετρος που αναφέρονται στο αέριο αναφοράς (δηλαδή το CO₂).

Ο αριθμητής του παραπάνω κλάσματος θα αναφέρεται ως **απόλυτο δυναμικό συμβολής** (*absolute global warming potential*, AGWP) στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, δηλαδή

$$\text{AGWP} = \int_0^{t_f} a_A[A(t)]dt \quad (7.2)$$

και θα έχει μονάδες (Wm⁻²kg⁻¹yr), σε αντίθεση με το δυναμικό συμβολής που είναι αδιάστατο, ως σχετική ποσότητα.

Στον Πίνακα 7.5 καταγράφονται πολλές ενώσεις που διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στο φαινόμενο της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και παρατίθεται το δυναμικό συμβολής που εμφανίζουν.

Πίνακας 7.5 Δυναμικό συμβολής στο φαινόμενο του θερμοκηπίου ορισμένων αερίων [Πηγή: Seinfeld and Pandis, 1998].

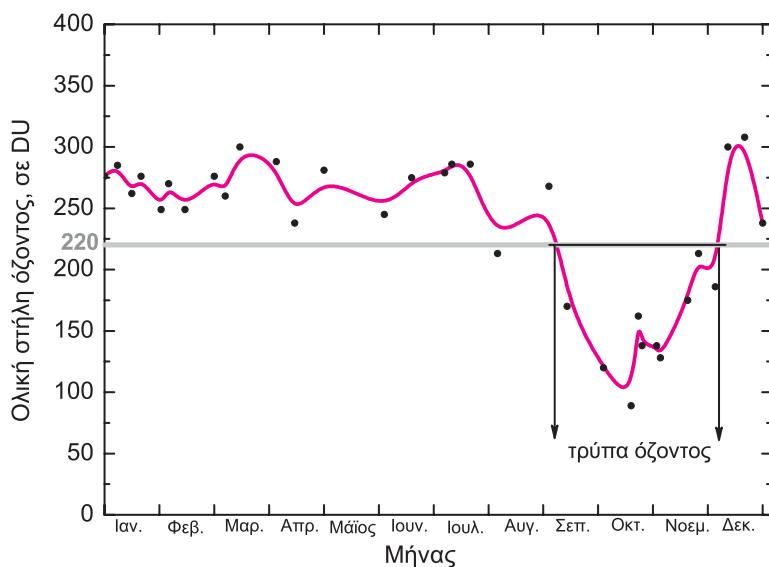
Ένωση ή κωδικός ένωσης	Χημικός τύπος	Χρόνος ζωής (έτη)	Δυναμικό συμβολής (GWP)	
			20 έτη	100 έτη
CFC-11	CFCl_3	52	5.000	4.000
CFC-12	CF_2Cl_2	102	7.900	8.500
CFC-13	CClF_3	640	8.100	11.700
CFC-113	$\text{C}_2\text{F}_3\text{Cl}_3$	85	5.000	5.000
CFC-114	$\text{C}_2\text{F}_4\text{Cl}_2$	300	6.900	9.300
CFC-115	$\text{C}_2\text{F}_5\text{Cl}$	1.700	6.200	9.300
τετραχλωράνθρακας	CCl_4	42	2.000	1.400
μεθυλοχλωροφόρμιο	CH_3CCl_3	5,5	360	110
HCFC-22	CF_2HCl	13,3	4.300	1.700
HCFC-141b	$\text{C}_2\text{FH}_3\text{Cl}_2$	9,4	1.800	630
HCFC-142b	$\text{C}_2\text{F}_2\text{H}_3\text{Cl}$	19,5	4.200	2.000
HCFC-123	$\text{C}_2\text{F}_3\text{HCl}_2$	1,4	300	93
HCFC-124	$\text{C}_2\text{F}_4\text{HCl}$	5,9	1.500	480
HCFC-225ca	$\text{C}_3\text{F}_5\text{HCl}_2$	2,5	550	170
HCFC-225cb	$\text{C}_3\text{F}_5\text{HCl}_2$	6,6	1.700	530
H-1301	CF_3Br	65	6.200	5.600
HFC-23	CHF_3	250	9.200	12.100
HFC-32	CH_2F_2	6	1.800	580
HFC-43-10mee	$\text{C}_5\text{H}_2\text{F}_{10}$	20,8	3.300	1.600
HFC-125	C_2HF_5	36	4.800	3.200
HFC-134	CHF_2CHF_2	11,9	3.100	1.200
HFC-134a	CH_2FCF_3	14	3.300	1.300
HFC-152a	$\text{C}_2\text{H}_4\text{F}_2$	1,5	460	140
HFC-143	$\text{CHF}_2\text{CH}_2\text{F}$	3,5	950	290
HFC-143a	CF_3CH_3	55	5.200	4.400
HFC-227ea	C_3HF_7	41	4.500	3.300
HFC-236fa	$\text{C}_3\text{H}_2\text{F}_6$	250	6.100	8.000
HFC-242ca	$\text{C}_3\text{H}_3\text{F}_5$	7	1.900	610
χλωροφόρμιο	CHCl_3	0,55	15	5
μεθυλενοχλωρίδιο	CH_2Cl_2	0,41	28	9
εξαφθοροθείο	SF_6	3.200	16.500	24.900
τετραφθορομεθάνιο	CF_4	50.000	4.100	6.300
υπερφθοροκυκλοβουτάνιο	C_4F_8	3.200	6.000	9.100
υπερφθοροκυκλοεξάνιο	C_6F_{14}	3.200	4.500	6.800
εξαφθοροαιθάνιο	C_2F_6	10.000	8.200	12.500
υποξείδιο του αζώτου	N_2O	120	290	320
μεθάνιο	CH_4	14,5±2,5	62±20	24,5±7,5

7.2 Η καταστροφή του στρατοσφαιρικού όζοντος

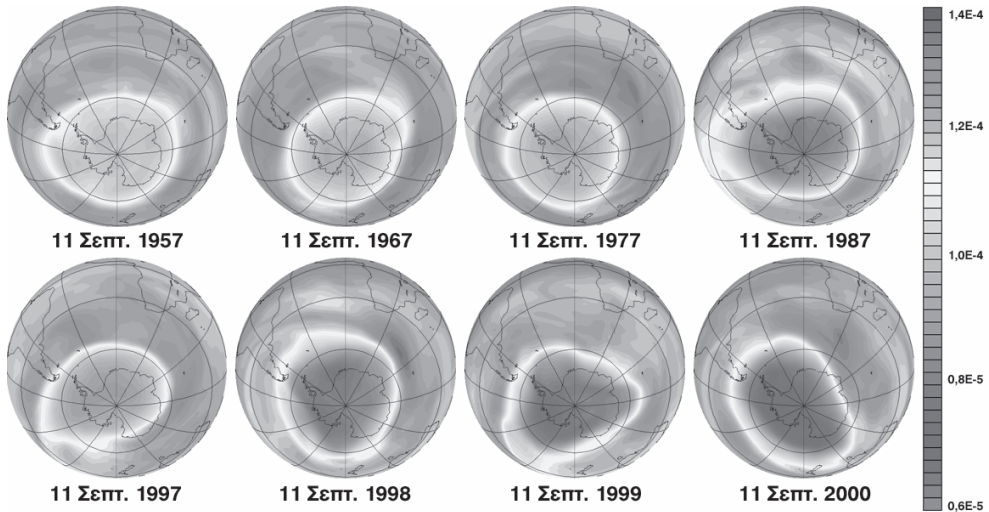
Από τα μέσα της δεκαετίας του 1980 οι επιστήμονες άρχισαν να παρατηρούν μια μεγάλη σε έκταση και έντονη μείωση του στρώματος του όζοντος της στρατόσφαιρας πάνω από την Ανταρκτική, φαινόμενο που ακολουθεί μια ετήσια περιοδικότητα σε γενικές γραμμές όμοια με αυτή του παρουσιάζεται για το 2008 στο Σχήμα 7.3, όπου διακρίνεται μια χαρακτηριστική «επιδείνωση» μεταξύ των μηνών Σεπτεμβρίου-Νοεμβρίου. Το φαινόμενο επεκράτησε με την ονομασία «**τρύπα του όζοντος**» (*ozone hole*).

Η εξέλιξη του σημαντικού αυτού φαινομένου για μια περίοδο 40 περίπου ετών (από το 1957 έως το 2000) παρουσιάζεται στην αλληλουχία των εικόνων του Σχήματος 7.4, κατά την 11η Σεπτεμβρίου κάθε έτους που περιλαμβάνεται στην αλληλουχία. Στις τελευταίες εικόνες της αλληλουχίας η μεγάλη έξαρση του φαινομένου είναι έκδηλη και πραγματικά τρομακτική.

Για να ακριβολογούμε, ως **τρύπα του όζοντος** ορίζουμε «τη γεωγραφική εκείνη έκταση στην οποία η ολική ποσότητα του όζοντος (στρατοσφαιρικού) είναι μι-



Σχήμα 7.3 Η μεταβολή της ολικής στήλης όζοντος πάνω από τον νότιο πόλο (Ανταρκτική) κατά το έτος 2006. Πηγή στοιχείων: *U.S. Department of Commerce/National Oceanic & Atmospheric Administration/NOAA Research*, ιστότοπος: www.esrl.noaa.gov/news/2008/ozonehole.html



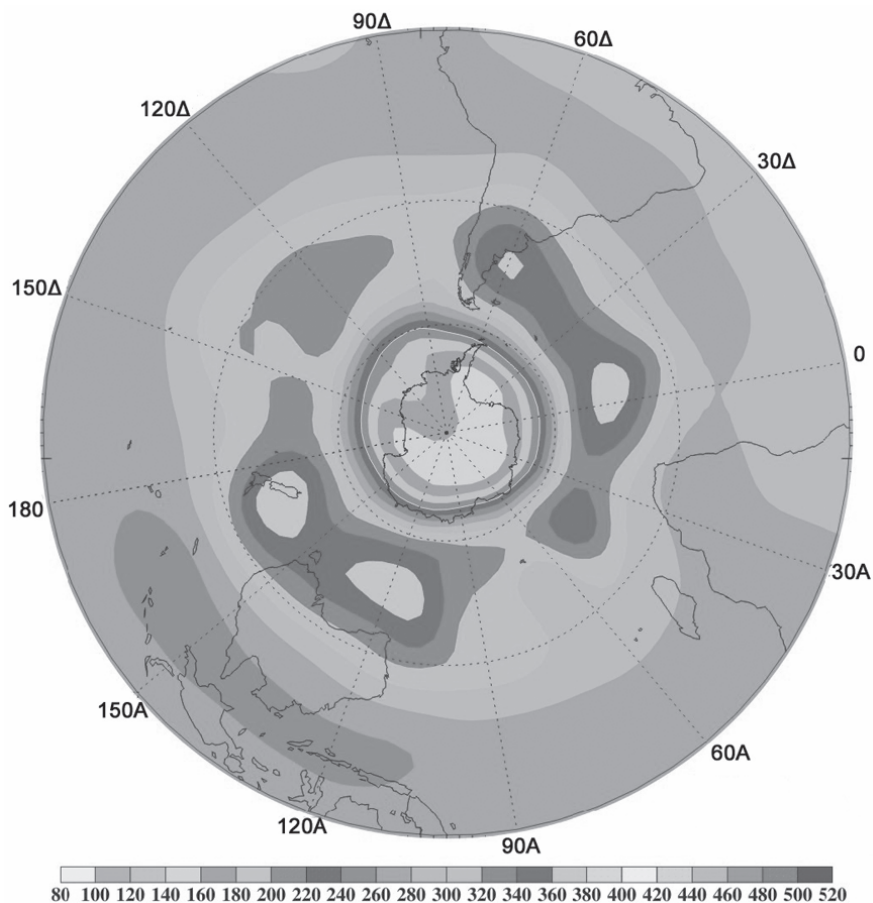
Σχήμα 7.4* Αλληλουχία εικόνων της εξέλιξης του φαινομένου της τρύπας του όζοντος επάνω από την Ανταρκτική από το 1957 έως το 2000 κατά την 11^η Σεπτεμβρίου κάθε έτους. Πηγή: Δεδομένα του προγράμματος ERA-40 του ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμων Μετεωρολογικών Προβλέψεων)

κρότερη των 220 μονάδων Dobson (DU)». Οι μονάδες **Dobson** (Dobson Unit – DU) είναι μια καθιερωμένη πλέον μονάδα μέτρησης της ποσότητας (πάχους) του στρώματος του στρατοσφαιρικού όζοντος σε μια κλίμακα που φέρει το όνομα **ολική στήλη όζοντος** (*total column ozone*). Συγκεκριμένα, «100 DU ισοδυναμούν με ένα στρώμα όζοντος πάχους 1 mm, εάν αυτό εξαπλωθεί απευθείας πάνω στην επιφάνεια της Γης».

Το φαινόμενο έχει λάβει ανησυχητικές διαστάσεις καθώς σημαντική μείωση του στρώματος του στρατοσφαιρικού όζοντος παρατηρείται ενίοτε και πάνω από κατοικημένες περιοχές του πλανήτη και όχι μόνο στην Ανταρκτική, η οποία συνεχίζει να διακρίνεται από την εντονότερη εμφάνιση του φαινομένου (δείτε στο Σχήμα 7.5 μια πιο πρόσφατη εικόνα της επικρατούσας κατάστασης).

Για να κατανοήσει κάποιος το φαινόμενο, χρειάζεται καταρχάς να γνωρίζει πως και γιατί το όζον είναι παρόν στην στρατόσφαιρα του πλανήτη. Το όζον της

* Δείτε την έγχρωμη εκδοχή του σχήματος στο τέλος του βιβλίου



Σχήμα 7.5* Κατανομή της συγκέντρωσης του όζοντος πάνω από την Ανταρκτική την 12^η Σεπτεμβρίου του 2008. Η κλίμακα κάτω από το σχήμα είναι ενδεικτική της ολικής στήλης όζοντος σε μονάδες DU για την ανάγνωση της εικόνας. Πηγή: *U.S. Department of Commerce/National Oceanic & Atmospheric Administration/NOAA Research*, ιστότοπος: www.esrl.noaa.gov/news/2008/ozonehole.html

στρατόσφαιρας βρίσκεται σε διαρκή δυναμική ισορροπία μεταξύ της αντίδρασης σχηματισμού του και της διάσπασής του. Οι κύριοι παράγοντες αυτής της ισορροπίας είναι η υπεριώδης (UV) ηλιακή ακτινοβολία και τα μόρια και άτομα οξυγόνου, τα οποία αλληλεπιδρούν σύμφωνα με τις αντιδράσεις:



* Δείτε την έγχρωμη εκδοχή του σχήματος στο τέλος του βιβλίου



όπου $h\nu$ είναι ένα φωτόνιο με ενέργεια που εξαρτάται από την συχνότητα (ν) του φωτός, και M είναι ένα μόριο αζώτου ή και οξυγόνου που δρα ως καταλύτης.

Ο κύκλος των αντιδράσεων 7.3-7.5 ξεκινά με τη φωτοδιάσπαση του μοριακού οξυγόνου, που σχηματίζει ατομικό οξυγόνο. Τα άτομα αυτά αντιδρούν με μοριακό οξυγόνο παρουσία ενός τρίτου μορίου M , (αντίδραση 7.4), για να σχηματίσουν όζον (O_3). Τέλος το σχηματιζόμενο όζον απορροφά την υπεριώδη ακτινοβολία και διασπάται (αντίδραση 7.5), για να συμπληρωθεί με αυτό τον τρόπο ο κύκλος του σχηματισμού και της διάσπασης του όζοντος. Σε δεδομένο υψόμετρο και γεωγραφικό πλάτος αποκαθίσταται μια δυναμική ισορροπία του συστήματος των αντιδράσεων 7.3-7.4 που οδηγεί σε μια συγκεκριμένη για το σημείο συγκέντρωση μόνιμης κατάστασης. Η παραπάνω περιγραφείσα επίδραση της υπεριώδους ακτινοβολίας (UV) στο όζον και το οξυγόνο της στρατόσφαιρας αποτελεί το μηχανισμό παρεμπόδισης της UV ακτινοβολίας για να φτάσει στην επιφάνεια της Γης, περιορίζοντας έτσι τις επιβλαβείς συνέπειες στη ζωή. Με άλλα λόγια το όζον της στρατόσφαιρας αποτελεί μια *προστατευτική ασπίδα* για τον άνθρωπο αλλά και για κάθε βιολογική διεργασία πάνω στον πλανήτη.

Το 1974, οι Rowland και Molina¹ απέδειξαν πως οι ενώσεις του άνθρακα με χλώριο και φθόριο, οι γνωστοί μας χλωροφθοράνθρακες (CFCs) ή υδρογονοχλωροφθοράνθρακες (HCFCs), μπορούν να διαταράξουν τη μόνιμη κατάσταση

¹



Paul J. Crutzen
(Ολλανδός)



F. Sherwood Rowland
(Αμερικανός)



Mario J. Molina
(Μεξικανός)

των Πανεπιστημίων Max-Planck-Institut für Chemie, Germany (P.J. Crutzen) και της California, Irvine, US (F.S. Rowland και M.J. Molina). Τιμήθηκαν με το Βραβείο Νόμπελ Χημείας το 1995 για τις πρωτοποριακές τους μελέτες στη χημεία της ατμόσφαιρας και ειδικά για την εξήγηση των μηχανισμών σχηματισμού και καταστροφής του στρατοσφαιρικού όζοντος.

της συγκέντρωσης του όζοντος στη στρατόσφαιρα. Οι CFCs και HCFCs είναι πολύ σταθερές, χημικά, ενώσεις και χρησιμοποιήθηκαν από τον άνθρωπο για πάνω από 50 χρόνια ως ψυκτικές ουσίες, προωθητικά αέρια (αεροζόλ), καθαριστικά, μέσα πυρόσβεσης και διαλυτικά. Εξαιτίας της σταθερότητας που εμφανίζουν στην τροπόσφαιρα, παραμένουν σε αυτή για μεγάλα χρονικά διαστήματα, βρίσκοντας έτσι την ευκαιρία να διαχυθούν στη στρατόσφαιρα και να έλθουν σε αλληλεπίδραση με το O₃. Διατυπώθηκε λοιπόν η άποψη πως οι CFCs στην τροπόσφαιρα διαταράσσουν την ισορροπία των αντιδράσεων 7.4 και 7.5 [Crutzen, Rowland and Molina, Nobel Lectures, 1995. Molina and Rowland, 1974].

Στη στρατόσφαιρα, οι CFCs εκτίθενται στην υπεριώδη ακτινοβολία (μήκους κύματος $\lambda < 220$ nm), φωτοδιασπώνται, ελευθερώνοντας χλώριο το οποίο επιδρά στην ισορροπία του όζοντος με τον ακόλουθο τρόπο:

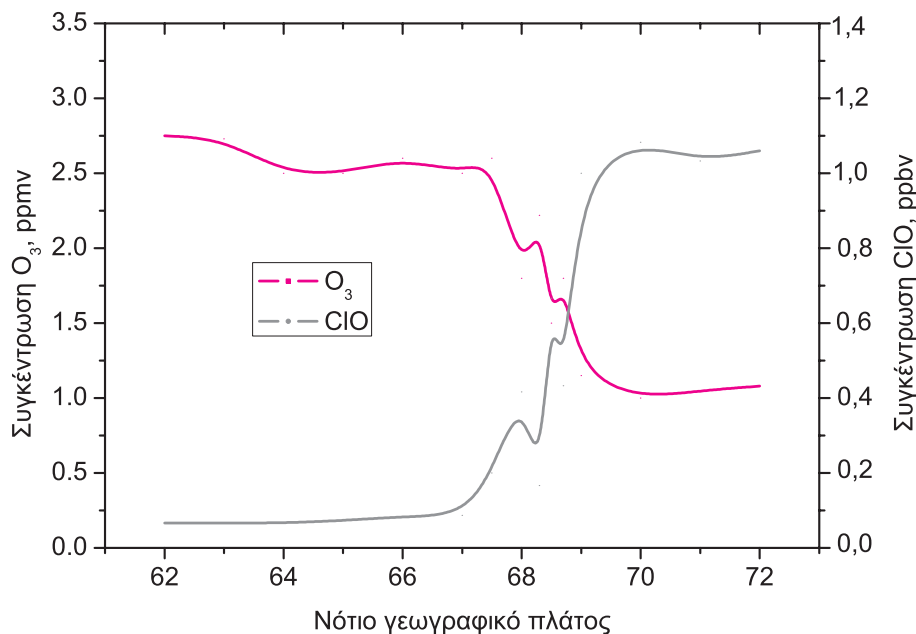


συνολικά :



Τα παραγόμενα άτομα χλωρίου από την αντίδραση 7.6 διευκολύνουν την διάσπαση του όζοντος (αντίδραση 7.7) μειώνοντας έτσι τη συγκέντρωσή του. Εξαιτίας της αυτό-καταλυτικής φύσης των αντιδράσεων 7.7 και 7.8 ένα άτομο χλωρίου διασπά πολλά μόρια όζοντος.

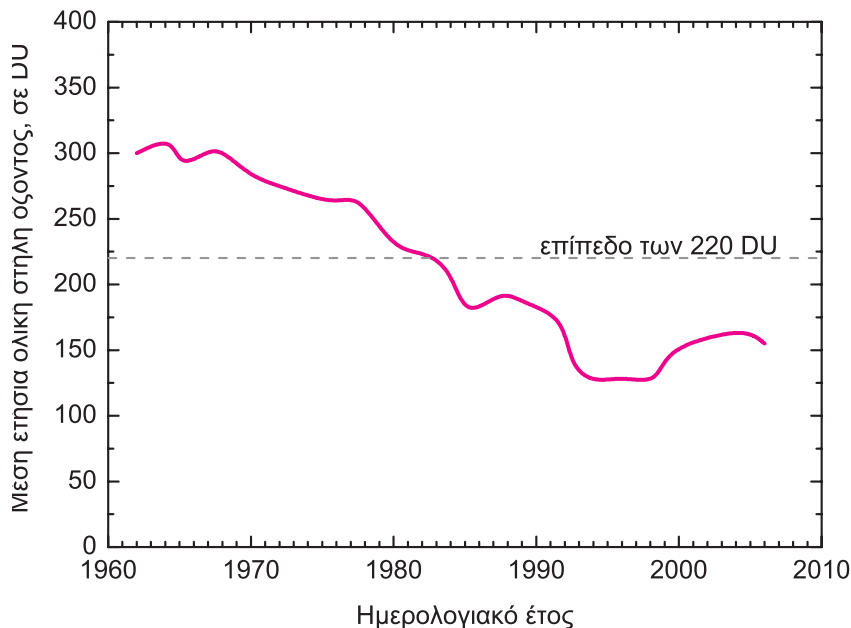
Η ανακάλυψη της τρύπας του όζοντος στα μέσα της δεκαετίας του 1980 πάνω από την Ανταρκτική ήρθε να επιβεβαιώσει όλα τα παραπάνω. Η ατμόσφαιρα πάνω από τους πόλους είναι αρκετά περίπλοκη εξαιτίας της μεγάλης διάρκειας της μέρας και της νύχτας, αλλά και εξαιτίας των πολικών νεφών της στρατόσφαιρας και των πολικών στροβίλων. Παρόλα αυτά, οι ερευνητές κατόρθωσαν να συλλέξουν στοιχεία που αποδεικνύουν τον ρόλο του ClO στον κύκλο των αντιδράσεων καταστροφής του όζοντος της στρατόσφαιρας. Στο Σχήμα 7.6



Σχήμα 7.6 Μέτωπα των συγκεντρώσεων του στρατοσφαιρικού όζοντος και των ριζών ClO σε ένα ύψος 18 km πάνω από την Ανταρκτική (27 Σεπτεμβρίου 1987) [Anderson *et al.*, 1985].

παρουσιάζονται σε αντιπαράθεση τα μέτωπα (προφίλ) του όζοντος και του ClO, που μετρήθηκαν σε υψόμετρο 18 km στις 21 Σεπτεμβρίου 1987, από ένα αεροσκάφος που πέταξε από τη νότια Χιλή με κατεύθυνση προς το Νότιο Πόλο. Ένα μήνα πριν, τα επίπεδα του όζοντος ήταν ομοιόμορφα, περίπου στα 2ppmv.

Οι τρύπες του όζοντος θεωρούνται από πολλούς ως ο προάγγελος μιας επερχόμενης μόνιμης βλάβης της ατμόσφαιρας του πλανήτη μας. Μια τέτοια μόνιμη βλάβη, τουλάχιστον όσον αφορά τα επίπεδα της μέσης συγκεντρώσεως του όζοντος πάνω από το Νότιο Πόλο παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.7. Ερευνητές ανακάλυψαν την ύπαρξη και άλλης τρύπας του όζοντος πάνω από την αρκτική ζώνη του πλανήτη, η οποία ευτυχώς είναι λιγότερο έντονη. Πρόσφατες μετρήσεις δείχνουν σημαντική μείωση των επιπέδων του όζοντος πάνω και από τη βόρεια εύκρατη ζώνη της Γης.



Σχήμα 7.2 Σταθερά μειούμενη ποσότητα της μέσης ολικής στήλης όζοντος (ισοδύναμα της συγκέντρωσης) πάνω από το Νότιο Πόλο την τελευταία πεντηκονταετία. Πηγή στοιχείων: Πηγή: *U.S. Department of Commerce / National Oceanic & Atmospheric Administration / NOAA Research*, ιστότοπος: www.esrl.noaa.gov/.

Τα ανησυχητικά στοιχεία που συγκεντρώθηκαν για το φαινόμενο οδήγησαν σε περιστολή της παραγωγής των CFCs σε παγκόσμια κλίμακα με τη γνωστή δεσμευση της Παγκόσμιας Κοινότητας (Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ) να ελαχιστοποιήσει την χρήση τους. Όμως, ακόμη και να πάψουμε παντελώς σήμερα να εκπέμπουμε στην ατμόσφαιρα CFCs/HCFs, το καταστροφικό έργο αυτών των ρύπων θα παραμείνει εν δράσει για πολλά ακόμη χρόνια εξαιτίας της χημικής τους σταθερότητας (διάρκεια ζωής 65-110 χρόνια, βλέπετε Πίνακα 7.2). Εκτιμήσεις ερευνητών της NOAA δείχνουν ότι ακόμα και μετά από πλήρη εξάλειψη των ανθρωπογενών παραγόντων που καταστρέφουν το στρατοσφαιρικό όζον θα παρέλθουν περί τα 100 χρόνια για να επανακτήσει το στρώμα του στρατοσφαιρικού όζοντος το αρχικό του πάχος, θα το προσεγγίσει δε ικανοποιητικά μετά τα μέσα του αιώνα που διανύουμε.

Σημαντική έρευνα στη χώρα μας στον τομέα, η οποία περιλαμβάνει παρατήρηση των επιπέδων του όζοντος στην στρατόσφαιρα και εξιχνίαση των μηχανισμών και των αντιδράσεων που το καταστρέφουν διεξάγεται υπό την εποπτεία

του καθηγητή Χρήστου Ζερεφού [Zerefos, 1997]. Ο Χ. Ζερεφός και η ομάδα του, σε μια σειρά άρθρων στην διεθνή βιβλιογραφία [πχ Zerefos *et al.*, 1995, Harris, *et al.*, 1997, Zerefos, *et al.*, 1997], βοήθησαν σημαντικά στην κατανόηση των τάσεων και των παραμέτρων που διέπουν την ισορροπία του όζοντος στη στρατόσφαιρα. Τα τελευταία χρόνια μελετούν μεθοδικά τα φαινόμενα που σχετίζονται τόσο με το στρατοσφαιρικό, όσο και με το τροποσφαιρικό όζον, αλλά και το μηχανισμό δημιουργίας και εξέλιξης των αερολυμάτων (*aerosols*) στην ατμόσφαιρα.

Μια λίστα από τους πλέον συνηθισμένους (στη χρήση) χλωροφθοράνθρακες παρουσιάζεται στον Πίνακα 7.6. Στον Πίνακα παρουσιάζεται επίσης και το «δυναμικό ελάττωσης του όζοντος» (*Ozone Depletion Potential*, ODP) που εμφανίζουν αυτές οι ενώσεις. Ως δυναμικό ελάττωσης του όζοντος ορίζουμε «το λόγο της επίδρασης ενός χημικού είδους με το όζον, σε σύγκριση με την επίδραση που έχει μια ίση σε βάρος ποσότητα του CFC-11». Δηλαδή εξ ορισμού ο CFC-11 έχει ODP=1. Άλλοι χλωροφθοράνθρακες (CFCs) ή υδρογονοχλωροφθοράνθρακες (HCFCs) έχουν ODP μεταξύ 0,01 και 1, ενώ φθοράνθρακες που περιέχουν βρώμιο εμφανίζουν πολύ υψηλό δυναμικό ODP που φθάνει μέχρι και 10 (Πίνακας 7.6).

Πίνακας 7.6 CFCs και HCFCs ευρείας χρήσεως και τα δυναμικά ελάττωσης όζοντος (ODP) που εμφανίζουν.

Κωδικός ένωσης	Χημική ονοματολογία και τύπος	ODP	Χρόνος ζωής
CFC-11	Τριχλωροφθορομεθάνιο (CFCl_3)	1	50±5
CFC-12	Διχλωροφθορομεθάνιο (CF_2Cl_2)	1	102
Halon 1301	Βρωμοτριφθορομεθάνιο (CF_3Br)	10	65
Halon 2402	Διβρωμοτετραφθοροαιθάνιο (CF_3CFBr_2)	6	-
HCFC-22	Χλωροδιφθορομεθάνιο (CF_2HCl)	0,05	13,3
HCFC-123	2,2-διχλωρο-1,1,1-τριφθοροαιθάνιο ($\text{C}_2\text{F}_3\text{HCl}_2$)	0,02	1,4
HCFC-124	2-χλωρο-1,1,1,2-τετραφθοροαιθάνιο ($\text{C}_2\text{F}_4\text{HCl}$)	0,02	5,9
HCFC-141b	1,1-διχλωρο-1-φθοροαιθάνιο ($\text{C}_2\text{FH}_3\text{Cl}_2$)	0,1	9,4
HCFC-142b	1-χλωρο-1,1-διφθοροαιθάνιο ($\text{C}_2\text{F}_2\text{H}_3\text{Cl}$)	0,06	19,5

Οι CFCs αντιπροσωπεύουν μόνο μια τάξη χημικών ουσιών που ελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα και βλάπτουν το όζον της στρατόσφαιρας. Ένα άλλο χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η καταστροφική δράση του N_2O επί του στρατοσφαιρικού όζοντος. Το N_2O έχει μεγάλη διάρκεια ζωής (χρόνος ζωής 120 χρόνια) καταφέροντας έτσι και αυτό να φθάσει στο στρώμα της στρατόσφαιρας. Εκεί φωτοδιασπάται σε NO και κατόπιν μέσω των παρακάτω αντιδράσεων αρχίζει η καταστροφική του δράση:



με συνολικό αποτέλεσμα:



7.3 Ερωτήσεις, προβλήματα

1. Ως γνωστό, βλ. κύκλο εξισώσεων 7.6 έως 7.9, το όζον της στρατόσφαιρας βάλλεται από το ατομικό χλώριο (Cl) που παράγεται από τη φωτόλυση των CFCs/HCFCs. Θεώρησε τους CFCs/HCFCs με κωδικούς CFC-1, CFC-12 και CFC-114. Υπολόγισε την % κ.β. περιεκτικότητα Cl σε κάθε μία από τις ουσίες αυτές. Εάν κάθε ένας από αυτούς θα μπορούσε να αντικαταστήσει ισοβαρώς τον άλλον σε πρακτικές εφαρμογές κατά πόσο ποσοστό θα ελαττωνόταν η έκλυση του βλαβερού για το όζον Cl στην περίπτωση της καλύτερης, από αυτή την άποψη, ουσίας σε σχέση με τις άλλες;
2. Εάν η παγκοσμίως παραγόμενη ενέργεια από τη χρήση (καύση) στερεών καυσίμων είναι της τάξης των 300×10^{15} kJ/yr και υποθέσουμε ότι αυτή παράγεται από ένα υποθετικό μέσο υδρογονάνθρακα με χημικό τύπο C_2H_3 , να υπολογιστούν οι εκπομπές του CO_2 ανά έτος από αυτή τη δραστηριότητα. Εάν η ατμόσφαιρα του πλανήτη περιέχει χονδρικά 500 δισεκατομμύρια τόνους αέρα, πόσες περίπου μονάδες ppmv το ως άνω παραγόμενο CO_2 θα προσθέσει στην ατμόσφαιρα;
3. Ποια είναι τα κυριότερα αέρια θερμοκηπίου και ποια η ποσοστιαία συνεισφορά τους στο φαινόμενο;
4. Το CO δεν κατατάσσεται στα αέρια του θερμοκηπίου. Με ποιους όμως έμμεσους τρόπους συνεισφέρει και αυτό στην ενίσχυση του φαινομένου;
5. Δώστε τον ορισμό της απόδοσης θερμοκηπίου (Α.Θ.) ενός αερίου του θερμοκηπίου και αναφέρατε δύο αέρια με εξαιρετικά υψηλή τιμή Α.Θ.
6. Περιγράψτε το μηχανισμό λειτουργίας του φαινομένου του θερμοκηπίου και δώστε σχηματικά την εικόνα του μηχανισμού αυτού.
7. Έχει το O_3 κάποια ιδιαιτερότητα σε σχέση με την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας, γεγονός που το καθιστά τόσο ως «προστάτη» της Γης από την UV ακτινοβολία, αλλά από την άλλη ως αέριο του θερμοκηπίου με υψηλή μάλιστα απόδοση θερμοκηπίου;
8. Περιγράψτε το ρόλο των υδρατμών στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.
9. Ποιες είναι οι έμμεσες επιδράσεις του CH_4 και των CFCs ή HCFCs στο φαινόμενο του θερμοκηπίου;

10. Ποιών αερίων του θερμοκηπίου η δράση στο φαινόμενο προβλέπεται να μειωθεί ποσοστιαία το 2040 και ποιων να αυξηθεί;
11. Ποιες είναι οι προβλέψεις των σύγχρονων μαθηματικών μοντέλων για την αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη τα επόμενα ~100 χρόνια και ποιες είναι οι επιπτώσεις σε πλανητική κλίμακα που προβλέπεται ότι θα ακολουθήσουν;
12. Πέρασε ο πλανήτης μας από διακυμάνσεις της μέσης θερμοκρασίας του στο παρελθόν; Που οφείλονταν αυτές και πως «εκφράστηκαν» ως επικρατούσες κλιματικές συνθήκες ανά περίοδο; Ποια είναι η σημαντική διαφορά σε τέτοιες ιστορικές διακυμάνσεις της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη με αυτή που αναμένεται βάσει των προβλέψεων των μοντέλων και οφείλεται στην εκτεταμένη ρύπανση της ατμόσφαιρας και δη στην ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου;
13. Αναφέρατε εν συντομία μέτρα που πρέπει να ληφθούν για τη συγκράτηση της ενίσχυσης του φαινομένου του θερμοκηπίου. Ποιο/α από αυτά τα μέτρα βρίσκεται σε ικανοποιητικό δρόμο υλοποίησης από τη διεθνή κοινότητα και ποιο/α όχι;
14. Περιγράψτε το μηχανισμό (κύκλος αντιδράσεων) παρεμπόδισης της ηλιακής UV ακτινοβολίας από το στρατοσφαιρικό στρώμα όζοντος.
15. Περιγράψτε το μηχανισμό καταστροφής του στρατοσφαιρικού όζοντος από τους χλωροφθοράνθρακες. Ποιο είναι το δραστικό ενδιάμεσο σε αυτό το μηχανισμό που προκαλεί τη διάσπαση του O_3 ;
16. Εκτός των χλωροφθορανθράκων ποια άλλη ένωση ενοχοποιείται για την καταστροφή του στρατοσφαιρικού όζοντος και πως αυτή δρα;
17. Δώστε τον ορισμό του δυναμικού ελάττωσης του όζοντος (ODP). Ποιες ενώσεις εμφανίζουν $ODP > 1$;