

Ενεργειακό ισοζύγιο του πλανήτη και κλιματικές αλλαγές



του Δρ. Κωνσταντίνου Παυλάκη

1) Εισαγωγή

Η κύρια ενεργειακή πηγή για τον πλανήτη μας είναι ο ήλιος. Από αυτόν λαμβάνουμε ενέργεια με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (ΗΜ ακτινοβολία) με μήκη κύματος από 0.1 μm έως 5 μm και γι' αυτό την ονομάζουμε ηλιακή ή μικρού μήκους κύματος ΗΜ ακτινοβολία. Η απορρόφηση ηλιακής ενέργειας προκαλεί θέρμανση του συστήματος γη-ατμόσφαιρα. Για να εξισορροπήσει αυτή την εισαγωγή ενέργειας, η γη εκπέμπει και η ίδια ΗΜ ακτινοβολία στο υπέρυθρο δηλαδή σε μεγαλύτερα μήκη κύματος από 5 μm έως 100 μm. Αυτή την ονομάζουμε γήινη ή μεγάλου μήκους κύματος ΗΜ ακτινοβολία. Αν η εισερχόμενη ενέργεια είναι ίση με την εξερχόμενη, η γη διατηρεί σταθερή θερμοκρασία και σταθερές κλιματικές συνθήκες (εικ.1). Αν όμως διαταραχθεί αυτό το ισοζύγιο ενέργειας, παρατηρούνται κλιματικές αλλαγές.

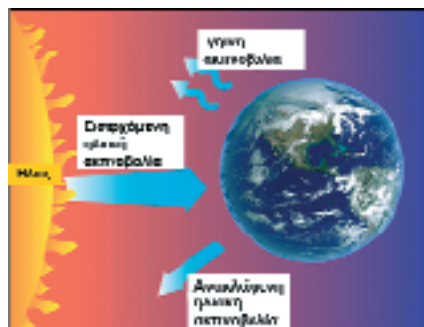
Το ενεργειακό ισοζύγιο στην κορυφή της ατμόσφαιρας ρυθμίζει το ενεργειακό περιεχόμενο του συστήματός, καταγράφεται συστηματικά από το 1978 (με κάποια χρονικά κενά) από δορυφόρους ενώ υπολογίζεται και από υπολογιστικά μοντέλα προσομοίωσης. Πολύ σημαντικό είναι και το ισοζύγιο ενέργειας στην επιφάνεια της γης το οποίο καθορίζει τη θερμοκρασία

επιφάνειας της γης, την κυκλοφορία της ατμόσφαιρας και των ωκεανών, καθώς και τον υδρολογικό κύκλο. Αυτό καταγράφεται από επίγειους σταθμούς οι οποίοι όμως στην στεριά είναι αραιά και ανομοιογενώς τοποθετημένοι, ενώ στους ωκεανούς είναι ελάχιστα. Έτσι το ισοζύγιο ενέργειας ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης υπολογίζεται κυρίως με χρήση μοντέλων προσομοίωσης (Vardavas and Taylor 2007).

2) Ενεργειακό ισοζύγιο του πλανήτη

As ξεκινήσουμε όμως βλέποντας αναλυτικότερα τη ροή και την ανακατανομή της ενέργειας στο σύστημα γης-ατμόσφαιρας (εικ. 2) με σκοπό να καταλάβουμε πως την επηρεάζουν διάφοροι παράγοντες όπως η σύσταση της ατμόσφαιρας, τα νέφη, και τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας της γης, καθώς και την τελική επίδραση που οι παράγοντες αυτοί έχουν στη διαμόρφωση του κλίματος της γης.

Το ενεργειακό ισοζύγιο στην κορυφή της ατμόσφαιρας (εικ. 2), αποτελείται από την εισερχόμενη και την ανακλώμενη ηλιακή ροή ΗΜ ακτινοβολίας (βέλη ροής στην αριστερά πλευρά της εικ. 2), καθώς και την γήινη ροή ΗΜ ακτινοβολίας που διαφεύγει στο διάστημα (βέλη ροής στην δεξιά πλευρά της εικ. 2). Η μέση ημερήσια ηλιακή ροή ακτινοβολίας που φτάνει στην κορυφή

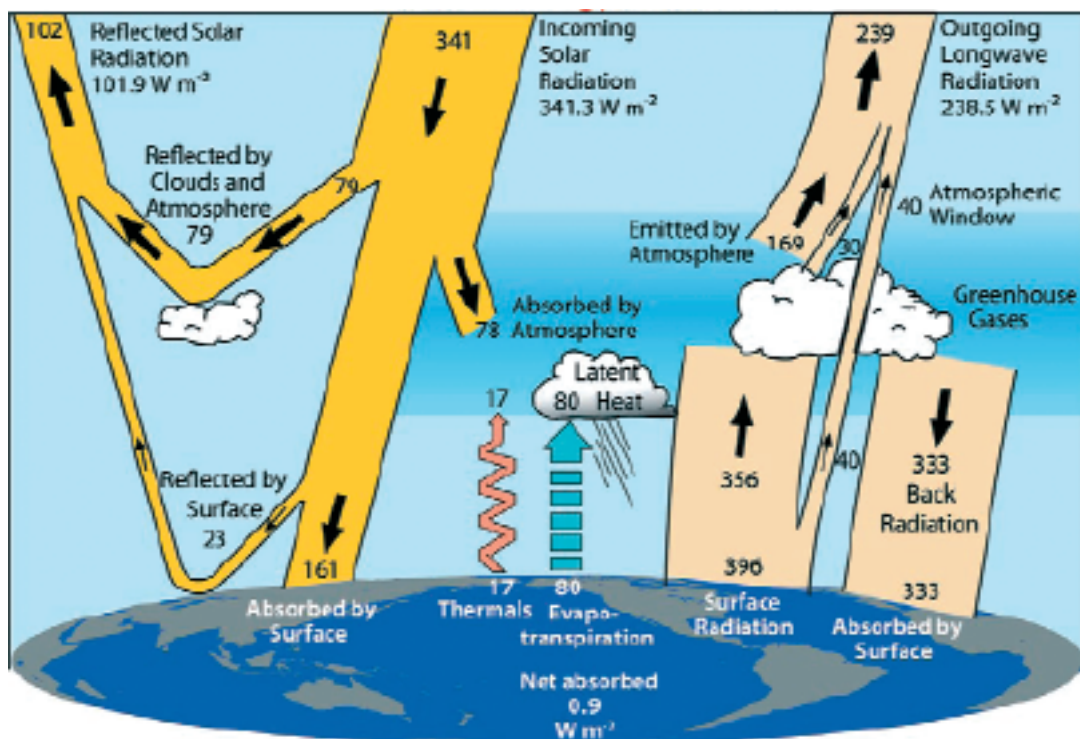


Εικ. 1 (από NASA)

της ατμόσφαιρας είναι 341 W m^{-2} . Από αυτή ένα 30% (102 W m^{-2}) ανακλάται άμεσα πίσω στο διάστημα από τα μόρια της ατμόσφαιρας, τα σύννεφα και την επιφάνεια του εδάφους. Από την υπόλοιπη περίπου το 1/3 απορροφάται στην ατμόσφαιρα (78 W m^{-2}) και τα 2/3 φτάνουν στην επιφάνεια (161 W m^{-2}) της γης την οποία και θερμαίνουν (Trenberth, Fasullo και Kiehl 2009).

Η επιφάνεια της γης επιστρέφει ένα με-

το όζον, το μεθάνιο, και το οξείδιο του αζώτου) που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα της γης, την οποία και θερμαίνουν. Η ατμόσφαιρα με τη σειρά της επανεκπέμπει υπέρυθη ακτινοβολία προς την επιφάνεια της γης και προς το διάστημα. Αυτή η παγίδευση γήινης ακτινοβολίας (θερμότητας) στην ατμόσφαιρα (η οποία διαφορετικά θα διέφευγε άμεσα προς το διάστημα), προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας του συστή-



Εικ.2: Καταμερισμός του ενεργειακού ισοζυγίου της γης (Trenberth, Fasullo και Kiehl 2009)

γάλο μέρος αυτής της θερμότητας στην ατμόσφαιρα με την μορφή μεγάλου μήκους κύματος ΗΜ ακτινοβολίας (υπέρυθη ακτινοβολία, δηλαδή θερμότητα). Από τα 396 W m^{-2} που εκπέμπει η επιφάνεια της γης μόνο το 60% (239 W m^{-2}) διαφεύγει στο διάστημα. Η υπόλοιπη ενέργεια απορροφάται από τα νέφη και τα αέρια θερμοκηπίου (κυρίως ο υδρατμός, κατά δεύτερο λόγο το διοξείδιο του άνθρακα και ακόμη

ματος, και δημιουργεί αυτό που ονομάζεται φυσικό φαινόμενο θερμοκηπίου. Το φαινόμενο αυτό είναι ουσιώδες για τη διατήρηση κατάλληλων συνθηκών ζωής στον πλανήτη. Αν με κάποιο τρόπο από την ατμόσφαιρα της γης αφαιρούσαμε τα σύννεφα και τα αέρια θερμοκηπίου, και αφήναμε το 99% των συστατικών της ατμόσφαιρας, (οξυγόνο και άζωτο) η μέση θερμοκρασία του πλανήτη θα ήταν $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ αντί για $15 \text{ }^\circ\text{C}$

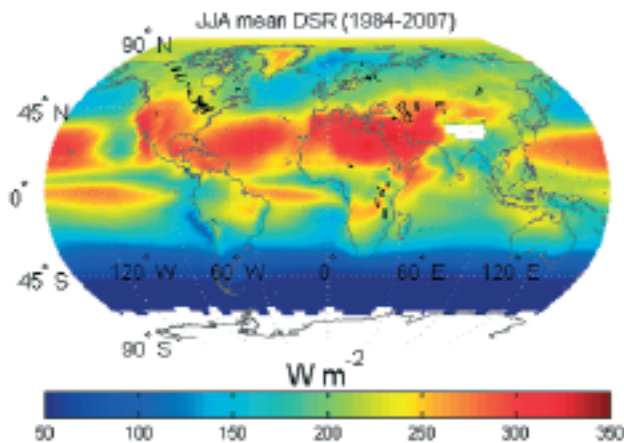
που είναι σήμερα. Ο πλανήτης δηλαδή θα ήταν μια χιονόμπαλα με δυσμενείς συνθήκες διατήρησης της ζωής.

Εκτός από τα αέρια θερμοκηπίου που όπως είδαμε επηρεάζουν τη ροή γήινης ΗΜ ακτινοβολίας, στην ατμόσφαιρα σχηματίζονται και **τα νέφη τα οποία παρεμβάλλονται τόσο στη ροή της ηλιακής όσο και της γήινης ΗΜ ακτινοβολίας**. Επηρεάζουν σημαντικά το ισοζύγιο ενέργειας αφού καλύπτουν κατά μέσο όρο 60% της επιφάνειας της γης. Κατά πρώτο λόγο ανακλούν ηλιακή ακτινοβολία, οπότε μειώνουν τη συνολική ενέργεια που εισέρχεται

σφαιρα, και από το πάχος του. Γενικά τα χαμηλά (λιγότερο από 2-3 Km από την επιφάνεια της γης) πυκνά νέφη λειτουργούν περισσότερο ως ανακλαστές ηλιακής ακτινοβολίας οπότε ψύχουν το σύστημα γης-ατμόσφαιρας ενώ τα ψηλά (πάνω από 5 Km από την επιφάνεια της γης) λεπτά νέφη λειτουργούν περισσότερο ως παγίδες θερμικής ενέργειας και συνεισφέρουν στην θέρμανση του πλανήτη.

Η τρίτη συνιστώσα που επηρεάζει σημαντικά το ισοζύγιο ενέργειας του πλανήτη, είναι τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας της γης. Διαφορετικές περιοχές της γης ανα-

κλούν με διαφορετικό τρόπο την ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει μέχρι την επιφάνεια. Για παράδειγμα η επιφάνεια του ωκεανού ή η επιφάνεια της γης που καλύπτεται από δάση έχει μικρή ανακλαστικότητα το οποίο σημαίνει ότι ανακλά ένα μικρό μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει σε αυτήν ενώ απορροφά το μεγαλύτερο μέρος και θερμαίνεται. Αντίθετα οι έρημοι και οι επιφάνειες οι καλυμμένες από πάγο ή χιόνι έχουν μεγάλη ανακλαστικότητα και στέλνουν



Εικ. 3 : Μέση τιμή ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια του πλανήτη κατά τους μήνες Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο

στο σύστημα γης-ατμόσφαιρας. Τα νέφη επιπρόσθετα, όπως και τα αέρια θερμοκηπίου, απορροφούν και επανεκπέμπουν υπέρυθρη ακτινοβολία που λαμβάνουν από την επιφάνεια της γης συνεπώς τελικά παγιδεύουν ενέργεια στο σύστημα γης ατμόσφαιρας. Το πιο φαινόμενο υπερισχύει εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες όπως από το μέγεθος και τη συγκέντρωση των σταγονιδίων που σχηματίζουν το νέφος, από τον αν το νέφος αποτελείται από υγρά σταγονίδια ή παγοκρυστάλλους, από τη θερμοκρασία του συνεπώς από το ύψος στο οποίο βρίσκεται στην ατμό-

πίσω στο διάστημα το μεγαλύτερο ποσοστό της ηλιακής ενέργειας που φτάνει σ'αυτές.

Σαν ένα παράδειγμα του πως διαμορφώνεται η ροή ηλιακής ακτινοβολίας από μερικούς από τους παραπάνω παράγοντες ας δούμε την μέση τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης κατά τους καλοκαιρινούς για το βόρειο ημισφαίριο μήνες (Ιούνιο, Ιούλιο Αύγουστο) όπως αυτή υπολογίζεται από ένα υπολογιστικό μοντέλο που χρησιμοποιώ στον τομέα Φυσικής του Γενικού τμήματος της ΣΤΕΦ. Όπως φαίνεται στην εικ. 3, η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης

προσδιορίζεται κατά το γεωγραφικό πλάτος, κυρίως από την εισερχόμενη ακτινοβολία στην κορυφή της ατμόσφαιρας. Παρατηρούμε λοιπόν μικρότερες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας στο νότιο ημισφαίριο όπου επικρατεί χειμώνας σε σχέση με το βόρειο ημισφαίριο. Η διαφοροποίηση που παρατηρείται στις τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας κατά το γεωγραφικό μήκος οφείλεται κυρίως στην ύπαρξη των νεφών (Hatzianastasiou, N. et al. 2005). Έτσι για παράδειγμα βλέπουμε μικρές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας περίπου $150-200 \text{ Wm}^{-2}$ στη νοτιανατολική Ασία (Ινδία, Ταϊλάνδη) όπου υπάρχει μεγάλη νεφοκάλυψη $\sim 80\%$ (περίοδος μουσώνων) και μεγάλες τιμές $300-340 \text{ Wm}^{-2}$ στις Αραβικές χώρες όπου δεν έχουμε σύννεφα. Παρατηρήστε ακόμη τιμές $\sim 340 \text{ Wm}^{-2}$ στην περιοχή της Κρήτης που όπως φαίνεται στην εικ.3 είναι από τις περιοχές στον πλανήτη που δέχονται τα μεγαλύτερα ποσά ηλιακής ακτινοβολίας την περίοδο του καλοκαιριού.

4) Ανθρωπογενείς παρεμβάσεις στο ισοζύγιο ενέργειας

Άμεσα ή έμμεσα, οι ανθρώπινες δραστηριότητες επιφέρουν σημαντικές αλλαγές και στις τρεις συνιστώσες του συστήματος γης-ατμόσφαιρας που επηρεάζουν το ενεργειακό ισοζύγιο δηλαδή στη σύσταση της ατμόσφαιρας, στα νέφη, και τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας της γης.

4α) Αέρια θερμοκηπίου

Ας ξεκινήσουμε από τα αέρια θερμοκηπίου που εκλύονται ως συνέπεια ανθρωπίνων δραστηριοτήτων. Αυτά επηρεάζουν τη ροή γήινης ακτινοβολίας, αυξάνοντας την παγίδευση θερμότητας στην ατμόσφαιρα, με αποτέλεσμα να ενισχύουν το φυσικό φαινόμενο θερμοκηπίου. Τα πιο σημαντικά είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το μεθάνιο (CH_4), το οξείδιο του αζώτου (N_2O), το όζον (O_3), και οι αλογονάνθρακες.

Από το 1950 το διοξείδιο του άνθρακα

στην ατμόσφαιρα αυξήθηκε κατά 20%. Σήμερα σε κάθε εκατομμύριο μόρια αέρα τα 370 είναι μόρια CO_2 . Ποτέ στα τελευταία 400 χιλιάδες χρόνια πριν την βιομηχανική επανάσταση, η συγκέντρωση CO_2 δεν είχε ξεπεράσει τα 280 μόρια στο εκατομμύριο. Ο μεγάλος ρυθμός αύξησης, δεν αφήνει καμιά αμφιβολία για την ανθρωπίνη συνεισφορά σε αυτό. Μάλιστα υπολογίζεται πως μέσα στα επόμενα 100 χρόνια, η τιμή συγκέντρωσης CO_2 θα είναι διπλάσια της τιμής της προ της βιομηχανικής επανάστασης. Κύριες πηγές της αύξησης αυτής είναι η χρήση ορυκτών καυσίμων, το κάπνισμα βιόμαζας και η καταστροφή των δασών. Στα μέσα της δεκαετίας του 70 έγινε αντιληπτό πως το CO_2 δεν ήταν το μόνο μόριο που συνεισέφερε σημαντικά στο φαινόμενο θερμοκηπίου. Για παράδειγμα βρέθηκε ότι η προσθήκη ενός μορίου χλωριοφθοράνθρακα στην ατμόσφαιρα ήταν ισοδύναμο με δέκα χιλιάδες μόρια CO_2 . Μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 80 μελετήθηκε ένας μεγάλος αριθμός μορίων που συνεισφέρουν στο φαινόμενο θερμοκηπίου. Το μεθάνιο (CH_4), με συγκέντρωση σήμερα 1,8 μόρια σε κάθε εκατομμύριο μόρια αέρα, έχει διπλασιαστεί συγκρινόμενο με την προ βιομηχανικής επανάστασης εποχή και συνεισφέρει σημαντικά στην ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου, μια που το μόριό του είναι οκτώ φορές πιο ενεργό (ικανό στην απορρόφηση υπέρυθρης ακτινοβολίας) από εκείνο του CO_2 . Το N_2O έχει αυξηθεί κατά 16% περίπου μετά το 1850 κυρίως λόγω της αύξησης χρήσης λιπασμάτων. Το όζον στην τροπόσφαιρα και οι αλογονάνθρακες απορροφούν υπέρυθρη ακτινοβολία, (παγιδεύουν θερμότητα) σε μήκη κύματος στην περιοχή που είναι γνωστή ως ατμοσφαιρικό παράθυρο στο υπέρυθρο, απ' όπου η γη μπορούσε να διώξει θερμότητα ανεμπόδιστα. Έτσι σήμερα υπολογίζεται ότι ένα 40% του φαινομένου θερμοκηπίου οφείλεται σε αέρια διαφορετικά από το CO_2 .

4β) Αερολύματα

Τα μικρά στερεά σωματίδια ($0.1 \mu\text{m}$ -

10 μ m) που αιωρούνται στον αέρα (αερολύματα) επηρεάζουν επίσης σημαντικά το κλίμα. Μπορεί να είναι είτε φυσικής προέλευσης (σκόνη από την επιφάνεια της γης, άλατα από τους ωκεανούς ή σωματίδια που εκλύονται κατά τις ηφαιστειακές εκρήξεις), είτε ανθρωπογενούς προέλευσης (μόλυνση του αέρα από βιομηχανικές εκπομπές). Αυτό που δεν είχε γίνει αντιληπτό μέχρι την τελευταία δεκαετία ήταν πόσο και με ποιο τρόπο επηρέαζαν το κλίμα. Πολλές ερευνητικές προσπάθειες μέχρι και σήμερα γίνονται για να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση των αερολυμάτων στην κλιματική αλλαγή και υπάρχει ακόμη αρκετή αβεβαιότητα στον υπολογισμό της αλλαγής που προκαλούν στο ενεργειακό ισοζύγιο.

Μέχρι το 2000 η μόλυνση του αέρα αντιμετωπιζόταν σαν ένα τοπικό πρόβλημα με συνέπειες σε θέματα υγείας. Αλλά τελευταία δεδομένα έχουν δείξει ότι μικροσωματίδια στον αέρα μεταφέρονται από ήπειρο σε ήπειρο και παίζουν σημαντικό ρόλο στην αλλαγή του κλίματος τόσο σε τοπικό επίπεδο όσο και σε ολόκληρη τη γη (Houghton 2009). Τα αερολύματα επηρεάζουν άμεσα τη ροή ηλιακής ακτινοβολίας καθώς την σκεδάζουν κι έτσι προκαλούν ψύξη του συστήματος γης-ατμόσφαιρας. Από την άλλη αερολύματα που περιέχουν άνθρακα (καπνιά, αιθάλη) απορροφούν ηλιακή ακτινοβολία αυξάνοντας την θερμοκρασία της ατμόσφαιρας κάτι που οδηγεί και σε αλλαγές στην κυκλοφορία της ατμόσφαιρας. Όμως υπάρχει και έμμεσος επηρεασμός του κλίματος από τα αερολύματα. Αυτά λειτουργούν ως πυρήνες συμπύκνωσης για το σχηματισμό σταγονιδίων νερού οπότε επηρεάζουν το σχηματισμό των νεφών. Η έρευνα την τελευταία δεκαετία έχει δείξει ότι η ύπαρξη μεγάλης συγκέντρωσης αερολυμάτων προκαλεί την παραγωγή νεφών με μεγάλο αριθμό σταγονιδίων που έχουν μικρότερο μέγεθος από αυτό που θα είχαν χωρίς την ύπαρξη της αυξημένης συγκέντρωσης αερολυμά-

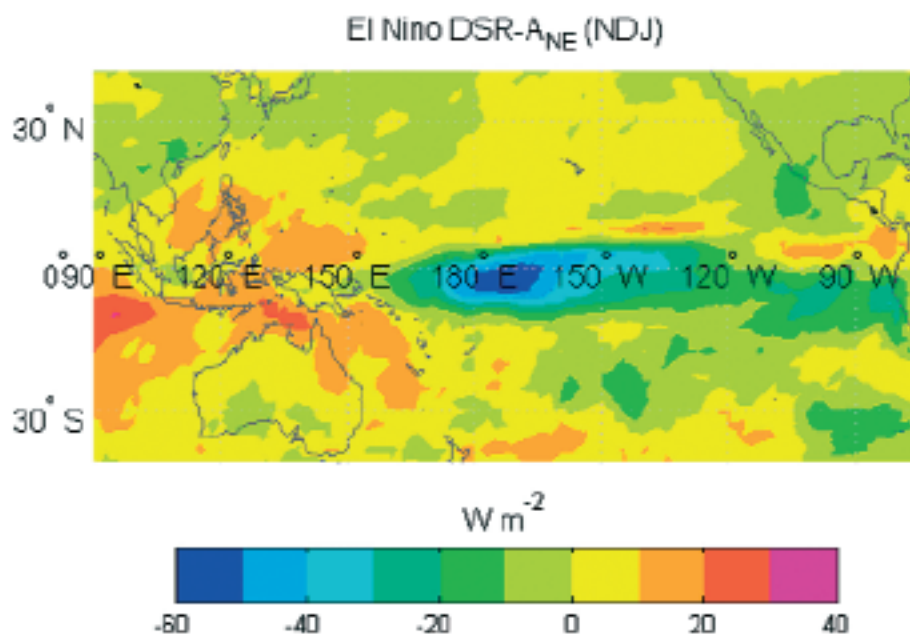
των. Τα νέφη αυτά έχουν μεγαλύτερη ανακλαστικότητα με συνέπεια λιγότερη ενέργεια να εισέρχεται στο σύστημα γης-ατμόσφαιρας (άρα έχουμε μεγαλύτερη ψύξη του πλανήτη). Ακόμη η συγκέντρωση και οι διαστάσεις των αερολυμάτων που υπάρχουν κατά τη διάρκεια του σχηματισμού ενός νέφους, επηρεάζουν την έκταση που καταλαμβάνει το νέφος, το χρόνο ζωής του, αλλά και την ικανότητά του να δώσει σημαντική βροχόπτωση, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την έντονη ξηρασία σε πολλές περιοχές του πλανήτη (Ramanathan and Feng 2009).

5) Κλιματική αλλαγή

Τίθεται τώρα το ερώτημα: Ο επηρεασμός των ρών ακτινοβολίας από ανθρωπογενείς παράγοντες οδηγεί σε κλιματική αλλαγή; Οι μετρήσεις δείχνουν μια αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη κατά 1°C από τη βιομηχανική επανάσταση και έπειτα με το ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας συνεχώς να μεγαλώνει (διακυβερνητική διάσκεψη για την πλανητική αλλαγή). Οφείλεται αυτή η αύξηση της θερμοκρασίας στις ανθρώπινες δραστηριότητες είναι το ερώτημα που τίθεται από μερικούς σκεπτικιστές. Αυτό που δεν αμφισβητείται (νόμος της φυσικής) είναι πως η αύξηση των αερίων θερμοκηπίου λόγω ανθρώπινων δραστηριοτήτων προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας του συστήματος. Η μέχρι σήμερα προσθήκη αερίων θερμοκηπίου έχει αυξήσει την παγίδευση γήινης ακτινοβολίας κατά 2.5 Wm⁻². Αυτή η αύξηση αν υποθέσουμε ότι καμιά άλλη αλλαγή δεν συμβαίνει στον πλανήτη οδηγεί σε μέση αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη περίπου 0.5 °C. Όμως εδώ μπαίνει το φαινόμενο της ανατροφοδότησης (feedback) θετικής ή αρνητικής του συστήματος που προκαλεί και τις μεγάλες αβεβαιότητες στα μοντέλα υπολογισμού της κλιματικής αλλαγής. Ανατροφοδότηση σημαίνει ότι αλλαγή ενός παράγοντα που προκαλεί κλιματική αλλαγή επηρεάζει και άλλους παράγοντες που και αυτοί συνεισφέρουν

στην κλιματική αλλαγή. Τι σημαίνει αυτό; Για να συνεχίσουμε το παραπάνω παράδειγμα η αύξηση των αερίων θερμοκηπίου από ανθρώπινες δραστηριότητες είδαμε ότι οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη. Αυτή η αύξηση της θερμοκρασίας συνεπάγεται και μεγαλύτερη εξάτμιση του νερού των ωκεανών. Άρα περισσότερος υδρατμός στην ατμόσφαιρα ο οποίος επίσης συνεισφέρει στο φαινόμενο θερμοκηπίου. Αν λάβουμε λοιπόν υπόψη και τον υδρατμό, η αύξηση της θερμοκρασίας του

προκαλεί λιώσιμο των πάγων της Ανταρκτικής και της Αρκτικής. Αλλά μείωση της παγοκάλυψης σημαίνει μικρότερη ανακλαστικότητα του εδάφους άρα αύξηση της ενέργειας του πλανητικού συστήματος και συνεπώς ακόμη μεγαλύτερη αύξηση της θερμοκρασίας. Μάλιστα η μείωση της παγοκάλυψης συνεισφέρει αρκετά στην κλιματική αλλαγή όπως δείχνουμε σε μια πρόσφατη εργασία μας (Matsoukas et. al. 2010). Εκεί υπολογίσαμε ότι η εξαφάνιση των πάγων από την Αρκτική μόνο (η έκταση



Εικ. 4 : Διαφορές στην ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης μεταξύ ουδέτερων χρονικών περιόδων και περιόδων που επικρατεί El Niño

πλανήτη αντί $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ γίνεται 1°C . Όμως ούτε η αύξηση της πλανητικής θερμοκρασίας ούτε η αύξηση του υδρατμού στην ατμόσφαιρα είναι ομοιόμορφη. Η διαφορετική αύξηση από περιοχή σε περιοχή προκαλεί αλλαγές στην κυκλοφορία της ατμόσφαιρας, άρα και στο ποσό του νερού που εξατμίζεται αλλά και στη νεφοκάλυψη της κάθε περιοχής, συνεπώς οδηγεί σε περαιτέρω κλιματικές αλλαγές. Επίσης η αύξηση της πλανητικής θερμοκρασίας

των πάγων στην Ανταρκτική είναι ακόμη μεγαλύτερη), οδηγεί σε αύξηση 0.55 Wm^{-2} της ενέργειας του πλανητικού συστήματος. Η τιμή αυτή είναι 4.5 φορές περίπου μικρότερη της αντίστοιχης αύξησης λόγω αερίων θερμοκηπίου από τη έναρξη της βιομηχανικής εποχής μέχρι σήμερα. Βλέπουμε λοιπόν ότι ο υπολογισμός της ακριβούς μεταβολής της θερμοκρασίας της γης απαιτεί πολύπλοκα μοντέλα μια που πολλές παράμετροι αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και αρκετή

προσπάθεια χρειάζεται ακόμη για να καταλάβουμε τους μηχανισμούς αλληλεπίδρασης. Πάντως το σίγουρο είναι ότι όλα τα μοντέλα προβλέπουν αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη και ως μιν συμφωνούν στην τιμή.

Ερευνητικές προσπάθειες για την καλύτερη κατανόηση των ανατροφοδοτήσεων γίνεται μελετώντας φυσικές κλιματικές αλλαγές όπως είναι το El Niño. Στην περίπτωση αυτή έχουμε ένα φυσικό πείραμα κατά το οποίο μεταβάλλονται αρκετές παράμετροι του συστήματος όπως η θερμοκρασία επιφάνειας της θάλασσας, ο ρυθμός εξάτμισης του νερού από την επιφάνεια της θάλασσας, η διεύθυνση και η ένταση των ανέμων και η νεφοκάλυψη. Έτσι μελετώντας το ενεργειακό ισοζύγιο στην περιοχή όπου επικρατεί το φαινόμενο, μπορούμε να ψάξουμε πως μεταβολές σε κάποιες παραμέτρους του συστήματος μπορούν να επηρεάσουν κάποιες άλλες. Το El Niño είναι μια φυσική κλιματική αλλαγή που εκτείνεται σε μια μεγάλη περιοχή του τροπικού και υποτροπικού Ειρηνικού ωκεανού και επαναλαμβάνεται κάθε πέντε έως επτά χρόνια. Κατά τη διάρκειά του παρατηρούνται σημαντικές αλλαγές στο ισοζύγιο ενέργειας στην επιφάνεια της γης. Μεταβολές στην ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια του ωκεανού περίπου 60 Wm^{-2} είναι αρκετά συνηθισμένες όπως φαίνεται στην εικ. 4 που μας δείχνει την αλλαγή στην ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης κατά τη διάρκεια ενός El Niño όταν αυτό βρίσκεται στην αποκορύφωσή του σε σχέση με αυτήν που φτάνει όταν επικρατούν κανονικές συνθήκες (Pavlakis et al. 2008).

Στον τομέα Φυσικής του γενικού τμήματος της σχολής ΣΤΕΦ του ΤΕΙ Κρήτης χρησιμοποιώ ένα υπολογιστικό μοντέλο διάδοσης ΗΜ ακτινοβολίας που αναπτύχθηκε στο ινστιτούτο έρευνας και τεχνολογίας (ΙΤΕ) βασισμένο σε ένα αρχικό μοντέλο

διάδοσης και κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας (Vardavas and Carver 1984). Αυτό το μοντέλο έχει χρησιμοποιηθεί σε ένα ευρύ φάσμα μελετών κλιματικής αλλαγής τόσο σε παγκόσμια κλίμακα όσο και σε τοπικό επίπεδο και έχουν γραφτεί ερευνητικές εργασίες στα πλαίσια συνεργασιών με μεγάλο αριθμό ερευνητών τόσο στην Ελλάδα όσο και στο εξωτερικό.

Πιο συγκεκριμένα έχουν δημοσιευθεί ερευνητικές εργασίες στους παρακάτω τομείς:

- 1) **Στον υπολογισμό του ενεργειακού ισοζυγίου και των μεταβολών του στην επιφάνεια της γης και στην κορυφή της ατμόσφαιρας.** Μάλιστα αυτή τη στιγμή έχει φτιαχτεί μια βάση δεδομένων ενεργειακού ισοζυγίου που καλύπτει χρονική περίοδο 25 ετών για ολόκληρο τον πλανήτη με χωρική ανάλυση $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ (γεωγραφικό πλάτος x γεωγραφικό μήκος). Χρησιμοποιείται για να μελετηθούν τόσο φυσικοί όσο και ανθρωπογενείς παράγοντες που προκαλούν μεταβολές στο ισοζύγιο ενέργειας και επομένως κλιματικές αλλαγές, και πώς αυτοί αλληλεπιδρούν μεταξύ τους.
- 2) **Στη μελέτη ενεργειακών μεταβολών σε τοπικό επίπεδο** όπως ο «υπολογισμός του ηλιακού δυναμικού στον ελληναδικό χώρο» ή το «ενεργειακό ισοζύγιο στο χώρο της Μεσογείου», για διερεύνηση τοπικών κλιματικών αλλαγών όπως η ερημοποίηση που παρατηρείται στις χώρες της Μεσογείου.
- 3) **Στη μελέτη φυσικών κλιματικών αλλαγών με διάρκεια μερικών ετών** (El Nino, La Nina, ταλάντωση βόρειου Ατλαντικού) που έχουν επιπτώσεις και στη χώρα μας με εναλλαγές περιόδων ξηρασίας και βροχοπτώσεων.

Οι ερευνητικές προσπάθειες έγιναν και γίνονται σε συνεργασία με ερευνητές από το πανεπιστήμιο Κρήτης, το ΙΤΕ, τα πανεπιστή-

για Ιωαννίνων και Αιγαίου καθώς και με ερευνητές από καταξιωμένα ιδρύματα του εξωτερικού όπως το ΕΤΗ στην Ελβετία και το NASA Langley στην Αμερική.

Βιβλιογραφία:

- Hatzianastassiou, N., Fotiadi, A., Matsoukas, C., Drakakis, E., Pavlakis, K. G., Hatzidimitriou, D. and Vardavas, I. Global distribution of earth's surface short-wave radiation budget. Atmos. Chem. Phys., 5, 2847–2867
- Houghton, J. T., Global warming (the complete briefing) Cambridge University Press (2009)
- Matsoukas, N. Hatzianastassiou, A. Fotiadi, K. G. Pavlakis, I. Vardavas, "The effect of Arctic sea-ice extend on the absorbed (net) solar flux at the surface, based on ISCCP-D2 cloud data for 1983-2007" Atmos Chem Phys 10, 777-787
- Pavlakis, K. G., Hatzianastassiou, N., Matsoukas, C., Fotiadi, A. Vardavas, I. " ENSO surface shortwave radiation forcing over the tropical Pacific" Atmos Chem Phys 8, 5565-5577 (2008)
- Ramanathan, V., Feng, Y., Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives, Atmospheric Environment 43, 37-50 (2009)
- Trenberth, K. E., Fasullo, J. T., Kiehl, J., Earth's global energy budget. Bull. Amer. Meteor. Soc., 90, 311-323 (2009)
- Vardavas, I. M., and Taylor, F. W.: Radiation and Climate, International Series of Monographs on Physics, No. 138, Oxford University Press, Oxford, 1–512,

2007.

- Vardavas, I. and Carver, J. H.: Solar and terrestrial parameterizations for radiative convective models, Planet. Space Sci., 32, 1307–1325, 1984.

Δρ. Παυλάκης Κωνσταντίνος,
Εργαστηριακός συνεργάτης στον
τομέα Φυσικής του Γενικού Τμήματος
Θετικών Επιστημών (ΓΤΘΕ).