

Η όξινη βροχή

Η όξινη βροχή είναι ένα από τα μεγαλύτερα περιβαλλοντικά προβλήματα της εποχής μας. Με τον όρο «όξινη βροχή» εννοούμε τη βροχή με pH (**ενεργό οξύτητα**) χαμηλότερο του φυσιολογικού. Η βροχή, στη φυσική της κατάσταση, είναι ελαφρά όξινη με pH μεταξύ 5.0 και 5.6 και αυτό οφείλεται κυρίως στο διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) της ατμόσφαιρας, το οποίο διαλύεται στο νερό της βροχής και σχηματίζει το ανθρακικό οξύ και, σε μικρότερη έκταση, στην ύπαρξη χλωρίου στην ατμόσφαιρα, το οποίο προέρχεται από τη θάλασσα. Τις τελευταίες δεκαετίες όμως, η βροχή γίνεται όλο και περισσότερο όξινη και το pH της κυμαίνεται από 3,5 έως 4,5. Βροχή με pH 4,6 είναι 10 φορές πιο όξινη από βροχή με pH 5,6. Η αυξημένη οξύτητα οφείλεται συνήθως σε νιτρικά και θειικά οξέα τα οποία συνήθως προέρχονται από ανθρωπογενείς πηγές. Τον όρο χρησιμοποίησε για πρώτη φορά το 1852, ο Άγγλος χημικός, Robert Angus Smith, για να περιγράψει τον όξινο χαρακτήρα των βροχοπτώσεων σε σχέση με τη ρυπασμένη ατμόσφαιρα του Λονδίνου από τις εκπομπές των εργοστασίων που έκαιγαν κάρβουνο. Το 1982, σε ειδική συνδιάσκεψη των Ηνωμένων Εθνών, η όξινη βροχή αναγνωρίστηκε ως ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα διασυννοριακής ρύπανσης.

6.1. Σχηματισμός της όξινης βροχής

Η κυριότερη αιτία σχηματισμού της όξινης βροχής είναι η καύση των ορυκτών καυσίμων. Η βιομηχανία και οι θερμοηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας, χρησιμοποιούν άνθρακα και πετρέλαιο, για να καλύψουν τις ανάγκες μας σε ενέργεια. Οι ιδιώτες χρησιμοποιούν πετρέλαιο, άνθρακα, ξύλα ή φυσικό αέριο για τη θέρμανση των σπιτιών. Αυτοκίνητα, τρένα, αεροπλάνα και πλοία χρησιμοποιούν **βενζίνη** και άλλα **ορυκτά καύσιμα**. Σε μικρότερο βαθμό συμβάλλουν και φυσικά αίτια, όπως οι πυρκαγιές, οι εκρήξεις των ηφαιστειών, που εκπέμπουν διοξείδιο του θείου (SO₂) στην ατμόσφαιρα, αλλά και το πλαγκτόν από το οποίο απελευθερώνονται ποσότητες θειούχας ένωσης (διμεθυλοσουλφίδιου) που στην ατμόσφαιρα διασπάται φωτοχημικά και τελικά οξειδώνεται σε SO₂. Οι κύριοι **ρύποι** που δημιουργούν την όξινη βροχή είναι το **διοξείδιο του θείου** και τα **οξείδια του αζώτου**. Ανεβαίνοντας, λοιπόν, οι ρύποι στην ατμόσφαιρα αντιδρούν με τους υδρατμούς της και το νερό της βροχής, και σχηματίζουν αντίστοιχα οξέα, όπως θειικό και νιτρικό. Αυτά τα οξέα μετατρέπουν τη βροχή σε όξινη. Εκτός από το νερό της βροχής επηρεάζονται από τους ρύπους, το χιόνι, η ομίχλη και το χαλάζι, τα οποία όταν πέφτουν στη γη, ρυπαίνουν το έδαφος και τα νερά και επιφέρουν σημαντικές μεταβολές στα οικοσυστήματα. Μελέτες από τα μέσα της δεκαετίας του '80 οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι μεγάλες συγκεντρώσεις ρύπων που συντελούν στη δημιουργία της όξινης βροχής μεταφέρονται μέσω των αερίων μαζών σε μεγάλες αποστάσεις, μακριά από τον τόπο παραγωγής τους.

Η πιθανότητα να δεχθεί μια περιοχή όξινη βροχή εξαρτάται κυρίως από την προέλευση και την τροχιά των αερίων μαζών που προκαλούν τις βροχές. Τα ρεύματα αέρα που επικρατούν σε ύψη όπου εκπέμπονται τα οξείδια (300-500 μέτρων), βοηθούν στη μεταφορά τους σε απόσταση έως και χίλια χιλιόμετρα μακριά από τον τόπο παραγωγής τους. Περιοχές που αντιμετωπίζουν έντονα προβλήματα από την όξινη βροχή, χωρίς οι ίδιες να έχουν σημαντικές εκπομπές οξειδίων θείου και αζώτου, είναι οι σκανδιναβικές χώρες και ο Καναδάς που γίνονται αποδέκτες της οξύτητας

που σχηματίζεται από εκπομπές χωρών της κεντροδυτικής Ευρώπης και των βορειοανατολικών Η.Π.Α. Στην Ευρώπη, η Μ. Βρετανία είναι η χώρα που επηρεάζει τα οικοσυστήματα της βορειοδυτικής Ευρώπης, «εξάγοντάς» τους όξινη βροχή.

Στην Ελλάδα, κατά κανόνα, το μεγαλύτερο ποσοστό των βροχών (35%-45%) έχουν δυτική και νοτιοδυτική προέλευση (Ισπανία, Ν. Ιταλία, Β. Αφρική), οι βροχές αυτές εμφανίζουν, κατά κανόνα, pH κοντά σε κείνο της καθαρής βροχής. Ένα εξίσου μεγάλο ποσοστό βροχών (30%-40%) έχει νότια προέλευση (Αίγυπτο–Λιβύη). Οι βροχές αυτές χαρακτηρίζονται συνήθως από υψηλό pH. Το 20%-25% των βροχών προέρχεται από την κεντρική Ευρώπη, όπου υπάρχουν σημαντικές πηγές εκπομπής διοξειδίου του θείου SO₂ και διοξειδίου του αζώτου NO₂. Οι βροχές αυτές έχουν χαμηλό pH και χαρακτηρίζονται ως όξινες.

6.2. Επιπτώσεις της όξινης βροχής στο περιβάλλον

Έχει διαπιστωθεί ότι η όξινη βροχή επιδρά σ' όλα τα συστατικά της βιόσφαιρας : στο έδαφος, στα δάση, στις καλλιέργειες, στις λίμνες, στα ποτάμια και γενικότερα στην υδρόβια ζωή, καθώς και στα μνημεία και στα κτήρια.

6.2.1. Επιπτώσεις της όξινης βροχής στο έδαφος

Η όξινη βροχή απομακρύνει από το έδαφος πολύτιμα μέταλλα, όπως το μαγνήσιο (Mg), το ασβέστιο (Ca), το κάλιο (K), μετατρέποντας το έδαφος σε φτωχό σε **θρεπτικά συστατικά** που είναι απαραίτητα για τη σωστή ανάπτυξη των φυτών. Επιπλέον, το όξινο pH θανατώνει τους **αποικοδομητές** στο έδαφος. Όσο πιο όξινο είναι το pH της βροχής τόσο περισσότερα τοξικά μέταλλα απελευθερώνονται από το έδαφος. Έτσι, τοξικά μέταλλα, όπως ο μόλυβδος (Pb), ο χαλκός (Cu), ο ψευδάργυρος (Zn), το κάδμιο (Cd) και ο υδράργυρος (Hg), μπορούν να αποδεσμευτούν από το έδαφος, να φτάσουν στα υπόγεια νερά, στους ποταμούς, τις λίμνες, και στα ρεύματα που χρησιμοποιούνται για την προμήθεια του πόσιμου νερού, να μπουν στην **τροφική αλυσίδα** και να καταλήξουν στον άνθρωπο.

6.2.2. Επιπτώσεις της όξινης βροχής στα υδάτινα οικοσυστήματα

Οι υψηλές συγκεντρώσεις όξινης απόθεσης είναι επιβλαβείς για τα υδάτινα οικοσυστήματα τα οποία δείχνουν ιδιαίτερη ευαισθησία στις αλλαγές της οξύτητας. Με την αύξηση της οξύτητας του νερού μειώνεται η γονιμότητα των ψαριών και το ποσοστό εκκόλαψης των αυγών, με αποτέλεσμα να μειώνεται δραματικά ο πληθυσμός των ψαριών και άλλων ειδών υδρόβιας ζωής. Επίσης, η όξινη βροχή ενεργοποιεί το αργίλιο στο νερό και στον πυθμένα των λιμνών, γεγονός που μπλοκάρει το αναπνευστικό σύστημα των οργανισμών που ζουν σ' αυτό, με αποτέλεσμα να οδηγούνται στο θάνατο. Επίσης, το αργίλιο συντελεί στην καθίζηση του φωσφόρου και μειώνει τη διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών και τη συγκέντρωση του φυτοπλαγκτού. Δημιουργούνται έτσι, ολιγοτροφικές λίμνες, που παρουσιάζουν μια πλαστή ομορφιά με τα εξαιρετικά διαυγή νερά τους. Η μείωση του pH συνοδεύεται από αύξηση των διαλυμένων μετάλλων, η υψηλή συγκέντρωση των οποίων μπορεί ν' αποβεί μοιραία για τα ψάρια. Όταν η τιμή του pH είναι ίση με 4, έχει παρατηρηθεί θνησιμότητα του 50% των αμφίβιων. Η μείωση του πληθυσμού των ψαριών και των αμφίβιων επηρεάζει άμεσα την τροφική αλυσίδα, καθώς τα θηλαστικά και τα πτηνά τρέφονται μ' αυτά. Μελέτες δείχνουν ότι εκατοντάδες λίμνες τόσο στη Β. Ευρώπη όσο και στις Η.Π.Α. και στον Καναδά είναι τόσο όξινες, ώστε ο πληθυσμός των ψαριών να έχει μειωθεί αισθητά. Σε μια προσπάθεια να χρησιμοποιηθεί κάποιο αντιδραστήριο εξουδετέρωσης προσθέτουν σβησμένο ασβέστη ή ασβεστόλιθο μέσα στις λίμνες. Μετά την εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου, διαπιστώθηκε ότι το pH του νερού επανήλθε στην κανονική του τιμή και τα διαλυμένα μέταλλα ελαττώνονται, καθώς καταβυθίζονται με τη μορφή υδροξειδίων σε ουδέτερο pH. Παρ' όλα αυτά, η μέθοδος αυτή δεν λύνει το πρόβλημα, μιας και τα μέταλλα συνεχίζουν να υπάρχουν σε τοξικές για τα ψάρια συγκεντρώσεις.

6.2.3. Επιπτώσεις της όξινης βροχής στα δάση και τις καλλιέργειες

Τα δάση στις ΗΠΑ, στον Καναδά, στη Σουηδία και στην Κεντρική Ευρώπη παρουσιάζουν σημαντική ελάττωση της ετήσιας αύξησής τους. Το 5% των δασών της Γερμανίας έχει νεκρωθεί, ενώ το 30%-50% έχει υποστεί σοβαρές βλάβες. Τις μεγαλύτερες βλάβες έχει υποστεί η ελάτη και ακολουθούν, με σειρά, η πεύκη, η ερυθρελάτη και η οξιιά. Οι επιστήμονες έχουν αναπτύξει διάφορες θεωρίες για να εξηγήσουν με ποιό τρόπο προκαλείται η καταστροφή των φυτών:

- Η **θεωρία των βλαστών** υποστηρίζει ότι αρχικά τα φύλλα των φυτών υφίστανται βλάβες από το όζον, οι οποίες επιταχύνονται από την επίδραση της όξινης βροχής.
- Η **θεωρία των ριζών** υποστηρίζει ότι το λεπτό ριζικό σύστημα καταστρέφεται από το χαμηλό pH του νερού της βροχής και έτσι γίνεται με δυσκολία η μεταφορά των θρεπτικών στοιχείων.
- Σύμφωνα με τη **θεωρία της πολλαπλής έντασης**, η συνολική επίδραση αέριων ρύπων κατά τις προηγούμενες δεκαετίες και ο συνδυασμός με άλλα φαινόμενα οδηγεί σε σημαντική ελάττωση της παραγωγής υδατανθράκων στα δασικά δέντρα. Τα φυτά χάνουν το σφρίγος τους, οι ρίζες και οι βλαστοί δεν αναπτύσσονται κανονικά και έτσι γίνονται ευάλωτα σε προσβολές από έντομα, μύκητες καθώς και στην καταστροφή από παγετό ή ξηρασία. Τα δέντρα έτσι γίνονται αδύναμα στα έντομα και στην ξηρασία.

6.2.4. Επιπτώσεις της όξινης βροχής στα αρχαία μνημεία

Η όξινη βροχή διαβρώνει υλικά όπως τα οικοδομικά υλικά (μάρμαρο, γρανίτη, ασβεστόλιθο), τα μέταλλα, τα χρώματα. Ιδιαίτερο πρόβλημα είναι η καταστροφή των αρχαίων μνημείων, σε πολλές πόλεις στον κόσμο (για παράδειγμα, στην Αθήνα, τα μάρμαρα της Ακρόπολης), καθώς και σε κτήρια και μνημεία της Ευρώπης, προκαλώντας ανεπανόρθωτες καταστροφές στην πολιτιστική κληρονομιά των λαών. Η διάβρωση των μνημείων οφείλεται σε αντιδράσεις που γίνονται στην επιφάνειά τους. Το διοξείδιο του θείου και η υγρασία αντιδρούν με το ανθρακικό ασβέστιο CaCO_3 και σχηματίζουν θεικό ασβέστιο και γύψο ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), τα οποία είναι διαλυτά στο νερό, με αποτέλεσμα να προκαλείται φθορά τόσο στα δομικά υλικά όσο και στο κονίαμα που τα συνδέει. Η διαδικασία αυτή λέγεται γυψοποίηση.

6.2.5. Επιπτώσεις της όξινης βροχής στον άνθρωπο

Υπάρχουν πολλοί λόγοι ανησυχίας για την υγεία του ανθρώπου από την όξινη βροχή. Η όξινη βροχή επιδρά σ' όλα τα συστατικά της βιόσφαιρας επηρεάζοντας τη διατροφική αλυσίδα και έτσι, μέσω αυτής εισέρχονται στον οργανισμό επικίνδυνα τοξικά μέταλλα στον οργανισμό του ανθρώπου με πολύ σοβαρές συνέπειες στην υγεία του.

6.3. Αντιμετώπιση του προβλήματος

Το πρόβλημα της όξινης βροχής είναι ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα διασυννοριακής ρύπανσης, επειδή αυτοί που επηρεάζονται από τη βροχή είναι πολλές φορές πολύ μακριά από αυτούς που την προκαλούν. Υπήρξε σημείο τριβής μεταξύ κρατών και έγινε η αφορμή να αρχίσουν νομοθετικές ρυθμίσεις για αυτό το θέμα.

Δραστικές, βιώσιμες λύσεις θα πρέπει να βασίζονται στη μείωση των εκπομπών των ρύπων που προέρχονται από ανθρωπογενείς πηγές. Για το σκοπό αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω γενικές προσεγγίσεις:

- **Έλεγχος των εκπομπών από τις βιομηχανίες.** Εφόσον οι περισσότεροι ρύποι είναι προϊόντα καύσης, μια πρώτη προσέγγιση για τον έλεγχο των εκπομπών θα πρέπει να στοχεύει στη μείωση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων. Οι βιομηχανίες των προηγμένων χωρών είναι υποχρεωμένες να μειώνουν τις εκπομπές των ρύπων που προκαλούν την όξινη βροχή.
- **Χρήση εναλλακτικών μορφών ενέργειας** και κυρίως ανανεώσιμων πηγών, όπως η ηλιακή, η αιολική ενέργεια και η γεωθερμία (βλ. ενότητα «Ενέργεια»).
- Η χρήση του **καταλυτικού μετατροπέα**, μιας συσκευής η οποία τοποθετείται στο σύστημα εξαγωγής των καυσαερίων των αυτοκινήτων με στόχο τη μετατροπή των εκπεμπόμενων ρύπων σε λιγότερο επιβλαβή για το περιβάλλον καυσαέρια.
Υπάρχουν, επίσης, εναλλακτικές μορφές ενέργειας για τα αυτοκίνητα, που δεν ρυπαίνουν το περιβάλλον, όπως τα αυτοκίνητα που κινούνται με αέριο, με μπαταρίες, με κυψέλες καυσίμων και με συνδυασμό εναλλακτικής μορφής ενέργειας και βενζίνης.
- Σε ατομικό επίπεδο, η ανάπτυξη οικολογικής συμπεριφοράς και η υιοθέτηση καταναλωτικών προτύπων φιλικών προς το περιβάλλον. Υπάρχουν συγκεκριμένες ενέργειες που μπορεί ο καθένας από μας να κάνει για να μειώσει τη συνεισφορά του στο πρόβλημα, όπως να έχει ενημέρωση και ενεργό συμμετοχή σε πρωτοβουλίες για το περιβάλλον, να περιορίζει τη σπατάλη ενέργειας (π.χ. απενεργοποίηση συσκευών και σβήσιμο των φώτων, όταν δεν είναι απαραίτητο να λειτουργούν), να ρυθμίζει το θερμοστάτη στις συσκευές θέρμανσης στους 20°C το χειμώνα και ψύξης στους 25°C το καλοκαίρι, να επιλέγει θερμομόνωση στις κατοικίες, να χρησιμοποιεί τα μέσα μαζικής μεταφοράς ή το ποδήλατο για τις μετακινήσεις του, να καταναλώνει προϊόντα που τα ίδια ή οι συσκευασίες τους είναι φιλικές στο περιβάλλον κ.ά.