



Παραδοτέο Π10.1: Έκθεση αποτελεσμάτων αριθμητικών προσομοιώσεων προσδιορισμού των επιπτώσεων της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης στα χερσαία και θαλάσσια οικοσυστήματα

Πακέτο Εργασίας	ΠΕ 10
Νο Παραδοτέου	Π10.1
Επικεφαλής δικαιούχος	ΠΚ
Συγγραφείς	Μαρία Κανακίδου
Συμμετέχοντες	Στέλιος Μυριοκεφαλιτάκης, Μαρία Σφακιανάκη
Εσωτερικοί κριτές	
Τύπος Παραδοτέου	Αναφορά
Επίπεδο Διάχυσης	ΡΥ (δημόσιο)
Εκτιμώμενη ημερομηνία Παράδοσης	Μήνας 46 (30/6/2022)
Πραγματική ημερομηνία Παράδοσης	
Έκδοση	
Σχόλια	

Περίληψη

Χρησιμοποιήθηκε το παγκόσμιας κλίμακας μοντέλο μεταφοράς και χημείας που είναι ικανό να περιγράψει την εναπόθεση των κύριων θρεπτικών συστατικών, αζώτου, φωσφόρου, σιδήρου παράλληλα με τον κύκλο του ατμοσφαιρικού άνθρακα. Το μοντέλο εστιάστηκε στην περιοχή της Μεσογείου.

Οι εκτιμώμενες εναποθέσεις συγκρίθηκαν με παρατηρήσεις αναδεικνύοντας την αναγκαιότητα περαιτέρω μελετών για την βελτίωση των πηγών του σιδήρου και του φωσφόρου στη περιοχή μας.

Μελετήθηκε η επίδραση της οξύτητας της ατμόσφαιρας στην απελευθέρωση διαλυτών θρεπτικών στο περιβάλλον. Εκτιμήθηκε ότι περίπου το ήμισυ της νέας πρωτογενούς παραγωγής στη Μεσόγειο θάλασσα θα μπορούσε να οφείλεται στην ατμοσφαιρική εναπόθεση.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη.....	2
Προσομοιώσεις Ατμοσφαιρικής Εναπόθεσης	3
Επίδραση της χημείας πολλαπλών φάσεων στη διαλυτότητα του σιδήρου	5
Επίδραση της ατμοσφαιρικής οξύτητας στις μορφές εναπόθεσης.....	6
Επίδραση ατμοσφαιρικής Εναπόθεσης στη Γήινη βλάστηση.....	10
Επίδραση της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης στο θαλάσσιο σύστημα της Μεσογείου.....	15
Δημοσιεύσεις PANACEA.....	19
Άλλες βιβλιογραφικές αναφορές.....	19

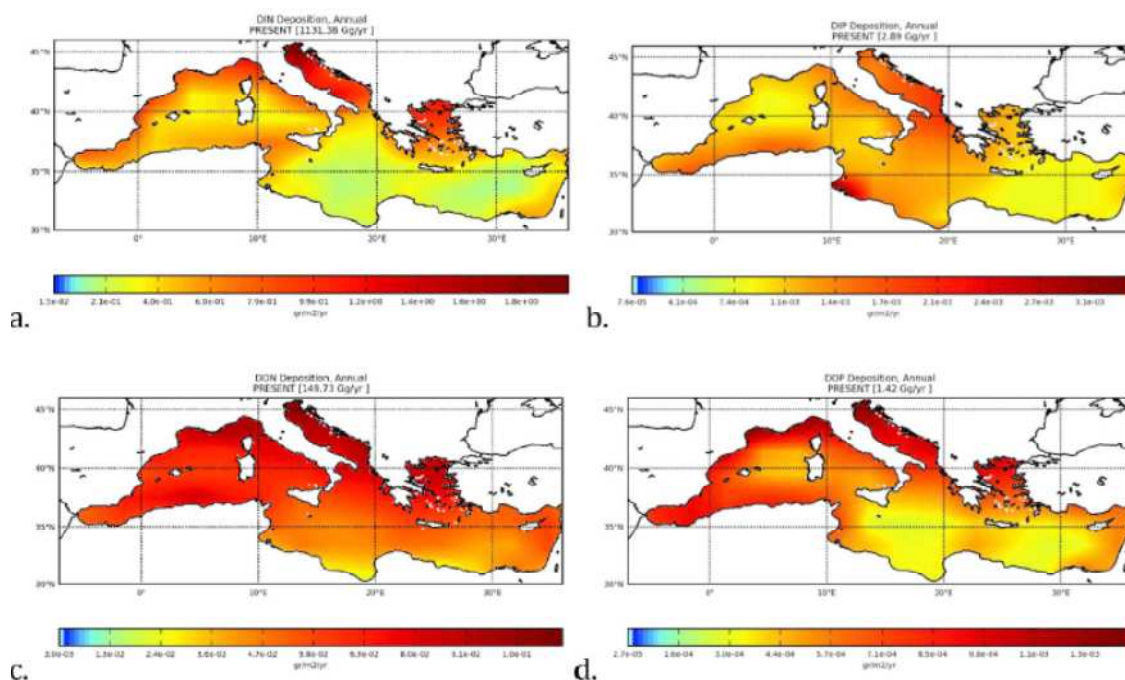
Προσομοιώσεις Ατμοσφαιρικής Εναπόθεσης

Ένα παγκόσμιο τρισδιάστατο μοντέλο χημείας-μεταφοράς εφαρμόστηκε για την αξιολόγηση των ροών ατμοσφαιρικής εναπόθεσης N, P και Fe στο Μεσόγειο θάλασσα (Εικόνα 1 & Πίνακας 1). Το off-line μοντέλο, TM4-ECPL (Myriokefalitakis et al., 2016a,b), περιέχει μια λεπτομερή περιγραφή της χημείας του όζοντος (Myriokefalitakis et al., 2016b), καθώς και όλα τα κύρια συστατικά αερολυμάτων, συμπεριλαμβανομένων των οργανικών αερολυμάτων και διαδραστικών υπολογισμών των εκπομπών θαλασσινού αλατιού, ερημικής σκόνης και βιοαεροζόλ (Myriokefalitakis et al., 2010, 2016b, 2017). Το μοντέλο κινείται από την μετεωρολογία ERA-Interim για το έτος 2008 (το έτος 2007 χρησιμοποιείται ως spin up) και χρησιμοποιεί το Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project (ACCMIP) εκτιμήσεις προγενέστερων ανθρωπογενών εκπομπών και τις εκτιμήσεις του Representative Concentration Pathways 8.5 (RCP8.5) για το μέλλον. Οι εκπομπές από τη βλάστηση είναι ανά έτος από το δεδομένα παγκόσμιων εκπομπών υπολογισμένα από το μοντέλο εκπομπών αερίων και αερολυμάτων από τη φύση (MEGAN).

Για την παρούσα μελέτη, ο κύκλος N παραμετροποιείται όπως περιγράφεται λεπτομερώς στο Kanakidou et al. (2012) και (2016) και οι παραμετροποιήσεις ατμοσφαιρικών κύκλων του Fe και P περιγράφονται στο Myriokefalitakis et al. (2015; 2016β). Εν συντομία, το μοντέλο λαμβάνει υπόψη τόσο φυσικές όσο και ανθρωπογενείς παγκόσμιες εκπομπές ανόργανων (αζώτου οξείδια, NO_x και αμμωνία, NH₃) και οργανικό άζωτο (θαλάσσιες αμίνες και οργανικό άζωτο που εκπέμπεται στη σωματιδιακή φάση). Συνολικά οι εκπομπές δραστικού αζώτου (TN) αυξήθηκαν από περίπου 47 Tg-N γ⁻¹ στο παρελθόν σε 125 Tg-N γ⁻¹ στις μέρες μας και παραμένουν σχεδόν ίδια στο μέλλον στο ~127 Tg-N γ⁻¹ (βλ. λεπτομέρειες στο Kanakidou et al., 2016; Jickells et al., 2017). Αυτές οι εκπομπές αλλάζουν επίσης ποιοτικά από τη συμβολή των εκπομπών οργανικού N σε TN μειώθηκαν προοδευτικά από 37% στο παρελθόν σε ~ 19% σήμερα και 18% στο μέλλον. Ομοίως, η συνεισφορά του οξειδωμένου ανόργανου αζώτου (NO_y) στις εκπομπές TN έχει αυξηθεί από το παρελθόν και θα μειωθεί στο μέλλον (27% στο παρελθόν, 39% επί του παρόντος και 32% στο μέλλον). Από την άλλη η συμβολή του ανηγμένου ανόργανου αζώτου (NH_x) σε TN είναι συνεχώς αυξανόμενη (36% στο παρελθόν, 42% σήμερα και 50% στο μέλλον), αν και προβλέπεται βραδύτερος ρυθμός αύξησης για το μέλλον.

Για το συνολικό Fe, το τρέχον μοντέλο αντιστοιχεί σε 37.9 Tg-Fe γ⁻¹ από σκόνη, 1.07 Tg-Fe γ⁻¹ από την καύση βιομάζας και 0.71 Tg-Fe γ⁻¹ από ανθρωπογενείς δραστηριότητες συμπεριλαμβανομένης της ναυτιλίας (βλ. Myriokefalitakis et al., 2015 και παραπομπές σε αυτό). Οι συνολικές εκπομπές P στο μοντέλο είναι 1.1 Tg-P γ⁻¹ από σκόνη, 0.02 Tg-P γ⁻¹ από καύση βιομάζας, 0.16 Tg-P γ⁻¹ από βιοαερολύματα, 0.01 Tg-P γ⁻¹ από ηφαιστειακές εκρήξεις, 0,04 Tg-P γ⁻¹ από ανθρωπογενείς δραστηριότητες και

0.01 Tg-Fe γ⁻¹ από τους ωκεανούς (Μυριοκεφαλitakis et al. 2016β). Ο Fe και ο P που βρίσκονται πάνω στην ορυκτή σκόνη παραμετροποιούνται με βάση τις εκπομπές σκόνης που προκαλούνται από τον άνεμο (Μυριοκεφαλitakis et al., 2016b), ορυκτολογία του εδάφους και περιεκτικότητα σε Fe και P σε κάθε ορυκτό, όπως περιγράφεται λεπτομερώς σε αυτές τις προηγούμενες δημοσιεύσεις. Κατά τη διάρκεια της ατμοσφαιρικής μεταφοράς, η χημική γήρανση μετατρέπει ένα κλάσμα του αδιάλυτο Fe και P σε διαλυτές μορφές.



Εικόνα 1 Ετήσιες ροές ατμοσφαιρικής εναπόθεσης διαλυτού α) ανόργανου δραστικού αζώτου, β) διαλυτού ανόργανου φωσφόρου, γ) οργανικού διαλυτού αζώτου, δ) διαλυτού οργανικού φωσφόρου (από Kanakidou et al., 2020)

Πίνακας 1. Ετήσιες ροές ατμοσφαιρικής εναπόθεσης θρεπτικών στην Μεσόγειο θάλασσα (Tg-N γρ⁻¹, Gg-P γρ⁻¹, Gg-P γρ⁻¹) (Kanakidou et al., 2020)

Nutrient	Method	Atmospheric Deposition over the Mediterranean	Reference
DN	Global model 2° in lat. x 3° in lon.; interpolation 0.1° in lat. x 0.1° in lon.	1.28	This study
	Observationally derived estimates	1.08	Guerzoni and Molinaroli (2005)
	Regional model 30 km x 30 km	2.02	Im et al. (2013)
	Regional model 50 km at 60°N	0.97	(without primary organic nitrogen emissions) Bartnicki and Fagerli (2008)
	Regional model 50 km	0.94	EMEP (Benedictow et al., 2010)
	Global model 1.9° in lat. x 3.75° in lon.	0.22 <	Richon et al. (2018a)
DP	Global model 2° in lat. x 3° in lon.; interpolation 0.1° in lat. x 0.1° in lon.	4.31–61.27	This study
	Global model 0.94° in lat. x 1.28° in lon.	4.49	Richon et al. (2018b)
	Estimate based on DIP observations	0.07	Guerzoni and Molinaroli (2005)
	Global model ~1.8° in lat. x 1.8° in lon.	5.7	Mahowald et al. (2008)
DFe	Global model 2° in lat. x 3° in lon.; interpolation 0.1° in lat. x 0.1° in lon.	6.32–15.93	This study
	Global model ~1.8° in lat. x 1.8° in lon.	0.15	Mahowald et al. (2009)
	Observationally derived estimates	5.1–12.5 (*)	(*) East Mediterranean only, estimated using DFe flux for Finokalia for the years 2005 and 2006 by Theodosi et al. (2010a) and Theodosi et al. (2010b)
	Observationally derived estimates	2.0 (**)	(**) West Mediterranean only, estimated using mean DFe flux by (Bonnet and Gulev, 2006) for the Northwestern Mediterranean
	Global ensemble model calculations 1° in lat. x 1° in lon.	4-43 (18) (#)	# range (mean) of ensemble calculations from 4 global models (Myriokefalitakis et al., 2018)

Επίδραση της χημείας πολλαπλών φάσεων στη διαλυτότητα του σιδήρου

Η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο επηρεάζουν οι πολυφασικές διεργασίες το κύκλο του αερολύματος που περιέχει σίδηρο είναι το κλειδί για την πρόβλεψη της η βιογεωχημείας του ωκεανού και των αναδράσεων με την αλλαγή του κλίματος του πλανήτη μας. Για τη μελέτη αυτή, το μοντέλο του γήινου συστήματος EC-Earth στη μορφή του που μπορεί να περιγράψει την ατμοσφαιρική-χημεία χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της χημείας πολλαπλών φάσεων και της επίδρασής της στις παγκόσμιες ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις του οξαλικού (OXL) και του θεικού (SO_4^{-2}) ιόντος και του κύκλου του ατμοσφαιρικού σιδήρου (Fe). Για αυτό ενσωματώθηκε στο μοντέλο μιας ολοκληρωμένης αναπαράστασης της πολυφασικής χημείας στα σταγονίδια σύννεφων και στο σωματιδιακό νερό. Η διάλυση των αερολυμάτων που περιέχουν Fe επηρεάζεται κινητικά από την οξύτητα του διαλύματος, το οξαλικό οξύ και την ακτινοβολία. Η οξύτητα του αερολύματος υπολογίζεται ρητά στο μοντέλο, τόσο για τα αερολύματα στη περιοχή συσσώρευσης όσο και για τα χονδρόκοκκα αερολύματα λαμβάνοντας υπόψη θερμοδυναμικές διεργασίες που περιλαμβάνουν ανόργανα συστατικά από θαλασσινό αλάτι και ορυκτή σκόνη (Myrjokefalitakis et al. 2022).

Υπολογίσαμε μια μέση παγκόσμια καθαρή χημική παραγωγή OXL στα $12.615 \pm 0.064 \text{ Tg yr}^{-1}$ στην EC-Earth, με τη γλυοξάλη να είναι ο σημαντικότερος πρόδρομος του οξαλικού οξέος. Σε σύγκριση με την προσομοίωση με ERA-Interim μετεωρολογία, οι διαφορές στην ατμοσφαιρική δυναμική που υπολογίζει το EC-Earth έχουν ως αποτέλεσμα να προσομοιώνεται ασθενέστερη οξειδωτική ικανότητα με συνολικό αποτέλεσμα 30% χαμηλότερη πηγή OXL στο EC-Earth.

Από την άλλη πλευρά, η πιο σωστή αναπαράσταση του χημεία υδατικής φάσης στην EC-Earth σε σύγκριση με την προηγούμενη έκδοση του μοντέλου οδηγεί σε συνολικά 20% υψηλότερη παραγωγή θεικών ιόντων. Αυτά όμως εξακολουθούν να συσχετίζεται καλά με τις ατμοσφαιρικές παρατηρήσεις.

Ο συνολικός ρυθμός διαλυτοποίησης Fe στο EC-Earth υπολογίζεται στο $0.806 \pm 0.014 \text{ Tg yr}^{-1}$ και προστίθεται στο πρωτογενές διαλυμένο Fe (DFe) που προέρχεται από τη σκόνη και τα αερολύματα καύσης στο μοντέλο ($0.072 \pm 0.001 \text{ Tg yr}^{-1}$). Οι προσομοιωμένες συγκεντρώσεις DFe δείχνουν μια ικανοποιητική σύγκριση με τις διαθέσιμες παρατηρήσεις, που δείχνει ατμοσφαιρικό φορτίο 0.007 Tg , με αποτέλεσμα μια συνολική ροή ατμοσφαιρικής εναπόθεσης στο παγκόσμιος ωκεανός $0.376 \pm 0.005 \text{ Tg yr}^{-1}$, που είναι μέσα στο εύρος τιμών που αναφέρονται στη βιβλιογραφία.

Επίδραση της ατμοσφαιρικής οξύτητας στις μορφές εναπόθεσης

Με τον όρο ατμοσφαιρική οξύτητα, αναφερόμαστε την οξύτητα των διαφόρων μέσων στην ατμόσφαιρα (αέρια όξινα συστατικά, σωματιδιακό νερό, νερό των συννέφων, βροχή) (Pye et al. 2020).

Η ατμοσφαιρική οξύτητα, στη Μεσόγειο, ενισχύεται σημαντικά κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού λόγω της αυξημένης φωτοχημικής δραστηριότητας, η οποία οδηγεί περαιτέρω σε αυξημένη οξειδωση NOx και SOx και μειωμένο σωματιδιακό νερό. Αυτά, μαζί με ετερογενείς αντιδράσεις όξινων αερίων (NOx, SOx) στην επιφάνεια των σωματιδίων σκόνης, που αυξάνουν επίσης την οξύτητα της σκόνης, ενισχύουν τη διάλυση των θρεπτικών ουσιών που σχετίζονται με την ορυκτή σκόνη και επομένως τη διαλυτότητα της σκόνης. Σύμφωνα με αυτά τα ευρήματα, οι Theodosi et al. (2010) βρήκαν μια θετική συσχέτιση της οξύτητας με τον Fe που είτε έχει διαλυθεί στο νερό της βροχής είτε υπόκειται σε ξηρή εναπόθεση. Τα δείγματα που υποβλήθηκαν σε επεξεργασία σε αυτή τη μελέτη συλλέχθηκαν στην Κρήτη στην Ανατολική Μεσόγειο και η διαλυτότητα κυμαινόταν από 27.2 %, για μολυσμένο νερό της βροχής (pH 4–5) έως 0.5% για επεισόδια σκόνης της Σαχάρας (pH κοντά στο 8). Ομοίως, οι παρατηρούμενες διαλυτότητες του ανόργανου κλάσματος του P σε αερολύματα στη Μεσόγειο κυμαίνονται μεταξύ 20% και 45%, με τις χαμηλότερες τιμές να σχετίζονται με τις επηρεαζόμενες από τη σκόνη μάζες αέρα και τις υψηλότερες με τις αέριες μάζες από την Κεντρική Ευρώπη (Markaki et al. 2003 και 2010· Herut et al. 1999). Myrjokefalitakis et al. (2015, 2016) και Kanakidou et al (2020) υπολόγισαν τις ενισχυμένες ροές διάλυσης ορυκτών Fe και P στη λεκάνη της ανατολικής Μεσογείου και τη Μέση Ανατολή. Συνολικά, μια αύξηση στις ροές εναπόθεσης διαλυτού Fe και P στη Μεσόγειο Θάλασσα που προκύπτει από τη διάλυση της σκόνης λόγω της οξύτητας υπολογίζεται ότι είναι περίπου 11 Gg(Fe) yr⁻¹ και 1 Gg(P) yr⁻¹, αντίστοιχα (Kanakidou et al. 2020, Πίνακας 1). Επιπρόσθετα, προτείνεται ότι οι εκπομπές από την καύση βιομάζας και ανθρωπογενούς προέλευσης, την καύση πετρελαίου συμβάλλουν επίσης στα επίπεδα του διαλυτού Fe (Ito et al. 2019) και μέσω της εναπόθεσης μπορούν να επηρεάσουν τη βιογεωχημεία των ωκεανών (Ito et al. 2016). Ο σχηματισμός οξαλικής υδατικής φάσης και επομένως η διάλυση Fe που προάγεται από τους οργανικούς συναρμωτές, ευνοείται επίσης από τις υψηλότερες βιογενείς εκπομπές NMVOC κατά τη διάρκεια της θερμής περιόδου, που είναι πρόδρομες οργανικών συναρμωτών (π.χ. Myrjokefalitakis et al. 2011).

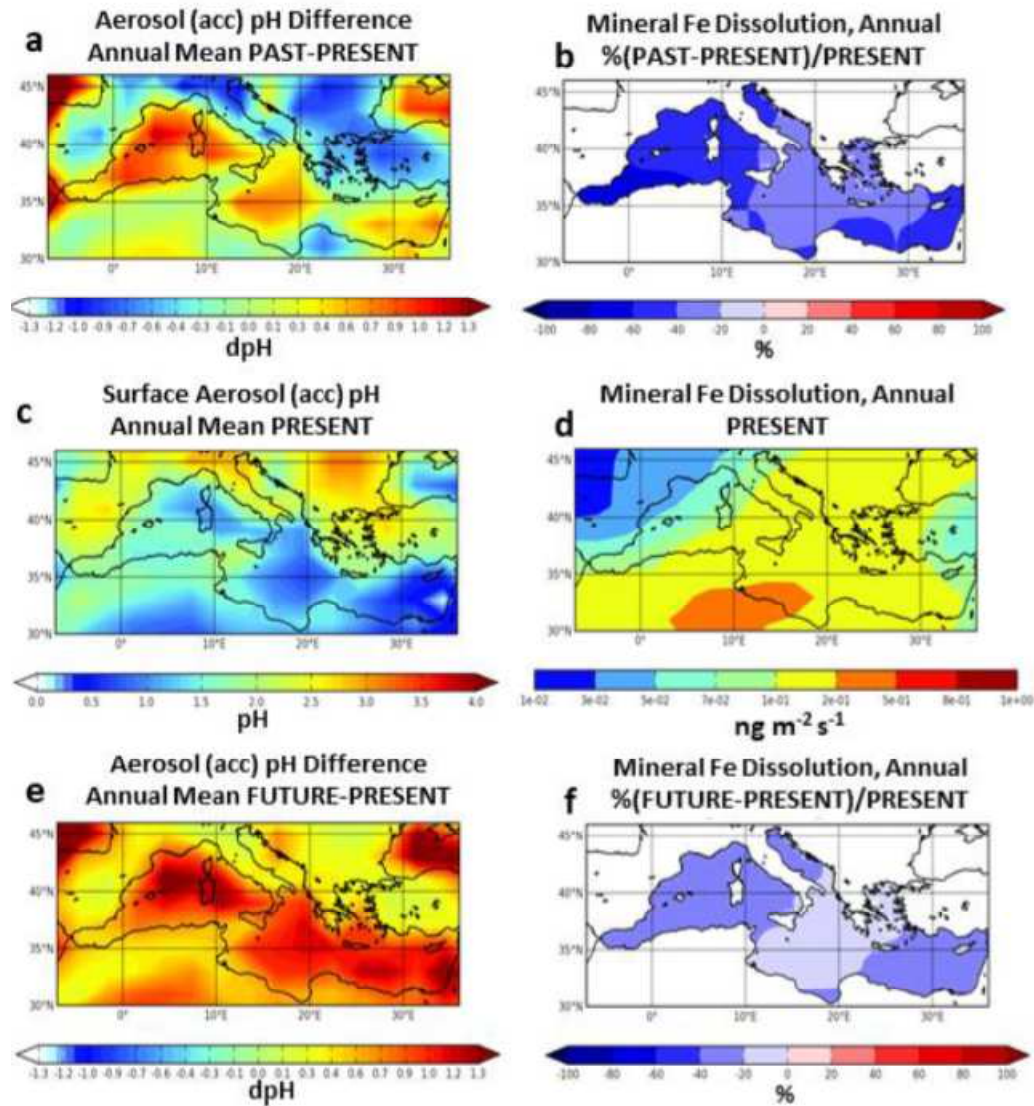
Η προαναφερθείσα χημική γήρανση του αερολύματος σκόνης μειώνει τη διάρκεια ζωής της σκόνης, η οποία εξαρτάται επίσης από την κατανομή του μεγέθους του αερολύματος (όσο μικρότερα είναι τα σωματίδια τόσο περισσότερο παραμένουν στην

ατμόσφαιρα). Πράγματι, η διάρκεια ζωής των αερολυμάτων που περιέχουν Fe έχει εκτιμηθεί μεταξύ λιγότερο από 1 ημέρα για το αεροζόλ υπερ-μικρού και εβδομάδες για το αεροζόλ με διάμετρο $<1 \mu\text{m}$ (Kok et al. 2017), ενώ η συνολική διάρκεια ζωής αερολύματος σκόνης έχει εκτιμηθεί μεταξύ 1.6 και 7.1 ημερών (Huneeus et al. 2011). Ωστόσο, η αξιολόγηση της διάρκειας ζωής της σκόνης και του τρόπου με τον οποίο αλλάζει κατά την ατμοσφαιρική μεταφορά και επεξεργασία παραμένει πρόκληση. Έχουν βρεθεί μεγάλες διαφορές μεταξύ των μοντέλων του ατμοσφαιρικού κύκλου Fe λόγω τόσο της κατανομής μεγέθους αερολύματος όσο και της παραμετροποίησης της διαλυτοποίησης της σκόνης (ως μέτρο της απόκλισης του μοντέλου, ο λόγος της τυπικής απόκλισης προς τον μέσο όρο του συνόλου των μοντέλων εξετάστηκε και βρέθηκε τοπικά μεγαλύτερο από 2, Myrjiokefalitakis et al. 2018). Τα μελλοντικά σενάρια εκπομπών δείχνουν ότι οι πηγές των κύριων όξινων ειδών της ατμόσφαιρας, όπως τα οξείδια του αζώτου (NO_x) και του θείου (SO_x) αναμένεται να μειωθούν κατά 34–59 % και 75–88%, αντίστοιχα, μεταξύ 2010 και 2100, αλλά η αμμωνία (NH_3) πιθανότατα θα αυξηθεί κατά 3–55%. Αυτή η ετερογένεια στην προβολή όξινων και αλκαλικών εκπομπών, συνολικά, θα διαταράξει μη γραμμικά τόσο την οξύτητα του αερολύματος της ατμόσφαιρας όσο και την οξίνιση της σκόνης και τα παραγόμενα θρεπτικά συστατικά θα μεταφερθούν στον ωκεανό.

Ιδιαίτερα για την περιοχή της Μεσογείου, οι Kanakidou et al. (2020) έδειξαν ότι οι προβιομηχανικοί ρυθμοί εναπόθεσης διαλυτού P και διαλυτού Fe ήταν χαμηλότεροι σε σύγκριση με τη σύγχρονη εποχή (δηλαδή, 35% και 54%, αντίστοιχα), αλλά θα επιστρέψουν σχεδόν στα σημερινά επίπεδα, στο άμεσο μέλλον. Οι προαναφερθείσες διαφορές, ωστόσο, ενσωματώνουν αλλαγές τόσο στις άμεσες εκπομπές όσο και στην ατμοσφαιρική επεξεργασία (Εικόνα 2). Συνολικά, αυτές οι αλλαγές μπορεί να είναι ιδιαίτερης σημασίας και να παίζουν βασικό ρόλο σε οικοσυστήματα όπως στη Μεσόγειο και ιδιαίτερα στην ανατολική λεκάνη της, όπου η ανάπτυξη φυτοπλαγκτού περιορίζεται από τη διαθεσιμότητα P.

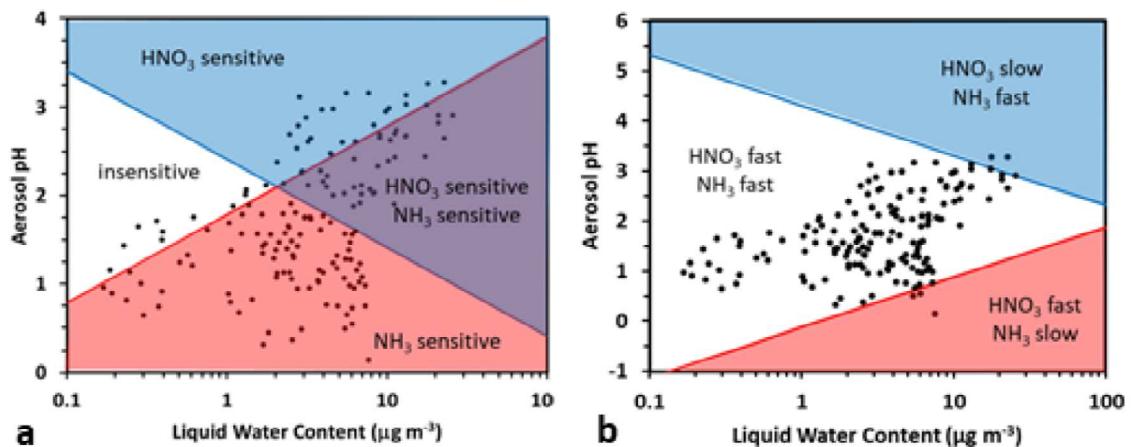
Επιπλέον, η κατανομή των νιτρικών και αμμωνιακών ιόντων στη φάση του αερολύματος επηρεάζεται επίσης από την οξύτητα και δεδομένου ότι τα αέρια παρουσιάζουν πιο αποτελεσματικά ξηρή εναπόθεση σε σύγκριση με αερολύματα μικρότερου μεγέθους, οι αλλαγές στην οξύτητα οδηγούν σε αλλαγές στα πρότυπα εναπόθεσης αυτών των θρεπτικών συστατικών (Nenes et al. 2020b). Είναι ενδιαφέρον ότι η κατανομή νιτρικών στη φάση αερολύματος ευνοείται σε υψηλότερο pH, ενώ η κατανομή NH_4^+ δείχνει αντίθετη εξάρτηση από το pH και ευνοείται σε όξινο περιβάλλον. Έτσι, η μεταφορά και η εναπόθεση μειωμένης απόκρισης αζώτου στις αλλαγές οξύτητας αερολύματος είναι διαφορετικές από αυτές του οξειδωμένου αζώτου (Nenes et al. 2020b). Επιπλέον, οι προαναφερθείσες ετερογενείς αντιδράσεις, οι οποίες ευνοούν την κατανομή των νιτρικών στο χονδροειδές αεροζόλ, μειώνουν τον

χρόνο παραμονής των νιτρικών και επομένως επηρεάζουν τα μοτίβα εναπόθεσής τους στην ατμοσφαιρική, μέσω της αυξημένης καθίζησης



Εικόνα 2. Εξέλιξη λόγω ανθρωπογενών εκπομπών και καύσης βιομάζας μεταβολές του pH των σχεδόν επιφανειακών αερολυμάτων διαμέτρου <1 μm στη Μεσόγειο (αριστερά) και η ροή διάλυσης του Fe από ορυκτά (δεξιά). α) διαφορές στις μονάδες pH (PAST-PRESENT), β) απόλυτο pH υπολογισμένο για ΠΑΡΟΝ; γ) διαφορές στις μονάδες pH (PAST-PRESENT). δ) τοις εκατό αλλαγές σε σχέση με το παρελθόν σχετικό έως σήμερα ((PAST-PRESENT)/PRESENT), ε) απόλυτες ροές διάλυσης του Fe που υπολογίζονται για PRESENT σε ng-2s⁻¹ προβλεπόμενες ποσοστιαίες αλλαγές στο μέλλον σε σχέση με το παρόν ((FUTURE-PRESENT)/PRESENT). Οι υπολογισμοί γίνονται με το παγκόσμιο μοντέλο TM4-ECPL χρησιμοποιώντας CMIP5 και εκπομπές RCP6.0 (παραμετροποιήσεις από Μυγιοκεφαλитаκис et al. 2015, η προσομοίωση που περιγράφεται στο Κανακίδου et al. 2020). Σε αυτούς τους υπολογισμούς του θερμοδυναμικού μοντέλου δεν λαμβάνεται υπόψη το K⁺ από την καύση βιομάζας. ΠΑΡΕΛΘΟΝ, ΠΑΡΟΝ και ΜΕΛΛΟΝ διαφέρουν μόνο στις εκπομπές που είναι αντίστοιχα για το 1850, το 2010 και το 2100, αντίστοιχα.

Ακολουθώντας τη μεθοδολογία των Nenes et al. (2020a και b) Το παρακάτω σχήμα (Εικόνα 3) παρέχει πληροφορίες σχετικές με την πολιτική σχετικά με την ευαισθησία των επιπέδων σωματιδίων (PM1) και της ξηρής εναπόθεσης δραστικού ανόργανου αζώτου, αντίστοιχα, στη συνολική διαθεσιμότητα αμμωνίας και νιτρικών αλάτων. Το σχήμα απεικονίζει ταξινομήσεις χημικών τομέων με βάση τα αποτελέσματα μοντέλων για περιοχές 2 μοιρών σε γεωγραφικό πλάτος επί 3 μοιρών σε γεωγραφικό μήκος σε μια εκτεταμένη περιοχή της Μεσογείου (νότια Ευρώπη και βόρεια Αφρική, Kanakidou et al. 2020).



Εικόνα 3: **a)** Διάγραμμα που δείχνει τα καθεστώτα ευαισθησίας των σωματιδίων (PM1) στο σύνολο διαθεσιμότητα αμμωνίας και νιτρικών (σημειώνονται στο σχήμα με HNO₃). Σημειώστε ότι στις περισσότερες περιπτώσεις, το αεροζόλ είναι είτε αποκλειστικά ευαίσθητο στην ολική αμμωνία (κόκκινη περιοχή) είτε ευαίσθητο και στα δύο συνολικά αμμωνία και νιτρικά (μωβ περιοχή). **b)** Διάγραμμα καθεστώτων ξηρής εναπόθεσης αντιδραστικού αζώτου. Για τις περισσότερες συνθήκες που προσομοιώνονται από το TM4-ECPL, ο συνδυασμός σωματιδιακού νερού, το περιεχόμενο και το pH διασφαλίζουν ότι το μεγαλύτερο μέρος της ξηρής εναπόθεσης δραστικού αζώτου είναι ταχεία εναπόθεση (κοντά στο όριο ταχύτητας εναπόθεσης αερίου), που σημαίνει ότι δεν επιτρέπει τη συσσώρευση νιτρικών ή αμμωνίας στο οριακό στρώμα, και ότι το άζωτο εναποτίθεται κοντά στην περιοχή που εκπέμπεται (για την αμμωνία) ή/και παράγεται (για τα νιτρικά άλατα). Οι τελείες δείχνουν τα μέσα ετήσια αποτελέσματα από το μοντέλο TM4-ECPL (Kanakidou et al. 2020) σε πλέγματα των 2°x3° για την περιοχή από 28°N-48°N και 9°W-36°E. Εικόνα από Kanakidou et al., 2022b.

Σύμφωνα με αυτούς τους υπολογισμούς, σε περισσότερο από το 60% της περιοχής το αερόλυμα είναι αποκλειστικά ευαίσθητο σε NH₃, άλλο 15% αποκλειστικά ευαίσθητο στο HNO₃, 5% μη ευαίσθητο. Το υπόλοιπο είναι ευαίσθητο τόσο στο HNO₃ όσο και στην NH₃. Έτσι, αν και πολιτικές για τη μείωση των PM1 μπορεί να διαφέρουν μεταξύ των περιοχών, τα PM1 είναι ευαίσθητα στην NH₃ σε περίπου 80% των περιοχών και ευαίσθητα στο HNO₃ σε περίπου 35% των περιοχών. Αυτά τα αποτελέσματα υποστηρίζουν τις μεγάλες δυνατότητες μείωσης των επιπέδων PM1 με τον έλεγχο των εκπομπών NH₃. Το Σχήμα δεξιά δείχνει ότι η ξηρή εναπόθεση του δραστικού αζώτου είναι γρήγορη τόσο για την οξυγονωμένη όσο και για την ανοιγμένη μορφή ανόργανου

αζώτου, που απομακρύνονται γρήγορα με την ξηρή εναπόθεση από το οριακό στρώμα.

Επίδραση ατμοσφαιρικής Εναπόθεσης στη Γήινη βλάστηση

Η ατμοσφαιρική ρύπανση έχει πολλαπλές επιπτώσεις στην βλάστηση είτε έμμεσα μέσω αλλαγών στη φυσική κατάσταση της ατμόσφαιρας, όπως αύξηση της θερμοκρασίας (που προκαλείται από αέρια θερμοκηπίου), και στη διάχυτη ακτινοβολία (που προκαλείται από αερολύματα) που φθάνει στη βλάστηση, είτε άμεσα μέσω φυτοτοξικότητας που προκύπτει από το όζον. θείο, άζωτο και άλλους ρύπους από στοματική και μη στοματική πρόσληψη από τα φυτά, τροποποίηση του ισοζυγίου θρεπτικών ουσιών με εναπόθεση στην ατμόσφαιρα, μεταφορά φυτικών ασθενειών από αερολύματα και ρύπανση από έμμοτους ρύπους και μέταλλα. Αυτές οι επιπτώσεις συνοψίζονται και παρουσιάζονται παρακάτω και συζητούνται οι φυσιολογικές αποκρίσεις των φυτών και ο τρόπος δράσης απόθεσης που υπερβαίνουν τα κρίσιμα επίπεδα θρεπτικών συστατικών (Kanakidou et al., 2022b).

Η Λεκάνη της Μεσογείου είναι μια από τις περιοχές του κόσμου που φιλοξενούν την υψηλότερη βιοποικιλότητα τόσο από θαλάσσια όσο και από χερσαία οικοσυστήματα. Η χλωρίδα της Μεσογείου παρουσιάζει μεγάλη ποικιλία με 15,000 έως 25,000 είδη, μεταξύ των οποίων το 60% είναι αυτοφυή και ενδημικά είδη μοναδικά στην περιοχή (Vlachogianni et al. 2012). Σε παγκόσμιο επίπεδο, η χερσαία βλάστηση είναι υπεύθυνη για περισσότερο από το ήμισυ της παραγωγής οξυγόνου στην ατμόσφαιρα. Περιφερειακά, η βλάστηση αλληλεπιδρά με τον κύκλο του ατμοσφαιρικού νερού μέσω της φωτοσύνθεσης, της αναπνοής και της διαπνοής. Στις αστικές περιοχές, η βλάστηση έχει την ικανότητα να αντισταθμίζει εν μέρει το φαινόμενο της θερμικής νησίδας και να βελτιώνει το μικροκλίμα μέσω της μείωσης τόσο του θορύβου όσο και της έντασης του ατμοσφαιρικού ιονισμού. Επιπλέον, η βλάστηση είναι μια αποτελεσματική πηγή ενέργειας ανακύκλωσης και τα φυτικά προϊόντα παρέχουν πρώτη ύλη για διάφορες κατασκευές, ρούχα καθώς και θρεπτικά συστατικά για τον άνθρωπο και την πανίδα.

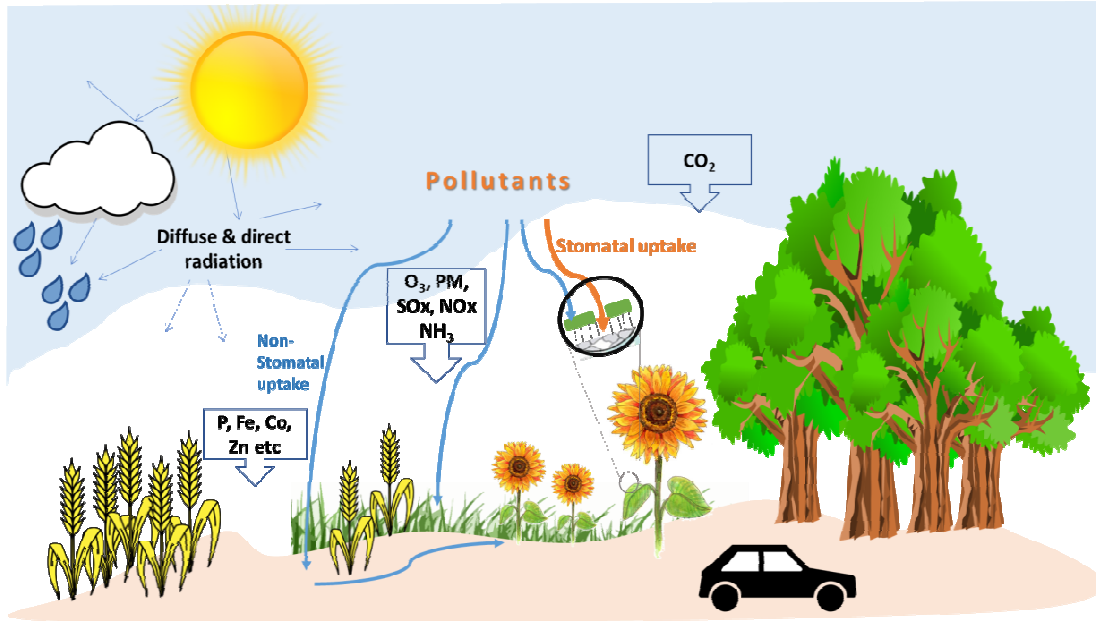
Λόγω των ήπιων καιρικών συνθηκών και της γονιμότητας των περισσότερων εδαφών, η γεωργία ήταν ανέκαθεν αναπόσπαστο μέρος των ανθρώπινων δραστηριοτήτων και σημαντικός συντελεστής στην οικονομία των μεσογειακών χωρών. Ωστόσο, η βλάστηση στην περιοχή κινδυνεύει λόγω των αλλαγών στις χρήσεις γης και της εμφάνισης περιβαλλοντικών πιέσεων και, ειδικότερα, της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε συνδυασμό με την κλιματική αλλαγή. Η μεσογειακή βλάστηση είναι γνωστό ότι είναι ιδιαίτερα ανθεκτική στις διαταραχές, κάτι που αποδίδεται διστακτικά στην ιστορική

της εξέλιξη κάτω από διάφορες πιέσεις και στην αυξημένη βιοποικιλότητά της, αν και οι μηχανισμοί που σχετίζονται με την ανθεκτικότητα των οικοσυστημάτων παραμένουν να γίνουν κατανοητοί (Lavorel 1999). Σοβαρές ανθρωπογενείς αλλαγές στις χρήσεις γης, όπως η αστική επέκταση, η γεωργική εγκατάλειψη και η δάσωση, οδήγησαν σε ανακατανομή της χλωρίδας στην περιοχή της Μεσογείου και στην αύξηση των χωροκατακτητικών ξένων φυτών (Vilà et al. 2003; Mosher et al. 2009). Επιπλέον, η ανθρώπινη παρέμβαση στη φύση έχει οδηγήσει σε πολλές παρενέργειες όπως ακραία κλιματικά φαινόμενα, συμπεριλαμβανομένων παρατεταμένων ξηρασιών, αυξημένης εμφάνισης πυρκαγιών, μαζί με αυξημένα επίπεδα όζοντος (O₃) και σωματιδίων (Avila et al. 1997 Kanakidou et al., 2011).

Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι επηρεάζουν τη φυσιολογία των φυτών με διάφορους τρόπους και μέσω διαφορετικών οδών: α) με απορρόφηση μέσω των στομάτων των φύλλων ή της επιδερμίδας (Hill 1971; Heath 2008), β) μέσω του ριζικού συστήματος μετά από εναπόθεση ατμοσφαιρικών ρύπων στα εδάφη (Gandois και Probst 2012; Cataldo and Wildung 1978), γ) με προσρόφηση αερολυμάτων στα φύλλα, μειώνοντας έτσι το διεισδυτικό φως και εμποδίζοντας το άνοιγμα των στομάτων (Gheorghe and Ion 2011) δ) αλλάζοντας τη Φωτοσυνθετικά Ενεργή Ακτινοβολία που φτάνει στο φυτό (Rap et al. 2015). Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι μπορούν επίσης να προκαλέσουν οξείες βλάβες στη βλάστηση όποτε πραγματοποιείται απορρόφηση υψηλών συγκεντρώσεων ρύπων σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα, ενώ οι χρόνιοι τραυματισμοί συμβαίνουν λόγω μακροχρόνιας απορρόφησης ρύπων σε υποθανατηφόρες συγκεντρώσεις (Gheorghe and Ion 2011). Οι Mills et al. (2018) υπολόγισε μια παγκόσμια απώλεια στις αποδόσεις σιταριού λόγω της έκθεσης στο O₃ κατά μέσο όρο 6% έως 9% στο νότιο και το βόρειο ημισφαίριο, αντίστοιχα, που οδηγεί σε πραγματικές συνολικές απώλειες σιτηρών περίπου 85 Tg ετησίως.

Επιπλέον, η ρύπανση από αεροζόλ επηρεάζει επίσης τη βλάστηση σκεδάζοντας πολλαπλώς το φως και αυξάνοντας έτσι το κλάσμα της διάχυτης ακτινοβολίας και την αποτελεσματικότητα της φωτοσύνθεσης (Rap et al. 2015) και **παρέχοντας θρεπτικά συστατικά ή/και τοξικές ουσίες στο οικοσύστημα μέσω ξηρής ή υγρής εναπόθεσης** (Ochoa- Hueso et al. 2011· Kanakidou et al. 2018). Η προσρόφηση αερολυμάτων στην επιφάνεια των φύλλων προκαλεί αρνητικές επιπτώσεις στα φυτά αφού τα αερολύματα καλύπτουν την επιφάνεια των φύλλων, μειώνουν το διεισδυτικό φως και εμποδίζουν το άνοιγμα των στομάτων (Gheorghe and Ion 2011). Η γεινίαση με τη λεκάνη της Μεσογείου με την αφρικανική έρημο, έχει ως αποτέλεσμα συχνές εστίες σκόνης που αυξάνουν τα επίπεδα αεροζόλ και την εναπόθεση θρεπτικών ουσιών στη Μεσόγειο (Kanakidou et al. 2020). Επιπλέον, οι εστίες σκόνης μπορούν επίσης να μεταφέρουν παθογόνους παράγοντες στη Μεσόγειο (Polymenakou et al. 2008) και σε άλλα οικοσυστήματα προκαλώντας την υποβάθμισή τους, όπως έχει προταθεί για τα οικοσυστήματα της Καραϊβικής (Foreman et al. 2006; Garrison et al. 2003).

Τέλος, η εντατικοποίηση των γεωργικών δραστηριοτήτων για την κάλυψη των ανθρώπινων αναγκών για διατροφή, έχει οδηγήσει σε μόλυνση του εδάφους μέσω της υπερβολικής χρήσης λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων. Ο ψεκασμός πολλών φυτοφαρμάκων στην ατμόσφαιρα κατά εντόμων, φυτοπαθογόνων ή άλλων παρασίτων, προκειμένου να βελτιωθεί η ποιότητα των προϊόντων και να αυξηθούν οι αποδόσεις διαφόρων καλλιεργειών, έχει συμβάλει στην ατμοσφαιρική ρύπανση των γεωργικών περιοχών. Τα φυτοφάρμακα περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα ενώσεων: εντομοκτόνα, ζιζανιοκτόνα, μυκητοκτόνα, ρυθμιστές ανάπτυξης φυτών και άλλα (Aktar et al. 2009). Ψεκάζονται στις καλλιέργειες και έτσι παραμένουν εν μέρει στην ατμόσφαιρα, μεταφέρονται από τον άνεμο και εναποτίθενται στα κοντινά εδάφη, επεκτείνοντας έτσι τη μόλυνση και παρέχοντας ένα πρόσθετο μονοπάτι για τα φυτοφάρμακα να διεισδύσουν στα φυτά μέσω του εδάφους. Τα τοξικά μέταλλα αποτελούν μια άλλη κατηγορία σημαντικών ατμοσφαιρικών ρύπων που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα σε χαμηλές συγκεντρώσεις, οι οποίοι εναποτίθενται και μπορούν να συσσωρευτούν στα εδάφη (Hernandez et al. 2003), στα ιζήματα (N'Guessan et al. 2009) και στους οργανισμούς (Kabata-Pendias and Pendias 2001). Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα Παρακολούθησης και Αξιολόγησης-EMEP 2018). Επίμονες οργανικές ενώσεις και τοξικά μέταλλα τείνουν να συσσωρεύονται στα φυτά, με αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσής τους στους ιστούς των οργανισμών σε διαδοχικά υψηλότερα επίπεδα, εισερχόμενοι στην τροφική αλυσίδα (Liu et al. 2005). Ο εμπλουτισμός με μέταλλα εδαφών σε γεωργικές και αστικές περιοχές της Ελλάδας (Kelepertzis 2014) και της Ισπανίας (Acosta et al. 2011) έχουν αποδοθεί σε διαδικασίες συσσώρευσης που προκύπτουν από παρατεταμένες εφαρμογές μεγάλων ποσοτήτων λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων-μυκητοκτόνων (χαλκός (Cu), ψευδάργυρο (Zn), κάδμιο (Cd), μόλυβδος (Pb) και αρσενικό (As)), καθώς και από βιομηχανικές δραστηριότητες και εναπόθεση μετάλλων λόγω του μεγάλου όγκου κυκλοφορίας οχημάτων (Pb και Cd). Η ρύπανση της βλάστησης τόσο από μέταλλα όσο και από φυτοφάρμακα μπορεί να είναι επιβλαβής για την ανθρώπινη υγεία καθώς αυτοί οι ρύποι μπορούν να διεισδύσουν στην τροφική αλυσίδα (Nasreddine and Parent-Massin 2002). Τέλος, τα βιοαποδομήσιμα απορρυπαντικά που απορρίπτονται στη θάλασσα μπορούν στη συνέχεια να μεταφερθούν στην ατμόσφαιρα μέσω της παραγωγής θαλάσσιου σπρέι που οδηγεί σε ατμοσφαιρική ρύπανση. Η εναπόθεση (φυσικού ή μολυσμένου) θαλάσσιου ψεκασμού στα φύλλα των φυτών, ευνοεί τη διείσδυση αλατιού στα φυτά προκαλώντας τον θάνατό τους. Οι επιπτώσεις της προαναφερθείσας ρύπανσης μπορούν να παρατηρηθούν σε ορισμένα παράκτια δάση γύρω από τη Μεσόγειο Θάλασσα (Garrec 2020).



Εικόνα 4: Αέριοι και σωματιδιακοί ατμοσφαιρικοί ρύποι που μεταφέρονται στα φυτά μέσω της στοματικής και μη στοματικής πρόσληψης από τα φύλλα καθώς και μέσω της εναπόθεσης στο έδαφος και της επακόλουθης πρόσληψης από τις ρίζες. (εικόνα από (Kanakidou et al., 2022a)

Πίνακας 2. Κύριες κατηγορίες ατμοσφαιρικών ρύπων, οι οδοί μέσω των οποίων εισέρχονται στα φυτά και οι κύριες επιδράσεις τους στα φυτά (από Kanakidou et al., 2022a).

Ατμοσφαιρικός ρύπος	Μονοπάτι μεταφοράς	Επίδραση στη βλάστηση
Οζόν (O ₃)	Μονοπάτι μέσω στομάτων, χωρίς εμπλοκή στομάτων εναπόθεση στα φύλλα	<ul style="list-style-type: none"> • Αύξηση των ενεργών ειδών οξειγόνου • Αλλαγές στις φυσιολογικές διεργασίες του φυτού • Μειωμένη φωτοσύνθεση • Μειωμένες αποδόσεις καλλιεργειών
Δραστικό άζωτο (N) (κυρίως NO _x , NH ₃ , HNO ₃ , νιτρικά και αμμωνιακά ιόντα)	Στόματα, εναπόθεση στα φύλλα	<ul style="list-style-type: none"> • Χαμηλά επίπεδα → σύνθεση αμινοξέων/πρωτεϊνών • Υψηλά επίπεδα → Μειωμένη φωτοσυνθετική δραστηριότητα • Αλλαγές στη στοιχειομετρία των φυτών και του εδάφους (N/P) • N-επαγόμενος περιορισμός P • Ο ευτροφισμός του εδάφους και του νερού που οδηγεί σε φυτικές τοξικότητες ή ελλείψεις και απώλειες βιοποικιλότητας

Θείο (S) (κυρίως SO ₂ , H ₂ SO ₄ , Θειικά)	Στόματα, εναπόθεση στα φύλλα	<ul style="list-style-type: none"> Χαμηλά επίπεδα → Πρωτεϊνοσύνθεση Υψηλά επίπεδα → Μείωση ανοίγματος στομίων, καταπόνηση νερού, αντικατάσταση O₂ σε κυψελωτό υλικό Αποικοδόμηση χλωροφύλλης Οξίνιση μετά από εναπόθεση σε φυτά και εδάφη Οξίνιση του εδάφους/απώλειες θρεπτικών στοιχείων
Όξινη εναπόθεση (κυρίως N, S)	εναπόθεση στα φύλλα και στο έδαφος	<ul style="list-style-type: none"> Οξίνιση του εδάφους-απώλεια θρεπτικών ουσιών μέσω της έκπλυσης ανόργανων και θρεπτικών ουσιών ανάπτυξης φυτών, με αποτέλεσμα κιτρίνισμα των φύλλων, αύξηση της ευπάθειας των φυτών, δέντρα που πεθαίνουν και διαλυτοποίηση τοξικών μετάλλων. απώλεια της ποικιλότητας των φυτών
Αιωρούμενα σωματίδια (περιλαμβάνουν επίσης S, N και μέταλλα)	εναπόθεση στα φύλλα και στο έδαφος	<ul style="list-style-type: none"> Διάχυτη ακτινοβολία, κλείσιμο των στομάτων Οξίνιση εδαφών, έκπλυση ορυκτών, ανεπάρκεια ορυκτών και θρεπτικών ουσιών Συσσώρευση ρύπων στα φυτά Φορείς φυτικών ασθενειών
Μέταλλα	εναπόθεση στα φύλλα και στο έδαφος, και δέσμευση από τις ρίζες	<ul style="list-style-type: none"> Συσσώρευση στα φυτά και στα άκρα των φύλλων Διαταραχή των φυσιολογικών διεργασιών του φυτού ανάλογα με το μέταλλο Μόλυνση τροφικών αλυσίδων
Πεσσιτίδια	εναπόθεση στα φύλλα και στο έδαφος, και δέσμευση από τις ρίζες	<ul style="list-style-type: none"> Συσσώρευση στα φυτά Μόλυνση της διατροφική αλυσίδας
Αλογόνα (Cl ₂ , HCl, HF)	Στόματα, εναπόθεση στα φύλλα	<ul style="list-style-type: none"> Παρεμβαίνουν στη δραστηριότητα των ενζύμων Βλάβη στις κυτταρικές μεμβράνες των φυτών Διαταραχή του κυτταρικού μεταβολισμού του ασβεστίου Νέκρωση, Θάνατος φυτών

Η ατμοσφαιρική εναπόθεση ρύπων παρέχει θρεπτικά συστατικά και τοξικές ενώσεις ή τα προϊόντα τους στη βλάστηση είτε μέσω άμεσης πρόσληψης από το φύλλωμα είτε με έμμεση πρόσληψη μέσω των ριζών των φυτών. Η συσσώρευση ρύπων στο περιβάλλον έχει μακροπρόθεσμες επιπτώσεις στη βλάστηση και το έδαφος, επομένως απαιτεί μεγάλες περιόδους ανάκτησης μετά τη διακοπή της συσσώρευσης. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για την εναπόθεση N, η οποία οδηγεί σε συσσώρευση N πάνω από τα βέλτιστα επίπεδα οικοσυστήματος στα εδάφη, συνεπάγεται οξίνιση του εδάφους και οδηγεί σε μείωση της βιοποικιλότητας και αλλαγή της σύνθεσης των φυτοκοινωνιών.

Πράγματι, αλλαγές στη στοιχειομετρία των θρεπτικών συστατικών έχουν παρατηρηθεί σε φυτά που εκτέθηκαν σε υπερβολικά υψηλά επίπεδα N στο έδαφος που προκύπτουν από την εναπόθεση ανθρωπογενούς αντιδραστικού αζώτου. Όπως και σε άλλες τοποθεσίες, ο ανθρωπογενής περιορισμός του P έχει παρατηρηθεί στην Ευρώπη και τη Μεσόγειο λόγω ανθρωπογενούς εναπόθεσης N. Τέτοιες αλλαγές στη σύνθεση του οικοσυστήματος πρέπει να αξιολογούνται προσεκτικά, ιδιαίτερα υπό συνθήκες κλιματικής αλλαγής που δυνητικά αυξάνουν την εμφάνιση σοβαρών γεγονότων ξηρασίας. Πράγματι, έχουν δειχθεί και προβλεφθεί αλληλεπιδραστικά αποτελέσματα μεταξύ της κλιματικής αλλαγής και της εναπόθεσης N στη βλάστηση.

Η ανταπόκριση των φυτών στην ατμοσφαιρική ρύπανση εκφράζεται με συμπτώματα που διαφέρουν ανάλογα με το φυτικό είδος και την ποικιλία και τον τύπο του ρύπου. Έτσι, οι διαταραχές των φυτών που προκαλούνται από την ατμοσφαιρική ρύπανση μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να συναχθούν τα επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης, μέσω της λεγόμενης διαδικασίας βιοπαρακολούθησης. Ωστόσο, δεδομένου ότι η χρήση βιοδεικτών απαιτεί μια σαφή σχέση μεταξύ της αιτίας και της απόκρισης των φυτών, αυτή η προσέγγιση περιπλέκεται από τη μη γραμμική απόκριση των οικοσυστημάτων στην ατμοσφαιρική ρύπανση και την κλιματική αλλαγή. Παρά την πολυπλοκότητα αυτή, η δύναμη της βιοπαρακολούθησης για την αναδόμηση της επιρροής της ρύπανσης του παρελθόντος, χρησιμοποιώντας για παράδειγμα καλά διατηρημένα βοτανοτροφεία σε σύγκριση με τη σημερινή κατάσταση, μπορεί να συμβάλει στην προσπάθεια απόκτησης μιας χωρικής άποψης των επιπτώσεων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης γύρω από τις περιοχές της Μεσογείου.

Επίδραση της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης στο θαλάσσιο σύστημα της Μεσογείου

Η Μεσόγειος Θάλασσα είναι ένα ολιγοτροφικό ημίκλειστο περιβάλλον όπου η ατμοσφαιρική εναπόθεση αποτελεί σημαντικό μοχλό για τη βιολογική δραστηριότητα. Η παρούσα μελέτη χρησιμοποιεί ένα τρισδιάστατο ατμοσφαιρικό μοντέλο μεταφοράς

και χημείας για τον υπολογισμό και την αξιολόγηση των ροών ατμοσφαιρικής εναπόθεσης αζώτου (N), φωσφόρου (P) και σιδήρου (Fe) στη Μεσόγειο θάλασσα. Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη τόσο τα ανόργανα όσο και τα οργανικά κλάσματα αυτών των ροών και τα συγκρίνει με άλλες πηγές αυτών των θρεπτικών συστατικών που είναι εξωτερικές στον ωκεανό. Οι εκτιμώμενες ατμοσφαιρικές ροές εναπόθεσης διαλυτών θρεπτικών συστατικών ανέρχονται σε $1281 \text{ Gg-N } \gamma^{-1}$, $4.31 \text{ Gg-P } \gamma^{-1}$ και $6.32 \text{ Gg-Fe } \gamma^{-1}$ για τη σημερινή εποχή, και βρίσκονται εντός του εύρους των λίγων σχετικών εκτιμήσεων που είναι διαθέσιμες στη βιβλιογραφία. Υπολογίζεται σχεδόν 6 φορές αύξηση της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης διαλυτού N από το 1850 ως αποτέλεσμα της αύξησης των ανθρωπογενών εκπομπών και των εκπομπών από καύσεις βιομάζας από την εποχή αυτή μέχρι σήμερα, ενώ οι ροές εναπόθεσης διαλυτού P και Fe έχουν αυξηθεί κατά 59% και 114%, αντίστοιχα. Ωστόσο, για τις μελλοντικές εκπομπές (2100), η εναπόθεση N αναμένεται να αυξηθεί ελαφρά (4%) ενώ οι διαλυτές ροές P και Fe θα μειωθούν κατά 34% και 32% σε σύγκριση με τις τρέχουσες εκτιμήσεις.

Οι ετήσιες ροές εναπόθεσης διαλυτών οργανικών N και P υπολογίζονται ότι είναι 12% και 28–83% του συνολικού διαλυτού N και P, αντίστοιχα, στη σημερινή ετήσια εναπόθεση πάνω από τη Μεσόγειο Θάλασσα. Ωστόσο, για να συμφωνήσουν τα αποτελέσματα του μοντέλου με τις παρατηρούμενες ροές στη δυτική και ανατολική Μεσόγειο, χρειάζεται ~ 14 φορές υψηλότερη ροή διαλυτού P, ειδικότερα οργανικού P και τουλάχιστον 2.5 φορές υψηλότερη ροή διαλυτού Fe στο μοντέλο. Τόσο υψηλές ροές μπορεί να οφείλονται σε υψηλότερες εκπομπές διαλυτού Fe και P από καύσεις, σε υψηλότερες εκπομπές σκόνης ή διαλυτοποίηση Fe και P που περιέχονται από τα αερολύματα σκόνης, και επίσης υψηλότερη ροή οργανικού P που σχετίζεται με βιοαερολύματα, από αυτές που χρησιμοποιούνται σήμερα στα παγκόσμια μοντέλα. Συνολικά, οι υπολογισμένες ροές εναπόθεσης παρέχουν μια ολοκληρωμένη χωρικά πλήρη εικόνα του τις ατμοσφαιρικές εισροές στο μεσογειακό θαλάσσιο οικοσύστημα, οι οποίες είναι δυνητικά σημαντικές για την καθαρή πρωτογενή παραγωγή και τον κύκλο του άνθρακα των ωκεανών

Η πιθανή ατμοσφαιρική δέσμευση N_2 μπορεί να εκτιμηθεί με βάση τη ροή ατμοσφαιρικής εναπόθεσης διαλυτού P και τη κυτταρική αναλογία N:P για διαζωτροφικούς οργανισμούς, με αναφερόμενες αναλογίες που κυμαίνονται από 40 έως 140 mol N/mol P (δηλ. 18 έως 56 g-N/g-P , Okin et al., 2011). Το ποσό της δέσμευσης N_2 που δυνητικά ενεργοποιείται από την ατμοσφαιρική εναπόθεση DP εκτιμάται μεταξύ 70 και $215 \text{ Gg-N } \gamma^{-1}$, δηλαδή 6 έως 18 φορές μικρότερο από την ατμοσφαιρική εναπόθεση διαλυτού N. Ομοίως, ακολουθώντας καθιερωμένη μεθοδολογία (Baker et al., 2003; Theodosi et al., 2010a,b), η δέσμευση N_2 που προέρχεται από την εναπόθεση διαλυτού σιδήρου (DFe) μπορεί να προσεγγιστεί χρησιμοποιώντας τον κυτταρικό λόγο Fe:N μεταξύ 2.8 και $4.9 \text{ mmol-Fe/mol-N}$ (δηλ. 11 και 20 mg-Fe/g-N) για οργανισμούς δέσμευσης N_2 (Berman-Frank et al., 2001; Baker et

al., 2003) και υπολογίζοντας το ποσό του DFe που χρησιμοποιήθηκε για ανάπτυξη φυτοπλαγκτού που υποκινείται από την ατμοσφαιρική εναπόθεση DN. Έτσι η προκύπτουσα πιθανή δέσμευση N₂ που υποκινείται από το DFe είναι 300–500 Gg-N·γ⁻¹ για τη βασική περίπτωση και 750–1500 Gg-N γ⁻¹ για την καλύτερη εκτίμησή μας.

Πίνακας 3. Εξέλιξη των ροών εναπόθεσης των διαλυτών θρεπτικών στη Μεσόγειο θάλασσα σε Gg θρεπτικού το χρόνο. Η ‘καλύτερη εκτίμησή’ για το παρόν δίνεται μέσα σε παρενθέσεις (από Kanakidou et al. 2020)

	Past	Present	Future
DIN	139	1131	1238
DON	88	150	91
DN	227	1281	1330
DIP	1.56	2.89 (4.43)	1.69
DOP	0.96	1.42 (57.84)	0.97
DP	2.52	4.31 (62.27)	2.66
DFe	2.96	6.32 (15.93)	4.30

Η χαμηλότερη εκτίμηση για την πιθανή δέσμευση ατμοσφαιρικού N₂ είναι ~4 φορές χαμηλότερη από την ατμοσφαιρική εναπόθεση DN υπολογισμένη από το μοντέλο και υψηλότερη από αυτό που εκτιμάται ότι θα υποστηριχθεί από την ατμοσφαιρική εναπόθεση DP βάσης (Πίνακας 3). Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη τις αβεβαιότητες, δηλαδή με βάση την εκτίμηση πηγών που συμφωνεί καλύτερα με τις παρατηρήσεις, οι ροές εναπόθεσης DFe και DP θα μπορούσαν να είναι τουλάχιστον 2.5 φορές και ~ 14 φορές υψηλότερα από αυτά της βάσης θήκης, αντίστοιχα. Επομένως, η πιθανή δέσμευση N₂ που υποκινείται από το DFe θα μπορούσε να είναι ίδιας τάξης με την εναπόθεση DN στην περιοχή και περίπου το ήμισυ του υψηλότερη στερέρωση N₂ που διεγείρεται από την υψηλότερη εκτίμηση της εναπόθεσης DP.

Αυτά τα αποτελέσματα ενισχύουν τη σημασία της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης για τον ισοζύγιο του N στη Μεσόγειο Θάλασσα. Επιπλέον, χρησιμοποιώντας το κυτταρική αναλογία C:N:P του Redfield 106:16:1, η ποσότητα C που θα μπορούσε να δεσμευθεί στο θαλασσινό νερό λόγω της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης διαλυτού N (DN) μπορεί να εκτιμηθεί σε 7.3 Tg-C γ⁻¹ ή σε 14.5 Tg-C γ⁻¹ εάν μια αναλογία C:N ίση προς 13:1 χρησιμοποιηθεί όπως προτείνεται για ολιγοτροφικές περιοχές (Dugdale και Wilkerson, 1988). Αυτές οι εκτιμημένες ροές δέσμευσης C που υποστηρίζονται από την ατμοσφαιρική εναπόθεση DN μπορούν να υποστηρίξουν περίπου το ήμισυ της νέας πρωτογενούς παραγωγής στη Μεσόγειο Θάλασσα (Πίνακας 4). Αυτή η εκτίμηση συμφωνεί γενικά με τις εκτιμήσεις από τους Guerzoni και Molinaroli (2005) ότι η ατμοσφαιρική εναπόθεση του N αντιπροσωπεύει έως το 60% και περίπου το 12% της νέας παραγωγής στη Δύση και Ανατολική Μεσόγειο, αντίστοιχα. Ωστόσο, η καθαρή πρωτογενής παραγωγή που συντηρείται από ατμοσφαιρικές εισροές N μπορεί να είναι

χαμηλότερη από την υπεράνω εκτίμηση αφού στη Μεσόγειο η παραγωγικότητα περιορίζεται από τη διαθεσιμότητα του P. Έτσι, με βάση την αναλογία Redfield και λαμβάνοντας υπόψη τόσο το ανόργανο όσο και τον οργανικό P, η ατμοσφαιρική εναπόθεση DP θα μπορούσε να υποστηρίξει μεταξύ 0.2 Tg-C y^{-1} (βασική περίπτωση) και 3.1 Tg-C y^{-1} (καλύτερη περίπτωση). Η εκλεκτική απελευθέρωση του P (σε σχέση με το N) από τα βυθιζόμενα σωματίδια στα επιφανειακά νερά, όπως συζητείται από τους Zamora et al. (2010) και Χριστοδουλάκη et al. (2013), θα μπορούσε να εξηγήσει την πολύ υψηλότερη νέα πρωτογενή παραγωγή που υποστηρίζεται από την ατμοσφαιρική εναπόθεση θρεπτικών ουσιών από αυτή που εκτιμάται εδώ με βάση μόνο την εναπόθεση του διαλυτού Π (DP). Για να ληφθεί υπόψη μια τέτοια διαδικασία χρειάζεται ένα μοντέλο βιογεωχημείας των ωκεανών.

Πίνακας 4. Εκτίμηση της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης διαλυτών θρεπτικών, δέσμευσης N_2 και C που υποστηρίζεται από την ατμοσφαιρική εναπόθεση στην Μεσόγειο θάλασσα και σύγκριση με βιβλιογραφικές εκτιμήσεις για νέα πρωτογενή παραγωγικότητα υποστηριζόμενη από εξωτερικές πηγές και συνολική πρωτογενή παραγωγική. (από Kanakidou et al., 2020)

Deposition (Gg y^{-1})	N_2 fixation (Gg-N.y^{-1})	C fixation (Tg-C y^{-1})
DFe (6.32–15.93)	300–1500 ^a	
DP (4.01–61.65)	70–3305 ^a	0.2–3.1 ^a
DN (1281)	^c	7.3–14.5 ^b
		New primary production: 27 ^d
		Primary production: 91 ^d

^a Using best case estimate and the highest ratios; see text.

^b Using a C:N ratio of 13:1, as suggested for oligotrophic areas (Dugdale and Wilkerson, 1988).

^c DN atmospheric deposition may induce, due to primary production, reduction in O_2 in the seawater and therefore denitrification that will lead to N_2O production (Duce et al., 2008; Suntharalingam et al., 2012).

^d (Dugdale and Wilkerson, 1988).

Σημειώστε ότι οι εκτιμήσεις που παρουσιάζονται στον Πίνακα πρέπει να ληφθούν υπόψη με μεγάλη προσοχή, αφού είναι γνωστό ότι υπάρχουν σημαντικές αποκλίσεις από την αναλογία Redfield στο θαλάσσιο περιβάλλον. Εξάλλου, προσθήκες ατμοσφαιρικού N μπορούν να διεγείρουν την ανάπτυξη βακτηρίων, απελευθερώνοντας έτσι το C στην ατμόσφαιρα, αντί για δέσμευση του C στο θαλάσσιο περιβάλλον. Επομένως, αξιολόγηση της δυνητικά σημαντικής επίδρασης της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης διαλυτών θρεπτικών ουσιών που υπολογίζεται εδώ για το θαλάσσιο περιβάλλον απαιτεί τη μοντελοποίηση της βιογεωχημείας των ωκεανών και των πολύπλοκων βιογεωχημικών αλληλεπιδράσεων στο θαλάσσιο περιβάλλον.

Δημοσιεύσεις PANACEA

- Kanakidou, M., Myriokefalitakis, S., and Tzagkaraki, M.: Atmospheric inputs of nutrients to the Mediterranean Sea, *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 171(June), 104606. doi:10.1016/j.dsr2.2019.06.014, 2020.
- Kanakidou M., Sfakianaki M., and Probst A., Impact of air pollution on terrestrial ecosystems, Chapter 10.3 in *Atmospheric Chemistry in the Mediterranean: Vol. 2, From Air Pollutant Sources to Impacts*, François Dulac, Stéphane Sauvage, and Eric Hamonou Eds., Springer Nature Publisher, 29 pages, 2022a, in press
- Kanakidou M., Myriokefalitakis S., Papadimitriou V. C, and Nenes A.: Aerosol impacts on atmospheric and precipitation chemistry, Chapter 9.3 in *Atmospheric Chemistry in the Mediterranean: Vol. 2, From Air Pollutant Sources to Impacts*, F. Dulac, S. Sauvage, and E. Hamonou Eds., Springer Nature Publisher, 28 pages. 2020β, in press.
- Myriokefalitakis, S., Bergas-Massó, E., Gonçalves-Ageitos, M., Pérez García-Pando, C., van Noije, T., Le Sager, P., Ito, A., Athanasopoulou, E., Nenes, A., Kanakidou, M., Krol, M. C., and Gerasopoulos, E.: Multiphase processes in the EC-Earth model and their relevance to the atmospheric oxalate, sulfate, and iron cycles, *Geosci. Model Dev.*, 15, 3079–3120, <https://doi.org/10.5194/gmd-15-3079-2022>, 2022.
- Pye, H. O. T., Nenes, A., Alexander, B., Ault, A. P., Barth, M. C., Clegg, S. L., Collett, J. L., Jr., Fahey, K. M., Hennigan, C. J., Herrmann, H., Kanakidou, M., Kelly, J. T., Ku, I.-T., McNeill, V. F., Riemer, N., Schaefer, T., Shi, G., Tilgner, A., Walker, J. T., ... Zuend, A. (2020). The acidity of atmospheric particles and clouds. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20, 4809–4888. <https://doi.org/10.5194/acp-20-4809-2020>

Άλλες βιβλιογραφικές αναφορές

- Acosta, J. A., Faz, A., Martínez-Martínez, S., and Arocena, J. M.: Enrichment of metals in soils subjected to different land uses in a typical Mediterranean environment (Murcia City, southeast Spain), *Applied Geochemistry*, 26(3), 405–414, doi:10.1016/j.apgeochem.2011.01.023, 2011.
- Aktar, W., Sengupta, D., and Chowdhury, A.: Impact of pesticides use in agriculture: Their benefits and hazards. *Interdisciplinary Toxicology*, 2(1), 1–12. doi:10.2478/v10102-009-0001-7, 2009.
- Avila, A., Queralt-Mitjans, I., and Alarcón, M.: Mineralogical composition of African dust delivered by red rains over northeastern Spain, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 102(18), 21977–21996, doi:10.1029/97jd00485, 1997.

- Cataldo, D. A., and Wildung, R. E.: Soil and plant factors influencing the accumulation of heavy metals by plants. *Environmental Health Perspectives*, Vol. 27(December), 149–159, doi:10.2307/3428874, 1978
- Foreman, W., States, U., Survey, G., Griffin, D.W., Mohammed, A., Ramsubhag, A.: Saharan dust - A carrier of persistent organic pollutants , metals and microbes to the Caribbean? Saharan dust – a carrier of persistent organic pollutants , metals and microbes to the Caribbean? *Int. J. Trop. Biol.* 54 (suppl), 9–21, 2006
- Gandois, L., and Probst, A.: Localisation and mobility of trace metal in silver fir needles, *Chemosphere*, 87(2), 204–210, doi:10.1016/j.chemosphere.2011.12.020, 2012.
- Garrec, J.P.: What is the impact of air pollutants on vegetation?, *Encyclopedia of the Environment*, [online ISSN 2555-0950], url : <https://www.encyclopedia-environnement.org/en/life/impact-air-pollutants-on-vegetation/>, Retrieved from <https://www.encyclopedia-environnement.org/en/life/impact-air-pollutants-on-vegetation/>, 2020.
- Garrison, V.H., Shinn, E.A., Foreman, W.T., Griffin, D.W., Holmes, C.W., Kellogg, C.A., Majewski, M.S., Richardson, L.L., Ritchie, K.I.M.B., Smith, G.W.: African and Asian Dust : From Desert Soils to Coral Reefs. *Bioscience* 53, 469–480, 2003.
- Gheorghe, I. F., Ion, B.: The Effects of Air Pollutants on Vegetation and the Role of Vegetation in Reducing Atmospheric Pollution, *The Impact of Air Pollution on Health, Economy, Environment and Agricultural Sources*, Mohamed K. Khallaf, IntechOpen, DOI: 10.5772/17660, 2011
- Heath, R. L.: Modification of the biochemical pathways of plants induced by ozone: What are the varied routes to change? *Environmental Pollution*, 155(3), 453–463, doi:10.1016/j.envpol.2008.03.010, 2008.
- Hernandez, L., Probst, A., Probst, J. L., and Ulrich, E.: Heavy metal distribution in some French forest soils: Evidence for atmospheric contamination, *Science of the Total Environment*, 312(1–3), 195–219, doi:10.1016/S0048-9697(03)00223-7, 2003.
- Herut, B., Krom, M. D., Pan, G., & Mortimer, R. (1999). Atmospheric input of nitrogen and phosphorus to the Southeast Mediterranean: Sources, fluxes, and possible impact. *Limnology and Oceanography*, 44, 1683–1692. <https://doi.org/10.4319/lo.1999.44.7.1683>
- Hill, A. C.: Vegetation: A Sink for Atmospheric Pollutants, *Journal of the Air Pollution Control Association*, 21(6), 341–346, doi:10.1080/00022470.1971.10469535, 1971.
- Huneus, N., Schulz, M., Balkanski, Y., Griesfeller, J., Prospero, J., Kinne, S., Bauer, S., Boucher, O., Chin, M., Dentener, F., Diehl, T., Easter, R., Fillmore, D., Ghan, S., Ginoux, P., Grini, A., Horowitz, L., Koch, D., Krol, M. C., ... Zender, C. S. (2011). Global dust model intercomparison in AeroCom phase I. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 7781–7816. <https://doi.org/10.5194/acp-11-7781-2011>

- Ito, T., Nenes, A., Johnson, M. S., Meskhidze, N., & Deutsch, C. (2016). Acceleration of oxygen decline in the tropical Pacific over the past decades by aerosol pollutants. *Nature Geoscience*, 9, 443–447. <https://doi.org/10.1038/NGEO2717>
- Ito, A., Myriokefalitakis, S., Kanakidou, M., Mahowald, N. M., Scanza, R. A., Hamilton, D. S., Baker, A. R., Jickells, T., Sarin, M., Bikkina, S., Gao, Y., Shelley, R. U., Buck, C. S., Landing, W. M., Bowie, A. R., Perron, M. M. G., Guieu, C., Meskhidze, N., Johnson, M. S., ... Duce, R. A. (2019). Pyrogenic iron: The missing link to high iron solubility in aerosols. *Science Advances*, 5, eaau7671. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aau7671>
- Jickells, T.D., Buitenhuis, E., Altieri, K., Baker, A.R., Capone, D., Duce, R.A., Dentener, F., Fennel, K., Kanakidou, M., Laroche, J., Lee, K., Liss, P., Middelburg, J.J., Moore, J.K., Okin, G., Oschlies, A., Sarin, M., Seitzinger, S., Sharples, J., Singh, A., Suntharalingam, P., Uematsu, M., Zamora, L.M., 2017. Global biogeochemical cycles. *Glob. Biogeochem. Cycles* 31, 1–17. <https://doi.org/10.1002/2016GB005586>.
- Kabata-Pendias, A., and Pendias, H.: Biogeochemistry of trace elements. In *Trace Elements in Soils and Plants, Third Edition (Vol. 2nd)*, doi:10.1201/b10158-25, 2001.
- Kanakidou, M., Mihalopoulos, N., Kindap, T., Im, U., Vrekoussis, M., Gerasopoulos, E., Dermitzaki, E., Unal, A., Koçak, M., Markakis, K., Melas, D., Kouvarakis, G., Youssef, A. F., Richter, A., Hatzianastassiou, N., Hilboll, A., Ebojie, F., Wittrock, F., von Savigny, C., John P. Burrows, J. P., Ladstaetter-Weissenmayerh, A., and Moubasher, H.: Megacities as hot spots of air pollution in the East Mediterranean, *Atmospheric Environment*, 45(6), 1223–1235, doi:10.1016/j.atmosenv.2010.11.048, 2011.
- Kanakidou, M., Duce, R.A., Prospero, J.M., Baker, A.R., Benitez-Nelson, C., Dentener, F.J., Hunter, K.A., Liss, P.S., Mahowald, N., Okin, G.S., Sarin, M., Tsigaridis, K., Uematsu, M., Zamora, L.M., Zhu, T., 2012. Atmospheric fluxes of organic N and P to the global ocean. *Glob. Biogeochem. Cycles* 26, 1–12. <https://doi.org/10.1029/2011GB004277>.
- Kanakidou, M., Myriokefalitakis, S., Daskalakis, N., Fanourgakis, G., Nenes, A., Baker, A.R., Tsigaridis, K., Mihalopoulos, N., 2016. Past, present, and future atmospheric nitrogen deposition. *J. Atmos. Sci.* 73, 2039–2047. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-15-0278.1>.
- Kanakidou, M., Myriokefalitakis, S., Tsigaridis, K., 2018. Aerosols in atmospheric chemistry and biogeochemical cycles of nutrients. *Environ. Res. Lett.* 13, 1–22. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabcbd>.
- Kelepertzis, E.: Accumulation of heavy metals in agricultural soils of Mediterranean: Insights from Argolida basin, Peloponnese, Greece, *Geoderma*, 221–222, 82–90, doi:10.1016/j.geoderma.2014.01.007, 2014
- Kok, J. F., Ridley, D. A., Zhou, Q., Zhao, C., Miller, R. L., Heald, C. L., Ward, D. S., Albani, S., & Haustein, K. (2017). Smaller desert dust cooling effect estimated from analysis of desert dust size and abundance. *Nature Geoscience*, 10, 274–278. <https://doi.org/10.1038/NGEO2912>

- Lavorel, S.: Ecological diversity and resilience of Mediterranean vegetation to disturbance. *Diversity and Distributions*, 5: 3-13. doi:10.1046/j.1472-4642.1999.00033.x, 1999.
- Liu, H., Probst, A., and Liao, B.: Metal contamination of soils and crops affected by the Chenzhou lead/zinc mine spill (Hunan, China), *Science of the Total Environment*, 339(1–3), 153–166, doi:10.1016/j.scitotenv.2004.07.030, 2005.
- Markaki, Z., Oikonomou, K., Kocak, M., Kouvarakis, G., Chaniotaki, A., Kubilay, N., & Mihalopoulos, N. (2003). Atmospheric deposition of inorganic phosphorus in the Levantine Basin, eastern Mediterranean: Spatial and temporal variability and its role in seawater productivity. *Limnology and Oceanography*, 48, 1557–1568. <https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.4.1557>
- Markaki, Z., Loýe-Pilot, M. D., Violaki, K., Benyahya, L., & Mihalopoulos, N. (2010). Variability of atmospheric deposition of dissolved nitrogen and phosphorus in the Mediterranean and possible link to the anomalous seawater N/P ratio. *Marine Chemistry*, 120, 187–194. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2008.10.005>.
- Mills, G., Sharps, K., Simpson, D., Pleijel, H., Frei, M., Burkey, K., Emberson, L., Uddling, J., Broberg, M., Feng, Z., Kobayashi, K. and Agrawal, M.: Closing the global ozone yield gap: Quantification and cobenefits for multistress tolerance. *Global Change Biology*, 24(10), 4869–4893, <https://doi.org/10.1111/gcb.14381>, 2018.
- Myriokefalitakis, S., Daskalakis, N., Mihalopoulos, N., Baker, A.R., Nenes, A., Kanakidou, M., 2015. Changes in dissolved iron deposition to the oceans driven by human activity: a 3-D global modelling study. *Biogeosciences* 12, 3973–3992. <https://doi.org/10.5194/bg-12-3973-2015>.
- Myriokefalitakis, S., Fanourgakis, G., Kanakidou, M., 2017. The contribution of bioaerosols to the organic carbon budget of the atmosphere. In: Karakostas, T.S. (Ed.), *Perspectives on Atmospheric Sciences* pp. 845–851. Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-35095-0>.
- Myriokefalitakis, S., Ito, A., Kanakidou, M., Nenes, A., Krol, M.C., Mahowald, N.M., Scanza, R.A., Hamilton, D.S., Johnson, M.S., Meskhidze, N., Kok, J.F., Guieu, C., Baker, A.R., Jickells, T.D., Sarin, M.M., Bikina, S., Shelley, R., Bowie, A., Perron, M.M.G., Duce, R.A., 2018. Reviews and syntheses: the GESAMP atmospheric iron deposition model intercomparison study. *Biogeosciences* 15, 6659–6684. <https://doi.org/10.5194/bg-15-6659-2018>.
- Myriokefalitakis, S., Nenes, A., Baker, A.R., Mihalopoulos, N., Kanakidou, M., 2016b. Bioavailable atmospheric phosphorous supply to the global ocean: a 3-D global modeling study. *Biogeosciences* 13, 6519–6543. <https://doi.org/10.5194/bg-13-6519-2016>.
- Myriokefalitakis, S., Vignati, E., Tsigaridis, K., Papadimas, C., Sciare, J., Mihalopoulos, N., Facchini, M.C., Rinaldi, M., Dentener, F.J., Ceburnis, D., Hatzianastasiou, N., O'Dowd,

- C.D., van Weele, M., Kanakidou, M., 2010. Global modeling of the oceanic source of organic aerosols. *Adv. Meteorol.* 1–16. 2010. <https://doi.org/10.1155/2010/939171>.
- Nasreddine, L., and Parent-Massin, D.: Food contamination by metals and pesticides in the European Union. Should we worry? *Toxicology Letters*, 127(1–3), 29–41. doi:10.1016/S0378-4274(01)00480-5, 2002.
- N'Guessan, Y. M., Probst, J. L., Bur, T., and Probst, A.: Trace elements in stream bed sediments from agricultural catchments (Gascogne region, S-W France): Where do they come from? *Science of the Total Environment*, 407(8), 2939–2952, doi:10.1016/j.scitotenv.2008.12.047, 2009.
- Ochoa-Hueso, R., Allen, E. B., Branquinho, C., Cruz, C., Dias, T., Fenn, M. E., Manrique, E., Pérez-Corona, M. E., Sheppard, L. J., and Stock, W. D.: Nitrogen deposition effects on Mediterranean-type ecosystems: An ecological assessment, *Environmental Pollution*, 159(10), 2265–2279, doi:10.1016/j.envpol.2010.12.019, 2011.
- Ochoa-Hueso, R., and Manrique, E.: Effects of nitrogen deposition and soil fertility on cover and physiology of *Cladonia foliacea* (Huds.) Willd., a lichen of biological soil crusts from Mediterranean Spain, *Environmental Pollution*, 159(2), 449–457, doi:10.1016/j.envpol.2010.10.021, 2011.
- Polymenakou, P. N., Mandalakis, M., Stephanou, E. G., and Tselepidis, A.: Particle size distribution of airborne microorganisms and pathogens during an intense African dust event in the eastern Mediterranean, *Environmental Health Perspectives*, 116(3), 292–296, doi:10.1289/ehp.10684, 2008
- Rap, A., Spracklen, D. V., Mercado, L., Reddington, C. L., Haywood, J. M., Ellis, R. J., Phillips, O. L., Artaxo, P., Bonal, D., Restrepo Coupe, N., and Butt, N.: Fires increase Amazon forest productivity, *Geophysical Research Letters*, (June), 4654–4662, doi:10.1002/2015GL063719. Received, 2015.
- Vilà, M., Burriel, J. A., Pino, J., Chamizo, J., Llach, E., Porterias, M., and Vives, M.: Association between *Opuntia* species invasion and changes in land-cover in the Mediterranean region. *Global Change Biology*, 9(8), 1234–1239. doi:10.1046/j.1365-2486.2003.00652.x, 2003.
- Mosher, E. S., Silander, J. A., and Latimer, A. M.: The role of land-use history in major invasions by woody plant species in the northeastern north american landscape. *Biological Invasions*, 11(10), 2317–2328, doi:10.1007/s10530-008-9418-8, 2009.
- Vlachogianni, T., Vogrin, M., Scoullou, M.: Biodiversity in the Mediterranean, The Regional Activity Centre for Specially Protected Areas (RAC/SPA), 1–10, Retrieved from <http://www.rac-spa.org/publications>, 2012.