



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών
—ΙΔΡΥΘΕΝ ΤΟ 1837—

Π.Μ.Σ. Οικολογία και Διαχείριση Βιοποικιλότητας
Περιβαλλοντική Βιοτεχνολογία

Βελτίωση της ποιότητας του αέρα με τη χρήση φυτικών οργανισμών

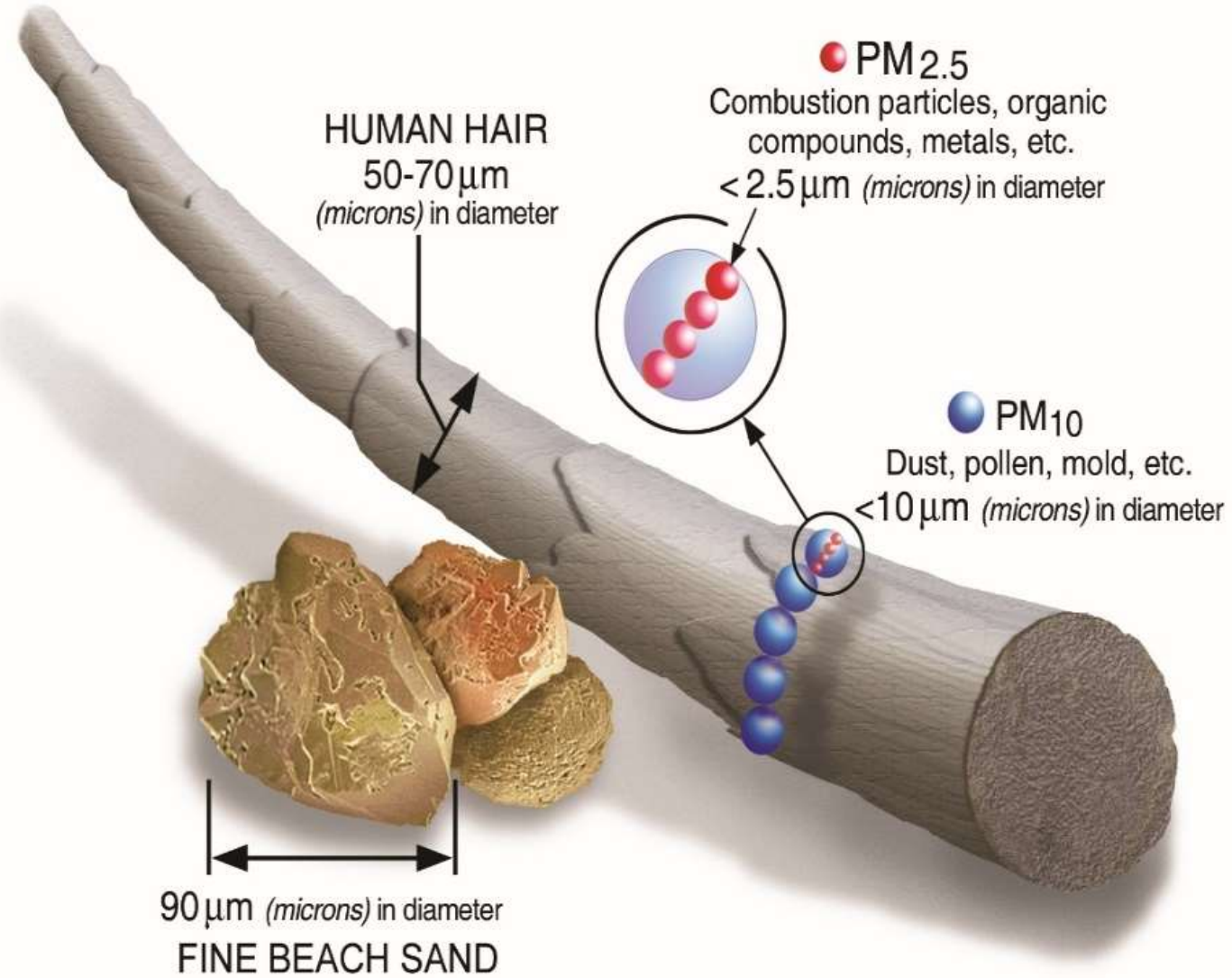
Χατζηπαύλου Λυδία
Α.Μ. 7113102500001

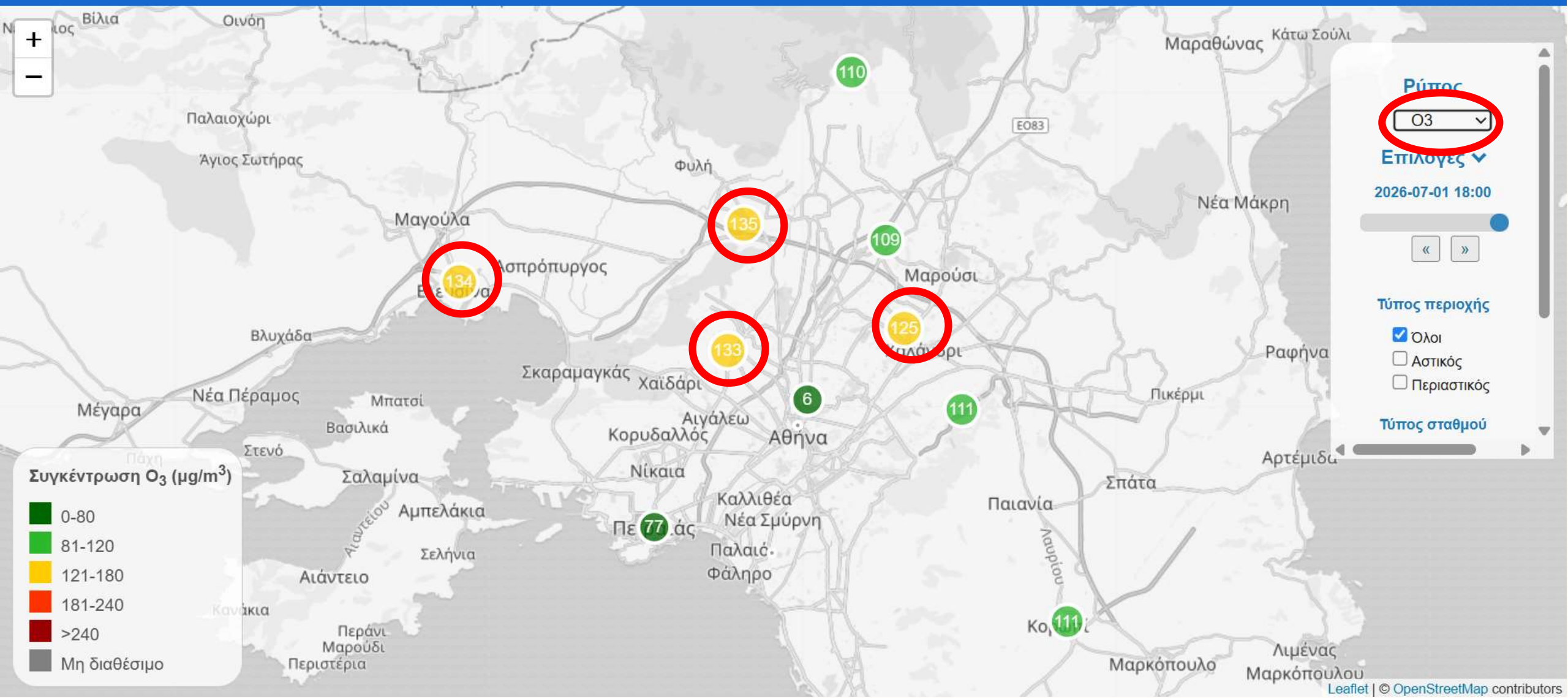
Ατμοσφαιρική ρύπανση

Ένας από τους πιο βασικούς λόγους εκπομπής ατμοσφαιρικών ρύπων στην ατμόσφαιρα αποτελεί η ανθρώπινη δραστηριότητα :

- σταθμοί παραγωγής και μετατροπής ενέργειας
- μέσα μεταφοράς
- βιομηχανικές εγκαταστάσεις
- καλλιεργούμενες εκτάσεις

- CO_2 , CO
- O_3
- VOCs
- CH_4
- NO_x , N_2O
- NH_3
- SO_2
- PM
- HM
- POPs





Βασικοί ρύποι εσωτερικού χώρου

- $PM_{2.5}$
- PM_{10}
- NO_2
- VOCs (βενζόλιο, τολουόλιο, φορμαλδεΐδη)
- PAHs
- CO
- O_3

Κύριες πηγές :

- Κάπνισμα
- Μαγείρεμα
- Συσκευές αερίου
- Θέρμανση
- Κεριά
- Καθαριστικά
- Έπιπλα
- Δομικά υλικά
- Ανεπαρκής αερισμός του χώρου

Σημαντικοί παράγοντες κρίνονται ακόμη η ηλικία του κτιρίου, η παρουσία νέων επίπλων και οι καθημερινές δραστηριότητες των ενοίκων.

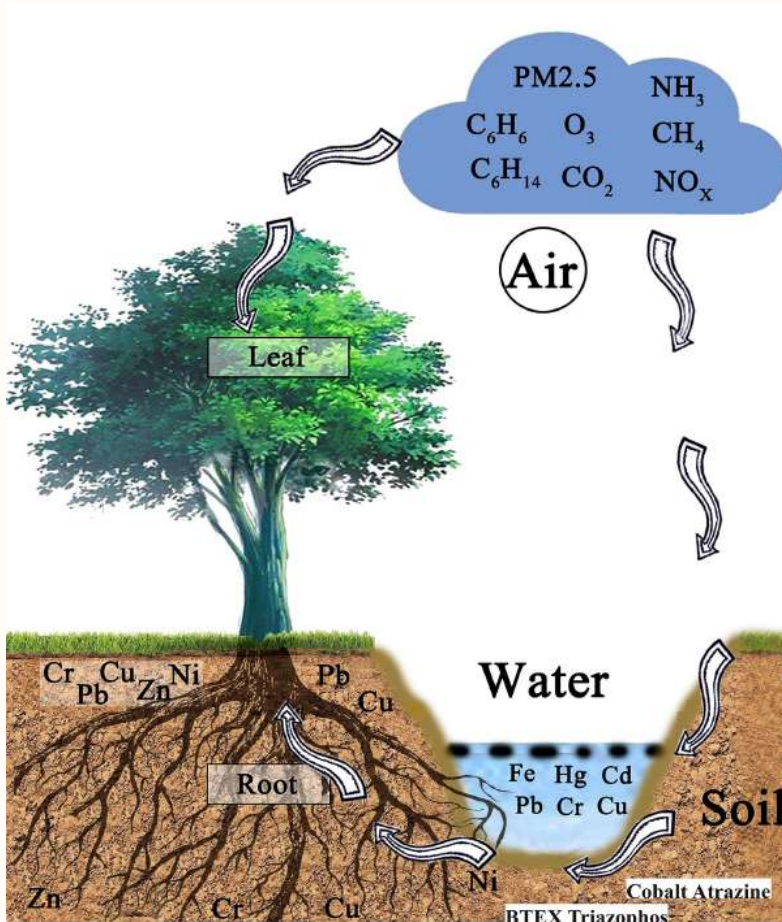
≈ 90% του χρόνου μας το περνάμε σε κλειστούς χώρους, γι' αυτό ο εσωτερικός αέρας μετράει εξίσου!

TABLE 1 | Major air pollutants and their effects on human comfort and health.

Pollutants	Adverse effects on human health
PMs ^a	Heart and lung cancer, risk of bladder cancer, nervous systems and respiratory illness
O ₃	Breathing problems, asthma, reduction of lung function, and lung diseases
NO ₂	Asthmatic bronchitis, reduced lung function growth, respiratory infections, and airway obstruction
SO ₂	Eye irritation, infections of the respiratory tract, coughing, mucus secretion, asthma and chronic bronchitis, and cardiac disease
CO	Neuropsychological impairment, headache, fatigue, dizziness, and nausea, fetal damage, myocardial ischemia
PAHs ^b	Lung cancer
Volatile organic compounds	Asthma, nocturnal breathlessness, sensitization reactions, respiratory tract, mucous membrane irritation, central nervous system symptoms, headache, drowsiness, fatigue, confusion, lethargy, and dizziness
Formaldehyde	Sneezing, coughing, minor eye irritation, irritant of the skin, respiratory tract, and nasopharyngeal cancer
Radon	Lung cancer, acute myeloid and acute lymphoblastic leukemia
Tobacco smoke	Irritation of eye, nose, and throat, asthma, lung cancer, bronchitis, pneumonia, bronchiolitis, acute childhood lower respiratory tract illnesses, and tuberculosis
Asbestos	Skin irritation, lung cancer, mesothelioma, and asbestosis

Χρήσεις φυτών στην περιβαλλοντική βιοτεχνολογία

- **Φυτοεξυγίανση αέρα**: τα φυτά χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση ρύπων κυρίως μέσω πρόσληψης από τα στόματα και δράσης μικροοργανισμών της ριζόσφαιρας



- **Βιοεξυγίανση ρυπασμένων υδάτων - ριζοδιήθηση**: χρησιμοποιούνται σε φυσικούς ή τεχνητούς υγροτόπους για την απομάκρυνση θρεπτικών, ρύπων και βαρέων μετάλλων
- **Φυτοεξυγίανση εδάφους**: τα φυτά συμβάλλουν στη διάσπαση οργανικών ρύπων αλλά και στη συσσώρευση βαρέων μετάλλων.
- **Αλληλοπάθεια και αντιμετώπιση ανεπιθύμητης βλάστησης**
- **Βιοεντομοκτόνα**
- **Βιοκαύσιμα**

Στρατηγικές φυτών για αντιμετώπιση των ατμοσφαιρικών ρύπων



Ρύθμιση των στομάτων

Τα στόματα λειτουργούν ως πρώτη γραμμή άμυνας, διότι μπορούν να περιορίσουν την είσοδο ρύπων μέσω ελέγχου της ανταλλαγής αερίων. Ακόμη, γίνεται δέσμευση των ρύπων από τα στόματα και μεταφορά τους σε οργανίδια του κυττάρου, όπως χυμοτόπιο, κυτταρικό τοίχωμα ή κυτταρική μεμβράνη.



Εφυμενίδα

Είναι μια αδιάβροχη στοιβάδα (υδροφόβα λιπαρά οξέα, αλκάνια, κηρώδεις ουσίες, αλκοόλες) που λειτουργεί ως φυσικός φραγμός απέναντι στους ρύπους. Αντίστοιχα το τρίχωμα του φυτού, ειδικά το αδενώδες, μειώνει την τοξικότητα του όζοντος πριν εισέλθει στον ιστό του φύλλου.



Μεταβολισμός

Τα φυτά αναπροσαρμόζουν τον μεταβολισμό τους π.χ. με αλλαγές στη φωτοσύνθεση και στον μεταβολισμό του αζώτου όταν εκτίθενται σε NOx.

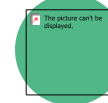


Αντιοξειδωτική άμυνα

Η έκθεση σε ατμοσφαιρικούς ρύπους προκαλεί σχηματισμό ROS μέσα στα φύλλα, με αποτέλεσμα να προκαλείται οξειδωτικό στρες στο φυτό, στη συνέχεια ενεργοποιείται η παραγωγή ενζύμων καταπολέμησης των ROS, γεγονός που είναι εις βάρος της ανάπτυξης του ίδιου του φυτού.



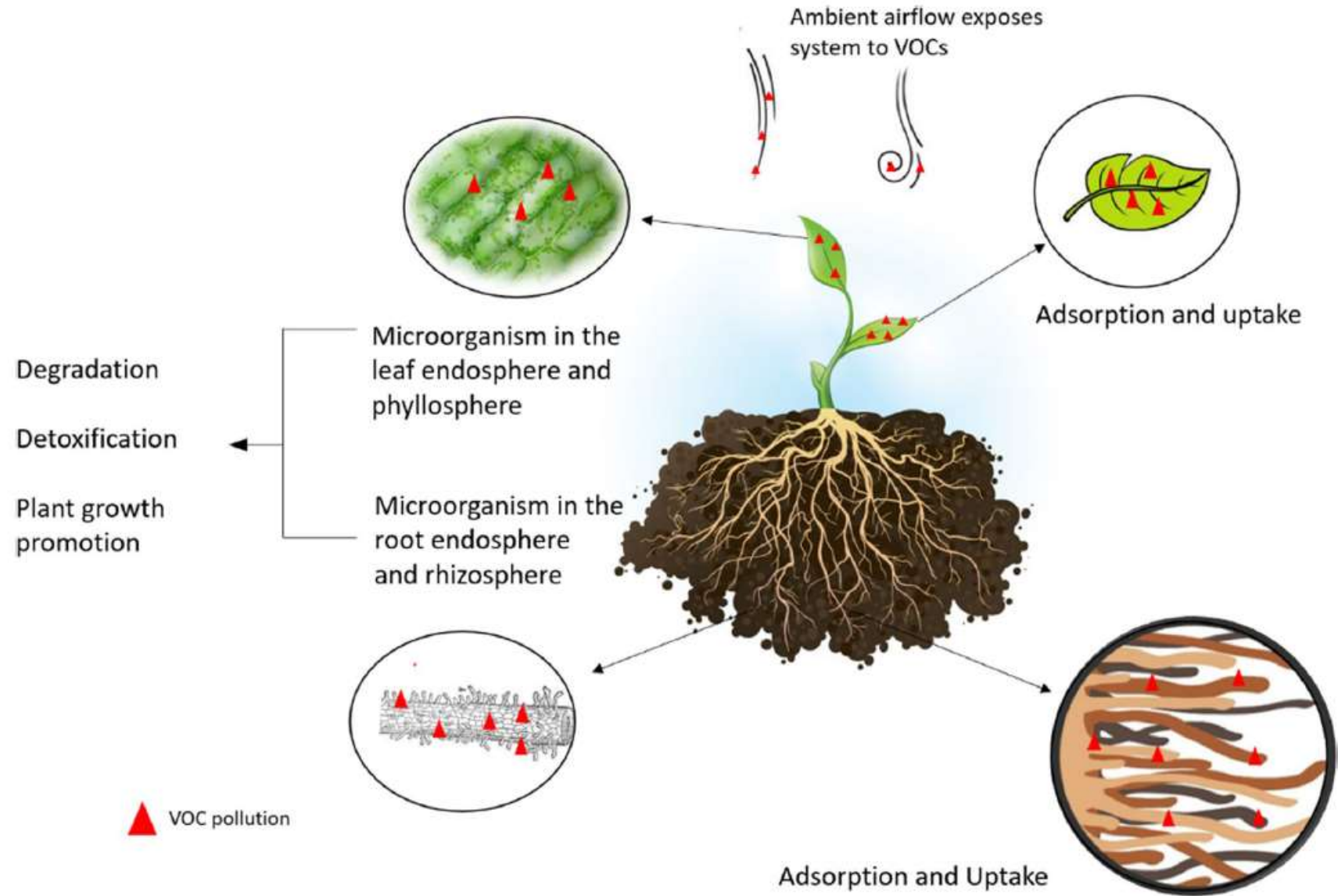
Betula pendula



Ριζόσφαιρα

Οι ρίζες έχουν συμβιωτικές σχέσεις με το μικροβίωμα στη ριζόσφαιρα, ενισχύοντας έτσι την μικροβιακή αποδόμηση των ρύπων.

Beijerinckia,
Azotobacter,
Cyanobacter,
Scytonema,



Τεχνολογίες βελτίωσης της ποιότητας του αέρα εσωτερικού χώρου

Αφετηρία: η μελέτη της NASA (Clean Air Study) σε σφραγισμένους θαλάμους έδειξε ότι φυτά εσωτερικού χώρου απομακρύνουν τοξικές ενώσεις.



Παθητικά (γλάστρες)

Τα φυτά τοποθετούνται στον χώρο και καθαρίζουν τον αέρα με φυσική διάχυση και επαφή των ρύπων (κυρίως VOCs) με τα φύλλα και κυρίως με τη ριζόσφαιρα. Είναι απλή και οικονομική μέθοδος αλλά όχι τόσο αποδοτική.



Passive diffusion

Τεχνολογίες βελτίωσης της ποιότητας του αέρα εσωτερικού χώρου



Ενεργά βιοφίλτρα

Ο μολυσμένος αέρας προωθείται μέσω ανεμιστήρα ή αντλίας, μέσα από το υπόστρωμα και τη ριζόσφαιρα, οπότε αυξάνεται πολύ η επαφή ρύπων και μικροοργανισμών, όπως και η απομάκρυνση VOCs, PM, NO₂ και O₃. Είναι πιο αποδοτική μέθοδος από την παθητική, αλλά απαιτεί σωστό σχεδιασμό ροής αέρα, υγρασίας και υποστρώματος.

Τεχνολογίες βελτίωσης της ποιότητας του αέρα εσωτερικού χώρου

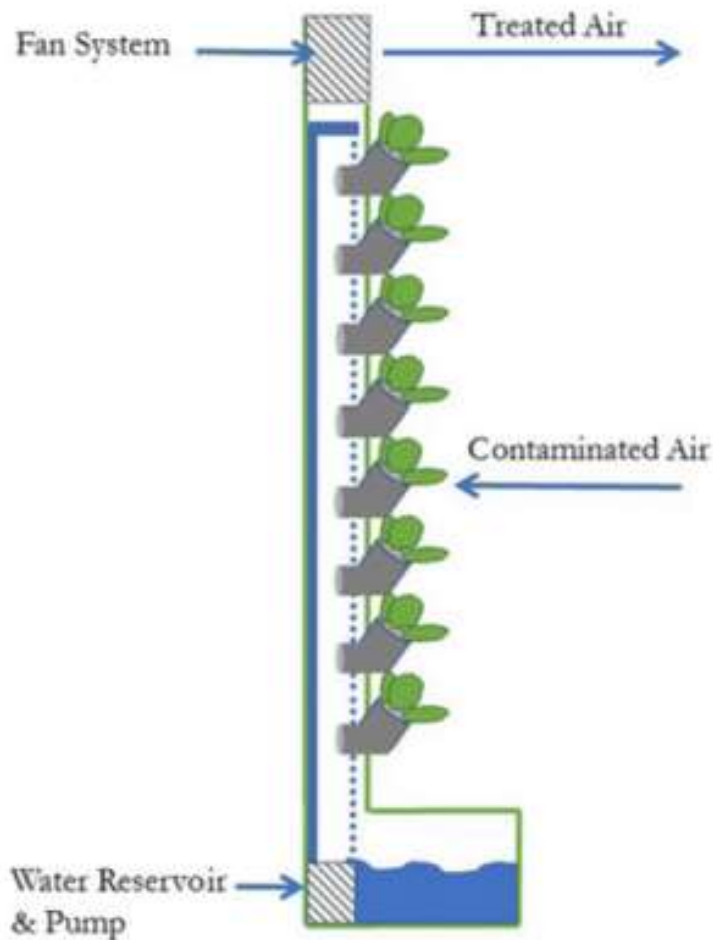


Fig. 1. An active botanical biofilter system in which contaminated air is drawn through the planted face and migrates upwards through the substrate before returning to ambient air. Image from [Torpy et al. \(2017\)](#).



Ζωντανοί τοίχοι

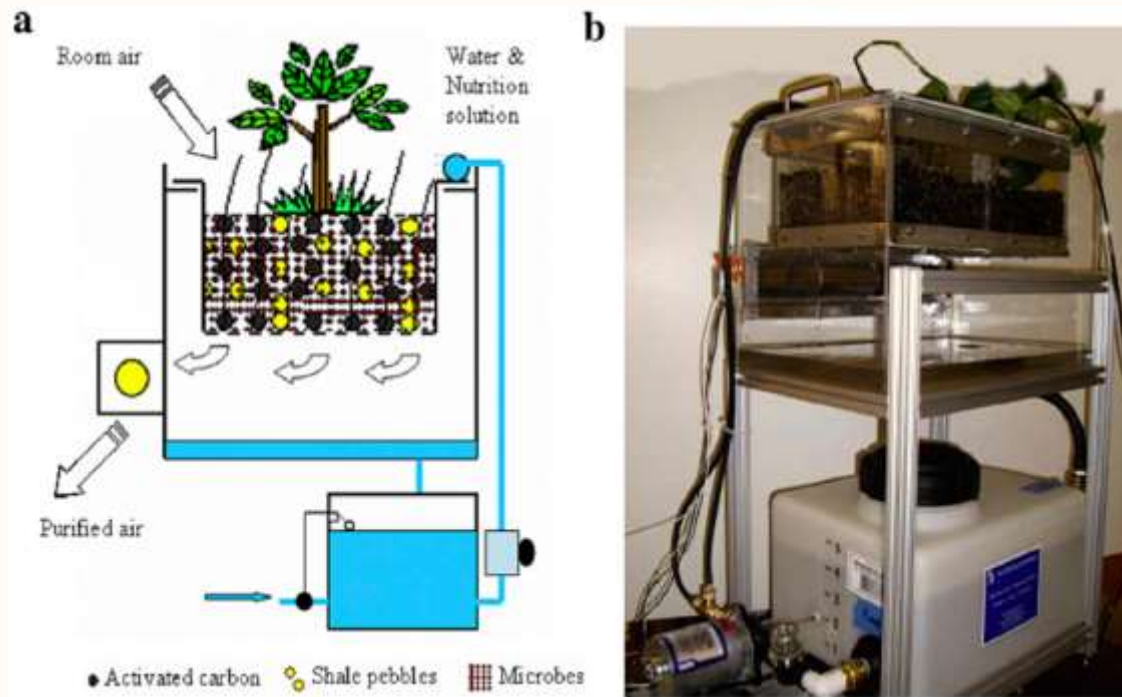
Οι κάθετοι φυτεμένοι τοίχοι αυξάνουν τη φυτική επιφάνεια μέσα στον χώρο και μπορούν να λειτουργούν είτε παθητικά είτε ενεργά· τα παθητικά είναι απλούστερα και φθηνότερα αλλά λιγότερο αποδοτικά, ενώ τα ενεργά έχουν υψηλότερες επιδόσεις επειδή συνδυάζονται με μηχανικό αερισμό και μεγαλύτερη ροή αέρα μέσα στο υπόστρωμα. Σημαντική θεωρείται η χρήση τους και για την θερμικός ρυθμιστής.

Ενεργοί ζωντανοί τοίχοι με βοτανικό σύστημα υδροπονικών φυτών δείχνουν μεγαλύτερη απόδοση στην απομάκρυνση ρύπων, ειδικά VOCs, σε μεγάλη ροή αέρα!

Πείραμα των Wang et al. για υπολογισμό αποδοτικότητας απομάκρυνσης των VOCs από το φυτό *Epipremnum aureum*

Οι Wang et al. (2014) έδειξαν ότι η ταχύτητα απομάκρυνσης της φορμαλδεΐδης δεν συνδέεται μόνο με το μέγεθος των φυτών σε γλάστρα, αλλά και πολύ έντονα με τη δυναμική της ροής του αέρα.

Χρησιμοποίησαν το **CADR** (clean air delivery rates) για τη φορμαλδεΐδη, όπου διαπιστώθηκε πως ήταν μόνο 5.1 m³/h ανά m² σε στατικό αέρα, αλλά ανέβηκε στα 233 m³/h ανά m² όταν ο αέρας διοχετευόταν ενεργά μέσα από τα φυτά.



Epipremnum aureum

Ενδεικτικά φυτά για βελτίωση ποιότητας εσωτερικού χώρου



Hedera helix

Υψηλή ικανότητα
απομάκρυνσης
χλωροφORMίου



*Crassula
portulaca*

Υψηλή ικανότητα
απομάκρυνσης
βενζολίου

Υψηλή ικανότητα
απομάκρυνσης
τολουόλιου
Sansevieria trifasciata



Chlorophytum comosum

Υψηλή
απομάκρυνσης
αιθυλοβενζόλιου

ικανότητα

Τεχνολογίες βελτίω



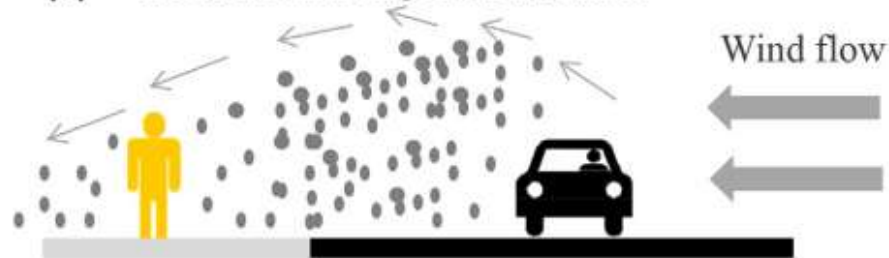
Δενδροφυτεύσεις στον αστικό ιστό

Χρήση δέντρων κατά μήκος οδών, σε πεζοδρόμια, πλατείες, αστικά πάρκα. Ο κύριος μηχανισμός είναι η εναπόθεση των ρύπων στα φύλλα και η πρόσληψη κάποιων ρύπων μέσω των στομάτων.

Σε στενούς δρόμους με ψηλά κτίρια τα δέντρα μπορεί να παγιδεύουν τους ρύπους, μειώνοντας τον αερισμό.

Open road configurations

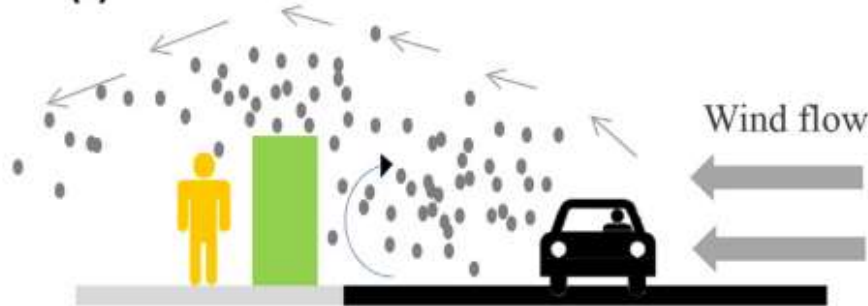
(a) Road with no vegetation barrier



(b) Road with vegetation barrier



(c) Road with green wall



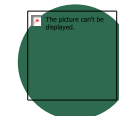
υπερικού χώρου

Φυτικές ζώνες - φράγματα (Vegetation barriers/green belts)

Χεδιάζονται σωστά, οι θάμνοι, οι και οι φυτεμένες λωρίδες κοντά σε ύπανσης μπορούν να μειώσουν την των πεζών στους ρύπους.

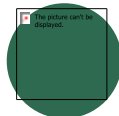
ής πυκνότητας με υψηλόες θάμνοι, επιτρέπουν τον αέρα νά μέσα από αυτούς, ενώ υψηλής ητας με χαμηλό πορώδες θάμνοι, ιλτράρουν τον αέρα, αλλά τον άζουν τον αέρα να περάσει από τους.

Τεχνολογίες βελτίωσης της ποιότητας του αέρα εξωτερικού χώρου



Πράσινες στέγες- Green Roofs

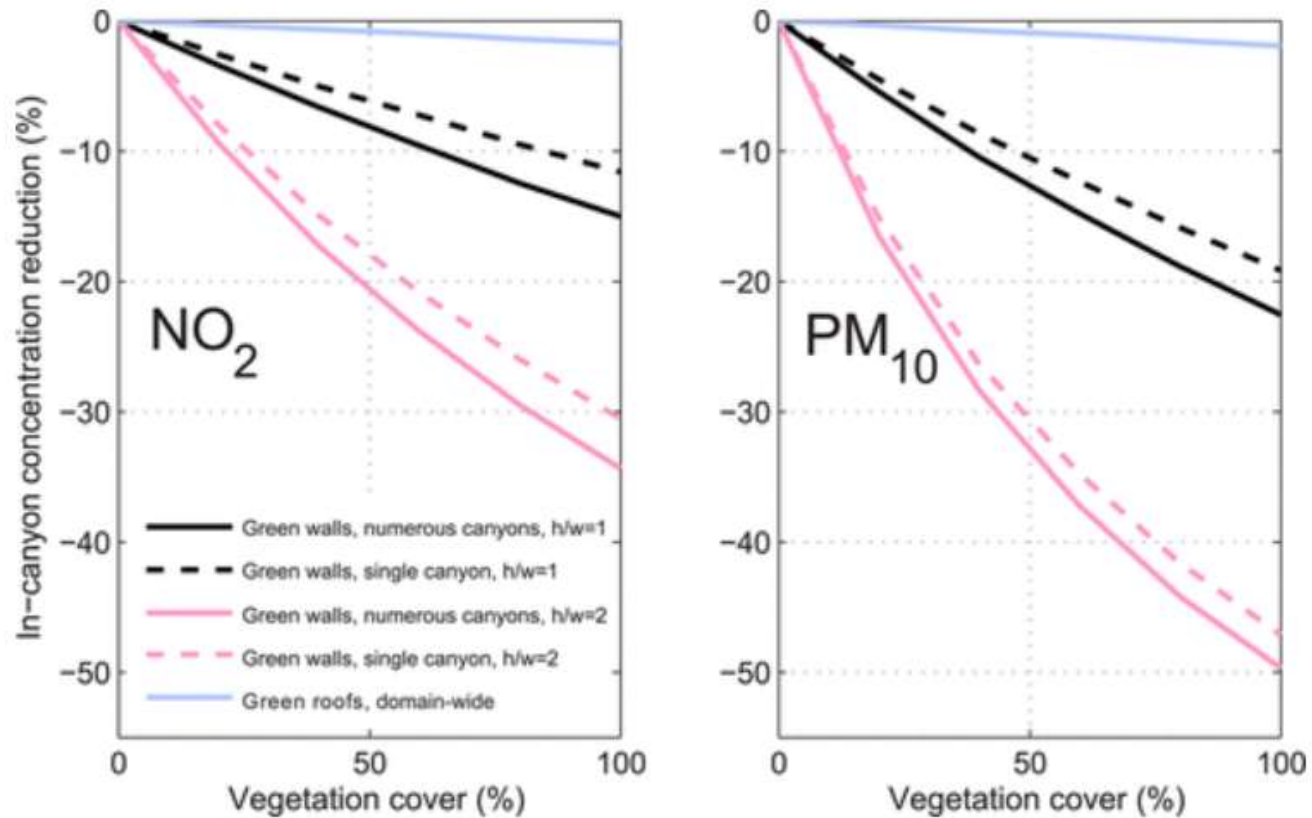
Οι πράσινες στέγες συμβάλλουν στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, τη διαχείριση των ομβρίων υδάτων, την άμβλυνση του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας, τον περιορισμό της ατμοσφαιρικής και ηχητικής ρύπανσης, καθώς και στην ενίσχυση της οικολογικής διατήρησης. Ωστόσο δεν αποτελεί τόσο αποτελεσματική λύση, λόγω της χαμηλής τραχύτητας της επιφάνειας και της απόστασης από την πηγή ρύπανσης.



Πράσινοι τοίχοι-Green Walls

Μπορούν να βελτιώσουν την ποιότητα του αέρα, απαιτείται ωστόσο παραπάνω μελέτη της απόδοσής τους. Σημαντική έχει διαπιστωθεί η χρήση αναρριχώμενων φυτικών ειδών, όπως είδη γένων Ivy και Lilians.

Φυτά με τριχοειδή φύλλα σε ορισμένες περιπτώσεις αποδίδουν καλύτερα στις πράσινες στέγες από άλλα ποώδη είδη.



- Πράσινοι τοίχοι σε βαθιά φαράγγια ($h/w=2$) = μέγιστη μείωση: έως -34% NO_2 και -50% PM_{10} σε πλήρη κάλυψη με βλάστηση.
- Η γεωμετρία του δρόμου κρίνει το αποτέλεσμα: τα βαθιά-στενά φαράγγια ($h/w=2$) υπερτερούν κατά πολύ των ρηχών ($h/w=1$, μόλις -12 έως -23%).
- Πράσινες στέγες σχεδόν αναποτελεσματικές στο επίπεδο του δρόμου (~-2%): βρίσκονται πάνω από το φαράγγι, οι πράσινοι τοίχοι υπερτερούν σαφώς.
- * h/w = height/width

Τεχνολογίες βελτίωσης της ποιότητας του αέρα εξωτερικού χώρου



Street Canyons

Μελέτες δείχνουν πως ψηλά δέντρα σε στενούς δρόμους μπορούν να χειροτερεύσουν την ποιότητα αέρα, ενώ η χαμηλή βλάστηση κοντά στην πηγή ρύπανσης είναι πιο πιθανό να βοηθήσει. Τα φράγματα βλάστησης πρέπει να είναι αρκετά πυκνά ώστε να προσφέρουν μεγάλη επιφάνεια εναπόθεσης των ρύπων και αρκετά πορώδη ώστε να επιτρέπουν τη διείσδυση, αντί της εκτροπής του ρεύματος αέρα πάνω από το φράγμα. Η επιλογή μεταξύ ψηλής ή χαμηλής και πυκνής ή αραιής βλάστησης καθορίζει την επίδραση στην ατμοσφαιρική ρύπανση από διαφορετικές πηγές και διαφορετικά μεγέθη σωματιδίων.



Δροσισμός / μείωση
θερμοκρασίας



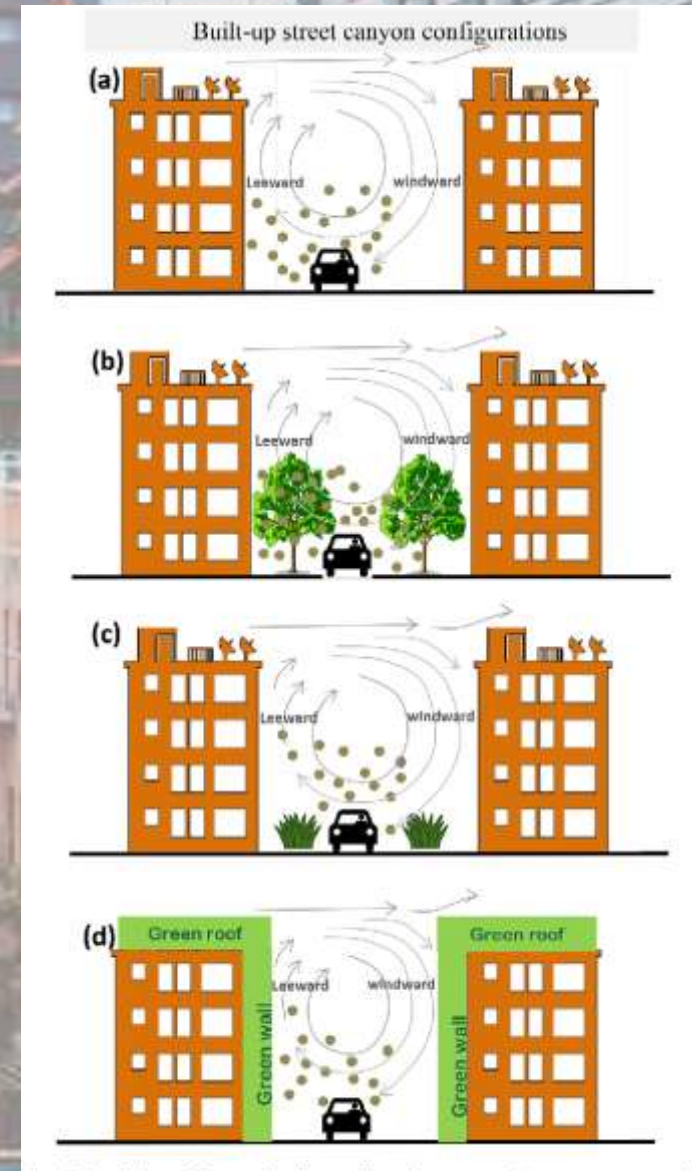
Λιγότερη ηχορύπανση



Δέσμευση CO₂ & σκίαση



Ευεξία & υγεία



Τα κωνοφόρα, με βελονοειδή φύλλωμα, είχαν καλύτερη συγκράτηση των $PM_{2.5}$ από τα πλατύφυλλα δέντρα, ειδικά μετά από βροχόπτωση.



Pinus sylvestris L.



Platycladus orientalis



Cupressus leylandii



Cedrus deodara

Μεταξύ των πλατυφύλλων, ξεχωρίζουν είδη που διαθέτουν φύλλα με πυκνό τρίχωμα όπως *Catalpa speciosa*, *Ulmus rumila*, *Amygdalus triloba* και *Broussonetia papyrifera*. Αντιθέτως είδη με λεία επιφάνεια φύλλων όπως *Tilia tuan*, *Armeniaca sibirica* και *Lonicera maackii* δεν ήταν τόσο αποδοτικά στην απομάκρυνση των PM_{2.5}.



Catalpa speciosa



Tilia tuan



Amygdalus triloba



Lonicera maackii

Πείραμα με γενετική τροποποίηση *Eripremnium aureum* (Zhang et al., 2019)



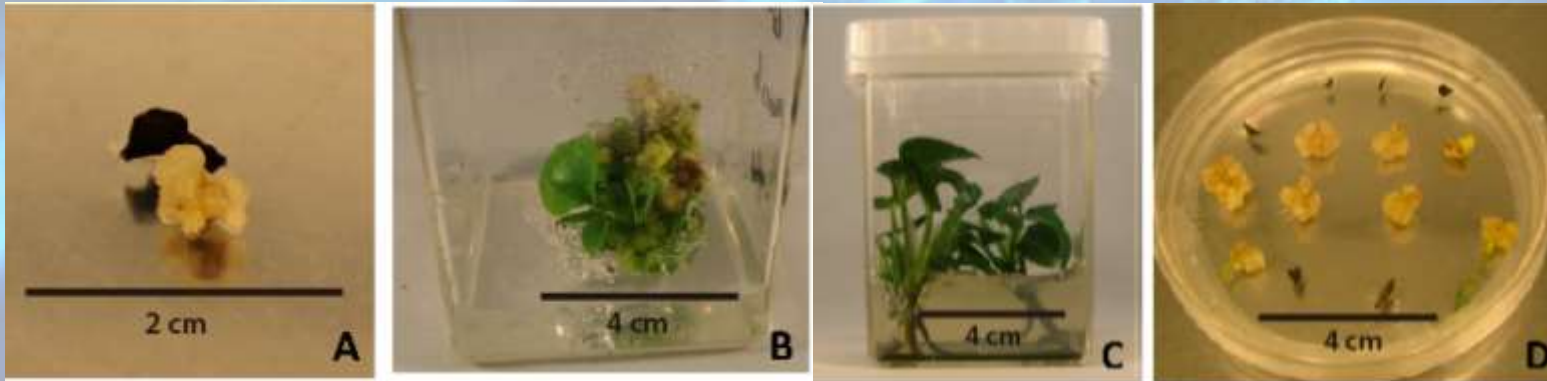
Η ιδέα

Εισαγωγή του θηλαστικού γονιδίου **CYP2E1** (από κουνέλι) στο *E. aureum* με γενετικό μετασχηματισμό. Το γονίδιο αποκωδικοποιεί το ένζυμο κυτοχρώματος **P450 2E1**, που οξειδώνει τα VOCs.



Το πείραμα

Απομόνωση του γονιδίου και εισαγωγή του σε πλασμίδιο του *Agrobacterium tumefaciens*. Ακολουθεί επιμόλυνση του φυτικού ιστού με το τροποποιημένο *Agrobacterium*, επιλογή κυττάρων που έχουν γονίδιο ανθεκτικότητας στην καναμυκίνη, και αναγέννηση του φυτού. Τα φυτά τοποθετήθηκαν σε κλειστά φιαλίδια, όπου εγχύθηκε αέριο βενζόλιο ή χλωροφόρμιο.



Αποτελέσματα

Σε 3 ημέρες η συγκέντρωση του χλωροφορμίου έπεσε δραματικά και σε 8 ημέρες το χλωροφόρμιο μόλις ανιχνευόταν. Εξίσου μείωση του βενζολίου. Από την άλλη τα μη γενετικά τροποποιημένα φυτά δεν έδειξαν σημαντική απομάκρυνση.



Μηχανισμός

Το ένζυμο μετατρέπει το χλωροφόρμιο σε CO₂ και ιόντα Cl (χρήση CO₂ στη φωτοσύνθεση) και το βενζόλιο σε φαινόλη (δομικό υλικό του κυτταρικού τοιχώματος).

Συμπεράσματα

nature

Getty

- Η χρήση φυτών δεν αποτελεί αυτόνομη λύση για την βελτίωση της ποιότητας του αέρα, είναι καλύτερο να θεωρείται συμπληρωματική στρατηγική.
- Η μείωση εκπομπών στην πηγή παραμένει η βασική στρατηγική.
- Σε εσωτερικούς χώρους ξεχωρίζουν τα ενεργά φυτικά βιοφίλτρα.
- Σε εξωτερικούς χώρους απαιτείται πολύ προσεκτικός αστικός σχεδιασμός, και είναι πολύ πιο εξαρτώμενη η μέθοδος αυτή από το είδος του φυτού, τη μορφή της φύτευσης και το αστικό περιβάλλον.
- Σημαντική θεωρείται η γενετική τροποποίηση των φυτών για αποδοτική βελτίωση της ποιότητας του αέρα.

Βιβλιογραφία

- Abhijith, K. V., Kumar, P., Gallagher, J., McNabola, A., Baldauf, R., Pilla, F., Broderick, B., Di Sabatino, S., & Pulvirenti, B. (2017). Air pollution abatement performances of green infrastructure in open road and built-up street canyon environments - A review. *Atmospheric Environment*, 162, 71-86.
- Bandehali, S., Miri, T., Onyeaka, H., & Kumar, P. (2021). Current state of indoor air phytoremediation using potted plants and green walls. *Atmosphere*, 12(4), 473.
- Brilli, F., Fares, S., Ghirardo, A., de Visser, P., Calatayud, V., Muñoz, A., Annesi-Maesano, I., Sebastiani, F., Alivernini, A., Varriale, V., & Menghini, F. (2018). Plants for sustainable improvement of indoor air quality. *Trends in Plant Science*, 23(6), 507-512.
- Brunekreef, B., & Holgate, S. T. (2002). Air pollution and health. *The Lancet*, 360(9341), 1233-1242.
- Chen, L., Liu, C., Zhang, L., Zou, R., & Zhang, Z. (2017). Variation in tree species ability to capture and retain airborne fine particulate matter (PM_{2.5}). *Scientific Reports*, 7, 3206.
- Han, K.-T., & Ruan, L.-W. (2020). Effects of indoor plants on air quality: A systematic review. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(14), 16019-16051.
- Henning, R. J. (2023). Particulate matter air pollution is a significant risk factor for cardiovascular disease. *Current Problems in Cardiology*.
- Janhäll, S. (2015). Review on urban vegetation and particle air pollution - Deposition and dispersion. *Atmospheric Environment*, 105, 130-137.
- Joshi, N., Gupta, C. K., Mangla, Y., & Chowdhuri, A. (2023). Green plants as a sustainable solution to air pollution. *International Journal of Plant and Environment*, 9(2), 102-112.

Βιβλιογραφία

- Matheson, S., Fleck, R., Irga, P. J., & Torpy, F. R. (2023). Phytoremediation for the indoor environment: A state-of-the-art review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 22, 249-280.
- Oksanen, E., & Kontunen-Soppela, S. (2021). Plants have different strategies to defend against air pollutants. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 19, 100222.
- Pettit, T., Irga, P. J., & Torpy, F. R. (2018). Towards practical indoor air phytoremediation: A review. *Chemosphere*, 208, 960-974.
- Pugh, T. A. M., MacKenzie, A. R., Whyatt, J. D., & Hewitt, C. N. (2012). Effectiveness of green infrastructure for improvement of air quality in urban street canyons. *Environmental Science & Technology*, 46(14), 7692-7699.
- Vardoulakis, S., Giagloglou, E., Steinle, S., Davis, A., Sleenwenhoek, A., Galea, K. S., Dixon, K., & Crawford, J. O. (2020). Indoor exposure to selected air pollutants in the home environment: A systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(23), 8972.
- Venter, Z. S., Hassani, A., Stange, E., Schneider, P., & Castell, N. (2024). Reassessing the role of urban green space in air pollution control. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121(6), e2306200121.
- Wang, H., & Shi, H. (2021). Particle retention capacity, efficiency, and mechanism of selected plant species: Implications for urban planting for improving urban air quality. *Plants*, 10(10), 2109.
- Wei, X., Lyu, S., Yu, Y., Wang, Z., Liu, H., Pan, D., & Chen, J. (2017). Phylloremediation of air pollutants: Exploiting the potential of plant leaves and leaf-associated microbes. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1318.
- Wei, Z., Van Le, Q., Peng, W., Yang, Y., Yang, H., Gu, H., Lam, S. S., & Sonne, C. (2021). A review on phytoremediation of contaminants in air, water and soil. *Journal of Hazardous Materials*, 403, 123658.
- Zhang, L., Routsong, R., & Strand, S. E. (2019). Greatly enhanced removal of volatile organic carcinogens by a genetically modified houseplant, pothos ivy (*Epipremnum aureum*) expressing the mammalian cytochrome P450 2e1 gene. *Environmental Science & Technology*, 53(1), 325-331.



ΣΑΣ ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ ΠΟΛΥ!