



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΔΑΣΟΛΟΓΙΑΣ, ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΞΥΛΟΥ & ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

**ΠΜΣ: «ΠΡΟΗΓΜΕΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ & MANAGEMENT
ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΑΠΟ ΞΥΛΟ»**

(MSc in Advanced Design, Technology & Management Methods of Wooden
Products)



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Το αποτύπωμα άνθρακα από τα διάφορα προϊόντα ξύλου
καθώς και η συμβολή τους στην μείωση του CO₂ στην
ατμόσφαιρα, όπως και η συγκράτηση NO_x, SO_x PM₁₀**



ΣΙΜΙΤΑ ΜΑΡΙΑ

ΑΓΜ:Μ01322013

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: κ. ΝΤΑΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΚΑΡΔΙΤΣΑ, ΜΑΙΟΣ 2024

Υπεύθυνη Δήλωση

«Δηλώνω υπεύθυνα ότι η συγκεκριμένη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία για τη λήψη του μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών του ΠΜΣ Πλήρους Φοίτησης του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας **«ΠΡΟΗΓΜΕΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ & MANAGEMENT ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΑΠΟ ΞΥΛΟ»** έχει συγγραφεί από εμένα προσωπικά και δεν έχει υποβληθεί ούτε έχει εγκριθεί στο πλαίσιο κάποιου άλλου μεταπτυχιακού ή προπτυχιακού τίτλου σπουδών στην Ελλάδα ή στο εξωτερικό. Η εργασία αυτή έχοντας εκπονηθεί από εμένα, αντιπροσωπεύει τις προσωπικές μου απόψεις επί του θέματος και το κείμενο είναι γραμμένο με τα δικά μου λόγια και δεν αποτελεί προϊόν λογοκλοπής από τρίτες πηγές. Οι πηγές στις οποίες ανέτρεξα για την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής αναφέρονται στο σύνολό τους, δίνοντας πλήρεις αναφορές στους συγγραφείς, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο».

Η Δηλούσα

ΣΙΜΙΤΑ ΜΑΡΙΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το έγγραφο είναι μια διπλωματική εργασία από το Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, που αφορά το αποτύπωμα άνθρακα των προϊόντων ξύλου και τη συμβολή τους στη μείωση του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και άλλων ρύπων στην ατμόσφαιρα. Η εργασία διερευνά τον κύκλο ζωής των προϊόντων ξύλου, τις μεθόδους διαχείρισής τους, και τον τρόπο με τον οποίο μπορούν να επηρεάσουν θετικά ή αρνητικά το περιβάλλον.

Κύρια σημεία:

1. Αποτύπωμα άνθρακα των προϊόντων ξύλου:
 - ο Εξετάζεται το συνολικό αποτύπωμα άνθρακα των προϊόντων ξύλου από την παραγωγή έως τη διάθεσή τους.
 - ο Παρουσιάζεται η μέθοδος της εκτίμησης του κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment - LCA) για την αξιολόγηση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου.
2. Μείωση του διοξειδίου του άνθρακα:
 - ο Αναλύεται πώς τα δάση και τα προϊόντα ξύλου συμβάλλουν στη μείωση του CO₂ στην ατμόσφαιρα.
 - ο Προτείνονται βιώσιμες πρακτικές διαχείρισης για τη μέγιστη αποθήκευση άνθρακα.
3. Συγκράτηση άλλων ρυπαντών (NO_x, SO_x, PM₁₀):
 - ο Διερευνώνται οι τρόποι με τους οποίους τα προϊόντα ξύλου μπορούν να συγκρατούν οξείδια του αζώτου, οξείδια του θείου και αιωρούμενα σωματίδια, βελτιώνοντας την ποιότητα του αέρα.
 - ο Προτείνεται ένα μοντέλο για την ποσοτικοποίηση της δέσμευσης αυτών των ρύπων από τα δέντρα.
4. Προτάσεις και μοντέλα:
 - ο Παρουσιάζονται προτάσεις για τη βελτίωση της περιβαλλοντικής διαχείρισης των προϊόντων ξύλου.
 - ο Περιλαμβάνονται εξισώσεις και μοντέλα για τον υπολογισμό της δέσμευσης CO₂ και άλλων ρύπων από τα δέντρα.

Η εργασία υπογραμμίζει τη σημασία της βιώσιμης διαχείρισης των δασών και των ξύλινων προϊόντων ως στρατηγική για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και την προστασία του περιβάλλοντος.

ΛΕΞΕΙΣ – ΚΛΕΙΔΙΑ: Αποτύπωμα άνθρακα, Προϊόντα ξύλου Κύκλος ζωής (LCA), Μείωση CO₂, Διαχείριση δασών, Δέσμευση ρύπων, Κλιματική αλλαγή, Βιώσιμη ανάπτυξη

ABSTRACT

The document is a master's thesis from the University of Thessaly, focusing on the carbon footprint of wood products and their role in reducing carbon dioxide (CO₂) and other pollutants in the atmosphere. It explores the life cycle of wood products, their management practices, and how they can positively or negatively impact the environment.

Key Points:

1. Carbon Footprint of Wood Products:
 - o The total carbon footprint of wood products from production to disposal is examined.
 - o The Life Cycle Assessment (LCA) method is presented to evaluate the environmental impact.
2. Reduction of Carbon Dioxide:
 - o The role of forests and wood products in reducing CO₂ in the atmosphere is analyzed.
 - o Sustainable management practices are proposed to maximize carbon storage.
3. Retention of Other Pollutants (NO_x, SO_x, PM₁₀):
 - o The ways in which wood products can retain nitrogen oxides, sulfur oxides, and particulate matter, thus improving air quality, are investigated.
 - o A model for quantifying the retention of these pollutants by trees is proposed.
4. Recommendations and Models:
 - o Recommendations for improving the environmental management of wood products are presented.
 - o Equations and models for calculating CO₂ and other pollutant retention by trees are included.

The thesis highlights the importance of sustainable forest management and wood product utilization as strategies to combat climate change and protect the environment.

Keywords : Carbon Footprint, Wood Products Life Cycle (LCA), CO₂ Reduction, Forest Management, Pollutant Retention, Climate Change, Sustainable Development

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να απευθύνω θερμές ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Γεώργιο Νταλό καθώς και στην καθηγήτρια του τμήματος Ανδρομάχη Μιτάνη για τη βοήθεια και την υποστήριξη που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω την μητέρα μου Αλίκη, τον αδερφό μου Κωνσταντίνο καθώς και φίλους και συναδέλφους οι οποίοι με στήριξαν ψυχολογικά και μου έδωσαν δύναμη για να παλέψω όχι μόνο την εκπόνηση των σπουδών μου αλλά και την μάχη μου απέναντι στην επάρατη νόσο. Αφιερώνω αυτή τη διπλωματική εργασία στα παιδιά μου Δήμητρα – Αικατερίνη και Ηλιάννα.

Πίνακας περιεχομένων

Εισαγωγή	7
Κεφάλαιο 1 : Αποτύπωμα άνθρακα των προϊόντων ξύλου	9
1.1 Γενικά για το αποτύπωμα άνθρακα	9
1.2 Κύκλος ζωής προϊόντων ξύλου	10
1.3 Πρωτογενή προϊόντα ξύλου	13
1.4 Παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν το αποτύπωμα άνθρακα	17
1.4.1 Βιώσιμη διαχείριση των δασών	17
1.4.2. Επεξεργασία ξυλείας	19
1.4.3 Μεταφορά και διανομή προϊόντων ξύλου	22
1.5 Φάση τέλους της ζωής των προϊόντων ξύλου	24
1.5.1 Μέθοδοι απόρριψης	24
1.5.2 Ανακύκλωση προϊόντων ξύλου	25
Κεφάλαιο 2 : Η συνεισφορά των προϊόντων ξύλου στη μείωση του διοξειδίου άνθρακα της ατμόσφαιρας	27
2.1 Εξέταση τριών προσεγγίσεων στον κύκλο ζωής των προϊόντων ξύλου με στόχο την μείωση του CO ₂	28
2.2 Διασφάλιση βιώσιμων πρακτικών για τη μεγιστοποίηση της αποθήκευσης άνθρακα.	30
2.2 Εξέταση σεναρίων για την αποθήκευση και την απελευθέρωση βιογενούς άνθρακα	32
Κεφάλαιο 3 : Η συγκράτηση οξειδίων του αζώτου (NO _x), οξειδίων του θείου (SO _x) και PM ₁₀ από προϊόντα ξύλου	43
3.1 Γενικά για τα οξείδια του αζώτου NO _x	43
3.1.1 Μηχανισμοί παραγωγής NO _x	44
3.1.2 Συνέπειες των οξειδίων του αζώτου	45
3.1.3 Στρατηγικές για τη μείωση των εκπομπών NO _x από την καύση ξύλου	51
3.2 Γενικά για τα οξείδια του θείου (SO _x)	52
3.2.1 Επιπτώσεις από τα οξείδια του θείου (SO _x)	53
3.3 Γενικά για τα αιωρούμενα σωματίδια PM	58
4.1 Προσδιορισμός του CO ₂ σε ένα ιστάμενο δέντρο ανάλογα με το είδος του	62
4.2 Προσδιορισμός του O ₂ που εκλύεται από ένα ιστάμενο δέντρο ανάλογα με το είδος του	70
4.3 Προσδιορισμός των NO _x που δεσμεύεται από ένα ιστάμενο δέντρο ανάλογα με το είδος του	71
4.3.1 Προσδιορισμός του NO _x με βάση τον ακόλουθο τύπο	72

4.4 Προσδιορισμός μονοξειδίου του άνθρακα (CO) που δεσμεύεται από ένα ιστάμενο δέντρο ανάλογα με το είδος του.....	74
4.5 Προσδιορισμός των PM10 που δεσμεύεται από ένα ιστάμενο δέντρο ανάλογα με το είδος του.....	75
4.6 Απαιτούμενες εξισώσεις.....	77
4.7 Δημιουργία Μοντέλου.....	91
Βιβλιογραφία	95

Εισαγωγή

Η κλιματική αλλαγή και η μόλυνση της ατμόσφαιρας είναι οι προκλήσεις της σύγχρονης εποχής, όντας σημαντικές απειλές για τα παγκόσμια οικοσυστήματα, την υγεία του ανθρώπου και την κοινωνικοοικονομική σταθερότητα. Η παγκόσμια κοινότητα έχει στρέψει την προσοχή της προς τον ρόλο των δασών και των προϊόντων ξύλου στη μείωση του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και την συγκράτηση άλλων αερίων, συμπεριλαμβανομένων των οξειδίων του αζώτου (NO_x) και του θείου (SO_x) και των σωματιδίων PM_{10} . Η ακόλουθη πτυχιακή εργασία θα αναλύσει ακριβώς αυτό, όπως και το αποτύπωμα άνθρακα των διαφόρων προϊόντων ξύλου.

Τα δάση και τα προϊόντα ξύλου παίζουν κρίσιμο ρόλο στον κύκλο του άνθρακα, δρώντας τόσο σαν δεξαμενή άνθρακα όσο και πηγή άνθρακα. Μέσω της φωτοσύνθεσης, τα δέντρα απορροφούν διοξείδιο του άνθρακα από την ατμόσφαιρα, αποθηκεύοντας τον άνθρακα στη βιομάζα τους και στο έδαφος τους. Όταν κόβονται και επεξεργάζονται σε ξύλινα προϊόντα όπως το κόντρα πλακέ και το νοβοπάν, αυτός ο αποθηκευμένος άνθρακας μπορεί να απομονωθεί και πιθανόν να αντισταθμίσει τις εκπομπές άνθρακα από άλλα υλικά. Ωστόσο, το αποτύπωμα άνθρακα των ξύλινων προϊόντων επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των πρακτικών διαχείρισης των δασών, τις τεχνικές επεξεργασίας και τις μεθόδους μεταφοράς.

Τα προϊόντα ξύλου έχουν την ικανότητα να αλληλεπιδρούν με μολυσματικά αέρια όπως τα οξείδια του αζώτου. Αυτά τα ρυπογόνα εκπέμπονται από πηγές όπως οι εξατμίσεις των αυτοκινήτων, βιομηχανικά απόβλητα και καύσεις βιομαζών και μπορούν να έχουν σημαντικές παρενέργειες στην υγεία του ανθρώπου και στο περιβάλλον. Πρόσφατες μελέτες υποδηλώνουν πως τα προϊόντα ξύλου, ιδίως όσα

έχουν συγκεκριμένες επικαλύψεις, μπορούν να απορροφούν και να συγκρατούν τα λεγόμενα ρυπογόνα, συμβάλλοντας έτσι στην καλυτέρευση της ατμόσφαιρας.

Παρά το αυξανόμενο ενδιαφέρον για τα περιβαλλοντικά οφέλη των προϊόντων ξύλου, υπάρχουν σχετικά κενά στην βιβλιογραφία. Ο στόχος της εργασίας αυτής είναι να ενοποιήσει τις υπάρχουσες πληροφορίες σε ένα συνολικό κείμενο. Η δομή που θα ακολουθηθεί στο κυρίως σώμα είναι η εξής: στο πρώτο μέρος θα αναφερθούν οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του αποτυπώματος άνθρακα των προϊόντων ξύλου, συμπεριλαμβανομένης και της εκτίμησης του κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment, LCA). Στο δεύτερο μέρος και στο τρίτο μέρος θα συζητήσουμε για την συνεισφορά των προϊόντων ξύλου για την μείωση του CO₂ και άλλων ρυπογόνων αερίων. Στο τρίτο κεφάλαιο, θα γίνει μία σύνοψη των προηγούμενων κεφαλαίων και θα γίνουν κάποιες προτάσεις για την καλύτερη διαχείριση των προϊόντων ξύλου για την καλυτέρευση της ποιότητας του αέρα. Στο τέταρτο και τελευταίο κεφάλαιο διαμορφώνεται μοντέλο που υπολογίζει το συνολικό ποσό δέσμευσης των ρύπων από τα δέντρα, ξεχωριστά για κάθε ρύπο (PM₁₀, SO_x, ozone, CO) για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο (ωριαία ή ημερήσια), συλλέγοντας τα δεδομένα για τα χαρακτηριστικά του κάθε δέντρου, τα μετεωρολογικά δεδομένα καθώς και τις συγκεντρώσεων των ρύπων (PM₁₀, SO_x, ozone, CO) από σταθμούς.

Κεφάλαιο 1 : Αποτύπωμα άνθρακα των προϊόντων ξύλου

1.1 Γενικά για το αποτύπωμα άνθρακα

Ο όρος «αποτύπωμα άνθρακα» αναφέρεται στο σύνολο των αερίων του θερμοκηπίου (greenhouse gases, GHGs), κυρίως στο CO₂, που εκπέμπονται άμεσα ή έμμεσα από μια δραστηριότητα, προϊόν, άτομο ή οργάνωση. Μετριέται σε μονάδες ισοδύναμες του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂e). Η κατανόηση του αποτυπώματος άνθρακα είναι κρίσιμη για την γνωστοποίηση της περιβαλλοντικής επίπτωσης των διαφόρων προϊόντων.

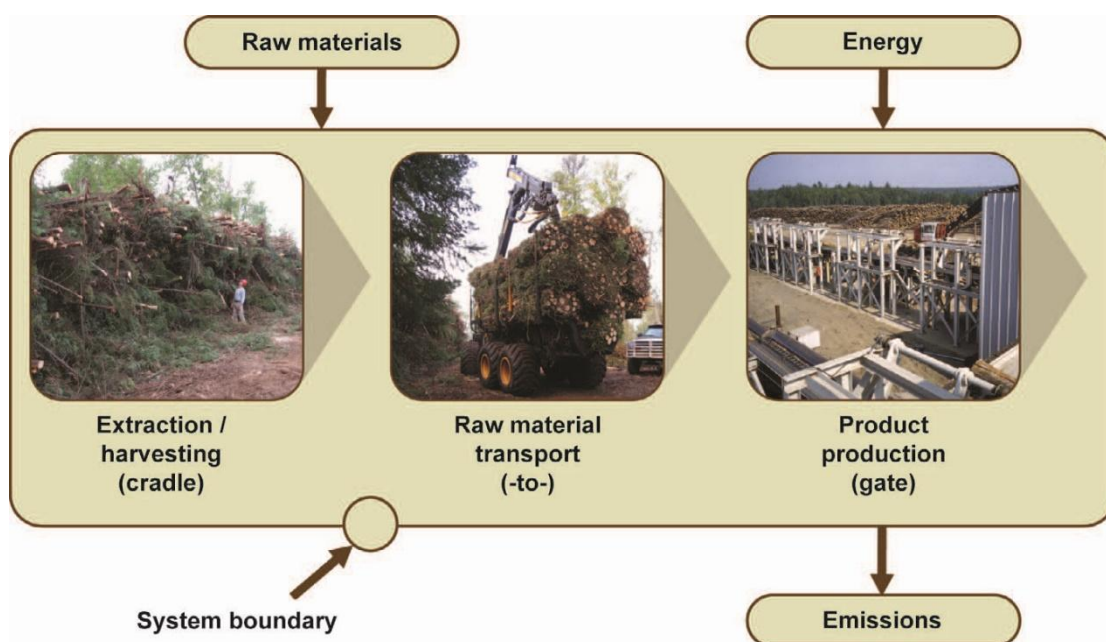
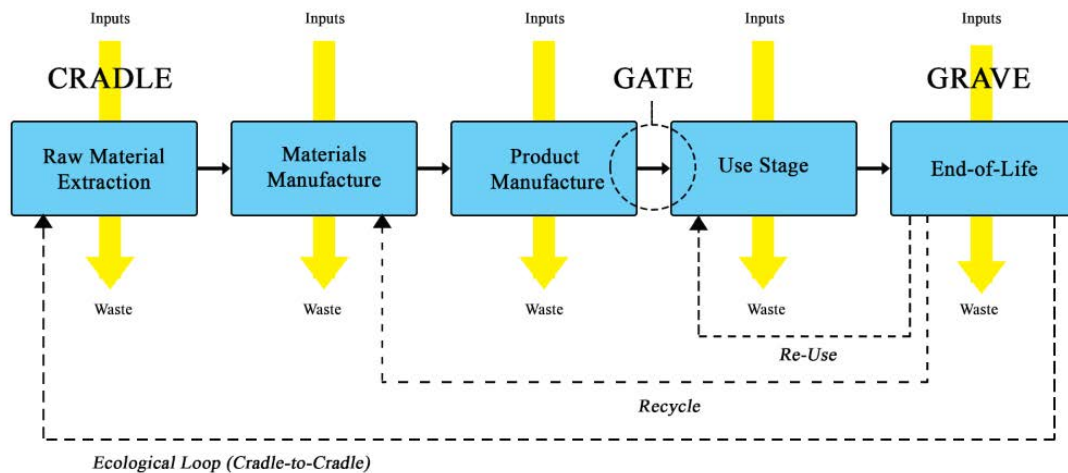


Τα προϊόντα ξύλου, προερχόμενα από την βιομάζα των δασών, παίζουν διττό ρόλο στον κύκλο του άνθρακα. Από τη μια μεριά, μπορούν να κατακρατούν άνθρακα, δρώντας ως δεξαμενές άνθρακα κατά την αναπτυξιακή τους φάση. Από την άλλη μεριά, οι διαδικασίες κοπής, επεξεργασίας, μεταφοράς και διάθεσης των προϊόντων ξύλου συνεισφέρουν στις εκπομπές άνθρακα. Η ακριβής μέτρηση του αποτυπώματος άνθρακα των προϊόντων αυτών θα μας βοηθήσει να αξιολογήσουμε το περιβαλλοντικό τους αντίκτυπο και να αναγνωρίσουμε ευκαιρίες για πρόοδο.

Το ξύλο είναι η πιο σημαντική ανανεώσιμη πηγή υλικών. Η χρησιμοποίηση του ξύλου σε όλες τις πτυχές της ανθρώπινης δραστηριότητας φαίνεται πως θα επιδράσει θετικά στο περιβάλλον, και αυτός είναι ο λόγος που αυξάνεται η χρήση του και σε κτηριακές δομές. Στις ΗΠΑ, το 90% των κατοικιών είναι φτιαγμένα από ξύλινο σκελετό. Από εκεί προκύπτει και ο όρος «πράσινα σπίτια».

1.2 Κύκλος ζωής προϊόντων ξύλου

Η εκτίμηση του κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment, LCA) είναι μια μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για να υπολογίσουμε το περιβαλλοντικό αντίκτυπο ενός προϊόντος κατά τη διάρκεια όλης της ζωής του. Η LCA περιλαμβάνει τέσσερα στάδια. Κατά το πρώτο στάδιο που ονομάζεται προσδιορισμός του σκοπού και του στόχου, προσδιορίζονται τα όρια και τα περιβαλλοντικά αποτελέσματα που πρέπει να διεξαχθούν κατά τη διάρκεια της μελέτης. Στο δεύτερο που καλείται απογραφική ανάλυση προσδιορίζεται και ποσοτικοποιείται η ενέργεια, τα απόβλητα και τα μεταχειρισμένα υλικά. Στη συνέχεια στο τρίτο που λέγεται εκτίμηση των επιπτώσεων, εκτιμούνται οι επιπτώσεις στον άνθρωπο και την οικολογία. Και τέλος στο τέταρτο στάδιο που ονομάζεται ερμηνεία των αποτελεσμάτων, πραγματοποιείται η αποτίμηση των αποτελεσμάτων του πρώτου σταδίου και η εκτίμηση των επιπτώσεων. Επειδή συχνά η LCA αναφέρεται σε προϊόντα που ξεκινούν ως ακατέργαστα υλικά (λίκνο) έως την διάθεση αυτών (τάφο) μπορεί να λάβει και το όνομα από το λίκνο έως τον τάφο μεθοδολογία (cradle-to-grave analysis), με την εικόνα να μας δείχνει ακριβώς αυτό.



Μια απλή εξίσωση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του αποτυπώματος άνθρακα των ξύλινων προϊόντων είναι η εξής:

$$A - B - \Gamma - \Delta = E$$

όπου **A** = η κατασκευαστική επεξεργασία που παράγει CO₂. Να υπογραμμίσουμε πως σε αυτό συμπεριλαμβάνεται και το B, όμως αποτελείται και από άλλες πηγές διοξειδίου του άνθρακα, όπως είναι η βενζίνη

B = τα υπολείμματα ξύλου συχνά καίγονται για παραγωγή ενέργειας κατά την κατασκευή των προϊόντων ξύλου. Επειδή το διοξείδιο του άνθρακα που απελευθερώνεται κατά την καύση, είναι το ίδιο που πρόσφατα απορροφήθηκε από την ατμόσφαιρα από το αναπτυσσόμενο δέντρο κατά τη διάρκεια της φωτοσύνθεσης, αυτό το καύσιμο θεωρείται καρβονικά ουδέτερο. Η χρήση αυτού του βιοκαυσίματος μειώνει το ανθρακικό αποτύπωμα των προϊόντων ξύλου

Γ = το διοξείδιο του άνθρακα απορροφάτε από την ατμόσφαιρα από το δέντρο μέσω της φωτοσύνθεσης. Αυτός ο άνθρακας μετατρέπεται σε ξύλο, φλοιό και άλλα μέρη του δέντρου, τα οποία σε βάρος αποτελούνται κατά το ήμισυ σε άνθρακα. Εάν το δέντρο σαπίσει ή καεί, ο στερεός άνθρακας του ξύλου απελευθερώνεται ξανά στην ατμόσφαιρα ως αέριο διοξείδιο του άνθρακα. Ωστόσο, όσο το ξύλινο προϊόν παραμένει άθικτο, τότε διατηρεί το πιθανό διοξείδιο του άνθρακα εκτός της ατμόσφαιρας. Αυτή η αποθήκευση άνθρακα των προϊόντων ξύλου μειώνει το αποτύπωμα άνθρακά τους

Δ = υπάρχουν εναλλακτικές για τα προϊόντα ξύλου. Ωστόσο, οι μη ξύλινες εναλλακτικές απαιτούν μεγαλύτερη ενέργεια για την κατασκευή τους, και η ενέργεια που χρησιμοποιείται είναι σχεδόν εξ ολοκλήρου από ορυκτό άνθρακα (πχ πετρέλαιο). Η χρήση ξύλινων προϊόντων επομένως μειώνει το αποτύπωμα άνθρακα

E = το συνολικό αποτύπωμα άνθρακα. Κάποιες φορές το συνολικό άθροισμα των B,Γ,Δ μπορεί να είναι μεγαλύτερο από το A, με αποτέλεσμα να έχουμε αρνητικό αποτύπωμα. Επομένως, η χρήση ξύλινων προϊόντων μπορεί να μας βοηθήσει στη μείωση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής.

1.3 Πρωτογενή προϊόντα ξύλου

Τα πρωτογενή προϊόντα ξύλου είναι αυτά που παράγονται απευθείας από τα δέντρα των δασών, και σε αυτά περιλαμβάνονται ο πολτός, η ξυλεία και τα συνθετικά ξύλου. Το τελευταίο είναι μια οικογένεια προϊόντων που περιέχει ξύλο ολόκληρο ή σε μορφή ινών ως βασικό συστατικό του προϊόντος. Τα θετικά στη χρήση αυτής της οικογένειας προϊόντων είναι η εκμετάλλευση μικρότερων δέντρων, η ανακύκλωση ξύλων από άλλα ανεπιθύμητα προϊόντα, η μεγαλύτερη στιβαρότητα (σε σχέση με ένα αποκλειστικά ξύλινο προϊόν) και η δυνατότητα παρασκευής διαφορετικών μεγεθών. Ωστόσο, είναι εύκολα κατανοητό πως αυτά έχουν μεγαλύτερο αποτύπωμα άνθρακα συγκριτικά με τον πολτό και την ξυλεία, διότι επιδέχονται επιπλέον επεξεργασία για την παρασκευή τους, κάτι το οποίο καταναλώνει ενέργεια, αυξάνοντας έτσι το αποτύπωμά τους.

Κάποια βασικά πρωτογενή προϊόντα ξύλου είναι τα ακόλουθα:

✚ Η **σκληρή ινοσανίδα** (επίσης γνωστή ως σκληρή σανίδα ή ινοσανίδα υψηλής πυκνότητας [HDF]) χρησιμοποιείται συνήθως για εσωτερικές, μη δομικές εφαρμογές, όπως στα έπιπλα. Αυτό το προϊόν κατασκευάζεται με τη διάσπαση ξύλου (συνήθως υπολειμμάτων από άλλες διαδικασίες κατασκευής) σε μικρές ίνες, στη συνέχεια ανάμειξη των ινών με ρητίνη και κερί για να σχηματιστούν στρώματα που συμπιέζονται με πίεση και θερμότητα. Η σκληρή ινοσανίδα είναι πολύ πυκνή, συνήθως περισσότερο από 800 kg m⁻³.

✚ Οι **κολλητές συγκολλημένες δοκοί** είναι δομικά σύνθετες δοκοί που χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη μεγάλων φορτίων στην κατασκευή κτιρίων. Τα πριονισμένα ξύλα, επιλεγμένα για τις μηχανικές ιδιότητες που σχετίζονται με την αντοχή στο στρες, συγκολλούνται και διατάσσονται σε στρώματα (με το υψηλής

ποιότητας ξύλο στα εξωτερικά στρώματα και το χαμηλότερης ποιότητας ξύλο στα εσωτερικά στρώματα) με την κατεύθυνση των ινών παράλληλη στο μήκος της δοκού. Το μέγεθος των κολλητών συγκολλημένων δοκών μπορεί να διαφέρει σημαντικά, επιτρέποντας τη χρήση τους όπως απαιτείται για συγκεκριμένη εφαρμογή. Οι κολλητές συγκολλημένες δοκοί για εσωτερική χρήση μπορούν να χρησιμοποιούν συγκολλητικά που είναι λιγότερο ανθεκτικά στις επιδράσεις του εξωτερικού περιβάλλοντος (π.χ., σχετική υγρασία και θερμοκρασία), ενώ οι κολλητές συγκολλημένες δοκοί για εξωτερική χρήση πρέπει να χρησιμοποιούν συγκολλητικά που είναι πιο ανθεκτικά στις αλλαγές του εξωτερικού περιβάλλοντος.

🔗 Η **ινোসανίδα μέσης πυκνότητας (MDF)** χρησιμοποιείται συνήθως για εσωτερικές, μη δομικές εφαρμογές, όπως στα έπιπλα. Αυτό το προϊόν κατασκευάζεται με τη διάσπαση ξύλου (συνήθως υπολειμμάτων από άλλες διαδικασίες κατασκευής) σε μικρές ίνες, στη συνέχεια ανάμειξη των ινών με ρητίνη και κερί για να σχηματιστούν στρώματα που συμπιέζονται με πίεση και θερμότητα. Η πυκνότητα της MDF κυμαίνεται μεταξύ 600 και 800 kg m⁻³.

🔗 Η **προσανατολισμένη σανίδα από νήματα (OSB)** είναι δομικό προϊόν πάνελ που χρησιμοποιείται συνήθως για τη στέγη, τους τοίχους και το δάπεδο στην κατασκευή. Το προϊόν συνήθως κατασκευάζεται από τρία ή περισσότερα στρώματα με τα νήματα σε κάθε στρώμα να είναι προσανατολισμένα σε εναλλασσόμενες κατευθύνσεις (δηλ. παράλληλα στο μήκος του πάνελ ή κάθετα σε αυτό). Για την OSB χρησιμοποιούνται συγκολλητικά ανθεκτικά στο νερό. Τα νήματα στο εξωτερικό στρώμα είναι προσανατολισμένα με την κατεύθυνση των ινών παράλληλη στο μήκος του πάνελ. Τα νήματα που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως περίπου τρεις φορές πιο μακριά από το πλάτος τους.

✚ Η **μοριοσανίδα** κατασκευάζεται με τη μείωση των υπολειμμάτων κατασκευής ξύλινων προϊόντων (π.χ., ξύσματα πλανίσματος, πριονίδια) και των ανακυκλωμένων ξύλινων προϊόντων σε μικρά σωματίδια. Τα μεγέθη των σωματιδίων συχνά διαφέρουν στο πάχος της σανίδας, με μικρότερα σωματίδια στα εξωτερικά στρώματα και μεγαλύτερα σωματίδια στο κεντρικό στρώμα. Η μοριοσανίδα χρησιμοποιείται συνήθως για εσωτερικές χρήσεις, όπως τα έπιπλα, και έχει εύρος πυκνότητας περίπου 600–800 kg m⁻³.

✚ Το **κόντρα πλακέ** κατασκευάζεται από λεπτά στρώματα ξύλου, τα οποία έχουν αποφλοιωθεί από έναν κορμό σε ένα περιστροφικό τόρνο. Αυτά τα λεπτά καπλαμάδες συνδυάζονται σε τρία ή περισσότερα (συνήθως μονό αριθμό) στρώματα σε εναλλασσόμενες κατευθύνσεις ινών. Τα εξωτερικά στρώματα είναι ευθυγραμμισμένα με την κατεύθυνση των ινών παράλληλη στο μήκος του πάνελ. Το κόντρα πλακέ για εσωτερικές εφαρμογές μπορεί να χρησιμοποιεί συγκολλητικό που είναι λιγότερο ανθεκτικό στο νερό από το κόντρα πλακέ για εξωτερική χρήση. Σε εσωτερικές εφαρμογές, το κόντρα πλακέ χρησιμοποιείται συχνά στα έπιπλα. Το κόντρα πλακέ για εξωτερικές εφαρμογές πρέπει να χρησιμοποιεί συγκολλητικό ανθεκτικό στο νερό. Η επιφάνεια είναι η πιο κοινή χρήση του κόντρα πλακέ σε εξωτερικές εφαρμογές.

✚ Το **ξύλινο πέλετ** κατασκευάζεται με τη συμπίεση των υπολειμμάτων ξύλου από άλλες διαδικασίες κατασκευής και χρησιμοποιείται κυρίως για συστήματα θέρμανσης βιομηχανικών, εμπορικών και οικιακών εγκαταστάσεων.

✚ Τα **σύνθετα ξύλινα υλικά** έχουν χρησιμοποιηθεί από καιρό τόσο ως διακοσμητικά όσο και ως δομικά στοιχεία στο ανθρώπινο περιβάλλον. Αυτά τα υλικά εκμεταλλεύονται τις καλύτερες ιδιότητες του ξύλου (και εξαλείφουν ή

ελαχιστοποιούν τα ελαττώματα) και τα συνδυάζουν με άλλα υλικά (συγκολλητικά, πλαστικά κ.λπ.) για να δημιουργήσουν μια μεγάλη ποικιλία νέων προϊόντων που καλύπτουν τις ανάγκες της αγοράς. Στην Ευρώπη, τα πιο κοινά παραγόμενα ξύλινα πάνελ είναι η μοριοσανίδα και η MDF. Ωστόσο, η OSB, το παραδοσιακό κόντρα πλακέ, η σανίδα μόνωσης και η σκληρή σανίδα είναι επίσης σημαντικά προϊόντα. Άλλα πιο πρόσφατα προϊόντα περιλαμβάνουν τη συγκολλημένη ξυλεία από καπλαμάδες (LVL), τη ελαφριά MDF (LDF), την HDF και τη διασταυρούμενη ξυλεία (CLT). Τα τελευταία χρόνια, οι τεχνολογικές καινοτομίες έχουν προωθήσει τον τομέα των ξύλινων πάνελ. Κυρίως, η θερμή πίεση και η επακόλουθη δυνατότητα των θερμοσκληρυντικών ρητινών έχουν βελτιώσει τα σύνθετα προϊόντα από σωματίδια και νήματα (μοριοσανίδα, OSB), ίνες (MDF, HDF) και καπλαμάδες (κόντραπλακέ, LVL).

Στην παρακάτω εικόνα, μπορούμε να δούμε το **αποτύπωμα άνθρακα των προαναφερθέντων πρωτογενών προϊόντων ξύλου:**

Table 16 Carbon footprint of 1 m³ of selected primary wood products from Ecoinvent 2.0 (2010)

Primary wood product	Carbon footprint (kg CO ₂ e)
Sawn timber, hardwood, raw, air dried, $u = 20 \%$, at plant/RER U	57
Sawn timber, hardwood, raw, kiln dried, $u = 10 \%$, at plant/RER U	79
Sawn timber, softwood, planed, air dried, at plant/RER U	85
Wood pellets, $u = 10 \%$, at storehouse/RER U	103
Sawn timber, softwood, planed, kiln dried, at plant/RER U	104
Glued laminated timber, indoor use, at plant/RER U	204
Glued laminated timber, outdoor use, at plant/RER U	222
Particle board, indoor use, at plant/RER U	262
Oriented strand board, at plant/RER U	310
Particle board, outdoor use, at plant/RER U	329
Medium-density fiberboard, at plant/RER U	495
Plywood, indoor use, at plant/RER U	497
Fiberboard hard, at plant/RER U	581
Plywood, outdoor use, at plant/RER U	643

1.4 Παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν το αποτύπωμα άνθρακα

Υπάρχουν ποικίλλοι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν το αποτύπωμα άνθρακα των προϊόντων ξύλου. Ξεκινώντας από την αρχή της ζωής τους, ένας από τους παράγοντες είναι η διαχείριση των δασών.

1.4.1 Βιώσιμη διαχείριση των δασών

Η **βιώσιμη διαχείριση των δασών** (ΒΔΔ) απαρτίζεται από πρακτικές που διατηρούν και ενισχύουν την οικονομική, κοινωνική και περιβαλλοντική αξία των δασών προς όφελος των υπάρχοντων και μελλοντικών γενεών. Ένα από τα μέσα αυτής είναι και η αναδάσωση, δηλαδή η φύτευση δέντρων σε εδάφη που είτε ήταν παλαιότερα δασικές εκτάσεις, είτε όχι. Βασικές αρχές της ΒΔΔ περιλαμβάνουν την διατήρηση της βιοποικιλότητας, την παροχή προϊόντων και την προστασία του εδάφους. Για το σκοπό αυτό, έχει συγκροτηθεί από το 1993 το Forest Stewardship Council, που έχει παγκόσμια εμβέλεια. Η FSC πιστοποίηση σε δάση της Σουηδίας έχει αναδείξει μεγαλύτερα αποθέματα άνθρακα και λιγότερες εκπομπές, συγκριτικά με μη πιστοποιημένα δάση της ίδιας περιοχής.



Ο τρόπος που θα κόψεις ένα δέντρο, και γενικά ένα δάσος για να εκμεταλλευτείς το ξύλο του παίζει ρόλο στο αποτύπωμα άνθρακα του τελικού προϊόντος. Το καθαρό κόψιμο, παρόλο που έχει το μεγαλύτερο οικονομικό όφελος από όλες τις τεχνικές, είναι και αυτό με το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό κόστος. Αφορά την πλήρη αποψήλωση μίας συγκεκριμένης περιοχής. Είναι εύκολα αντιληπτό ότι με τη τεχνική αυτή, χάνεται μια πολύ μεγάλη δεξαμενή άνθρακα.

Μία νέα τεχνική, ονομαζόμενη κοπή Shelterwood, αφορά την απομάκρυνση δέντρων σε μια σειρά κοπών που έχουν σχεδιαστεί για τη δημιουργία μιας νέας γενιάς δενδρυλλίων υπό την προστασία των εναπομείναντων δέντρων. Αποτελεί μια ενδιάμεση κατάσταση μεταξύ της ολικής ξύλευσης και της επιλεκτικής, με σαφές πλεονέκτημα το χαμηλό αποτύπωμα άνθρακα. Πρόκειται για μια περίπλοκη διαδικασία που απαιτεί προσεκτικό προγραμματισμό και παρακολούθηση για την διασφάλιση της επιτυχούς αναγέννησης του δάσους. Θα πρέπει να τονιστεί και το ρίσκο του εγχειρήματος αυτού, καθώς μπορεί τα εναπομείναντα δέντρα να μην είναι ικανά να προστατεύσουν τα νέα δενδρύλλια από το περιβαλλοντολογικό στρες, ένα ρίσκο που έλαβαν οι γερμανοί ξυλοκόποι και επέτυχαν να ανατροφοδοτούν τα δάση τους.

Η επιλεκτική ξύλευση επίσης διατηρεί το αποτύπωμα άνθρακα σε χαμηλά επίπεδα. Αφορά την προσεκτική αφαίρεση συγκεκριμένων δέντρων ενώ ταυτόχρονα δεν επηρεάζει το περιβάλλον οικοσύστημα. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει νωρίτερα να έχει μελετηθεί το δάσος έτσι ώστε να υπολογιστεί το ελάχιστο μήκος κοπής (περίπου τα 20 χρόνια) και η βιομάζα του, κάτι που θα πρέπει να αξιολογηθεί και στο τέλος της κοπής. Αυτό βεβαίως προϋποθέτει και την εκπαίδευση του ανθρωπίνου δυναμικού που θα ασχοληθεί με τη συγκομιδή των συγκεκριμένων ξύλων. Η συγκεκριμένη

τεχνική έχει κυρίως εφαρμοστεί σε δάση της βορειοδυτικής ακτής των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής.

Αφού λοιπόν παρθεί η πρώτη ύλη, τότε το ξύλο δέχεται μια **επεξεργασία** που χωρίζεται σε δύο μέρη, την πρωτοπαθή και την δευτεροπαθή.

1.4.2. Επεξεργασία ξυλείας

✚ Η **πρωτοπαθής επεξεργασία** αποτελείται από το πριονιστήριο και το στέγνωμα. Στον πριονισμό του ξύλου καταναλώνεται ενέργεια, κυρίως από ορυκτά, που συμβάλλουν στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Κατά το στέγνωμα του ξύλου, η μέθοδος που χρησιμοποιείται στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων, είναι ο κλίβανος. Πρόκειται για μια διαδικασία που βασίζεται βαριά στα ορυκτά καύσιμα και επιβαρύνει σοβαρά την ατμόσφαιρα με GHGs. Για να μειωθεί το αποτύπωμα άνθρακα σε αυτές τις διαδικασίες, προτείνεται η εναλλαγή σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, και ιδίως στο στάδιο του πριονισμού να χρησιμοποιείται κυρίως το υπόλειμμα ξύλου (το B στην εξίσωση) για να παραχθεί η απαιτούμενη ενέργεια της διαδικασίας.

Η ξήρανση του ξύλου είναι το κλειδί για τον έλεγχο της ποιότητας του ξύλου στα τελικά προϊόντα και καταναλώνει έως και το 90% του χρόνου επεξεργασίας στα σκληρά ξύλα και πάνω από το 70% του κόστους πρωτογενούς επεξεργασίας, με τη χρήση σημαντικών ποσοτήτων θερμότητας και ενέργειας. Η παρεχόμενη θερμότητα χρησιμοποιείται κυρίως για τη διαδικασία ξήρανσης, η οποία πραγματοποιείται σε κλίβανο. Ο χρόνος παράδοσης και η ποιότητα του ξύλου είναι η κύρια προτεραιότητα πριν από την κατανάλωση ενέργειας κατά την παραγωγή της ξυλείας. Επομένως, η εισαγωγή βελτιωμένων διαδικασιών ξήρανσης, συμπεριλαμβανομένης μιας απλής

αλλά φιλικής προς το περιβάλλον διαδικασίας ξήρανσης, θα ήταν επωφελής για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, διασφαλίζοντας παράλληλα την ποιότητα των τελικών προϊόντων. Για παράδειγμα, η ηλιακή ξήρανση παρέχει την ευκαιρία ως εναλλακτική μέθοδος ξήρανσης της ξυλείας, ενώ χρησιμοποιεί ανανεώσιμη ηλιακή ενέργεια για την αντιμετώπιση των ελλείψεων που σχετίζονται με τη διαδικασία ξήρανσης με βάση τα ορυκτά καύσιμα. Επιπλέον, τα ηλιακά συστήματα χρησιμοποιούν την ενέργεια του ήλιου, η οποία είναι άφθονη, ανεξάντλητη και μη ρυπογόνος, με αποτέλεσμα να έχουν μικρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, σε αντίθεση με άλλες μορφές μεθόδων ξήρανσης που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα. Ωστόσο, εξωτερικοί παράγοντες, όπως η θερμοκρασία του αέρα, η ταχύτητα του αέρα, η γεωγραφική θέση και η σχετική υγρασία, επηρεάζουν τον πιθανό ρυθμό ξήρανσης. Ωστόσο, έχει πλεονεκτήματα σε σχέση με τις τεχνικές ξήρανσης σε ανοιχτό στον ήλιο ή στον αέρα, επειδή ο ηλιακός κλίβανος παγιδεύει την ηλιακή ενέργεια για να αυξήσει τη θερμοκρασία του κυκλοφορούντος αέρα και εξασφαλίζει την απαιτούμενη ισορροπία σε περιεκτικότητα υγρασία, αυξημένη διάρκεια ζωής, προσθήκη αξίας και βελτίωση της ποιότητας. Αυτά τα χαρακτηριστικά μπορούν να συμπληρωθούν περαιτέρω από την ελεγχόμενη υγρασία του αέρα και άλλες συνθήκες ξήρανσης, ακόμη και με τη χρήση ψεκαστήρων νερού σε ορισμένες περιπτώσεις. Ωστόσο, μπορεί να υπάρχουν ακόμα πιθανότητες η παραγωγικότητα να επηρεάζεται από τις καιρικές συνθήκες, όπως οι βροχοπτώσεις, η νεφοκάλυψη, και τα λιγότερο προβλέψιμα αποτελέσματα από αυτά των βιομηχανικών κλιβάνων.

Η ξήρανση σε ηλιακούς κλιβάνους επηρεάζεται συνήθως από τις γεωγραφικές και κλιματολογικές συνθήκες. Για παράδειγμα, η θερμοκρασία στο εσωτερικό του κλιβάνου επηρεάζεται από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και την ηλιακή ακτινοβολία. Οι περιοχές με χαμηλή υγρασία προσφέρουν παραγωγική απόδοση για

τους ηλιακούς κλιβάνους. Σύμφωνα με τους Phonetip et al. (2017b), η μείωση του επιπέδου της σχετικής υγρασίας (relative humidity, RH) στο 40% μπορεί να στεγνώσει τις σανίδες ταχύτερα από ό,τι όταν οι συνθήκες διατηρούνται στο 60%. Η αξιοποίηση της χαμηλής RH περιβάλλοντος θα μπορούσε να οδηγήσει σε διάφορα οφέλη, όπως η μείωση της κατανάλωσης νερού και ενέργειας.

Ως εκ τούτου, προκειμένου να βελτιωθεί η αποτελεσματικότητα και να μειωθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, χρησιμοποιούνται στην πράξη διάφορα είδη ηλιακής ξήρανσης, όπως οι ηλιακοί ξηραντήρες ολοκληρωμένου, κατανεμημένου και μικτού τύπου με βάση τον τρόπο αξιοποίησης της ηλιακής θερμότητας, καθώς και το σύστημα θερμοκηπίου, ο εξωτερικός συλλέκτης και η ηλιακή ξήρανση μικτού τύπου ανάλογα με τα συστήματα θερμοκηπίου. Επί του παρόντος, μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ενισχυμένοι ηλιακοί ξυλόκηποι με χαρακτηριστικά την αποθήκευση ηλιακής ενέργειας με ανεξάρτητη θέρμανση, την ενσωμάτωση θερμαντήρα αέρα στην αποθήκευση και στο θάλαμο ξήρανσης και τη διαχείριση διαφορετικών κύκλων ξήρανσης με βάση τον ποιοτικό έλεγχο των προϊόντων.

Συνολικά, η ηλιακή ξήρανση έχει περισσότερα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα λόγω του μικρότερου χρόνου ξήρανσης και καλύτερη ποιότητα ξήρανσης από εκείνη της ξήρανσης με αέρα. Ομοίως, απαιτεί χαμηλό λειτουργικό κόστος και λιγότερο εκπαιδευμένο ανθρώπινο δυναμικό, και τελικά αποτελεί μια φιλική προς το περιβάλλον τεχνική λόγω της εξάρτησής της από ανανεώσιμες πηγές και των χαμηλών περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

 **Η δευτεροπαθής επεξεργασία** περιλαμβάνει την περαιτέρω διύλιση της ακατέργαστης ξυλείας σε τελικό προϊόν. Εδώ έχουμε την μηχανουργική κατεργασία και το φινίρισμα. Ιδίως οι πτητικές οργανικές ουσίες που χρησιμοποιούνται στο

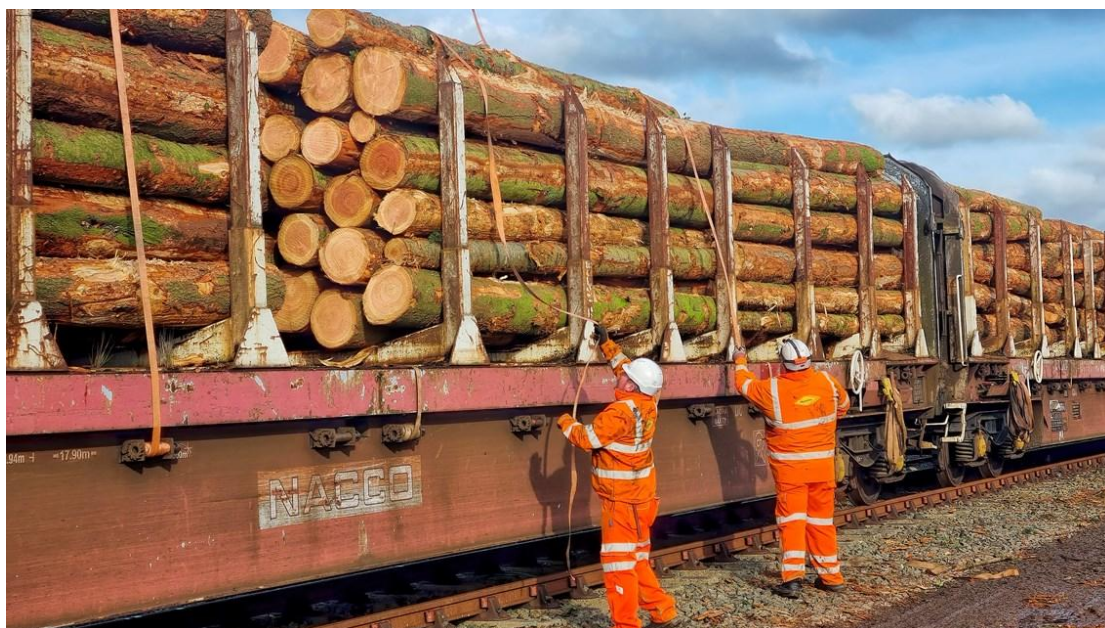
φινίρισμα των προϊόντων μπορούν να συνεισφέρουν πολύ στις εκπομπές GHGs. Η εναλλαγή σε ουσίες με βάση το νερό για το φινίρισμα θα βοηθούσε στη πτώση του αποτυπώματος άνθρακα των ξύλινων προϊόντων.

1.4.3 Μεταφορά και διανομή προϊόντων ξύλου

Ένας ακόμα παράγοντας που συμβάλλει στο αποτύπωμα άνθρακα των προϊόντων ξύλου είναι η μεταφορά και η διανομή. Τα ακατέργαστα υλικά μεταφέρονται από το δάσος στις μονάδες επεξεργασίας και τα τελικά προϊόντα από τους κατασκευαστές στο τελικό χρήστη. Οι τρόποι μεταφοράς είναι με φορτηγά, με τρένο ή μέσω νερού. Τα φορτηγά χρησιμοποιούνται συνήθως για τη μεταφορά ξυλείας σε μικρές ή μεσαίες αποστάσεις. Είναι ένας ευέλικτος τρόπος και αποτελεσματικός, όμως έχει υψηλό αποτύπωμα άνθρακα εξαιτίας της κατανάλωσης βενζίνης/πετρελαίου. Γι' αυτό θα πρέπει να είναι πλήρως φορτωμένα για να μεγιστοποιείται ο λόγος καύσιμο προς τόνους μεταφοράς. Προτείνεται επίσης η χρήση λογισμικών πλοήγησης με στόχο την μείωση της χιλιομετρικής απόστασης και την κατανάλωση καυσίμου. Στο τελευταίο μπορεί να συμβάλει και η χρήση νέας τεχνολογίας φορτηγών, καθώς και φορτηγά που χρησιμοποιούν εναλλακτικές πηγές ενέργειας (πχ ηλεκτρικά).



Η μεταφορά με τρένο έχει μεγαλύτερη απόδοση στην κατανάλωση καυσίμου από τη χρήση φορτηγών. Προτιμάται στις μεγάλες αποστάσεις. Η αναβάθμιση των υπάρχοντων σιδηροδρομικών υποδοχών θα μειώσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Επιπλέον, ο συνδυασμός των δύο αναφερθέντων μέσων μεταφοράς μπορεί να μειώσει το τελικό αποτύπωμα άνθρακα του προϊόντος.



Η μεταφορά μέσω υδάτων αποτελεί την καλύτερη εκδοχή όσον αφορά την απόδοση καυσίμου. Σοβαρό μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η υψηλή υγρασία που επικρατεί, μια διαδικασία που μετέπειτα θα απαιτεί μεγαλύτερο στέγνωμα στην πρωτοπαθή επεξεργασία του ξύλου αλλά μπορεί και να εκκινήσει την εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα από το προϊόν.

Αξίζει να γίνει και μία αναφορά στην μεταφορά με τη χρήση αεροπλάνου. Αυτός ο τρόπος χρησιμοποιείται για τα τελικά προϊόντα, και ιδίως για υψηλής αξίας. Αποτελεί την μέθοδο μεταφοράς με το μεγαλύτερο αποτύπωμα άνθρακα. Αυτό την καθιστά απαραίτητη μόνο σε περιορισμένες περιπτώσεις και να κρατείται ως έσχατη λύση.

1.5 Φάση τέλους της ζωής των προϊόντων ξύλου

Η φάση του τέλους ζωής των προϊόντων ξύλου είναι ένα κρίσιμο στάδιο που επηρεάζει σημαντικά το συνολικό ανθρακικό τους αποτύπωμα και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις τους. Αυτή η φάση περιλαμβάνει την απόρριψη, την ανακύκλωση ή την επαναχρησιμοποίηση των προϊόντων ξύλου στο τέλος της χρήσιμης ζωής τους. Η σωστή διαχείριση των σεναρίων τέλους ζωής μπορεί να οδηγήσει σε μείωση των εκπομπών, εξοικονόμηση πόρων και ενίσχυση της βιωσιμότητας.

1.5.1 Μέθοδοι απόρριψης

✚ Όταν τα προϊόντα ξύλου φτάνουν στο τέλος της χρήσιμης ζωής τους, μία κοινή μέθοδος απόρριψης είναι η ταφή σε χωματερές. Ωστόσο, τα προϊόντα ξύλου σε χωματερές μπορούν να υποστούν αναερόβια αποσύνθεση, παράγοντας μεθάνιο (CH_4), ένα ισχυρό αέριο του θερμοκηπίου. Επιπλέον, η ταφή οδηγεί σε απώλεια πολύτιμων υλικών που θα μπορούσαν να επαναχρησιμοποιηθούν ή να ανακυκλωθούν, και οι χωματερές καταλαμβάνουν μεγάλες εκτάσεις γης, οδηγώντας σε μακροπρόθεσμη περιβαλλοντική υποβάθμιση. Για την αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων, μπορούν να εφαρμοστούν προγράμματα εκτροπής αποβλήτων από χωματερές για την ανακατεύθυνση των αποβλήτων ξύλου προς την ανακύκλωση ή την επαναχρησιμοποίηση. Η εγκατάσταση συστημάτων συλλογής μεθανίου σε χωματερές μπορεί επίσης να βοηθήσει στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, χρησιμοποιώντας το συλλεγμένο αέριο για ενέργεια.

✚ Μια άλλη μέθοδος απόρριψης είναι η καύση, η οποία απελευθερώνει διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και άλλους ρύπους, συμβάλλοντας στις εκπομπές

αερίων του θερμοκηπίου. Αν και η καύση για την παραγωγή ενέργειας μπορεί να ανακτήσει κάποια ενέργεια από τη διαδικασία καύσης, είναι συχνά λιγότερο αποδοτική σε σύγκριση με την ανακύκλωση ή την επαναχρησιμοποίηση. Για να μειωθεί η περιβαλλοντική επίπτωση της καύσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνολογίες προηγμένης καύσης με συστήματα ελέγχου ρύπων για να ελαχιστοποιηθούν οι εκπομπές. Ωστόσο, η προτεραιότητα πρέπει να δίνεται στην ανακύκλωση και την επαναχρησιμοποίηση έναντι της καύσης, καθώς εξοικονομεί πόρους και μειώνει τις εκπομπές.

1.5.2 Ανακύκλωση προϊόντων ξύλου

Η ανακύκλωση και η επαναχρησιμοποίηση των προϊόντων ξύλου στο τέλος του κύκλου ζωής τους μπορεί να μειώσει σημαντικά τις εκπομπές και να εξοικονομήσει πόρους. Η ανακύκλωση των προϊόντων ξύλου μπορεί να αποφύγει την ανάγκη για νέες πρώτες ύλες και να μειώσει τις εκπομπές μεθανίου από χωματερές. Η μηχανική ανακύκλωση περιλαμβάνει τη διάσπαση των προϊόντων ξύλου σε μικρότερα κομμάτια ή ίνες για χρήση σε νέα προϊόντα όπως μοριοσανίδες ή ινοσανίδες. Η **χημική ανακύκλωση** χρησιμοποιεί χημικές διαδικασίες για τη διάσπαση του ξύλου στα βασικά του συστατικά, τα οποία μπορούν στη συνέχεια να ανασυντεθούν σε νέα υλικά. Τα αποδοτικά συστήματα συλλογής και διαλογής είναι απαραίτητα για την εξασφάλιση υψηλής ποιότητας υλικού ανακύκλωσης, και η ανάπτυξη αγορών για ανακυκλωμένα προϊόντα ξύλου μπορεί να υποστηρίξει τις υποδομές ανακύκλωσης.

Η επαναχρησιμοποίηση και η επανατοποθέτηση των προϊόντων ξύλου επεκτείνει τον κύκλο ζωής τους, καθυστερώντας την απόρριψη και μειώνοντας τη ζήτηση για νέα υλικά. Οι στρατηγικές επαναχρησιμοποίησης περιλαμβάνουν τη μετατροπή ξύλου από παλιά έπιπλα, κτίρια και άλλες κατασκευές σε νέα έπιπλα, δάπεδα ή υλικά

κατασκευής. Το ανακτημένο ξύλο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για καλλιτεχνικά έργα, διακοσμητικά αντικείμενα και λειτουργικά προϊόντα όπως ράφια και λύσεις αποθήκευσης. Ο σχεδιασμός προϊόντων με σκοπό την αποσυναρμολόγηση διευκολύνει την επαναχρησιμοποίηση και την επανατοποθέτηση, ενώ η προώθηση πρακτικών επαναχρησιμοποίησης μεταξύ των καταναλωτών και των επιχειρήσεων μπορεί να ενισχύσει περαιτέρω τη βιωσιμότητα.

Η **κομποστοποίηση** των προϊόντων ξύλου μπορεί να επαναφέρει τον άνθρακα στο έδαφος, λειτουργώντας ως μορφή δέσμευσης άνθρακα. Αυτή η διαδικασία προσθέτει επίσης οργανική ύλη στο έδαφος, βελτιώνοντας τη δομή, τη γονιμότητα και την ικανότητα συγκράτησης νερού του εδάφους. Οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις κομποστοποίησης μπορούν να χειριστούν σημαντικούς όγκους αποβλήτων ξύλου, εξασφαλίζοντας την κατάλληλη αποσύνθεση και την παραγωγή βελτιωτικών του εδάφους. Οι πρωτοβουλίες κομποστοποίησης σε κοινοτικό και οικιακό επίπεδο μπορούν επίσης να χειριστούν ορισμένα είδη αποβλήτων ξύλου, όπως πριονίδι και ακατέργαστα ξύλινα τσιπ. Είναι σημαντικό να διασφαλιστεί ότι μόνο ακατέργαστα και μη μολυσμένα ξύλινα απόβλητα κομποστοποιούνται για να αποφευχθεί η μόλυνση του εδάφους, ενώ η διατήρηση της σωστής ισορροπίας υγρασίας, οξυγόνου και θερμοκρασίας είναι κρίσιμη για την αποδοτική αποσύνθεση.

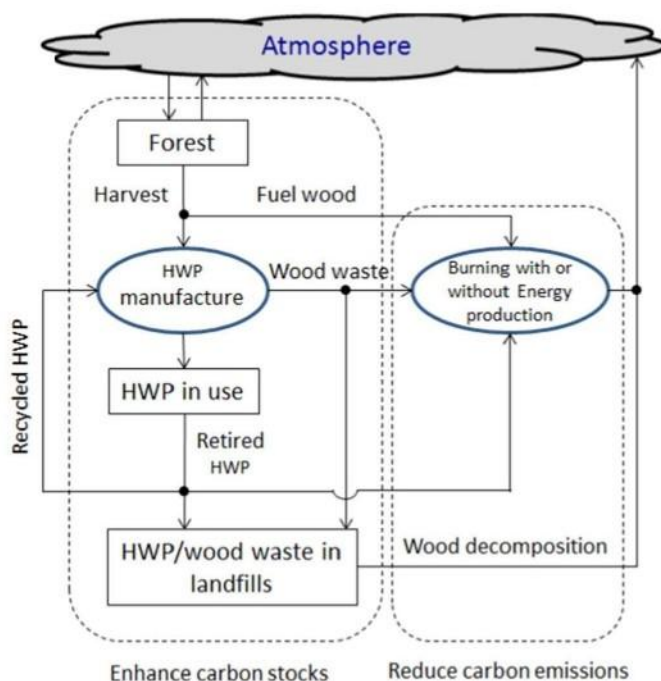
Η **φυσική αποσύνθεση** επιτρέπει στα προϊόντα ξύλου να αποσυντίθενται σε δάση ή άλλες φυσικές τοποθεσίες, συμβάλλοντας στον κύκλο των θρεπτικών συστατικών και υποστηρίζοντας την υγεία των οικοσυστημάτων. Αυτή η μέθοδος απελευθερώνει άνθρακα αργά, κάτι που μπορεί να είναι λιγότερο επιβαρυντικό σε σχέση με άλλες μεθόδους απόρριψης. Η ελεγχόμενη αποσύνθεση περιλαμβάνει τη διαχείριση της τοποθέτησης και των συνθηκών της φυσικής αποσύνθεσης για να εξασφαλιστεί ότι ωφελεί το οικοσύστημα χωρίς να δημιουργεί περιβαλλοντικούς κινδύνους. Το ξύλο

που αποσυντίθεται φυσικά μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σε έργα αποκατάστασης οικοσυστημάτων, όπως η δημιουργία βιότοπων για άγρια ζωή ή η αποτροπή της διάβρωσης του εδάφους.

Κεφάλαιο 2 : Η συνεισφορά των προϊόντων ξύλου στη μείωση του διοξειδίου άνθρακα της ατμόσφαιρας

Το διοξείδιο του άνθρακα θεωρείται το σημαντικότερο αέριο του θερμοκηπίου. Πέρα από την υπεροχή του στην ατμόσφαιρα και τις επιπτώσεις του στην παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας, είναι το κύριο αέριο που εκπέμπεται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Τον τελευταίο αιώνα, οι άνθρωποι έχουν αυξήσει την ατμοσφαιρική συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα σε πολύ υψηλά επίπεδα, τα οποία συνεχίζουν να μεγαλώνουν. Συνεπώς, η θερμοκρασία αυξάνεται με πρωτοφανή ρυθμό σε σχέση με τα τελευταία 2.000 χρόνια, με αποτέλεσμα την κλιματική κρίση.

Τα προϊόντα ξύλου διαδραματίζουν βασικό ρόλο στην μείωση του διοξειδίου του άνθρακα και συνεπώς και στην κλιματική αλλαγή. Στα προϊόντα αυτά, ο άνθρακας είναι δεσμευμένος μέχρις ότου να αρχίσουν να φθείρονται ή να καίγονται, οπότε και απελευθερώνεται CO₂. Στο σχήμα που ακολουθεί, διακρίνουμε τον κύκλο του άνθρακα με βάση τα προϊόντα ξύλου:



2.1 Εξέταση τριών προσεγγίσεων στον κύκλο ζωής των προϊόντων ξύλου με στόχο την μείωση του CO₂

Για τη μείωση της συγκέντρωσης του CO₂ στην ατμόσφαιρα, μπορούν να εξεταστούν τρεις προσεγγίσεις στον κύκλο ζωής των προϊόντων ξυλείας.

✚ Η πρώτη, η αποθήκευση άνθρακα, αφαιρεί το CO₂ από την ατμόσφαιρα με την αποθήκευση στα δέντρα, τις ρίζες και το έδαφος ενός δάσους, και με τη συγκράτηση άνθρακα σε ξύλινα προϊόντα - στα αποθεματικά κατοικιών, ανακυκλωμένα σε άλλα προϊόντα και προϊόντα σε χωματερές.

✚ Η δεύτερη προσέγγιση είναι η χρήση του τύπου για έναν ενεργειακό λογαριασμό - αξιολογώντας τη μείωση του ισοδύναμου CO₂ στην ατμόσφαιρα ως αποτέλεσμα της επιλογής ενός προϊόντος ή διαδικασίας. Για παράδειγμα, ο κύκλος ζωής ενός προϊόντος ή υλικού που εκπέμπει λιγότερο CO₂ στην ατμόσφαιρα μπορεί να αντικατασταθεί από ένα άλλο, ένα σημαντικό πλεονέκτημα των προϊόντων ξύλου συγκριτικά με παρόμοια αυτών από άλλο υλικό (πχ μέταλλο).

✚ Η τρίτη προσέγγιση είναι η χρήση βιομάζας (ξύλο, φλοιός και γεωργικά υπολείμματα) ως καύσιμο. Τα καύσιμα προέλευσης ορυκτού χαρακτήρα όπως πετρέλαιο, βενζίνη, άνθρακας, φυσικό αέριο και προπάνιο συμβάλλουν στην προσθήκη CO₂ στην ατμόσφαιρα και είναι μη ανανεώσιμα και μη βιώσιμα. Η Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των ΗΠΑ θεωρεί τις εκπομπές CO₂ από την καύση βιομάζας "αναίσθητες στις επιπτώσεις" στην παγκόσμια θέρμανση λόγω της ικανότητας των δασών να ανακυκλώνουν το CO₂ πίσω σε άνθρακα στο ξύλο και να απελευθερώνουν οξυγόνο στην ατμόσφαιρα.

Η αποθήκευση άνθρακα αναφέρεται στη διαδικασία σύλληψης και αποθήκευσης του ατμοσφαιρικού CO₂. Αυτό μπορεί να συμβεί φυσικά μέσω βιολογικών διεργασιών ή τεχνητά μέσω διαφόρων τεχνολογικών μεθόδων. Στο πλαίσιο της δασοκομίας και των προϊόντων ξυλείας, η αποθήκευση άνθρακα πραγματοποιείται μέσω της ανάπτυξης των δέντρων και της αποθήκευσης άνθρακα στα προϊόντα.

Τα δέντρα δεσμεύουν το διοξείδιο του άνθρακα από την ατμόσφαιρα μέσω της φωτοσύνθεσης, και ένα μέρος αυτού του δεσμευμένου άνθρακα αποθηκεύεται στη ξυλώδη βιομάζα (κορμούς, κλαδιά, φύλλα, ρίζες) και στο έδαφος. Ο άνθρακας που αποθηκεύεται στη βιομάζα των δασών περιλαμβάνει όχι μόνο τα ζωντανά μέρη των δέντρων αλλά και τα νεκρά ξύλα και τα φύλλα. Αυτή η βιομάζα λειτουργεί ως δεξαμενή άνθρακα, συλλαμβάνοντας περισσότερο άνθρακα από ό,τι απελευθερώνει. Το ξύλο αποτελείται από τρεις κύριους βιοπολυμερείς (κυτταρίνη, ημικυτταρίνη και λιγνίνη). Σε μια πρώτη προσέγγιση, η στοιχειώδης σύνθεση μπορεί να αποδοθεί σε ένα στοιχειομετρικό λόγο CH₂O. Αυτό σημαίνει ότι ο ατμοσφαιρικός άνθρακας αποτελεί τουλάχιστον το 40% της ξηρής μάζας του ξύλου (αυξάνεται κάπως με την αύξηση της περιεκτικότητας σε λιγνίνη). Κάθε τόνος ξηρού ξύλου συνεπώς ισοδυναμεί με την απομάκρυνση περίπου 1,5 τόνων διοξειδίου του άνθρακα από την

ατμόσφαιρα (ο λόγος του μοριακού βάρους του CO₂ σε σύγκριση με το CH₂O: 44/30). Το καθαρό όφελος αυτής της ικανότητας αποθήκευσης ατμοσφαιρικού άνθρακα εξαρτάται από το χρονικό διάστημα πριν το υλικό οξειδωθεί και ο άνθρακας απελευθερωθεί πίσω στην ατμόσφαιρα. Σε όλες τις περιπτώσεις όπου λαμβάνονται υπόψη οι ροές και τα αποθέματα άνθρακα, είναι ουσιώδες να γίνει διάκριση μεταξύ βιογενούς και ορυκτού άνθρακα. Ακόμη και με τον βιογενή άνθρακα, είναι επίσης σημαντικό να διαφοροποιηθεί ο άνθρακας που αποθηκεύεται μακροπρόθεσμα (όπως στα παλιά δάση) από αυτόν που προέρχεται από νεότερα διαχειριζόμενα ή φυτεμένα δάση.

2.2 Διασφάλιση βιώσιμων πρακτικών για τη μεγιστοποίηση της αποθήκευσης άνθρακα.

Η διασφάλιση βιώσιμων πρακτικών στη δασοκομία είναι ζωτικής σημασίας για τη μεγιστοποίηση της αποθήκευσης άνθρακα. Η επιλεκτική υλοτόμηση, που περιλαμβάνει την προσεκτική επιλογή των δέντρων προς υλοτόμηση ενώ επιτρέπεται σε άλλα να αναπτυχθούν, βοηθά στη διατήρηση της συνολικής υγείας του δάσους και της ικανότητας αποθήκευσης άνθρακα. Επιπλέον, η αναδάσωση, που περιλαμβάνει τη φύτευση δέντρων σε αποψιλωμένες περιοχές, και η δάσωση, που περιλαμβάνει τη φύτευση δέντρων σε περιοχές που δεν ήταν προηγουμένως δασικές, μπορούν να αυξήσουν σημαντικά την αποθήκευση άνθρακα.

Τα δάση που διαχειρίζονται για την αποθήκευση άνθρακα μπορούν επίσης να προάγουν τη βιοποικιλότητα, παρέχοντας βιότοπους για ένα ευρύ φάσμα ειδών. Επιπλέον, η βιώσιμη δασοκομία και η βιομηχανία ξυλείας μπορούν να δημιουργήσουν θέσεις εργασίας και οικονομικά οφέλη ενώ συμβάλλουν στους στόχους αποθήκευσης άνθρακα.

Τα εδάφη στα δασικά οικοσυστήματα επίσης παίζουν σημαντικό ρόλο στην αποθήκευση άνθρακα. Τα δάση περιέχουν οργανικό άνθρακα που προέρχεται από φυτικά και ζωικά υλικά. Υγιή εδάφη με υψηλή οργανική περιεκτικότητα μπορούν να αποθηκεύσουν σημαντικές ποσότητες άνθρακα. Πρακτικές που ενισχύουν την υγεία του εδάφους, όπως η ελαχιστοποίηση της διαταραχής του εδάφους και η διατήρηση της δασικής κάλυψης, μπορούν να αυξήσουν την αποθήκευση άνθρακα στο έδαφος.

Όταν τα δέντρα υλοτομούνται και επεξεργάζονται σε προϊόντα ξύλου, ο άνθρακας που αποθηκεύεται στο ξύλο παραμένει αποθηκευμένος. Το ξύλο που χρησιμοποιείται σε κτίρια και υποδομές μπορεί να αποθηκεύει άνθρακα για πολλά χρόνια, καθιστώντας αυτά τα κτίρια αποτελεσματικές λύσεις μακροχρόνιας αποθήκευσης άνθρακα. Το ξύλο που χρησιμοποιείται σε έπιπλα, εργαλεία και άλλα προϊόντα επίσης διατηρεί τον αποθηκευμένο άνθρακα, και παρόλο που η διάρκεια ζωής αυτών των προϊόντων ποικίλλει, ο άνθρακας παραμένει αποθηκευμένος όσο το ξύλο παραμένει άθικτο. Η ανακύκλωση των ξυλείας προϊόντων και η επαναχρησιμοποίησή τους σε νέες εφαρμογές παρατείνει τη διάρκεια αποθήκευσης άνθρακα, μειώνοντας την ανάγκη για νέες πρώτες ύλες και διατηρώντας τον άνθρακα αποθηκευμένο για μεγαλύτερες περιόδους.

Ένας τύπος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί η αποθηκευμένη ποσότητα CO₂ σε ένα προϊόν ξύλου είναι:

$$Kg_{CO_2} = 3,67 \cdot f_c \cdot \frac{D \cdot V \cdot fw}{1 + (\frac{u}{100})}$$

Όπου έχουμε την εξής σημασία:

Kg_{CO_2} = τα κιλά διοξειδίου του άνθρακα που είναι αποθηκευμένα στο προϊόν ξύλου

3,67 = Κάθε άτομο άνθρακα αντιπροσωπεύει το μόριο διοξειδίου του άνθρακα από το οποίο προέρχεται. Ένα άτομο άνθρακα ζυγίζει 12 u και ένα μόριο διοξειδίου του άνθρακα ζυγίζει 44 u, επομένως κάθε άτομο άνθρακα αναλογεί 3,67 φορές το βάρος του (44/12)

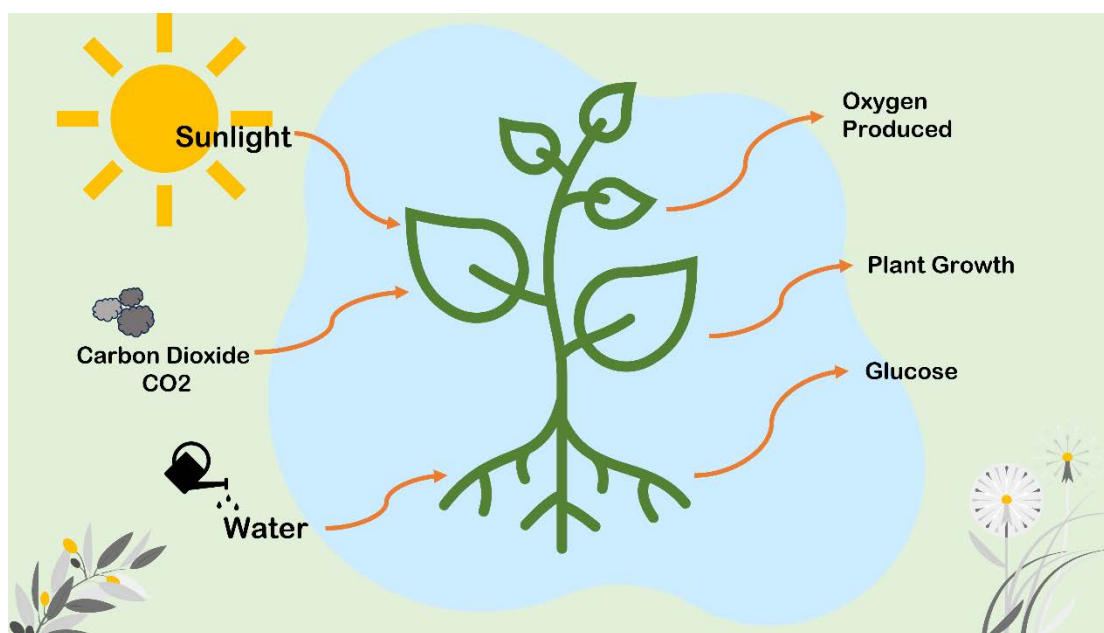
F_c = ποσοστό άνθρακα στο ξύλο, σε βάρος, που διαφέρει από τύπο σε τύπο ξύλου

D = πυκνότητα ξύλου (σε kg/m^3)

V = όγκος ξύλου (σε m^3)

fw = ποσοστό ξύλου που περιέχεται στο τελικό προϊόν

u = ποσοστό υγρασίας του ξύλου



2.2 Εξέταση σεναρίων για την αποθήκευση και την απελευθέρωση βιογενούς άνθρακα

Ας εξετάσουμε διάφορα σενάρια για την αποθήκευση και την απελευθέρωση βιογενούς άνθρακα.

✚ Στο πρώτο μας σενάριο, το παλιό δάσος καίγεται και η γη καθαρίζεται για εναλλακτική χρήση. Το αποτέλεσμα είναι η απελευθέρωση στην ατμόσφαιρα ορυκτού άνθρακα με τη μορφή διοξειδίου του άνθρακα (ο άνθρακας που αποθηκεύεται σε παλιά δάση αντιμετωπίζεται όπως ο υποθαλάσσιος ορυκτός άνθρακας. Αυτή η περιεκτικότητα σε άνθρακα προηγουμένως διατηρούνταν σε μακροπρόθεσμη (ιστορική) αποθήκευση. Επομένως, αν και τεχνικά πρόκειται για βιογενή άνθρακα, αντιπροσωπεύει άνθρακα που θα ήταν αποθηκευμένος· πριν από τη βιομηχανική επανάσταση, ήταν μέρος του φυσικού βιογενή κύκλου και μπορεί να θεωρηθεί ισοδύναμος με τον ορυκτό άνθρακα. Η συγκέντρωση αυτού του ‘ορυκτού’ άνθρακα στην ατμόσφαιρα μειώνεται σταδιακά μετά την απελευθέρωση (ο κύκλος Bern) καθώς αφαιρείται μέσω δέσμευσης στους ωκεάνιους και χερσαίους αποθηκευτικούς χώρους.

✚ Σε ένα δεύτερο σενάριο, μια νέα δασική φυτεία δημιουργείται και τα δέντρα επιτρέπεται να αναπτυχθούν για 50 χρόνια πριν τη συγκομιδή και την ανανέωση. Ο άνθρακας αφαιρείται από την ατμόσφαιρα καθώς το διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας δεσμεύεται φωτοσυνθετικά στη βιομάζα. Το συνολικό αποτέλεσμα είναι ένα όφελος (εμφανίζεται ως αρνητικός άνθρακας) επειδή το διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας έχει δεσμευτεί. Εάν η βιομάζα του δάσους καεί στη συνέχεια με ανάκτηση ενέργειας μετά από 50 χρόνια, τότε η βιομάζα πάνω από το έδαφος οξειδώνεται και ο συσσωρευμένος ατμοσφαιρικός άνθρακας χάνεται. Το συνολικό αποτέλεσμα είναι παρ' όλα αυτά ένα όφελος όσον αφορά τη δέσμευση άνθρακα. Αυτό συμβαίνει επειδή έχει αφαιρεθεί διοξείδιο του άνθρακα από την ατμόσφαιρα κατά την περίοδο των 100 ετών της εξέτασης. Όταν η βιομάζα πάνω από το έδαφος καίγεται στη συνέχεια, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την επιστροφή του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Αυτό ισχύει μόνο επειδή δημιουργήθηκε

νέο δάσος. Ωστόσο, η καύση παρθένου ξύλινου βιομάζας δεν μπορεί σοβαρά να θεωρηθεί αποτελεσματική στρατηγική μετριασμού. Είναι πιο συνετό να αξιοποιηθεί η θερμική αξία της βιομάζας και να αντικατασταθεί με μια εναλλακτική λύση ορυκτού καυσίμου. Το όφελος προκύπτει τότε όχι μόνο από την αποθήκευση ατμοσφαιρικού άνθρακα στην αναπτυσσόμενη βιομάζα, αλλά επιπλέον από την αποφυγή εκπομπής ορυκτού άνθρακα.

✚ Σε ένα τρίτο σενάριο, ο βιογενής άνθρακας που ενσωματώνεται στο φυτεμένο δάσος αποθηκεύεται σε ξύλινα προϊόντα για 50 χρόνια, πριν χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο, πραγματοποιούνται τρία οφέλη. Κατά τη φάση ανάπτυξης του δάσους, το διοξείδιο του άνθρακα δεσμεύεται λόγω της αύξησης του μεγέθους των δέντρων. Μετά τη συγκομιδή, ο άνθρακας συνεχίζει να αποθηκεύεται στα ξύλινα προϊόντα. Μόνο στο τέλος της ζωής τους αυτός ο αποθηκευμένος άνθρακας απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. Και πάλι, εάν το ξύλο καεί με ανάκτηση ενέργειας, τότε υπάρχει επίσης το όφελος της αποφυγής εκπομπής του ορυκτού άνθρακα. Μια ακόμη καλύτερη επιλογή είναι να μεταβιβαστεί το ξύλινο υλικό κατά μήκος της αλυσίδας αξίας προϊόντος μέσω αρκετών κύκλων ζωής πριν την τελική καύση με ανάκτηση ενέργειας.

Για να αντικατοπτριστούν οι εξελίξεις στην έρευνα για τον άνθρακα στα δάση και στα προϊόντα ξύλου, προτάθηκαν διάφορες προσεγγίσεις λογιστικής άνθρακα για την εκτίμηση και την αναφορά των αποθεμάτων και των αλλαγών αποθεμάτων άνθρακα στα προϊόντα, όπως η προσέγγιση αλλαγής αποθέματος, η προσέγγιση παραγωγής, η προσέγγιση ατμοσφαιρικής ροής και η προσέγγιση απλής αποσύνθεσης. Αρκετές μελέτες πρότειναν ότι παγκοσμίως τα αποθέματα άνθρακα των προϊόντων ξύλου αυξάνονταν. Οι Winjum et al. (1998) εκτίμησαν ότι τα παγκόσμια αποθέματα άνθρακα των προϊόντων αυξήθηκαν κατά περίπου 139 τετραγραμμάρια άνθρακα (Tg

C) ετησίως το 1990, που ήταν περίπου 2% των παγκόσμιων εκπομπών άνθρακα από τη χρήση ορυκτών καυσίμων και την παραγωγή τσιμέντου και 14% των ακαθάριστων εκπομπών άνθρακα από τη συγκομιδή και την παραγωγή προϊόντων ξύλου παγκοσμίως. Οι Pingoud et al. (2003) ανέφεραν μια ετήσια αύξηση 40 Tg C των παγκόσμιων αποθεμάτων άνθρακα των προϊόντων ξύλου από το 1960 έως το 2000, με τα συνολικά αποθέματα άνθρακα των προϊόντων σε χρήση να αυξάνονται από 1500 σε >3000 Tg C κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου.

Διάφοροι παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν τα αποθέματα άνθρακα των προϊόντων ξύλου, τις αλλαγές αποθεμάτων και το δυναμικό μετριασμού των αερίων θερμοκηπίου των προϊόντων που παράγονται σε μια χώρα/περιοχή, όπως:

- οι διαθέσιμες δασικές εκτάσεις,
- οι τύποι δασών,
- η παραγωγικότητα των δασών,
- η διαχείριση των δασών,
- η διαταραχή (πυρκαγιές και συγκομιδή ξύλου), και
- η κατασκευή και χρήση των ξύλινων προϊόντων.

Ο Skog (2008) ανέφερε ότι στις Ηνωμένες Πολιτείες, η συμβολή των προϊόντων ξύλου στη δέσμευση αερίων θερμοκηπίου ήταν 15 Tg C έως 44 Tg C το 2005, ανάλογα με τις προσεγγίσεις λογιστικής άνθρακα των προϊόντων που χρησιμοποιήθηκαν, που αντιπροσώπευαν το 9% έως 25% των δεσμεύσεων άνθρακα από τα δάση των ΗΠΑ και μπορούσαν να αντισταθμίσουν το 21%–61% των ετήσιων εκπομπών από τη χρήση φυσικού αερίου στα κατοικίες στη χώρα.

Με το 10% της παγκόσμιας δασικής έκτασης και ως ένας από τους μεγαλύτερους παραγωγούς προϊόντων ξύλου στον κόσμο, τα αποθέματα άνθρακα των προϊόντων

του Καναδά (συμπεριλαμβανομένων των προϊόντων σε χρήση και των προϊόντων σε χωματερές) εκτιμήθηκε ότι αυξάνονται με ετήσιο ρυθμό 23,5 Tg C από το 1985 και φτάνουν συνολικά τα 837 Tg C το 1989 (Apps et al., 1999). Οι Chen et al. (2010) προέβλεψαν μια αύξηση 465,3 Tg στα συνολικά αποθέματα άνθρακα στα δάση και στα προϊόντα ξύλου στο Οντάριο του Καναδά από το 2001 έως το 2100, από τα οποία η αύξηση των αποθεμάτων άνθρακα των προϊόντων αντιπροσώπευε το 89,7%. Οι Karjalainen και Kellomäki (1995) εκτίμησαν ότι τα προϊόντα ξύλου σε χρήση και σε χωματερές περιείχαν το 27–43% των συνολικών ξύλινων αποθεμάτων άνθρακα σε μια περίοδο 500 ετών, και συνεπώς πρότειναν να συμπεριληφθούν τα προϊόντα στην εκτίμηση του ισοζυγίου άνθρακα του δασικού τομέα.

Στην Κίνα, ο άνθρακας που αποθηκεύεται στα προϊόντα ξύλου αυξάνεται ετησίως από το 1993 και αυξήθηκε σε 941 Tg C το 2013, δηλαδή 2,21 φορές από αυτό που αναφέρθηκε για το 1993. Ως ο μεγαλύτερος παραγωγός στον κόσμο, τα προϊόντα ξύλου της Κίνας έχουν μεγάλο δυναμικό μετριασμού των αερίων θερμοκηπίου, αν και το δυναμικό μετριασμού είναι σχετικά μικρό σε σύγκριση με τις συνολικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου της χώρας, του μεγαλύτερου εκπομπού αερίων θερμοκηπίου στον κόσμο. Η διαφορετική χρονική περίοδος μελέτης και η χρήση διαφορετικών προσεγγίσεων μπορούν επίσης να επηρεάσουν τα αποτελέσματα, οδηγώντας σε διαφορετικές εκτιμήσεις αποθεμάτων άνθρακα των προϊόντων ξύλου. Χρησιμοποιώντας την προσέγγιση ατμοσφαιρικής ροής, οι Lun et al. (2012) εκτίμησαν ότι όσο προϊόντα παράχθηκαν στην Κίνα, συσσωρεύσαν 306,52 Tg C καθαρών αποθεμάτων άνθρακα από το 2000 έως το 2009. Σε σύγκριση, τα σωρευτικά αποθέματα άνθρακα των προϊόντων που παράχθηκαν στην Κίνα το 1961–2011 που αναφέρθηκαν από τους Yang et al. (2013) ήταν 676 και 258 Tg C, εκτιμημένα

χρησιμοποιώντας την προσέγγιση αλλαγής αποθέματος και την προσέγγιση ατμοσφαιρικής ροής, αντίστοιχα.

Οι μεγάλες διαφορές σε πολλούς παράγοντες μεταξύ διαφορετικών μελετών καθιστούν δύσκολη την άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων. Αλλά γενικά, τα αποθέματα άνθρακα των προϊόντων ξύλου είναι σχετικά μικρά σε σύγκριση με τα αποθέματα άνθρακα των δασών που συγκομίζονται για την παραγωγή. Αλλά οι αυξήσεις στα αποθέματα άνθρακα των προϊόντων συχνά συμβάλλουν σημαντικά στις συνολικές αλλαγές αποθέματος άνθρακα στον δασικό τομέα. Συνεπώς, είναι σημαντικό να συμπεριληφθούν τα προϊόντα ξύλου στην ανάλυση του ισοζυγίου άνθρακα του δασικού τομέα. Τα αποθέματα άνθρακα των προϊόντων συγκομιδής ξύλου μπορούν να ενισχυθούν χρησιμοποιώντας περισσότερα προϊόντα σε τελικές χρήσεις με μακρές διάρκειες ζωής (π.χ. σε κατοικίες), αυξάνοντας την ανακύκλωση και την επαναχρησιμοποίηση των αποσυρόμενων προϊόντων, και συλλέγοντας το μεθάνιο που παράγεται από την αποσύνθεση των προϊόντων στις χωματερές και χρησιμοποιώντας το για την παραγωγή ενέργειας.

Συνεχίζοντας στην δεύτερη προσέγγιση, έχουμε την ενεργειακή αποτίμηση του προϊόντος. Η ενεργειακή αποτίμηση περιλαμβάνει την αξιολόγηση και βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας και των σχετικών εκπομπών CO₂ για διάφορα προϊόντα και διαδικασίες καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους. Αυτή η προσέγγιση είναι κρίσιμη για τον εντοπισμό τρόπων μείωσης των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Στο πλαίσιο των προϊόντων ξυλείας, η ενεργειακή αποτίμηση μπορεί να προσφέρει πληροφορίες για το πώς αυτά τα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν πιο αποδοτικά και βιώσιμα.

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA) είναι ένα μεθοδολογικό πλαίσιο που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός προϊόντος ή μιας διαδικασίας από τη γέννηση έως το θάνατο, που περιλαμβάνει όλα τα στάδια από την εξαγωγή πρώτων υλών έως τη διάθεση. Για τα προϊόντα ξυλείας, η LCA περιλαμβάνει την εξαγωγή πρώτων υλών, που αφορά την υλοτόμηση των δέντρων και τη μεταφορά της ακατέργαστης ξυλείας στις μονάδες επεξεργασίας. Η ενέργεια που χρησιμοποιείται και οι εκπομπές CO₂ που παράγονται κατά τη διάρκεια αυτού του σταδίου αξιολογούνται. Το επόμενο στάδιο είναι η επεξεργασία και η κατασκευή, όπου η ακατέργαστη ξυλεία επεξεργάζεται σε διάφορα προϊόντα, όπως ξυλεία, κόντρα πλακέ, χαρτί και έπιπλα. Η κατανάλωση ενέργειας και οι εκπομπές κατά τη διάρκεια της κοπής, της ξήρανσης και του φινιρίσματος αξιολογούνται. Στη συνέχεια, η μεταφορά των τελικών προϊόντων ξυλείας στους διανομείς, τους λιανοπωλητές και τους τελικούς χρήστες λαμβάνεται υπόψη, συμπεριλαμβανομένης της ενέργειας που χρησιμοποιείται και των εκπομπών από τη μεταφορά. Κατά τη φάση χρήσης, τα προϊόντα ξυλείας εξυπηρετούν τον προορισμό τους, όπως παρέχοντας δομική υποστήριξη σε κτίρια ή λειτουργώντας ως έπιπλα, που μπορεί να περιλαμβάνει ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας και εκπομπές. Στο τέλος της χρήσιμης ζωής τους, τα προϊόντα ξυλείας είτε ανακυκλώνονται, επαναχρησιμοποιούνται, είτε απορρίπτονται σε χώρους υγειονομικής ταφής. Η ενέργεια και οι εκπομπές που σχετίζονται με αυτές τις διαδικασίες επίσης λαμβάνονται υπόψη. Με την εκτέλεση μιας LCA, μπορούμε να συγκρίνουμε τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των προϊόντων ξυλείας με αυτές των εναλλακτικών υλικών, όπως ο χάλυβας ή το σκυρόδεμα, που συνήθως έχουν υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας και εκπομπές CO₂ κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους. Αυτή η σύγκριση βοηθά στη λήψη ενημερωμένων

αποφάσεων που προτιμούν υλικά με χαμηλότερες συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Μία αποτελεσματική στρατηγική εντός της ενεργειακής αποτίμησης είναι η υποκατάσταση, που περιλαμβάνει την αντικατάσταση υλικών υψηλών εκπομπών με εκείνα που έχουν χαμηλότερο αποτύπωμα άνθρακα. Για παράδειγμα, τα προϊόντα ξυλείας γενικά απαιτούν λιγότερη ενέργεια για την παραγωγή σε σύγκριση με τον χάλυβα και το σκυρόδεμα. Αντικαθιστώντας τη χρήση ξυλείας με αυτά τα πιο ενεργοβόρα υλικά στην κατασκευή, μπορούμε να μειώσουμε σημαντικά τις εκπομπές CO₂. Η ξυλεία έχει επίσης το πρόσθετο πλεονέκτημα της αποθήκευσης άνθρακα, μειώνοντας περαιτέρω την καθαρή της επίδραση στην ατμόσφαιρα. Επιπλέον, η χρήση ανακυκλωμένων ξυλείας ή προϊόντων ξυλείας αντί νέων υλικών μπορεί να μειώσει περαιτέρω το αποτύπωμα άνθρακα. Η ανακύκλωση μειώνει την ανάγκη για εξαγωγή και επεξεργασία πρώτων υλών, που είναι ενεργοβόρα στάδια.

Η βελτιστοποίηση της χρήσης των προϊόντων ξυλείας μπορεί επίσης να συμβάλει στη μείωση των εκπομπών CO₂. Αυτό περιλαμβάνει το σχεδιασμό των προϊόντων ξυλείας, ειδικά στην κατασκευή, για μακροχρόνια χρήση, εξασφαλίζοντας ότι ο άνθρακας που αποθηκεύεται στην ξυλεία παραμένει αποθηκευμένος για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Τα μακράς διάρκειας κτίρια και κατασκευές καθυστερούν το στάδιο του τέλους ζωής, όπου μπορεί να απελευθερωθεί άνθρακας εάν η ξυλεία αποσυντεθεί. Η υιοθέτηση ενεργειακά αποδοτικών τεχνολογιών και πρακτικών στην επεξεργασία και κατασκευή των προϊόντων ξυλείας μπορεί να μειώσει την καταναλισκόμενη ενέργεια και τις σχετικές εκπομπές CO₂. Αυτό περιλαμβάνει τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στις μονάδες παραγωγής. Επιπλέον, η μείωση των αποβλήτων κατά την παραγωγή και χρήση των προϊόντων ξυλείας ελαχιστοποιεί

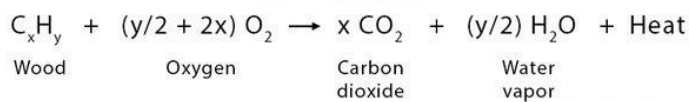
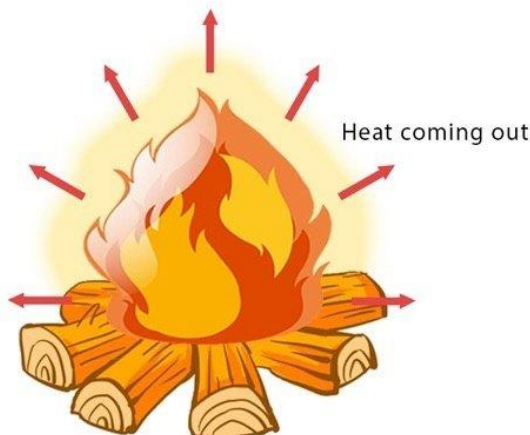
την ανάγκη για πρόσθετες πρώτες ύλες και επεξεργασία, εξοικονομώντας έτσι ενέργεια και μειώνοντας τις εκπομπές.

Η ενεργειακή αποτίμηση των προϊόντων ξυλείας προσφέρει πολλά οφέλη. Επιλέγοντας προϊόντα ξυλείας αντί για πιο ενεργοβόρα υλικά, μπορούμε να μειώσουμε σημαντικά τις συνολικές εκπομπές CO₂ που σχετίζονται με την κατασκευή και παραγωγή. Η ξυλεία είναι ένας ανανεώσιμος πόρος όταν προέρχεται από βιώσιμα διαχειριζόμενα δάση, συμβάλλοντας σε μια πιο βιώσιμη αλυσίδα εφοδιασμού. Οι ενεργειακά αποδοτικές πρακτικές και η χρήση ανακυκλωμένων υλικών μπορούν να μειώσουν το κόστος παραγωγής και να ενισχύσουν την ανταγωνιστικότητα της βιομηχανίας ξυλείας. Ωστόσο, υπάρχουν επίσης προκλήσεις για την εφαρμογή της αποτελεσματικής ενεργειακής αποτίμησης. Η ακριβής ενεργειακή αποτίμηση απαιτεί λεπτομερή δεδομένα για την κατανάλωση ενέργειας και τις εκπομπές σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής, τα οποία μπορεί να είναι δύσκολο να αποκτηθούν. Η ανάπτυξη τυποποιημένων μεθόδων για τη διεξαγωγή LCA και τη σύγκριση διαφορετικών υλικών είναι απαραίτητη για συνεπή και αξιόπιστα αποτελέσματα. Η προώθηση της χρήσης προϊόντων ξυλείας και ενεργειακά αποδοτικών πρακτικών απαιτεί αποδοχή από την αγορά και επίγνωση των περιβαλλοντικών οφελών.

Τέλος, η τρίτη προσέγγιση, ως προς το πώς τα προϊόντα ξύλου συνεισφέρουν στην μείωση του CO₂ της ατμόσφαιρας, είναι η χρησιμοποίηση τους ως καύσιμο. Η βιομάζα, περιλαμβάνοντας υλικά όπως ξύλο, φλοιό και γεωργικά υπολείμματα, αποτελεί μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που προέρχεται από οργανικά υλικά. Η χρήση της ως καύσιμο παίζει κρίσιμο ρόλο στη μείωση των εκπομπών CO₂ και στην προώθηση ενός βιώσιμου ενεργειακού πλαισίου.

Exothermic Reaction

Burning of wood



ChemistryLearner.com

Η διαδικασία παραγωγής ενέργειας από βιομάζα ξεκινά με τη συλλογή οργανικών υλικών όπως τα αποθέματα δασών, τα απόβλητα καλλιεργειών και ειδικές ενεργειακές καλλιέργειες όπως η switchgrass και η willow. Αυτά τα υλικά επεξεργάζονται στη συνέχεια για τη βελτίωση της ενεργειακής τους απόδοσης, περιλαμβάνοντας ξήρανση, πελλετοποίηση ή μετατροπή σε υγρά βιοκαύσιμα όπως η αιθανόλη και το βιοντίζελ. Η τελική φάση περιλαμβάνει την καύση για την παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού ή τη μετατροπή σε βιοκαύσιμα μέσω βιοχημικών διαδικασιών όπως η ζύμωση ή θερμοχημικές διαδικασίες όπως η αεριοποίηση και η πυρόλυση.

Κατά την καύση της βιομάζας, απελευθερώνεται CO₂ στην ατμόσφαιρα. Ωστόσο, αντίθετα με τα ορυκτά καύσιμα, το CO₂ που εκπέμπεται είναι μέρος ενός σχετικά σύντομου κύκλου άνθρακα. Όπως έχουμε αναφέρει νωρίτερα, κατά τη διάρκεια της φωτοσύνθεσης, τα φυτά απορροφούν CO₂ από την ατμόσφαιρα και αυτός ο άνθρακας απελευθερώνεται όταν η βιομάζα καίγεται. Η βιώσιμη διαχείριση των πόρων της

βιομάζας είναι κρίσιμη για να διατηρηθεί αυτός ο κύκλος αποτελεσματικός και ισορροπημένος.

Τα οφέλη της χρήσης της βιομάζας ως καυσίμου είναι σημαντικά. Η βιομάζα θεωρείται απολύτως καθαρή ως προς τον άνθρακα επειδή η CO₂ που απελευθερώνεται κατά την καύση αντισταθμίζεται από την CO₂ που απορροφάτε κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης των φυτών. Αυτό συμβάλλει στην αντιστοίχιση της ατμοσφαιρικής CO₂ και στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Επιπλέον, η βιομάζα είναι ανανεώσιμη και υποστηρίζει την ενεργειακή ασφάλεια με τη μείωση της εξάρτησης από εισαγόμενα ορυκτά καύσιμα. Η χρήση γεωργικών και δασικών υπολειμμάτων συμβάλλει επίσης στη μείωση των αποβλήτων και στην παροχή οικονομικών ευκαιριών στις αγροτικές περιοχές. Η βιομάζα μπορεί να μετατραπεί σε διάφορες μορφές ενέργειας, συμβάλλοντας στην ευελιξία της για διάφορες εφαρμογές.

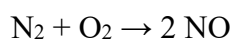
Παρά τα οφέλη της, η βιομάζα ως καύσιμο συναντά και ορισμένες προκλήσεις. Η διασφάλιση βιώσιμης προμήθειας είναι κρίσιμη για την αποφυγή περιβαλλοντικής υποβάθμισης και τη διατήρηση της βιοποικιλότητας. Οι διαδικασίες μετατροπής ενέργειας της βιομάζας μπορεί να έχουν χαμηλότερη απόδοση σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα, απαιτώντας συνεχείς τεχνολογικές εξελίξεις. Επιπλέον, η καύση βιομάζας μπορεί να παράγει ρυπαντικές ουσίες όπως σωματίδια και οξείδια του αζώτου (NO_x), απαιτώντας αποτελεσματικά μέτρα ελέγχου εκπομπών. Η οικονομική βιωσιμότητα και οι ανησυχίες για τη χρήση της γης επηρεάζουν επίσης την ευρεία υιοθέτηση της βιομάζας ως πηγής καυσίμου.

Κεφάλαιο 3 : Η συγκράτηση οξειδίων του αζώτου (NO_x), οξειδίων του θείου (SO_x) και PM₁₀ από προϊόντα ξύλου

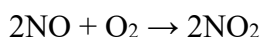
3.1 Γενικά για τα οξείδια του αζώτου NO_x

Με τον γενικό όρο οξείδια του αζώτου (NO_x) γίνεται αναφορά στο αέριο μίγμα μονοξειδίου του αζώτου (NO) και διοξειδίου του αζώτου (NO₂) που υπάρχει στην γήινη ατμόσφαιρα, αποτελώντας έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες ρύπανσής της. Συνήθως στην ομάδα αυτή των οξειδίων περιλαμβάνεται και το υποξείδιο του αζώτου (N₂O), αέριο το οποίο συμβάλλει σημαντικά στη δημιουργία του φαινόμενο του θερμοκηπίου. Τα οξείδια του αζώτου μπορούν να σχηματιστούν είτε φυσικά είτε τεχνητά.

Υπό κανονικές συνθήκες το άζωτο δεν αντιδρά με το οξυγόνο της ατμόσφαιρας. Αυτό οφείλεται στον ιδιαίτερα ισχυρό τριπλό δεσμό μεταξύ των δύο ατόμων που συνιστούν το μόριο του αζώτου, γεγονός που καθιστά το μόριό του αδρανές. Η αντίδραση όμως μεταξύ αζώτου και οξυγόνου είναι δυνατή σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών. Έτσι, οξείδια του αζώτου παράγονται όταν στην ατμόσφαιρα συμβαίνουν ηλεκτρικές εκκενώσεις, όπως αστραπές και κεραυνοί. Κατά την εκδήλωση αστραπών και κεραυνών στην ατμόσφαιρα, η περί την ηλεκτρική εκκένωση περιοχή του αέρα αποκτά πολύ υψηλές θερμοκρασίες, και έτσι πραγματοποιείται αρχικά η αντίδραση:



Το σχηματιζόμενο μονοξείδιο του αζώτου αντιδρά, σε διάστημα μερικών δεκάδων λεπτών, με το οξυγόνο της ατμόσφαιρας, παράγοντας διοξείδιο του αζώτου:



Τα οξείδια του αζώτου σχηματίζονται κατά τις διαδικασίες καύσεως κυρίως ορυκτών καυσίμων (βενζίνης, πετρελαίου, γαιανθράκων), σε κινητήρες οχημάτων και εργοστάσια αλλά και από κατασκευές οικιακής χρήσης (κεντρικές θερμάνσεις, τζάκια κτλ). Στις συνθήκες αυτές, όπου επικρατούν υψηλές θερμοκρασίες (και πιέσεις) οι πιο πάνω αντιδράσεις είναι σχετικά εύκολο να πραγματοποιηθούν. Τα πιο περιβαλλοντικά σημαντικά οξείδια του αζώτου είναι όπως αναφέρθηκε: NO, NO₂, και πιο πρόσφατα N₂O. Το N₂O είναι μια πρόσφατη ανησυχία επειδή είναι ένα αέριο του θερμοκηπίου που συμβάλλει στην υπερθέρμανση του πλανήτη και επειδή μπορεί να βοηθήσει στην καταστροφή του στρώματος όζοντος της ανώτερης ατμόσφαιρας που μας προστατεύει από την υπεριώδη ακτινοβολία. Ευτυχώς, πολύ λίγο N₂O εκπέμπεται από τη φλόγα ενός τυπικού καυστήρα. Πάνω από το 90% των NO_x από μια τυπική φλόγα έχει τη μορφή NO και το υπόλοιπο είναι NO₂. Ωστόσο, δεδομένου ότι το NO τελικά μετατρέπεται σε NO₂ στην ατμόσφαιρα, οι περισσότεροι κανονισμοί αντιμετωπίζουν όλα τα NO_x ως NO₂. Οι εκπομπές NO_x από πηγές καύσης οφείλονται στην οξείδωση του ατμοσφαιρικού N₂ και στην οξείδωση του αζώτου που συνδέεται χημικά σε μόρια καυσίμου. Υπάρχουν τρεις βασικοί μηχανισμοί παραγωγής NO_x. Ορισμένοι από αυτούς τους μηχανισμούς είναι καλά κατανοητοί, ενώ άλλοι βρίσκονται ακόμη υπό διερεύνηση. Αυτοί είναι ο θερμικός μηχανισμός, ο γρήγορος μηχανισμός και ο μηχανισμός καυσίμων.

3.1.1 Μηχανισμοί παραγωγής NO_x

 Το θερμικό NO_x σχηματίζεται από την αντίδραση υψηλής θερμοκρασίας αζώτου με οξυγόνο, μέσω του γνωστού μηχανισμού Zeldovich, όπως δίνεται από την απλοποιημένη αντίδραση : $\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}, \text{NO}_2$ Το θερμικό NO_x αυξάνεται

εκθετικά με τη θερμοκρασία. Πάνω από τους 1100 ° C είναι γενικά ο κυρίαρχος μηχανισμός στις διαδικασίες καύσης, καθιστώντας το σημαντικό στις περισσότερες εφαρμογές θέρμανσης υψηλής θερμοκρασίας. Αυτό σημαίνει ότι αυτός ο μηχανισμός καθίσταται πιο σημαντικός όταν χρησιμοποιείται προθέρμανση αέρα ή εμπλουτισμός οξυγόνου του αέρα καύσης, γεγονός που αυξάνει κανονικά τη θερμοκρασία της φλόγας.

✚ Το «γρήγορο» NOx σχηματίζεται από τη σχετικά γρήγορη αντίδραση μεταξύ ριζών αζώτου, οξυγόνου και υδρογονανθράκων. Δίνεται από τη συνολική αντίδραση : $\text{CH}_4 + \text{O}_2 + \text{N}_2 \rightarrow \text{NO}, \text{NO}_2, \text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$, ιχνοστοιχεία Στην πραγματικότητα, αυτή η πολύ περίπλοκη διαδικασία αποτελείται από εκατοντάδες αντιδράσεις. Οι ρίζες υδρογονανθράκων είναι ενδιάμεσα είδη που σχηματίζονται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας καύσης. Το «γρήγορο» NOx είναι γενικά ένας σημαντικός μηχανισμός σε διαδικασίες καύσης χαμηλότερης θερμοκρασίας.

✚ Το καύσιμο NOx σχηματίζεται από την άμεση οξείδωση οργανικών αζωτούχων ενώσεων που περιέχονται στο καύσιμο. Δίνεται από τη συνολική αντίδραση : $\text{RXN} + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}, \text{NO}_2, \text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$, ιχνοστοιχεία

3.1.2 Συνέπειες των οξειδίων του αζώτου

Το διοξείδιο του αζώτου, το πιο τοξικό οξείδιο του αζώτου, ερεθίζει τους πνεύμονες προκαλώντας βλάβη στα ευαίσθητα κύτταρα που τους περιβάλλουν. Σε αντίθεση με ουσίες που προσβάλλουν κυρίως το ανώτερο αναπνευστικό (όπως η αμμωνία), με βασικό χαρακτηριστικό της παρουσίας τους την πρόκληση βήχα και βλεννώδους συμφόρησης, το διοξείδιο του αζώτου προκαλεί ιδιαίτερα συμπτώματα μόνο όταν συναντάται σε υψηλές συγκεντρώσεις. Ο σημαντικός κίνδυνος

εμφανίζεται περίπου 5 με 72 ώρες αργότερα, όταν είναι σε εξέλιξη η φλεγμονή που μπορεί να οδηγήσει σε πνευματικό οίδημα, αλλά ακόμη και στο θάνατο. Οι συγκεντρώσεις στον περιβάλλοντα αέρα εξαιρετικά σπάνια φτάνουν σε εκείνα τα όρια ώστε να προκληθούν τέτοια ακραία αποτελέσματα, όμως η έκθεση σε τέτοιες τιμές πραγματοποιείται σε μερικά επαγγέλματα. Οι αγρότες για παράδειγμα εκτίθενται στα επίπεδα που υπάρχουν στα σιλό του σιταριού (silo fillers' disease).

Μελέτες σε ζώα έχουν δείξει ότι η μακροχρόνια έκθεση σε χαμηλές συγκεντρώσεις μπορεί να προκαλέσει αλλαγές στη δομή των πνευμόνων αλλά και στη λειτουργία τους προκαλώντας εμφύσημα και χρόνια βρογχίτιδα. Τα παιδιά που ζουν σε σπίτια που χρησιμοποιούν σόμπες αερίου παρουσιάζουν αναπνευστικές λοιμώξεις (κοινά κρυολογήματα) και μειωμένες λειτουργίες στους πνεύμονες, σε μεγαλύτερο ποσοστό σε σχέση με τα παιδιά που ζουν σε σπίτια όπου χρησιμοποιούνται αντίστοιχα ηλεκτρικές συσκευές. Το μεγαλύτερο ποσοστό των λοιμώξεων φαίνεται να οφείλεται τόσο στη μειωμένη δυνατότητα των κυττάρων που έχουν υποστεί βλάβη να καθαρίσουν τα εισπνεόμενα βακτηρίδια και τους ιούς, όσο και σε βλάβη στα κύτταρα του ανοσοποιητικού συστήματος που καταπολεμούν τη λοίμωξη. Οι ασθματικοί και οι άνθρωποι που πάσχουν από χρόνια βρογχίτιδα ενδέχεται να είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι όταν εκτίθενται συχνά στις υψηλές συγκεντρώσεις που εμφανίζονται στον αστικό αέρα.

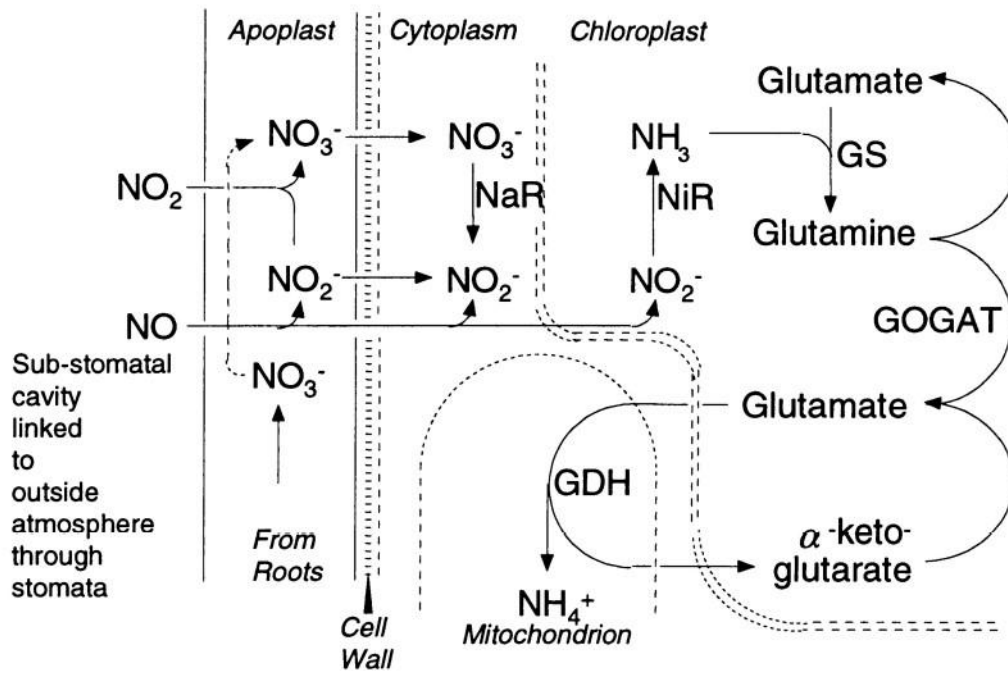
Τα οξείδια του αζώτου έχουν σοβαρές οικολογικές συνέπειες. Οι χειρότερες από αυτές φαίνεται να οφείλονται στο νιτρικό οξύ, το τελευταίο προϊόν της χημικής αντίδρασης του διοξειδίου του αζώτου στον αέρα. Ο μετασχηματισμός των οξειδίων του αζώτου λαμβάνει χώρα σε σχετικά μικρές χρονικές κλίμακες οπότε οι επιπτώσεις εμφανίζονται σε μικρές ως μεσαίες αποστάσεις από την πηγή εκπομπής.

Η όξυνση των υδάτων έχει αρνητικές συνέπειες στο πληθυσμό των ψαριών και των άλλων ειδών. Η όξινη βροχή σε συνδυασμό με τις πιέσεις από το όζον, τη ζέστη και την ανομβρία οδηγούν στην μείωση των δασικών εκτάσεων σε διάφορες περιοχές. Σε ευαίσθητες εκβολές και παραθαλάσσιες περιοχές, η αζωτούχα μόλυνση από την απορροή των λιπασμάτων, τα λύματα και την ατμοσφαιρική εναπόθεση μπορούν να προκαλέσουν την παραγωγή ανεπιθύμητων φυτών και οργανισμών. Μακροπρόθεσμα, οι επιπτώσεις από τέτοιες αλλαγές, δεν είναι γνωστές.

Τα φυτά μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στον μετριασμό των επιπτώσεων των οξειδίων του αζώτου στην υγεία και το περιβάλλον επειδή η μεγάλη επιφάνειά τους αποτελεί αποτελεσματική ‘αποθήκη’ για τους ατμοσφαιρικούς ρύπους. Στις πόλεις, οι ικανότητες φυτοεξυγίανσης του αέρα σε συνδυασμό με άλλες οικοσυστημικές υπηρεσίες των δέντρων (π.χ. μετριασμός της θερμοκρασίας του αέρα, ακραίες συνθήκες) δίνουν στο αστικό πράσινο τη δυνατότητα να βελτιώσει την ανθρώπινη υγεία, ενώ παράλληλα μετριάξει τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Τα φυτά αφαιρούν αέριους ατμοσφαιρικούς ρύπους, όπως τα NO_x και το όζον, κυρίως με απορρόφηση μέσω των στομάτων των φύλλων, αν και ορισμένοι αέριες ενώσεις μπορεί επίσης να εναποτίθενται στην επιφάνεια των φυτών. Η ικανότητα απορρόφησης του NO₂ έχει αναφερθεί για μια ποικιλία φυτικών ειδών, συμπεριλαμβανομένων πολλών δέντρων όπως η πεύκη loblolly (*Pinus taeda*), η λευκή βελανιδιά (*Quercus alba*), ασημένια σημύδα (*Betula pendula*), ευρωπαϊκή οξιά (*Fagus sylvatica*), πεντάφυλλη δρυς (*Quercus robur*), δρυς πουρνάρι (*Quercus ilex*), δρυς της Καλιφόρνιας (*Quercus agrifolia*), πεύκη (*Pinus sylvestris*), και ερυθρελάτη (*Picea abies*). Η εναπόθεση NO₂ επηρεάζεται από το άνοιγμα των στομάτων, την κατάσταση του αζώτου, την ανάπτυξη του φύλλου και την ηλικία, τον ρυθμό φωτοσύνθεσης και τη θέση του των φύλλων μέσα στο θόλο των φυτών.

Εάν το NO_x προσλαμβάνεται μέσω των στομάτων, πρέπει να μεταφερθεί περαιτέρω ή να εναποτεθούν μέσα στη δομή του φυτού. Πράγματι, υπάρχουν ενδείξεις ότι διάφορα ένζυμα έχουν την ικανότητα να μεταβολίζουν τα NO_x. Για παράδειγμα, οι φυτοσφαιρίνες (PGBs) είναι πρωτεΐνες που θεωρούνται σημαντικές για τους μεταβολισμούς του αζώτου και είναι παντού κατανεμημένες στα φυτά. Οι συγκεκριμένες πρωτεΐνες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην τη ρύθμιση πολλών βιολογικών διεργασιών, όπως η φυσιολογική ανάπτυξη, το υποξικό στρες, η συμβιωτική γονιμοποίηση και το άζωτο και ενεργοποιούνται σε απόκριση σε χαμηλά επίπεδα ανόργανων θρεπτικών συστατικών κατάσταση και στρες. Ωστόσο, είναι γνωστό ότι διαφορετικά δέντρα είδη έχουν διαφορετικές ικανότητες απομάκρυνσης των ρυπογόνων που σχετίζονται με διάφορα χαρακτηριστικά των φύλλων που επηρεάζουν την ταχύτητα απόθεσης και με τη συμπεριφορά των στομάτων τους ως απόκριση στην ξηρασία. Η ικανότητα επεξεργασίας των NO_x μπορεί επομένως να είναι ένα ακόμη χαρακτηριστικό που επηρεάζει την πρόσληψη αέριων ενώσεων αζώτου. Ιδιαίτερα τα δέντρα που θεωρούνται κατάλληλα υπό μελλοντικές περιβαλλοντικές συνθήκες και τα οποία, ως εκ τούτου, ενδέχεται να έχουν μειωμένη αγωγιμότητα στομάτων προσαρμοσμένα σε υψηλές θερμοκρασίες και χαμηλή παροχή νερού, θα μπορούσαν να υποθέσουν ότι έχουν μικρότερη ικανότητα απομάκρυνσης των NO_x. Επομένως, τα είδη δέντρων που επιλέγονται για να αντέχουν στην αυξανόμενη θερμότητα και την ξηρασία σε αστικές περιοχές πρέπει να ελέγχεται η ικανότητά τους να παρέχουν την ίδια βαθμό οικοσυστημικών υπηρεσιών, δηλαδή απομάκρυνση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Παρακάτω βλέπουμε τον κύκλο και τις μορφές που λαμβάνει το διοξείδιο του αζώτου κατά την πρόσληψή του από τα κύτταρα των φύλλων των δέντρων.



Η καύση ξύλου για την παραγωγή ενέργειας είναι σημαντική στο πλαίσιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η κατανόηση της σχέσης μεταξύ της καύσης του ξύλου και των εκπομπών οξειδίων του αζώτου (NO_x) είναι ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη στρατηγικών για την ελαχιστοποίηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και τη βελτιστοποίηση της χρήσης της ενέργειας από βιομάζα.

Όταν το ξύλο καίγεται, υφίσταται μια σειρά χημικών αντιδράσεων. Τα κύρια συστατικά του ξύλου είναι ο άνθρακας, το υδρογόνο και το οξυγόνο, με μικρότερες ποσότητες αζώτου, θείου και διαφόρων ορυκτών. Η διαδικασία καύσης μετατρέπει αυτά τα συστατικά σε θερμική ενέργεια, διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), υδρατμούς (H₂O) και διάφορους ρύπους, συμπεριλαμβανομένων των NO_x.

Οι εκπομπές NO_x από την καύση του ξύλου σχηματίζονται κυρίως μέσω δύο μηχανισμών: των θερμικών NO_x και των NO_x του καυσίμου. Τα θερμικά NO_x εμφανίζονται όταν το άζωτο και το οξυγόνο του αέρα αντιδρούν σε υψηλές

θερμοκρασίες, συνήθως πάνω από 1.300°C. Η υψηλή θερμοκρασία στη ζώνη καύσης προκαλεί τη διάσπαση των μορίων αζώτου (N₂) και την αντίδρασή τους με το οξυγόνο (O₂) προς σχηματισμό μονοξειδίου του αζώτου (NO), το οποίο μπορεί να οξειδωθεί περαιτέρω προς σχηματισμό διοξειδίου του αζώτου (NO₂). Το NO_x του καυσίμου παράγεται από τις ενώσεις αζώτου που υπάρχουν εγγενώς στο ξύλο. Όταν αυτές οι ενώσεις αζώτου θερμαίνονται κατά την καύση, διασπώνται και αντιδρούν με το οξυγόνο σχηματίζοντας NO_x.

Διάφοροι παράγοντες επηρεάζουν την ποσότητα των NO_x που παράγονται κατά την καύση του ξύλου, όπως:

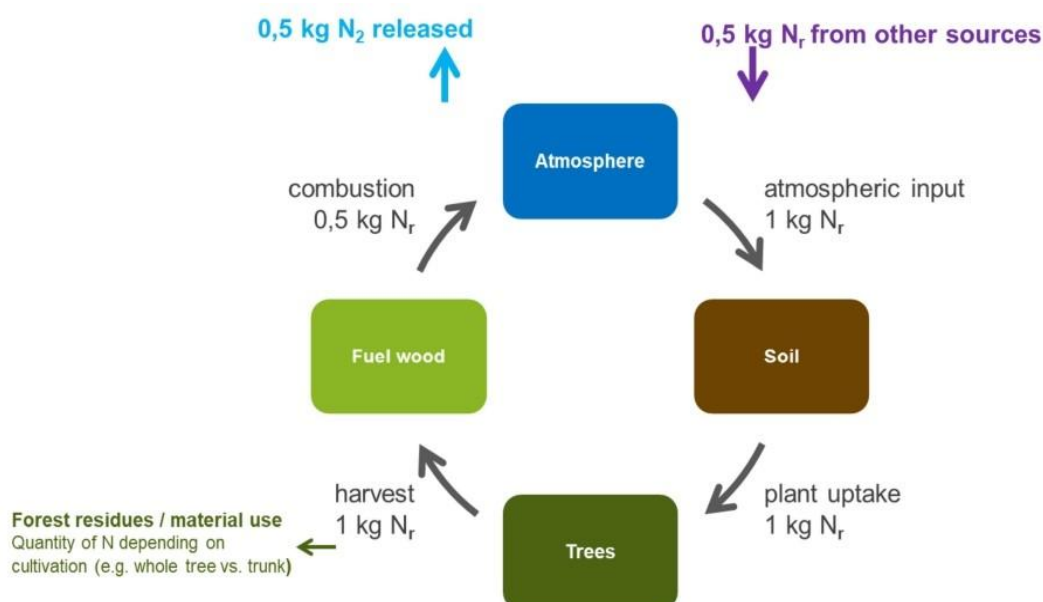
- **η θερμοκρασία καύσης:** Οι υψηλότερες θερμοκρασίες αυξάνουν γενικά τον σχηματισμό θερμικών NO_x. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας καύσης μπορεί να συμβάλει στην ελαχιστοποίηση των εκπομπών NO_x.
- **η αναλογία αέρα προς καύσιμο:** Η ποσότητα αέρα που παρέχεται στη διαδικασία καύσης επηρεάζει το σχηματισμό NO_x. Τόσο η περίσσεια αέρα όσο και η ανεπάρκεια αέρα μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερες εκπομπές NO_x. Οι βέλτιστες αναλογίες αέρα προς καύσιμο συμβάλλουν στην επίτευξη πλήρους καύσης με ελάχιστη παραγωγή NO_x.
- **η περιεκτικότητα σε υγρασία:** Η περιεκτικότητα του ξύλου σε υγρασία επηρεάζει τη θερμοκρασία και την απόδοση της καύσης. Η υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλότερες θερμοκρασίες καύσης, μειώνοντας ενδεχομένως τον σχηματισμό NO_x, αλλά μπορεί επίσης να μειώσει τη συνολική απόδοση της καύσης.
- **η τεχνολογία καύσης:** Ο σχεδιασμός και η τεχνολογία του συστήματος καύσης παίζουν σημαντικό ρόλο στις εκπομπές NO_x. Τα προηγμένα συστήματα καύσης, όπως η σταδιακή καύση και η ανακυκλοφορία καυσαερίων, μπορούν να συμβάλουν στη μείωση του σχηματισμού NO_x.

3.1.3 Στρατηγικές για τη μείωση των εκπομπών NOx από την καύση ξύλου

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες στρατηγικές για τη μείωση των εκπομπών NOx από την καύση ξύλου, συμπεριλαμβανομένης της σταδιακής καύσης, της ανακυκλοφορίας καυσαερίων (FGR), της καταλυτικής μείωσης και των βελτιστοποιημένων συνθηκών καύσης. Η σταδιακή καύση περιλαμβάνει τη διαίρεση της διαδικασίας καύσης σε πολλαπλά στάδια, με ελεγχόμενη παροχή αέρα σε κάθε στάδιο. Αυτό βοηθά στη μείωση των μέγιστων θερμοκρασιών και του σχηματισμού NOx. Στην ανακυκλοφορία καυσαερίων (FGR), ένα μέρος των καυσαερίων ανακυκλοφορεί πίσω στο θάλαμο καύσης. Αυτό μειώνει τη μέγιστη θερμοκρασία καύσης και μειώνει τον σχηματισμό θερμικών NOx. Οι μέθοδοι καταλυτικής μείωσης, όπως η επιλεκτική καταλυτική μείωση (SCR) και η επιλεκτική μη καταλυτική μείωση (SNCR), είναι τεχνολογίες μετά την καύση που μπορούν να μειώσουν τις εκπομπές NOx μετατρέποντάς τες σε αβλαβές άζωτο (N₂) και νερό (H₂O) με τη χρήση καταλύτη ή αναγωγικού παράγοντα. Η διατήρηση των βέλτιστων συνθηκών καύσης, όπως η σωστή αναλογία αέρα προς καύσιμο και η κατάλληλη θερμοκρασία καύσης, μπορεί να συμβάλει στην ελαχιστοποίηση των εκπομπών NOx.

Η μείωση των εκπομπών NOx είναι σημαντική για την προστασία του περιβάλλοντος και τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς για την ποιότητα του αέρα. Τα NOx είναι πρόδρομος παράγοντας του όζοντος σε επίπεδο εδάφους (νέφος) και μπορεί να συμβάλει στην όξινη βροχή, τα οποία έχουν δυσμενείς επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Ως εκ τούτου, οι ρυθμιστικές αρχές συχνά θέτουν όρια στις εκπομπές NOx από πηγές καύσης, συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων καύσης ξύλου.

Η καύση του ξύλου για την παραγωγή ενέργειας είναι μια ανανεώσιμη επιλογή με περιβαλλοντικά οφέλη, αλλά θέτει επίσης προκλήσεις που σχετίζονται με τις εκπομπές NO_x. Η κατανόηση των μηχανισμών σχηματισμού NO_x και η εφαρμογή αποτελεσματικών στρατηγικών μετριασμού μπορεί να συμβάλει στη βελτιστοποίηση των διαδικασιών καύσης ξύλου, μειώνοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις τους και συμβάλλοντας σε καθαρότερο αέρα. Με την αντιμετώπιση αυτών των παραγόντων, η χρήση του ξύλου ως βιώσιμης πηγής ενέργειας μπορεί να διαχειριστεί αποτελεσματικότερα, ώστε να εξισορροπηθούν οι ανάγκες παραγωγής ενέργειας με τους στόχους προστασίας του περιβάλλοντος.



3.2 Γενικά για τα οξείδια του θείου (SO_x)

Τα οξείδια του θείου (SO_x) είναι ενώσεις θείου και μορίων οξυγόνου. Το διοξείδιο του θείου (SO₂) είναι η επικρατέστερη μορφή που βρίσκεται στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Είναι ένα άχρωμο αέριο που μπορεί να ανιχνευθεί με τη γεύση και την οσμή στο εύρος 1.000 έως 3.000 μικρογραμμάρια ανά κυβικό μέτρο (μg/m³). Σε συγκεντρώσεις 10.000 μg/m³, έχει μια πικάντικη, δυσάρεστη οσμή. Το

διοξειδίο του θείου διαλύεται εύκολα στο νερό που υπάρχει στην ατμόσφαιρα και σχηματίζει θειικό οξύ (H_2SO_3). Περίπου το 30% του διοξειδίου του θείου στην ατμόσφαιρα μετατρέπεται σε θειικό αεροζόλ (όξινο αεροζόλ), το οποίο απομακρύνεται μέσω διεργασιών υγρής ή ξηρής εναπόθεσης. Το τριοξείδιο του θείου (SO_3), ένα άλλο οξείδιο του θείου, είτε εκπέμπεται απευθείας στην ατμόσφαιρα είτε παράγεται από το διοξείδιο του θείου και μετατρέπεται γρήγορα σε θειικό οξύ (H_2SO_4).

Το περισσότερο διοξείδιο του θείου παράγεται από την καύση καυσίμων που περιέχουν θείο ή από την έψηση μεταλλευμάτων θειούχων μετάλλων, αν και υπάρχουν φυσικές πηγές διοξειδίου του θείου (που αντιπροσωπεύουν το 35--65% των συνολικών εκπομπών διοξειδίου του θείου), όπως τα ηφαίστεια. Θερμικής ενέργειας μηχανές που καίνε άνθρακα με υψηλή περιεκτικότητα σε θείο ή πετρέλαιο θέρμανσης είναι γενικά οι κύριες πηγές ανθρωπογενών εκπομπών διοξειδίου του θείου παγκοσμίως, ακολουθούμενες από βιομηχανικούς λέβητες και χυτήρια μη σιδηρούχων μετάλλων.

3.2.1 Επιπτώσεις από τα οξείδια του θείου (SO_x)

Οι εκπομπές από την οικιακή καύση άνθρακα και από οχήματα μπορούν επίσης να συμβάλουν σε υψηλά επίπεδα τοπικού ατμοσφαιρικού διοξειδίου του θείου. Περιοδικά επεισόδια πολύ υψηλών συγκεντρώσεων του διοξειδίου του θείου πιστεύεται ότι προκαλούν το μεγαλύτερο μέρος των βλαβών στην υγεία και τη βλάστηση που οφείλονται στις εκπομπές θείου. Ανάλογα με τον άνεμο, τη θερμοκρασία, την υγρασία και την τοπογραφία, το διοξείδιο του θείου μπορεί να συγκεντρωθεί κοντά στο επίπεδο του εδάφους. Κατά τη διάρκεια του 1952 στο Λονδίνο, τα επίπεδα έφθασαν τα $3.500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (μέσος όρος για 48 ώρες) στο κέντρο

της πόλης και παρέμειναν υψηλά για μια περίοδο 5 ημερών. Υψηλά επίπεδα έχουν καταγραφεί κατά τη διάρκεια θερμοκρασιακών αναστροφών στην Κεντρική και Ανατολική Ευρώπη, στην Κίνα και στην άλλες τοποθεσίες.

Η έκθεση σε διοξείδιο του θείου στον ατμοσφαιρικό αέρα έχει συσχετιστεί με μειωμένη πνευμονική λειτουργία, αυξημένη συχνότητα αναπνευστικών συμπτωμάτων και ασθένειες, ερεθισμό των ματιών, της μύτης και του λαιμού και πρόωρη θνησιμότητα. Τα παιδιά, οι ηλικιωμένοι και οι όσοι πάσχουν ήδη από αναπνευστικές παθήσεις, όπως οι ασθματικοί, διατρέχουν ιδιαίτερο κίνδυνο. Ορισμένες επιδημιολογικές μελέτες, ωστόσο, έχουν δείξει συσχέτιση μεταξύ σχετικά χαμηλών μέσων ετήσιων επιπέδων και υπερβολικής θνησιμότητας. Δεν είναι σαφές εάν οι μακροπρόθεσμες επιπτώσεις σχετίζονται απλώς με τις ετήσιες μέσες τιμές ή με επαναλαμβανόμενες εκθέσεις σε μέγιστες τιμές. Οι επιπτώσεις στην υγεία που αποδίδονται στα οξείδια του θείου οφείλονται στην έκθεση σε διοξείδιο του θείου, θειικά αερολύματα και διοξείδιο του θείου προσροφημένο σε σωματίδια. Από μόνο του, το διοξείδιο του θείου θα διαλυθεί στα υδαρή υγρά του ανώτερου αναπνευστικού συστήματος και απορροφάται στην κυκλοφορία του αίματος.

Το διοξείδιο του θείου αντιδρά με άλλες ουσίες στην ατμόσφαιρα και σχηματίζει θειικά αερολύματα. Δεδομένου ότι τα περισσότερα θειικά αερολύματα αποτελούν μέρος των PM_{2.5} (λεπτόκοκκα σωματίδια, με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερη από 2,5 μικρόμετρα), μπορεί να έχουν σημαντικό ρόλο στις επιπτώσεις στην υγεία που συνδέονται με τα λεπτά σωματίδια. Ωστόσο, τα θειικά αερολύματα μπορούν να μεταφερθούν σε μεγάλες αποστάσεις μέσω της ατμόσφαιρας πριν από την εναπόθεση. Μέσος όρος θειικών αερολυμάτων συγκεντρώσεις είναι περίπου το 40% των μέσων επιπέδων λεπτών σωματιδίων σε περιοχές όπου χρησιμοποιούνται συνήθως καύσιμα με υψηλή περιεκτικότητα σε θείο. Διοξείδιο του θείου που

προσροφάται στα σωματίδια μπορεί να μεταφερθεί βαθιά μέσα στο πνευμονικό σύστημα. Ως εκ τούτου, η μείωση των συγκεντρώσεων των σωματιδίων μπορεί επίσης να μειώσει τις επιπτώσεις του διοξειδίου του θείου στην υγεία. Τα όξινα αερολύματα επηρεάζουν τις αναπνευστικές και αισθητηριακές λειτουργίες.

Οι εκπομπές οξειδίου του θείου προκαλούν δυσμενείς επιπτώσεις στην βλάστηση, συμπεριλαμβανομένων των δασών και των γεωργικών καλλιεργειών. Μελέτες στις Ηνωμένες Πολιτείες και αλλού έχουν δείξει ότι τα φυτά που εκτίθενται σε υψηλές περιβαλλοντικές συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου μπορεί να χάσουν το φύλλωμα, να γίνουν λιγότερο παραγωγικά ή να πεθάνουν πρόωρα. Ορισμένα είδη είναι πολύ πιο ευαίσθητα στην έκθεση από άλλα. Τα φυτά στην άμεση πλησίον των πηγών εκπομπών είναι πιο ευάλωτα.

Μελέτες έχουν δείξει ότι τα πιο ευαίσθητα είδη φυτών αρχίζουν να εμφανίζουν ορατά σημάδια τραυματισμού σε συγκεντρώσεις περίπου 1.850 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ για 1 ώρα, 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ για 8 ώρες και 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ για για την καλλιεργητική περίοδο (Smith 1981, όπως αναφέρεται στο NAPAP 1990). Σε μελέτες που πραγματοποιήθηκαν στον Καναδά, οι χρόνιες επιδράσεις στην ανάπτυξη των δασών πεύκης ήταν εμφανείς όταν οι συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου στον αέρα ήταν κατά μέσο όρο 44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ο αριθμητικός μέσος όρος για τη συνολική περίοδο μέτρησης των 10 ετών- οι χρόνιες επιδράσεις ήταν ελαφρές όπου οι ετήσιες συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου ήταν κατά μέσο όρο 21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Καναδάς 1987).

Δέντρα και άλλα φυτά που εκτίθενται σε υγρές και ξηρές αποθέσεις οξέων σε κάποια απόσταση από την πηγή των εκπομπών μπορεί επίσης να τραυματιστούν. Οι επιπτώσεις στα δασικά οικοσυστήματα ποικίλλουν σε μεγάλο βαθμό ανάλογα με τον

τύπο του εδάφους, φυτικά είδη, τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, τους πληθυσμούς των εντόμων και άλλους παράγοντες που δεν είναι καλά μελετημένοι.

Οι γεωργικές καλλιέργειες μπορεί επίσης να τραυματιστούν από την έκθεση στις αποθέσεις. Η μηδική και το γρασίδι σίκαλης είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι. Φαίνεται ότι οι ζημιές στα φύλλα πρέπει να είναι εκτεταμένη πριν η έκθεση επηρεάσει τις αποδόσεις των περισσότερων καλλιεργειών. Είναι πιθανό ότι μακροπρόθεσμα, η εισροή θείου στα εδάφη θα επηρεάσει τις αποδόσεις (OECD 1981, NAPAP 1990). Ωστόσο, το διοξείδιο του θείου μπορεί να μην είναι η πρωταρχική αιτία της ζημίας των φυτών και εν τέλει άλλοι ρύποι, όπως το όζον, μπορεί να έχουν μεγαλύτερο αντίκτυπο.

Οι αποθέσεις οξέων μπορούν να βλάψουν τις λίμνες γλυκού νερού και τα οικοσυστήματα ρευμάτων μειώνοντας το pH του νερού. Οι λίμνες με χαμηλή ρυθμιστική ικανότητα, οι οποίες θα μπορούσε να βοηθήσει στην εξουδετέρωση της όξινης βροχής, είναι ιδιαίτερα σε κίνδυνο. Λίγα είδη ψαριών μπορούν να επιβιώσουν από μεγάλες μεταβολές στο pH, και οι πληγείσες λίμνες θα μπορούσαν να γίνουν εντελώς στερημένες από την ιχθυοπανίδα. Η όξυνση μειώνει επίσης την ποικιλία και την αφθονία άλλων ειδών ζωικής και φυτικής ζωής.

Τα θειικά αερολύματα, που μετατρέπονται από το διοξείδιο του θείου στην ατμόσφαιρα, μπορούν να μειώσουν την ορατότητα διασκορπίζοντας το φως. Σε συνδυασμό με τις θερμές θερμοκρασίες, την άφθονη ηλιακή ακτινοβολία, την υψηλή υγρασία και την μειωμένη κατακόρυφη ανάμιξη, τα αερολύματα αυτά μπορούν να συμβάλουν σε θολότητα που εκτείνεται σε μεγάλες περιοχές.

Οι εκπομπές διοξειδίου του θείου μπορεί να επηρεάσουν το κτίριο από πέτρα και τα σιδηρούχα και μη σιδηρούχα μέταλλα. Το θειικό οξύ, που σχηματίζεται από την

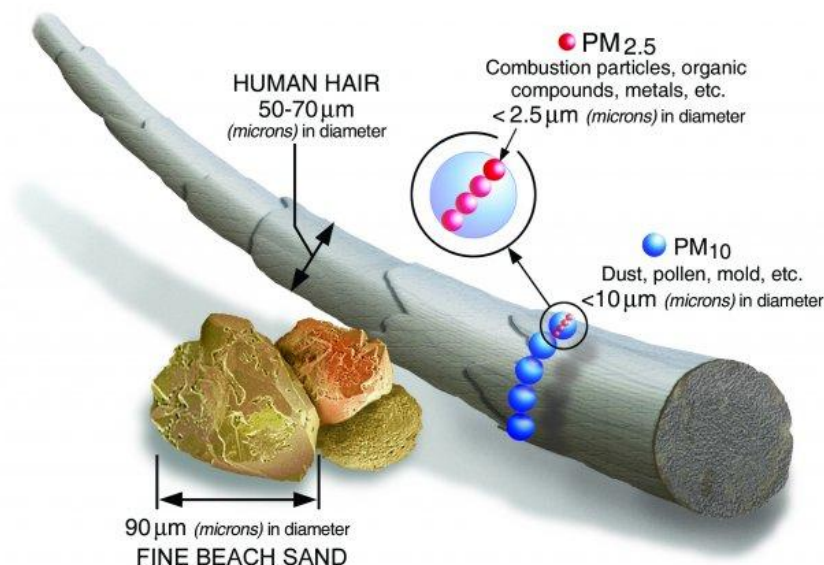
αντίδραση του διοξειδίου του θείου με την υγρασία, επιταχύνει τη διάβρωση του σιδήρου, χάλυβα και ψευδαργύρου. Τα οξέα με τη μορφή αερίων, αερολυμάτων ή κατακρημνισμάτων μπορούν να προκαλέσουν χημική διάβρωση σε οικοδομικά υλικά όπως μάρμαρο, ασβεστόλιθο και δολομίτη. Ιδιαίτερη ανησυχία προκαλεί η χημική διάβρωση ιστορικών μνημείων και έργων τέχνης. Τα θειούχα και θειικά οξέα που σχηματίζονται από το διοξείδιο του θείου και το τριοξείδιο του θείου όταν αντιδρούν με την υγρασία μπορεί επίσης να καταστρέψουν το χαρτί και το δέρμα.

Το θείο είναι απαραίτητο στοιχείο στον μεταβολισμό των φυτών, και σε πολλά δομικά συστατικά των φυτών. Το θείο απορροφάται συνήθως από τις ρίζες ως θειικό ιόν, αλλά μπορεί επίσης να εισέλθει στα φύλλα ως αέριο διοξείδιο του θείου, ή διαλύεται σε νερό ως θειικό οξύ. Το διοξείδιο του θείου εισέρχεται στα φύλλα του φυτών κυρίως μέσω των στομάτων. Ανάλογα με τη συγκέντρωση του αερίου, την συχνότητα των υποκαπνισμών, τη διάρκεια της έκθεσης των φυτών και τους διάφορους προδιαθεσικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες, είτε οξείς είτε χρόνιους, μπορεί να προκληθεί τραυματισμός στο φύλλωμα. Ο οξύς τύπος τραυματισμού προκαλείται από απορρόφηση υψηλών συγκεντρώσεων του διοξειδίου του θείου σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ταχεία συσσώρευση του μονοξειδίου θείου που είναι τοξικό για τις μεταβολικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στα μεσόφυλλα κύτταρα. Ο χρόνιος τραυματισμός προκαλείται από την μακροχρόνια απορρόφηση διοξειδίου του θείου σε υποθανατηφόρες συγκεντρώσεις. Το θειικό άλας που σχηματίζεται οξειδώνεται σε θειικό οξύ σε περίπου ίδιο ρυθμό με το αέριο που απορροφάται. Όταν συσσωρεύονται θειικά ιόντα πέρα από μια τιμή κατωφλίου που τα κύτταρα του φυτού μπορούν να ανεχθούν, εμφανίζεται χρόνιος τραυματισμός.

Η ποσότητα του αέριου ατμοσφαιρικού ρύπου που απορροφάται από ένα δάσος σχετίζεται με τις ατμοσφαιρικές διεργασίες (άνεμος, ροή θερμότητας, κ.λπ.) και τη διαμόρφωση της πηγής βύθισης, επειδή αυτές οι μεταβλητές επηρεάζουν την παροχή του ρυπογόνου αέριου στη δασική βλάστηση. Το ποσοστό απορρόφησης θα επηρεαστεί επίσης από τις φυσικές και χημικές αλληλεπιδράσεις που λαμβάνουν χώρα μεταξύ του αερίου και τις δασικές καταβόθρες. Η απλούστερη διαμόρφωση πηγής είναι μια διάσπαρτη πηγή που προσεγγίζεται με πολλά μικρά, στενά απέχουσες, διακριτές πηγές. Αυτή η ρύθμιση οδηγεί σε συγκέντρωση ρύπων σε ύψος πηγής που ποικίλλει αργά σε χρόνο και χώρο και μπορεί, επομένως, να αντιμετωπιστεί ως μονοδιάστατη, κατακόρυφη διάχυση με σχεδόν σταθερή κατάσταση σε οριακές συγκεντρώσεις. Η φυσική και χημική αλληλεπίδραση του SO₂ με τη δασική βλάστηση σε χαμηλές συγκεντρώσεις είναι σε μεγάλο βαθμό το διάλυμα του αερίου στο νερό των φύλλων που ακολουθείται από το μεταβολισμό της διαλυμένης ουσίας.

3.3 Γενικά για τα αιωρούμενα σωματίδια PM

Το PM σημαίνει σωματιδιακή ύλη (ονομάζεται επίσης σωματιδιακή ρύπανση): ο όρος για ένα μείγμα στερεών σωματιδίων και σταγονιδίων υγρών που βρίσκονται στον αέρα. Ορισμένα σωματίδια, όπως η σκόνη, η βρωμιά, η αιθάλη ή ο καπνός, είναι αρκετά μεγάλα ή σκοτεινά ώστε να φαίνονται με γυμνό μάτι. Άλλα είναι τόσο μικρά που μπορούν να ανιχνευθούν μόνο με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Η σωματιδιακή ρύπανση περιλαμβάνει το PM₁₀ (εισπνεύσιμα σωματίδια, με διαμέτρους που είναι γενικά 10 μικρόμετρα και μικρότερες) και το PM_{2.5} (λεπτά εισπνεόμενα σωματίδια, με διαμέτρους που είναι γενικά 2,5 μικρόμετρα και μικρότερες).



Αυτά τα σωματίδια έχουν πολλά μεγέθη και σχήματα και μπορούν να αποτελούνται από εκατοντάδες διαφορετικές χημικές ουσίες. Μερικά εκπέμπονται απευθείας από μια πηγή, όπως εργοτάξια, μη ασφαλτοστρωμένους δρόμους, χωράφια, καπνογόνα ή πυρκαγιές. Τα περισσότερα σωματίδια σχηματίζονται στην ατμόσφαιρα ως αποτέλεσμα πολύπλοκων αντιδράσεων χημικών ουσιών όπως το διοξείδιο του θείου και τα οξείδια του αζώτου, τα οποία είναι ρύποι που εκπέμπονται από σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, βιομηχανίες και αυτοκίνητα.

3.3.1 Επιπτώσεις από τα αιωρούμενα σωματίδια PM

Το μέγεθος των σωματιδίων συνδέεται άμεσα με τη δυνατότητά τους να προκαλούν προβλήματα υγείας. Μικρά σωματίδια με διάμετρο μικρότερη των 10 μικρομέτρων δημιουργούν τα μεγαλύτερα προβλήματα, επειδή μπορούν να εισχωρήσουν βαθιά στους πνεύμονες και μερικά μπορεί ακόμη και να εισέλθουν στην κυκλοφορία του αίματος. Η έκθεση σε τέτοια σωματίδια μπορεί να επηρεάσει τόσο τους πνεύμονές σας όσο και την καρδιά σας. Πολύαριθμες επιστημονικές μελέτες έχουν συνδέσει την έκθεση στη σωματιδιακή ρύπανση με μια ποικιλία

προβλημάτων, όπως: πρόωρο θάνατο σε άτομα με καρδιακή ή πνευμονοπάθεια, μη θανατηφόρα καρδιακά επεισόδια, ακανόνιστος καρδιακός παλμός, επιδεινωμένο άσθμα, μειωμένη πνευμονική λειτουργία, αυξημένα αναπνευστικά συμπτώματα (όπως ερεθισμός των αεραγωγών, βήχας ή δυσκολία στην αναπνοή). Τα άτομα με καρδιακές ή πνευμονικές παθήσεις, τα παιδιά και οι ηλικιωμένοι είναι οι πιο πιθανό να επηρεαστούν από την έκθεση στη σωματιδιακή ρύπανση.

Τα σωματίδια μπορούν να μεταφερθούν σε μεγάλες αποστάσεις με τον άνεμο και στη συνέχεια να καθιζάνουν στο έδαφος ή στο νερό. Ανάλογα με τη χημική τους σύνθεση, τα αποτελέσματα αυτής της καθίζησης μπορεί να περιλαμβάνουν: όξυνση λιμνών και ποταμών, αλλαγή της ισορροπίας των θρεπτικών συστατικών στα παράκτια ύδατα και τις μεγάλες λεκάνες απορροής ποταμών, εξάντληση των θρεπτικών στοιχείων στο έδαφος, καταστροφή ευαίσθητων δασών και αγροτικών καλλιεργειών, διαταραχή της ποικιλομορφίας των οικοσυστημάτων, συμβολή στις επιπτώσεις της όξινης βροχής. Επειδή οι πυρκαγιές είναι μια κύρια πηγή PM₁₀, η διατήρηση της ακεραιότητας ενός δάσους συμβάλει στην μετρίαση της συγκέντρωσης PM₁₀.

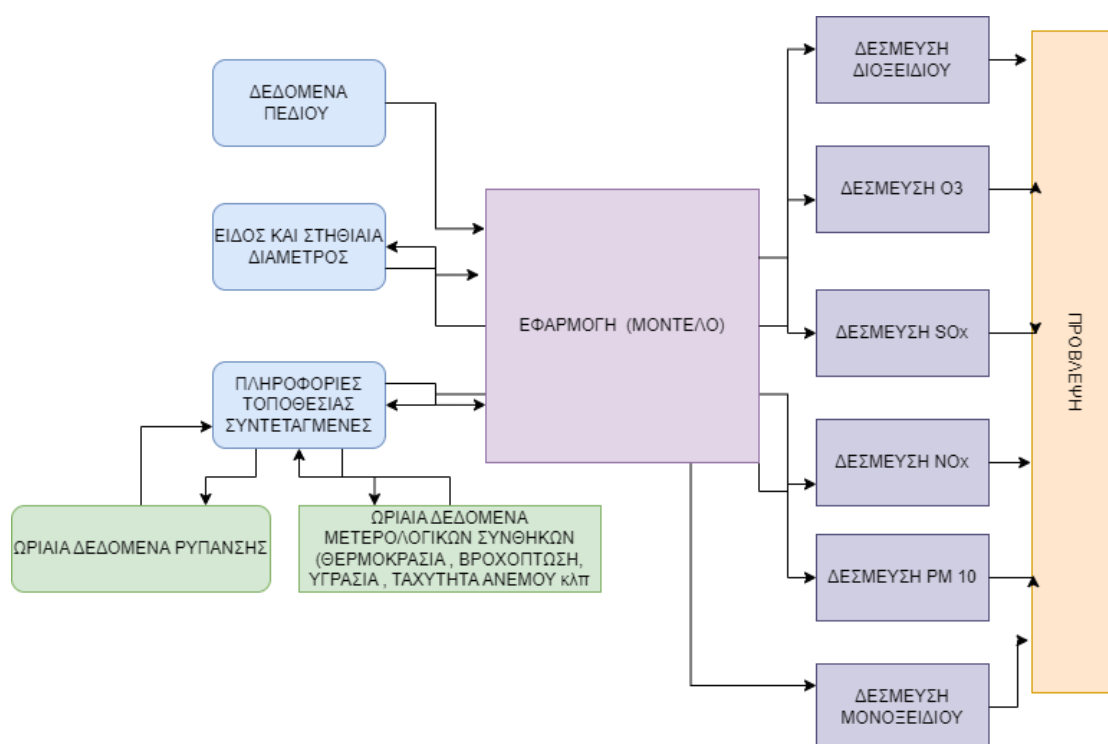
Οι κύριες πηγές PM-10 στη βιομηχανία κόντρα πλακέ είναι από την καύση απόβλητων καυσίμων για παραγωγή θερμότητας και τα στεγνωτήρια καπλαμά. Δεν υπάρχει αξιόπιστος εκτιμώμενος συντελεστής εκπομπών που δημοσιεύεται για λείανση κόντρα πλακέ, αλλά οι εκτιμήσεις, που έχουν γίνει, δείχνουν ότι δεν είναι σημαντικό πηγή PM-10, ακόμη και αν είναι ανεξέλεγκτη. Η κοπή καπλαμά πραγματοποιείται εντός κλειστών κτιρίων. Επιπλέον, τα κούτσουρα είναι υγρά όταν κόβονται. Επομένως, δεν υπάρχει δυνατότητα εκπομπής PM-10 κατά την κοπή του καπλαμά.

Κεφάλαιο 4^ο: Μοντέλο που υπολογίζει το συνολικό ποσό δέσμευσης των ρύπων από τα δέντρα , ξεχωριστά για κάθε ρύπο (PM₁₀, SO_x, ozone,CO) για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο (ωριαία ή ημερήσια).

Το μοντέλο i-Tree Eco μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση ενός ευρέος φάσματος λειτουργιών του οικοσυστήματος όπως η απομάκρυνση της ρύπανσης στον αέρα, η δέσμευση άνθρακα (Nowak et al. 2008).

Το μοντέλο χρειάζεται: εκτός από **το είδος και τη διάμετρο** του στελέχους στο ύψος του στήθους (DBH) απαιτούνται περαιτέρω δεδομένα εισαγωγής, συμπεριλαμβανομένων των **κριτηρίων χρήσης γης**, του **συνολικού ύψους δέντρου**, του **μέγεθους της κόμης** (ύψος έως κορυφή, ύψος έως τη βάση της κόμης, πλάτος κόμης και ποσοστό έλλειψης κόμης), η **υγεία της κόμης** και η **ανταγωνιστική κατάσταση**.

Επίσης, μετεωρολογικά στοιχεία και ρύπανση όπου θα συνδέεται με server η βάση δεδομένων για άντληση δεδομένων από τοπικούς μετεωρολογικούς σταθμούς και αισθητήρες αέριας ρύπανσης. Ένα βασικό διάγραμμα παρουσιάζεται στην εικόνα 1.

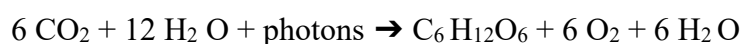


Εικόνα 1: Διάγραμμα σχεδιασμού μοντέλου

Input 1	Temperature	°C
Input 2	Pressure	Pa
Input 3	Humidity	%
Input 4	Sunshine	Hours
Input 5	Wind speed us	m/s
Input 6	Wind direction ud	degrees
Input 7	VOC	
Input 8	NOISE	
Input 9	CO ₂	μg/m ³
Input 10	CH ₂ O	μg/m ³
Input 11	O ₃	μg/m ³
Output 1	PM10	μg/m ³
Output 2	NO _x	μg/m ³
Output 3	SO _x	μg/m ³
Output 4	CO	μg/m ³

4.1 Προσδιορισμός του CO₂ σε ένα ιστάμενο δέντρο ανάλογα με το είδος του.

Για να γίνει κατανοητό σε κάποιον η αξιοποίηση των δεδομένων πρώτα από όλα να καταλάβουμε ότι όλα ξεκινάνε από τη φωτοσύνθεση και η μετατροπή της δέσμευσης διαφόρων στοιχείων οπότε



Οπότε ουσιαστικά η δέσμευση του διοξειδίου μετατρέπεται σε γλυκόζη, οξυγόνο και νερό. Στη συνέχεια η γλυκόζη μετατρέπεται σε ξύλο και κυρίως κυτταρίνη και λιγνίνη. Όταν δεν μετατρέπεται σε ξύλο με την αποσύνθεση του επιστρέφει με τη μορφή CO₂. Η μέτρηση λοιπόν του δεσμευμένου CO₂ που αποθηκεύεται στα δέντρα βασίζεται στη μάζα του ξύλου. Για τη μέτρηση του υπάρχουν πολλοί τρόποι από τους οποίους θα δούμε αυτούς που μας δίνουν ικανοποιητική ακρίβεια αλλά ταυτόχρονα είναι και εύκολοι στη λήψη των απαραίτητων στοιχείων. (Richard A. Birdsey, 1992)

Κάποιες παραδοχές που πρέπει να κάνουμε είναι :

- 35% της πράσινης μάζας των δέντρων είναι νερό και το 65% είναι συμπαγής ξηρή μάζα
- 50% της ξηρής μάζας του δέντρου είναι άνθρακας
- 20% της βιομάζας του δέντρου βρίσκεται στις ρίζες του που είναι κάτω από το έδαφος και για να το συνυπολογίσουμε υπολογίζουμε την υπέργεια μάζα με 1,2 ή 120%
- για να υπολογίσουμε το ισοδύναμο του CO₂ μέσα από τις μετατροπές από γλυκόζη σε ξύλο (κυτταρίνη, λιγνίνη) το αποτέλεσμα των υπολογισμών πολλαπλασιάζεται με τον συντελεστή 3.67.

CO₂ ισοδύναμο ανά δέντρο σε κιλά (kg) = Η μάζα του ξύλου (kg) x 65% (για την μετατροπή σε ξηρή μάζα) x 50% (που είναι η ποσότητα άνθρακα στο ξύλο %) x 3.67 x 120 (για να συμπεριληφθούν και τα υπόγεια μέρη, ριζικό σύστημα %)

Πάμε τώρα στον υπολογισμό της μάζας του ξύλου

Η μάζα του δέντρου σε κιλά (kg) = όγκος του δέντρου σε κυβικά μέτρα (m³) x η πυκνότητα του είδους σε κιλά ανά κυβικό μέτρο (kg/m³)

Ο ρυθμός δέσμευσης άνθρακα εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά ανάπτυξης των ειδών δέντρων, τις συνθήκες ανάπτυξης όπου φυτεύεται το δέντρο και την πυκνότητα του ξύλου του δέντρου. Είναι μεγαλύτερη στα νεότερα στάδια ανάπτυξης των δέντρων, μεταξύ 20 και 50 ετών.

Η διαδικασία:

1. Προσδιορισμός συνολικό (χλωρού) βάρους του δέντρου. ενός δέντρου είναι:

W = Υπέργειο βάρος του δέντρου

D = Διάμετρος κορμού

H = Ύψος του δέντρου

Για δέντρα με D < 11:

W = 0,25D²H

Για δέντρα με D ≥ 11:

W = 0,15D²H

Ανάλογα με το είδος, ο συντελεστής (π.χ. 0,25) θα μπορούσε να αλλάξει και οι μεταβλητές D² και H θα μπορούσαν να αυξηθούν σε εκθέτες ακριβώς πάνω

ή κάτω από 1. Ωστόσο, αυτές οι δύο εξισώσεις θα μπορούσε να θεωρηθεί ως «μέσος όρος» όλων των εξισώσεων των ειδών.

Το ριζικό σύστημα ζυγίζει περίπου 20% όσο το υπέργειο βάρος του δέντρου.

Επομένως, για να προσδιορίσετε το συνολικό πράσινο βάρος του δέντρου, πολλαπλασιάστε το πάνω από το έδαφος βάρος του δέντρου κατά 120%.

2. Προσδιορισμός ξηρό βάρος του δέντρου.

Για το ξηρό βάρος του δέντρου, πολλαπλασιάστε το βάρος του δέντρου επί 72,5%.

3. Προσδιορισμός βάρος του άνθρακα στο δέντρο.

Η μέση περιεκτικότητα σε άνθρακα είναι γενικά το 50% του συνολικού όγκου του δέντρου. Επομένως, πολλαπλασιάζετε το ξηρό βάρος του δέντρου κατά 50%.

4. Προσδιορισμός βάρος του διοξειδίου του άνθρακα που δεσμεύεται στο δέντρο

Το CO₂ αποτελείται από ένα μόριο άνθρακα και 2 μόρια οξυγόνου.

Το ατομικό βάρος του άνθρακα είναι 12,001115.

Το ατομικό βάρος του οξυγόνου είναι 15,9994.

Το βάρος του CO₂ είναι $C+2*O=43,999915$.

Η αναλογία CO₂ προς C είναι $43,999915/12,001115=3,6663$.

Επομένως, για να υπολογίσετε το βάρος του διοξειδίου του άνθρακα που δεσμεύεται στο δέντρο, πολλαπλασιάστε το βάρος άνθρακα στο δέντρο κατά 3,6663.

5. Προσδιορισμός βάρος του CO₂ που δεσμεύεται στο δέντρο ανά έτος

Το βάρος του διοξειδίου του άνθρακα που έχει δεσμευτεί στο δέντρο διαιρείτε με την ηλικία του δέντρου

Για τον κυβισμό του κορμού μπορούμε να βασιστούμε σε τρεις τύπους του Smalian , HuberBruce και του Newton

Log formula	Equation
Smalian's formula	$V_L = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot f \cdot L \cdot (dA^2 + dB^2)$ (1)
Huber's formula	$V_L = f \cdot L \cdot (dM)^2$ (2)
Bruce's formula	$V_L = f \cdot L \cdot (0.25(dB)^2 + 0.75(dA)^2)$ (3)

where:

V_L =	Log volume at i th (m ³)
L =	Length of log (m)
f =	0.00007854 (metric units)
dA =	Diameter at the small log end (cm)
dB =	Diameter at the large log end (cm)
dM =	Diameter at the mid-length log end (cm)

Για τη χρήση τους χρειάζεται μια ή δύο διαμέτρους σε βάση κορυφή του δέντρου. Για να γίνει αυτό χρειάζεται ένα ειδικό όργανο που λέγεται ρελασκόπιο του bitterlich



Εικόνα 2: Ρελασκόπιο bitterlich

Με τη βοήθεια του οποίου, από το έδαφος μπορούμε να μετρήσουμε τις διαμέτρους ιστάμενων δέντρων σε όποιο σημείο θέλουμε. Για τη χρήση του βέβαια θα χρειαστούμε δασολόγο ή κάποιον που θα εκπαιδευτεί κατάλληλα. .

Υπάρχει βέβαια και ο πιο απλός τρόπος με τη μέτρηση της στήθιας διαμέτρου δηλαδή σε ύψος 1,3 μέτρα από το έδαφος και στη συνέχεια αν είναι κωνοφόρο δέντρο χρησιμοποιούμε τον τύπο

$$\text{Όγκος (m}^3\text{)} = \text{ύψος δέντρου (m)} \times \text{διάμετρο στο 1,3 μέτρα υψωμένη στο τετράγωνο}^2 \text{ (m}^2\text{)} \times 0.7854 / 3$$

Η αν είναι πλατύφυλλο

$$\text{Όγκος (m}^3\text{)} = \text{ύψος δέντρου (m)} \times \text{διάμετρο στο 1,3 μέτρα υψωμένη στο τετράγωνο}^2 \text{ (m}^2\text{)} \times 0.7854$$

Για τη μέτρηση του ύψους του δέντρου και πάλι υπάρχουν όργανα όπως το haga ή το blumeleiss που πάλι θέλουν εκπαίδευση για τη σωστή χρήση τους.



Εικόνα 3: Haga ή το blumeleiss

Το κλισίμετρο είναι όργανο μικρό και εύχρηστο για την μέτρηση των % κλίσεων ή των γωνιών κλίσεων σε βαθμούς ή μοίρες. Τα κλισίμετρα στηρίζονται στην αρχή του εκκρεμούς. Το όργανο αιωρούμενο παίρνει την κατακόρυφη θέση με το 0% οριζόντιο. Αποτελείται από ένα σύστημα φακών, οι οποίοι μεγεθύνουν την κατάλληλη κλίμακα η οποία είναι χαραγμένη σε ένα εσωτερικό πίνακα. Η κλίμακα είναι αριθμημένη από 0 έως 50 grad. Σε κάθε σκόπευση διαβάζουμε την ένδειξη της κλίμακας, που μας δίνει την κατακόρυφη γωνία της ευθυγραμμίας. Υπάρχει ο περιορισμός της χαραγμένης κλίμακας, που δεν μας επιτρέπει να μετρήσουμε γωνίες μεγαλύτερες από 50 grad. Η σκόπευση οποιουδήποτε σημείου και η αναγνώριση πάνω στις κλίμακες (με νοητή προέκταση του σημείου στις κλίμακες) δίνει την κλίση.

Χρησιμοποιούνται για πάνω από 100 χρόνια, προσφέροντας μικρή σχετικά ακρίβεια αλλά ευκολία στη χρήση και μικρό κόστος αγοράς. Οι συνηθέστεροι τύποι που χρησιμοποιούνται σήμερα στην δασική πράξη είναι οι εξής:

- ***ΚΛΙΣΙΜΕΤΡΑ SUUNTO***



Εικόνα 4: SUUNTO

1. Μια πλαισιωτή κατασκευή από ελαφρό σε βαρύ μέταλλο που αντέχει στη σκουριά
2. Την κλίμακα, η οποία στηρίζεται με μηχανική διάταξη χωρίς τριβές και όλα τα κινητά μέρη βρίσκονται βυθισμένα σ' ένα υγρό μετριάσμου των κινήσεων μέσα σε ερμητικά κλειστή πλαστική υποδοχή. Το υγρό περιορίζει τις ανεπιθύμητες ταλαντεύσεις της κλίμακας και επιτρέπει μόνο μια μικρή κίνησή της. Το υλικό κατασκευής της πλαστικής υποδοχής δεν επηρεάζεται από την παγωνιά και δεν επηρεάζεται σε υψηλές θερμοκρασίες.
3. Ένα μηχανισμό εύκολης και γρήγορης ανάγνωσης με φακό χωρίς παραλλακτικότητα που είναι τοποθετημένος σε πλαισιωτή κατασκευή.
4. Μια ενσωματωμένη λάμπα με tritium που φωτίζει την κλίμακα και διευκολύνει έτσι την ανάγνωση σε συνθήκες εργασίας με περιορισμένο φως ή στο σκοτάδι.

- ***ΚΛΙΣΙΜΕΤΡΑ MERIDIAN***



Εικόνα 5: ΚλισίμετροMERIDIAN

Αποτελούνται από:

1. Ένα μεταλλικό πλαίσιο με ορθογώνια διατομή μέσα στο οποίο υπάρχει βαρίδιο με ανάλογο βάρος.
2. Ένα κουτί κυκλικής διατομής που συνδέεται κατ' επέκταση προς τα επάνω με το μεταλλικό πλαίσιο και στο οποίο τοποθετούνται ένας ή περισσότεροι φακοί που στο πίσω τμήμα έχουν κλίμακα διαιρέσεων. Οι φακοί είναι τοποθετημένοι έτσι ώστε η γραμμή του μηδενός της κλίμακας να συμπίπτει με το οριζόντιο επίπεδο που περνάει από το μάτι του παρατηρητή όταν το όργανο κρατιέται στη θέση της ισορροπίας.
3. Ένα δακτύλιο (κρίκο) προσαρμοσμένο στο επάνω τμήμα του οργάνου που με τη βοήθεια του κρεμιέται το όργανο από τον αντίχειρα και παίρνει ελεύθερα τη θέση της ισορροπίας, δηλαδή την κατακόρυφη θέση.

Μειονέκτημα του οργάνου είναι ότι οι υποδιαιρέσεις της κλίμακας

αντιπροσωπεύουν 0.5 grad. Συνεπώς η ακρίβεια είναι μικρή σε σχέση με τα άλλα τοπογραφικά όργανα (Θεοδόλιχο, Ταχύμετρο). Ένα άλλο μειονέκτημα του οργάνου είναι ότι είναι φορητό: όση σταθερότητα και αν διαθέτουμε, το χέρι μας θα κάνει μικρές κινήσεις, δυσκολεύοντας τη μέτρηση. Το πλεονέκτημα, σε σύγκριση με τα άλλα όργανα, είναι ότι το κλισίμετρο είναι πολύ μικρό, ελαφρύ όργανο και μεταφέρεται παντού.

Αυτό το **πλεονέκτημα** έχουν εκμεταλλευθεί οι κατασκευαστές του οργάνου και προχώρησαν σε μια πρόσθετη βελτίωση: Συγχώνευσαν σε ένα όργανο το κλισίμετρο και την πυξίδα. Κατ' αυτόν τον τρόπο, το άτομο που κάνει τις μετρήσεις φέρει πάντα στο χέρι του το πλήρες όργανο, έχοντας έτσι τη δυνατότητα να μετρά οριζόντιες και κατακόρυφες γωνίες και να τις αναγάγει απ' ευθείας σε αζιμούθιες γωνίες και κατά μήκος κλίσεις ευθυγραμμιών. Η μικρή ακρίβεια των μετρήσεων δεν έχει και τόση σημασία, αφού οι μετρήσεις δεν έχουν χαρακτήρα τελικών επιμετρήσεων, αλλά λήψη αρχικών στοιχείων για τον αρχικό σχεδιασμό.

Σε πολλά κλισίμετρα ο πίνακας των μετρήσεων περιέχει και άλλες κλίμακες. Δίπλα στην κλίμακα των βαθμών υπάρχει μια παράλληλη κλίμακα αριθμημένη σε μοίρες (0°-45°). Δίπλα σε αυτή υπάρχει μια άλλη, που μας δίνει απ' ευθείας την απόσταση ενός σημείου, στο οποίο τοποθετούμε ένα δίμετρο στόχο (ακόντιο ύψους 2m). Η

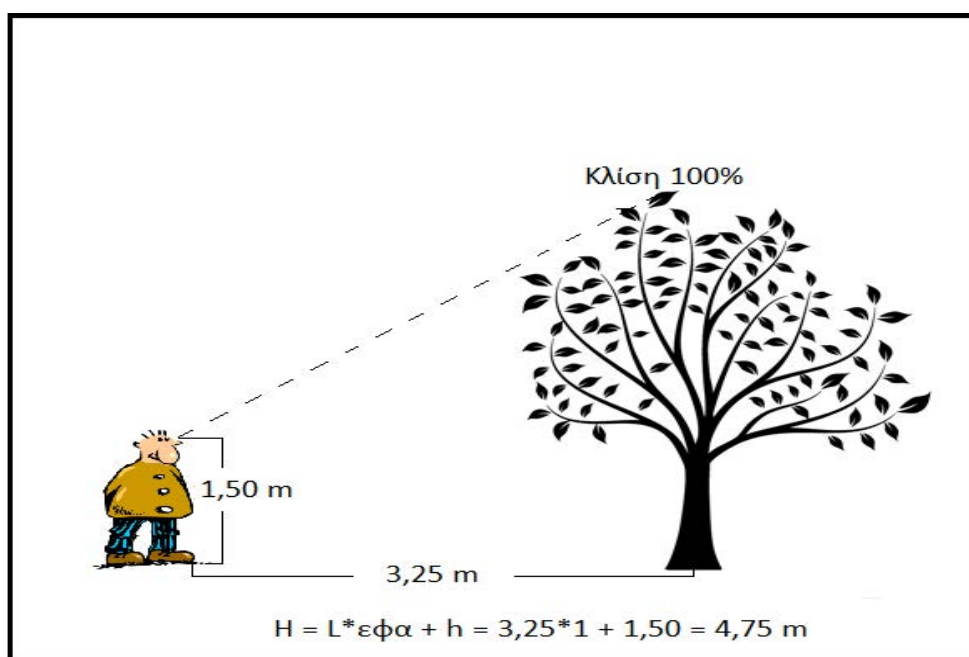
τέταρτη στη σειρά κλίμακα δίνει απ' ευθείας την κλίση (%) της σκοπευόμενης ευθυγραμμίας.

- **ΥΨΟΜΕΤΡΗΣΗ ΔΕΝΤΡΩΝ ΜΕ ΚΛΙΣΙΜΕΤΡΟ MERIDIAN**

Η διαδικασία μέτρησης του ύψους ενός δέντρου με την χρήση κλισίμετρου MERIDIAN είναι πολύ απλή επειδή

α. το όργανο είναι ελαφρύ

β. δεν χρειάζονται ιδιαίτερες ρυθμίσεις πριν την έναρξη της διαδικασίας μετρήσεις όπως πχ συμβαίνει με το θεοδόλιχο.



Αρχικά ο παρατηρητής στέκεται στην ευθεία με το δέντρο, του οποίου ενδιαφέρεται να μετρήσει το ύψος. Κρατάει το κλισίμετρο με τον αντίχειρα έτσι ώστε αυτό να είναι κατακόρυφο. Στη συνέχεια κοιτά την κλίμακα του οργάνου που δείχνει την κλίση της ευθείας που σχηματίζεται νοητά μεταξύ των ματιών του παρατηρητή και της κορυφής του δέντρου.

Μετακινείτε μπρος - πίσω έως ότου η κορυφή του δέντρου ‘βρεθεί’ στο 100% της κλίμακας του οργάνου. Κλίση 100% σημαίνει ότι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στη νοητή ευθεία και το οριζόντιο επίπεδο είναι $\alpha=45^\circ$.

Το ύψος του δέντρου δίνεται από τον τύπο: $H = L * \epsilon\phi\alpha + h$ όπου

L : είναι η απόσταση του παρατηρητή από το δέντρο

h : είναι η απόσταση των ματιών του παρατηρητή από το οριζόντιο επίπεδο και

$$\varepsilon_{\phi 45} = \varepsilon_{\phi 45^\circ} = 1$$

Βέβαια μπορεί και το ρελασκόπιο να χρησιμοποιηθεί.

Το ύψος αποτελεί σχεδόν πάντα παράμετρο στους υπολογισμούς και για αυτό αφιερώνεται αρκετός χρόνος για το σωστό υπολογισμό του.

Πυκνότητες γένους δέντρων.

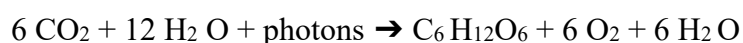
Πριν γίνει η παράθεση των τιμών θα πρέπει να γίνει κατανοητό ότι σε ένα γένος έχουμε πολλά είδη με μεγάλη διακύμανση των τιμών της πυκνότητας. Χαρακτηριστικό είναι στον πιο κάτω πίνακα που ακολουθεί ότι στο γένος *Pinus* έχουμε τιμές από 0,49 g/cm³ ή 490 kg/m³ μέχρι 0,71g/cm³ ή 710kg/m³ δηλαδή 210 κιλά στο κυβικό μέτρο διαφορά!!!.

Παρόλα αυτά για χάρη ευκολίας αλλά και δυνατότητας να χρησιμοποιηθούν τα στοιχεία αυτά από μη εξειδικευμένα άτομα όπως ένας απλός πολίτης δίνουμε τους μέσους όρους του γένους με ότι απόκλιση αυτό συνεπάγεται κάθε φορά.

Σε είδη που δεν αποξυλώνονται όπως τα κακτοειδή που η μάζα τους είναι περισσότερο νερό δεν γίνεται μέτρηση πυκνότητας. Το ίδιο και σε θάμνους που δεν παρουσιάζουν κορμό αλλά πολλά πολυσχιδείς κλαδιά που είναι νεαροί βλαστοί με μεγάλο ποσοστό υγρασίας.

4.2 Προσδιορισμός του O₂ που εκλύεται από ένα ιστάμενο δέντρο ανάλογα με το είδος του.

Για τον προσδιορισμό του εκλυόμενου οξυγόνου βασιζόμαστε σύμφωνα με τις έρευνες των UHNursyahbandi, WSubchanandSuratno, σχετικά με την εκτίμηση της δέσμευσης CO₂ αλλά και του εκλυόμενου O₂ από δέντρα σε δρόμους πόλης (The estimationn of CO₂ absorption and O₂ production from trees on main street) αλλά και άλλων επιστημόνων που φαίνονται στη βιβλιογραφία ότι με βάση τον τύπο της φωτοσύνθεσης που ακολουθεί για κάθε ένα mol κυτταρίνης που παράγεται εκλύονται 6 mol οξυγόνου.



Μετατρέποντας τα mol σε βάρος βλέπουμε ότι η αντιστοίχιση

Then to estimate the amount of O₂ that was produced, can be estimated using this equation[9].

$$nO_2 = C \times 2,67 \quad (4)$$

Explanation:

N = O₂production (kg/year)

C = Amount of carbon (kg/year)

2,67 = conversion factor C to O₂.

Βασιζόμενοι λοιπόν στην δέσμευση του CO₂ όπως αυτή υπολογίστηκε στα προηγούμενα βήματα μπορούμε να υπολογίσουμε και την έκλυση οξυγόνου.

4.3 Προσδιορισμός των NO_x που δεσμεύεται από ένα ιστάμενο δέντρο ανάλογα με το είδος του.

Εξαιτίας της μόλυνσης από αυτοκίνητα και βιομηχανίες το NO_x είναι ένας βασικός ρυπαντής ενώ ταυτόχρονα ο ρυπαντής αυτός δημιουργεί σοβαρά προβλήματα στην υγεία (Kim et al., 2018; Kumar et al., 2019).

Ταυτόχρονα από μελέτες βρέθηκε ότι τα φυτά σε αστικά περιβάλλοντα απορροφούν αλλά και εξουδετερώνουν τους ατμοσφαιρικούς ρύπους στην επιφάνεια των φύλλων τους Chaparro-Suarez et al., 2011; Franzaring and van der Eerden, 2000

Το ίδιο συμβαίνει και με στερεά με μορφή σκόνης που έχουν διαστάσεις PM 10 και PM 2.5 που επίσης δεσμεύονται από τα φύλλα που έχουν όμως τραχιά επιφάνεια και μεγάλα φύλλα.

Σχετικά με το NO₂ εισχωρεί στα φύλλα μέσα από τα στόματα, μέσα από την ανταλλαγή αερίων όπου αφομοιώνονται από ένζυμα . (Hu et al., 2016; Teklemariam and Sparks, 2006)

Οι περισσότερες μελέτες κατέληξαν ότι οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την απορρόφηση των πιο πάνω ρυπαντών είναι η επιφάνεια των φύλλων και το ποσοστό κάλυψη των φύλλων (Cai et al., 2017; Jim and Chen, 2008; Lin et al., 2019)

Τη σχέση της μάζας του φυλώματος μπορούμε να τη συσχετίσουμε με βάση τον πιο κάτω πίνακα σε σχέση με τον ξυλώδη όγκο.

	Deciduous angiosperm	Evergreen angiosperm	Evergreen gymnosperm	Total
M_F/M_S	2548 (142)	4362 (316)	1893 (31)	8803 (489)
A_F/M_S	1585 (86)	3648 (239)	894 (22)	6127 (347)
M_F/A_F	1863 (102)	4348 (257)	1487 (30)	7698 (389)
A_F/A_S	1793 (98)	3509 (236)	1629 (32)	6931 (366)
A_S/M_S	2502 (140)	3544 (290)	1910 (29)	7956 (459)

Numbers indicate individual plants, with the number of unique species given in parentheses. Sample sizes differed between variables because not all included studies measured all variables. M_F , total leaf mass; M_S , above-ground woody mass; A_F , total leaf area; A_S , basal stem area.

4.3.1 Προσδιορισμός του NO_x με βάση τον ακόλουθο τύπο.

Η ποσότητα της πρόσληψης αζώτου ενός μεμονωμένου δέντρου μπορεί να εκφραστεί ως η μάζα αζώτου ανά μάζα δείγματος φύλλου σε βάση το ξηρό βάρος ($\text{mg N} \cdot \text{g}^{-1} \text{ DW}$).

Η απορρόφηση NO_x υπολογίζεται με βάση τη συνολική φυλλική επιφάνεια A , τη συνολική μάζα φύλλων M και μέσος ρυθμός πρόσληψης NO_x r :

Ολική απορρόφηση $\text{NO}_x = M \cdot r$

NO_x absorption per leaf area ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) = $M \cdot r / A$

Η συνολική επιφάνεια φύλλου A υπολογίστηκε με βάση το φύλλο υψηλής ανάλυσης δεδομένα δείκτη περιοχής (LAI).

$M = A / (\text{Reg} / 4.93 + 3.93 \text{Rda} / 4.93)$

όπου A είναι η συνολική επιφάνεια των φύλλων.

Το **Rda** είναι ο λόγος της επιφάνειας των φύλλων και της μάζας των φύλλων για φυλλοβόλο αγγειόσπερμο,

και **Reg** είναι η αναλογία της επιφάνειας των φύλλων και της μάζας των φύλλων για αειθαλές γυμνόσπερμο.

Αντιπροσωπεύτηκε η μέση πρόσληψη NO_x (που συμβολίζεται με *r*) μεμονωμένων δέντρων με τη μάζα των NO_x ανά μάζα βιομάζας φύλλων φυτών

Πολη	Περιοχ ή μελετης (km ²)	Normalize removal rate (g m ⁻² a ⁻¹)	NO _x	Μέθοδος	Πηγη
Beijing, China	1386	0.94 (0.63)		Stable isotope	Gong, C. et al. (2021)
Beijing, China	301.80	0.44 (1.64)		UFORE	Yang et al, 2005
Guangzhou, China	NA	1.77 (0.61)		Sap-flow	Hu et al, 2016
Guangzhou, China	NA	NA (0.37~0.78)		Sap-flow	Chen et al, 2018
Guangzhou, China	231.50	0.18 (NA)		Other	Jim et al., 2008
Tabriz, Iran	244.79	0.36 (1.06)		i-tree Eco	Parsa et al., 2019
Sourth Korea	NA	1.68 (NA)		Other	Song et al., 2016
Strasbourg, France	78.15	0.17 (0.15)		i-tree Eco	Selmi et al., 2016
Santiago, Chile	967.2	0.19 (0.17~0.9)		i-tree Eco	Francisco et al., 2009

Από τις τιμές που έχουμε από τον πιο πάνω πίνακα θα μπορούσαμε να εκτιμήσουμε ότι ο δείκτης για την Αθήνα θα μπορούσε να κυμανθεί περίπου στο 0,17 -0,2. Για μεγαλύτερη ακρίβεια θα πρέπει να γίνουν πραγματικές μετρήσεις.

4.4 Προσδιορισμός μονοξειδίου του άνθρακα (CO) που δεσμεύεται από ένα ιστάμενο δέντρο ανάλογα με το είδος του.

Το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) είναι ένα άχρωμο, άοσμο αέριο που εκπέμπεται από τις διαδικασίες καύσης. Το CO είναι ένας κοινός ατμοσφαιρικός ρύπος. Τα επίπεδα CO₂ στο περιβάλλον μπορούν να συμβάλουν σε προβλήματα υγείας, ειδικά για άτομα με καρδιακές παθήσεις και άλλες χρόνιες καρδιοπνευμονικές παθήσεις. Το μονοξείδιο του άνθρακα συμβάλλει επίσης στο σχηματισμό αιθαλομίχλης, διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και όζοντος (O₃), που σχετίζονται με την ποιότητα του αέρα και τις κλιματικές ανησυχίες. Τα δέντρα μπορούν να απομακρύνουν το ατμοσφαιρικό CO από την ατμόσφαιρα, συμβάλλοντας έτσι στην ποιότητα του αέρα και ένα σταθερό κλίμα, καθώς και στην αποφυγή πιθανών προβλημάτων υγείας του ανθρώπου που σχετίζονται με την έκθεση σε CO. Τα καυσαέρια από μηχανοκίνητα οχήματα συμβάλλουν περίπου στο 60 τοις εκατό όλων των εκπομπών μονοξειδίου του άνθρακα σε εθνικό επίπεδο και έως και το 95 τοις εκατό σε αστικές περιοχές. Το CO μπορεί να βλάψει τους ανθρώπους μειώνοντας την παροχή οξυγόνου στους ιστούς και τα όργανα του σώματος, όπως η καρδιά και ο εγκέφαλος. Η δηλητηρίαση από μονοξείδιο του άνθρακα, η οποία συχνά συνδέεται με δυσλειτουργία των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης και της ποιότητας του αέρα των εσωτερικών χώρων, μπορεί να είναι σοβαρά εξουθενωτική ή ακόμη και θανατηφόρα. Το μονοξείδιο του άνθρακα συμβάλλει στον σχηματισμό CO₂ και όζοντος, δύο ισχυρών αερίων θερμοκηπίου (GHGs) που θερμαίνουν την ατμόσφαιρα. Τα δέντρα συμβάλλουν στη μείωση των πιθανών δυσμενών επιπτώσεων του CO στην υγεία και το περιβάλλον αφαιρώντας το από τον αέρα. Οι αέριοι ατμοσφαιρικοί ρύποι προσλαμβάνονται κυρίως μέσω των στομάτων των φύλλων (πόροι), αν και ορισμένα αέρια απομακρύνονται από την επιφάνεια του φυτού. Μόλις εισέλθουν στο φύλλο, τα αέρια διαχέονται στους μεσοκυττάριους χώρους και μπορούν να απορροφηθούν από μεμβράνες νερού για να σχηματίσουν οξέα ή να αντιδράσουν με τις εσωτερικές επιφάνειες των φύλλων. Η απομάκρυνση των αερίων ρύπων είναι πιο μόνιμη από την απομάκρυνση των σωματιδίων επειδή τα αέρια συχνά απορροφώνται και μετατρέπονται μέσα στο εσωτερικό του φύλλου.

4.5 Προσδιορισμός των PM₁₀ που δεσμεύεται από ένα ιστάμενο δέντρο ανάλογα με το είδος του.

Οι αστικές μονάδες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον μετριασμό των αστικών αερομεταφερόμενων PM. Οι διάμετροι PM (τουλάχιστον μέχρι 2 mm) μπορεί να εισέλθει στη στοματική κοιλότητα. Τα PM που εναποτέθηκαν σε φύλλα αποτελούνταν κυρίως από C, O, Si, Fe και Ca, υποδεικνύοντας ότι τα PM ήταν κυρίως από φυσική πηγή. Ο αριθμός των σωματιδίων ανά φύλλο cm² ήταν $1,95 \times 10^7$. Ο συγκέντρωση μάζας ήταν 148,44 mg/cm² στις επιφάνειες των φύλλων σε αειθαλή είδη. Διάμετροι PM (λιγότερο από 2,5 mm) μόνο αντιπροσώπευε το 2,09% της συνολικής μάζας PM.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία υπάρχουν 3 διεργασίες οι οποίες μελετώνται και σχετίζονται με την περιεκτικότητα του PM στα δέντρα.

Πρώτον, υπάρχει η εισερχόμενη ροή αέρα, η οποία φέρει μια ορισμένη συγκέντρωση PM (μg/m³) ποικίλλει με την πάροδο του χρόνου και του χώρου, ανάλογα με τα μοτίβα του ανέμου και τις πηγές εκπομπών PM. Εξετάζονται, οι μέσες συγκεντρώσεις σε ένα ετήσιο χρονικό βήμα.

Δεύτερον, η εισερχόμενη ροή αέρα περνά μέσα από το θόλο(κόμη) και ένα κλάσμα του PM δεσμεύεται. Αυτό μπορεί να μετρηθεί είτε ως το ποσοστό μείωσης των PM κατά τη διέλευση από το θόλο, είτε ως αφαίρεση σε τόνους, είτε ως deposition velocity (the absolute rate of deposition per unit time). Σημειώστε ότι ένα μέρος της εισερχόμενης ροής αέρα εκτρέπεται αντί να περάσει μέσα από το θόλο, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε τοπικά υψηλότερες συγκεντρώσεις PM.

Τρίτον, ο καθαρότερος αέρας εξέρχεται από το θόλο και συνεχίζει να κινείται κατά τον άνεμο. Σε κάποια απόσταση, αυτός ο καθαρότερος αέρας αναμιγνύεται με άλλον αέρα που δεν πέρασε από το θόλο και η συγκέντρωση των PM προσεγγίζει τη μέση συγκέντρωση για την περιοχή.

Η ξηρή εναπόθεση PM₁₀ στα δέντρα προκύπτει κυρίως από καθίζηση υπό βαρύτητα και πρόσκρουση υπό την επίδραση του ανέμου (Nowak, 1994) και επομένως επηρεάζεται λιγότερο από ταχέως μεταβαλλόμενη μετεωρολογία, αλλά επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τη διάρκεια φυλλώματος κόμης και τη συνολική επιφάνεια των

φύλλων της κόμης. Στην έρευνα των Tallisetal., 2011 προκειμένου να προσδιορίσουν τις σχέσεις μεταξύ της ποσότητας και του τύπου της δενδρικής κάλυψης και της πρόσληψης των PM10 χρησιμοποίησαν δύο προσεγγίσεις μοντελοποίησης: τη μέθοδο pollution/deposition flux που έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές μελέτες (π.χ. Lovett, 1994, Nowak, 1994a, Nowak and Crane, 1998, Smith, 1981) και (ii) την προσέγγιση που χρησιμοποιήθηκε από τους Tiwary et al. (2009), όπου οι ταχύτητες απόθεσης για συγκεκριμένα είδη χρησιμοποιήθηκαν με την προσέγγιση ροής ρύπανσης - που αναφέρεται εδώ ως "η μέθοδος Tiwary". Πραγματοποιήθηκε εκτέλεση μοντέλων απορρόφησης χρησιμοποιώντας τοπικά ωριαία μετεωρολογικά δεδομένα και δεδομένα ρύπανσης. Στο μοντέλο που χρησιμοποίησαν η καθοδική ροή των PM10 (F - σε $g\ m^{-2}\ s^{-1}$) προς το θόλο των αστικών δέντρων μπορεί να υπολογιστεί ως το γινόμενο της ταχύτητας απόθεσης (V_d - σε $m\ s^{-1}$) και της συγκέντρωσης του ρύπου (C - σε $g\ m^{-3}$) σύμφωνα με τη μεθοδολογία που χρησιμοποιείται σε διάφορες μελέτες (Lovett, 1994),.

$$F = V_d * C \quad (1)$$

$$V_d = (R_a + R_b + R_c)^{-1} \quad (2)$$

Η V_d υπολογίζεται ως το αντίστροφο του αθροίσματος των αεροδυναμικών αντιστάσεων (R_a), του ελασματικού οριακού στρώματος (R_b) και του θόλου (R_c) (Baldocchi, Hicks, & Camara, 1987).

Για την ροή δέσμευσης του PM₁₀ η τιμή εναπόθεσης πολλαπλασιάζεται με την περιοχή της επιφάνειας καλυμμένη έκταση γης για τη μέθοδο ροής ρύπανσης ή περιοχή καλυμμένης με θόλο πολλαπλασιασμένη με τον δείκτη επιφάνειας φύλλων (LAI) για τη μέθοδο Tiwary) σε χρονικές περιόδους για τα οποία είναι γνωστή η συγκέντρωση ρύπων π.χ. ωριαία ή ετήσια. Ο Δείκτης Επιφάνειας Φύλλων είναι ο λόγος της συνολικής επιφάνειας φύλλων δέντρου προς την προβαλλόμενη επιφάνεια που καταλαμβάνει ο θόλος ($m^2 m^{-2}$). Οι τοπικές μετεωρολογικές συνθήκες χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των αντιστάσεων R_a και R_b σε sm^{-1} όπως περιγράφεται λεπτομερώς στο Nowak, 1994b. Οι τιμές αντίστασης θόλου (R_c ; sm^{-1}) προέρχονται από τον μέσο όρο R_a και R_b και την ταχύτητα εναπόθεσης (V_d , σε ms^{-1}) όπως περιγράφεται από τους Nowak, 1994 και Tiwaryetal. (2009). Η μέθοδος Tiwary διαφέρει εντός της παραμέτρου V_d .

Σε περιοχές στην Αμερική χρησιμοποιείται το UFORE-D: Dry Deposition of Air Pollution – το οποίο ποσοτικοποιεί ωριαία την ποσότητα της ρύπων που απομακρύνεται από την ατμόσφαιρα από τα αστικά δάση και το συσχετίζει με την καλύτερη ποιότητα αέρα ετησίως

Η απομάκρυνση της ρύπανσης αποτιμάτε με μετρήσεις των O_3 , SO_2 , NO_2 , CO , και PM_{10} στο πεδίο, της συγκέντρωσης των ρύπων και μετεωρολογικών δεδομένων.

4.6 Απαιτούμενες εξισώσεις

Οι εξισώσεις που θα χρησιμοποιηθούν είναι

- Για τον υπολογισμό της ταχύτητας εναπόθεσης
- Τον υπολογισμό της αεροδυναμικής αντίστασης
- Την ταχύτητα τριβής
- Αντίσταση οριακής στρώσης
- Αντίσταση της κόμης
- Της στοματικής αντίστασης
- Την βελτίωση της ποιότητας του αέρα
- Της μεταβολής της συγκέντρωσης των ρύπων

 **ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΤΩΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΡΥΠΩΝ** CO , SO_x , O_3 και PM_{10} σύμφωνα με τους παρακάτω τύπους

$$F = V_d * C \quad (1)$$

$$F = V_d * C * 3600$$

$$F_{min} = V_{dmin} * C * 3600$$

$$F_{max} = V_{dmax} * C * 3600$$

Όπου F = Ροή των ρύπων ($g\ m^{-2}\ s^{-1}$),

F_{min} = Ελάχιστη ροή των ρύπων και

F_{max} = Μέγιστη ροή των ρύπων

V_d - ταχύτητας εναπόθεσης (σε $m\ s^{-1}$) και της

C συγκέντρωσης του ατμοσφαιρικού ρύπου (- σε g m⁻³)

Vd_{min}=ελάχιστη ταχύτητα εναπόθεσης (σε m s⁻¹)

Vd_{max}=μέγιστη ταχύτητα εναπόθεσης

 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ ΤΩΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΡΥΠΩΝ CO, SO_x, O₃ ΚΑΙ PM₁₀ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟΥΣ ΠΑΡΑΚΑΤΩ ΤΥΠΟΥΣ

$$V_d = (R_a + R_b + R_c)^{-1} \quad (2)$$

(R_a)=αεροδυναμικές αντιστάσεις (sm⁻¹)

(R_b)=αντίσταση του ελασματικού οριακού στρώματος(sm⁻¹)

(R_c) =αντίσταση του θόλου(sm⁻¹)

Ανάλογα με την πυκνότητα ροής της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας , το ελάχιστο και το μέγιστο του Vd υπολογίζονται ως εξής (Lovett 1994):

Εάν > 0 (κατά τη διάρκεια της ημέρας)

- για NO₂ Vd,min=0,001 και Vd,max=0,005 (5)
- για το O₃ Vd,min=0,001 και Vd,max=0,008 (6)
- για SO₂ Vd,min=0,002 και Vd,max=0,01 (7)

αλλιώς (τη νύχτα)

$$V_{d,min} = V_d$$

$$V_{d,max} = V_d$$

 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ ΓΙΑ PM₁₀

Η ταχύτητα εναπόθεσης για τα PM₁₀ υπολογίζεται με βάση τις μέσες, ελάχιστες και μέγιστες τιμές που αναφέρονται από τον Lovett (1994).

$$V_d = V_{d,PM10,avg} \cdot (BAI + LAI) / (BAI + LAI_{PM10})$$

$$V_{d,min} = V_{d,PM10,min} \cdot (BAI + LAI) / (BAI + LAI_{PM10})$$

$$V_{d,max} = V_{d,PM10,max} \cdot (BAI + LAI) / (BAI + LAI_{PM10})$$

όπου

$$V_{d,PM10,avg} = \text{Μέση ταχύτητα εναπόθεσης για PM}_{10} (= 0,0064 \text{ ms}^{-1}) \text{ (Lovett 1994)}$$

Vd,PM10,min = Ελάχιστη ταχύτητα εναπόθεσης για PM10 (= 0,0025 ms⁻¹) (Lovett 1994)

Vd,PM10,max = Μέγιστη ταχύτητα εναπόθεσης για PM10 (= 0,01 ms⁻¹) (Lovett 1994)

LAI_{PM10} = Δείκτης φυλλικής επιφάνειας για εναπόθεση σωματιδίων (= 6 m²/m²)

BAI = Δείκτης επιφάνειας φλοιού (m²/m²) Ο Δείκτης Επιφάνειας Φλοιού (BAI) υπολογίζεται συνήθως ως το συνολικό εμβαδόν των δέντρων σε μια περιοχή, χωρισμένο με το συνολικό εμβαδόν της εκτός τριγώνου από τη βάση των δέντρων.

Συνήθως, υπολογίζεται ως εξής:

$$BAI=BA/A$$

Όπου **BA** είναι το συνολικό εμβαδόν των δέντρων (σε τετραγωνικά μέτρα, από μετρήσεις στο πεδίο).

A είναι η συνολική έκταση της περιοχής (σε τετραγωνικά μέτρα).

Ο BAI μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει την πυκνότητα των δέντρων σε μια περιοχή

LAI = Δείκτης φυλλικής επιφάνειας (m²/m²) Το σύμβολο "LAI" αναφέρεται στον Δείκτη Φυλλικής Επιφάνειας (Leaf Area Index) και εκφράζει τη σχέση μεταξύ του συνολικού εμβαδού των φύλλων ενός φυτού ή ενός δασικού οικοσυστήματος και της εκτάσεως του εδάφους που καλύπτεται από αυτά. Συνήθως μετριέται σε μονάδες της επιφάνειας (τυπικά τετραγωνικά μέτρα) ανά μονάδα έκτασης εδάφους (συνήθως τετραγωνικά μέτρα).

Ο τρόπος υπολογισμού του LAI εξαρτάται από τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του εμβαδού των φύλλων και την εκτίμηση της εκτάσεως του εδάφους. Συνήθως, μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους είναι η χρήση δορυφορικών εικόνων και μετρήσεων στο πεδίο.

Μια απλή μέθοδος υπολογισμού του LAI είναι η χρήση της εξίσωσης:

$$LAI=N \cdot S/K$$

Όπου:

- **N** είναι ο αριθμός των φύλλων ανά μονάδα έκτασης (συνήθως ανά τετραγωνικό μέτρο),
- **S** είναι το μέσο εμβαδόν των φύλλων (σε τετραγωνικά μέτρα),
- **K** είναι ο αριθμός που αντιστοιχεί στην εκτάση του εδάφους που καλύπτεται από τα φύλλα (σε τετραγωνικά μέτρα).

Ο Δείκτης Φυλλικής Επιφάνειας (LAI) είναι σημαντικός για τη μελέτη των φυσικών διαδικασιών στα φυτά, όπως η φωτοσύνθεση, η αναπνοή και η εξάτμιση,

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Ωριαία μετεωρολογικά δεδομένα από τον πλησιέστερο μετεωρολογικό σταθμό για την εκτίμηση των Ra και Rb . Η αεροδυναμική αντίσταση υπολογίζεται ως (Killus et al. 1984):

$$Ra = u(z)/u_*^{-2} \quad (3)$$

$u(z)$ είναι η μέση ταχύτητα ανέμου στο ύψος z ($m\ s^{-1}$) και u_* είναι η ταχύτητα τριβής ($m\ s^{-1}$).

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΡΙΒΗΣ

Η ταχύτητα τριβής, u_* , υπολογίζεται χρησιμοποιώντας διαφορετικές εξισώσεις με βάση το μήκος της τραχύτητας και συνεπώς την ατμοσφαιρική σταθερότητα. Η ατμοσφαιρική σταθερότητα περιγράφεται με την τάξη σταθερότητας Pasquill, A έως F, είναι μια εμπειρική μέθοδος για την εκτίμηση του μήκους σταθερότητας Monin-Obuhkon, L , και για τον προσδιορισμό του μήκους τραχύτητας,

Η τάξη σταθερότητας Pasquill είναι μια εμπειρική κατηγοριοποίηση που χρησιμοποιείται στη μετεωρολογία και την ατμοσφαιρική επιστήμη για να περιγράψει το επίπεδο ατμοσφαιρικής σταθερότητας. Κάθε επίπεδο σταθερότητας από την κλίμακα Pasquill αντιστοιχεί σε συγκεκριμένες μετεωρολογικές συνθήκες.

Οι τάξεις σταθερότητας Pasquill κατηγοριοποιούνται από το A έως το F, όπου η κάθε τάξη αντιστοιχεί σε διαφορετικές συνθήκες στρώσεων της ατμόσφαιρας. Αυτές οι τάξεις λαμβάνουν υπόψη τους παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, η ταχύτητα του ανέμου και άλλες μετεωρολογικές παράμετροι.

Η τάξη σταθερότητας Pasquill χρησιμοποιείται επίσης για την εκτίμηση του μήκους σταθερότητας Monin-Obukhov (L), που περιγράφει το μήκος της επιφάνειας ενός εδάφους ή άλλου επιφανειακού στρώματος που επηρεάζεται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Επιπλέον, η τάξη σταθερότητας Pasquill μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό του μήκους τραχύτητας, που αναφέρεται στο μήκος κλίμακας στο οποίο οι ταραχές της ατμοσφαιρικής ροής είναι σημαντικές.

Η χρήση της τάξης σταθερότητας Pasquill είναι ένας πρακτικός τρόπος για να κατηγοριοποιήσουμε τις μετεωρολογικές συνθήκες σε σχέση με την ατμοσφαιρική σταθερότητα και να κατανοήσουμε τον τρόπο που επηρεάζουν την ατμοσφαιρική ροή και άλλες μετεωρολογικές διαδικασίες.

$$\text{Pasquill} = A: 1L = -0,0875 \cdot z_0^{-0,1029}$$

$$\text{Pasquill} = B: 1L = -0,03849 \cdot z_0^{-0,1714}$$

$$\text{Pasquill} = C: 1L = -0,0807 \cdot z_0^{-0,3049}$$

$$\text{Pasquill} = D: 1L = 0 \cdot z_0^{-0}$$

$$\text{Pasquill} = E: 1L = 0,0807 \cdot z_0^{-0,3049}$$

$$\text{Pasquill} = F: 1L = 0,03849 \cdot z_0^{-0,1714}$$

$$u_* = (k \times u(z-d)) [\ln((z-d) \times z_0^{-1}) - \psi M(z-d) * L^{-1}) + \Psi m(z_0 * L^{-1})]^{-1} \quad (4)$$

όπου $k = 0,4$ σταθερά von Karman,

d = ύψος μετατόπισης (m),

z_0 = μήκος τραχύτητας (m),

ψM = συνάρτηση σταθερότητας για ορμή, και

L = μήκος σταθερότητας Monin-Obukhov.

Το L εκτιμάτε ταξινομώντας τα ωριαία τοπικά μετεωρολογικά δεδομένα σε τάξεις ευστάθειας χρησιμοποιώντας τάξεις Turner (Panofsky και Dutton 1984) και στη συνέχεια υπολογίζοντας το $1/L$ ως συνάρτηση της τάξης σταθερότητας και του z_0 (Zannetti 1990). Ο όρος " L " αναφέρεται στο μήκος της σταθερότητας Monin-Obukhov στην ατμόσφαιρα. Αυτό το μήκος είναι ένας σημαντικός παράγοντας στη

μετεωρολογία και την ατμοσφαιρική επιστήμη καθώς περιγράφει το μήκος της επιφάνειας ενός εδάφους ή άλλου επιφανειακού στρώματος που επηρεάζεται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Η τιμή του L μπορεί να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας τάξεις σταθερότητας Turner.

Οι τάξεις σταθερότητας Turner, που εισήχθησαν από τους Panofsky και Dutton το 1984, χρησιμοποιούνται για την κατηγοριοποίηση των ωριαίων τοπικών μετεωρολογικών δεδομένων σε διαφορετικές κλάσεις σταθερότητας, λαμβάνοντας υπόψη τη θερμοκρασία, την υγρασία, την ταχύτητα του ανέμου και άλλες μετεωρολογικές παραμέτρους.

Έπειτα, το $1/L$ υπολογίζεται ως συνάρτηση της τάξης σταθερότητας και του z_0 μηκος τραχύτητας, το οποίο αντιπροσωπεύει το ύψος της τριβής. Η συνάρτηση $1/L$ είναι σημαντική για την περιγραφή της ατμοσφαιρικής ροής και των μετεωρολογικών φαινομένων. Το z_0 είναι η μέση τιμή του ύψους της τριβής, το οποίο μπορεί να προσδιοριστεί ανάλογα με το περιβάλλον και τις συνθήκες της μελέτης.

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε διαθέσιμα ωριαία μετεωρολογικά δεδομένα από έναν μετεωρολογικό σταθμό σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία. Αυτά τα δεδομένα περιλαμβάνουν τη θερμοκρασία του αέρα, τη σχετική υγρασία, την ταχύτητα του ανέμου και την κατεύθυνσή του, καθώς και την ατμοσφαιρική πίεση.

Αρχικά, θα χρησιμοποιήσουμε τα δεδομένα αυτά για να κατατάξουμε τις ωριαίες μετρήσεις σε διάφορες τάξεις σταθερότητας Turner, από την A έως την F, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του Panofsky και του Dutton.

Έπειτα, με βάση τις τάξεις σταθερότητας που προέκυψαν, θα υπολογίσουμε το $1/L$ χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες σχέσεις που δίνονται στη βιβλιογραφία, λαμβάνοντας υπόψη το z_0 , το ύψος της τριβής, το οποίο μπορεί να εκτιμηθεί ανάλογα με το περιβάλλον και τις συνθήκες της μελέτης.

Τέλος, το $1/L$ που θα υπολογιστεί θα μας δώσει μια εκτίμηση του μήκους της σταθερότητας Monin-Obukhov στην ατμόσφαιρα για τις συγκεκριμένες μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν στην τοποθεσία του μετεωρολογικού σταθμού

▪ **Όταν $L = 0$**

Για την ουδέτερη ατμόσφαιρα, το u^* υπολογίζεται ως:

$$u^* = k \cdot u(z-d) / \ln(z-d/z_0)$$

Όπου k = σταθερά von Karman (=0,41)

$u(z)$ = Μέση ταχύτητα ανέμου στο ύψος z (m s⁻¹)

z = Ύψος μετεωρολογικού σταθμού (m)

d = Ύψος μετατόπισης (m)

z_0 = Μήκος τραχύτητας (m)

u^* = Ταχύτητα τριβής (ms⁻¹)

▪ **Όταν $L < 0$ (ασταθής) (vanUldenandHoltslag 1985):**

$$u^* = k \cdot u(z-d) / (\ln(z-d/z_0) - \psi M(z-d/L) + \psi M(z_0/L))$$

$$\Psi_M = 2 \ln[0.5(1+X)] + \ln[0.5(1+X^2)] - 2 \tan^{-1}(X) + 0.5\pi$$

Όπου $X = (1 - 28 z L^{-1})^{0.25}$ (Dyer and Bradley 1982).

L : Μήκος σταθερότητας Monin-Obuhkov

u^* = Ταχύτητα τριβής (ms⁻¹)

z_0 = Μήκος τραχύτητας

$u(z)$ = Μέση ταχύτητα ανέμου στο ύψος z (ms⁻¹)

▪ **$L > 0$ (σταθερές)**

$$u_* = C_{DN} \cdot u(z) \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 - \left(\frac{2u_o}{\sqrt{C_{DN}} \cdot u(z)} \right)^2} \right]$$

Όπου $C_{DN} = k (\ln(z/z_0))^{-1}$

C_{DN} = Ουδέτερος συντελεστής (χωρίς διάσταση)

u^* = Ταχύτητα τριβής (ms⁻¹)

$u(z)$ = Μέση ταχύτητα ανέμου σε ύψος z (m s⁻¹)

u_o = Ταχύτητα καθίζησης που επηρεάζεται από τη θερμοκρασία, που ορίζεται παρακάτω ($m s^{-1}$)

$$u_o = \sqrt{\frac{\beta_m z g \theta_*}{T}}$$

Όπου m = σταθερά χωρίς διάσταση (= 4,7)

g = Επιτάχυνση λόγω βαρύτητας (= $9,81 m s^{-2}$)

T = Θερμοκρασία αέρα (K)

$\theta_* = 0,09 (1 - 0,5 N^2)$

N = κλάσμα αδιαφανούς νεφοκάλυψης

Για πραγματική αξία για το u^* , πρέπει να ισχύει η ακόλουθη συνθήκη

$$2u_o / \sqrt{C_{DN}} \cdot u(z) \leq 1$$

Διαφορετικά, η ταχύτητα τριβής (u^*) υπολογίζεται ως (US EPA 1995):

$$u_* = u_{*cr} \frac{u(z)}{u_{cr}}$$

$u(z)$ = Μέση ταχύτητα ανέμου στο ύψος z ($m s^{-1}$)

και το u_{cr} και το u_{*cr} υπολογίζονται ως (US EPA 1995):

$$u_{cr} = \sqrt{\frac{4}{C_{DN}}} u_o$$

$$u_{*cr} = \frac{C_{DN} u_{cr}}{2}$$

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ R_b

$$R_b = 2(S_c)^{2/3} (Pr)^{-2/3} (k^* u^*)^{-1} \quad (4)$$

Όπου S_c = αριθμός Schmidt για $O_3=1$, $CO=0.76$ $SO_2=1.15$ και $NO_2=0.98$ και

Pr είναι ο αριθμός Prandtl=0.72

$k=0.40$.

Οι ωριαίες αντιστάσεις κόμης του δέντρου για O_3 , SO_2 και NO_2 υπολογίστηκαν με βάση ένα τροποποιημένο υβρίδιο μοντέλων εναπόθεσης με μεγάλα φύλλα και πολλαπλών στρωμάτων (Baldocchi et al. 1987; Baldocchi 1988).

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΘΟΛΟΥ (Rc)

Η αντίσταση του θόλου έχει τρία συστατικά: στοματική αντίσταση (r_s), αντίσταση μεσοφύλλης (r_m) και αντίσταση επιδερμίδας (r_t),:

$$1/R_c = 1/(r_s + r_m) + 1/r_t \quad (5)$$

όπου r_s = Στοματική αντίσταση, η οποία υπολογίζεται ως το αντίστροφο της αγωγιμότητας

r_m = Αντοχή στη μεσοφύλλη

r_t = Επιδερμидική αντίσταση

Στοματική Αντίσταση (r_s):

- Μπορεί να υπολογιστεί ως το αντίστροφο της στοματικής αγωγιμότητας, η οποία μπορεί να μετρηθεί ή να υπολογιστεί πειραματικά.
- Σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εκτίμηση μέσω αναφορών ή προηγούμενων ερευνών που ασχολούνται με παρόμοια συστήματα.

Αντίσταση στη Μεσοφύλλη (r_m):

- Αυτή η αντίσταση εξαρτάται από την επιλεγμένη μέθοδο μεταφοράς ουσιών μέσα στον μεσοφύλλη.
- Ορισμένοι παράγοντες που επηρεάζουν την αντίσταση συμπεριλαμβάνουν το μέγεθος των σωματιδίων, την ιδιοστατική πίεση, και την κυκλοφορία του νερού στον μεσοφύλλη.

Επιδερμидική Αντίσταση (r_t):

- Αυτή η αντίσταση εξαρτάται από τη φύση του υλικού και την ατμοσφαιρική συνθήκη της επιφάνειας.
- Μπορεί να υπολογιστεί μέσω μοντέλων που περιγράφουν τη μεταφορά των ουσιών από την επιφάνεια στην ατμόσφαιρα.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΟΜΗΣ ΓΙΑ CO

Καθώς η απομάκρυνση του CO από τη βλάστηση δεν σχετίζεται άμεσα με τη διαπνοή, η αντίσταση κόμης για το CO σε περιόδους εντός των φύλλων ($R_{c,InLeaf}$) ορίζεται σε μια σταθερά με βάση τα δεδομένα από τους Bidwell και Fraser (1972).

$$R_{c,InLeaf} = 50.000 \text{ (sm}^{-1}\text{)}$$

Η αντίσταση του θόλου(κόμης) για το CO σε περιόδους εκτός φύλλου ($R_{c,OutLeaf}$) ορίζεται σε μια σταθερά με βάση τα δεδομένα των Bidwell και Fraser (1972).

$$R_{c,OutLeaf}=1.000.000 \text{ (sm}^{-1}\text{)}$$

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΟΜΗΣ ΓΙΑ NO₂, O₃ ΚΑΙ SO₂

Οι αντιστάσεις θόλου για NO₂, O₃ και SO₂ (R_c) μπορούν να υπολογιστούν ως

$$1/R_c=1/(r_s+r_m+1r_{soil}+1r_t)$$

όπου

r_s = Στοματική αντίσταση, η οποία υπολογίζεται ως το αντίστροφο της αγωγιμότητας

r_m = Αντοχή στη μεσοφύλλη

r_{soil} = Αντοχή εδάφους (= 2941 sm⁻¹ στην καλλιεργητική περίοδο, = 2000 sm⁻¹ διαφορετικά)

r_t = Επιδερμική αντίσταση

Parameter	NO ₂	O ₃	SO ₂	CO
r _m	100 (s m ⁻¹)	10 (s m ⁻¹)	0 (s m ⁻¹)	50,000 (in-leaf season) 1,000,000 (out-leaf season)
	(Hosker and Lindberg 1982)	(Hosker and Lindberg 1982)	(Wesely 1989)	(Bidwell and Fraser 1972).
r _t	20,000 (s m ⁻¹)	10,000 (s m ⁻¹)	8,000 (s m ⁻¹)	
	(Wesely 1989)	(Taylor et al. 1988, Lovett 1994)	(Taylor et al. 1988, Lovett 1994)	

ΣΤΟΜΑΤΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΓΙΑ ΗΛΙΟΛΟΥΣΤΑ/ΣΚΙΑΣΜΕΝΑ ΦΥΛΛΑ ΣΕ ΚΑΘΕ ΣΤΡΩΣΗ

Αυτή η διαδικασία βασίζεται σε μεθόδους που εξηγούνται στους Farquharetal. (1980), Baldochi (1994) και Harleyetal. (1992). Η στοματική αγωγιμότητα g_s για κάθε στρώμα του θόλου μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$g_s=mArhC_s+b'$$

όπου

m = Κλίση χωρίς διαστάσεις (= 10)

A = Φωτοσυνθετική πυκνότητα ροής φύλλου

rh = Σχετική υγρασία

$b' =$ Μηδενική τομή όταν το A είναι ίσο ή μικρότερο από μηδέν ($= 0,02 \text{ molm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

C_s = συγκέντρωση CO_2 στην επιφάνεια του φύλλου

Το A αντιπροσωπεύεται ως:

$$A = V_c - 0,5V_o - R_d$$

V_c = Ρυθμός καρβοξυλίωσης της ανταλλαγής CO_2 μεταξύ φύλλου και ατμόσφαιρας

V_o = Ρυθμός οξυγόνωσης της ανταλλαγής CO_2 μεταξύ φύλλου και ατμόσφαιρας

R_d = Σκοτεινός ρυθμός αναπνοής ανταλλαγής CO_2 μεταξύ φύλλου και ατμόσφαιρας

Ο ρυθμός σκοτεινής αναπνοής της ανταλλαγής CO_2 μεταξύ φύλλου και ατμόσφαιρας, το R_d μπορεί να υπολογιστεί ως

$$R_d = V_c(25^\circ\text{C}) \cdot 0,015 \exp[(T-298)E/298RT] / (1 + \exp[1.3(T-328)])$$

- $V_c(25^\circ\text{C})=90$ (ρυθμός καρβοξυλίωσης της ανταλλαγής CO_2 μεταξύ φύλλου και ατμόσφαιρας)
- E (σχετική ενέργεια ενεργοποίησης)
- R (καθολική σταθερά αερίου)
- T (απόλυτη θερμοκρασία φύλλου)
- Ο όρος $c o V - 0,5V$ εκφράζεται από τον Baldocchi (1994) ως

$$V_c - 0,5V_o = \min(W_c, W_j) (1 - \Gamma/C_i)$$

Οπου W_c = Ρυθμός καρβοξυλίωσης όταν διφωσφορική ριβουλόζη (RuBP) καρβοξυλάση/οξυγενάση είναι κορεσμένη

W_j = Ρυθμός καρβοξυλίωσης όταν η αναγέννηση του RuBP περιορίζεται από τη μεταφορά ηλεκτρονίων

$\min(W_c, W_j)$ = Ελάχιστη τιμή μεταξύ αυτών των δύο μεταβλητών ρυθμού

- Γ (σημείο αντιστάθμισης CO_2 απουσία σκοτεινής αναπνοής)

$$\Gamma = 0,105 \cdot K_c \cdot [O_2] / K_o$$

K_c = Συντελεστές Michaelis-Menten για CO_2 ($= 333 \text{ microbars}$ στους 25°C)

K_o = Συντελεστές Michaelis-Menten για O_2 ($= 295 \text{ millibar}$ στους 25°C)

$[O_2]$ = Μερικές πιέσεις O_2 στον μεσοκυττάριο εναέριο χώρο ($= 210 \mu\text{mol/mol}$)

- C_i (εσωτερική συγκέντρωση CO_2) Η εσωτερική συγκέντρωση CO_2 μπορεί να εκφραστεί ως

$$C_i = C_s - A/g_s$$

- C_s (συγκέντρωση CO_2 στην επιφάνεια του φύλλου)

$$C_s = C_a - A/g_b$$

- Ca (συγκέντρωση CO_2 της ατμόσφαιρας) (= 360 ppm)
- gb (αγωγιμότητα κατά μήκος του στρωτού οριακού στρώματος ενός φύλλου ενός φύλλου ($mol\ m^{-2}\ s^{-1}$) για ανταλλαγή CO_2)

$$gb=1/(Ra+Rb,co_2)$$

- $Vc-0,5Vo=aCi-adeCi+b$

εκφράζει τη σχέση μεταξύ του ρυθμού καρβοξυλίωσης Vc και του ρυθμού αναγέννησης Vo όταν η εσωτερική συγκέντρωση Ci του διοξειδίου του άνθρακα είναι γνωστή. Οι σταθερές a και b προκύπτουν από πειραματικά δεδομένα ή μοντέλα.

a αντιπροσωπεύει το προσδιορισμένο συντελεστή της καθαρής καρβοξυλίωσης

ade αντιπροσωπεύει το προσδιορισμένο συντελεστή της καθαρής αναγέννησης

b αντιπροσωπεύει τη σταθερά από το μοντέλο που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του Vc και του Vo

Οι σταθερές a και b μπορεί να υπολογιστούν από πειραματικά δεδομένα ή μπορεί να προκύψουν από προηγούμενες μελέτες. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η εξίσωση αυτή χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του Vc και του Vo όταν η εσωτερική συγκέντρωση Ci του διοξειδίου του άνθρακα είναι γνωστή. Τα Vc και Vo είναι σημαντικοί παράγοντες στη μελέτη της φωτοσύνθεσης και της αναπνοής των φυτών.

Το Rd αναφέρεται στον ρυθμό ανάπνευσης του φύλλου.

Για να υπολογιστεί Rd , πρέπει να γνωρίζουμε τις τιμές των μεταβλητών Γ , E , R , T , c , Vo , Γ , Ci , Cs , Ca και gb για το συγκεκριμένο φυτό ή τη συγκεκριμένη φυτική καλλιέργεια της οποίας μελετάμε τον ρυθμό ανάπνευσης. Αυτές οι τιμές θα μπορούσαν να προέλθουν από πειραματικά δεδομένα ή από προηγούμενες μελέτες για παρόμοια φυτά ή καλλιέργειες.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΑΕΡΑ

Ωριαία βελτίωση της ποιότητας του αέρα ανά μονάδα κάλυψης δέντρων λόγω της ξηρής εναπόθεσης ατμοσφαιρικών ρύπων, η μονάδα I_{unit} (%) υπολογίζεται ως:

$$I_{unit}=F/(F+M_{total}\cdot 100)$$

F = Ροή ρύπων ($g\ m^{-2}\ h^{-1}$)

M_{total} = Συνολική μάζα ατμοσφαιρικών ρύπων ανά μονάδα κάλυψης δέντρων ($g\ m^{-2}\ h^{-1}$)

$$M_{total} = H \cdot C$$

που

H = Ύψος αστικής ανάμειξης (m),

C = Συγκέντρωση ατμοσφαιρικών ρύπων ($g\ m^{-3}\ h^{-1}$)

T_c = Συνολική δενδροκάλυψη στην πόλη (%)

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΡΥΠΩΝ

Η μεταβολή στη συγκέντρωση των ατμοσφαιρικών ρύπων μπορεί να υπολογιστεί ως $\Delta C = C / (1 - I_{total}/100) - C$

όπου

ΔC = Μεταβολή συγκέντρωσης ατμοσφαιρικών ρύπων (ppm για CO, NO₂, SO₂ και O₃ και $\mu g\ m^{-3}$ για PM₁₀)

C = Συγκέντρωση ατμοσφαιρικών ρύπων (ppm για CO, NO₂, SO₂ και O₃ και $\mu g\ m^{-3}$ για PM₁₀)

$$E = R(R + A)^{-1}$$

όπου E = σχετική μείωση της επίδρασης (%).

R = ποσότητα που αφαιρέθηκε από δέντρα (kg).

A = ποσό ρύπανση της ατμόσφαιρας (kg).

Η ικανότητα μεμονωμένων δέντρων να απομακρύνουν τους ρύπους για κάθε κατηγορία διαμέτρου χρησιμοποιείται ο τύπος (Nowak 1994c)

$$I_x = R_t (LA_x / LA_t) / N_x$$

όπου I_x = απομάκρυνση της ρύπανσης από μεμονωμένα δέντρα κατηγορίας διαμέτρου x (kg/δέντρο)

R_t = συνολική ρύπανση αφαιρέθηκε για όλες τις κατηγορίες διαμέτρου (kg).

LA_x = συνολική επιφάνεια φύλλων σε τάξη διαμέτρου x (m²).

LA_t = σύνολο επιφάνειας φύλλων όλων των κατηγοριών διαμέτρου (m²). και

N_x = αριθμός δέντρων στην κατηγορία διαμέτρου x .

Ο τύπος αποδίδει μια εκτίμηση της απομάκρυνσης της ρύπανσης από μεμονωμένα δέντρα με βάση το φύλλο

Στατιστικές Δοκιμές Σύγκρισης Τιμών Ισοτόπων και Στοιχειακής Σύνθεσης

Δοκιμή t-test ή Wilcoxon για τη σύγκριση των διαφορών στις τιμές των ισοτόπων και τη στοιχειακή σύνθεση μεταξύ των δύο τύπων πράσινης γης.

Πολλαπλές συγκρίσεις μεταξύ ειδών δέντρων:

Κατασκευή πολλών γραμμικών μοντέλων μικτών επιδράσεων για την επίδραση διαφορετικών πειραματικών παραγόντων στις τιμές των ισοτόπων. Δοκιμές ανά ζεύγη για αξιολόγηση της σημασίας των διαφορών στις τιμές των ισοτόπων και τη στοιχειακή σύνθεση μεταξύ των ειδών δέντρων μεταξύ των τύπων τοποθεσιών δειγματοληψίας.

Προσαρμογή τιμών p από πολλαπλές συγκρίσεις χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Bonferroni για τον έλεγχο ποσοστού σφάλματος.

Ανάλυση Αβεβαιότητας -Δοκιμή υπόθεσης Point-in-Polygon: Προσομοίωση Μίξης Πολυγώνων προσομοίωση Monte Carlo -Εκτίμηση πηγών αζώτου με χρήση μοντέλου SIAR

Μοντέλο SIAR (Stable Isotope Analysis in R)

Αυτές οι μέθοδοι χρησιμοποιήθηκαν για την παροχή πληροφοριών σχετικά με τις σχέσεις μεταξύ των αστικών δέντρων, της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και των περιβαλλοντικών παραγόντων.

Αρχικά, εκκινείται ο αλγόριθμος και εισάγονται δεδομένα εισόδου και εξόδου. Τα δεδομένα στη συνέχεια χωρίζονται σε σύνολα εκπαίδευσης και δοκιμών-επικύρωσης (80/20 split) και προεπεξεργασμένο με χρήση κανονικοποίησης και αυτόνομης τεχνικής ανίχνευσης ανωμαλιών. Ο συνολικός αριθμός των πιθανών εισροών συνδυασμοί υπολογίζονται χρησιμοποιώντας την εξίσωση

$$C(n,k)=k!(n-k)!n!$$

Όπου **n!** (που διαβάζεται ως "n factorial") αντιπροσωπεύει το γινόμενο όλων των θετικών ακεραιών αριθμών από το 1 έως το n

k! (που διαβάζεται ως "k factorial") αντιπροσωπεύει το γινόμενο όλων των θετικών ακεραιών αριθμών από το 1 έως το k.

$(n-k)!$ αντιπροσωπεύει το γινόμενο όλων των θετικών ακεραίων αριθμών από το 1 έως το $(n - k)$.

4.7 Δημιουργία Μοντέλου

Η δημιουργία ενός μοντέλου για την εκτίμηση της ποσότητας των ρύπων που δεσμεύονται από τα δέντρα προϋποθέτει την εξέταση διαφόρων παραγόντων που επηρεάζουν την πρόσληψη ρύπων από τη βλάστηση.:

Δεδομένα Εισόδου:

➤ Χαρακτηριστικά δέντρων:

1. Είδος δέντρου: Διαφορετικά είδη έχουν διαφορετική ικανότητα απορρόφησης ρύπων.
2. Μέγεθος του δέντρου: Η διάμετρος στο ύψος του στήθους (DBH) ή το μέγεθος της κόμης, επηρεάζει τη συνολική επιφάνεια των φύλλων που είναι διαθέσιμη για απορρόφηση.
3. Χαρακτηριστικά των φύλλων: Η επιφάνεια, η πυκνότητα και η μορφολογία επηρεάζουν τη δέσμευση ρύπων.

➤ Περιβαλλοντικοί παράγοντες:

1. Θερμοκρασία: Οι υψηλότερες θερμοκρασίες μπορούν να αυξήσουν το ρυθμό απορρόφησης ρύπων.
2. Υγρασία: Τα υψηλότερα επίπεδα υγρασίας μπορούν να ενισχύσουν την απορρόφηση των ρύπων.
3. Ταχύτητα και κατεύθυνση του ανέμου: Επηρεάζουν τη διασπορά και την εναπόθεση των ρύπων στα φύλλα.

➤ Συγκεντρώσεις ρύπων:

1. Αρχικές συγκεντρώσεις ρύπων (π.χ. PM₁₀, SO_x, όζον) στον αέρα πριν από την αλληλεπίδραση με τα δέντρα
2. Συγκεντρώσεις ρύπων υποβάθρου στην περιοχή.

➤ Γεωγραφικοί παράγοντες:

1. Τοποθεσία: Γεωγραφικό πλάτος, γεωγραφικό μήκος, υψόμετρο, τα οποία επηρεάζουν τις κλιματικές συνθήκες και την κατανομή των ειδών.
2. Αστικό έναντι αγροτικού περιβάλλοντος: Οι αστικές περιοχές έχουν γενικά υψηλότερες συγκεντρώσεις ρύπων.

Δεδομένα εξόδου

1. Πρόσληψη ρύπων: PM10, SO_x, όζοντος που απορροφούνται από τα δέντρα σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο.
2. Αποδοτικότητα απομάκρυνσης ρύπων: Ποσοστό των ρύπων που απομακρύνονται από τον αέρα.

Για τη δημιουργία του αλγορίθμου

1. Συλλογή δεδομένων: Περιβαλλοντικοί παράγοντες (θερμοκρασία, υγρασία, άνεμος), συγκεντρώσεις ρύπων και γεωγραφικοί παράγοντες.
2. Προεπεξεργασία: Κανονικοποίηση δεδομένων εισόδου και χειρισμός ελλειπών τιμών.
3. Μηχανική χαρακτηριστικών: Παραγωγή πρόσθετων χαρακτηριστικών, εάν είναι απαραίτητο (π.χ. επιφάνεια φύλλων με βάση το μέγεθος του δέντρου).
4. Επιλογή μοντέλου: κατάλληλο μοντέλο μηχανικής μάθησης (π.χ. , regression, decision tree, random forest) με βάση τη φύση του προβλήματος και τα διαθέσιμα δεδομένα.
5. Εκπαίδευση μοντέλου: Διαχωρισμός των δεδομένων σε σύνολα εκπαίδευσης και επικύρωσης.
6. Εκπαίδευση του μοντέλου χρησιμοποιώντας τα δεδομένα εκπαίδευσης.
7. Αξιολόγηση μοντέλου χρησιμοποιώντας το σύνολο επικύρωσης.
8. Προσαρμογή των υπερπαραμέτρων εάν είναι απαραίτητο για τη βελτίωση της απόδοσης
9. Πρόβλεψη Χρησιμοποίηση του εκπαιδευμένου μοντέλου για να προβλέψει την απορρόφηση ρύπων από τα δέντρα με βάση τις παραμέτρους εισόδου
10. Μετα-επεξεργασία: Ερμηνεία των αποτελεσμάτων και αξιολόγηση της αξιοπιστίας των προβλέψεων
11. Τελειοποίηση το μοντέλο, εάν απαιτείται, με βάση τις παρατηρήσεις του πραγματικού κόσμου.

12. Ανάπτυξη: Ανάπτυξη του μοντέλου για προβλέψεις σε πραγματικό χρόνο ή παρτίδες, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η επεκτασιμότητα και οι υπολογιστικοί πόροι.
13. Παρακολούθηση και συντήρηση: Παρακολούθηση των επιδόσεων συνεχώς του μοντέλου και να το ενημέρωση με νέα δεδομένα, εάν χρειάζεται.
14. Εκπαίδευση περιοδικά του μοντέλου για να λαμβάνει υπόψη τις αλλαγές στις περιβαλλοντικές συνθήκες ή στα χαρακτηριστικά των δέντρων.

Πιο συγκεκριμένα

1. Input Parameters:

- Τα χαρακτηριστικά των δέντρων
 - Leaf area index (LAI)
 - Canopy coverage (m^2)
- Μετεωρολογικά δεδομένα
 - Mean windspeed (u ; m/s)
 - Friction velocity (u^* ; m/s)
 - Air temperature (T ; Kelvin)
 - Cloud cover fraction (N)
- Συγκεντρώσεις ρύπων :
 - PM10 concentration ($\mu g/m^3$)
 - SOx concentration (ppm or $\mu g/m^3$)
 - Ozone concentration (ppm or $\mu g/m^3$)

2. Intermediate Calculations:

- Υπολογισμός του (V_d) χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις
- Calculate the pollutant flux (F) χρησιμοποιώντας την εξίσωση

3. Output:

- Το συνολικό ποσό δέσμευσης των ρύπων από τα δέντρα , ξεχωριστά για κάθε ρυπο (PM10, SOx, ozone,CO) για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο (ωριαία ή ημερήσια).

4. Algorithm:

- Συλλογή των δεδομένων για τα χαρακτηριστικά του κάθε δέντρου (LAI, canopycoverage) και των μετεωρολογικών δεδομένων (meanwindspeed, frictionvelocity, airtemperature, cloudcoverfraction).
- Συλλογή των συγκεντρώσεων των ρύπων (PM10, SOx, ozone,CO) από σταθμούς
- Υπολογισμός του (Vd).
- Υπολογισμός του pollutantflux (F) χρησιμοποιώντας το (Vd) την συγκέντρωση των ρύπων (C) για κάθε ρύπο ξεχωριστά
- Άθροιση των τιμών ροών των ρύπων για τη συνολική ποσότητα ρύπων που δεσμεύονται από τα δέντρα για κάθε ρύπο.

Επισημάνσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι αρχικά οι μονάδες όλων των παραμέτρων να είναι ίδιοι σε όλους τους υπολογισμούς κα να ληφθούν υπόψη ο εποχιακές διακυμάνσεις στα χαρακτηριστικά των δέντρων και των μετεωρολογικών συνθηκών .

Βιβλιογραφία

- 1) Bergman, Richard & Puettmann, Maureen & Taylor, Adam & Skog, Kenneth. (2014). The Carbon Impacts of Wood Products. Forest Products Journal. 64. 220–231. 10.13073/FPJ-D-14-00047.
- 2) Pingoud, K., Perälä, A., & Pussinen, A. (2001). Carbon dynamics in wood products. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 6, 91-111. <https://doi.org/10.1023/A:1011353806845>.
- 3) Kutnar, A., & Hill, C. (2014). Assessment of Carbon Footprinting in the Wood Industry. , 135-172. https://doi.org/10.1007/978-981-4585-75-0_6.
- 4) Sedjo, R. (2002). Wood materials used as a means to reduce greenhouse gases (GHGs): An examination of wooden utility poles. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 7, 191-200. <https://doi.org/10.1023/A:1022833227481>.
- 5) Karjalainen, Timo & Kellomäki, Seppo & Pussinen, Ari. (1994). Role of wood-based products in absorbing atmospheric carbon. Silva Fennica. 1994. 28(2): 67–80.. 28. 10.14214/sf.a9163.
- 6) Iordan, C., Hu, X., Arvesen, A., Kauppi, P., & Cherubini, F. (2018). Contribution of forest wood products to negative emissions: historical comparative analysis from 1960 to 2015 in Norway, Sweden and Finland. Carbon Balance and Management, 13. <https://doi.org/10.1186/s13021-018-0101-9>.
- 7) Profft, I., Mund, M., Weber, G., Weller, E., & Schulze, E. (2009). Forest management and carbon sequestration in wood products. European Journal of Forest Research, 128, 399-413. <https://doi.org/10.1007/s10342-009-0283-5>.

- 8) Geng, A., Yang, H., Chen, J., & Hong, Y. (2017). Review of carbon storage function of harvested wood products and the potential of wood substitution in greenhouse gas mitigation. *Forest Policy and Economics*, 85, 192-200. <https://doi.org/10.1016/J.FORPOL.2017.08.007>.
- 9) Bais-Moleman, A., Sikkema, R., Vis, M., Reumerman, P., Theurl, M., Theurl, M., & Erb, K. (2018). Assessing wood use efficiency and greenhouse gas emissions of wood product cascading in the European Union. *Journal of Cleaner Production*, 172, 3942-3954. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.04.153>.
- 10) Wang, B., Lee, X., Theng, B. K. G., Zhang, L., Cheng, H., Cheng, J., & Lyu, W. (2019). Biochar addition can reduce NO_x gas emissions from a calcareous soil. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 31(1), 38–48. <https://doi.org/10.1080/09542299.2018.1544035>
- 11) Knauf, M., Köhl, M., Mues, V. *et al.* Modeling the CO₂-effects of forest management and wood usage on a regional basis. *Carbon Balance Manage* **10**, 13 (2015). <https://doi.org/10.1186/s13021-015-0024-7>
- 12) Tadakatsu Yoneyama, Akira Hashimoto & Tsumugu Totsuka (1980) Absorption of atmospheric NO₂ by plants and soils, *Soil Science and Plant Nutrition*, 26:1, 1-7, DOI: 10.1080/00380768.1980.10433207
- 13) Wellburn, A.R. (2002). NO₂, NO and HNO₃ Uptake by Trees. In: Gasche, R., Papen, H., Rennenberg, H. (eds) *Trace Gas Exchange in Forest Ecosystems. Tree Physiology*, vol 3. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9856-9_2
- 14) Jensen, K.F. and Kozłowski, T.T. (1975), Absorption and Translocation of Sulfur Dioxide by Seedlings of Four Forest Tree Species[†]. *Journal of*

382. <https://doi.org/10.2134/jeq1975.00472425000400030021x>

- 15) Murphy, C.E., Jr., Sinclair, T.R. and Knoerr, K.R. (1977), An Assessment of the Use of Forests as Sinks for the Removal of Atmospheric Sulfur Dioxide[†]. Journal of Environmental Quality, 6: 388-396. <https://doi.org/10.2134/jeq1977.00472425000600040012x>

- 16) Willy Maenhaut, Reinhilde Vermeulen, Magda Claeys, Jordy Vercauteren, Edward Roekens, Sources of the PM10 aerosol in Flanders, Belgium, and re-assessment of the contribution from wood burning, Science of The Total Environment, Volume 562, 2016, Pages 550-560, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.074>.

