

ΤΟ ΔΑΣΟΣ

Μια Ολοκληρωμένη Προσέγγιση

Επιμέλεια: Αριστοτέλης Χ. Παπαγεωργίου, Γεώργιος Καρέτσος,
Γεώργιος Κατσαδωράκης

Επιστημονική Επιμέλεια Έκδοσης: Αριστοτέλης Χ. Παπαγεωργίου,
Γεώργιος Καρέτσος, Γεώργιος Κατσαδωράκης

Συντονισμός Έκδοσης: Ευαγγελία Κορακάκη, Ηλίας Τζηρίτης

Γλωσσική Επιμέλεια: Αριάδνη Χατζηανδρέου

Φωτογραφία εξώφυλλου: © WWF Ελλάς/Andrea Bonetti

Σχεδιασμός-Παραγωγή: ΚΕΘΕΑ Σχήμα-Χρώμα

ISBN: 978-960-7506-28-3

Copyright: WWF Ελλάς

Προτεινόμενη αναφορά: Όνομα συγγραφέα-ων. 2012. Τίτλος κεφαλαίου.
Σελ. 000-000 στο Α.Χ. Παπαγεωργίου, Γ. Καρέτσος και Γ. Κατσαδωράκης
(επιμ. έκδοσης). Το δάσος: Μια ολοκληρωμένη προσέγγιση.
WWF Ελλάς, Αθήνα.

Το βιβλίο έχει τυπωθεί σε χαρτί Soporset Premium Offset/100 gr
πιστοποιημένο κατά FSC (Cert. no SW-COC-1783).

Διατίθεται δωρεάν και απαγορεύεται οποιαδήποτε εμπορική χρήση.

Η παρούσα έκδοση πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του προγράμματος
«Το Μέλλον των Δασών», με την συγχρηματοδότηση των κοινωφελών
ιδρυμάτων Ι.Σ. Λάτση, Α.Γ. Λεβέντη και Μποδοσάκη, καθώς και με την
υποστήριξη ιδιωτών.


Κοινωφελές Ίδρυμα
Ιωάννη Σ. Λάτση




ΙΔΡΥΜΑ ΜΠΟΔΟΣΑΚΗ

2. Δάση και κλιματική αλλαγή. Από τη βασική έρευνα στις διεθνείς πολιτικές αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής

Χαράλαμπος Πέτσικος

Η συνεχώς αυξανόμενη ανησυχία για την κλιματική αλλαγή έχει προκαλέσει κατά τις τελευταίες δεκαετίες την έντονη ερευνητική δραστηριότητα για τον κύκλο του άνθρακα και το ρόλο των δασών σε αυτόν. Η απορρόφηση και η αποθήκευση από τα δάση του 1/4 των ανθρωπογενών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου αποτελεί μια πολύ σημαντική συνεισφορά στη ρύθμιση του παγκόσμιου κλίματος και την πιο πρόσφατα αναγνωρισμένη υπηρεσία που προσφέρουν τα δάση. Η μελέτη των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των δασών, της σύνθεσης της ατμόσφαιρας και του κλίματος είναι σημαντική για την κατανόηση και την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Στο κεφάλαιο αυτό συνοψίζονται τα ευρήματα για το ρόλο των δασών στον παγκόσμιο κύκλο του άνθρακα, περιγράφονται οι ροές και οι αποθήκες άνθρακα στα δάση και εξετάζονται οι παράγοντες που επηρεάζουν το ισοζύγιο άνθρακα στο δασικό οικοσύστημα. Η αναγκαιότητα για μετριασμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, καθώς και η δυνατότητα των δασών να δεσμεύουν και να αποθηκεύουν ατμοσφαιρικό άνθρακα, έχουν φέρει τη δασοπονία στο προσκήνιο των διεθνών διαπραγματεύσεων για την κλιματική αλλαγή. Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται οι πολιτικές αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής που σχετίζονται με τη δασοπονία και το πλαίσιο συμμετοχής των δασών στο Πρωτόκολλο του Κιότο και τη διεθνή αγορά άνθρακα. Εξετάζονται, επίσης, οι στρατηγικές μετριασμού στον δασικό τομέα και προτείνονται μέτρα προστασίας και αύξησης των αποθεμάτων άνθρακα στα δάση της Ελλάδας. Τέλος, περιγράφονται σε συντομία οι υποχρεώσεις των χωρών για τον υπολογισμό και την αναφορά των εκπομπών και απορροφήσεων αερίων του θερμοκηπίου, καθώς και η ελληνική απογραφή για τις «Χρήσεις Γης, Αλλαγές Χρήσεων Γης και Δασοπονία» (LULUCF).

***Λέξεις κλειδιά:** κλιματική αλλαγή, κύκλος του άνθρακα, δάση, χοάνη, πρωτόκολλο του Κιότο, LULUCF*

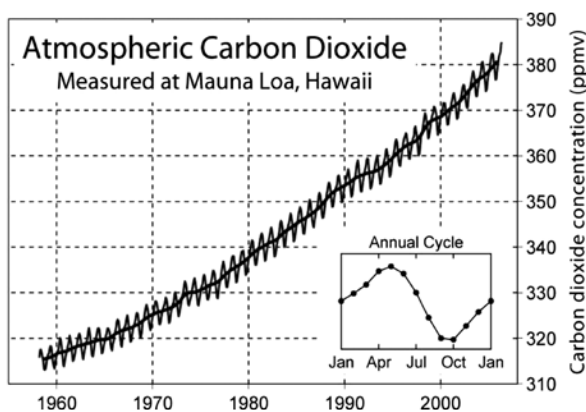
Κλιματική αλλαγή και κύκλος του άνθρακα

Το κλίμα της γης άλλαξε κατά τη διάρκεια του περασμένου αιώνα και θα συνεχίσει να αλλάζει σημαντικά στους επόμενους αιώνες. Τα τέσσερα μεγαλύτερα παγκοσμίως ερευνητικά κέντρα για το κλίμα συμφωνούν ότι τα δέκα θερμότερα έτη, από τα τέλη του 19ου αιώνα, έχουν καταγραφεί μετά το 1998 (NOAA 2011, NASA 2011, UK-MetOffice 2011, JMA 2011). Οι προβλέψεις για τα αποτελέσματα της κλιματικής αλλαγής είναι ιδιαίτερα ανησυχητικές και θεωρείται η μεγαλύτερη και σημαντικότερη απειλή για την ανθρωπότητα και για τον πλανήτη όπως τον ξέρουμε.

Η σημερινή κλιματική αλλαγή οφείλεται στην αύξηση της συγκέντρωσης των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, ως αποτέλεσμα ανθρωπίνων δραστηριοτήτων, όπως η καύση ορυκτών πόρων και η αποδάσωση (Solomon et al. 2007a, Matson et al. 2010, United States National Research Council 2008). Παρά τη σύγχυση που έχουν προσαπείσει να δημιουργήσουν ορισμένοι οικονομικοί και πολιτικοί κύκλοι σχετικά με τα ανθρωπογενή ή μη αίτια της κλιματικής αλλαγής, και με σκοπό την καθυστέρηση λήψης μέτρων (Monbiot 2009, Adam 2005), στην επιστημονική βιβλιογραφία υπάρχει συμφωνία στα συμπεράσματα αυτά. Τα ανθρωπογενή αίτια της κλιματικής αλλαγής, καθώς και η κρισιμότητα λήψης άμεσων μέτρων

μείωσης των εκπομπών έχουν αναγνωριστεί από τις Εθνικές Ακαδημίες Επιστημών των περισσότερων χωρών, ενώ δεν υπάρχει κανένας εθνικός ή διεθνής επιστημονικός φορέας που να τα αμφισβητεί (Oreskes 2004, Joint Science Academies' Statement 2010). Έχει ενδιαφέρον να αναφερθεί ότι η πρόβλεψη για την παγκόσμια θέρμανση που προκαλείται από την καύση ορυκτών πόρων και την εκπομπή CO₂ έχει διατυπωθεί ήδη από το 1896, από τον Σουηδό φυσικό S. Arrhenius (Arrhenius 1896). Ωστόσο, ήταν το 1988, μετά τη μεγάλη ξηρασία στη βόρεια Αμερική, όταν η ανακοίνωση των ευρημάτων της NASA για την παγκόσμια θέρμανση από τον J. Hansen στο κογκρέσο των ΗΠΑ προκάλεσε την έντονη ανησυχία της κοινής γνώμης και της επιστημονικής κοινότητας (McCright and Dunlap 2000).

Ο άνθρακας αποτελεί τη βάση της ζωής ως δομικό συστατικό όλων των ζωντανών οργανισμών, ως τροφή και ως ενέργεια. Είναι επίσης ο βασικότερος συντελεστής του φαινομένου του θερμοκηπίου και της κλιματικής αλλαγής. Το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) είναι το σημαντικότερο από τα αέρια του θερμοκηπίου, ενώ το μεθάνιο (CH₄) είναι επίσης ένας σημαντικός παράγοντας. Η συγκέντρωσή τους στην ατμόσφαιρα έχει αυξηθεί δραματικά, λόγω της ανθρώπινης παρέμβασης στον παγκόσμιο κύκλο του άνθρακα.



Σχήμα 1. Συγκέντρωση CO₂ (ppmv) στην ατμόσφαιρα από μετρήσεις στη Mauna Loa της Χαβάης (ετήσιοι και μηνιαίοι μέσοι όροι) (πηγή: Scripps Inst. Oceanography - NOAA ESRL/GMD <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends>. Πρόσβαση Ιούλιος 2012).

Ο κύκλος του άνθρακα είναι ένας φυσικός βιογεωχημικός κύκλος, όπου ο άνθρακας, με τη μορφή CO₂, μεταφέρεται από την ατμόσφαιρα στη γη και στους ωκεανούς, όπου παραμένει υπό άλλες μορφές πριν ξαναγυρίσει στην ατμόσφαιρα ως CO₂. Οι κύριες διεργασίες μεταφοράς του από την ατμόσφαιρα είναι η απορρόφηση από τα φυτά, μέσω της φωτοσύνθεσης, και η διάλυσή του στους ωκεανούς. Οι διεργασίες μέσω των οποίων επιστρέφει στην ατμόσφαιρα είναι η οξείδωση

της οργανικής ουσίας μέσω της αναπνοής ή της φωτιάς και η απελευθέρωσή του από σημεία των ωκεανών που η επιφάνειά τους είναι κορεσμένη σε CO₂. Κατά τη διάρκεια των 10.000 χρόνων, από το τέλος της τελευταίας παγετώδους περιόδου και μέχρι την αρχή της βιομηχανικής περιόδου, οι φυσικές πηγές CO₂ ήταν σε ισορροπία με τις φυσικές χοάνες – οι εκπομπές, δηλαδή, αντισταθμιζονταν από τις απορροφήσεις – με αποτέλεσμα η συγκέντρωσή του στην ατμόσφαιρα να παραμείνει σταθερή, μεταξύ 260 και 280 ppm κατά όγκο (Solomon et al. 2007b).

Το 1958 ο C. Keeling με την ομάδα του ξεκίνησε τις πρώτες μετρήσεις ατμοσφαιρικού CO₂ στην τοποθεσία Mauna Loa της Χαβάης. Οι μετρήσεις αυτές καταγράφουν τη μεγάλη αύξηση της συγκέντρωσης CO₂ στην ατμόσφαιρα, από 315 ppm το 1960 σε 390 ppm το 2010. Η κλασική, πλέον, «καμπύλη του Keeling» είναι σημαντική όχι μόνο για τη γρήγορη αύξηση που παρουσιάζει η συγκέντρωση του CO₂, αλλά και για την ένδειξη της χοάνης που καταγράφει (Σχήμα 1). Αντί η συγκέντρωση να αυξάνεται σταθερά, παρουσιάζει μια εποχιακή διακύμανση, καταγράφοντας μεγαλύτερες τιμές την άνοιξη και μικρότερες το φθινόπωρο. Αυτή η διαφορά οφείλεται στην εκτεταμένη απορρόφηση CO₂ κατά την αυξητική περίοδο των δασών του βορείου ημισφαιρίου – αφού το βόρειο ημισφαίριο έχει πολύ μεγαλύτερη δασοκάλυψη από το νότιο. Η καμπύλη αυτή δείχνει τη σημασία που έχουν τα δάση στον έλεγχο της συγκέντρωσης του CO₂, καθώς επίσης και ότι ο έλεγχος αυτός είναι περιορισμένος. Η διακύμανση είναι φανερή, αλλά ακόμα πιο φανερή είναι η αυξητική τάση στη συγκέντρωση του CO₂ – οι απορροφήσεις δεν αντισταθμίζουν πλέον τις εκπομπές.

Ανθρωπογενής διαταραχή στον κύκλο του άνθρακα

Ο κύκλος του άνθρακα έγινε αντικείμενο έντονης ερευνητικής δραστηριότητας, καθώς έγινε συνειδητό ότι οι ανθρωπογενείς εκπομπές CO₂ είναι αρκετά μεγάλες ώστε να ανατρέψουν την ισορροπία και να προκαλέσουν επικίνδυνη αύξηση της συγκέντρωσής του στην ατμόσφαιρα. Μέχρι τον 19ο αιώνα, οι ανθρωπογενείς εκπομπές CO₂ προέρχονταν κυρίως από την αποδάσωση στις εύκρατες περιοχές του πλανήτη (Ευρώπη και βόρεια Αμερική) και τη μετατροπή τους σε γεωργικές καλλιέργειες. Έκτοτε, το ισοζύγιο των εκπομπών άλλαξε, καθώς άρχισε η χρήση των ορυκτών καυσίμων, μειώθηκε η αποδάσωση στις εύκρατες περιοχές, αλλά αυξήθηκε η αποδάσωση στις τροπικές.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1990, οι γνώσεις μας για τον κύκλο του άνθρακα ήταν ελλιπείς. Παρά

τη βεβαιότητα ότι πρόκειται για έναν πρακτικά κλειστό κύκλο, αθροίζοντας τις υπολογισμένες ροές άνθρακα από και προς την ατμόσφαιρα, η ποσότητα άνθρακα που τελικά παρέμενε στην ατμόσφαιρα ήταν μικρότερη από ό,τι αναμενόταν. Συγκεκριμένα, αποδείχθηκε ότι οι ετήσιες εκπομπές άνθρακα από τις ανθρώπινες δραστηριότητες ήταν περισσότερες από το άθροισμα της ετήσιας αύξησης του CO₂ που μετρείται στην ατμόσφαιρα και αυτού που απορροφάται από τους ωκεανούς – διεργασίες και ροές οι οποίες είναι γνωστές και εκτιμούνται με σχετικά υψηλό βαθμό βεβαιότητας. Θεωρήθηκε, έτσι, ότι πρέπει να υπάρχει μια κρυφή χοάνη (the “missing sink” theory), της τάξης των 1-2 Gt άνθρακα. Η χοάνη αυτή θεωρήθηκε ότι βρίσκεται στη χερσαία βλάστηση (Tans et al. 1990, Gifford 1994, Fan et al. 1998).

Η έρευνα που ακολούθησε κατέδειξε ότι τις τελευταίες δεκαετίες έχει αναπτυχθεί μια χοάνη η οποία οφείλεται στην αυξημένη παραγωγικότητα των δασικών οικοσυστημάτων, ως συνέπεια τεσσάρων παραγόντων: 1) της αυξημένης συγκέντρωσης CO₂ στην ατμόσφαιρα, που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της φωτοσύνθεσης (CO₂ fertilisation effect), 2) της απόθεσης αζώτου στο έδαφος λόγω της αέριας ρύπανσης (N fertilisation), 3) της διεύρυνσης της αυξητικής περιόδου που οφείλεται στην κλιματική αλλαγή και 4) των ιστορικών πρακτικών διαχείρισης των δασών (αναγέννηση των δασών που υλοτομήθηκαν στα μέσα του 20ού αιώνα) (Schimel 1995, Myneni et al. 1997, Lloyd 1999, Schimel et al. 2000, Schimel et al. 2001, Hymus and Valentini 2007). Ωστόσο, το μέγεθος, η συνεισφορά και η χωρική κατανομή των διεργασιών αυτών παραμένουν σε μεγάλο βαθμό αβέ-

βαιες (Bellassen et al. 2011). Για παράδειγμα, στις ΗΠΑ, το ποσοστό της χοάνης άνθρακα που αποδίδεται στις αλλαγές στη χρήση και στη διαχείριση της γης μπορεί να είναι από 98% (Caspersen et al. 2000) μέχρι 40% (Schimel et al. 2001).

Σύμφωνα με τα τελευταία στοιχεία από το Global Carbon Project (Σχήμα 2), τη δεκαετία 2000-2009, οι μέσες ετήσιες εκπομπές CO₂ από την καύση ορυκτών πόρων και την παραγωγή τσιμέντου ήταν 7,7±0,5 Gt C y⁻¹ και από την αποδάσωση 1,1±0,7 Gt C y⁻¹. Από αυτές, οι μισές περίπου παρέμειναν στην ατμόσφαιρα (4,1±0,1 Gt C y⁻¹, 47%), ενώ οι υπόλοιπες απορροφήθηκαν από τα δάση (2,4 Gt C y⁻¹, 27%) και τους ωκεανούς (2,3±0,4 Gt C y⁻¹, 26%) (Global Carbon Project 2010, ενημέρωση από Le Quéré et al. 2009).

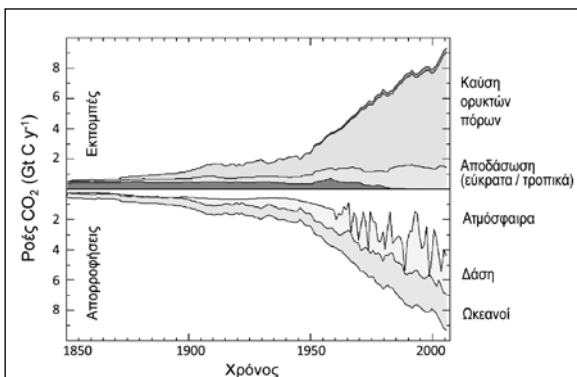
Δάση και διοξείδιο του άνθρακα

Ροές και αποθήκες άνθρακα

Τα δάση περιέχουν σημαντικά αποθέματα άνθρακα στη βιομάζα και στο έδαφος, και βρίσκονται σε μια συνεχή ανταλλαγή CO₂ με την ατμόσφαιρα. Περίπου το 50% των χερσαίων αποθεμάτων άνθρακα του πλανήτη βρίσκεται στα δασικά οικοσυστήματα, ενώ το περισσότερο από το υπόλοιπο βρίσκεται στους τυρφώνες και στους υγρότοπους. Τα δάση περιέχουν περίπου το 80% του παγκόσμιου υπέργειου άνθρακα και περίπου το 40% του συνολικού υπόγειου άνθρακα (Dixon et al. 1994).

Στη μελέτη της συμμετοχής των δασών στον κύκλο του άνθρακα, απαραίτητη είναι η αναγνώριση, η κατανόηση και η ποσοτικοποίηση των ροών άνθρακα μεταξύ των διάφορων αποθηκών του οικοσυστήματος και της ατμόσφαιρας. Οι αποθήκες που αναγνωρίζονται σε ένα δασικό οικοσύστημα είναι πέντε: η υπέργεια βιομάζα, η υπόγεια βιομάζα (το ριζικό σύστημα), το νεκρό ξύλο, η φυλλάδα και το έδαφος (η οργανική ουσία του εδάφους). Στο Σχήμα 3 απεικονίζονται οι αποθήκες και οι ροές άνθρακα σε ένα δασικό οικοσύστημα, ενώ στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται οι ροές άνθρακα και η σχέση μεταξύ των διαφορετικών εννοιών της παραγωγικότητας των οικοσυστημάτων, GPP, NPP, NEP και NBP.

Τα φυτά απορροφούν διοξείδιο του άνθρακα από την ατμόσφαιρα μέσω της φωτοσύνθεσης. Οι ρυθμοί φωτοσύνθεσης αθροιζόμενοι για μερικά φυτά, ένα δάσος ή ολόκληρο τον πλανήτη αποτελούν τη Μεικτή Πρωτογενή Παραγωγικότητα (GPP, Gross Primary Productivity). Αυτή αποτελεί τη μεγαλύτερη ροή στον κύκλο του άνθρακα, και σε παγκόσμιο επίπεδο υπολογίζεται σε 120 Gt C y⁻¹ περίπου (Prentice et al. 2001). Το μισό περίπου από αυτό το



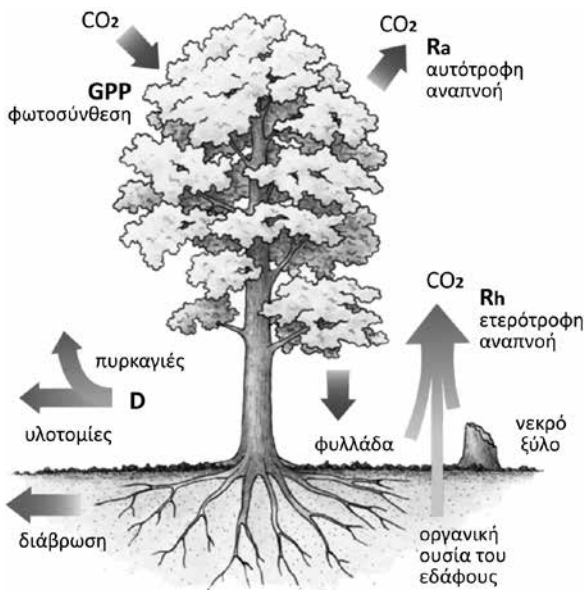
Σχήμα 2. Η ανθρωπογενής διαταραχή στον κύκλο του άνθρακα.

Τα στοιχεία αυτά προέρχονται από το Global Carbon Project (2010, ενημέρωση από Le Quéré et al. 2009). Η συσσώρευση CO₂ στην ατμόσφαιρα προέρχεται από μετρήσεις, οι εκπομπές εκτιμώνται βάσει στατιστικών δεδομένων για την κατανάλωση ενέργειας και την αποδάσωση, οι απορροφήσεις από τους ωκεανούς εκτιμώνται από μοντέλα, ενώ η χοάνη στα δάση είναι το εναπομείναν ποσό.

CO₂ επιστρέφει στην ατμόσφαιρα μέσω της κυτταρικής αναπνοής των φυτών (αυτότροφη αναπνοή – R_a, autotrophic respiration, περίπου 60 Gt C yr⁻¹ παγκοσμίως). Αυτό είναι το κόστος της ενέργειας που απαιτείται για τον μεταβολισμό των φυτών. Το υπόλοιπο CO₂ μετατρέπεται από το φυτό σε βιομάζα (φύλλα, ξύλο, καρπούς, άνθη, ρίζα) και αποτελεί την Καθαρή Πρωτογενή Παραγωγή (NPP, Net Primary Production).

$$NPP = GPP - R_a$$

Η NPP χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της κατάστασης των οικοσυστημάτων και των υπηρεσιών τους, των επιπτώσεων της ρύπανσης και της κλιματικής αλλαγής, καθώς και την αξιολόγηση περιβαλλοντικών αλλαγών όπως η αποδάσωση, η υποβάθμιση των δασών και η ερημοποίηση.



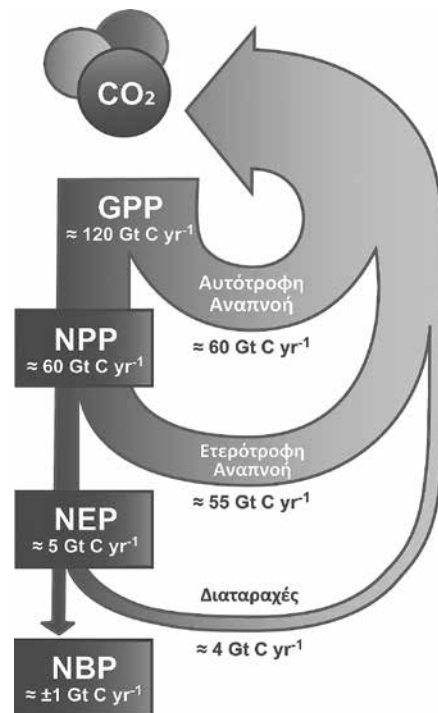
Σχήμα 3. Ροές και αποθήκες. Ο κύκλος του άνθρακα στο δασικό οικοσύστημα.

Καθώς η βιομάζα νεκρώνεται (είτε γρήγορα, π.χ. πτώση των φύλλων και των καρπών, είτε πιο αργά, με το θάνατο του δένδρου), ο άνθρακας μεταφέρεται στην αποθήκη του νεκρού ξύλου ή της φυλλάδας και από εκεί, στη συνέχεια, μέσω της χυμοποίησης, στην αποθήκη του οργανικού άνθρακα του εδάφους. Ο άνθρακας που είναι αποθηκευμένος στο έδαφος είναι το αποτέλεσμα της NPP επί χιλιάδες χρόνια, καθώς η οργανική ουσία του εδάφους μπορεί να διατηρηθεί για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Η αποσύνθεση είναι μια διαδικασία που γίνεται σε διάφορα στάδια, όπου έντομα, βακτήρια και μύκητες επιδρούν στα διάφορα βιοχημικά συστατικά της οργανικής ύλης. Τα προϊόντα της αποσύνθεσης είναι CO₂, H₂O και ανόργανα ιόντα. Το CO₂ συγκεντρώνεται στους πόρους του εδάφους και διαχέεται στην ατμόσφαιρα ως

ετερότροφη αναπνοή (R_h, heterotrophic respiration), αποτελώντας τις μισές περίπου εκπομπές CO₂ από τις συνολικές εκπομπές από το έδαφος. Οι άλλες μισές προέρχονται από την αναπνοή των ριζών. Ωστόσο, το ποσοστό αυτό μπορεί να κυμαίνεται από 10% μέχρι 90%, ανάλογα με το είδος της βλάστησης και τις ιδιαίτερες συνθήκες του οικοσυστήματος.

Τα διαφορετικά τμήματα της βιομάζας των φυτών έχουν διαφορετικές αντιστάσεις στην αποσύνθεση και διαφορετικούς ρυθμούς ανακύκλωσης, επιδρώντας στους ρυθμούς της παραγωγικότητας και στη δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα. Κάποια τμήματα της βιομάζας, όπως οι υδατάνθρακες και οι πρωτεΐνες, είναι σημαντικές πηγές ενέργειας για τους οργανισμούς του εδάφους και καταναλώνονται γρήγορα· άλλα τμήματα, όπως η λιγνίνη και η κυτταρίνη, είναι πιο ανθεκτικά στην αποσύνθεση (Gleixner et al. 2001), ενώ ένα μικρό τμήμα παραμένει αναλλοίωτο, πρακτικά μόνιμα αποθηκευμένο στο έδαφος (“recalcitrant” material). Το υπόγειο τμήμα των χερσαίων οικοσυστημάτων (εδάφη και ρίζες) είναι ιδιαίτερα σημαντικό. Περίπου τα δύο τρίτα του χερσαίου άνθρακα βρίσκονται υπογείως, ενώ ο υπόγειος άνθρακας έχει, γενικά, μικρότερους ρυθμούς ανακύκλωσης σε σχέση με τον υπέργειο. Έτσι, η αποθήκευση του άνθρακα διατηρείται για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

Για την εκτίμηση της Καθαρής Παραγωγικότητας του Οικοσυστήματος (NEP, Net Ecosystem Productivity), η οποία είναι το μέτρο της καθαρής απορ-



Σχήμα 4. Διαγραμματική απεικόνιση των σχέσεων μεταξύ των ροών άνθρακα στο δασικό οικοσύστημα και οι τιμές τους σε παγκόσμια κλίμακα (προσαρμογή από: Steffen et al. 1998).

ρόφησης ή εκπομπής CO₂ από ένα δάσος, θα πρέπει να συνυπολογίσουμε και τις εκπομπές από την Ετερότροφη Αναπνοή (R_h, Heterotrophic Respiration).

$$NEP = NPP - R_h = GPP - R_a - R_h$$

Η Καθαρή Οικοσυστημική Παραγωγικότητα παγκοσμίως υπολογίζεται σε 5 Gt C yr⁻¹ περίπου. Σε ένα δάσος, η NEP εκτιμάται με δύο τρόπους: με τη μέτρηση των αλλαγών στα αποθέματα άνθρακα στη βλάστηση και στο έδαφος (στις αποθήκες του οικοσυστήματος, «μέθοδος της απογραφής») ή με την απευθείας μέτρηση των ροών CO₂ μεταξύ της βλάστησης και της ατμόσφαιρας (Net Ecosystem Exchange, NEE) με ειδικά όργανα (eddy covariance).

Για την εκτίμηση του ισοζυγίου άνθρακα σε μεγαλύτερες εκτάσεις και για μεγαλύτερες χρονικές περιόδους χρησιμοποιείται η Καθαρή Παραγωγή της Μεγαδιάπλασης (NBP, Net Biome Production) (Steffen et al. 1998). Η NBP είναι η καθαρή παραγωγή οργανικής ύλης σε μια ευρύτερη περιοχή που περιλαμβάνει ένα πλήθος οικοσυστημάτων και όπου συνυπολογίζονται, πέρα από την ετερότροφη αναπνοή, και άλλες διεργασίες που προκαλούν απώλειες στη ζωντανή ή νεκρή οργανική ύλη, ως αποτέλεσμα φυσικών, τυχαίων ή διαχειριστικών «διαταραχών» (D), όπως πυρκαγιές, υλοτομίες, αλλαγές χρήσης της γης, επιδημίες, διάβρωση του εδάφους κ.λπ.

$$NBP = NEP - D = GPP - R_a - R_h - D$$

Σε σχέση με τις συνολικές ροές άνθρακα μεταξύ ατμόσφαιρας και βιόσφαιρας, η παγκόσμια NBP είναι σχετικά μικρή. Για τη δεκαετία 1980-1989 υπολογίστηκε ότι ήταν περίπου 0,2±0,7 Gt C yr⁻¹ και για τη δεκαετία 1989-1998 υπολογίστηκε ότι ήταν περίπου 1,4 Gt C yr⁻¹. Η ετήσια παγκόσμια απορρόφηση CO₂ μέσω της φωτοσύνθεσης (GPP) – όπως επίσης και οι αντίστοιχες εκπομπές από την αναπνοή – είναι περίπου 14 φορές μεγαλύτερη από τις ετήσιες ανθρωπογενείς εκπομπές άνθρακα. Γίνεται, έτσι, φανερό ότι μικρές αλλαγές στις ροές αυτές μπορούν να μεταβάλουν σημαντικά το ισοζύγιο άνθρακα στην ατμόσφαιρα.

Παράγοντες που επιδρούν στο χερσαίο ισοζύγιο άνθρακα

Τα δάση μπορεί να λειτουργούν είτε ως χοάνη, είτε ως πηγή, ανάλογα με το ισοζύγιο μεταξύ απορροφήσεων άνθρακα μέσω της φωτοσύνθεσης και των εκπομπών μέσω της αναπνοής των φυτών, της αποσύνθεσης (ετερότροφη αναπνοή), της καύσης ή της απομάκρυνσης μέσω των υλοτομιών. Ένα δάσος λειτουργεί ως χοάνη (καθαρή απορρόφηση CO₂ από την ατμόσφαιρα) όταν το συνολικό από-

θεμα άνθρακα σε όλες τις αποθήκες του οικοσυστήματος αυξάνεται. Σε αυτήν την περίπτωση, η NEP είναι θετική, δηλαδή η Καθαρή Πρωτογενής Παραγωγικότητα NPP είναι μεγαλύτερη από την Ετερότροφη Αναπνοή R_h.

Το παγκόσμιο ισοζύγιο του άνθρακα μεταξύ της χερσαίας βιόσφαιρας και της ατμόσφαιρας δεν είναι σε ισορροπία. Αυτό οφείλεται σε διάφορους παράγοντες, τόσο σε άμεσα ανθρωπογενείς επιδράσεις (π.χ. αποδασώσεις και δασώσεις), όσο και σε έμμεσα ανθρωπογενείς επιδράσεις (π.χ. λίπανση διοξειδίου του άνθρακα και αζώτου, κλιματική αλλαγή). Οι παράγοντες αυτοί, όπως και οι φυσικοί παράγοντες (π.χ. κλιματική διακύμανση, ηλικία του δάσους), που επιδρούν στο ισοζύγιο του άνθρακα, περιγράφονται στη συνέχεια. Θα εξετάσουμε πώς ορισμένοι παράγοντες επιδρούν στο ισοζύγιο του άνθρακα σε παγκόσμιο, σε περιφερειακό και σε τοπικό επίπεδο.

Αλλαγές χρήσεων γης

Οι αλλαγές στη χρήση/κάλυψη της γης και οι πρακτικές διαχείρισης είναι η βασικότερη ανθρωπογενής αιτία της ανισορροπίας, και περιλαμβάνουν την αποδάσωση και την υποβάθμιση των δασών, τις δασώσεις και αναδασώσεις και τις αλλαγές στη διαχείριση των δασών και των αγροτικών καλλιεργειών. Εκτιμάται ότι η ανθρώπινη δραστηριότητα έχει μεταβάλει το 1/3 με 1/2 της επιφάνειας της γης (Vitousek et al. 1997a). Ο ταχύς ρυθμός αποδάσωσης των τροπικών δασών είναι σήμερα ο πιο σημαντικός από αυτούς τους παράγοντες, καθώς ευθύνεται για την εκπομπή μεγάλων ποσοτήτων CO₂ από την καύση της βλάστησης και την ελακόλυθη αποσύνθεση της βιομάζας και της οργανικής ουσίας του εδάφους.

Στον αντίποδα των εκπομπών CO₂ από την αποδάσωση, έχει δημιουργηθεί μια χοάνη CO₂ από την ανθρωπογενή ή τη φυσική αναγέννηση και ανάπτυξη δασών σε εγκαταλελειμμένες αγροτικές εκτάσεις, κυρίως στην εύκρατη ζώνη (Ευρώπη και βόρεια Αμερική). Οι Nabuurs et al. (2003) αναφέρουν ότι η σημερινή ηλικιακή δομή των ευρωπαϊκών δασών είναι το αποτέλεσμα μεγάλης κλίμακας δασώσεων εκτάσεων που μέχρι τα μέσα του 20ού αιώνα χρησιμοποιούνταν στη γεωργία και στην κτηνοτροφία, καθώς και πρακτικών διαχείρισης που επικεντρώνονταν στη φύτευση μετά την αποψίλωση και τις περιοδικές αραιώσεις ομήλικων φυτειών. Η ηλικιακή δομή των σχετικά νέων δασών της Ευρώπης (η μέση ηλικία εκτιμήθηκε σε 57 έτη το 2003, ενώ ελάχιστα από αυτά ήταν πάνω από 150 ετών) είναι σημαντική, αφού θεωρείται ότι είναι βασικότερος παράγοντας αύξησης της χοάνης άνθρακα στην Ευρώπη απ' ό,τι η επέκταση της συνολικής δασικής έκτασης.

Αντίστοιχα, στην Ελλάδα, η εγκατάλειψη της γεωργίας και της κτηνοτροφίας κατά τις τελευταίες δεκαετίες στα ορεινά, κυρίως, της χώρας έχει ως αποτέλεσμα τη φυσική δάσωση των εκτάσεων αυτών και τη δημιουργία μιας χοάνης η οποία αποθηκεύει σημαντικές ποσότητες άνθρακα στη βιομάζα και στο έδαφος τως δασών που αναπτύσσονται. Ωστόσο, το μέγεθος της χοάνης αυτής και των αποθεμάτων άνθρακα που έχουν αποθηκευτεί στις εκτάσεις αυτές δεν το γνωρίζουμε. Από την άλλη πλευρά, οι επαναλαμβανόμενες πυρκαγιές και οι πιέσεις αλλαγής χρήσης των δασών στα χαμηλά, κυρίως, υψόμετρα έχουν ως αποτέλεσμα την αποδάσωση και υποβάθμιση των δασών, και, επομένως, την απώλεια άνθρακα στις εκτάσεις αυτές.

Σύμφωνα με την ελληνική απογραφή των αερίων του θερμοκηπίου (Petsikos 2012), οι αγροτικές εκτάσεις που δασώθηκαν μέσω του σχετικού επιδοτούμενου μέτρου δάσωσης γεωργικών γαιών απορροφούν σήμερα και αποθηκεύουν στη βιομάζα του δάσους περίπου 0,35 Mt CO₂ ετησίως. Στον γεωργικό τομέα, η αύξηση των δενδρωδών καλλιεργειών, η οποία λαμβάνει χώρα στην Ελλάδα κατά τις τελευταίες δεκαετίες, έχει δημιουργήσει μια χοάνη άνθρακα η οποία κυμαίνεται μεταξύ 0,2-1,3 Mt CO₂ ετησίως κατά την περίοδο 1990-2010 – λαμβάνοντας υπόψη μόνο τον άνθρακα που αποθηκεύεται στη βιομάζα και όχι στο έδαφος (Petsikos 2012).

Αίπωση διοξειδίου του άνθρακα

Η αύξηση της συγκέντρωσης CO₂ στην ατμόσφαιρα προκαλεί αύξηση στο ρυθμό φωτοσύνθεσης των φυτών, με επίδραση στην ποσότητα άνθρακα που αποθηκεύεται στη βιομάζα, στη νεκρή οργανική ουσία και στο έδαφος. Τα αποτελέσματα περισσότερων από 100 πειραμάτων, όπου νεαρά δένδρα εξετίθεντο σε διπλάσια συγκέντρωση CO₂ από την ατμοσφαιρική, για περιόδους μέχρι και δέκα χρόνια, έδειξαν αύξηση στο ρυθμό ανάπτυξης κατά 10-70% (Wullschlegel et al. 1995, Idso 1999). Πιο πρόσφατες μελέτες σε συστάδες μέσης και μεγάλης ηλικίας (Körner et al. 2005, Asshoff et al. 2006) έδειξαν ότι τα μεγαλύτερα δένδρα δεν αποκρίνονται στην αυξημένη συγκέντρωση ατμοσφαιρικού CO₂ στο βαθμό που αποκρίνονται τα νεαρότερα δένδρα. Ωστόσο, η επίδραση της αυξημένης συγκέντρωσης CO₂ σε ώριμα δάση παραμένει ελάχιστα μελετημένη και αβέβαιη.

Αίπωση αζώτου

Ο ρυθμός της εισροής αζώτου στο χερσαίο κύκλο του αζώτου έχει διπλασιαστεί (Vitousek et al. 1997b) από την ανθρώπινη δραστηριότητα με την

απελευθέρωση οξειδίων του αζώτου κατά την καύση ορυκτών πόρων και βιομάζας και την απελευθέρωση αμμωνίας από τη χρήση λιπασμάτων, την κτηνοτροφία και τη βιομηχανία. Καθώς η παραγωγικότητα των φυτών συχνά περιορίζεται από την έλλειψη αζώτου, έχει βρεθεί ότι αυτή η αύξηση στη διαθεσιμότητα αζώτου στα εδάφη έχει προκαλέσει την αύξηση της ανάπτυξης των δασών στις εύκρατες ζώνες (Nadelhoffer et al. 1999), ιδιαίτερα στις περιοχές που βρίσκονται κοντά στις πηγές των εκπομπών.

Κλιματική διακύμανση

Οι ρυθμοί της φωτοσύνθεσης, της αναπνοής, της αποσύνθεσης και η συχνότητα των πυρκαγιών επηρεάζονται από κλιματικούς παράγοντες, όπως η ηλιοφάνεια, η θερμοκρασία και οι βροχοπτώσεις. Οι ετήσιες διακυμάνσεις του κλίματος έχουν ως αποτέλεσμα την αντίστοιχη ετήσια διακύμανση στο μέγεθος της παγκόσμιας χερσαίας χοάνης άνθρακα (όπως φαίνεται στο Σχήμα 2) και, επομένως, και στη συγκέντρωση του CO₂ στην ατμόσφαιρα. Η βιόσφαιρα – όπως και ένα δάσος – μπορεί να λειτουργεί ως χοάνη μια χρονιά και ως πηγή εκπομπών την επόμενη, λόγω της μεταβλητότητας του κλίματος (Bousquet et al. 2000).

Οι αλλαγές στη φωτοσύνθεση ή στην αναπνοή συχνά συνδέονται και με μεγάλης κλίμακας τοπικές καιρικές διαταραχές, οι οποίες επιδρούν στα χερσαία οικοσυστήματα. Για παράδειγμα, η έκρηξη του ηφαιστείου Pinatubo το 1991 και η ηφαιστειακή σκόνη που διοχετεύθηκε στην ατμόσφαιρα προκάλεσαν αφενός τη διάχυση της ηλιακής ακτινοβολίας, που είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της φωτοσύνθεσης (Farquhar and Roderick 2003, Gu et al. 2002, 2003) και την πτώση της παγκόσμιας θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα τη μείωση της αναπνοής (Jones and Cox 2001). Η αυξημένη παραγωγικότητα των χερσαίων οικοσυστημάτων κατά την περίοδο 1991-1993 συγκράτησε την αύξηση της συγκέντρωσης CO₂ στην ατμόσφαιρα για το διάστημα αυτό, επίδραση η οποία είναι ορατή στην καμπύλη του Keeling (Σχήμα 1).

Το φαινόμενο «El Niño» συνδέεται με υψηλές θερμοκρασίες και ξηρασίες σε πολλές τροπικές περιοχές. Εκτιμάται ότι αν η συχνότητα του φαινομένου αυξηθεί στο μέλλον, ενδεχομένως πολλές τροπικές περιοχές να μετατραπούν σε πηγές άνθρακα. Τα έτη 1997 και 1998, κατά τη διάρκεια του «El Niño», οι ξηρασίες οδήγησαν σε εκτεταμένες πυρκαγιές σε πολλές περιοχές του πλανήτη, απελευθερώνοντας μεγάλες ποσότητες CO₂, CH₄ και άλλων αερίων στην ατμόσφαιρα (Schimel et al. 2001, van der Werf et al. 2004).

Κλιματική αλλαγή

Δορυφορικά δεδομένα (Myneni et al. 1997) και φαινολογικές παρατηρήσεις (Cannell et al. 1999) καταδεικνύουν ότι οι υψηλότερες θερμοκρασίες έχουν ήδη οδηγήσει σε μεγαλύτερες αυξητικές περιόδους στη βόρεια (boreal) ζώνη και στην εύκρατη Ευρώπη. Ωστόσο, μετρήσεις των ροών CO₂ σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη δείχνουν ότι η χοάνη αυτή στη βιομάζα ισοσκελίζεται από εκπομπές εδαφικού άνθρακα που προκαλούνται από το λιώσιμο του μόνιμα παγωμένου εδάφους (permafrost) (Goulden et al. 1998).

Οι Nemani et al. (2003), αναλύοντας κλιματικά δεδομένα και παρατηρήσεις από δορυφόρους, εκτίμησαν ότι κατά την περίοδο 1982-1999 η παγκόσμια NPP αυξήθηκε κατά 6%. Η αύξηση αυτή οφείλεται στις μεταβολές στο κλίμα κατά την περίοδο αυτή, οι οποίες ήταν στην πλειοψηφία τους προς την κατεύθυνση μετριασμού των κλιματικών περιορισμών στην αύξηση των φυτών. Η μεγαλύτερη αύξηση παρατηρήθηκε στις τροπικές ζώνες και αποδίδεται στη μείωση της νεφοκάλυψης, η οποία είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της προσπιπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (η οποία αποτελεί τον περιοριστικό παράγοντα στην παραγωγικότητα των τροπικών δασών). Η αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα σε περιοχές της βόρειας Αμερικής και της βορειοδυτικής Ευρώπης, όπου οι χαμηλές θερμοκρασίες είναι ο περιοριστικός παράγοντας, προκάλεσε την πρώιμη έναρξη της αυξητικής περιόδου και τη δέσμευση και αποθήκευση επιπρόσθετου άνθρακα. Επίσης, αλλαγές στους μουσώνες επέδρασαν θετικά σε οικοσυστήματα της Αυστραλίας, της Αφρικής και της Ινδίας, όπου η παραγωγικότητα περιορίζεται από το διαθέσιμο νερό.

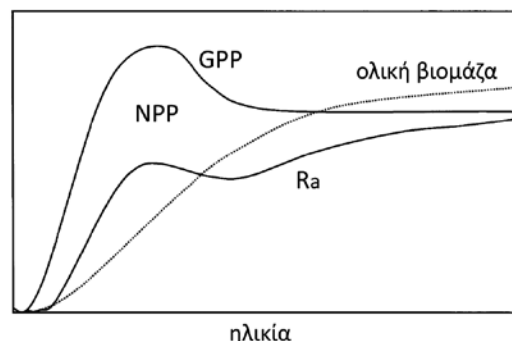
Αυτή η μακρόχρονη συσχέτιση της NPP με τη μέση παγκόσμια θερμοκρασία οδήγησε στο συμπέρασμα πως η παγκόσμια θέρμανση αυξάνει την παραγωγή βιομάζας. Ωστόσο, σε πρόσφατη μελέτη οι Zhao and Running (2010), χρησιμοποιώντας παρόμοια δορυφορικά δεδομένα (MODIS Terra), υποστήριξαν, σε αντίθεση με το αναμενόμενο, ότι η παγκόσμια NPP μειώθηκε (οριακά) τη δεκαετία 2000-2009, παρά το γεγονός ότι πρόκειται για θερμότερη δεκαετία από τις προηγούμενες. Ο κύριος λόγος της μείωσης αυτής πιστεύεται ότι είναι μια σειρά από εκτεταμένες ξηρασίες που παρατηρήθηκαν σε διάφορα μέρη του πλανήτη την περίοδο αυτή. Σε περίπτωση που οι εκτιμήσεις αυτές επαληθευτούν (προς το παρόν η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε έχει αμφισβητηθεί από άλλους ερευνητές, Samanta et al. 2011, Medlyn 2011), οι επιπτώσεις από την αντιστροφή αυτή στην επίδραση της θέρμανσης στη NPP θα είναι σημαντικές, δεδομένων των θερμότερων και ξηρότερων ετών που αναμένονται στο μέλλον – πέρα από τα προβλήματα στην επάρκεια των τροφίμων που θα προκληθούν από

τις μειωμένες σοδειές των αγροτικών προϊόντων, λιγότερος άνθρακας θα αποθηκεύεται στα χερσαία οικοσυστήματα, με αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσης του CO₂ στην ατμόσφαιρα.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο καύσωνας του 2003 στην Ευρώπη, όπου οι θερμοκρασίες του Ιουλίου ήταν κατά 6°C μεγαλύτερες από τον μέσο όρο, και τα ετήσια κατακρημνίσματα μειωμένα κατά 300 mm, 50% λιγότερα από τον μέσο όρο. Οι Ciais et al. (2005), αναλύοντας δεδομένα από μετρήσεις ροών διοξειδίου του άνθρακα σε δασικά οικοσυστήματα, δορυφορικά δεδομένα και εθνικές στατιστικές παραγωγής αγροτικών προϊόντων, και χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο προσομοίωσης (DGVM), εκτίμησαν τις μεταβολές της πρωτογενούς παραγωγικότητας στην Ευρώπη κατά το 2003 και τις επιπτώσεις τους στο καθαρό ισοζύγιο άνθρακα. Υπολογίστηκε ότι το 2003 η μεικτή πρωτογενής παραγωγικότητα (GPP) ήταν μειωμένη κατά 30%, με αποτέλεσμα τη μετατροπή της επί τετραετίας ευρωπαϊκής χοάνης άνθρακα σε σημαντική πηγή εκπομπών άνθρακα (0,5 Pg C yr⁻¹). Τα αποτελέσματα του μοντέλου, επιβεβαιωμένα από τα ιστορικά στοιχεία αγροτικής παραγωγής, έδειξαν ότι η μείωση αυτή της πρωτογενούς παραγωγικότητας στην Ευρώπη ήταν άνευ προηγούμενου κατά τη διάρκεια του τελευταίου αιώνα.

Ηλικία του δάσους

Η ηλικία του δάσους, η οποία εξαρτάται συνήθως από τις διαταραχές που ανανεώνουν το οικοσύστημα, είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που καθορίζει την παραγωγικότητα, τις ροές άνθρακα και την κατανομή των αποθηκών άνθρακα στα διάφορα δασικά οικοσυστήματα. Σε ένα δένδρο ή σε ένα ομήλικο δάσος, η αύξηση και η συσσώρευση βιομάζας είναι αργή στην αρχή, αυξάνει καθώς η φυλλική επιφάνεια αυξάνεται, φτάνει σε κορυφή καθώς η φυλλική επιφάνεια γίνεται μέγιστη και, στη συνέχεια, φθίνει (Σχήμα 5).



Σχήμα 5. Θεωρητική γραφική παράσταση της μεικτής πρωτογενούς παραγωγικότητας (GPP), της αυτότροφης αναπνοής (Ra) και της ολικής βιομάζας σε σχέση με την ηλικία ενός δένδρου ή μιας συστάδας. Η διαφορά μεταξύ της GPP και της αυτότροφης αναπνοής είναι η καθαρή πρωτογενής παραγωγικότητα (NPP) (πηγή: Carey et al. 2001).

Η Καθαρή Πρωτογενής Παραγωγή (NPP) ενός δάσους βρίσκεται σε αντιστοιχία με τον όρο Μεικτή Ετήσια Προσαύξηση του ξυλαποθέματος (Gross Annual Increment in growing stock, GAI) που χρησιμοποιείται στη δασοπονία, με τη διαφορά ότι η πρώτη αφορά τη συνολική βιομάζα του δένδρου ή της συστάδας, ενώ η δεύτερη αφορά μόνο το κορμόξυλο. Έτσι, η Καθαρή Πρωτογενής Παραγωγή μιας συστάδας συσχετίζεται με τη Μεικτή Ετήσια Προσαύξηση του ξυλαποθέματος. Στα πρώτα έτη από την εγκατάσταση της συστάδας είναι μικρή, στη συνέχεια αυξάνεται, φθάνοντας σε ένα μέγιστο, όπου η δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα (carbon sequestration) γίνεται μέγιστη, και στη συνέχεια φθίνει.

Ενώ είναι γνωστός ο ρόλος των νεαρών δασών ως χοάνης άνθρακα, υπάρχει η άποψη ότι τα υπερώριμα, μη διαχειριζόμενα δάση είναι ανθρακικά ουδέτερα (carbon neutral), δηλαδή η φωτοσύνθεση αντισταθμίζεται από την αναπνοή και επομένως παύουν να αποθηκεύουν άνθρακα (Odum 1969, Jarvis 1989). Η θεωρία αυτή στηρίχθηκε στην παρατηρούμενη μείωση της NPP με το χρόνο σε ομήλικες φυτείες (Gower et al. 1996, Binkley et al. 2002) και οδήγησε στην αντίληψη ότι τα υπερώριμα δάση, ενώ είναι σημαντικά ως αποθήκες άνθρακα, δεν είναι σημαντικά ως χοάνες. Ωστόσο, καθώς τα δάση συνεχίζουν να μεγαλώνουν και γίνονται λιγότερο παραγωγικά, μπορεί να συνεχίσουν να συσσωρεύουν άνθρακα στη φυλλάδα, στο νεκρό ξύλο και στο έδαφος. Πρόσφατες έρευνες αποδεικνύουν ότι τα δάση αυτά συνεχίζουν να λειτουργούν ως χοάνες και να αποθηκεύουν άνθρακα για αιώνες. Οι Luysaert et al. (2008), μελετώντας τα δεδομένα από 519 εύκρατα και βόρεια δάση (τάιγκα), διαπίστωσαν μείωση της NPP μετά από κάποια ηλικία, αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις δάση μεγαλύτερα από 120 χρόνων παρουσίαζαν ακόμη σημαντική NPP. Οι εκτιμήσεις τους για τη NEP στα δάση μεγαλύτερα των 200 ετών έδειξαν ότι απορροφούν και αποθηκεύουν κατά μέσο όρο $2,4 \pm 0,8 \text{ t C ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$. Οι Knohl et al. (2003) κατέγραψαν καθαρές απορροφήσεις άνθρακα (NEP) ίσες με $4,9 \text{ t C ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ σε εκτός διαχείρισης δάσος οξιάς στην κεντρική Γερμανία, ηλικίας 250 ετών. Μελέτη των Carey et al. (2001) έδειξε ότι η παραγωγικότητα ενός υποαλπικού δάσους στα Βραχώδη όρη των ΗΠΑ έφτασε στο μέγιστο μετά από 450 χρόνια – η NPP σε αυτές τις συστάδες ήταν σχεδόν $6 \text{ t C ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ – καταδεικνύοντας ότι η αύξηση και η αποθήκευση άνθρακα σε φυσικά, μεικτά, υπερώριμα δάση δεν μπορεί να προβλεφθεί από την παραγωγικότητα αμιγών, ομήλικων φυτειών.

Η μετα-ανάλυση των Pregitzer and Euskirchen (2004), με δεδομένα από μεγάλο αριθμό διαχει-

ριζόμενων και μη διαχειριζόμενων δασών, κατέδειξε ότι η μέση NEP εύκρατων δασών ηλικίας 0-10, 11-30, 31-70, 71-120, και 121-200 ήταν -1,9, 4,5, 2,4, 1,9, και $1,7 \text{ t C ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ αντίστοιχα. Οι NPP και NEP ήταν μεγαλύτερες σε μέσης ηλικίας δάση (π.χ. 30-120 ετών), ενώ γηραιότερα δάση (>120 ετών) ήταν γενικά λιγότερο παραγωγικά. Η μέση NEP των νεαρών δασών (0-10 ετών) ήταν αρνητική, αποτελούσαν δηλαδή καθαρή πηγή άνθρακα προς την ατμόσφαιρα, τόσο στην εύκρατη όσο και στη βόρεια κλιματική ζώνη ($-0,1$ και $-1,9 \text{ t C ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ αντίστοιχα).

Στην πραγματικότητα, τα νεαρά δάση, παρά τα υπερώριμα, αποτελούν πολύ συχνά πηγή CO_2 . Αυτό συμβαίνει επειδή η ανάπτυξη ενός νέου δάσους (είτε φυσικά, είτε από τον άνθρωπο) συνήθως ακολουθεί τη διαταραχή της προηγούμενης βλάστησης και του εδάφους, η οποία έχει ως αποτέλεσμα ο ρυθμός της αποσύνθεσης του νεκρού ξύλου, της φυλλάδας και της οργανικής ουσίας του εδάφους (ο ρυθμός ανοργανοποίησης του περιεχόμενου C, μετρούμενος ως ετερότροφη αναπνοή) να υπερβαίνει την NPP της αναγέννησης (Luysaert et al. 2008).

Πυρκαγιές

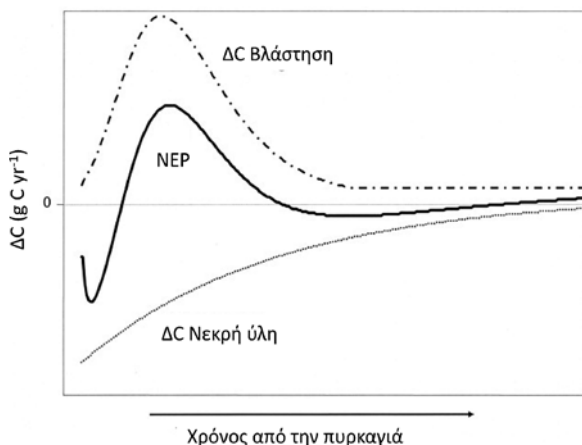
Οι πυρκαγιές είναι κύριο συστατικό πολλών οικοσυστημάτων και έχουν σημαντικές άμεσες, μεσοπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες επιπτώσεις στον κύκλο και στην αποθήκευση του άνθρακα. Η κατανόηση της επίδρασης των πυρκαγιών είναι πολύ σημαντική στην πρόβλεψη των μελλοντικών αλλαγών στο ισοζύγιο του άνθρακα, καθώς μεγαλύτερη ένταση, έκταση και συχνότητα πυρκαγιών θα αυξήσουν τις δασικές εκτάσεις που λειτουργούν ως πηγές διοξειδίου του άνθρακα. Αν η κλιματική αλλαγή αυξήσει σημαντικά τις εκτάσεις που καίγονται κατά τις επόμενες δεκαετίες – όπως προβλέπεται (Neilson and Drapek 1998, Dale et al. 2001) – θα επηρεαστεί και η συγκέντρωση CO_2 στην ατμόσφαιρα. Καθώς οι οικοσυστημικές διεργασίες που εμπλέκονται – καύση, αποσύνθεση, παραγωγή, διαδοχή κ.λπ. – λειτουργούν σε διαφορετικούς χρονικούς ορίζοντες, στη μελέτη της επίδρασης της πυρκαγιάς σημασία έχει η κλίμακα χρόνου που θα επηρεχθεί.

Η άμεση επίδραση των πυρκαγιών είναι η απώλεια του άνθρακα που απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα με την καύση. Οι πυρκαγιές νεκρώνουν τα δένδρα αλλά συνήθως καταναλώνουν ένα μικρό μόνο τμήμα της βιομάζας, αφήνοντας στο οικοσύστημα νεκρή οργανική ύλη, η οποία αποσυντίθεται τα επόμενα χρόνια ή δεκαετίες, ανάλογα με τις συνθήκες, αλλά και τη φύση και το μέγεθος των υλικών αυτών. Οι Auclair and Carter (1993) υπο-

λόγισαν πως οι εκπομπές αυτές από την αποσύνθεση είναι κατά μέσο όρο τριπλάσιες από τις άμεσες εκπομπές κατά τη διάρκεια της καύσης για τα δάση της βόρειας και δυτικής Αμερικής.

Η μεσοπρόθεσμη επίδραση των πυρκαγιών αφορά το ισοζύγιο μεταξύ του άνθρακα αυτού που εκπέμπεται από την αποσύνθεση της νεκρής ύλης και αυτού που δεσμεύεται από την αναγέννηση της βλάστησης μετά την πυρκαγιά. Καθώς η πυρκαγιά νεκρώνει τη ζωντανή βιομάζα και μειώνει τη φυλλική επιφάνεια στο μηδέν – στην περίπτωση ολοσχερούς καταστροφής της βλάστησης – η καθαρή πρωτογενής παραγωγικότητα του οικοσυστήματος (NPP) αμέσως μετά την πυρκαγιά προσεγγίζει επίσης το μηδέν (Pearson et al. 1987). Στη φάση αυτή, όπου η απώλεια άνθρακα από την αποσύνθεση είναι μεγαλύτερη από την NPP, η καθαρή ετήσια αλλαγή στις αποθήκες άνθρακα (NEP) είναι αρνητική. Καθώς το δάσος επανεγκαθίσταται και η αποσύνθεση μειώνεται, η συσσώρευση άνθρακα στη βιομάζα τελικά αντισταθμίζει τις απώλειες από την αποσύνθεση και η NEP γίνεται θετική (Σχήμα 6).

Αντίστοιχη επίδραση με τις πυρκαγιές έχουν και άλλου είδους διαταραχές, όπως οι υλοτομίες, οι ανεμορριπίες, οι επιδημίες κ.λπ., οι οποίες προκαλούν καταστροφή της βλάστησης και – σε διαφορετικό βαθμό – διαταραχή του εδάφους, δεν παράγουν ωστόσο άμεσες εκπομπές από καύση. Σημαντικός παράγοντας όσον αφορά τον κύκλο του άνθρακα και τη διαχείρισή του είναι ο χρόνος που απαιτείται μετά την αρχική διαταραχή ενός δάσους, ώστε αυτό να μετατραπεί από πηγή εκπομπών σε ανθρακικά ουδέτερο και, στη συνέχεια, σε χοάνη άνθρακα. Πρόσφατα, ορισμένες εργασίες παρέχουν στοιχεία σχετικά με το αντικείμενο αυτό. Οι Thornton et al. (2002), συνδυ-



Σχήμα 6. Θεωρητική γραφική παράσταση της καθαρής οικοσυστημικής παραγωγικότητας (NEP) και των αποθηκών της βλάστησης (ζωντανή βιομάζα) και της νεκρής οργανικής ύλης μετά από πυρκαγιά (πηγή: Kashian et al. 2006).

άζοντας ένα μοντέλο (Biome-BGC) με βιομετρικές αναλύσεις και μετρήσεις ροών άνθρακα (eddy covariance), συμπέραναν ότι ο χρόνος αυτός είναι ιδιαίτερα μεταβλητός και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως ο τύπος και η ένταση της διαταραχής, αλλά και η διαχείριση μετά τη διαταραχή. Οι Howard et al. (2004) υπολόγισαν ότι είναι δέκα χρόνια για ένα δάσος πεύκης στον Καναδά που υλοτομήθηκε, οι Law et al. (2001) εκτίμησαν 15-20 χρόνια για ένα δάσος πεύκης που υλοτομήθηκε, οι Litvak et al. (2003) κατέγραψαν 11 χρόνια για μια συστάδα ερυθρελάτης στον Καναδά που κήκε, ενώ οι Knohl et al. (2002) κατέγραψαν θετική NEP 12 και 24 χρόνια μετά από ανεμορριπίες σε δύο δάση της ρωσικής τσίγκας.

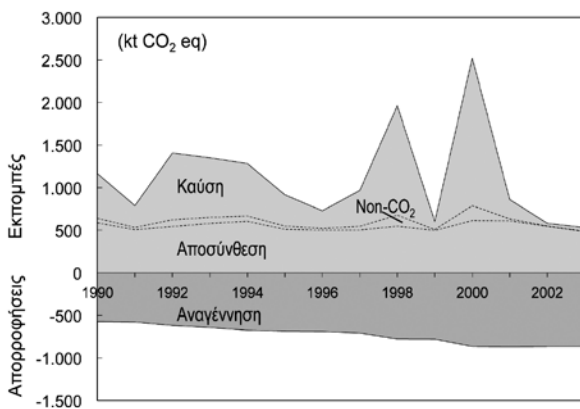
Μέχρι πρόσφατα, οι μελέτες για το παγκόσμιο ισοζύγιο του άνθρακα γενικά αγνοούσαν την επίδραση των πυρκαγιών (Houghton 2003), θεωρώντας ότι οι απώλειες άνθρακα σε κάποιες περιοχές που καίγονται αντισταθμίζονται από τις απορροφήσεις σε άλλες περιοχές που ανακάμπτουν (Crutzen and Andreae 1990). Η παραδοχή αυτή, ωστόσο, είναι ρεαλιστική μόνο στην περίπτωση που οι εκπομπές άνθρακα από τις πυρκαγιές παραμένουν σταθερές στο χρόνο – δεν μεταβάλλεται, δηλαδή, η συχνότητα των πυρκαγιών και οι εκτάσεις που καίγονται – και αν τα καμένα οικοσυστήματα ανακτούν πλήρως τη χαμένη βιομάζα. Αν το οικοσύστημα μετά την πυρκαγιά έχει φτωχή αναγέννηση, η ανάκαμψη του δάσους δεν θα αναπληρώσει την απώλεια άνθρακα από την καύση και την αποσύνθεση, και το καθαρό ισοζύγιο άνθρακα για το οικοσύστημα αυτό κατά τη διάρκεια ενός κύκλου επανάληψης της φωτιάς είναι αρνητικό.

Η αλλαγή στη συχνότητα των πυρκαγιών επιδρά, επίσης, στο καθαρό ισοζύγιο του άνθρακα. Μια αύξηση στη συχνότητα των πυρκαγιών – ή στις καμένες εκτάσεις – έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία καθαρής πηγής άνθρακα, ενώ, αντίθετα, η μείωση της συχνότητας – ή των καμένων εκτάσεων – έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία καθαρής χοάνης. Στην Ελλάδα, η μέση έκταση που καίγεται κάθε χρόνο κατά τη δεκαετία του '60 αυξήθηκε κατά τέσσερις περίπου φορές στις δεκαετίες του '80 και '90, αύξηση η οποία έχει δημιουργήσει μια πηγή εκπομπών, καθώς ο αυξημένος άνθρακας που έχει απωλεσθεί, πρακτικά δεν έχει ακόμη απορροφηθεί από την αναγέννηση.

Οι μελέτες εκτίμησης του ισοζυγίου του άνθρακα βάσει των καμένων εκτάσεων εμπιρεύουν πολλές αβεβαιότητες, όπως για παράδειγμα σε σχέση με τον τύπο βλάστησης και τους συντελεστές καύσης. Εκτιμήσεις που βασίζονται σε μακρόχρονες αναλύσεις και περιέχουν, εκτός από τις άμε-

σες εκπομπές από την καύση, και το δυναμικό του άνθρακα ως αποτέλεσμα της αποσύνθεσης και της αναγέννησης, άρχισαν να εμφανίζονται στη βιβλιογραφία κατά την τελευταία δεκαετία.

Στην ελληνική απογραφή των αερίων του θερμοκηπίου (Petsikos 2005) παρουσιάζονται εκτιμήσεις για τις ετήσιες εκπομπές και απορροφήσεις διοξειδίου του άνθρακα, καθώς και των εκπομπών άλλων αερίων του θερμοκηπίου για την περίοδο 1990-2003, ως αποτέλεσμα των δασικών πυρκαγιών. Οι εκτιμήσεις αυτές εμπεριέχουν τις εκπομπές από την απευθείας οξείδωση κατά την καύση, τις εκπομπές από την αποσύνθεση της νεκρής οργανικής ύλης και τις απορροφήσεις από την αναγέννηση στις καμένες επιφάνειες (Σχήμα 7). Οι άμεσες εκπομπές από την καύση παρουσιάζουν μεγάλη ετήσια διακύμανση, αντίστοιχη της διακύμανσης των εκτάσεων που καίγονται κάθε έτος. Οι μέσες ετήσιες εκπομπές κατά την περίοδο αυτή ήταν 1.120 kt CO₂ eq (equivalent, μονάδες ισοδύναμου CO₂) περίπου, ενώ οι απορροφήσεις από την αναγέννηση ήταν 728 kt CO₂ eq. Στις εκτιμήσεις αυτές, ωστόσο, δεν έχει ληφθεί υπόψη η επίδραση των πυρκαγιών στα αποθέματα άνθρακα του εδάφους.



Σχήμα 7. Εκπομπές και απορροφήσεις CO₂ από την καύση, την αποσύνθεση της νεκρής οργανικής ύλης και την αναγέννηση από τις δασικές πυρκαγιές στην Ελλάδα κατά την περίοδο 1990-2003. Παρουσιάζονται επίσης και οι εκπομπές CH₄ και N₂O σε μονάδες ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα (CO₂ eq) που εκπέμπονται κατά την καύση (πηγή: Petsikos 2005).

Η επίδραση της φωτιάς στον άνθρακα του εδάφους είναι λιγότερο μελετημένη και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ένταση και τη διάρκεια της πυρκαγιάς, την ποσότητα και την κατανομή του άνθρακα στο εδαφικό προφίλ, το ποσό υγρασίας του εδάφους και το ρυθμό ανοργανοποίησης του εδαφικού άνθρακα μετά την πυρκαγιά. Χαμηλής έντασης πυρκαγιές προκαλούν απώλειες άνθρακα από τον οργανικό ορίζοντα, αλλά μικρές ή καθόλου αλλαγές στο ανόργανο έδαφος. Αντίθετα, μεγάλης έντασης πυρκαγιές μπορούν να προκα-

λέσουν μεγάλες απώλειες εδαφικού άνθρακα (Johnson 1992). Οι πυρκαγιές ακολουθούνται από σημαντικές αλλαγές στις συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίας του εδάφους και τη διαδοχή των δασικών ειδών, με διαφορές στην ποσότητα και την ποιότητα της βιομάζας που επιστρέφει στο έδαφος και επιπτώσεις στο ρυθμό ανοργανοποίησης του εδαφικού άνθρακα και στην ετερότροφη αναπνοή. Σε μια από τις ελάχιστες μελέτες όπου μετρήθηκε ο εδαφικός άνθρακας πριν και μετά από πυρκαγιά, υπολογίστηκε η απώλεια άνθρακα σε 23 t C ha⁻¹, το 60% του οποίου ήταν από τους ανόργανους ορίζοντες του εδάφους (Bormann et al. 2008). Η μεγάλη αυτή απώλεια άνθρακα πιστεύεται ότι οφείλεται κυρίως στη διάβρωση μετά την πυρκαγιά, λόγω της απομάκρυνσης της βλάστησης και των μεγάλων κλίσεων του εδάφους.

Οι Savage and Mast (2005), μελετώντας δέκα πενκοδάση στις ΗΠΑ που κάηκαν, διαπίστωσαν ότι στο 50% των περιπτώσεων αυτών η έλλειψη επαρκούς αναγέννησης είχε ως αποτέλεσμα τα δάση να μετατραπούν σε θαμνώνες και χορτολίβαδα με μειωμένη ικανότητα να δεσμεύσουν και να αποθηκεύσουν άνθρακα. Η διάβρωση, η μείωση της οργανικής ουσίας και της παραγωγικότητας του εδάφους και η υποβάθμιση των δασών μέσω της πυρκαγιάς αποτελούν πραγματικότητα για τις ξηρές εύκρατες περιοχές, όπως η Ελλάδα. Η χαρτογράφηση των δασών και των αλλαγών χρήσεων γης κατά την περίοδο 1987-2007 του WWF Ελλάς και ΑΠΘ (2011), καταδεικνύει ότι ένα σημαντικό τμήμα των υψηλών δασών της Ελλάδας έχει μετατραπεί σε χαμηλό δάσος και θαμνότοπους, ως αποτέλεσμα των αυξανόμενων εκτάσεων που καίγονται. Η καταγραφή, η χαρτογράφηση και η παρακολούθηση των επιπτώσεων των πυρκαγιών στα εδάφη αυτά και στα αποθέματα άνθρακα, η μεταπυρική εξέλιξη των οικοσυστημάτων καθώς και η μελέτη της πυρκαγιάς ως φορέα ερημοποίησης κρίνονται ως επείγουσα προτεραιότητα για την Ελλάδα.

Τα προϊόντα της καύσης της βιομάζας, πέρα από το διοξείδιο του άνθρακα, περιλαμβάνουν έναν αριθμό οργανικών ενώσεων οι οποίες αλληλεπιδρούν με διάφορους τρόπους με την τροπόσφαιρα και τη στρατόσφαιρα και οι οποίοι δεν είναι πλήρως κατανοητοί (Andreae et al. 2002). Οι πυρκαγιές εκπέμπουν, επίσης, σημαντικές ποσότητες μαύρου άνθρακα, ο οποίος ως αερόλυμα που απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία θερμαίνει την ατμόσφαιρα. Ο μαύρος άνθρακας θεωρείται, τελευταίως, ένας από τους σημαντικότερους ανθρωπογενείς παράγοντες της παγκόσμιας θέρμανσης (IPCC 2007, Ramanathan and Carmichael 2008, Ban-Weiss et al. 2011). Ο χρόνος παραμονής του

στην ατμόσφαιρα είναι λίγες μόνο εβδομάδες και γι' αυτόν το λόγο προτείνεται η μείωση των εκπομπών του ως ένα άμεσο μέτρο αντιμετώπισης της παγκόσμιας θέρμανσης. Γίνεται, έτσι, κατανοητή η σημασία του περιορισμού των δασικών πυρκαγιών για το παγκόσμιο και το τοπικό κλίμα.

Άλλες οργανικές ενώσεις

Πέρα από το CO₂ και τις οργανικές ενώσεις που εκπέμπονται κατά την καύση, τα δάση ανταλλάσσουν με την τροπόσφαιρα και άλλες οργανικές ενώσεις, σε μικρότερα ποσά. Το μεθάνιο είναι ένα αέριο του θερμοκηπίου με παγκόσμιο δυναμικό θέρμανσης 23 φορές μεγαλύτερο από του CO₂ σε χρονικό ορίζοντα 100 ετών. Κάθυγρα εδάφη και υγρότοποι αποτελούν συνήθως πηγή μεθανίου (μεθανογένεση), ενώ ξηρά εδάφη συχνά απορροφούν μεθάνιο ως αποτέλεσμα της δράσης μεθανιότροφων βακτηρίων. Τα δάση εκπέμπουν, επίσης, ένα ποσοστό του άνθρακα που αφομοιώνουν με τη φωτοσύνθεση υπό τη μορφή διαφόρων πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs) – κυρίως ισοπρένιο και μονοτερπένια – οι οποίες εξυπηρετούν σημαντικές βιολογικές λειτουργίες, όπως η προσέλκυση επικονιαστών ή η απομάκρυνση φυτοφάγων ζώων. Οι Kesselmeier et al. (2002) εκτίμησαν ότι οι εκπομπές VOCs ανέρχονται σε 0,1 - 4% της GPP. Ωστόσο, η παραγωγή και η απελευθέρωση VOCs δεν έχουν μελετηθεί επαρκώς, απαιτούν διαφορετικές μεθόδους μέτρησης και σπάνια λαμβάνονται υπόψη στις μελέτες υπολογισμού του ισοζυγίου του άνθρακα.

Στρατηγικές μετριασμού της κλιματικής αλλαγής από τον τομέα των δασών

Η χρήση της γης, και ιδιαίτερα η διαχείριση των δασών και η δασοπονία, μπορούν να συμβάλουν στους στόχους μετριασμού της κλιματικής αλλαγής, επιβραδύνοντας τη συσσώρευση CO₂ στην ατμόσφαιρα. Το 50% περίπου της ξηρής βιομάζας των δασών είναι άνθρακας ο οποίος προέρχεται από την ατμόσφαιρα και το μεγαλύτερο μέρος του οποίου θα επιστρέψει, αργά ή γρήγορα, πάλι σε αυτή. Είναι, επομένως, σημαντική η προστασία και η αύξηση των δασών με σκοπό τη διατήρηση όσο το δυνατόν μεγαλύτερων αποθεμάτων άνθρακα και για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα στη βιόσφαιρα.

Τα μέτρα στον δασικό τομέα ενδείκνυνται για το μετριασμό της κλιματικής αλλαγής γιατί α) τα δάση έχουν σημαντικό δυναμικό δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα, β) η τεχνολογία εγκατάστασης και αποκατάστασης των δασών υπάρχει και είναι δοκιμασμένη και γ) πολλές μελέτες δείχνουν ότι το κόστος των μέτρων στον δασικό τομέα σε πολλές περιπτώσεις είναι σχετικά μικρό (Sedjo et al. 1995). Επίσης, η χρήση των δασών ως χοανών άνθρακα εξυπηρετεί και άλλους περιβαλλοντικούς σκοπούς όπως η προστασία της βιοποικιλότητας, του εδάφους και των υδατικών πόρων.

Στη συνέχεια, αναλύονται τα μέτρα στο δασικό τομέα, με ιδιαίτερη αναφορά σε εκείνα που έχουν ενδιαφέρον για την ελληνική πραγματικότητα. Αυτά μπορούν να διακριθούν σε τέσσερις κατηγορίες: α) προστασία και διατήρηση των υφιστάμενων αποθεμάτων άνθρακα (αντιμετώπιση της αποδόσωσης και της υποβάθμισης των δασών), β) μεγέθυνση των υφιστάμενων αποθεμάτων άνθρακα μέσω της κατάλληλης διαχείρισης των δασών, γ) δημιουργία νέων αποθεμάτων άνθρακα μέσω της επέκτασης των δασών και δ) αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων από βιοκαύσιμα και χρήση προϊόντων ξύλου για την αντικατάσταση άλλων υλικών (Dixon et al. 1994).

Προστασία και διατήρηση των υφιστάμενων αποθεμάτων άνθρακα

Η αποδάσωση και η υποβάθμιση των δασών έχουν ως αποτέλεσμα την απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων άνθρακα από τις χερσαίες αποθήκες προς την ατμόσφαιρα. Σύμφωνα με την Τέταρτη Έκθεση Αξιολόγησης της IPCC (2007), το ένα τρίτο των ανθρωπογενών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια των τελευταίων 250 ετών προήλθαν από τις αλλαγές χρήσεων γης και κυρίως από την αποδάσωση. Στις μέρες μας, περίπου 13 εκατομμύρια εκτάρια τροπικών δασών (όσο το μέγεθος της Ελλάδας) αποψιλώνονται κάθε χρόνο, με σκοπό τη μετατροπή τους κυρίως σε γεωργική γη, και σε μικρότερο βαθμό λόγω της παράνομης υλοτομίας (FAO 2006). Οι εκπομπές που προκαλούνται από την καύση και την αποσύνθεση της οργανικής ουσίας της βιομάζας και των εδαφών στις εκτάσεις αυτές αποτελούν τουλάχιστον το 15%¹ των συνολικών ανθρωπογενών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Van der Werf et al. 2009).

Η αποδάσωση δεν είναι όμως σημαντική μόνο για τις ποσότητες άνθρακα που απελευθερώνει στην

¹ Οι προηγούμενες εκτιμήσεις θεωρείται ότι ήταν υπερεκτιμημένες και έφθαναν στο 20% των παγκόσμιων εκπομπών (IPCC 2007). Οι Van der Werf et al. (2009) περιλαμβάνουν επίσης στις εκτιμήσεις τους και τις εκπομπές από τους τυρφώνες.

ατμόσφαιρα. Κλιματικά μοντέλα δείχνουν ότι η αποδάσωση στον Αμαζόνιο έχει επιπτώσεις στο τοπικό ισοζύγιο ενέργειας, προκαλώντας ένα πιο θερμό και ξηρό κλίμα. Επιπλέον, μέσω της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας, η επίπτωση μπορεί να μεταδοθεί πολύ μακρύτερα από τον Αμαζόνιο. Τέτοιες τηλεσυνδέσεις είναι συχνές και δείχνουν πως οι κλιματικές διαταραχές μπορεί να έχουν επιπτώσεις χιλιάδες χιλιόμετρα μακριά (Van den Dool 2000).

Η αντιμετώπιση της αποδάσωσης και της υποβάθμισης των δασών αναγνωρίζεται ως ένας άμεσος, αποτελεσματικός και φθηνός τρόπος αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής, με σημαντικά δευτερεύοντα οφέλη για την προστασία της βιοποικιλότητας. Υπογραμμίζοντας τη σημασία της αντιμετώπισης της αποδάσωσης, η έκθεση Stern για τα οικονομικά της κλιματικής αλλαγής (Stern 2006) αναφέρει ότι «απαιτείται επείγοντως η ανάληψη δράσης για τη διατήρηση των εκτάσεων φυσικού δάσους που έχουν απομείνει». Μέτρα για την αντιμετώπιση της αποδάσωσης στις τροπικές χώρες δεν προβλέπονται από το Πρωτόκολλο του Κιότο (παρά μόνο για την αποδάσωση στα αναπτυσσόμενα κράτη – άρθρο 3.3). Ωστόσο, στις διαπραγματεύσεις για τη συνέχεια του Πρωτοκόλλου προβλέπεται να τεθεί σε λειτουργία ένας μηχανισμός για τη μείωση της αποδάσωσης και της υποβάθμισης των δασών στις αναπτυσσόμενες χώρες (REDD+, Reducing Emissions from Deforestation and forest Degradation).

Στην Ελλάδα, οι εκτάσεις που αποδασώνονται νόμιμα – π.χ. παραχωρήσεις για διάνοιξη δρόμων, δημιουργία τεχνητών λιμνών, λατομεία κ.λπ. – και αντίστοιχα οι εκπομπές άνθρακα που προκαλούνται είναι μικρές (κυμαίνονται μεταξύ 2-20 Kt CO₂ yr⁻¹ κατά την περίοδο 1990-2010, Petsikos 2012). Σχετικά μικρές είναι, επίσης, και οι εκτάσεις που αποδασώνονται παράνομα – εκχερσώσεις, καταλήψεις – και αντίστοιχα μικρές αναμένεται να είναι και οι εκπομπές άνθρακα.

Ωστόσο, η υποβάθμιση των δασών στην Ελλάδα είναι γεγονός και ενδεχομένως αποτελεί μια σημαντική πηγή εκπομπών, η οποία όμως παραμένει απροσδιόριστη. Ως υποβάθμιση των δασών εννοείται η μείωση της βιομάζας του δάσους και της παραγωγικής ικανότητας του εδάφους μέσω της παράνομης υλοτομίας, της βόσκησης, των πυρκαγιών ή άλλων επεμβάσεων. Η υποβάθμιση των ελληνικών δασών συντελείται κυρίως μέσω των επαναλαμβανόμενων πυρκαγιών, συχνά ακολουθούμενων από βόσκηση, διάβρωση και απώλεια εδάφους, και πολλές φορές οδηγεί μέσω της σταδιακής υποβάθμισης στην ουσιαστική, *de facto* αποδάσωση. Τα εδάφη αυτά μπορεί να μη χάνουν τον δασικό τους χαρακτήρα – και τυπικά ή νομι-

κά να μην χαρακτηρίζονται αποδασωμένα – αλλά χάνουν ανεπίστρεπτα την παραγωγική τους ικανότητα και τα αποθέματα άνθρακα που ήταν αποθηκευμένα στη βιομάζα και στο έδαφος.

Αν και η παρακολούθηση των δασών και των αποθεμάτων άνθρακα σε όλη την επικράτεια της χώρας αποτελεί υποχρέωση της Ελλάδας προς τη Σύμβαση-Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Αλλαγή, το Πρωτόκολλο του Κιότο και την ΕΕ, μέχρι σήμερα δεν υπάρχει ένα αξιόπιστο σύστημα καταγραφής της έκτασης και παρακολούθησης της κατάστασης των δασών και των αποθεμάτων άνθρακα. Καθώς η υποβάθμιση των δασών και η ερημοποίηση θεωρούνται η μεγαλύτερη περιβαλλοντική απειλή για την ελληνική ύπαιθρο, και υπό το πρίσμα των δυσσιώνων προβλέψεων για την κλιματική αλλαγή και τις επιπτώσεις της στην περιοχή μας (ξηρασία, συχνότερες και εντονότερες πυρκαγιές κ.λπ.), η λειτουργία της Εθνικής Απογραφής Δασών για την παρακολούθηση των δασών, πέρα από τυπική υποχρέωση, αποτελεί απαραίτητο εργαλείο για την προστασία τους.

Εκτός των πιέσεων στα δάση που αναφέρθηκαν – πυρκαγιές, υπερβόσκηση, παράνομες υλοτομίες κ.λπ. – η κλιματική αλλαγή αποτελεί μια επιπρόσθετη, πολύ σημαντική πίεση σε αυτά τα οικοσυστήματα, η οποία απειλεί, πέραν των άλλων προϊόντων και υπηρεσιών που προσφέρουν τα δάση, και τον άνθρακα που αυτά αποθηκεύουν. Επομένως, στα μέτρα προστασίας των δασών από τις υφιστάμενες πιέσεις θα πρέπει να περιληφθούν και μέτρα προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή. Αυτά περιλαμβάνουν την αύξηση της ανθεκτικότητας απέναντι στην ξηρασία και τις πυρκαγιές, σε ασθένειες και προσβολές εντόμων, την αύξηση της ικανότητας ανάκαμψης μετά από διαταραχές, τη διατήρηση και ενίσχυση της γενετικής ποικιλότητας, της ποικιλότητας των ειδών και της μίξης των συστάδων, τη διευκόλυνση της μετανάστευσης, την αύξηση της συγκράτησης του νερού κ.λπ. (Regato 2010).

Μεγέθυνση των υφιστάμενων αποθεμάτων άνθρακα

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφορες πρακτικές σχετικά με το πώς μπορεί η διαχείριση των δασών να χρησιμοποιηθεί για το μετριασμό της αύξησης του ατμοσφαιρικού CO₂, και οι οποίες αποσκοπούν στην αύξηση της συγκέντρωσης του άνθρακα ανά μονάδα επιφάνειας (t C ha⁻¹) (Johnson and Curtis 2001, Guo and Gifford 2002, Jandl et al. 2007). Η συγκέντρωση του άνθρακα σε ένα δάσος μπορεί να αυξηθεί είτε μέσω της αύξησης των απορροφήσεων (εισροών) μεγιστοποιώντας την προσαύξηση, με μέτρα όπως κατάλλη-

λοι δασοκομικοί χειρισμοί, λίπανση και άρδευση των εδαφών, αλλαγή ή/και μίξη των δασικών ειδών, αύξηση του περιτρώπου χρόνου κ.ά., είτε μέσω της μείωσης των εκπομπών (εκροών), μειώνοντας τις απώλειες από τη βιομάζα, τη νεκρή οργανική ύλη και το έδαφος (π.χ. με τον περιορισμό του λήμματος, τη μείωση της διάβρωσης, την εφαρμογή υλοτομιών μειωμένων επιπτώσεων κ.ά.).

Διαχείριση πυρκαγιάς

Ένας σημαντικός παράγοντας που προκαλεί μεγάλες απώλειες άνθρακα είναι οι πυρκαγιές. Οι πυρκαγιές έχουν έναν εγγενή ρόλο στη δομή και στη λειτουργία των δασικών οικοσυστημάτων, ιδίως σε περιοχές με περιοδική ξηρασία όπως η Μεσόγειος. Επομένως, οποιεσδήποτε προτάσεις για τη διαχείριση των δασών θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τον παράγοντα αυτόν.

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, οι δασικές πυρκαγιές διοχετεύουν στην ατμόσφαιρα μεγάλες ποσότητες άνθρακα κατά την καύση και μετατρέπουν για πολλά χρόνια το δάσος από χοάνη διοξειδίου του άνθρακα σε πηγή. Η καταστολή των πυρκαγιών που λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια του τελευταίου αιώνα (Swetnam et al. 1999) έχει ως αποτέλεσμα αφενός τον περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και αφετέρου την αύξηση της πυκνότητας των δασών (Conington et al. 1994). Αυτός θεωρείται ότι είναι ένας βασικός λόγος που τα δάση των ΗΠΑ αποτέλεσαν σημαντική χοάνη άνθρακα κατά το διάστημα αυτό (Houghton 1999, Tilman et al. 2000), ενώ το ίδιο θεωρείται ότι συμβαίνει σε πολλές χώρες της εύκρατης ζώνης και στην Ελλάδα. Ωστόσο, η καταστολή αυτή, μαζί με την εγκατάλειψη της διαχείρισης των δασών, συνετέλεσε στη συσσώρευση μεγάλων ποσοτήτων καύσιμης ύλης με αποτέλεσμα τα πυκνά δάση που έχουν προκύψει να είναι ιδιαίτερα ευάλωτα σε καταστροφικές, μεγάλης έντασης πυρκαγιές. Αυτό φάνηκε καθαρά από τις πολλές, μεγάλες πυρκαγιές των τελευταίων ετών, όπως και στις πυρκαγιές της Πελοποννήσου το 2007.

Στην πραγματικότητα, η πολιτική καταστολής της πυρκαγιάς μπορεί να καθυστερήσει, αλλά δεν μπορεί να αποτρέψει την πυρκαγιά σε βάθος χρόνου (Jandl et al. 2007). Η καταστολή οδηγεί στη συσσώρευση βιομάζας, η οποία αυξάνει το ρίσκο καταστροφικών πυρκαγιών μεγάλης έντασης, οι οποίες προκαλούν μεγαλύτερες απώλειες άνθρακα, όχι μόνο από τη βιομάζα και τον δασικό τάπητα, αλλά και από το έδαφος. Για το λόγο αυτόν, και υπό το πρίσμα των προβλεπόμενων κλιματικών αλλαγών που θα επιφέρουν μεγαλύτερη ξηρασία και περισσότερες ημέρες το χρόνο με υψηλό κίνδυνο εμφάνισης πυρκαγιάς (WWF Ελλάς

2009), δεν προτείνεται να εφαρμοστούν στα μεσογειακά δάση μέτρα που στοχεύουν στη μεγιστοποίηση της συγκέντρωσης άνθρακα στη βιομάζα (Nabuurs et al. 2008). Αντίθετα, θα πρέπει να εφαρμόζεται διαχείριση η οποία θα αποτρέψει τη συσσώρευση καύσιμης ύλης και θα στοχεύει στη δημιουργία πυρανθεκτικών δασών, μειώνοντας τον κίνδυνο μεγάλης έντασης πυρκαγιάς. Η πυροπροστασία δεν θα πρέπει να επικεντρώνεται στην καταστολή αλλά στην πρόληψη, με την κατάλληλη διαχείριση του δάσους και της καύσιμης ύλης.

Για τη μεγιστοποίηση της δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα στα ελληνικά δάση προτείνεται η καλλιέργεια του δάσους με κατάλληλες αραιώσεις, ώστε να διατηρούνται υψηλοί ρυθμοί προσαύξησης (και επομένως δέσμευσης CO₂), χωρίς να αυξάνεται υπερβολικά η πυκνότητα της βιομάζας και ο κίνδυνος πυρκαγιάς, και χρήση της παραγόμενης βιομάζας (λήμμα) σε μακράς διάρκειας προϊόντα ξύλου ή/και ως βιοκαύσιμα. Στα μη παραγωγικά δάση, τα οποία βρίσκονται εκτός διαχείρισης και τα οποία είναι συνήθως και τα πιο εύφλεκτα (π.χ. πευκοδάση χαμηλών υψομέτρων, αείφυλλα πλατύφυλλα), θα πρέπει να λαμβάνονται μέτρα πρόληψης των πυρκαγιών που περιλαμβάνουν τη διαχείριση της καύσιμης ύλης. Η μετα-ανάλυση των Fulé et al. (2012) έδειξε ότι οι αραιώσεις και η ελεγχόμενη φωτιά αποκαθιστούν το φυσικό καθεστώς του φαινομένου (συχνότητα και ένταση), οδηγώντας σε χαμηλής έντασης και επιπτώσεων πυρκαγιές, ιδιαίτερα όταν αυτές οι δύο μέθοδοι συνδυάζονται. Στη βιβλιογραφία περιγράφονται διάφορα μέτρα για τη διαχείριση της καύσιμης ύλης, όπως η μείωσή της και αύξηση της ασυνέχειας αυτής (με μηχανικές επεμβάσεις, με χρήση ελεγχόμενης φωτιάς ή με βόσκηση), η επιλογή ή ευνόηση λιγότερων εύφλεκτων ειδών, η δημιουργία αντιπυρικών ζωνών ή ζωνών με λιγότερο εύφλεκτα είδη (π.χ. πλατύφυλλα ανάμεσα σε κωνοφόρα), οι κλαδεύσεις των δένδρων για τον περιορισμό των επικόρυφων πυρκαγιών κ.ά. (Graham et al. 2004, Agee and Skinner 2005). Η εξαγόμενη βιομάζα (ξύλο, υπολείμματα υλοτομιών, κλαδεύσεων και καθαρισμών) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή βιοενέργειας, αντικαθιστώντας άλλες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Η χρήση της δασικής βιομάζας ως βιοκαυσίμου είναι μια ευνοϊκή προοπτική για να προαχθεί η διαχείριση της καύσιμης ύλης και να μειωθούν οι δαπάνες των επεμβάσεων (Rigolot et al. 2009).

Η μετάβαση σε ένα καθεστώς σπανιότερων πυρκαγιών με μικρότερη ένταση αποτρέπει τις μεγάλες απώλειες άνθρακα από το οικοσύστημα, οι οποίες προκαλούνται από τις μεγάλης έντασης πυρκαγιές με την καύση, την οξειδωση, την αποσύνθεση της οργανικής ύλης και τη διάβρωση του εδάφους.

Ανόρθωση πρεμνοφυών δασών

Από την άλλη πλευρά, ένα μεγάλο μέρος των δασών της Ελλάδας έχει σοβαρά προβλήματα στη δομή, στο ύψος και στην ποιοτική σύνθεση του ξυλαποθέματός του. Τα δάση αυτά μπορούν να αποθηκεύσουν περισσότερο άνθρακα τις επόμενες δεκαετίες και σε αυτές τις περιπτώσεις ενδείκνυται η καλλιέργεια και η εφαρμογή μέτρων ανόρθωσης και πύκνωσης των δασών.

Τα δρυοδάση, τα οποία αποτελούν σημαντικότερους σχηματισμούς στον Ελλαδικό χώρο, έχουν υποστεί έντονη υποβάθμιση, τόσο της δομής και της σύνθεσης, όσο και του εδάφους τους, ενώ συνεχίζουν στην πλειοψηφία τους να διαχειρίζονται πρεμνοφυώς (Τσιτσώνη 2003). Η πρεμνοφυής διαχείριση διατηρεί το ξυλαπόθεμα σε χαμηλά επίπεδα, η απόληψη του υλικού λεπτών διαστάσεων έχει ως αποτέλεσμα την απομάκρυνση σημαντικών ποσοτήτων ανόργανων συστατικών από το οικοσύστημα, ενώ οι αποψιλωτικές υλοτομίες και η περιοδική αποκάλυψη του εδάφους προκαλούν την απώλεια άνθρακα από το δασικό τάπητα και το έδαφος.

Η αναγωγή των πρεμνοφυών δασών σε σπερμωφή, πέραν όλων των άλλων λόγων που την επιβάλλουν, έχει πολύ μεγάλο δυναμικό δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα. Η αναγωγή δε με καλλιεργητικά μέτρα εκτιμάται ότι αποτελεί ένα πολύ αποδοτικό οικονομικά μέτρο αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής. Σύμφωνα με τον Βέργο (2000), το 1/3 των δρυοδασών της χώρας (περίπου 400.000 εκτάρια), στις καλύτερες ποιότητες τόπου, μπορεί να τεθεί σε αναγωγή άμεσα και χωρίς μεγάλες δαπάνες, με την παράταση του περιόδου χρόνου και εφαρμόζοντας τα κατάλληλα καλλιεργητικά μέτρα (αναγωγικές αραιώσεις). Οι ετήσιες απορροφήσεις CO₂, στην περίπτωση που τεθούν οι εκτάσεις αυτές σε αναγωγή, είναι της τάξης των 2.000-3.000 Kt CO₂ yr⁻¹ για τα επόμενα 70-100 χρόνια, υπολογίζοντας τον άνθρακα που αποθηκεύεται μόνο στη βιομάζα του δάσους. Οι απορροφήσεις αυτές αντιστοιχούν στο 10% περίπου των ετήσιων εκπομπών από όλες τις χερσαίες, θαλάσσιες και εναέριες μεταφορές στην Ελλάδα.

Πέρα από την αύξηση των αποθεμάτων άνθρακα στη δασική βιομάζα, η αναγωγή αναστέλλει τις απώλειες άνθρακα από τα εδάφη, που προκαλούνται κατά την πρεμνοφυή διαχείριση και τις αποψιλωτικές υλοτομίες, και αυξάνει τα αποθέματα άνθρακα στο έδαφος και στο δασικό τάπητα. Ενώ ο άνθρακας στη βιομάζα ελέγχεται απευθείας με τη διαχείριση του δάσους, η διαχείριση του άνθρακα των εδαφών γίνεται έμμεσα μέσω της βλάστησης. Οι στρατηγικές μετριασμού που στοχεύουν τον εδαφικό άνθρακα είναι αποτελεσματικές γιατί, πέραν του γεγονότος της αύξησης των απο-

θεμάτων άνθρακα, επιπλέον ο άνθρακας αυξάνει την παραγωγικότητα του εδάφους, βελτιώνοντας τα χαρακτηριστικά του (π.χ. υδατοσυγκράτηση, διαθεσιμότητα θρεπτικών).

Μελέτες σε συστάδες δρυός στον Χολομώντα (Σμύρης κ.ά. 1999) και στα Κερδύλλια όρη (Θανάσης και Ζάγκας 2001) έδειξαν ότι οι αναγωγικές αραιώσεις επιδρούν θετικά στην αύξηση του όγκου. Επίσης, τα αποτελέσματα των αναγωγικών αραιώσεων σε ένα δάσος αριάς στη Χαλκιδική έδειξαν ότι βελτιώθηκε η ποιότητα και η οικολογική σταθερότητα των συστάδων και αυξήθηκε η αντοχή τους έναντι των πυρκαγιών (Hatzistathis et al. 1996, Zagas et al. 1998). Σε γενικές γραμμές, οι χειρισμοί που αφήνουν τα υπολείμματα των υλοτομιών στο δάσος, καθώς και οι επιλεκτικές υλοτομίες όπου διατηρείται η συνεχής κάλυψη του εδάφους, έχουν μικρότερες επιπτώσεις στην αναπνοή και στα αποθέματα του εδαφικού άνθρακα (Johnson and Curtis 2001). Αντίθετα, οι αποψιλωτικές υλοτομίες μετατρέπουν το δάσος από χοάνη σε πηγή άνθρακα για πολλά χρόνια (Law et al. 2001). Για το λόγο αυτόν, η ομάδα εργασίας της ΕΕ για τις δασικές χοάνες (ECCP 2003) πρότεινε ότι η δασοπονία συνεχούς κάλυψης με επιλεκτικές υλοτομίες μπορεί να είναι ένα αποτελεσματικό μέτρο για τη μείωση των εκπομπών εδαφικού άνθρακα, σε αντιδιαστολή με τις αποψιλωτικές υλοτομίες.

Για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση ενός προγράμματος δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα στη δασοπονία θα πρέπει να συνεκτιμηθούν και οι τυχόν εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου εκτός των ορίων του προγράμματος, σε άλλες τοποθεσίες ή σε άλλους τομείς δραστηριότητας (leakages). Για παράδειγμα, η αναγωγή ενός πρεμνοφυούς δάσους με την αύξηση του περιόδου χρόνου θα αυξήσει τις απορροφήσεις και τα αποθέματα άνθρακα στο δάσος, αλλά θα μειώσει τις διαθέσιμες ποσότητες καυσόξυλου. Αν για την κάλυψη των αναγκών σε καυσόξυλα χρησιμοποιηθούν καυσόξυλα από κάποιο άλλο δάσος ή ορυκτά καύσιμα, θα δημιουργηθούν εκπομπές οι οποίες θα πρέπει να ληφθούν υπόψη.

Δημιουργία νέων αποθεμάτων άνθρακα

Η εγκατάσταση και η ανάπτυξη ενός δάσους έχει ως αποτέλεσμα τη δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα στις αποθήκες της βιομάζας και της νεκρής οργανικής ύλης, και σε μικρότερο βαθμό και με πιο αργό ρυθμό στο έδαφος. Για αυτόν το λόγο, έχει προταθεί η επέκταση των δασών ως ένα σημαντικό μέτρο μετριασμού της κλιματικής αλλαγής.

Η εγκατάσταση ενός δάσους διακρίνεται σε αναδάσωση ή δάσωση, ανάλογα με την προηγούμενη χρήση/κάλυψη της γης. Η αναδάσωση λαμβάνει

χώρα σε υποβαθμισμένες δασικές εκτάσεις, όπου το δάσος έχει καταστραφεί ύστερα από κάποια διαταραχή ή λόγω μακροχρόνιων ανθρωπογενών πιέσεων. Αν και με τον όρο αναδάσωση συνήθως εννοείται η τεχνητή ελάνδρυνση του δάσους, σε κάποιες περιπτώσεις αυτή μπορεί να επιτευχθεί μέσω της φυσικής αναγέννησης με την άρση των αιτιών της υποβάθμισης, εκεί όπου οι συνθήκες είναι κατάλληλες. Σύμφωνα με τον Βέργο (2000), στην Ελλάδα υπάρχουν 1.500.000 εκτάρια γυμνών και μερικώς δασοσκεπών εκτάσεων που είναι κατάλληλα για αναδάσωση. Η αναδάσωση των εκτάσεων αυτών, εκτός από τις προστατευτικές, υδρονομικές, κοινωνικές, οικονομικές και άλλες ωφέλειες, μπορεί να δεσμεύσει και να αποθηκεύσει σημαντικές ποσότητες άνθρακα και να συμβάλει στο μετριασμό της κλιματικής αλλαγής.

Με τον όρο δάσωση εννοούμε την εγκατάσταση του δάσους σε μη δασικές εκτάσεις (π.χ. γεωργικές εκτάσεις, λατομεία), οι οποίες εποικίζονται για πρώτη φορά από δασική βλάστηση. Η δάσωση γίνεται είτε φυσικά, ύστερα από την εγκατάλειψη της προηγούμενης χρήσης και τη φυσική αναγέννηση του δάσους μέσω της οικολογικής διαδοχής, είτε τεχνητά, με σπορά ή φύτευση. Η συσσώρευση άνθρακα στη βιομάζα μετά τη δάσωση διαφέρει σημαντικά, ανάλογα με το δασικό είδος και τις τοπικές συνθήκες, και κυμαίνεται παγκοσμίως μεταξύ 1 και 35 t CO₂ ha⁻¹ yr⁻¹ (Richards and Stokes 2004). Στο έδαφος, σύμφωνα με την επισκόπηση των Post and Kwon (2000), η συγκέντρωση του άνθρακα μετά τη δάσωση γεωργικών εδαφών αυξάνει περίπου 0,3 t C ha⁻¹ yr⁻¹ κατά μέσο όρο (κυμαίνεται μεταξύ 0-3 t C ha⁻¹ yr⁻¹) για τις διάφορες κλιματικές ζώνες και συνθήκες. Η μετα-ανάλυση των Guo and Gifford (2002) έδειξε αύξηση στον εδαφικό άνθρακα κατά 18% σε γεωργικά εδάφη που δασώθηκαν τεχνητά, ενώ η αύξηση αυτή ήταν μεγαλύτερη (53%) στα γεωργικά εδάφη που δασώθηκαν φυσικά.

Κατά την πολύχρονη παρακολούθηση μιας φυτείας πεύκης στη Β. Καρολίνα των ΗΠΑ, όπου το δάσος ήταν σημαντική χοάνη άνθρακα, βρέθηκε ότι το 80% του εισερχόμενου άνθρακα αποθηκεύθηκε στη βιομάζα, κάποιο μέρος στο δασικό τάπητα, και μόνο ένα πολύ μικρό ποσοστό παρέμεινε στο ανόργανο έδαφος (Richter et al. 1999). Η μελέτη έξι χρονοσειρών δασωμένων γεωργικών εκτάσεων στη βόρεια Ευρώπη έδειξε ότι στο έδαφος αποθηκεύεται από 0% μέχρι 30% του δεσμευμένου άνθρακα (Vesterdal et al. 2006). Οι διαθέσιμες μακροχρόνιες μελέτες δείχνουν ότι, σε γενικές γραμμές, τα αποθέματα άνθρακα στο ανόργανο έδαφος αυξάνονται με την αύξηση της ηλικίας του δάσους (Brown and Lugo 1990, Richter et al. 1999, Post and Kwon 2000, Guo and Gifford 2002, Paul et al. 2003, DeGryze et al. 2004).

Η αποσύνθεση της οργανικής ύλης στο έδαφος σχηματίζει πιο σταθερές αποθήκες άνθρακα. Οι αποθήκες αυτές μπορεί να χρειάζονται πολύ χρόνο να αναπτυχθούν, αλλά έχουν μεγάλη σημασία στην εξασφάλιση της διάρκειας αποθήκευσης του άνθρακα. Μελέτες στην Ευρώπη και τη Β. Αμερική έδειξαν ότι η χρήση ενδημικών δασικών ειδών, το ριζικό σύστημα των οποίων καταλαμβάνει διαφορετικά τμήματα του εδαφικού προφίλ, μπορεί να αυξήσει τον άνθρακα στα υποβαθμισμένα εδάφη (Pretzch 2005, Jandl et al. 2007). Είδη με ριζικό σύστημα αποθηκεύουν άνθρακα στον οργανικό ορίζοντα, ενώ βαθύριζα είδη αποθηκεύουν άνθρακα βαθύτερα, στο ανόργανο έδαφος.

Πολλές χώρες ανέπτυξαν μεγάλα προγράμματα δάσωσης/αναδάσωσης κατά τη διάρκεια του 20ού αιώνα. Η Ευρωπαϊκή Ένωση και οι ΗΠΑ διαθέτουν επιδοτήσεις στους γεωργούς που ενδιαφέρονται να μετατρέψουν τις εκτάσεις τους σε δάση, και ένας από τους βασικούς στόχους των προγραμμάτων αυτών είναι ο μετριασμός της κλιματικής αλλαγής. Στην Ελλάδα, περίπου 33 Kha εντάχθηκαν στο μέτρο της δάσωσης γεωργικών γαιών κατά την περίοδο 1994-2006 (καν. 2080/1992 και 1257/1999). Υπολογίζεται ότι στις εκτάσεις αυτές απορροφώνται σήμερα και αποθηκεύονται στη βιομάζα του δάσους περίπου 350 Kt CO₂ ετησίως, απορροφήσεις οι οποίες συμπεριλαμβάνονται, σύμφωνα με το άρθ. 3.3 του Πρωτοκόλλου του Κιότο, στις προσπάθειες της χώρας για επίτευξη του εθνικού στόχου μετριασμού των εκπομπών του φαινομένου του θερμοκηπίου (Petsikos 2010). Άλλες μεσογειακές χώρες εκμεταλλεύτηκαν στο πολλαπλάσιο το μέτρο αυτό (Ισπανία: 1.023 Kha, Ιταλία: 543 Kha), με αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση των δασικών εκτάσεων και των απορροφήσεων διοξειδίου του άνθρακα. Σε παγκόσμιο επίπεδο, ο Cannell (2003) εκτίμησε τη δυνατότητα συνεισφοράς των δασώσεων στον κύκλο άνθρακα βάσει των διαθέσιμων εκτάσεων, και κατέληξε ότι υπάρχει μια θεωρητική δυνατότητα απορρόφησης 2-4 Gt C yr⁻¹, μια ρεαλιστική δυνατότητα 1-2 Gt C yr⁻¹ και μια επιτεύξιμη δυνατότητα 0,2-1 Gt C yr⁻¹.

Χρήση προϊόντων ξύλου και βιοενέργειας

Η αύξηση στη χρήση προϊόντων ξύλου και βιοενέργειας από αειφορικά διαχειριζόμενα δάση συμβάλλει στο μετριασμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Οι υλοτομίες μειώνουν τα αποθέματα άνθρακα στο δάσος, ο περιεχόμενος στο λήμμα άνθρακας, όμως, δεν επιστρέφει κατευθείαν στην ατμόσφαιρα. Ένα μεγάλο μέρος αυτού αποθηκεύεται, για μικρότερο ή για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, στα προϊόντα του ξύλου, τα οποία αποτελούν μια επιπλέον, εκτός οι-

κοσυστήματος, αποθήκη άνθρακα. Ο χρόνος παραμονής ποικίλει ανάλογα με τη χρήση, από μερικές εβδομάδες (π.χ. χαρτί) μέχρι δεκαετίες ή αιώνες (π.χ. κατασκευαστική ξυλεία, έπιπλα). Επίσης, μια άλλη πολύ σημαντική ωφέλεια της χρήσης προϊόντων ξύλου είναι ότι αντικαθιστούν άλλα κατασκευαστικά υλικά, όπως τσιμέντο, αλουμίνιο, πλαστικά κ.ά., η παραγωγή και η επεξεργασία των οποίων παράγουν μεγάλες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Μέχρι πρόσφατα, η σημασία των προϊόντων ξύλου ως αποθηκών άνθρακα δεν είχε αναγνωριστεί στις διεθνείς προσπάθειες μετριασμού των εκπομπών και συνήθως δεν υπολογίζονταν στις απογραφές αερίων του θερμοκηπίου. Προς το παρόν, κατά την πρώτη περίοδο δέσμευσης του Πρωτοκόλλου του Κιότο, η συνεισφορά της αποθήκης αυτής δεν προσμετράται κατά την αξιολόγηση των χωρών ως προς την επίτευξη του στόχου περιορισμού των εκπομπών τους, ωστόσο, στη συνδιάσκεψη της UNFCCC στο Durban το 2011 αποφασίστηκε η προσμέτρησή της κατά τη δεύτερη περίοδο δέσμευσης.

Στην περίπτωση που η δασική βιομάζα χρησιμοποιείται για παραγωγή βιοενέργειας, είτε ως καυσόξυλο είτε ως άλλης μορφής βιοκαύσιμο, δεν αυξάνονται τα αποθέματα άνθρακα, αλλά μειώνονται οι εκπομπές από τον τομέα της ενέργειας, με την αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων που θα χρησιμοποιούνταν σε διαφορετική περίπτωση. Τα δάση μπορούν να αποτελέσουν, άμεσα ή έμμεσα, τον προμηθευτή βιομάζας για βιοενέργεια – και πέρα από τα καυσόξυλα – χρησιμοποιώντας τα υπολείμματα των υλοτομιών, των καθαρισμών του δάσους, των βιομηχανικών ξύλου κ.λπ., εφόσον αυτό δεν έρχεται σε αντίθεση με άλλες πολιτικές (π.χ. προστασία της βιοποικιλότητας, διατήρηση των θρεπτικών του εδάφους). Επίσης, η χρήση της δασικής βιομάζας για βιοενέργεια μπορεί να μειώσει τις εισαγωγές πετρελαίου και φυσικού αερίου, να βελτιώσει την ποιότητα του περιβάλλοντος και να προωθήσει την εγχώρια οικονομική ανάπτυξη υποστηρίζοντας τις αγροτικές οικονομίες.

Δάση και διεθνείς πολιτικές μετριασμού της κλιματικής αλλαγής

Το Υπουργικό Συμβούλιο για την Ατμοσφαιρική Ρύπανση και την Κλιματική Αλλαγή που έγινε το 1989 στο Noordwijk της Ολλανδίας, κατέληξε σε μια κοινή δήλωση που υπέγραψαν 67 υπουργοί περιβάλλοντος, αποτελώντας έτσι την πρώτη διακρατική συμφωνία ειδικά για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Μεταξύ άλλων, πρό-

τεινε την αύξηση της παγκόσμιας δασικής κάλυψης και την αειφορική διαχείριση των δασών, με σκοπό το μετριασμό της κλιματικής αλλαγής. Λίγα χρόνια αργότερα, υιοθετήθηκε η Σύμβαση-Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Αλλαγή (στη συνέχεια Σύμβαση UNFCCC, 1992). Η Σύμβαση έχει ως απώτερο στόχο τη «σταθεροποίηση των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, σε επίπεδα τέτοια ώστε να προληφθούν επικίνδυνες επιπτώσεις στο κλίμα από τις ανθρώπινες δραστηριότητες». Το άρθρο 4 της Σύμβασης αναφέρεται στη δέσμευση όλων των Μερών της Σύμβασης να εφαρμόσουν μέτρα για το μετριασμό της κλιματικής αλλαγής που στοχεύουν στις εκπομπές από τις πηγές και τις απορροφήσεις από τις χοάνες. Ειδικά τα Μέρη του Παραρτήματος I της Σύμβασης (βιομηχανικά κράτη και κράτη με οικονομία σε μετάβαση) θα πρέπει να υιοθετήσουν πολιτικές και να λάβουν μέτρα ώστε να περιορίσουν τις ανθρωπογενείς εκπομπές και να προστατεύσουν και να μεγεθύνουν τις χοάνες και τις αποθήκες αερίων του θερμοκηπίου (άρθρο 4.2a). Ο στόχος για τη μείωση των εκπομπών μέχρι το 2000 στα επίπεδα του 1990 περιλαμβάνει, επίσης, εκπομπές και απορροφήσεις (άρθρο 4.2b), ωστόσο δεν περιγράφεται στη Σύμβαση πώς ακριβώς οι απορροφήσεις θα συμμετέχουν στο στόχο αυτόν.

Το Πρωτόκολλο του Κιότο (το Πρωτόκολλο, στη συνέχεια) υιοθετήθηκε το 1997 στο πλαίσιο της Σύμβασης και συνιστά τη νομική δέσμευση των αναπτυγμένων κρατών να περιορίσουν, μεμονωμένα ή σε συνεργασία με άλλες χώρες, τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου που δεν ελέγχονται από το Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ (συγκεκριμένα CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs και SF₆). Αποτελεί το πρώτο σημαντικό βήμα των εθνών του κόσμου να περιορίσουν τις εκπομπές τους, δημιουργώντας τη μεγαλύτερη και πιο φιλόδοξη περιβαλλοντική νομοθεσία μέχρι σήμερα.

Το Παράρτημα Β του Πρωτοκόλλου περιλαμβάνει τους ποσοτικοποιημένους στόχους περιορισμού των εκπομπών για κάθε Μέρος του Παραρτήματος I κατά την 1η περίοδο δέσμευσης (2008-2012) σε σχέση με ένα προκαθορισμένο έτος βάσης (συνήθως το 1990). Η Ευρωπαϊκή Ένωση, η οποία αποτελεί Συμβαλλόμενο Μέρος του Πρωτοκόλλου, δεσμεύτηκε για μείωση των εκπομπών κατά 8%, ενώ η Ελλάδα, στο ευρωπαϊκό πλαίσιο «κατανομής των βαρών», έχει δεσμευτεί να περιορίσει την αύξηση των εκπομπών της στο +25% σε σχέση με το έτος βάσης. Τα Συμβαλλόμενα Μέρη καλούνται να μειώσουν τις εκπομπές τους από πέντε τομείς δραστηριότητας: ενέργεια, βιομηχανικές διεργασίες, χρήση διαλυτών και άλλων προϊόντων, γεωργία και απόβλητα.

Το άρθρο 3.3 του Πρωτοκόλλου ορίζει ότι στην αξιολόγηση των Μερών ως προς το στόχο μείωσης των εκπομπών θα προσμετρηθούν και οι εκπομπές και οι απορροφήσεις από τις δραστηριότητες Δάσωση, Αναδάσωση και Αποδάσωση που έλαβαν χώρα από το 1990 και μετά, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα στα Μέρη να αυξήσουν τις δασώσεις/αναδασώσεις και να μειώσουν τις αποδασώσεις για την επίτευξη του στόχου τους. Το άρθρο 3.4 ορίζει ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εθελοντική βάση και άλλες δραστηριότητες από τον τομέα των χρήσεων γης και της δασοπονίας, οι οποίες δεν ορίζονται από το Πρωτόκολλο αλλά θα αποφασισθούν στη συνέχεια από τη Σύνοδο των Συμβαλλόμενων Μερών.

Επιφυλάξεις για τη χρήση μέτρων στον δασικό τομέα

Ενώ η προστασία των χερσαίων αποθεμάτων άνθρακα και η μείωση των εκπομπών από τις αποδασώσεις αναγνωρίζονται ευρέως ως απαραίτητες για το μετριασμό της κλιματικής αλλαγής, η ένταξη στο Πρωτόκολλο του Κιότο δράσεων στη δασοπονία για την αύξηση των απορροφήσεων εγείρει αντιρρήσεις και αποτέλεσε και αποτελεί σημείο έντονης αντιπαράθεσης στις διεθνείς διαπραγματεύσεις για τις πολιτικές αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής. Πολλά κράτη, εμπειρογνώμονες και μη κυβερνητικές οργανώσεις, εξέφρασαν από νωρίς τις επιφυλάξεις τους ότι κάποιες επιλογές μπορεί να αποδειχθεί ότι δεν συντελούν στην καθαρή αύξηση των απορροφήσεων και, τελικά, υπονομούν τις προσπάθειες μείωσης των εκπομπών από την πηγή τους.

Οι Sanz et al. (2004) περιγράφουν τις επιφυλάξεις που έχουν εκφραστεί, οι οποίες υπήρξαν κομβικές στις διαπραγματεύσεις για τη συμμετοχή των δασών στο Πρωτόκολλο του Κιότο. Καθώς η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου αγγίζει το σύστημα παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας, προτάθηκε, αντί αυτού, η αύξηση των απορροφήσεων διοξειδίου του άνθρακα από τα δάση. Ωστόσο, βασικό μειονέκτημα των μέτρων αποθήκευσης άνθρακα στη βιομάζα και στο έδαφος των δασών είναι η μη μονιμότητά τους (non-permanence), αφού ο άνθρακας αυτός μπορεί να διοχετευθεί μελλοντικά πάλι στην ατμόσφαιρα αν το δάσος καταστραφεί. Με τη χρήση των μέτρων αυτών, στην ουσία επιτρέπεται ορυκτός άνθρακας, μόνιμα αποθηκευμένος στο υπέδαφος, να μεταφερθεί σε ασταθείς βιολογικές αποθήκες και να εισέλθει στον δυναμικό κύκλο του άνθρακα.

Για το λόγο αυτόν, και παρά τα λοιπά περιβαλλοντικά και κοινωνικά οφέλη που έχουν οι δράσεις στη δασοπονία, για το σκοπό της αντιμετώπισης του φαινομένου του θερμοκηπίου η αποφυγή εκπομπής ενός τόνου άνθρακα είναι ασφαλέστερη και, επομένως, προτιμότερη από τη δημιουργία μιας ασταθούς αποθήκης ενός τόνου άνθρακα στο δάσος. Οι χερσαίες χοάνες είναι σημαντικές αλλά προσωρινές αποθήκες άνθρακα, οι οποίες μπορούν να προσφέρουν πολύτιμο χρόνο για τη μείωση των εκπομπών, αλλά δεν μπορούν να αποτελέσουν μόνιμες αντισταθμίσεις των εκπομπών. Η ένταξη της διάστασης της προστασίας των υφιστάμενων αποθεμάτων άνθρακα των δασών και της επαύξησης της δυναμικότητας της χερσαίας χοάνης άνθρακα στη διαχειριστική πρακτική και στη χάραξη περιβαλλοντικής πολιτικής είναι απαραίτητη. Ωστόσο, μέτρα αύξησης των απορροφήσεων από δράσεις δάσωσης και διαχείρισης δασών θα πρέπει να αντιμετωπίζονται ως επικουρικά και επιπρόσθετα, και δεν θα πρέπει να αποσπάσουν οικονομικούς ή πολιτικούς πόρους από οριστικές λύσεις μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από την πηγή τους.

Πολλοί εξέφρασαν, επίσης, τη σοβαρή επιφυλάξη ότι οι εγγενείς επιστημονικοί και τεχνικοί περιορισμοί στην εκτίμηση και την επαλήθευση του μεγέθους των απορροφήσεων άνθρακα, μπορεί να προκαλέσουν ισχυρισμούς από κάποιες χώρες για μεγεθυμένες απορροφήσεις (Sanz et al. 2004), ενώ ο Victor (2001) αναφέρει ότι οι δασικές χοάνες προσφέρουν τεράστιες δυνατότητες στις κυβερνήσεις για «μαγείρεμα των στοιχείων». Επίσης, αν δεν προσμετρηθούν μόνο οι άμεσα ανθρωπογενείς δραστηριότητες, όπως ορίζει το Πρωτόκολλο, υπάρχει ο κίνδυνος μέρος της δασικής χοάνης που έχει αναπτυχθεί φυσικά ως αποτέλεσμα της κλιματικής αλλαγής και της ανθρωπογενούς δραστηριότητας (π.χ. από τη λίπανση CO₂ και N) να προσμετρηθεί ως μέρος των δράσεων που αναπτύχθηκαν για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής. Ο διαχωρισμός μεταξύ των φυσικών φαινομένων και των ανθρώπινων δράσεων παραμένει ένα από τα πιο δύσκολα θέματα στο διάλογο για τις χοάνες (Schlamadinger et al. 2007).

Σημαντικές επιφυλάξεις διατυπώθηκαν επίσης σχετικά με τη συμμετοχή της Δασοπονίας στους Ευέλικτους Μηχανισμούς του Πρωτοκόλλου και την αποτελεσματικότητα των προγραμμάτων δημιουργίας αντισταθμίσεων άνθρακα (carbon offsets) από το δασικό τομέα, για χρήση είτε στα πλαίσια του Πρωτοκόλλου ή άλλων σχημάτων εμπορίας άνθρακα, είτε στην εθελοντική αγορά άνθρακα². Για

² Τα προγράμματα αυτά εφαρμόζονται σε αναπτυσσόμενες χώρες, οι οποίες δεν έχουν υποχρεώσεις μείωσης ή περιορισμού των εκπομπών, και η απογραφή εκπομπών και απορροφήσεων γίνεται σε επίπεδο προγράμματος.

την επιτυχία των προγραμμάτων αυτών σημαντική είναι η εξασφάλιση ότι η δέσμευση και η αποθήκευση άνθρακα είναι επιπρόσθετη αυτής που θα υπήρχε χωρίς την εφαρμογή του προγράμματος (additionality) και ότι η αύξηση των αποθεμάτων άνθρακα που επιτυγχάνει ένα πρόγραμμα δεν θα προκαλέσει τη μείωση των αποθεμάτων κάπου αλλού (leakages).

Κανονιστικό πλαίσιο για τη συμμετοχή των LULUCF στο Πρωτόκολλο

Στην αντιπαράθεση σχετικά με τη συμμετοχή της δασοπονίας στις πολιτικές μετριασμού, μεγάλη σημασία για την αποτελεσματικότητα των μέτρων έχει το κανονιστικό πλαίσιο για το σύστημα προσμέτρησης που θα εφαρμοστεί (για τον έλεγχο της συμμόρφωσης σε σχέση με τους ποσοτικούς στόχους μείωσης ή περιορισμού των εκπομπών). Καθώς οι στόχοι μείωσης των εκπομπών του Πρωτοκόλλου είχαν τεθεί πριν αποφασισθεί πώς και σε ποιο βαθμό οι δραστηριότητες από τον τομέα των χρήσεων γης και δασοπονίας (και κυρίως η διαχείριση δασών) θα χρησιμοποιηθούν για την επίτευξη των στόχων, καθώς και λόγω των ιδιαιτεροτήτων και αβεβαιοτήτων που συνδέονται με τον τομέα αυτό, την υιοθέτηση του Πρωτοκόλλου ακολούθησε μια περίοδος έντονων διαπραγματεύσεων, η οποία οδήγησε τελικά σε ένα πολύπλοκο σύστημα προσμέτρησης για τις LULUCF (Fry 2002, Schulze et al. 2002, Schlamadinger et al. 2007). Η γλώσσα δε που χρησιμοποιείται για τις LULUCF έχει χαρακτηριστεί ως «περίτλοκη, δυσνόητη και απρόσιτη» (Yamin 1998), ενώ η Γραμματεία της Σύμβασης προειδοποίησε ότι η ορολογία σχετικά με τις χοάνες μπορεί να προκαλέσει σύγχυση, και για το λόγο αυτόν η ακρίβεια στη χρήση της είναι πολύ σημαντική. Η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή ανέλαβε να συγκεντρώσει την απαραίτητη επιστημονική και τεχνική πληροφόρηση για το θέμα των Χρήσεων Γης, των Αλλαγών Χρήσεων Γης και της Δασοπονίας σε μια Ειδική Αναφορά (Special Report on LULUCF, IPCC, 2000).

Μετά το ναυάγιο των διαπραγματεύσεων στη Χάγη (COP6, 2000), το κανονιστικό πλαίσιο για τη συμμετοχή και την προσμέτρηση των LULUCF αποφασίστηκε με τις συμφωνίες της Βόννης (COP6bis, 2001) και του Μαρακές (COP7, 2001). Η απόφαση 11/CP.7 καθόρισε τις δραστηριότητες που θα συμμετέχουν, τους ορισμούς αυτών, και τον τρόπο και τους κανόνες προσμέτρησης, προσπαθώντας να συμβιβάσει τις διαφορετικές αντιλήψεις και να εξασφαλίσει την περιβαλλοντική

ακεραιότητα του Πρωτοκόλλου. Οι δραστηριότητες που αποφασίστηκε να είναι επιλέξιμες στο πλαίσιο του άρθρου 3.4 για την πρώτη περίοδο δέσμευσης είναι: α) η διαχείριση δασών, β) η διαχείριση καλλιιεργειών, γ) η διαχείριση βοσκοτόπων και δ) η επαναβλάστηση. Η Ελλάδα, όπως και τα περισσότερα Μέρη του Παραρτήματος I, επέλεξε μόνο τη Διαχείριση Δασών. Καθώς ο διαχωρισμός μεταξύ άμεσης και έμμεσης ανθρωπογενούς επίδρασης στην αύξηση των δασών είναι πολύ δύσκολος και δεν υπάρχει γενικά αποδεκτή μεθοδολογία για να επιτευχθεί αυτός, αλλά και για την κάλυψη των υπόλοιπων επιφυλάξεων που αναφέρθηκαν παραπάνω, η απόφαση προβλέπει ένα ανώτατο όριο (cap) στο ποσό που μπορεί να προσμετρήσει κάθε Μέρος από τη δραστηριότητα της Δασικής Διαχείρισης. Το όριο αυτό είναι το 15% περίπου των προηγούμενων αναφερόμενων απορροφήσεων κάθε χώρας, και για την Ελλάδα ορίστηκε σε 330 kt CO₂ για κάθε έτος της περιόδου δέσμευσης. Το όριο αυτό περιλαμβάνει επίσης απορροφήσεις από προγράμματα δάσωσης και αναδάσωσης που εφαρμόζονται από κοινού με άλλα Μέρη του Παραρτήματος I (υπό το μηχανισμό της «από κοινού εφαρμογής», joint implementation).

Για την προσμέτρηση των δραστηριοτήτων του άρθρου 3.3 και της Διαχείρισης Δασών δεν γίνεται σύγκριση των καθαρών εκπομπών/απορροφήσεων κατά την περίοδο δέσμευσης με αυτές του έτους βάσης (net-net accounting), όπως ισχύει για τους υπόλοιπους τομείς δραστηριότητας και για τις υπόλοιπες δραστηριότητες του άρθρου 3.4, αλλά προσμετράται η αλλαγή στα αποθέματα άνθρακα και οι εκπομπές άλλων αερίων του θερμοκηπίου³ κατά τη διάρκεια της περιόδου δέσμευσης (gross-net accounting). Αν οι δραστηριότητες αυτές έχουν ως αποτέλεσμα καθαρές απορροφήσεις, τα Μέρη εκδίδουν, ύστερα από έλεγχο και επαλήθευση από τις Ελεγκτικές Ομάδες Εμπειρογνομόνων, «μονάδες απορρόφησης» (removal units, RMUs). Σε περίπτωση που οι δραστηριότητες αυτές έχουν ως αποτέλεσμα καθαρές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, τα Μέρη ακυρώνουν αντίστοιχες μονάδες (πιστώσεις άνθρακα).

Στο πλαίσιο του Μηχανισμού Καθαρής Ανάπτυξης, μόνο οι δράσεις Δάσωσης/Αναδάσωσης είναι επιλέξιμες, ενώ οι πιστώσεις που μπορεί ένα Μέρος να αποκτήσει από τέτοια προγράμματα περιορίζεται στο 1% των εκπομπών του έτους βάσης. Οι πιστώσεις αυτές έχουν περιορισμένη χρονική διάρκεια, με τη λήξη της οποίας πρέπει να αντικα-

³ Εννοούνται τα λοιπά αέρια του θερμοκηπίου εκτός του CO₂ (non - CO₂ GHG).

τασταθούν (temporary CERs και long-term CERs). Με τον τρόπο αυτόν αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της μη μονιμότητας και της πιθανής μελλοντικής εκπομπής του δεσμευμένου άνθρακα. Στα Μέρη του Παραρτήματος Ι, οι επιφυλάξεις, όσον αφορά τη μονιμότητα των αποθηκών, αντιμετωπίζονται με την ετήσια απογραφή αερίων του θερμοκηπίου.

Απογραφές αερίων του θερμοκηπίου και LULUCF

Η Σύμβαση απαιτεί από τα Συμβαλλόμενα Μέρη να υποβάλλουν ετήσιες εθνικές απογραφές ανθρωπογενών εκπομπών από πηγές και απορροφήσεων από χόανες αερίων του θερμοκηπίου, καθώς και περιοδικές εθνικές αναφορές για την εφαρμογή της Σύμβασης. Οι ετήσιες απογραφές αερίων του θερμοκηπίου είναι ένα απαραίτητο εργαλείο στη χάραξη και εφαρμογή πολιτικών μετριασμού της κλιματικής αλλαγής. Προσφέρουν πληροφορίες σχετικά με την εξέλιξη των εκπομπών αναφορικά με ένα προεπιλεγμένο έτος βάσης, ενώ επίσης συνεισφέρουν στη διαδικασία λήψης πολιτικών και μέτρων μείωσης των εκπομπών, καθώς και στην παρακολούθηση των αποτελεσμάτων των μέτρων αυτών. Το Πρωτόκολλο ορίζει ότι όλα τα Συμβαλλόμενα Μέρη της Σύμβασης που περιλαμβάνονται στο Παράρτημα Ι της Σύμβασης θα πρέπει να αναπτύξουν ένα Εθνικό Σύστημα (National System) για την απογραφή των εκπομπών και απορροφήσεων αερίων του θερμοκηπίου. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει όλες τις θεσμικές, νομοθετικές και διαδικαστικές ρυθμίσεις που εφαρμόζονται σε ένα Συμβαλλόμενο Μέρος για την εκτίμηση εκπομπών και απορροφήσεων των αερίων του θερμοκηπίου, καθώς και για την αναφορά και αρχειοθέτηση των πληροφοριών σχετικά με τις ετήσιες απογραφές εκπομπών και απορροφήσεων.

Οι βασικές αρχές εκπόνησης και σύνταξης των εθνικών απογραφών εκπομπών/απορροφήσεων ανά πηγή/χόανη για τις χώρες του Παραρτήματος Ι της Σύμβασης, καθορίζονται από τις σχετικές αποφάσεις της Συνόδου των Συμβαλλομένων Μερών (αποφάσεις 3/CP.5, 22/CP.7, 18/CP.8, 15/CP.10, 14/CP.11 και 6/CMP.3). Στις αποφάσεις αυτές ορίζεται ότι ο υπολογισμός των εκπομπών/απορροφήσεων θα πρέπει να γίνεται με συγκρίσιμες μεθοδολογίες, οι οποίες περιγράφονται: α) στις Αναθεωρημένες Κατευθυντήριες Οδηγίες της IPCC για τις Εθνικές Απογραφές Αερίων του Θερμοκηπίου (IPCC 1997), β) στον Οδηγό Βέλτιστων Πρακτικών και Διαχείρισης Αβεβαιοτήτων για τις Εθνικές Απογραφές Αερίων του Θερμοκηπίου (IPCC 2000) και γ) στον Οδηγό Βέλτιστων Πρακτικών για τις Χρήσεις Γης, Αλλαγές Χρήσεων Γης

και Δασοπονία (IPCC 2003). Για την απογραφή υπό τη Σύμβαση ορίζονται έξι γενικές κατηγορίες χρήσεων γης (Δασικές εκτάσεις, Γεωργικές εκτάσεις, Χορτολιβάδα, Υγρότοποι, Οικισμοί και Άλλες εκτάσεις), για τις οποίες θα πρέπει να υπολογίζονται και να αναφέρονται οι αλλαγές στα αποθέματα σε πέντε αποθήκες άνθρακα (υπέργεια βιομάζα, υπόγεια βιομάζα, νεκρό ξύλο, φυλλάδα και εδαφική οργανική ουσία) και οι εκπομπές άλλων αερίων του θερμοκηπίου. Αντικείμενο, δηλαδή, της απογραφής είναι η εκτίμηση και η παρακολούθηση της καθαρής παραγωγικότητας (NBP – όπως αναλύεται παραπάνω) σε όλη την επικράτεια της χώρας, από το 1990 μέχρι σήμερα.

Καθώς στην προσμέτρηση δεν συμμετέχει όλος ο τομέας των LULUCF αλλά μόνο οι δραστηριότητες των άρθρων 3.3 και 3.4, τα Μέρη που έχουν επικυρώσει το Πρωτόκολλο πρέπει, από το 2010 και μετά, να περιλαμβάνουν στην απογραφή τους συμπληρωματικές πληροφορίες σχετικά με τις εκπομπές και απορροφήσεις από τις δραστηριότητες αυτές. Η αναφορά στο πλαίσιο του Πρωτοκόλλου αποτελεί τμήμα της απογραφής στο πλαίσιο της Σύμβασης, ωστόσο οι τεχνικές προδιαγραφές που πρέπει να πληροί είναι υψηλότερες (ανώτερες μέθοδοι υπολογισμού, αναφορά σε μεγαλύτερη χωρική κλίμακα κ.λπ.). Οι απογραφές αυτές υφίστανται ετήσιους ελέγχους από τις Ελεγκτικές Ομάδες Εμπειρογνομόνων, σύμφωνα με τις διαδικασίες του άρθρου 8 του Πρωτοκόλλου και τις σχετικές αποφάσεις της Συνόδου, έτσι ώστε να διασφαλίζεται η ορθότητα και η διαφάνεια των χρησιμοποιούμενων μεθόδων και η πληρότητα και ακρίβεια των εκτιμήσεων.

Η ελληνική απογραφή για τις LULUCF

Η πρώτη προσπάθεια εκτίμησης των εκπομπών και απορροφήσεων αερίων του θερμοκηπίου από τον τομέα «Χρήσεις Γης, Αλλαγές Χρήσεων Γης και Δασοπονία» στην Ελλάδα έγινε στην απογραφή του 2005 (Petsikos 2005). Σε αυτήν εκτιμήθηκαν οι ετήσιες εκπομπές και απορροφήσεις διοξειδίου του άνθρακα και άλλων αερίων του θερμοκηπίου από την προσαύξηση των δασών, τις πυρκαγιές, τις υλοτομίες, τις δασώσεις και τις γεωργικές εκτάσεις. Το 2010 η απογραφή αυτή βελτιώθηκε και συμπληρώθηκε, έτσι ώστε να καλυφθούν οι αυξημένες υποχρεώσεις αναφοράς για το Πρωτόκολλο. Η μεθοδολογία για την εκτίμηση των εκπομπών και απορροφήσεων από τα δάση άλλαξε, από τη μέθοδο των ροών στη μέθοδο της αλλαγής των αποθεμάτων άνθρακα, η οποία εφαρμόστηκε στα πρωτογενή δεδομένα των διαχειριστικών μελετών των δασών της χώρας. Οι εκτιμήσεις εκπομπών και απορροφήσεων έγιναν σε επίπεδο νομού – όπως ορίζεται για την αναφορά υπό το Πρωτό-

κόλλο του Κιότο – και συμπληρώθηκαν με στοιχεία για τις αποδασώσεις και τις αλλαγές χρήσεων γης. Ο τομέας των LULUCF εκτιμήθηκε ότι απορροφά περίπου 2,2-3,3 Mt CO₂ eq το χρόνο, για την περίοδο 1990-2010, το οποίο αντιστοιχεί στο 2-3% περίπου των συνολικών ανθρωπογενών εκπομπών της Ελλάδας. Η χοάνη αυτή οφείλεται κατά 2/3 περίπου στον δασικό τομέα και στην αύξηση της βιομάζας των δασών, και κατά 1/3 περίπου στον γεωργικό τομέα και στην αύξηση των δενδρωδών καλλιεργειών (Petsikos 2012).

Οι εκτιμήσεις των εκπομπών και απορροφήσεων αερίων του θερμοκηπίου υπόκεινται σε τυχαία και συστηματικά σφάλματα, που δεν μπορούν πάντα να ποσοτικοποιηθούν. Η αβεβαιότητα των εκτιμήσεων για τις συνολικές εκπομπές/απορροφήσεις για τον τομέα αυτόν υπολογίστηκε σε 59%⁴ για την απογραφή του 2005 και σε 29% για την απογραφή του 2010. Ωστόσο, η πραγματική αβεβαιότητα είναι μεγαλύτερη, καθώς στις εκτιμήσεις αυτές υπολογίστηκαν τα σφάλματα των πρωτογενών δεδομένων (π.χ. ξυλαπόθεμα, καμένες εκτάσεις) και των συντελεστών μετατροπής των πρωτογενών δεδομένων στις ζητούμενες ποσότητες (π.χ. ξυλαπόθεμα σε άνθρακα), αλλά όχι τα σφάλματα που εισάγονται από τις παραδοχές που έγιναν και τις κατηγορίες που δεν εκτιμήθηκαν (π.χ. απώλειες άνθρακα από την υποβάθμιση των δασών, αποθήκευση άνθρακα από φυσικές δασώσεις σε εγκαταλελειμμένες εκτάσεις κ.ά.).

Το σχέδιο βελτίωσης της απογραφής αερίων του θερμοκηπίου έχει ως σκοπό την κάλυψη των κενών και τη μείωση των αβεβαιοτήτων των εκτιμήσεων, και βασίζεται στην Ανάλυση Βασικών Κατηγοριών, μια διαδικασία θέσπισης προτεραιοτήτων με σκοπό την αποτελεσματικότερη βελτίωση

της απογραφής. Οι απογραφές αερίων του θερμοκηπίου για τις LULUCF βασίζονται σε στοιχεία από τις Εθνικές Απογραφές Δασών (ΕΑΔ) (Löwe et al. 2000). Την τελευταία δεκαετία οι περισσότερες χώρες τροποποίησαν και συμπλήρωσαν τις προδιαγραφές των ΕΑΔ (π.χ. κατάλληλη χρονική κάλυψη, παρακολούθηση όλων των αποθηκών άνθρακα κ.λπ.), έτσι ώστε να βελτιώσουν την πληρότητα της απογραφής αερίων του θερμοκηπίου για τις LULUCF, να μειώσουν τις αβεβαιότητες των εκτιμώμενων μεγεθών και να καλύψουν τις υποχρεώσεις αναφοράς. Στην Ελλάδα, όπου δεν λειτουργεί σύστημα ΕΑΔ, για την απογραφή του 2005 χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία της 1ης ΕΑΔ για την προσαύξηση των δασών και ετήσια στατιστικά στοιχεία για τις υλοτομίες και τις πυρκαγιές, τα οποία υπήρχαν συγκεντρωμένα στην κεντρική διοίκηση. Για την απογραφή του 2010, καθώς οι απαιτήσεις αναφοράς έγιναν αυστηρότερες, συγκεντρώθηκαν στοιχεία που δεν ήταν άμεσα διαθέσιμα, αλλά υπήρχαν στη διοίκηση (π.χ. για τις αλλαγές χρήσεων γης και τα διαχειριζόμενα δάση). Για να μπορέσουμε, ωστόσο, να έχουμε μια καλή εκτίμηση του ισοζυγίου του άνθρακα στον ελλαδικό χώρο και να καλυφθούν τα σημαντικά κενά της απογραφής, θα πρέπει να αναπτυχθεί ένα σύστημα παρακολούθησης των δασών στο πλαίσιο μιας σύγχρονης και διευρυμένης Εθνικής Απογραφής Δασών, η οποία πέρα από τα κλασικά στοιχεία καταγραφής (έκταση, σύνθεση, ξυλαπόθεμα κ.λπ.), θα πρέπει να επεκταθεί και να καλύπτει τις σύγχρονες ανάγκες παρακολούθησης των δασών (αποθέματα άνθρακα σε όλες τις αποθήκες, αλλαγές χρήσεων γης, υγεία των δασών και επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, εδάφη και ερημοποίηση).

⁴ Για διάστημα εμπιστοσύνης 95%.

Λεξιλόγιο – Βασικοί Όροι

LULUCF, Land Use, Land use Change and Forestry. Τομέας δραστηριότητας και κατηγορία της απογραφής αερίων του θερμοκηπίου που περιλαμβάνει τις εκπομπές και απορροφήσεις που προέρχονται από τις χρήσεις της γης, τις αλλαγές χρήσεων γης και τη δασοπονία. Όρος που χρησιμοποιείται από το 2000 και συμπλήρωσε και αντικατέστησε τον όρο Land Use Changes and Forestry. Οι εκπομπές από την κτηνοτροφία και τα αγροτικά λιπάσματα απογράφονται στον τομέα της Γεωργίας, ενώ οι αλλαγές στα αποθέματα άνθρακα στη βιομάζα και τα εδάφη των γεωργικών εκτάσεων στον τομέα των LULUCF. Στο μέλλον, οι δύο αυτοί τομείς θα συγχωνευθούν σε Agriculture, Forestry and Other Land Uses (AFOLU).

Afforestation/Reforestation: Δάσωση/Αναδάσωση. Για την εφαρμογή του Πρωτοκόλλου του Κιότο, ως Δάσωση/Αναδάσωση ορίζεται η άμεσα ανθρωπογενής μετατροπή μη δασικής γης σε δασική, μέσω φύτευσης, σποράς και/ή ανθρωπογενούς προώθησης της φυσικής αναγέννησης. Η διαφορά των δύο όρων έγκειται μόνο στο χρονικό διάστημα της προηγούμενης χρήσης, και για αυτό συνήθως οι δύο όροι αναφέρονται μαζί. Η Δάσωση λαμβάνει χώρα σε εδάφη όπου δεν υπήρχε δάσος για τουλάχιστον 50 χρόνια, ενώ η Αναδάσωση σε εδάφη που δεν ήταν δάσος στις 31 Δεκεμβρίου 1989. Κατά τη χρήση των ορισμών αυτών στα πλαίσια του Πρωτοκόλλου δεν θα πρέπει να υπάρχει σύγχυση με τους ορισμούς που χρησιμοποιούνται στη δασική πράξη ή τη νομοθεσία.

Mitigation: Μετριασμός της κλιματικής αλλαγής. Δράση για τη μείωση των εκπομπών ή την αύξηση των απορροφήσεων αερίων του θερμοκηπίου. Αναφέρεται και ως μετριασμός των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου, ή μετριασμός της αύξησης της συγκέντρωσης των αερίων αυτών στην ατμόσφαιρα.

Adaptation: Προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή. Δράση για τη μείωση της ευπάθειας και την αύξηση της ανθεκτικότητας των φυσικών ή των ανθρωπίνων συστημάτων στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Ο μετριασμός αφορά τις αιτίες της κλιματικής αλλαγής, ενώ η προσαρμογή αφορά τις επιπτώσεις της.

CO₂ Emissions: Εκπομπές CO₂ από μια αποθήκη προς την ατμόσφαιρα (π.χ. από καύσεις ορυκτών πόρων, την αναπνοή των φυτών, πυρκαγιές).

CO₂ Removals: Απορροφήσεις CO₂ από την ατμόσφαιρα, που πραγματοποιούνται από τα φυτά μέσω της φωτοσύνθεσης.

Carbon Pool (C reservoir): Αποθήκη άνθρακα. Ένα σύστημα το οποίο έχει τη δυνατότητα να συσσωρεύει αλλά και να απελευθερώνει άνθρακα, π.χ. η δασική βιομάζα, το έδαφος, τα προϊόντα ξύλου, η ατμόσφαιρα.

Carbon Stock: Απόθεμα άνθρακα. Η ποσότητα άνθρακα που βρίσκεται σε μια αποθήκη σε μια χρονική στιγμή. Μονάδα μέτρησης είναι η μάζα (π.χ. t C).

Carbon Flux: Ροή άνθρακα. Η μεταφορά άνθρακα από μια αποθήκη σε μια άλλη, μετρούμενη συνήθως ως μάζα ανά μονάδα επιφανείας και χρόνου (π.χ. t C ha⁻¹ y⁻¹).

Sink: Χοάνη. Μια αποθήκη λειτουργεί ως χοάνη ατμοσφαιρικού άνθρακα, σε μια χρονική περίοδο, όταν ο άνθρακας που εισέρχεται σε αυτήν είναι περισσότερος από αυτόν που εξέρχεται. Οι κύριες φυσικές χοάνες είναι οι ωκεανοί και τα δάση.

Source: Πηγή. Το αντίθετο της χοάνης. Μια αποθήκη είναι πηγή άνθρακα προς την ατμόσφαιρα όταν ο άνθρακας που εισέρχεται είναι λιγότερος από αυτόν που εξέρχεται. Ένα δάσος μπορεί να λειτουργεί ως χοάνη (π.χ. τυπικά όταν αυξάνεται) ή ως πηγή (π.χ. όταν υποβαθμίζεται ή καίγεται).

Carbon sequestration: Δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα. Η διαδικασία κατά την οποία μια χοάνη άνθρακα απορροφά και αποθηκεύει διοξείδιο του άνθρακα από την ατμόσφαιρα. Συνήθως, γίνεται λόγος για forest sequestration, για δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα, δηλαδή, στη βιομάζα και στο έδαφος των δασικών οικοσυστημάτων μέσω της φωτοσύνθεσης.

Carbon offset: Αντιστάθμιση άνθρακα. Είναι η μείωση των εκπομπών ή η αύξηση των απορροφήσεων αερίων του θερμοκηπίου με σκοπό την αντιστάθμιση των εκπομπών από κάπου αλλού. Μετριέται σε τόνους ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα (CO₂ eq).

Carbon neutral: Ανθρακικά ουδέτερο. Στην περίπτωση που μια αποθήκη άνθρακα δεν αυξάνεται ούτε μειώνεται, οι εισροές δηλαδή είναι ίσες με τις εκροές, τότε χαρακτηρίζεται ως ανθρακικά ουδέτερο. Ο όρος αυτός χρησιμοποιείται, επίσης, για να χαρακτηρίσει ότι ένα προϊόν ή μια ρυπογόνος διαδικασία έχουν μηδενικό αποτύπωμα άνθρακα.

Accounting: Προσμέτρηση. Η ποσοτική αξιολόγηση της συμμόρφωσης των Μερών που επικύρωσαν το Πρωτόκολλο του Κιότο σε σχέση με τους στόχους μείωσης ή περιορισμού των εκπομπών τους, η οποία γίνεται με την έκδοση ή την ακύρωση πιστώσεων άνθρακα.

Βιβλιογραφία

A. Ελληνική

Βέργος, Στ. 2000. Σημειώσεις Μαθημάτων Δασοκομικής ΙΙ (Εφαρμοσμένη Δασοκομική). Τ.Ε.Ι. Λάρισας, Τμήμα Δασοπονίας. Καρδίτσα.

Θανάσης, Γ.Α., και Θ.Δ. Ζάγκας. 2001. Συμβολή της αναγωγής των δρυοδασών της ανατολικής πλευράς των Κερδυλλίων ορέων στην προστασία του φυσικού περιβάλλοντος της ευρύτερης περιοχής. Σελ. 609-619 στο Πρακτικά 9ου Πανελληνίου Δασολογικού Συνεδρίου «Προστασία φυσικού περιβάλλοντος και αποκατάσταση διαταραγμένων περιοχών». Κοζάνη, 17-20 Οκτωβρίου 2000. Ελληνική Δασολογική Εταιρεία, Θεσσαλονίκη.

Regato, P. 2010. Τα Μεσογειακά Δάση απέναντι στην Παγκόσμια Κλιματική Αλλαγή (Μτφ. Χ. Πέτσικος, και Χ. Ζωγράφου). WWF Ελλάς, Αθήνα.

Σμύρης, Π., Μ. Ασλανίδου, και Η. Μήλιος. 1999. Αραιώσεις δρυός (*Quercus conferta*) στο Χολομώντα Χαλκιδικής. Σελ. 416-424 στο Πρακτικά 8ου Πανελληνίου Δασολογικού Συνεδρίου «Σύγχρονα προβλήματα Δασοπονίας». Αλεξανδρούπολη, 6-8 Οκτωβρίου 1999. Ελληνική Δασολογική Εταιρεία, Θεσσαλονίκη.

Τσιτσώνη, Θ. 2003. Δασοκομική έρευνα των δρυοδασών στη Βόρεια Ελλάδα. Χωρίς σελίδες στο Πρακτικά 11ου Πανελληνίου Δασολογικού Συνεδρίου «Πολιτική - Πρεμνοφυή Δάση - Προστασία Φυσικού Περιβάλλοντος». Αρχαία Ολυμπία, 1-3 Οκτωβρίου 2003. Ελληνική Δασολογική Εταιρεία, Θεσσαλονίκη.

WWF Ελλάς. 2009. Το αύριο της Ελλάδας: επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην Ελλάδα κατά τα άμεσο μέλλον. Αθήνα.

WWF Ελλάς, και ΑΠΘ. 2011. Πανελλαδική χαρτογράφηση των καλύψεων γης και των αλλαγών τους την περίοδο 1987-2007. Αθήνα.

B. Ξενόγλωσση

Adam, D. 27/1/2005. Oil firms fund climate change denial. London: Guardian <http://www.guardian.co.uk/world/2005/jan/27/environment.science>, Accessed on March 2012.

Agee, J., and C. Skinner. 2005. Basic principles of forest fuel reduction treatments. *Forest Ecology and Management* 211:83-96.

Andreae, M.O., P. Artaxo, C. Brandão, F.E. Carswell, P. Ciccioli, A.L. da Costa, A.D. Culf, J.L. Esteves, J.H.C. Gash, J. Grace, P. Kabat, J. Lelieveld, Y. Malhi, A.O. Manzi, F.X. Meixner, A.D. Nobre,

C. Nobre, M.d.L.P. Ruivo, M.A. Silva-Dias, P. Stefani, R. Valentini, J. von Jouanne, and M.J. Waterloo. 2002. Biogeochemical cycling of carbon, water, energy, trace gases, and aerosols in Amazonia: The LBA-EUSTACHE experiments. *Journal of Geophysical Research* 107, 8066, doi:10.1029/2001JD000524, 2002.

Arrhenius, S. 1896. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science (fifth series) 41: 237-275.

Asshoff, R., G. Zotz, and C. Körner. 2006. Growth and phenology of mature temperate forest trees in elevated CO₂. *Global Change Biology* 12:1-14.

Auclair, A.N.D., and T.B. Carter. 1993. Forest wildfires as a recent source of CO₂ at northern latitudes. *Canadian Journal of Forest Research* 23: 1528-1536.

Ban-Weiss, G.A., L. Cao, G. Bala, and K. Caldeira. 2011. Dependence of climate forcing and response on the altitude of black carbon aerosols. *Climate Dynamics* doi: 10.1007/s00382-011-1052-y.

Bellassen, V., N. Viovy, S. Luyssaert, G. Le Maire, M. Schelhaas, and P. Ciais. 2011. Reconstruction and attribution of the carbon sink of European forests between 1950 and 2000. *Global Change Biology* 17:3274-3292.

Binkley, D., J.L. Stape, M.G. Ryan, H.R. Barnard, and J. Fownes. 2002. Age-related decline in forest ecosystem growth: an individual tree, stand-structure hypothesis. *Ecosystems* 5:58-67.

Bormann, B.T., P.S. Homann, R.L. Darbyshire, and B.A. Morrisette. 2008. Intense forest wildfire sharply reduces mineral soil C and N: The first direct evidence. *Canadian Journal of Forest Research* 38:2771-2738.

Bousquet, P., P. Peylin, and P. Ciais. 2000. Regional changes in carbon dioxide fluxes of land and oceans since 1980. *Science* 290:1342-1346.

Brown, S., and A.E. Lugo. 1990. Effects of forest clearing and succession on the carbon and nitrogen content of soils in Puerto Rico and US Virgin Islands. *Plant Soil* 124:53-64.

Cannell, M.G.R., J.P. Palutikof, and T.H. Sparks. 1999. Indicators of climate change in the UK. DETR and CEH, London.

Cannell, M.G.R. 2003. Carbon sequestration and biomass energy offset: theoretical, potential and achievable capacities globally, in Europe and the UK. *Biomass and Bioenergy* 24:97-116.

- Caspersen, J.P., S.W. Pacala, J.C. Jenkins, G.C. Hurtt, P.R. Moorcroft, and R.A. Birdsey. 2000. Contributions of land-use history to carbon accumulation in U.S. forests. *Science* 290:1148-1151.
- Carey, E.V., A. Sala, R. Keane, and R.M. Callaway. 2001. Are old forests underestimated as global carbon sinks? *Global Change Biology* 7:339-344.
- Ciais, P., M. Reichstein, N. Viovy, A. Granier, J. Ogee, V. Allard, M. Aubinet, N. Buchmann, C. Bernhofer, A. Carrara, F. Chevallier, N. De Noblet, A.D. Friend, P. Friedlingstein, T. Grünwald, B. Heinesch, P. Keronen, A. Knohl, G. Krinner, D. Loustau, G. Manca, G. Matteucci, F. Miglietta, J.M. Ourcival, D. Papale, K. Pilegaard, S. Rambal, G. Seufert, J.F. Soussana, M. J. Sanz, E.D. Schulze, T. Vesala, and R. Valentini. 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature* 437:529-533.
- Covington, W.W., R.L. Everett, R. Steele, L.L. Irwin, T.A. Daer, and A.N.D. Auclair. 1994. Historical and anticipated changes in forest ecosystems of the inland west of the United States. *Journal of Sustainable Forestry* 2:13-63.
- Dale, V.H., L.A. Joyce, S. McNulty, R.P. Neilson, M.P. Ayres, M.D. Flannigan, P.J. Hanson, L.C. Ireland, A.E. Lugo, C.J. Peterson, D. Simberloff, F.J. Swanson, B.J. Stocks, and B.M. Wotton. 2001. Climate change and forest disturbances. *BioScience* 51:723-734.
- DeGryze, S., J. Six, K. Paustian, S.J. Morris, E.A. Paul, and R. Merckx. 2004. Soil organic carbon pool changes following land-use conversions. *Global Change Biology* 10:1120-1132.
- Dixon R.K., S. Brown, R.A. Houghton, A.M. Solomon, M.C. Trexler and J. Wisniewski. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* 263:185-190.
- ECCP-Working group on forest sinks. 2003. Conclusions and Recommendations Regarding Forest Related Sinks and Climate Change Mitigation. Tech. Rep., EC-DG Environment http://ec.europa.eu/clima/policies/forests/docs/forest_sinks_final_report_en.pdf
- Fan, S., M. Gloor, J. Mahlman, S. Pacala, J. Sarmiento, T. Takahashi, and P. Tan. 1998. A large terrestrial carbon sink in North America implied by atmospheric and oceanic carbon dioxide data and models. *Science* 282:442-446.
- FAO. 2006. Global Forest Resources Assessment 2005. Progress towards sustainable forest management. FAO Forestry Paper 147.
- Farquhar, G.D., and M.L. Roderick, 2003. Pinatubo, diffuse light, and the carbon cycle. *Science* 299:1997-1998.
- Fry, I. 2002. Twists and turns in the jungle: exploring the evolution of land use. Land-use change and forestry decisions within the Kyoto Protocol. *Review of European Community and International Environmental Law* 11:159-168.
- Fulé, P.Z., J.E. Crouse, J. Roccaforte, and E.L. Kalies. 2012. Review. Do thinning and/or burning treatments in western USA ponderosa or Jeffrey pine-dominated forests help restore natural fire behavior? *Forest Ecology and Management* 269:68-81.
- Gifford, R.M. 1994. The global carbon cycle: a viewpoint on the missing sink. *Australian Journal of Plant Physiology* 21:1-15.
- Gleixner, G., C.J. Czimczik, C. Kramer, B. Lihker, and M.W.I. Schmidt. 2001. Plant Compounds and their Turnover and Stability as Soil Organic Matter. Pages 201-215 in E.D. Schulze, M. Heimann, S. Harrison, E. Holland, J. L. Lloyd, C. Prentice, and D. Schimel, editors. *Global biogeochemical cycles in the climate system*. Academic Press, San Diego.
- Goulden, M.L., S.C. Wofsy, J.W. Harden, S.E. Trumbore, P.M. Crill, S.T. Gower, T. Fries, B.C. Daube, S.M. Fan, D.J. Sutton, A. Bazzaz, and J.W. Munger. 1998. Sensitivity of boreal forest carbon balance to soil thaw. *Science* 279:214-217.
- Gower, S.T., R.E. McMurtrie, and D. Murty. 1996. Aboveground net primary production decline with stand age: Potential causes. *Trends in Ecology and Evolution* 11:378-382.
- Grace, J. 2004. Presidential address: understanding and managing the global carbon cycle. *Journal of Ecology* 92:189-202.
- Graham, R., S. McCaffrey, and T. Jain. 2004. Science basis for changing forest structure to modify wildfire behavior and severity. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, General Technical Report RMRS-GTR-120.
- Gu, L., D. Baldocchi, S.B. Verma, T.A. Black, T. Vesala, E.M. Falge, and P.R. Dwyer. 2002. Advantages of diffuse radiation for terrestrial ecosystem productivity. *Journal of Geophysical Research* 107(D6), 10.1029/2001JD001242.
- Gu, L., D.D. Baldocchi, S.C. Wofsy, J.W. Munger, J.J. Michalsky, S.P. Urbanski, and T.A. Boden. 2003. Response of a deciduous forest to the Mount Pinatubo eruption: Enhanced photosynthesis. *Science* 299:2035-2038.
- Guo, L.B., and R.M. Gifford. 2002. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology* 8:345-360.

- Hatzistathis, A., T. Zagas, G. Goudelis, P. Ganatsas, and T. Tsitsoni. 1996. Thinning treatment effects on stand structure and quality of holm oak coppice. Pages 11-16 in G. Tsankov, A. Alexandrov, I. Raev, N. Yossifov, E. Dimitrov, I. Michov, and E. Palamarev, editors. Proceedings of 2nd Balkan scientific conference on study, conservation and utilization of forest resources. Vol.I. Sofia.
- Houghton, R.A., J.L. Hackler, and K.T. Lawrence. 1999. The US carbon budget: contributions from land-use change. *Science* 285:574-578.
- Houghton, R.A. 2001. Global terrestrial productivity and carbon balance. Pages 499-519 in J. Roy, B. Saugier, and H.A. Mooney, editors. Terrestrial global productivity. Academic Press, San Diego, CA.
- Howard, E.A., S.T. Gower, J.A. Foley, and C. J. Kucharik. 2004. Effects of logging on carbon dynamics of a jack pine forest in Saskatchewan, Canada. *Global Change Biology* 10:1267-1284.
- Hymus, G., and R. Valentini. 2007. Terrestrial vegetation as a carbon dioxide sink. Page 11-30 in D. S., Reay, C.N. Hewitt, K.A. Smith, and J. Grace, editors. Greenhouse gas sinks. CABI Publishing, UK.
- Idso, S.B. 1999. The long-term response of trees to atmospheric CO₂ enrichment. *Global Change Biology* 5:493-495.
- IPCC. 2000 – R.T. Watson, I.R. Noble, B. Bolin, N.H. Ravindranath, D.J. Verardo, and D.J. Dokken, editors. Land Use, Land-Use Change and Forestry. Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC. 2007 - Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, and H.L. Miller, editors. Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group 1 to the 4th assessment report of the IPCC. Cambridge University Press, Cambridge.
- Jandl, R., M. Lindner, L. Vesterdal, B. Bauwens, R. Bartiz, F. Hagedorn, D.W. Johnson, K. Minkinen, and K.A. Byrne. 2007. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma* 137:253-268.
- Jarvis, P.G. 1989. Atmospheric carbon dioxide and forests. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London (Series B)* 324:369-392.
- JMA (Japan Meteorological Agency). 2011. Global Temperature in 2010. Tokyo Climate Center News. Tokyo climate Center. <http://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/news/tccnews23.pdf>
- Johnson, D.W. 1992. Effects of forest management on soil carbon storage. *Water, Air, Soil Pollution* 64:83-120.
- Johnson, D.W., and P.S. Curtis. 2001. Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis. *Forest Ecology and Management* 140: 227-238.
- Jones, C.D., and P.M. Cox. 2001. Modeling the volcanic signal in the atmospheric CO₂ record. *Global Biogeochemical Cycles* 15:453-465.
- Joint Science Academies' Statement. 2010. Global response to climate change. <http://nationalacademies.org/onpi/06072005.pdf>
- Kashian, D.M., W.H. Romme, D.B. Tinker, M.G. Turner, and M.G. Ryan. 2006. Carbon storage on landscapes with stand-replacing fires. *BioScience* 56: 598-606.
- Kesselmeier, J., P. Ciccioli, U. Kuhn, P. Stefani, T. Biesenthal, S. Rottenberger, A. Wolf, M. Vitullo, R. Valentini, A. Nobre, P. Kabat, and M.O. Andreae. 2002. Volatile organic compound emissions in relation to plant carbon fixation and the terrestrial carbon budget: *Global Biogeochemical Cycles* 16: 1126.
- Knohl, A., O. Kolle, T.Y. Minayeva, I. M. Milyukova, N.N. Vygodskaya, T. Foken, and E.-D. Schulze. 2002. Carbon dioxide exchange of a Russian boreal forest after disturbance by wind throw. *Global Change Biology* 8:231-246.
- Knohl, A., E.D. Schulze, O. Kolle, and N. Buchmann. 2003. Large carbon uptake by an unmanaged 250-year-old deciduous forest in Central Germany. *Agricultural and Forest Meteorology* 118:151-167.
- Körner, C., R. Asshoff, O. Bignucolo, S. Hättenschwiler, S.G. Keel, S. Peláez-Riedl, S. Pepin, R.T.W. Siegwolf, and G. Zotz. 2005. Carbon flux and growth in mature deciduous forest trees exposed to elevated CO₂. *Science* 309:1360-1362.
- Kowalski, A.S., D. Loustau, P. Berbigier, G. Manca, V. Tedeschi, M. Borghetti, R. Valentini, P. Kolari, F. Berninger, Ü. Rannik, P. Hari, M. Rayment, M. Mencuccini, J. Moncrieff, and J. Grace. 2004. Paired comparisons of carbon exchange between undisturbed and regenerating stands in four managed forests in Europe. *Global Change Biology* 10:1707-1723.
- Kurz, W.A., and M.J. Apps. 1999. A 70-year retrospective analysis of carbon fluxes in the Canadian forest sector. *Ecological Applications* 9:526-547.
- Law, B.E., P.E. Thornton, J. Irvine, P.M. Anthony, and S. Van Tuyl. 2001. Carbon storage and fluxes in ponderosa pine forests at different developmental stages. *Global Change Biology* 7:755-777.
- Le Quéré, C., M.R. Raupach, J.G. Canadell, G. Marland, L. Bopp, P. Ciais, T.J. Conway, S.C. Doney,

- R. Feely, P. Foster, P. Friedlingstein, K. Gurney, R.A. Houghton, J.I. House, C. Huntingford, P.E. Levy, M.R. Lomas, J. Majkut, N. Metzler, J.P. Ometto, G.P. Peters, I.C. Prentice, J.T. Randerson, S.W. Running, J.L. Sarmiento, U. Schuster, S. Sitch, T. Takahashi, N. Viovy, G.R. van der Werf, and F.I. Woodward. 2009. Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. *Nature Geoscience* 2:831-836.
- Litvak, M., S. Miller, S.C. Wofsy, and M. Goulden. 2003. Effect of stand age on whole ecosystem CO₂ exchange in the Canadian boreal forest. *Journal of Geophysical Research* 108:8225 doi:10.1029/2001JD000854.
- Lloyd, J. 1999. The CO₂ dependence of photosynthesis, plant growth responses to elevated CO₂ concentrations and their interaction with soil nutrient status, II. Temperate and boreal forest productivity and the combined effects of increasing CO₂ concentrations and increased nitrogen deposition at a global scale. *Functional Ecology* 13:439-459.
- Löwe, H., H. Seufert, and F. Raes. 2000. Comparison of methods used within member states for estimating CO₂ emissions and sinks according to UNFCCC and EU monitoring mechanism: forest and other wooded land. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment* 4:315-319.
- Luyssaert, S., E.D. Schulze, A. Börner, A. Knohl, D. Hessenmöller, B.E. Law, P. Ciais, J. Grace. 2008. Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature* 455:213-215.
- Matson, P. A., T. Dietz, W. Abdalati, A.J. Busalacchi, K. Caldeira, R. Corell, R. Defries, I. Fung, and S. Gaines. 2010. *Advancing the Science of Climate Change. America's Climate Choices: Panel on Advancing the Science of Climate Change; National Research Council. The National Academies Press. Washington, D.C.*
- McCright, A.M., and R.E. Dunlap. 2000. Challenging Global Warming as a Social Problem: An Analysis of the Conservative Movement's Counter-Claims. *Social Problems* 47:499-522.
- Medlyn, B.E. 2011. Comment on "Drought-Induced Reduction in Global Terrestrial Net Primary Production from 2000 through 2009". *Science* 333:1093.
- Mladenoff, D.J., M.A. White, J. Pastor, and T.R. Crow. 1993. Comparing spatial pattern in unaltered old-growth and disturbed forest landscapes. *Ecological Applications* 3:294-306.
- Monbiot, George. 19/9/2009. «The denial industry» London: Guardian (<http://www.guardian.co.uk/environment/2006/sep/19/ethicalliving.g2>)
- Myneni, R.B., C.D. Keeling, C.J. Tucker, G. Asrar, and R.R. Nemani. 1997. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature* 386:698-702.
- Nabuurs, G.J., E. Thürig, N. Heidema, K. Armolaitis, P. Biber, E. Cienciala, E. Kaufmann, R. Mäkipää, P. Nilsen, R. Petritsch, T. Pristova, J. Rock, M.J. Schelhaas, R. Sievanen, Z. Somogyi, and P. Vallet. 2008. Hotspots of the European forests carbon cycle. *Forest Ecology and Management* 256: 194-200.
- Nadelhoffer, K.J., B.A. Emmett, P. Gundersen, O.J. Kjønaas, C.J. Koopmans, P. Schleppi, A. Tietema, and R.F. Wright. 1999. Nitrogen deposition makes a minor contribution to carbon sequestration in temperate forests. *Nature* 398:145-148.
- NASA. 2011. NASA Research Finds 2010 Tied for Warmest Year on Record. <http://www.giss.nasa.gov/research/news/20110112/>
- Neilson, R.P., and R.J. Drapek. 1998. Potentially complex biosphere responses to transient global warming. *Global Change Biology* 4:505-521.
- Nemani, Ramakrishna, C.D. Keeling, H. Hashimoto, W.M. Jolly, S.C. Piper, C.J. Tucker, R.B. Myneni, and S.W. Running. 2003. Climate-Driven Increases in Global Terrestrial Net Primary Production from 1982 to 1999. *Science* 300:1560-3.
- NOAA. 2011. National Climatic Data Center, State of the Climate: Annual 2010 Report "Global Analysis. Published online January 2011. <http://www.ncdc.noaa.gov/sotc/2010/13>.
- Odum, E.P. 1969. The strategy of ecosystem development. *Science* 164:262-270.
- Oreskes, N. 2004. Beyond the ivory tower: The scientific consensus on climate change. *Science* 306: 5702 p. 1686. DOI: 10.1126/science.1103618
- Pearson, J.A., D.H. Knight, and T.J. Fahey. 1987. Biomass and nutrient accumulation during stand development in Wyoming lodgepole pine forests. *Ecology* 68:1966-1973.
- Paul, K.I., P.J. Polglase, and G.P. Richards. 2003. Predicted change in soil carbon following afforestation or reforestation, and analysis of controlling factors by linking a C accounting model (CAMFor) to models of forest growth (3PG), litter decomposition (GENDEC) and soil C turnover (RothC). *Forest Ecology and Management* 177:485-501.
- Petsikos, C. 2005. Land Use, Land Use Change and Forestry. In: *Climate Change Emissions Inventory: National Inventory for greenhouse and other gases for the years 1990-2003. National Obser-*

- vatory of Athens. Ministry for the Environment, Physical Planning and Public Works. Greek Submission to the Secretariat of UNFCCC and the European Commission.
- Petsikos, C. 2012 Land Use, Land Use Change and Forestry. Pages 253-283 in Climate Change Emissions Inventory: National Inventory for greenhouse and other gases for the years 1990-2010. Ministry of Environment, Energy and Climate Change. Greek Submission to the Secretariat of UNFCCC and the European Commission.
- Post, W., and K. Kwon, 2000. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biology* 6:317-328.
- Pregitzer, K.S. and E.S. Euskirchen. 2004. Carbon cycling and storage in world forests: biome patterns related to forest age. *Global Change Biology* 10:2052-2077.
- Prentice, I.C., G.D. Farquhar, M.J.R. Fasham, M.L. Goulden, M. Heimann, V.J. Jaramillo, H.S. Khesghi, C. Le Quéré, R.J. Scholes, and D.W.R. Wallace. 2001. The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide. Pages 183-237 in J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson, editors. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press, Cambridge and New York.
- Pretzch, H. 2005. Diversity and productivity in forests: evidence from long-term experimental plots. Pages 41-64 In N. Schrer-Lorenzen, C. Körner, and E. Schulze, editors. *Forest diversity and function: temperate and boreal systems*. Springer Verlag, Berlin.
- Ramanathan, V., and G. Carmichael. 2008. Global and regional climate changes due to black carbon. *Nature Geoscience* 1:221-227.
- Richards, K.R., and C. Stokes. 2004. A review of forest carbon sequestration cost studies: a dozen years of research. *Climatic Change* 63:1-48.
- Richter, D.D., D. Markewitz, S.E. Trumbore, and C.G. Wells. 1999. Rapid accumulation and turnover of soil carbon in a re-establishing forest. *Nature* 400:56-58.
- Rigolot, E., P. Fernades, and F. Rego. 2009. Managing wildfire risk: Prevention, Suppression. Pages 49-52 in Y. Birot, editor. *Living with wildfires: What science can tell us*. Discussion Paper 15. European Forest Institute, Finland.
- Samanta, A., M.H. Costa, E.L. Nunes, S.A. Vieira, L. Xu, and R.B. Myneni. 2011. Comment on “Drought-Induced Reduction in Global Terrestrial Net Primary Production from 2000 Through 2009”. *Science* 333:1093.
- Sanz, M., E.-D. Schulze, and R. Valentini. 2004. International policy framework on climate change: sinks in recent international agreements. Pages 431-438 in C. Field and M. Raupach, editors. *The Global Carbon Cycle: Integrating Humans, Climate, and the Natural World*. Island Press, Washington DC.
- Savage, M., and J.N. Mast. 2005. How resilient are southwestern ponderosa pine forests after crown fires? *Canadian Journal of Forest Research* 35:967-977.
- Schimel, D.S. 1995. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Global Change Biology* 1:77-91.
- Schimel, D., J. Melillo, H. Tian, A.D. McGuire, D. Kicklighter, T. Kittel, N. Rosenbloom, S. Running, P. Thornton, D. Ojima, W. Parton, R. Kelly, M. Sykes, R. Neilson, and B. Rizzo. 2000. Contribution of increasing CO₂ and climate to carbon storage by ecosystems in the United States. *Science* 287:2004-2006.
- Schimel, D.S., J.I. House, J.I. Hibbard, P. Bousquet, P. Ciais, P. Peylin, B.H. Braswell, M.J. Apps, D. Baker, A. Bondeau, J. Canadell, G. Churkina, W. Cramer, A.S. Denning, C.B. Field, P. Friedlingstein, C. Goodale, M. Heimann, R.A. Houghton, J.M. Melillo, B. Moore III, D. Murdiyarso, I. Noble, S.W. Pacala, I.C. Prentice, M.R. Raupach, P.J. Rayner, R.J. Scholes, W.L. Steffen, and C. Wirth. 2001. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature* 414:169-172.
- Schlamadinger, B., N. Bird, S. Brown, J. Canadell, L. Ciccarese, B. Clabbers, M. Dutschke, J. Fiedler, A. Fischlin, P. Fearnside, C. Forner, A. Freibauer, P. Frumhoff, N. Hoehne, T. Johns, M. Kirschbaum, A. Labat, G. Marland, A. Michaelowa, L. Montanarella, P. Moutinho, D. Murdiyarso, N. Pena, K. Pingoud, Z. Rakonczay, E. Rametsteiner, J. Rock, M. J. Sanz, U. Schneider, A. Shvidenko, M. Skutsch, P. Smith, Z. Somogyi, E. Trines, M. Ward, and Y. Yamagata. 2007. A synopsis of land use, land-use change and forestry (LULUCF) under the Kyoto Protocol and Marrakech Accords. *Environmental Science Policy* 10:271-282.
- Schulze, E.-D., R. Valentini, and M.-J. Sanz. 2002. The long way from Kyoto to Marrakesh: implications of the Kyoto protocol negotiations for global ecology. *Global Change Biology* 8:505-518.
- Sedjo, R., J. Wisniewski, A. Sample, and J. Kinsman. 1995. The economics of managing carbon

- via forestry: Assessment of existing studies. *Environmental & Resource Economics* 6:139-165.
- Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, and H.L. Miller (eds.). 2007a. Summary for policymakers. *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press, Cambridge and New York.
- Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, and H.L. Miller (eds.). 2007b. Chapter 7. Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry. In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press, Cambridge and New York.
- Steffen, W.L., I. Noble, J. Canadell, M. Apps, E.-D. Schulze, P.G. Jarvis, D. Baldocchi, P. Ciais, W. Cramer, J. Ehleringer, G. Farquhar, C.B. Field, A. Ghazi, R. Gifford, M. Heimann, R. Houghton, P. Kabat, C. Körner, E. Lambin, S. Linder, H.A. Mooney, D. Murdiyarso, W.M. Post, I.C. Prentice, M.R. Raupach, D.S. Schimel, A. Shvidenko, and R. Valentini (IGBP Terrestrial Carbon Working Group), editors. 1998. The terrestrial carbon cycle: implications for the Kyoto Protocol. *Science* 280:1393-1394.
- Stern, N. 2006. *Stern Review on The Economics of Climate Change*. HM Treasury, London.
- Swetnam, T.W., C.D. Allen, and J.L. Betancourt. 1999. Applied historical ecology: Using the past to manage for the future. *Ecological Applications* 9:1189-1206.
- Tans, P.P., I.Y. Fung, and T. Takahashi. 1990. Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget. *Science* 247:1431-1438.
- Thornton, P.E., B. Law, H. Gholz, K. Clark, E. Falge, D. Ellsworth, A. Goldstein, R. Monson, D. Hollinger, and M. Falk. 2002. Modelling and measuring the effects of disturbance history and climate on carbon and water budgets in evergreen needleleaf forests. *Agricultural and Forest Meteorology* 113:185-222.
- Tilman, D., P. Reich, H. Phillips, M. Menton, A. Patel, E. Vos, D. Peterson, and J. Knops. 2000. Fire suppression and ecosystem carbon storage. *Ecology* 81:2680-2685.
- UNFCCC. 1992. *United Nations General Assembly. United Nations Framework Convention on Climate Change*. UNFCCC, United Nations, New York. In: <http://www.unfccc.int/resources> (Accessed on March 2012).
- United States National Research Council of the National Academies. 2008. *Understanding and Responding to Climate Change*. National Academy of Sciences.
- UK-MetOffice. 2011. 2010 - a near record year. <http://www.metoffice.gov.uk/news/releases/archive/2011/2010-global-temperature> (Accessed on March 2012).
- Van den Dool, H.M., S. Saha, and A. Johansson. 2000. Empirical orthogonal teleconnections. *Journal of Climate* 13:1421-1435.
- Van der Werf, G.R., J.T. Randerson, G.J. Collatz, L. Giglio, P.S. Kasibhatla, A.F. Arellano, S.C. Olsen, and E.S. Kasichke. 2004. Continental-scale partitioning of fire emissions during the 1997 to 2001 El Niño/La Niña period. *Science* 303:73-76.
- Van der Werf, G.R., D.C. Morton, R.S. Defries, J.G.J. Olivier, P.S. Kasibhatla, R.B. Jackson, G.J. Collatz, and J.T. Randerson. 2009. CO₂ emissions from forest loss. *Nature Geoscience* 2:737-738.
- Vesterdal, L., L. Rosenqvist, C. van der Salm, B.-J. Groenenberg, M.-B. Johansson, and K. Hansen. 2006. Carbon sequestration in soil and biomass following afforestation: experiences from oak and Norway spruce chronosequences in Denmark, Sweden, and the Netherlands. Pages 1-16 in G. Heil, B. Muys, and K. Hansen, editors. *Environmental Effects of Afforestation. Field Observations, Modelling and Spatial Decision Support*. Springer, Berlin.
- Victor, D.G. 2001. *The Collapse of the Kyoto Protocol and the Struggle to Slow Global Warming*. A Council on Foreign Relations Book. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- Vitousek, P.M., H.A. Mooney, J. Lubchenco, and J.M. Melillo. 1997a. Human domination of Earth's ecosystems. *Science* 277:494-99.
- Vitousek, P.M., J. Aber, R.W. Howarth, G.E. Likens, P.A. Matson, D.W. Schindler, W.H. Schlesinger, and G.D. Tilman. 1997b. Human Alteration of the Global Nitrogen Cycle: Causes and Consequences. *Issues in Ecology* 1:1-17.
- Wullschleger, S.D., W.M. Post, and A.W. King. 1995. On the potential for a CO₂ fertilisation effect in forests: estimates of the biotic growth factor based on 58 controlled exposure studies. Pages 85-107 in G.M. Woodwell, and F.T. McKenzie, editors. *Biotic Feedbacks in the Global Climatic System* Oxford University Press, Oxford.

Yamin, F. 1998. The Kyoto Protocol: origins, assessment and future challenges. Review of European Community and International Environmental Law 7:113-27.

Zagas, Th., P. Gkanatsas, Th. Tsitsoni, and A. Hatzistathis. 1998. Influence of silvicultural treatment on ecology, quality and fire resistance in *Quercus ilex* coppice stands, in North Greece.

Page 473 in A. Farina, J. Kennedy, and V. Boss, editors. Proceedings of 7th Global Congress of Ecology (INTECOL) «New Tasks For Ecologists After Rio 1992», 19-25 July 1998, Florence.

Zhao, M., and S.W. Running. 2010. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. Science 329: 940-943.