



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΔΙΠΛΩΜΑ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

**“Χαρακτηρισμός καυσίμων από ενεργειακές
καλλιέργειες αγριαγκινάρας, καλαμιού και switch grass
στην Ελλάδα.”**



ΒΙΚΤΩΡΙΑ Π. ΤΟΠΟΥΖΗ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Δρ. ΔΕΣΠΟΙΝΑ ΒΑΜΒΟΥΚΑ

ΚΑΛΟΥΜΕΝΟΥ

Δρ. ΑΝΤΩΝΙΟΣ ΦΩΣΚΟΛΟΣ

Δρ. ΘΕΟΧΑΡΗΣ ΤΣΟΥΤΣΟΣ

ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΡΙΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ
(ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ)

ΟΜΟΤΙΜΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΧΑΝΙΑ
Ιούλιος 2007

Στην Οικογένειά μου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

«Χαρακτηρισμός καυσίμων από ενεργειακές καλλιέργειες αγριαγκινάρας (*Cynara cardunculus*), καλαμιού (*Arundo donax*) και switchgrass (*Panicum virgatum*) στην Ελλάδα»

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η επίδραση των καλλιεργητικών τεχνικών της άρδευσης και της λίπανσης στην παραγωγικότητα των ενεργειακών φυτειών της αγριαγκινάρας (*Cynara cardunculus*), του καλαμιού (*Arundo donax*) και του switchgrass (*Panicum virgatum*). Στη συνέχεια, τα δείγματα αυτά βιομάζας χαρακτηρίστηκαν με βάση την προσεγγιστική και τη στοιχειακή τους ανάλυση και τον προσδιορισμό της θερμογόνου δύναμης. Οι τέφρες, που προήλθαν μετά την καύση, χαρακτηρίστηκαν ως προς την ποιοτική και ποσοτική τους σύσταση. Τέλος πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις που αφορούν τον προσδιορισμό του σημείου ροής της τέφρας τους.

Ως γενικό συμπέρασμα μπορεί να διατυπωθεί ότι οι ενεργειακές καλλιέργειες αγριαγκινάρας (*Cynara cardunculus*), καλαμιού (*Arundo donax*) και switchgrass (*Panicum virgatum*) είναι κατάλληλες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας. Χαρακτηρίζονται από χαμηλή περιεκτικότητα σε τέφρα, θείο και άζωτο και υψηλές τιμές πτητικών ουσιών και θερμογόνου δύναμης.

Από τις αναλύσεις τέφρας σε κύρια ανόργανα στοιχεία και βαρέα μέταλλα, που πραγματοποιήθηκαν, προκύπτει ότι είναι δυνατή η εναπόθεση της τέφρας στο έδαφος, χωρίς κάποια περιβαλλοντική επιβάρυνση, εντούτοις είναι πιθανή η δημιουργία επικαθήσεων και επισκωρώσεων στους καυστήρες, κατά την καύση σε υψηλές θερμοκρασίες.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την Αναπληρώτρια Καθηγήτρια κ. Δρ. Δ. Βάμβουκα - Καλουμένου για την ανάθεση του θέματος της διατριβής μου, την άψογη συνεργασία καθώς και για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους Καθηγητές κ.κ. Δρ. Α. Φώσκολο και Δρ. Θ. Τσούτσο για την συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή.

Ευχαριστώ επίσης τους επιστημονικούς συνεργάτες Πεντάρη Δ. και Στρατάκη Α. για τη βοήθεια που μου προσέφεραν στο πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για όλη την ηθική και οικονομική υποστήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
---------------	---

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	4
2.1 Η ΒΙΟΜΑΖΑ ΩΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΗ ΠΗΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	4
2.1.1 Ορισμός και πηγές βιομάζας.....	4
2.1.2 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα βιομάζας.....	8
2.1.3 Το δυναμικό της βιομάζας σε παγκόσμια κλίμακα.....	11
2.1.4 Το δυναμικό της βιομάζας στην Ελλάδα.....	13
2.2 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ- ΓΕΝΙΚΑ.....	14
2.2.1 Είδη ενεργειακών καλλιεργειών και παραγωγή ενέργειας.....	14
2.2.2 Συστήματα παραγωγής ενεργειακών καλλιεργειών.....	22
2.2.3 Κριτήρια επιλογής φυτών για ενεργειακές καλλιέργειες.....	24
2.2.4 Περιβαλλοντικές και κοινωνικό-οικονομικές επιπτώσεις των ενεργειακών καλλιεργειών.....	28
2.2.5 Μέθοδος εκτίμησης των επιπτώσεων των ενεργειακών καλλιεργειών.....	38
2.2.6 Χαρακτηριστικά καυσίμων από ενεργειακές καλλιέργειες.....	40
2.3 ΟΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ.....	44

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΦΥΤΩΝ.....	65
3.1 Γενικά	65
3.2 Περιγραφή πειραματικής περιοχής εγκατάστασης της φυτείας.....	66
3.2.1 SWITCHGRASS (<i>Panicum virgatum</i>).....	72
3.2.2 ΑΓΡΙΑΓΚΙΝΑΡΑ (<i>Cynara cardunculus</i>).....	76
3.2.3 ΚΑΛΑΜΙ (<i>Arundo donax</i>).....	80

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.....	86
-------------------------	----

4.1	Μεθοδολογία εκτέλεσης πειραματικών δοκιμών.....	86
4.2	Προέλευση και προετοιμασία δειγμάτων.....	88
4.3	Χαρακτηρισμός δειγμάτων.....	89
4.3.1	Προσεγγιστική ανάλυση.....	89
4.3.2	Στοιχειακή ανάλυση.....	91
4.3.3	Προσδιορισμός θερμογόνου δύναμης.....	94
4.3.4	Χημική ανάλυση τέφρας.....	97
4.3.5	Σημείο ροής τέφρας.....	103
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5		
	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑ.....	108
5.1.	Προσεγγιστική και στοιχειακή ανάλυση.....	108
5.2.	Χημική ανάλυση τέφρας.....	126
5.3.	Σημείο ροής τέφρας.....	143
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6		
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	151
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	154
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....	160

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ενώ τα ορυκτά καύσιμα αναπότρεπτα εξαντλούνται, το παγκόσμιο ενδιαφέρον στρέφεται στις εναλλακτικές μορφές ενέργειας που δεν εξαντλούνται, όπως είναι η αιολική ενέργεια, η ενέργεια από τις υδατοπτώσεις, η ηλιακή ενέργεια, η γεωθερμία και η βιομάζα.

Η περίπτωση της τελευταίας παρουσιάζει ιδιαιτερότητες, σε σχέση με τις άλλες εναλλακτικές μορφές. Απαιτείται ιδιαίτερος σχεδιασμός, τόσο στην επιλογή της τεχνολογίας μετατροπής της βιομάζας σε ενέργεια, όσο και στην εξασφάλιση της πρώτης ύλης, που εδώ διατίθεται με κάποιο κόστος, σε αντίθεση π.χ. με την αιολική ή την ηλιακή ενέργεια.

Η βιομάζα, είναι αποτέλεσμα της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας των φυτικών οργανισμών, που μετασχηματίζουν την ηλιακή ενέργεια με μια σειρά διεργασιών. Από ενεργειακής άποψης, η βιομάζα θεωρείται ο φυσικός αποταμιευτής ηλιακής ενέργειας, η δε φωτοσύνθεση το αποδοτικότερο σύστημα συνεχούς δέσμευσης και αποθήκευσης ενέργειας.

Η βιομάζα είναι συνεχώς ανανεούμενη, και όταν η διαχείρισή της πραγματοποιείται βάσει των αρχών της αειφορίας, συμβάλλει στην μείωση των εκπομπών CO₂ στην ατμόσφαιρα, καθόσον οι ποσότητες που απελευθερώνονται μετά την μετατροπή της σε ενέργεια είναι ίσες με αυτές που δεσμεύονται κατά την ανάπτυξή της. Οι πηγές της βιομάζας είναι ενδεχομένως οι μεγαλύτερες και οι πλέον ανανεώσιμες ενεργειακές πηγές παγκοσμίως. Οι πρόσφατες εξελίξεις στον ενεργειακό τομέα και κυρίως στο χώρο του πετρελαίου, έχουν επαναφέρει με επιτακτικό τρόπο την ανάγκη για την αξιοποίηση των εναλλακτικών μορφών ενέργειας.

Η «καλλιέργεια ενέργειας» δεν είναι κάτι εντελώς καινούριο. Υπάρχει εδώ και 20 χρόνια στην Ευρώπη και έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον σε συζητήσεις σχετικά με

τον μελλοντικό εφοδιασμό της Ευρώπης με ενέργεια. Περίπου 40 με 100 εκατομμύρια εκτάρια στην Ευρωπαϊκή Ένωση μπορούν να διατεθούν για σκοπούς εκτός της εγκατάστασης καλλιεργειών με στόχο την παραγωγή τροφίμων. Έχοντας οργανική προέλευση η ενέργεια από βιομάζα είναι ανανεώσιμη.

Η αξιοποίηση των ενεργειακών καλλιεργειών, ως καύσιμα, αποτελεί έναν εναλλακτικό τρόπο παραγωγής ενέργειας, καθώς από την ίδια θερμική πηγή μπορεί να παραχθεί ηλεκτρισμός και θερμότητα. Τα φυτά είναι η παλαιότερη πηγή ενέργειας που έχει χρησιμοποιηθεί από τον άνθρωπο (κυρίως στην παραγωγή θερμότητας). Με την πρόοδο της σχετικής τεχνολογίας, έχουν αναπτυχθεί ποικιλίες δένδρων και χορταριών που μεγαλώνουν ταχύτατα και αντικαθιστούν όσα κόβονται. Χρησιμοποιώντας μέρος αυτής της έκτασης για εγκατάσταση ενεργειακών καλλιεργειών μπορεί να οδηγήσει στην ικανοποίηση ενός σχετικού μέρους της ζήτησης για ενέργεια στην Ευρώπη, ενώ ταυτόχρονα θα συμβάλλει και στην μείωση των εκπομπών CO₂. Έχουν γίνει διάφορες μελέτες σε θερμό - χημικά είδη με αρκετά καλά αποτελέσματα.

Στα πλαίσια αυτής της γενικότερης ιδέας, εξετάζουμε αν και κατά πόσο μπορούν οι ενεργειακές καλλιέργειες να αναπτυχθούν στην Ελλάδα και να αποδώσουν αξιοποιήσιμα ποσά, τόσο για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όσο και θερμότητας. Το γεγονός, επίσης, ότι η βιομάζα παράγει ελάχιστη ή καθόλου ρύπανση, συγκριτικά με τα ορυκτά καύσιμα, και ότι είναι σε πολλές περιπτώσεις άμεσα διαθέσιμη, έχουν καταστήσει τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, εν γένει, μια σημαντική προτεραιότητα της Ευρωπαϊκής ενεργειακής στρατηγικής. Ταυτόχρονα όμως, εξάγονται συμπεράσματα που αφορούν τις επιπτώσεις μιας τέτοιας εφαρμογής στο περιβάλλον, μέσω της απόθεσης των τεφρών της καύσης στο έδαφος.

Ωστόσο, για να φτάσουμε να πραγματοποιήσουμε αναλύσεις στα βιοκαύσιμα, απαιτείται, σαν πρώτο μέλημά μας, η παραγωγή τους χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες καλλιεργητικές τεχνικές.

Στην παρούσα διατριβή επιλέχτηκαν φυτά, ικανά να αναπτυχθούν στις αγρό-κλιματικές συνθήκες της Ελλάδας. Αυτά είναι η αγριαγκινάρα (*Cynara cardunculus*), το καλάμι (*Arundo donax*) και το switchgrass (*Panicum virgatum*). Κατά το στάδιο

της παραγωγής τους εφαρμόστηκαν οι καλλιεργητικές τεχνικές της άρδευσης και της λίπανσης. Η ξηρή ουσία, που παράχθηκε από τις πειραματικές φυτείες χαρακτηρίστηκε ως προς την ικανότητά της να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο, μέσω της προσεγγιστικής και στοιχειακής ανάλυσης, καθώς και του προσδιορισμού της θερμογόνου δύναμής. Στις τέφρες, που προήλθαν μετά την καύση, πραγματοποιήθηκε χημικός χαρακτηρισμός για την ποσοτική και ποιοτική σύστασή τους, με σκοπό να προκύψουν πληροφορίες για τη συμπεριφορά της τέφρας κατά την καύση, όσο αφορά τη δημιουργία επικαθήσεων και επισκωριώσεων στους καυστήρες καθώς και τη ρύπανση του εδάφους κατά την απόθεσή της.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1 Η ΒΙΟΜΑΖΑ ΩΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΗ ΠΗΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1.1 Ορισμός και πηγές βιομάζας

Με τον όρο **βιομάζα** χαρακτηρίζεται η ύλη που έχει βιολογική (οργανική) προέλευση, δηλαδή οποιοδήποτε προϊόν ή παραπροϊόν ή υπόλειμμα προέρχεται από οργανική ύλη. Συγκεκριμένα, σε αυτή συμπεριλαμβάνονται [5]:

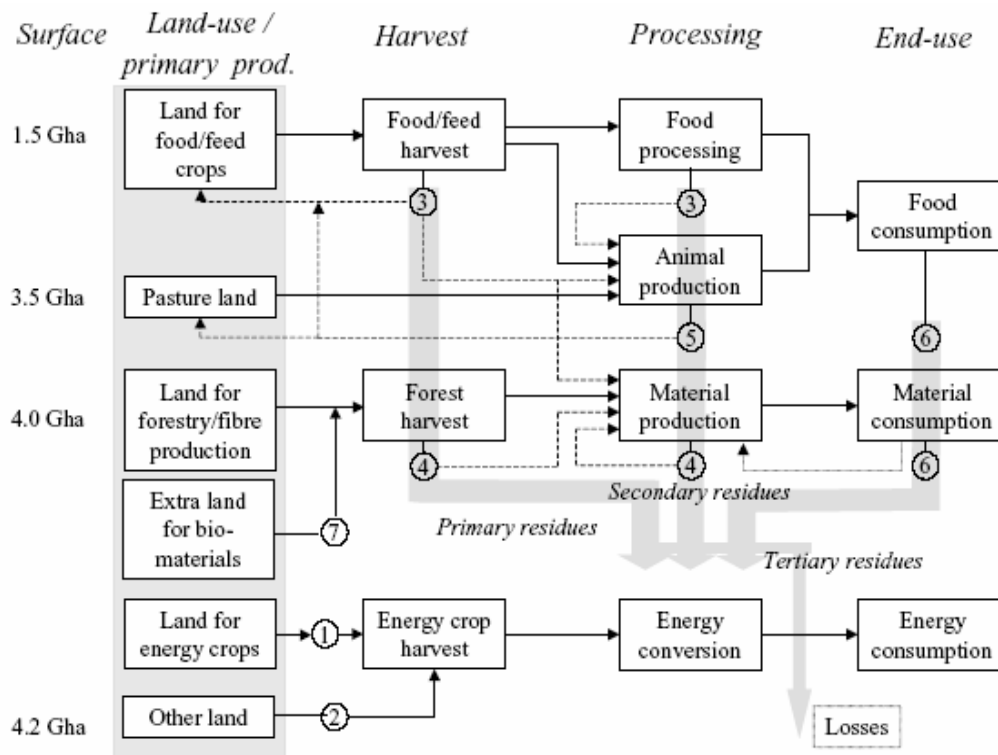
1. Οι φυτικές ύλες που προέρχονται από φυσικά οικοσυστήματα, όπως τα αυτοφυή φυτά και δάση
2. Τα παραπροϊόντα και κατάλοιπα της φυτικής, ζωικής, δασικής και αλιευτικής παραγωγής, όπως άχυρα, στελέχη αραβόσιτου και βαμβακιάς, κλαδοδέματα αμπέλου, ροδακινιάς, αμυγδαλιάς, πορτοκαλιάς και ελιάς, φύκη, κτηνοτροφικά απόβλητα, κληματίδες, υπολείμματα από αραιώσεις νεαρών δένδρων, υλικό προερχόμενο από την απομάκρυνση της υπορόφου βλαστήσεως για την προστασία από τις πυρκαγιές, υπολείμματα υλοτομίας, υπολείμματα επεξεργασίας ξύλου [8] κ.α.
3. Τα παραπροϊόντα που προέρχονται από την επεξεργασία ή μεταποίηση των υλικών αυτών, όπως ελαιοπυρηνόξυλα, υπολείμματα εκκοκκισμού βαμβακιού, πριονίδι, πυρήνες φρούτων κ.α.
4. Τα αστικά λύματα και σκουπίδια με βιολογική προέλευση
5. Οι φυτικές ύλες που προέρχονται από τεχνητές φυτείες αγροτικού ή δασικού τύπου, δηλαδή από τις λεγόμενες ενεργειακές καλλιέργειες [8], στις οποίες και επικεντρώνεται η παρούσα εργασία.

Στο Σχήμα 2.1 απεικονίζονται η διαθέσιμη έκταση ανά χρήση γης σε παγκόσμια κλίμακα και οι διαδρομές που ακολουθούνται για την παραγωγή τελικών προϊόντων, μεταξύ των οποίων είναι και η βιομάζα [9], η οποία κατά το μεγαλύτερο ποσοστό παράγεται από τα υπολείμματα αγροτικών και δασικών διαδικασιών παραγωγής.

Πιο συγκεκριμένα, η διαθεσιμότητα των αγροτικών υπολειμμάτων εξαρτάται από την παραγωγή τροφών και ζωοτροφών. Τα υπολείμματα αυτά προέρχονται είτε από την καλλιέργεια, είτε από την παραγωγή. Η διαθεσιμότητα των υπολειμμάτων καλλιέργειας εξαρτάται από την αναλογία υπολείμματος προς προϊόν και από το σύστημα παραγωγής. Ο Hall (1993) υπολογίζει το δυναμικό των αγροτικών υπολειμμάτων σε 14 EJ/έτος για τα υπολείμματα καλλιέργειας και 25 EJ/έτος για τα υπολείμματα παραγωγής.[9]

Ο Hall θεωρεί ότι το 25% των υπολειμμάτων υλοτομίας (δασικά υπολείμματα) συν το 33% των υπολειμμάτων κατεργασίας (υπολείμματα δασικών βιομηχανιών-πριονιστηρίων) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ενεργειακή χρήση, με συνολική συνεισφορά 13 EJ/έτος. Άλλες εκτιμήσεις υπολογίζουν συνεισφορά 10-11 EJ/έτος για το έτος 2025, ενώ ο Lazarus υποθέτει ότι η διαθεσιμότητα των δασικών υπολειμμάτων μπορεί να αυξηθεί από 0 σε 16 EJ/έτος σε μια περίοδο 40 χρόνων.

Το διαθέσιμο ποσοστό των ζωικών υπολειμμάτων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ενεργειακούς σκοπούς εξαρτάται από τον αριθμό των ζώων και την ζήτηση της κοπριάς για λίπασμα. Ο Wirsenius υπολόγισε το συνολικό ισχύον ποσό της παραγόμενης κοπριάς σε 46 EJ/έτος. Άλλες μελέτες αναφέρουν ότι 12.4-25% της συνολικής διαθέσιμης κοπριάς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας. Με βάση τους υπολογισμούς του Wirsenius, το καθαρό διαθέσιμο ποσό ζωικών υπολειμμάτων για παραγωγή ενέργειας ανέρχεται σε 6-12 EJ/έτος. [9]



Σχήμα 2.1. Τύποι, διαδικασίες παραγωγής τελικών προϊόντων βιομάζας και παγκόσμια έκταση ανά χρήση γης. [9]

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να γίνει αναφορά στην ανταγωνιστική σχέση παραγωγής τροφίμων-παραγωγής βιομάζας. Από τα περίπου 13 Gha της συνολικής επιφάνειας της γης, τα 5 Gha χρησιμοποιούνται στην παραγωγή τροφίμων. Αυτά περιλαμβάνουν την αρδευόμενη γη για την ανάπτυξη καλλιεργειών όπως σιτάρι, καλαμπόκι, γεώμηλα κ.α. και τους βοσκότοπους για την ζωική παραγωγή (γαλακτοκομικά προϊόντα και κρέας). Η ανάγκη, λοιπόν, για την παραγωγή τροφίμων παραθέτει ένα σημαντικό εμπόδιο για τις δυνατότητες της χρήσης της ηλιακής ενέργειας. Αν και υπάρχουν σημαντικά πλεονάσματα διαφόρων ειδών τροφίμων στην παγκόσμια αγορά, κάτι τέτοιο δεν συνεπάγεται και την ταυτόχρονη ύπαρξη πλεονάσματος σε τρόφιμα σε παγκόσμια κλίμακα. Τα πλεονάσματα αυτά οφείλονται στην μη ορθολογική διανομή των τροφίμων.

Άλλες μελέτες κάνουν διάκριση μεταξύ συστημάτων παραγωγής τροφίμων με υψηλές εισροές ενέργειας και συστημάτων παραγωγής τροφίμων με χαμηλές εισροές ενέργειας. Στην πρώτη περίπτωση λαμβάνει χώρα μέγιστη παραγωγή καλλιεργειών και παράλληλα εισαγωγή θρεπτικών ουσιών και λιπασμάτων ενώ στην δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιούνται γεωργικά συστήματα με την ελάχιστη περιβαλλοντική επικινδυνότητα (δεν γίνεται χρησιμοποίηση χημικών λιπασμάτων και βιοκτόνων ουσιών). Με βάση αυτή τη διάκριση και λαμβάνοντας υπόψη τρία διαφορετικά διαιτολόγια (χορτοφαγία, μέση και άφθονη διατροφή) έχει υπολογιστεί ότι η παγκόσμια απαίτηση για τρόφιμα το έτος 2025 κυμαίνεται μεταξύ $4.1-17.3 \times 10^{12}$ Kg gr.eq., ενώ η ισχύουσα απαίτηση είναι 5×10^{12} Kg gr.eq [9].

Το γενικό συμπέρασμα που εξάγεται από αυτές τις μελέτες είναι ότι η έκταση που απαιτείται για την παραγωγή ενέργειας από βιομάζα είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη έκταση για παραγωγή τροφίμων [1], όπως φαίνεται και από τον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 2.1. Κατανάλωση, απόδοση και απαιτούμενη έκταση για παραγωγή τροφίμων και ενέργειας.[1]

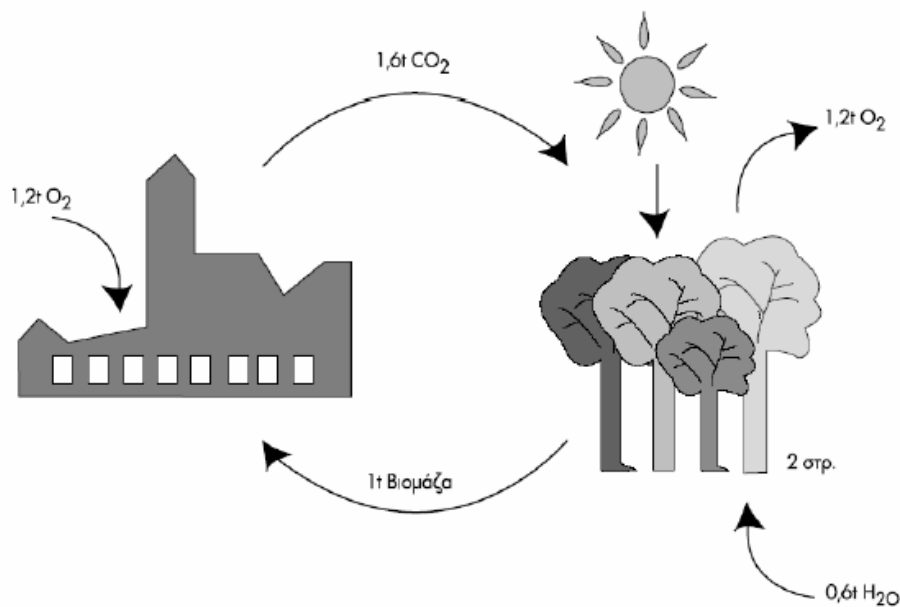
	Ανεπτυγμένες χώρες	Αναπτυσσόμενες χώρες
Κατανάλωση τροφίμων (Kg gr.eq.)	800	2000
Κατανάλωση ενέργειας (GJ)	200	35
Απόδοση καλλιεργειών (Kg/m ²)	1.0	0.2
Απόδοση βιομάζας (MJ/m ²)	27	1.8
Απαιτούμενη έκταση για παραγωγή τροφίμων (m ²)	800	1000
Απαιτούμενη έκταση για παραγωγή βιομάζας (m ²)	7410	19444

2.1.2 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα βιομάζας

Η βιομάζα αποτελεί μια ενδιαφέρουσα ενεργειακή πηγή για διάφορους λόγους [7,9]:

1. Η βιοενέργεια μπορεί να συμβάλλει στην αειφόρο ανάπτυξη
2. Οι πηγές βιομάζας είναι, συνήθως, διαθέσιμες σε τοπικό επίπεδο και η μετατροπή τους σε δευτερογενή ενεργειακούς φορείς είναι εφικτή χωρίς ιδιαίτερα υψηλές επενδύσεις κεφαλαίου
3. Η ενέργεια από την βιομάζα μπορεί να συμβάλλει θετικά στην αποκατάσταση υποβαθμισμένων εδαφών με την προσθήκη οργανικής ουσίας στο έδαφος. Αποφεύγεται, έτσι, η ερημοποίηση και εγκατάλειψη, γεγονός που συμβαίνει ήδη με ταχύτατους ρυθμούς σε πολλές τροπικές χώρες.
4. Η βιομάζα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για συνεχή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, που δεν εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες (όπως συμβαίνει με την αιολική, ηλιακή και υδροδυναμική ενέργεια) [32].
5. Η ενέργεια από την βιομάζα μπορεί να διαδραματίσει ένα σημαντικό ρόλο στην μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, αφού όταν παράγεται και χρησιμοποιείται με αειφορικό τρόπο, η χρήση της βιομάζας μπορεί να αντισταθμίσει τις εκπομπές αερίων από την καύση των ορυκτών καυσίμων. Μια από τις εκτιμήσεις του ρόλου που μπορεί να διαδραματίσει η βιομάζα στην μελλοντική παγκόσμια ενεργειακή κατάσταση (Intergovernmental Panel on Climate Change) υποδεικνύει ότι αν δεν ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα για την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, οι παγκόσμιες θερμοκρασίες αέρα αναμένεται να αυξηθούν κατά 0.3°C ανά δεκαετία, με ταυτόχρονη αύξηση του επιπέδου της θάλασσας κατά 6 μέτρα ανά δεκαετία. Η απελευθέρωση CO₂ από την χρήση της βιομάζας ως ενέργεια δεν προστίθεται στα παγκόσμια καθαρά επίπεδα CO₂, αφού τα αέρια που εκλύονται κατά την χρήση της είχαν απομακρυνθεί από την ατμόσφαιρα κατά τον σχηματισμό της βιομάζας [10] (Σχήμα 2.2)
6. Τα υγρά καύσιμα που παράγονται από βιομάζα δεν περιέχουν θείο, αποφεύγοντας έτσι τις εκπομπές SO₂, ενώ παράλληλα μειώνονται και οι εκπομπές NO_x.

7. Οι ενεργειακές καλλιέργειες και τα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας από βιομάζα μπορούν να δημιουργήσουν νέες θέσεις εργασίας σε αγροτικές περιοχές αναπτυσσόμενων χωρών, συμβάλλοντας κατά αυτό τον τρόπο στην κοινωνική πλευρά της αειφορικότητας.
8. Η βιομάζα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την κατασκευή υλικών που ονομάζονται βιοϋλικά. Η χρήση της βιομάζας για την παραγωγή τέτοιων υλικών στις εκβιομηχανισμένες χώρες ποικίλλει σημαντικά. Το ξύλο χρησιμοποιείται για την παραγωγή δομικών και κατασκευαστικών υλικών. Είναι, επίσης, δυνατόν να γίνουν και νέες εφαρμογές της βιομάζας σε αυτό τον τομέα. Για παράδειγμα, η βιομάζα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις βιομηχανίες σιδήρου και χάλυβα, καθώς και ως ανανεώσιμη πηγή άνθρακα στην παραγωγή συνθετικών οργανικών υλικών όπως χρώματα, διαλύτες και πλαστικά.



Σχήμα 2.2. Ο κύκλος του CO₂[5]

Παρά το γεγονός της ιδιαίτερα σημαντικής συμβολής που έχει η χρήση της βιομάζας στην παγκόσμια ενεργειακή κατάσταση, δεν παύουν να υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί και εμπόδια στην αξιοποίηση της:

1. Απαιτούνται μεγάλες επιφάνειες για την συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας και την μετατροπή της σε βιομάζα
2. Η παραγωγή βιομάζας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την παραγωγικότητα του εδάφους, το κλίμα, την διαθεσιμότητα νερού και τους παράγοντες διαχείρισης.
3. Η τιμή ανά μονάδα ενέργειας είναι, συχνά, υψηλότερη σε σχέση με τις τωρινές χαμηλές τιμές ορυκτών καυσίμων. Αυτό, όμως, δεν είναι απόλυτο και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τάση διακύμανσης των τιμών των ορυκτών καυσίμων.
4. Η συνολικά διαθέσιμη επιφάνεια που μπορεί να αποδοθεί αποκλειστικά στην παραγωγή βιομάζας (ενεργειακές καλλιέργειες) είναι περιορισμένη [1].
5. Η κοινωνία είναι διστακτική όσον αφορά την χρήση της βιομάζας ως πηγή ενέργειας, γεγονός που προέρχεται κυρίως από την έλλειψη ενημέρωσης και την γενικότερη άγνοια που επικρατεί σε αυτόν τον τομέα.
6. Απαιτούνται πολιτικές μεταρρυθμίσεις και συντονισμένες ενέργειες σε παγκόσμια κλίμακα.
7. Ο ανταγωνισμός που προβάλλουν οι εταιρίες παραγωγής και διάθεσης ορυκτών καυσίμων είναι ιδιαίτερα έντονος.
8. Η χρήση της βιομάζας στην παραγωγή βιοϋλικών, ενδεχομένως να μειώσει την υπάρχουσα ποσότητα της για την παραγωγή ενέργειας. Το παγκόσμιο δυναμικό απαίτησης βιομάζας για την παραγωγή τέτοιων υλικών κυμαίνεται μεταξύ 50 και 6084 Mt/έτος ανάλογα με την χρήση (π.χ. στην πετροχημική βιομηχανία 50-996 Mt/έτος), ενώ η χρήση γης ποικίλλει μεταξύ 5 και 678 Mha[9].

Όλες οι μελέτες υποδεικνύουν ότι το δυναμικό της βιομάζας είναι πολύ μεγάλο (33-1135 EJ/έτος). Οι παράγοντες που επηρεάζουν και θα επηρεάσουν στο μέλλον την παραγωγή και χρήση της βιομάζας είναι:

1. Η μεταβολή του παγκόσμιου πληθυσμού
2. Η οικονομική ανάπτυξη
3. Η ζήτηση τροφίμων
4. Η απόδοση των συστημάτων παραγωγής τροφίμων
5. Οι αποδόσεις των ενεργειακών καλλιεργειών

6. Η μελλοντική ανάπτυξη ανταγωνιστικών προϊόντων, όπως βιοϋλικά.
7. Οι ανταγωνιστικοί τύποι χρήσης γης [9]

2.1.3 Το δυναμικό της βιομάζας σε παγκόσμια κλίμακα

Η βιομάζα αποτελεί μια δεσμευμένη και αποθηκευμένη μορφή ηλιακής ενέργειας, αποτέλεσμα της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας των φυτικών οργανισμών. Στην διαδικασία της φωτοσύνθεσης, η ηλιακή ενέργεια μετατρέπεται σε χημική (γλυκόζη). Η διαδικασία αυτή μπορεί να περιγραφεί ως εξής:



Η βιομάζα που παράγεται αποτελείται από τρία βασικά στοιχεία: άνθρακα, οξυγόνο και υδρογόνο. Μικροποσότητες αζώτου και ιχνοστοιχείων συμπληρώνουν την δομή της βιομάζας. Οι μονοσακχαρίτες μετατρέπονται, εν συνεχεία, σε κυτταρίνη, ημικυτταρίνη και λιγνίνη. Η κυτταρίνη είναι η αφθονότερη οργανική ουσία στον πλανήτη. Συντίθεται από τα παραγόμενα μόρια γλυκόζης, τα οποία ενώνονται μεταξύ τους με άτομα οξυγόνου για να σχηματίσουν μακριές αλυσίδες ή πολυμερή. Ενώ το μόριο της κυτταρίνης αποτελείται αποκλειστικά από μονάδες γλυκόζης, το μόριο της ημικυτταρίνης περιλαμβάνει ένα μεγάλο αριθμό μονοσακχαριτών. Η λιγνίνη είναι ένα άμορφο τρισδιάστατο πολυμερές, με βασική δομική μονάδα το φαινυλοπροπάνιο με ένα φαινολικό δακτύλιο που υποκαθίσταται από μηδέν, και μια ή δύο ομάδες μεθοξυλίου ($-\text{OCH}_3$). Τα φυτά περιέχουν, κατά αναλογία, 40% κυτταρίνη, 35% ημικυτταρίνη και 15% λιγνίνη [2]. Η κυτταρίνη είναι τοποθετημένη σε ευθείς και στενά συνδεδεμένες ομάδες μικροϊνιδίων, με δεσμούς υδρογόνου και σημαντική ισχύ δεσμών. Η ημικυτταρίνη είναι περισσότερο διακλαδισμένη και έχει λιγότερη ισχύ. Η λιγνίνη είναι η συγκολλητική ουσία, που συγκρατεί τα συστατικά μεταξύ τους, και δρα ως εμπόδιο στην βιολογική αποικοδόμηση. Η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας γίνεται στο ορατό τμήμα του φάσματος, σε μήκη κύματος από 400-700nm [3,4].

Τα προϊόντα αφομοίωσης των φυτών (συνολική πρωτογενής παραγωγή) χρησιμοποιούνται για την διατήρηση του υπάρχοντος φυτικού υλικού και για την παραγωγή των νέων δομικών φυτικών υλικών (κυτταρίνη, πρωτεΐνες, λίπη, δηλαδή την καθαρή πρωτογενή παραγωγή). Αυτά τα δομικά φυτικά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάφορους σκοπούς [1].

Ανάμεσα στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η βιομάζα, στην παρούσα φάση, προμηθεύει περίπου το 15% της συνολικής ενέργειας (σύμφωνα με πρόσφατες εκτιμήσεις, η βιομάζα καλύπτει το 1/7 της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας και αφορά κυρίως τις παραδοσιακές χρήσεις της [5]), ενώ σε ορισμένα αναπτυσσόμενα έθνη συμβάλλει μέχρι και στο 80% της πρωτογενούς ενεργειακής κατανάλωσης. Αναφορικά για τις υπόλοιπες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορούμε να πούμε ότι η υδροηλεκτρική συμμετέχει με 2.7% ενώ η γεωθερμική, η ηλιακή και η αιολική με 0.7% [1].

Η βιομάζα είναι σημαντική για το τεράστιο δυναμικό της και για την ικανότητα της να επιφέρει μείωση στις συνολικές εκπομπές CO₂ [6]. Περίπου 300-500 Mtoe/έτος (12.3-20.5 EJ/έτος) παράγονται για την Ευρωπαϊκή Ένωση, ενώ η βιομάζα που παράγεται κάθε χρόνο παγκοσμίως ανέρχεται σε 172 δισεκατομμύρια τόνους ξηρού υλικού με ενεργειακό περιεχόμενο 3×10^{12} GJ. Άλλες εκτιμήσεις αναφέρουν ετήσια πρωτογενή παραγωγή βιομάζας 4500 EJ (4.5×10^{12} GJ) [7]. Η ενέργεια αυτή είναι περίπου δεκαπλάσια από την ενέργεια που καταναλίσκεται σε ολόκληρο τον κόσμο και ίση με τα διαπιστωμένα αποθέματα ορυκτής ενέργειας. Η παγκόσμια χρήση ορυκτών καυσίμων υπολογίζεται σε 400 EJ/έτος, ποσότητα που αποτελεί το 0.01% της ετήσιας συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας (3.5×10^6 EJ)[1]. Η βιομάζα είναι, επίσης, η πηγή του 14% της συνολικής παραγωγής θερμικής ενέργειας στις χώρες του ΟΟΣΑ. Το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας από βιομάζα καταναλίσκεται από τα νοικοκυριά (καυσόξυλα), καθώς και από βιομηχανίες ξύλου και πολτού [8].

Η βιομάζα, γενικά, μπορεί να αποκτηθεί από υπολείμματα παραγωγής ή από συγκεκριμένες καλλιέργειες, όπως θα αναλυθεί στην συνέχεια. Θεωρείται μια ελκυστική επιλογή μεταξύ των ανανεώσιμων πηγών. Η από κοινού χρησιμοποίηση της με τον

γαιάνθρακα σε εν λειτουργία εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι επιθυμητή, με σκοπό την απόκτηση σημαντικών τεχνικών, οικονομικών και περιβαλλοντικών οφελών [8].

2.1.4 Το δυναμικό της βιομάζας στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα, τα κατ' έτος διαθέσιμα γεωργικά και δασικά υπολείμματα ισοδυναμούν ενεργειακά με 3-4 Mtoe, ενώ το δυναμικό των ενεργειακών καλλιεργειών μπορεί άνετα να ξεπεράσει εκείνο των γεωργικών και δασικών υπολειμμάτων. Το ποσό αυτό αντιστοιχεί στο 30-40% της ποσότητας του πετρελαίου που καταναλώνεται ετησίως στην χώρα μας (1 t ξηρής βιομάζας αντιστοιχεί ενεργειακά σε 0.4 t πετρελαίου, περίπου). Εντούτοις, με τα σημερινά δεδομένα, καλύπτεται μόλις το 3% περίπου των ενεργειακών αναγκών της με την χρήση της διαθέσιμης βιομάζας.

Η βιομάζα στη χώρα μας χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή, κατά τον παραδοσιακό τρόπο, θερμότητας στον οικιακό τομέα (μαγειρική, θέρμανση), για την θέρμανση θερμοκηπίων, σε ελαιουργία, καθώς και, με την χρήση πιο εξελιγμένων τεχνολογιών, στη βιομηχανία (εκκοκκιστήρια βαμβακιού, παραγωγή προϊόντων ξυλείας, ασβεστοκάμινοι κ.α.). Η χρήση, όμως, αυτή είναι σε περιορισμένη κλίμακα. Ως πρώτη ύλη σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιούνται παραπροϊόντα της βιομηχανίας ξύλου, ελαιοπυρηνόξυλα, κουκούτσια ροδάκινων και άλλων φρούτων, τσόφλια αμυγδάλων, βιομάζα δασικής προέλευσης, άχυρο σιτηρών, υπολείμματα εκκοκκισμού κ.α.

Παρόλα αυτά, οι προοπτικές αξιοποίησης της βιομάζας στην χώρα μας είναι εξαιρετικά ευοίωνες, καθώς υπάρχει σημαντικό δυναμικό, μεγάλο μέρος του οποίου είναι άμεσα διαθέσιμο. Παράλληλα, η ενέργεια που μπορεί να παραχθεί είναι, σε πολλές περιπτώσεις, οικονομικά ανταγωνιστική αυτής που παράγεται από τις συμβατικές πηγές ενέργειας.

Από πρόσφατη απογραφή, έχει εκτιμηθεί ότι το σύνολο της άμεσα διαθέσιμης βιομάζας στην Ελλάδα συνίσταται από περίπου 7.5 εκατομμύρια τόνους υπολειμμάτων γεωργικών

καλλιεργειών (σιτηρών, αραβοσίτου, βαμβακιού, καπνού, ηλίανθου, κλαδοδεμάτων, κληματίδων, πυρηνόξυλου κ.α.) καθώς και από 2.7 εκατομμύρια τόνους δασικών υπολειμμάτων υλοτομίας (κλάδοι, φλοιοί κ.α.). Πέραν του ότι το μεγαλύτερο ποσοστό αυτής της βιομάζας παραμένει αναξιοποίητο, πολλές φορές αποτελεί αιτία δυσάρεστων καταστάσεων (πυρκαγιές, εξάπλωση ασθενειών κ.α.).

Από τις παραπάνω ποσότητες βιομάζας, το ποσοστό τους εκείνο που προκύπτει σε μορφή υπολειμμάτων κατά την δευτερογενή παραγωγή προϊόντων (εκκοκκισμός βαμβακιού, επεξεργασία ξύλου, μεταποίηση γεωργικών προϊόντων κ.α.), είναι άμεσα διαθέσιμο, δεν παρουσιάζει προβλήματα μεταφοράς και μπορεί να τροφοδοτήσει άμεσα διάφορα συστήματα παραγωγής ενέργειας. Έτσι, η εκμετάλλευση του μπορεί να καταστεί οικονομικά συμφέρουσα [5].

2.2 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ — ΓΕΝΙΚΑ

2.2.1 Είδη ενεργειακών καλλιεργειών και παραγωγή ενέργειας

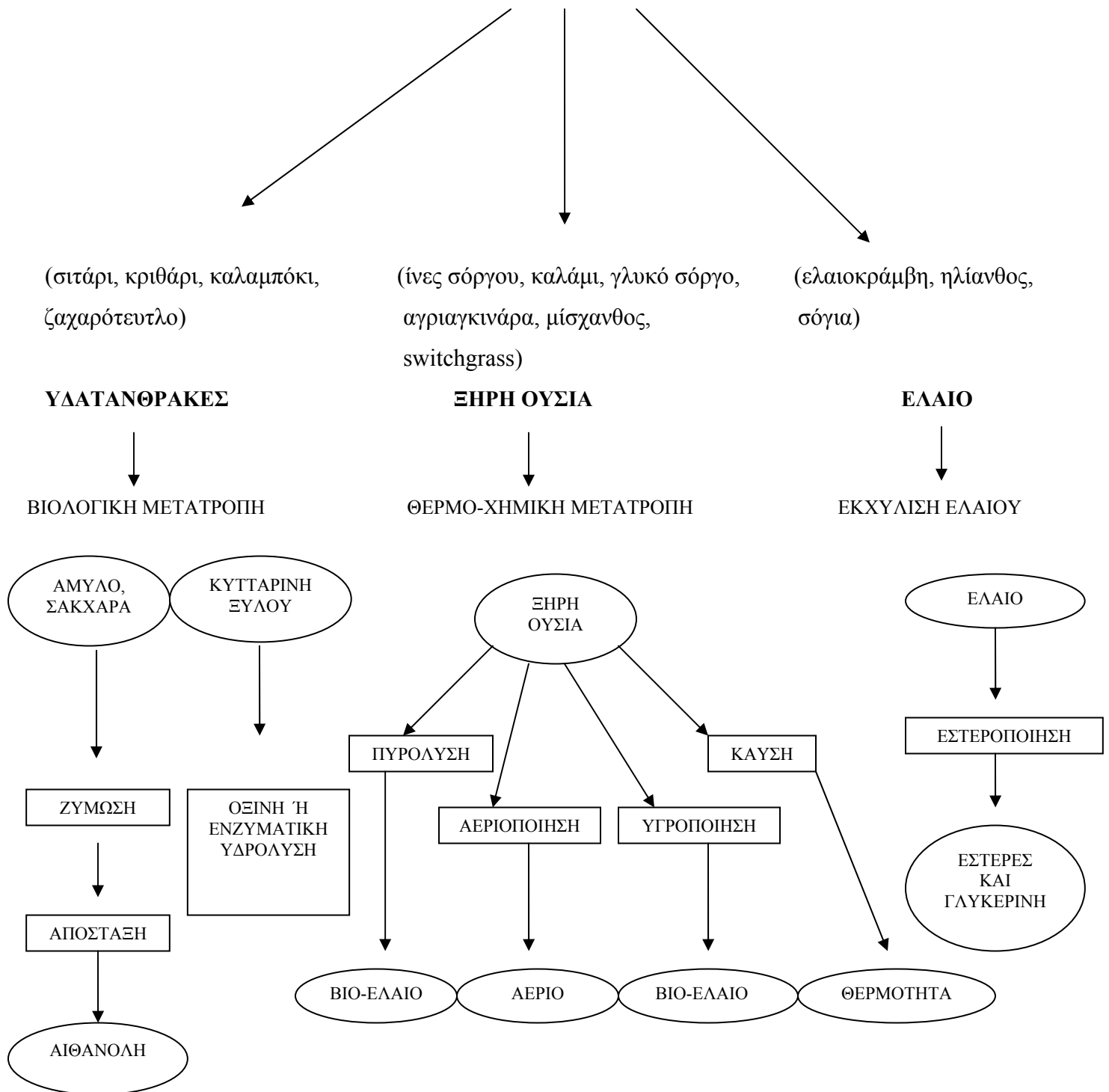
Από το 1970 και έπειτα, η βιομάζα έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον σε συζητήσεις σχετικά με τον μελλοντικό εφοδιασμό της Ευρώπης με ενέργεια. Περίπου 40 με 100 εκατομμύρια εκτάρια στην Ευρωπαϊκή Ένωση μπορούν να διατεθούν για σκοπούς εκτός της εγκατάστασης καλλιεργειών με στόχο την παραγωγή τροφίμων. Χρησιμοποιώντας μέρος αυτής της έκτασης για εγκατάσταση ενεργειακών καλλιεργειών μπορεί να οδηγήσει στην ικανοποίηση ενός σχετικού μέρους της ζήτησης για ενέργεια στην Ευρώπη, ενώ ταυτόχρονα θα συμβάλλει και στην μείωση των εκπομπών CO₂. Για τους αγρότες, οι ενεργειακές καλλιέργειες μπορούν να αποτελέσουν μια ενδιαφέρουσα πολιτική, καθώς οι επιδοτήσεις για τα αγροτικά τρόφιμα συνεχώς μειώνονται, ενώ παράλληλα η ζήτηση γεωργικών προϊόντων στην Ευρώπη αυξάνεται αλλά με αργούς ρυθμούς. Ενδιαφέρουσα είναι και η πιθανότητα εγκατάστασης ενεργειακών καλλιεργειών σε παραμελημένες εκτάσεις, χωρίς την απώλεια των υπάρχοντων εκτάσεων

που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή τροφίμων [11]. Επίσης, έχει διαπιστωθεί ότι η εφαρμογή λάσπης λυμάτων, σε μικρές ποσότητες, για ορισμένα είδη ενεργειακών καλλιεργειών, μπορεί να δράσει ως λίπασμα, αυξάνοντας τα επίπεδα απόδοσης των καλλιεργειών αυτών, ενώ παράλληλα περιορίζεται ο κίνδυνος που προβάλλουν τα λύματα αυτά για την δημόσια υγεία [12].

Με τον όρο *ενεργειακή καλλιέργεια ή ενεργειακή φυτεία* εννοείται η φυτεία εκείνη στην οποία η παραγόμενη βιομάζα προορίζεται για την παραγωγή ενέργειας [13]. Οι ενεργειακές καλλιέργειες μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις ομάδες, με βάση τα υλικά από τα οποία εξασφαλίζεται η ενέργεια (Σχήμα 2.3) [32]:

1. Γεωργικές φυτείες που τα παραγόμενα προϊόντα περιέχουν άμυλο ή σάκχαρο, τα οποία μπορούν να μετατραπούν σε αιθανόλη
2. Γεωργικές φυτείες που τα παραγόμενα προϊόντα περιέχουν έλαια κατάλληλα για την παραγωγή βιολογικού ντίζελ (βιοντίζελ)
3. Δασικές φυτείες που η παραγόμενη βιομάζα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή θερμότητας ή ηλεκτρισμού με καύση, πυρόλυση ή αεριοποίηση.

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ



Σχήμα 2.3. Φυτά ενεργειακών καλλιεργειών, διαδικασίες μετατροπής και προϊόντα [32]

Διακρίνονται, δηλαδή τρεις ενεργειακές αλυσίδες (energy chain):

1. Παραγωγή βιοντίζελ από φυτά με ελαιώδης σπόρους, μέσω εκχύλισης ελαίων και εστεροποίησης
2. Παραγωγή αιθανόλης, μέσω ζύμωσης από φυτά πλούσια σε κυτταρίνη, σάκχαρα και άμυλο
3. Παραγωγή βιομάζας, από φυτικά είδη με υψηλή παραγωγή σε ξηρή ουσία

Ενεργειακές καλλιέργειες για παραγωγή βιοντίζελ

Από το 1991, διάφορες Ευρωπαϊκές εταιρίες έχουν αναπτύξει αυτή την αλυσίδα, με την αρωγή της ενεργειακής πολιτικής της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ορισμένες εταιρίες πετρελαίου έχουν ξεκινήσει δοκιμές μιγμάτων βιοντίζελ – βενζίνης. Η συνολική επένδυση της Ευρωπαϊκής Ένωσης στην παραγωγή βιοντίζελ είναι περισσότερη από 50 εκατομμύρια €.

Τα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα του βιοντίζελ έχουν αποτελέσει αντικείμενο θεώρησης σε διεθνές επίπεδο εξαιτίας, της υψηλής ικανότητας του να βιοδιασπάται (80% μετά από 28 ημέρες), της έλλειψης θείου, του χαμηλού περιεχομένου σε βενζένιο και των χαμηλότερων εκπομπών σωματιδίων, αρωματικών και αερίων του θερμοκηπίου, σε σχέση με το ντίζελ.

Στην Ευρώπη, μόνο ο ηλίανθος, η ελαιοκράμβη και η σόγια έχουν επιτύχει υψηλά επίπεδα παραγωγής, που να δικαιολογούν την καλλιέργεια τους για ενεργειακή χρήση. Η σόγια είναι ένα φυτό με σπόρους υψηλής περιεκτικότητας σε πρωτεΐνη και έλαιο. Εξαιτίας αυτού του υψηλού περιεχομένου σε πρωτεΐνη, χρησιμοποιείται συχνά ως ζωοτροφή, και για αυτό το λόγο δεν έχει συμπεριληφθεί σε παραμελημένα εδάφη των Ευρωπαϊκών χωρών. Η ελαιοκράμβη και ο ηλίανθος μπορούν να καλλιεργηθούν σε παραμελημένα εδάφη σε όλη την Ευρωπαϊκή Ένωση, ακολουθώντας καθορισμένες διαδικασίες, και είναι δυο από τα πιο υποσχόμενα είδη για μελλοντική ανάπτυξη στην Ευρώπη. Ο ηλίανθος μπορεί να καλλιεργηθεί σε οποιαδήποτε περιοχή με χαμηλή

διαθεσιμότητα νερού, όπου μπορεί εύκολα να ανταγωνιστεί είδη με υψηλότερους συντελεστές εξατμισοδιαπνοής και κατανάλωσης νερού. Η ελαιοκράμβη μπορεί να καλλιεργηθεί σε ένα μεγάλο εύρος περιοχών της βόρειο-κεντρικής Ευρώπης και σε ορισμένες νοτιότερες περιοχές. Προβλήματα εγκατάστασης υπάρχουν σε περιοχές με ζαχαρότευτλο, διότι η ελαιοκράμβη αποτελεί ξενιστή ενός νηματώδους του ζαχαρότευτλου (*Heterodera schachtii*).

Τα φυτά παραγωγής βιοντίζελ δεν παρουσιάζουν τεχνικά προβλήματα, διότι έχουν καλλιεργηθεί για μεγάλο χρονικό διάστημα για την παραγωγή φυτικού ελαίου και πρωτεΐνης, και οι χρησιμοποιούμενες τεχνικές είναι γνωστές.

Γενικά, υπάρχουν μεγάλες διακυμάνσεις στις αποδόσεις των τριών αυτών φυτών, εξαιτίας περιβαλλοντικών και τεχνικών παραγόντων. Σε μια μελέτη σε 400 φυτείες στην βόρειο – ανατολική Ιταλία, το εύρος της διακύμανσης ήταν από 13 έως 122 GJ/ha για την ελαιοκράμβη και 14 έως 124 GJ/ha για τον ηλίανθο.

Παρά τους περιορισμούς και τα προβλήματα που προκύπτουν στην παραγωγή και χρήση του βιοντίζελ, οι οποίοι είναι κυρίως οικονομικής φύσεως, η εγκατάσταση φυτειών με ελαιοπαραγωγά φυτά φαίνεται ότι αποτελεί μια ελκυστική πρόταση για την άμβλυνση του ενεργειακού προβλήματος. Μόνο στην Ευρωπαϊκή Ένωση, οι ετήσιες ανάγκες σε βιοκαύσιμο ανέρχονται σε 500.000 t.[6]

Ενεργειακές καλλιέργειες για παραγωγή αιθανόλης

Στην Ευρώπη, το σχέδιο είναι να μειωθεί το ποσό των αρωματικών και της ολεφίνης στα καύσιμα, στο χρονικό διάστημα 2000-2005. Η αιθανόλη μπορεί να εξασφαλισθεί από ξυλώδη κυτταρινική βιομάζα ή μέσω διαδικασιών ζύμωσης από φυτά με υψηλό περιεχόμενο υδατανθράκων (δημητριακά, ζαχαρότευτλο, γλυκό σόργο, αγκινάρα της Ιερουσαλήμ).

Το ζαχαρότευτλο είναι το φυτό, που έχει μελετηθεί περισσότερο στον τομέα της παραγωγής αιθανόλης. Το βασικό εμπόδιο, ωστόσο, που υπάρχει στην περίπτωση του ζαχαρότευτλου προκύπτει από τις βιομηχανίες ζάχαρης.

Τα δημητριακά αποτελούν μια ενδιαφέρουσα προοπτική, διότι είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν διάφορες ποικιλίες και αγρονομικές τεχνικές με στόχο την καλύτερη σχέση εκροών – εισροών ενέργειας. Ανάμεσα στα δημητριακά, το σιτάρι, το κριθάρι, το καλαμπόκι και το σόργο θεωρούνται τα καλύτερα.

Παρόλα αυτά υπάρχουν δυσκολίες που σχετίζονται με την ανθεκτικότητα του σόργου στις ασθένειες, την συγκομιδή του, την μεταφορά και κυρίως το υψηλό περιεχόμενο υγρασίας του. Παρά τα προβλήματα που υπάρχουν, το φυτό αυτό εμφανίζει μεγάλο ενδιαφέρον, διότι από το ενεργειακό ισοζύγιο του προκύπτει υψηλό κέρδος στις γεωργικές και βιομηχανικές φάσεις παραγωγής του.

Το ενεργειακό ισοζύγιο σε όλα τα δημητριακά είναι θετικό. Οι διαφορές που ενδεχομένως να υπάρχουν οφείλονται στις διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες των περιοχών (Πίνακας 2.2).

Πέραν των θεμάτων που σχετίζονται με τις αποδόσεις των φυτών και την οικονομική πλευρά της εγκατάστασης των φυτειών, πρέπει να εξεταστούν τα περιβαλλοντικά θέματα που προκύπτουν από την παραγωγή αιθανόλης μέσω των ενεργειακών φυτειών. Η βίο – αιθανόλη ρυπαίνει λιγότερο από το πετρέλαιο, σε σχέση με το CO, τους HC, το SO_x και τους αρωματικού υδρογονάνθρακες και είναι περισσότερο βιοδιασπάσιμο.

Οι αλυσίδα της αιθανόλης, μαζί με την παραγωγή του βιοντίζελ, είναι πλήρως λειτουργικές από τεχνική πλευρά. Η έρευνα μπορεί να επιφέρει βελτιώσεις σε ορισμένα αδύναμα σημεία. Απαιτούνται οργανωμένες τεχνικές επιλογές, βασισμένες στην διαθέσιμη γνώση, σε πολιτικές πρωτοβουλίες και σε οικονομικά μέτρα, που θα καταστήσουν τις δύο αυτές διαδικασίες παραγωγής ανταγωνιστικές με τα υπάρχοντα ορυκτά καύσιμα [6].

Πίνακας 2.2. Στοιχεία αξιολόγησης επιλογής καλλιιεργειών για παραγωγή αιθανόλης [6]

	Σιτάρι	Κριθάρι	Καλαμπόκι	Κυτταρινούχο σόργο	Ζαχαρότευτλο	Γλυκό σόργο	Αγκινάρα της Ιερουσαλήμ
Προσαρμοστικότητα στο περιβάλλον	Υψηλή	Υψηλή	Χαμηλή	Καλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή
Εισαγωγή σε νέες καλλιέργειες	Εύκολη	Εύκολη	Περιορισμένη	Περιορισμένη	Περιορισμένη	Δύσκολη	Δύσκολη
Τεχνικές γνώσεις	Πολύ καλές	Πολύ καλές	Πολύ καλή	Καλή	Πολύ καλή	Δύσκολη	Δύσκολη
Τεχνικές ανάγκες	Μέτριες	Χαμηλές	Μέτριες	Χαμηλές	Υψηλές	Μέτριες	Υψηλές
Διαθεσιμότητα σπόρων	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Καλή	Καλή	Χαμηλή	Χαμηλή
Έλεγχος παρασίτων	Εύκολος	Εύκολος	Μέτριος	Μέτριος	Δύσκολος	Εύκολος	Εύκολος
Ειδική μηχανοποίηση	Διαθέσιμη	Διαθέσιμη	Διαθέσιμη	Διαθέσιμη	Διαθέσιμη	Πρωτότυπα	Μη διαθέσιμη
Κόστος μεταφοράς	Χαμηλό	Χαμηλό	Χαμηλό	Χαμηλό	Υψηλό	Υψηλό	Υψηλό
Διατήρηση	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή
Εφοδιασμός βιομηχανιών	Σταθερός	Σταθερός	Σταθερός	Σταθερός	Ασταθής	Ασταθής	Ασταθής
Μελλοντικό κέρδος απόδοσης	Υψηλό	Καλό	Χαμηλό	Καλό	Μέτριο	Δύσκολο	Δύσκολο

Ενεργειακές καλλιέργειες για παραγωγή λιγνό – κυτταρινικών φυτών

Τα φυτά είναι η παλαιότερη πηγή ενέργειας που έχει χρησιμοποιηθεί από τον άνθρωπο (κυρίως στην παραγωγή θερμότητας). Έχουν γίνει διάφορες μελέτες σε θερμό - χημικά είδη με αρκετά καλά αποτελέσματα. Προς το παρόν, η καύση έχει κερδίσει έδαφος, καθώς έχουν γίνει τεχνολογικές καινοτομίες που οδήγησαν στην αύξηση του συντελεστή αποτελεσματικότητας της καύσεως σε σχέση με το παρελθόν.[6] Κατά την πλήρη καύση της βιομάζας, το οξυγόνο ενώνεται με τον άνθρακα για να απελευθερωθεί CO₂, και με το υδρογόνο για να απελευθερωθεί νερό. Σε αντίθεση με την καύση των ορυκτών

καυσίμων, η καύση της βιομάζας δεν αυξάνει τα επίπεδα CO₂ στην ατμόσφαιρα, διότι ο C ανακυκλώνεται σε ένα κλειστό κύκλωμα.

Κατά την διαδικασία της καύσης μπορούν να διακριθούν τρία στάδια. Αρχικά λαμβάνει χώρα εξάτμιση της περιεχόμενης υγρασίας της ύλης, εν συνεχεία τα πτητικά συστατικά εκλύονται και καίγονται και τέλος, τα μη πτητικά ανθρακικά συστατικά καίγονται. Τα πτητικά καίγονται στην αέρια φάση, ενώ τα μη πτητικά στην στερεή φάση.[3]

Η έρευνα και ανάπτυξη έχουν επικεντρωθεί και σε δύο άλλες διαδικασίες, την πυρόλυση και την αεριοποίηση, ώστε σύντομα να γίνουν οικονομικά επικερδείς.

Η έρευνα, όμως, σε γενικές γραμμές έχει παρακωλυθεί εξαιτίας της έλλειψης χρηματοδοτήσεων. Ερωτήματα που πρέπει να απαντηθούν σχετίζονται με το σχήμα (δεμάτια, τεμαχίδια, pellets κ.α.), με τα μεγέθη, το ποσοστό υγρασίας, το ποσοστό στάχτης κ.α. Η αγρονομική έρευνα έχει επικεντρωθεί στην αξιολόγηση διαφορετικών ειδών σε σχέση με την καταλληλότητα και τα διαθέσιμα επίπεδα παραγωγής, χωρίς να εισέρχεται σε λεπτομέρειες σχετικά με τις χρησιμοποιούμενες τεχνικές και μεθόδους συγκομιδής.

Τα είδη τα οποία εμφανίζουν ενδιαφέρον στην αλυσίδα αυτή είναι το κυτταρινούχο σόργο, το οποίο κυριαρχεί ανάμεσα στα ετήσια φυτά, το καλάμι ανάμεσα στα πολυετή, ο μίσχανθος, η αγριαγκινάρα (όταν η διαθεσιμότητα νερού είναι ο περιοριστικός παράγοντας). Από τα άλλα είδη, κυρίως το switchgrass εμφανίζει ενδιαφέρον, διότι υπάρχουν διαφορετικοί οικότυποι που να ανταποκρίνονται στις περιβαλλοντικές συνθήκες που παρουσιάζει κάθε φυτεία.

Ανάμεσα στις διάφορες ομάδες ενεργειακών φυτειών, ορισμένες διαθέτουν σύγχρονες τεχνολογίες στις φάσεις της παραγωγής και μετατροπής. Οι περιορισμοί που τίθενται δεν είναι τόσο τεχνικής φύσεως, όσο οικονομικής και λογιστικής. Σε πολλές περιοχές οι εκροές ενέργειας είναι χαμηλές, αλλά υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης με την χρήση οργανωμένων τεχνικών, που να επιτρέπουν χαμηλές εισροές ενέργειας. Οι φυτείες λιγνό

– κυτταρινικής βιομάζας είναι ακόμη σε πειραματικό στάδιο, ενώ πρέπει να ενταθεί η έρευνα σε θέματα μηχανοποίησης της συγκομιδής και κόστους μεταφοράς.[6]

2.2.2 Συστήματα παραγωγής ενεργειακών καλλιεργειών

Και στις τρεις αλυσίδες που προαναφέρθηκαν, κατά την εγκατάσταση και εκμετάλλευση ενεργειακών καλλιεργειών, μπορούν να διακριθούν δύο διαφορετικά συστήματα παραγωγής [6]:

- 1 Εξαντλητική διαχείριση με χαμηλά επίπεδα εισροών ενέργειας, γεγονός που συχνά καταλήγει σε ανεπαρκή επίπεδα εκροών ενέργειας,
- 2 Εντατική διαχείριση με σκοπό την επίτευξη υψηλών αποδόσεων και σχετικά υψηλά επίπεδα εισροών ενέργειας και κόστους.

Οι εισροές που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας απαιτούν και οι ίδιες ενέργεια για την δική τους παραγωγή (έμμεση ενέργεια), αλλά και για την εφαρμογή τους στις καλλιέργειες (άμεση ενέργεια). Από το 1990 και έπειτα, έχουν γίνει πολλές μελέτες σχετικά με την χρήση ενέργειας ορυκτών πόρων στα συστήματα παραγωγής γεωργικών τροφίμων. Οι μελέτες αυτές περιλαμβάνουν συγκρίσεις μεταξύ οργανικής παραγωγής και παραγωγής υψηλών εισροών, επιπτώσεις της τεχνολογικής ανάπτυξης πάνω στην χρήση ενέργειας στην γεωργία και σύγκριση της χρήσης ενέργειας στην γεωργία μεταξύ διαφορετικών χωρών. Όλες οι μελέτες υποδεικνύουν ότι η χρήση ενέργειας στα συστήματα χαμηλών εισροών είναι μικρότερη σε σχέση με τα συστήματα υψηλών εισροών ενέργειας. Η απόλυτη ενεργειακή χρήση (GJ/ha) και η σχετική ενεργειακή χρήση (απαιτήσεις ενέργειας ανά μονάδα παραγόμενου προϊόντος) είχαν μεγαλύτερες τιμές στα συστήματα υψηλών εισροών ενέργειας. Επιπροσθέτως, η ενέργεια ορυκτών καυσίμων χρησιμοποιείται περισσότερο αποδοτικά στα συστήματα χαμηλών εισροών, τα οποία και έχουν την μεγαλύτερη παραγωγή βιομάζας ανά μονάδα εφαρμοζόμενης ενέργειας.

Επειδή δεν υπάρχει ουσιαστική διαφορά μεταξύ των συστημάτων παραγωγής γεωργικών τροφίμων και καλλιεργειών για ενεργειακή χρήση, συνεπάγεται ότι η μείωση της αποδοτικότητας χρήσης ενέργειας, με την αύξηση των εισροών που παρατηρείται στις καλλιεργείες τροφίμων, θα αποτελεί γεγονός και για τις ενεργειακές καλλιεργείες. Για την παραγωγή τροφίμων, όμως, η αποδοτικότητα χρήσης ενέργειας δεν παρουσιάζει κάποιο ουσιαστικό ενδιαφέρον, διότι η αξία του συγκομιζόμενου υλικού δεν καθορίζεται από την θερμογόνο αξία του. Για τις ενεργειακές καλλιεργείες, όμως, η αποδοτικότητα χρήσης ενέργειας ορυκτών καυσίμων και η απόδοση ενέργειας είναι σημαντικοί παράγοντες που καθορίζουν το δυναμικό ανάπτυξης τέτοιων καλλιεργειών. Μόνο οι καλλιεργείες που έχουν ενεργειακή απόδοση μεγαλύτερη από αυτή που χρησιμοποιείται για την παραγωγή τους, θεωρούνται κατάλληλες ως ενεργειακές καλλιεργείες. Μεγαλύτερο δυναμικό υπάρχει για τις καλλιεργείες που έχουν μεγαλύτερες καθαρές αποδόσεις, δηλαδή, μεγαλύτερες διαφορές μεταξύ εισροών και εκροών ενέργειας. Αυτή η οριακή συνθήκη δεν ισχύει για την παραγωγή τροφίμων, και υπάρχουν πολλές περιπτώσεις όπου η ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή μιας σοδειάς είναι μεγαλύτερη από αυτή που εξασφαλίζεται από αυτή (παραγωγή ντομάτας στο θερμοκήπιο).

Η απόδοση των εντατικών συστημάτων παραγωγής ορίζεται ως το δυναμικό επίπεδο παραγωγής μιας καλλιεργείας σε μια περιοχή. Η δυναμική παραγωγή είναι αυτή που μπορεί να εξασφαλισθεί από μια καλλιεργεία όταν αυτή εφοδιάζεται με νερό, θρεπτικά συστατικά και είναι ανεξάρτητη από επιδράσεις ασθενειών και εντόμων. Αυτό συνεπάγεται ότι μόνο τα χαρακτηριστικά των φυτών, η θερμοκρασία αέρα και η ηλιακή ακτινοβολία καθορίζουν την παραγωγή. Το δυναμικό επίπεδο απόδοσης είναι ένα μέτρο του τι μπορεί να εξασφαλισθεί, κάτω από τις ευνοϊκότερες συνθήκες καλλιεργείας σε μια περιοχή.

Η απόδοση των εξαντλητικών συστημάτων παραγωγής ορίζεται ως το δυναμικό επίπεδο παραγωγής ενέργειας μιας καλλιεργείας, όταν οι μόνες εισροές ενέργειας είναι κατά την περίοδο της φύτευσης των ενεργειακών φυτών και κατά την συγκομιδή τους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου συστήματος είναι η παραγωγή βιομάζας από

δασικές φυτείες, όπου οι περισσότερες εισροές ενέργειας προέρχονται από το ίδιο το σύστημα (π.χ. το άζωτο προέρχεται από την αποσύνθεση και απόθεση των υπολειμμάτων φυτικών μερών) [14].

Στην δεύτερη περίπτωση, οι περιοριστικοί παράγοντες είναι οι χαμηλές αποδόσεις και η ανάγκη χρησιμοποίησης μεγάλων εκτάσεων, ενώ το ενεργειακό κέρδος προέρχεται από χαμηλές εισροές ενέργειας και είναι συχνά χαμηλό. Στην πρώτη περίπτωση, απαιτείται περιορισμένη επιφάνεια, αλλά το αποτέλεσμα της διαχείρισης δεν μπορεί να αποτελέσει μέρος ενός αειφορικού τρόπου παραγωγής, εξαιτίας των σχετικά υψηλών εισροών ενέργειας (κυρίως λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων) [6].

2.2.3 Κριτήρια επιλογής φυτών για ενεργειακές καλλιέργειες

Στην περίπτωση που οι συνθήκες είναι ευνοϊκές για την εγκατάσταση ενεργειακών καλλιεργειών σε μια περιοχή, θα πρέπει τεθούν υπό εξέταση η επιλογή του κατάλληλου ή των κατάλληλων ειδών, καθώς και οι αρμόζουσες, στην περιοχή και στο είδος, τεχνικές εγκατάστασης. Πρέπει να γίνει, αρχικά, διάκριση μεταξύ πολυετών φυτών που μπορούν να αναπτυχθούν σε σαφώς προσδιορισμένες περιοχές και φυτών που μπορούν να εισαχθούν σε εναλλακτικές καλλιέργειες (μονοετή ή ετήσια φυτά). Στην πρώτη περίπτωση, τα φυτά είναι κυρίως ξυλώδη, ενώ στην δεύτερη αγροστώδη.

Οι προϋποθέσεις που πρέπει να υπάρχουν για να εγκατασταθεί με μεγάλες πιθανότητες επιτυχίας μια ενεργειακή φυτεία είναι [6]:

1. καταλληλότητα στις εδαφοκλιματικές συνθήκες της συγκεκριμένης περιοχής
2. ευκολία εισαγωγής σε προϋπάρχουσες γεωργικές καλλιέργειες
3. ομοιόμορφα και σταθερά επίπεδα αποδόσεων σε σχέση με την ποσότητα και την ποιότητα
4. ανταγωνιστικό εισόδημα σε σύγκριση με τις παραδοσιακές καλλιέργειες φυτών

5. θετικό ενεργειακό ισοζύγιο σε σχέση με την αναλογία $\frac{\text{εκροές}}{\text{εισροές}}$ και, ειδικότερα, σε σχέση με το καθαρό κέρδος (εκροές-εισροές)
6. χρήση τεχνικών εγκατάστασης και ανάπτυξης σε συμφωνία με την έννοια της αειφορίας
7. αντίσταση και ανθεκτικότητα στους κύριους βιοτικούς (μύκητες, βακτήρια, ιοί) και αβιοτικούς παράγοντες (pH, κλίμα, θρεπτικά συστατικά)
8. διαθεσιμότητα γενετικών πόρων (σπόροι, ριζώματα) κατάλληλων για διαφορετικές τοποθεσίες εγκατάστασης
9. χρήση μηχανημάτων κατάλληλων για το συγκεκριμένο φυτικό είδος, τις εδαφικές συνθήκες και τις κοινωνικές απόψεις της περιοχής.

Σε γενικές γραμμές, πριν γίνει η εγκατάσταση μιας ενεργειακής φυτείας πρέπει να ληφθούν υπόψη τα παρακάτω [6]:

1. η επιλογή των ειδών ανάλογα με τον τελικό προορισμό του (παραγωγή βιοντίζελ, αιθανόλης κ.α.) εξαρτάται από τις υπάρχουσες τεχνικές υποδομές
2. οι εκροές ενέργειας εξαρτώνται από το περιβάλλον και από τις χρησιμοποιούμενες τεχνικές
3. οι εισροές ενέργειας, αν και αποτελούν ένα σημαντικό παράγοντα, αυτός δεν είναι περιοριστικός, διότι η παραγωγή βιοενέργειας εξαρτάται πρωτίστως από την διαθέσιμη γη. Υπάρχουν περιθώρια μείωσης των εισροών με την χρήση των κατάλληλων μηχανημάτων
4. στις περισσότερες περιπτώσεις, όμως, οι εισροές ενέργειας δεν μπορούν να μειωθούν κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο. Όταν το καθαρό κέρδος ή η αναλογία $\frac{\text{εκροές}}{\text{εισροές}}$ και είναι σε χαμηλά επίπεδα, τότε η φυτεία θεωρείται αποτελεσματική όταν και το τελικό προϊόν έχει αξιόλογο οικονομικό κέρδος ή έχει σημασία για την τοπική κοινωνία, όχι όμως για την παραγωγή ενέργειας.
5. όλες οι φυτείες έχουν δυνατότητες βελτίωσης, με την χρήση νέων τεχνικών και γενοτύπων

6. η παραγωγή παραπροϊόντων μπορεί να συμβάλλει θετικά στην επίτευξη οικονομικού κέρδους από την εγκατάσταση μιας φυτείας, και να βελτιώσει, έτσι, το οικονομικό ισοζύγιο.

C₃ και C₄ φυτά

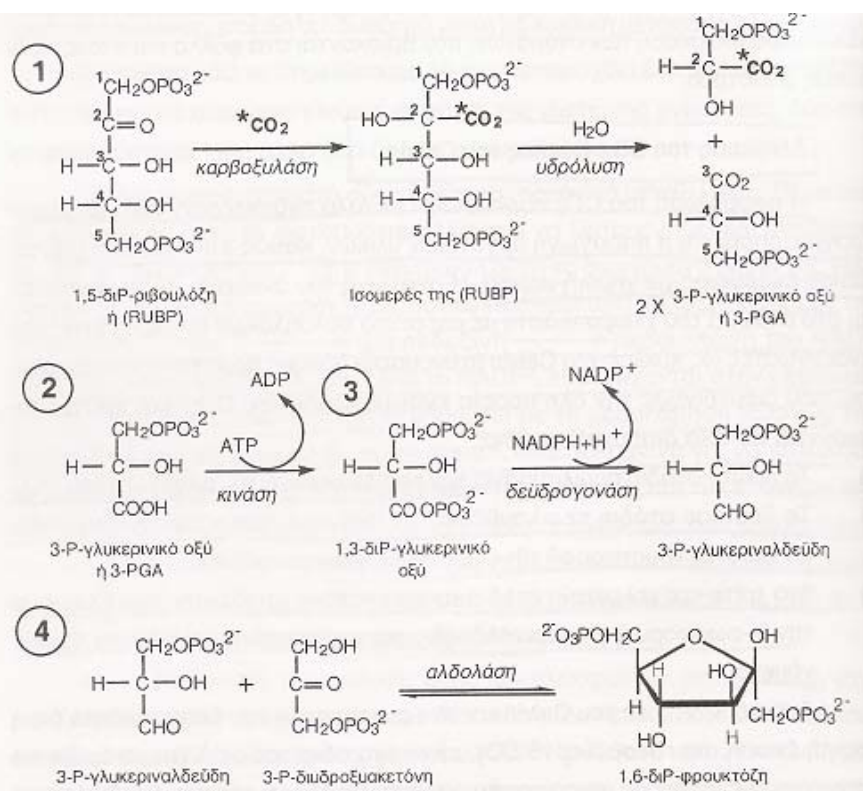
Το ιδανικό φυτό θα έχει μεγάλη ικανότητα μετατροπής της ηλιακής ενέργειας, θα απαιτεί χαμηλές εισροές χημικών ουσιών και θα έχει χαμηλά επίπεδα υγρασίας κατά την περίοδο της συγκομιδής. Τα C₄ φυτά είναι περισσότερο αποδοτικοί μετατροπείς σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών και φωτός. Τα θεωρητικά επίπεδα αφομοίωσης των φυτών αυτών είναι 350 kg/ha/ημέρα, σε σχέση με τα 200kg/ha/ημέρα των C₃ φυτών. Έχει αποδειχθεί ότι η εποχιακές αποδόσεις των φυτειών με ετήσια C₄ φυτά, όπως το σόργο και το καλαμπόκι, είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες των C₃ πολυετών φυτών. Αντίστοιχα, οι βαθμοί ανάπτυξης και οι εποχιακές αποδόσεις των C₄ πολυετών φυτών είναι μεγαλύτερες από αυτές των C₃ πολυετών, όταν και τα δύο είδη φυτών αναπτύσσονται στο ίδιο περιβάλλον [15].

Η διαφορά των δύο αυτών ομάδων φυτών έγκειται στην δέσμευση του CO₂ στις σκοτεινές αντιδράσεις. Η αφομοίωση του CO₂ παρουσιάζει πολύ μεγάλο ενδιαφέρον, διότι με αυτή τη διαδικασία πραγματοποιείται η παραγωγή οργανικών υλικών και η αποταμίευση ενέργειας με χημική μορφή. Η αναγωγή του άνθρακα πραγματοποιείται στο στρώμα του χλωροπλάστη με μια σειρά πολύπλοκων αντιδράσεων, που είναι γνωστές ως ο κύκλος του Calvin (Σχήμα 2.4) και πραγματοποιούνται σε τρία διαδοχικά στάδια:

- καρβοξυλίωση του αποδέκτη του CO₂
- αναγωγή των καρβοξυλικών οξέων σε αλδεϋδική μορφή (3-φωσφορική γλυκεριναλδεϋδη)
- αναγέννηση του αποδέκτη του CO₂ από την 3-φωσφορική γλυκεριναλδεϋδη, για να επαναληφθεί κυκλικά το φαινόμενο.

Η βασική ένωση που δεσμεύει το CO₂ είναι ένα σάκχαρο με 5 άτομα C εστεροποιημένο με 2 φωσφορικές ομάδες. Πρόκειται για τον 1,5-διφωσφορικό εστέρα της ριβουλόζης. Η

ενσωμάτωση του CO_2 επιτυγχάνεται με την καρβοξυλίωση της 1,5-διφωσφορικής ριβουλόζης από το ένζυμο καρβοξυλάση της 1,5-διφωσφορικής ριβουλόζης. Με την ενσωμάτωση του CO_2 , το σάκχαρο με 5 άτομα C μετατρέπεται σε μια ασταθή ένωση με 6 άτομα C, η οποία στην συνέχεια διασπάται σε δύο μόρια 3-φωσφορικού εστέρα του γλυκερινικού οξέος. Επειδή κάθε μόριο του 3-φωσφορικού εστέρα του γλυκερινικού οξέος περιέχει 3 άτομα C στο μόριο του, γι' αυτό ο κύκλος του Calvin χαρακτηρίζεται και ως C_3 κύκλος.



Σχήμα 2.4. Κύκλος του Calvin ή C_3 κύκλος[16]

Στα C_4 φυτά το πρώτο προϊόν της ενσωμάτωσης του CO_2 δεν είναι ο 3-φωσφορικός εστέρας του γλυκερινικού οξέος, αλλά μια ένωση με 4 άτομα C, το οξαλοξικό οξύ. Ο C_4 φωτοσυνθετικός κύκλος αναφέρεται και ως κύκλος των Hatch και Slack.

Εκτός από την διαφορά στην διαδικασία της φωτοσύνθεσης, τα C_4 φυτά έχουν και ανατομικές διαφορές στα φύλλα από τα C_3 φυτά.

Τα φυτά C_4 έχουν προσαρμοστεί σε ποικίλους ακραίους περιβαλλοντικούς παράγοντες, με αποτέλεσμα να αναπτύσσουν διάφορους φυσιολογικούς ή μορφολογικούς μηχανισμούς. Αναπτύχθηκαν, κατά βάση, σε τροπικά κλίματα και προσαρμόστηκαν πλήρως σε έντονο φως, υψηλές θερμοκρασίες και έντονη ξηρασία. Η άριστη θερμοκρασία για φωτοσύνθεση είναι αρκετά υψηλότερη από τα C_3 φυτά. Εξάλλου τα C_4 φυτά αναπτύσσονται σε θερμοκρασίες που θα μπορούσαν να αποβούν θανατηφόρες για πολλά C_3 είδη. Τέλος, εξαιτίας της αποτελεσματικής αξιοποίησης του CO_2 , τα C_4 φυτά μπορούν να πετύχουν την ίδια φωτοσυνθετική αναλογία με τα C_3 , με την διαφορά ότι αφήνουν μικρότερο άνοιγμα στομάτων στην επιφάνεια των φύλλων, με συνέπεια να συμβαίνει σημαντικά λιγότερη απώλεια νερού. Γενικά, η φωτοσυνθετική αναλογία των C_4 φυτών είναι κατά δύο ή τρεις φορές μεγαλύτερη της αντίστοιχης των C_3 φυτών [16].

Ορισμένα C_4 φυτά που χρησιμοποιούνται για ενεργειακές καλλιέργειες στην Ελλάδα είναι το γλυκό σόργο, το κυτταρινούχο σόργο και το switchgrass (Κ.Α.Π.Ε.).

2.2.4 Περιβαλλοντικές και κοινωνικό-οικονομικές επιπτώσεις των ενεργειακών καλλιεργειών

Η εγκατάσταση ενεργειακών καλλιεργειών στα διάφορων ειδών εδάφη θα επιφέρει ορισμένα αποτελέσματα, τόσο σε περιβαλλοντικό επίπεδο, όσο και σε οικονομικό και κοινωνικό. Τα αποτελέσματα αυτά δεν θα είναι πάντοτε θετικά και για το λόγο αυτό απαιτείται να γίνονται ολοκληρωμένες μελέτες, με βάση τους παράγοντες (κοινωνικούς, οικονομικούς, πολιτικούς, περιβαλλοντικούς) που επηρεάζουν και επηρεάζονται από τις ενεργειακές καλλιέργειες, προτού παρθεί η πολιτική απόφαση για την εγκατάστασή τους σε μια περιοχή. Μόνο σε μια τέτοια περίπτωση θα υπάρχουν αυξημένες πιθανότητες επιτυχίας της εγκατάστασης.

Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

- Εκμετάλλευση εδαφών χαμηλής γονιμότητας.

Τα εδάφη τα οποία μπορούν να αποδοθούν αποκλειστικά στην παραγωγή βιομάζας διαχωρίζονται σε τρεις κατηγορίες. Στα πλεονάζοντα αγροτικά εδάφη, στα υποβαθμισμένα και παραμελημένα γεωργικά εδάφη, και σε αποξηραμένους υγροτόπους.

Η έκταση που ενδέχεται να καταλαμβάνουν τα πλεονάζοντα γεωργικά εδάφη, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ενεργειακές φυτείες, είναι πολύ δύσκολο να υπολογιστεί, διότι πρέπει να ληφθούν υπόψη οι παρούσες και μελλοντικές απαιτήσεις γης για παραγωγή τροφίμων και ζωοτροφών. Στην παρούσα φάση, τα δασικά εδάφη μετατρέπονται σε γεωργικά, αυξάνοντας έτσι την συνολική έκταση των γεωργικών εδαφών. Εάν συνεχίσει να αυξάνεται η ζήτηση γης για γεωργική χρήση, τότε δεν θα υπάρχει διαθέσιμη γη για την παραγωγή βιομάζας από αυτή την κατηγορία.[9]

Αντίθετα, η εγκατάσταση ενεργειακών φυτειών σε υποβαθμισμένα εδάφη αποτελεί μια ελκυστική λύση για την αξιοποίηση των περιοχών αυτών. Ο Hall υπολόγισε ότι από τα 760 Mha των υποβαθμισμένων εδαφών τα 430 Mha μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ενεργειακές καλλιέργειες. Η EPA έχει υπολογίσει ότι η διαθέσιμη για αναδάσωση γη είναι περίπου 380 Mha. Ο Houghton έχει υπολογίσει περίπου 500-580 Mha. Συνοψίζοντας, μπορεί να γίνει η υπόθεση ότι περίπου 430-580 Mha υποβαθμισμένων εδαφών μπορούν να αποδοθούν στην εγκατάσταση ενεργειακών καλλιεργειών. Στις δύο πρώτες κατηγορίες διαθέσιμων εδαφών, το δυναμικό παραγωγής βιομάζας από ενεργειακές καλλιέργειες υπολογίζεται σε 0-998 EJ/έτος για τα πλεονάζοντα εδάφη και 8-110 EJ/έτος για τα υποβαθμισμένα εδάφη [9].

Σε γενικές γραμμές, όμως, επικρατεί η άποψη ότι η καλύτερη λύση για την εγκατάσταση ενεργειακών φυτειών είναι η χρήση των υποβαθμισμένων εδαφών. Η άποψη αυτή έχει τόσο περιβαλλοντικό, όσο και οικονομικό υπόβαθρο. Με τις τιμές βιομάζας για παραγωγή ενέργειας στις Η.Π.Α. να κυμαίνονται σε \$30/Mg ή και λιγότερο, η

εγκατάσταση ενεργειακών καλλιεργειών φαίνεται ανταγωνιστική μόνο σε αυτά τα εδάφη. Συγκεκριμένα, οι Η.Π.Α. έχουν 200 εκατομμύρια εκτάρια δασικών εδαφών, 140 εκατομμύρια εκτάρια γεωργικών εδαφών, 47 εκατομμύρια εκτάρια υποβαθμισμένων γεωργικών εδαφών και λιβαδιών, και 32 εκατομμύρια εκτάρια εκμεταλλευόμενα από ομοσπονδιακά προγράμματα. Έχει υπολογιστεί ότι περίπου 60 εκατομμύρια εκτάρια (Η.Π.Α.) μπορούν να μετατραπούν σε ενεργειακές καλλιέργειες[10]. Το μεγαλύτερο ποσοστό των εδαφών αυτών είναι υποβαθμισμένα.

- Προστασία έναντι της διάβρωσης του εδάφους.

Η διάβρωση του εδάφους έχει συντελέσει στην απώλεια 430 εκατομμυρίων εκταρίων γεωργικής γης παγκοσμίως. Η έκταση αυτή αποτελεί το 30% της παγκόσμιας έκτασης γεωργικής γης. Η απώλεια του εδάφους επηρεάζει αρνητικά τα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την παραγωγικότητα της γης, την ικανότητα συγκράτησης νερού, τα θρεπτικά συστατικά και την οργανική ύλη του εδάφους, την πυκνότητα του εδάφους και την μικροχλωρίδα και μικροπανίδα. Επίσης, τα ιζήματα που απομακρύνονται, συγκεντρώνονται σε λίμνες, ποτάμια και λεκάνες απορροής, συνιστώντας ακόμη μεγαλύτερες οικονομικές απώλειες στο άμεσο μέλλον.

Ο σχηματισμός του εδάφους είναι μια πολύ αργή διαδικασία. Υπολογίζεται ότι απαιτούνται περίπου 100 χρόνια για τον σχηματισμό 2.5cm εδάφους. Η διάβρωση μειώνει την μακροπρόθεσμη παραγωγικότητα των εδαφών. Η επίδραση της διάβρωσης διαφέρει ανάλογα με το βάθος του ανώτερου στρώματος του εδάφους, την σύνθεση και το βάθος του υποστρώματος, το φυτικό είδος που παράγεται κ.α.. Ο βαθμός υδατικής διάβρωσης, γενικά, αυξάνεται με την αύξηση της κλίσης. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την διάβρωση του εδάφους από το νερό είναι εμφανείς στην παγκόσμια εξίσωση απώλειας εδάφους:

Απώλεια εδάφους $y = RKLSCP$, όπου R ο δείκτης διάβρωσης λόγω βροχόπτωσης, K ο παράγοντας διαβρωσιμότητας του εδάφους, L ο παράγοντας μήκους πλαγιάς, S ο

παράγοντας κλίσης, C ο παράγοντας κάλυψης και διαχείρισης και P ο παράγοντας τρόπου καλλιέργειας [10].

Οι εγκατάσταση ενεργειακών καλλιεργειών με πολυετή αγροστώδη φυτά θεωρείται η καλύτερη λύση για την μείωση του προβλήματος της εδαφικής διάβρωσης, σε αντίθεση με τα ετήσια φυτά, τα οποία εξαντλούν το έδαφος από τα θρεπτικά του, δεν παρέχουν μόνιμη κάλυψη καθ' όλη την διάρκεια του έτους, ενώ το ριζικό τους σύστημα αναπτύσσεται, συνήθως, σε μικρά βάθη με αποτέλεσμα να μην προσφέρουν κατακράτηση των εδαφικών σωματιδίων σε μεγάλο βαθμό. Τα φυτά αυτά (τα πολυετή αγροστώδη) πρέπει να είναι ανθεκτικά στην ξηρασία και να έχουν ελάχιστες απαιτήσεις σε θρεπτικά. Για παράδειγμα, το switchgrass (*Panicum virgatum*), το *Andropogon gerardi*, το *Andropogon scoparius* και το *Sorghastrum nutans* ευδοκιμούν σε μεγάλη κλίμακα στην Β. Αμερική σε εδάφη ξηρά και άγονα με μεγάλους συντελεστές διάβρωσης. Το switchgrass σε αυτές τις περιοχές παράγει 4-14.3 Mg/ha ξηρής βιομάζας ετησίως, μια ποσότητα ανάλογη με αυτή της υβριδογενούς λεύκης. Επίσης, για τα φυτά αυτά υπάρχει ήδη εξοπλισμός και εμπειρία για την παραγωγή τους. Όταν εγκατασταθούν, τα κόστη συντήρησης είναι χαμηλά, διότι οι απαιτήσεις σε λιπάσματα και ζιζανιοκτόνα είναι πολύ χαμηλές.

Το τριφύλλι (*Medicago sativa*) είναι ένα ακόμη πολυετές φυτό κατάλληλο για παραγωγή βιομάζας σε διαβρωμένα εδάφη. Εγκαθίσταται με ευκολία ενώ η κύρια ρίζα του αναπτύσσεται σε μεγάλο βάθος, με αποτέλεσμα να αποτελεί ένα από τα πιο ανθεκτικά στην ξηρασία φυτά. Το τριφύλλι που προορίζεται για βιομάζα συγκομίζεται πιο αργά σε σχέση με το τριφύλλι για ζωοτροφές, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ποσότητα του υλικού που προορίζεται για καύση. Τα φύλλα του τριφυλλιού μπορούν να αφαιρεθούν από τους βλαστούς πριν την καύση, απομακρύνοντας μια ενδεχόμενη πηγή NO_x και παράγοντας ένα υψηλής πρωτεϊνικής αξίας συμπλήρωμα για τα ζώα [17].

- Διαχείριση του νερού

Γενικά, οι ενεργειακές καλλιέργειες με φυτά που παρέχουν μόνιμη κάλυψη εδάφους, ελέγχουν αποτελεσματικά την *επιφανειακή απορροή υδάτων* και η *διάβρωση* μπορεί να γίνει και αρνητική. Θετική είναι και η συνεισφορά στον *οργανικό άνθρακα του εδάφους*. Έχει αναφερθεί μέχρι και 25% αύξηση στο επιφανειακό έδαφος (0-7.5 cm) πολυετούς καλλιέργειας σε αντίθεση με καλλιέργεια καλαμποκιού.

- Βιοποικιλότητα.

Σημαντική είναι η συνεισφορά των πολυετών αγροστωδών φυτών και στην *βιοποικιλότητα*. Οι ενεργειακές φυτείες με τέτοια φυτικά είδη, είναι γνωστό ότι υποστηρίζουν περισσότερους πληθυσμούς αυτοχθόνων πτηνών, θηλαστικών και άλλων ζωικών ομάδων σε σχέση με τα ετήσια φυτά και τις μονοκαλλιέργειες[17]. Αναγνωρισμένη είναι, επίσης, η αξία των ενεργειακών φυτειών πολυετών αγροστωδών για τον καθαρισμό των αστικών λυμάτων, μειώνοντας έτσι, τις αρνητικές επιπτώσεις για την κοινωνία [18].

Τα ξυλώδη ταχυαυξή είδη θεωρείται ότι, γενικά, αναπτύσσονται καλύτερα σε γόνιμα γεωργικά εδάφη. Η παραγωγικότητα μειώνεται όσο μικρότερη είναι η παραγωγικότητα του εδάφους και όσο χαμηλότερο είναι το επίπεδο υγρασίας. Παρόλα αυτά, οι φυτείες ξυλωδών φυτών μπορούν να εγκατασταθούν σε εδάφη που θεωρούνται ακατάλληλα για συμβατική γεωργική χρήση, δηλαδή σε υποβαθμισμένα γεωργικά εδάφη. Τα είδη αυτά μπορούν να μειώσουν την διάβρωση του εδάφους από το νερό συγκρατώντας τα ιζήματα από διαβρωμένα εδάφη, να μειώσουν την επιφανειακή απορροή και να αυξήσουν τον βαθμό διήθησης του νερού. Οι Pimentel και Krummel[18] αναφέρουν ότι ο μέσος βαθμός διάβρωσης σε φυτείες με ξυλώδη είδη ήταν 2 Mg/ha/έτος σε κλίση 5%, ενώ η παραγωγή καλαμποκιού σε κλίση 4% έχει ως αποτέλεσμα απώλεια εδάφους περίπου 21.8 Mg/ha/έτος. Εντούτοις, οι Ranney και Mann αναφέρουν ότι το μεγαλύτερο ποσοστό διάβρωσης συμβαίνει στα 2 πρώτα χρόνια της εγκατάστασης της φυτείας, όταν δηλαδή, δεν υπάρχει καθόλου κάλυψη στο έδαφος. Συνεπώς, ο βαθμός εδαφικής διάβρωσης είναι πολύ μικρότερος από 2 Mg/ha/έτος.

Ο Kenney αναφέρει ότι, κάτω από διαχείριση ταχυναζών ξυλωδών φυτειών, προκαλείται αύξηση της οργανικής ουσίας στο έδαφος, λόγω της προσθήκης του φυλλώματος και της συνεισφοράς των πολυετών ριζικών συστημάτων. Η υπόθεση αυτή ενισχύεται από την διαπίστωση του Hansen, ο οποίος έδειξε ότι όταν αντικατασταθεί ένα γεωργικό λιβάδι από φυτεία υβριδογενούς λεύκης, ακολούθησε ορυκτοποίηση της επιφανειακής οργανικής ουσίας σε διάστημα 12 ετών. Σε φυτείες 12 και 18 ετών διαπιστώθηκε, επίσης, καθαρή αύξηση της οργανικής ουσίας του εδάφους σε σχέση με παρακείμενες γεωργικές εκτάσεις. [18]

Επίσης, η εγκατάσταση ξυλωδών ειδών σε παρόχθιες περιοχές σταθεροποιεί με φυσικό τρόπο τις όχθες μέσω του εκτεταμένου ριζικού συστήματος. Η λεύκη αποτελεί ένα τυπικό παράδειγμα τέτοιου είδους. Οι φυτείες λεύκης προτείνονται να εγκαθίστανται σε πλαγιές με μεγάλες κλίσεις, υποκείμενες σε ολισθήσεις. Χρησιμοποιούνται, επίσης, στους πυθμένες μικρών ρεμάτων για να αναχαιτίζουν την ροή του νερού και να κατακρατούν ιλύ και συντρίμματα. Και η ιτιά αποτελεί ένα ξυλώδες φυτικό είδος κατάλληλο για τέτοιες περιπτώσεις, ενώ έχει βρεθεί ότι στην Αυστραλία η ιτιά έχει την ικανότητα να συγκρατεί το έδαφος άλλα δεν προσφέρει αποτελεσματική κατακράτηση ιζημάτων και αύξηση του βαθμού διήθησης του νερού [10].

Σε αντίθεση με τις φυτείες πολυετών αγροστωδών, οι φυτείες ταχυναζών ειδών παρέχουν ένα ενδιάμεσο οικοτόπο, που χαρακτηρίζεται από εκτεταμένες αλλαγές στην δομή του οικοτόπου σε μικρό χρονικό διάστημα. Αυτές οι αλλαγές αντικατοπτρίζονται στην ζωοκοινότητα. Για παράδειγμα, η ορνιθοπανίδα σε μια φυτεία λεύκης, μεταβάλλεται από λιβαδικά είδη, στα δύο πρώτα χρόνια, σε δασικά είδη, για τα επόμενα επτά χρόνια της καλλιέργειας. Έτσι, μεταβάλλοντας τις συμβατικές καλλιέργειες σε φυτείες ξυλωδών ειδών, αυξάνεται η πυκνότητα και η ποικιλότητα των ειδών πτηνών, αλλά μπορεί να αλλάξει εντελώς η δυναμική των ζωοκοινοτήτων. Οι φυτείες, όμως, που εγκαθίστανται κοντά σε δασικές περιοχές μπορούν να αποτελέσουν ένα μεταβατικό ρυθμιστικό περιβάλλον για τα είδη της πανίδας που διαβιούν στα γειτονικά δασικά εδάφη [17]. Έχει, επίσης, διαπιστωθεί ότι η καλλιέργεια ταχυναζών ειδών σε ενεργειακές καλλιέργειες μπορεί να μειώσει το περιεχόμενο βαρέων μετάλλων στο έδαφος [18].

Παρά τις θετικές αυτές επιδράσεις των ενεργειακών φυτειών ταχυσυζών ειδών, έχει διαπιστωθεί ότι τα ξυλώδη είδη μπορούν να καταπιέσουν την αγροστόδη βλάστηση που αναπτύσσεται στον υπόροφο των δένδρων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην υπάρχει χαμηλή κάλυψη για το έδαφος και, σε περιπτώσεις ισχυρών βροχοπτώσεων, να λαμβάνει χώρα σοβαρή διάβρωση του εδάφους [10]. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει τον βαθμό της έρευνας που απαιτείται πριν την εγκατάσταση τέτοιων φυτικών ειδών για ενεργειακούς σκοπούς, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι πιθανότητες πρόκλησης σοβαρών βλαβών στα οικοσυστήματα.

Η τρίτη κατηγορία εδαφών όπου μπορεί να γίνει εγκατάσταση ενεργειακών καλλιεργειών είναι οι αποξηραμένοι υγρότοποι. Στην Ευρώπη έχουν εμφανιστεί αρκετά προβλήματα ρύπανσης των υδατικών πόρων εξαιτίας της αποξήρανσης τέτοιων πολύτιμων εδαφών. Η πλειονότητα των εκτάσεων των αποξηραμένων υγροτόπων έχουν μετατραπεί σε γεωργικές εκτάσεις. Οι αύλακες αποξήρανσης που διασχίζουν τις καλλιέργειες μεταφέρουν εδαφικά ιζήματα, λιπάσματα και εντομοκτόνα σε ρέματα, λίμνες και ποτάμια, συμβάλλοντας κατά αυτό τον τρόπο στον ευτροφισμό και την μείωση της βιοποικιλότητας των συστημάτων αυτών, ενώ παράλληλα αυξάνεται και ο κίνδυνος για την δημόσια υγεία. Οι υγρότοποι λειτουργούν ως φίλτρα για τις λεκάνες απορροής, απορροφώντας ιζήματα και θρεπτικά συστατικά από τα μικρά ρέματα, μειώνοντας, έτσι, την μετανάστευση τους στα μεγαλύτερα υδάτινα σώματα. Αυτή η μεγάλη περιεκτικότητα σε θρεπτικά και λεπτά εδαφικά υλικά καθιστούν τους υγροτόπους ιδιαίτερα παραγωγικά συστήματα.

Η ορθολογική διαχείριση των εδαφών αυτών συνίσταται στην αποκατάσταση και προστασία τους. Συνήθως, όμως, η μετατροπή τους σε γεωργικά εδάφη είναι δύσκολο να αποφευχθεί. Ένας τρόπος αειφορικής εκμετάλλευσης τους είναι η εγκατάσταση ενεργειακών καλλιεργειών με πολυετή φυτικά είδη, προσαρμοσμένα σε συνθήκες υψηλής εδαφικής υγρασίας. Τα φυτά αυτά θα συγκομίζονται στα μέσα με τέλη καλοκαιριού, όταν η περιεχόμενη υγρασία θα είναι σε αποδεκτά επίπεδα για την περαιτέρω χρησιμοποίησή τους. Τέτοια είδη είναι το *Calamagrostis canadensis*, το

Spartina pectinata, το *Andropogon gerardi* και το switchgrass (κατάλληλο για τις ελληνικές συνθήκες) [17].

Σε ορισμένες περιπτώσεις θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και ξυλώδη ταχυαυξή είδη. Η ιτιά, είδος αρκετά ανθεκτικό σε συνθήκες υψηλής υγρασίας, μπορεί να ευδοκιμήσει σε αυτά τα εδάφη. Η υβριδογενής λεύκη είναι ευαίσθητη στο υδατικό stress και μπορεί να αναπτυχθεί σε ένα στενό εύρος υδατικής διαθεσιμότητα. Γενικά, θα πρέπει να προτιμώνται αυτόχθονα είδη, τα οποία είναι και περισσότερο προσαρμοσμένα σε αυτές τις συνθήκες [19]. Παρόλα αυτά, στην περίπτωση που τέτοια είδη δεν ικανοποιούν τις ενεργειακές ανάγκες, για τις οποίες γίνεται η εγκατάσταση της φυτείας, θα πρέπει να επιλέγονται τα κατάλληλα είδη με βάση τις περιβαλλοντικές - οικολογικές απαιτήσεις τους και τους αντίστοιχους περιορισμούς που θέτουν αυτές.

Κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις

Όπως συμβαίνει με τα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας από μη ανανεώσιμες πηγές, έτσι και τα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας από βιομάζα χρειάζονται ένα μακροπρόθεσμο, αξιόπιστο και προβλέψιμο εφοδιασμό με πρώτες ύλες για να υπάρξει συνεχής ροή παραγωγής ενέργειας. Στην παρούσα φάση, το κυριότερο εμπόδιο στην ανάπτυξη εργοστασίων χρήσης βιομάζας είναι οι χαμηλές τιμές ορισμένων ορυκτών καυσίμων. Η ικανότητα οικονομικής επιβίωσης των ενεργειακών καλλιεργειών εξαρτάται κατά το μεγαλύτερο βαθμό από τα κόστη παραγωγής, τα κόστη μετατροπής της παραγόμενης βιομάζας σε χρήσιμη ενέργεια και τα κόστη των ανταγωνιστικών καυσίμων. Ο κανόνας για να γίνουν ανταγωνιστικές οι ενεργειακές καλλιέργειες είναι να παραχθούν με τον λιγότερο δαπανηρό τρόπο [15]. Εάν η τιμή της πρώτης ύλης δεν μπορεί να διατηρηθεί σε χαμηλά και σταθερά επίπεδα, τότε η ύλη αυτή δεν μπορεί να αυξήσει την ανταγωνιστικότητα της.

Οι πρώτες ύλες των ενεργειακών καλλιεργειών διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους σε θερμικό περιεχόμενο, ενώ είναι λίγα τα φυτικά είδη που προσεγγίζουν το θερμικό περιεχόμενο των ορυκτών καυσίμων. Τα καύσιμα αυτά παράγουν περισσότερο από 850

GJ/kg καυσίμου, ενώ το θερμικό περιεχόμενο των ξυλωδών ταχυανξών ειδών είναι, κατά μέσο όρο, 400 GJ/kg και των αγρωστωδών 160 GJ/kg.

Οι μακροοικονομικές αναλύσεις, προς το παρόν, δεν φαίνεται να ευνοούν την ευρεία παραγωγή βιομάζας για ενεργειακούς σκοπούς. Πρέπει, όμως, να ληφθούν υπόψη κάποιοι παράγοντες, πέρα από τα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα που προβάλλουν οι ενεργειακές καλλιέργειες, οι οποίοι θα επηρεάσουν το ενεργειακό καθεστώς στο μέλλον. Ένας από αυτούς είναι η αντικατάσταση των σημερινών εργοστασίων παραγωγής ενέργειας στο άμεσο μέλλον εξαιτίας της τεχνολογικής παλαίωσης. Τα εργοστάσια αυτά λειτούργησαν για πρώτη φορά σε μια περίοδο, όπου οι εναλλακτικές πηγές ενέργειας ήταν σε νηπιακό επίπεδο. Οι σημερινές τεχνικές και τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα της παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές προσφέρουν πληθώρα επιλογών για ιδιωτικές και κρατικές εταιρίες δημοσίας ωφέλειας, με την βιομάζα να αποτελεί μια ελκυστική λύση. Οι οικονομικοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον υπολογισμό της οικονομικότητας μιας ενεργειακής καλλιέργειας είναι [15]:

- Κόστος μεταφοράς, το οποίο είναι ανάλογο με την απόσταση της φυτείας από το εργοστάσιο μετατροπής και παραγωγής ενέργειας
- Κόστος πολλαπλασιαστικού υλικού, λιπάσματος και χημικών ουσιών, το οποίο είναι ανάλογο με την χρησιμοποιούμενη ποσότητα
- Κόστος καυσίμων, το οποίο εξαρτάται από την τρέχουσα τιμή του καυσίμου και από την εργασία που πρέπει να εκτελεστεί
- Κόστος επισκευών και συντήρησης, το οποίο εξαρτάται κυρίως από τον αριθμό των εργατωρών
- Κόστος εργασίας των χειριστών μηχανημάτων και ανειδίκευτων εργατών
- Χρησιμοποιούμενο επιτόκιο
- Κόστος ενοικίασης της καλλιεργούμενης έκτασης
- Απόσβεση για τα χρησιμοποιούμενα μηχανήματα και εργαλεία
- Κόστος εγκατάστασης
- Κόστος από την μη διάθεση της έκτασης και των μηχανημάτων σε μια άλλη, εκτός των ενεργειακών καλλιεργειών, εναλλακτική χρήση.

Ένα από τα προβλήματα που εμφανίζονται στην αποδοχή των ενεργειακών καλλιεργειών είναι η δυσπιστία που προβάλλεται από την πλευρά των αγροτών. Οι παράγοντες που απασχολούν την πλευρά των αγροτών σε αυτή την περίπτωση είναι το ενδεχόμενο κέρδος, οι απαιτήσεις σε μηχανικό εξοπλισμό, η διαθεσιμότητα της αγοράς, οι γνώσεις που απαιτούνται, τα κίνητρα που μπορούν να δοθούν από τις κυβερνήσεις[17], η δυνατότητα συμπαραγωγής ενεργειακών φυτών και γεωργικών τροφίμων και, κυρίως, ο βαθμός αβεβαιότητας σε ότι αφορά την διάθεση της παραγωγής, καθώς οι ενεργειακές καλλιέργειες αποτελούν μια καινοτομία στην γεωργική παραγωγή. Ο βαθμός στον οποίο θα γίνουν αποδεχτές οι ενεργειακές καλλιέργειες από τους γεωργούς και γαιοκτήμονες εξαρτάται από το καθαρό κέρδος που θα προκύψει, σε σχέση με την αμέσως επόμενη εναλλακτική επιλογή. Επίσης, η δυνατότητα παραγωγής παραπροϊόντων από τις ενεργειακές φυτείες, για σκοπούς μη ενεργειακούς, αποτελεί ένα ελκυστικό κίνητρο για τους γεωργούς, που ενδέχεται να ενισχύσει την εμπιστοσύνη τους σε αυτό το νέο είδος καλλιέργειας. Πολλές είναι οι φαρμακευτικές και χημικές βιομηχανίες που χρησιμοποιούν συστατικά των φυτικών ιστών για την παραγωγή των προϊόντων τους. Βεβαίως, τα συστατικά αυτά δεν πρέπει να επηρεάζουν την ενεργειακή αξία των φυτών, μιας και ο πρωταρχικός στόχος των ενεργειακών καλλιεργειών είναι η παραγωγή ενέργειας υψηλής απόδοσης και ποιότητας.

Επίσης, η απόφαση εγκατάστασης ενεργειακών καλλιεργειών και εργοστασίων παραγωγής ενέργειας από βιομάζα σε μια περιοχή εγείρει πολλά ερωτήματα στην κοινωνία, σε τοπικό επίπεδο. Ορισμένα από αυτά σχετίζονται με τα απόβλητα που θα προκύπτουν, καθώς επίσης και με τις οσμές και τις οπτικές οχλήσεις. Ειδικότερα, οι οσμές αποτελούν ένα σοβαρό μειονέκτημα καθώς, ανάλογα με το είδος της πρώτης ύλης μπορεί να είναι αρκετά έντονες (κουκούτσια καρπών). Αλλά και οι ίδιες οι ενεργειακές φυτείες αλλοιώνουν τον χαρακτήρα μιας περιοχής, μεταβάλλοντας σε μεγάλο βαθμό το τοπίο και την φυσιογνωμία της (π.χ. ο μίσχανθος μπορεί να φθάσει το ύψος των 3 m) [20].

Αναμφισβήτητα, η υιοθέτηση των ενεργειακών καλλιεργειών σε ευρύ επίπεδο για παραγωγή βιομάζας θα συντελέσει στην αύξηση των θέσεων απασχόλησης, για κάθε βαθμίδα εργατικού δυναμικού, σε τοπικό, περιφερειακό και διεθνές επίπεδο. Για να λειτουργήσει άρτια ένα ολοκληρωμένο σύστημα παραγωγής βιομάζας από ενεργειακές καλλιέργειες απαιτούνται γεωπόνοι, δασολόγοι, χημικοί μηχανικοί, μηχανολόγοι μηχανικοί, τεχνολόγοι, οικονομολόγοι, οδηγοί και ένας μεγάλος αριθμός ανειδίκευτων εργατών.

2.2.5 Μέθοδος εκτίμησης των επιπτώσεων των ενεργειακών καλλιεργειών

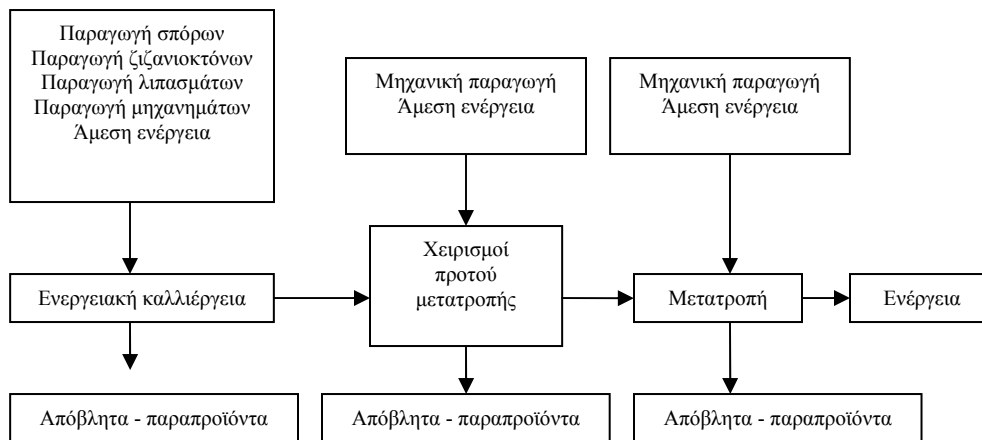
Προς το παρόν, οι περισσότερες μελέτες που έχουν διεξαχθεί στον τομέα των ενεργειακών καλλιεργειών σχετίζονται με την παραγωγή ενέργειας των καλλιεργειών και την ανακύκλωση του CO₂. Είναι μικρός ο αριθμός των μελετών που επιδιώκουν την ολοκληρωμένη εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την εγκατάσταση μιας ενεργειακής καλλιέργειας, ενώ ακόμη και αυτές επικεντρώνονται περισσότερο στον οικονομικό τομέα. Είναι, λοιπόν, απαραίτητο να αναπτυχθούν μέθοδοι πλήρους εκτίμησης των επιπτώσεων των ενεργειακών φυτειών, οι οποίες θα αποτελούν χρήσιμο εργαλείο στα χέρια των διαχειριστών και των ληπτών αποφάσεων.

Μια τέτοια μέθοδος έχει αναπτυχθεί από το Κέντρο για την Γεωργία και το Περιβάλλον την Δανίας (CLM). Πρόκειται, ουσιαστικά, για μια λεπτομερή ανάλυση των διαδικασιών και αλυσίδων που λειτουργούν μέσα σε μια ενεργειακή καλλιέργεια, και συνδέεται στενά με τον αξιολόγηση του κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment). Η διαφορά της μεθόδου αυτής από την τυπική LCA είναι ότι επικεντρώνεται στην αγροτική παραγωγή και όχι στην βιομηχανική. Επίσης, συμπεριλαμβάνει τόσο οικονομικά όσο και κοινωνικά κριτήρια. Σκοπός της μεθόδου είναι να συγκρίνει την οικολογική και κοινωνικοοικονομική βιωσιμότητα της παραγωγής και χρήσης των ενεργειακών φυτών, με άλλα φυτά και εναλλακτικές καλλιέργειες. Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει τα εξής [17]:

1. καθορισμό των λειτουργικών μονάδων
2. ανάλυση ολόκληρου του κύκλου ζωής των καλλιεργειών
3. καθορισμό των επιπέδων απόδοσης και των γεωργικών πρακτικών
4. ανάλυση των οικολογικών και οικονομικών κριτηρίων
5. καθορισμό των συστημάτων αναφοράς
6. καθορισμό των συστημάτων βαρύτητας

Η λειτουργική μονάδα περιγράφει την λειτουργία που επιτελεί ένα προϊόν για την κοινωνία και καθορίζει την ποσοτικοποίηση αυτής της λειτουργίας. Στην συγκεκριμένη μέθοδο καθορίστηκαν δύο λειτουργικές μονάδες: το ισοδύναμο ενός GJ ορυκτών καυσίμων και η ποσότητα γεωργικού προϊόντος από ένα εκτάριο σε ένα έτος.

Ο κύκλος ζωής των ενεργειακών καλλιεργειών είναι πολύ δύσκολο να μελετηθεί, καθώς κάθε τμήμα του κύκλου αυτού έχει τον δικό του κύκλο ζωής. Μια τυπική αναπαράσταση του κύκλου ζωής ενός ενεργειακού φυτού φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5. Κύκλος ζωής ενεργειακού φυτού[17]

Στην μέθοδο αυτή γίνεται διάκριση μεταξύ πραγματικής και δυναμικής εφαρμογής καθ' όλη την διάρκεια του κύκλου ζωής. Η πραγματική εφαρμογή αντιστοιχεί στις ισχύουσες μεθόδους καλλιέργειας και μετατροπής, ενώ η δυναμική αναφέρεται στο μέλλον,

υποθέτοντας τεχνικές εξελίξεις τόσο στην φάση της καλλιέργειας, όσο και στην φάση της μετατροπής.

Για κάθε οικολογικό και οικονομικό κριτήριο αναπτύχθηκε μια μέθοδος αποτίμησης. Οι ενεργειακές καλλιέργειες μπορούν να συγκριθούν με τις πηγές ορυκτών καυσίμων χρησιμοποιώντας τα κριτήρια 1,2 και 3. Όλα τα οικολογικά και οικονομικά κριτήρια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την σύγκριση των ενεργειακών καλλιεργειών μεταξύ τους, ή και με μη ενεργειακές καλλιέργειες. Γενικά, οι ενεργειακές καλλιέργειες θα αντικαταστήσουν αυτές με το μικρότερο οικονομικό κέρδος. Στην παρούσα φάση, τα υποβαθμισμένα εδάφη έχουν τις χαμηλότερες οικονομικές επιστροφές, ακολουθούμενες από τα δημητριακά. Για το λόγο αυτό, στην συγκεκριμένη μέθοδο χρησιμοποιήθηκαν οι αγροί και οι καλλιέργειες δημητριακών ως σύστημα αναφοράς.

Αυτή η μέθοδος εκτίμησης των περιβαλλοντικών και κοινωνικοοικονομικών επιπτώσεων των ενεργειακών καλλιεργειών μπορεί να εφαρμοσθεί σε οποιαδήποτε χώρα και περιοχή. Τα κριτήρια μπορούν να συμπληρωθούν, ανάλογα με τις συνθήκες που ισχύουν σε κάθε περιοχή. Πρέπει, όμως, να σημειωθεί ότι η μέθοδος αυτή φέρει, όπως και κάθε άλλη άλλωστε, έντονα στοιχεία υποκειμενικότητας σε κάθε σημείο εφαρμογής της, όπως π.χ. στην επιλογή των συντελεστών βαρύτητας και στην ανάλυση του κύκλου ζωής της ενεργειακής καλλιέργειας.

2.2.6 Χαρακτηριστικά καυσίμων από ενεργειακές καλλιέργειες

Η αγριαγκινάρα αποτελεί ενδημικό είδος των μεσογειακών χωρών. Εκτός από το γεγονός ότι μπορεί να αναπτύσσεται μόνη της στην ύπαιθρο, μπορεί να καλλιεργηθεί και να προσαρμοστεί εύκολα στις κλιματικές συνθήκες των περιοχών αυτών. Η συνολική παραγωγή βιομάζας από καλλιεργούμενη αγριαγκινάρα μπορεί να φτάσει τους 20 με 30 τόνους ξηρής ουσίας ανά εκτάριο, συμπεριλαμβανομένων 2000-3000 kg σπόρων. Έτσι, για παράδειγμα, αν η παραγωγή ξηρής ουσίας από αγριαγκινάρα είναι 2 t/στρέμμα, για μια μονάδα ηλεκτροπαραγωγής των 100MW απαιτούνται 106.250 τόνοι ξηρής βιομάζας. Άρα 53.125 στρέμματα ή 5.312 ha

Μεταξύ των θερμοχημικών μεθόδων μετατροπής της βιομάζας σε ενέργεια και προϊόντων βιομηχανικού ενδιαφέροντος, η απλούστερη είναι η πυρόλυση. Τα βασικά χαρακτηριστικά είναι αυτά της προσεγγιστικής ανάλυσης, της στοιχειακής ανάλυσης και

Πίνακας 2.3.: Χαρακτηριστικά καυσίμου από ενεργειακές καλλιέργειες

της θερμογόνου δύναμης και αναφέρονται σε ξηρή βάση. Από τη βιβλιογραφία, προκύπτει ο παρακάτω συνοπτικός Πίνακας 2.3.μερικών ενεργειακών καλλιεργειών.

	Αγριαγκινάρα [33,36,53,58]	Switchgrass [45,52,53,54,59]	Καλάμι [45,52,53,58]	Σόργο [53,58]	Μίσχανθος [52].
Υγρασία (%)	15 - 24	3 - 15	10 -28	25.7	16 - 62
Τέφρα (%)	8.4	3.5 - 10	2 - 11	2.7	1.6 - 4
Πτητικά αέρια (%)	77.3	75 - 80	55 - 60	61.3	
Μόνιμος άνθρακας(%)	14.3	13 - 14	12	10.3	
Θερμογόνος δύναμη (MJ/kg).	12.68 -18.2	16 - 17	16 - 19	16	17 - 19
C (%)	39-48	43-49	40-47	30-35	47 - 49
H (%)	4-6	5-6	5-6	4-5	5 - 6
N (%)	0.5-2	0.5 - 1.5	0.5 - 1	0.5-1	0.19 - 0.67
S (%)	0.1-0.2	0.08 - 0.2	0.07 - 0.2	0.02-0.1	0.04 - 0.19
O (%)	40-50	35 - 50	42 - 55	55-60	41 - 42

Η θερμογόνος δύναμη ποικίλει ανάλογα με τη θέση που έχει το φυτό ως προς τον ήλιο. Όταν τα φυτά βρίσκεται, καθ' όλη τη διάρκεια του αυξητικού του κύκλου, υπό την άμεση επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας, τότε η περιεκτικότητα σε υγρασία θα είναι χαμηλότερη και η θερμογόνος δύναμη υψηλότερη, από ότι στην περίπτωση που το φυτό σκιάζεται (π.χ. σε περιπτώσεις πιο ανεπτυγμένων ατόμων). [36]

Πιο συγκεκριμένα, κατά τα συγκομιδή της αγριαγκινάρας, το περιεχόμενο σε υγρασία των στελεχών της κυμαίνεται από 17 έως 18%, του καρπού της από 15 έως 23% (συμπεριλαμβανομένων και των σπόρων) και των φύλλων από 11 έως 17% [34,36].

Το switchgrass αποτελεί μια πολύ ελκυστική πηγή βιοκαυσίμου για τους λόγους που αναφέραμε παραπάνω. Η συνολική παραγωγή βιομάζας από switchgrass είναι της τάξης των 10.4 έως 36.4 τόνους ξηρής ουσίας στο εκτάριο , ανάλογα πάντα με την ποικιλία και την περιοχή εγκατάστασης της φυτείας.[52,53,54]

Κατά την προσδιορισμό των μεταλλοξειδίων στην τέφρα της βιομάζας παρατηρούμε ότι το μεγαλύτερο μέρος κατέχει το οξείδιο του πυριτίου.

Πίνακας 2.4.: Χημική ανάλυση τέφρας ενεργειακών καλλιεργειών.

	Αγριαγκινάρα	Switchgrass	Καλάμι	Μίσχανθος
	[64]	[57]	[63]	[63].
SiO₂ (%)	1.5 - 39.5	57.52	50.77	53.3
Al₂O₃ (%)	0 - 12.9	0.7	0.83	2.43
Fe₂O₃ (%)	0.1 - 7.9	5.45	0.72	1.22
CaO (%)	0.4 - 73.9	9.1	7.74	12.7
MgO (%)	1.7 - 19.4	4.64	10.06	10.8
Na₂O (%)	0.8 - 4.3	0.55	1.68	1.26
K₂O (%)	0 - 24.2	13.88	20.55	5.2
P₂O₅ (%)	0.3 - 14.4	6.56	7.66	6.5
SO₃ (%)	0.4 - 7	2.41	0.06 - 0.11	0.04 - 0.19
Cl (%)		0.93	0.32	0.02
As (mg/kg)		1.2		
Ba (mg/kg)		733		
Cr (mg/kg)		58		
Cd (mg/kg)		<5		
Pb (mg/kg)		40		

Οι διάφοροι τύποι βιομάζας έχουν χαμηλές θερμοκρασίες τήξης της τέφρας τους εν αντιθέσει με τους λιγνίτες, εξαιτίας του υψηλού περιεχομένου σε αλκάλια. Η τέφρα του ξύλου μαλακώνει στους 1250-1300°C, με συχνά μικρές διαφορές μεταξύ των σημείων ημισφαιρίου και σημείου ροής. Παρόλα αυτά, μερικοί τύποι παρουσιάζουν μια απόκλιση από αυτές τις τιμές. Οι ενεργειακές καλλιέργειες έχουν μια ευρύτερη απόκλιση στις θερμοκρασίες ημισφαιρίου μεταξύ των 750-1100 °C και στο σημείο ροής μεταξύ 1000 °C και 1350 °C [60].

Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση του άχυρου από σιτάρι η αρχική παραμόρφωση (IDT) κυμαίνεται από 900-1050 °C, η θερμοκρασία ημισφαιρίου (HT) από 1300-1400 °C και το σημείο ροής (FT) 1400-1500 °C.

Στην περίπτωση του άχυρου από κριθάρι η αρχική παραμόρφωση (IDT) κυμαίνεται από 730-800 °C, η θερμοκρασία ημισφαιρίου (HT) από 850-1050 °C και το σημείο ροής (FT) 1050-1200 °C.

Στην περίπτωση των υπολειμμάτων ρυζιού, η αρχική παραμόρφωση (IDT) κυμαίνεται από 800-850 °C, η θερμοκρασία ημισφαιρίου (HT) από 1050-1150 °C και το σημείο ροής (FT) 1300-1400 °C [65].

Γενικότερα, μπορούμε να πούμε ότι το εύρος των τιμών, σε όλα τα είδη των ενεργειακών καλλιιεργειών, συμβαδίζει με τα παραπάνω. Αυτό μπορούμε να το επικυρώσουμε και με τα αποτελέσματα των αναλύσεων που παρουσιάζονται, αναλυτικά, σε παρακάτω κεφάλαιο της παρούσας διατριβής.

2.3 ΟΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ

Γενικά

Οι ανάπτυξη των ενεργειακών καλλιεργειών στον ελληνικό γεωργικό χώρο αποτελεί μια ελκυστική λύση τόσο για την παραγωγή ενέργειας και υγρών βιοκαυσίμων, όσο και την αύξηση της ανταγωνιστικότητας του αγροτικού τομέα, την ενίσχυση της απασχόλησης, την προστασία του περιβάλλοντος, την εξασφάλιση αειφόρου περιφερειακής ανάπτυξης και την μείωση της εξάρτησης από το πετρέλαιο και τα ορυκτά καύσιμα. Στην Ελλάδα, οι προσπάθειες για την έρευνα και ανάπτυξη των ενεργειακών καλλιεργειών ξεκίνησαν στα τέλη της δεκαετίας του 80 και έχουν επικεντρωθεί[13]:

- Σε αγρονομικά θέματα. Ο κύριος στόχος που επιδιώκεται σε αυτό τον τομέα είναι να αποκτηθεί η βέλτιστη επίδοση των ενεργειακών καλλιεργειών συνταιριάζοντας παράγοντες τοπογραφίας, κλίματος και εδαφικών χαρακτηριστικών για ένα εύρος ειδών, ποικιλιών, υβριδίων και γενοτύπων. Τα χαρακτηριστικά που αναλύονται για κάθε φυτό είναι η προσαρμοστικότητα τους κάτω από διαφορετικές περιβαλλοντικές και καλλιεργητικές συνθήκες, τα χαρακτηριστικά της ανάπτυξης τους, όπως το ύψος και ο αριθμός των βλαστών ανά φυτό, και, τέλος, η παραγωγή βιομάζας ανά φυτό και ανά φυτικό μέρος.
- Στα χαρακτηριστικά των παραγόμενων καυσίμων. Εδώ, γίνεται κατηγοριοποίηση των ενεργειακών φυτών, με βάση την θερμιδική αξία και τις ιδιότητες τους. Διεξάγονται χημικές αναλύσεις διαφόρων καυσίμων, στοιχειομετρικές αναλύσεις τέφρας κ.α.
- Στα περιβαλλοντικά θέματα της παραγωγής βιομάζας. Εξετάζονται θέματα που σχετίζονται με το ισοζύγιο αζώτου και νερού, την διάβρωση του εδάφους και τις αγροχημικές εισροές λιπασμάτων και άλλων χημικών ουσιών.
- Στην μετατροπή της βιομάζας σε ενέργεια. Γίνεται κατηγοριοποίηση των τύπων παραγόμενης βιομάζας ανάλογα με την κατάλληλη τεχνολογία μετατροπής

(αεριοποίηση, πυρόλυση, ανθρακοποίηση, Fluidized Bed Combustion, Pulverized Fuel Combustion).

- Σε κοινωνικοοικονομικά ζητήματα. Αναλύεται η ικανότητα των ενεργειακών καλλιεργειών να αντικαταστήσουν τις συμβατικές καλλιέργειες.

Τρεις είναι οι κύριες κατηγορίες ενεργειακών φυτών που έχουν εξεταστεί μέχρι τώρα: τα πολυετή αγροστώδη, τα ετήσια αγροστώδη και τα ταχυσυζή ξυλώδη είδη.

Συγκεκριμένα, την τελευταία δεκαετία έχουν διεξαχθεί περισσότερα από 60 πειράματα στην Ελλάδα, σχεδόν αποκλειστικά μέσω του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Κ.Α.Π.Ε.), για την εκτίμηση του δυναμικού απόδοσης βιομάζας διάφορων ενεργειακών φυτών. Έχουν αναπτυχθεί, επίσης, μοντέλα χωρικής ανάλυσης, τα οποία έχουν ως βάση τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών, για την εκτίμηση του δυναμικού των ενεργειακών καλλιεργειών, ώστε να διευκολυνθούν οι γεωργοί και διαχειριστές στις αποφάσεις τους σχετικά με την καλλιέργεια και εκμετάλλευση της παραγόμενης βιομάζας[21]. Οι μελέτες έχουν επικεντρωθεί στα εξής φυτά[13,22]:

1. Ετήσια αγροστώδη

- 1.1 Sorghum bicolor (γλυκό και κυτταρινούχο σόργο)
- 1.2 Brassica carinata – Brassica napus (ελαιοκράμβη)
- 1.3 Hibiscus cannabinus (κέναφ)
- 1.4 Helianthus annuus (ηλίανθος)
- 1.5 Triticum aestivum (σιτάρι)
- 1.6 Beta vulgaris (ζαχαρότευτλο)
- 1.7 Zea mays (αραβόσιτος)
- 1.8 Hordeum sativum/Vulgare (κριθάρι)

2. Πολυετή αγροστώδη

- 2.1 Cynara cardunculus (αγριαγκινάρα)
- 2.2 Arundo donax (καλάμι)
- 2.3 Miscanthus x giganteus (μίσχανθος)

2.4 *Panicum virgatum* (switchgrass)**3 Ταχυσυδή δασικά είδη**3.1 *Eucalyptus globulus* (ευκάλυπτος)3.2 *Eucalyptus camaldulensis* (ευκάλυπτος)3.3 *Robinia pseudoacacia* (ψευδακακία)

Στην συνέχεια θα αναφερθούν τα χαρακτηριστικά ορισμένων από τα φυτικά αυτά είδη, που παρουσιάζουν την μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης σε ενεργειακές καλλιέργειες, τόσο στην Ελλάδα, όσο και στην Ευρώπη ευρύτερα.

Γλυκό και κυτταρινούχο σόργο (*Sorghum bicolor*) [13, 22, 23]

Το κυτταρινούχο σόργο είναι ετήσιο φυτό, με τροπικές καταβολές και ακολουθεί τον C₄ φωτοσυνθετικό κύκλο, με υψηλές αποδόσεις σε βιομάζα. Αντίθετα με το γλυκό σόργο, το κυτταρινούχο έχει σχετικά χαμηλή περιεκτικότητα σε διαλυτά σάκχαρα και το ενεργειακό δυναμικό του βασίζεται κυρίως στην υψηλή περιεκτικότητά του σε λιγνοκυτταρινούχα συστατικά. Το γλυκό σόργο έχει χαμηλές απαιτήσεις σε άρδευση και λίπανση, ενώ προσαρμόζεται εύκολα σε διάφορα είδη εδαφών και σε ποικίλες κλιματικές συνθήκες. Γενικά, το σόργο είναι προσαρμοσμένο καλύτερα στις



Εικόνα 2.1. *Sorghum bicolor*

περιβαλλοντικές συνθήκες της νοτιότερης

Ευρώπης. Εντούτοις, στις μεσογειακές ζώνες, η κύρια βλαστητική περίοδος του συμπίπτει με την ξηρή περίοδο και, γι' αυτό συχνά απαιτεί άρδευση. Όταν γίνεται άρδευση, μπορούν να ληφθούν πολύ υψηλές αποδόσεις (30 τόνοι ξηρού υλικού/ha).

Στην Ευρώπη, έχουν εξεταστεί πολλές ποικιλίες. Οι αποδόσεις τους ποικίλουν, ανάλογα με την περιοχή, τις κλιματικές συνθήκες, τη γονιμότητα του εδάφους και τις καλλιεργητικές τεχνικές που εφαρμόζονται. Το χλωρό βάρος κυμαίνεται από 8-10 τόνους/ στρέμμα στη Γερμανία, σε 9,2 τόνους/ στρέμμα στην Ισπανία και μπορεί να φτάσει τους 14,1 τόνους/ στρέμμα στην Ελλάδα. Το σόργο καλλιεργήθηκε στην Ελλάδα, για σειρά ετών, με σκοπό τη μελέτη της παραγωγικότητας του σε διάφορους τύπους εδαφών (περιθωριακά και γόνιμα) καθώς και την επίδραση διαφόρων καλλιεργητικών τεχνικών στις τελικές αποδόσεις.

Η αναλογία σε σάκχαρα, ποικίλει από 9-13.2% επί του χλωρού βάρους των στελεχών, οι δε αποδόσεις με βάση την παραγωγή φτάνουν τους 1.2 τόνους/ στρέμμα. Πρέπει να σημειωθεί ότι η προαναφερθείσα ποσότητα σακχάρων επιτυγχάνεται στις αρχές του Σεπτεμβρίου για τις πρώιμες ποικιλίες, και περίπου δεκαπέντε μέρες αργότερα για τις όψιμες. Σύμφωνα με πειραματικά δεδομένα, που βασίζονται στο χλωρό βάρος των στελεχών και στην περιεκτικότητά τους σε σάκχαρα, μπορεί να εξασφαλιστεί, θεωρητικά, μέση παραγωγή 675 λίτρων αιθανόλης/ στρέμμα.

Επιπλέον, μετά την επεξεργασία της πρώτης ύλης, μένουν μεγάλες ποσότητες υπολείμματος (bagasse), υψηλής θερμογόνου δύναμης, οι οποίες μπορούν να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες, τόσο της παραγωγής, όσο και της μετατροπής του σόργου σε αλκοόλη.

Το γλυκό σόργο μπορεί να καλλιεργηθεί από τις βορειότερες ως τις νοτιότερες περιοχές της Ελλάδας, σε εύφορα αλλά και υποβαθμισμένα εδάφη. Από τους παράγοντες που εξετάστηκαν, η άρδευση αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την επίτευξη υψηλών αποδόσεων, ενώ η αζωτούχος λίπανση δεν έδειξε να επηρεάζει καθοριστικά τις αποδόσεις. Στην Ε.Ε. πραγματοποιούνται έρευνες με σκοπό τη διεύρυνση της δυνατότητας αξιοποίησης του γλυκού σόργου για την παραγωγή βιοαιθανόλης σαν καύσιμο μεταφορών.

Στην Ελλάδα, το γλυκό σόργο έχει δοκιμαστεί τα τελευταία 8 χρόνια σε πειραματικές καλλιέργειες διαφορετικών γεωγραφικών περιοχών. Οκτώ διαφορετικές ποικιλίες έχουν δοκιμαστεί, από τις οποίες οι έξι είχαν πολύ καλή απόδοση. Η εγκατάσταση της φυτείας με σπόρους είναι απλή και εύκολη. Έχει διαπιστωθεί, επίσης, ότι η χρησιμοποίηση χαμηλών πυκνοτήτων φύτευσης (143.000 φυτά ανά εκτάριο) μπορεί να βελτιώσει την απόδοση σημαντικά. Το φυτό μπορεί να ευδοκιμήσει και στα φτωχότερα εδάφη της χώρας. Προβλήματα που εμφανίζονται κατά την παραγωγή είναι η έλλειψη του κατάλληλου εξοπλισμού συγκομιδής, η μικρή περίοδος επεξεργασίας για την παραγωγή αιθανόλης, ενώ το κυτταρινούχο σόργο εμφανίζει μεγάλη αντοχή στο πλάγιασμα κάτι που επιφέρει σημαντικά προβλήματα στην καλλιέργεια και συγκομιδή του.

Οι αποδόσεις για το γλυκό σόργο ποικίλουν μεταξύ 45 και 141 t/ha χλωρής βιομάζας και 13-45 t/ha ξηρής βιομάζας. Οι αντίστοιχες αποδόσεις για το κυτταρινούχο σόργο είναι 90 και 27 t/ha, αντίστοιχα. Το δυναμικό παραγωγής βιοαιθανόλης από το γλυκό σόργο υπολογίζεται περίπου σε 6.750 lit/ha.

Το σόργο έχει το πλεονέκτημα έναντι των περισσότερων ενεργειακών φυτών ότι μπορεί να ενσωματωθεί επιτυχώς στις υπάρχουσες συμβατικές γεωργικές καλλιέργειες. Πρέπει, όμως, να σημειωθεί ότι για να γίνει οικονομικά ανταγωνιστικό πρέπει να αρδεύεται επαρκώς. Μια λύση σε αυτό το πρόβλημα θα ήταν η άρδευση του με νερό από λύματα.

Ελαιοκράμβη (*Brassica carinata* - *Brassica napus*) [22, 23, 24]

Η ελαιοκράμβη είναι ετήσιο φυτό και ανήκει στην οικογένεια των Σταυρανθών ή Βρασσικίδων (Cruciferae ή Brassicaceae). Είναι, χωρίς αμφιβολία, το πιο διαδεδομένο φυτό ενεργειακών καλλιεργειών στην Ευρώπη και θεωρείται ως το τρίτο σημαντικότερο ελαιοπαραγωγό φυτό, μετά την σόγια και το φοινικέλαιο. Αυτό οφείλεται κυρίως στην ανάπτυξη της αγροτικής παραγωγής



Εικόνα 2.2. *Brassica napus*

της ελαιοκράμβης για τρόφιμα και ζωοτροφές και στην ευκολία κατεργασίας και εισαγωγής της στην αγορά.

Πολλαπλασιάζεται με σπόρο και καλλιεργείται κυρίως σαν πρώτη ύλη για την παραγωγή ελαίου και σε μικρότερη έκταση για τα φύλλα της. Μετά την εξαγωγή του ελαίου, τα υπολείμματά της (η λεγόμενη πίτα) χρησιμοποιούνται στην κτηνοτροφία. Είναι πολύ καλά προσαρμοσμένο στις τυπικές μεσογειακές κλιματικές συνθήκες. Ο μικρός στρογγυλός σπόρος της έχει κατά μέσο όρο περιεκτικότητα σε λάδι 30-50% και η πίτα της είναι πολύ πλούσια σε πρωτεΐνη.

Η *Brassica carinata* είναι πρώιμη, κυρίως διαδεδομένη στα εύκρατα δροσερά κλίματα. Υπάρχει σε δύο τύπους καλλιέργειας, την χειμερινή και την ανοιξιιάτικη. Η *Brassica napus* είναι φυτό αιθιοπικής προέλευσης, ψηλό, με μεγάλη φυλλική επιφάνεια, συγγενές της *Brassica carinata* και παρουσιάζει πολύ καλή προσαρμοστικότητα και ικανοποιητική παραγωγικότητα στις μεσογειακές χώρες.

Η καλλιέργεια, γενικά, απαιτεί υψηλά επίπεδα εισροών. Το συνολικό ενεργειακό ισοζύγιο είναι ελάχιστα θετικό. Υπάρχουν, ακόμη, πιθανότητες σημαντικών εκπομπών N_2O εξαιτίας του υψηλού ποσοστού αζωτούχου λιπάνσεως. Εντούτοις, η ελαιοκράμβη είναι ένα φυτό γνωστό στους Ευρωπαίους γεωργούς, οι οποίοι φαίνονται πρόθυμοι να το καλλιεργήσουν για ενεργειακούς σκοπούς.

Οι αποδόσεις της ελαιοκράμβης, από πειραματικά δεδομένα στην Ελλάδα, ποικίλουν μεταξύ 3-8 t/ha για την ξηρή ύλη και 1.2-2.5 t/ha για τις αποδόσεις σε σπόρο, με αντίστοιχη παραγωγή 43-90 λίτρων σε βιοντίζελ. Στην Ισπανία, οι αποδόσεις σε ξηρή ουσία ήταν μεταξύ 4-7.9 t/ha, με κατώτερη θερμική αξία 18.7 MJ/kg ξηρής ουσίας.

Ηλίανθος (*Helianthus annuus*) [22, 23]

Ο ηλίανθος είναι ετήσιο φυτό το οποίο ανήκει στην οικογένεια Compositae. Στην κεντρική και νότια Ευρώπη θεωρείται ως εναλλακτικό φυτό της ελαιοκράμβης, εξαιτίας των σχετικά



Εικόνα 2.3. *Helianthus annuus*

χαμηλών εισροών ενέργειας (αζώτου και ζιζανιοκτόνων) που απαιτεί.

Στην Ιταλία, η οποία είναι και η τρίτη παραγωγός χώρα βιοντίζελ στην Ευρώπη, χρησιμοποιώντας ως πρώτη ύλη τον ηλίανθο, περίπου 55000 εκτάρια ηλίανθου καλλιεργούνται για την παραγωγή βιοντίζελ. Η μέση απόδοση των σπόρων είναι 1.7-2.4 t/ha.

Στην Ελλάδα, από πειραματικές καλλιέργειες έχει υπολογιστεί ότι από ένα εκτάριο ενεργειακής καλλιέργειας ηλίανθου παράγονται κατά μέσο όρο 1200-2100 κιλά σπόρων με αντίστοιχη παραγωγή 43-75 λίτρων βιοντίζελ.

Στην Ελλάδα, ο ηλίανθος θεωρείται ένα πολύ σημαντικό φυτό και η καλλιέργεια του συγκεντρώνεται κυρίως στο βόρειο – ανατολικό τμήμα της χώρας. Καλλιεργείται ως πηγή φυτικού ελαίου διατροφής.

Μίσχανθος (*Miscanthus x giganteus*) [13, 20, 27, 28]

Ο μίσχανθος είναι ένα αγροστώδες, πολυετές και ριζωματώδες φυτό με C₄ φωτοσυνθετικό κύκλο. Το γένος *Miscanthus* έχει τις καταβολές του στις τροπικές και υποτροπικές χώρες, άλλα διάφορα είδη μπορούν να βρεθούν σε εκτεταμένο κλιματικό εύρος στην Ανατολική Ασία. Ο μίσχανθος καλλιεργήθηκε για πρώτη φορά στην Ευρώπη την δεκαετία του 1930. Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός καλλωπιστικών ποικιλιών του μίσχανθου με διάφορα κοινά ονόματα.



Εικόνα 2.4. *Miscanthus x giganteus*

Το 1935, ο Aksel Olsen εισήγαγε στην Δανία ένα στείρο γενότυπο, τον *Miscanthus x giganteus*, ο οποίος παρατηρήθηκε ότι είχε εξαιρετικά ζωνή ανάπτυξη.

Τα ριζώματα του μίσχανθου παραλαμβάνονται με το κόψιμο του ριζικού υλικού των μητρικών φυτών, κατά προτίμηση σε ηλικία πάνω από 3 έτη. Εκτός από την χρήση του ως στερεό καύσιμο, ο μίσχανθος μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την κατασκευή δομικών υλικών, όπως μοριοσανίδες ή ως πηγή κυτταρίνης.

Η βέλτιστη φυτευτική πυκνότητα είναι περίπου 10.000 φυτά/ha. Γενικά, απαιτεί χαμηλές εισροές σε λιπάσματα (5 kg N, 0.4 kg P₂O₅, 5.5 kg K₂O ανά τόνο ξηρής ουσίας ανά εκτάριο παραγωγής ανά έτος). Η συγκομιδή του γίνεται νωρίς, από τέλη Νοεμβρίου έως τέλη Φεβρουαρίου, όταν το περιεχόμενο υγρασίας είναι 12-15%.

Ο μίσχανθος χαρακτηρίζεται από υψηλές αποδόσεις σε χλωρή και ξηρή ουσία, χαμηλή περιεκτικότητα σε υγρασία και ανθεκτικότητα σε ασθένειες και παθογόνα. Επιπλέον, παρουσιάζει υψηλή αποτελεσματικότητα χρήσης νερού και νιτρικών, εξαιτίας του φωτοσυνθετικού κύκλου που ακολουθεί. Το μέσο ύψος της φυτείας, από μετρήσεις στην Ελλάδα, μπορεί να φθάσει τα 3 μέτρα, ενώ η απόδοση σε ξηρή βιομάζα κυμαίνεται μεταξύ 11-34 t/ha. Το ενεργειακό δυναμικό του είναι περίπου 13.8 Mtoe/ha/έτος. Γενικά, οι αποδόσεις του μίσχανθου, σε ευρωπαϊκό επίπεδο, μπορεί να διαφέρουν αισθητά από 2 μέχρι 44 t/ha.

Τα κυριότερα μειονεκτήματα του είναι το σχετικά υψηλό κόστος εγκατάστασης (αναπαράγεται με ριζώματα και *in vitro* καλλιέργειες), η χαμηλή ανθεκτικότητα του κατά την διάρκεια του πρώτου χειμώνα μετά την εγκατάσταση, ο αυξημένος κίνδυνος της χρήσης ενός μόνο κλώνου όσον αφορά τις επιδημίες εντόμων και ασθενειών και, τέλος, η μη ανάπτυξη ολόκληρου του δυναμικού του φυτού εξαιτίας των περιορισμένων επιλογών που θέτουν οι υπάρχοντες γενότυποι του είδους.

Τα τελευταία χρόνια, εξετάζεται η πιθανότητα χρησιμοποίησής του, ως ενεργειακή καλλιέργεια, αλλά και για την κατασκευή δομικών υλικών.

Αγριαγκινάρα (*Cynara cardunculus*) [22,25,26,33,34,35,47,48,49]

Η αγριαγκινάρα είναι ένα πολυετές είδος φυτού (αγκάθι) απόλυτα προσαρμοσμένο στις άνυδρες περιοχές της Νότιας Ευρώπης. Σχετικά με τη συστηματική του κατάταξη ανήκει στην τάξη Asterales (Compositae – Σύνθετα), στην οποία ανήκουν επίσης ο ηλίανθος (*Helianthus annuus*) και το safflower (*Carthamus tinctorius*). Τα φυτά της τάξης αυτής υποδιαιρούνται σε δύο οικογένειες, την Asteraceae και την Cichoriaceae, με την αγριαγκινάρα να ανήκει στην πρώτη. Περιλαμβάνει το γένος *Cynara* και συγκεκριμένα το είδος *cardunculus*.



Εικόνα 2.5. *Cynara cardunculus*

Παραδοσιακά καλλιεργείται σε μερικές περιοχές της Μεσογείου για ανθρώπινη κατανάλωση των μίσχων των φύλλων και ως ένζυμο για την παρασκευή τυριού[5]. Θεωρείται ζιζάνιο με βαθιά πασαλώδη ρίζα όμοια με αυτή της εδώδιμης αγκινάρας και η διαφορά της έγκειται στην ανάπτυξη των πλάγιων φύλλων, στο μικρό μέγεθος των οφθαλμών ή του καρπού καθώς και στις διαστάσεις και το μέγεθος το οποίο είναι ανώτερο από αυτό της κοινής αγκινάρας. Ως εδώδιμα μπορούν να θεωρηθούν τα πλάγια φύλλα και μέρη των κύριων φύλλων ενώ ο καρπός όχι, σε αντίθεση με την κοινή αγκινάρα. Μπορεί να φτάσει τα 1.8-2.5 μέτρα ύψος και κατέχει χώρο 1.2-1.8 τ.μ.

Το φυτό αναπτύσσεται σε ελαφρά (αμμώδη), μεσαία (αργιλώδη) και βαριά (πηλώδη) εδάφη, καθώς επίσης και σε φτωχά σε θρεπτικά συστατικά εδάφη. Προτιμά τα όξινα, ουδέτερα και βασικά εδάφη. Δεν μπορεί να αναπτυχθεί στη σκιά, ενώ η πλήρης έκθεσή της στον ήλιο δεν προκαλεί ζημιά στο φυτό. Απαιτεί ξερά ή ελαφρώς υγρά εδάφη και μπορεί να αντέξει την ξηρασία και τους δυνατούς ανέμους, αλλά όχι την έκθεσή του σε θαλάσσια περιβάλλοντα. Αναπτύσσεται σε εδάφη με σχεδόν ουδέτερο pH (6.6 - 7.5) αλλά και σε εδάφη ελαφρώς αλκαλικά (7.6 - 7.8).

Είναι ένα πολυετές φυτό το οποίο κατά τη διάρκεια του φυσικού του κύκλου βλαστάνει το φθινόπωρο με τις πρώτες βροχοπτώσεις. Περνά το χειμώνα όντας στο στάδιο του ρόδακα και την άνοιξη αναπτύσσει ανθοφόρους βλαστούς, οι οποίοι ξεραίνονται κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Οι ρίζες του παραμένουν ζωντανές αλλά σε κατάσταση λήθαργου, μέχρις ότου να αρχίσει ο νέος κύκλος με την έκπτυξη των φύλλων από τις ρίζες κατά τις φθινοπωρινές βροχοπτώσεις. Όπως τα περισσότερα είδη αγκαθιών, έτσι και η αγριαγκινάρα είναι πολύ καλά προσαρμοσμένη στις καλοκαιρινές συνθήκες ξηρασίας, ενώ σαν χειμερινό φυτό απαιτεί χαμηλές εισροές νερού αφού επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση βιομάζας. Εξαιτίας της ικανότητας του ριζικού της συστήματος να αναπτύσσεται σε μεγάλα βάθη, η αγριαγκινάρα μπορεί να προσροφά νερό και θρεπτικά συστατικά από βαθιές εδαφικές ζώνες σε άνυδρες συνθήκες, εκμεταλλευόμενη το νερό της βροχόπτωσης, που συσσωρεύεται κατά τη διάρκεια του φθινοπώρου, του χειμώνα και της άνοιξης. Μπορεί να παράγει μεγάλα ποσά βιομάζας, σε σχέση με άλλα πολυετή ενεργειακά φυτά που αναπτύσσονται στις ίδιες περιορισμένες κλιματολογικές συνθήκες [50]. Επίσης, προσφέρει προστασία ενάντια στην διάβρωση του εδάφους, εξαιτίας του ισχυρού ριζικού του συστήματος.

Για καλύτερα αποτελέσματα, κατά τη φύτευση και την περίοδο ανάπτυξης απαιτείται αρκετή υγρασία και πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά έδαφος, εν αντιθέσει με τις απαιτήσεις του ενήλικου πια φυτού που είναι ανθεκτικό στη ξηρασία. Αντέχει σε θερμοκρασίες -10°C και μπορεί να αναπτύσσεται καλύτερα σε ξηρά και θερμά καλοκαίρια, ενώ οι υγροί χειμώνες μπορούν να προκαλέσουν μεγαλύτερες βλάβες από ότι ο κρύοι.

Η παραγωγικότητα της φυτείας αγριαγκινάρας σε ξηρή βιομάζα, χωρίς άρδευση, είναι ιδιαίτερα υψηλή, σε αντίθεση με είδη όπως ο μίσχανθος και το καλάμι. Προηγούμενες μελέτες έχουν δείξει ότι η ενεργειακή αυτή καλλιέργεια μπορεί να παράγει από 15 έως 30 t/ha ξηρής βιομάζας το χρόνο, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί κυρίως για ενεργειακούς σκοπούς, παραγωγή χαρτοπολτού ή ζωοτροφών, γεγονός που αυξάνει την αξία της σε επίπεδο καλλιέργειας. Παράγει επίσης από 1.5 έως 2.5 τόνους/ εκτάριο σπόρους, οι οποίοι έχουν υψηλό περιεχόμενο σε έλαιο (22-25%) και πρωτεΐνες (περίπου

15-20%). Το έλαιο αυτό είναι παρόμοιο με του ηλίανθου και τα τέσσερα κύρια λιπαρά οξέα είναι το παλμιτικό (11-14%), το στεαρικό (3%), το ολειακό (25%) και το λινολεϊκό (56%). Η βιομάζα που συλλέγεται είναι πρακτικά άνυδρη, πράγμα που ελαχιστοποιεί ένα από τα μειονεκτήματα της αγροτικής βιομάζας για βιομηχανικές χρήσεις και που έχει να κάνει με τα υψηλά ποσοστά υγρασίας που επηρεάζουν τη μεταφορά, αποθήκευση και συντήρησή της. Τα στοιχεία αυτά είναι πολύ ελπιδοφόρα, αλλά είναι ανάγκη να επιβεβαιωθούν και από καλλιέργειες που αναπτύσσονται σε διαφορετικές εδαφοκλιματικές συνθήκες.

Στην Ελλάδα, η αγριαγκινάρα έχει δοκιμαστεί σε πειραματικές φυτείες από το 1994. Αποδείχθηκε ότι είναι ένα φυτό με πολύ καλή προσαρμοστικότητα και υψηλές αποδόσεις. Οι υψηλότερες από αυτές εξασφαλίσθηκαν σε φυτευτικές πυκνότητες 30.000 φυτών/ha, το οποίο όμως δεν είναι σταθερό, καθώς οι αποδόσεις μπορούν να αλλάξουν όσο το φυτό αναπτύσσεται. Το φυτό μπορεί να φτάσει τα 2.6 μέτρα σε τελικό ύψος, με παραγωγή ξηρής βιομάζας από 16.96 έως 31.67 t/ha.

Γενικά, για την Ελλάδα θεωρείται ως ένα πολλά υποσχόμενο φυτικό είδος ενεργειακών καλλιεργειών για μη αρδευόμενες περιοχές, χαμηλής παραγωγικότητας και με εδάφη επιρρεπή στην διάβρωση. Το κυριότερο εμπόδιο στην καλλιέργεια θεωρείται η έλλειψη κατάλληλου εξοπλισμού συγκομιδής. Γι' αυτό, πρέπει να δοθεί προτεραιότητα στην ανάπτυξη και βελτίωση αυτών των ελλειμματικών τομέων, ώστε η αγριαγκινάρα να λάβει της κατάλληλης προσοχής και χρήσης για την παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας και βιοελαίου.

Switchgrass (*Panicum virgatum*)[22, 38,39,40,41,42,51]

Το switchgrass είναι ένα πολυετές C₄ και αγροστώδες φυτό. Αποτελεί ενδημικό φυτό των βόρειων και κεντρικών περιοχών της Αμερικής, αλλά έχει εντοπιστεί και στην νότιο Αμερική και Αφρική. Σχετικά με τη φυσιολογική του ταξινόμηση, το switchgrass ανήκει στην τάξη Poales και την οικογένεια Poaceae. Λόγω της ενδημικότητάς του αυτής, το switchgrass είναι ανθεκτικό σε πολλά είδη φυτοπαράσιτων και ασθενειών. Έχει την ικανότητα να παράγει μεγάλες ποσότητες υλικού με πολύ χαμηλή εφαρμογή λιπασμάτων. Αυτό σημαίνει ότι η ανάγκη για χημικές γεωργικές εφαρμογές κατά την ανάπτυξη του είναι σχετικά χαμηλές. Είναι, επίσης, αρκετά ανθεκτικό σε εδάφη φτωχά σε θρεπτικά συστατικά, υδατικά κορεσμένα καθώς και σε άγονα και άνυδρα, τα οποία αποτελούν συνηθισμένα αγρονομικά προβλήματα ιδιαίτερα των νότιο-ανατολικών περιοχών.



Εικόνα 2.6. *Panicum virgatum*

Υπάρχουν δύο κύρια είδη switchgrass: αυτά των ορεινών περιοχών, που αναπτύσσονται μέχρι τα 1.5 έως 1.8 μέτρα ύψος και προσαρμόζονται καλύτερα σε ένυδρα εδάφη και αυτά των χαμηλών περιοχών (κάμπος), που αναπτύσσονται πάνω από 3.5 μέτρα ύψος και παρατηρούνται συνήθως σε βαριά εδάφη των χαμηλών περιοχών. Παρά το γεγονός ότι το switchgrass εμφανίζεται σε συγκεκριμένες περιοχές, η ανάγκη των παραγωγών οδήγησε στην ανάπτυξη ενός αρκετά μεγάλου αριθμού βελτιωμένων ποικιλιών, με σκοπό τη χρήση του ως ζωοτροφή κυρίως.

Οι σπόροι του switchgrass είναι πολύ μικροί και πολλοί από αυτούς εμφανίζονται σε κατάσταση λήθαργου αμέσως μετά τη συγκομιδή. Επίσης, το μικρό μέγεθος των σπόρων του switchgrass ευθύνεται εν μέρει για την τάση τους να αναπτύσσονται με αργούς ρυθμούς, καθώς επίσης και να είναι ιδιαίτερα ευπαθή στον σπορικό ανταγωνισμό.

Δυστυχώς, δεν υπάρχουν εγκεκριμένα ζιζανιοκτόνα για τον σπορικό έλεγχο κατά τη διάρκεια εγκατάστασης των φυτειών switchgrass. Ωστόσο, μπορεί ακόμη να εγκατασταθεί φυτεία με επιτυχία χωρίς ιδιαίτερες γεωργικές ή άλλες στρατηγικές. Το switchgrass έχει πολύ μεγάλο και μόνιμο ριζικό σύστημα, το οποίο διεισδύει πάνω από 3 μέτρα στο έδαφος και ζυγίζει όσο το υπέργειο τμήμα του φυτού κατά τον πρώτο χρόνο (6-8t/ha). Κάτω από κατάλληλες συνθήκες μπορεί να φτάσει σε ύψος 2.5 μέτρων.

Η εγκατάσταση του φυτού γίνεται με σπόρο και στην Ελλάδα λαμβάνει χώρα το Μάιο, όταν η θερμοκρασία εδάφους ξεπεράσει τους 10-15 °C. Η σπορά δεν πρέπει να γίνει σε βάθος μεγαλύτερο του 1 cm και η συνιστώμενη πυκνότητα της φυτείας είναι 200 με 300 φυτά ανά τετραγωνικό μέτρο. Έχει, επίσης, πολλές μικρές και λεπτές προσωρινές ρίζες. Το σύνολο του ριζικού συστήματος έχει την ιδιότητα να βελτιώνει την ποιότητα του εδάφους, προσθέτοντας οργανικό υλικό, αυξάνοντας την υδατοπερατότητα του εδάφους και διατηρώντας την θρεπτική ικανότητα. Η άνθιση έχει παρατηρηθεί να συμβαίνει μεταξύ τέλους Ιουλίου και αρχών Αυγούστου. Παράγει πολύ μικρούς σπόρους με βάρος 1000 σπόρων μεταξύ 0.7 έως 2 g. Κατάλληλη εποχή συγκομιδής είναι το χρονικό διάστημα από τέλη Νοεμβρίου ως και τον Ιανουάριο. Οι φυτείες του switchgrass αποτελούν ενδιαιτήματα για πολλά είδη άγριας πανίδας και παρέχουν προστασία σε πολλά θηλαστικά (π.χ. ελάφια, λαγοί κ.α.)

Η καλλιέργεια του Switchgrass παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα, αφού μπορούν να παραχθούν σημαντικές ποσότητες βιομάζας ακόμη και σε συνθήκες μειωμένων εισροών (λίπανση, ζιζανιοκτονία) Οι αρδευτικές ανάγκες του Switchgrass είναι χαμηλές, αφού χαρακτηρίζεται από αποδοτική χρήση του νερού. Πειράματα που έχουν εκτελεστεί έδειξαν ότι αρδεύσεις συνολικού ύψους 400mm είναι αρκετές για ικανοποιητική παραγωγή.

Η ποικιλία Alamo αποτελεί ένα εύρωστο είδος του switchgrass που ταιριάζει περισσότερο στις νότιες περιοχές. Πειραματικές εφαρμογές που πραγματοποιήθηκαν στο Πανεπιστήμιο του Auburn έδειξαν ότι η παραγωγή ξεπέρασε τους 10 t/ha το χρόνο. Σε εμπορική κλίμακα όμως, είναι πιο λογικό η παραγωγή να κυμαίνεται στους 6 με 8 t/ha το

χρόνο. Αυτό συμβαίνει για το λόγο ότι οι πειραματικές φυτείες έχουν άριστες εγκαταστάσεις, αλλά σε εμπορικό επίπεδο υπάρχουν σχεδόν πάντα μη παραγωγικά σημεία στις καλλιεργούμενες εκτάσεις. Παρόλα αυτά, σε επίπεδο σύγκρισης, ο μέσος όρος παραγωγής πρώτης ύλης στην περιοχή της Αλαμπάμα είναι γύρω στους 2.5 t/ha, ενώ η παραγωγικότητα των δασών είναι μόνο περίπου η μισή από αυτή του switchgrass.

Σχετικά με τα περιβαλλοντικά οφέλη, το switchgrass, όταν χρησιμοποιείται για παραγωγή ενέργειας, συμμετέχει και αυτό, όπως όλα τα φυτά, στον κύκλο του άνθρακα. Η συσσώρευση άνθρακα, ιδιαίτερα κάτω από το έδαφος, είναι γνωστή ως carbon sequestration και θεωρείται σημαντική μέθοδος ελάττωσης του ατμοσφαιρικού CO₂. Το switchgrass είναι αδιαμφισβήτητα μια από τις καλύτερες φυτείες για το σκοπό αυτό, για το λόγο ότι όταν τα υπέργεια τμήματά του συλλέγονται και καίγονται για παραγωγή ενέργειας, το CO₂ επιστρέφει ξανά στην ατμόσφαιρα από όπου αποκτήθηκε αρχικά από το φυτό, αλλά θα έχει μειώσει την ανάγκη για αρκετά συμβατά καύσιμα. Για το λόγο αυτό, το CO₂ έχει ανακυκλωθεί από τη χρήση του switchgrass για παραγωγή ενέργειας, κάνοντας τη διαδικασία αυτή ουδέτερη ως προς CO₂ (ή στην πραγματικότητα αρνητική αν ληφθεί υπόψη η συγκέντρωση άνθρακα στο έδαφος) σε σύγκριση με τα συμβατά καύσιμα, που προσθέτουν επιπλέον CO₂ στην ατμόσφαιρα. Κατά τη σύγκριση των χαμηλών επιπέδων άνθρακα, το switchgrass που καίγεται για παραγωγή ενέργειας συμβάλλει επίσης και στις μειωμένες εκπομπές τοξικών ρύπων, όπως τα οξείδια του θείου και του αζώτου.

Καλάμι (*Arundo donax*) [13, 22, 29,30,47]

Το καλάμι αποτελεί ένα αγροστόδες πολυετές φυτό με C₃ φωτοσυνθετικό μηχανισμό. Ανήκει στην υποοικογένεια Arundinoideae της οικογένειας Gramineae. Αποτελεί ενδημικό είδος των χωρών της Μεσογείου. Συναντάται συνήθως κοντά σε ποτάμια και λίμνες, γενικά σε αγρούς με υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία, ωστόσο μπορεί να καλλιεργηθεί σε ευρεία κλίμακα εδαφικών και κλιματικών συνθηκών. Θεωρείται ένα πολύ δυναμικό φυτό και πολλαπλασιάζεται κυρίως με ριζώματα, μπορεί όμως να πολλαπλασιαστεί και με μοσχεύματα.

Το *Arundo donax* είναι ανθεκτικό σε ποικίλους τύπους εδάφους. Από εδάφη με συνεκτικό άργιλο ως εδάφη με χαλαρή άμμο. Ως πολυετές αγροστώδες φυτό έχει την ικανότητα να αντέχει σε ακραίες συνθήκες, λόγω του ισχυρού ριζικού συστήματος του πράγμα που συμβάλλει στην ικανοποιητική πρόσληψη νερού και προφυλάσσει το έδαφος από διάβρωση. Η καλλιέργεια μπορεί να ξεπεράσει ακραίες συνθήκες ξηρασίας, αλλά παρόλα αυτά να παράγει υψηλά ποσά ξηρού υλικού της τάξης των 19 t/ha. Με την συμβολή επαρκούς άρδευσης και λίπανσης οι ποσότητες του ξηρού υλικού μπορούν να αυξηθούν ικανοποιητικά.



Εικόνα 2.7. *Arundo donax*

Το *Arundo* ευδοκίμει εύκολα τόσο στα εύκρατα, όσο και στα τροπικά κλίματα, αλλά η παραγωγή βιομάζας εξαρτάται από το εύρος της αυξητικής περιόδου και τις βροχοπτώσεις. Η ετήσια βροχόπτωση ποικίλει από 30-400mm. Το *Arundo* επιζεί τόσο σε συνθήκες περιοδικής πλημμύρας όσο και αυστηρής ξηρασίας. Σε μια μελέτη που πραγματοποιήθηκε σε διπλανές περιοχές χωρίς άρδευση και σε ξηρό μεσογειακό κλίμα για τέσσερα χρόνια, η ετήσια συγκομιδή έπεσε κάτω από 8 t/ha. Με άρδευση 44 mm/yr, με τους ίδιους κλιματολογικούς όρους, παρήγαγε 15 t/ha, ενώ αρδεύοντας 859 mm/yr αύξησε την παραγωγή συγκομιζόμενης βιομάζας σε 18 t/ha. Η ετήσια παραγωγή μπορεί ενδεχομένως να αυξηθεί σε 40 t/ha σε ιδανικές συνθήκες θερμού κλίματος και υπόγειας άρδευσης.

Η καταλληλότερη εποχή συγκομιδής για το καλάμι, είναι σε άμεση συνάρτηση με τα κλιματολογικά χαρακτηριστικά κάθε περιοχής και εντοπίζεται στο διάστημα από Ιανουάριο έως και τις αρχές Μαρτίου.

Σχετικά με τις αποδόσεις του καλαμιού αυτές αγγίζουν τους 2 – 2.5 τόνους/στρέμμα ξηρού βάρους στη νότια Γαλλία, ενώ στη νότια Ιταλία περίπου 3.5 τόνους/στρέμμα. Σε πρόσφατες μελέτες, ορισμένες από τις οποίες έχουν διεξαχθεί στην Ελλάδα, έχει επιβεβαιωθεί η δυνατότητα του φυτού να παράγει αξιόλογες ποσότητες βιομάζας. Οι αποδόσεις που καταγράφηκαν στο σύνολο των πειραματικών αγρών (στις ελληνικές εδαφο-κλιματικές συνθήκες) κυμάνθηκαν από 0.5 έως και 3 τόνους ανά στρέμμα σε ξηρή ουσία.

Σημαντική διακύμανση στις αποδόσεις παρατηρήθηκε για τα διαφορετικά επίπεδα άρδευσης που εφαρμόστηκαν. Είναι προφανές, ότι τα υψηλά επίπεδα άρδευσης οδήγησαν στην επίτευξη των υψηλότερων αποδόσεων. Είναι ενδεικτικό ότι η αζωτούχος λίπανση δεν διαφοροποίησε σημαντικά τις αποδόσεις.

Η θερμογόνο αξία αυτού του φυτού ανήλθε σε 18.6 MJ/kg ξηρής ουσίας και η περιεκτικότητα σε τέφρα 6.9% σε ξηρή βάση. Με βάση αυτές τις εκτιμήσεις και τις αποδόσεις σε ξηρό βάρος, που έχουν επιτευχθεί μέχρι σήμερα, εκτιμάται ότι, κατά μέσο όρο, το ενεργειακό δυναμικό του καλαμιού μπορεί να φθάσει τους 1.29 ΤΠΠ/ στρέμμα/ έτος.

Στον παρακάτω Πίνακα 2.5 παρουσιάζονται συνοπτικά μερικά χαρακτηριστικά των ενεργειακών καλλιεργειών που αναλύθηκαν παραπάνω.

Πίνακας 2.5. Πολυετή ενεργειακά φυτά[13]

	Αγριαγκινάρα	Καλάμι	Μίσχανθος	Switchgrass
Υλικό πολλ/σμού	Σπόροι	Ριζώματα, κλαδομοσχεύματα	Σπόροι, ριζώματα, κλαδομοσχεύματα	Σπόροι, ριζώματα
Εποχή βλάστησης	Απρίλιος – Μάιος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάρτιος
Ζιζανιοκτόνα	Πριν την σπορά	Πριν την σπορά	Πριν την έκπτυση, στα 2 πρώτα χρόνια	Πριν την φύτευση
Φυτευτική πυκνότητα (φυτά/ εκτάριο)	10.000-50.000	12.500-28.500	28.500-40.000	4.000.000
Άρδευση (mm)	-	400	60-700	200
Λίπανση (Kg N/εκτάριο)	0-100	40-120	40-240	0-150
Περίοδος ανθοφορίας	Άνοιξη	Σεπτέμβριος - Οκτώβριος	Αύγουστος - Σεπτέμβριος	Ιούνιος - Ιούλιος
Περίοδος συγκομιδής	Ιούνιος - Ιούλιος	Φεβρουάριος	Φεβρουάριος	Δεκέμβριος - Φεβρουάριος
Αποδόσεις ξηρής ουσίας (τόνοι/ha)	17-30	20-30	11-34	19-30
Τύπος βιοκαυσίμου	Στερεά καύσιμα, βιοντίζελ	Στερεά καύσιμα	Στερεά καύσιμα	Βιοαιθανόλη, στερεά καύσιμα

Ευκάλυπτος (*Eucalyptus globulus* - *Eucalyptus camaldulensis*) [13, 22, 23, 31]

Οι φυτείες ευκαλύπτων χαρακτηρίζονται από γρήγορους ρυθμούς ανάπτυξης, μετά την εγκατάσταση της καλλιέργειας. Τα δύο αυτά είδη ευκαλύπτου είναι τα σημαντικότερα για τις μεσογειακές χώρες. Χαρακτηριστική διαφορά τους είναι στα άνθη, όπου στο *Eucalyptus camaldulensis* είναι σε κίτρινες ταξιανθίες με 5-10 άνθη σε κοινό ποδίσκο, ενώ στο *Eucalyptus globulus* τα άνθη είναι σε λευκές ταξιανθίες, μονά ή το πολύ ανά τρία.

Η μεγαλύτερη έκταση που έχει αποδοθεί στην καλλιέργεια ευκαλύπτου στην Ευρώπη είναι στην Πορτογαλία με 500.000 ha, κυρίως για παραγωγή χαρτοπολτού. Στην Ελλάδα

έχουν εγκατασταθεί μικρές δοκιμαστικές φυτείες από το 1990. Το καταλληλότερο είδος, από πλευράς προσαρμοστικότητας, για την Ελλάδα έχει αποδειχθεί ότι είναι ο *Eucalyptus camaldulensis*, διότι παρουσιάζει: μεγαλύτερη ικανότητα προσαρμογής σε διάφορα μικροπεριβάλλοντα, σε σχέση με τα άλλα είδη ευκαλύπτου, ταχυαυξεία, εύκολη πρεμνοβλάστηση μετά από κοπή και μεγάλη παραγωγικότητα σε βιομάζα. Εντούτοις, και τα δύο είδη επέδειξαν ευρωστία και υψηλή παραγωγικότητα σε όξινα εδάφη, η δε ανάπτυξη τους συνεχιζόταν καθ' όλη την διάρκεια του έτους. Η άρδευση και η λίπανση με άζωτο δεν έχουν επιδείξει σοβαρή επίδραση στην παραγωγικότητα.

Ανάλογα με την γονιμότητα του εδάφους και τις καλλιεργητικές πρακτικές, η απόδοση σε ξηρή βιομάζα κυμαίνεται μεταξύ 20 και 35 t/ha/yr. Σε λιγότερο γόνιμα εδάφη, η απόδοση μπορεί να είναι ιδιαίτερα χαμηλή (6 t ξηρής ουσίας/ha/yr κατά την δεύτερη βλαστητική περίοδο).

Γενικά, ο ευκάλυπτος αποτελεί μια καλή προοπτική για την εγκατάσταση ενεργειακών φυτειών στην Ελλάδα εξαιτίας, κυρίως, των χαμηλών απαιτήσεων σε άρδευση.

Σχετικά με τις χρήσεις του, ο ευκάλυπτος αποτελεί σημαντική πρώτη ύλη για παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και για την παραγωγή χαρτοπολτού (Πίνακας 2.6).

Ιτιά (*Salix spp.*) – Λεύκη (*Populus spp.*)

Η ιτιά (*Salix*) και η λεύκη (*Populus*) είναι δύο ταχυαυξή ξυλώδη φυτικά είδη τα οποία, εν αντιθέσει με την Ελλάδα, έχουν αναπτυχθεί σε μεγάλο βαθμό στην Ευρώπη για ενεργειακές χρήσεις.

Η ιτιά καλλιεργείται κυρίως στα βορειότερα τμήματα της Ευρώπης. Στην Σουηδία, η ανάπτυξη της παραγωγής ιτιάς αποτελεί πρώτη προτεραιότητα από το 1975, μέσω εντατικών ερευνητικών προγραμμάτων. Από το 1991, η παραγωγή έχει εμπορευματοποιηθεί και έχουν εγκατασταθεί περίπου 17.000 ha. Υπολογίζεται ότι η

καθαρή απόδοση στην Σουηδία είναι περίπου 8-10 t/ha/yr ξηρής ουσίας, ενώ υπάρχουν περιθώρια αύξησης εφόσον βελτιωθεί το γενετικό υλικό και βελτιστοποιηθούν οι καλλιεργητικές πρακτικές. Η λίπανση κάτω από τα συνιστώμενα επίπεδα είχε ως αποτέλεσμα την μείωση της απόδοσης κατά 20% και οι υψηλότερες αποδόσεις πετυχαίνονται στα οργανικά εδάφη.

Στην Ιταλία, η *Populus euramericana* και η *Populus alba* (Λεύκη η λευκή) έχουν ετήσιες αποδόσεις 15-20 t/ha ξηρής ουσίας, κάτω από άρδευση.

Από τις πρώτες εμπορικές φυτείες που εγκαταστάθηκαν έχουν εξαχθεί τα εξής συμπεράσματα: είναι απαραίτητη η πληροφόρηση στους γεωργούς, οι τεχνικές καταπολέμησης των ζιζανίων πρέπει να βελτιωθούν, απαραίτητη προϋπόθεση για την οικονομική ευμάρεια των καλλιεργειών είναι η φθινή και καλή εγκατάσταση, οι απαιτήσεις των φυτειών σε νερό είναι υψηλές και αυτός είναι ο κυριότερος περιοριστικός παράγοντας για την παραγωγή, και, τέλος, η ετερογένεια των φυτειών έχει σοβαρές επιδράσεις στις αποδόσεις. Στην Σουηδία το κύριο είδος που χρησιμοποιείται είναι η *Salix viminalis*, ενώ έχουν γίνει και πειραματικές φυτείες με *Salix dasyclados* και με κλώνους από την διασταύρωση των ειδών *Salix schwerinii* και *Salix viminalis*. Η καλλιέργεια της ιτιάς έχει αποδειχθεί περιβαλλοντικά φιλική όσον αφορά τις εκπομπές νερού, το ισοζύγιο άνθρακα και την δημιουργία οικοτόπων για την πανίδα και χλωρίδα[23].

Η λεύκη μπορεί να καλλιεργηθεί σε θερμότερα κλίματα από την ιτιά. Σε μερικές χώρες όπως η Μεγάλη Βρετανία, η Ιρλανδία, το Βέλγιο, η Αυστρία και η Γερμανία καλλιεργούνται και τα δύο είδη ταυτόχρονα. Τα κυριότερα εμπόδια στην εγκατάσταση των φυτειών είναι τα υψηλά κόστη και απαιτήσεις για άρδευση. Γενικά, οι πληροφορίες για την λεύκη είναι λίγες και δεν εστιάζονται στην ενεργειακή χρήση του είδους αυτού. Στην Ελλάδα, η λεύκη καλλιεργείται κατά αποκλειστικότητα για την παραγωγή ξύλου για δομικά υλικά και χαρτοπολτό.

Πίνακας 2.6. Πολυετή ξυλώδη ενεργειακά φυτά[13]

	Ευκάλυπτος	Ψευδακακία
Πολλαπλασιαστικό υλικό	Δενδρύλλια, βλαστομοσχεύματα	Δενδρύλλια, βλαστομοσχεύματα
Ζιζανιοκτόνα	Μετά την φύτευση	Μετά την φύτευση
Φυτευτική πυκνότητα (φυτά/ha)	10.000-40.000	10.000-20.000
Περίτροπος χρόνος (έτη)	2-3	2-3
Αποδόσεις σε ξηρή ύλη (t/ha)	18-24	14
Τύπος βιοκαυσίμου	Στερεά καύσιμα	Στερεά καύσιμα



Εικόνα 2.8. *Salix viminalis*



Εικόνα 2.9. *Populus tremuloides*



Εικόνα 2.10. *Eucalyptus globulus*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΦΥΤΩΝ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η εγκατάσταση φυτειών με είδη, τα οποία παρέχουν υψηλά ποσοστά βιομάζας χρησιμοποιώντας με τον πιο επαρκή τρόπο τους φυσικούς πόρους και τις εισροές, συμβάλλει τόσο στην ελάττωση της χρήσης των ήδη μειωμένων υδατικών αποθεμάτων, όσο και στα προβλήματα της ρύπανσης. Η χρήση των συστημάτων παραγωγής των φυτειών αυτών, προσφέρει τη δυνατότητα για μακροχρόνιες εφαρμογές, χωρίς να χρειαστεί αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων υλικού, μετατροπές στον εφοδιασμό καυσίμων και μείωση των αποθεμάτων των πρώτων υλών. Ο πιο σημαντικός παράγοντας, που συμβάλλει εξαιρετικά στην εντατικοποίηση της χρήσης της βιοενέργειας, είναι η ικανότητα μετατροπής των καυσίμων στις υπάρχουσες εγκαταστάσεις.

Στη βιβλιογραφία παρουσιάζεται ότι, τα επίπεδα βιομάζας που επιτυγχάνονται από τις καλλιέργειες αυτές, κάτω από χαμηλές εισροές άρδευσης και αζωτούχου λίπανσης, είναι σχετικά υψηλά. Η συγκομιδή των καλλιεργειών πραγματοποιείται μετά από το φυσικό γηρασμό στο χωράφι. Όταν ο αυξητικός κύκλος και η ωριμότητα του φυτού ολοκληρώνονται σε διαδοχικές περιόδους, επιτρέπεται η διαδοχική συγκομιδή και η επάρκεια σε πρώτη ύλη, καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

Τα τρία πολυετή φυτά, που επιλέχθηκαν για να μελετηθούν στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή, είναι η αγριαγκινάρα (*cynara cardunculus*), το switchgrass (*panicum virgatum*) και το καλάμι (*arundo donax*). Τα συγκεκριμένα, έχουν το πλεονέκτημα να συλλέγονται σε διαφορετικές χρονικές περιόδους, διαδοχικά το καλοκαίρι, το φθινόπωρο και το χειμώνα, αντίστοιχα [43]. Επίσης, απαιτούνται απλές καλλιεργητικές τεχνικές και χαμηλά παραγωγικά κόστη [46]. Η συμβολή της άρδευσης και της αζωτούχου λίπανσης στη φυτεία της κάθε καλλιέργειας παρέχει πληροφορίες για τη δυνατότητα παραγωγής,

κάτω από μειωμένες ή και ανεπαρκείς εισροές νερού και αζώτου. Συνεπώς, η συνδυαστική χρήση των ενεργειακών αυτών φυτειών μπορεί να παρέχει πρώτη ύλη με χαμηλές απαιτήσεις αποθήκευσης, καθ' όλη τη διάρκεια του έτους [43].

3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΦΥΤΕΙΑΣ. [37,44,46,47]

Η εγκατάσταση της φυτείας πραγματοποιήθηκε σε φυτώριο του Κ.Α.Π.Ε. (Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας) στην περιοχή της κεντρικής Ελλάδας και συγκεκριμένα στην Αλιάρτο Βοιωτίας, το 2002. Οι συντεταγμένες της περιοχής είναι $38^{\circ}22'$ γεωγραφικό πλάτος, $23^{\circ}10'$ γεωγραφικό μήκος και 114m υψόμετρο πάνω από το επίπεδο της θάλασσας.

Για το λόγο ότι το κλίμα της Αλιάρτου χαρακτηρίζεται ως ξηρό με 400mm/έτος μέση ετήσια βροχόπτωση, υψηλή θερμοκρασία και ελάχιστες βροχοπτώσεις από την αρχή του Ιουνίου ως το τέλος Αυγούστου, κρίθηκε απαραίτητη η άρδευση, με σκοπό τόσο την επιτυχία εγκατάστασης και ανάπτυξης της καλλιέργειας, όσο και τα υψηλά επίπεδα βιομάζας.

Κατά την περίοδο που εγκαταστάθηκαν οι φυτείες, τα καιρικά στοιχεία ήταν χαρακτηριστικά του μεσογειακού κλίματος. Η μέση θερμοκρασία αέρα ήταν αρκετά υψηλή στους θερινούς μήνες και για τα δύο έτη (2003 και 2004) και εκτιμήθηκαν να είναι περισσότερο από 25°C κατά μέσον όρο για κάθε θερινό μήνα (Πίνακας 3.1). Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, οι μέγιστες θερμοκρασίες αέρα και στα δύο έτη ήταν περίπου 40°C . Το φθινόπωρο και η άνοιξη ήταν ήπια, ενώ το χειμώνα η θερμοκρασία μειώθηκε λιγότερο από 10°C κατά μέσον όρο. Κατά τη διάρκεια του προηγούμενου χειμώνα, παρατηρήθηκαν μερικά γεγονότα παγετού, με τις χαμηλότερες θερμοκρασίες να καταγράφονται στις 24 Ιανουαρίου και στις 14 Φεβρουαρίου (-12.41 και -12.92°C , αντίστοιχα).

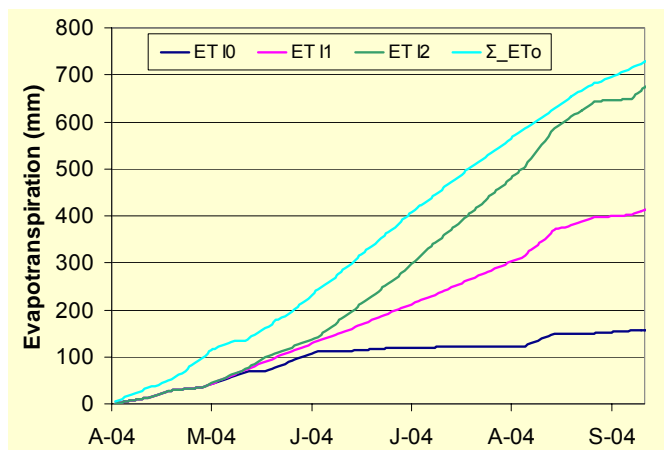
Πίνακας 3.1. Μηνιαίες τιμές καιρικών συνθηκών κατά την περίοδο Ιουνίου 2003-Νοεμβρίου 2004

Month	T _{mean}	Average T _{max}	Absolute T _{max}	Average T _{min}	Absolute T _{min}	RH _{mean}	Average RH _{max}	Absolute RH _{max}	Average RH _{max}	Absolute RH _{max}	Wind speed at 2m	Wind speed at 6m	PAR (MJ m ² / month)	RAIN (mm/ month)	ET _o (mm/ month)
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(%)	(%)	(%)	(%)	(m/s)	(m/s)			
June 03	25,44	33,75	39,97	16,19	10,50	52,76	83,42	100,00	28,89	15,52	0,71	0,88	248,91	19,80	136,03
July 03	27,70	35,83	42,46	18,48	14,83	51,21	81,44	94,40	27,74	11,86	0,75	0,94	297,60	0,00	147,43
August 03	26,29	35,33	44,48	17,64	14,01	60,13	90,48	100,00	31,46	10,08	0,58	0,73	256,77	22,20	120,38
September 03	20,75	29,05	38,63	12,89	8,34	66,19	94,43	100,00	36,43	19,50	0,67	0,84	192,51	24,40	83,45
October 03	19,03	26,61	35,48	11,94	3,14	65,65	91,34	100,00	38,55	16,83	1,16	1,39	127,84	24,00	74,70
November 03	13,04	18,61	28,65	8,79	3,03	84,68	97,14	100,00	61,86	32,07	0,56	0,64	65,37	49,00	29,04
December 03	7,32	11,90	20,99	3,80	-5,22	93,86	99,66	100,00	76,83	34,46	0,50	0,61	39,52	123,20	17,54
January 04	5,38	11,38	21,35	0,48	-12,41	88,80	99,66	100,00	65,15	27,97	0,83	0,99	66,85	139,20	24,18
February 04	7,55	14,33	23,87	1,38	-12,92	79,17	97,70	100,00	49,74	20,00	1,18	1,32	91,79	60,40	40,58
March 04	11,07	16,68	26,64	5,52	-0,05	76,09	95,77	100,00	50,57	26,66	1,37	1,50	129,72	61,80	69,40
April 04	14,91	21,04	27,86	9,01	0,98	67,32	88,83	100,00	41,40	12,07	1,35	1,53	173,82	43,00	104,15
May 04	17,72	24,94	30,00	11,04	4,44	62,56	92,02	100,00	35,14	7,28	1,17	1,38	188,14	56,40	117,22
June 04	24,72	32,07	36,96	16,44	11,03	56,62	89,40	100,00	30,66	16,54	0,99	1,15	268,02	21,40	164,96
July 04	26,33	34,29	41,02	17,58	12,33	51,89	80,67	100,00	29,17	17,30	0,73	0,86	294,40	3,20	174,09
August 04	26,24	34,66	39,63	17,55	13,34	58,54	90,45	100,00	29,67	13,67	0,68	0,81	264,85	27,00	153,86
September 04	21,62	30,01	35,89	13,97	6,02	63,06	89,31	98,90	35,21	16,90	0,77	0,95	189,86	14,00	103,15
October 04	18,55	26,41	33,81	11,38	4,97	73,56	96,81	100,00	43,84	21,83	0,61	0,75	129,50	19,00	63,92
November 04	12,02	18,69	27,61	6,29	-5,12	75,09	93,80	100,00	48,15	25,33	0,57	0,71	69,72	17,20	31,70

Το καλοκαίρι ήταν η ξηρότερη περίοδος του έτους, με τη μέση υγρασία αέρα να κυμαίνεται από 51% ως 60%, ενώ το χειμώνα η υγρασία αυξήθηκε μέχρι 94%. Επίσης, οι βροχοπτώσεις περιορίστηκαν κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού του 2003 και του 2004 στα 42mm για κάθε καλοκαίρι. Η βροχόπτωση συνέχισε να είναι χαμηλή κατά τη διάρκεια του φθινοπώρου, εν αντιθέσει με τα συνηθισμένα στοιχεία αυτής της περιόδου. Η βροχερή περίοδος παρουσιάστηκε κυρίως το χειμώνα και την άνοιξη, όταν καταγράφηκαν 323mm και 161mm της συνολικής βροχόπτωσης, αντίστοιχα.

Η εξατμισοδιαπνοή, που αναφέρεται στην εργασία αυτή (ET₀), υπολογίστηκε σύμφωνα με την τροποποιημένη μέθοδο FAO Penman-Monteith.(*). Η εξατμισοδιαπνοή ήταν υψηλή τον Ιούνιο και τον Ιούλιο και έπειτα μειώθηκε σταδιακά. Η εξέλιξη του ημερήσιου ρυθμού εξατμισοδιαπνοής παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1. Οι υψηλότερες απώλειες νερού μέσω της εξατμισοδιαπνοής, πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και ανέρχονται στα 404mm και 493mm για το καλοκαίρι 2003 και 2004, αντίστοιχα.

Οι κυριότερες επεξεργασίες που εφαρμόστηκαν, ήταν τρία επίπεδα άρδευσης: I₀=καθόλου άρδευση, I₁=50% ET₀, I₂=100% ET₀. Επιπρόσθετη επεξεργασία ήταν τα τρία επίπεδα λίπανσης με άζωτο: N₀=0 kg N/ha, N₁=40 kg N/ha και N₂=120 kg N/ha. Στην περίπτωση της αγριαγκινάρας, εφαρμόστηκε μόνο η λίπανση του αζώτου σε ίδια ποσοστά με προηγουμένως, για το λόγο ότι είναι ένα φυτό που μπορεί και εκμεταλλεύεται τον όγκο του νερού τον χειμώνα.



Σχήμα 3.1. Εξατμισοδιαπνοή των τριών επιπέδων άρδευσης σε σύγκριση με τη συνολική εξατμισοδιαπνοή, για την τρίτη αυξητική περίοδο του καλαμιού

(*): Βλέπε αναλυτικά στο Κεφάλαιο Παραρτήματα

Πριν την εγκατάσταση της φυτείας πραγματοποιήθηκαν εδαφολογικές αναλύσεις, τόσο για τον προσδιορισμό της υφής του εδάφους, όσο και για τα χαρακτηριστικά του. Οι αναλύσεις έγιναν σε βάθος 82cm και επικεντρώθηκαν στην έρευνα των εδαφολογικών αλλαγών που πραγματοποιήθηκαν λόγω των καλλιεργειών. Οι παράμετροι που μετρήθηκαν ήταν: η ηλεκτρική αγωγιμότητα, το pH, το συνολικό ασβέστιο, η οργανική ουσία, το συνολικό άζωτο, ο φώσφορος, το κάλιο, το νάτριο και το χλώριο. Τα αποτελέσματα για το switchgrass παρατίθενται στον Πίνακα 3.2. *Γενικά, η καλλιέργεια οδήγησε σε αύξηση της οργανικής ουσίας και του καλίου.* Αντίθετα, η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η συγκέντρωση νατρίου και φωσφόρου μειώθηκαν, ενώ το pH και το συνολικό ασβέστιο δεν άλλαξαν. Σχετικά με τη συγκέντρωση χλωρίου, ακόμα κι αν ήταν υψηλότερο από αυτό στην περίπτωση του καλαμιού, ήταν χαμηλό.

Ο τύπος του εδάφους χαρακτηρίζεται ως αμμοπηλώδες με σχετικά χαμηλή οργανική ουσία (λιγότερο από 1%).

Η άρδευση για το switchgrass και το καλάμι διαφοροποιήθηκε, αφότου η λίπανση αζώτου ολοκληρώθηκε. Οι εγκαταστάσεις αρδεύονταν κάθε 8-10 ημέρες. Οι ανάγκες άρδευσης για κάθε συγκομιδή καθορίστηκαν από την περιεκτικότητα σε εδαφολογικό νερό και την εξατμισοδιαπνοή (ET_o), σύμφωνα με την τροποποιημένη μέθοδο FAO Penman-Monteith(*)[64]. Η άρδευση διαφοροποιήθηκε στις 6 Ιουνίου και συνεχίστηκε μέχρι την 27η Αυγούστου. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, η I₀ επεξεργασία έλαβε 60mm, η I₁ 298mm και η I₂ 523mm. Ο σχεδιασμός άρδευσης καθορίστηκε έτσι, δεδομένου ότι οι εγκαταστάσεις I₂ του επιπέδου άρδευσης είχαν συνεχώς αρκετό νερό για την ανάπτυξή τους, ενώ ταυτόχρονα δεν εμφανίστηκε καμία απώλεια νερού.

Η περιεκτικότητα σε εδαφολογικό νερό μετρήθηκε με τη βοήθεια TDR (Time Domain Reflectometry)(*), αισθητήρων που τοποθετήθηκαν σε τρία βάθη (15, 35 και 75cm) για τη συνεχή καταγραφή, καθώς και με πλαστικά βυθοσκόπια μέχρι 180cm για περιοδική μέτρηση. Οι καταγραφές από το TDR χρησίμευσαν για να βεβαιώσουν ότι καμία απώλεια νερού δεν αναμένεται κάτω των 75cm.

Πίνακας 3.2. Αναλύσεις για το υπερκείμενο στρώμα εδάφους (0-20cm) στις πειραματικές φυτείες του switchgrass.

	Electrical Conductivity	pH	Total Calcium	Organic Matter	Total Nitrogen (N)	Phosphorus (P ₂ O ₅)	Potassium (K ₂ O)	Sodium (Na)	Clorine (Cl)
	μMHOS/cm		%	%	%	mgr/kg soil	mgr/kg soil	mgr/kg soil	mgr/kg soil
2003	85	7,8	8	1,2	0,153*	2,862	6,6	4	-
I₀N₀	80	7,8	8	1,6	0,1	2,3	11,4	2	7
I₀N₁	80	7,8	8	1,7	0,11	2,9	11,4	2	7
I₀N₂	80	7,8	8	2,1	0,13	2,9	12	2,5	10,6
I₁N₀	70	7,8	8	1,9	0,12	2,3	10,2	2,5	8,9
I₁N₁	80	7,8	8	2,1	0,13	2,3	10,8	2	7
I₁N₂	80	7,8	8	2,5	0,16	2,9	10,8	2	7
I₂N₀	80	7,8	8	1,8	0,09	3,4	10,2	8	14
I₂N₁	80	7,8	8	1,5	0,1	2,3	9	3	10,6
I₂N₂	80	7,8	7,2	1,7	0,11	2,3	9,6	2	7
I₀	80,00	7,80	8,00	1,80	0,11	2,70	11,60	2,17	8,20
I₁	76,67	7,80	8,00	2,17	0,14	2,50	10,60	2,17	7,63
I₂	80,00	7,80	7,73	1,67	0,10	2,67	9,60	4,33	10,53
N₀	76,67	7,80	8,00	1,77	0,10	2,67	10,60	4,17	9,97
N₁	80,00	7,80	8,00	1,77	0,11	2,50	10,40	2,33	8,20
N₂	80,00	7,80	7,73	2,10	0,13	2,70	10,80	2,17	8,20

Είναι γνωστό, ότι η λίπανση είναι μια από τις καλλιεργητικές τεχνικές που επηρεάζει περισσότερο την παραγωγικότητα και η κατάχρησή της μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρές περιβαλλοντικές ζημιές. Επιπλέον, η λίπανση είναι συνήθως ακριβή εργασία. Συγκεκριμένα, έχει αναφερθεί ότι αντιπροσωπεύει το υψηλότερο κόστος καλλιέργειας της αγριαγκινάρας, σχεδόν 40% των ετήσιων δαπανών. Συνεπώς, απαιτείται μια ισορροπημένη και ακριβής λίπανση, για να βελτιστοποιήσει την οικονομική ισορροπία της καλλιέργειας και να ελαχιστοποιήσει τις πιθανές περιβαλλοντικές επιδράσεις της. Οι ανάγκες λίπανσης για τις καλλιέργειες των φυτειών προσδιορίζονται συνήθως από τις απαιτήσεις της, την εδαφολογική γονιμότητα και τις εμπειρικές αλληλεπιδράσεις και των

δύο. Ένα από τα εργαλεία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση των αναγκών της καλλιέργειας είναι οι αναλύσεις των φυτών της καλλιέργειας, δεδομένου ότι μπορεί να εκτιμήσουν το ποσό των θρεπτικών ουσιών από μια ιδιαίτερη συγκομιδή.

Για τη λίπανση των καλλιεργειών επιλέχτηκε η νιτρική αμμωνία (NH_4NO_3). Η περιεκτικότητά της σε N είναι 32 με 33%. Αναφέρουμε ότι τα νιτρικά λιπάσματα, στα οποία ανήκει και η νιτρική αμμωνία, είναι πολύ ευδιάλυτα στο έδαφος, αλλά δεν συγκρατούνται και ξεπλένονται εύκολα με το νερό της βροχής. Η διαθεσιμότητα σε N στο έδαφος εξαρτάται από περιβαλλοντικούς και βιολογικούς παράγοντες. Η λίπανση διαφοροποιήθηκε μόνο το δεύτερο έτος, εκτός από την αγριαγκινάρα, με σκοπό να εξασφαλιστεί η επιτυχία ίδρυσης της φυτείας. Η λίπανση αζώτου διαιρέθηκε σε δύο μέρη, προκειμένου να βεβαιωθούν μέγιστη και ελάχιστη διύλιση λίπανσης. Οι ημερομηνίες εφαρμογής της λίπανσης αζώτου ήταν στις 23/10/03 και τις 29/04/04 για την αγριαγκινάρα, στις 03/05/04 και τις 08/06/04 για το switchgrass και στις 11/05/04 και το 29/06/04 για το καλάμι.

Η τελική συγκομιδή των switchgrass και των καλάμιών, που αναπτύσσονται κατά τη δεύτερη καλλιεργητική περίοδο (2003), πραγματοποιήθηκαν το χειμώνα και στην αρχή της άνοιξης. Επίσης, τα στοιχεία κατά την ανάπτυξη και παραγωγή των τριών ενεργειακών φυτειών (switchgrass, καλάμι και αγριαγκινάρα) καταγράφονταν σε μηνιαία διαστήματα, κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου του 2004. Όλες οι συγκομιδές πραγματοποιήθηκαν χειρονακτικά στο τέλος των καλλιεργητικών περιόδων τους, όταν εμφανίστηκε φυσικός γηρασμός τους. Ειδικότερα, το καλάμι συγκομίστηκε στις 09/03/2004, η αγριαγκινάρα 10/08/2004 και το switchgrass στις 18/11/2003 και στις 21/01/2004. Τα δείγματα από κάθε συγκομιδή αναλύθηκαν εργαστηριακά για το χαρακτηρισμό ως καύσιμο (κατώτερη και ανώτερη θερμογόνος δύναμη, περιεχόμενο σε υδρογόνο, άνθρακα, άζωτο και οξυγόνο, πτητική ουσία, τέφρα και μόνιμο άνθρακα). Τα στοιχεία αναλύθηκαν στατιστικά από την μέθοδο ANOVA, ενώ χρησιμοποιήθηκε μια πιθανότητα λάθους της τάξης του $P \leq 0.05$.

(*): Βλέπε αναλυτικά στο Κεφάλαιο Παραρτήματα

3.2.1 SWITCHGRASS (*Panicum virgatum*)

Γενικά χαρακτηριστικά

Το Switchgrass είναι ένα πολυετές θερμόβιο ευθυτενές φυτό, ενδημικό της βόρειας Αμερικής, όπου φύεται από 550⁰ γεωγραφικό πλάτος έως το Μεξικό, και χαρακτηρίζεται κυρίως ως φυτό των στεπών. Τις τελευταίες δεκαετίες αποτελεί σημαντικό θερμόβιο C₄ λιβαδικό φυτό και χρησιμοποιείται ως ζωοτροφή, όταν τα πιο ψυχρόβια C₃ φυτά είναι λιγότερο παραγωγικά το καλοκαίρι.

Οι λόγοι που οδήγησαν τη χρήση του Switchgrass ως βιομάζα για παραγωγή ενέργειας είναι το υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο ανά εκτάριο, το χαμηλό κόστος παραγωγής, οι χαμηλές απαιτήσεις σε θρεπτικά συστατικά, το χαμηλό ποσοστό τέφρας κατά την καύση, η υψηλή επάρκεια σε νερό, το μεγάλο εύρος γεωγραφικής προσαρμογής, η ευκολία ίδρυσης της φυτείας από σπόρους, η αφομοίωση σε υποβαθμισμένα εδάφη και η ικανότητα αποθήκευσης άνθρακα στο έδαφος.

Για να εγκατασταθεί μια φυτεία, η οποία θα διαρκέσει, υπό καλές συνθήκες, για πάνω από 20 χρόνια, καθώς επίσης και για να φτάσει τη μέγιστη παραγωγή, απαιτούνται μερικά χρόνια προσεκτικής διαχείρισης.

Η πειραματική περιοχή του switchgrass κάλυψε μια περιοχή 2128m² και αποτελείται από 27 πειραματικά τεμάχια 64m² (8m x 8m), το καθένα. Η σπορά πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια σπαρτικής μηχανής. Οι σπόροι switchgrass σπάρθηκαν σε αποστάσεις 0.4m μεταξύ των σειρών και διανεμήθηκαν κατά μήκος της σειράς. Υπολογίστηκε ότι η πυκνότητα φύτευσης ήταν 10 kgf σπόρου/ ha, περίπου.

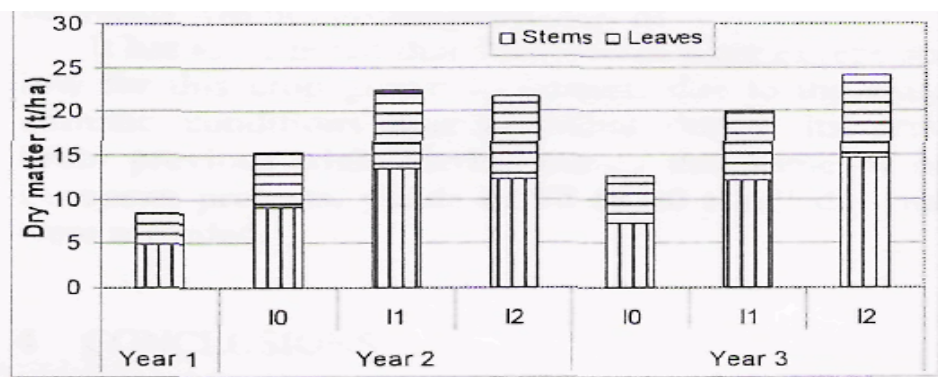
Αναφέρεται ότι η παραγωγή βιομάζας από switchgrass απαιτεί 50 kgf N/ha. Στην Αμερική, για περιοχές με ετήσια βροχόπτωση από 450mm έως 750 mm, η ανάγκη για αζωτούχα λίπανση κυμαίνεται από 50 έως 100 kgf N/ha.

Στα επιβαρημένα εδάφη με υψηλά ποσοστά σε άζωτο, το switchgrass συχνά δεν επηρεάζεται για μερικά χρόνια μετά την εγκατάσταση της φυτείας του, ενώ ανιχνεύεται στα λιγότερο επιβαρημένα εδάφη με άζωτο.

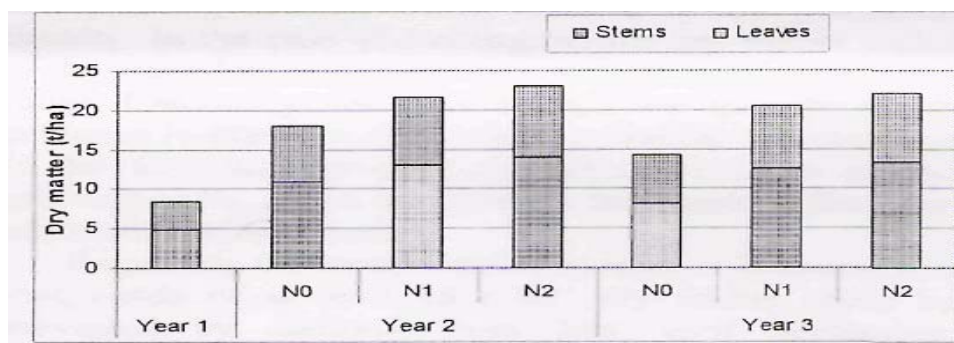
Στο πειραματικό πεδίο του switchgrass εκτελέστηκαν οι ακόλουθες εργασίες:

- ✓ Τελικές συγκομιδές για τη δεύτερη καλλιεργητική περίοδο, εκτελέστηκαν στις 18/11/03 και στις 21/01/04.
- ✓ Εδαφολογική ανάλυση για το ανώτερο στρώμα (0-20cm) μετά από τη συγκομιδή και πριν να αρχίσει η νέα αυξητική περίοδος (18/03/04).
- ✓ Εφαρμογή των σχεδιασμένων καλλιεργητικών τεχνικών, δηλαδή αζωτούχου λίπανσης, στις 03/05/04 και 08/06/04 και της άρδευσης (αρκετές φορές σύμφωνα με τις απαιτήσεις εγκαταστάσεων).
- ✓ Συλλογή και εκτίμηση των δεδομένων που αφορούν τη μετάδοση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω της συγκόμησης της φυτείας, την εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας και την εδαφολογική υγρασία.
- ✓ Καταγραφή των στοιχείων κατά την εξέλιξη της αύξησης των φυτών από τις μηνιαίες μετρήσεις αύξησης και παραγωγής.

Η παραγωγή σε ξηρή ουσία, το έτος εγκατάστασής της, ήταν αρκετά χαμηλή, 8.42 t /ha με περιεκτικότητα σε υγρασία 24.75%. Στο επόμενο έτος, η παραγωγή παρουσίασε ραγδαία αύξηση και κυμάνθηκε από 15.41 t /ha έως 21.76 t /ha, ανάλογα με τις καλλιεργητικές μεθόδους που εφαρμόστηκαν. Στα Σχήματα 3.2 και 3.3 παρουσιάζεται ο μέσος όρος ξηρής ουσίας σε σχέση με τα τρία ποσοστά άρδευσης και λίπανσης.

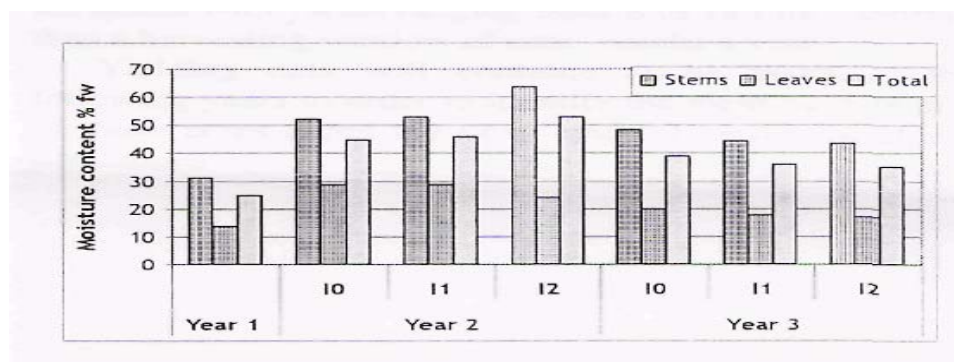


Σχήμα 3.2. Μέσος όρος ξηρής ουσίας στις πειραματικές φυτείες του switchgrass, μετά τα τρία επίπεδα άρδευσης.



Σχήμα 3.3. Μέσος όρος ξηρής ουσίας στις πειραματικές φυτείες του switchgrass, μετά τα τρία επίπεδα λίπανσης.

Η περιεκτικότητα σε υγρασία κυμάνθηκε από 44% έως 53% (Σχήμα 9). Στο τρίτο έτος, η παραγωγή παρουσίασε μείωση για τα χαμηλά και μεσαία επίπεδα άρδευσης, ενώ αυξήθηκε για το υψηλό επίπεδο άρδευσης. Κυμάνθηκε δηλαδή από 12.69 t /ha ως 24.05 t /ha ανάλογα με την επεξεργασία. Στα Σχήματα 3.2 και 3.3 παρουσιάζεται επίσης ο μέσος όρος ξηρής ουσίας σε σχέση με τα τρία ποσοστά άρδευσης και λίπανσης. Η περιεκτικότητα σε υγρασία κυμαίνεται από 35.3% έως 39% (Σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.4. Περιεκτικότητα σε υγρασία του συγκομισμένου υλικού στις πειραματικές φυτείες switchgrass, μετά τα τρία επίπεδα άρδευσης.

Το μέρος των στελεχών συνέβαλε 57.84% στη συνολική ξηρή ουσία, κατά το έτος εγκατάστασης της φυτείας. Στο δεύτερο έτος, το μέρος των στελεχών κυμάνθηκε από 56.39% έως 60.27%. Το ίδιο εύρος καταγράφηκε και στο επόμενο έτος και ήταν 56.82% με 60.67%.

Χρησιμοποιώντας την ANOVA, με πιθανότητα λάθους επιπέδου 0.05 στο συνολικό πεδίο και στα δύο μέρη (στελέχη και φύλλα), παρατηρήθηκε ότι η άρδευση είχε σημαντικά στατιστικά αποτελέσματα στη συνολική ξηρή ουσία και την ξηρή ουσία των στελεχών. Όσον αφορά στα φύλλα, η ξηρή ουσία επηρεάστηκε στατιστικά μόνο από την ηλικία της φυτείας. Η λίπανση αζώτου δεν είχε κάποια σαφή επίδραση στην παραγωγή βιομάζας. Όπως, στην περίπτωση του καλαμιού, τόσο η άρδευση όσο και η λίπανση φάνηκε να ρυθμίζει τον κύκλο ανάπτυξης του φυτού, καθώς τα μη αρδευόμενα φυτά δεν αναπτύχθηκαν καθόλου, ενώ τα αρδευόμενα αναπτύχθηκαν. Ο χρόνος και το ποσοστό των φυτών, όμως, που αναπτύχθηκαν επηρεάστηκε από την άρδευση και τη λίπανση αζώτου. Στο τέλος των δύο καλλιεργητικών περιόδων (Αύγουστος) μόνο τα φυτά με τη I_2N_2 επεξεργασία αναπτύχθηκαν σε ένα ποσοστό μεγαλύτερο από 50%. Στην ίδια χρονική περίοδο, οι επεξεργασίες I_1N_2 , I_2N_0 και I_2N_1 άρχισαν να διαμορφώνουν ταξιανθίες και μετά από 2-3 εβδομάδες έφθασαν στο 50% της άνθησης.

3.2.2 ΑΓΡΙΑΓΚΙΝΑΡΑ (*Cynara cardunculus*)

Γενικά χαρακτηριστικά

Η αγριαγκινάρα καλλιεργείται συστηματικά όπως η εδώδιμη αγκινάρα. Οι φυτείες αυτές εγκαθίστανται στη νότια Ευρώπη, έτσι ώστε να αναπτύξουν σαρκώδη φύλλα. Είναι πολυετείς φυτείες, που κατά τη διάρκεια του φυσικού τους κύκλου, οι νεαροί βλαστοί εκπύσσουν το φθινόπωρο. Η αγριαγκινάρα είναι μια πολύ ενδιαφέρουσα καλλιέργεια, λόγω της προσαρμογής της στο μεσογειακό περιβάλλον και της ποσότητας και της ποιότητάς του για παραγωγή βιομάζας. Η χαμηλή υγρασία της βιομάζας, που συγκομίζεται το καλοκαίρι, κάνει εύκολη τη μεταφορά και την αποθήκευση.

Όπως και σε άλλες ενεργειακές φυτείες που ευδοκιμούν στα μεσογειακά κλίματα, η παραγωγικότητα της αγριαγκινάρα εξαρτάται από τις βροχοπτώσεις. Παρά το γεγονός αυτό, η παραγωγή βιομάζας από αγριαγκινάρα είναι συνήθως υψηλή. Έχει παρουσιαστεί σε ένα πείραμα μακράς διάρκειας (10 έτη), ότι η μέση παραγωγικότητα της φυτείας, που αναπτύσσεται στην κεντρική Ισπανία υπό βροχερές συνθήκες, είναι 14 t dm ha/year.

Το πειραματικό πεδίο της αγριαγκινάρας κάλυψε μια περιοχή 979.2m², η οποία αποτελείται από 9 πειραματικά τεμάχια 96m² (10m x 9.6m), το καθένα. Οι σπόροι σπάρθηκαν σε αποστάσεις 0.8m μεταξύ τους και 0.8m κατά μήκος της σειράς. Υπολογίστηκε ότι η πυκνότητα φύτευσης ήταν 5 kgf σπόρου /ha, περίπου.

Η συγκομιδή της αγριαγκινάρας πραγματοποιείται στο τέλος του κάθε αυξητικού κύκλου, δηλαδή Ιούλιο με Αύγουστο, όταν η υπερκείμενη βιομάζα αποβάλλει την υγρασία της.

Στο πειραματικό πεδίο της αγριαγκινάρας εκτελέστηκαν οι ακόλουθες εργασίες:

- ✓ Τελική συγκομιδή για τη δεύτερη καλλιεργητική περίοδο, εκτελέστηκε στις 10/08/04.
- ✓ Εφαρμογή των σχεδιασμένων καλλιεργητικών τεχνικών κατά την τρίτη αυξητική περίοδο, δηλαδή αζωτούχου λίπανσης στις 23/10/03 και 29/04/04.
- ✓ Συλλογή και εκτίμηση των δεδομένων που αφορούν τη μετάδοση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω της συγκόμησης της φυτείας, την εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας και την εδαφολογική υγρασία.
- ✓ Καταγραφή των στοιχείων κατά την εξέλιξη της αύξησης των φυτών, από τις μηνιαίες μετρήσεις αύξησης και παραγωγής.

Στα μέσα του Σεπτεμβρίου 2003, παρατηρήθηκε αναγέννηση της φυτείας αγριαγκινάρας. Μέχρι της 16 του Σεπτεμβρίου, φύτρωσε το 50% σχεδόν των φυτών. Κατά τη διάρκεια της αρχικής αυξητικής περιόδου (μέχρι το Δεκέμβριο), όταν οι καιρικές συνθήκες ήταν ευνοϊκές (υψηλή βροχόπτωση και καθόλου παγετός) οι φυτείες αυξήθηκαν έντονα. Στη συνέχεια, οι παγετοί που σημειώθηκαν, διέκοψαν την ανάπτυξη του φυτού. Οι δύο χιονοπτώσεις, που σημειώθηκαν στις 24 Ιανουαρίου και στις 14 Φεβρουαρίου (καταγεγραμμένη ελάχιστη θερμοκρασία -12.41 και -12.92°C, αντίστοιχα), είχαν σαν αποτέλεσμα την ολοκληρωτική καταστροφή της φυτείας. Αργότερα, στην αρχή της άνοιξης, από τα «μάτια» που βρίσκονταν στη βάση των φυτών που επέζησαν, άρχισαν να αναπτύσσονται νέα. Παρόλα αυτά, ήταν ήδη αργά για την αγριαγκινάρα να φτάσει τα ικανοποιητικά επίπεδα παραγωγικότητας στο τέλος του φυτικού της κύκλου (Αύγουστος). Αυτός ήταν και ο λόγος της πολύ χαμηλής απόδοσης σε ξηρή ουσία. Στις αρχές Ιουνίου, άρχισε το άνθισμα των φυτών και συνεχίστηκε μέχρι τον Ιούλιο. Οι παρακάτω φωτογραφίες (Εικόνες 3.1-3.6) παρουσιάζουν τη φυτεία της αγριαγκινάρας σε διάφορες φάσεις, κατά τη διάρκεια της δεύτερης καλλιεργητικής περιόδου.



Εικόνα 3.1. Πειραματική φυτεία αγριαγκινάρας στις 11/12/03.



Εικόνα 3.2. Πειραματική φυτεία αγριαγκινάρας στις 19/12/03.



Εικόνα 3.3. Πειραματική φυτεία αγριαγκινάρας στις 26/01/04.



Εικόνα 3.4. Πειραματική φυτεία αγριαγκινάρας στις 06/02/04.



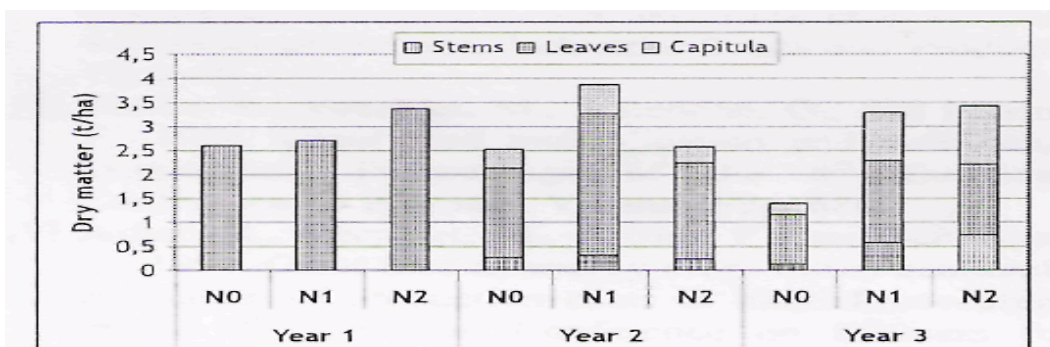
Εικόνα 3.5. Πειραματική φυτεία αγριαγκινάρας στις 09/03/04.



Εικόνα 3.6. Πειραματική φυτεία αγριαγκινάρας στις 29/06/04.

Η παραγωγή σε ξηρή ουσία, το έτος εγκατάστασης της φυτείας, ήταν αρκετά χαμηλή και κυμάνθηκε από 2.61 έως 3.38 t /ha, με περιεκτικότητα σε υγρασία 37.5%. Στο επόμενο

έτος, η παραγωγή παρουσίασε αύξηση και κυμάνθηκε από 2.53 t /ha έως 3.87 t /ha, ανάλογα με τον ρυθμό λίπανσης που εφαρμόστηκε (Σχήμα 3.5).



Σχήμα 3.5. Μέσος όρος ξηρής ουσίας στις πειραματικές φυτείες της αγριαγκινάρας, μετά τα τρία επίπεδα λίπανσης.

Κατά το τρίτο έτος, η παραγωγή παρουσίασε ίδια τάση και κυμάνθηκε από 1.40 t /ha έως 3.42 t /ha (Σχήμα 3.5). Αυτά τα σχήματα απεικονίζουν σαφώς και τον κλωνισμό των φυτειών λόγω των παγετών. Ακόμα κι αν κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου όλα τα χαρακτηριστικά που καταγράφονται έδειξαν την υψηλή παραγωγικότητα της αγριαγκινάρας και την προσδοκία για υψηλή τελική παραγωγή, η αγριαγκινάρα αποδείχτηκε ευαίσθητη στον παγετό και την πολύ χαμηλή παραγωγή βιομάζας.

Συνεπώς, τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αυτό το έτος, μπορούν δύσκολα να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή συμπερασμάτων για την αγριαγκινάρα και τη δυνατότητα να παράγει βιομάζα στον ελληνικούς χώρο. Σε αντίθεση με τις άλλες δύο δοκιμασμένες φυτείες, το μέρος των φύλλων της είναι υψηλότερο από το μέρος των στελεχών. Στο πρώτο έτος ίδρυσης της φυτείας, το τμήμα των φύλλων ήταν σχεδόν το 100% του συγκομισμένου υλικού. Στην ακόλουθη αυξητική περίοδο, το μέρος των φύλλων κυμάνθηκε από 74.2% ως 78.1% ανάλογα με τη λίπανση και στο τρίτο έτος κυμάνθηκε από 42.98% ως 72.86% στη συνολική ξηρή ουσία. Συνεπώς, η αναλογία των στελεχών κυμάνθηκε από 8% - 10% στο δεύτερο έτος και 10% έως 21.35% στο τρίτο έτος. Η περιεκτικότητα σε υγρασία κυμάνθηκε από 19.2% ως 37.7% για το μέρος των φύλλων, από 60% έως 70% για τα στελέχη και το 29.4% έως 43.2% για τον καρπό.

Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ANOVA, με πιθανότητα λάθους επιπέδου 0.05 στο συνολικό πεδίο και στα τρία μέρη (στελέχη, φύλλα και καρπός), παρατηρήθηκε ότι η επίδραση της λίπανσης αζώτου δεν ήταν ευδιάκριτη (Σχήμα 3.3).

Πρέπει να σημειωθεί, ότι αυτές οι παραγωγές ήταν εξαιρετικά χαμηλές για αυτές της φυτείες που καλλιεργήθηκαν στην Ελλάδα, λόγω των ακραίων κλιματολογικών συνθηκών που επικράτησαν κατά τη διάρκεια της ανάπτυξής του. Από προηγούμενες εργασίες που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια άλλων ερευνητικών εργασιών, οι παραγωγές κυμάνθηκαν από 15 έως 30 t /ha ξηρής ουσίας.

3.2.3 ΚΑΛΑΜΙ (*Arundo donax*)

Γενικά χαρακτηριστικά

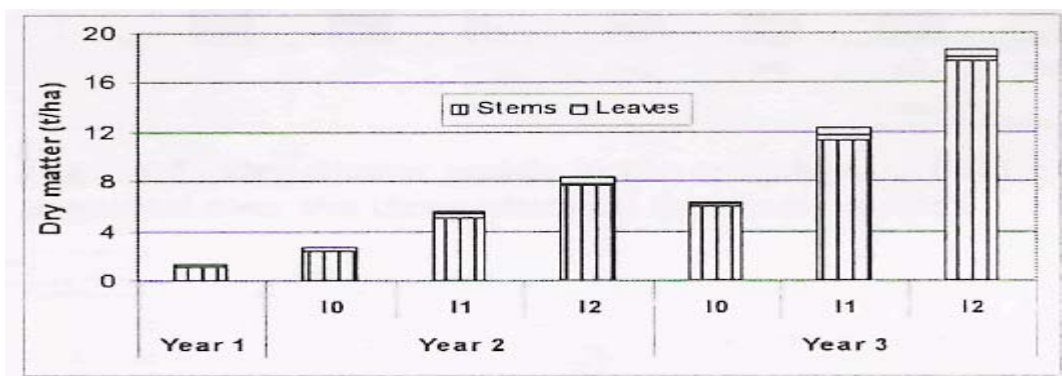
Το καλάμι αποτελεί ενδημικό είδος των χωρών της Μεσογείου. Ως πολυετές αγροστώδες φυτό έχει την ικανότητα να αντέχει σε ακραίες συνθήκες, λόγω του ισχυρού ριζικού συστήματος του, πράγμα που συμβάλλει στην ικανοποιητική πρόσληψη νερού και προφυλάσσει το έδαφος από διάβρωση. Η καλλιέργεια μπορεί να ξεπεράσει ακραίες συνθήκες ξηρασίας, αλλά παρόλα αυτά να παράγει υψηλά ποσά ξηρού υλικού της τάξης των 19 t/ha. Με την συμβολή επαρκούς άρδευσης και λίπανσης, οι ποσότητες του ξηρού υλικού μπορούν να αυξηθούν ικανοποιητικά.

Οι απαιτήσεις σε άρδευση και λίπανση αναμένονται να είναι σε χαμηλά επίπεδα, ανάλογα με τις αγρό-κλιματικές συνθήκες. Σχετικά με τις απαιτήσεις σε εντομοκτόνα, αυτές θεωρούνται αμελητέες ή ακόμη και ανύπαρκτες, για το λόγο ότι έχουν αναφερθεί μερικές μόνο περιπτώσεις προσβολής από έντομα.

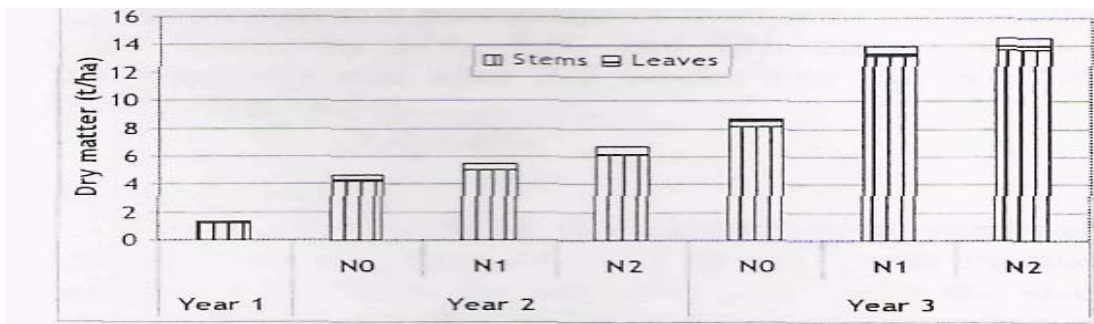
Η λίπανση εξαρτάται από την παραγωγικότητα του εδάφους, καθώς μια σημαντική ποσότητα ξερών φύλλων επιστρέφει στο έδαφος, εμπλουτίζοντάς το με οργανικό υλικό και με θρεπτικά συστατικά .

Το πειραματικό πεδίο του καλαμιού κάλυψε μια περιοχή 2721m² η οποία αποτελείται από 27 πειραματικά τεμάχια των 100.8m² (12m x 8.4m) το κάθε ένα. Τα ριζώματα, για την εγκατάσταση της φυτείας, προήλθαν από μια παλαιότερη, διαιρέθηκαν σε μικρότερα μέρη και έπειτα φυτεύτηκαν σε αποστάσεις 1.5m μεταξύ των σειρών και 0.7m κατά μήκος της σειράς.

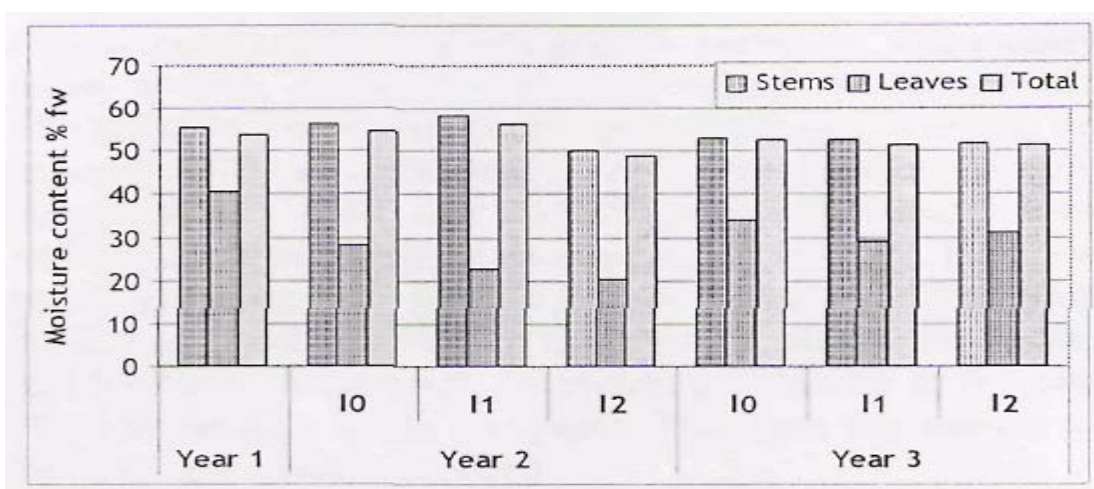
Η παραγωγή σε ξηρή ουσία, το έτος εγκατάστασής της, ήταν αρκετά χαμηλή της τάξης του 1.37 t /ha, με περιεκτικότητα σε υγρασία 54%. Στο επόμενο έτος, η παραγωγή παρουσίασε αύξηση, που κυμάνθηκε από 2.69 t /ha έως 8.67 t /ha ανάλογα με την επεξεργασία. Στα Σχήματα 3.6 και 3.7 παρουσιάζεται ο μέσος όρος ξηρής ουσίας σε σχέση με τα τρία ποσοστά άρδευσης και λίπανσης. Η περιεκτικότητα σε υγρασία κυμάνθηκε από 48% έως 56% (Σχήμα 3.8). Στο τρίτο έτος, η παραγωγή διπλασιάστηκε και κυμάνθηκε από 6.33 t /ha ως 18.60 t /ha, ανάλογα με την επεξεργασία. Στα Σχήματα 3.6 και 3.7 παρουσιάζεται επίσης ο μέσος όρος ξηρής ουσίας σε σχέση με τα τρία ποσοστά άρδευσης και λίπανσης. Η περιεκτικότητα σε υγρασία κυμάνθηκε από 51% έως 52% (Σχήμα 3.8).



Σχήμα 3.6. Μέσος όρος ξηρής ουσίας στις πειραματικές φυτείες του καλαμιού, μετά τα τρία επίπεδα άρδευσης.



Σχήμα 3.7. Μέσος όρος ξηρής ουσίας στις πειραματικές φυτείες του καλαμιού, μετά τα τρία επίπεδα λίπανσης.



Σχήμα 3.8. Περιεκτικότητα σε υγρασία του συγκομισμένου υλικού στις πειραματικές φυτείες καλαμιού, μετά τα τρία επίπεδα άρδευσης.

Το μέρος των στελεχών συνέβαλε 86.13% στη συνολική ξηρή ουσία κατά το πρώτο έτος εγκατάστασης της φυτείας. Το επόμενο έτος, το μέρος των στελεχών κυμάνθηκε από 89.79% έως 92.49%, ανάλογα με την επεξεργασία. Το τρίτο έτος, οι τιμές κυμάνθηκαν από 92.11% έως 95.22%, ανάλογα με την επεξεργασία (Σχήμα 3.6 και 3.7). Φαίνεται ότι κατά τη συγκομιδή των δύο πρώτων καλλιεργητικών περιόδων, το ποσοστό των φύλλων είναι υψηλότερο, ενώ κατά την τρίτη καλλιεργητική περίοδο το ποσοστό αυτό είναι μειωμένο αισθητά.

Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ANOVA, με πιθανότητα λάθους επιπέδου 0.05 στο συνολικό πεδίο και στα δύο μέρη (στελέχη και φύλλα), παρατηρήθηκε ότι η άρδευση και

η ηλικία της φυτείας είχαν σημαντικά στατιστικά αποτελέσματα στο ποσό της συνολικής ξηρής ουσίας και στην ξηρή ουσία των στελεχών. Όσον αφορά στα φύλλα, η ξηρή ουσία επηρεάστηκε στατιστικά μόνο από την ηλικία της φυτείας. Η λίπανση αζώτου δεν είχε κάποια σαφή επίδραση στην παραγωγή βιομάζας. (Σχήμα 3.7)

Οι δύο παράγοντες που μελετάμε, η άρδευση και η αζωτούχος λίπανση, φάνηκαν να ρυθμίζουν τον κύκλο αύξησης των φυτών, καθώς οι μη αρδευόμενες φυτείες δεν αναπτύχθηκαν καθόλου, ενώ οι αρδευόμενες αναπτύχθηκαν ανάλογα με τις μεθόδους που εφαρμόστηκαν. Στο τέλος των δύο καλλιεργητικών περιόδων (Σεπτέμβριος), μόνο τα I_2N_2 φυτά αναπτύχθηκαν σε ένα ποσοστό περισσότερο από 50%. Στην ίδια χρονική περίοδο, οι επεξεργασίες I_1N_2 , I_2N_0 και I_2N_1 άρχισαν να διαμορφώνουν ταξιανθίες και μετά από 2-3 εβδομάδες έφθασαν σε 50% άνθηση.

Στο πειραματικό πεδίο του καλαμιού εκτελέστηκαν οι ακόλουθες εργασίες:

- ✓ Τελική συγκομιδή για τη δεύτερη καλλιεργητική περίοδο, εκτελέστηκε στις 09/03/04.
- ✓ Εδαφολογική ανάλυση για το ανώτερο στρώμα (0-20cm) μετά από τη συγκομιδή και πριν να αρχίσει η νέα αυξητική περίοδος (18/03/04).
- ✓ Εφαρμογή των σχεδιασμένων καλλιεργητικών τεχνικών, δηλαδή αζωτούχου λίπανσης (11/05/04 και 29/06/04) και άρδευσης (αρκετές φορές σύμφωνα με τις απαιτήσεις εγκαταστάσεων).
- ✓ Συλλογή και εκτίμηση των δεδομένων που αφορούν τη μετάδοση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω της συγκόμοσης της φυτείας, την εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας και την εδαφολογική υγρασία.
- ✓ Καταγραφή των στοιχείων κατά την εξέλιξη της αύξησης των φυτών, από τις μηνιαίες μετρήσεις αύξησης και παραγωγής.

Για την εδαφολογική ανάλυση, στα δείγματα, που συλλέχθηκαν από όλες τις καλλιεργητικές τεχνικές, μετρήθηκαν στο εργαστήριο μερικά σημαντικά χαρακτηριστικά τους, όπως η ηλεκτρική αγωγιμότητα, το pH, το συνολικό ασβέστιο, η οργανική ουσία, η συνολική περιεκτικότητα σε άζωτο, φώσφορο, κάλιο, νάτριο και χλώριο. Αυτές οι τιμές,

μαζί με τις τιμές του προηγούμενου έτους παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3, προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση αυτών στην ανάπτυξη του καλαμιού. Γενικά, παρατηρήθηκε μια μικρή αύξηση στην ηλεκτρική αγωγιμότητα, το pH και τη συγκέντρωση ασβεστίου, καθώς και μια σημαντική αύξηση στο φώσφορο και το κάλιο, λόγω της εφαρμογής της λίπανσης. Αντίθετα, καταγράφηκε μια μικρή μείωση της οργανικής ουσίας και του νατρίου. Το χλώριο μετρήθηκε, για το λόγο ότι αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τη διαδικασία μετατροπής, δεδομένου ότι η υψηλή περιεκτικότητα σε χλώριο στο καύσιμο προκαλεί τεράστια προβλήματα στη μετατροπή. Εντούτοις, η εδαφολογική ανάλυση έδειξε ότι η περιεκτικότητα σε χλώριο ήταν χαμηλή σε όλες τις καλλιεργητικές τεχνικές.

Πίνακας 3.3. Αναλύσεις για το υπερκείμενο στρώμα εδάφους (0-20cm) στις πειραματικές φυτείες καλαμιού.

	Electrical Conductivity	pH	Total Calcium	Organic Matter	Total Nitrogen (N)	Phosphorus (P ₂ O ₅)	Potassium (K ₂ O)	Sodium (Na)	Chlorine (Cl)
	(μMHOS/cm)		(%)	(%)	(%)	(mgr/kg soil)	(mgr/kg soil)	(mgr/kg soil)	(mgr/kg soil)
2003	65	7,5	4	1,3	0,137*	1,7	4,8	4	-
I ₀ N ₀	60	7,7	4,4	0,7	0,045	1,7	9,6	2	7
I ₀ N ₁	70	7,7	4	0,6	0,04	2,3	9,6	2	7
I ₀ N ₂	70	7,8	4	0,7	0,045	2,3	9,6	2	7
I ₁ N ₀	70	7,8	4,4	0,6	0,04	2,9	10,2	1,75	5,3
I ₁ N ₁	70	7,8	4	0,7	0,045	2,3	10,2	2	7
I ₁ N ₂	60	7,9	4	0,4	0,03	2,3	9	1,5	5,3
I ₂ N ₀	65	7,8	5,2	0,7	0,045	2,9	9,6	1,5	5,3
I ₂ N ₁	65	7,8	4	0,4	0,03	3,4	9,6	1,5	5,3
I ₂ N ₂	65	7,8	4	0,7	0,045	2,9	10,2	1,5	5,3
I ₀	66,7	7,73	4,13	0,67	0,04	2,10	9,60	2,00	7,00
I ₁	66,7	7,83	4,13	0,57	0,038	2,50	9,80	1,75	5,87
I ₂	65,0	7,80	4,40	0,60	0,040	3,07	9,80	1,50	5,30
N ₀	65,0	7,77	4,67	0,67	0,043	2,50	9,80	1,75	5,87
N ₁	68,3	7,77	4,00	0,57	0,038	2,67	9,80	1,83	6,43
N ₂	65,0	7,83	4,00	0,60	0,040	2,50	9,60	1,67	5,87

Οι νέοι βλαστοί εμφανίστηκαν από το τέλος Μαρτίου, αλλά δεν αναπτύχθηκαν περαιτέρω λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας που καταγράφηκε εκείνη την περίοδο. Αργότερα, όταν οι χαμηλές θερμοκρασίες ήταν υψηλότερες από 0 °C, το ύψος των βλαστών αυξήθηκε. Η ανάπτυξη της φυτείας ήταν υψηλότερη κατά 50% από ότι τις 14 Απριλίου. Ο αυξητικός κύκλος των καλλιεργειών σταμάτησε στο τέλος του Σεπτεμβρίου. Τα μόνα φυτά που ανθοφόρησαν ήταν αυτά που αρδεύονταν και λιπαίνονταν. Μεταξύ των ανθισμένων πειραματικών τεμαχίων, εκείνα που έλαβαν τη μέγιστη ποσότητα νερού και λίπανσης αζώτου (I_2N_2 επεξεργασία) διαμόρφωσαν περισσότερους νέους βλαστούς, από ότι τα πειραματικά τεμάχια που λάμβαναν τα μέτρια ποσά λίπανσης αζώτου ή νερού (I_1N_1 , I_1N_2 και I_2N_1 επεξεργασίες).

Η διαφοροποίηση της άρδευσης άρχισε στις 25 Μαΐου και συνεχίστηκε μέχρι τις 17 Σεπτεμβρίου. Στο σύνολο, κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου η I_0 επεξεργασία έλαβε 20mm, η I_1 289mm και η I_2 562mm.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

4.1 Μεθοδολογία εκτέλεσης πειραματικών δοκιμών

Οι φάσεις της πειραματικής διαδικασίας της παρούσας εργασίας ήταν οι ακόλουθες:

Αρχικά, έγινε προμήθεια του υλικού (βιομάζα ενεργειακών καλλιεργειών) από το Κ.Α.Π.Ε. (Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας). Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το καλάμι (*Arundo donax*) συγκομίστηκε στις 09/03/2004, η αγριαγκινάρα (*Cynara cardunculus*) στις 10/08/2004 και το switchgrass (*Panicum virgatum*) στις 18/11/2003 και στις 21/01/2004.

Στη συνέχεια, τα δείγματα τεμαχίστηκαν πρώτα σε κομμάτια των 5cm με μαχαίρι και λειτριβήθηκαν σε κοκκομετρία -425 μ m κατά τα πρότυπα της ASTM.

Ακολούθησε ο χημικός χαρακτηρισμός των αρχικών δειγμάτων ενεργειακών καλλιεργειών, ο προσδιορισμός δηλαδή της περιεκτικότητάς τους σε υγρασία, καύσιμη ύλη και τέφρα, η στοιχειακή τους ανάλυση, ο προσδιορισμός δηλαδή της περιεκτικότητάς τους σε άνθρακα, υδρογόνο, άζωτο και θείο, καθώς επίσης και ο υπολογισμός της θερμογόνου δύναμης.

Στις τέφρες, που παρήχθησαν μετά την καύση, πραγματοποιήθηκαν χημικές αναλύσεις για τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων των ιχνοστοιχείων και των κύριων οξειδίων με τη μέθοδο της ολικής διαλυτοποίησης.

Στη συνέχεια, μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις των ιχνοστοιχείων Ni, Mo, Cu, Pb, Zn, As, Cd, Co, Sr καθώς και των κύριων οξειδίων SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, MnO, Na₂O, K₂O, P₂O₅, SO₃ στις ολικές διαλυτοποιήσεις των τεφρών, με τη μέθοδο της φασματοφωτομετρίας ατομικής απορρόφησης (AAS). Ο προσδιορισμός του Cl₂

πραγματοποιήθηκε με φασματοφωτόμετρο UV – VIS Hach 4000V με την μέθοδο DPD (N,N-diethyl-p-phenylenediamine).

Τέλος, έγινε επιλογή αντιπροσωπευτικών δειγμάτων από το σύνολό τους για τον προσδιορισμό του Σημείου Ροής Τέφρας σε θερμικό μικροσκόπιο Leitz.

Όλες οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για τις προαναφερθείσες αναλύσεις περιγράφονται παρακάτω αναλυτικά. Αναφέρουμε, επίσης, ότι πραγματοποιήθηκαν πάνω από δύο επαναλήψεις, σε κάθε μέτρηση, και υπολογίστηκε ο μέσος όρος αυτών, σε όλα τα δείγματα και σε όλες τις μεθόδους ανάλυσης.

4.2 Προέλευση και προετοιμασία δειγμάτων

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν τα παρακάτω δείγματα ενεργειακών καλλιεργειών βιομάζας:

1. Αγριαγκινάρα (*Cynara cardunculus*)
2. Switchgrass (*Panicum virgatum*)
3. Καλάμι (*Arundo donax*)

Τα δείγματα των ενεργειακών καλλιεργειών βιομάζας προήλθαν από την περιοχή της κεντρικής Ελλάδας και πιο συγκεκριμένα από το φυτώριο του ΚΑΠΕ στην Αλιάρτο Βοιωτίας.

Για το χημικό χαρακτηρισμό της βιομάζας που μελετήθηκε, σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM, απαιτήθηκε η λήψη αντιπροσωπευτικών δειγμάτων κοκκομετρίας –425 μ m.

Αρχικά, τα δείγματα είχαν διαστάσεις περίπου κυλινδρικές μήκους 15cm και ακτίνας 2cm. Προκειμένου τα δείγματα να αποκτήσουν το επιθυμητό μέγεθος, κόπηκαν σε μικρότερα κομμάτια της τάξης των 5cm με τη βοήθεια τροχού και μαχαιριού. Στη συνέχεια το μέγεθός τους μειώθηκε στα –425 μ m με τη βοήθεια μαχαιρόμυλου, μοντέλου Pulverisette 15 της εταιρείας FRITSCH.

Η κοκκομετρική ανάλυση των δειγμάτων έγινε με τη βοήθεια συσκευών με δονούμενα κόσκινα μοντέλου analysette 3 της εταιρείας FRITSCH.

4.3 Χαρακτηρισμός δειγμάτων

4.3.1 Προσεγγιστική ανάλυση

Προσδιορισμός υγρασίας

Σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM (ASTM E871), αντιπροσωπευτικό δείγμα 2g ζυγίζεται σε αναλυτικό ζυγό με ακρίβεια 0.1mg και θερμαίνεται για 1 ώρα και 15 λεπτά στους 100°C - 105°C. Στη συνέχεια φυλάσσεται για 30 λεπτά σε συνθήκες έλλειψης υγρασίας και κατόπιν ξαναζυγίζεται. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου 2 διαδοχικές τιμές έχουν διαφορά βάρους 0.1mg. Η υγρασία υπολογίζεται από τη σχέση 4.1.

$$\text{Υγρασία \%} = \left[\frac{(W - B)}{W} \right] \times 100 \quad (4.1)$$

Όπου: W = το αρχικό βάρος του δείγματος σε g.

B = το τελικό βάρος του δείγματος μετά ξήρανση σε g.

Προσδιορισμός τέφρας

Ο προσδιορισμός της τέφρας για τη βιομάζα πραγματοποιήθηκε κατά τα πρότυπα ASTM D1102-84, σύμφωνα με τα οποία τα δείγματα καίγονται σε θερμοκρασία 580°C με ρυθμό θέρμανσης 12°C/min. Μετά την καύση, τα δείγματα μεταφέρονται σε συνθήκες έλλειψης υγρασίας, για την εξισορρόπηση των θερμοκρασιών μεταξύ του χωνευτηρίου και της ατμόσφαιρας. Κατόπιν ζυγίζονται στον αναλυτικό ζυγό και ο προσδιορισμός της τέφρας υπολογίζεται από την σχέση 4.2.

$$\text{Τέφρα \%} = \left[\frac{(F - G)}{W} \right] \times 100 \quad (4.2)$$

Όπου: F = βάρος χωνευτηρίου και τέφρας σε g.

G = βάρος χωνευτηρίου σε g.

W = αρχικό βάρος δείγματος σε g

Προσδιορισμός καύσιμης ύλης

Η καύσιμη ύλη, που αποτελεί το άθροισμα των πτητικών συστατικών και του μόνιμου άνθρακα, υπολογίζεται από τη σχέση (4.3).

$$\text{Καύσιμη Ύλη επί Ξηρού(\%)} = 100 - \text{Τέφρα επί Ξηρού(\%)} \quad (4.3)$$

Προσδιορισμός πτητικών

Για τον προσδιορισμό των πτητικών, έγιναν πειράματα σε θερμοζυγό τύπου TGA-6 της Perkin Elmer, σε θερμοκρασίες μεταξύ 25 και 850°C, με γραμμικό ρυθμό ανόδου της θερμοκρασίας 10°C/min. Τα πειράματα διεξήχθησαν παρουσία N₂, ροής 45 ml/min. Η πειραματική διαδικασία ήταν η ακόλουθη:

Μετά τη τοποθέτηση του δείγματος στον υποδοχέα του θερμοβαρυτομετρικού αναλυτή, η θερμοκρασία αυξήθηκε στους 110°C και παρέμεινε σε αυτή τη τιμή μέχρι σταθερής απώλειας βάρους του δείγματος. Σε αυτό το στάδιο απομακρύνεται η υγρασία του δείγματος. Στη συνέχεια η θερμοκρασία αυξήθηκε στους 850°C όπου παρέμεινε, για 15 λεπτά, μέχρι σταθερής απώλειας βάρους του δείγματος.

Τα πτητικά προσδιορίζονται από τη σχέση 4.4.

$$\text{Πτητικά \%} = \left[\frac{(W_{\xi\eta\rho\upsilon} - W_{\tau\epsilon\lambda\iota\kappa\omicron}(850^{\circ}\text{C}))}{W_{\xi\eta\rho\upsilon}} \right] \times 100, \quad (4.4)$$

όπου W= αρχικό βάρος δείγματος σε g

Μόνιμος Άνθρακας

Τέλος για τον προσδιορισμό του μόνιμου άνθρακα χρησιμοποιείται η σχέση 4.5.

$$\text{Μόνιμος Άνθρακας (\% επί ξηρού)} = 100 - \text{Τέφρα (\%)} - \text{Πτητικά (\%)} \quad (4.5)$$

4.3.2 Στοιχειακή ανάλυση

Η στοιχειακή ανάλυση των δειγμάτων έγινε στο εργαστήριο Ανόργανης και Οργανικής Γεωχημείας και Οργανικής Πετρογραφίας του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων και περιλαμβάνει τις εξής διεργασίες:

- Προσδιορισμό άνθρακα (C), υδρογόνου (H) και αζώτου (N).
- Προσδιορισμό θείου (S).
- Προσδιορισμό οξυγόνου (O).

Προσδιορισμός άνθρακα (C), υδρογόνου (H) και αζώτου (N).

Ο ποσοτικός προσδιορισμός του άνθρακα, του υδρογόνου και του αζώτου έγινε με τον αυτόματο στοιχειακό αναλυτή της LECO τύπου CHN-600. Η αρχή λειτουργίας του μηχανήματος, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 4.1, είναι η ακόλουθη:

Ποσότητα δείγματος της τάξεως των mgs εισάγεται στο μηχάνημα σε ειδικό υποδοχέα και καίγεται πλήρως σε καθαρή ατμόσφαιρα οξυγόνου. Κατά την καύση παράγονται υδρατμοί, CO₂, NO_x, N₂ και SO_x. Από το CO₂ υπολογίζεται ο άνθρακας, από τους υδρατμούς το υδρογόνο και από το υπόλοιπο αέριο το άζωτο.

Αρχικά με μία δευτερογενή καύση παρουσία CaO δεσμεύονται τα SO_x, με σκοπό την αποφυγή δημιουργίας θειικού οξέος, το οποίο θα έφθαιρε την συσκευή. Στη συνέχεια,

δεσμεύονται σε δύο στήλες οι υδρατμοί και το CO₂, ενώ το οξυγόνο απομακρύνεται με χρήση κατάλληλου καταλύτη. Στο αέριο που διαφεύγει με χρήση υπέρθερμου χαλκού μετατρέπονται τα NO_x σε N₂. Κατόπιν το αέριο μεταφέρεται σε ένα ηλεκτρονικό στοιχείο που αποτελείται από μία γέφυρα Wheatstone, όπου λόγω διαφορετικής αγωγιμότητας αζώτου και ηλίου (αέριο που μεταφέρει από την αρχή το αέριο της καύσης) μετριέται το άζωτο. Από τους υδρατμούς και το CO₂ που έχουν δεσμευτεί υπολογίζονται φασματοφωτομετρικά το H₂ και ο C.

Αφού ολοκληρωθούν όλες οι διαδικασίες, γίνονται διορθώσεις ως προς τη βαρυτομετρική πίεση και ως προς άλλες παρεμβολές που λαμβάνουν χώρα κατά την διαδικασία της καύσης και λαμβάνονται καταγραμμένα τα συνολικά ποσοστά C, H, N, συμπεριλαμβανομένων του άνθρακα των ανθρακικών ενώσεων, του υδρογόνου της υγρασίας και της ενυδάτωσης των πυριτικών ενώσεων. Αν το ποσοστό της υγρασίας είναι γνωστό, τα αποτελέσματα μπορούν να υπολογιστούν επί ξηρού.

Προσδιορισμός θείου (S).

Ο υπολογισμός του στοιχειακού θείου έγινε με χρήση του επαγωγικού φούρνου HF-10 και του αυτόματου αναλυτή θείου της LECO 532-500. Ποσότητα δείγματος της τάξεως των mgς τοποθετήθηκε σε χωνευτήριο καύσης και αφού σκεπάστηκε με ειδικό κάλυμμα, κάηκε στους 2000 °C στον επαγωγικό φούρνο παρουσία οξυγόνου. Σε κάθε δείγμα προστέθηκε σαν επιταχυντής της καύσης 1g σιδήρου (ελευθέρου θείου), που παρέχει αγωγή μάζα και επιταχύνει την καύση και 1g κασσιτέρου (ελευθέρου θείου), που λειτουργεί σαν συλλίπασμα.

Κατά την καύση του δείγματος, το θείο οποιασδήποτε μορφής μετατρέπεται σε διοξείδιο του θείου, το οποίο αυτόματα ογκομετρείται παρουσία αμύλου με διάλυμα KI-KIO₃. Στον υποδοχέα τιτλοδότησης περιέχεται HCl, KI και αρκετό KIO₃, το οποίο παρουσία αμύλου δίδει ένα έντονο μπλε χρώμα. Όταν το SO₂ εισέρχεται στον υποδοχέα αντιδρά και διαυγάζει την διάλυση, λόγω αντίδρασης με το ιώδιο. Τότε, αυτόματα, μέσω ενός

φωτοκύτταρου, απελευθερώνεται KIO_3 από την προχοΐδα και η διαυγάζουσα διάλυση επανέρχεται στο αρχικό της μπλε χρώμα. Το καταναλωθέν KIO_3 προσδιορίζεται από την προχοΐδα, η οποία είναι ήδη βαθμονομημένη σε αντίστοιχα ποσοστά θείου.

Το συνολικό θείο των δειγμάτων υπολογίζεται με τη βοήθεια προτύπων και διορθώνεται ως προς τη μάζα του ως εξής:

Στην πραγματική τιμή 0,135% S (περιεκτικότητα σε θείο των προτύπων) μετράται μια μέση τιμή β προτύπων % S, οπότε στην μέση τιμή α % S των δειγμάτων αντιστοιχεί πραγματική τιμή $0,135 \cdot \alpha / \beta$.

Το % S διορθωμένο ως προς τη μάζα υπολογίζεται από τον τύπο $S\% = \frac{0,135 \cdot \alpha}{\beta} \cdot m$ όπου m η μέση τιμή μάζας σε g των ως προς μελέτη δειγμάτων.

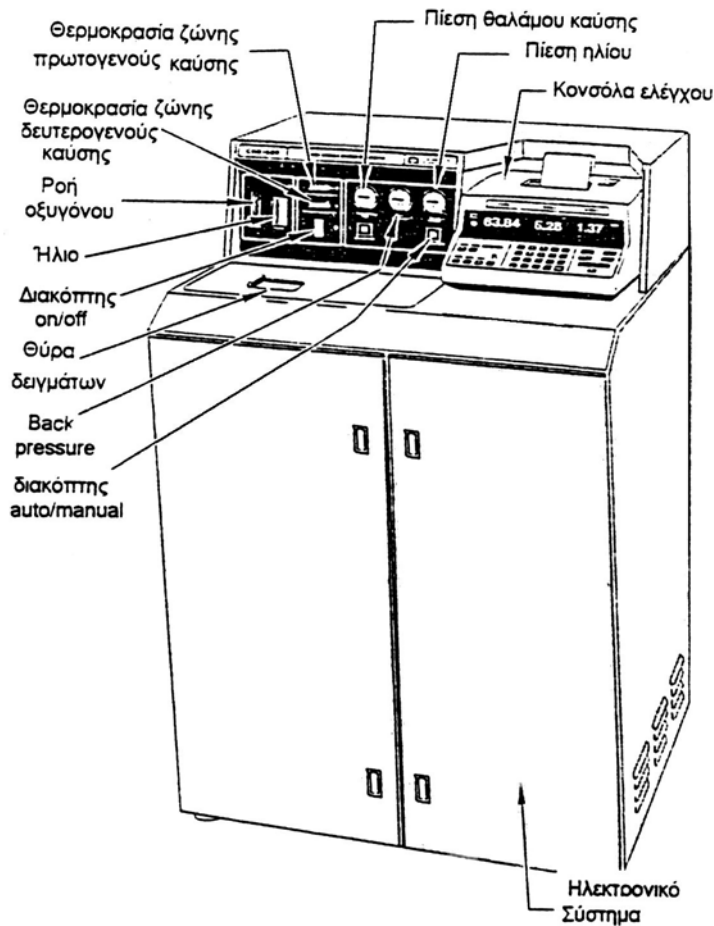
Για τον έλεγχο της ορθής λειτουργίας του οργάνου, μετρήθηκαν και τέσσερα πρότυπα δείγματα.

Στη συνέχεια, έγινε αναγωγή του %S της τέφρας σε ποσότητα συγκρίσιμη με αυτή του δείγματος και με αφαίρεση προέκυψε το θείο που περιέχεται στο οργανικό μέρος του δείγματος.

Προσδιορισμός οξυγόνου (O).

Το ποσοστό του οξυγόνου (επί ξηρού δείγματος) προσδιορίζεται από την διαφορά των C, H, N, συμπεριλαμβανομένου του ποσοστού τέφρας (επί ξηρού δείγματος) από το 100, όπως φαίνεται από τη σχέση (4.6) :

$$\%O = 100 - [\%C + \%H + \%N + \%Τέφρα] \quad (4.6)$$



Σχήμα 4.1. Αυτόματος στοιχειακός αναλυτής CHN-600 της LECO

4.3.3 Προσδιορισμός θερμογόνου δύναμης

Η θερμογόνος δύναμη των δειγμάτων προσδιορίστηκε στο εργαστήριο Ανόργανης και Οργανικής Γεωχημείας και Οργανικής Πετρογραφίας του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων με τη βοήθεια αυτόματου θερμιδόμετρου AC-300 της LECO, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 4.2. Μία ποσότητα δείγματος τοποθετείται σε ειδικό υποδοχέα, μέσα από τον οποίο περνά ένα λεπτό σύρμα, που χρησιμοποιείται για την ανάφλεξη του. Η όλη συσκευασία τοποθετείται σε μία οβίδα υψηλής ανθεκτικότητας σε πίεση 440 psi και σε ατμόσφαιρα καθαρού O_2 . Η οβίδα περιβάλλεται από νερό, του οποίου η θερμοκρασία μετράται με ένα ηλεκτρονικό θερμόμετρο ακριβείας 1/20.000 του ενός βαθμού Κελσίου.

Σε ένα ισοθερμικό σύστημα υπάρχει δυνατότητα ανταλλαγής μερικής ενέργειας μεταξύ του εξωτερικού περιβάλλοντος και του νερού που περιβάλλει την οβίδα. Αυτό μπορεί να υπολογισθεί μετρώντας την αλλαγή θερμοκρασίας του νερού, όταν η οβίδα περιβάλλεται από νερό και πριν το δείγμα καεί.

Η θερμική ανταλλαγή λόγω συνθηκών περιβάλλοντος υπολογίζεται κατά την διάρκεια της ανάλυσης. Ένας μικροεπεξεργαστής διαβάζει την θερμοκρασία του νερού κάθε έξι λεπτά. Η επίδραση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος υπολογίζεται και τα αποτελέσματα διορθώνονται σύμφωνα με αυτή και με το μήκος του καμένου σύρματος. Επιπρόσθετα, γίνεται διόρθωση βάσει της περιεκτικότητας N_2 , S και υγρασίας του δείγματος και εκτυπώνονται τα αποτελέσματα.

Με βάση την ανώτερη θερμογόνο δύναμη επί ξηρού, το ποσοστό υγρασίας επί του φυσικού δείγματος W_ϕ , το ποσοστό τέφρας επί του φυσικού δείγματος A_ϕ , το ποσοστό υγρασίας επί του αεροξηραθέντος δείγματος W_α και της τέφρας του αεροξηραθέντος δείγματος A_α , μπορούν να υπολογιστούν οι εξής παράμετροι :

- Ανώτερη θερμογόνο δύναμη επί του φυσικού δείγματος $(A.Θ.Δ.)_\phi$
- Ανώτερη θερμογόνο δύναμη επί του αεροξηραθέντος δείγματος $(A.Θ.Δ.)_\alpha$
- Κατώτερη θερμογόνο δύναμη επί του φυσικού δείγματος $(K.Θ.Δ.)_\phi$
- Κατώτερη θερμογόνο δύναμη επί του αεροξηραθέντος δείγματος $(K.Θ.Δ.)_\alpha$
- Κατώτερη θερμογόνο δύναμη επί του ξηρού δείγματος $(K.Θ.Δ.)_\xi$

Οι σχέσεις που προσδιορίζουν τις παραπάνω τιμές έχουν ως εξής :

$$(A.Θ.Δ.)_\phi = (A.Θ.Δ.)_\xi * (1 - W_\phi) \quad (4.7)$$

$$(A.Θ.Δ.)_\alpha = (A.Θ.Δ.)_\xi * (1 - W_\alpha) \quad (4.8)$$

$$(K.Θ.Δ.)_\phi = (A.Θ.Δ.)_\phi - A' \quad (4.9)$$

Όπου:

$$A = \{ [100 - (W_{\phi} + A_{\phi})] * 0,45 + W_{\phi} \} * 5,85$$

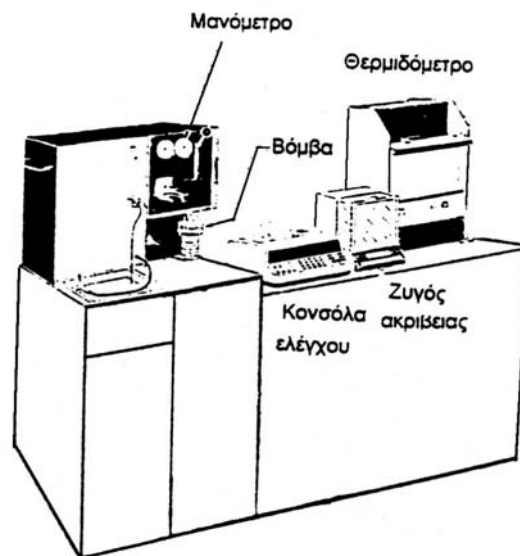
$$(K.Θ.Δ.)_{\alpha} = (A.Θ.Δ.)_{\alpha} - ''A$$

$$''A = \{ [100 - (W_{\alpha} + A_{\alpha})] * 0,45 + W_{\alpha} \} * 5,85$$

$$(K.Θ.Δ.)_{\xi} = (K.Θ.Δ.)_{\alpha} / (1 - W_{\alpha}).$$

0,45: Συντελεστής ο οποίος υπολογίζεται από την περιεκτικότητα του δείγματος σε υδρογόνο.

5,85: Λανθάνουσα θερμότητα εξαέρωσης του νερού σε calories.



Σχήμα 4.2 Αυτόματο θερμιδόμετρο AC-300 της LECO

4.3.4 Χημική ανάλυση τέφρας

Για τη χημική ανάλυση της τέφρας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της φασματοσκοπίας ατομικής απορρόφησης (Atomic Absorption Spectrometry – AAS).

Αρχή Μεθόδου AAS

Η AAS χρησιμοποιεί την απορρόφηση του φωτός προκειμένου να μετρήσει συγκεντρώσεις ατόμων στην αέρια φάση. Το προς ανάλυση δείγμα (συνήθως υγρό ή στερεό) πρέπει να εξατμιστεί (εξαχνωθεί) είτε σε φλόγα, είτε σ' ένα φούρνο από γραφίτη, σε θερμοκρασίες 1000-2000 ° K. Τα άτομα απορροφούν υπεριώδη ή ορατή ακτινοβολία και μεταπηδούν σε στοιβάδες υψηλότερης ενεργειακής στάθμης. Η συγκέντρωση του δείγματος καθορίζεται από την ποσότητα της απορρόφησης.

Το φάσμα των ατόμων στην αέρια φάση αποτελείται από πολύ λεπτές γραμμές, με αποτέλεσμα η τεχνική αυτή να έχει υψηλή ευαισθησία και να είναι εύκολη η ταυτόχρονη εξέταση πολλών δειγμάτων. Η AAS σε φούρνο, είναι χρήσιμη όταν η ποσότητα του δείγματος είναι πολύ μικρή, άρα απαιτούνται πολύ χαμηλά επίπεδα ανίχνευσης.

Το μηχάνημα της AAS βαθμονομείται κάθε φορά για το συγκεκριμένο προς ανάλυση στοιχείο, από διαλύματα γνωστής συγκέντρωσης του αυτού στοιχείου και κατόπιν καταγράφονται τα αποτελέσματα της απορρόφησης. Έτσι σχεδιάζεται σε διάγραμμα η απορρόφηση ως προς τη συγκέντρωση.

Ανάλυση ιχνοστοιχείων τέφρας

Για την ανάλυση των 9 ιχνοστοιχείων της τέφρας που επιλέχθηκαν (Cu, Co, Ni, Zn, Pb, Mo, As, Cd, Sr) χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ατομικής απορρόφησης (AAS). Πιο

συγκεκριμένα μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις των στις ολικές διαλυτοποιήσεις των τεφρών.

Η διαλυτοποίηση των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε με τα οξέα $\text{HF} - \text{HNO}_3$. Το τελικό προϊόν συγκεκριμένου όγκου, μεταφέρθηκε σε πλαστική φιάλη και χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των ιχνοστοιχείων.

Διαλυτοποίηση με επίδραση οξέων

Για τη διαλυτοποίηση ενός δείγματος με επίδραση οξέων χρησιμοποιείται συνήθως και ανάλογα με το δείγμα μίγμα οξέων. Αν υπάρχει οργανική ουσία καταστρέφεται με την επίδραση υπεροξειδίου του υδρογόνου ή υπερχλωρικού οξέος. Η διαλυτοποίηση πραγματοποιείται συνήθως σε χωνευτήρια από Teflon. Συχνά απαιτείται ήπια θέρμανση του δείγματος με το μίγμα των οξέων. Οι ενώσεις του Si διασπώνται με την επίδραση του HF , σε αυτήν την περίπτωση όμως το Si δεν μπορεί να προσδιοριστεί γιατί μετατρέπεται σε μια πτητική ένωση.

Διαλυτοποίηση με επίδραση $\text{HF}-\text{HNO}_3$

Ποσότητα 250mg λειοτριβιμένου δείγματος μεταφέρονται σε ποτήρι από Teflon, χωρητικότητας 200ml. Προστίθενται 20ml πυκνού HNO_3 οξέος και 60ml πυκνού HF οξέος. Το ποτήρι μεταφέρεται σε υδατόλουτρο και το περιεχόμενο εξατμίζεται μέχρι ξηρού. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται και στο υπόλειμμα προστίθενται 5ml πυκνού HCl οξέος και 5ml πυκνού HNO_3 οξέος και το περιεχόμενο εξατμίζεται μέχρι ξηρού. Στη συνέχεια, προστίθενται άλλα 5ml HCl οξέος και 5ml HNO_3 οξέος και ακολουθεί αραίωση μέχρι περίπου 50ml. Το περιεχόμενο εξατμίζεται μέχρι να φτάσει τα 35ml περίπου, μεταφέρεται σε ογκομετρική φιάλη των 50ml, αραιώνεται μέχρι τη χαραγή και μεταφέρεται σε πλαστική φιάλη, όπου και φυλάσσεται για να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των ιχνοστοιχείων.

Ανάλυση κύριων οξειδίων τέφρας

Η διαλυτοποίηση των τεφρών για τον προσδιορισμό της σύστασής τους πραγματοποιήθηκε με τη χρήση συντηκτικού μέσου για την περίπτωση του SiO_2 και με την επίδραση οξέων HF-HCl-HNO_3 για τα υπόλοιπα οξείδια.

Διαλυτοποίηση με επίδραση HF-HNO_3

Ποσότητα 250mg λειοτριβιμένου δείγματος μεταφέρονται σε ποτήρι από Teflon, χωρητικότητας 200ml. Προστίθενται 20ml πυκνού HNO_3 οξέος και 60ml πυκνού HF οξέος. Το ποτήρι μεταφέρεται σε υδατόλουτρο και το περιεχόμενο εξατμίζεται μέχρι ξηρού. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται και στο υπόλειμμα προστίθενται 5ml πυκνού HCl οξέος και 5ml πυκνού HNO_3 οξέος και το περιεχόμενο εξατμίζεται μέχρι ξηρού. Στη συνέχεια, προστίθενται άλλα 5ml HCl οξέος και 5ml HNO_3 οξέος και ακολουθεί αραίωση μέχρι περίπου 50ml. Το περιεχόμενο εξατμίζεται μέχρι να φτάσει τα 35ml περίπου, μεταφέρεται σε ογκομετρική φιάλη των 50ml, αραιώνεται μέχρι τη χαραγή και μεταφέρεται σε πλαστική φιάλη, όπου και φυλάσσεται για να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των ιχνοστοιχείων.

Διαλυτοποίηση με σύντηξη

Για τη διαλυτοποίηση με σύντηξη χρησιμοποιούνται αντιδραστήρια που ονομάζονται συντηκτικά μέσα και έχουν την ιδιότητα, όταν θερμανθούν σε υψηλές θερμοκρασίες με το προς διάλυση δείγμα, να σχηματίζουν μαζί του ενώσεις που είναι ευδιάλυτες σε αραιά διαλύματα οξέων.

Υπάρχουν πολλές ενώσεις που χρησιμοποιούνται σαν συντηκτικά μέσα. Τέτοια είναι τα ανθρακικά και βορικά άλατα και τα υδροξείδια των αλκαλίων. Για τη σύντηξη, χρησιμοποιούνται χωνευτήρια από διάφορα υλικά όπως σίδηρος, νικέλιο, λευκόχρυσος και κράματα λευκόχρυσου με παλλάδιο, ιρίδιο ή χρυσό. Επειδή στις δραστικές συνθήκες της σύντηξης, τα χωνευτήρια μπορεί να προσβληθούν, η επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού συντηκτικού, χωνευτηρίου και θερμοκρασίας πρέπει να γίνεται με μεγάλη προσοχή. Είναι αυτονόητο ότι με αυτήν τη μεθοδολογία διαλυτοποίησης δεν μπορούν,

εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών που απαιτούνται, να προσδιοριστούν πτητικά στοιχεία. Η σύντηξη με τετραβορικό λίθιο ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) και μεταβορικό λίθιο (LiBO_2) ή μείγμα αυτών, καθώς και η χρήση μείγματος H_3BO_3 και LiCO_3 προτείνεται συχνά για τη διαλυτοποίηση δειγμάτων που πρόκειται να αναλυθούν με οπτικές μεθόδους ανάλυσης.

Για τη διαλυτοποίηση με σύντηξη χρησιμοποιήθηκε H_3BO_3 και LiCO_3 σαν συντηκτικό μέσο και ακολούθησε διαλυτοποίηση του τήγματος με HNO_3 . Τα αντιδραστήρια που χρησιμοποιήθηκαν προέκυψαν ως εξής:

Μέσο σύντηξης (2M H_3BO_3 : 1M LiCO_3): 123.66g H_3BO_3 αναμιγνύονται καλά με 73.89g LiCO_3 . Το μείγμα αφήνεται για 2-3 h στους 110 °C, μέχρι να αποκτήσει μια κοκκώδη εμφάνιση, συνθλίβεται και φυλάσσεται σε σκοτεινόχρωμες φιάλες.

3% HNO_3 : 46ml πυκνού HNO_3 67% μεταφέρονται σε ογκομετρική φιάλη των 1000ml και αραιώνονται.

Ποσότητα 100mg λεπτόκοκκου δείγματος μεταφέρονται σε χωνευτήρια από λευκόχρυσο και ανακατεύονται με 500mg συντηκτικού μέσου. Το μείγμα τοποθετείται σε φούρνο στους 980°C για 15-20 λεπτά. Απομακρύνεται από το φούρνο, αναδεύεται αν υπάρχει ανάγκη και τέλος ψύχεται το υαλώδες τήγμα. Στη συνέχεια, μεταφέρεται σε ποτήρι ζέσης και προστίθενται 10ml HNO_3 1M. Το ποτήρι, με το χωνευτήριο, τοποθετείται σε οριζόντιο αναταράκτη μέχρι να διαλυθεί εντελώς το τήγμα. Το διάλυμα αυτό μεταφέρεται σε ογκομετρική φιάλη των 100ml και αφού αραιωθεί μεταφέρεται σε πλαστική φιάλη για φύλαξη.

Προσδιορισμός (%) του βασικού μεταλλοξειδίου SiO_2

0.100g δείγματος συντήκονται με 0.500g συντηκτικού μέσου (μείγμα H_3BO_3 και LiCO_3) σε χωνευτήρια λευκόχρυσου. Στη συνέχεια διαλυτοποιούνται, όπως περιγράφεται παραπάνω, σε διάλυμα αραιού νιτρικού οξέος (HNO_3) 3% και μετρώνται στο φασματοφωτόμετρο ατομικής απορρόφησης AAnalyst 100.

Προσδιορισμός (%) βασικών μεταλλοξειδίων Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , MnO , Na_2O , K_2O

0.250g δείγματος διαλυτοποιούνται, σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία, με HCl / HF/ HNO_3 και μετρώνται στο φασματοφωτόμετρο ατομικής απορρόφησης AAnalyst 100.

Προσδιορισμός (%) P_2O_5 .

Ο φώσφορος προσδιορίζεται με το σχηματισμό ενός κίτρινου συμπλόκου του μολυβδοβαναδοφωσφορικού οξέος που απορροφά σε μήκος κύματος 460nm. Οπότε, 10ml από το διάλυμα που προήλθε με τη διαλυτοποίηση των δειγμάτων με οξέα HCl / HF/ HNO_3 , μεταφέρονται σε ογκομετρικές φιάλες των 50ml στις οποίες προσθέτονται βαναδικό αμμώνιο(NH_4VO_3), μολυβδαινικό αμμώνιο ($(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$) και πυκνό HNO_3 . Τα αντιδραστήρια που χρησιμοποιήθηκαν προέκυψαν ως εξής:

βαναδικό αμμώνιο (NH_4VO_3): 2.5g NH_4VO_3 διαλύονται σε 800ml απεσταγμένου νερού με σύγχρονη ανάδευση. Προστίθενται 20ml πυκνού HNO_3 και αραιώνονται στα 1000ml (διάλυμα 0.25%).

μολυβδαινικό αμμώνιο ($(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$): 50g $(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$ διαλύονται σε 1000ml απεσταγμένου νερού με ανάδευση (διάλυμα 5%)

διάλυμα φωσφορικών: 1.9175g KH_2PO_4 διαλύονται σε 1000ml απεσταγμένου νερού (1000μg P_2O_5 /ml)

Ποσότητα 2.5ml πυκνού HNO_3 προστίθενται σε κάθε μια από τις ογκομετρικές φιάλες για τα πρότυπα και τα δείγματα. 5ml βαναδικού αμμωνίου προστίθενται σε κάθε φιάλη. 10ml μολυβδαινικού αμμωνίου προστίθενται σε κάθε φιάλη. Αραιώνεται κάθε φιάλη μέχρι τα 50ml και τα διαλύματα αφήνονται να ηρεμήσουν για 10 λεπτά. Ρυθμίζεται το 0 και το 100 στην κλίμακα του φασματοφωτομέτρου ορατού υπερϊώδους μοντέλο Spectronic 20d της MILTON ROY COMPANY και προσδιορίζεται η απορρόφηση ή η διαπερατότητα για κάθε διάλυμα στα 460nm. Οι μετρήσεις πρέπει να γίνονται με την ίδια κυψελίδα ή με κυψελίδες που είναι προσαρμοσμένες, δείχνουν δηλαδή, την ίδια απορρόφηση για το διάλυμα. Γίνεται γραφική παράσταση (καμπύλη αναφοράς) της

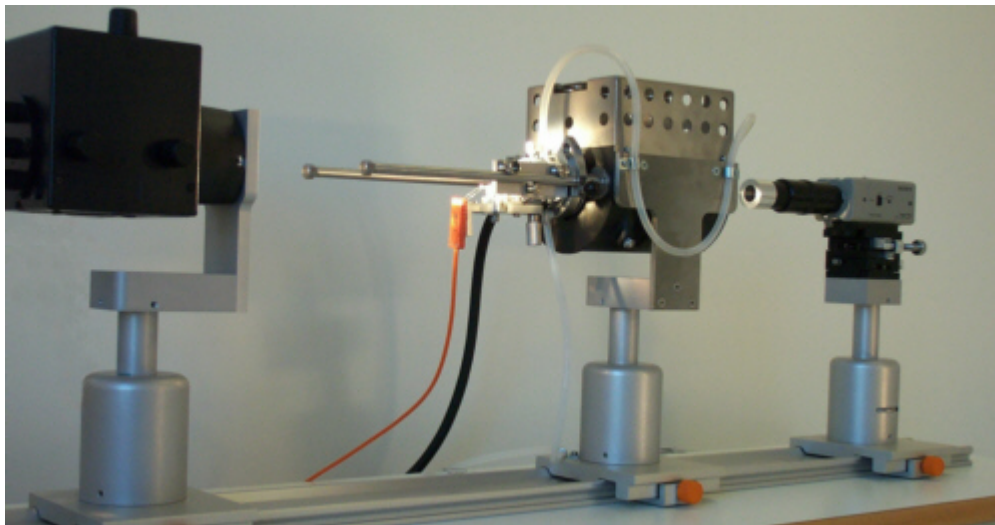
απορρόφησης ή της διαπερατότητας των προτύπων ως προς την αντίστοιχη συγκέντρωση. Χρησιμοποιώντας την απορρόφηση ή την διαπερατότητα για κάθε δείγμα προσδιορίζεται η αντίστοιχη συγκέντρωση P_2O_5 από την καμπύλη αναφοράς.

Προσδιορισμός (ppm) Cl_2 .

Όπως και στην περίπτωση των βασικών μεταλλοξειδίων που περιγράφεται παραπάνω, πραγματοποιήθηκε διαλυτοποίηση με HCl / HF / HNO_3 και στη συνέχεια το διάλυμα μετρήθηκε στο φασματοφωτόμετρο UV – VIS Hach 4000V με την μέθοδο DPD (N,N-diethyl-p-phenylenediamine). 10ml δείγματος τοποθετούνται σε κυψελίδες του φασματοφωτομέτρου. Στη συνέχεια, προστίθεται το περιεχόμενο από ένα φακελάκι DPD Total Chlorine Powder Pillow σε κάθε κυψελίδα. Το διάλυμα αναδεύεται για 20 δευτερόλεπτα ώστε να ομοιογενοποιηθεί. Η ύπαρξη χλωρίου διαφαίνεται, αρχικά, με την αλλαγή του χρώματος του διαλύματος, από διάφανο που είναι, σε ροζ. Η κυψελίδα τοποθετείται στην υποδοχή του μηχανήματος και μετά από 3 λεπτά τα αποτελέσματα εμφανίζεται σε mg/L. Με αναγωγή στην ξηρή ουσία του δείγματος, τα αποτελέσματα μπορούν να εκφραστούν και σε ποσοστό επί τοις εκατό (%).

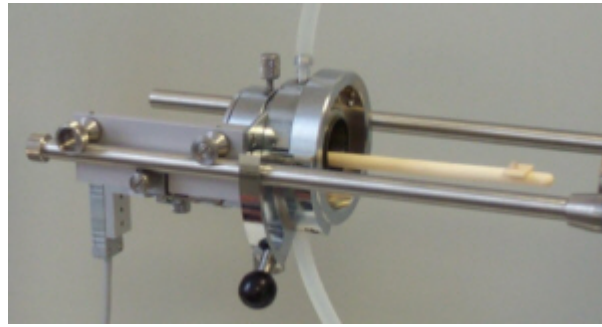
4.3.5 Σημείο Ροής Τέφρας

Η ανάλυση σύντηξης των τεφρών πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια θερμικού μικροσκοπίου Leitz, σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM D1857-94 (DIN51730). Με τη μέθοδο αυτή μετράται ο βαθμός παραμόρφωσης μιας ποσότητας τέφρας σε μορφή κύβου σε τέσσερις διαφορετικές θερμοκρασίες. Η θερμοκρασία αρχικής παραμόρφωσης, η θερμοκρασία μαλάκυνσης, η θερμοκρασία ημισφαιρίου και η θερμοκρασία του σημείου ροής. Η θερμοκρασία του σημείου ροής αποτελεί δείκτη δημιουργίας των αναμενόμενων επισκωριώσεων.



Εικόνα 4.1. Θερμικό μικροσκόπιο Leitz.

Το θερμικό μικροσκόπιο Leitz αποτελείται ουσιαστικά από δύο μέρη. Το πρώτο είναι ένα σύστημα κυλινδρικού κλιβάνου, όπου πραγματοποιείται η θερμική διεργασία και καταγράφονται οι θερμοκρασίες που ενδιαφέρουν. Το δεύτερο μέρος είναι το κλασσικό μικροσκόπιο μέσω του οποίου παρατηρείται το προς ανάλυση δείγμα και φωτογραφίζεται. Η καύση του δείγματος πραγματοποιείται με έναν σταθερό ρυθμό που καθορίζεται από το χρήστη.



Εικόνα 4.2. Κλίβανος θερμικού μικροσκοπίου Leitz.

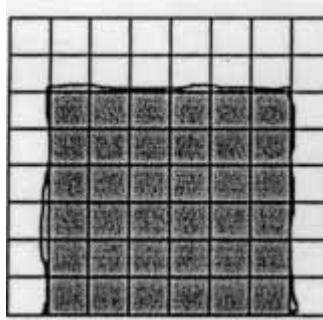
Ο κλίβανος του μικροσκοπίου μπορεί να είναι κεραμικός και να φτάνει στους 1600-1750°C ενώ το δείγμα τους 1500-1650 °C. Ο ρυθμός θέρμανσης μπορεί να καθορίσει από τους 10 έως τους 80 °C/min.

Έχει τη δυνατότητα να μετρά τη θερμοκρασία που αρχίζει και παραμορφώνεται το δείγμα, το σημείο της αρχικής παραμόρφωσης, την συμπεριφορά που έχει το δείγμα όταν αρχίζει και μαλακώνει και στη συνέχεια λιώνει.

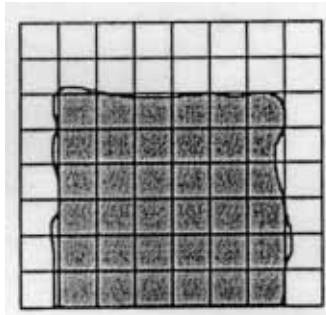
Χαρακτηρισμός της συμπεριφοράς της τέφρας.

Η τέφρα της βιομάζας και άλλων ανόργανων ενώσεων δεν έχει ένα καθορισμένο σημείο τήξης αλλά μπορεί να διαιρεθεί σε τέσσερα στάδια. Η πραγματική τήξη αρχίζει μετά από την πυροσυσσωμάτωση της τέφρας, σε ένα μεγαλύτερο ή μικρότερο εύρος θερμοκρασιών, και πριν αρχίσει να γίνεται υγρή, η τέφρα περνά από διάφορα στάδια πλαστικότητας και ρευστότητας. Ο προσδιορισμός της θερμικής συμπεριφοράς τέφρας δίνεται σύμφωνα με το DIN 51730 (DIN 51730, 1976).

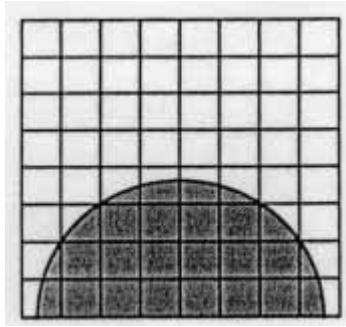
Τα διάφορα στάδια της τήξης μπορούν να περιγραφούν ως εξής:

SIT: αρχή της αρχικής παραμόρφωσης (πυροσυσσωμάτωση)

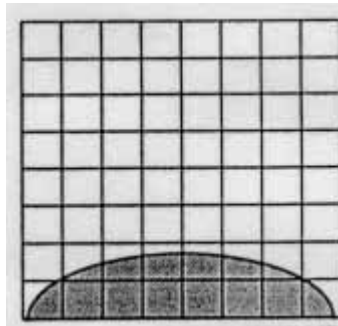
Η πυροσυσσωμάτωση περιγράφει μια διαδικασία, όπου τα μεμονωμένα μόρια τέφρας κολλούν μεταξύ τους. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αυτής, το δείγμα μπορεί να αλλάξει τις αρχικές του διαστάσεις χωρίς να παρουσιάσει τυπικά χαρακτηριστικά του σημείου μαλάκυνσης.

SOT: αρχή της μαλάκυνσης

Στη θερμοκρασία μαλάκυνσης το δείγμα παρουσιάζει τα πρώτα σημάδια της μαλάκυνσης, π.χ. αλλαγές στην επιφάνεια του, η στρογγυλοποίηση των άκρων είναι πλήρης και το δείγμα αρχίζει να απομακρύνει τον όγκο του αερίου μεταξύ των μορίων. Εάν οι άκρες είναι ακόμα αιχμηρές, μια συμπύκνωση του δείγματος δεν πρέπει να θεωρηθεί ότι μαλακώνει.

HT: σημείο ημισφαιρίου

Το ημισφαιρικό σημείο δίνει τη θερμοκρασία κατά την οποία το δείγμα λαμβάνει, κατά προσέγγιση, την μορφή ενός ημισφαιρίου. Το ύψος του λειωμένου δείγματος είναι το κατά προσέγγιση μισό μήκος της γραμμής της βάσης.

FT: σημείο ροής

Σε αυτήν την θερμοκρασία το δείγμα έχει συρρικνωθεί στο ένα τρίτο του αρχικού ύψους του.[67]

Προσδιορισμός θερμοκρασιών με θερμαινόμενο μικροσκόπιο

Η συμπεριφορά ενός υλικού με την αύξηση της θερμοκρασίας, εξετάζεται με βάσει τις μεταβολές που καταγράφονται σε ένα μικρό δείγμα υλικού, αφού μορφοποιηθεί σε συγκεκριμένο σχήμα. Η διαδικασία που ακολουθείται γίνεται σύμφωνα με Γερμανικό πρότυπο DIN51730.

Τοποθετείται στην ειδική μήτρα κατασκευής του δοκιμίου κατάλληλη ποσότητα υλικού, αφού πρώτα έχει προστεθεί μια ποσότητα νερού ώστε να γίνει μια συμπαγής μάζα, για τη

δημιουργία ενός δοκιμίου με ύψος 3mm και διάμετρο 3mm. Το δοκίμιο αυτό τοποθετείται σε ένα μικρό κεραμικό δισκίο και κατόπιν στην ειδική υποδοχή, πάνω στο κυλινδρικό στήριγμα που περιέχει τα θερμοστοιχεία και στη συνέχεια μέσα στο φούρνο. Ο φούρνος καλύπτεται με κυκλικούς δίσκους χαλαζία ώστε να αποτρέπουν την κίνηση του αέρα και φαινόμενα στροβιλισμού στο θάλαμο του φούρνου κατά την θέρμανση, τροφοδοτείται με ρεύμα μέσω ενός μετασχηματιστή οπότε, μεταβάλλοντας την ένταση του ρεύματος, αυξάνει η θερμοκρασία που διοχετεύεται στο δείγμα.

Οι συνθήκες μέτρησης, είναι αύξηση της έντασης του ρεύματος με ρυθμό τέτοιο ώστε να υπάρχει αύξηση της θερμοκρασίας κατά 10 °C/min. Η καταγραφή της θερμοκρασίας γίνεται με ένα γαλβανόμετρο ως τους 1600 °C.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑ

5.1 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Οι ενεργειακές καλλιέργειες της αγριαγκινάρας (*Cynara cardunculus*), του switchgrass (*Panicum virgatum*) - δύο ημερομηνίες συγκομιδής- και του καλαμιού (*Arundo donax*) μελετήθηκαν ως βιοκαύσιμα ανάλογα με τις καλλιεργητικές τεχνικές άρδευσης/λίπανσης που εφαρμόστηκαν.

Στην περίπτωση της αγριαγκινάρας δεν εφαρμόστηκε καθόλου άρδευση, παρά μόνο λίπανση. Στην περίπτωση αυτή έχουμε δείγματα με:

- καθόλου λίπανση (N_0)
- μεσαία λίπανση (N_{40})
- μέγιστη λίπανση (N_{120})

Σε όλα τα δείγματα της αγριαγκινάρας πραγματοποιήθηκαν, εκτός από την προσεγγιστική και στοιχειακή ανάλυση και τον προσδιορισμό της θερμογόνου δύναμης, και χημικές αναλύσεις χαρακτηρισμού της τέφρας. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στο υποκεφάλαιο 5.2, που ακολουθεί.

Στα δείγματα του Switchgrass και του καλαμιού εφαρμόστηκε άρδευση και λίπανση. Οπότε, για να διαπιστώσουμε την επίδρασή τους, μετρήθηκαν δείγματα τα οποία δεν αρδεύτηκαν ούτε λιπάνθηκαν (I_0N_0), δείγματα που εφαρμόστηκε η μεσαία επεξεργασία άρδευσης και λίπανσης (I_1N_1) και δείγματα με τη μέγιστη άρδευση και λίπανση (I_2N_2). Μετρήθηκαν, επίσης, δείγματα με όλους τους δυνατούς συνδυασμούς καλλιεργητικών τεχνικών. Έτσι, είχαμε δείγματα που εφαρμόστηκε:

- Καθόλου άρδευση (I_0) και μεταβλήθηκε η λίπανση (N_0, N_1, N_2).
- Μεσαία άρδευση (I_1) και μεταβλήθηκε η λίπανση (N_0, N_1, N_2).
- Μέγιστη άρδευση (I_2) και μεταβλήθηκε η λίπανση (N_0, N_1, N_2).

Σε όλα τα παραπάνω δείγματα πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για τον χαρακτηρισμό τους ως βιοκαύσιμα. Δηλαδή, προσδιορισμός της υγρασία και της τέφρας, των συγκεντρώσεων σε C, H, O, N και S καθώς και της θερμογόνου δύναμης. Τα αποτελέσματα της προσεγγιστικής ανάλυσης, για όλα τα δείγματα που εφαρμόστηκαν η άρδευση και η λίπανση, δείχνουν ότι τα ποσοστά της υγρασία κυμαίνονται από 2 έως 8% και της τέφρας, επί ξηρού, από 2 έως 10%. Η στοιχειακή ανάλυση έδωσε ποσοστά για τον C από 42 έως 46%, για το H από 6 έως 6.5%, για το N από 0.1 έως 1%, για το S από 0.03 έως 0.1% και για το O από 42 έως 46%. Οι τιμές της κατώτερης θερμογόνου δύναμης κυμαίνονται από 4000 έως 6000kcal/kg, επί ξηρού. Στο Παράρτημα παρουσιάζονται αναλυτικά, σε μορφή πινάκων, οι τιμές της κάθε παραμέτρου και για όλα τα δείγματα.

Στην περίπτωση του Switchgrass-και των δύο ημερομηνιών συγκομιδής- τα φύλλα παρουσιάζουν υψηλότερα ποσοστά υγρασίας και τέφρας από ότι τα στελέχη. Τα δείγματα του Switchgrass της πρώτης ημερομηνίας παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές υγρασίας και τέφρας, από αυτά της δεύτερης. Αυτό συμβαίνει λόγω της διαφορετικής εποχής συγκομιδής. Υψηλότερη τιμή υγρασίας και τέφρας παρουσιάζουν τα φύλλα I_1N_1 και τα στελέχη I_0N_2 , για την πρώτη ημερομηνία. Στα φύλλα της πρώτης συγκομιδής, κατά την εφαρμογή της άρδευσης μόνο (I_0N_0 , I_1N_0 , I_2N_0) παρατηρείται μια μικρή τάση αύξησης του ποσοστού της υγρασίας και της τέφρας, ενώ κατά την εφαρμογή της λίπανσης μόνο (I_0N_0 , I_0N_1 , I_0N_2) παρατηρείται μια μικρή τάση αύξησης του ποσοστού της τέφρας. Στα στελέχη και για τις ίδιες επεξεργασίες, παρατηρούνται οι ίδιες μεταβολές με παραπάνω. Οι μεταβολές αυτές δεν είναι ουσιαστικές και οι τιμές κυμαίνονται μέσα σε περιορισμένα όρια.

Γενικότερα, κατά την εφαρμογή της άρδευσης και της λίπανσης τόσο στα φύλλα όσο και στα στελέχη, παρουσιάζεται μια τάση αύξησης της υγρασίας και της τέφρας κατά τη μεσαία επεξεργασία I_1 και N_1 , ενώ σε πολλές περιπτώσεις παρατηρείται μείωση κατά τη μετάβαση στην μέγιστη επεξεργασία I_2 και N_2 . Κατά τη δεύτερη συγκομιδή, η εφαρμογή της άρδευσης μειώνει τις συγκεντρώσεις της τέφρας, ενώ η λίπανση δεν τις επηρεάζει ουσιαστικά. Η εφαρμογή μεγαλύτερων ποσοτήτων νερού/ λιπάσματος δεν επηρεάζει τη συμπεριφορά του για το λόγο ότι δεν είναι τόσο μεγάλη και δεν είναι ικανή να μεταβάλλει ουσιαστικά την συγκέντρωση της υγρασίας ή της τέφρας.

Εμφανέστερη είναι η αύξηση της συγκέντρωσης της τέφρας όσο αυξάνεται η λίπανση, αλλά όχι ιδιαίτερα.

Γενικότερα, παρατηρείται ότι στα δείγματα του Switchgrass της πρώτης συγκομιδής η άρδευση προκάλεσε αύξηση των συγκεντρώσεων της τέφρας των φύλλων, ενώ στα στελέχη η αύξηση της τέφρας οφείλεται στη λίπανση κυρίως. Ο συνδυασμός άρδευσης/λίπανσης προκάλεσε αύξηση των συγκεντρώσεων της τέφρας. Στα δείγματα του Switchgrass της δεύτερης συγκομιδής παρατηρείται ότι μόνο η άρδευση μείωσε λίγο τις συγκεντρώσεις της τέφρας.

Το καλάμι εμφανίζει παρόμοια συμπεριφορά με το Switchgrass της δεύτερης ημερομηνίας συγκομιδής.

Σχετικά με τα αποτελέσματα της στοιχειακής ανάλυσης παρατηρείται ότι η άρδευση και η λίπανση δεν επηρέασαν τις συγκεντρώσεις του C, του O, του N, του S και του H.

Συγκρίνοντας μεταξύ τους τα μέρη του κάθε φυτού, διαπιστώνεται ότι σε όλα τα δείγματα του Switchgrass τα στελέχη έχουν μεγαλύτερη συγκέντρωση σε C (45-46%) από ότι τα φύλλα (42-43%). Η μεγαλύτερη συγκέντρωση C δηλώνει την υψηλότερη απόδοση σε ενέργεια και τη λιγότερη συγκέντρωση σε τέφρα. Με τη λίπανση αυξάνονται λίγο οι συγκεντρώσεις του N σε όλα τα δείγματα, ενώ η άρδευση δεν επηρεάζει ουσιαστικά τις συγκεντρώσεις C, H, N, O και S.

Στα δείγματα του καλαμιού οι συγκεντρώσεις του C τόσο των φύλλων όσο και των στελεχών είναι της ίδιας τάξης μεγέθους (44-45%).

Οι συγκεντρώσεις του N και του S όλων των δειγμάτων είναι χαμηλές, οπότε και κατά την καύση τους δεν εκλύονται επικίνδυνα αέρια.

Σχετικά με τη θερμογόνο δύναμη, παρατηρείται ότι οι τιμές όλων των δειγμάτων κυμαίνονται στο ίδιο επίπεδο. Οι καλλιεργητικές τεχνικές συνδέονται με τις περιεκτικότητες σε υγρασία και τέφρα. Αύξηση των τιμών των δύο αυτών παραμέτρων θα μειώσει και την απόδοση του φυτού σε ενέργεια. Οπότε σύμφωνα με

τα παραπάνω, τα αποτελέσματα της θερμογόνου δύναμης κυμαίνονται ανάλογα με τις τιμές των συγκεντρώσεων του C, του O και της τέφρας.

Διαπιστώνεται ότι οι τιμές των δειγμάτων κυμαίνονται σε ένα περιορισμένο εύρος τιμών που το καθορίζουν οι ποσότητες των εφαρμογών της λίπανσης και της άρδευσης. Για περαιτέρω αναλύσεις επιλέχτηκαν τα δείγματα που δεν αρδεύτηκαν ούτε λιπάνθηκαν (I_0N_0), αυτά που δέχτηκαν τη μεσαία άρδευση και λίπανση (I_1N_1) και αυτά που δέχτηκαν τη μέγιστη άρδευση και λίπανση (I_2N_2).

Προσεγγιστική ανάλυση

Τα αποτελέσματα της προσεγγιστικής ανάλυσης για τις ενεργειακές καλλιέργειες της αγριαγκινάρας (*Cynara cardunculus*), του switchgrass (*Panicum virgatum*) - δύο ημερομηνίες συγκομιδής- και του καλαμιού (*Arundo donax*), που μελετάμε παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.1.1, 5.1.2, 5.1.3, 5.1.4. αντίστοιχα.

Πίνακας 5.1.1. Προσεγγιστική ανάλυση *Cynara cardunculus* 10/08/2004

ΔΕΙΓΜΑ	ΥΓΡΑΣΙΑ(%)	ΤΕΦΡΑ (%) επί ξηρού	ΠΤΗΤΙΚΑ (%)	ΜΟΝΙΜΟΣ ΑΝΘΡΑΚΑΣ (%)
Φύλλα N ₀	8.03	29.57	59.54	10.89
Φύλλα N ₄₀	8.37	25.75	69.52	4.73
Φύλλα N ₁₂₀	8.87	17.87	72.17	9.96
Στελέχη N ₀	8.75	7.61	77.74	14.65
Στελέχη N ₄₀	8.62	7.04	74.26	18.70
Στελέχη N ₁₂₀	8.71	6.86	80.20	12.94
Καρπός N ₀	7.05	5.68	78.00	16.32
Καρπός N ₄₀	7.12	5.32	72.63	22.05
Καρπός N ₁₂₀	6.57	5.35	79.12	15.53

Στον Πίνακα 5.1.1, παρατηρείται το ποσοστό της υγρασίας της αγριαγκινάρας να κυμαίνεται από 6 έως 8%, ανεξάρτητα από το μέρος του φυτού και την καλλιεργητική τεχνική που έχει εφαρμοστεί (υπενθυμίζουμε ότι εδώ έχει εφαρμοστεί μόνο λίπανση).

Στους Πίνακες 5.1.2 και 5.1.3 παρατηρούμε τα ποσοστά υγρασίας του switchgrass 18/11/2003 και 21/01/2004 αντίστοιχα, να κυμαίνονται από 3 έως 7% στο πρώτο και από 2 έως 8% στο δεύτερο.

Στον Πίνακα 5.1.4 παρατηρείται το ποσοστό υγρασίας του καλαμιού να κυμαίνεται από 0.5 έως 6%. Και στην περίπτωση του switchgrass και του καλαμιού δεν λαμβάνουμε υπόψη ούτε τις καλλιεργητικές τεχνικές που εφαρμόστηκαν ούτε το μέρος του φυτού.

Πίνακας 5.1.2. Προσεγγιστική ανάλυση *Panicum virgatum* 18/11/2003

ΔΕΙΓΜΑ	ΥΓΡΑΣΙΑ (%)	ΤΕΦΡΑ (%) επί ξηρού	ΠΤΗΤΙΚΑ (%)	ΜΟΝΙΜΟΣ ΑΝΘΡΑΚΑΣ (%)
Φύλλα I ₀ N ₀	6.04	7.90	73.18	18.92
Φύλλα I ₁ N ₁	6.96	10.02	70.12	19.86
Φύλλα I ₂ N ₂	6.68	8.56	72.13	19.31
Στελέχη I ₀ N ₀	2.99	2.17	82.28	15.55
Στελέχη I ₁ N ₁	4.46	2.44	76.46	21.10
Στελέχη I ₂ N ₂	4.83	1.84	79.16	19.00

Πίνακας 5.1.3. Προσεγγιστική ανάλυση *Panicum virgatum* 21/01/2004

ΔΕΙΓΜΑ	ΥΓΡΑΣΙΑ (%)	ΤΕΦΡΑ(%) επί ξηρού	ΠΤΗΤΙΚΑ (%)	ΜΟΝΙΜΟΣ ΑΝΘΡΑΚΑΣ (%)
Φύλλα I ₀ N ₀	7.77	8.47	84.11	7.42
Φύλλα I ₁ N ₁	6.97	7.11	77.88	15.01
Φύλλα I ₂ N ₂	6.12	5.64	88.25	6.11
Στελέχη I ₀ N ₀	2.19	2.45	77.67	19.88
Στελέχη I ₁ N ₁	4.37	1.89	76.00	22.11
Στελέχη I ₂ N ₂	3.16	2.04	70.15	27.81

Πίνακας 5.1.4. Προσεγγιστική ανάλυση *Arundo donax* 09/03/2004

ΔΕΙΓΜΑ	ΥΓΡΑΣΙΑ (%)	ΤΕΦΡΑ(%) επί ξηρού	ΠΤΗΤΙΚΑ %	ΜΟΝΙΜΟΣ ΑΝΘΡΑΚΑΣ %
Φύλλα I ₀ N ₀	3.90	8.00	76.10	15.90
Φύλλα I ₁ N ₁	5.74	4.52	83.22	12.26
Φύλλα I ₂ N ₂	5.84	10.14	77.08	12.78
Στελέχη I ₀ N ₀	3.38	3.09	68.38	28.53
Στελέχη I ₁ N ₁	0.58	2.48	79.72	17.80
Στελέχη I ₂ N ₂	1.21	2.81	79.32	17.87

Παρατηρώντας τον πίνακα προσεγγιστικής ανάλυσης της αγριαγκινάρας (*Cynara cardunculus*) 5.1.1, διαπιστώνουμε ότι το ποσοστό υγρασίας των φύλλων και των στελεχών της είναι της ίδιας τάξης μεγέθους. Πηγαίνοντας από την υψηλότερη στη χαμηλότερη περιεκτικότητα, βλέπουμε ότι τα στελέχη έχουν περισσότερη υγρασία, ακολουθούν τα φύλλα και έπεται ο καρπός. Το γεγονός αυτό συμβαίνει για το λόγο ότι η περιεκτικότητα σε νερό είναι μεγαλύτερη στα στελέχη, μετά στα φύλλα και τέλος στον καρπό, λόγω των φαινομένων της φωτοσύνθεσης και της διαπνοής που πραγματοποιούνται εκεί. Είναι γνωστό ότι, όσο περισσότερο νερό υπάρχει τόσο αυξάνεται και η παραγωγικότητα του φυτού [62]. Στο γεγονός αυτό στηρίζεται ο μηχανισμός της αύξησης του φυτού.

Τα ποσοστά της τέφρας δείχνουν μεγαλύτερες τιμές στα φύλλα της αγριαγκινάρας, μετά των στελεχών και τέλος του καρπού της. Η περιεκτικότητα σε τέφρα συνδέεται με την περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά και επομένως και της ανάπτυξης του φυτού. Το μεγαλύτερο μέρος των διεργασιών της ανάπτυξης πραγματοποιείται αρχικά στα φύλλα και έπειτα στα στελέχη. Επομένως, υψηλή περιεκτικότητα θρεπτικών συστατικών αντικατοπτρίζει τα υψηλά ποσοστά της τέφρας. Στα πτητικά αέρια παρατηρούμε ότι οι τιμές κυμαίνονται στο ίδιο εύρος, ενώ δεν υπάρχει κάποια μεγάλη απόκλιση μεταξύ τους. Η λίπανση, που εφαρμόστηκε στην αγριαγκινάρα, έχει σαν αποτέλεσμα τις αυξημένες συγκεντρώσεις των πτητικών και τα μειωμένα ποσοστά τέφρας. Στην περίπτωση του μόνιμου άνθρακα παρατηρούμε, και εδώ, ότι οι τιμές του δεν παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις, εκτός από αυτές των φύλλων N₄₀ και N₁₂₀.

Η παραγωγικότητα της αγριαγκινάρας εξαρτάται από τα υδατικά κατακρημνίσματα, οπότε για το λόγο αυτό δεν χρειάστηκε να αρδευτεί. Επομένως, η μόνη καλλιεργητική τεχνική, που εφαρμόστηκε ήταν αυτή της λίπανσης. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, τα δείγματα με N_0 δεν έχουν δεχτεί καθόλου λίπασμα, τα N_{40} δέχτηκαν 40kg N/ha και τα N_{120} 120kg N/ha. Η εφαρμογή της λίπανσης είναι μια από τις τεχνικές που επηρεάζει σημαντικά την παραγωγικότητα της φυτείας. Η ποσότητα του λιπάσματος, όμως, εξαρτάται από τις απαιτήσεις της και την γονιμότητα του εδάφους. Ωστόσο, επηρεάζει σημαντικά την ποιοτική και ποσοτική σύσταση της τέφρας της βιομάζας, που παράγεται κατά την καύση. Παρατηρείται ότι η υψηλά λυπαινόμενες φυτείες N_{120} παρουσιάζουν και υψηλές συγκεντρώσεις πτητικών [61]. Αυτό μπορεί να διαπιστωθεί και από τις αναλύσεις των παραπάνω δειγμάτων αγριαγκινάρας (Πίνακας 5.1.1), όπου αυτά με τη μέγιστη λίπανση παρουσιάζουν και μεγαλύτερες τιμές πτητικών από τα υπόλοιπα.

Για τα θερμόβια φυτά, όπως το switchgrass, η αζωτούχος λίπανση και η άρδευση είναι οι κύριες τεχνικές που καθορίζουν την παραγωγικότητα. Η θρέψη με N επηρεάζεται από πολλές παραμέτρους, όπως την εποχή και τη συχνότητα των συγκομιδών, την συγκομιζόμενη βιομάζα και τους ρυθμούς ορυκτοποίηση του εδάφους. Το περιεχόμενο σε N είναι υψηλότερο όταν το φυτό συγκομίζεται στα μέσα του κύκλου του και τόσο το N όσο και τα άλλα θρεπτικά του συστατικά που συμβάλλουν στην τέφρα του φυτού μειώνονται σε χαμηλότερα επίπεδα μετά από ένα παγετό και κατά το γηρασμό. Μετρήσεις έδειξαν ότι κατά τον γηρασμό, το N μεταφέρεται στα χαμηλότερα μέρη του φυτού και στις ρίζες. Η μεταφορά αυτή του N και των άλλων θρεπτικών συστατικών από το φύλλωμα προς τη ρίζα, έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του ποσοστού της τέφρας των φύλλων. Στον Πίνακα 5.1.3. διαπιστώνεται ότι τα ποσοστά της τέφρας των φύλλων του Switchgrass της δεύτερης ημερομηνίας μειώνονται όσο αυξάνεται η άρδευση και η λίπανση. Η συγκομιδή μετά τον Σεπτέμβριο έχει απώλειες κατά 20%. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, τόσο μειώνεται η τέφρα. Δηλαδή κατά το καλοκαίρι έχουμε χαμηλότερα ποσοστά τέφρας [62].

Τα αποτελέσματα της προσεγγιστικής ανάλυσης στους παραπάνω πίνακες δείχνουν ότι οι παραπάνω ενεργειακές καλλιέργειες χαρακτηρίζεται από μια σχετικά χαμηλή περιεκτικότητα σε τέφρα, που κυμαίνεται από 2 ως 10%, εκτός από τα φύλλα της

αγριαγκινάρας, ενώ μια πολύ υψηλή περιεκτικότητα σε πτητικές ουσίες, που κυμαίνεται από 60 ως 85%, περίπου, σε ξηρή βάση. Όσον αφορά την περιεκτικότητα σε υγρασία, μπορεί να παρατηρηθεί ότι, αν και τα δείγματα αεροξηράνθηκαν, υπήρξε μια μικρή αύξηση στις συγκεντρώσεις ύδατος των φύλλων του καλαμιού κατά την επεξεργασία της άρδευσης. Στα δείγματα του Switchgrass και της αγριαγκινάρας παρατηρείται ότι, η άρδευση δεν επηρέασε ουσιαστικά την περιεκτικότητα σε υγρασία τις τιμές των φύλλων τους. Εντούτοις, η επίδραση των τεχνικών της άρδευσης/λίπανσης στις πτητικές ουσίες είναι σημαντική, με συνέπεια τα πιο υψηλά επίπεδα πτητικών ουσιών σε όλες τις περιπτώσεις. Τα στελέχη όλων των δειγμάτων παρουσίασαν χαμηλότερη περιεκτικότητα σε τέφρα από ότι τα φύλλα και αυτό δεν επηρεάστηκε ούτε από την άρδευση ούτε από τη λίπανση. Στα δείγματα του *Arundo donax*, η περιεκτικότητα σε τέφρα των φύλλων των φυτών (I_1N_1), κατά τη μεσαία τεχνική άρδευσης/λίπανσης, σχεδόν υποδιπλασιάστηκε, σε σύγκριση με την τιμή που αντιστοιχεί στην επεξεργασία (I_0N_0) του. Η μικρή αύξηση στην περιεκτικότητα της τέφρα στα φύλλα του *Arundo donax* των υψηλά αρδευόμενων /λιπαινόμενων φυτειών (I_2N_2), οφειλόταν στο πιο υψηλό επίπεδο αζωτούχου λίπανσης.

Συγκρίνοντας τα ποσοστά υγρασίας αυτών των φυτών με τους λιγνίτες, διαπιστώνουμε ότι όλα τα παραπάνω είναι εξαιρετικά χαμηλότερα. Το γεγονός αυτό είναι απόλυτα λογικό, αν αναλογιστεί κανείς την προέλευση των λιγνιτών (εξόρυξή τους από το υπέδαφος) εν αντιθέσει με την υπερκείμενη βιομάζα, η οποία δέχεται άμεσα την ηλιακή ακτινοβολία.

Συγκρίνοντας τώρα τις τέφρες των παραπάνω με αυτές των λιγνιτών, καταλήγουμε στο ίδιο συμπέρασμα. Ότι και εδώ η αγριαγκινάρα, το switchgrass και το καλάμι έχουν χαμηλότερα ποσοστά σε σχέση με τους λιγνίτες. Αυτό εξηγείται λόγω της προέλευσης των λιγνιτών. Αναλυτικότερα παρατηρούμε ότι, η τέφρα δεν ξεπερνάει το 10% με μια εξαίρεση, αυτή των φύλλων της αγριαγκινάρας με ποσοστό από 15 έως 30%.

Στην περίπτωση των πτητικών, αντίθετα, τα ποσοστά των ενεργειακών καλλιεργειών είναι υψηλότερα από αυτά των λιγνιτών. Παρατηρούμε ότι τα πτητικά αέρια της αγριαγκινάρας κυμαίνονται από 60 έως 80% περίπου, του Switchgrass από 70 έως 90% και του καλαμιού από 65 έως 85%.

Αναφορικά με τον μόνιμο άνθρακα, που απομένει, παρατηρούμε ότι τα ποσοστά του στους παραπάνω πίνακες είναι χαμηλότερα από αυτά των λιγνιτών. Ανατρέχοντας και στη βιβλιογραφία, επιβεβαιώνουμε ότι και τα ποσοστά του μόνιμου άνθρακα είναι χαμηλά και κυμαίνονται στο εύρος των τιμών των πινάκων [52,53,56,57].

Συγκρίνοντας τώρα όλα τα παραπάνω αποτελέσματα, με άλλα είδη ενεργειακών καλλιεργειών από τη βιβλιογραφία, διαπιστώνουμε ότι τα ποσοστά όλων των παραμέτρων της προσεγγιστικής ανάλυσης κυμαίνονται στο ίδιο περίπου εύρος τιμών με τα προς ανάλυση δικά μας δείγματα.

Αντιπαραβάλλοντας τις τιμές των παραμέτρων της προσεγγιστική ανάλυσης των δικών μας δειγμάτων με αυτές από τη βιβλιογραφία, συμπεραίνεται ότι τα αποτελέσματα των αναλύσεων μας συμφωνούν με αυτά των βιβλιογραφικών αναφορών [22,52,53,56,57,59,60]. (βλέπε και Πίνακα 2.3)

Οι τιμές για τα ποσοστά της τέφρας, των πτητικών αερίων και του μόνιμου άνθρακα, τόσο των πινάκων 5.1.1, 5.1.2, 5.1.3, 5.1.4. όσο και της βιβλιογραφίας, αναφέρονται σε ξηρή βάση υλικού.

Στοιχειακή ανάλυση.

Τα αποτελέσματα της στοιχειακής ανάλυσης για τις ενεργειακές καλλιέργειες της αγριαγκινάρας (*Cynara cardunculus*), του switchgrass (*Panicum virgatum*) - δύο ημερομηνίες συγκομιδής- και του καλαμιού (*Arundo donax*), που μελετάμε παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.1.5, 5.1.6, 5.1.7, 5.1.8. αντίστοιχα.

Σε γενικές γραμμές, το 30-40% της ξηρής ουσίας της βιομάζας είναι το οξυγόνο. Το κύριο συστατικό της είναι ο άνθρακας με τιμές από 30 έως 60%. Από τα οργανικά συστατικά της βιομάζας, το υδρογόνο είναι το τρίτο βασικό συστατικό με τιμές 5-6% ξηρής ουσίας. Το άζωτο, το θείο και το χλώριο βρίσκεται σε ποσότητες λιγότερο από 1% ξηρής ουσίας, ενίοτε όμως μπορούν να βρεθούν και λίγο πάνω από αυτό. Τα τελευταία είναι σημαντικά ως προς το σχηματισμό επικίνδυνων εκπομπών και το θείο και το χλώριο σε συγκεκριμένους μηχανισμούς οδηγεί στη δημιουργία επικαθίσεων και επισκωριώσεων. Το άζωτο είναι ένα στοιχείο σημαντικό για τα φυτά και την ανάπτυξή τους [59].

Ο Πίνακας 5.1.5. της στοιχειακής ανάλυσης της αγριαγκινάρας, δείχνει ότι το μεγαλύτερο ποσοστό καταλαμβάνει ο άνθρακας, με τιμές από 34 μέχρι 47% περίπου. Ακολουθεί το οξυγόνο με τιμές που κυμαίνονται από 29 έως 45%. Η τιμή του υδρογόνου γύρω στο 5 με 7%, του αζώτου από 0.7 έως 1.7%, του θείου από 0.04 έως 0.2% και του χλωρίου μέχρι 100ppm (0.01%).

Παρατηρείται ότι οι τιμές του C, του H και του O είναι υψηλότερες στον καρπό της αγριαγκινάρας, μετά στα στελέχη και τέλος στα φύλλα. Η ύπαρξη των σπόρων στον καρπό δικαιολογεί το υψηλό ποσοστό του άνθρακα, οπότε και το χαμηλό ποσοστό σε τέφρα, αλλά και τις υψηλές τιμές της θερμογόνου δύναμης.

Μεταξύ των μερών που έχουν λιπανθεί με N δεν παρατηρείται καμία εξαιρετική μεταβολή στα παραπάνω ποσοστά. Η επίδραση της λίπανσης είναι σχετική με την παραγωγικότητα, αρχικά, και κατόπιν με τις εκπομπές επικίνδυνων αερίων. Οι τιμές του S είναι χαμηλές και δεν διαφέρουν μεταξύ των μερών του φυτού.

Πίνακας 5.1.5. Στοιχειακή ανάλυση *Cynara cardunculus* 10/08/2004

ΔΕΙΓΜΑ	ΤΕΦΡΑ (%)	C %	H %	N %	S %	O % (*)	Cl (*)	Α.Θ.Δ. (Kcal/Kg) επί ξηρού	Κ.Θ.Δ (Kcal/Kg) επί φυσικού
Φύλλα N ₀	29.57	34.11	4.84	1.49	0.20	29.78	50	4297.5	4086.2
Φύλλα N ₄₀	25.75	37.52	5.55	1.48	0.22	29.47	50	4658.2	4435.8
Φύλλα N ₁₂₀	17.87	40.09	5.89	1.91	0.21	34.01	10	5120.5	4875.7
Στελέχη N ₀	7.61	41.64	6.11	0.85	0.05	43.73	60	5141.3	4869.9
Στελέχη N ₄₀	7.04	41.69	6.11	0.67	0.04	44.43	50	5372.1	5099.6
Στελέχη N ₁₂₀	6.86	41.94	6.14	1.11	0.05	43.89	40	5218.6	4945.3
Καρπός N ₀	5.68	46.32	7.00	1.59	0.07	39.33	100	6186.8	5915.8
Καρπός N ₄₀	5.32	46.31	7.03	1.62	0.06	39.65	20	6367.3	6095.1
Καρπός N ₁₂₀	5.35	46.96	7.08	1.67	0.04	38.89	40	6404.3	6133.9

(*)%O = $100 - [\%C + \%H + \%N + \%S + \%Τέφρα]$

(*) Cl: εκφράζεται σε ppm

Στους Πίνακες 5.1.6 και 5.1.7 παρατηρούμε τα ποσοστά της στοιχειακής ανάλυσης του Switchgrass 18/11/2003 και 21/01/2004 αντίστοιχα. Ο άνθρακας κυμαίνεται από 42 έως 45% στο μεν πρώτο και από 43 έως 46% για το δε δεύτερο. Το οξυγόνο υπολογίζεται από 41 έως 46%, το υδρογόνο κυμαίνεται γύρω στο 6 με 6.5%, το άζωτο από 0.2 έως 0.7%, το θείο από 0.02 έως 0.07% και το χλώριο από 10 έως 80 ppm για το switchgrass της πρώτης συγκομιδής, ανεξάρτητα από τις καλλιεργητικές τεχνικές που πραγματοποιήθηκαν. Κατά τη δεύτερη συγκομιδή, οι τιμές του οξυγόνου κυμαίνονται από 41 έως 45%, του υδρογόνου γύρω στο 6 με 6.5%, του αζώτου από 0.1 έως 0.5%, του θείου 0.04 έως 0.07% και του χλωρίου από 10 έως 70 ppm. Διαπιστώνεται, επίσης, ότι η άρδευση και η λίπανση δεν επηρέασε ουσιαστικά τα ποσοστά των παραπάνω στοιχείων.

Παρατηρείται ότι, τα ποσοστά των στοιχείων δεν έχουν διαφορές μεταξύ τους λόγω της διαφορετικής ημερομηνίας συγκομιδής. Οπότε μπορούμε να πούμε ότι αυτό δεν επηρεάζει τις περαιτέρω αναλύσεις. Αφορά μόνο το περιεχόμενο σε τέφρα και τη θερμογόνο δύναμη.

Πίνακας 5.1.6. Στοιχειακή ανάλυση *Panicum virgatum* 18/11/2003

ΔΕΙΓΜΑ	ΤΕΦΡΑ (%)	C %	H %	N %	S %	O % (*)	Cl (*)	Α.Θ.Δ. (Kcal/Kg) επί ξηρού	Κ.Θ.Δ (Kcal/Kg) επί φυσικού
Φύλλα I ₀ N ₀	7.90	42.67	6.44	0.35	0.06	42.57	40	6120.0	5488.0
Φύλλα I ₁ N ₁	10.02	41.43	6.26	0.69	0.07	41.52	10	6167.0	5478.0
Φύλλα I ₂ N ₂	8.56	42.13	6.46	0.67	0.05	42.12	20	6666.0	5959.0
Στελέχη I ₀ N ₀	2.17	45.30	6.61	0.28	0.03	45.61	30	5497.0	5066.0
Στελέχη I ₁ N ₁	2.44	45.56	6.54	0.21	0.04	45.20	10	5709.0	5183.0
Στελέχη I ₂ N ₂	1.84	45.84	6.57	0.21	0.02	45.52	80	5638.0	5091.0

(*) %O = $100 - [\%C + \%H + \%N + \%S + \%Τέφρα]$

(*) Cl: εκφράζεται σε ppm

Πίνακας 5.1.7. Στοιχειακή ανάλυση *Panicum virgatum* 21/01/2004

ΔΕΙΓΜΑ	ΤΕΦΡΑ (%)	C %	H %	N %	S %	O % (*)	Cl (*)	Α.Θ.Δ. (Kcal/Kg) επί ξηρού	Κ.Θ.Δ (Kcal/Kg) επί φυσικού.
Φύλλα I ₀ N ₀	8.47	43.36	6.30	0.36	0.06	41.44	70	5737.0	5025.0
Φύλλα I ₁ N ₁	7.11	43.42	6.49	0.45	0.06	42.46	10	6286.0	5581.0
Φύλλα I ₂ N ₂	5.64	43.72	6.49	0.51	0.06	43.58	10	6102.0	5460.0
Στελέχη I ₀ N ₀	2.45	45.58	6.45	0.10	0.04	45.38	50	5987.0	5592.0
Στελέχη I ₁ N ₁	1.89	45.32	6.60	0.33	0.07	45.78	70	5764.0	5239.0
Στελέχη I ₂ N ₂	2.04	46.00	6.50	0.30	0.05	45.11	10	5756.0	5306.0

$$(*)\%O = 100 - [\%C + \%H + \%N + \%S + \%Τέφρα]$$

(*) Cl: εκφράζεται σε ppm

Στον Πίνακα 5.1.8 παρατηρείται το ποσοστό του άνθρακα του καλαμιού να κυμαίνεται από 42 έως 46%, του οξυγόνου από 39 έως 44%, του υδρογόνου γύρω στο 6 με 6.5%, του αζώτου από 0.5 έως 1.5%, του θείου από 0.07 έως 0.12% και του χλωρίου από 10 μέχρι 50ppm (0.05%).

Πίνακας 5.1.8. Στοιχειακή ανάλυση *Arundo donax* 09/03/2004

ΔΕΙΓΜΑ	ΤΕΦΡΑ (%)	C %	H %	N %	S %	O % ^(*)	Cl ^(*)	Α.Θ.Δ. (Kcal/Kg) επί ξηρού	Κ.Θ.Δ. (Kcal/Kg) επί φυσικού
Φύλλα I ₀ N ₀	8.00	42.85	6.39	0.58	0.12	42.05	40	5189.0	4732.0
Φύλλα I ₁ N ₁	4.52	45.09	6.62	0.95	0.59	42.22	10	6441.0	5802.0
Φύλλα I ₂ N ₂	10.14	42.63	6.34	0.70	0.62	39.56	50	5644.0	5059.0
Στελέχη I ₀ N ₀	3.09	44.85	6.26	0.58	0.08	45.13	30	5804.0	5342.0
Στελέχη I ₁ N ₁	2.48	45.35	6.11	0.78	0.07	45.71	10	5906.0	5613.0
Στελέχη I ₂ N ₂	2.81	45.48	6.15	1.52	0.07	43.97	40	5866.0	5536.0

$$(*)\%O = 100 - [\%C + \%H + \%N + \%S + \%Τέφρα]$$

(*) Cl: εκφράζεται σε ppm

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρείται ότι, για τα φύλλα του καλαμιού, η αύξηση ήταν υψηλότερη μεταξύ των 0 και 40 kg/ha από ότι μεταξύ των 0 και 120kg N/ha. Επιπλέον, το λίπασμα αύξησε τις συγκεντρώσεις του S των φύλλων μόνο. Εντούτοις, το περιεχόμενο N και του S ήταν χαμηλό, που σημαίνει λιγότερες εκπομπές κατά τη διάρκεια της χρησιμοποίησης καλαμιών για την παραγωγή ενέργειας. Από τους παραπάνω πίνακες της στοιχειακής ανάλυσης όλων των δειγμάτων, σημειώνεται ότι δεν υπάρχει ουσιαστική διαφορά στο περιεχόμενο σε C, H και O μεταξύ των φύλλων και των στελεχών των φυτών, ενώ η επίδραση της άρδευσης/λίπανσης ήταν

ασήμαντη. Οι συγκεντρώσεις N όλων των ειδών αυξήθηκαν με τη λίπανση, η οποία είναι σύμφωνη με προηγούμενες μελέτες [63].

Συγκρίνοντας τα ποσοστά της στοιχειακής ανάλυσης όλων των φυτών με τους λιγνίτες, διαπιστώνουμε ότι στην περίπτωση των λιγνιτών οι τιμές του C είναι υψηλότερες από ότι στην περίπτωση της βιομάζας. Τα ποσοστά του N και του S είναι χαμηλότερα από αυτά των λιγνιτών. Αυτό σημαίνει ότι παράγονται αέρια με χαμηλά επίπεδα σε οξείδιο του αζώτου (NO_x), οξείδια του χλωρίου και SO_2 , πράγμα που σημαίνει ότι η καύση τους δεν συμβάλλει στη δημιουργία του φαινομένου της όξινης βροχής και στην καταστροφή του όζοντος [53].

Το Cl εμφανίζεται με τη μορφή ελεύθερου ανιόντος ή σχετίζεται λιγότερο σε ανταλλάξιμη μορφή. Παίζει σημαντικό ρόλο στο άνοιγμα και το κλείσιμο των «στομάτων» των φύλλων των φυτών. Έχει υψηλή κινητικότητα μέσα στο φυτό και προέρχεται από μια πληθώρα πηγών, όπως το νερό κατά την άρδευση, τις βροχοπτώσεις, τη λίπανση και γενικότερα η αέρια ρύπανση συμβάλλει στα χαρακτηριστικά κατά τη ανάπτυξη του φυτού, για το λόγο αυτό η ύπαρξή του αφορά την τοξικότητα στα φυτά παρά την ανεπάρκεια του [65]. Το Cl αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες δημιουργίας επικαθήσεων, οδηγώντας τα χλωριούχα αλκάλια στις θερμές επιφάνειες των καυστήρων και προκαλώντας τη δημιουργία θεικών αλκαλίων. Διευκολύνει την κινητικότητα των περισσότερων ανόργανων συστατικών και ιδιαίτερα του K. Το KCl είναι, μεταξύ άλλων, το πλέον σταθερότερο σε υψηλές θερμοκρασίες. Η συγκέντρωση του χλωρίου εκφράζει το ποσό του αλκαλίου, που εξατμίζεται κατά την καύση, δημιουργώντας περισσότερο επικίνδυνες επικαθήσεις. Έχει την ιδιότητα να απελευθερώνεται σχετικά νωρίς κατά τη καύση και να σχηματίζει σταθερές ενώσεις με τα υπάρχοντα αλκάλια της βιομάζας [56]. Οι συγκεντρώσεις Cl όλων των δειγμάτων είναι εξαιρετικά χαμηλές και εκφράζονται σε ppm.

Από τις αναλύσεις των δειγμάτων μας διαπιστώνεται ότι αυτές συμφωνούν με τις αντίστοιχες των βιβλιογραφικών αναφορών [33,45,53,54,58,59]. (βλέπε και Πίνακα 2.3)

Θερμογόνος δύναμη

Η κύρια μέτρηση του ενεργειακού περιεχομένου ενός καυσίμου είναι η θερμική του αξία. Καθορίζεται δε από το περιεχόμενο του δείγματος σε υγρασία και τέφρα. Συγκεκριμένα, η υγρασία σε ένα καύσιμο μειώνει τη θερμική του αξία. Είναι απαραίτητο να καθορίζεται η βάση που γίνονται οι προσδιορισμοί, αν είναι δηλαδή σε ξηρή βάση ή όχι.

Η υγρασία ενός καυσίμου είναι περιοριστικός παράγοντας για την καύση της βιομάζας εξαιτίας της επίδρασης στην θερμική του αξία. Η αντίδραση καύσης είναι εξώθερμη ενώ η εξάτμιση του νερού ιδιαίτερα ενδόθερμη.

Η θερμογόνος δύναμη της βιομάζας μπορεί να συσχετιστεί με το περιεχόμενο σε τέφρα. Το ξύλο με τέφρα λιγότερο από 1% τυπικά έχει θερμογόνο δύναμη γύρω στα 20 MJ/kg. Κάθε αύξηση κατά 1% της τέφρας μεταφράζεται σε μείωση κατά 0.2 MJ/kg της θερμογόνου δύναμης, για το λόγο ότι η τέφρα δεν συμβάλλει ουσιαστικά στην απελευθέρωση θερμότητας κατά την καύση, παρόλο που κάποια στοιχεία της μπορεί να δρουν καταλυτικά στην θερμική αποικοδόμηση. Η θερμογόνος δύναμη μπορεί να συσχετιστεί και με τη συγκέντρωση σε C, όπου με κάθε αύξηση κατά 1% αυτού, αυξάνεται και η τιμή της κατά 0.39 MJ/kg περίπου.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, παρατηρούμε ότι τα μέρη με χαμηλή τέφρα και υγρασία έχουν υψηλότερες τιμές θερμαντικής αξίας.

Οι τιμές της θερμαντικής αξίας που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1.9 επεξηγούν την επιρροή που είχε η αλλαγή στη σύνθεση της καύσιμης ύλης και της στοιχειακής σύνθεσης στο ενεργειακό περιεχόμενο των δειγμάτων.

Στα δείγματα της αγριαγκινάρας παρατηρείται ότι υψηλότερη θερμογόνο έχουν αυτά του καρπού λόγω της ύπαρξης των σπόρων μέσα σε αυτά, αλλά και των χαμηλότερων ποσοστών υγρασίας και τέφρας τους. Ακολουθούν τα στελέχη και τέλος τα φύλλα με τη χαμηλότερη θερμογόνο. Παρατηρείται ότι, αν και τα ποσοστά της τέφρας των φύλλων είναι αρκετά υψηλότερα από ότι των στελεχών, οι αντίστοιχες τιμές της θερμογόνου δύναμης δεν διαφέρουν εξαιρετικά μεταξύ τους.

Στην περίπτωση του Switchgrass της πρώτης κοπής, τις υψηλότερες τιμές θερμογόνου παρουσιάζουν τα φύλλα με τη μέγιστη άρδευση/λίπανση (I_2N_2), ενώ σε αυτό της δεύτερης κοπής, οι τιμές κυμαίνονται στο ίδιο εύρος και για τα φύλλα και για τα στελέχη, με υψηλότερη αυτή των φύλλων με μεσαία άρδευση/λίπανση I_1N_1 . Σε γενικές γραμμές οι τιμές και στις δύο περιπτώσεις δεν διαφέρουν εξαιρετικά μεταξύ τους και κυμαίνονται στα ίδια σχετικά επίπεδα ανεξάρτητα από την καλλιεργητική τεχνική που εφαρμόστηκε.

Στα δείγματα του καλαμιού, η υψηλότερη θερμαντική αξία αντιστοιχεί στα φύλλα, όταν εφαρμόστηκε η μεσαία επεξεργασία άρδευσης/λίπανσης (I_1N_1), λόγω της χαμηλής τέφρας και της υψηλής περιεκτικότητας σε πτητικές ουσίες του δείγματος.

Συγκρίνοντας τα παραπάνω δείγματα με τους λιγνίτες, διαπιστώνεται ότι οι τιμές της κατώτερης θερμογόνου δύναμης, που κυμαίνονται από 4000 ως 6000kcal/kg περίπου, δίνουν τιμές παραπλήσιες ή υψηλότερες των περισσότερων λιγνιτών.

Από τη βιβλιογραφία προκύπτει ο Πίνακας 2.3 του Θεωρητικού μέρους, στον οποίο παρουσιάζονται αναλυτικά οι τιμές της θερμογόνου δύναμης για μερικά είδη ενεργειακών καλλιεργειών. Συγκρίνοντας τις τιμές αυτές του πίνακα με αυτές των προς ανάλυση δειγμάτων, συμπεραίνεται ότι τα αποτελέσματα των αναλύσεων κυμαίνονται στο ίδιο εύρος.

Πίνακας 5.1.9. Θερμογόνος Δύναμη των φυτών

	ΔΕΙΓΜΑ	ΥΓΡΑΣΙΑ (%)	ΤΕΦΡΑ (%)	Κ.Θ.Δ (kcal/kg) επί φυσικού	Κ.Θ.Δ (MJ/kg)	Α.Θ.Δ. (kcal/kg) επί ξηρού	Α.Θ.Δ. (MJ/kg)
Cynara cardunculus	Φύλλα N ₀	8.03	29.57	4086.26	17.10	4672.72	19.55
	Φύλλα N ₄₀	8.37	25.75	4435.81	18.56	5083.71	21.27
	Φύλλα N ₁₂₀	8.87	17.87	4875.75	20.40	5618.90	23.51
	Στελέχη N ₀	8.75	7.61	4869.93	20.38	5634.30	23.57
	Στελέχη N ₄₀	8.62	7.04	5099.65	21.34	5878.86	24.60
	Στελέχη N ₁₂₀	8.71	6.86	4945.38	20.69	5716.51	23.92
	Καρπός N ₀	7.05	5.68	5915.82	24.75	6656.05	27.85
	Καρπός N ₄₀	7.12	5.32	6095.15	25.50	6855.40	28.68
	Καρπός N ₁₂₀	6.57	5.35	6133.99	25.66	6854.65	28.68
Panicum virgatum 18/11/2003	Φύλλα I ₀ N ₀	6.04	7.90	5488.71	22.96	6120.26	25.61
	Φύλλα I ₁ N ₁	6.96	10.02	5478.83	22.92	6167.35	25.80
	Φύλλα I ₂ N ₂	6.68	8.56	5959.19	24.93	6666.74	27.89
	Φύλλα I ₂ N ₁	2.99	2.17	5431.90	22.73	6078.52	25.43
	Στελέχη I ₀ N ₀	4.46	2.44	5066.04	21.20	5497.58	23.00
	Στελέχη I ₁ N ₁	4.83	1.84	5183.42	21.69	5709.23	23.89
	Στελέχη I ₂ N ₂	7.77	8.47	5091.85	21.30	5638.12	23.59
Panicum virgatum 21/1/2004	Φύλλα I ₀ N ₀	6.97	7.11	5025.45	21.03	5737.18	24.00
	Φύλλα I ₁ N ₁	6.12	5.64	5581.44	23.35	6286.57	26.30
	Φύλλα I ₂ N ₂	2.19	2.45	5460.81	22.85	6102.36	25.53
	Στελέχη I ₀ N ₀	4.37	1.89	5592.75	23.40	5987.73	25.05
	Στελέχη I ₁ N ₁	3.16	2.04	5239.96	21.92	5764.20	24.12
	Στελέχη I ₂ N ₂	3.90	8.00	5306.95	22.20	5756.92	24.09
Arundo donax	Φύλλα I ₀ N ₀	5.74	4.52	4732.36	19.80	5189.49	21.71
	Φύλλα I ₁ N ₁	5.84	10.14	5802.18	24.28	6441.76	26.95
	Φύλλα I ₂ N ₂	3.38	3.09	5059.95	21.17	5644.97	23.62
	Στελέχη I ₀ N ₀	0.58	2.48	5342.71	22.35	5804.91	24.29
	Στελέχη I ₁ N ₁	1.21	2.81	5613.81	23.49	5906.66	24.71
	Στελέχη I ₂ N ₂	6.04	7.90	5536.05	23.16	5866.79	24.55

5.2 ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Γενικά στοιχεία

Για την ανάπτυξη των φυτών και τη συμπλήρωση του βιολογικού τους κύκλου (βλάστηση- ανάπτυξη - δημιουργία αναπαραγωγικών οργάνων - νέκρωση) είναι απαραίτητη η ύπαρξη τουλάχιστον 16 θρεπτικών στοιχείων, από τα 92 στοιχεία που υπάρχουν στον στερεό φλοιό της γης. Η πρόσληψή τους από τα φυτά, γίνεται μέσω του αέρα και του έδαφους. Τα κύρια θρεπτικά στοιχεία ή μακροθρεπτικά είναι τα εξής: Άνθρακας (Carbon - C), Υδρογόνο (Hydrogen - H), Οξυγόνο (Oxygen - O), Άζωτο (Nitrogen - N), Φωσφόρος (Phosphorus - P) και Κάλιο (Potassium K).

Ο άνθρακας, το υδρογόνο και το οξυγόνο μαζί με το άζωτο, σχηματίζουν τα δομικά υλικά των φυτών και προσλαμβάνονται μέσω του αέρα και του νερού. Ωστόσο, το άζωτο, ο φώσφορος και το κάλιο μπορεί να μην υπάρχουν σε επαρκής ποσότητες ή μορφές, τέτοιες που να ικανοποιούν τις ανάγκες ανάπτυξης των φυτών και σε αυτή τη περίπτωση θα πρέπει να προστεθούν από τον καλλιεργητή.

Εκτός από τα παραπάνω θρεπτικά στοιχεία, απαραίτητα είναι και τα εξής, γνωστά ως δευτερεύοντα στοιχεία: Θείο (Sulphur - S), Ασβέστιο (Calcium - Ca), Μαγνήσιο (Magnesium - Mg), Χλώριο (Chlorine - Cl), και Νάτριο (Sodium - Na, το οποίο δεν είναι πάντα απαραίτητο). Από αυτά, το ασβέστιο, το μαγνήσιο και το θείο, παρόλο που αποτελούν απαραίτητα στοιχεία, απαιτούνται σε μικρότερες ποσότητες.

Τέλος, στα απαραίτητα μικροθρεπτικά στοιχεία, συγκαταλέγονται τα εξής: Σίδηρος (Fe), Ψευδάργυρος (Zn), Μαγγάνιο (Mn), Χαλκός (Cu), Μολυβδαίνιο (Mo), Βόριο (B), Βρώμιο (Br), Χρώμιο (Cr), Αργίλιο(Al), Ιώδιο (I), Σελήνιο (Se), Πυρίτιο (Si), Στρόντιο(Sr), Τιτάνιο(Ti), Βανάδιο(V), Γάλλιο(Ga), Φθόριο(F), Κασσίτερος (Sn) και Κοβάλτιο (Co).

Ο σίδηρος, το μαγγάνιο, ο ψευδάργυρος, ο χαλκός, το μολυβδαίνιο, το χλώριο, και το βόριο είναι απαραίτητα για τα φυτά σε πολύ μικρές ποσότητες. Το νάτριο, το κοβάλτιο, όπως και το πυρίτιο μαζί με το αλουμίνιο, είναι χρήσιμα για ορισμένα φυτά.

Το στρόντιο (Sr) έχει υψηλή χημική συγγένεια με το ασβέστιο, σε βαθμό που τα φυτά δεν μπορούν να τα διαχωρίσουν. Επόμενο είναι να τα προσλαμβάνουν με την αναλογία που τα στοιχεία αυτά εμπεριέχονται στο εδαφικό διάλυμα.

Για τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων των παραπάνω στοιχείων πραγματοποιήθηκαν χημικές αναλύσεις στην τέφρα των φυτών μετά την καύση τους.

Έγινε ολική διαλυτοποίηση των τεφρών των ενεργειακών καλλιεργειών βιομάζας, που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των βαρέων και τοξικών μετάλλων, καθώς και χημική ανάλυση για τον προσδιορισμό των ποσοστών των κύριων οξειδίων στις τέφρες αυτών. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν, παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες. Στον Πίνακα 5.2.1 φαίνονται οι συγκεντρώσεις των ιχνοστοιχείων, των ίδιων δειγμάτων, μετρημένες στις ολικές διαλυτοποιήσεις των τεφρών τους, εκφρασμένες σε ppm. Στους Πίνακες 5.2.2, 5.2.3, 5.2.4 και 5.2.5 φαίνονται τα ποσοστά των κύριων οξειδίων των τεφρών ενεργειακών καλλιεργειών βιομάζας, που προέκυψαν μετά από καύση των δειγμάτων στους 600 °C.

Ιχνοστοιχεία

Παρατηρούμε ότι οι συγκεντρώσεις των ιχνοστοιχείων που μελετήθηκαν στις τέφρες των παρακάτω δειγμάτων είναι στην πλειονότητά τους χαμηλές. Πολλά από αυτά θεωρούνται και θρεπτικά συστατικά απαραίτητα για την ανάπτυξη και τη συμπλήρωση του βιολογικού κύκλου του φυτού. Ωστόσο, τα όρια τοξικότητας για κάθε φυτό διαφέρουν και εξαρτώνται και από τη χρήση που έχει κάθε είδος.

Στην περίπτωση του αρσενικού (As), οι συγκεντρώσεις είναι χαμηλές και δεν παρουσιάζεται κάποια ιδιαίτερη τάση μεταβολής τους, για την πλειονότητα των δειγμάτων. Υψηλότερες τιμές, αλλά σε χαμηλά επίπεδα, παρουσιάζουν τα στελέχη N₁₂₀ της αγριαγκινάρας με 5.06ppm, τα στελέχη I₀N₀ και I₁N₁ του Switchgrass δεύτερης κοπής με 6.64 και 5.58ppm, αντίστοιχα και τέλος τα φύλλα I₀N₀ και I₂N₂ του καλαμιού με 7.83 και 5.32ppm, αντίστοιχα. Το όριο τοξικότητας του As κυμαίνεται από 0.05 έως 12ppm [64]. Το ίδιο παρατηρείται και στην περίπτωση του καδμίου (Cd), όπου οι τιμές των συγκεντρώσεων είναι ελαφρώς υψηλότερες, σε σύγκριση με το As, με των φύλλων N₁₂₀ και των στελεχών N₀ της αγριαγκινάρας, των φύλλων και των στελεχών I₂N₂ του Switchgrass δεύτερης κοπής και των φύλλων I₂N₂

του καλαμιού, να εμφανίζονται ελαφρώς αυξημένες από αυτές των υπολοίπων δειγμάτων.

Πίνακας 5.2.1. Χημική ανάλυση τερφρών των δειγμάτων σε ιχνοστοιχεία (ppm)

ΔΕΙΓΜΑ									
<i>Cynara cardunculus</i>	Cu	Zn	Pb	Ni	Co	As	Cd	Mo	Sr
φύλλα N ₀	52.0	167.0	81.6	199.0	41.4	2.43	8.8	38.6	398.6
φύλλα N ₄₀	55.4	182.6	96.6	178.4	39.8	2.29	9.4	51.2	434.2
φύλλα N ₁₂₀	67.6	198.8	106.6	110.4	41.2	1.75	12.4	58.2	583.2
στελέχη N ₀	105.6	290.8	121.2	88.6	33.6	1.17	12.6	56.0	636.0
στελέχη N ₄₀	191.6	488.0	90.4	42.2	30.6	4.66	9.6	55.8	609.4
στελέχη N ₁₂₀	242.6	919.0	87.0	46.4	33.2	5.06	9.2	64.4	616.4
καρπός N ₀	275.8	557.0	111.4	76.2	32.8	2.22	8.8	55.8	230.0
καρπός N ₄₀	318.8	567.4	138.8	76.8	32.2	1.97	9.4	62.4	292.0
καρπός N ₁₂₀	326.4	504.4	130.8	94.6	32.0	1.38	9.4	79.0	279.6
Panicum virgatum									
18/11/2003									
φύλλα I ₀ N ₀	63.2	160.8	51.2	79.6	17.8	2.20	6.2	82.6	180.4
φύλλα I ₁ N ₁	80.4	201.8	53.6	132.8	22.4	1.79	7.2	118.0	175.8
φύλλα I ₂ N ₂	120.0	157.6	60.0	110.2	22.8	1.48	7.4	136.2	245.8
στελέχη I ₀ N ₀	163.8	391.8	91.4	92.0	23.4	1.31	7.8	95.2	220.4
στελέχη I ₁ N ₁	147.4	308.0	76.0	85.6	25.6	1.42	8.0	85.0	123.0
στελέχη I ₂ N ₂	136.6	253.8	81.8	79.4	26.0	2.11	7.8	93.8	235.6
Panicum virgatum									
21/1/2004									
φύλλα I ₀ N ₀	35.4	78.2	55.6	45.2	13.4	3.73	6.4	37.6	138.0
φύλλα I ₁ N ₁	81.4	234.8	90.8	84.4	18.6	3.08	8.2	47.0	247.0
φύλλα I ₂ N ₂	80.6	282.8	90.8	96.8	23.0	3.63	10.2	58.8	334.0
στελέχη I ₀ N ₀	141.8	327.2	106.4	72.0	12.4	6.54	6.0	40.2	83.0
στελέχη I ₁ N ₁	229.0	353.4	142.0	115.0	25.8	5.58	8.4	59.8	173.0
στελέχη I ₂ N ₂	180.4	786.8	119.8	126.6	29.2	2.44	11.8	59.4	244.0
Arundo donax									
φύλλα I ₀ N ₀	54.2	197.2	61.4	65.6	22.2	7.83	8.0	93.8	163.6
φύλλα I ₁ N ₁	114.8	374.0	103.2	115.6	24.8	4.51	8.4	59.2	264.8
φύλλα I ₂ N ₂	90.2	137.2	77.0	59.6	21.4	5.32	10.2	52.0	219.0
στελέχη I ₀ N ₀	36.2	81.6	45.8	39.2	18.6	3.72	7.4	69.0	91.4
στελέχη I ₁ N ₁	123.4	305.0	52.2	87.0	26.2	1.40	7.2	69.2	86.2
στελέχη I ₂ N ₂	94.6	147.6	64.6	76.4	31.0	1.43	9.6	57.8	99.8

Στην περίπτωση του χαλκού (Cu), οι συγκεντρώσεις έχουν την τάση να αυξάνονται με την άρδευση και τη λίπανση που έχουν εφαρμοστεί, ανεξάρτητα από το μέρος του φυτού. Παρατηρείται, δηλαδή, μια συνεχόμενη αύξηση, από τα φύλλα N₀ έως τον καρπό N₁₂₀ της αγριαγκινάρας, για παράδειγμα. Το ίδιο συμβαίνει και στα άλλα είδη των φυτών. Τα μόνα δείγματα που ξεχωρίζουν, είναι αυτά των φύλλων και των στελεχών I₁N₁ του *Arundo donax*, όπου οι τιμές είναι ελαφρώς εμπλουτισμένες σε σχέση με τα υπόλοιπα. Επίσης, παρατηρείται ότι οι συγκεντρώσεις όλων των φύλλων όλων των δειγμάτων κυμαίνονται από 50 έως 120ppm περίπου και των στελεχών από 100 έως 240ppm.

Οι συγκεντρώσεις του ψευδαργύρου (Zn) και του μόλυβδου (Pb), όπως και στον Cu, έχουν και αυτές την τάση να αυξάνονται με την άρδευση και τη λίπανση που έχουν εφαρμοστεί, ανεξάρτητα από το μέρος του φυτού. Υψηλότερη τιμή συγκέντρωσης του Zn παρουσιάζουν τα στελέχη N₁₂₀ της αγριαγκινάρας (919ppm). Στον Pb οι συγκεντρώσεις έχουν μια πιο ομαλή διαβάθμιση κατά την αύξησή τους.

Στην περίπτωση του νικελίου (Ni) και του μολυβδαινίου (Mo) οι τιμές των συγκεντρώσεων συμπεριφέρονται με τον ίδιο τρόπο. Στο Switchgrass παρατηρείται μια αύξηση στα φύλλα, με την άρδευση ή/και τη λίπανση. Η ίδια τάση παρατηρείται και στα στελέχη της δεύτερης συγκομιδής. Στα δείγματα της αγριαγκινάρας, η αύξηση της λίπανση έχει την τάση να δρα πτωτικά ως προς τις συγκεντρώσεις του Ni, αλλά πάντα μέσα στο ίδιο εύρος τιμών του. Στο Mo, οι τιμές σχηματίζουν ένα πιο εύρος τιμών μικρότερο από ότι στο Ni.

Στην περίπτωση του κοβαλτίου (Co) και του στροντίου (Sr), οι τιμές των συγκεντρώσεών τους δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερη τάση με την καλλιεργητική τεχνική που εφαρμόστηκε. Οι τιμές του Co κυμαίνονται μεταξύ 20 και 40 ppm περίπου, ενώ στο Sr παρατηρείται ότι τα φύλλα και τα στελέχη της αγριαγκινάρας έχουν υψηλότερα ποσοστά από ότι είναι των υπολοίπων δειγμάτων.

Γενικότερα, παρατηρούνται αυξημένες συγκεντρώσεις σε όλα τα ιχνοστοιχεία στα δείγματα της αγριαγκινάρας από ότι στα άλλα φυτά, ενώ οι χαμηλότερες βρίσκονται στο Switchgrass πρώτης κοπής. Αυτό μπορεί να συμβαίνει λόγω της εποχής συγκομιδής του κάθε φυτού αλλά και της ικανότητας απορροφησιμότητας του

καθενός. Επίσης, παρατηρείται ότι στην περίπτωση της αγριαγκινάρας, οι μεταβολές των συγκεντρώσεων είναι πιο ομαλές και δεν παρατηρείται κάποια ακραία συμπεριφορά της τέφρας από ότι στα υπόλοιπα δείγματα. Γενικά, οι τιμές βαρέων μετάλλων σε αυτήν τη φυτεία είναι χαμηλές και δεν πρέπει να είναι ένα περιοριστικό χαρακτηριστικό γνώρισμα στη χρησιμοποίηση ή τη διάθεση της τέφρας.

Κύρια Οξείδια

Οι πολυετείς ενεργειακές φυτείες αποτελούν σημαντικό ενεργειακό καύσιμο που κατά τη θερμοχημική μετατροπή τους χρησιμεύουν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας.

Πριν όμως τον χαρακτηρισμό ως βιοκαύσιμο αξίζει να αναφέρουμε ότι στο περιεχόμενο της τέφρας σημαντικό ρόλο κατέχουν και οι παρακάτω παράγοντες:

- ❖ Ο τύπος και το είδος του φυτού
- ❖ Το ποσοστό συμμετοχής κάθε μέρους του φυτού
- ❖ Οι συνθήκες ανάπτυξης του
- ❖ Η συγκομιδή
- ❖ Η επεξεργασία και η αποθήκευσή του
- ❖ Η προετοιμασία πριν τη θερμοχημική μετατροπή
- ❖ Η θερμοχημική μετατροπή

Τύπος και είδος φυτού

Τα C₃ φυτά (όπως το καλάμι, το σόργο, το σιτάρι κ.λπ.) παρουσιάζουν μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα σε εύκρατα και ψυχρά κλίματα και χρειάζονται μεγαλύτερες ποσότητες νερού για να παράγουν ίδιες ποσότητες ξηρής ουσίας σε σύγκριση με τα C₄ φυτά. Επομένως, τα C₃ φυτά παρουσιάζουν μεγαλύτερα ποσοστά τέφρας καθώς υπάρχει μεγαλύτερη συσσώρευση ανόργανων συστατικών στα μέρη του φυτού, τα οποία μεταφέρονται από το έδαφος μέσω του νερού. Αντίθετα, τα C₄ φυτά (όπως το ζαχαρότευτλο, καλαμπόκι, μίσχανθος, Switchgrass κ.λπ.) παρουσιάζουν μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα στα μεσογειακά και θερμά κλίματα και απαιτείται η μισή

ποσότητα νερού από τα C₃ φυτά. Επομένως, τα C₄ φυτά παρουσιάζουν χαμηλότερα ποσοστά τέφρας από ότι τα C₃ φυτά.

Το ποσοστό συμμετοχής κάθε μέρους του φυτού

Η κατανομή της τέφρας και συγκεκριμένων ανόργανων συστατικών ποικίλουν σημαντικά μεταξύ των διαφορετικών μερών του φυτού. Οι Summers et all [65], για παράδειγμα, εντοπίζουν διαφορετική αναλογία τέφρας και πυριτίου στα φύλλα και τα στελέχη του άχυρου του ρυζιού. Η κατανομή των ανόργανων συστατικών μεταξύ των μερών του φυτού είναι συγκεκριμένη και μπορεί να έχει άμεση επιρροή κατά την εφαρμογή της βιομάζας.

Συνθήκες ανάπτυξης του φυτού

Το είδος του εδάφους και συγκεκριμένα η υφή του αποτελεί σημαντικό παράγοντα κατά την κατανομή των ανόργανων συστατικών της βιομάζας. Οι Elbersen et all [65] προσδιορίζουν το περιεχόμενο της τέφρας και των θρεπτικών συστατικών πέντε ποικιλιών Switchgrass, τόσο σε αργιλικά όσο και σε αμμώδη εδάφη. Το Switchgrass που αναπτύσσεται σε αμμώδη εδάφη παρουσιάζει χαμηλότερα ποσοστά τέφρας από ότι στα αργιλικά εδάφη. Η διαφορά της συνολικής τέφρας μεταξύ των τύπων των εδαφών μπορεί να είναι εξηγείται καλύτερα εξαιτίας του υψηλού ποσού διαλυμένου πυριτίου που υπάρχει στα αργιλικά εδάφη, πράγμα που σημαίνει υψηλότερα ποσοστά τέφρας των καλλιεργειών που αναπτύσσονται στα εδάφη αυτά.

Συγκομιδή

Τόσο το συνολικό ποσοστό της τέφρας, όσο και αυτό συγκεκριμένων ανόργανων συστατικών μπορεί να καθοριστεί από το χρόνο συγκομιδής. Εκτεταμένη εποχή συγκομιδής, πέρα από την εποχή του, οδηγεί σε χαμηλότερα ποσοστά τέφρας. Επίσης, ένας αριθμός συστατικών (π.χ. K, Cl) είναι μειωμένος, εξαιτίας του γηρασμού και της μετακίνησης (συστατικά μετακινούνται από τα φύλλα και άλλους ιστούς σε υπόγεια μέρη του φυτού). Η επιλογή των μηχανικών μέσων κατά τη συγκομιδή μπορεί να επηρεάσει τόσο την ποσότητα της τέφρας, όσο και τη σύσταση.

Επεξεργασία και αποθήκευση

Η επιρροή της μακροχρόνιας αποθήκευσης της αγροστώδους βιομάζας στην τέφρα πιστεύεται ότι είναι μικρή, καθώς αυτή αποθηκεύεται σε μέρη με εξαιρετικά χαμηλή υγρασία. Ωστόσο, αν υπάρχει μικροβιακή υποβάθμιση στο αποθηκευμένο υλικό τότε έχουμε απώλεια οργανικού υλικού, το οποίο οδηγεί σε αύξηση των ανόργανων συστατικών.

Ένα αξιοσημείωτο ποσοστό των πολυετών ενεργειακών φυτειών περιέχουν ανόργανα συστατικά, τα οποία αναφέρονται στην τέφρα, και που δεν μπορούν να μετατραπούν σε ενέργεια. Μεγάλης σημασίας αποτελεί, όχι μόνο η ποσότητα της τέφρας, αλλά και η σύνθεσή της με όλες της καλλιεργητικές τεχνικές, που έχουν υποστεί τα φυτά από όπου προέρχεται. Τα κύρια ανόργανα συστατικά της τέφρας που επηρεάζουν τη θερμοχημική μετατροπή της βιομάζας είναι κυρίως το πυρίτιο (Si), το κάλιο (K), το ασβέστιο (Ca), το θείο (S) και το χλώριο (Cl) [65].

Για να προσδιορίσουμε την περιεκτικότητα των συστατικών της τέφρας πραγματοποιήθηκε διαλυτοποίηση με οξέα και αναγωγή των αποτελεσμάτων με τη μορφή οξειδίων.

Συγκρίνοντας τις συγκεντρώσεις τέφρας της αγριαγκινάρας παρατηρούμε ότι, τα φύλλα της περιέχουν σημαντικά υψηλότερες συγκεντρώσεις ανόργανων συστατικών. Αυτό συμβαίνει, εν μέρει, λόγω του γρήγορου μεταβολισμού ανάπτυξης (συσσώρευση θρεπτικών συστατικών) και της διαφορετικής οργανικής δομής των φύλλων της (SiO₂-phytoliths). Η σύσταση της τέφρας μπορεί επίσης να επηρεαστεί και από τη περίοδο συγκομιδής τους, αλλά και από τις μηχανικές τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη συγκομιδή.

Η περιεκτικότητα στα κύρια οξείδια στα δείγματα της αγριαγκινάρας, που προέκυψαν ύστερα από καύση στους 600 °C, παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 5.2.1.

Στο διάγραμμα αυτό παρατηρείται ότι η τέφρα των δειγμάτων παρουσιάζει υψηλές περιεκτικότητες κυρίως σε SiO₂, K₂O. Ακολουθούν, από τις υψηλότερες προς τις

χαμηλότερες, οι ενώσεις του CaO , του MgO , του P_2O_5 και τέλος οι ενώσεις του Fe_2O_3 , του Al_2O_3 και του MnO .

Μεταξύ των δειγμάτων, οι υψηλότερες συγκεντρώσεις SiO_2 παρουσιάζουν τα στελέχη N_0 , N_{40} , N_{120} . Ακολουθούν όλα τα δείγματα του καρπού και τέλος τα φύλλα. Το πυρίτιο δρα ευεργετικά σε μεγάλο αριθμό φυτών. Αυξάνει την ευθυτένια των μίσχων καθώς επίσης και την ανθεκτικότητα των ιστών ενάντια στους μύκητες, τα έντομα και τα ζιζάνια [65].

Στις συγκεντρώσεις του K_2O , τα φύλλα N_{120} παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές ενώ τις χαμηλότερες τα στελέχη N_0 . Παρατηρείται σε όλα τα δείγματα, ότι οι συγκεντρώσεις του K_2O είναι αυξημένες στα δείγματα που έχουν υποστεί μεγάλη λίπανση, ακολουθούν αυτά με μεσαία λίπανση και τέλος αυτά με καθόλου λίπανση. Το κάλιο χαρακτηρίζεται για την υψηλή κινητικότητα στα φυτά σε όλα τα επίπεδα, καθώς και μεταξύ των κυττάρων, των ιστών και την μεταφορά σε όλο το μήκος του φυτού[65]. Έχει βρεθεί ότι, η λίπανση με N έχει σημαντική επιρροή στην παραγωγικότητα της βιομάζας καθώς επίσης και στη συγκέντρωση του νερού, του N , του K και του Ca , αλλά όχι στην τέφρα και το Cl [63]. Στην περίπτωση αυτή, παρατηρείται ότι η αύξηση της λίπανση έχει την τάση να μειώνει τις περιεκτικότητες σε SiO_2 και να αυξάνει αυτές σε K_2O

Στις συγκεντρώσεις του CaO και MgO , παρατηρείται ότι οι υψηλότερες τιμές εμφανίζονται στα φύλλα N_{120} , ακολουθούν τα φύλλα N_{40} και τέλος τα N_0 . Οι τιμές των υπολοίπων δειγμάτων κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα αντίστοιχα για το κάθε στοιχείο. Το ασβέστιο παίζει σημαντικό ρόλο στη δομή των στηρικτικών κυττάρων των φυτών, καθώς καθορίζει τους δεσμούς μεταξύ τους επομένως και τη δομή του[65].

Στις συγκεντρώσεις του P_2O_5 παρατηρούνται αυξημένες τιμές, αρχικά, στα στελέχη, ακολουθεί ο καρπός και τέλος τα φύλλα. Τα δείγματα που έχουν υποστεί μεγάλη λίπανση, δηλαδή τα φύλλα N_{120} , τα στελέχη N_{120} και ο καρπός N_{120} , έχουν τις υψηλότερες τιμές.

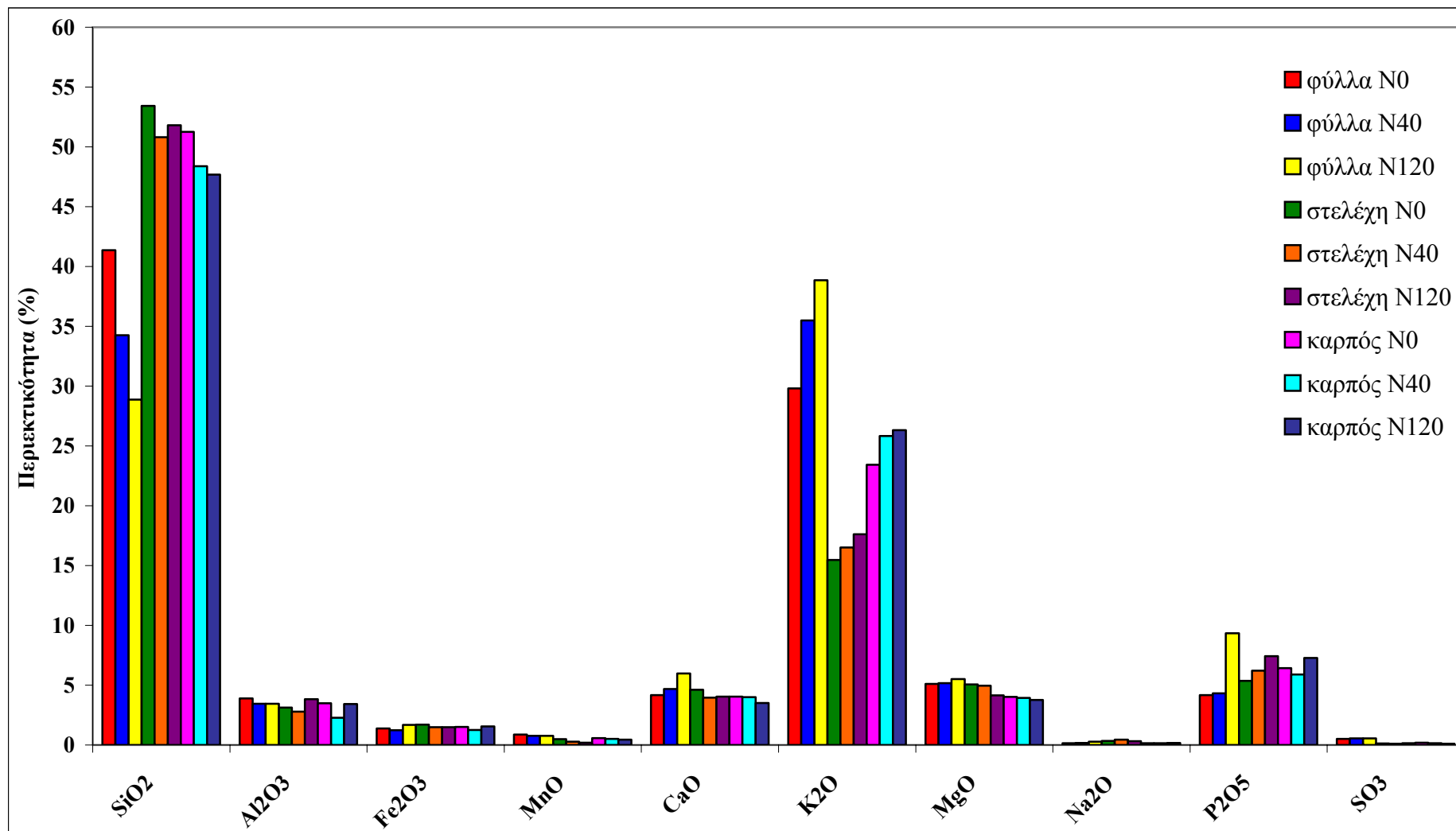
Πίνακας 5.2.2.: Συγκεντρώσεις κύριων οξειδίων στις τέφρες των δειγμάτων *Cynara cardunculus* (%) 10/08/2004

ΑΓΓΙΑΓΚΙΝΑΡΑ	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃
Φύλλα N ₀	41.37	3.89	1.39	0.88	4.16	29.80	5.10	0.15	4.17	0.51
Φύλλα N ₄₀	34.26	3.45	1.23	0.77	4.68	35.50	5.17	0.18	4.32	0.56
Φύλλα N ₁₂₀	28.88	3.45	1.69	0.77	5.97	38.85	5.51	0.28	9.35	0.55
Στελέχη N ₀	53.42	3.13	1.70	0.49	4.62	15.47	5.06	0.34	5.37	0.13
Στελέχη N ₄₀	50.80	2.78	1.50	0.28	3.96	16.51	4.95	0.44	6.21	0.10
Στελέχη N ₁₂₀	51.81	3.83	1.48	0.20	4.05	17.61	4.14	0.32	7.42	0.15
Καρπός N ₀	51.25	3.50	1.51	0.58	4.04	23.42	4.03	0.14	6.42	0.19
Καρπός N ₄₀	48.38	2.27	1.26	0.52	3.99	25.83	3.93	0.15	5.89	0.15
Καρπός N ₁₂₀	47.68	3.43	1.55	0.44	3.52	26.32	3.76	0.16	7.28	0.10

Στις συγκεντρώσεις των υπόλοιπων οξειδίων οι τιμές κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα σε όλα τα δείγματα.

Οι τιμές των συγκεντρώσεων Na σε συνδυασμό με τις συγκεντρώσεις Cl υποδηλώνουν την τιμή της συγκέντρωσης NaCl. Οι υψηλές συγκεντρώσεις Cl και S σε συνδυασμό με τις υψηλές συγκεντρώσεις K και Na αποτελούν αφορμή για το σχηματισμό τόσο αερίων εκπομπών, όσο και εναποθέσεων στους καυστήρες λόγω της πτητικότητάς τους. Κατά την καύση, τα στοιχεία αυτά αεριοποιούνται και συμπυκνώνονται με το αέριο σχηματίζοντας έτσι μικρά σωματίδια, τα οποία επικάθονται στις επιφάνειες, μειώνοντας έτσι τη θερμοκρασία. Επίσης υψηλές συγκεντρώσεις K και Si μπορούν να προκαλέσουν το σχηματισμό τεφρών με χαμηλά σημεία τήξης και εντέλει τον σχηματισμό επισκωρίσεων στον καυστήρα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, που οι τιμές του Na και του Cl είναι χαμηλές, ο παραπάνω κίνδυνος είναι μικρότερος.

Διάγραμμα 5.2.1. Περιεκτικότητα (%) των κύριων οξειδίων τέφρας της *Cynara cardunculus* 10/08/2004



Στους παρακάτω Πίνακες 5.2.3 και 5.2.4 παρουσιάζονται οι τιμές των κύριων οξειδίων του Switchgrass και για τις δύο ημερομηνίες συγκομιδής.

Πίνακας 5.2.3.: Συγκεντρώσεις κύριων οξειδίων στις τέφρες των δειγμάτων *Panicum virgatum* 18/11/2003 (%)

SWITCHGRASS										
8/12/2004	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃
Φύλλα I ₀ N ₀	44.07	3.45	2.18	0.73	6.41	20.05	3.38	0.15	2.43	0.17
Φύλλα I ₁ N ₁	43.58	3.42	2.36	1.01	6.48	20.30	4.40	0.18	3.54	0.19
Φύλλα I ₂ N ₂	44.48	3.56	2.58	0.90	4.93	20.10	4.03	0.17	4.11	0.14
Στελέχη I ₀ N ₀	44.12	3.40	1.23	0.64	5.18	14.50	4.11	0.15	4.52	0.07
Στελέχη I ₁ N ₁	43.54	3.51	1.42	0.51	7.04	17.86	3.74	0.15	9.16	0.12
Στελέχη I ₂ N ₂	43.88	3.30	1.51	0.46	5.21	19.40	3.98	0.29	10.04	0.06

Πίνακας 5.2.4.: Συγκεντρώσεις κύριων οξειδίων στις τέφρες των δειγμάτων *Panicum virgatum* 21/2/2004 (%)

SWITCHGRASS										
21/2/2004	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃
Φύλλα I ₀ N ₀	43.99	3.64	1.94	0.59	4.34	11.93	5.17	0.29	4.47	0.17
Φύλλα I ₁ N ₁	43.47	3.43	2.25	1.26	3.49	13.35	6.48	0.18	6.07	0.16
Φύλλα I ₂ N ₂	44.97	3.67	2.41	0.06	3.93	16.02	5.96	0.22	9.53	0.15
Στελέχη I ₀ N ₀	45.53	3.68	2.93	0.20	3.82	17.60	4.91	0.17	7.94	0.11
Στελέχη I ₁ N ₁	44.46	3.41	1.94	0.94	4.62	19.52	3.82	0.16	11.78	0.19
Στελέχη I ₂ N ₂	44.80	3.50	1.21	0.38	5.29	21.10	3.73	0.22	12.06	0.13

Παρατηρείται ότι οι τιμές στις συγκεντρώσεις του SiO₂ κυμαίνονται στο ίδιο εύρος τιμών, δηλαδή 43 με 45% και για τις δύο ημερομηνίες. Το ίδιο παρατηρείται και στις τιμές του Al₂O₃, του Na₂O, του Fe₂O₃, του MnO και του SO₃.

Στην περίπτωση του Fe₂O₃ παρατηρούμε ότι τα φύλλα της πρώτης ημερομηνίας έχουν υψηλότερες τιμές από ότι τα στελέχη, ενώ στη δεύτερη βλέπουμε ότι στα στελέχη I₀N₀ η τιμή είναι υψηλότερη από αυτές των υπόλοιπων δειγμάτων.

Στο MnO παρατηρείται ότι οι συγκεντρώσεις όλων των δειγμάτων είναι στο ίδιο εύρος τιμών, από 0.2 έως 0.9%, εκτός από τα φύλλα I_1N_1 , όπου και στις δύο ημερομηνίες το δείγμα αυτό έχει την υψηλότερη τιμή από όλα τα υπόλοιπα.

Στις τιμές των συγκεντρώσεων CaO παρατηρείται ότι τα φύλλα της πρώτης ημερομηνίας έχουν σχεδόν διπλάσιες τιμές από τα αντίστοιχα της δεύτερης. Υψηλότερες τιμές έχουν και τα φύλλα της πρώτης συγκομιδής στην περίπτωση του K_2O , ενώ αντίθετα τα στελέχη έχουν παρόμοιες τιμές και στις δύο περιπτώσεις.

Στην περίπτωση του MgO οι τιμές της δεύτερης συγκομιδής είναι υψηλότερες από ότι στην πρώτη. Παρατηρείται δε ότι τα φύλλα I_1N_1 και των δύο περιπτώσεων έχουν τιμές 4.40 και 6.48% αντίστοιχα, υψηλότερες από ότι τα I_0N_0 και I_2N_2 . Στα στελέχη, τις υψηλότερες τιμές παρουσιάζουν τα δείγματα I_0N_0 και των δύο συγκομιδών, με 4.11 και 4.91% αντίστοιχα.

Οι τιμές των συγκεντρώσεων του K_2O έχουν την τάση να αυξάνονται με την αύξηση της λίπανσης. Αυτό είναι περισσότερο εμφανές στα στελέχη και των δύο ημερομηνιών του Switchgrass καθώς και στα φύλλα της δεύτερης.

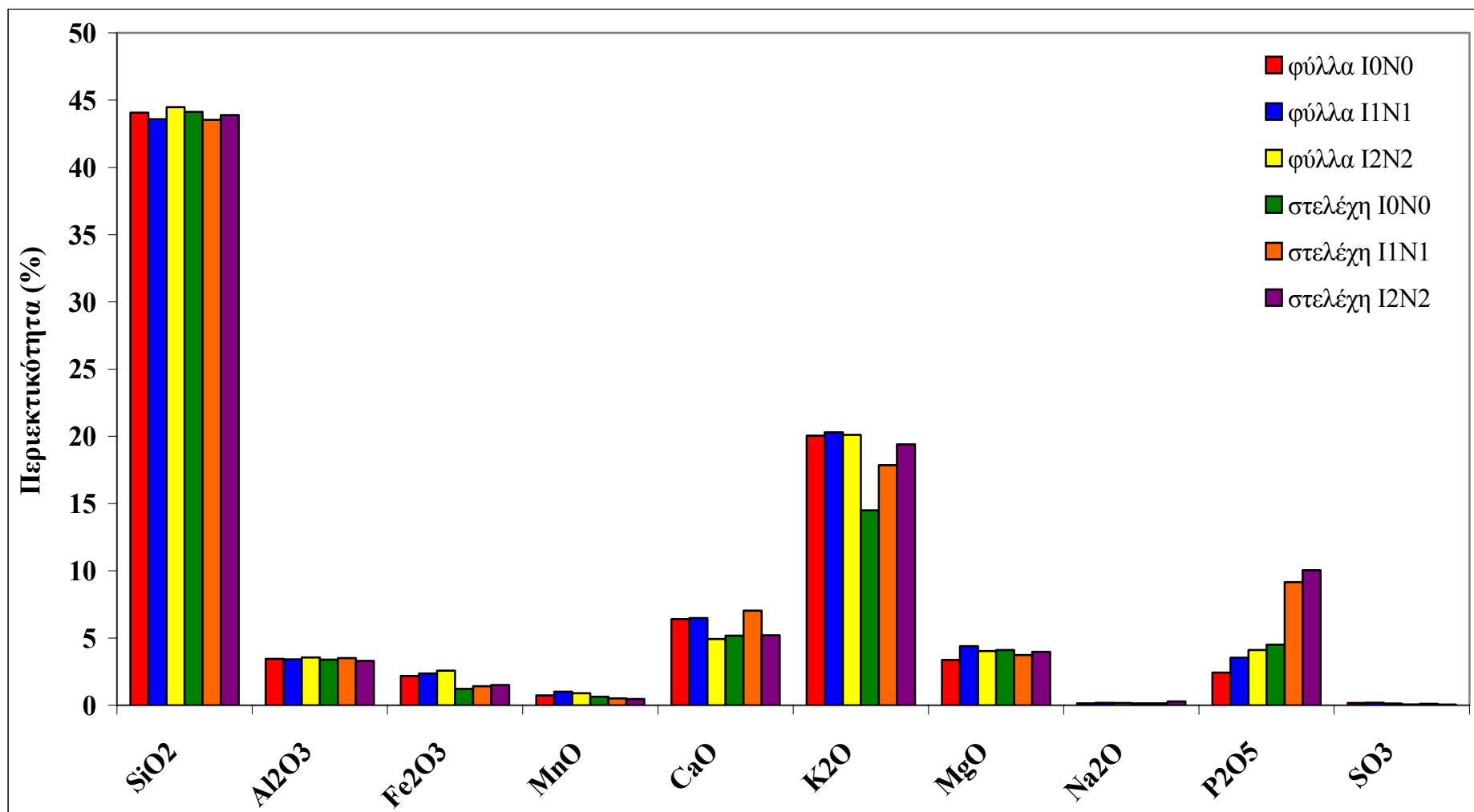
Στην περίπτωση του P_2O_5 παρατηρείται το ίδιο με το CaO . Οι περισσότερες τιμές στα φύλλα της δεύτερης συγκομιδής είναι σχεδόν διπλάσιες από ότι της πρώτης.

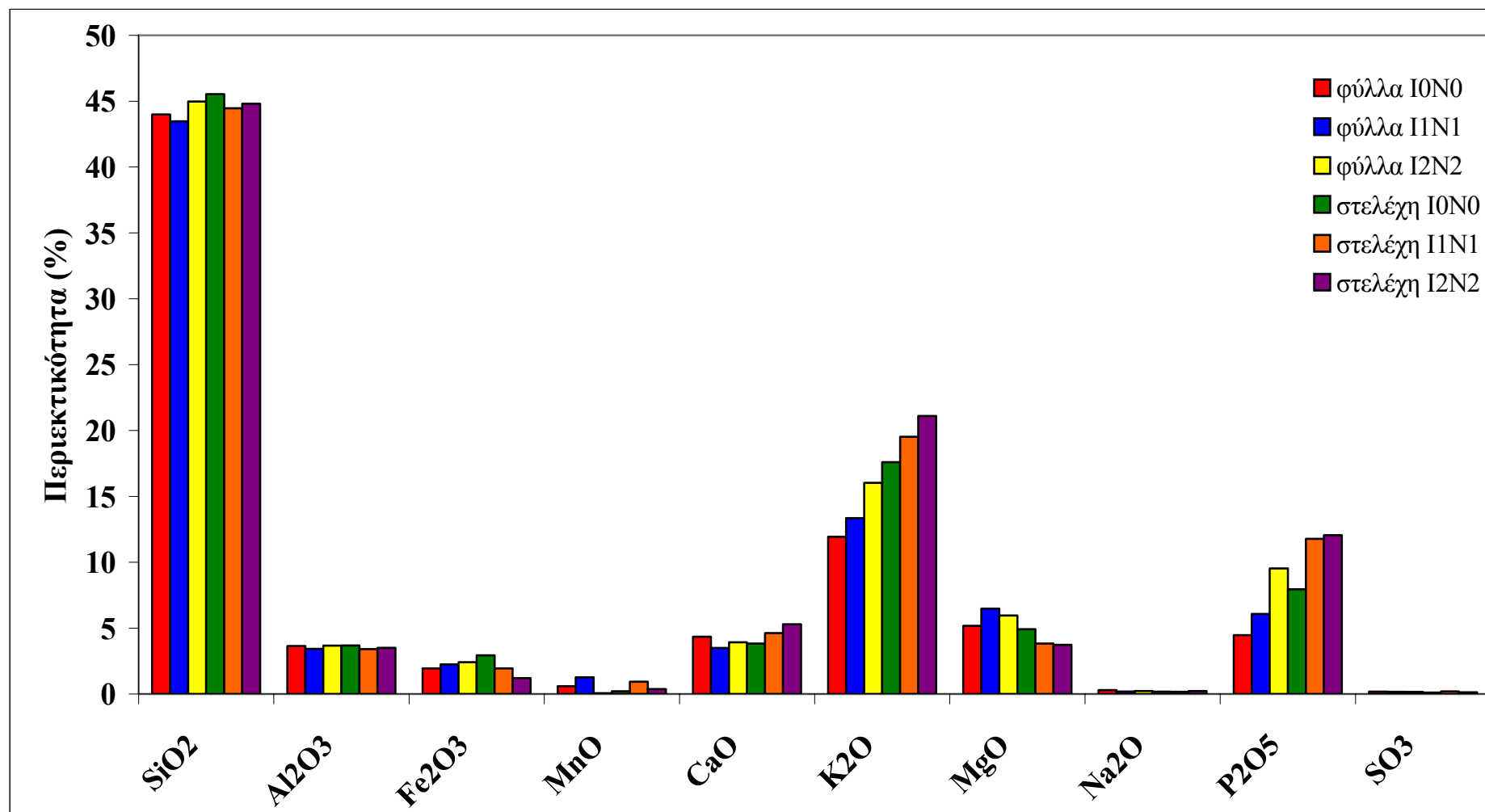
Γενικότερα παρατηρείται ότι η επίδραση της άρδευσης/λίπανσης επηρέασε τις συγκεντρώσεις του K_2O και του P_2O_5 , ενώ στα υπόλοιπα δεν παρουσιάστηκε κάποια ουσιαστική μεταβολή.

Παρατηρώντας τους Πίνακες 5.2.3 και 5.2.4 του switchgrass διαπιστώνεται ότι η αύξηση της λίπανσης και της άρδευσης δεν επιδρούν ουσιαστικά στις συγκεντρώσεις των οξειδίων των μετάλλων. Το μόνο που μπορεί να παρατηρηθεί είναι οι ελαφρώς μειωμένες συγκεντρώσεις των στελεχών του switchgrass της πρώτης κοπής, αλλά μέσα στο εύρος τιμών διακύμανσης των τιμών τους.

Παρακάτω παρουσιάζονται με τη μορφή διαγραμμάτων οι τιμές για τα οξείδια των μετάλλων των τεφρών του Switchgrass και για τις δύο συγκομιδές.

Διάγραμμα 5.2.2. Περιεκτικότητα (%) των κύριων οξειδίων τέφρας του *Panicum virgatum* 18/11/2003



Διάγραμμα 5.2.3. Περιεκτικότητα (%) των κύριων οξειδίων τέφρας του *Panicum virgatum* 21/1/2004

Στον παρακάτω Πίνακα 5.2.5 παρουσιάζονται οι τιμές των κύριων οξειδίων του καλαμιού και ακολουθεί το διάγραμμα αυτών.

Πίνακας 5.2.5.: Συγκεντρώσεις κύριων οξειδίων στις τέφρες των δειγμάτων *Arundo donax* (%) 09/03/2004

ARUNDO DONAX	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃
Φύλλα I ₀ N ₀	49.80	3.27	2.39	0.85	2.83	16.20	4.66	0.15	5.27	0.32
Φύλλα I ₁ N ₁	46.69	3.53	3.89	0.95	3.43	20.80	5.57	0.20	8.60	1.50
Φύλλα I ₂ N ₂	43.24	3.67	3.37	1.21	4.34	22.30	5.12	0.15	9.12	1.57
Στελέχη I ₀ N ₀	43.05	3.53	3.27	0.16	3.05	20.20	4.76	0.14	3.93	0.21
Στελέχη I ₁ N ₁	42.62	3.34	2.32	0.56	6.19	21.20	4.87	0.16	7.38	0.18
Στελέχη I ₂ N ₂	42.17	3.38	1.23	0.39	7.90	24.30	5.42	0.16	9.64	0.19

Στο καλάμι, οι τιμές των συγκεντρώσεων του SiO₂ είναι αρκετά υψηλές με αυτή των φύλλων I₀N₀ να υπερτερεί όλων με σχεδόν 50% και χαμηλότερη αυτή των στελεχών I₂N₂ με 42.17%. Γενικά παρατηρούμε ότι στα φύλλα υπάρχει περισσότερο πυρίτιο από ότι στα στελέχη.

Στο Al₂O₃, του Fe₂O₃ του Na₂O και του MnO οι τιμές όλων των δειγμάτων κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα και δεν παρατηρείται καμία ακραία τιμή.

Στο CaO παρατηρείται μια αυξητική τάση των συγκεντρώσεων στα φύλλα και τα στελέχη, καθώς αυξάνεται η άρδευση/λίπανση. Υψηλότερες τιμές εμφανίζουν τα φύλλα και τα στελέχη I₂N₂ και χαμηλότερες τα φύλλα και τα στελέχη I₀N₀.

Στο P₂O₅ και το K₂O, παρατηρείται μια αυξητική τάση των συγκεντρώσεων τόσο των φύλλων όσο και των στελεχών, καθώς αυξάνεται η άρδευση/λίπανση. Τα φύλλα I₀N₀ και τα στελέχη I₀N₀ έχουν τις χαμηλότερες τιμές, ακολουθούν τα φύλλα I₁N₁ και τα στελέχη I₁N₁ και τέλος τα φύλλα I₂N₂ και τα στελέχη I₂N₂.

Συγκρίνοντας τώρα όλα τα δείγματα μεταξύ τους διαπιστώνεται ότι οι συγκεντρώσεις του SiO₂ είναι περισσότερο αυξημένες στα δείγματα του καλαμιού και τις αγριαγκινάρας από ότι σε αυτά του Switchgrass.

Οι συγκεντρώσεις του Al_2O_3 και του Fe_2O_3 έχουν το ίδιο εύρος τιμών σε όλα τα δείγματα. Στην περίπτωση του Fe_2O_3 παρατηρείται μια μικρή αύξηση στα δείγματα του καλαμιού, ενώ το αντίστροφο συμβαίνει στην περίπτωση της αγριαγκινάρας.

Οι τιμές των συγκεντρώσεων του MnO κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα, ενώ ξεχωρίζουν τα φύλλα I_2N_2 του καλαμιού, όπου η τιμή τους είναι ελάχιστα αυξημένη.

Στις συγκεντρώσεις του CaO παρατηρείται ότι οι τιμές του καλαμιού με αυτές του Switchgrass της δεύτερης συγκομιδής είναι παρόμοιες. Οι τιμές στα στελέχη του καλαμιού είναι αντίστοιχες με τα στις τιμές του Switchgrass της δεύτερης συγκομιδής. Οι τιμές στα δείγματα αγριαγκινάρας κυμαίνονται στο ίδιο εύρος τιμών με αυτές του Switchgrass της δεύτερης συγκομιδής.

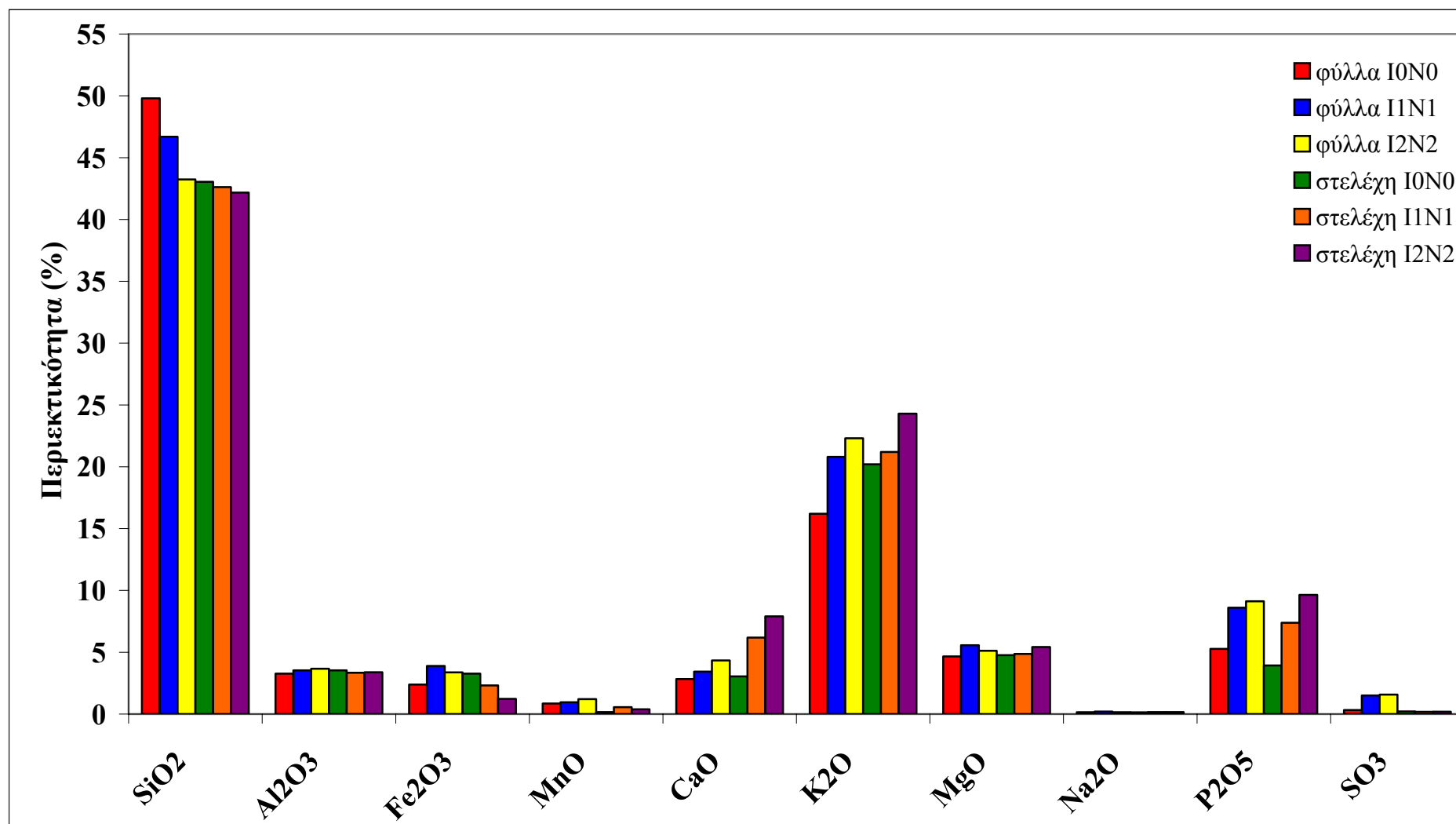
Οι συγκεντρώσεις του K_2O της αγριαγκινάρας είναι υψηλότερες σχεδόν από όλα τα δείγματα. Ακολουθούν του καλαμιού και τέλος των δειγμάτων του Switchgrass.

Στις συγκεντρώσεις του MgO και του Na_2O οι τιμές κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα σε όλα τα δείγματα.

Στις συγκεντρώσεις του P_2O_5 , και ιδιαίτερα των στελεχών, παρατηρείται μια μικρή αυξητική τάση κατά την εφαρμογή των καλλιεργητικών τεχνικών της άρδευσης/λίπανσης.

Γενικότερα, παρατηρείται μια τάση αύξησης των συγκεντρώσεων του K_2O και του P_2O_5 , καθώς αυξάνεται η άρδευση και η λίπανση, τόσο στα φύλλα όσο και στα στελέχη όλων των δειγμάτων.

Διάγραμμα 5.2.4. Περιεκτικότητα (%) των κύριων οξειδίων τέφρας του *Arundo donax* 09/03/2004



5.3 ΣΗΜΕΙΟ ΡΟΗΣ ΤΕΦΡΑΣ

Γενικά

Η βιομάζα αποτελείται από ανόργανα στοιχεία, κάποια από τα οποία απελευθερώνονται από την τέφρα κατά τη διάρκεια της καύσης και εναποθέτονται επάνω στις επιφάνειες του καυστήρα. Αυτές καλούνται *επικαθήσεις*. Οι *επισκωριώσεις* αφορούν την τήξη αυτών των εναποθέσεων, με τη διαμόρφωση ενός υαλώδους στρώματος. Η αλληλεπίδραση των εναποθέσεων με τις μεταλλικές επιφάνειες μπορεί να επιταχύνει τη *διάβρωση*, η οποία βαθμιαία τις καταστρέφει και επομένως οδηγεί σε αυξανόμενες απαιτήσεις συντήρησης και μειωμένο χρόνο ζωής της εγκατάστασης.

Ο σχηματισμός εναπόθεσης, που οδηγεί στις επισκωριώσεις, τις επικαθήσεις και τη διάβρωση, είναι ένα σύνθετο φαινόμενο, το οποίο περιλαμβάνει αλκαλική απελευθέρωση κατά τη διάρκεια της καύσης καθώς και χημικές αντιδράσεις σε στερεή και αέρια φάση. Παρά την εντατική έρευνα τα τελευταία έτη, οι μηχανισμοί απόθεσης δεν είναι ακόμα γνωστοί λεπτομερώς. Εντούτοις, υπάρχει γενική συμφωνία σε μερικά σημεία του μηχανισμού.

Ο αρχικός μηχανισμός της απόθεσης είναι συμπύκνωση KCl και K_2SO_4 , που διαμορφώνεται από τα πτητικά στοιχεία όπως το K , S , και Cl , το οποίο ατμοποιείται κατά τη διάρκεια της καύσης. Αυτό το αρχικό στρώμα θα λειώσει και θα γίνει κολλώδες, θα παγιδεύσει κατά συνέπεια αμετάβλητα στοιχεία όπως το Si , το Ca και το Mg .

Το K αντιδρά με το Si για να σχηματίσει αλκαλικά πυριτικά άλατα, τα οποία έχουν χαμηλότερα σημεία τήξης. Τα άλλα στοιχεία σχηματίζουν ευτηκτικά μείγματα με χαμηλά σημεία τήξης, όπου αυτά με τις υψηλές συγκεντρώσεις K παρουσιάζουν χαμηλότερα σημεία τήξης. Μαζί με το K , υπάρχει και το Cl , το οποίο αποτελεί σημαντικό παράγοντα στο σχηματισμό επικαθήσεων.

Η διάβρωση των μεταλλικών επιφανειών μπορεί να επιταχυνθεί από τα αλκάλια και το χλώριο, για το λόγο ότι το προστατευτικό στρώμα οξειδίων του μετάλλου μπορεί να καταστραφεί. Έτσι ο σχηματισμός των εναποθέσεων είναι στενά συνδεδεμένος με τη διάβρωση. Αυτό σημαίνει, ότι μια μείωση στις εναποθέσεις θα περιορίσει τα προβλήματα διάβρωσης [66].

Τα καύσιμα από αγροστώδη φυτά περιέχουν το πυρίτιο και το κάλιο ως κύρια συστατικά της τέφρας τους. Έχουν συνήθως υψηλά ποσοστά χλωρίου σχετικά με άλλα καύσιμα βιομαζών. Αυτές οι ιδιότητες υποδηλώνουν τα ενδεχομένως σοβαρά προβλήματα απόθεσης της τέφρας σε υψηλές ή μέτριες θερμοκρασίες καύσης. Οι αρχικές πηγές αυτών των προβλημάτων είναι:

- η αντίδραση του αλκαλίου με το πυρίτιο, για να διαμορφώσει τα αλκαλικά πυριτικά άλατα που λειώνουν ή μαλακώνουν στις χαμηλές θερμοκρασίες (μπορεί να είναι χαμηλότερος από 700°C, ανάλογα με τη σύνθεση)
- η αντίδραση του αλκαλίου με το θείο, για να διαμορφώσουν τα αλκαλικά θειικά άλατα στις επιφάνειες μεταφοράς θερμότητας.

Το αλκαλικό υλικό παίζει σημαντικό ρόλο και στις δύο διαδικασίες. Το κάλιο είναι η κυρίαρχη πηγή αλκαλίου στα περισσότερα καύσιμα βιομαζών.

Η αναλογία Cl προς S αποτελεί δείκτη της ικανότητας διάβρωσης του καυσίμου και καλείται «ενεργή οξείδωση- active oxidation», η οποία αφορά την απελευθέρωση διαβρωτικών χλωριούχων αερίων στους σωλήνες του καυστήρα κατά την θειοποίηση των αλκαλίων. Η αναλογία Cl/S πάνω από 1 φανερώνει αύξηση της διαβρωτικής ικανότητας [43]

Στην περίπτωση των δικών μας δειγμάτων, αναλογία αυτή για το καλάμι είναι κάτω από 1 και κυμαίνεται από 0.08 έως 0.71. Στα ίδια επίπεδα είναι και για τα δείγματα της αγριαγκινάρας και του switchgrass, αφού οι τιμές των συγκεντρώσεων του Cl και του S κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα με το καλάμι.

Όσο αφορά στα βιοκαύσιμα, όσο μικρότερη είναι η περιεκτικότητά τους σε χλώριο και κάλιο, τόσο καλύτερη είναι η ποιότητά τους. Κατά συνέπεια, η ποιότητα του

βιοκαυσίμου μπορεί να επηρεασθεί από την αγροτική του διαχείριση. Σημαντικοί παράγοντες, από αυτή την άποψη, αποτελούν το είδος των λιπασμάτων, η τεχνική και ο χρόνος της συγκομιδής, το κλίμα, όπως επίσης και το είδος της καλλιέργειας.

Επίσης, έχει παρατηρηθεί, ότι όσο χαμηλότερη είναι η συγκέντρωση του αζώτου, θείου και χλωρίου στην τέφρα, τόσο καλύτερες είναι οι συνθήκες της καύσης.

Εξάλειψη ή μείωση των αλκαλικών μετάλλων στο καύσιμο μειώνει τις συγκεντρώσεις των στοιχείων αυτών, τόσο στην αέρια όσο και στη στερεή φάση. Ακόμη μειώνει τον ρυθμό της συμπύκνωσης και των χημικών αντιδράσεων, καθώς και τις επικαθήσεις, που δημιουργούνται από πρόσκρουση σωματιδίων [68].

Αγριαγκινάρα (*Cynara cardunculus*)

Στους παρακάτω Πίνακες 5.3.1, 5.3.2 και 5.3.3 παρουσιάζονται οι τιμές των θερμοκρασιών τήξης των τεφρών της αγριαγκινάρα, του Switchgrass και του καλαμιού. Έγινε επιλογή συγκεκριμένων δειγμάτων που είχαν να κάνουν με τη μέση καλλιεργητική τεχνική που εφαρμόστηκε στο κάθε είδος, καθώς και με τη ποσοτική σύσταση της τέφρας τους.

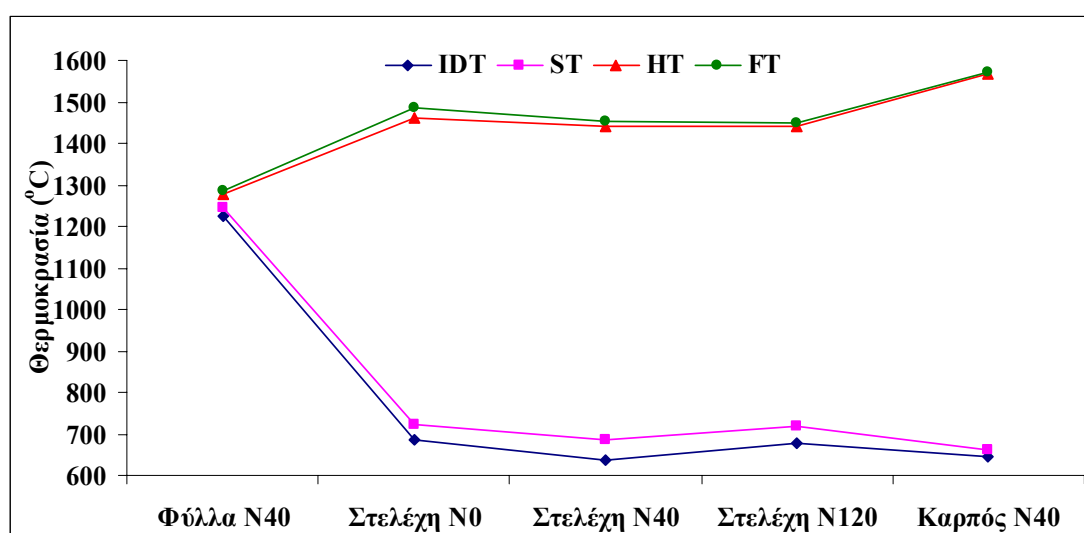
Οι θερμοκρασίες τήξης των τεφρών, που είναι σημαντικές για την πρόβλεψη των εναποθέσεων στα τοιχώματα των κλιβάνων, συσχετίζονται άμεσα με τη χημεία της τέφρας. Για τις διαδικασίες μετατροπής, η αρχική θερμοκρασία παραμόρφωσης (IDT) είναι ο σημαντικότερος δείκτης των προβλημάτων. Η θερμοκρασία στην οποία η τέφρα αρχίζει να μαλακώνει πρέπει να είναι αρκετά μεγαλύτερη από τη μέγιστη θερμοκρασία της διαδικασίας, εκτός αν η τέφρα απομακρύνεται σε ρευστή μορφή.

Μια σύγκριση των θερμοκρασιών τήξης της τέφρας όλων των δειγμάτων δείχνει ότι, η IDT και η θερμοκρασία μαλάκυνσης (ST) είναι χαμηλές για τις διαδικασίες καύσης και δείχνουν τα πιθανά προβλήματα επισκωρίσεων. Εντούτοις, για συστήματα ρευστοποιημένης κλίνης ή αεριοποιητές σε θερμοκρασίες κάτω των 1000°C δεν προβλέπονται κάποια προβλήματα.

Στο Διάγραμμα 5.3.1 παρατηρείται ότι η IDT και η ST των στελεχών και του καρπού της αγριαγκινάρας είναι χαμηλότερες από των φύλλων, ενώ η FT υψηλότερες. Διαπιστώνεται, δηλαδή, ότι η τέφρα αρχίζει να παραμορφώνεται σε χαμηλή θερμοκρασία ενώ αρχίζει να ρέει σε υψηλή. Στα φύλλα N₄₀, αντιθέτως, παρατηρείται ότι οι τιμές όλων των θερμοκρασιών βρίσκονται σε ένα περιορισμένο εύρος τιμών. Πράγμα που σημαίνει ότι η τέφρα τους παραμορφώνεται σε υψηλή IDT και τήκεται σε χαμηλότερη FT από τα υπόλοιπα δείγματα. Η διαφορά θερμοκρασία των IDT και ST με την FT των φύλλων είναι μικρότερη από ότι η διαφορά των υπόλοιπων δειγμάτων αγριαγκινάρας. Αυτό αυξάνει το ρυθμό σχηματισμού επικαθίσεων μέσα στους λέβητες [69].

Πίνακας 5.3.1.: Θερμοκρασίες ροής της τέφρας της *Cynara cardunculus* (°C)

	IDT	ST	HT	FT
Φύλλα N ₄₀	1223	1244	1276	1285
Στελέχη N ₀	686	721	1462	1486
Στελέχη N ₄₀	638	687	1440	1454
Στελέχη N ₁₂₀	678	717	1439	1448
Καρπός N ₄₀	646	662	1567	1570

Διάγραμμα 5.3.1.: Θερμοκρασίες ροής της τέφρας της *Cynara cardunculus* (°C)**Switchgrass (*Panicum virgatum*)**

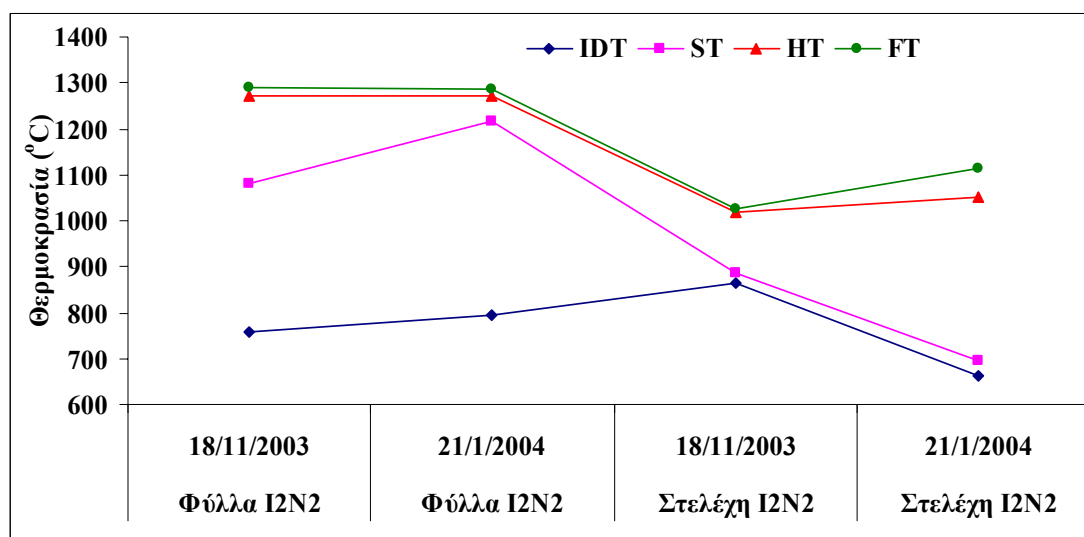
Στο Διάγραμμα 5.3.2 παρουσιάζονται οι τιμές των θερμοκρασιών των επιλεγμένων δειγμάτων Switchgrass με τη μέγιστη άρδευση/λίπανση. Παρατηρείται ότι η IDT και η ST των στελεχών I₂N₂ της δεύτερης ημερομηνίας κοπής (21/1/2004) είναι χαμηλότερες από αυτές των υπολοίπων δειγμάτων, πράγμα που δείχνει πιθανά προβλήματα επισκωρίσεων. Οι τιμές IDT των φύλλων και των δύο ημερομηνιών κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα τιμών ενώ οι τιμές ST είναι υψηλότερες από τις

αντίστοιχες των στελεχών. Οι τιμές των θερμοκρασιών των στελεχών της πρώτης ημερομηνίας κυμαίνονται σε μικρότερο εύρος τιμών από ότι τα υπόλοιπα δείγματα. Η διαφορά θερμοκρασία των IDT και ST με την FT των στελεχών είναι μικρότερη από ότι η διαφορά των υπόλοιπων δειγμάτων του Switchgrass, δηλώνοντας αύξηση του ρυθμού σχηματισμού των επικαθήσεων.

Πίνακας 5.3.2.: Θερμοκρασίες ροής των τερφών του *Panicum virgatum* και για τις δυο συγκομιδές (°C)

	Φύλλα I ₂ N ₂ 18/11/2003	Φύλλα I ₂ N ₂ 21/1/2004	Στελέχη I ₂ N ₂ 18/11/2003	Στελέχη I ₂ N ₂ 21/1/2004
IDT	756	795	865	662
ST	1082	1216	887	696
HT	1272	1273	1018	1051
FT	1289	1286	1025	1115

Διάγραμμα 5.3.2.: Θερμοκρασίες ροής των τερφών του *Panicum virgatum* και για τις δυο συγκομιδές (°C)



Καλάμι (*Arundo donax*)

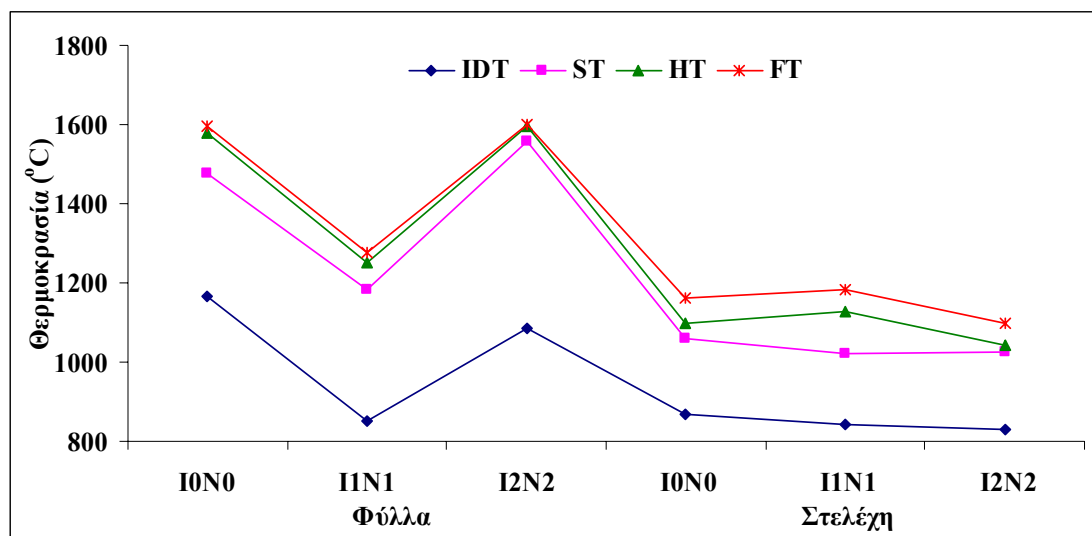
Μια σύγκριση των θερμοκρασιών τήξης της τέφρας όλων των δειγμάτων του καλαμιού δείχνει ότι, η IDT και η θερμοκρασία μαλάκυνσης (ST) των στελεχών, κυρίως, είναι χαμηλές για τις διαδικασίες καύσης και δείχνουν τα πιθανά προβλήματα επισκωριώσεων. Εντούτοις, για συστήματα ρευστοποιημένης κλίνης ή αεριοποιητές σε θερμοκρασίες κάτω των 1000°C δεν προβλέπονται κάποια προβλήματα.

Αντιθέτως, οι θερμοκρασίες τήξης των φύλλων ήταν υψηλές. Οι χαμηλότερες θερμοκρασίες τήξης των στελεχών απεικονίζουν τις χαμηλότερες συγκεντρώσεις τους σε πυρίτιο και την υψηλότερη συγκέντρωση σε αλκάλια. Η επίδραση της άρδευσης/λίπανσης ήταν μόνο προφανής για τους μέγιστους ρυθμούς. Κατά συνέπεια, στην I₂N₂ τεχνική, η IDT ήταν κάπως χαμηλότερη, ενώ η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της θερμοκρασίας μαλάκυνσης και της θερμοκρασίας ροής (FT) μειώθηκε. Αυτό ως γνωστό δείχνει ένα υψηλότερο ποσοστό επικαθίσεων μέσα στους λέβητες [69].

Γενικότερα, είναι γνωστό ότι οι θερμοκρασίες τήξης της τέφρας συνδέονται άμεσα με τη χημική σύστασή της. Έτσι, χαμηλές θερμοκρασίες αρχικής παραμόρφωσης (IDT) και μαλάκυνσης (ST) οφείλονται σε υψηλές περιεκτικότητες αλκαλίων. Στα παραπάνω δείγματα διαπιστώνεται ότι οι υψηλές τιμές συγκεντρώσεων K₂O αποδίδουν χαμηλές τιμές IDT και ST.

Πίνακας 5.3.3.: Θερμοκρασίες ροής της τέφρας του *Arundo donax* (°C)

	IDT	ST	HT	FT
Φύλλα I ₀ N ₀	1167	1476	1577	1595
Φύλλα I ₁ N ₁	850	1184	1250	1277
Φύλλα I ₂ N ₂	1085	1557	1594	1599
Στελέχη I ₀ N ₀	868	1061	1098	1162
Στελέχη I ₁ N ₁	842	1020	1126	1183
Στελέχη I ₂ N ₂	829	1025	1042	1098

Διάγραμμα 5.3.3.: Θερμοκρασίες ροής της τέφρας του *Arundo donax* (°C)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι ενεργειακές καλλιέργειες οι οποίες μελετήθηκαν, δηλαδή η αγριαγκινάρα (*Cynara cardunculus*), το Switchgrass (*Panicum virgatum*) και το καλάμι (*Arundo donax*), αποτελούν είδη μικρού περιόδου χρόνου και ικανά να δώσουν ικανοποιητικές ποσότητες ξηρής ουσίας, ανάλογα με τις συνθήκες που επικράτησαν και τις καλλιεργητικές τεχνικές που εφαρμόστηκαν. Στις παραπάνω φυτείες εφαρμόστηκε άρδευση ή/και αζωτούχος λίπανση και η παραγωγικότητά τους, από τον πρώτο χρόνο ως την τελική συγκομιδή, κυμάνθηκε για την αγριαγκινάρα από 1.40-3.42 t/ha, για το switchgrass από 8.42-24.05 t/ha και για το καλάμι από 1.37-18.60 t/ha.

Η εφαρμογή της άρδευσης επηρέασε περισσότερο την παραγωγικότητα και τα θερμοχημικά χαρακτηριστικά των φυτών, από ότι η λίπανση. Η αζωτούχος λίπανση σε συνδυασμό με την άρδευση, επηρέασε σημαντικά την ανάπτυξη και τα υψηλά επίπεδα παραγωγικότητας των πειραματικών τεμαχίων, από ότι μόνο η εφαρμογή της λίπανσης.

Οι παραπάνω ενεργειακές καλλιέργειες χαρακτηρίζονται από μια σχετικά χαμηλή περιεκτικότητα σε τέφρα, που κυμαίνεται από 2 ως 10%, εκτός από τα φύλλα της αγριαγκινάρας, ενώ μια πολύ υψηλή περιεκτικότητα σε πτητικές ουσίες, που κυμαίνεται από 60 ως 85%, περίπου, σε ξηρή βάση. Εντούτοις, η επίδραση των τεχνικών της άρδευσης/λίπανσης στις πτητικές ουσίες είναι σημαντική, με συνέπεια τα πιο υψηλά επίπεδα πτητικών ουσιών σε όλες τις περιπτώσεις. Τα στελέχη όλων των δειγμάτων παρουσίασαν χαμηλότερη περιεκτικότητα σε τέφρα από ότι τα φύλλα και αυτό δεν επηρεάστηκε ούτε από την άρδευση ούτε από τη λίπανση.

Όσον αφορά την στοιχειακή ανάλυση όλων των δειγμάτων, σημειώνεται ότι δεν υπάρχει ουσιαστική διαφορά στο περιεχόμενο σε C, H και O μεταξύ των φύλλων και των στελεχών των φυτών, ενώ η επίδραση της άρδευσης/λίπανσης ήταν ασήμαντη. Οι συγκεντρώσεις N και S όλων των ειδών είναι χαμηλές, ενώ παρατηρήθηκε μια μικρή αύξηση του N με τη λίπανση, η οποία είναι σύμφωνη με προηγούμενες μελέτες. Η

περιεκτικότητα του Cl είναι χαμηλή (<1%), οπότε, τα δείγματα που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία, δεν προβλέπεται να προκαλέσουν φαινόμενα διάβρωσης στις μεταλλικές επιφάνειες του καυστήρα.

Συγκρίνοντας τα παραπάνω δείγματα με τους λιγνίτες, διαπιστώνεται ότι οι τιμές της κατώτερης θερμογόνου δύναμης, που κυμαίνονται από 4000 ως 6000kcal/kg περίπου, είναι υψηλότερες από τους περισσότερους λιγνίτες.

Οι συγκεντρώσεις των ιχνοστοιχείων είναι χαμηλές και κυμαίνονται μέσα στα επιτρεπτά όρια, που καθορίζονται από την ευρωπαϊκή νομοθεσία. Αναλυτικότερα, οι υψηλότερες συγκεντρώσεις παρατηρούνται στα ιχνοστοιχεία της αγριαγκινάρας, ενώ οι χαμηλότερες παρατηρούνται στο Switchgrass πρώτης κοπής. Αυτό μπορεί να συμβαίνει λόγω της εποχής συγκομιδής του κάθε φυτού, αλλά και της ικανότητας απορροφησιμότητας του καθενός. Γενικά, οι τιμές βαρέων μετάλλων είναι χαμηλές και δεν πρέπει να είναι ένα περιοριστικό χαρακτηριστικό γνώρισμα στη χρησιμοποίηση ή τη διάθεση της τέφρας.

Το κυριότερο συστατικό σχηματισμού της τέφρας όλων των δειγμάτων είναι κυρίως το SiO₂, ακολουθεί το K₂O και τέλος το P₂O₅. Συγκρίνοντας τώρα όλα τα δείγματα μεταξύ τους διαπιστώνεται ότι οι συγκεντρώσεις του SiO₂ είναι περισσότερο αυξημένες στα δείγματα του καλαμιού και τις αγριαγκινάρας από ότι σε αυτά του Switchgrass. Οι συγκεντρώσεις του K₂O της αγριαγκινάρας είναι υψηλότερες σχεδόν από όλα τα δείγματα. Ακολουθούν του καλαμιού και τέλος των δειγμάτων του Switchgrass. Γενικότερα, παρατηρείται μια τάση αύξησης των συγκεντρώσεων του K₂O και του P₂O₅, καθώς αυξάνεται η άρδευση και η λίπανση, τόσο στα φύλλα όσο και στα στελέχη όλων των δειγμάτων.

Μια σύγκριση των θερμοκρασιών τήξης της τέφρας όλων των δειγμάτων δείχνει ότι, η IDT και η θερμοκρασία μαλάκυνσης (ST) όλων των στελεχών είναι χαμηλότερες από αυτές των φύλλων. Για τις συμβατικές διεργασίες καύσης δείχνουν πιθανά προβλήματα επισκωρίσεων. Εντούτοις, για συστήματα ρευστοποιημένης κλίνης ή αεριοποιητές σε θερμοκρασίες κάτω των 1000°C δεν προβλέπονται κάποια

προβλήματα. Στα παραπάνω δείγματα διαπιστώνεται ότι, οι χαμηλές τιμές IDT και ST οφείλονται στις υψηλές τιμές συγκεντρώσεων K_2O .

Τέλος, συγκρίνοντας την παραγωγικότητα κάθε φυτείας με τα αποτελέσματα των θερμοχημικών διεργασιών, που πραγματοποιήθηκαν, συμπεραίνουμε ότι είναι κατάλληλες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας. Οι τιμές της παραγωγικότητας είναι ανάλογες με τις τιμές των ενεργειακών καλλιεργειών που απαντώνται σε διεθνές επίπεδο, ενώ τα βιοκαύσιμα αυτά χαρακτηρίζονται από χαμηλή περιεκτικότητα σε τέφρα, θείο και άζωτο και υψηλές τιμές πτητικών ουσιών και θερμογόνου δύναμης.

Από τις αναλύσεις τέφρας σε κύρια ανόργανα στοιχεία και βαρέα μέταλλα, που πραγματοποιήθηκαν, προκύπτει ότι είναι δυνατή η εναπόθεση της τέφρας στο έδαφος, χωρίς κάποια περιβαλλοντική επιβάρυνση, εντούτοις είναι πιθανή η δημιουργία επικαθήσεων και επισκωρώσεων στους καυστήρες, κατά την καύση σε υψηλές θερμοκρασίες.

Συνολικά, το καλάμι (*Arundo donax*) είχε την μεγαλύτερη απόδοση σε ξηρή ουσία με την καλύτερη θερμοχημική συμπεριφορά. Ακολούθησε το switchgrass (*Panicum virgatum*), και συγκεκριμένα αυτό της δεύτερης κοπής, και τέλος η αγριαγκινάρα (*Cynara cardunculus*).

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. Sanderine Nonhebel, 'Renewable energy and food supply: will there be enough land?', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 9 (2005) 191-201
- [2]. Anne Belinda Thomsen, Helen B. Klink, Anette Skammelsen Schmidt, 'Conversion of plant residues to valued added products', 1st World Conference on Biomass for Energy and Industry, Sevilla, Spain, 5-9 June 2000, 1075-1077
- [3]. J. Richardson, R. Bjorheden, P. Hakkila, A.T. Lowe, C.T. Smith, *Bioenergy from Sustainable Forestry: Guiding Principles and Practise*, pp.32-48, Kluwer Academic Publishers, 2002
- [4]. Ιωάννης Π. Φιλίππου, *Χημεία και Χημική Τεχνολογία του Ξύλου*, Εκδόσεις Γιαχούδη – Γιαπούλη, Θεσσαλονίκη, 1986
- [5]. Θεοχάρης Τσούτσος, *Αειφόρα Ενεργειακά Συστήματα*, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Άνοιξη 2005
- [6]. Piero Venturi, Gianpietro Venturi, 'Analysis of energy comparison for crops in European agricultural systems', *Biomass and Bioenergy* 25 (2003) 235-255
- [7]. Ashwini Kumar, 'Biomass for energy in developing countries: problems and future strategies', 1st World Conference on Biomass for Energy and Industry, Sevilla, Spain, 5-9 June 2000, 318-320
- [8]. Βάμβουκα Δέσποινα, 'Ενέργεια από βιομάζα', Σημειώσεις μαθήματος 'Βιομάζα, Βιοενέργεια και Περιβάλλον', 2005
- [9]. Monique Hoogwijk, Andre Faaij, Richard van den Broek, Goran Berndes, Dolf Gielen, Wim Turkenburg, 'Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy', *Biomass and Bioenergy* 25 (2003) 119-133
- [10]. John Kort, Michael Collins, David Ditsch, 'A review of soil erosion potential associated with biomass crops', *Biomass and Bioenergy*, Vol.14, No. 4, pp. 351-359, 1998
- [11]. Marjoleine C. Hanegraaf, Edo E. Biewinga, Gert van der Bijl, 'Assessing the ecological and economic sustainability of energy crops', *Biomass and Bioenergy*, Vol. 15, Nos. 4/5, pp. 345-355, 1998

- [12]. A.J. Moffat, A.T. Armstrong, J. Ockleston, 'The optimization of sewage sludge and effluent disposal on energy crops of short rotation hybrid poplar', *Biomass and Bioenergy* 20 (2001) 161-169
- [13]. M. Mardikis, I. Namatov, C. Panoutsou, 'Research and technological development in the field of energy crops in Greece', 1st World Conference on Biomass for Energy and Industry, Sevilla, Spain, 5-9 June 2000, 1502-1505
- [14]. S. Nonhebel, 'Energy yields in intensive and extensive biomass production systems', *Biomass and Bioenergy* 22 (2002) 159-167
- [15]. A. Hallam, I.C. Anderson, D.R. Buxton, 'Comparative economic analysis of perennial, annual and intercrops for biomass production', *Biomass and Bioenergy* 21 (2001) 407-424
- [16]. Στυλιανός Σ. Καρατάγλης, Φυσιολογία Φυτών, Εκδόσεις Art of Text, Θεσσαλονίκη 1999
- [17]. Laura K. Paine, Todd L. Peterson, D.J. Undersander, Kenneth C. Rineer, Gerald A. Bartelt, Stanley A. Temple, David W. Sample, Richard M. Klemme, 'Some ecological and socio – economic considerations for biomass energy crop production', *Biomass and Bioenergy*, Vol. 10, No. 4, pp. 231-242, 1996
- [18]. Pal Borjesson, 'Environmental effects of energy crop cultivation in Sweden I: Identification and Quantification', *Biomass and Bioenergy* 16 (1999) 137-154
- [19]. Σπύρος Αθ. Ντάφης, Δασική Οικολογία, Εκδόσεις Γιαχούδη - Γιαπούλη, Θεσσαλονίκη, 1986
- [20]. I. Lewandowski, J.C. Clifton – Brown, J.M.O. Scurlock, W. Huisman, 'Miscanthus: European experience with a novel energy crop', *Biomass and Bioenergy* 19 (2000) 209-227
- [21]. R.M. Saez, M. Varela, C.G. Barquero, E. Castellano, C. Cardiel, L. Kallivroussis, P.G. Soldatos, S. Rozakis, I. Nikolau, H. Schwaiger, G. Jungmeier, 'A multiple criteria decision tool for the integration of energy crops into the Southern Europe Energy System', 1st World Conference on Biomass for Energy and Industry, Sevilla, Spain, 5-9 June 2000, 1417-1419
- [22]. Ενεργειακές Καλλιέργειες για την παραγωγή υγρών και στερεών καυσίμων στην Ελλάδα, Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ), Υπουργείο Ανάπτυξης
- [23]. R. Venendaal, U. Jorgensen, C.A. Foster, 'European energy crops: a synthesis', *Biomass and Bioenergy*, Vol. 13, No. 3, pp. 147-185, 1997

- [24]. M.P. Ciria, E. Gonzalez, J.E. Carrasco, 'Brassica carinata as a new energy crop for the production of biomass for heat and electricity in Southern EU countries', 1st World Conference on Biomass for Energy and Industry, Sevilla, Spain, 5-9 June 2000, 218-221
- [25]. C. S. Panoutsou, E. Kipriotis, P.G. Soldatos, 'Estimation of energy crops breakeven points in northern Greece', 1st World Conference on Biomass for Energy and Industry, Sevilla, Spain, 5-9 June 2000, 463-466
- [26]. I. Piscionari, N. Sharma, G. Baviello, S. Orlandini, 'Promising industrial energy crop *Cynara Cardunculus*: a potential source for biomass for biomass production and alternative energy', *Energy Conversion and Management* 41 (2000) 1091-1105
- [27]. J. Clifton – Brown, I. Lewandowski, U. Jorgensen, D. Christian, A. Riche, K. Tayebi, G. Basch, K.U. Schwarz, J. Bonderup – Kjeldsen, B. Andersson, 'Crop development and yield of different *Miscanthus* genotypes grown at five sites distributed between Sweden and Portugal', 1st World Conference on Biomass for Energy and Industry, Sevilla, Spain, 5-9 June 2000, 210-213
- [28]. P. Venturi, J.K. Gigler, W. Huisman, 'Economical and technical comparison between herbaceous (*Miscanthus x giganteus*) and woody energy crops (*Salix viminalis*)', *Renewable energy* 16 (1999) 1023-1026
- [29]. M. Mardikis, M. Christou, E. Alexopoulou, 'Arundo donax population screening in Greece', 1st World Conference on Biomass for Energy and Industry, Sevilla, Spain, 5-9 June 2000, 1626-1629
- [30]. M. Christou, M. Mardikis, E. Alexopoulou, 'Propagation material and plant density effects on the Arundo donax yields', 1st World Conference on Biomass for Energy and Industry, Sevilla, Spain, 5-9 June 2000, 1622-1625
- [31]. Νικόλαος Ηρ. Αθανασιάδης, Δασική Βοτανική II, Εκδόσεις Γιαχούδη – Γιαπούλη, Θεσσαλονίκη 1986
- [32]. Βουρδουμπάς, Σημειώσεις Βιομάζας, 2002
- [33]. J.M. Encinar, J.F. Gonzales, J. Gonzales, 'Fixed-bed pyrolysis of *Cynara cardunculus* L. Products yields and compositions', *Fuel Processing Technology* 68 (2000) 209-222.
- [34]. J. Gominho, J.Fernandez, H. Pereira, 'Cynara cardunculus L.- a new fibre crop for pulp and paper production.' *Industrial Crop and Products* 13 (2001) 1-10.

- [35]. J.M. Encinar, J.F.González, J. González, “Steam gasification of *Cynara cardunculus* L.: influence of variables”, *Fuel Processing Technology* 75 (2002) 27-43.
- [36]. www.eeci.net/archive/archiveWhole.html
- [37]. M. Christou, M. Mardikis, E. Alexopoulou, “Biomass production from perennial crops in Greece.”, Report from EU project ‘Bioenergy chains’ ENK6-CT2001-00524
- [38]. E.Alexopoulou, N. Sharma, M. Christou, I. Piscioneri, V. Pignatelli, “ Long term studies on Switchgrass as an energy crop for Southern Europe”, 14th European Conference on Biomass, Paris 17-21/10/2005 (in press)
- [39]. E.Alexopoulou, M. Christou “Year effect on switchgrass biomass production”
- [40]. N. Sharma, I. Piscioneri, V. Pignatelli, E. Alexopoulou, M. Christou, M. Mardikis, W. Elbersen, “Effect of different Nitrogen treatments on the growth of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) varieties in Southern Europe”, 12th European Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, 17-21 June 2002, Amsterdam, the Netherlands
- [41]. E.Alexopoulou, M. Christou, M. Mardikis “Evaluation of switchgrass varieties in Greece”, 12th European Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, 17-21 June 2002, Amsterdam, the Netherlands
- [42]. E.Alexopoulou, M. Christou, M. Mardikis, “Evaluation of several switchgrass varieties in Greece and Italy”, *aspects of Applied Biology* 65, Biomass and energy crops II, 2001
- [43]. Jonas Dahl& Ingwald Obernberger, “Evaluation of the combustion characteristics of four perennial energy crops (*Arundo donax*, *Cynara cardunculus*, *Miscanthus x giganteus* and *Panicum virgatum*)”, 2nd World Conference for Industry and Climate Protection, 10-14 May 2004, Rome, Italy
- [44].J. Fernandez, M.D. Curt, S. Luque, P. Aguado, G. Sanchez, C. Lopez and M. Hidalgo, “Multilogical study of the contents in N, P& K of *Cynara cardunculus* L. grown for biomass production” 12th European Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, 17-21 June 2002, Amsterdam, the Netherlands
- [45]. www.ecn.nl
- [46].J. Gonzales Cortes, M.C. Rodriguez Molina, A. Ayuso Mateos, D. Gonzales Primo, “Screening *Cynara cardunculus* plants in field trials to optimize biomass yields in Southwestern Spain” 2nd World Conference for Industry and Climate Protection, 10-14 May 2004, Rome, Italy

- [47]. M. Christou, M. Mardikis, E. Alexopoulou, "Research on the effect of irrigation and nitrogen upon growth and yields of *Arundo donax* L. in Greece." aspects of Applied Biology 65, Biomass and energy crops II, 2001
- [48]. www.pfaf.org
- [49]. <http://davesgarden.com>
- [50]. www.biomatnet.org
- [51]. <http://bioenergy.ornl.gov>.
- [52]. I. Lewandowski, J.M.O. Scurlock, E. Lindvall, M. Christou, 'The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe.' Biomass and Bioenergy 25(2003) 335-361
- [53]. J.F. Gonzalez, Carmen M. Gonzalez-Garcia, A. Ramiro, J. Ganán, A. Ayuso, J. Turegano ' Use of energy crops for domestic heating with a mural boiler', Fuel Processing Technology xx (2006)xxx-xxx.
- [54]. R.Zhang, R.C. Brown, A. Suby, 'Thermochemical Generation of Hydrogen from Switchgrass', Energy & Fuel 2004, 18, 251-256.
- [55]. Χαχλαδάκης Ι (2004), 'Εκχύλιση τοξικών στοιχείων από τέφρες λιγνιτών και αγροτικών υπολειμμάτων στα καλλιεργούμενα εδάφη της Κρήτης', Μεταπτυχιακή διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων-Πολυτεχνείο Κρήτης.
- [56]. Larry Baxter, Thomas R. Miles, Thomas R. Miles Jr, Brian M. Jenkins, Thomas Milne, David Dayton, Richard W. Bryers, Larry L. Oden, 'The behavior of inorganic material in biomass-fired power boilers: field and laboratory experiences' Fuel Processing Technology 54 (1998) 47-78
- [57]. Wade A. Amos, 'Summary of Chariton Valley Switchgrass Co-Fire Testing at the Ottumwa Generating Station in Chillicothe, Iowa' NREL (National Renewable Energy Laboratory) (<http://biomass.ecria.com>)
- [58]. J.F. Gonzalez, Carmen M. Gonzalez-Garcia, A. Ramiro, Jeronimo Gonzalez, Eduardo Sabio, Jose Ganán, Miguel A. Rodriguez, 'Combustion optimisation of biomass residue pellets for domestic heating with a mural boiler' Biomass and Bioenergy 27 (2004) 145-154.
- [59]. B.M. Jenkins, L.L. Baxter, T.R. Miles Jr, T.R. Miles, 'Combustion properties of biomass', Fuel Processing Technology 54 (1998) 17-46.
- [60]. T. Heinzl, V. Siegle, H. Spliethoff, K.R.G. Hein, ' Investigation of slagging in pulverized fuel co-combustion of biomass and coal at a pilot-scale test facility', Fuel Processing Technology 54 (1998) 109-125

- [61]. M.A. Sanderson, R.L. Reed, S.B. Mc Laughlin, S.D. Wullschleger, B.V. Conger, D.J. Parrish, D.D. Wolf, C. Taliaferro, A.A. Hopkins, W.R. Ocumpaugh, M.A. Hussey, J.C. Read & C.R. Tischler, 'Switchgrass as a sustainable bioenergy crop', *Bioresource Technology* 56 (1996) 83-93.
- [62]. Samuel B. Mc Laughlin, Lynn Adams Kszos, 'Development of switchgrass (*Panicum virgatum*) as a bioenergy feedstock in the United States', *Biomass and Bioenergy* 28 (2005) 515-535
- [63] I. Lewandowski, D. Kauter, 'The influence of nitrogen fertilizer on the yield and combustion quality of whole grain crops for solid fuel use', *Industrial Crops and Products* 17 (2003) 103-117
- [64]. www.fao.org
- [65]. Robert R. Bakker, H.W. Elbersen, 'Managing ash content and quality in herbaceous biomass: an analysis from plant to product'.
- [66]. www.switchgrass.nl
- [67]. www.vt.tuwien.ac.at
- [68]. Ζωγράφος, Δ. (2001). "Μελέτη της επίδρασης της ανόργανης ύλης στην καύση αγροτικών υπολειμμάτων από καλλιέργειες της Κρήτης σε συνθήκες ρευστοποιημένης κλίνης", Διπλωματική Εργασία-Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων-Πολυτεχνείο Κρήτης.
- [69]. H.T. Kim, H.J. Bae, S.H. Lee, Preprints of the American Chemical Society Division of Fuel Chemistry, (1997) 214(47), 1107.

INTERNET SITES

www.sciencedirect.com
www.cres.gr
<http://pubs.acs.org>
www.ecn.nl

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Ονομασίες φυτών

Λατινική ονομασία	Κοινή ελληνική ονομασία
Eucalyptus globulus L.	Ευκάλυπτος, σφαιροειδής
Eucalyptus camaldulensis D.	Ευκάλυπτος, ρυγχωτός
Robinia pseudoacacia L.	Ψευδακακία
Arundo donax L.	Καλάμι
Miscanthus giganteus GREEF et DEU	Μίσχανθος
Cynara cardunculus L.	Αγριαγκινάρα
Panicum virgatum L.	Switchgrass
Sorghum bicolor L.	Γλυκό – κυτταρινούχο σόργο
Hibiscus cannabinus L.	Κέναφ
Brassica napus	Ελαιοκράμβη
Brassica carinata	Ελαιοκράμβη
Helianthus annuus L.	Ηλίανθος
Triticum aestivum L.	Σιτάρι
Beta vulgaris L.	Ζαχαρότευτλο
Zea mays L.	Αραβόσιτος
Hordeum sativum/Vulgare L.	Κριθάρι
Secale cereale	Σίκαλη
Cannabis sativa	Κανναβίς
Phalaris arundinacea	Καλάμι
Alnus spp.	Σκλήθρο
Salix spp.	Ιτιά
Populus spp.	Λεύκη
Betula spp.	Σημύδα
Solanum tuberosum	Πατάτα
Phragmites australis	Νεροκάλαμο
Onopordum nervosum	Σημύδα
Spartium junceum	Σπάρτο
Sinapis alba	Λαγνάνα (ήμερο σινάπι)
Helianthus tuberosus	Ηλίανθος

Πίνακες, σχήματα, εικόνες

Σχήμα 2.1	Τύποι, διαδικασίες παραγωγής τελικών προϊόντων βιομάζας και παγκόσμια έκταση ανά χρήση γης.
Πίνακας 2.1	Κατανάλωση, απόδοση και απαιτούμενη έκταση για παραγωγή τροφίμων και ενέργειας
Σχήμα 2.2	Ο κύκλος του CO ₂
Σχήμα 2.3	Φυτά ενεργειακών καλλιεργειών, διαδικασίες μετατροπής και προϊόντα
Πίνακας 2.2	Στοιχεία αξιολόγησης επιλογής σιτηρών για παραγωγή αιθανόλης
Σχήμα 2.4	Κύκλος του Calvin ή C ₃ κύκλος
Σχήμα 2.5	Κύκλος ζωής ενεργειακού φυτού
Πίνακας 2.3	Χαρακτηριστικά καυσίμου από ενεργειακές καλλιέργειες

Πίνακας 2.4	Χημική ανάλυση τέφρας ενεργειακών καλλιεργειών
Εικόνα 2.1	<i>Sorghum bicolor</i>
Εικόνα 2.2	<i>Brassica napus</i>
Εικόνα 2.3	<i>Helianthus annuus</i>
Εικόνα 2.4	<i>Miscanthus x giganteus</i>
Εικόνα 2.5	<i>Cynara cardunculus</i>
Εικόνα 2.6	<i>Panicum virgatum</i>
Εικόνα 2.7	<i>Arundo donax</i>
Πίνακας 2.5	Πολυετή αγρωστώδη ενεργειακά φυτά
Πίνακας 2.6	Πολυετή ξυλώδη ενεργειακά φυτά
Εικόνα 2.8	<i>Salix viminalis</i>
Εικόνα 2.9	<i>Populus tremuloides</i>
Εικόνα 2.10	<i>Eucalyptus globulus</i>
Πίνακας 3.1	Μηνιαίες τιμές καιρικών συνθηκών κατά την περίοδο Ιουνίου 2003-Νοεμβρίου 2004
Σχήμα 3.1	Εξατμισοδιαπνοή των τριών επιπέδων άρδευσης σε σύγκριση με τη συνολική εξατμισοδιαπνοή, για την τρίτη αυξητική περίοδο του καλαμιού
Πίνακας 3.2	Αναλύσεις για το υπερκείμενο στρώμα εδάφους (0-20cm) στις πειραματικές φυτείες του switchgrass
Σχήμα 3.2	Μέσος όρος ξηρής ουσίας στις πειραματικές φυτείες του switchgrass, μετά τα τρία επίπεδα άρδευσης.
Σχήμα 3.3	Μέσος όρος ξηρής ουσίας στις πειραματικές φυτείες του switchgrass, μετά τα τρία επίπεδα λίπανσης
Σχήμα 3.4	Περιεκτικότητα σε υγρασία του συγκομισμένου υλικού στις πειραματικές φυτείες switchgrass, μετά τα τρία επίπεδα άρδευσης.
Εικόνα 3.1	Πειραματική φυτεία αγριαγκινάρας στις 11/12/03.
Εικόνα 3.2	Πειραματική φυτεία αγριαγκινάρας στις 19/12/03
Εικόνα 3.3	Πειραματική φυτεία αγριαγκινάρας στις 26/01/04.
Εικόνα 3.4	Πειραματική φυτεία αγριαγκινάρας στις 06/02/04.
Εικόνα 3.5	Πειραματική φυτεία αγριαγκινάρας στις 09/03/04.
Εικόνα 3.6	Πειραματική φυτεία αγριαγκινάρας στις 29/06/04
Σχήμα 3.5	Μέσος όρος ξηρής ουσίας στις πειραματικές φυτείες της αγριαγκινάρας, μετά τα τρία επίπεδα λίπανσης
Σχήμα 3.6	Μέσος όρος ξηρής ουσίας στις πειραματικές φυτείες του καλαμιού, μετά τα τρία επίπεδα άρδευσης
Σχήμα 3.7	Μέσος όρος ξηρής ουσίας στις πειραματικές φυτείες του καλαμιού, μετά τα τρία επίπεδα λίπανσης
Σχήμα 3.8	Περιεκτικότητα σε υγρασία του συγκομισμένου υλικού στις πειραματικές φυτείες καλαμιού, μετά τα τρία επίπεδα άρδευσης.
Πίνακας 3.3	Αναλύσεις για το υπερκείμενο στρώμα εδάφους (0-20cm) στις πειραματικές φυτείες καλαμιού
Σχήμα 4.1.	Αυτόματος στοιχειακός αναλυτής CHN-600 της LECO
Σχήμα 4.2	Αυτόματο θερμιδόμετρο AC-300 της LECO
Εικόνα 4.1	Θερμικό μικροσκόπιο Leitz
Εικόνα 4.2	Κλίβανος θερμικού μικροσκοπίου Leitz
Πίνακας 5.1.1.	Προσεγγιστική ανάλυση <i>Cynara cardunculus</i>

Πίνακας 5.1.2.	Προσεγγιστική ανάλυση <i>Panicum virgatum</i> 18/11/2003
Πίνακας 5.1.3.	Προσεγγιστική ανάλυση <i>Panicum virgatum</i> 21/01/2004
Πίνακας 5.1.4.	Προσεγγιστική ανάλυση <i>Arundo donax</i>
Πίνακας 5.1.5.	Στοιχειακή ανάλυση <i>Cynara cardunculus</i>
Πίνακας 5.1.6.	Στοιχειακή ανάλυση <i>Panicum virgatum</i> 18/11/2003
Πίνακας 5.1.7.	Στοιχειακή ανάλυση <i>Panicum virgatum</i> 21/01/2004
Πίνακας 5.1.8.	Στοιχειακή ανάλυση <i>Arundo donax</i>
Πίνακας 5.1.9.	Θερμογόνος Δύναμη των φυτών
Πίνακας 5.2.1.	Χημική ανάλυση τέφρων των δειγμάτων σε ιχνοστοιχεία (ppm)
Διάγραμμα 5.2.1.	Περιεκτικότητα (%) των κύριων οξειδίων τέφρας της αγριαγκινάρας 10/08/2004
Πίνακας 5.2.2.	Συγκεντρώσεις κύριων οξειδίων στις τέφρες των δειγμάτων αγριαγκινάρας (%) 10/08/2004
Διάγραμμα 5.2.2.	Περιεκτικότητα (%) των κύριων οξειδίων τέφρας του Switchgrass 18/11/2003
Πίνακας 5.2.3.	Συγκεντρώσεις κύριων οξειδίων στις τέφρες των δειγμάτων Switchgrass 18/11/2003 (%)
Διάγραμμα 5.2.3.	Περιεκτικότητα (%) των κύριων οξειδίων τέφρας του Switchgrass 21/1/2004
Πίνακας 5.2.4.	Συγκεντρώσεις κύριων οξειδίων στις τέφρες των δειγμάτων Switchgrass 21/2/2004 (%)
Διάγραμμα 5.2.4.	Περιεκτικότητα (%) των κύριων οξειδίων τέφρας του <i>Arundo donax</i> 09/03/2004
Πίνακας 5.2.5.	Συγκεντρώσεις κύριων οξειδίων στις τέφρες των δειγμάτων <i>Arundo donax</i> (%) 09/03/2004
Πίνακας 5.3.1	Θερμοκρασίες ροής της τέφρας της <i>Cynara cardunculus</i> (°C)
Διάγραμμα 5.3.1.	Θερμοκρασίες ροής της τέφρας της <i>Cynara cardunculus</i> (°C)
Πίνακας 5.3.2	Θερμοκρασίες ροής των τέφρων του <i>Panicum virgatum</i> και για τις δυο συγκομιδές (°C)
Διάγραμμα 5.3.2.	Θερμοκρασίες ροής των τέφρων του <i>Panicum virgatum</i> και για τις δυο συγκομιδές (°C)
Πίνακας 5.3.3	Θερμοκρασίες ροής της τέφρας του <i>Arundo donax</i> (°C)
Διάγραμμα 5.3.3.	Θερμοκρασίες ροής της τέφρας του <i>Arundo donax</i> (°C)

ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

SWITCHGRASS (Panicum virgatum) 18/11/2003

ΔΕΙΓΜΑ	ΥΓΡΑΣΙΑ (%)	ΤΕΦΡΑ (%) επί ξηρού	ΤΕΦΡΑ (%) επί φυσικού	ΠΤΗΤΙΚΑ (%)	ΜΟΝΙΜΟΣ ΑΝΘΡΑΚΑΣ (%)
Φύλλα I ₀ N ₀	6,04	7,90	7,42	73,18	18,92
Φύλλα I ₁ N ₁	6,96	10,02	9,32	70,12	19,86
Φύλλα I ₂ N ₂	6,68	8,56	7,99	72,13	19,31
Φύλλα I ₁ N ₀	6,25	8,29	7,77		
Φύλλα I ₁ N ₂	6,60	8,22	7,68		
Φύλλα I ₀ N ₁	6,48	7,39	6,91		
Φύλλα I ₀ N ₂	5,78	8,50	8,01		
Φύλλα I ₂ N ₀	5,20	8,23	7,80		
Φύλλα I ₂ N ₁	6,39	9,73	9,11		
Στελέχη I ₀ N ₀	2,99	2,17	2,11	82,28	15,55
Στελέχη I ₁ N ₁	4,46	2,44	2,33	76,46	21,10
Στελέχη I ₂ N ₂	4,83	1,84	1,75	79,16	19,00
Στελέχη I ₁ N ₀	5,14	2,06	1,95		
Στελέχη I ₁ N ₂	3,74	1,40	1,35		
Στελέχη I ₀ N ₁	2,50	1,96	1,91		
Στελέχη I ₀ N ₂	5,37	3,17	3,00		
Στελέχη I ₂ N ₀	4,78	1,92	1,83		
Στελέχη I ₂ N ₁	4,28	2,93	2,80		

SWITCHGRASS (*Panicum virgatum*) 21/01/2004

ΔΕΙΓΜΑ	ΥΓΡΑΣΙΑ (%)	ΤΕΦΡΑ (%) επί ξηρού	ΤΕΦΡΑ (%) επί φυσικού	ΠΤΗΤΙΚΑ (%)	ΜΟΝΙΜΟΣ ΑΝΘΡΑΚΑΣ (%)
Φύλλα I ₀ N ₀	7,77	8,47	7,81	84,11	7,42
Φύλλα I ₁ N ₁	6,97	7,11	6,61	77,88	15,01
Φύλλα I ₂ N ₂	6,12	5,64	5,29	88,25	6,11
Φύλλα I ₁ N ₀	7,20	6,65	6,17		
Φύλλα I ₁ N ₂	6,99	6,79	6,32		
Φύλλα I ₀ N ₁	7,45	9,39	8,69		
Φύλλα I ₀ N ₂	6,98	7,32	6,81		
Φύλλα I ₂ N ₀	7,84	7,95	7,33		
Φύλλα I ₂ N ₁	6,52	6,88	6,43		
Στελέχη I ₀ N ₀	2,19	2,45	2,40	77,67	19,88
Στελέχη I ₁ N ₁	4,37	1,89	1,81	76,00	22,11
Στελέχη I ₂ N ₂	3,16	2,04	1,98	70,15	27,81
Στελέχη I ₁ N ₀	4,11	1,50	1,44		
Στελέχη I ₁ N ₂	3,03	2,09	2,03		
Στελέχη I ₀ N ₁	2,58	3,48	3,39		
Στελέχη I ₀ N ₂	4,37	2,71	2,59		
Στελέχη I ₂ N ₀	3,19	1,43	1,38		
Στελέχη I ₂ N ₁	2,20	2,07	2,02		

ΚΑΛΑΜΙ (*Arundo donax*)

ΔΕΙΓΜΑ	ΥΓΡΑΣΙΑ (%)	ΤΕΦΡΑ (%) επί ξηρού	ΤΕΦΡΑ (%) επί φυσικού	ΠΗΤΤΙΚΑ (%)	ΜΟΝΙΜΟΣ ΑΝΘΡΑΚΑΣ (%)
Φύλλα I ₀ N ₀	3,90	8,00	7,69	76,10	15,90
Φύλλα I ₁ N ₁	5,74	4,52	4,26	83,22	12,26
Φύλλα I ₂ N ₂	5,84	10,14	9,55	77,08	12,78
Φύλλα I ₁ N ₀	6,07	4,79	4,50		
Φύλλα I ₁ N ₂	3,83	4,68	4,50		
Φύλλα I ₀ N ₁	4,88	5,92	5,63		
Φύλλα I ₀ N ₂	4,89	7,02	6,68		
Φύλλα I ₂ N ₀	2,66	5,58	5,43		
Φύλλα I ₂ N ₁	2,11	6,27	6,14		
Στελέχη I ₀ N ₀	3,38	3,09	2,99	68,38	28,53
Στελέχη I ₁ N ₁	0,58	2,48	2,47	79,72	17,80
Στελέχη I ₂ N ₂	1,21	2,81	2,78	79,32	17,87
Στελέχη I ₁ N ₀	3,56	1,91	1,84		
Στελέχη I ₁ N ₂	2,12	2,63	2,57		
Στελέχη I ₀ N ₁	2,83	2,00	1,94		
Στελέχη I ₀ N ₂	4,94	2,06	1,96		
Στελέχη I ₂ N ₀	4,27	2,57	2,46		
Στελέχη I ₂ N ₁	4,41	2,98	2,85		

ΣΤΟΙΧΕΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

SWITCHGRASS (Panicum virgatum) 18/11/2003

ΔΕΙΓΜΑ	ΤΕΦΡΑ (%) επί ξηρού	C %	H %	N %	S %	O %
Φύλλα I ₀ N ₀	7,90	42,67	6,44	0,35	0,070	42,57
Φύλλα I ₁ N ₁	10,02	41,43	6,26	0,69	0,076	41,52
Φύλλα I ₂ N ₂	8,56	42,13	6,46	0,67	0,057	42,12
Φύλλα I ₁ N ₀	8,29	42,65	6,51	0,55	0,073	41,93
Φύλλα I ₁ N ₂	8,22	42,68	6,44	1,11	0,090	41,46
Φύλλα I ₀ N ₁	7,39	42,56	6,37	0,27	0,070	43,34
Φύλλα I ₀ N ₂	8,50	42,71	6,41	0,42	0,088	41,87
Φύλλα I ₂ N ₀	8,23	42,69	6,32	0,39	0,085	42,28
Φύλλα I ₂ N ₁	9,73	42,02	6,25	0,46	0,077	41,46
Στελέχη I ₀ N ₀	2,17	45,30	6,61	0,28	0,029	45,61
Στελέχη I ₁ N ₁	2,44	45,56	6,54	0,21	0,047	45,20
Στελέχη I ₂ N ₂	1,84	45,84	6,57	0,21	0,023	45,52
Στελέχη I ₁ N ₀	2,06	45,57	6,59	0,50	0,032	45,25
Στελέχη I ₁ N ₂	1,40	45,62	6,52	0,49	0,065	45,91
Στελέχη I ₀ N ₁	1,96	45,89	6,48	0,38	0,069	45,22
Στελέχη I ₀ N ₂	3,17	45,93	6,59	0,33	0,024	43,96
Στελέχη I ₂ N ₀	1,92	45,23	6,54	0,22	0,029	46,06
Στελέχη I ₂ N ₁	2,93	45,52	6,51	0,31	0,035	44,69

SWITCHGRASS (*Panicum virgatum*) 21/01/2004

ΔΕΙΓΜΑ	ΤΕΦΡΑ (%) επί ξηρού	C %	H	N %	S %	O %
Φύλλα I ₀ N ₀	8,47	43,36	6,30	0,36	0,07	41,44
Φύλλα I ₁ N ₁	7,11	43,42	6,49	0,45	0,07	42,46
Φύλλα I ₂ N ₂	5,64	43,72	6,49	0,51	0,06	43,58
Φύλλα I ₁ N ₀	6,65	43,68	6,50	0,59	0,07	42,51
Φύλλα I ₁ N ₂	6,79	43,52	6,42	0,48	0,10	42,69
Φύλλα I ₀ N ₁	9,39	42,01	6,23	0,39	0,09	41,89
Φύλλα I ₀ N ₂	7,32	43,28	6,12	0,32	0,09	42,87
Φύλλα I ₂ N ₀	7,95	43,52	6,29	0,59	0,05	41,60
Φύλλα I ₂ N ₁	6,88	42,89	6,32	0,42	0,08	43,41
Στελέχη I ₀ N ₀	2,45	45,58	6,45	0,10	0,04	45,38
Στελέχη I ₁ N ₁	1,89	45,32	6,60	0,33	0,08	45,78
Στελέχη I ₂ N ₂	2,04	46,00	6,50	0,30	0,05	45,11
Στελέχη I ₁ N ₀	1,50	44,79	6,43	0,47	0,06	46,75
Στελέχη I ₁ N ₂	2,09	45,82	6,39	0,34	0,08	45,28
Στελέχη I ₀ N ₁	3,48	45,97	6,46	0,39	0,04	43,66
Στελέχη I ₀ N ₂	2,71	45,53	6,56	0,37	0,07	44,76
Στελέχη I ₂ N ₀	1,43	45,61	6,54	0,01	0,05	46,36
Στελέχη I ₂ N ₁	2,07	45,59	6,59	0,21	0,05	45,49

ΚΑΛΑΜΙ (*Arundo donax*)

ΔΕΙΓΜΑ	ΤΕΦΡΑ (%) επί ξηρού	C %	H	N %	S %	O %
Φύλλα I ₀ N ₀	8,00	42,85	6,39	0,58	0,13	42,05
Φύλλα I ₁ N ₁	4,52	45,09	6,62	0,95	0,60	42,22
Φύλλα I ₂ N ₂	10,14	42,63	6,34	0,70	0,63	39,56
Φύλλα I ₁ N ₀	4,79	44,89	6,59	1,25	0,14	42,34
Φύλλα I ₁ N ₂	4,68	44,46	6,59	0,89	0,14	43,24
Φύλλα I ₀ N ₁	5,92	43,74	6,48	0,62	0,15	43,09
Φύλλα I ₀ N ₂	7,02	44,01	6,6	1,11	0,12	41,14
Φύλλα I ₂ N ₀	5,58	43,81	6,52	0,72	0,12	43,25
Φύλλα I ₂ N ₁	6,27	43,45	6,46	0,94	0,13	42,75
Στελέχη I ₀ N ₀	3,09	44,85	6,26	0,58	0,09	45,13
Στελέχη I ₁ N ₁	2,48	45,35	6,11	0,28	0,07	45,71
Στελέχη I ₂ N ₂	2,81	45,48	6,15	1,52	0,07	43,97
Στελέχη I ₁ N ₀	1,91	45,79	6,24	0,62	0,07	45,37
Στελέχη I ₁ N ₂	2,63	45,68	6,17	1,12	0,07	44,33
Στελέχη I ₀ N ₁	2,00	44,76	6,19	0,65	0,14	46,26
Στελέχη I ₀ N ₂	2,06	45,54	5,96	0,94	0,08	45,42
Στελέχη I ₂ N ₀	2,57	44,99	6,19	0,25	0,11	45,89
Στελέχη I ₂ N ₁	2,98	45,71	6,55	0,49	0,06	44,21

ΘΕΡΜΟΓΟΝΟΣ ΔΥΝΑΜΗ

	ΔΕΙΓΜΑ	ΥΓΡΑΣΙΑ (%)	ΤΕΦΡΑ (%) επί ξηρού	Α.Θ.Δ. (cal/gr) επί φυσικού	Κ.Θ.Δ (cal/gr) επί φυσικού	Α.Θ.Δ. (MJ/kg) επί φυσικού	Κ.Θ.Δ (MJ/kg) επί φυσικού	Α.Θ.Δ. (cal/gr) επί ξηρού	Α.Θ.Δ. (MJ/kg) επί ξηρού
ΑΓΡΙΑΓΚΙΝΑΡΑ	Φύλλα N ₀	8,03	29,57	4297,50	4086,26	17,98	17,10	4672,72	19,55
	Φύλλα N ₄₀	8,37	25,75	4658,20	4435,81	19,49	18,56	5083,71	21,27
	Φύλλα N ₁₂₀	8,87	17,87	5120,50	4875,75	21,42	20,40	5618,90	23,51
	Στελέχη N ₀	8,75	7,61	5141,30	4869,93	21,51	20,38	5634,30	23,57
	Στελέχη N ₄₀	8,62	7,04	5372,10	5099,65	22,48	21,34	5878,86	24,60
	Στελέχη N ₁₂₀	8,71	6,86	5218,60	4945,38	21,83	20,69	5716,51	23,92
	Καρπός N ₀	7,05	5,68	6186,80	5915,82	25,89	24,75	6656,05	27,85
	Καρπός N ₄₀	7,12	5,32	6367,30	6095,15	26,64	25,50	6855,40	28,68
	Καρπός N ₁₂₀	6,57	5,35	6404,30	6133,99	26,80	25,66	6854,65	28,68
SWITCHGRASS 18/11/2003	Φύλλα I ₀ N ₀	6,04	7,90	5750,60	5488,71	24,06	22,96	6120,26	25,61
	Φύλλα I ₁ N ₁	6,96	10,02	5738,10	5478,83	24,01	22,92	6167,35	25,80
	Φύλλα I ₂ N ₂	6,68	8,56	6221,40	5959,19	26,03	24,93	6666,74	27,89
	Φύλλα I ₁ N ₀	6,25	8,29	5724,70	5463,16	23,95	22,86	6106,35	25,55
	Φύλλα I ₁ N ₂	6,60	8,22	5432,80	5169,95	22,73	21,63	5816,70	24,34
	Φύλλα I ₀ N ₁	6,48	7,39	5750,30	5485,65	24,06	22,95	6148,74	25,73
	Φύλλα I ₀ N ₂	5,78	8,50	5640,80	5381,33	23,60	22,52	5986,84	25,05
	Φύλλα I ₂ N ₀	5,20	8,23	5570,10	5311,78	23,31	22,22	5875,63	24,58
	Φύλλα I ₂ N ₁	6,39	9,73	5690,10	5431,90	23,81	22,73	6078,52	25,43
	Στελέχη I ₀ N ₀	2,99	2,17	5333,20	5066,04	22,31	21,20	5497,58	23,00

SWITCHGRASS 21/01/2004	Στελέχη I ₁ N ₁	4,46	2,44	5454,60	5183,42	22,82	21,69	5709,23	23,89
	Στελέχη I ₂ N ₂	4,83	1,84	5365,80	5091,85	22,45	21,30	5638,12	23,59
	Στελέχη I ₁ N ₀	5,14	2,06	5100,50	4826,14	21,34	20,19	5376,87	22,50
	Στελέχη I ₁ N ₂	3,74	1,40	5237,50	4965,90	21,91	20,78	5440,99	22,77
	Στελέχη I ₀ N ₁	2,50	1,96	5206,00	4939,87	21,78	20,67	5339,49	22,34
	Στελέχη I ₀ N ₂	5,37	3,17	5539,50	5267,32	23,18	22,04	5853,85	24,49
	Στελέχη I ₂ N ₀	4,78	1,92	5483,50	5209,92	22,94	21,80	5758,77	24,09
	Στελέχη I ₂ N ₁	4,28	2,93	5537,60	5268,29	23,17	22,04	5785,21	24,21
	Φύλλα I ₀ N ₀	7,77	8,47	5291,40	5025,45	22,14	21,03	5737,18	24,00
	Φύλλα I ₁ N ₁	6,97	7,11	5848,40	5581,44	24,47	23,35	6286,57	26,30
	Φύλλα I ₂ N ₂	6,12	5,64	5728,90	5460,81	23,97	22,85	6102,36	25,53
	Φύλλα I ₁ N ₀	7,20	6,65	6426,50	6157,59	26,89	25,76	6925,11	28,97
	Φύλλα I ₁ N ₂	6,99	6,79	5833,90	5566,03	24,41	23,29	6272,34	26,24
	Φύλλα I ₀ N ₁	7,45	9,39	5146,30	4883,80	21,53	20,43	5560,56	23,27
	Φύλλα I ₀ N ₂	6,98	7,32	5530,90	5264,46	23,14	22,03	5945,93	24,88
	Φύλλα I ₂ N ₀	7,84	7,95	5095,80	4828,25	21,32	20,20	5529,30	23,13
	Φύλλα I ₂ N ₁	6,52	6,88	5751,20	5485,08	24,06	22,95	6152,33	25,74
	Στελέχη I ₀ N ₀	2,19	2,45	5856,60	5592,75	24,50	23,40	5987,73	25,05
	Στελέχη I ₁ N ₁	4,37	1,89	5512,30	5239,96	23,06	21,92	5764,20	24,12
	Στελέχη I ₂ N ₂	3,16	2,04	5575,00	5306,95	23,33	22,20	5756,92	24,09
	Στελέχη I ₁ N ₀	4,11	1,50	4878,60	4606,07	20,41	19,27	5087,70	21,29
	Στελέχη I ₁ N ₂	3,03	2,09	5243,10	4975,60	21,94	20,82	5406,93	22,62

ΚΑΛΛΑΜΙ	Στελέχη I ₀ N ₁	2,58	3,48	5434,90	5172,51	22,74	21,64	5578,83	23,34
	Στελέχη I ₀ N ₂	4,37	2,71	5354,00	5083,82	22,40	21,27	5598,66	23,42
	Στελέχη I ₂ N ₀	3,19	1,43	5470,50	5200,75	22,89	21,76	5650,76	23,64
	Στελέχη I ₂ N ₁	2,20	2,07	5080,60	4815,72	21,26	20,15	5194,89	21,74
	Φύλλα I ₀ N ₀	3,90	8,00	4987,10	4732,36	20,87	19,80	5189,49	21,71
	Φύλλα I ₁ N ₁	5,74	4,52	6072,00	5802,18	25,41	24,28	6441,76	26,95
	Φύλλα I ₂ N ₂	5,84	10,14	5315,30	5059,95	22,24	21,17	5644,97	23,62
	Φύλλα I ₁ N ₀	6,07	4,79	5847,50	5577,33	24,47	23,34	6225,38	26,05
	Φύλλα I ₁ N ₂	3,83	4,68	4703,00	4439,75	19,68	18,58	4890,30	20,46
	Φύλλα I ₀ N ₁	4,88	5,92	4910,20	4646,83	20,54	19,44	5162,11	21,60
	Φύλλα I ₀ N ₂	4,89	7,02	4966,60	4706,10	20,78	19,69	5221,95	21,85
	Φύλλα I ₂ N ₀	2,66	5,58	4870,20	4613,08	20,38	19,30	5003,29	20,93
	Φύλλα I ₂ N ₁	2,11	6,27	5324,00	5070,47	22,28	21,21	5438,76	22,76
	Στελέχη I ₀ N ₀	3,38	3,09	5608,70	5342,71	23,47	22,35	5804,91	24,29
	Στελέχη I ₁ N ₁	0,58	2,48	5872,40	5613,81	24,57	23,49	5906,66	24,71
	Στελέχη I ₂ N ₂	1,21	2,81	5795,80	5536,05	24,25	23,16	5866,79	24,55
	Στελέχη I ₁ N ₀	3,56	1,91	5531,50	5261,82	23,14	22,02	5735,69	24,00
	Στελέχη I ₁ N ₂	2,12	2,63	5717,00	5453,85	23,92	22,82	5840,83	24,44
	Στελέχη I ₀ N ₁	2,83	2,00	5190,90	4923,81	21,72	20,60	5342,08	22,35
	Στελέχη I ₀ N ₂	4,94	2,06	5488,70	5214,98	22,96	21,82	5773,93	24,16
	Στελέχη I ₂ N ₀	4,27	2,57	5295,00	5024,78	22,15	21,02	5531,18	23,14

Στελέχη I ₂ N ₁	4,41	2,98	5006,60	4737,01	20,95	19,82	5237,58	21,91
---------------------------------------	------	------	---------	---------	-------	-------	---------	-------

Μονάδες μέτρησης και παράγοντες μετατροπής

Πρόθεμα	Σύμβολο	Δείκτης
Exa	E	10^{18}
Peta	P	10^{15}
Tera	T	10^{12}
Giga	G	10^9
Mega	M	10^6
Kilo	K	10^3

Μέτρηση επιφάνειας		
1 εκτάριο (ha)	10 στρέμματα	10.000 τετρ. μέτρα (m^2)
1 στρέμμα	0.1 εκτάρια (ha)	1.000 τετρ. μέτρα (m^2)

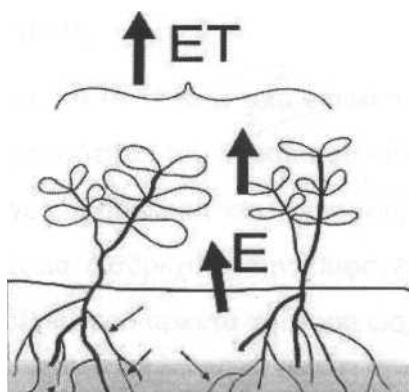
Μονάδες και ισοδύναμα	
d	ημέρα
h	ώρα
ha	εκτάριο
Gha	10^9 ha = 10^{10} στρέμματα
m	μέτρο
t	τόνος = 1000 kg = Mg
toe	μετρικός τόνος ισοδύναμου πετρελαίου = 41.868 GJ
MTOE	10^6 toe
yr	έτος
j	joule
lit	λίτρα
EJ	exajoule

ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ

Η λειτουργία της εξατμισοδιαπνοής

Η εξατμισοδιαπνοή (ET) είναι ο συνδυασμός δύο διαδικασιών, μέσω των οποίων χάνεται νερό και οι οποίες μελετούνται από κοινού:

της διαπνοής, δηλαδή του νερού που παίρνει το φυτό από το έδαφος και στη συνέχεια το αποβάλλει προς τον ατμοσφαιρικό αέρα και της εξάτμισης, δηλαδή του νερού που εξατμίζεται κατευθείαν από την επιφάνεια του εδάφους.



Η εξατμισοδιαπνοή (ET) είναι ο συνδυασμός δύο διαδικασιών μέσω των οποίων χάνεται νερό, της διαπνοής και της εξάτμισης

Εξάτμιση

Εξάτμιση είναι η διαδικασία κατά την οποία υγρό νερό από μια επιφάνεια μεταπίπτει από την υγρή στην αέρια φάση και απομακρύνεται από την επιφάνεια προς την υπερκείμενη της ατμόσφαιρα. Το νερό εξατμίζεται από ποικίλες επιφάνειες, όπως είναι οι λίμνες, τα ποτάμια, το οδόστρωμα, τα εδάφη και η υγρή βλάστηση.

Για να αλλάξει η κατάσταση των μορίων του νερού από την υγρή στην αέρια φάση και να υπάρξει εξάτμιση απαιτείται ενέργεια (για την εξάτμιση ενός γραμμαρίου

νερού χρειάζεται ενέργεια ίση περίπου με 590 cal). Αυτή η ενέργεια παρέχεται κυρίως από την ηλιακή ακτινοβολία και σε μικρότερη έκταση από τη θερμοκρασία του αέρα.

Η κινητήριος δύναμη για μετακινηθεί ο ατμός του νερού από την επιφάνεια που εξατμίζεται είναι η διαφορά μεταξύ της πίεσης του ατμού στην επιφάνεια και της πίεσης της γύρω ατμόσφαιρας. Δηλαδή θα πρέπει η συγκέντρωση των υδρατμών του αέρα που υπέρκειται της επιφάνειας να είναι μικρότερη από ότι στην επιφάνεια. Καθώς η εξάτμιση συνεχίζεται, ο γύρω αέρας σταδιακά έρχεται σε κατάσταση κορεσμού και η διαδικασία της εξάτμισης σταδιακά επιβραδύνεται και μπορεί να σταματήσει και τελείως αν ο υγρός αέρας δεν μεταφέρεται στην ατμόσφαιρα και δεν ανανεώνεται με συνέπεια να δημιουργηθεί κατάσταση ισορροπίας.

Στην πραγματικότητα οι άνεμοι που επικρατούν κοντά στη γήινη επιφάνεια δεν επιτρέπουν τη διαμόρφωση μιας τέτοιας ισορροπίας, απομακρύνουν τους υδρατμούς πάνω από τις υγρές επιφάνειες και διατηρούν την διαφορά πίεσης υδρατμών που εξασφαλίζει τη συνέχιση της εξάτμισης. Η αντικατάσταση αυτή του υγρού αέρα με άλλον πιο ξηρό εξαρτάται σημαντικά από την ταχύτητα του ανέμου.

Γι' αυτό το λόγο ότι η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία του αέρα, η υγρασία του αέρα και η ταχύτητα του ανέμου είναι κλιματολογικοί παράγοντες πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον υπολογισμό της εξάτμισης

Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την εξάτμιση, όταν αυτή γίνεται από επιφάνεια εδάφους, είναι ο βαθμός σκίασης της βλάστησης και η ποσότητα του νερού που είναι διαθέσιμη στην επιφάνεια του εδάφους. Οι συχνές βροχές, η άρδευση και η μεταφορά του νερού από τα βαθύτερα στρώματα προς την επιφάνεια διαβρέχουν την επιφάνεια του εδάφους.

Όπου το έδαφος έχει την ικανότητα να παρέχει νερό αρκετά γρήγορα ώστε να ικανοποιούνται οι ανάγκες σε εξάτμιση, η εξάτμιση από το έδαφος καθορίζεται μόνο από τις μετεωρολογικές συνθήκες. Όμως, όπου το διάστημα μεταξύ βροχών ή ποτισμάτων είναι μεγάλο και η ικανότητα του εδάφους να φέρνει νερό μέχρι την επιφάνεια του είναι μικρή, η περιεκτικότητα του επιφανειακού εδάφους σε νερό

πέφτει και αυτό οδηγεί στην ξήρανση του. Κάτω από αυτές τις συνθήκες η περιορισμένη διαθεσιμότητα σε νερό ασκεί περιοριστική δράση στην εξάτμιση του εδάφους. Σε πλήρης απουσία νερού στην επιφάνεια του εδάφους, η εξάτμιση μειώνεται γρήγορα και μπορεί να σταματήσει σχεδόν τελείως μέσα σε μερικές μόνο ημέρες.

Διαπνοή

Ο όρος διαπνοή περιλαμβάνει την εξάτμιση του υγρού νερού που περιέχεται στους φυτικούς ιστούς ενός φυτού και του ατμού που μετακινείται στην ατμόσφαιρα. Τα φυτά κατά κύριο λόγο χάνουν νερό μέσω των στομάτων. Τα στόματα είναι μικρά ανοίγματα πάνω στο φύλλο μέσω των οποίων περνούν αέρια και νερό. Το νερό μαζί με μερικά θρεπτικά στοιχεία λαμβάνεται από τις ρίζες και μεταφέρεται στο φυτό. Η εξάτμιση λαμβάνει χώρα μέσα στο φύλλο, δηλαδή στους μεσοκυττάριους χώρους, και η ανταλλαγή του ατμού με την ατμόσφαιρα ελέγχεται από το άνοιγμα των στομάτων. Σχεδόν όλο το νερό που παίρνει το φυτό χάνεται μέσω της διαπνοής και μόνο ένα πολύ μικρό κλάσμα χρησιμοποιείται μέσα στο φυτό.

Η διαπνοή, όπως και η απευθείας εξάτμιση, απαιτεί ενέργεια και έτσι εξαρτάται από την κάλυψη των αναγκών σε ενέργεια και εκτός αυτής από τη σταθερά εξάτμισης και τον άνεμο. Γι' αυτό η ακτινοβολία, η θερμοκρασία και η υγρασία του αέρα και ο άνεμος θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής. Η περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία και η ικανότητα του να μεταφέρει το νερό αυτό στις ρίζες του φυτού επίσης είναι παράγοντες που καθορίζουν το βαθμό της διαπνοής, όπως επίσης η υπερβολική συγκράτηση του νερού και η αλατότητα του εδαφικού νερού.

Η διαπνοή επίσης επηρεάζεται από τους περιβαλλοντικούς παράγοντες και το είδος της βλάστησης. Διαφορετικά είδη φυτών μπορεί να έχουν διαφορετικό βαθμό διαπνοής. Όχι μόνο ο τύπος της βλάστησης αλλά επίσης το στάδιο ανάπτυξης της, το περιβάλλον και η καλλιεργητική τεχνική πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον υπολογισμό της διαπνοής. (Μπερτάκη, 2001).

Στοιχεία Εξατμισοδιαπνοής

Η εξάτμιση και η διαπνοή λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα και δεν υπάρχει εύκολος τρόπος διαχωρισμού μεταξύ των δύο αυτών και γι' αυτό θεωρούνται σαν μια ενιαία λειτουργία και χαρακτηρίζονται από τον όρο εξατμισοδιαπνοή. Εκτός από τη διαθεσιμότητα του νερού στο επιφανειακό έδαφος, η εξάτμιση από το έδαφος κυρίως καθορίζεται από τη ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους. Αυτή η ποσότητα μειώνεται καθώς η κόμη σκιάζει συνεχώς μεγαλύτερη επιφάνεια εδάφους.

Όταν η βλάστηση είναι μικρή, το νερό χάνεται κατά κύριο λόγο εξαιτίας της εδαφικής εξάτμισης, αλλά μόλις η βλάστηση αναπτυχθεί και καλύψει πλήρως το έδαφος η διαπνοή γίνεται ο κύριος λόγος απωλειών νερού.

Μονάδες εξατμισοδιαπνοής

Η εξατμισοδιαπνοή συνήθως εκφράζεται σε χιλιοστά ανά μονάδα χρόνου και εκφράζει την ποσότητα του νερού που χάνεται από μια καλυμμένη με βλάστηση επιφάνεια εδάφους σε ορισμένο χρόνο σε μονάδες ύψους νερού. Η μονάδα του χρόνου μπορεί να είναι μια ώρα, μια ημέρα, μια δεκαετία, ένας μήνας ή ακόμα μια ολόκληρη καλλιεργητική περίοδος ή ένα έτος.

Το ύψος του νερού μπορεί επίσης να εκφραστεί σε σχέση με την ενέργεια που λαμβάνεται ανά μονάδα επιφάνειας. Η ενέργεια αυτή είναι η ενέργεια (ή η θερμότητα) που απαιτείται για να εξατμιστεί νερό από μια ελεύθερη επιφάνεια. Αυτή η ενέργεια είναι γνωστή σαν λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης (λ) και είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας του νερού και με βάση αυτή η εξατμισοδιαπνοή εκφράζεται σε

$$\frac{MJ}{m^2 \cdot day}.$$

Παράγοντες που επηρεάζουν την εξατμισοδιαπνοή

Σύμφωνα με την Μπερτάκη (2001), οι κύριες παράμετροι που επηρεάζουν την εξατμισοδιαπνοή είναι:

Καιρικές παράμετροι

Οι καιρικές παράμετροι που κυρίως επηρεάζουν την εξατμισοδιαπνοή είναι η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία του αέρα, η υγρασία και η ταχύτητα του ανέμου. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής με βάση τις παραπάνω παραμέτρους.

Παράγοντες βλάστησης

Ο τύπος της βλάστησης, η ποικιλία και το στάδιο ανάπτυξης είναι παράγοντες που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής. Η διαφοροποίηση στην αντίσταση στη διαπνοή, στο ύψος, στην ανάκλαση, στην κάλυψη του εδάφους και στο ριζικό σύστημα είναι παράγοντες που επίσης επηρεάζουν την εξατμισοδιαπνοή ακόμα και όταν οι περιβαλλοντικές συνθήκες είναι οι ίδιες.

Περιβαλλοντικοί παράγοντες

Παράγοντες όπως είναι η αλατότητα του εδάφους, η περιορισμένη εφαρμογή λιπασμάτων, η παρουσία αδιαπέραστων εδαφικών οριζόντων, η αναποτελεσματική αντιμετώπιση των ασθενειών και των ζιζανίων και η φτωχή εδαφική διαχείριση ελαττώνουν την εξατμισοδιαπνοή. Άλλοι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής είναι η εδαφική κάλυψη, η πυκνότητα φύτευσης και η εδαφική υγρασία. Η επίδραση της εδαφικής υγρασίας στην ΕΤ εξαρτάται κυρίως από το ύψος του ελλείμματος σε νερό και τον τύπο του εδάφους. Από την άλλη όμως κατάκλιση του εδάφους με νερό μπορεί να προκαλέσει ζημιές στις ρίζες και να περιορίσει την προσρόφιση νερού από τις ρίζες λόγω αναστολής της αναπνοής.

Εξατμισοδιαπνοή Αναφοράς (ET_o)

Ορισμός της Εξατμισοδιαπνοής Αναφοράς (ET_o)

Η τιμή της εξατμισοδιαπνοής από μια επιφάνεια αναφοράς, που δεν παρουσιάζει έλλειψη νερού, καλείται εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ή βασική εξατμισοδιαπνοή) ET_o. Η επιφάνεια αναφοράς είναι υποτιθέμενη έκταση από γρασίδι που έχει κάποια ειδικά χαρακτηριστικά.

Σύμφωνα με την Μπερτάκη (2001), στη διεθνή βιβλιογραφία σαν εξατμισοδιαπνοή αναφοράς ET_o, ορίζεται "το μέγιστο ύψος νερού που χάνεται λόγω εξατμισοδιαπνοής από εκτεταμένη επιφάνεια με γρασίδι ομοιόμορφου ύψους 8-15 cm, επαρκώς ανεπτυγμένου χωρίς έλλειψη νερού, απαλλαγμένου από φυτικές ασθένειες που σκιάζει πλήρως το έδαφος".

Η εισαγωγή της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς έγινε για να μελετήσει την απαίτηση σε εξάτμιση της ατμόσφαιρας ανεξάρτητα από τον τύπο της βλάστησης, το στάδιο και την καλλιεργητική τεχνική. Όσο το διαθέσιμο νερό είναι άφθονο στην επιφάνεια του εδάφους αναφοράς, οι παράγοντες του εδάφους δεν επηρεάζουν την ET.

Η συσχέτιση της ET με μια ειδική επιφάνεια δίνει μια τιμή αναφοράς με την οποία μπορούν να συσχετιστούν τιμές ET από άλλες επιφάνειες. Τιμές ET_o που έχουν μετρηθεί ή υπολογιστεί σε διαφορετικές τοποθεσίες ή σε διαφορετικές εποχές είναι συγκρίσιμες μόνο αν αναφέρονται στην ET από την ίδια επιφάνεια αναφοράς.

Οι μόνοι παράγοντες που επηρεάζουν την ET_o είναι οι κλιματικές παράμετροι. Συμπερασματικά, η ET_o είναι μια κλιματική παράμετρος και μπορεί να υπολογιστεί από μετεωρολογικά δεδομένα. Η ET_o εκφράζει την δυνατότητα εξάτμισης της ατμόσφαιρας σε συγκεκριμένη τοποθεσία και χρονική περίοδο του έτους και δεν έχει να κάνει με τα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας.

Μέθοδοι υπολογισμού της Εξατμισοδιαπνοής Αναφοράς (ET₀)

Οι μέθοδοι για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής από μετεωρολογικά δεδομένα προϋποθέτουν την ύπαρξη ποικίλων μετεωρολογικών και φυσικών παραμέτρων. Οι διαφορετικές κλιματικές συνθήκες επηρεάζουν την εξατμισοδιαπνοή σημαντικά. Η εξατμισοδιαπνοή σε ζεστά και ξηρά κλίματα είναι υψηλή εξαιτίας της ξηρότητας του αέρα και της υψηλής θερμοκρασίας. Σε υγρά κλίματα η εξατμισοδιαπνοή είναι μικρότερη εξαιτίας της υψηλής υγρασίας του αέρα και της παρουσίας σύννεφων που εμποδίζουν μεγάλο ποσοστό ακτινοβολίας να φτάσει στο έδαφος.

Σύμφωνα με την Μπερτάκη (2001), η λειτουργία της εξατμισοδιαπνοής σε γενικές γραμμές επηρεάζεται από τους εξής παράγοντες:

- Ηλιακή ακτινοβολία
- Θερμοκρασία αέρος
- Υγρασία αέρος
- Ταχύτητα ανέμου
- Ατμοσφαιρική πίεση
- Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης

Η εξατμισοδιαπνοή δεν είναι παράμετρος που μπορεί να μετρηθεί εύκολα.. Οι διάφοροι τρόποι υπολογισμού ή μέτρησης της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς είναι:

1. Μέθοδος ισοζυγίου ενέργειας
2. Μέθοδος υδατικού ισοζυγίου εδαφικής κατατομής
3. Λυσίμετρα
4. Υπολογισμός εξατμισοδιαπνοής από μετεωρολογικά δεδομένα
5. Μέθοδος εξατμισίμετρου

Στην παρούσα εργασία η εξατμισοδιαπνοή υπολογίζεται με μέθοδο που στηρίζεται σε μετεωρολογικά στοιχεία και συγκεκριμένα στη μέθοδο Penman- Monteith, η οποία έχει δείξει πολύ καλά αποτελέσματα σε παγκόσμια κλίμακα.

Συνοπτική παρουσίαση μεθόδων υπολογισμού

A. Τροποποιημένη μέθοδος BLANEY-CRIDDLE (FAO-24)

Σύμφωνα με τη μέθοδο Blaney-Criddle το ύψος της εξατμισοδιαπνοής εκτιμάται με βάση την εξίσωση (Doorenbos and Pruitt, 1977):

$$ET_o = \{a + b[p(0,46T + 8,13)]\} (1 + 0,0001E) \left(\frac{mm}{d}\right) \quad (\text{Σχέση 3})$$

όπου οι όροι της εξίσωσης εκφράζονται από τις σχέσεις:

p = ποσοστό των ωρών ημέρας του μήνα προς τις ώρες ημέρας του έτους (από πίνακα για συγκεκριμένο γεωγραφικό πλάτος).

E = το υψόμετρο του σταθμού (m).

T = μέση μηνιαία θερμοκρασία της ατμόσφαιρας ($^{\circ}\text{C}$).

$$a = 0,0043 \cdot RH_{min} - (n/N) - 1,41$$

$$b = 0,908 - 0,00483 \cdot RH_{min} + 0,7949 \cdot (n/N) + 0,0768 \cdot [\ln(Vd + 1)]^2 - 0,0038 \cdot$$

- $RH_{min} \cdot (n/N) - 0,000433 \cdot RH_{min} \cdot Vd + 0,281 \cdot \ln(Vd + 1) \cdot \ln(n/N + 1) - 0,00975 \cdot \ln(Vd + 1) \cdot [\ln(RH_{min} + 1)]^2 \cdot \ln(n/N + 1)$, όπου:
- RH_{min} = μέση μηνιαία ελάχιστη τιμή σχετικής υγρασίας του αέρα σε ποσοστό %.
- n/N = η σχετική ηλιοφάνεια, όπου n η μέση ημερήσια πραγματική ηλιοφάνεια ($\frac{h}{d}$) και N η μέση ημερήσια θεωρητική ηλιοφάνεια ($\frac{h}{d}$), η τιμή της οποίας δίνεται από πίνακες.
- Vd = μέση ταχύτητα ανέμου κατά τη διάρκεια της ημέρας ($\frac{m}{sec}$)

Στην εξίσωση αυτή κύρια κλιματική παράμετρος είναι η θερμοκρασία και για το λόγο αυτό η χρήση της θα πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή.

B. Εξίσωση PENMAN αρχική

Η αρχική διατύπωση της εξίσωσης είχε ως εξής:

$$ET_o = W \cdot R_n + (1 - W) \cdot f(u) \cdot (e_a - e_d) \left(\frac{mm}{d}\right), \text{ όπου:} \quad (\text{Σχέση 4})$$

$$f(u) = 0,265 \cdot (1 + 0,0062 \cdot U), \text{ παράγων που εκφράζει την επίδραση του ανέμου στην}$$

βασική εξατμισοδιαπνοή, με U να είναι η ταχύτητα ανέμου σε ύψος 2m από την επιφάνεια του εδάφους ($\frac{km}{d}$).

♦ $W = \Delta / (\Delta - H\gamma)$ και $(1 - W) = \gamma / (\Delta + \gamma)$, σταθμιστικοί παράγοντες που αντιπροσωπεύουν την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας και την επίδραση του ανέμου και της υγρασίας της ατμόσφαιρας στην ET_o αντίστοιχα, όπου:

- $\Delta = 2 * (0,00738 * T + 0,8072)^7 - 0,00116$, η κλίση της καμπύλης πίεσης κορεσμού

των υδρατμών σε σχέση με τη θερμοκρασία T ($\frac{mb}{^\circ C}$).

- $\gamma = 1,613 * P / L$, η ψυχομετρική σταθερά ($\frac{mb}{^\circ C}$), όπου:

- $P = 1013 - 0,1055 * E$, η ατμοσφαιρική πίεση (mb) και E = το υψόμετρο του σταθμού (m).

- $L = 2500,78 - 2,3601 * T$ και T η θερμοκρασία ($^\circ C$).

♦ $Rn = Rns - Rnl$, η καθαρή ηλιακή ακτινοβολία εκφρασμένη σε ισοδύναμο πάχος εξατμιζόμενου νερού ($\frac{mm}{d}$), όπου:

- $Rns = 0,75 * Rs$, η καθαρή μικρού μήκους κύματος ηλιακή ακτινοβολία ($\frac{mm}{d}$), όπου:

- $Rs = (0,25 + 0,5 * n/N) * Ra$, η προσπίπτουσα στη γη ηλιακή ακτινοβολία

($\frac{mm}{d}$), όπου Ra η θεωρητική ηλιακή ακτινοβολία που είναι

συνάρτηση του γεωγραφικού πλάτους ενός τόπου και οι τιμές της δίνονται από πίνακες.

- $Rnl = f(T) * f(ed) * f(n/N)$, η καθαρή μεγάλου μήκους κύματος ηλιακή ακτινοβολία ($\frac{mm}{d}$), η οποία είναι η διαφορά ανάμεσα σε αυτή που ακτινοβολεί

η γη και σ' αυτή που η γη δέχεται από το διάστημα, όπου:

- $f(T) = 1,9867 * 10^{-9} * (273 + T)^4$

- $f(ed) = 0,34 - 0,044 * (ed)^{0,5}$

- $f(n/N) = 0,10 + 0,9 * (n/N)$

♦ $ea = 33,8639 * [(0,00738 * T + 0,8072)^8 - 0,000019 * 1,8 * T + 48 + 0,001316]$, η πίεση κορεσμού των υδρατμών στη μέση θερμοκρασία της ατμόσφαιρας (mb).

♦ $ed = ea * (RHmean/100)$, η πραγματική πίεση των υδρατμών της ατμόσφαιρας (mb), όπου $RHmean$ η μέση σχετική υγρασία του αέρα σε ποσοστό %.

Γ. Τροποποιημένη εξίσωση PENMAN-FAO

Η εξίσωση αυτή προήλθε με τροποποίηση της αρχικής Penman, εισάγοντας το διορθωτικό συντελεστή c και έχει τη μορφή (Doorenbos and Pruitt, 1977):

$$ET_o = c * [W * R_n + (1 - W) * f(u) * (ea - ed)] \left(\frac{mm}{d} \right) \quad (\text{Σχέση 5})$$

όπου:

$$\begin{aligned} c = & 0,892 - 0,0781 * Vd + 0,00219 * Vd * R_s + 0,000402 + RHmax * R_s \\ & + 0,000196 * (Vd/V_n) * Vd * RHmax + 0,0000198 * (Vd/V_n) * Vd * RHmax * R_s \\ & + 0,00000236 * Vd^2 * RHmax * R_s - 0,0000086 * (Vd/V_n)^2 * Vd * RHmax \\ & - 0,0000000292 * (Vd/V_n) * Vd^2 * RHmax^2 * R_s - 0,0000161 * RHmax * R_s^2, \end{aligned}$$

είναι ένας διορθωτικός παράγοντας ενδεικτικός της διαφοράς των συνθηκών που επικρατούν σε ένα τόπο κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας, όπου:

- Vd/V_n = ο λόγος των ταχυτήτων του ανέμου κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας.

- $RHmax$ = η μέγιστη σχετική υγρασία του αέρα σε ποσοστό %.

- $R_s = (0,25 + 0,5 * (n/N) * R_a$, η προσπίπτουσα στη γη ηλιακή ακτινοβολία ($\frac{mm}{d}$),

όπου R_a η θεωρητική ηλιακή ακτινοβολία που είναι συνάρτηση του γεωγραφικού πλάτους ενός τόπου και οι τιμές της δίνονται από πίνακες.

- $f(u) = 0,27 * (1 + \frac{U}{100})$, συνάρτηση που αντιπροσωπεύει την επίδραση του ανέμου στη βασική εξατμισοδιαπνοή όπου U η μέση ταχύτητα ανέμου του 24ώρου σε ύψος 2 m από την επιφάνεια του εδάφους ($\frac{Km}{d}$).

Οι υπόλοιποι συντελεστές της εξίσωσης είναι όμοιοι με την αρχική εξίσωση Penman όπως αυτή αναφέρεται παραπάνω.

Δ. Εξίσωση FAO PENMAN-MONTEITH

Η εξίσωση αυτή αποτελεί την πρότυπη μέθοδο υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής, είναι άλλη μια τροποποίηση της αρχικής Penman και έχει την ακόλουθη μορφή [Monteith, 1981]:

$$ET_0 = \frac{0,408 * \Delta * (Rn - G) + \gamma * \frac{900}{(T + 273)} * V * (ea - ed)}{\Delta + \gamma * (1 + 0,34 * V)} \left(\frac{mm}{d} \right) \quad (\text{Σχέση } 6)$$

όπου:

♦ Δ = η κλίση της καμπύλης πίεσης κορεσμού των υδρατμών σε σχέση με τη θερμοκρασία $\left(\frac{kPa}{^{\circ}C} \right)$, και υπολογίζεται όπως στη σχέση της αρχικής Penman.

♦ $Rn = Rns - Rnl$, η καθαρή ηλιακή ακτινοβολία $\left(\frac{MJ}{m^2 * d} \right)$, όπου:

- $Rns = 0,77 * (0,25 + 0,5 * n/N) * Ra$, η καθαρή μικρού μήκους κύματος ηλιακή ακτινοβολία $\left(\frac{MJ}{m^2 * d} \right)$, όπου Ra είναι η θεωρητική ηλιακή ακτινοβολία η οποία βρίσκεται από πίνακες ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος ■-

- $Rnl = 2,45 * 10^{-9} * (0,9 * n/N + 0,1) * (0,34 - 0,14 * ed^{0,5}) * (T_{κχ}^4 - T_{κν}^4)$, η καθαρή μεγάλου μήκους κύματος ηλιακή ακτινοβολία $\left(\frac{MJ}{m^2 * d} \right)$, όπου $T_{κχ}$ είναι η μέση μέγιστη θερμοκρασία ($^{\circ}K$) και $T_{κν}$ είναι η μέση ελάχιστη θερμοκρασία ($^{\circ}K$).

♦ $G = 0,14 * (T_{month\ n} - T_{month\ n-1})$, η κατακόρυφη μεταφορά εδαφικής θερμότητας στο έδαφος, όπου:

- $T_{month\ n}$ = μέση θερμοκρασία αέρα του μήνα n ($^{\circ}C$) και
- $T_{month\ n-1}$ = μέση θερμοκρασία αέρα του προηγούμενου μήνα ($^{\circ}C$).

♦ γ = ψυχομετρική σταθερά $\left(\frac{kPa}{^{\circ}C} \right)$.

♦ T = μέση μηνιαία θερμοκρασία της ατμόσφαιρας ($^{\circ}C$).

♦ $ea = 0,611 * \exp\left(17,27 * \frac{T}{(T + 273,3)}\right)$, η πίεση κορεσμού των υδρατμών, (kPa).

RHmean

$$\diamond \quad ed = \frac{RHmean}{\frac{50}{ea_{(Tmin)}} + \frac{50}{ea_{(Tmax)}}}, \quad \text{η πραγματική πίεση των υδρατμών της}$$

ατμόσφαιρας (kPa), όπου:

- $ea_{(Tmin)}$ = η πίεση κορεσμού των υδρατμών στην ελάχιστη θερμοκρασία ($^{\circ}C$).
- $ea_{(Tmax)}$ = η πίεση κορεσμού των υδρατμών στην μέγιστη θερμοκρασία ($^{\circ}C$).
- $RHmean$ = μέση σχετική/υγρασία σε ποσοστό %.
- V = μέση ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 2 m πάνω από την επιφάνεια του

εδάφους ($\frac{m}{sec}$)

E. Μέθοδος THORNTHWAITE

Η εξατμισοδιαπνοή με τη μέθοδο αυτή υπολογίζεται με την ακόλουθη εξίσωση η οποία μόνη μετρούμενη παράμετρο έχει τη θερμοκρασία (Thornthwaite, 1948):

$$ET_o = Ld * 16 * 10 * \left(\frac{T}{I}\right)^a \left(\frac{mm}{d}\right), \quad (\text{Σχέση 7})$$

όπου:

♦ Ld = συντελεστής που είναι συνάρτηση του γεωγραφικού πλάτους (είναι ο λόγος της μέσης διάρκειας ημέρας σε ώρες κάθε μήνα προς ημέρα διάρκειας 12 ωρών) και βρίσκεται από πίνακες

♦ T = μέση μηνιαία θερμοκρασία της ατμόσφαιρας ($^{\circ}C$).

♦ I = ένας ετήσιος θερμικός δείκτης ο οποίος υπολογίζεται από το άθροισμα των μηνιαίων δεικτών θερμότητας: $t = \left(\frac{T}{5}\right)^{0.514}$ κάθε έτους.

♦ $a = 0,000000675 * (I)^3 - 0,0000771 * (I)^2 + 0,01792 * (I) + 0,49239$.

ΣΤ. Μέθοδος TURC

Για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής ο Turc προτείνει την ακόλουθη εξίσωση (Ture, 1961):

$$ET_o = 0,4 * (Ig + 50) * \frac{T}{(T + 15)} \left(\frac{mm}{d}\right), \quad (\text{Σχέση 8})$$

όπου:

- ♦ T = μέση μηνιαία θερμοκρασία της ατμόσφαιρας ($^{\circ}C$)
- ♦ $I_g = I_o * (0,18 + 0,62 * n/N)$, όπου:
 - I_o = η ακτινοβολία στο όριο της ατμόσφαιρας ($\frac{Cal}{cm * d}$), η οποία βρίσκεται από πίνακες. Σε περίπτωση που οι τιμές των πινάκων είναι σε ($\frac{mm}{d}$) πολλαπλασιάζονται με το συντελεστή αντιστοιχίας:
$$I (\frac{Cal}{cm * d}) = 17,1 * 10^{-3} (\frac{mm}{d})$$
 - n/N = η σχετική ηλιοφάνεια, όπου n η μέση ημερήσια πραγματική ηλιοφάνεια ($\frac{h}{d}$) και N η μέση ημερήσια θεωρητική ηλιοφάνεια ($\frac{h}{d}$) η τιμή της οποίας δίνεται από πίνακες.

Z. Μέθοδος ΕΞΑΤΜΙΣΙΜΕΤΡΟΥ

Η εξατμισοδιαπνοή με τη μέθοδο του εξατμισίμετρου, δίνεται από την εξίσωση (Doorenbos and Pruitt, 1977):

$$ET_o = K_p * E_{pan} (\frac{mm}{d}) \quad (\text{Σχέση 9})$$

όπου:

- ♦ E_{pan} = η μέση εξάτμιση του 24ώρου από το εξατμισίμετρο ($\frac{mm}{d}$),
- ♦ K_p = συντελεστής εξατμισίμετρου που εξαρτάται από τον τύπο του εξατμισίμετρου και δίνεται από πίνακες για τις διάφορες συνθήκες υγρασίας, ανέμου και περιβάλλοντος οργάνου.

Ο συντελεστής αυτός είναι δύσκολο να υπολογιστεί γιατί για τον προσδιορισμό του απαιτούνται να ληφθούν υπόψη εκτός από τον τύπο του εξατμισίμετρου, η κάλυψη του εδάφους γύρω από το όργανο, ο περιβάλλοντας χώρος, οι συνθήκες ανέμου και υγρασίας.

Η. Μέθοδος Hargreaves

Η μέθοδος Hargreaves (Hargreaves, 1994 Hargreaves και Samani 1985) χρησιμοποιείται ευρέως επειδή απαιτεί περιορισμένα μετεωρολογικά στοιχεία. Πολλές μελέτες έχουν αποδείξει ότι δίνει πολύ αξιόπιστα αποτελέσματα συγκρίνοντας την με την μέθοδο Penman – Monteith που προτείνεται από τον FAO. Μερικές από τις μελέτες αυτές είναι:

1. Droogers P. and Allen R.G, 2002. «Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions, Irrigation and Drainage Systems» 16: pp 33-45, 2002,
2. Hargreaves et al, 2003,
3. Smith et al, 1996

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει την εξατμισοδιαπνοή σύμφωνα με τη σχέση (Hargreaves and Samani, 1985):

$$ET_o = 0,0023 * Ra * (T_o + 17,8) * TD^{0,5} \left(\frac{mm}{d} \right) \text{ (Σχέση 10)}$$

- ♦ Ra = θεωρητική ηλιακή ακτινοβολία που βρίσκεται από πίνακες σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος. $\left(\frac{mm}{d} \right)$
- ♦ $T_o = (T_{max} + T_{min})/2$, το ημίθροισμα της μέσης μέγιστης θερμοκρασίας T_{max} και της μέσης ελάχιστης θερμοκρασίας T_{min} ($^{\circ}C$).
- ♦ $TD = T_{max} - T_{min}$, η διαφορά της μέσης μέγιστης θερμοκρασίας T_{max} και της μέσης ελάχιστης θερμοκρασίας T_{min} ($^{\circ}C$).

Στον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς πολλές φορές χρησιμοποιούνται μετεωρολογικά στοιχεία που λαμβάνονται από σταθμούς που απέχουν αρκετή απόσταση από την εξεταζόμενη περιοχή. Η απόσταση αυτή δεν δημιουργεί εσφαλμένα αποτελέσματα στις περιοχές εκείνες που το κλίμα παραμένει το ίδιο για πολύ μεγάλες αποστάσεις. Σε περιοχές όμως με εναλλαγή κλίματος σε μικρές αποστάσεις, όπως π.χ είναι οι περιοχές που έχουν μεγάλες λίμνες, η εξατμισοδιαπνοή διαφοροποιείται και χρειάζεται προσοχή στον υπολογισμό.

Μπερτάκη, Μ., " Εξατμισοδιαπνοή και ανάγκες σε νερό των κυριοτέρων καλλιεργειών του νομού Χανίων", Πτυχιακή μελέτη στο Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα Ιούλιος 2001.

Το TDR

Το TDR (Time Domain Reflectometry) είναι μια ηλεκτρονική συσκευή που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό των ελαττωμάτων στα μεταλλικά καλώδια (π.χ. μονοαξονικά καλώδια, οπτικές ίνες κλπ).



Χρήση του TDR στις Γεωπονικές επιστήμες.

Το TDR χρησιμοποιείται για να καθορίσει την περιεκτικότητα σε εδαφολογικό νερό στα πορώδη μέσα. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δύο δεκαετιών, οι ουσιαστικές πρόοδοι έχουν γίνει σε εδάφη, σιτηρά και τρόφιμα καθώς και σε ιζήματα. Το «κλειδί» για την επιτυχία των μετρήσεων με το TDR είναι η δυνατότητά του να καθορίσει ακριβώς τη διαπερατότητα (διηλεκτρική σταθερά) ενός υλικού από τη διάδοση κυμάτων καθώς επίσης και το γεγονός ότι υπάρχει μια ισχυρή σχέση μεταξύ διαπερατότητας ενός υλικού και της περιεκτικότητας σε νερό. Η μέθοδος TDR είναι μια τεχνική γραμμών μετάδοσης, και καθορίζει την προφανή διαπερατότητα TDR (K_a), από το χρόνο ταξιδιού ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος που διαδίδεται σύμφωνα με μια γραμμή μετάδοσης. Συνήθως δύο ή περισσότερες παράλληλες ράβδοι μετάλλων ενσωματώνονται σε ένα χώμα ή ένα ίζημα. Οι έλεγχοι TDR είναι συνήθως μεταξύ 10 και 30 cm σε μήκος και συνδέονται με το TDR μέσω ενός ομοαξονικού καλωδίου. (www.fao.org)