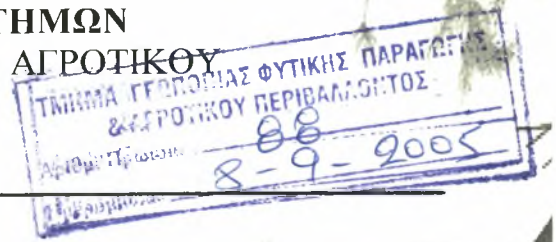


ΠΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
Εργαστήριο Γεωργίας



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**«Πρόγραμμα Η/Υ για την εφαρμογή μοντέλου
προσομοίωσης της αφομοίωσης CO₂ με βάση τις νέες
εξισώσεις της άμεσης & διάχυτης ακτινοβολίας.»**

ΓΚΙΝΤΣΙΟΥΔΗΣ ΙΠΠΟΛΥΤΟΣ



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 5038/1
Ημερ. Εισ.: 17-10-2006
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΦΠΑΠ
2003
ΓΚΙ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
Εργαστήριο Γεωργίας

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Γκιντσιούδης Ιππόλυτος

«Πρόγραμμα Η/Υ για την εφαρμογή μοντέλου προσομοίωσης της
αφομοίωσης CO₂ με βάση τις νέες εξισώσεις της άμεσης & διάχυτης
ακτινοβολίας.»

Επιβλέπων
Ν. Γ. Δαναλάτος, Επ. Καθηγητής

Μέλη
Π. Λόλας, Καθηγητής
Στ. Τζώρτζιος, Καθηγητής

ΒΟΛΟΣ 2003

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	1
Πρόλογος	4
1. Γενικά	5
2. Εισαγωγή στη φωτοσύνθεση και τα μοντέλα.....	7
2.1 Φωτοσύνθεση	7
2.1.1 Απορρόφηση ενέργειας και μετατροπή σε χημική (φωτεινές αντιδράσεις). 7	
2.1.2 Αφομοίωση του CO ₂ (σκοτεινές αντιδράσεις).....	10
2.2 Φωτοσύνθεση και αύξηση.....	11
2.2.1 Αφομοίωση CO ₂ από ένα απλό φύλλο	14
2.2.2 Αφομοίωση φυλλοστοιβάδας.	17
2.3 Μοντέλα.....	19
2.3.1 Προσομοίωση φωτοσύνθεσης	20
2.3.2 Μοντέλα φωτοσύνθεσης – προσομοίωση δυναμικού παραγωγής	23
2.4 Ειδικός σκοπός της εργασίας.....	24
3. Το μοντέλο προσομοίωσης.....	25
3.1 Εξισώσεις φωτοσύνθεσης φυλλοστοιβάδας (το μοντέλο).....	25
3.1.1 Ολική Ακτινοβολία.....	25
3.1.2 Άμεση και διάχυτη ακτινοβολία.....	27
3.1.3 Φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία	28
3.1.4 Ημερήσια αφομοίωση.....	31
4. Μεθοδολογία – Υπολογιστικό μέρος.....	33
4.1 Υλικά μέσα (Hardware).....	33
4.2 Λογισμικό (Software)	33
4.3 Μεθοδολογία	36
4.3.1 Ανάλυση του μοντέλου	36
4.3.2 Λογικό διάγραμμα	36
4.3.3 Σχεδιασμός περιβάλλοντος.....	37
4.3.4 Προγραμματισμός	39

4.4 Χρήση του προγράμματος..... 41

5. Αποτελέσματα και συζήτηση..... 49

5.1 Τα αποτελέσματα του μοντέλου για τον ελλαδικό για C_3 και C_4 φυτά..... 54

5.2 Τα αποτελέσματα της εφαρμογής για την υφήλιο..... 58

5.3 Επεξεργασία των αποτελεσμάτων..... 62

Επίλογος..... 65

Βιβλιογραφία..... 66

Η εργασία αυτή αφιερώνεται στον πατέρα μου.

Πρόλογος

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η ανάλυση ενός μοντέλου προσομοίωσης της αφομοίωσης CO₂ από μια καλλιέργεια με βάση τις νέες εξισώσεις άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας, καθώς και η διαδικασία ανάπτυξης της αντίστοιχης εφαρμογής για ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Αρχικά περιγράφονται όλοι οι μηχανισμοί που συμμετέχουν στη διαδικασία της μετατροπής της φωτεινής ενέργειας σε χημική μέσω της φωτοσύνθεσης από την στιγμή της πρόσληψης του CO₂ μέχρι τη δημιουργία ξηράς ουσίας. Ακολουθεί περιγραφή και ανάλυση του μοντέλου καθώς και η διαδικασία κατασκευής του αντίστοιχου προγράμματος για ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Τέλος παρουσιάζεται η αφομοίωση CO₂ μερικών σημαντικών καλλιεργειών της Ελλάδας όπως βαμβάκι, σιτάρι, κριθάρι και καλαμπόκι σε όλο το εύρος της ελληνικής επικράτειας, τα αποτελέσματα του μοντέλου για όλη την υφήλιο (από 0° – 60°) σε πίνακες, καθώς και παραδείγματα για το πως μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι πίνακες από τον αναγνώστη.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επ. Καθηγητή κ. Ν. Δαναλάτο για την επιλογή του θέματος, την καθοδήγηση, την ενθάρρυνση, τις συμβουλές που μου έδωσε, αλλά και για τις πολύτιμες γνώσεις που αποκόμισα στα μαθήματα Γενικής γεωργίας και Προσομοίωσης καλλιεργειών.

Ευχαριστώ θερμά τον Καθηγητή κ. Π. Λολα για την πολύτιμη βοήθειά του στην ολοκλήρωση της Πτυχιακής αυτής Διατριβής, τις χρήσιμες παρατηρήσεις του, αλλά και για τις πολύτιμες γνώσεις που αποκόμισα στο μάθημα της Φυσιολογίας.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Στ. Τζώρτζιο για τις χρήσιμες παρατηρήσεις του, την πολύτιμη βοήθειά του στην διεκπεραίωση αυτής της εργασίας καθώς και για τις πολύτιμες γνώσεις που αποκόμισα στα μαθήματα Πληροφορικής, Στατιστικής και Βιομετρίας.

1. Γενικά

Η ανάπτυξη των φυτών μπορεί να μελετηθεί σε ένα ευρύ φάσμα λεπτομέρειας από το μοριακό επίπεδο έως το επίπεδο οικολογίας. Κατά την μελέτη σε επίπεδο φυσιολογίας, ο σχηματισμός νέων ιστών καθορίζεται από την δράση φυτο-ορμονών, βιοχημικών διεργασιών και τον τρόπο μεταφοράς ουσιών μέσα στα φυτικά όργανα. Κατά την ανάλυση σε αγρονομικό επίπεδο οι διεργασίες αυτές λαμβάνονται ως βάση και προχωρούμε στη μελέτη της διαμόρφωσης της παραγωγής ως συνάρτηση παραγόντων διαχείρισης, όπως η άρδευση, η θρέψη, η αμειψισπορά και η κατεργασία του εδάφους. Αποτελεί μάλιστα στόχο για την γεωργία και την γεωργική οικολογία η εξήγηση των αποτελεσμάτων της αγρονομικής έρευνας σχετικά με τους παράγοντες αυτούς σε επίπεδο φυσιολογίας. Σε αρκετές περιπτώσεις αυτό είναι εφικτό αλλά παραμένουν ακόμα μεγάλα κενά στον τομέα αυτό. Για παράδειγμα γνωρίζουμε γιατί τα φυτά απαιτούν νερό και θρεπτικά συστατικά, ή γιατί η παραγωγή των φυτών επηρεάζεται θετικά από την αύξηση CO₂ στην ατμόσφαιρα όμως σε μεγάλο βαθμό η γνώση μας είναι ποιοτική και δεν εξηγεί σε βάθος στοιχεία προσαρμοστικότητας, της μορφολογίας και των βιοχημικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα κατά την αύξηση των φυτών. Η μεθοδολογία κατασκευής προτύπων (μοντέλων) προφανώς δεν επιλύει το πρόβλημα αυτό, αλλά βοηθά σε μεγάλο βαθμό στο συσχετισμό των υποθέσεων εργασίας σχετικά με τις διεργασίες αυτές, και παρέχει τη δυνατότητα ποσοτικής θεώρησης των μεταβλητών που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους.

Τα μοντέλα είναι αναγκαστικά απλοποιημένες εκφράσεις πιο πολύπλοκων συστημάτων και μέρους της πραγματικότητας (De Wit, 1968, 1993) και σε καμιά περίπτωση δεν μπορούν να αντιπροσωπεύσουν όλο το εύρος του πραγματικού συστήματος. Επομένως τα βιολογικά μοντέλα και τα μοντέλα ανάπτυξης καλλιεργειών δεν μπορούν να επιτύχουν απόλυτα σε περιπτώσεις άλλες από αυτές για τις οποίες σχεδιάστηκαν. Ένα ενιαίο μοντέλο με παγκόσμια ισχύ δεν υπάρχει και προφανώς δεν πρόκειται να υπάρξει ποτέ. Αντίθετα, σκοπός της κατασκευής ενός μοντέλου είναι η κατά το δυνατόν απλοποίηση και μελέτη ενός συγκεκριμένου μέρους της πραγματικότητας που χρειαζόμαστε για ένα συγκεκριμένο θέμα που μελετάμε (Goudriaan & Van Laar, 1994).

Στην παρούσα εργασία θα παρουσιαστεί ένα μοντέλο υπολογισμού του ημερήσιου ρυθμού φωτοσύνθεσης (ρυθμός αφομοίωσης CO₂) της φυλλοστοιβάδας

μιας καλλιέργειας με βάση την καμπύλη φωτοσύνθεσης ενός απλού φύλλου, το συντελεστή διεισδυτικότητας του φωτός και τον δείκτη φυλλικής επιφάνειας, και η δημιουργία αντίστοιχου προγράμματος ηλεκτρονικού υπολογιστή στην γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic. Στο μοντέλο μελετάται μόνο η επίδραση της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας στο ρυθμό φωτοσύνθεσης ενώ οι λοιποί παράγοντες που επηρεάζουν την διαδικασία της φωτοσύνθεσης και της παραγωγικότητας όπως η λίπανση, η εδαφική υγρασία κλπ θεωρούνται ιδανικοί.

2. Εισαγωγή στη φωτοσύνθεση και τα μοντέλα

2.1 Φωτοσύνθεση

Τα φυτά ως αυτότροφοι οργανισμοί χαρακτηρίζονται από την ικανότητά τους να απορροφούν φωτεινή ενέργεια και να την μετατρέπουν σε χημική. Η διεργασία αυτή που αποτελεί και μια από τις βασικότερες λειτουργίες των φυτών ονομάζεται φωτοσύνθεση και περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση.



Η φωτοσύνθεση πραγματοποιείται με μια σειρά αλληλοδιαδοχικών φυσικών και χημικών φαινομένων με τελικό σκοπό την αναγωγή του CO_2 προς την θεμελιώδη ομάδα δομής των υδατανθράκων (H-C-OH) με υδρογόνο που απελευθερώνεται από τη φωτόλυση του H_2O . Η αλυσίδα των επιμέρους αντιδράσεων οδηγεί στο σχηματισμό της τελικής ουσίας που κατά κανόνα είναι η γλυκόζη, από το CO_2 της ατμόσφαιρας. Οι αντιδράσεις της φωτοσύνθεσης χωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με το αν απαιτούν ή όχι την ύπαρξη φωτός. Σύμφωνα με τον Blackman χαρακτηρίζονται ως «φωτεινές αντιδράσεις» όσες απαιτούν φωτεινή ενέργεια και «σκοτεινές αντιδράσεις» όσες μπορούν να πραγματοποιηθούν και σε συνθήκες σκότους. Οι φωτεινές αντιδράσεις προέχουν των σκοτεινών διότι σε αυτές πραγματοποιείται η δέσμευση της ηλιακής ενέργειας και η μετατροπή της σε χημική μορφή με την οποία θα χρησιμοποιηθεί στο στάδιο των σκοτεινών αντιδράσεων για την δημιουργία οργανικών υλών.

2.1.1 Απορρόφηση ενέργειας και μετατροπή σε χημική (φωτεινές αντιδράσεις)

Βασική προϋπόθεση για την μετατροπή της φωτεινής ενέργειας σε χημική είναι η απορρόφηση του φωτός. Αυτή πραγματοποιείται από χρωστικές που βρίσκονται στα θυλακοειδή των χλωροπλαστών και κυρίως από την χλωροφύλλη. Η χλωροφύλλη μαζί με άλλες χρωστικές και πρωτεΐνες σχηματίζει πολυμοριακά σύμπλοκα τα οποία είναι γνωστά ως φωτοσυστήματα. Υπάρχουν δυο ειδών φωτοσυστήματα ανάλογα με

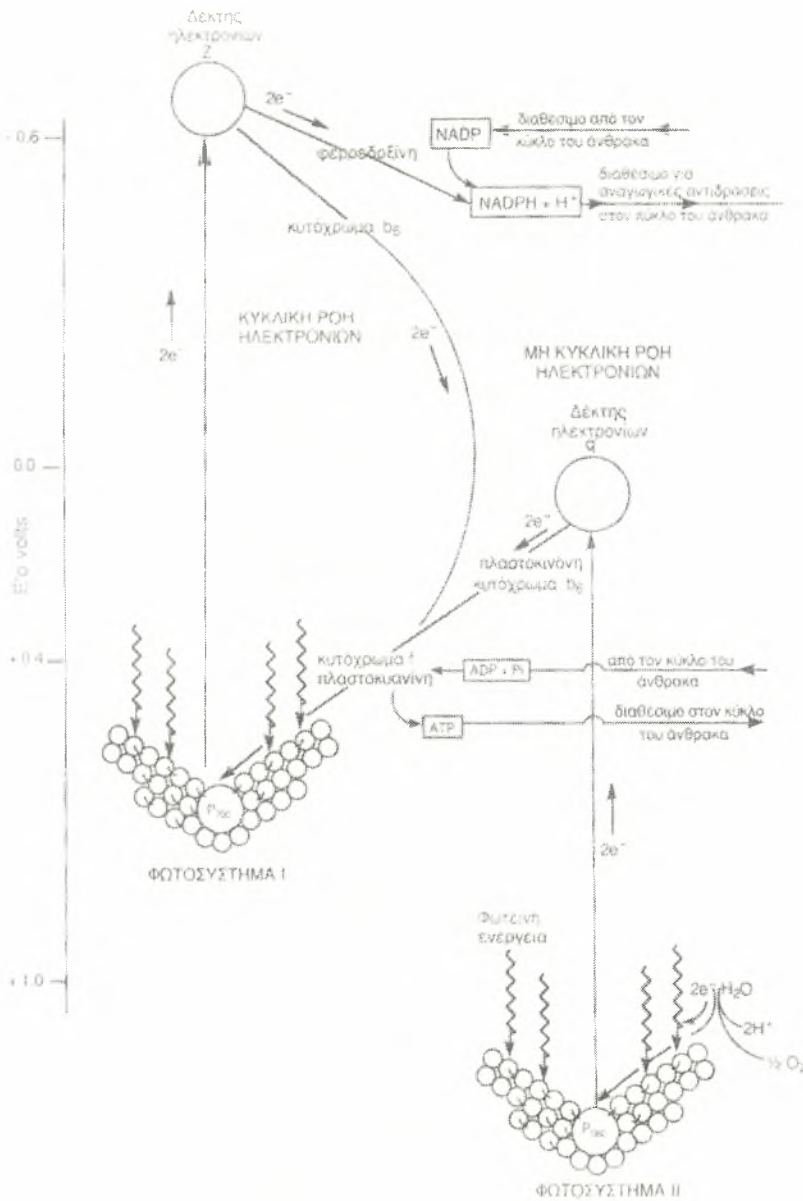
το μήκος ακτινοβολίας που απορροφούν και χαρακτηρίζονται ως φωτοσύστημα I ή P₇₀₀ και φωτοσύστημα II ή P₆₈₀ για μήκη ακτινοβολίας 700nm και 680nm αντίστοιχα. Κάθε φωτοσύστημα περιέχει αρκετές διαφορετικές πρωτεΐνες μαζί με μόρια χλωροφύλλης και καροτενοειδών που απορροφούν το φως και γι' αυτό όλα αυτά τα μόρια ονομάζονται κεραίες ή αντέννα (Λόλας, 2001).

Σε κάθε φωτοσύστημα όλα τα μόρια των χρωστικών είναι ικανά να απορροφούν φωτόνια (hv), μόνο ένα ειδικό ζεύγος όμως που αποτελείται από χλωροφύλλη a που ονομάζεται κέντρο αντίδρασης του φωτοσυστήματος έχει την ιδιότητα να χρησιμοποιεί την ενέργεια στη φωτοχημική αντίδραση.

Η δέσμευση και μετατροπή της φωτεινής ενέργειας σε χημική γίνεται διαδοχικά με το εξής τρόπο:

- Εισχώρηση φωτεινής ενέργειας στο φωτοσύστημα II και διέγερση της χλωροφύλλης.
- Μεταφορά δυο ηλεκτρονίων στον αποδέκτη ηλεκτρονίων Q.
- Το οξειδωμένο πλέον P₆₈₀ διασπά το H₂O σύμφωνα με την αντίδραση $H_2O \rightarrow 2H^+ + 2e^- + \frac{1}{2} O_2$ (φωτόλυση).
- Τα e⁻ που απελευθερώνονται απ' την φωτόλυση μεταφέρονται στο P₆₈₀ και στη συνέχεια στο Q
- Τα ηλεκτρόνια από το Q μεταφέρονται στο φωτοσύστημα I μέσω μιας αλυσίδας μεταφοράς ηλεκτρονίων που περιλαμβάνει μια πλαστοκινίνη, δυο κυτοχρώματα και μια πλαστοκυανίνη.
- Καθώς τα ηλεκτρόνια μεταφέρονται κατά μήκος αυτής της αλυσίδας σε ένα από τα στάδια μεταξύ πλαστοκινίνης και κυτοχρώματος f, η ενέργεια που ελευθερώνεται χρησιμοποιείται για την μετατροπή του ADP σε ATP. Δηλαδή η ηλιακή ενέργεια μετατρέπεται σε χημική που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τα φυτά.
- Η φωτεινή ενέργεια διεγείρει το P₇₀₀ και τα ηλεκτρόνια μεταφέρονται σε έναν αποδέκτη Z.
- Από τον δέκτη ηλεκτρονίων Z, τα 2 ηλεκτρόνια ρέουν προς την φερεδοξίνη η οποία ανάγεται.
- Από την φερεδοξίνη τελικά τα 2 ηλεκτρόνια ρέουν προς το συνένζυμο NADP⁺ το οποίο ανάγεται σε NADPH⁺ + H.

Με αυτή τη διαδικασία η ηλιακή ενέργεια βρίσκεται δεσμευμένη με χημική μορφή στα μόρια του NADPH και του ATP. Η διαδικασία παρουσιάζεται στην εικόνα 1:



Εικόνα 1. Διάγραμμα που δείχνει την πιθανή διάταξη των φωτοσυστημάτων I και II (Καρατάγλης 1999).

2.1.2 Αφομοίωση του CO₂ (σκοτεινές αντιδράσεις)

Στο στάδιο των σκοτεινών αντιδράσεων πραγματοποιείται η αφομοίωση του CO₂ και η παραγωγή οργανικών υλών. Το CO₂ εισέρχεται από τα στομάτια του φυτού για να εισχωρήσει στη συνέχεια στα κύτταρα του μεσόφυλλου και να αναχθεί στο στρώμα των χλωροπλαστών με μια σειρά πολύπλοκων αντιδράσεων που είναι γνωστές ως ο κύκλος του Calvin.

Οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν μέρος στον κύκλο του Calvin είναι οι παρακάτω:

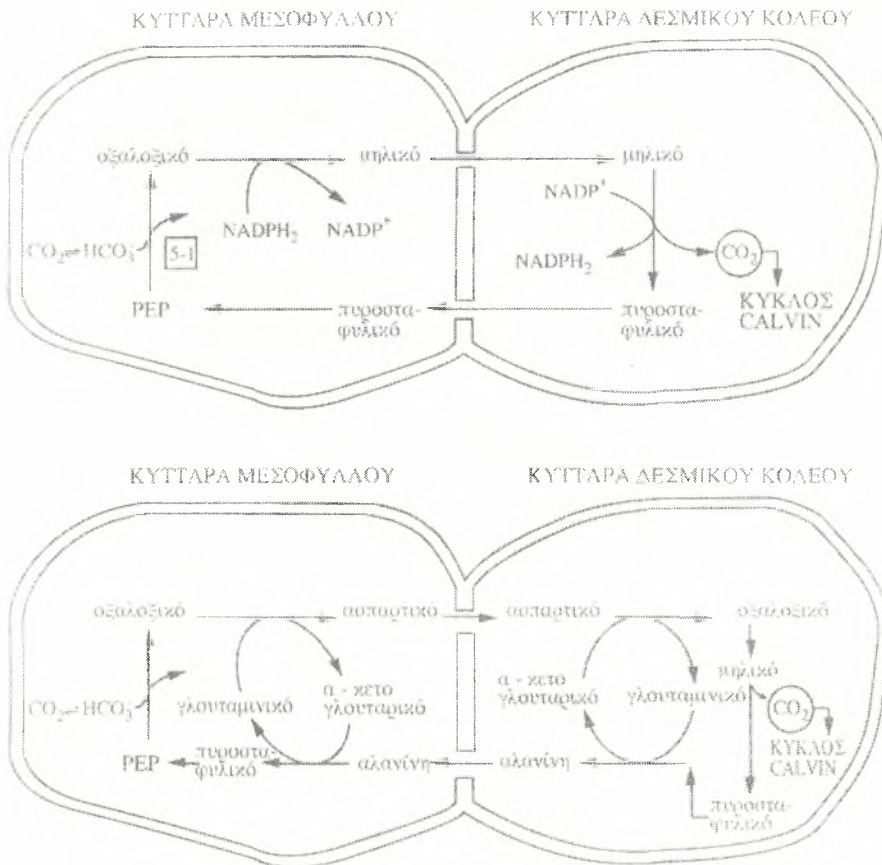
- Ενσωμάτωση του CO₂ στον 1,5-διφωσφορικό εστέρα της ριβουλόζης (RuBP) με καρβοξυλίωση αυτού, αντίδραση που καταλύεται από το ένζυμο καρβοξυλάση της 1,5-διφωσφορικής ριβουλόζης (Rubisco) και παραγωγή ασταθούς ένωσης με 6 άτομα άνθρακα.
- Διάσπαση της ασταθούς ένωσης σε 2 μόρια 3-P-γλυκερινικού οξέος (PGA).
- Μετατροπή του PGA σε 1,3-διP-γλυκερινικό οξύ και ADP με κατανάλωση ενέργειας σε μορφή ATP.
- Μετατροπή του 1,3-διP-γλυκερινικού οξέος σε 3-P-γλυκεριναλδεΐδη με κατανάλωση ενέργειας που παρέχεται με την μορφή NADPH⁺ + H.
- Μετατροπή της 3-P-γλυκεριναλδεΐδης σε 1,6-διP-φρουκτόζη.

Η 1,6-διP-φρουκτόζη είναι πρόδρομος όλων των άλλων εξοζών συμπεριλαμβανομένων της γλυκόζης και των διάφορων πολυμερών της. Μερικά απ' αυτά τα συστατικά, όπως το άμυλο, η σακχαρόζη και η ινσουλίνη είναι συστατικά που αποταμιεύουν ενέργεια, ενώ η κυτταρίνη, οι ημικυτταρίνες και οι πηκτίνες παίζουν σημαντικό ρόλο ως δομικά συστατικά του κυττάρου.

Επειδή το πρώτο προϊόν που προσδιορίζεται αμέσως μετά την ενσωμάτωση του CO₂ είναι το PGA με 3 άτομα άνθρακα, ο κύκλος του Calvin ονομάζεται C₃ κύκλος (1978).

Η φωτοσύνθεση όπως περιγράφηκε παραπάνω δεν είναι ίδια σε όλα τα φυτά. Σε μερικά φυτά όπως το καλαμπόκι, το πρώτο προϊόν της δέσμευσης του CO₂ δεν είναι το φωσφογλυκερικό οξύ αλλά το οξαλικό οξύ με 4 άτομα C. Αυτά τα φυτά είναι γνωστά ως C₄ φυτά. Στα C₄ φυτά το CO₂ δεσμεύεται από το πυροσταφυλλικό οξύ ή το φωσφοενολπυρουβικό οξύ με σχηματισμό οξαλικού οξέος που γρήγορα μετατρέπεται είτε σε ασπαρτικό είτε σε μηλικό οξύ. Στη συνέχεια το ασπαρτικό ή το

μηλικό οξύ μετακινείται μέσω των πλασμοδεμάτων των κυττάρων στους χωρίς grana χλωροπλάστες, στα κύτταρα του δεσμικού κολεού γύρο από τις ηθμαγγειώδεις δεσμίδες και ελευθερώνουν CO_2 που δεσμεύεται από τον κύκλο του Calvin (εικόνα 2).



Εικόνα 2. Σχηματική παρουσίαση της φωτοσύνθεσης των C_4 φυτών (Καρατάγλης, 1999).

2.2 Φωτοσύνθεση και αύξηση

Ένα μέρος των παραγόμενων υδατανθράκων με την διαδικασία της φωτοσύνθεσης χρησιμοποιείται ως δομικό υλικό της φυτικής μάζας όπως παραδείγματος χάριν πρωτεΐνες, λιγνίνη, λίπη και κυτταρίνη, ενώ ένα άλλο μέρος χρησιμοποιείται ως πηγή ενέργειας για τις ανάγκες του φυτού.

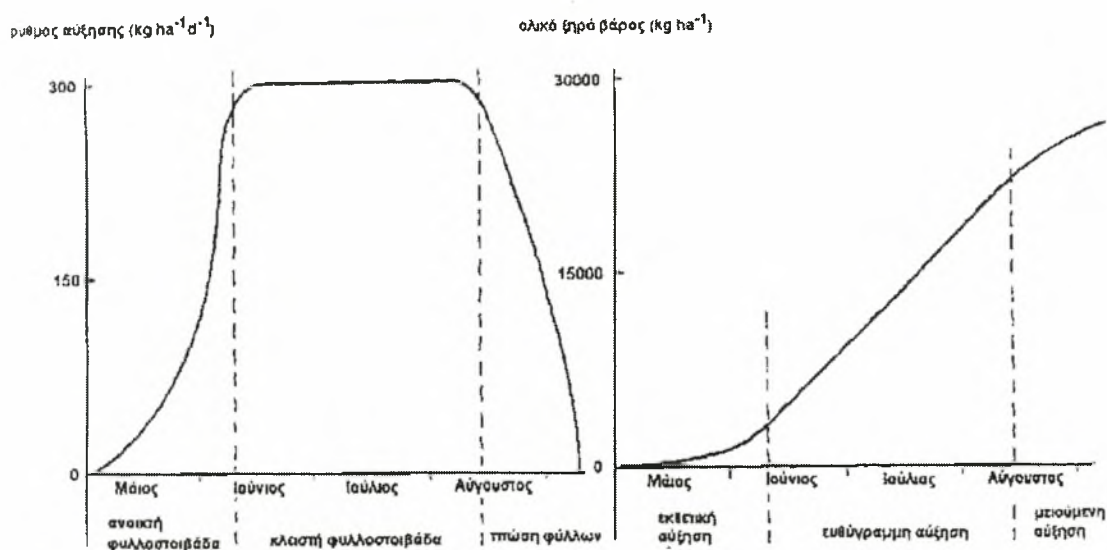
Η απελευθέρωση ενέργειας από τους υδατάνθρακες που παράγονται από την διαδικασία της φωτοσύνθεσης περιγράφονται από την εξίσωση:



Η λειτουργία αυτή καλείται αναπνοή. Περίπου το 40% των υδατανθράκων που παράγονται κατά την διάρκεια της αφομοίωσης χάνονται κατά την αναπνοή. Αφαιρώντας τον ρυθμό αναπνοής από το ρυθμό αφομοίωσης προκύπτει ο ρυθμός αύξησης ξηρής ουσίας ή απλά ο ρυθμός αύξησης.

Στην εικόνα 3α παρουσιάζεται σχηματικά η μεταβολή του ρυθμού αύξησης και της συνολικής παραγωγής ξηρής ουσίας στο χρόνο για μια εαρινή καλλιέργεια στην Ελλάδα. Οι ρυθμοί προκύπτουν από την καμπύλη της συνολικής ξηρής βιομάζας με τον προσδιορισμό της εφαπτόμενης σε κάθε σημείο της καμπύλης (Εικόνα 3β)

Όσον αφορά στο ρυθμό αύξησης διακρίνονται τρεις φάσεις.



Εικόνα 3: α. ρυθμός αύξησης βιομάζας,

β. συνολική παραγωγή ξηρής ουσίας (Δαναλάτος, 2002)

- Η πρώτη φάση όπου τα φυτά της καλλιέργειας δεν αλληλοσκιάζονται μεταξύ τους, και ο ρυθμός αύξησης βαίνει αυξανόμενος.
- Η δεύτερη φάση κατά την οποία τα φυτά της καλλιέργειας σκιάζουν πλήρως το έδαφος και ο ρυθμός αύξησης είναι σταθερός.
- Η τρίτη φάση κατά την οποία η καλλιέργεια ωριμάζει και ο ρυθμός αύξησης μειώνεται.

Στην πρώτη φάση το έδαφος είναι ως επί το πλείστον ακάλυπτο και το μεγαλύτερο μέρος των προϊόντων αφομοίωσης χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη της φυλλικής μάζας. Κάθε νέο φύλλο που σχηματίζεται συνεισφέρει σε μεγαλύτερο ρυθμό φωτοσύνθεσης, και ο ρυθμός αύξησης αυξάνει ακόμα περισσότερο. Εφόσον δεν υπάρχει ακόμα σκίαση μεταξύ των φυτών, η συνεισφορά των νέων φύλλων είναι ίδια με αυτή των ήδη υπαρχόντων. Αυτό σημαίνει σχετικά σταθερό ημερήσιο ρυθμό αύξησης και επομένως περίπου εκθετική αύξηση της βιομάζας.

Στη δεύτερη φάση τα φύλλα αρχίζουν σταδιακά να αλληλοσκιάζονται και όταν ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (LAI) φτάσει περί την τιμή 5 (κλειστή φυλλοστοιβάδα), η νέα φυλλική επιφάνεια συνεπάγεται μικρότερη αύξηση στην απορρόφηση ηλιακής ενέργειας και επομένως ο ρυθμός αύξησης παραμένει σταθερός. Κατά αυτόν τον τρόπο περνάμε από την εκθετική στην φάση ευθύγραμμης αύξησης της βιομάζας. Ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας συνεχίζει να αυξάνει κάτω από άριστες συνθήκες θρέψης και υγρασίας για να φτάσει και σε τιμές μεγαλύτερες του 6, που όμως δεν συνεισφέρουν περαιτέρω σε αύξηση του ρυθμού παραγωγής βιομάζας αλλά ίσως ακόμα και σε μείωσή του λόγω αυξημένων αναγκών σε αναπνοή και επομένως η αύξηση της καλλιέργειας παραμένει ευθύγραμμη.

Στη τρίτη φάση συντελείται η φυσιολογική ωρίμανση και πτώση των φύλλων, αλλά και η μεταφορά των θρεπτικών ουσιών προς τα καρποφόρα όργανα. Κατά τον χρόνο που ο LAI ακόμα υπερβαίνει την τιμή 3, η διαφορά στον ρυθμό αύξησης της καλλιέργειας είναι μικρή, αλλά σε τιμές μικρότερες του τρία, ο ρυθμός αφομοίωσης παρουσιάζει δραστική αύξηση (βλέπε εικόνα 7).

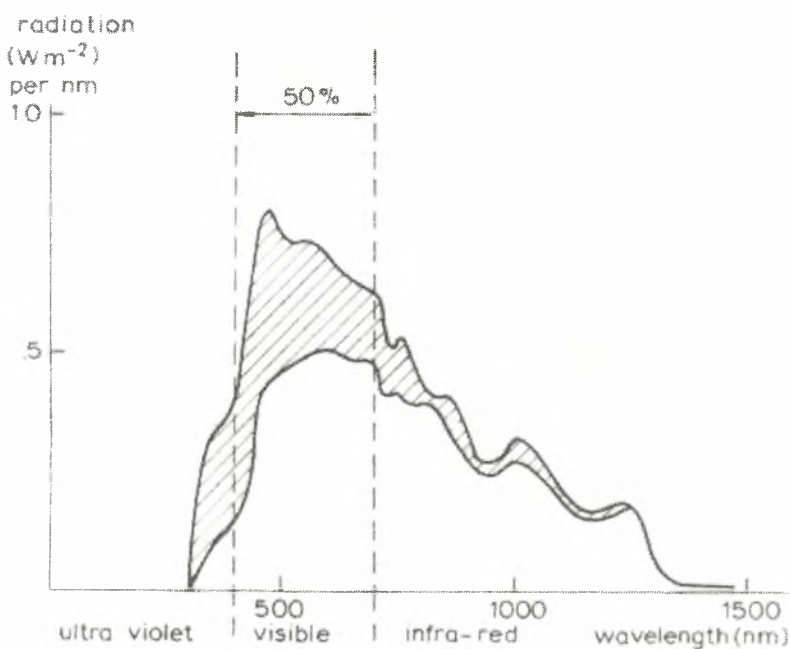
Το μεγαλύτερο μέρος της ξηρής ουσίας παράγεται κατά την δεύτερη φάση, επομένως η συνολική παραγωγή βιομάζας μιας καλλιέργειας είναι στενά συνδεδεμένη με το ρυθμό αύξησης κατά τη γραμμική αυξητική φάση και την διάρκεια της φάσης αυτής. Η διάρκεια της γραμμικής φάσης είναι χαρακτηριστικό της κάθε ποικιλίας, ενώ επηρεάζεται και από τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής. Ο πραγματικός ρυθμός αύξησης εξαρτάται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες όπως την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία, τη διαθεσιμότητα του νερού και των θρεπτικών στοιχείων και την ανάπτυξη των ζιζανίων, εχθρών και ασθενειών κατά την διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου.

Κάτω από άριστες συνθήκες διαθεσιμότητας νερού και θρεπτικών στοιχείων και με πλήρη καταπολέμηση εχθρών, ασθενειών και ζιζανίων, ο ρυθμός αύξησης

εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία και αναφέρεται ως δυναμικός ρυθμός αύξησης.

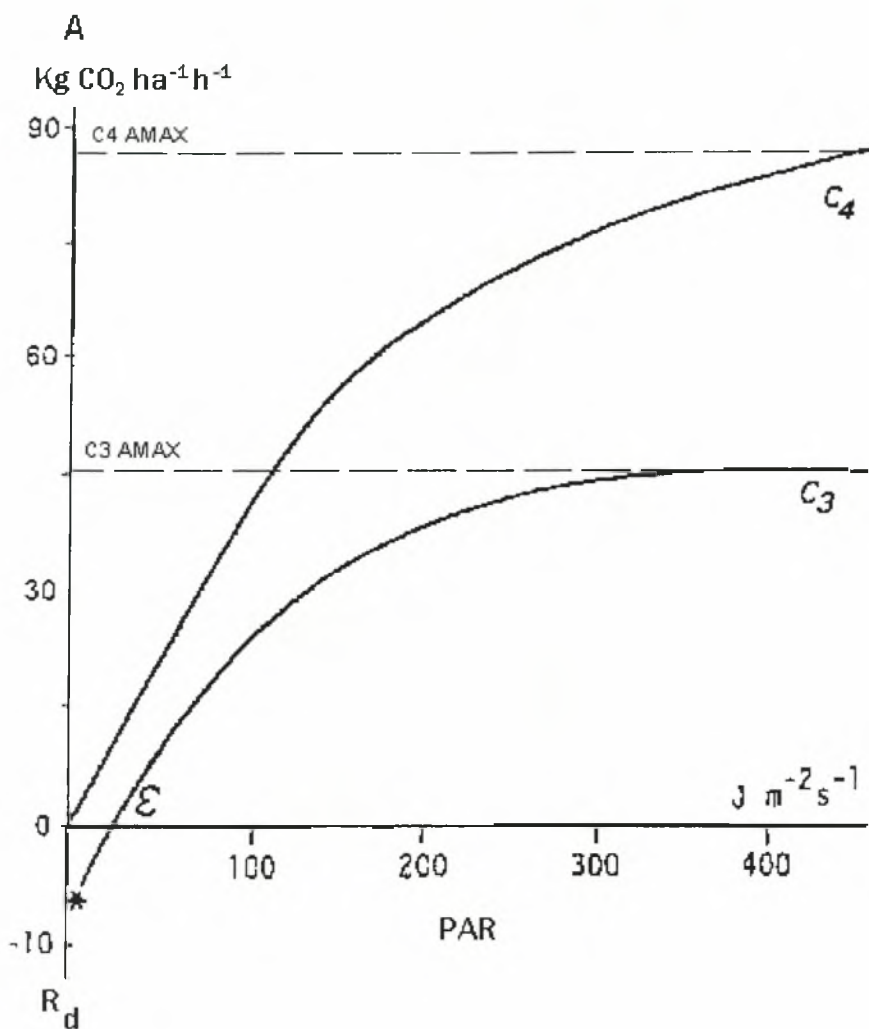
2.2.1 Αφομοίωση CO₂ από ένα απλό φύλλο

Όλο το φάσμα της ακτινοβολίας του ήλιου δεν συμβάλει στην φωτοσύνθεση αλλά μόνο ένα μέρος αυτού που κυμαίνεται από 400 εώς 700 nm και ονομάζεται φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία (PAR, J m⁻² s⁻¹). Η PAR αποτελεί περίπου το 50% της συνολικής ακτινοβολίας (AVRAD, J m⁻² s⁻¹) όπως φαίνεται στην εικόνα 4.



Εικόνα 4: Φασματική κατανομή της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας (άνω καμπύλη) και της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας (κάτω καμπύλη). Γωνία κλίσης του ηλίου 30° και υγρασία ατμόσφαιρας 21mm (Monteith 1973).

Ο ρυθμός αφομοίωσης CO₂ ενός απλού φύλλου μπορεί να μετρηθεί με την τοποθέτηση του φύλλου σε ειδικό θάλαμο (leaf chamber) και αναλύοντας την συγκέντρωση CO₂ του εισερχόμενου και εξερχόμενου αέρα που διαπερνά το φύλλο με γνωστό ρυθμό ροής. Όταν ο ρυθμός αφομοίωσης προσδιοριστεί για διάφορες εντάσεις φωτός μπορεί να κατασκευαστεί η καμπύλη της εικόνας 5 για φύλλα φυτών των φωτοσυνθετικών τύπων C₃ και C₄.

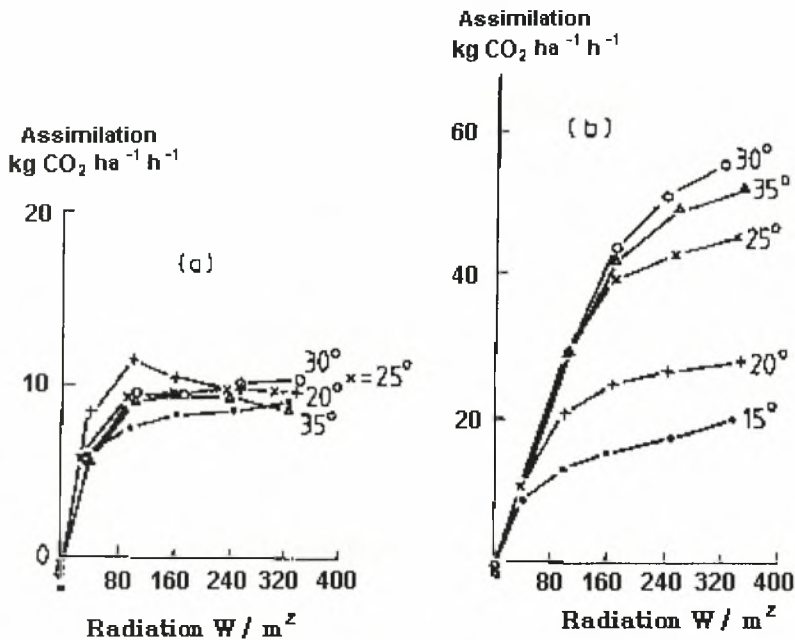


Εικόνα 5: Χαρακτηριστικές καμπύλες αφομοίωσης CO₂ για φύλλα φυτών C₃ και C₄

Οι κύριες παράμετροι που χαρακτηρίζουν την καμπύλη φωτοσύνθεσης είναι η αρχική κλίση της καμπύλης, γνωστή ως αρχική αποτελεσματικότητα (E), ο ρυθμός αναπνοής στο σκοτάδι R_d, και ο μέγιστος ρυθμός καθαρής αφομοίωσης (A) σε μεγάλη ένταση κορεσμού, AMAX. Οι μέγιστοι ρυθμοί αφομοίωσης κυμαίνονται από 50-90 kg ha⁻¹ (φύλλου) h⁻¹ για φυτά τύπου C₄ και 30-50 kg ha⁻¹ (φύλλου) h⁻¹ για φυτά τύπου C₃.

Η αρχική αποτελεσματικότητα είναι πρακτικά ανεξάρτητη της συγκέντρωσης CO₂ (Gaastra, 1978), ενώ ο μέγιστος ρυθμός καθαρής αφομοίωσης και ο ρυθμός αναπνοής επηρεάζονται περισσότερο από την ακτινοβολία, τη θερμοκρασία και τον φωτοσυνθετικό τύπο του φυτού (C₃, C₄). Η επιρροή της θερμοκρασίας στον μέγιστο ρυθμό αφομοίωσης παρουσιάζεται στην εικόνα 6 για τους δυο φωτοσυνθετικούς

τύπους. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε φυτά κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες και σε θερμοκρασίες κοντά στη βέλτιστη.



Εικόνα 6: η σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και μέγιστου ρυθμού αφομοίωσης CO₂ για C₃ (α) και C₄ (β) φυτά.

Οι συμβολισμοί C₃, C₄ αναφέρονται στον διαφορετικό τρόπο δέσμευσης του CO₂ από τα 2 είδη φυτών με αποτέλεσμα πολλές φυσιολογικές και βιοχημικές διαφορές μεταξύ τους. Παρακάτω παρουσιάζονται οι κυριότερες διαφορές μεταξύ των C₃ και C₄ φυτών που σχετίζονται με την αποδοτικότητά τους:

- Το κύριο καρβοξυλικό ένζυμο (PEP-καρβοξυλάση) που παίρνει μέρος στην δέσμευση του CO₂ των C₄ φυτών έχει διπλάσια ικανότητα δέσμευσης CO₂ απ' αυτήν των C₃ (Rubisco).
- Στα φυτά C₃ η αναπνοή λαμβάνει χώρα στο φως και αυτό οδηγεί στην εξάρτηση του ρυθμού αφομοίωσης από την συγκέντρωση οξυγόνου στον αέρα, η φωτοαναπνοή είναι πρακτικά αμελητέα στα φυτά C₄. Έτσι στα φυτά C₃ οι απώλειες παραγώγων αφομοίωσης από την φωτοαναπνοή αυξάνουν με

τη θερμοκρασία και την ένταση φωτισμού, και αυτό έχει μεγάλη πρακτική σημασία στον μέγιστο ρυθμό καθαρής αφομοίωσης.

- Τα C_4 φυτά κάνουν πιο αποδοτική χρήση της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας από τα φυτά C_3 . Οι μέγιστοι ρυθμοί αφομοίωσης (AMAX) κυμαίνονται από $50-90 \text{ kg ha}^{-1} (\text{φύλλου}) \text{ h}^{-1}$ για φυτά τύπου C_4 και $30-50 \text{ kg ha}^{-1} (\text{φύλλου}) \text{ h}^{-1}$ για φυτά τύπου C_3 .
- Στα φυτά C_4 ο μέγιστος ρυθμός αφομοίωσης πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες $25-35 \text{ }^\circ\text{C}$ ενώ στα C_3 σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται μεταξύ $15-25 \text{ }^\circ\text{C}$ (Black, 1973).

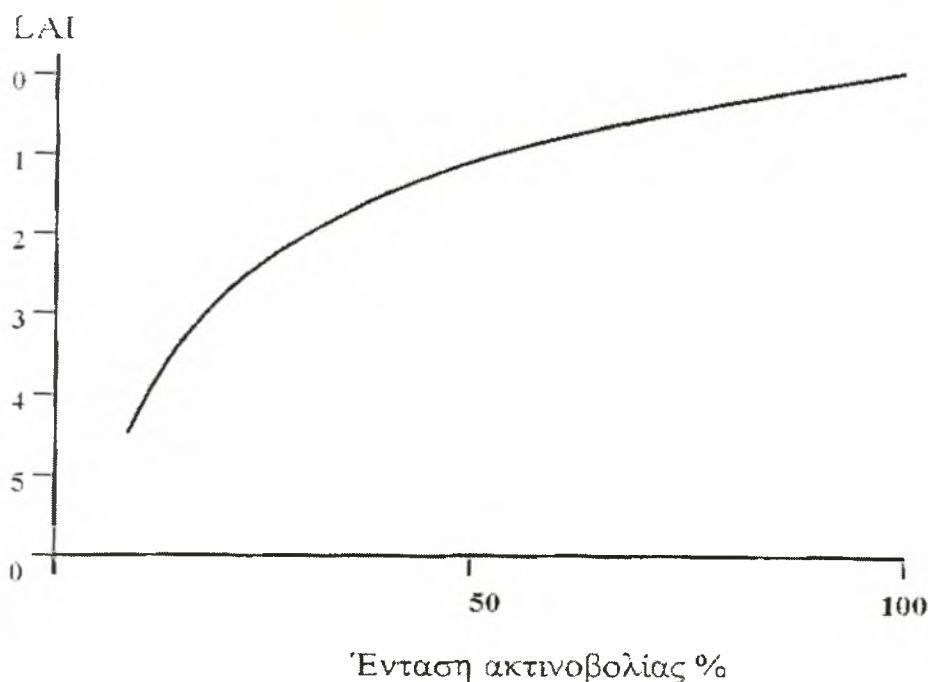
Παραδείγματα C_3 φυτών που καλλιεργούνται στην εύκρατη ζώνη είναι χειμερινά σιτηρά, ρύζι, βαμβάκι και τύπου C_4 , σόργο, αραβόσιτος, κεχρί και ζαχαροκάλαμο.

2.2.2 Αφομοίωση φυλλοστοιβάδας.

Ο ρυθμός αφομοίωσης μιας καλλιέργειας εξαρτάται από την εισερχόμενη ορατή ακτινοβολία με τον ίδιο τρόπο όπως και ο ρυθμός αφομοίωσης ενός απλού φύλλου. Για λόγους απλούστευσης υποθέτουμε ότι μια καλλιέργεια έχει ένα μεγάλο οριζόντιο στρώμα φύλλων που σχηματίζουν μια κλειστή επιφάνεια. Το στρώμα αυτό λειτουργεί σαν ένα μεγάλο γιγαντιαίο φύλλο, και αν είναι γνωστή η ηλιακή ακτινοβολία τότε από την εικόνα 5 μπορεί να προσδιοριστεί ο ρυθμός αφομοίωσης του CO_2 λαμβάνοντας υπόψη ότι το 10% της εισερχόμενης ακτινοβολίας ανακλάται, το 10% περνά απ' τα φύλλα, άλλο ένα 10% απορροφάται από τα συστατικά του φύλλου που δεν έχουν σχέση με την φωτοσύνθεση και το υπόλοιπο 70% απορροφάται από τους χλωροπλάστες και χρησιμοποιείται στη διαδικασία της φωτοσύνθεσης.

Κάτω από συνθήκες ορατής ακτινοβολίας έντασης $300 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ μια καλλιέργεια τύπου C_3 έχει καθαρό ρυθμό αφομοίωσης περί τα $25 \text{ kg ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (εικόνα 5) για LAI ίσο με ένα (μία στρώση φύλλων). Για LAI ίσο με δύο (δεύτερο στρώμα φύλλων κάτω από το πρώτο) η ακτινοβολία που φθάνει στο 2^ο στρώμα είναι ίση με το 10% που διαπερνά την πρώτη στρώση και έτσι με τη σειρά της προκαλεί ρυθμό αφομοίωσης ίσο με $3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Προσθέτοντας επομένως περισσότερα στρώματα φύλλων κάτω από το δεύτερο, η αύξηση του ρυθμού αφομοίωσης είναι αμελητέα.

Στην πραγματικότητα οι καλλιέργειες δεν αποτελούνται από οριζόντιες στρώσεις μεγάλων φύλλων, αλλά από φύλλα που αναπτύσσονται προς διάφορες κατευθύνσεις και με διάφορους προσανατολισμούς, έτσι ώστε η κατανομή του φωτός στα φύλλα να είναι ομοιόμορφη. Η διεισδυτικότητα του φωτός μέσα στη φυλλοστοιβάδα μιας καλλιέργειας μπορεί να προσδιοριστεί πειραματικά μετρώντας την ένταση του φωτός σε διάφορα ύψη και την ίδια στιγμή μετρώντας την συνολική φυλλική επιφάνεια στα ίδια επίπεδα. Το αποτέλεσμα ενός τέτοιου πειράματος παρουσιάζεται στην εικόνα 7 που δείχνει τη σχέση μεταξύ της σχετικής έντασης του φωτός και του δείκτη φυλλικής επιφάνειας, υπολογίζοντας τη φυλλική επιφάνεια από την κορυφή της φυλλοστοιβάδας προς το έδαφος.



Εικόνα 7. Η απορρόφηση της έντασης φωτός σε διαφορετικά βάθη φυλλοστοιβάδας (Danalatos, 1993). Η προτεινόμενη σχέση είναι: $PAR_{ef} = \lambda e^{-K_c \cdot LAI}$ όπου K_c ο συντελεστής διεισδυτικότητας της φυλλοστοιβάδας.

Η διείσδυση του φωτός είναι εκθετικής μορφής για την αύξηση του LAI. Για κάθε τιμή του LAI, το ποσοστό του απορροφημένου φωτός μπορεί να προσδιοριστεί από την εικόνα 7. Σε συνδυασμό με την εικόνα 5 μπορεί να προσδιοριστεί ο ρυθμός αφομοίωσης της καλλιέργειας. Για δείκτη φυλλικής επιφάνειας ίσο με 4, ο ρυθμός αφομοίωσης CO_2 είναι περίπου $39 \text{ kg ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$, ή περίπου 150% παραπάνω απ' ότι

στην καλλιέργεια με τα μεγάλα οριζόντια φύλλα. Ο λόγος γι' αυτό είναι ότι σε μια πραγματική καλλιέργεια η κατανομή της φωτεινής ακτινοβολίας στη φυλλοστοιβάδα είναι περισσότερο ομοιόμορφη και επομένως περισσότερα φύλλα εκτίθενται σε ακτινοβολίες στο γραμμικό τμήμα της καμπύλης αφομοίωσης ακτινοβολίας.

Τα παραπάνω δίνουν ένα σχηματικό τρόπο υπολογισμού του ρυθμού αφομοίωσης CO₂ μιας καλλιέργειας. Στην πραγματικότητα όμως η επίδραση της άμεσης και έμμεσης ακτινοβολίας, της φυλλικής επιφάνειας, της γωνίας έκπτυξης των φύλλων και των οπτικών χαρακτηριστικών τους, της γωνίας πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων και της κατανομής του φωτός μέσα στην φυλλοστοιβάδα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη.

Το πρόβλημα αυτό άρχισε να επιλύεται ήδη από 30ετίας με την βοήθεια μοντέλων H/Y (De Wit, 1965: Duncan *et al*, 1967: Goudriaan, 1977) που υπολογίζουν τον ρυθμό αφομοίωσης της φυλλοστοιβάδας για κάθε χρονική στιγμή της ημέρας σε σχέση με την εισερχόμενη φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία, η οποία με την σειρά της εξαρτάται από την γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων και το βαθμό νέφωσης.

2.3 Μοντέλα

Όπως αναφέρθηκε, τα μοντέλα είναι απλοποιημένες εκφράσεις πιο πολύπλοκων συστημάτων και μέρους της πραγματικότητας (De Wit, 1968, 1993) και πιο συγκεκριμένα στη περίπτωση που μελετάμε είναι ένα σύνολο μαθηματικών εξισώσεων που περιγράφει ένα φυσικό σύστημα (ακτινοβολία, φυτό) (James and Cutforth, 1996).

Η χρήση των μοντέλων παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα και βοηθά στην περαιτέρω έρευνα. Σε περιπτώσεις που ο πειραματισμός είναι είτε χρονοβόρος είτε αδύνατος και αντιοικονομικός στο πραγματικό σύστημα, το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτική λύση για την πραγματοποίησή του και να μας δώσει κάποια πρώτα αποτελέσματα που θα συμπίπτουν αρκετά με αυτά που θα είχαμε αν κάναμε το πείραμα. Βέβαια η ακρίβεια και εγκυρότητα των αποτελεσμάτων εξαρτάται από την ακρίβεια και λεπτομέρεια του μοντέλου, αλλά παρ' όλα αυτά μπορούμε να έχουμε μια πρώτη εκτίμηση του τι θα προκύψει από το πείραμα, οικονομικά και σε μικρό χρονικό διάστημα. Μ' αυτόν τον τρόπο μπορούμε να

προβλέψουμε μελλοντικές καταστάσεις κάποιων φαινομένων χωρίς να χρειαστεί να τις μελετήσουμε μία προς μία.

Μερικά από τα πλεονεκτήματα από την χρήση των μοντέλων συνοπτικά, είναι τα εξής:

- Κατανόηση ενός φαινομένου μέσω της απλοποίησης.
- Παρουσίαση και εκτίμηση της σχέσης αίτιο –αποτέλεσμα.
- Πειραματισμός στο αληθινό σύστημα είναι είτε αδύνατος, είτε πολύ ακριβός, είτε πολύ χρονοβόρος, είτε ηθικά ή κοινωνικά απαγορευτικός.
- Εξοικονόμηση χρόνου για την ανάλυση του συστήματος και της πρόβλεψης μελλοντικών καταστάσεων.

2.3.1 Προσομοίωση φωτοσύνθεσης

Την αρχή ανάπτυξης ενός μοντέλου προσομοίωσης του φωτοσυνθετικού ρυθμού και υπολογισμού του δυναμικού παραγωγής έκανε το 1965 ο Ολλανδός C. T. De Wit και η εργασία του συνεχίζεται μέχρι και σήμερα από διάφορους ερευνητές που βελτιώνουν και εξελίσσουν το αρχικό αυτό μοντέλο (Van Laar, Goudriaan, Spitters, Toussaint, Danalatos, κ.α).

Πρώτος ο de Wit υπολόγισε το φωτοσυνθετικό ρυθμό της φυλλοστοιβάδας μιας καλλιέργειας σε σχέση με την μεταφορά και αντανάκλαση της ακτινοβολίας, την φωτοσυνθετική ικανότητα των φύλλων, τη γωνία των φύλλων σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο και μεταξύ τους, το δείκτη φυλλικής επιφάνειας, το ύψος του ηλίου και τη συγκέντρωση του CO₂ στην ατμόσφαιρα, και κατασκεύασε το αντίστοιχο μοντέλο (BACROS) που περιελάμβανε όλους αυτούς τους παράγοντες (de Wit, 1965). Για τη σχέση που συνδέει την φωτοσύνθεση με την ακτινοβολία χρησιμοποίησε την παρακάτω εξίσωση:

$$A=AMAX*H/(H+HH) \quad (1)$$

Όπου **AMAX** ο μέγιστος ρυθμός φωτοσύνθεσης σε Kg CO₂ ha⁻¹ h⁻¹, **H** η απορροφούμενη φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία σε W m⁻², και **HH** η

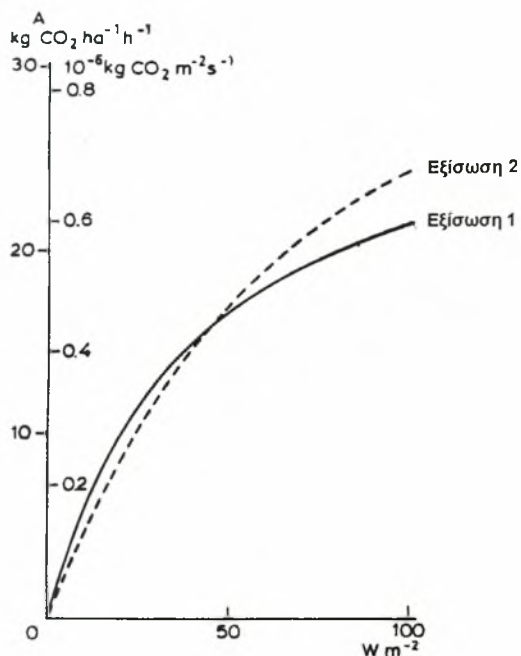
ακτινοβολία στην οποία πραγματοποιείται το μισό της ολικής φωτοσύνθεσης σε $W m^{-2}$.

Παρουσίασε επίσης πίνακες που δίνουν τον ημερήσιο ρυθμό αφομοίωσης CO_2 για κλειστή φυλλοστοιβάδα με σφαιρική κατανομή φύλλων, για ανέφελος (FCL) και τελείως νεφοσκεπείς μέρες (FOV) για γεωγραφικά πλάτη από 0° έως 70° . Στους πίνακες του όμως δεν γίνεται ο διαχωρισμός μεταξύ C_3 και C_4 φυτών. Αργότερα με την ανακάλυψη του διαφορετικού μηχανισμού φωτοσύνθεσης των φυτών και τον διαχωρισμό τους σε C_3 και C_4 έγιναν βελτιώσεις στο μοντέλο και παρουσιάστηκαν από τους Goudriaan και van Laar (1978) πίνακες για κάθε είδος φυτού.

Πιο πρόσφατες μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν (Van Laar & Penning de Vries, 1972; Peat 1970; English 1976) βελτίωσαν την σχέση φωτοσύνθεσης-ακτινοβολίας του de Wit και κατέληξαν σε μια ασυμπτωτική εκθετική συνάρτηση η οποία είναι πιο ακριβής και δίδεται από την σχέση (2):

$$A=AMAX*(1-\exp(-H/HH)) \quad (2)$$

Όπου **AMAX** ο μέγιστος ρυθμός φωτοσύνθεσης σε $Kg CO_2 ha^{-1} h^{-1}$, **H** η απορροφούμενη φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία σε $W m^{-2}$, και **HH** η ακτινοβολία στην οποία πραγματοποιείται το μισό της ολικής φωτοσύνθεσης σε $W m^{-2}$.



Εικόνα 8. η ακαθάριστη φωτοσύνθεση (χωρίς την αναπνοή) ως συνάρτηση της απορροφούμενης ακτινοβολίας. Η συμπαγής γραμμή είναι σύμφωνα με την εξίσωση 1 και η διακεκομμένη σύμφωνα με την εξίσωση 2 (Goudriaan & van Laar, 1978)

Ο ρυθμός AMAX/HH εκφράζει το πόσο αποτελεσματικά γίνεται η εκμετάλλευση του φωτός σε χαμηλές εντάσεις και είναι η κορυφή της καμπύλης φωτοσύνθεσης-απορροφημένου φωτός.

Ο de Wit (1965) έδινε στο AMAX την τιμή $0.8 \cdot 10^{-6} \text{ Kg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ($20 \text{ kg CH}_2\text{O ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ στο SI) και στο HH την τιμή 39 Wm^{-2} (απορροφημένη φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία PAR) έτσι ώστε η αποτελεσματικότητα E ήταν $21 \cdot 10^{-9} \text{ Kg CO}_2 \text{ J}^{-1}$ ($0.75 \text{ kg CO}_2 \text{ m}^2 \text{ s ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ J}^{-1}$). Αργότερα αποδείχθηκε ότι αυτή η τιμή είναι πολύ υψηλή και υπολογίστηκε ότι υπέρβαινε κατά 30% την πραγματικότητα (de Wit *et al.*, 1978; Bjorkman & Ehleringer, 1975; Van Laar & Penning de Vries 1972) και η τιμή $14 \cdot 10^{-9} \text{ Kg CO}_2 \text{ J}^{-1}$ βρισκόταν πιο κοντά στην πραγματικότητα.

Οι πίνακες ακαθάριστης ημερήσιας αφομοίωσης CO_2 των Goudriaan, van Laar (1978) δίνουν μικρότερες τιμές για νεφοσκεπή ουρανό σε σχέση με αυτές του de Wit και ειδικότερα για τον χειμώνα και λίγο υψηλότερες για καθαρό ουρανό και ειδικότερα για το καλοκαίρι. Αυτή η αλλαγή οφείλεται στην αλλαγή της καμπύλης, της σχέσης φωτοσύνθεση – ένταση φωτός. Ενδεικτικοί πίνακες του μοντέλου των

Goudriaan & van Laar (1978) παρουσιάζονται στη παράγραφο «Αποτελέσματα και συζήτηση».

Μέχρι το 1985 στα μοντέλα φωτοσύνθεσης ο συνήθης τρόπος διαχωρισμού μεταξύ της άμεσης (direct) και διάχυτης (diffuse) ακτινοβολίας ήταν να θεωρείται ότι σε συγκεκριμένες περιόδους της ημέρας ο ουρανός είναι είτε τελείως νεφοσκεπής είτε τελείως ανέφελος, μια ανακριβής βέβαια μέθοδος αφού αυτή η προσέγγιση υποτιμά σε μεγάλο βαθμό την επίδραση της διάχυτης ακτινοβολίας. Το 1985 οι Weiss and Norman (1985) και ο Latinga (1985) παρουσίασαν μια μέθοδο εκτίμησης της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας από μετρήσεις της ολικής ημερήσιας ακτινοβολίας βασισμένοι στο πιθανό ποσό της ακτινοβολίας που φτάνει στην γήινη επιφάνεια. Την επόμενη χρονιά ο Spitters (1986) ασχολήθηκε με τη διάχυτη και την άμεση ακτινοβολία και παρουσίασε μια πιο ακριβή μέθοδο που ενσωματώθηκε στα μοντέλα SUCROS και WOFOST, που αποτελούν εξέλιξη του μοντέλου BACROS του de Wit (1965) που δημιουργήθηκε από την σχολή Wageningen της Ολλανδίας

Ο Spitters κατέληξε στις εξής σχέσεις για τον υπολογισμό της διάχυτης ακτινοβολίας:

$$\frac{FRDIF}{AVRAD} = 1 \quad \text{για} \quad ATMTR < 0.07$$

$$\frac{FRDIF}{AVRAD} = 1 - 2.3(ATMTR - 0.07)^2 \quad \text{για} \quad 0.07 \leq ATMTR < 0.35$$

$$\frac{FRDIF}{AVRAD} = 1.33 - 1.46 \times ATMTR \quad \text{για} \quad 0.35 \leq ATMTR < 0.75$$

$$\frac{FRDIF}{AVRAD} = 0.23 \quad \text{για} \quad 0.75 \leq ATMTR$$

Όπου FRDIF το ποσοστό της διάχυτης ακτινοβολίας, AVRAD η ολική ακτινοβολία ($J m^{-2} d^{-1}$) και ATMTR (ATMospheric TRansmission) το ποσοστό της ακτινοβολίας που τελικά εισέρχεται στη γη από την κοσμική που φθάνει στα όρια της γης.

2.3.2 Μοντέλα φωτοσύνθεσης – προσομοίωση δυναμικού παραγωγής

Τα μοντέλα προσομοίωσης αύξησης καλλιεργειών και παραγωγής περιγράφουν τις επιδράσεις των μετεωρολογικών φαινομένων (μεταβλητών) πάνω στις διεργασίες των

φυτών όπως είναι η φωτοσύνθεση και η αναπνοή με σκοπό να περιγράψουν την αύξηση της καλλιέργειας. Παραδείγματα τέτοιων μοντέλων είναι τα ELCROS (Centre for Agrobiological Research (CABO) Holland, 1972), BACROS (De Wit *et al.*, 1978), CERES (Godwin and Vlek, 1985), SUCROS (Goudriaan, 1992), WOFOST (Van Keulen, 1986,1994), DSSAT (Tsuji *et al.*, 1994), ORYZA2000 (Bouman & van Laar, 2000). Τα παραπάνω μοντέλα έχουν εξειδικευμένη χρήση ανάλογα με την/τις καλλιέργειες που περιγράφουν σε ορισμένες περιοχές του πλανήτη.

2.4 Ειδικός σκοπός της εργασίας

Στηριγμένος στις αρχές προσομοίωσης των δυναμικών παραγωγής της σχολής Wageningen, ο Danalatos (1993) κατασκεύασε ένα βελτιωμένο μοντέλο προσομοίωσης του συστήματος έδαφος-φυτό-ατμόσφαιρα (SOil CROp ATmosphere Evaluation System, SO.CR.AT.E.S) βασισμένο στα μοντέλα SUCROS και WOFOST λαμβάνοντας υπόψη και την επίδραση της διάχυτης και άμεσης ακτινοβολίας, βασισμένο σε πειραματικά δεδομένα αγρού για έναν αριθμό ποικιλιών-υβριδίων βαμβακιού, καλαμποκιού και σίτου. Το πρόγραμμα είναι γραμμένο στην γλώσσα προγραμματισμού Quick Basic.

Στην παρούσα εργασία αναβαθμίζεται το μοντέλο αυτό σε Visual Basic για ταχύτερη επεξεργασία και καλύτερη επικοινωνία με τον χρήστη (user friendly) και εφαρμόζεται το μοντέλο για την αναπαραγωγή των πινάκων των Goudriaan και van Laar (1978), διορθωμένων για την επίδραση της διάχυτης ακτινοβολίας σε ελληνικά γεωγραφικά πλάτη (35° - 41°) ανά μισό βαθμό γεωγραφικού πλάτους, και για την υψήλιο από (0° - 60° B.) ανά 10 βαθμούς γεωγραφικού πλάτους για την εύκολη και γρήγορη χρήση της μεθόδου για διδακτικούς ή ερευνητικούς σκοπούς χωρίς την ανάγκη χρήσης ηλεκτρονικού υπολογιστή (Οι πίνακες παρατίθενται στα αποτελέσματα).

3. Το μοντέλο προσομοίωσης

3.1 Εξισώσεις φωτοσύνθεσης φυλλοστοιβάδας (το μοντέλο)

Το μοντέλο που περιγράφεται στην παρούσα εργασία υπολογίζει το ακαθάριστο ποσό αφομοίωσης CO₂ της φυλλοστοιβάδας μιας καλλιέργειας. Αποτελεί ένα μέρος του μοντέλου SO.CR.AT.E.S. (Danalatos, 1993) και συγκεκριμένα το μέρος του μοντέλου που υπολογίζει τον ημερήσιο δυναμικό ρυθμό αφομοίωσης CO₂. Η εφαρμογή που προγραμματίστηκε με βάση αυτό το μοντέλο δίνει αποτελέσματα για τον Ελληνικό χώρο, όμως βρίσκει εφαρμογή και σε γεωγραφικά πλάτη ευρύτερα από τα Ελληνικά. Στην παράγραφο «Αποτελέσματα» παρουσιάζονται ενδεικτικοί πίνακες αφομοίωσης CO₂ για κλειστή φυλλοστοιβάδα για πλήρως ανέφελο και πλήρως νεφοσκεπή ουρανό των Goudriaan & Van Laar (1978), και του παρόντος μοντέλου για σύγκριση. Το μοντέλο για να λειτουργήσει απαιτεί ως δεδομένα εισόδου το γεωγραφικό πλάτος της καλλιέργειας και τον μέγιστο ρυθμό αφομοίωσης CO₂ AMAX (kg CO₂ ha⁻¹ (φύλλου) h⁻¹) της καλλιέργειάς, το ποσοστό ηλιοφάνειας (Sunshine Duration ratio), την ημέρα εφαρμογής του μοντέλου και το δείκτη φυλλικής επιφάνειας της καλλιέργειας. Αν το ποσοστό ηλιοφάνειας δεν είναι γνωστό, μπορεί να υπολογιστεί με εισαγωγή του ποσοστού των ωρών πραγματικής ηλιοφάνειας (ώρες πραγματική ηλιοφάνειας / ώρες διάρκειας της ημέρας).

3.1.1 Ολική Ακτινοβολία

Για τη λειτουργία του μοντέλου απαιτείται να γνωρίζουμε την ολική ηλιακή ακτινοβολία (AVRAD, W m⁻²) που εισέρχεται στην ατμόσφαιρα της γης. Άμεσα μετρημένες τιμές της AVRAD υπάρχουν για λίγες περιοχές της Ελλάδας, και όπου δεν είναι διαθέσιμη υπολογίζεται από τα διαθέσιμα στοιχεία διάρκειας της ηλιοφάνειας, χρησιμοποιώντας τον τύπο του Angstrom (1924):

$$AVRAD = DSO \times ATMTR \quad Jm^{-2}d^{-1} \quad (3.3)$$

$$ATMTR = \left(a + b \times \frac{n}{DAYL} \right) \quad (3.4)$$

Όπου DSO είναι η ολική ακτινοβολία που φθάνει στα όρια της ατμόσφαιρας ($J m^{-2} d^{-1}$), ATMTR (ATMospheric TRansmission) είναι ο συντελεστής που εκφράζει το ποσοστό της ακτινοβολίας που εισέρχεται στην γήινη ατμόσφαιρα, και α και β είναι σταθερές που έχουν τις τιμές 0,20 και 0,56 αντίστοιχα (Frère και Poron, 1979), σε συμφωνία με τις μετρήσεις στην Ελλάδα (Danalatos, 1993). Η παράμετρος "n" δηλώνει την πραγματική διάρκεια ηλιοφάνειας (σε ώρες) όπως μετριέται με το όργανο καταγραφής Campbell-Stokes, και η DAYL αντιπροσωπεύει την πραγματική διάρκεια ημέρας σε ώρες.

Η ακτινοβολία που φθάνει στα όρια της ατμόσφαιρας DSO, υπολογίζεται από την ηλιακή σταθερά ($1370 J m^{-2} d^{-1}$; I.E.A, 1978) και δίνεται από τον τύπο:

$$DSO = 1370 \times \left[1 + 0.033 \times \cos \left(2 \times \pi \times \frac{DAY}{365} \right) \right] \times \int_0^{DAYL} \sin(B) dt \quad Jm^{-2} d^{-1} \quad (3.5)$$

Όπου DAY είναι η ημέρα του έτους μετά την 1η Ιανουαρίου, και B η γωνία ανύψωσης του ήλιου πάνω από τον ορίζοντα που ολοκληρώνεται για την διάρκεια μιας ημέρας.

Η αστρονομική διάρκεια ημέρας (DAYL σε ώρες) και η ηλιακή ανύψωση πάνω από τον ορίζοντα ($\sin(B)$) δίνονται από (Danalatos, 1993):

$$DEC = -\arcsin(\sin(23.45 \times RAD) \times \cos(2 \times \pi \times \frac{DAY + 10}{365})) \quad (3.6)$$

$$SSIN = \sin(RAD \times LAT) \times \sin(DEC) \quad (3.7)$$

$$CCOS = \cos(RAD \times LAT) \times \cos(DEC) \quad (3.8)$$

$$DAYL = 12 \times \left[1 + \frac{2 \times \arcsin\left(\frac{SSIN}{CCOS}\right)}{\pi} \right] \text{ hours} \quad (3.9)$$

$$\sin(B) = SSIN + CCOS \times \cos\left(\frac{2 \times \pi \times (HOUR + 12)}{24}\right) \quad (3.10)$$

Όπου DEC είναι η γωνία κλίσης του ήλιου, LAT το γεωγραφικό πλάτος και HOUR η ώρα της ημέρας. Το RAD είναι ο συντελεστής μεταφοράς από μοίρες σε ακτίνια (RAD=1/180).

3.1.2 Άμεση και διάχυτη ακτινοβολία

Σημαντική βελτίωση του μοντέλου αποτελεί ο διαχωρισμός μεταξύ της άμεσης (direct) και διάχυτης (diffuse) ακτινοβολίας που αποτελούν τις συνιστώσες της ολικής ακτινοβολίας που φτάνει στην γη. Η στιγμιαία ακτινοβολία πάνω στην γήινη επιφάνεια είναι κυρίως άμεση, με γωνία εμφάνισης ίση με την γωνία του ήλιου και ελάχιστα διάχυτη με εμφάνιση κάτω από διάφορες γωνίες. Η διάχυτη προέρχεται από διασπορά των ηλιακών ακτίνων πάνω στα σωματίδια της ατμόσφαιρας.

Το κλάσμα της στιγμιαίας διάχυτης ακτινοβολίας (FRDIF) υπολογίζεται από την ατμοσφαιρική μεταφορά ATMTR σύμφωνα με τις σχέσεις (de Jong, 1980):

$$\frac{FRDIF}{AVRAD} = 1 \quad \text{για} \quad ATMTR < 0.07 \quad (3.11a)$$

$$\frac{FRDIF}{AVRAD} = 1 - 2.3(ATMTR - 0.07)^2 \quad \text{για} \quad 0.07 \leq ATMTR < 0.35 \quad (3.11b)$$

$$\frac{FRDIF}{AVRAD} = 1.33 - 1.46 \times ATMTR \quad \text{για} \quad 0.35 \leq ATMTR < 0.75 \quad (3.11c)$$

$$\frac{FRDIF}{AVRAD} = 0.23 \quad \text{για} \quad 0.75 \leq ATMTR \quad (3.11d)$$

3.1.3 Φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία

Όπως αναφέρθηκε όλο το φάσμα της ακτινοβολίας που φθάνει στη γη (300-3000 nm) δεν είναι φωτοσυνθετικά ενεργό παρά μόνο ένα μικρό κομμάτι του εύρους των 400-700 nm. Αυτή η ακτινοβολία ονομάζεται φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία (PAR).

Η PAR χωρίζεται και αυτή σε δυο μέρη, την διάχυτη (PARDIF) και άμεση (PARDIR). Οι στιγμιαίες τιμές των PAR, PARDIF, PARDIR, προκύπτουν από τις καθημερινές τιμές της AVRAD [εξισώσεις (3.3) έως (3,5)], όπως φαίνεται από τις εξισώσεις (3.12) έως (3.14) (Spitters, 1986):

$$PAR = \frac{0.5 \times AVRAD \times \sin'(B)}{\int_0^{DAYL} \sin'(B) dt} \quad Jm^{-2}s^{-1} \quad (3.12)$$

$$PARDIF = 0.5 \times AVRAD \times FRDFIR \times \sin(B) \quad Jm^{-2}s^{-1} \quad (3.13)$$

$$PARDIR = PAR = PARDIF \quad Jm^{-2}s^{-1} \quad (3.14)$$

Όπου $\sin'(B) = \sin(B) \times (1 + 0.4 \times \sin(B))$. Ο παράγοντας $(1 + 0.4 \times \sin(B))$ προστίθεται για να συνυπολογιστεί η ημερήσια πορεία της ATMTR που συνδέεται με το ημερήσιο πρότυπο της ηλιακής ανύψωσης.

Η ένταση της PAR, που διαπερνά τη φυλλοστοιβάδα δεν είναι σταθερή, αλλά μειώνεται εκθετικά με το LAI σύμφωνα με την ακόλουθη γενική εξίσωση:

$$VIS = (1 - REFS) \times PAR \times e^{-k \times LAI} \quad Jm^{-2}(leaf)s^{-1} \quad (\text{βλ. επίσης Εικ. 7}) \quad (3.15)$$

Όπου VIS είναι η στιγμιαία καθαρή ένταση του φωτός στα διάφορα βάθη της φυλλοστοιβάδας μετρώντας από την κορυφή, PAR είναι η στιγμιαία ένταση του φωτός στην κορυφή της φυλλοστοιβάδας ($J m^{-2}$ (εδάφους) s^{-1}) και το K είναι ο

συντελεστής διεισδυτικότητας (extinction coefficient). REFS είναι ο συντελεστής αντανάκλασης για σφαιρική κατανομή γωνίας φύλλων.

Σε αναλογία με την εξίσωση (3.15), οι κατανομές τις καθαρής διάχυτης ροής (VISDF), της ολικής άμεσης ροής (VIST), και της άμεσης συνιστώσας της άμεσης ροής (VISD) δίδονται από τις παρακάτω εξισώσεις (εξισώσεις 3.16a έως 3.16c)

$$VISDF = (1 - REFS) \times PARDIF \times KDIF \times e^{-KDIF \times LAI} \quad Jm^{-2} (leaf) s^{-1} \quad (3.16a)$$

$$VIST = (1 - REFS) \times PARDIR \times KDIRT \times e^{-KDIRT \times LAI} \quad Jm^{-2} (leaf) s^{-1} \quad (3.16b)$$

$$VISD = (1 - SCV) \times PARDIR \times KDIRBL \times e^{-KDIRBL \times LAI} \quad Jm^{-2} (leaf) s^{-1} \quad (3.16c)$$

Όπου SCV είναι ο συντελεστής της διασποράς (SCV=0.2), και KDIF, KDIRT και KDIRBL είναι οι συντελεστές διεισδυτικότητας της διάχυτης ακτινοβολίας, της συνολικής άμεσης ροής και του άμεσου συστατικού της άμεσης ροής, αντίστοιχα. Οι συντελεστές διεισδυτικότητας προσεγγίζονται από τον Goudriaan (1977, 1982) ως εξής:

$$KDIF = 0.8 \times \sqrt{1 - SCV} \quad SCV = 0.2 \quad (3.17a)$$

$$KDIRBL = \frac{0.5}{\sin(B)} \quad (3.17b)$$

$$KDIRT = KDIRBL \times \sqrt{1 - SCV} \quad (3.17c)$$

Ο συντελεστής διασποράς SCV (de Wit, 1965) χρησιμοποιείται για να εκφράσει το ποσοστό της ακτινοβολίας που εισέρχεται σε μη φωτοσυνθετικά όργανα ενώ ο συντελεστής αντανάκλασης (REFS) εκφράζει την ακτινοβολία που αντανακλάται από τα φύλλα και υπολογίζεται με το συνδυασμό των ακόλουθων σχέσεων:

$$REFH = \frac{1 - \sqrt{1 - SCV}}{1 + \sqrt{1 - SCV}} \quad (3.18a)$$

$$REFS = REFH \times \frac{1}{0.5 + \sin(B)} \quad (3.18b)$$

Η εξίσωση (3.18α) υπολογίζει την αντανάκλαση για μια φυλλοστοιβάδα με οριζόντια φύλλα (REFH) σύμφωνα με τον Goudriaan (1977). Το δεύτερο μέρος της εξίσωσης (3.18b) είναι ένας κατά προσέγγιση παράγοντας διορθώσεως για σφαιρικής κατανομής γωνίας φύλλων (Goudriaan, 1988). Σημειώνεται ότι η ταξινομημένη σε πίνακες τιμή 0,5 χρησιμοποιείται πάλι, όπως στην εξίσωση (3.17), για να δείξει τη μέση προβολή των σφαιρικών φύλλων στο έδαφος.

Η καθαρή ακτινοβολία VIS και τα κλάσματά της δεν είναι η ακτινοβολία που απορροφάται από τα φύλλα αλλά αυτή που υπάρχει σε κάθε σημείο της φυλλοστοιβάδας ανάλογα με το βάθος. Η διάχυτη ακτινοβολία που απορροφάται από την φυλλοστοιβάδα (VISSHD) είναι το άθροισμα της καθαρής διάχυτης ακτινοβολίας (VISDF (3.16α)) και του διάχυτου μέρους της άμεσης ροής [VIST-VISD εξίσ. (3.16b-c)], και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ποσοστού αφομοίωσης από τα σκιασμένα φύλλα (FGRSH):

$$VISSHD = VISDF + VIST - VISD \quad Jm^{-2}(leaf)s^{-1} \quad (3.19a)$$

$$FGRSH = AMAX \times \left(1 - e^{-\frac{VISSHD \times EFF}{AMAX}} \right) \quad kg(CO_2)ha^{-1}h^{-1} \quad (3.19b)$$

EFF, η αρχική κλίση της καμπύλης ακτινοβολίας-φωτοσύνθεσης.

Η απορροφημένη άμεση ακτινοβολία (VISSP) δίδεται από την εξίσωση:

$$VISSP = (1 - SCV) \times \frac{PARDIR}{\sin(B)} \quad Jm^{-2}(leaf)s^{-1} \quad (3.20)$$

με συνέπεια το ποσοστό αφομοίωσης των ηλιοφώτιστων φύλλων (FGRSUN) να είναι:

$$FGRSUN = AMAX \times \left[1 - (AMAX - FGRSH) \times \frac{\left(1 - e^{-\frac{VISPP \times EFF}{AMAX}} \right)}{EFF - VISPP} \right] \text{ kg}(CO_2)ha^{-1}h^{-1} \quad (3.21)$$

Το ποσοστό αφομοίωσης ανά μονάδα φύλλικης επιφάνειας (FGL), που υπολογίζεται κατά μέσο όρο για ένα επίπεδο της φυλλοστοιβάδας, είναι το άθροισμα των ρυθμών αφομοίωσης των ηλιοφώτιστων και των σκιασμένων φύλλων, ανάλογα με το μερίδιό τους σε εκείνο το στρώμα:

$$FGL = FSLLA \times FGRSUN + (1 - FSLLA) \times FGRSH \text{ kg}(CO_2)ha^{-1}h^{-1} \quad (3.22)$$

Όπου FSLLA είναι το ποσοστό της ηλιοφώτιστης περιοχής φύλλων και υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$FSLLA = e^{-KDIRBL \times LAI} \quad (3.23)$$

3.1.4 Ημερήσια αφομοίωση

Όλες οι παραπάνω εξισώσεις (3.3 έως 3.23) δίνουν στιγμιαίες τιμές και η αφομοίωση που υπολογίζεται είναι στιγμιαία για ένα οριζόντιο επίπεδο που τέμνει κάθετα το φυτό. Η τιμή FGL που υπολογίστηκε είναι για ένα επίπεδο της φυλλοστοιβάδας και είναι στιγμιαία. Για τον υπολογισμό του ημερήσιου ρυθμού αφομοίωσης της καλλιέργειας χρησιμοποιείται η μέθοδος του Gauss, η οποία εφαρμόστηκε για πρώτη φορά σε μοντέλα προσομοίωσης παραγωγικότητας από τον Goudrian (1986). Με βάση τη μέθοδο αυτή η ημερήσια αφομοίωση της φυλλοστοιβάδας προσδιορίζεται από το ζυγισμένο μέσο όρο των ρυθμών αφομοίωσης σε τρία επιλεγμένα βάθη της φυλλοστοιβάδας και σε τρεις χρονικές στιγμές της ημέρας (3x3 επιλεγμένα σημεία). Τα τρία επιλεγμένα βάθη στο φυλλοστοιβάδας (LAIC) και οι 3 ώρες της ημέρας (HOUR) είναι αντίστοιχα:

$$LAIC(I) = 0.5 \times LAI + I \times LAI \times \sqrt{0.15} \quad (3.24)$$

$$HOUR(I) = 12 + DAYL \times 0.5 \times (0.5 + I \times \sqrt{0.15}) \quad I = -1, 0, 1 \quad (3.25)$$

Η συνολική αφομοίωση φυλλοστοιβάδας στις επιλεγμένες στιγμές της ημέρας δίνεται από:

$$FGROS(I) = (FGL(-1) + 1.6 \times FGL(0) + FGL(1)) \times \frac{LAI}{3.6} \quad kg(CO_2)ha^{-1}d^{-1} \quad (3.26)$$

ολοκληρώνεται κατά τη διάρκεια της ημέρας και δίνει τη συνολική αφομοίωση της φυλλοστοιβάδας:

$$FGC = (FGROS(-1) + 1.6 \times FGROSS(0) + FGROS(1)) \times \frac{DAYL}{3.6} \quad kg(CO_2)ha^{-1}d^{-1} \quad (3.27)$$

4. Μεθοδολογία – Υπολογιστικό μέρος

Για την διεκπεραίωση της εργασίας χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα ηλεκτρονικού υπολογιστή με λειτουργικό Windows XP, περιβάλλον κάτω απ' το οποίο εκτελείται η εφαρμογή, αλλά και πακέτα λογισμικού (software) για τον προγραμματισμό και την βελτιστοποίηση της εφαρμογής.

4.1 Υλικά μέσα (Hardware)

Τα χαρακτηριστικά του υπολογιστή που απαιτήθηκαν υπερβαίνουν κατά πολύ τις απαιτήσεις εκτέλεσης του προγράμματος αλλά κρίθηκε αναγκαία η χρησιμοποίηση του λόγω του μεγάλου σε απαιτήσεις επεξεργαστικής ισχύος και μνήμης προγράμματος – γλώσσας προγραμματισμού, που χρησιμοποιήθηκε (Visual Basic™), του λειτουργικού που χαρακτηρίζεται από μεγάλες απαιτήσεις σε πόρους συστήματος (μνήμη, επεξεργαστική ισχύ) αλλά και του σχεδιαστικού προγράμματος η χρήση του οποίου κρίθηκε απαραίτητη για τη δημιουργία σχεδιαγραμμάτων και επεξεργασίας εικόνων.

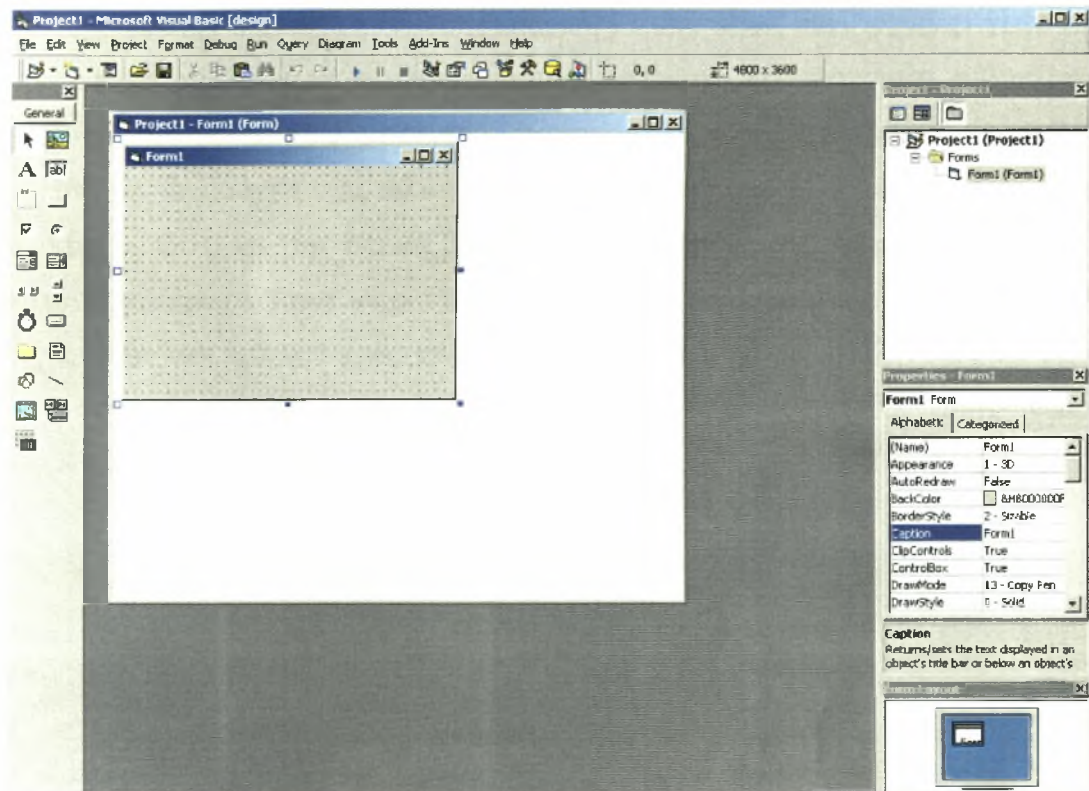
Τα κύρια χαρακτηριστικά του ηλεκτρονικού υπολογιστή που χρησιμοποιήθηκε είναι τα κάτωθι:

Επεξεργαστής:	Intel Celeron 633, 128KB cache
Μητρική:	Gigabyte 6VX7A+
Μνήμη RAM:	256 MB 133 Mhz
Σκληρός δίσκος:	IBM 60 GB
Κύκλωμα γραφικών:	Geforce2 MX με 32 MB μνήμης
Οθόνη:	Philips 105S

4.2 Λογισμικό (Software)

Το κύριο μέρος της εργασίας αποτέλεσε ο προγραμματισμός του μοντέλου σε γλώσσα προγραμματισμού υψηλού επιπέδου κάτω από το περιβάλλον εργασίας του

λειτουργικού, Windows XP. Η γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιήθηκε ήταν η Visual Basic™ 6 Personal edition της εταιρίας λογισμικού Microsoft © (εικόνα 9).



Εικόνα 9: το περιβάλλον εργασίας της Visual Basic™

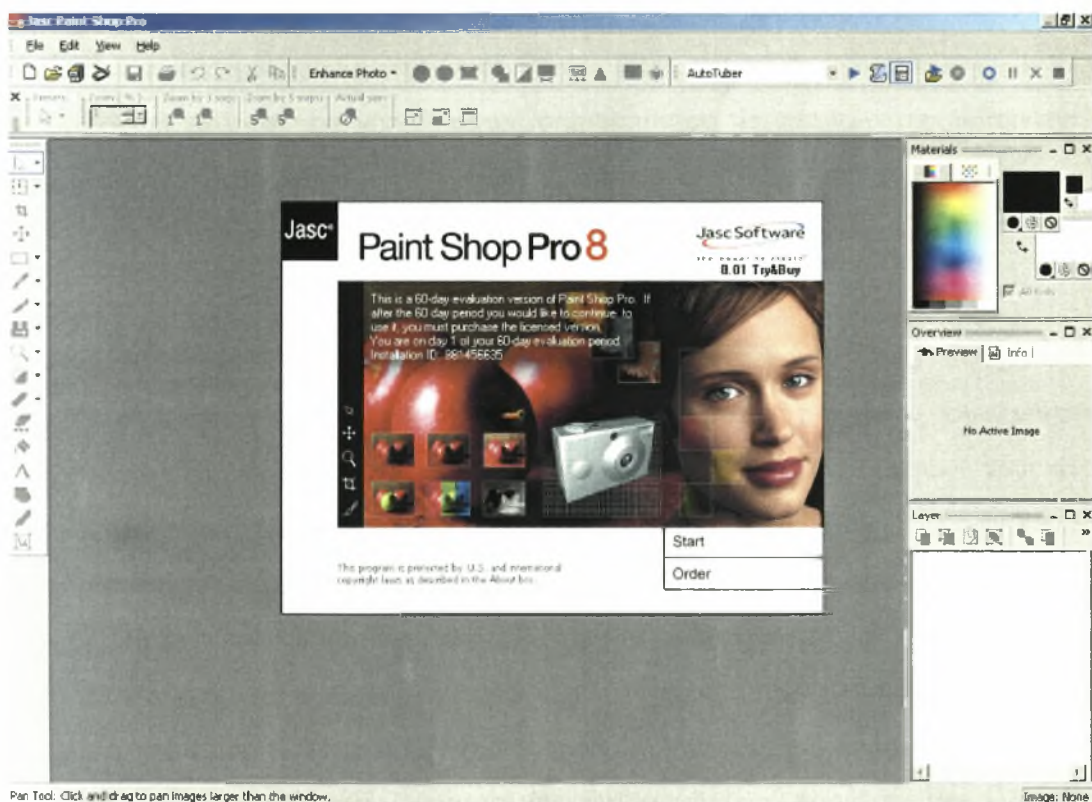
Η Visual Basic™ 6 αποτελεί την εξέλιξη της γλώσσας προγραμματισμού BASIC για προσωπικούς υπολογιστές που δημιουργήθηκε το 1964 στο κολέγιο του Dartmouth από τους J. Kemeny & T. Kurtz και εξελίχθηκε αργότερα από τους Bill Gates και Paul Allen για τα λειτουργικά των σημερινών προσωπικών υπολογιστών, DOS και Windows. Παρά την ύπαρξη άλλων γλωσσών προγραμματισμού που θεωρούνται πιο γρήγορες πχ, C++ και C, η χρήση της Visual Basic™ κρίθηκε πιο ικανοποιητική διότι:

- Δημιουργήθηκε από την ίδια εταιρία που σχεδίασε το λειτουργικό στο οποίο εκτελείται (Microsoft) και έτσι η συμβατότητα είναι μέγιστη.
- Το ευέλικτο γραφικό της περιβάλλον με έτοιμα προγραμματιστικά εργαλεία (controls) μεγιστοποιεί την ταχύτητα δημιουργίας μιας εφαρμογής.
- Υποστηρίζεται πλήρως από προϊόντα τρίτων κατασκευαστών.

- Οι εφαρμογές της εκτελούνται σε ένα λειτουργικό το οποίο χρησιμοποιείται από το 85% των χρηστών ηλεκτρονικών υπολογιστών του κόσμου.

Η διαφορά στην ταχύτητα εκτέλεσης εφαρμογών από άλλες πιο «ισχυρές» γλώσσες προγραμματισμού γίνεται αμελητέα όταν η εφαρμογή δεν εμπεριέχει πολύπλοκα γραφικά και ο κώδικας βελτιστοποιηθεί με κατάλληλες τεχνικές (code optimization).

Για την δημιουργία ενός φιλικού προς τον χρήστη περιβάλλοντος (graphical user interface - GUI) και την οπτική βελτίωση του προγράμματος χρησιμοποιήθηκε το πακέτο λογισμικού Paint shop Pro 8 της εταιρίας Jasc Software (εικόνα 10). Η δημιουργία ενός φιλικού προς τον χρήστη (user friendly) περιβάλλοντος κρίνεται απαραίτητη κατά την κατασκευή οποιασδήποτε εφαρμογής για την γρήγορη και εύκολη πρόσβαση του προγράμματος απ' τον χρήστη.



Εικόνα 10: το περιβάλλον εργασίας του Paint shop pro 8.

Συνοπτικά χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω πακέτα λογισμικού:

- Microsoft Windows XP “Home” edition
- Microsoft Visual Basic™ 6 “Personal” edition
- Jasc Paint Shop Pro 8 “trial” version

4.3 Μεθοδολογία

Η δημιουργία της εφαρμογής χωρίστηκε στα εξής τμήματα:

1. Ανάλυση του μοντέλου.
2. Δημιουργία λογικού διαγράμματος.
3. Σχεδιασμός του περιβάλλοντος.
4. Προγραμματισμός.

4.3.1 Ανάλυση του μοντέλου

Αρχικά πραγματοποιήθηκε η λεπτομερής ανάλυση του προγράμματος. Καθορίστηκαν όλα τα στάδια δημιουργίας του, μελετώντας τις μαθηματικές συναρτήσεις του μοντέλου, τα δεδομένα εισόδου, και καθορίστηκε η μορφή των δεδομένων εξόδου και η εμφάνισή τους. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η μαθηματική επίλυση του προβλήματος τοποθετώντας τις απαραίτητες μαθηματικές εξισώσεις σε λογική σειρά, δημιουργώντας έτσι τον αλγόριθμο του προγράμματος.

4.3.2 Λογικό διάγραμμα

Το επόμενο στάδιο ήταν η δημιουργία του λογικού διαγράμματος. Οι εξισώσεις χωρίστηκαν σε επιμέρους ενότητες έτσι ώστε να είναι δυνατή η εισαγωγή τους στον υπολογιστή και σχεδιάστηκε το λογικό διάγραμμα κάθε συνάρτησης.

Ένα λογικό διάγραμμα παρουσιάζει σχηματικά την λογική σειρά επίλυσης ενός προβλήματος καθιστώντας έτσι πιο εύκολη την ανάγνωσή του, και την κατανόηση του τρόπου επίλυσης του προβλήματος (Πρελορέντζος, 1994). Δεν περιέχει όρους και εντολές από καμία γλώσσα προγραμματισμού και αποτελεί μια κοινή γλώσσα μεταξύ των προγραμματιστών που χρησιμοποιούν διαφορετικές γλώσσες προγραμματισμού αφού παρουσιάζεται η λογική του αλγόριθμου έτσι ώστε ο κάθε προγραμματιστής να μπορεί να μεταφέρει τον αλγόριθμο στην γλώσσα που εργάζεται.

4.3.3 Σχεδιασμός περιβάλλοντος

Στη Visual Basic TM οι εφαρμογές που προγραμματίζονται στηρίζονται στην αλληλεπίδραση μεταξύ χρήστη και των φορμών του προγράμματος. Το πρόγραμμα χωρίζεται σε φόρμες (forms) που φέρουν εργαλεία (controls) τα οποία αλληλεπιδρούν με τον χρήστη. Τα πιο χαρακτηριστικά είναι τα πλαίσια κειμένου (text boxes) είτε για εισαγωγή δεδομένων είτε για προβολή αποτελεσμάτων, τα κουμπιά (buttons) για εκκίνηση υπολογισμών και γενικότερα διεργασιών που θα εκτελέσει το πρόγραμμα, οι πινακίδες (labels) για παρουσίαση σχολίων που θα καθοδηγήσουν τον χρήστη, και τα πλέγματα (grids) για παρουσίαση αποτελεσμάτων κυρίως βάσεων δεδομένων με την μορφή ενός πλέγματος. Στην εικόνα 11 παρουσιάζεται μια φόρμα με διάφορα εργαλεία.

Form

The image shows a screenshot of a data entry form titled "Φόρμα εισαγωγής δεδομένων". The form contains several input fields and buttons. Red circles and arrows highlight specific controls: "Γεωγραφικό πλάτος" (circled in red, labeled "Label"), "80" (circled in red, labeled "Text box"), "Συνέχεια" (circled in red, labeled "Button control"), and "Πίσω" (circled in red, labeled "Button control"). The form fields include: "Δείκτης φυλλικής επιφάνειας" (7 Μονάδες), "Γεωγραφικό πλάτος" (40 Μοίρες), "Ημέρα εφαρμογής" (220 Ημέρα), "Ποσοστό ήλιοφάνειας" (1 "Ποσοστό"), "ΑΜΑΧ" (80 Kgr CO2 / ha / h), "Συνέχεια", and "Πίσω".

Εικόνα 11: Μια φόρμα με μερικά από τα πιο σημαντικά εργαλεία, text boxes, buttons, labels

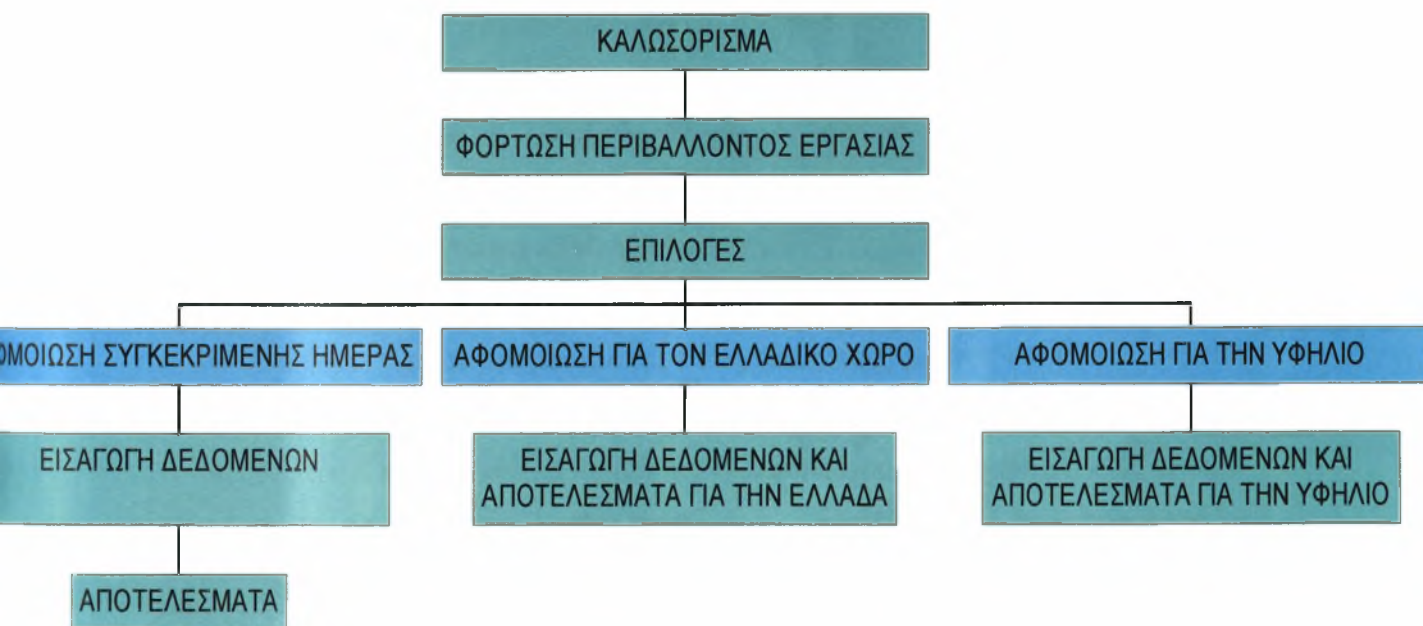
Στην συνέχεια καθορίστηκε η μορφή του προγράμματος και το περιβάλλον εργασίας. Το πρόγραμμα θα έπρεπε να είναι λειτουργικό και φιλικό προς τον χρήστη με εύκολα προσπελάσιμες εντολές και καταλόγους που θα τον διευκολύνουν στη χρήση και θα τον καθοδηγούν βήμα προς βήμα μέχρι την εμφάνιση του τελικού αποτελέσματος. «Ένα γραμμάριο καλής εμφάνισης αξίζει όσο ένα κιλό λειτουργικότητας» (Κανόνες του Murphy, 1990).

Η μορφή του προγράμματος αποφασίστηκε να αποτελείται από φόρμες με ιεραρχική δομή ανάλογα με τα δεδομένα εισόδου και εξόδου, μέσα σε ένα ενιαίο

περιβάλλον που θα ομαδοποιεί αυτές τις φόρμες (Multi-Document-Interface - MDI). Η χρήση αυτής της τεχνικής κρίθηκε η καλύτερη λόγω της πληθώρας φορμών που αποτελούν το πρόγραμμα και η ομαδοποίησή τους κάτω από ένα περιβάλλον κρίνεται αναγκαία.

Αφού αποφασίστηκε η γενική μορφή του προγράμματος, σχεδιάστηκαν οι επιμέρους φόρμες. Αρχικά σχεδιάστηκε ένα δενδροδιάγραμμα που περιελάμβανε τις φόρμες, ιεραρχημένες ανάλογα με τα δεδομένα εισόδου-εξόδου που λάμβανε και εξήγαγε η καθεμία αντίστοιχα. Το πρόγραμμα αρχικά εμφανίζει το λογότυπο της εφαρμογής και αφού φορτώσει το περιβάλλον εργασίας, εμφανίζει έναν αρχικό κατάλογο (φόρμα Επιλογές) που καθοδηγεί τον χρήστη βήμα προς βήμα από τις φόρμες εισόδου, όπου εισάγει τα κατάλληλα δεδομένα, έως τις φόρμες εξόδου όπου μπορεί να δει τα αποτελέσματα του μοντέλου. Σε πολλές φόρμες η είσοδος και η έξοδος πραγματοποιούνται στην ίδια φόρμα. Το δενδροδιάγραμμα φορμών της εφαρμογής δίνεται παρακάτω:

ΔΕΝΔΡΟΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΟΡΜΩΝ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ



Δενδροδιάγραμμα φορμών του προγράμματος. Με πράσινο παρουσιάζονται οι φόρμες και με γαλάζιο οι επιλογές της φόρμας «Επιλογές».

4.3.4 Προγραμματισμός

Αφού καθορίστηκε ο αλγόριθμος και η μορφή του προγράμματος ακολούθησε η μεταφορά του στον υπολογιστή. Η μεταφορά χωρίστηκε σε επιμέρους τμήματα τα οποία και ήταν:

- 1 Προγραμματισμός.
- 2 Διόρθωση σφαλμάτων και πρόβλεψη λαθών (debugging).
- 3 Βελτιστοποίηση κώδικα (code optimization).
- 4 Βελτίωση μορφής.

Προγραμματισμός: Όλες οι μαθηματικές εξισώσεις μεταφράστηκαν στην γλώσσα της Visual Basic TM και δημιουργήθηκε το περιβάλλον και οι φόρμες.

Πρόβλεψη λαθών και διόρθωση σφαλμάτων (debugging): Η εξέταση του κώδικα ενός προγράμματος για την εύρεση και διόρθωση λαθών είναι σημαντικό μέρος της κατασκευής μιας εφαρμογής. Λάθη στη δομή του προγράμματος και πιθανά σφάλματα του χρήστη είναι ικανά να τερματίσουν την εφαρμογή σε ανύποπτο χρόνο και να χαθούν δεδομένα και η εργασία του χρήστη.

Μετά το τέλος του προγραμματισμού και αφού η εφαρμογή είχε αποκτήσει μια πρώτη λειτουργική μορφή, εξετάστηκαν πιθανά λάθη τα οποία θα μπορούσαν να προκύψουν κατά την εκτέλεσή της, και προστέθηκε ο κατάλληλος κώδικας ώστε να αποφευχθούν. Μερικά τέτοια πιθανά λάθη ήταν:

- Να δοθεί τιμή σε μια μεταβλητή εκτός του εύρους τιμών η οποία αυτή δέχεται π.χ. Γεωγραφικό πλάτος 98^oB.
- Να δοθεί κείμενο σε μια μεταβλητή η οποία δέχεται μόνο αριθμητικές τιμές.
- Να δοθεί διαφορετικό είδος τιμής σε μια μεταβλητή π.χ. ένας δεκαδικός σε μεταβλητή που έχει οριστεί σαν ακέραιος.
- Λάθος μεταβίβαση τιμών από φόρμα σε φόρμα.

Παρακάτω εμφανίζεται για παράδειγμα ένα τμήμα του κώδικα που ελέγχει αν η τιμή που δίνεται στην μεταβλητή για το LAI είναι αριθμητική και μεγαλύτερη του 0.

```

'-----LAI box error checking
If IsNumeric(Me.LAIItxb.Text) = False Then
    MsgBox "wrong input in << Leaf area index >> box", vbCritical, "Input error"
    Exit Sub
End If

LAI = Me.LAIItxb.Text

If LAI < 0 Then
    MsgBox " LAI<0 error", vbCritical, "Input error"
    Exit Sub
End If

```

Η εφαρμογή στη συνέχεια εκτελέστηκε πολλές φορές και δοκιμάστηκαν όλες οι λειτουργίες της ώστε να βρεθούν διάφορα λάθη που διέφυγαν αρχικά και διορθώθηκαν. Επίσης προστέθηκαν παράθυρα κειμένου (message boxes) για ειδοποίηση του χρήστη σε περίπτωση λανθασμένης ενέργειας και καθοδήγηση αυτού.

Βελτιστοποίηση κώδικα (code optimization): Σ' αυτό το στάδιο προστέθηκε κώδικας που επιτάχυνε την εκτέλεση της εφαρμογής και μείωνε τις απαιτήσεις του σε υπολογιστική ισχύ και μνήμη. Κατά την έναρξη της εφαρμογής φορτώνονται μόνο οι απαραίτητες φόρμες και κατά την διάρκεια εργασίας, φόρμες που δεν είναι αναγκαία η παρουσία τους αφαιρούνται από την μνήμη για εξοικονόμηση αυτής.

```

Private Sub MDIForm_Load()

' Φόρτωση και απόκριση φορμών
GridResults.Visible = False
Iform.Visible = False
QuestionForm.Visible = True
ResultForm.Visible = False

GridResults.Enabled = True
Iform.Enabled = True
QuestionForm.Enabled = True
ResultForm.Enabled = True

End Sub

```

Δείγμα κώδικα για την φόρτωση των κατάλληλων φορμών στην οθόνη

Δημιουργία βοήθειας (Help) και βελτίωση μορφής: Τέλος βελτιώθηκε η μορφή της εφαρμογής τοποθετώντας τις φόρμες στην κατάλληλη θέση στην οθόνη και προστέθηκαν εικόνες.

Το πρόγραμμα λαμβάνοντας την τελική του μορφή, κωδικοποιήθηκε σε γλώσσα μηχανής ώστε να είναι εκτελέσιμο σε κάθε υπολογιστή με λειτουργικό Windows και δοκιμάστηκε σε διάφορα συστήματα ώστε να ελεγχθούν οι απαιτήσεις του.

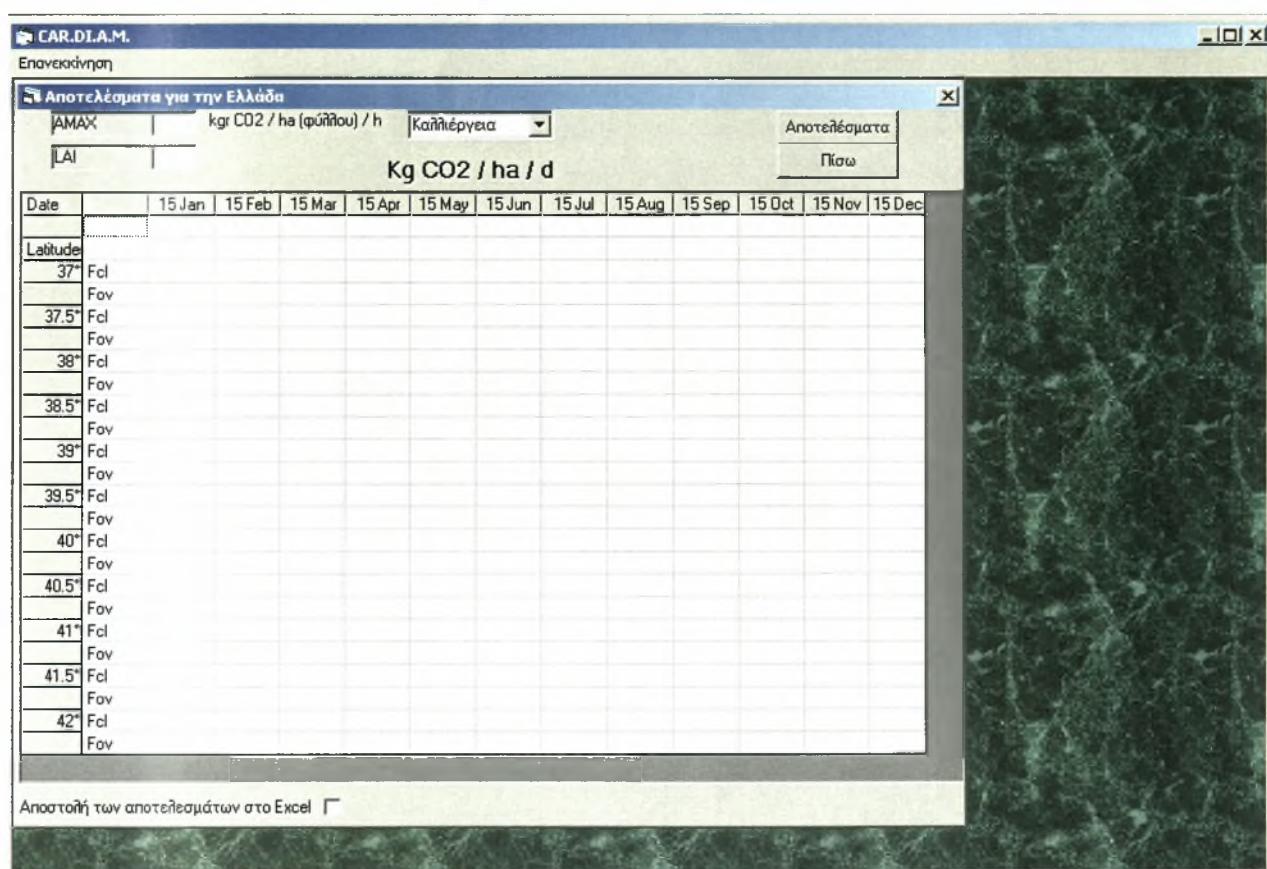
Οι απαιτήσεις του καθορίστηκαν και είναι οι εξής:

Ηλεκτρονικός υπολογιστής PC με

Λειτουργικό: Windows 98, Me, XP

Επεξεργαστής: Pentium I ή ανώτερος

Μνήμη: 64 MB ή περισσότερη



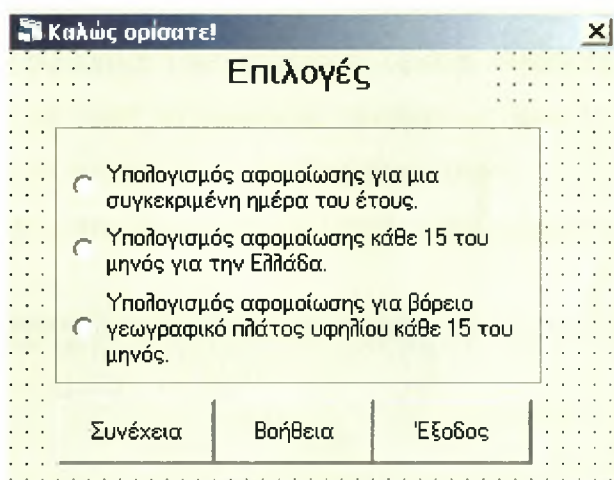
Εικόνα της εφαρμογής

4.4 Χρήση του προγράμματος.

Για τη χρήση του προγράμματος δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα ώστε να είναι απλή στον αρχάριο χρήστη. Μετά την εισαγωγική οθόνη ο χρήστης εισέρχεται στο βασικό

περιβάλλον εργασίας και καλείται να διαλέξει¹ μεταξύ τριών επιλογών στην φόρμα «επιλογές» (Εικόνα 12), οι οποίες και είναι:

1. Επιλογή: Αν επιθυμεί να δει τον ημερήσιο ρυθμό αφομοίωσης CO₂ μιας καλλιέργειας μια συγκεκριμένη μέρα.
2. Επιλογή: Αν επιθυμεί να δει τον ρυθμό αφομοίωσης CO₂ μιας καλλιέργειας κάθε 15η του μηνός σε γεωγραφικά πλάτη που καταλαμβάνουν όλο τον Ελληνικό χώρο.
3. Επιλογή: Αν επιθυμεί να δει τον ρυθμό αφομοίωσης CO₂ μιας καλλιέργειας κάθε 15η του μηνός σε γεωγραφικά πλάτη που καταλαμβάνουν όλη την υφήλιο.



Εικόνα 12. Φόρμα αρχικών επιλογών

¹ Όπου ο χρήστης καλείται να κάνει μια επιλογή στο πρόγραμμα, αυτό πραγματοποιείται με πάτημα του αριστερού κουμπιού του ποντικιού γνωστό και ως αριστερό κλικ.

Επιλογή 1^η: Για μια συγκεκριμένη ημέρα.

Σε περίπτωση που ο χρήστης επιλέξει να δει την ημερήσια αφομοίωση της καλλιέργειάς του τότε εμφανίζεται η φόρμα εισόδου όπου πρέπει να εισάγει τις εξής παραμέτρους (Εικόνα 13):

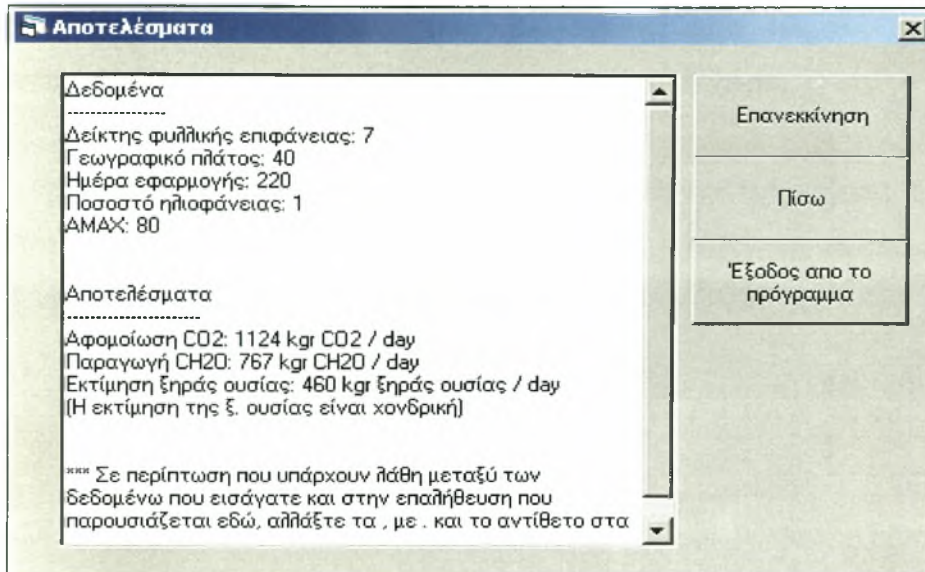
1. Το γεωγραφικό πλάτος της καλλιέργειας (τιμές 35-41°, Ελληνικά όρια).
2. Τον αύξοντα αριθμό της ημέρας που θέλει να μελετήσει την αφομοίωση (τιμές 1-365).
3. Το μέγιστο ρυθμό αφομοίωσης της καλλιέργειας AMAX. (Kg CO₂ ha⁻¹ (φύλλου) d⁻¹).
4. Το ποσοστό ηλιοφάνειας με μορφή δεκαδικού (τιμές 0-1), ή αν δεν είναι γνωστό, με την επιλογή του κουμπιού «Ωρες ηλιοφάνειας» ο χρήστης μπορεί να εισάγει τις ώρες πραγματικής ηλιοφάνειας που έχει μετρήσει και το πρόγραμμα θα υπολογίσει το ποσοστό ηλιοφάνειας.
5. Το δείκτη φυλλικής επιφάνειας LAI που έχει η καλλιέργεια εκείνη την ημέρα.

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα
Δείκτης φυλλικής επιφάνειας	7	Μονάδες
Γεωγραφικό πλάτος	40	Μοίρες
Ημέρα εφαρμογής	220	Ημέρα
Ποσοστό ηλιοφάνειας	1	"Ποσοστό"
AMAX	80	Kg CO ₂ / ha / h

Εικόνα 13. Φόρμα εισόδου

Αφού εισάγει τις τιμές που επιθυμεί, με την επιλογή του κουμπιού «Συνέχεια» παρουσιάζεται η φόρμα «Αποτελέσματα» (Εικόνα 14), όπου δίδεται η ημερήσια αφομοίωση CO₂ της καλλιέργειας καθώς και η ημερήσια παραγωγή σακχάρων και ξηράς ουσίας με χονδρική εκτίμηση². Ο υπολογισμός παραγωγής σακχάρων και ξηράς ουσίας δεν είναι θέμα αυτής της εργασίας αλλά παρουσιάζεται ως μια πρακτική εφαρμογή του μοντέλου. Το κουμπί «Πίσω» επιστρέφει τον χρήστη στην φόρμα «επιλογές» (Εικόνα 12).

² Για το πώς υπολογίζονται τα σάκχαρα και η ξηρά ουσία, δες στο 5^ο μέρος της εργασίας «Αποτελέσματα και συζήτηση».



Εικόνα 14. Φόρμα προβολής αποτελεσμάτων.

Η φόρμα «Αποτελέσματα» έχει 3 επιλογές ή λειτουργίες των οποίων είναι:

- «Επανεκκίνηση» ξαναρχίζει την εφαρμογή.
- «Πίσω» μεταβαίνει στην φόρμα εισόδου.
- «Έξοδος από το πρόγραμμα» κλείνει την εφαρμογή.

Επιλογή 2^η. Πίνακας αφομοίωσης μιας καλλιέργειας κάθε 15η του μηνός σε γεωγραφικά πλάτη που καταλαμβάνουν όλο τον Ελληνικό χώρο.

Επιλέγοντας την δεύτερη επιλογή στην φόρμα «επιλογές» εμφανίζεται η φόρμα της εικόνας 15.

Date		15 Jan	15 Feb	15 Mar	15 Apr	15 May	15 Jun	15 Jul	15 Aug	15 Sep	15 Oct	15 Nov	15 Dec
Latitude													
37°	Fcl												
	Fov												
37.5°	Fcl												
	Fov												
38°	Fcl												
	Fov												
38.5°	Fcl												
	Fov												
39°	Fcl												
	Fov												
39.5°	Fcl												
	Fov												
40°	Fcl												
	Fov												
40.5°	Fcl												
	Fov												
41°	Fcl												
	Fov												
41.5°	Fcl												
	Fov												
42°	Fcl												
	Fov												

Εικόνα 15. Φόρμα αποτελεσμάτων δυναμικού παραγωγής για τον Ελληνικό χώρο.

Εισάγοντας το κατάλληλο AMAX και LAI και πατώντας το πλήκτρο «Αποτελέσματα» το πρόγραμμα θα υπολογίσει και θα παρουσιάσει τον ημερήσιο ρυθμό αφομοίωσης CO₂ της καλλιέργειας (kg/ha) για κάθε 15^η κάθε μηνός, σε γεωγραφικά πλάτη που καταλαμβάνουν όλο τον Ελληνικό γεωγραφικό χώρο (37-42°) ανά 0,5°, για συνθήκες πλήρους ηλιοφάνειας FCL και για τελείως καλυμμένο από σύννεφα ουρανό FOV. Οι τιμές που παρουσιάζονται είναι στις δυο ακραίες καταστάσεις νέφωσης ούτως ώστε ο χρήστης γνωρίζοντας το ποσοστό ηλιοφάνειας της ημέρας που μελετά, με τη χρήση γραμμικής παρεμβολής να μπορεί να βρει την αφομοίωση CO₂ της καλλιέργειάς του. Η γραμμική παρεμβολή μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης για την εύρεση της αφομοίωσης σε ημερομηνίες και γεωγραφικά πλάτη που δεν παρουσιάζονται στον πίνακα. Παραδείγματα παρουσιάζονται στο 5^ο μέρος της εργασίας «Αποτελέσματα και συζήτηση».

Σε περίπτωση που ο χρήστης δεν γνωρίζει το AMAX της καλλιέργειάς που μελετά, μπορεί να επιλέξει κάποια από την λίστα καλλιεργειών (Επιλογή «Καλλιέργεια»).

Σε περίπτωση που ο χρήστης θέλει να επεξεργαστεί τα αποτελέσματα ή να τα αποθηκεύσει στο Excel, πρέπει να κάνει την κατάλληλη επιλογή που βρίσκεται στη βάση της φόρμας. Με την επιλογή «πίσω» μεταφέρεστε στη φόρμα «επιλογές».

Επιλογή 3^η. Πίνακας αφομοίωσης μιας καλλιέργειας κάθε 15η του μηνός σε γεωγραφικά πλάτη που καταλαμβάνουν όλη την υφήλιο.

Επιλέγοντας την τρίτη επιλογή στην φόρμα αρχικών επιλογών εμφανίζεται η φόρμα της εικόνας 16.

Date		15 Jan	15 Feb	15 Mar	15 Apr	15 May	15 Jun	15 Jul	15 Aug	15 Sep	15 Oct	15 Nov	15 Dec
Latitude													
	0°												
	Fcl												
	Fov												
	10°												
	Fcl												
	Fov												
	20°												
	Fcl												
	Fov												
	30°												
	Fcl												
	Fov												
	40°												
	Fcl												
	Fov												
	50°												
	Fcl												
	Fov												
	60°												
	Fcl												
	Fov												

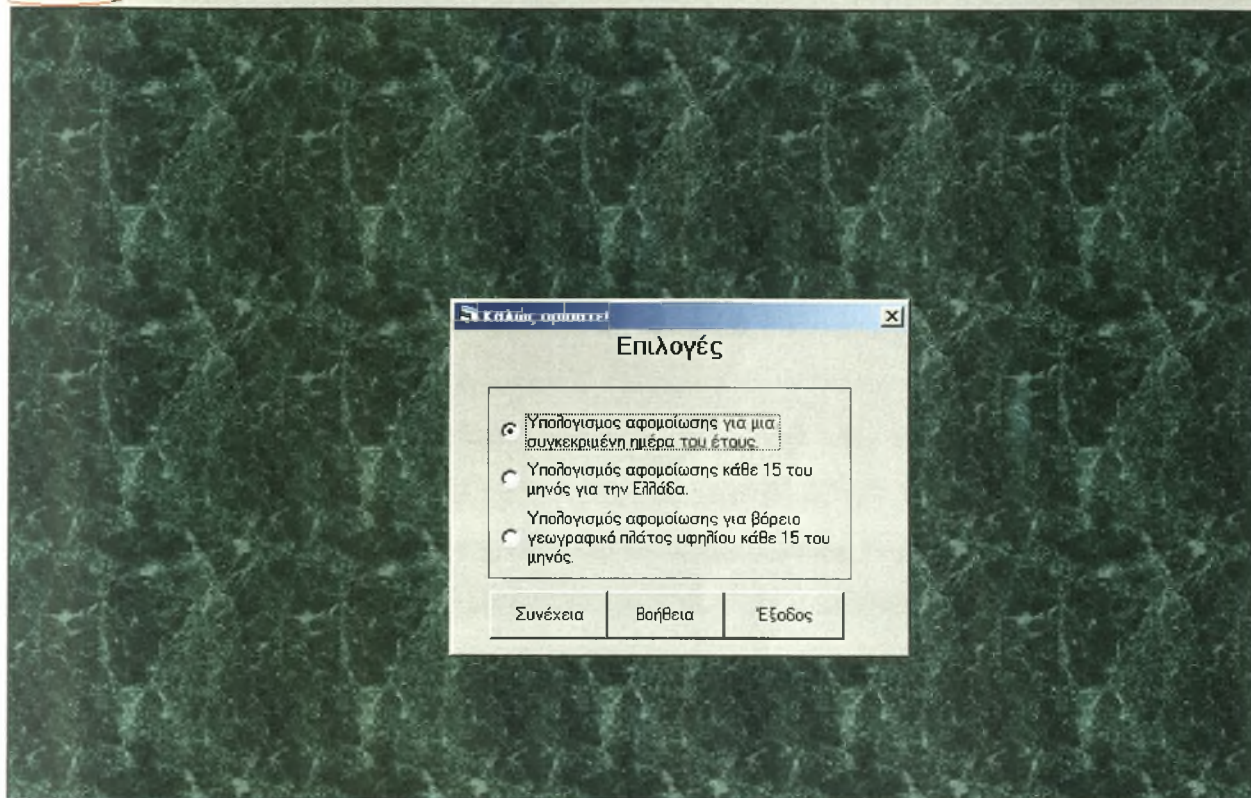
Εικόνα 16. Φόρμα αποτελεσμάτων δυναμικού παραγωγής για τον Ελληνικό χώρο.

Εισάγοντας το κατάλληλο AMAX και LAI και πατώντας το πλήκτρο «Αποτελέσματα» το πρόγραμμα θα υπολογίσει και θα παρουσιάσει τον ημερήσιο ρυθμό αφομοίωσης CO₂ της καλλιέργειας (kg/ha) για κάθε 15^η κάθε μηνός, σε γεωγραφικά πλάτη από 0°-60° ανά 10°, για συνθήκες πλήρους ηλιοφάνειας FCL και για τελείως καλυμμένο από σύννεφα ουρανό FOV. Η χρήση του πίνακα είναι αντίστοιχη με αυτή των αποτελεσμάτων για τον ελληνικό χώρο.

Σε περίπτωση που ο χρήστης δεν γνωρίζει το AMAX της καλλιέργειάς που μελετά, μπορεί να επιλέξει κάποια από την λίστα καλλιεργειών (Επιλογή «Καλλιέργεια»).

Σε περίπτωση που ο χρήστης θέλει να επεξεργαστεί τα αποτελέσματα ή να τα αποθηκεύσει στο Excel, πρέπει να κάνει την κατάλληλη επιλογή που βρίσκεται στη βάση της φόρμας. Με την επιλογή «πίσω» μεταφέρεστε στη φόρμα «επιλογές».

Για την ανά πάσα στιγμή επανεκκίνηση της εφαρμογής επιλέξτε την λέξη «Επανεκκίνηση» που βρίσκεται στο άνω αριστερό μέρος του βασικού περιβάλλοντος εργασίας όπως φαίνεται στην εικόνα 17.



Εικόνα 17. Επιλογή επανεκκίνησης.

5. Αποτελέσματα και συζήτηση

Το πρόγραμμα παρουσιάζει τον ημερήσιο ρυθμό αφομοίωσης CO₂ μιας καλλιέργειας σε kg CO₂ ha⁻¹ για μια συγκεκριμένη ημέρα, για όλη την υφήλιο και για τον ελλαδικό χώρο, μια πληροφορία που αυτούσια έχει μεγάλη αξία για την επιστημονική κοινότητα αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για πρακτικούς σκοπούς. Το CO₂ ανάγεται στο φυτό και μετατρέπεται σε σάκχαρα σύμφωνα με την εξίσωση της φωτοσύνθεσης:



Υπολογίζοντας τον ρυθμό αφομοίωσης CO₂ από το πρόγραμμα και τα μοριακά βάρη του CO₂ και (44) και σακχάρου (30) μπορεί να προσδιορισθεί ο ακαθάριστος ρυθμός παραγωγής σακχάρων σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\text{FGASS} = (30 / 44) * \text{FGC}, \quad \text{kg CH}_2\text{O ha}^{-1} \text{ d}^{-1} \quad (3.28)$$

FGASS είναι ο ακαθάριστος ρυθμός παραγωγής σακχάρων, FGC η συνολική αφομοίωση της φυλλοστοιβάδας σε Kg ha⁻¹ d⁻¹ και τα 30 και 44 είναι τα μοριακά βάρη των CH₂O και CO₂, αντίστοιχα.

Ένα μέρος των σακχάρων αυτών θα οξειδωθεί κατά την διαδικασία της αναπνοής για τη διατήρηση του φυτού και τις ανάγκες της αυξητικής διεργασίας. Οι ρυθμοί αναπνοής, διατήρησης, και αύξησης είναι σε στενή συνάρτηση με την ζώσα φυτική μάζα και την θερμοκρασία και εάν δεν είναι γνωστοί είναι αδύνατη μια ακριβής εκτίμηση των ημερήσιων αυξητικών ρυθμών του φυτού. Το θέμα αυτό είναι έξω από τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, πλην όμως για να δοθούν τάξεις μεγέθους, οι οποίες ακόμα μια φορά επισημαίνεται ότι μπορεί να απέχουν αρκετά από την πραγματικότητα, θεωρούμε εδώ ότι περί το 40% των σχηματιζόμενων σακχάρων οξειδώνεται με την διαδικασία της αναπνοής, έτσι ώστε η καθαρή ξηρή ουσία που σχηματίζεται ανά ημέρα (60%) δίνεται από την εξίσωση 3.29.

$$\text{DWI} = \text{FGC} * (30/44) * 0.6 \quad \text{,kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1} \quad (3.29)$$

Βεβαίως αν είναι γνωστή η περιεκτικότητα της ξηρής ουσίας σε N και K π.χ. $[N+K] = 35\%$ είναι δυνατή η προσέγγιση με ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια Εξίσωση 3.30).

$$DWI = FGC * (30/44)*(1-0.35) \quad ,\text{kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1} \quad (3.30)$$

Παράδειγμα

Θα υπολογιστεί η απόδοση καλαμποκιού σε σπόρο στην περιοχή της Λάρισας (AMAX = 70 kg ha⁻¹ h⁻¹).

Το καλαμπόκι από την στιγμή που θα αρχίσει ο σχηματισμός του σπόρου, περίπου στα μέσα Ιουλίου, σταματάει την ανάπτυξή του και όλα τα σχηματιζόμενα σάκχαρα μεταφέρονται προς τους σπόρους. Επομένως η υπολογιζόμενη αφομοίωση κατά τη διάρκεια γεμίσματος του σπόρου θα μας δώσει το δυναμικό παραγωγής. Έστω ότι η περίοδος γεμίσματος του σπόρου σε μια συγκεκριμένη ποικιλία είναι 45 ημέρες (περίπου 10 ημέρες μετά την έναρξη ανθοφορίας έως την φυσιολογική ωρίμανση του σπόρου).

Τα δεδομένα είναι:

Γεωγραφικό πλάτος Λάρισας	39° 30'
AMAX	70 kg CO ₂ ha ⁻¹ (φύλλου) h ⁻¹
Δείκτης φυλλικής επιφάνειας	6 (Πλήρης κάλυψη από φύλλα)
Ποσοστό ηλιοφάνειας Αυγούστου	0,760 (Μετ. σταθμός Λάρισας)
Ημέρες που μελετάμε	15/7-28/8 (196-240)

Αποτελέσματα

Ημέρα	FGC	FGASS*0.6
196	742	445
197	740	444
198	738	443
199	737	442
200	736	441
201	734	440
202	732	439
203	730	438
204	728	437
205	726	436
206	724	434

Ημέρα	FGC	FGASS*0.6
211	714	428
212	711	427
213	709	425
214	706	424
215	704	423
216	702	421
217	699	419
218	697	418
219	694	416
220	691	415
221	689	413

Ημέρα	FGC	FGASS*0.6
226	674	405
227	671	403
228	668	401
229	665	399
230	662	397
231	659	395
232	655	393
233	652	391
234	649	389
235	646	387
236	642	385

207	722	433	222	686	412	237	639	383	
208	720	432	223	683	410	238	635	381	
209	718	431	224	680	408	239	631	379	
210	716	430	225	677	406	240	628	377	
							Σύνολο	18697	

Το Σύνολο είναι σε kg ha⁻¹ δηλαδή 1870 κιλά ξηρού σπόρου ανά στρέμμα μπορεί να πάρει ένας παραγωγός αν όλες οι άλλες συνθήκες όπως λίπανσης και άρδευσης είναι ιδανικές. Αν είναι γνωστή [N+K]=0,04 και η υγρασία εμπορικού βάρους σπόρου είναι 13% τότε το δυναμικό παραγωγής είναι:

$$1870 * 0,96 / 0,87 = 2063 \text{ kg σπόρου / στρέμμα}$$

«Ο υπολογισμός της ξηράς ουσίας που παρουσιάστηκε στο παράδειγμα είναι έξω από τον σκοπό της παρούσας εργασίας και θα αποτελέσει μελέτη επόμενης εργασίας. Δίδεται για να παρουσιαστεί η πρακτική χρησιμότητα του ρυθμού αφομοίωσης CO₂.»

Τα αποτελέσματα του προγράμματος χωρίζονται σε δυο σκέλη. Το πρώτο που υπολογίζει τον ημερήσιο ρυθμό αφομοίωσης CO₂ μιας καλλιέργειας και το δεύτερο που δίνει την αφομοίωση μιας καλλιέργειας στις 15 του κάθε μηνός με τη μορφή πινάκων. Οι πίνακες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να έχει ο χρήστης μια πρώτη άποψη για το πως μεταβάλλεται η αφομοίωση του CO₂ από τα φυτά κατά την διάρκεια του έτους, για διδακτικούς σκοπούς σε περίπτωση που ο χρήστης θέλει να αναπαράγει τους αντίστοιχους πίνακες των Goudriaan & van Laar και να κάνει συγκρίσεις, και για να υπολογίσει την αφομοίωση της καλλιέργειάς του με βάση το δικό του γεωγραφικό πλάτος και τις δικές του ημερομηνίες. Επεξήγηση για το πώς ο αναγνώστης μπορεί να υπολογίσει την αφομοίωση για τα δικά του δεδομένα μέσω των πινάκων, δίδεται στην παράγραφο 5.2.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι πίνακες των Goudriaan και van Laar για δυο φυτά, ένα C₃ και ένα C₄ με AMAX 40 και 70 kg ha⁻¹ (φύλλου) h⁻¹ αντίστοιχα, καθώς και οι πίνακες του μοντέλου για σύγκριση. Όπως ήδη αναφέρθηκε οι πίνακες αυτοί αφορούν κλειστή φυλλοστοιβάδα και πλήρως ανέφελο ή καλυμμένο ουρανό, FCL και FOV αντίστοιχα.

(Goudriaan and Van Laar, 1978)

AMAX = 40 kg ha⁻¹ (leaf) h⁻¹

North lat.		Jan 15	Feb 15	Mar 15	Apr 15	May 15	June 15	July 15	Aug. 15	Sep 15	Oct 15	Nov 15	Dec 15
0°	FCL	728	753	768	761	737	720	727	752	768	760	736	720
	FOV	306	320	328	324	311	302	306	319	328	324	311	302
10°	FCL	652	701	748	779	786	784	785	784	765	720	667	638
	FOV	270	295	319	334	336	333	335	336	327	305	277	262
20°	FCL	562	634	713	783	820	834	829	802	745	665	583	542
	FOV	226	261	300	334	351	356	355	343	316	276	236	216
30°	FCL	454	549	659	768	839	869	858	804	708	591	481	429
	FOV	175	219	271	324	357	371	366	341	295	239	187	163
40°	FCL	333	445	586	737	843	892	873	788	652	497	364	304
	FOV	120	169	233	304	354	377	368	329	264	193	133	107
50°	FCL	202	324	491	686	833	904	877	757	574	384	234	172
	FOV	63	114	187	275	343	375	363	307	224	140	77	52
60°	FCL	68	191	375	615	813	915	875	708	474	255	102	39
	FOV	15	57	132	236	323	368	351	277	175	83	25	8

(Danalatos, 1993)

AMAX = 40 kg ha⁻¹ (leaf) h⁻¹

North lat.		Jan 15	Feb 15	Mar 15	Apr 15	May 15	June 15	July 15	Aug. 15	Sep 15	Oct 15	Nov 15	Dec 15
0	FCL	753	777	787	774	743	721	729	758	781	779	759	743
	FOV	384	395	399	390	372	360	364	380	393	395	386	379
10	FCL	673	724	769	794	795	788	790	793	779	739	687	657
	FOV	343	368	389	400	399	394	395	398	392	374	349	335
20	FCL	576	652	730	796	829	840	834	810	757	680	597	553
	FOV	294	331	370	401	416	420	417	406	381	344	303	282
30	FCL	462	561	672	779	846	875	863	809	716	601	489	434
	FOV	236	285	340	392	425	438	432	406	360	304	249	222
40	FCL	334	451	592	741	846	895	875	789	654	502	366	303
	FOV	172	230	300	373	425	448	438	395	329	254	188	157
50	FCL	198	324	491	683	830	902	873	750	570	384	233	167
	FOV	104	167	250	344	417	452	437	376	288	196	121	88
60	FCL	63	187	370	605	801	904	862	694	465	251	95	0
	FOV	38	99	190	306	403	455	433	349	236	130	54	0

(Goudriaan and Van Laar, 1978)

AMAX = 70 kg ha⁻¹ (leaf) h⁻¹

North lat.		Jan 15	Feb 15	Mar 15	Apr 15	May 15	June 15	July 15	Aug.15	Sep 15	Oct 15	Nov 15	Dec 15
0°	FCL	959	995	1017	1007	973	947	958	993	1018	1007	971	947
	FOV	326	341	350	346	331	321	325	340	351	346	331	321
10°	FCL	852	922	989	1032	1039	1035	1037	1038	1012	949	873	832
	FOV	285	313	340	357	358	356	357	359	349	324	294	277
20°	FCL	726	827	937	1035	1086	1103	1097	1062	983	870	755	698
	FOV	237	276	319	356	375	381	379	366	336	292	248	226
30°	FCL	577	707	860	1011	1109	1149	1134	1060	927	765	613	542
	FOV	182	229	287	345	381	396	391	363	313	251	195	170
40°	FCL	410	562	755	962	1108	1175	1150	1033	845	633	452	372
	FOV	123	176	245	322	377	402	392	349	278	201	138	110
50°	FCL	236	397	620	885	1086	1183	1145	982	733	477	278	198
	FOV	65	117	194	289	362	398	384	324	234	145	78	53
60°	FCL	71	220	460	779	1046	1182	1129	905	591	301	109	40
	FOV	15	58	136	246	340	388	369	290	181	85	25	8

(Danalatos, 1993)

AMAX = 70 kg ha⁻¹ (leaf) h⁻¹

North lat.		Jan 15	Feb 15	Mar 15	Apr 15	May 15	June 15	July 15	Aug.15	Sep 15	Oct 15	Nov 15	Dec 15
0	FCL	983	1016	1030	1010	967	935	946	987	1020	1019	991	970
	FOV	417	430	435	424	404	389	393	412	428	430	419	411
10	FCL	875	944	1004	1037	1036	1026	1028	1034	1016	964	893	853
	FOV	370	399	424	436	433	427	428	432	427	406	377	361
20	FCL	744	846	951	1038	1081	1093	1087	1056	986	883	772	713
	FOV	314	357	401	436	453	456	454	442	414	371	325	302
30	FCL	591	722	871	1013	1102	1139	1123	1052	929	776	627	554
	FOV	250	305	366	425	461	476	469	440	389	326	265	235
40	FCL	421	575	762	960	1099	1163	1136	1023	844	642	464	381
	FOV	180	243	320	402	459	485	474	427	353	270	197	163
50	FCL	244	408	626	879	1072	1167	1128	967	730	485	288	203
	FOV	108	175	264	368	448	487	470	403	305	206	125	91
60	FCL	71	228	465	771	1027	1163	1107	887	588	311	111	0
	FOV	39	102	198	324	430	486	462	370	248	135	55	0

Συγκρίνοντας τους αντίστοιχους πίνακες για κάθε είδος φυτού παρατηρείται μια ελαφριά αύξηση του ρυθμού φωτοσύνθεσης για τελείως ανέφελές ημέρες (FCL) (2-5%) αλλά μια σημαντική αύξηση για τις τελείως νεφοσκεπείς (FCL) (20-25%). Αυτό οφείλεται διότι στις τελείως ανέφελές μέρες το ποσοστό της διάχυτης ακτινοβολίας

είναι πολύ μικρό και δεν συμμετέχει ενεργά στη διαδικασία της φωτοσύνθεσης γι' αυτό και η διαφορά μεταξύ των δυο μοντέλων είναι μικρή. Αντιθέτως σε τελείως νεφοσκεπείς ημέρες το ποσοστό της διάχυτης ακτινοβολίας είναι μεγάλο και συμμετέχει ενεργά στη φωτοσύνθεση κάτι που μέχρι πρότινος είχε παραληφθεί από τα άλλα μοντέλα.

Μέχρι στιγμής η προσφορά της διάχυτης ακτινοβολίας θεωρούνταν μειωμένης αξίας και σταθερή στις νεφοσκεπείς ημέρες. Με τον διαχωρισμό όμως της άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας και τον λεπτομερέστερο υπολογισμό της δεύτερης, προκύπτει ότι η συμμετοχή της στη φωτοσύνθεση είναι σημαντική και ιδιαίτερα τις νεφοσκεπείς ημέρες όπου το ποσοστό της είναι μεγαλύτερο απ' ό,τι στις τελείως ανέφελες όπου είναι μηδαμινό.

5.1 Τα αποτελέσματα του μοντέλου για τον ελλαδικό για C₃ και C₄ φυτά.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου οργανωμένα σε πίνακες. Κάθε πίνακας δίνει το μέγιστο ποσό αφομοίωσης CO₂ σε συνθήκες πλήρους ηλιοφάνειας FCL και πλήρος νεφοσκεπούς ουρανού FOV, για τιμή του δείκτη φυλλικής επιφάνειας LAI ίση με 6. Το LAI δίδεται 6 γιατί σ' αυτήν την τιμή παρατηρείται το μέγιστο της φωτοσύνθεσης.

Κριθάρι (C₃)

AMAX = 30 kg ha⁻¹ (leaf) h⁻¹

Date		15-Ιαν	15-Φεβ	15-Μαρ	15-Απρ	15-Μαϊ	15-Ιουν	15-Ιουλ	15-Αυγ	15-Σεπ	15-Οκτ	15-Νοε	15-Δεκ
Latitude													
35°	Fcl	348	440	547	655	728	760	747	688	592	479	374	323
	Fov	197	247	305	363	401	418	411	379	328	267	211	183
35.5°	Fcl	343	436	544	653	728	761	747	687	590	475	368	317
	Fov	194	245	303	362	401	419	411	379	326	265	208	180
36°	Fcl	337	431	540	652	728	762	748	686	587	471	363	311
	Fov	191	242	301	361	401	419	411	378	325	263	205	177
36.5°	Fcl	332	426	537	650	728	763	748	686	584	467	358	306
	Fov	188	240	299	360	401	420	412	378	323	260	202	174
37°	Fcl	326	421	534	648	728	764	749	685	582	462	352	300
	Fov	185	237	297	359	401	420	412	377	322	258	199	171
37.5°	Fcl	320	417	530	647	728	765	749	684	579	458	347	294
	Fov	182	234	296	358	401	421	412	377	321	256	196	168
38°	Fcl	315	412	526	645	728	765	750	683	576	453	342	289

	Fov	179	232	294	357	401	421	412	376	319	253	193	164
38.5°	Fcl	309	407	523	643	727	766	750	682	573	449	336	283
	Fov	176	229	292	356	401	422	413	376	317	251	190	161
39°	Fcl	304	402	519	641	727	767	750	681	570	445	331	277
	Fov	173	226	290	355	401	422	413	375	316	248	187	158
39.5°	Fcl	298	397	515	640	727	767	751	680	567	440	325	272
	Fov	170	224	288	354	401	422	413	375	314	246	184	155
40°	Fcl	292	392	512	638	727	768	751	678	564	435	320	266
	Fov	166	221	286	353	401	423	413	374	313	244	181	152
40.5°	Fcl	287	387	508	636	726	769	751	677	561	431	314	260
	Fov	163	218	284	352	401	423	413	373	311	241	178	148
41°	Fcl	281	382	504	634	726	769	751	676	558	426	309	254
	Fov	160	215	281	351	401	424	414	373	309	239	175	145

Σίτος (C₃)

AMAX = 40 kg ha⁻¹ (leaf) h⁻¹

Date		15-Ιαν	15-Φεβ	15-Μαρ	15-Απρ	15-Μαϊ	15-Ιουν	15-Ιουλ	15-Αυγ	15-Σεπ	15-Οκτ	15-Νοε	15-Δεκ
Latitude													
35°	Fcl	399	508	635	762	849	887	871	802	688	554	429	370
	Fov	205	259	321	384	426	444	436	402	346	280	219	190
35.5°	Fcl	393	503	631	761	849	888	871	801	685	549	423	363
	Fov	202	256	319	383	426	444	436	401	344	278	216	187
36°	Fcl	386	497	627	759	848	889	872	799	682	544	417	356
	Fov	199	253	317	382	426	445	436	401	343	275	213	183
36.5°	Fcl	380	491	622	757	848	890	872	798	678	539	411	350
	Fov	195	250	315	381	426	445	436	400	341	273	210	180
37°	Fcl	373	486	618	755	848	891	873	797	675	534	405	343
	Fov	192	248	313	380	426	446	437	399	339	270	207	177
37.5°	Fcl	367	480	614	752	848	891	873	796	672	529	398	336
	Fov	189	245	311	379	425	446	437	399	338	268	204	173
38°	Fcl	360	474	610	750	848	892	874	795	668	523	392	330
	Fov	185	242	309	378	425	447	437	398	336	265	201	170
38.5°	Fcl	354	468	605	748	848	893	874	793	665	518	385	323
	Fov	182	239	306	377	425	447	437	398	334	262	197	167
39°	Fcl	347	463	601	746	847	894	874	792	661	513	379	316
	Fov	179	236	304	375	425	447	438	397	333	260	194	163
39.5°	Fcl	341	457	597	744	847	894	875	791	658	507	373	310
	Fov	176	233	302	374	425	448	438	396	331	257	191	160
40°	Fcl	334	451	592	741	846	895	875	789	654	502	366	303
	Fov	172	230	300	373	425	448	438	395	329	254	188	157
40.5°	Fcl	327	445	588	739	846	896	875	788	650	497	360	296
	Fov	169	227	298	372	424	449	438	395	327	252	185	153
41°	Fcl	321	439	583	736	846	896	875	786	647	491	353	289
	Fov	166	224	295	371	424	449	438	394	325	249	181	150

Βαμβάκι (C₃)AMAX = 50 kg ha⁻¹ (leaf) h⁻¹

Date		15-Ιαν	15-Φεβ	15-Μαρ	15-Απρ	15-Μαΐ	15-Ιουν	15-Ιουλ	15-Αυγ	15-Σεπ	15-Οκτ	15-Νοε	15-Δεκ
Latitude													
35°	Fcl	442	564	707	852	949	991	973	895	767	616	476	408
	Fov	210	266	332	398	442	461	452	416	358	289	225	194
35.5°	Fcl	435	558	703	849	948	992	974	894	763	610	469	401
	Fov	207	263	329	397	442	461	452	416	356	286	222	191
36°	Fcl	427	552	698	847	948	994	974	893	760	605	462	394
	Fov	203	260	327	396	442	462	453	415	354	283	219	188
36.5°	Fcl	420	545	693	845	948	994	975	892	756	599	455	386
	Fov	200	257	325	394	442	462	453	415	353	281	215	184
37°	Fcl	413	539	688	842	948	995	975	890	752	593	448	379
	Fov	196	254	323	393	441	463	453	414	351	278	212	181
37.5°	Fcl	405	532	684	840	948	996	976	889	749	587	440	371
	Fov	193	251	321	392	441	463	453	413	349	275	209	177
38°	Fcl	398	526	679	837	947	997	976	887	745	581	433	364
	Fov	190	248	318	391	441	463	453	412	347	273	205	174
38.5°	Fcl	391	519	674	835	947	998	977	886	741	575	426	356
	Fov	186	245	316	390	441	464	454	412	345	270	202	170
39°	Fcl	383	513	669	832	946	999	977	884	737	569	419	349
	Fov	183	242	314	389	441	464	454	411	343	267	199	167
39.5°	Fcl	376	506	664	830	946	999	977	883	733	563	412	341
	Fov	179	239	311	387	440	464	454	410	342	264	195	163
40°	Fcl	368	499	659	827	945	1000	977	881	728	557	404	333
	Fov	176	236	309	386	440	465	454	409	340	262	192	160
40.5°	Fcl	361	493	654	824	945	1001	978	879	724	551	397	326
	Fov	172	233	307	385	440	465	454	409	338	259	189	156
41°	Fcl	353	486	648	821	944	1001	978	877	720	545	390	318
	Fov	169	230	304	383	440	465	454	408	336	256	185	153

Καλαμπόκι (C₄)AMAX = 70 kg ha⁻¹ (leaf) h⁻¹

Date		15-Ιαν	15-Φεβ	15-Μαρ	15-Απρ	15-Μαΐ	15-Ιουν	15-Ιουλ	15-Αυγ	15-Σεπ	15-Οκτ	15-Νοε	15-Δεκ
Latitude													
35°	Fcl	508	651	820	990	1104	1153	1132	1041	890	712	547	469
	Fov	216	275	344	415	461	482	472	434	372	299	232	200
35.5°	Fcl	499	644	814	987	1103	1155	1133	1039	886	705	539	460
	Fov	212	272	342	414	461	482	473	434	370	296	228	196
36°	Fcl	491	637	809	984	1103	1156	1133	1038	881	699	531	451
	Fov	209	269	340	412	461	482	473	433	368	293	225	192
36.5°	Fcl	482	629	803	982	1103	1157	1134	1036	877	692	523	442
	Fov	205	266	337	411	461	483	473	432	366	291	221	189
37°	Fcl	474	621	797	979	1102	1158	1134	1034	872	685	514	434
	Fov	202	263	335	410	461	483	473	432	365	288	218	185
37.5°	Fcl	465	614	792	976	1102	1159	1135	1033	868	678	506	425
	Fov	198	259	333	409	461	484	473	431	363	285	215	182
38°	Fcl	456	606	786	973	1102	1160	1135	1031	863	671	497	416

	Fov	195	256	330	407	460	484	473	430	361	282	211	178
38.5°	Fcl	448	598	780	970	1101	1160	1135	1029	858	664	489	407
	Fov	191	253	328	406	460	484	474	429	359	279	208	174
39°	Fcl	439	591	774	966	1100	1161	1135	1027	853	657	481	398
	Fov	188	250	325	405	460	485	474	428	357	276	204	171
39.5°	Fcl	430	583	768	963	1100	1162	1136	1025	848	649	472	390
	Fov	184	247	323	403	460	485	474	427	355	273	201	167
40°	Fcl	421	575	762	960	1099	1163	1136	1023	844	642	464	381
	Fov	180	243	320	402	459	485	474	427	353	270	197	163
40.5°	Fcl	413	567	756	956	1098	1163	1136	1020	839	635	455	372
	Fov	177	240	318	400	459	486	474	426	350	267	194	160
41°	Fcl	404	559	750	953	1097	1164	1136	1018	833	627	446	363
	Fov	173	237	315	399	459	486	474	425	348	264	190	156

Μίσχανθος (C₄)

AMAX = 80 kg ha⁻¹ (leaf) h⁻¹

Date		15-Ιαν	15-Φεβ	15-Μαρ	15-Απρ	15-Μαί	15-Ιουν	15-Ιουλ	15-Αυγ	15-Σεπ	15-Οκτ	15-Νοε	15-Δεκ
Latitude													
35°	Fcl	534	686	864	1044	1164	1217	1194	1098	938	750	576	492
	Fov	218	278	349	420	468	488	479	440	377	302	234	201
35.5°	Fcl	525	678	858	1041	1164	1218	1195	1096	934	743	567	483
	Fov	214	275	346	419	468	489	479	440	375	299	230	198
36°	Fcl	516	670	852	1038	1164	1219	1196	1095	929	735	558	474
	Fov	211	272	344	418	468	489	479	439	373	297	227	194
36.5°	Fcl	507	662	846	1035	1164	1220	1196	1093	924	728	549	465
	Fov	207	268	341	417	468	490	480	438	371	294	223	190
37°	Fcl	498	654	840	1032	1163	1221	1196	1091	919	721	540	455
	Fov	204	265	339	415	467	490	480	437	369	291	220	187
37.5°	Fcl	488	646	834	1029	1163	1222	1197	1089	914	713	532	446
	Fov	200	262	337	414	467	490	480	437	367	288	216	183
38°	Fcl	479	638	828	1026	1162	1223	1197	1087	909	706	523	437
	Fov	196	259	334	413	467	491	480	436	365	285	213	179
38.5°	Fcl	470	630	822	1023	1161	1224	1197	1085	904	699	514	427
	Fov	193	256	332	411	467	491	480	435	363	282	209	176
39°	Fcl	461	621	815	1019	1161	1225	1198	1083	899	691	505	418
	Fov	189	252	329	410	466	491	480	434	361	279	206	172
39.5°	Fcl	452	613	809	1016	1160	1226	1198	1081	894	683	496	409
	Fov	185	249	326	408	466	492	480	433	359	276	202	168
40°	Fcl	442	605	803	1012	1159	1226	1198	1078	889	676	487	399
	Fov	182	246	324	407	466	492	480	432	357	273	199	165
40.5°	Fcl	433	596	796	1008	1158	1227	1198	1076	883	668	478	390
	Fov	178	242	321	406	465	492	480	431	355	270	195	161
41°	Fcl	424	588	789	1005	1157	1228	1198	1074	878	660	469	381
	Fov	174	239	319	404	465	492	480	430	352	267	192	157

5.2 Τα αποτελέσματα της εφαρμογής για την υφήλιο.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου για την υφήλιο. Κατά αντιστοιχία με τα αποτελέσματα της Ελλάδος παρουσιάζονται σε πίνακες για συνθήκες πλήρους ηλιοφάνειας FCL και πλήρως νεφοσκεπούς ουρανού FOV, για τιμή του δείκτη φυλλικής επιφάνειας LAI ίση με 6.

(Danalatos, 1993)

AMAX = 10 kg ha⁻¹ (leaf) h⁻¹

North lat.		Jan 15	Feb 15	Mar 15	Apr 15	May 15	June 15	July 15	Aug.15	Sep 15	Oct 15	Nov 15	Dec 15
0	FCL	339	347	350	346	335	327	330	340	348	347	341	336
	FOV	246	251	252	249	241	236	238	244	250	251	247	244
10	FCL	308	327	343	354	356	354	354	354	348	333	313	302
	FOV	225	237	248	254	255	254	254	254	250	241	228	221
20	FCL	270	300	330	356	370	376	373	362	341	311	278	261
	FOV	200	219	239	256	266	269	267	260	246	226	205	194
30	FCL	224	265	309	352	380	392	387	364	327	281	235	212
	FOV	168	196	226	254	273	281	278	262	237	206	176	160
40	FCL	170	220	280	341	384	405	396	361	305	242	184	156
	FOV	131	166	207	248	277	291	285	261	223	181	141	121
50	FCL	110	167	240	322	383	414	402	350	274	193	125	95
	FOV	86	129	181	237	279	301	292	256	204	148	98	74
60	FCL	45	106	190	294	379	424	406	333	233	136	62	0
	FOV	35	83	147	221	280	312	299	248	177	106	48	0

(Danalatos, 1993)

AMAX = 20 kg ha⁻¹ (leaf) h⁻¹

North lat.		Jan 15	Feb 15	Mar 15	Apr 15	May 15	June 15	July 15	Aug.15	Sep 15	Oct 15	Nov 15	Dec 15
0	FCL	512	527	533	525	507	493	498	516	529	529	516	507
	FOV	323	331	334	327	315	306	309	320	330	331	325	320
10	FCL	462	494	522	539	540	537	538	539	528	503	471	452
	FOV	292	311	327	336	336	333	333	334	329	315	296	286
20	FCL	400	448	498	541	563	571	567	550	516	466	413	385
	FOV	254	283	312	337	350	354	351	342	322	293	261	245
30	FCL	325	390	462	531	576	595	587	552	491	417	344	307
	FOV	208	248	291	332	358	369	364	343	307	263	219	197
40	FCL	240	319	412	510	579	611	598	541	453	353	262	219
	FOV	156	204	261	319	361	380	371	337	284	224	169	143
50	FCL	149	235	347	475	572	620	601	520	400	275	172	127
	FOV	97	152	222	299	358	387	375	325	253	177	112	83
60	FCL	53	142	268	427	558	627	599	487	333	186	77	0
	FOV	37	93	173	271	352	395	377	307	213	121	52	0

(Danalatos, 1993)

AMAX = 30 kg ha⁻¹ (leaf) h⁻¹

North lat.		Jan 15	Feb 15	Mar 15	Apr 15	May 15	June 15	July 15	Aug.15	Sep 15	Oct 15	Nov 15	Dec 15
0	FCL	645	664	673	662	638	619	626	650	668	667	650	637
	FOV	361	371	375	367	351	340	343	358	370	371	363	357
10	FCL	578	621	658	680	681	676	677	679	667	634	590	565
	FOV	324	347	366	376	375	371	372	374	369	352	330	317
20	FCL	497	561	626	681	710	719	715	694	649	584	515	478
	FOV	279	313	348	377	391	395	393	382	359	325	288	269
30	FCL	401	485	578	668	725	750	739	694	615	519	424	377
	FOV	226	271	322	370	400	412	406	382	341	289	238	213
40	FCL	292	392	512	638	727	768	751	678	564	435	320	266
	FOV	166	221	286	353	401	423	413	374	313	244	181	152
50	FCL	176	285	427	590	715	776	751	647	495	336	206	149
	FOV	102	162	240	328	395	428	414	358	275	189	118	87
60	FCL	59	167	325	525	692	780	745	601	406	223	87	0
	FOV	38	97	184	294	385	433	412	334	228	127	53	0

(Danalatos, 1993)

AMAX = 40 kg ha⁻¹ (leaf) h⁻¹

North lat.		Jan 15	Feb 15	Mar 15	Apr 15	May 15	June 15	July 15	Aug.15	Sep 15	Oct 15	Nov 15	Dec 15
0	FCL	753	777	787	774	743	721	729	758	781	779	759	743
	FOV	384	395	399	390	372	360	364	380	393	395	386	379
10	FCL	673	724	769	794	795	788	790	793	779	739	687	657
	FOV	343	368	389	400	399	394	395	398	392	374	349	335
20	FCL	576	652	730	796	829	840	834	810	757	680	597	553
	FOV	294	331	370	401	416	420	417	406	381	344	303	282
30	FCL	462	561	672	779	846	875	863	809	716	601	489	434
	FOV	236	285	340	392	425	438	432	406	360	304	249	222
40	FCL	334	451	592	741	846	895	875	789	654	502	366	303
	FOV	172	230	300	373	425	448	438	395	329	254	188	157
50	FCL	198	324	491	683	830	902	873	750	570	384	233	167
	FOV	104	167	250	344	417	452	437	376	288	196	121	88
60	FCL	63	187	370	605	801	904	862	694	465	251	95	0
	FOV	38	99	190	306	403	455	433	349	236	130	54	0

(Danalatos, 1993)

AMAX = 50 kg ha⁻¹ (leaf) h⁻¹

North lat.		Jan 15	Feb 15	Mar 15	Apr 15	May 15	June 15	July 15	Aug. 15	Sep 15	Oct 15	Nov 15	Dec 15
0	FCL	843	870	882	866	831	805	814	848	874	873	849	832
	FOV	399	411	415	405	386	373	377	394	409	410	401	393
10	FCL	752	810	861	889	890	882	883	888	872	827	768	734
	FOV	355	382	405	416	414	409	410	413	408	388	362	346
20	FCL	642	728	817	891	928	939	933	907	847	760	665	616
	FOV	303	343	383	417	432	436	434	422	396	356	313	291
30	FCL	512	624	750	870	947	978	965	904	800	669	543	481
	FOV	243	294	352	407	441	455	448	421	373	314	256	228
40	FCL	368	499	659	827	945	1000	977	881	728	557	404	333
	FOV	176	236	309	386	440	465	454	409	340	262	192	160
50	FCL	216	357	544	760	925	1007	973	835	633	424	255	181
	FOV	106	171	256	355	431	468	452	388	296	201	123	90
60	FCL	66	203	407	670	890	1006	958	770	513	275	102	0
	FOV	39	100	194	314	415	469	446	359	241	132	54	0

(Danalatos, 1993)

AMAX = 60 kg ha⁻¹ (leaf) h⁻¹

North lat.		Jan 15	Feb 15	Mar 15	Apr 15	May 15	June 15	July 15	Aug. 15	Sep 15	Oct 15	Nov 15	Dec 15
0	FCL	918	949	962	944	904	875	885	923	953	952	926	906
	FOV	409	422	427	416	396	382	386	405	420	422	411	404
10	FCL	819	882	938	969	969	960	962	967	950	901	836	798
	FOV	364	392	416	428	425	420	421	424	419	399	371	355
20	FCL	697	792	889	971	1011	1023	1016	987	922	826	723	669
	FOV	310	351	393	428	444	448	445	433	406	365	320	297
30	FCL	555	677	815	947	1031	1065	1050	985	870	727	589	521
	FOV	247	300	360	417	453	467	460	432	382	321	261	232
40	FCL	397	540	715	899	1029	1088	1063	958	791	603	436	359
	FOV	178	240	315	395	451	477	465	419	347	266	195	162
50	FCL	231	385	588	824	1005	1094	1057	907	685	457	273	193
	FOV	107	173	261	362	441	479	463	397	301	204	124	90
60	FCL	69	217	439	724	964	1091	1039	833	554	294	107	0
	FOV	39	101	196	320	423	479	455	365	245	134	55	0

(Danalatos, 1993)

AMAX = 70 kg ha⁻¹ (leaf) h⁻¹

North lat.		Jan 15	Feb 15	Mar 15	Apr 15	May 15	June 15	July 15	Aug. 15	Sep 15	Oct 15	Nov 15	Dec 15
0	FCL	983	1016	1030	1010	967	935	946	987	1020	1019	991	970
	FOV	417	430	435	424	404	389	393	412	428	430	419	411
10	FCL	875	944	1004	1037	1036	1026	1028	1034	1016	964	893	853
	FOV	370	399	424	436	433	427	428	432	427	406	377	361
20	FCL	744	846	951	1038	1081	1093	1087	1056	986	883	772	713
	FOV	314	357	401	436	453	456	454	442	414	371	325	302
30	FCL	591	722	871	1013	1102	1139	1123	1052	929	776	627	554
	FOV	250	305	366	425	461	476	469	440	389	326	265	235
40	FCL	421	575	762	960	1099	1163	1136	1023	844	642	464	381
	FOV	180	243	320	402	459	485	474	427	353	270	197	163
50	FCL	244	408	626	879	1072	1167	1128	967	730	485	288	203
	FOV	108	175	264	368	448	487	470	403	305	206	125	91
60	FCL	71	228	465	771	1027	1163	1107	887	588	311	111	0
	FOV	39	102	198	324	430	486	462	370	248	135	55	0

(Danalatos, 1993)

AMAX = 80 kg ha⁻¹ (leaf) h⁻¹

North lat.		Jan 15	Feb 15	Mar 15	Apr 15	May 15	June 15	July 15	Aug. 15	Sep 15	Oct 15	Nov 15	Dec 15
0	FCL	1039	1074	1089	1067	1020	986	997	1042	1077	1076	1047	1025
	FOV	423	437	442	430	409	394	399	418	435	436	426	417
10	FCL	924	997	1061	1096	1094	1082	1085	1092	1073	1018	943	900
	FOV	375	405	430	442	440	434	435	439	433	412	382	366
20	FCL	784	893	1004	1097	1142	1154	1147	1115	1041	932	814	752
	FOV	318	362	406	443	459	463	460	448	419	376	329	305
30	FCL	622	761	918	1069	1163	1202	1185	1110	980	817	660	583
	FOV	253	308	371	431	468	482	475	446	394	329	268	237
40	FCL	442	605	803	1012	1159	1226	1198	1078	889	676	487	399
	FOV	182	246	324	407	466	492	480	432	357	273	199	165
50	FCL	255	428	658	926	1130	1231	1189	1018	767	509	302	212
	FOV	108	176	266	372	454	493	476	408	308	207	126	91
60	FCL	73	238	487	810	1081	1224	1165	932	617	325	115	0
	FOV	39	102	200	327	434	492	467	374	250	135	55	0

(Danalatos, 1993)

AMAX = 90 kg ha⁻¹ (leaf) h⁻¹

North lat.		Jan 15	Feb 15	Mar 15	Apr 15	May 15	June 15	July 15	Aug. 15	Sep 15	Oct 15	Nov 15	Dec 15
0	FCL	1087	1124	1139	1116	1066	1030	1042	1089	1127	1126	1095	1072
	FOV	428	442	447	435	414	398	403	423	440	441	430	422
10	FCL	966	1043	1110	1146	1144	1131	1134	1142	1123	1065	986	941
	FOV	379	409	435	448	445	438	439	444	438	417	386	369
20	FCL	819	933	1050	1147	1194	1206	1199	1166	1089	974	850	785
	FOV	321	365	411	448	464	468	465	453	424	380	333	308
30	FCL	649	795	960	1118	1216	1256	1238	1161	1024	854	689	608
	FOV	255	311	374	435	473	488	481	451	398	333	270	239
40	FCL	460	630	838	1057	1211	1282	1252	1126	928	705	507	415
	FOV	183	247	327	411	471	497	485	437	360	275	200	166
50	FCL	264	445	686	966	1180	1285	1241	1063	800	530	313	219
	FOV	109	177	268	375	458	498	481	412	311	209	127	92
60	FCL	75	246	507	844	1128	1277	1216	972	642	337	118	0
	FOV	39	103	201	329	438	496	472	377	251	136	55	0

5.3 Επεξεργασία των αποτελεσμάτων

Ο αναγνώστης μπορεί να χρησιμοποιήσει τους πίνακες για να υπολογίσει την αφομοίωση της καλλιέργειας που μελετά για γεωγραφικά πλάτη και ημερομηνίες εκτός από αυτές που παρουσιάζονται. Οι πίνακες παρουσιάζουν χονδρικά τα αποτελέσματα του μοντέλου ανά 30 ημέρες για όλο το εύρος του χρόνου και σε γεωγραφικά πλάτη από 0° έως 60° ή από 35° έως 41°, παραλείποντας πολλές ενδιάμεσες χρονικές και τοπικές περιπτώσεις οι οποίες μπορούν να υπολογιστούν με την χρήση της γραμμικής παρεμβολής.

Παρακάτω παρατίθενται δυο παραδείγματα για το πώς ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει τους πίνακες για τα δικά του δεδομένα.

Παράδειγμα 1.

Να βρεθεί η αφομοίωση μιας καλλιέργειας καλαμποκιού στις 25 Μαΐου (AMAX 70 kg ha⁻¹ (leaf) h⁻¹), σε γεωγραφικό πλάτος 30° και συνθήκες πλήρους ηλιοφάνειας FCL.

Απάντηση.

Η ημερομηνία είναι μεταξύ 15 Μαΐου και 15 Ιουνίου και το AMAX μεταξύ 1102 και 1139. Με γραμμική παρεμβολή έχουμε:

$$A = 1102 + \left[(1139 - 1102) * \frac{10}{31} \right] = 1114 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$$

Παράδειγμα 2.

Να βρεθεί η αφομοίωση μιας καλλιέργειας βαμβακιού ($AMAX=50 \text{ kg ha}^{-1} (\text{leaf}) \text{ h}^{-1}$) στις 28 Ιουνίου, στην περιοχή της Καρδίτσας (γεωγραφικό πλάτος $39,20^\circ$) και σε συνθήκες πλήρους ηλιοφάνειας (FCL).

Απάντηση.

Για τη λύση πρέπει να πραγματοποιηθούν 3 γραμμικές παρεμβολές, από μία μεταξύ 15 Ιουνίου και 15 Ιουλίου, για 30° και 40° και μια μεταξύ των αποτελεσμάτων.

Από πίνακα, για FCL:

Γεωγραφικό πλάτος	15 Ιουνίου	15 Ιουλίου
30°	978	965
40°	1000	977

- 15 Ιουνίου – 15 Ιουλίου, 30° .

$$A = 978 + \left[(965 - 978) * \frac{13}{31} \right] = 972 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$$

- 15 Ιουνίου – 15 Ιουλίου, 40° .

$$B = 1000 + \left[(977 - 1000) * \frac{13}{31} \right] = 990 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$$

- $30^\circ - 40^\circ$

$$C = 972 + \left[(990 - 972) * \frac{9,20}{10} \right] = 989 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$$

Η αφομοίωση μιας καλλιέργειας βαμβακιού στις 28 Ιουνίου στην περιοχή της Καρδίτσας και σε συνθήκες πλήρους ηλιοφάνειας (FCL) είναι **989 kg CO₂ ha⁻¹ d⁻¹**.

Η μέθοδος της γραμμικής παρεμβολής μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κάθε ενδιάμεση περίπτωση AMAX, γεωγραφικού πλάτους, ποσοστού ηλιοφάνειας και ημερομηνίας μόνο που σε μια τέτοια περίπτωση οι υπολογισμοί είναι πολλοί και ενδείκνυται η χρήση της εφαρμογής για H/Y.

Επίλογος

Στην παρούσα διατριβή αυτή παρουσιάστηκε η διαδικασία της φωτοσύνθεσης και πως αυτή μπορεί να εξομοιωθεί μέσω ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή. Αναλύθηκε το μοντέλο προσομοίωσης της φωτοσύνθεσης και πως από την καμπύλη έντασης ακτινοβολίας - φωτοσύνθεσης ενός φύλλου μπορεί να μετρηθεί η αφομοίωση CO₂ μιας καλλιέργειας..

Δόθηκαν και επεξηγήθηκαν οι εξισώσεις του μοντέλου καθώς και η καινοτομία που εισήχθηκε με το διαχωρισμό της ακτινοβολίας σε άμεση και έμμεση και παρουσιάστηκε όλη η διαδικασία προγραμματισμού της εφαρμογής (CAR.DI.A.) που ενσωματώνει όλες αυτές τις εξισώσεις και παρουσιάζει σε ευανάγνωστη μορφή τα αποτελέσματα του μοντέλου για τον ελληνικό χώρο αλλά και για την υφήλιο

Τέλος δίδονται παραδείγματα για το πώς ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει τα αποτελέσματα μέσω της γραμμικής παρεμβολής για προσωπική χρήση καθώς και πως μπορεί χονδρικά να υπολογίσει την ξηρά ουσία της καλλιέργειάς που μελετά.

Πρέπει όμως πάλι να επισημανθεί ότι τα μοντέλα είναι αναγκαστικά απλοποιημένες εκφράσεις πιο πολύπλοκων συστημάτων και μέρους της πραγματικότητας και σε καμιά περίπτωση δεν μπορούν να αντιπροσωπεύσουν όλο το εύρος του πραγματικού συστήματος, η χρησιμότητά τους όμως για πρόγνωση και πειραματισμό φαινομένων, σε διάφορες συνθήκες, σε ένα περιβάλλον φθινό και ασφαλές όπως αυτό του ηλεκτρονικού υπολογιστή, τα κάνει ένα δυνατό εργαλείο στα χέρια της επιστημονικής, και όχι μόνο, κοινότητας.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω άλλη μια φορά τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Ν. Δαναλάτο, τον Καθηγητή κ. Π. Λόλα και τον Καθηγητή κ. Στ. Τζώρτζιο για τις πολύτιμες γνώσεις που αποκόμισα στα μαθήματα τους και για την βοήθειά τους χωρίς την οποία η διεκπεραίωση αυτής της διατριβής θα ήταν αδύνατη.

Βιβλιογραφία

Goudriaan, J. and H. H. van Laar, 1978. Calculation of daily totals of gross CO₂ assimilation of leaf canopies. Department of Theoretical Production Ecology, Agricultural University of Wageningen, the Netherlands, 373-382 pp.

Spitters, C. J. T., 1986. Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis, Part II calculations of canopy photosynthesis. Foundation of agricultural plant breeding, Wageningen, the Netherlands, 231-242 pp.

de Wit, C. T., R., Brouwer and F. W. T. Penning de Vries, 1970. Prediction and measurement of photosynthetic productivity. Center for Agricultural publishing and documentation, Wageningen, the Netherlands, 47-71 pp.

de Wit, C. T., 1965. Photosynthesis of leaf canopies. Center for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen the Netherlands, 1-49 pp.

Spitters, C. J. T., H. A. J. M. Toussaint and J. Goudriaan, 1986. Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis, Part I Components of incoming radiation. Foundation of agricultural plant breeding, Wageningen, the Netherlands, 217-229 pp.

Goudriaan, J., 1986 A simple and fast numerical method for the computation of daily totals of crop photosynthesis, 249-254 pp.

Jame, Y. W. and H. W. Cutforth, 1996. Crop growth models for decision support systems Semiarid Prairie Agricultural Research Centre, Agriculture and Agri-Food Canada, Saskatchewan, Canada.

Δαναλάτος, Ν., 2001. Σημειώσεις μαθήματος εισαγωγή στην προσομοίωση – μοντέλα. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.

Danalatos, N., 1993. Countrified analysis of selected land use systems in the Larissa region, Greece. Wageningen agricultural press ISBN 9054850639. Wageningen, the Netherlands, 370 pp.

Καρατάγλης, Σ. , 1999. Φυσιολογία φυτών, εκδόσεις Art of text, ISBN 960-312-009-X , Θεσσαλονίκη, 203-236 pp.

Λόλας, Π. , 2000. Σημειώσεις μαθήματος φυσιολογίας «φυσιολογία φυτού». Εκδόσεις πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Βόλος

Πετρούτσος, Ε. , 1999. Πλήρες εγχειρίδιο της Visual Basic 6; απόδοση Γιάννης Β. Σαμαράς, Ευάγγελος Πετρούτσος. Εκδόσεις Γκιούρδας, ISBN 960-512-155-7, Αθήνα.

Φραγκάκης, Χ. , 1986. Προγραμματισμός Ηλεκτρονικών Υπολογιστών : για προσωπικούς μικροϋπολογιστές IBM και συμβατούς. Εκδόσεις Κυριακίδη ISBN 960-343-071-4, Θεσσαλονίκη, 39-40 pp.

Σελίδες διαδικτύου

<http://www.phys.uu.nl/~bergmann/history.html>. A brief history of the development of Basic

<http://www.jasc.com/>. Official site of Jasc software. Paint shop Pro homepage

[http://www.knowledgebank.irri.org/oryza2000/Welcome to Oryza 2000.htm](http://www.knowledgebank.irri.org/oryza2000/Welcome%20to%20Oryza%202000.htm).

Oryza2000 official website

[www.atm.ch.cam.ac.uk/ tour/part1.html](http://www.atm.ch.cam.ac.uk/tour/part1.html). The ozone hole tour Part I (εικόνα ατμόσφαιρας)

www.digitalblasphemy.com. 3D rendered Art site. (Εικόνες)



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000089079