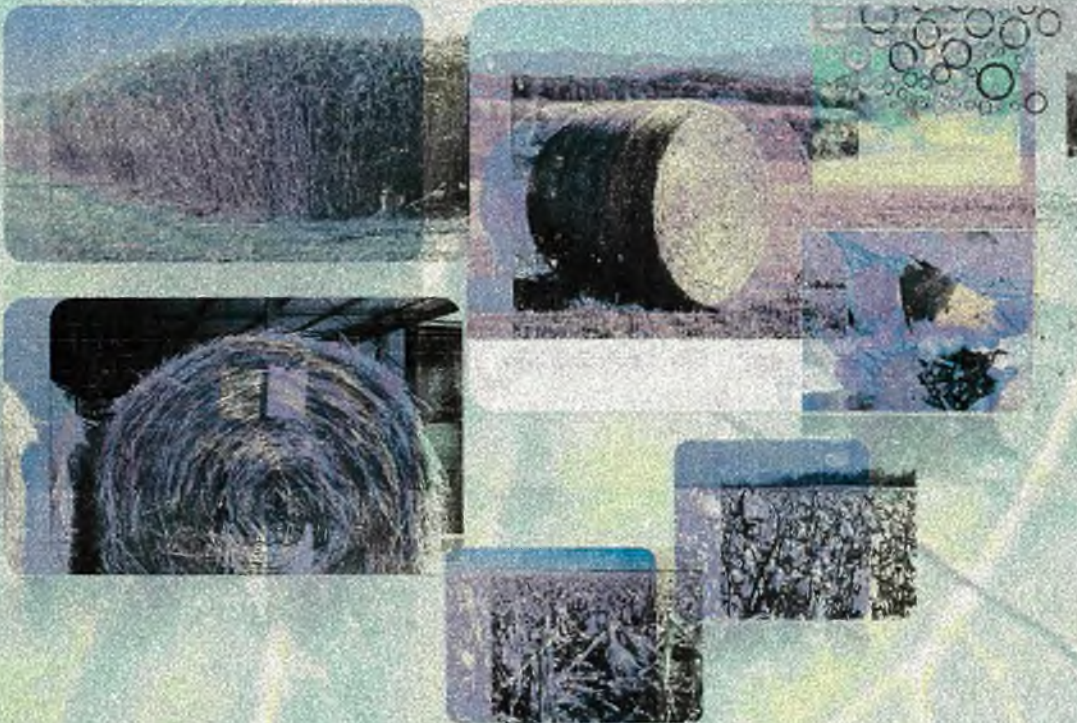


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΓΕΩΠΟΝΙΑ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

406
9-10-12

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΦΟΜΟΙΩΣΗΣ CO₂ ΑΠΟ ΦΥΤΑ ΜΕΓΑΛΗΣ
ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ



ΣΑΜΟΥΡΗΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ

ΒΟΛΟΣ 2012



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 11225/1
Ημερ. Εισ.: 17-12-2012
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιδετικός Κωδικός: ΠΤ – ΦΠΑΠ
2012
ΣΑΜ

ΤΡΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
& ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Αριθμ. Πρωτοκ. _____

Ημερομηνία _____

406
9-10-12

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΓΕΩΠΟΝΙΑ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΟΝΤΟΣ

Εργαστήριο Γεωργίας

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΑΦΟΜΟΙΩΣΗ CO₂ ΦΥΤΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟΝ
ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ

ΣΑΜΟΥΡΗΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ

ΒΟΛΟΣ 2012



Επιβλέπον καθηγητής

κ. Νικόλαος Δαναλάτος, Καθηγητής

Μέλη Επιτροπής

κ. Ιμπραχίμ Αβρααμ Χα, Καθηγητής

κ. Χρήστος Νάκας, Επικ. Καθηγητής

Ευχαριστίες

Πρώτους απ' όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπον αυτής της πτυχιακής διατριβής κ. Νικόλαο Δαναλάτο, Καθηγητή Γεωπονικής Σχολής (Τμήμα Φυτικής Παραγωγής) Βόλου, για την καθοδήγηση και την άμεση και ουσιαστική βοήθεια που μου παρείχε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της διατριβής. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Γκιντσιούδη Ι., υποψήφιο διδάκτορα του εργαστηρίου γεωργίας που με βοήθησε σημαντικά σε όλη την διάρκεια της πτυχιακής μου αφιερώνοντας μου αρκετό από τον χρόνο του και υποδεικνύοντας μου πολλές χρήσιμες πληροφορίες. Ιδιαίτερες ευχαριστίες αξίζουν και οι καθηγητές του τμήματος, κ. Ιμπραχίμ Αβραάμ Χα, κ. Χρήστος Νάκας, για τις πολύτιμες πληροφορίες πάνω στην συγγραφή αυτής της εργασίας. Τέλος θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς τους γονείς μου και τον αδερφό μου που ήταν δίπλα μου σε κάθε μου βήμα στηρίζοντας με όχι μόνο οικονομικά αλλά και ηθικά, αλλά και τους φίλους μου Τσαπερλή Α., Σταφυλά Δ., Μαντά Π., Μηλιώκα Γ., Κορώνη Χ., οι οποίοι με τον δικό τους ξεχωριστό τρόπο μου συμπαραστάθηκαν.

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	1
Περίληψη	3
1. Εισαγωγή.....	4
1.1 Φωτοσύνθεση	4
1.2 Κύρια στάδια Φωτοσύνθεσης.....	5
1.2.1 Φωτεινές αντιδράσεις της φωτοσύνθεσης.....	5
1.2.2 Σκοτεινές αντιδράσεις της φωτοσύνθεσης.....	8
1.2.3 Ο κύκλος C3 ή κύκλος του Calvin	9
1.2.4 Ο κύκλος C2.....	12
1.2.5 Ο κύκλος C4.....	13
1.2.6 Μεταβολισμός οξέων τύπου Crassulaceae (CAM).....	14
1.3 Η Επίδραση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στη φωτοσύνθεση.....	16
1.4 Επίδραση της συγκέντρωσης του CO ₂ στη φωτοσύνθεση.....	17
1.5 Επίδραση της θερμοκρασίας στη φωτοσύνθεση.....	18
1.6 Ο ρόλος του αζώτου στο μεταβολισμό των φυτών	18
2. Προσομοίωση.....	20
2.1 Ορισμός	20
2.2 Φάσεις της Προσομοίωσης	20
2.2.1 Οι προσομοιώσεις φαινομένων.....	21
2.2.2 Διαδραστικές προσομοιώσεις φαινομένων.....	21
2.3 Μοντέλα	22
2.3.1 Ορισμοί:.....	22
2.3.2 Ορισμός του συστήματος και ιδιότητες συστημάτων	22
2.3.4 Λόγοι κατασκευής μοντέλου.....	25
2.3.5 Τύποι Μοντέλων	28
2.3.6 Δημιουργία μοντέλων προσομοίωσης.....	30
2.3.7 Μοντέλα προσομοίωσης.....	30
2.3.8 Κατασκευή μοντέλων προσομοίωσης.....	31
2.3.9 Κριτήρια καλού Μοντέλου	32
3. Υλικά και μέθοδοι.....	33
3.1 Λογισμικό	33
3.1.1 Visual Basic.net (VB).....	34

3.1.2 .Χαρακτηριστικά της Γλώσσας [Επεξεργασία]	34
3.1.3 .Net Framework.....	36
3.2 Υλικά μέσα Η/Υ.....	39
3.3 Μοντέλο	40
3.3.1 Ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα	40
3.3.2 Διάχυτη και άμεση ακτινοβολία.	41
3.3.3 Φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία.....	42
3.3.4 Ακτινοβολία μέσα στη φυλλοστοιβάδα.....	42
3.3.5 Φωτοσύνθεση ενός φύλλου.	44
3.3.6 Αφομοίωση φυλλοστοιβάδας.....	45
3.3.7 Ημερήσια αφομοίωση.....	46
3.4 Προγραμματισμός μοντέλου στην Visual Basic.	47
Λογικό διάγραμμα μοντέλου	48
Είσοδοι και Έξοδοι Ρουτινών	48
3.5 Περιβάλλον εργασίας μοντέλου – Εφαρμογή Η/Υ.....	49
3.5.1 Είσοδοι - Έξοδοι Μοντέλου	49
3.5.2 Ημερήσια αφομοίωση.....	50
3.5.3 Μηνιαία αφομοίωση.....	52
3.5.4 Αποτελέσματα – Γραφήματα	54
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΧΕΙΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	56
Παράρτημα.....	58
Βιβλιογραφία	62

Περίληψη

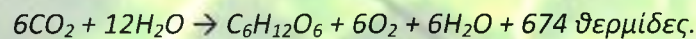
Στην πτυχιακή διατριβή αυτή παρουσιάζεται ένα δυναμικό μοντέλο προσομοίωσης της ημερήσιας αφομοίωσης διοξειδίου του άνθρακα για κλειστές φυλλοστοιβάδες φυτών μεγάλης καλλιέργειας στην Ελλάδα. Αρχικά περιγράφεται ο μηχανισμός της φωτοσύνθεσης καθώς και τα κύρια στάδιά της. Πραγματοποιείται ανάλυση της προσομοίωσης και της χρησιμότητας της, επεξήγηση του μοντέλου και παρουσίαση της εφαρμογής Η/Υ που κατασκευάστηκε σε γλώσσα Visual Basic.Net για τη λειτουργία του. Στο μοντέλο αυτό, λαμβάνεται υπόψη ότι τα φυτά βρίσκονται σε άριστη κατάσταση, καθώς βρίσκονται υπό αφθονία νερού και θρεπτικών στοιχείων χωρίς προσβολές από ασθένειες και έντομα. Το μοντέλο προσομοίωσης είναι βασισμένο σε θεωρίες οι οποίες προέκυψαν ως αποτέλεσμα διεξαγωγής/εκτέλεσης πολλών πειραμάτων και μπορεί να ενσωματωθεί όχι μόνο σε ολοκληρωμένα μοντέλα ανάπτυξης εφαρμογών αλλά και να λειτουργήσει-χρησιμοποιηθεί ως αυτόνομος οδηγός για πιο σύνθετα μοντέλα. Σαν εισόδους το μοντέλο αυτό χρειάζεται το γεωγραφικό πλάτος (LAT), την Ιουλιανή ημέρα του έτους (DAY) και τη διάρκεια ηλιοφάνειας (SD). Τέλος παρουσιάζεται η χρήση της εφαρμογής καθώς και δύο παραδείγματα στηριζόμενα σ' αυτή.

1. Εισαγωγή

1.1 Φωτοσύνθεση

Η φωτοσύνθεση είναι μια σημαντική και ιδιαίτερα πολύπλοκη βιολογική διεργασία μέσω της οποίας οι φωτοσυνθετικοί οργανισμοί χρησιμοποιώντας φωτεινή ενέργεια, διοξείδιο του άνθρακα και νερό, παράγουν τα απαραίτητα για τη θρέψη τους συστατικά. Τα χλωροφυλλούχα φυτά έχουν την ικανότητα να μετατρέπουν το διοξείδιο του άνθρακα και το νερό σε οργανικές ουσίες, όπως γλυκόζη, απαραίτητες για την ανάπτυξη και τη συντήρησή τους. Η φωτοσυνθετική αυτή διεργασία γίνεται με την ενέργεια του ηλιακού φωτός στους χλωροπλάστες των κυττάρων.

Η χημική αντίδραση της φωτοσύνθεσης, λεγόμενη και αντίδραση φωτοσύνθεσης είναι:



Η παραπάνω αντίδραση μπορεί ασφαλώς να απλοποιηθεί από χημικής πλευράς. Από βιοχημικής όμως αυτό δεν είναι ορθό, επειδή η απλοποιημένη αντίδραση θα έδειχνε ότι το ελεύθερο οξυγόνο θα προερχόταν εξ ημισείας από το CO_2 και το H_2O ενώ, όπως θα δούμε, το οξυγόνο προέρχεται αποκλειστικά από την φωτόλυση του H_2O .

Στην πραγματικότητα η φωτοσύνθεση γίνεται σε στάδια και με μια σειρά πολύπλοκων χημικών αντιδράσεων, που αναλύονται στις επόμενες παραγράφους.

Συνοπτικά ο μηχανισμός της φωτοσύνθεσης περιγράφεται από τις παρακάτω διεργασίες:

- ☞ Το νερό διαλύει και μεταφέρει το διοξείδιο του άνθρακα μέχρι τα κύτταρα και τους χλωροπλάστες των φύλλων.
- ☞ Εκεί με την ενέργεια του φωτός ($h\nu$) που απορροφά η χλωροφύλλη, διασπάται το νερό (φωτόλυση) στα στοιχεία του: $\text{H}_2\text{O} \xrightarrow{h\nu} [\text{H}] + 1/2 \text{O}_2$. Το οξυγόνο απελευθερώνεται, ενώ το ατομικό υδρογόνο δεσμεύεται από διάφορα ένζυμα.

➤ Έπειτα το υδρογόνο οδηγείται στις αντιδράσεις με το διοξείδιο του άνθρακα: $\text{CO}_2 + [\text{H}] \rightarrow (\text{CH}_2\text{O})_x$.

➤ Στο δεύτερο στάδιο αντιδράσεων δε χρειάζεται ηλιακή ενέργεια, γι' αυτό οι αντιδράσεις αυτές ονομάζονται "σκοτεινές". Το άμυλο είναι μια από τις πρώτες ενώσεις που σχηματίζονται. Αυτό μεταφέρεται σ' άλλες θέσεις του φυτού κατά τη νύχτα, όταν σταματά το φαινόμενο της φωτοσύνθεσης.

Εκτός από τα ανώτερα πράσινα φυτά, υπάρχουν άλλα κατώτερα χωρίς χλωροφύλλη, που διασπούν το διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας και συνθέτουν οργανικές ουσίες. Οι λειτουργίες τους αυτές ονομάζονται **χημειοσύνθεση** και **φωτοχημειοσύνθεση**. Τέτοια φυτά είναι μερικά βακτήρια (σίδηρο- βακτήρια, θειο-βακτήρια κ.λπ.).

1.2 Κύρια στάδια Φωτοσύνθεσης

1.2.1 Φωτεινές αντιδράσεις της φωτοσύνθεσης

Οι φωτεινές αντιδράσεις της φωτοσύνθεσης πραγματοποιούνται στα θυλακοειδή των grana και στα θυλακοειδή του στρώματος των χλωροπλαστών. Πρόκειται για δομές που αποτελούνται από επάλληλες σειρές θυλακοειδών μεμβρανών, που περιέχουν φωτοσυνθετικές χρωστικές. Οι χρωστικές αυτές δημιουργούν σύμπλοκα με πρωτεΐνες και οργανώνονται σε μια μακρομοριακή δομή, το φωτοσυλλεκτικό μηχανισμό ή αντένα φωτοσυλλογής. Για την ολοκλήρωση των φωτεινών αντιδράσεων λειτουργούν και συνεργάζονται μεταξύ τους δύο φωτοσυστήματα, το φωτοσύστημα I και το φωτοσύστημα II. Κάθε φωτοσύστημα διαθέτει ένα φωτοχημικό κέντρο αντίδρασης το οποίο συνεργάζεται με τον αντίστοιχο φωτοσυλλεκτικό μηχανισμό.

Οι φωτεινές αντιδράσεις περιλαμβάνουν την απορρόφηση φωτονίων από τα μόρια των χρωστικών που βρίσκονται στο φωτοσυλλεκτικό μηχανισμό. Το quantum ενέργειας που απορροφάται από τις χρωστικές μεταφέρεται σε ένα ειδικό μόριο χλωροφύλλης a, το οποίο εντοπίζεται στο φωτοχημικό κέντρο αντίδρασης του

φωτοσυστήματος II (PSII). Αυτό προκαλεί διέγερση των ηλεκτρονίων στο μόριο της χλωροφύλλης *a* και τελικώς διαχωρισμό φορτίου (δηλ. απόσπαση ηλεκτρονίων από το μόριο της χρωστικής). Τα ηλεκτρόνια που αποσπώνται από τη Chl*a*, μεταφέρονται από το φωτοσύστημα II (PSII) στο φωτοσύστημα I (PSI) μέσω ενδιάμεσων φορέων, όπως το σύμπλοκο κυτοχρωμάτων *bf6* (cyt *bf6*). Για κάθε φωτόνιο που απορροφάται, μετακινείται ένα ηλεκτρόνιο. Τα ηλεκτρόνια μεταφέρονται μέσω οξειδοαναγωγικών ζευγών αποτελούμενων από αναγωγικούς παράγοντες (δότες ηλεκτρονίων) και οξειδωτικούς παράγοντες (δέκτες ηλεκτρονίων).

Το φωτοχημικό κέντρο αντίδρασης του PS I διαθέτει ένα ειδικό μόριο χλωροφύλλης *a*, το οποίο παρουσιάζει μέγιστο απορρόφησης στην κόκκινη περιοχή του φάσματος, στα 700nm. Για το λόγο αυτό, το φωτοχημικό κέντρο αντίδρασης του PSI αναφέρεται ως P700. Αντίστοιχα, το φωτοχημικό κέντρο του PSII αναφέρεται ως P680 καθώς διαθέτει ένα ειδικό μόριο χλωροφύλλης *a*, το οποίο παρουσιάζει μέγιστο απορρόφησης στα 680nm. Το ηλεκτρόνιο που αποσπάται από το μόριο της χλωροφύλλης *a* του PSII αντικαθίσταται από ένα άλλο ηλεκτρόνιο, το οποίο παρέχεται από το νερό.

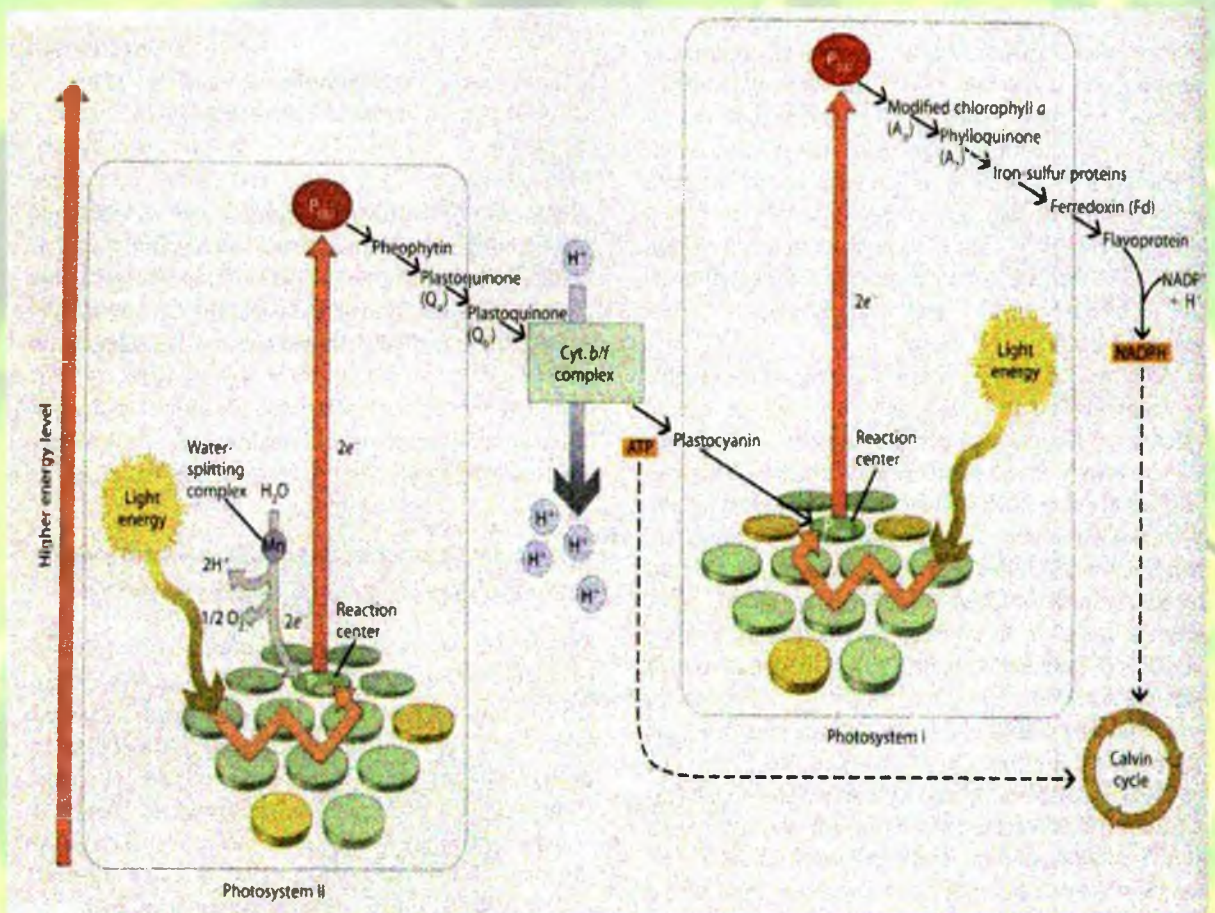
Η διάσπαση του νερού καταλήγει στην απελευθέρωση μοριακού οξυγόνου και συμβάλει στην διαμόρφωση συγκέντρωσης πρωτονίων μεταξύ στρώματος και lumen των θυλακοειδών. Στο PSI, η απορρόφηση του φωτός προκαλεί διέγερση και μεταφορά ηλεκτρονίων προς έναν ενδιάμεσο φορέα, τη φερρεδοξίνη, και κατόπιν τη ρεδουκτάση του NADP⁺, το ένζυμο το οποίο είναι υπεύθυνο για τη σύνθεση του NADPH. Το ηλεκτρόνιο που αποσπάστηκε από το φωτοχημικό κέντρο αντίδρασης του PSI αναπληρώνεται από ένα άλλο ηλεκτρόνιο, το οποίο παρέχεται από το PSII. Η φωτοχημική αλυσίδα αναφέρεται ως μεταφορά ηλεκτρονίων με τη βοήθεια ενδιάμεσων φορέων με δότη το νερό και τελικό δέκτη το NADP μέσω των PSII, PSI.

Συνοψίζοντας, η απορρόφηση φωτεινής ενέργειας και η μεταφορά ηλεκτρονίων προς το NADP⁺ έχει δύο σημαντικές επιπτώσεις: Μόρια νερού διασπώνται μέσω της διαδικασίας της φωτόλυσης, απελευθερώνοντας ηλεκτρόνια, H⁺ στα lumen των θυλακοειδών και οξυγόνο, και παράγεται NADPH. Το οξυγόνο απελευθερώνεται

από το φύλλο στην ατμόσφαιρα ως παραπροϊόν και χρησιμοποιείται από αερόβιους οργανισμούς για αναπνοή.

Η διαφορά στη συγκέντρωση πρωτονίων, η οποία δημιουργείται κατά τη μεταφορά ηλεκτρονίων, προκαλεί τη σύνθεση ATP από την συνθάση του ATP . Συνεπώς η ενέργεια η οποία απορροφάται από το φως του ήλιου αποθηκεύεται τελικά στο NADPH (ως αναγωγική δύναμη) και στο μόριο του ATP, μέσω της διαδικασίας της φωτοφωσφορλίωσης.

Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία ATP και NADPH , τα οποία παρέχουν στο φυτό την ενέργεια που είναι απαραίτητη για τις βιοχημικές του αντιδράσεις (Bjorkman and Demmig, 1987; Lawlor, 2001; Ridge, 2002; Northington and Schneider, 1996; Schulze and Cadwell, 1995).



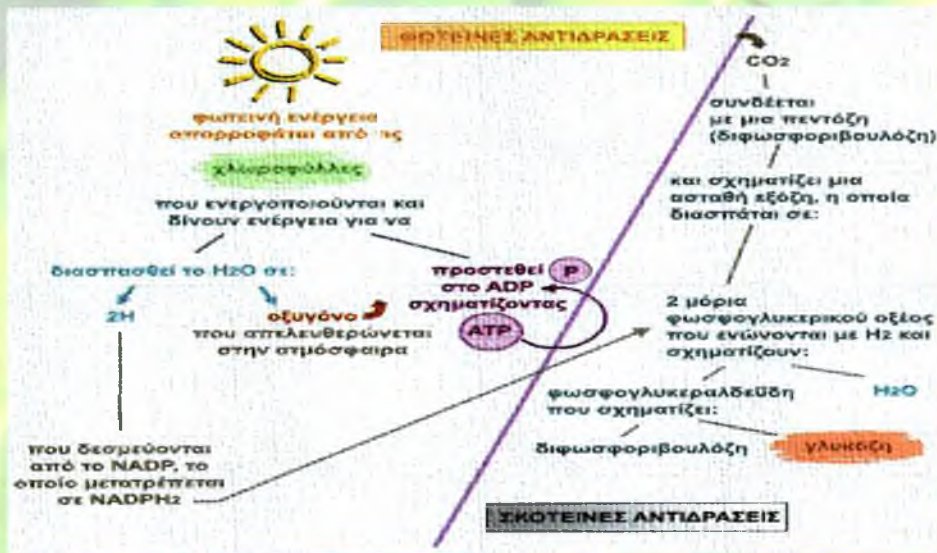
Σχεδιάγραμμα 1. Φωτεινές Αντιδράσεις

1.2.2 Σκοτεινές αντιδράσεις της φωτοσύνθεσης:

Ο χαρακτηρισμός «σκοτεινές αντιδράσεις» δικαιολογείται από το γεγονός ότι η ολοκλήρωσή τους δεν εξαρτάται άμεσα από τη φωτεινή ενέργεια. Συνεπώς οι αντιδράσεις αυτές μπορούν να πραγματοποιηθούν και να ολοκληρωθούν και στο σκοτάδι υπό την προϋπόθεση ότι είναι διαθέσιμα τα ATP και NADPH (Εικόνα 1). Για το λόγο αυτό ονομάζονται και φωτοανεξάρτητες αντιδράσεις, καθώς η φωτεινή ενέργεια δεν είναι απαραίτητη σε όλες τις φάσεις της διαδικασίας (Northington and Schneider, 1996).

Μέχρι σήμερα έχει διαπιστωθεί ότι υπάρχουν τέσσερις κύριες βιοχημικές παραλλαγές των σκοτεινών αντιδράσεων της φωτοσύνθεσης (Taiz and Zeiger, 2006):

- 1) Ο C3 κύκλος ή κύκλος του Calvin (Εικόνα 2)
- 2) Η C2 οδός (φωτοαναπνοή)
- 3) Η C4 οδός ή κύκλος Hatch και Slack
- 4) Ο μεταβολισμός οξέων τύπου Crassulaceae (CAM)



Εικόνα1. Απλοποιημένη σχηματική απεικόνιση των φωτεινών και σκοτεινών αντιδράσεων της φωτοσύνθεσης. ATP (τριφωσφορική αδενοσίνη): νουκλεοτίδιο που αποτελείται από αδενίνη, ριβόζη και τρεις φωσφορικές ομάδες, P: φωσφορική ομάδα, NADP (νικοτιναμινο-αδενο-δινουκλεοτίδιο φωσφορικό): συνένζυμο, δέκτης υδρογόνων

1.2.3 Ο κύκλος C3 ή κύκλος του Calvin

Η αφομοίωση του άνθρακα θεωρείται η πιο σημαντική μεταβολική δραστηριότητα των αυτότροφων οργανισμών, διότι μετατρέπει τον ανόργανο άνθρακα σε οργανικές ενώσεις μέσω μιας σειράς από αντιδράσεις, γνωστές ως κύκλος C3 (καθώς το πρώτο προϊόν, το PGA, περιέχει τρεις άνθρακες), ή κύκλος του Calvin (προς τιμή του επιστήμονα που τον ανακάλυψε, Εικόνα 2). Οι αντιδράσεις αυτές πραγματοποιούνται στο στρώμα των χλωροπλαστών. Το CO₂ εισέρχεται στον κύκλο μέσω καρβοξυλίωσης της διφωσφορικής ριβουλόζης (RuBP), ενός μορίου – δέκτη του CO₂.

Η αντίδραση καταλύεται από την RubisCO και έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία δύο μορίων 3-φωσφογλυκερικού οξέος (3-PGA). Στη συνέχεια το PGA ανάγεται προς φωσφορικές τριόζες (3C σάκχαρο). Μέσω της διαδικασίας αυτής το φυτό καταφέρνει να ανάγει ένα μόριο CO₂ και να προσθέσει μια καρβοξυλική μονάδα σε ένα 5C σάκχαρο προς σχηματισμό δύο μορίων 3C σακχάρων.

Κατά την πορεία του κύκλου οι τριόζες που παράγονται μπορεί να μετατρέπονται σε άλλους υδατάνθρακες, όπως π.χ. άμυλο. Ένα μέρος των τριοζών χρησιμοποιείται για την αναγέννηση του μορίου-δέκτη, της RuBP. Δημιουργείται λοιπόν ένας βιοχημικός κύκλος η λειτουργία του οποίου έχει ως αποτέλεσμα να αφομοιώνεται CO₂ της ατμόσφαιρας, να παράγονται ως κέρδος μόρια υδατανθράκων και να αναγεννάτε ο δέκτης (Huffaker and Miller, 1978; Ridge, 2002; Rost et al., 1998).

Για να ολοκληρωθεί ο κύκλος απαιτούνται μεγάλα ποσά ενέργειας, τα οποία παρέχονται από το ATP και το NADPH. Το ATP απαιτείται σε δύο φάσεις του κύκλου: κατά τη μετατροπή του 3-PGA προς φωσφορικές τριόζες, και κατά την αναγέννηση της RuBP. Οι φωτεινές και οι σκοτεινές αντιδράσεις της φωτοσύνθεσης συνδέονται λοιπόν μεταξύ τους: Το φως είναι απαραίτητο για το σχηματισμό του ATP και του NADPH, τα οποία καταναλώνονται κατά τις σκοτεινές αντιδράσεις.

Η RubisCO παίζει σημαντικό ρόλο στον κύκλο C3 . Θεωρείται θεμελιώδες ένζυμο, καθώς συμμετέχει στην πρώτη αντίδραση του κύκλου του Calvin, την αφομοίωση του CO₂. Είναι η αφθονότερη πρωτεΐνη στη βιόσφαιρα, η δε συγκέντρωσή της στα φύλλα

ανέρχεται ακόμη και στο 50% της ολικής πρωτεΐνης. Εμφανίζει δράση καρβοξυλάσης αλλά και οξυγονάσης διότι το ενεργό κέντρο του ενζύμου μπορεί να χρησιμοποιήσει ως υποστρώματα τόσο το CO₂ όσο και το O₂ .

Υπό κανονικές συνθήκες η δράση της ως οξυγενάσης μπορεί να μειώσει τη δράση της ως καρβοξυλάσης έως και 30%. Το μόριο της RubisCO είναι υψηλού M.B. στα ανώτερα φυτά κωδικοποιείται από γονίδια τόσο του χλωροπλάστη, όσο και του πυρήνα. Αποτελείται από 8 μεγάλες και 8 μικρές υπομονάδες, απαιτείται δε η παρουσία ενός chaperone (συνοδού πρωτεΐνης) προκειμένου να σχηματιστεί το ολοένζυμο με τη συνένωση όλων των υπομονάδων μέσα στο χλωροπλάστη (Ridge, 2002).

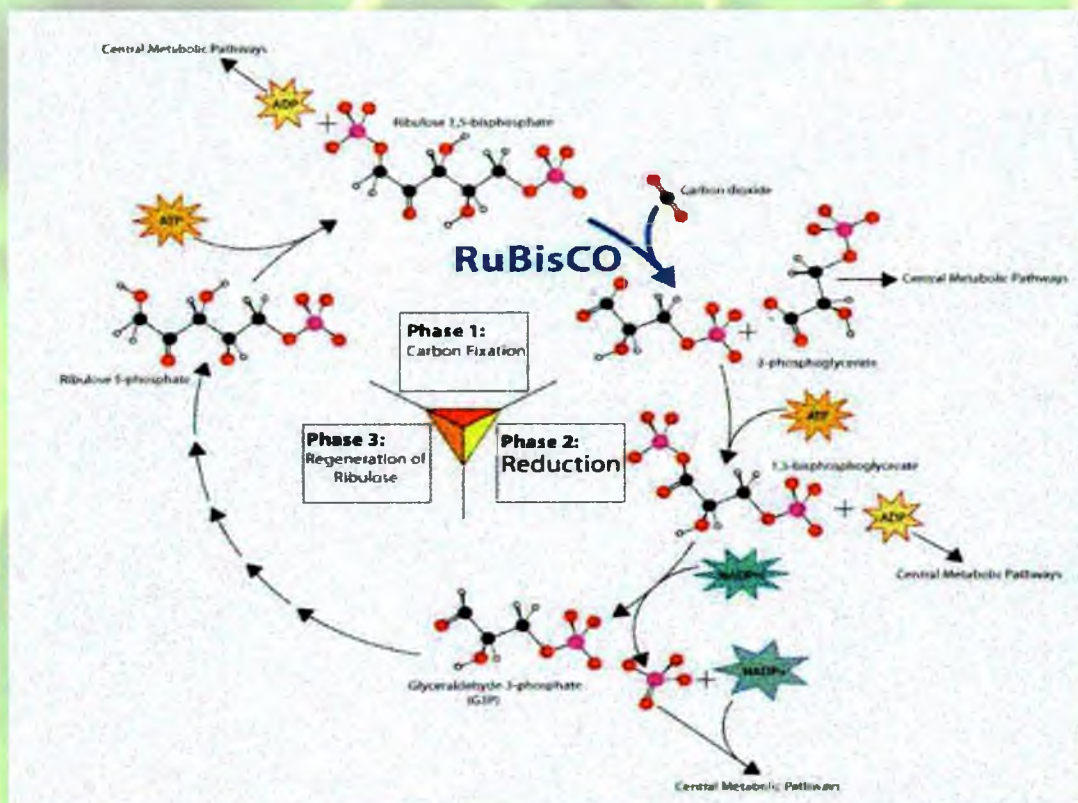
Κατά τη διάρκεια λειτουργίας του κύκλου του Calvin παράγονται υδατάνθρακες τριών ατόμων άνθρακα οι οποίες αποτελούν πρόδρομα μόρια για την βιοσύνθεση σημαντικών υδατανθράκων όπως η σακχαρόζη και το άμυλο. Η σακχαρόζη αποτελεί τον βασικό υδατάνθρακα ο οποίος μπορεί να μεταφέρεται μέσω του ηθμού σε ολόκληρο το φυτό. Το άμυλο είναι ένα δυσδιάλυτο υδατανθρακικό πολυμερές, το οποίο απαντάται σε όλα σχεδόν τα φυτά. Συντίθεται στους χλωροπλάστες, ενώ η σακχαρόζη στο κυτταρόπλασμα.

Η όλη πορεία αφομοίωσης του άνθρακα προϋποθέτει την ύπαρξη ρυθμιστικών μηχανισμών σε διαφορετικά στάδια της διαδικασίας έτσι ώστε να υπάρξει συντονισμός μεταξύ των φωτεινών αντιδράσεων και του κύκλου C3. Προκειμένου να επιταχυνθεί ο κύκλος C3 , όταν επικρατούν συνθήκες αυξημένης φωτεινής ακτινοβολίας, ή για την έναρξη της λειτουργίας του κατά την ανατολή, απαιτούνται υψηλές συγκεντρώσεις ενεργών ενζύμων και ενδιάμεσων μεταβολιτών.

Ο περιοριστικός παράγοντας για τη λειτουργία του κύκλου C3 σε συνθήκες σκίασης είναι η ένταση της φωτεινής ακτινοβολίας, ωστόσο σε συνθήκες άπλετου φωτισμού οι περιοριστικοί παράγοντες είναι το διοξείδιο του άνθρακα και η δραστηριότητα των επί μέρους ενζύμων. Τα φυτά που αναπτύσσονται σε άπλετο φως παρουσιάζουν υψηλότερες ταχύτητες του C3 κύκλου και υψηλότερες συγκεντρώσεις των απαραίτητων για τον κύκλο ενζύμων από ότι τα φυτά που αναπτύσσονται υπό σκιά.

Η δραστηριότητα της RubisCO αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα ρύθμισης και λειτουργίας του κύκλου του Calvin. Το ένζυμο επηρεάζεται από τις επί μέρους συγκεντρώσεις CO_2 και O_2 , τη θερμοκρασία αλλά και την ύπαρξη φωτισμού. Η RubisCO αποτελεί φωτοεπαγόμενο ένζυμο δηλ. απενεργοποιείται στο σκοτάδι και ενεργοποιείται στο φως. Στην ενεργοποίηση του μηχανισμού συμμετέχει μια πρωτεΐνη χαμηλού MB, η ακτιβάση της RubisCO. Οι συγκεντρώσεις του CO_2 και του O_2 επηρεάζουν τη σχετική δραστηριότητα της RubisCO ως καρβοξυλάσης και ως οξυγενάσης.

Σε υψηλές θερμοκρασίες η RubisCO παρουσιάζει περιορισμένη δραστηριότητα καρβοξυλάσης και αυξημένη οξυγονάσης λόγω της μειωμένης διαλυτότητας του CO_2 σε σχέση με αυτήν του O_2 αλλά και γιατί η RubisCO παρουσιάζει μειωμένη συγγένεια προς το CO_2 σε σύγκριση με το O_2 . Η υπερθέρμανση του πλανήτη έχει σημαντικές επιπτώσεις στη δραστηριότητα της RubisCO. Υψηλές συγκεντρώσεις CO_2 ευνοούν την καρβοξυλίωση και τη δέσμευση του άνθρακα, ενώ οι υψηλές θερμοκρασίες όχι. (Bjorkman, 1981; Ridge, 2002).



Εικόνα 2. Κύκλος Calvin

1.2.4 Ο κύκλος C2

Η φωτοαναπνοή αποτελεί μια φωτο-εξαρτώμενη αντίδραση, η οποία πραγματοποιείται κατά την οξυγόνωση της RuBP από τη RubisCO. Αναφέρεται και ως κύκλος C₂ ή οξειδωτικός φωτοσυνθετικός κύκλος του άνθρακα. Περιλαμβάνει την απορρόφηση O₂, τη απελευθέρωση CO₂ και την μερική ανάκτηση του άνθρακα, ο οποίος χάνεται κατά την φωτοαναπνοή.

Επομένως από πλευράς ανταλλαγής αερίων ο κύκλος C₂ παρουσιάζει ομοιότητες με τη διαδικασία της κυτταρικής αναπνοής. Ένα μόριο οξυγόνου αντιδρά με το αρχικό μόριο-δέκτη του κύκλου του Calvin RuBP, προς σχηματισμό 2-φωσφογλυκολικού and 3-φωσφογλυκερινικού οξέος. Το 2-φωσφογλυκολικό που σχηματίζεται με οξυγόνωση στους χλωροπλάστες, υπόκειται σε μια σειρά από αντιδράσεις στα υπεροξεισώματα αλλά και στα μιτοχόνδρια, μεταξύ των οποίων μια NADPH-εξαρτώμενη οξείδωση και μια φωσφορυλίωση από το ATP.

Μετά τη φωσφορυλίωση, το παραγόμενο 3-PGA εισέρχεται στους χλωροπλάστες και παίρνει μέρος στο C₃ κύκλο. Κατά τη διαδικασία αυτή δεν απελευθερώνεται ενέργεια. Αντίθετα, καταναλώνεται ATP. Τα δύο μόρια φωσφογλυκολικού (4-C), τα οποία προκύπτουν κατά την οξυγόνωση της RuBP, μετατρέπονται σε ένα μόριο 3-PGA (3-C) και ένα μόριο CO₂ (1-C). Σε συνήθεις συγκεντρώσεις O₂ και CO₂ του ατμοσφαιρικού αέρα, η οξυγόνωση της RubisCO μειώνει την δέσμευση του καθαρού άνθρακα κατά 25-50%.

Παρά το γεγονός ότι ο C₂ κύκλος εμφανίζεται ως μια σπάταλη διαδικασία κατανάλωσης ATP και απώλειας άνθρακα, φαίνεται ότι αποτελεί ένα μηχανισμό ασφαλείας σε περιπτώσεις υπερσυσσώρευσης ενέργειας. Προστατεύει το φυτό από φαινόμενα φωτοπαρεμπόδισης, ιδιαίτερα σε συνθήκες έντονης ηλιοφάνειας, υψηλών θερμοκρασιών και χαμηλής συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα (Ridge, 2002; Taiz and Zeiger, 2006).

1.2.5 Ο κύκλος C4

Η σχέση δομής – λειτουργίας είναι ζωτικής σημασίας στα C4 φυτά, διότι στις περισσότερες περιπτώσεις τα βιοχημικά στάδια αφομοίωσης CO₂ είναι τοπικά διαχωρισμένα. Τα περισσότερα C4 φυτά χαρακτηρίζονται από μια ιδιαίτερη ανατομία φύλλων (ανατομία τύπου Kranz). Τα κύτταρα του κολεού της δέσμης, τα οποία περιβάλλουν τις ηθμαγγειώδεις δεσμίδες, διαθέτουν παχύτερα κυτταρικά τοιχώματα, συνήθως με εναπόθεση φελλίνης και περιέχουν περισσότερους και μεγαλύτερους χλωροπλάστες σε σύγκριση με τα κύτταρα του μεσόφυλλου. Στα περισσότερα είδη της ομάδας αυτής οι χλωροπλάστες των κυττάρων του κολεού περιέχουν σχετικά λιγότερα grana, γεγονός το οποίο καθιστά το PSII λιγότερο αποτελεσματικό (Ridge, 2002).

Στα C4 φυτά η καρβοξυλίωση πραγματοποιείται σε δύο τοπικά διαχωρισμένα στάδια. Το CO₂ εισέρχεται μέσω των στομάτων στο μεσόφυλλο και μετατρέπεται αμέσως σε ανθρακικό οξύ από το ένζυμο αφυδατάση των ανθρακικών. Στη συνέχεια αντιδρά με μια 3-C ένωση, το φωσφοενολοπυροσταφυλικό (PEP), προς σχηματισμό μιας 4-C ένωσης, του οξαλοξικού οξέος (OAA) (Ridge, 2002).

Η καρβοξυλίωση καταλύεται από την καρβοξυλάση του φωσφοενολοπυροσταφυλικού. Το OAA ανάγεται προς μηλικό ή ασπαραγινικό οξύ (δύο 4-C οξέα), ανάλογα με το φυτικό είδος. Το 4-C οξύ μεταφέρεται μέσω των πλασμοδεσμών στα κύτταρα του κολεού. Αυτό είναι το πρώτο στάδιο μεταφοράς.

Στον κολεό πραγματοποιείται αποκαρβοξυλίωση του οξέος και το CO₂ επαναδεσμεύεται από τη RubisCO στον C3 κύκλο, ενώ το 4-C οξύ μετατρέπεται σε ένα 3-C οξύ. Κατά το δεύτερο στάδιο μεταφοράς, το 3-C οξύ μεταφέρεται στο μεσόφυλλο, και αναγεννάται το PEP. Τα C4 φυτά χρειάζονται περισσότερη ενέργεια για την ενσωμάτωση ενός μορίου CO₂ σε έναν υδατάνθρακα (5ATP + 2NADPH). Τα C4 φυτά αποτελούν μόλις το 1% των γνωστών αγγειόσπερμων.

Τα περισσότερα είναι πόες και ζιζάνια των τροπικών και υποτροπικών περιοχών, ενώ ορισμένα εξ αυτών αποτελούν σημαντικά καλλιεργούμενα φυτά όπως το καλαμπόκι και το σακχαροκάλαμο. Παρά την πρόσθετη δαπάνη ενέργειας, τα C4 φυτά λειτουργούν αποδοτικότερα έναντι των αντίστοιχων C3 διότι περιορίζουν

αποτελεσματικά τη λειτουργία της φωτοαναπνοής. Ο πρόσθετος μηχανισμός τον οποίο διαθέτουν τα C4 είδη, τα βοηθά να επιβιώνουν σε ζεστά, με μεγάλη ηλιοφάνεια ενδαιτήματα, στα οποία η διαθεσιμότητα του νερού είναι περιορισμένη. Η υψηλή συγγένεια της καρβοξυλάσης των PEP για το CO₂ επιτρέπει στα φυτά αυτά να λειτουργούν αποδοτικά έστω και με μισόκλειστα στομάτια, περιορίζοντας τις απώλειες νερού.

Παρόλα αυτά, τα C4 είδη επιτυγχάνουν αξιόλογες φωτοσυνθετικές ταχύτητες, ενώ η ταχύτητα διαπνοής τους παρουσιάζει εντυπωσιακές διαφορές σε σχέση με αυτή των C3 ειδών.

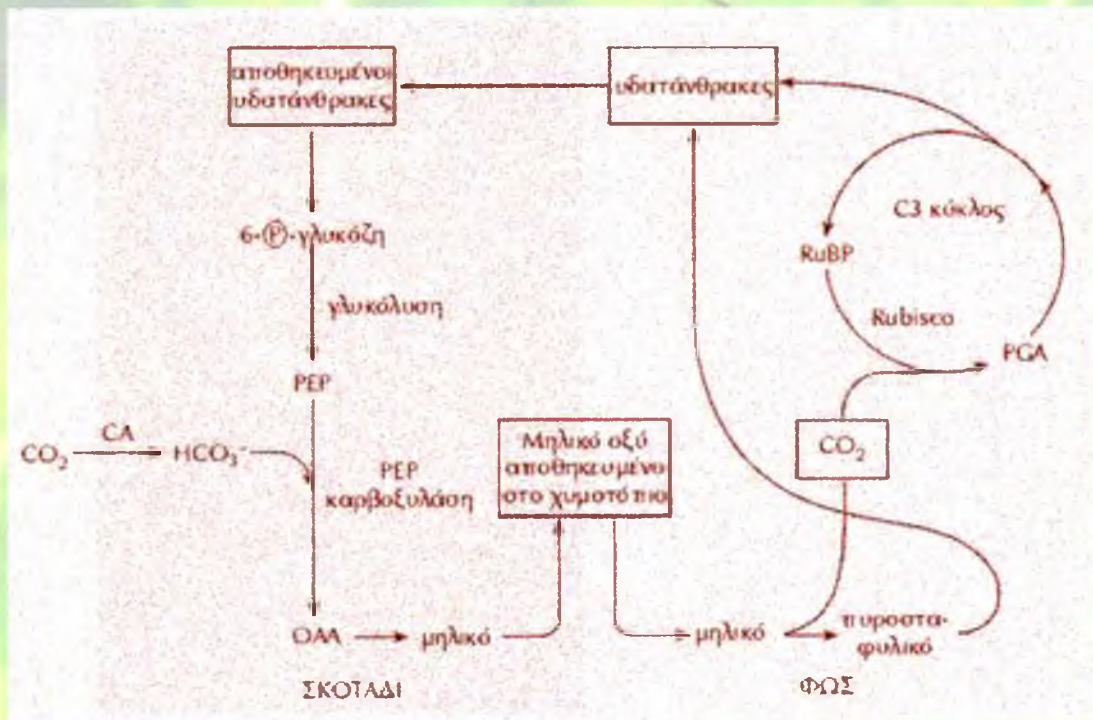
1.2.6 Μεταβολισμός οξέων τύπου Crassulaceae (CAM)

Ο μηχανισμός τύπου CAM απαντάται σε παχύφυτα, φυτά με σαρκώδη φύλλα και βλαστούς, όπως ο κάκτοι. Ο μηχανισμός στα φυτά αυτά παρουσιάζει ομοιότητες με αυτόν των C4 φυτών, οι δύο καρβοξυλιώσεις όμως είναι χρονικά και όχι τοπικά διαχωρισμένες. Το CO₂ εισέρχεται στα φύλλα κατά τη διάρκεια της νύχτας, όταν τα στόματα είναι ανοιχτά και δεσμεύεται και πάλι από την καρβοξυλάση του PEP προς σχηματισμό μηλικού οξέος. Αυτή η C4 ένωση αποθηκεύεται στα χυμοτόπια κατά τη διάρκεια της νύχτας. Η έντονη συσσώρευση μηλικού ευθύνεται για την έντονα όξινη γεύση των φύλλων των φυτών CAM κατά τη διάρκεια της νύχτας, η οποία εξαφανίζεται το πρωί. Το μηλικό οξύ απελευθερώνεται στο κυτταρόπλασμα κατά τη διάρκεια της ημέρας, όπου και αποκαρβοξυλιώνεται. Το παραγόμενο CO₂ δεσμεύεται από τη RubisCO και εισέρχεται στον κύκλο C3. Τα στόματα παραμένουν κλειστά την ημέρα. Τα φυτά αυτά διαθέτουν σκληρή εφυμενίδα, η οποία συμβάλλει στην ελαχιστοποίηση των απωλειών νερού ή CO₂ από τα φύλλα. Πρόκειται για έναν πολύ αποτελεσματικό μηχανισμό αφομοίωσης CO₂ σε συνθήκες έντονης έλλειψης νερού. Σε ορισμένα φυτά CAM ο μηχανισμός αφομοίωσης CO₂ είναι αρκετά ευέλικτος καθώς μπορεί, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα του νερού και τη θερμοκρασία, να λειτουργεί είτε ως CAM είτε ως C3.

Στα φυτά τύπου CAM, το πυροσταφυλικό που παράγεται στο φως χρησιμοποιείται στη σύνθεση υδατανθράκων, οι οποίοι αποθηκεύονται και κατά τη

διάρκεια της νύχτας υδρολύονται ώστε να παραχθεί PEP, το μόριο δέκτης των CO₂. Συνεπώς η συγκέντρωση των αποθηκευμένων υδατανθράκων αυξάνεται την ημέρα και μειώνεται τη νύχτα, ανάλογα με τη συγκέντρωση του μηλικού οξέος. Η μεταφορά του μηλικού οξέος από το κυτταρόπλασμα προς τα χυμοτόπια απαιτεί ενέργεια και πραγματοποιείται μέσω ενός ενεργού μεταφορέα, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με μια αντλία πρωτονίων.

Ο μηχανισμός των CAM φυτών είναι επομένως περισσότερο «ακριβός» ενεργειακά σε σχέση με τον κύκλο C₄. Η ποσότητα του μηλικού οξέος που μπορεί να αποθηκευτεί αποτελεί τον περιοριστικό παράγοντα για την λειτουργία της φωτοσύνθεσης. Για τον λόγο αυτό τα φυτά CAM παρουσιάζουν χαμηλούς ρυθμούς ανάπτυξης. Ωστόσο εκμεταλλεύονται στο έπακρο τα λιγοστά αποθέματα νερού καθώς έχουν αναπτύξει μια στρατηγική επιβίωσης σε ιδιαίτερα ξηρές συνθήκες, στις οποίες το άνοιγμα των στοματίων κατά τη διάρκεια της ημέρας ισοδυναμεί με αυτοκτονία. Το 8% περίπου των αγγειόσπερμων παρουσιάζουν εταβολισμό τύπου CAM. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν τα παχύφυτα της ερήμου, οι ορχιδέες (επίφυτα του θόλου σε τροπικά δάση) και ορισμένα δένδρα των τροπικών δασών.



Σχεδιάγραμμα 2. Γραφική Απεικόνιση της CAM

1.3 Η Επίδραση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στη φωτοσύνθεση

Η ένταση της φωτεινής ακτινοβολίας κάτω από την οποία αναπτύσσονται τα φυτά επηρεάζει τόσο τη δομή, όσο και τη λειτουργία των φύλλων τους. Φύλλα τα οποία αναπτύσσονται σε άπλετο ηλιακό φως διαθέτουν περισσότερες στοιβάδες κυττάρων του δρυφακτοειδούς παρεγχύματος, περισσότερες και ισχυρότερες ηθμαγγειώδεις δεσμίδες και παχύτερες επιδερμικές στοιβάδες έναντι αυτών που αναπτύσσονται υπό σκιά. Τα χαρακτηριστικά αυτά συμβάλλουν στην αύξηση του LMA των φύλλων τόσο σε ποώδη, όσο και σε δενδρώδη είδη (Evans, 1998).

Ωστόσο η ανατομία των φύλλων φωτός ενδέχεται να ελαττώνει το ρυθμό αφομοίωσης του CO_2 , αφού μειώνεται η ταχύτητα διάχυσης στους μεσοκυττάριους χώρους προς τις θέσεις καρβοξυλίωσης. Όταν η ένταση φωτεινής ακτινοβολίας δεν αποτελεί τον περιοριστικό παράγοντα, ο ρυθμός της καθαρής αφομοίωσης του CO_2 εξαρτάται από παράγοντες όπως η θερμοκρασία και οι μερικές πιέσεις CO_2 και O_2 στις θέσεις καρβοξυλίωσης (Evans, 1996).

Σε συνθήκες χαμηλής έντασης φωτισμού, η καθαρή φωτοσύνθεση αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση της φωτοσυνθετικής ροής φωτονίων (Photosynthetic Photon Flux Density – PPFD). Σε υψηλές εντάσεις PPFD παρατηρείται κορεσμός και η κλίση της καμπύλης μειώνεται. Στις συνθήκες αυτές άλλοι παράγοντες αναδεικνύονται ως περιοριστικοί, όπως η συγκέντρωση CO_2 . Για μια συγκεκριμένη τιμή χαμηλής φωτοσυνθετικής ροής φωτονίων, η καθαρή φωτοσύνθεση παίρνει μηδενικές τιμές Αυτό σημαίνει ότι η ταχύτητα της ολικής φωτοσύνθεσης ισούται με αυτήν της αναπνοής ($\text{GP}=\text{R}$), ή ότι η απορροφούμενη ποσότητα CO_2 είναι ίση με την εκλυόμενη ποσότητα CO_2 . Το σημείο αυτό ονομάζεται σημείοαντιστάθμισης φωτισμού. Για μικρότερες τιμές PPFD η αναπνευστική δραστηριότητα υπερیشχει της ολικής φωτοσύνθεσης (παρατηρείται δηλ. καθαρή έκλυση CO_2).

Το σημείο αντιστάθμισης φωτισμού των σκιοφύτων είναι χαμηλότερο εκείνου φυτών που αναπτύσσονται σε άπλετο φως. Κατά συνέπεια τα σκιοφυτά επιτυγχάνουν καθαρή φωτοσύνθεση σε χαμηλότερης έντασης PPFD και άρα

απορροφούν το φως πολύ πιο αποδοτικά, λόγω των ιδιαίτερων ανατομικών και βιοχημικών χαρακτηριστικών τους.

Στα σκιοφύτα το σημείο κορεσμού επιτυγχάνεται σε χαμηλότερη τιμή PPFD και ο ρυθμός καθαρής φωτοσύνθεσης είναι χαμηλότερος σε υψηλότερες εντάσεις φωτισμού, σε σύγκριση με φυτά που αναπτύσσονται σε άπλετο φως. Οι διαφορές αυτές παρατηρούνται όχι μόνο μεταξύ φύλλων διαφορετικών ειδών (σκιοφύτα-ηλιόφυτα), αλλά και μεταξύ των φύλλων του ίδιου είδους, τα οποία εγκλιματίστηκαν σε διαφορετικό καθεστώς φωτισμού.

Η PPFD στην οποία αναπτύσσονται τα φυτά επηρεάζει όχι μόνο την ανατομία τους αλλά και τον βιοχημικό τους εξοπλισμό, π.χ. δραστηριότητα της RubisCO και ο ρυθμός της φωτοσυνθετικής μεταφοράς ηλεκτρονίων αυξάνονται, αυξανόμενης της έντασης PPFD (Niinemets et al., 1998; Hand et al., 1993; Hikosaka and Terashima, 1995; Larcher, 2003; Dennis, 1992; Terashima and Hikosaka, 1995; Mohr and Schopfer, 1995).

1.4 Επίδραση της συγκέντρωσης του CO₂ στη φωτοσύνθεση

Σε συνθήκες φωτοκορεσμού και σταθερής συγκέντρωσης O₂, υπάρχει μια ορισμένη τιμή της συγκέντρωσης του CO₂ για την οποία NP=0. Η τιμή αυτή ονομάζεται σημείο αντιστάθμισης CO₂.

Δηλαδή στις συνθήκες αυτές δεν παρατηρείται καθαρή απορρόφηση ή έκλυση CO₂ και η ολική φωτοσύνθεση ισούται με το άθροισμα της αναπνοής και της φωτοαναπνοής (GP=R+PR). Χαμηλές τιμές του σημείου αντιστάθμισης CO₂ υποδεικνύουν ότι το φυτό αφομοιώνει το CO₂ πολύ αποτελεσματικά.

Τα C₄ και τα CAM φυτά παρουσιάζουν χαμηλό σημείο αντιστάθμισης διότι διαθέτουν μηχανισμό συσσώρευσης του CO₂, ο οποίος τους επιτρέπει να διαχειρίζονται το CO₂ αποτελεσματικά. Τα C₃ φυτά παρουσιάζουν υψηλές τιμές του σημείου αντιστάθμισης, καθώς δεν διαθέτουν ανάλογο βιοχημικό εξάρτημα. (Ehleringer et al., 2004; Larcher, 2003; Usuda and Shimogawara, 1998). Ωστόσο τα C₃ φυτά σε συνθήκες αυξημένης συγκέντρωσης CO₂ πλεονεκτούν έναντι των C₄.


1.5 Επίδραση της θερμοκρασίας στη φωτοσύνθεση

Η θερμοκρασία αποτελεί ένα περιβαλλοντικό παράγοντα ο οποίος παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις και επηρεάζει όχι μόνο την ανάπτυξη αλλά και την επιβίωση των φυτικών οργανισμών. Αποτελεί, από κοινού με τη διαθεσιμότητα νερού, τον σημαντικότερο περιοριστικό παράγοντα ανάπτυξης των φυτικών ειδών σε πλανητικό επίπεδο. Οι ακραίες θερμοκρασίες προκαλούν βλάβες στη φωτοσυνθετική μηχανή, καθώς διαταράσσουν τη λειτουργία των μεμβρανών και των ενζύμων. Τόσο οι χαμηλές, όσο και οι υψηλές θερμοκρασίες, σε συνδυασμό με υψηλές εντάσεις φωτισμού, διαταράσσουν τη φωτοσυνθετική λειτουργία καθώς παρατηρούνται φαινόμενα φωτοπαραμπόδισης και φωτοοξείδωσης. Οι τιμές βεβαίως θερμοκρασίας που θεωρούνται ακραίες εξαρτώνται από το είδος του φυτικού οργανισμού και την ικανότητα προσαρμογής ή εγκλιματισμού. Για παράδειγμα, θερμοκρασίες της τάξης των 10 °C θεωρούνται εξαιρετικά χαμηλές για τα τροπικά φυτά (Larcher, 2003).

1.6 Ο ρόλος του αζώτου στο μεταβολισμό των φυτών

Τα θρεπτικά συστατικά βρίσκονται στο έδαφος σε διαφορετικές μορφές (Marschner 1995). Η διαθεσιμότητά τους εξαρτάται από πολυάριθμους παράγοντες: τη σύσταση των μητρικών πετρωμάτων, το κλίμα, τη βλάστηση αλλά και τον τρόπο διαχείρισης των θρεπτικών πόρων από τους οργανισμούς (Schulze et al., 2005).

Το άζωτο χαρακτηρίζεται ως μακροστοιχείο, απαραίτητο για την ομαλή διεξαγωγή του μεταβολισμού των φυτών. Η ζωτική σημασία του αζώτου για το φυτικό μεταβολισμό αντανακλάται από το γεγονός ότι αποτελεί συστατικό πολυάριθμων σημαντικών μορίων. Αποτελεί ουσιώδες συστατικό των πρωτεϊνών, των νουκλεϊνικών οξέων, ορισμένων ορμονών, της χλωροφύλλης και άλλων σημαντικών μεταβολιτών του πρωτογενούς και δευτερογενούς μεταβολισμού των φυτών. Αποτελεί συνήθως έναν από τους πιο βασικούς περιοριστικούς παράγοντες για την ανάπτυξη τόσο των άγριων, όσο και των καλλιεργούμενων φυτών. Παρότι το αφθονότερο στοιχείο της ατμόσφαιρας, το αέριο άζωτο είναι αδρανές και συνεπώς δεν είναι άμεσα διαθέσιμο για τα φυτά. Μέσω της ανακύκλωσης της



οργανικής ύλης ή μέσω της αναγωγής του μοριακού αζώτου με κατανάλωση ενέργειας μετατρέπεται στις διαθέσιμες μορφές του, ιόντα αμμωνίου (NH_4^+), νιτρικά ιόντα (NO_3^-) ή ακόμα και στην οργανική του μορφή (R-NH_2). Στη φύση, η μετατροπή του αερίου αζώτου σε διαθέσιμη μορφή γίνεται είτε στην ατμόσφαιρα, με ενέργεια που παράγεται από τις ηλεκτρικές εκκενώσεις, είτε στο έδαφος από ελεύθερα ή συμβιωτικά αζωτοδεσμευτικά βακτήρια, τα οποία συμβιούν στις ρίζες των ψυχανθών, ή και από ορισμένα υανοβακτήρια σε αναερόβιες συνθήκες (Marschner 1995; Schulze et al., 2005).

Το άζωτο απορροφάται από το έδαφος με τη μορφή ανόργανων ιόντων (νιτρικά ή /και αμμωνιακά ιόντα), μέσω των ριζών και στη συνέχεια μεταφέρεται στα υπέργεια όργανα. Τα φυτικά είδη παρουσιάζουν διαφορετικές προτιμήσεις σχετικά με τη μορφή του αζώτου που μπορούν να απορροφήσουν, ανάλογα με τις μορφές αζώτου που είναι διαθέσιμες στο έδαφος. Σε πλούσια από άποψη θρεπτικών στοιχείων εδάφη, τα φυτά απορροφούν νιτρικά, ενώ σε φτωχά εδάφη αμμωνιακά ιόντα (Lambers et al, 2008; Larcher, 2003; Marschner, 1995).

2.2 Προσομοίωση

2.1 Ορισμός

Προσομοίωση είναι μια μέθοδος μελέτης ενός συστήματος και εξοικείωσης με τα χαρακτηριστικά του με τη βοήθεια ενός άλλου συστήματος το οποίο στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ηλεκτρονικός υπολογιστής.

Αποτελεί πειραματική μέθοδο που έχει σα σκοπό τη μελέτη της λειτουργίας ενός συστήματος, τη βελτιστοποίησή του και την ανάλυση της ευαισθησίας του. Ως πειραματική μέθοδος όμως, εξαρτάται πολύ από την πιστότητα του μοντέλου που χρησιμοποιείται (επιλογή παραμέτρων).

2.2 Φάσεις της Προσομοίωσης

Η διαδικασία της προσομοίωσης αποτελείται από τρεις διακριτές φάσεις:

- α) την κατασκευή του μοντέλου προσομοίωσης,
- β) την εκτέλεση ή τρέξιμο του μοντέλου και
- γ) την ανάλυση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

Η κατασκευή του μοντέλου αποτελεί ίσως το πιο σημαντικό βήμα για την προσομοίωση του συστήματος, επειδή η ποιότητα και αξιοπιστία του καθορίζουν και την αξιοπιστία της προσομοίωσης. Τα μοντέλα συνεχών συστημάτων λύνονται συνήθως με αναλυτικές μεθόδους, ενώ για τα διακριτά συστήματα χρησιμοποιείται συνήθως η προσομοίωση. Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι ο χρόνος που χρησιμοποιείται κατά την προσομοίωση αποτελεί μοντελοποίηση του χρόνου του συστήματος. Επομένως, ο προσομοιωμένος χρόνος δεν έχει καμία σχέση με τον πραγματικό χρόνο που παρέρχεται όταν εκτελείται η προσομοίωση.

2.2.1 Οι προσομοιώσεις φαινομένων

Στις προσομοιώσεις στην οθόνη του υπολογιστή (δηλαδή σ' αυτή την τεχνητή – εικονική φύση) αναπαρίστανται διάφορα φαινόμενα. Μέσα από κάποια λίστα επιλέγεται ένα φαινόμενο και με την ενεργοποίηση της επιλογής «έναρξη» το παρατηρούμε. Φαινόμενα τα οποία λόγω κλίμακας είναι αδύνατο να παρατηρηθούν χωρίς τη χρήση κατάλληλων οργάνων ή είναι αδύνατο να παρατηρηθούν, αναπαρίστανται στην οθόνη. Φαινόμενα του Μακρόκοσμου (πχ κίνηση των πλανητών, εκλείψεις, κλπ) ή του Μικρόκοσμου (κίνηση ατόμων ή μορίων ή ηλεκτρονίων, κλπ) μπορεί να «παρατηρηθούν» στην οθόνη του υπολογιστή. Όπως και στα εικονικά πειράματα έτσι και στις προσομοιώσεις, η ποιότητα της γνώσης των ατόμων που θα τις μελετήσουν καθώς και η γνώση των συμβόλων και των κανόνων ανάγνωσης της αναπαράστασης θα προσδιορίσουν το αν θα προκληθούν παρανοήσεις ή αν θα ευοδωθεί η καλύτερη κατανόηση των φαινομένων. Οι μαθησιακές δραστηριότητες με τις προσομοιώσεις πρέπει να στηρίζονται στην παραγωγή άλλων αναπαραστάσεων όπως η λεκτική (προφορική περιγραφή), γραπτή (παραγωγή κειμένου), σχηματική (σχέδιο), μοντελοποίηση (σχεδίαση και περιγραφή μοντέλου για το φαινόμενο) ή και φορμαλιστική (μαθηματικές σχέσεις που περιγράφουν το φαινόμενο, ή διάφορους συνδυασμούς τους.

2.2.2 Διαδραστικές προσομοιώσεις φαινομένων

Στις προσομοιώσεις αυτές δίνεται η δυνατότητα να καθοριστούν από το χρήστη οι τιμές διαφόρων παραμέτρων που καθορίζουν την εξέλιξη ενός φαινομένου που αναπαρίσταται στην τεχνητή-εικονική φύση του υπολογιστή. Διαφέρουν από τα εικονικά πειράματα στο ότι η πειραματική διάταξη είναι ήδη σχεδιασμένη και αμετάβλητη. Διαδικασίες όπως η πρόβλεψη και ο έλεγχός της από την πειραματική διάταξη είναι οι πλέον ενδεδειγμένες μαθησιακές δραστηριότητες χρήσης των διαδραστικών προσομοιώσεων.

2.3 Μοντέλα

2.3.1 Ορισμοί:

- **Μοντέλο** είναι μία αναπαράσταση ενός φυσικού συστήματος ή οργανισμού φυσικού φαινομένου ή ακόμη και μίας ιδέας.
- **Μοντέλο** είναι το σύνολο των πληροφοριών ενός συστήματος που έχει συγκεντρωθεί με σκοπό τη Μελέτη του συστήματος

2.3.2 Ορισμός του συστήματος και ιδιότητες συστημάτων

Σύστημα είναι ένα σύνολο αλληλεπιδρώντων στοιχείων τα οποία συνεργάζονται μεταξύ τους ή λειτουργούν συλλογικά για την επίτευξη κάποιου σκοπού.

Το σχηματικό διάγραμμα ενός συστήματος φαίνεται στην εικόνα 3 και αποτελείται από ένα μπλοκ με εισόδους και εξόδους.



Εικόνα 3. Σχηματικό Διάγραμμα ενός συστήματος

Η μελέτη συστημάτων αφορά τόσο την ανάλυσή τους, όταν πρόκειται για υπάρχοντα συστήματα όσο και τη σύνθεσή τους όταν πρόκειται για συστήματα που βρίσκονται στο στάδιο της σχεδίασης.

Η ανάλυση ορίζεται ως ο καθορισμός της εξόδου του συστήματος όταν δοθεί η είσοδος στο σύστημα. Η μεθοδολογία αυτή χρησιμοποιείται επομένως όταν είναι γνωστά τα στοιχεία του συστήματος και επιδιώκεται να διαπιστωθεί η λειτουργία του και να καθορισθεί η αξιοπιστία του, η ευαισθησία του, κτλ.

Η σύνθεση ορίζεται ως ο καθορισμός των στοιχείων του συστήματος όταν δοθούν οι εισοδοι και οι έξοδοι που αντιστοιχούν σ' αυτές τις εισόδους. Η μεθοδολογία αυτή χρησιμοποιείται κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος

Ένα πολύ σημαντικό δυναμικό στοιχείο που χαρακτηρίζει ένα σύστημα είναι η **κατάσταση του συστήματος**, που ορίζεται ως η συνολική περιγραφή των οντοτήτων, των χαρακτηριστικών τους και των δραστηριοτήτων, σε μια δεδομένη χρονική στιγμή. Όπως είναι γνωστό η προσομοίωση ασχολείται ακριβώς με την παρακολούθηση της κατάστασης ενός συστήματος, όπως αυτή μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου. Η κατάσταση ενός συστήματος όμως, μπορεί να μην εξαρτάται μόνον από τις δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα μέσα στο σύστημα αλλά και από δραστηριότητες εκτός του συστήματος. Για το λόγο αυτό ορίζουμε ως **περιβάλλον του συστήματος** το σύνολο των μεταβολών που συμβαίνουν εκτός του συστήματος. Το μοντέλο, επομένως, που θα δημιουργηθεί για το σύστημα είναι ενσωματωμένο στον περιβάλλοντα χώρο ο οποίος είτε επηρεάζει είτε δεν επηρεάζει τις λειτουργίες του μοντέλου και κατ' επέκταση του συστήματος. Τα όρια του συστήματος διαχωρίζουν τις οντότητες, που βρίσκονται μέσα στο σύστημα από αυτές που βρίσκονται εκτός του συστήματος και αποτελούν το περιβάλλον του.

Ανάλογα με το χώρο όπου λαμβάνουν χώρα οι δραστηριότητες, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- ✓ ενδογενείς και
- ✓ εξωγενείς.

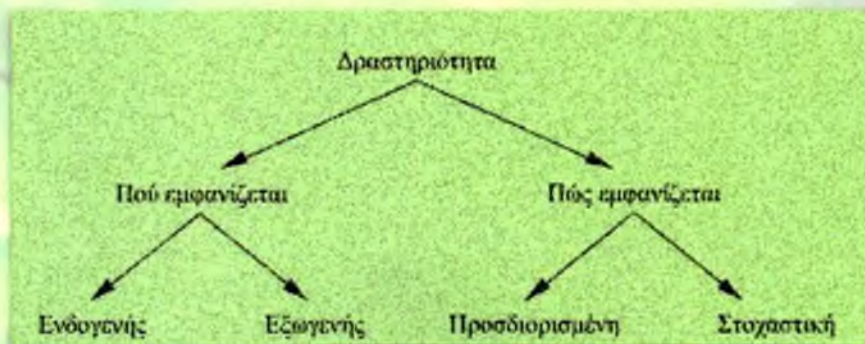
Ενδογενείς δραστηριότητες είναι αυτές οι οποίες λαμβάνουν χώρα μέσα στο σύστημα ή παράγονται μέσα στο σύστημα ή είναι αποτέλεσμα εσωτερικών αιτιών.

Εξωγενείς δραστηριότητες είναι αυτές οι οποίες λαμβάνουν χώρα στο περιβάλλον του συστήματος αλλά επηρεάζουν το σύστημα.

Οι δραστηριότητες ανάλογα με τον τρόπο ορισμού των αποτελεσμάτων τους χωρίζονται σε:

- ✓ προσδιορισμένες και
- ✓ στοχαστικές,

Σε μια προσδιορισμένη δραστηριότητα, τα αποτελέσματα μπορούν να περιγραφούν πλήρως από τις εισόδους. Δηλαδή, για κάθε σύνολο εισόδων, η έξοδος της δραστηριότητας είναι συγκεκριμένη και προσδιορισμένη. Σε μια στοχαστική δραστηριότητα τα αποτελέσματα δεν μπορούν να προσδιορισθούν πλήρως από τις εισόδους αλλά μεταβάλλονται τυχαία μέσα σε ένα σύνολο δυνατών αποτελεσμάτων. Αυτό σημαίνει ότι για ένα δεδομένο σύνολο εισόδων υπάρχουν πολλαπλά σύνολα εξόδων και αυτό που θα συμβεί κάθε φορά είναι αποτέλεσμα τυχαίων παραγόντων. Στην εικόνα 4 φαίνονται διαγραμματικά οι κατηγορίες των διεργασιών.



Εικόνα 4. Κατηγορίες των διεργασιών

Τα συστήματα χωρίζονται επίσης σε κατηγορίες, ανάλογα με τις μεταβολές της κατάστασής τους ή τη σχέση τους με το περιβάλλον.

Στα **συνεχή** συστήματα οι μεταβολές της κατάστασης είναι κατά κύριο λόγο ομαλές. Οι δραστηριότητες δηλαδή, μεταβάλλουν συνεχώς την κατάσταση του συστήματος και όχι μόνον όταν τελειώσουν (Lackner 1962).

Στα **διακριτά** συστήματα οι μεταβολές είναι κυρίως ασυνεχείς, πράγμα που σημαίνει, ότι η κατάσταση του συστήματος αλλάζει μόλις τελειώσει μία δραστηριότητα (Law 1991).

Στην πραγματικότητα βέβαια, όλα τα συστήματα είναι συνεχή στη φύση. Κατά τη μελέτη των συστημάτων όμως, πολλές φορές έχουν ενδιαφέρον οντότητες και χαρακτηριστικά που εμφανίζουν ασυνεχείς μεταβολές.

Όσον αφορά τη σχέση του συστήματος με το περιβάλλον, τα συστήματα διακρίνονται σε:

- ✓ ανοικτά
- ✓ κλειστά

Ένα σύστημα ονομάζεται **ανοικτό** αν έχει εξωγενείς δραστηριότητες, ενώ αντίθετα, αν δεν έχει εξωγενείς δραστηριότητες ονομάζεται **κλειστό**. Ένα ανοικτό σύστημα αν και έχει εξωγενείς δραστηριότητες υπάρχει περίπτωση να μην αντιδρά στις αλλαγές του περιβάλλοντος. Έτσι, αν ένα σύστημα αντιδρά στις αλλαγές του περιβάλλοντος ονομάζεται **προσαρμοζόμενο**, ενώ αντίθετα αν δεν αντιδρά στις αλλαγές του περιβάλλοντος ονομάζεται **μη προσαρμοζόμενο**. Στην εικόνα 5 δίνεται διαγραμματικά η ταξινόμηση των συστημάτων.



Εικόνα 5. Ταξινόμηση των συστημάτων

2.3.4 Λόγοι κατασκευής μοντέλου

🔗 Διευκόλυνση στην κατανόηση.

Το μοντέλο είναι συχνά πολύ πιο απλό στην κατανόηση από το ίδιο το σύστημα γιατί κατά την κατασκευή του μοντέλου διατηρούνται μόνο τα χαρακτηριστικά του συστήματος που ενδιαφέρουν στη συγκεκριμένη μελέτη. Με τον τρόπο αυτό ο μελετητής δεν χάνεται στις λεπτομέρειες του συστήματος αλλά επικεντρώνει την προσοχή του μόνο στα σημαντικά στοιχεία.

🔗 Διευκόλυνση στην επικοινωνία.

Με την κατασκευή ενός μοντέλου είναι πολύ πιο εύκολο να μεταδοθούν οι ιδέες για κάποιο σύστημα απ' ό,τι με την περιγραφή του συστήματος.

🔗 Το μοντέλο αποτελεί εργαλείο πρόβλεψης.

Ορισμένα συστήματα παρουσιάζουν πολύ αργές μεταβολές της κατάστασής τους με αποτέλεσμα να είναι αδύνατη η πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους για ένα μακρύ χρονικό διάστημα. Κατασκευάζοντας ένα μοντέλο του συστήματος πετυχαίνουμε επιτάχυνση των χρονικών μεταβολών, έτσι ώστε να μπορούμε να προβλέψουμε τη μελλοντική συμπεριφορά του πραγματικού συστήματος.

🔗 Αδυναμία πρόσβασης.

Μερικές φορές η πρόσβαση στο πραγματικό σύστημα είναι αδύνατη ή επικίνδυνη. Κατασκευάζοντας ένα μοντέλο, είναι δυνατόν να μελετήσουμε το σύστημα χωρίς να κινδυνεύσει ο μελετητής ή το ίδιο το σύστημα.

🔗 Εκπαίδευση.

Με την κατασκευή ενός μοντέλου είναι δυνατόν να εκπαιδευτούν χειριστές χωρίς τον κίνδυνο καταστροφών από λάθος των εκπαιδευομένων. Είναι επίσης δυνατόν να εκπαιδευτούν οι χειριστές ενός συστήματος, το οποίο δεν έχει κατασκευασθεί ακόμη.

🔗 Σχεδιασμός.

Η κατασκευή ενός μοντέλου συμβάλλει πολύ στο σχεδιασμό ενός συστήματος, γιατί επιτρέπει τον εντοπισμό σχεδιαστικών σφαλμάτων και τη διόρθωσή τους πριν το σύστημα κατασκευασθεί.

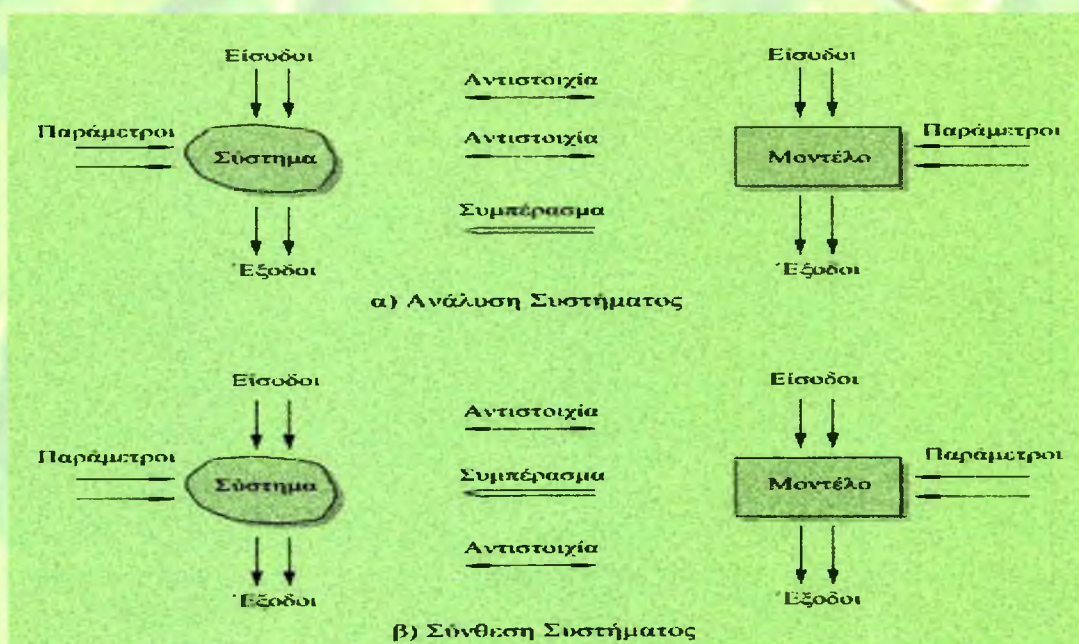
🔗 Ανεύρεση εναλλακτικών λύσεων και βελτιστοποίηση.

Ο λόγος αυτός για την κατασκευή μοντέλων είναι παρόμοιος με τον προηγούμενο. Κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος είναι δυνατόν να κατασκευασθούν πολλά διαφορετικά μοντέλα και να επιλεγθεί το κατάλληλο προς υλοποίηση με βάση κάποια συγκεκριμένα κριτήρια βελτιστοποίησης.

Βελτίωση της απόδοσης υπάρχοντος συστήματος.

Με την κατασκευή ενός μοντέλου είναι δυνατό να ελεγχθεί η συμπεριφορά του συστήματος για διάφορες τιμές των παραμέτρων του. Από τη μελέτη του μοντέλου που έχει κατασκευασθεί διαπιστώνεται ο αποδοτικότερος συνδυασμός παραμέτρων και στη συνέχεια οι παράμετροι αυτοί εφαρμόζονται στο πραγματικό σύστημα.

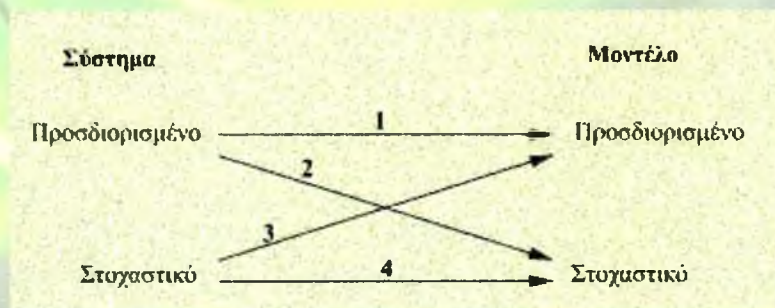
Το Μοντέλο ενός συστήματος θα πρέπει να αντιπροσωπεύει το σύστημα όσο πιο πιστά γίνεται, έτσι ώστε τα συμπεράσματα που θα εξαχθούν από τη μελέτη του μοντέλου να αντιστοιχούν σε συμπεράσματα για το σύστημα. Σε περίπτωση που το μοντέλο χρησιμοποιείται για την ανάλυση του συστήματος υπάρχει αντιστοιχία ανάμεσα στις εισόδους του συστήματος και στις εισόδους του μοντέλου. Υπάρχει επίσης αντιστοιχία ανάμεσα στις εσωτερικές δομές του μοντέλου και του συστήματος. Η μελέτη κατόπιν συνάγει τις εξόδους του συστήματος από τις εξόδους του μοντέλου. Αυτό φαίνεται διαγραμματικά στην εικόνα 6 α. Σε περίπτωση που το μοντέλο χρησιμοποιείται για τη σύνθεση του συστήματος υπάρχει αντιστοιχία ανάμεσα στις εισόδους του συστήματος και στις εισόδους του μοντέλου. Υπάρχει επίσης αντιστοιχία ανάμεσα στις εξόδους του μοντέλου και τις εξόδους του συστήματος. Η μελέτη κατόπιν συνάγει την εσωτερική δομή του συστήματος, δηλαδή τα συστατικά του στοιχεία από τη δομή του μοντέλου. Αυτό φαίνεται διαγραμματικά στην εικόνα 6 β.



Εικόνα 6. Αντιστοιχία μοντέλου συστήματος

2.3.5 Τύποι Μοντέλων

Συστήματα των οποίων οι δραστηριότητες είναι κυρίως προσδιορισμένες, δηλαδή μη εξαρτώμενες από τυχαίους παράγοντες, ονομάζονται **προσδιορισμένα συστήματα**. Αντίστοιχα, **στοχαστικά** ονομάζονται τα συστήματα των οποίων οι δραστηριότητες είναι κυρίως στοχαστικές. Με τον ίδιο τρόπο διακρίνονται και τα μοντέλα σε **προσδιορισμένα** και **στοχαστικά** σε αναλογία, όμως, με τις δραστηριότητες που περιλαμβάνουν και όχι με το σύστημα το οποίο αντιπροσωπεύουν. Μπορεί, επομένως, να υπάρξει οποιοσδήποτε συνδυασμός συστήματος μοντέλου όπως φαίνεται στην εικόνα 7.



Εικόνα 7. Συνδιασμοί συστημάτων μοντέλου

Η ταξινόμηση των μοντέλων μπορεί να γίνει με βάση διάφορα κριτήρια (Tocher 1963, Law 1991). Οι βασικοί τύποι μοντέλων δίνονται στην εικόνα 8.



Εικόνα 8. Τύποι Μοντέλων

Το **φυσικό μοντέλο**, που ονομάζεται επίσης και παράθυρο εικονικό, είναι μια φυσική αναπαράσταση του αντικειμένου που αντιπροσωπεύει και μοιάζει με αυτό. Μπορεί να είναι σε κλίμακα μικρότερη του αντικειμένου. Τα φυσικά μοντέλα διακρίνονται σε **στατικά και δυναμικά**. Ο δεύτερος βασικός τύπος μοντέλου είναι το **μαθηματικό μοντέλο**. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται μαθηματικές έννοιες για να περιγράψουν είτε τις φυσικές ιδιότητες του συστήματος (σχήμα, μέγεθος, χρώμα, κ.λπ.) είτε τις λειτουργίες του (κίνηση, αλλαγή σχήματος, αλλαγές της κατάστασης, κ.λπ.) είτε ακόμη τις σχέσεις ανάμεσα στα στοιχεία του συστήματος.

Τα μαθηματικά μοντέλα διακρίνονται επίσης σε **στατικά και δυναμικά**. Τέλος, τα μαθηματικά μοντέλα μπορούν να διακριθούν σε αναλυτικά και αριθμητικά. Στην πρώτη περίπτωση υπάρχει ένα πλήρες σύνολο εξισώσεων που περιγράφει το μοντέλο. Αντίθετα, όταν οι μαθηματικές εξισώσεις περιγραφής του συστήματος είναι αδύνατο να ευρεθούν ή δεν υπάρχουν, το σύστημα περιγράφεται από αριθμητικά δεδομένα που έχουν συλλεχθεί με εμπειρικό τρόπο. Το σύνολο των δεδομένων και οι συσχετίσεις τους αποτελούν το αριθμητικό μοντέλο του συστήματος.

Τα χαρακτηριστικά που προαναφέρθηκαν καθορίζουν και την πολυπλοκότητα του μοντέλου. Τα απλά μοντέλα περιγράφονται συνήθως από μαθηματικές εξισώσεις και είναι δυνατόν να επιλυθούν αναλυτικά. Αντίθετα, τα πολύπλοκα μοντέλα δεν είναι συνήθως δυνατό να περιγραφούν με μαθηματικές εξισώσεις και έτσι μελετώνται με προσομοίωση. Στον πίνακα 1. δίνονται σε αντιδιαστολή τα χαρακτηριστικά των απλών και των πολύπλοκων μοντέλων.

Μοντέλα	
Απλά	Πολύπλοκα
Στατικά	Δυναμικά
Γραμμικά	Μη γραμμικά
Προσδιοριστικά	Στοχαστικά
Συνεχή	Διακριτά
Σταθερής κατάστασης	Μεταβατικά
Περιληπτικά	Λεπτομερή

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά των απλών και των πολύπλοκων μοντέλων

τα χαρακτηριστικά που δίνονται στον πίνακα αυτό είναι απλώς ενδεικτικά. Δεν προσδιορίζουν δηλαδή κατ' αποκλειστικότητα τα μοντέλα. Ο πίνακας αυτός δίνει απλώς τα αναμενόμενα χαρακτηριστικά ενός απλού ή ενός πολύπλοκου μοντέλου. Έτσι, αν ένα μοντέλο είναι στοχαστικό, μη γραμμικό, διακριτό και δυναμικό, αναμένεται να είναι πολύπλοκο.

2.3.6 Δημιουργία μοντέλων προσομοίωσης

Η δημιουργία μοντέλων για προσομοίωση είναι μια πειραματική μεθοδολογία, η οποία έχει ως σκοπούς:

- α. τη μελέτη της συμπεριφοράς ενός συστήματος,
- β τον έλεγχο υποθέσεων ή θεωριών για την παρατηρούμενη συμπεριφορά ενός συστήματος, και
- γ. την πρόβλεψη ή εκτίμηση της μελλοντικής συμπεριφοράς ενός συστήματος.

2.3.7 Μοντέλα προσομοίωσης

Σύμφωνα με την ταξινόμηση του πίνακα 1 τα μοντέλα προσομοίωσης είναι κυρίως αριθμητικά δυναμικά μαθηματικά μοντέλα. Αυτό όμως που κυρίως χαρακτηρίζει τα μοντέλα προσομοίωσης είναι το γεγονός ότι τα μοντέλα αυτά δεν λύνονται, αλλά εκτελούνται, συνήθως σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Όλα τα μοντέλα προσομοίωσης είναι περιγραφικά μοντέλα, με την έννοια ότι χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι, υπολογιστικές μέθοδοι και διεργασίες για να περιγράψουν τη λειτουργία του συστήματος. Σχεδόν όλα τα μοντέλα προσομοίωσης αποτελούνται από κάποιο συνδυασμό των παρακάτω στοιχείων:

- Συστατικά
- Μεταβλητές
- Παραμέτρους

- Λειτουργικές σχέσεις
- Περιορισμούς

2.3.8 Κατασκευή μοντέλων προσομοίωσης

Η κατασκευή μοντέλων προσομοίωσης είναι μια δύσκολη τεχνική γιατί πρέπει να εξισορροπήσει αντικρουόμενους παράγοντες. Αφενός το μοντέλο θα πρέπει να είναι αρκετά απλό, έτσι ώστε να μπορεί να κατασκευασθεί και να μελετηθεί, αφετέρου θα πρέπει να είναι αρκετά πολύπλοκο, έτσι ώστε να αντιπροσωπεύει όσο πιο πιστά γίνεται το σύστημα που πρόκειται να μελετηθεί. Η ισορροπία αυτή μπορεί να επιτευχθεί με προσεκτική ανάλυση του μοντέλου. Αν το μοντέλο που έχει κατασκευασθεί είναι απλό και κατανοητό, τότε μπορεί να εμπλουτισθεί. Αντίθετα, αν το μοντέλο είναι πολύπλοκο και δυσνόητο, μπορεί να απλοποιηθεί. Σε κάθε περίπτωση χρησιμοποιούνται οι εξής πέντε κανόνες εμπλουτισμού ή απλοποίησης του μοντέλου:

- Αν το μοντέλο είναι απλό, ορισμένες σταθερές μετατρέπονται σε μεταβλητές ώστε να γίνει πολύπλοκο. Αντίθετα αν το μοντέλο είναι πολύπλοκο, ορισμένες μεταβλητές μετατρέπονται σε σταθερές.
- Η εξάλειψη ή συνένωση μεταβλητών απλοποιεί το μοντέλο, ενώ αντίθετα η προσθήκη μεταβλητών το εμπλουτίζει.
- Επειδή τα γραμμικά μοντέλα είναι γενικώς απλούστερα των μη γραμμικών, η παραδοχή γραμμικότητας του συστήματος απλοποιεί το μοντέλο, ενώ αντίθετα η παραδοχή μη γραμμικότητας το εμπλουτίζει.
- Η προσθήκη ισχυρότερων υποθέσεων και περιορισμών απλοποιεί το μοντέλο.
- Τέλος, ο περιορισμός των ορίων του συστήματος οδηγεί σε απλούστερο μοντέλο, ενώ η επέκτασή τους οδηγεί σε πιο πολύπλοκο μοντέλο.

2.3.9 Κριτήρια καλού μοντέλου

Ένα καλό μοντέλο όχι μόνο αντιπροσωπεύει πιστότερα το σύστημα από ένα κακό, αλλά βοηθά περισσότερο τόσο στην κατανόηση των λειτουργιών του συστήματος, όσο και στην ανάλυση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Υπάρχουν διάφορα κριτήρια που επιτρέπουν την αναγνώριση ενός καλού μοντέλου και τα οποία βοηθούν στην κατασκευή του:

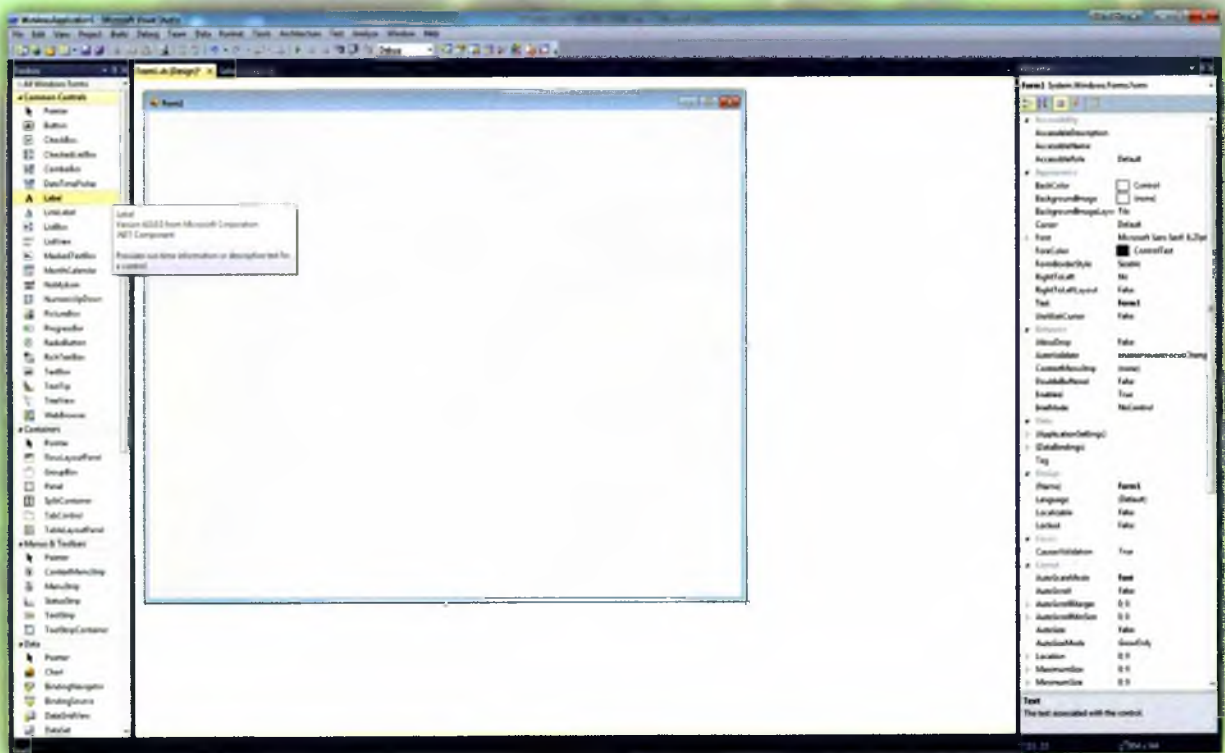
- Γενικώς, τα καλά μοντέλα είναι εύκολα στην κατανόηση από τον χρήστη και προσανατολίζονται προς τους συγκεκριμένους σκοπούς ή στόχους που έχουν τεθεί. Επιπλέον, είναι ισχυρά με την έννοια ότι δεν δίνουν περιέργες και δυσνόητες απαντήσεις.
- Οι χρήστες ελέγχουν και μεταβάλλουν ευκολότερα ένα καλό μοντέλο παρά ένα κακό. Είναι δηλαδή πολύ πιο εύκολο για τους χρήστες να επικοινωνήσουν με ένα καλό μοντέλο. Η προσαρμοστικότητα του μοντέλου είναι επομένως ένα σημαντικό στοιχείο ποιότητας του μοντέλου. Για τα καλά μοντέλα υπάρχουν εύκολες και ακριβείς διαδικασίες τροποποίησης ή ενημέρωσής τους.
- Τέλος, χαρακτηριστικό των καλών μοντέλων είναι η δυνατότητα εξέλιξής τους. Ξεκινούν δηλαδή από μια απλή μορφή και εξελίσσονται σε μια πιο πολύπλοκη, ανάλογα με τη λεπτομέρεια που θέλει να μελετήσει ο χρήστης.

3. Υλικά και μέθοδοι

3.1 Λογισμικό (Software)

Για τον προγραμματισμό του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic.Net και το περιβάλλον εργασίας του Microsoft Visual Studio 2010 σε λειτουργικό σύστημα Microsoft Windows 7 (Εικόνα 9).

Η γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic.Net είναι η νεότερη έκδοση της γλώσσας προγραμματισμού Visual Basic που πρωτοεμφανίστηκε το 1991. Είναι υψηλού επιπέδου, αντικειμενοστρεφής, καθοδηγούμενη από γεγονότα και χρησιμοποιεί τις βιβλιοθήκες προγραμματισμού του λογισμικού .Net Framework γεγονός που διευκολύνει σημαντικά τον προγραμματισμό σε περιβάλλον Windows.



Εικόνα 9. Περιβάλλον εργασίας MS Visual Basic.Net

3.1.1 Visual Basic.net (VB)

Η **Visual Basic.net** (VB) είναι μια αντικειμενοστραφής γλώσσα προγραμματισμού τρίτης γενιάς καθοδηγούμενη από συμβάντα (event driven) και πλαισιώνεται από το Γραφικό Περιβάλλον Ανάπτυξης Εφαρμογών (IDE) Visual Studio της Microsoft. Η VB θεωρείται μία σχετικά εύκολη γλώσσα προγραμματισμού στην εκμάθηση και τη χρήση λόγω του IDE και της συγγένειας της με την γλώσσα προγραμματισμού BASIC.

Η Visual Basic.Net προέρχεται από τη BASIC και επιτρέπει την ταχεία ανάπτυξη εφαρμογών (RAD) με Γραφικό Περιβάλλον Χρήστη (GUI), πρόσβαση σε βάσεις δεδομένων χρησιμοποιώντας αντικείμενα (Data Access Objects, Remote Data Objects, ή ActiveX Data Objects), και τη δημιουργία στοιχείων ελέγχου ActiveX και αντικειμένων. Οι γλώσσες προγραμματισμού τύπου "scripting", όπως η VBA και VBScript συντακτικά είναι παρόμοιες με τη Visual Basic.net, αλλά έχουν διαφορετικές επιδόσεις. Ένας προγραμματιστής μπορεί να ολοκληρώσει μια εφαρμογή για Windows χρησιμοποιώντας μόνο τα στοιχεία που παρέχονται με την Visual Basic.Net.

3.1.2 Χαρακτηριστικά της Γλώσσας [Επεξεργασία]

Όπως και η γλώσσα προγραμματισμού BASIC, η Visual Basic έχει σχεδιαστεί για να είναι εύκολη στην εκμάθηση και το χειρισμό. Η γλώσσα δεν επιτρέπει στους προγραμματιστές να δημιουργήσουν μόνο απλές εφαρμογές GUI, αλλά μπορούν επίσης να αναπτύξουν πιο πολύπλοκες εφαρμογές. Ο προγραμματισμός σε VB συνίσταται από τον οπτικό συνδυασμό στοιχείων ή ελέγχων σε μια φόρμα, τον προσδιορισμό χαρακτηριστικών και ενεργειών αυτών των στοιχείων και την σύνταξη επιπλέον γραμμών κώδικα για αυξημένη λειτουργικότητα. Καθώς υπάρχουν προεπιλεγμένα χαρακτηριστικά και ενέργειες για τα επιμέρους στοιχεία, μπορεί να δημιουργηθεί ένα απλό πρόγραμμα χωρίς ο προγραμματιστής να γράψει πολλές γραμμές κώδικα.

Οι φόρμες δημιουργούνται χρησιμοποιώντας τεχνικές "σύρε κι άσε" (drag-and-drop). Χρησιμοποιείται ένα εργαλείο για την τοποθέτηση στοιχείων ελέγχου (π.χ. πλαίσια κειμένου, κουμπιά, κλπ.) στη φόρμα (παράθυρο). Τα στοιχεία ελέγχου έχουν χαρακτηριστικά και χειριστές συμβάντων συνδεδεμένους με αυτά. Τα χαρακτηριστικά αποτελούν ιδιότητες των στοιχείων ελέγχου, όπως π.χ. χρώμα, τύπος και μέγεθος γραμματοσειράς κ.α. ενώ οι χειριστές συμβάντων 'αντιδρούν' σε εντολές του συστήματος ή ενέργειες του χρήστη και εκτελούν προγραμματισμένες ενέργειες. Προεπιλεγμένες τιμές των χαρακτηριστικών παρέχονται όταν δημιουργείται το στοιχείο ελέγχου, αλλά μπορούν να τροποποιηθούν από τον προγραμματιστή. Πολλές τιμές χαρακτηριστικών είναι δυνατό να τροποποιηθούν κατά το χρόνο εκτέλεσης από ενέργειες του χρήστη ή αλλαγές του περιβάλλοντος, παρέχοντας έτσι μια δυναμική

εφαρμογή. Για παράδειγμα, μπορεί να εισαχθεί κώδικας στον χειριστή συμβάντων αλλαγής διαστάσεων της φόρμας, ώστε ένα στοιχείο ελέγχου να παραμένει πάντα στο κέντρο της φόρμας ή να μεγαλώσει ώστε να την γεμίσει, κλπ. Με την προσθήκη κώδικα μέσα σε ένα χειριστή συμβάντων για το πάτημα των πλήκτρων σε ένα πλαίσιο κειμένου, το πρόγραμμα μπορεί αυτόματα να μετατρέψει το εισαγόμενο κείμενο σε κεφαλαία ή πεζά ή ακόμα και να εμποδίσει ορισμένους από τους χαρακτήρες να εμφανιστούν.

Με τη Visual Basic είναι δυνατή η δημιουργία εκτελέσιμων (EXE) αρχείων, στοιχείων ελέγχου ActiveX ή αρχείων DLL, αλλά χρησιμοποιείται κυρίως για την ανάπτυξη εφαρμογών για τα Windows και τη διασύνδεση συστημάτων βάσεων δεδομένων. Τα στοιχεία ελέγχου παρέχουν τις βασικές λειτουργίες της εφαρμογής, ενώ οι προγραμματιστές μπορούν να εισαγάγουν επιπλέον λογική μέσα στο κατάλληλο χειριστή γεγονότων. Για παράδειγμα, ένα πτυσσόμενο πλαίσιο θα εμφανίζει αυτόματα μια λίστα που θα επιτρέπει στο χρήστη να επιλέξει οποιοδήποτε στοιχείο. Ένας χειριστής γεγονότων καλείται όταν ένα αντικείμενο είναι επιλεγμένο, και στη συνέχεια μπορεί να εκτελεστεί πρόσθετος κώδικας που δημιουργείται από τον προγραμματιστή για να εκτελεστεί κάποια ενέργεια που βασίζεται στο στοιχείο που έχει επιλεγεί.

Εναλλακτικά, ένα συστατικό της Visual Basic μπορεί να μην έχει Γραφικό Περιβάλλον Χρήστη, αλλά αντ' αυτού, να παρέχει αντικείμενα ActiveX σε άλλα προγράμματα μέσω Component Object Model (COM). Αυτό επιτρέπει επεξεργασία στην πλευρά του διακομιστή (server-side processing) ή τη δημιουργία πρόσθετων μορφομάτων (add-in module).

Η γλώσσα έχει αυτόματη διαχείριση μνήμης με την τεχνική της συλλογής σκουπιδιών (garbage collection) χρησιμοποιώντας υπολογισμό αναφορών και έχει μια μεγάλη βιβλιοθήκη με βοηθητικά αντικείμενα καθώς και βασική αντικειμενοστραφή υποστήριξη. Αντίθετα με πολλές άλλες γλώσσες προγραμματισμού η Visual Basic γενικά δεν διαχωρίζει τους πεζούς από τους κεφαλαίους χαρακτήρες, αν και θα μετατρέψει τις λέξεις-κλειδιά σε μία τυπική διαμόρφωση. Οι συγκρίσεις συμβολοσειρών διαχωρίζουν τα πεζά από τα κεφαλαία από προεπιλογή, αλλά μπορεί να αλλάξει αυτό, εφόσον το επιθυμείτε.

Ο μεταγλωττιστής της Visual Basic είναι κοινός με τις άλλες γλώσσες του Visual Studio (C#, C++), αλλά οι περιορισμοί στον IDE δεν επιτρέπουν τη δημιουργία ορισμένων στόχων (μοντέλα Windows DLL) και σε μοντέλα νημάτων.

3.1.3 .Net Framework

Το .NET Framework (Πλαίσιο Προγραμματισμού .Net) είναι μία βιβλιοθήκη για υπολογιστές με λειτουργικό σύστημα Windows. Δίνει τη δυνατότητα στους προγραμματιστές να χρησιμοποιήσουν διάφορες εξελιγμένες λειτουργίες του και οι προγραμματιζόμενες εφαρμογές να είναι συμβατές με όλα τα συστήματα που υποστηρίζουν και έχουν εγκατεστημένο το .NET Framework ανεξαρτήτως λειτουργικού συστήματος.

Το .NET Framework σχεδιάστηκε ώστε να ικανοποιεί τρεις στόχους. Αρχικά έπρεπε να κάνει τις εφαρμογές των Windows πιο αξιόπιστες βελτιώνοντας το βαθμό της ασφάλειάς τους. Δεύτερο, να απλουστευθεί η ανάπτυξη Web εφαρμογών και υπηρεσιών (Web services), οι οποίες θα έτρεχαν και σε φορητές συσκευές. Τρίτο, σχεδιάστηκε για να παρέχει ένα σύνολο βιβλιοθηκών που θα μπορούσαν να λειτουργήσουν με πολλές γλώσσες προγραμματισμού.

Η αρχιτεκτονική του .NET Framework χωρίζεται σε 4 τμήματα όπως φαίνεται στο παρακάτω πίνακα. Το Common Language Runtime (CLR), ένα σύνολο από βιβλιοθήκες, ένα σύνολο από γλώσσες προγραμματισμού και από την ASP.NET (Πίνακας 2).

Common Language Runtime (CLR)

Βιβλιοθήκες (Class Libraries)

**Γλώσσες προγραμματισμού
(C#,VC++,VB.NET,Jscript.NET)
ASP.NET**

Πίνακας 2. Τα τμήματα του .NET Framework

Common Language Runtime

Οι γλώσσες προγραμματισμού συνήθως αποτελούνται από έναν compiler και ένα runtime περιβάλλον. Ο compiler μεταφράζει τον κώδικα σε εκτελέσιμο αρχείο που μπορεί να εκτελεστεί από τους χρήστες. Το runtime περιβάλλον παρέχει ένα σύνολο υπηρεσιών του λειτουργικού συστήματος, στον εκτελέσιμο κώδικα. Οι υπηρεσίες αυτές είναι ενσωματωμένες σε ένα επίπεδο runtime (Runtime Layer) που επιτρέπει στον κώδικα να μην ασχολείται με λεπτομέρειες χαμηλού επιπέδου του λειτουργικού συστήματος. Τέτοιες λειτουργίες μπορεί να είναι η διαχείριση μνήμης, εγγραφή και ανάγνωση αρχείων κλπ.

Πριν το .NET Framework, κάθε γλώσσα είχε και το δικό της runtime περιβάλλον. Η Visual Basic ερχόταν με το MSVBVM60.DLL, ενώ η Visual C++ με το MSVCRT.DLL. Το περιβάλλον ενσωματωνόταν με τον εκτελέσιμο κώδικα και έπρεπε να εγκατασταθεί στο μηχάνημα του χρήστη.

Το βασικό πρόβλημα με τα περιβάλλοντα αυτά, βρίσκεται στο ότι ήταν σχεδιασμένα για χρήση με μόνο μία γλώσσα. Δεν μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν λειτουργίες από το περιβάλλον μιας γλώσσας, σε μία άλλη. Έτσι, ένας από τους βασικούς στόχους του .NET Framework ήταν να ενοποιήσει τα runtime περιβάλλοντα έτσι ώστε οι προγραμματιστές να μπορούν να χρησιμοποιούν μόνο ένα περιβάλλον. Η λύση που δόθηκε ήταν η Common Language Runtime (CLR). Η CLR παρέχει δυνατότητες διαχείρισης μνήμης, ασφάλειας, διαχείρισης λαθών κ.α. για κάθε γλώσσα που δουλεύει με το .NET Framework.

Η CLR επίσης επιτρέπει στις γλώσσες να συνεργάζονται μεταξύ τους. Μπορεί για παράδειγμα να δεσμευτεί ένα κομμάτι μνήμης με κώδικα γραμμένο στην Visual Basic .Net και το ίδιο κομμάτι να ελευθερωθεί με κώδικα γραμμένο σε άλλη γλώσσα όπως η C#.

.NET Class Libraries

Οι προγραμματιστές αρέσκονται στο να δουλεύουν με κώδικα που ήδη έχει δοκιμαστεί και φαίνεται να λειτουργεί, όπως για παράδειγμα το Win32 API και οι βιβλιοθήκες MFC. Η επαναχρησιμοποίηση κώδικα ήταν στόχος της προγραμματιστικής κοινότητας, από πολύ παλιά. Πολλές γλώσσες είχαν πρόσβαση σε κομμάτια κώδικα δοκιμασμένα, έτοιμα για εκτέλεση. Οι προγραμματιστές που χρησιμοποιούσαν την Visual C++ είχαν επωφεληθεί από βιβλιοθήκες όπως η Microsoft Foundation Classes (MFC) που τους επέτρεπαν να δημιουργήσουν εφαρμογές Windows εύκολα και γρήγορα. Ωστόσο, το ότι οι βιβλιοθήκες αυτές ήταν προορισμένες για μία μόνο γλώσσα σήμαινε ότι δεν μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν με καμία άλλη γλώσσα.

Το .Net Framework παρέχει πολλές κλάσεις για να βοηθήσει τους προγραμματιστές στην επαναχρησιμοποίηση κώδικα. Οι βιβλιοθήκες .Net Class Libraries περιέχουν κώδικα για προγραμματιστικά θέματα όπως νήματα, εγγραφή/ανάγνωση αρχείων, υποστήριξη βάσεων δεδομένων, μετατροπή σε XML, δομές δεδομένων όπως στοίβες και ουρές κλπ. Το καλύτερο σημείο βέβαια είναι το ότι η βιβλιοθήκη είναι διαθέσιμη σε κάθε γλώσσα που λειτουργεί με το .Net Framework.

.NET Γλώσσες προγραμματισμού

Το .NET Framework παρέχει ένα σύνολο εργαλείων για να βοηθήσει στην κατασκευή κώδικα που λειτουργεί με αυτό. Η Microsoft παρέχει ένα σύνολο γλωσσών που είναι ήδη συμβατές με το .NET. Η C# είναι μία από αυτές. Επίσης δημιουργήθηκαν νέες εκδόσεις της Visual Basic και της Visual C++ όπως και μία νέα έκδοση της Jscript.NET. Ένα πολύ σημαντικό στοιχείο είναι ότι οι συμβατές γλώσσες με το .NET δεν είναι αποκλειστικά της Microsoft, αφού η εταιρία έχει δημοσιεύσει πλήρης τεκμηρίωση που δείχνει το πώς οι κατασκευαστές γλωσσών μπορούν να κάνουν τις γλώσσες τους συμβατές με το .NET, και διάφοροι κατασκευαστές το επιχείρησαν όπως η COBOL και η Perl. Υπάρχουν αυτή τη στιγμή πάνω από 20 γλώσσες τρίτων κατασκευαστών που μπορούν και λειτουργούν στο περιβάλλον .NET Framework.

ASP.NET

Το Internet αρχικά δημιουργήθηκε για την παροχή στατικού περιεχομένου στους Web browsers. Το Active Server Pages (ASP) δημιουργήθηκε από τη Microsoft για να προσθέσει δυναμικές ιδιότητες στις web σελίδες. Αυτό το πέτυχε με προγραμματισμό πίσω από την web σελίδα, κυρίως σε γλώσσα VB Script. Όταν οι χρήστες επισκέπτονταν ένα site τους ζητούνταν να επιβεβαιώσουν κάποιες πληροφορίες (είτε χειροκίνητα είτε αυτοματοποιημένα) και στη συνέχεια ένα script δημιουργούσε τη σελίδα ανάλογα με τα στοιχεία που εισήγαγε ο χρήστης.

Η ASP.NET βελτιώνει κατά πολύ την αρχική ASP. Με την ASP το HTML και το script συνυπήρχαν στο ίδιο έγγραφο. Με την ASP.NET το script και το HTML υπάρχουν σε διαφορετικά έγγραφα.

3.2 Υλικά μέσα Η/Υ (Hardware)

Για την δημιουργία του Μοντέλου χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρονικός υπολογιστής (laptop) με τα εξής χαρακτηριστικά:

Επεξεργαστής	Intel Core 2 Duo CPU 2.50 GHz
Μνήμη RAM	4 GB of DDR2 667 MHz memory
Σκληρός Δίσκος	320 GB - Serial ATA-150 - 5400 rpm
Κάρτα Γραφικών	NVIDIA GeForce 8600M GT - 512 MB
Οθόνη	17" WXGA+ high-brightness (200-nit) Acer CrystalBrite™ TFT LCD, 1440 x 900 pixel resolution

Πίνακας 3. Χαρακτηριστικά Η/Υ.

Τα χαρακτηριστικά αυτά του υπολογιστή ήταν σαφώς καλύτερα από τις ελάχιστες απαιτήσεις της Visual Basic.Net οι οποίες δίνονται στον Πίνακα 4. Παρόλα αυτά η χρήση ενός δυνατότερου συστήματος ενδείκνυται για την εύρυθμη λειτουργία του περιβάλλοντος εργασίας.

Οι ελάχιστες απαιτήσεις που απαιτεί η Visual Basic.Net είναι:

Επεξεργαστής	Intel Core CPU 1,6 GHz
Μνήμη RAM	1 GB (32 Bit) or 2 GB (64 Bit) RAM
Σκληρός Δίσκος	3GB διαθέσιμο χώρο
Κάρτα Γραφικών	Ικανή για DirectX 9
Οθόνη	Υποστηριζόμενη ανάλυση το λιγότερο 1024 x 768 pixels

Πίνακας 4. Απαιτήσεις Visual Basic.Net.

3.3 Μοντέλο

Το μοντέλο αυτό υπολογίζει τον ημερήσιο ακαθάριστο ρυθμό αφομοίωσης CO₂ από φυτά μεγάλης καλλιέργειας για κλειστή φυλλοστοιβάδα, στην Ελλάδα. Πιο συγκεκριμένα υπολογίζει τον ημερήσιο ρυθμό αφομοίωσης για καλλιέργειες όπως βαμβάκι, σιτάρι, καλαμπόκι, βρώμη, ηλιάνθος, κριθάρι, μίσχανθος, σόργο.

3.3.1 Ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα

Η συνολική ημερήσια ακτινοβολία του ήλιου (AVRAD), που φτάνει στην επιφάνεια της γης είναι μία συνάρτηση της ημερήσιας προσπίπτουσας ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα (DSO) και της ατμοσφαιρικής μεταφοράς (ATMTR).

$$AVRAD = DSO \cdot ATMTR \quad [\text{J m}^{-2} \text{d}^{-1}] \quad (1)$$

$$ATMTR = a + b \cdot n / \text{DAYL} \quad [-] \quad (2)$$

Η ατμοσφαιρική μεταφορά είναι μία συνάρτηση της πραγματικής διάρκειας ηλιοφάνειας (n), του μήκους της ημέρας (DAYL) και των σταθερών (a,b). Για την Ελλάδα τα a & b ισούνται με 0,2 και 0,56 αντίστοιχα. Η καθημερινή συνολική αφομοίωση (DSO), εξαρτάται από την Ιουλιανή ημέρα του χρόνου (t_d), το ολοκλήρωμα του ημιτόνου της ηλιακής ανύψωσης (β) και την ηλιακή σταθερά SC (1367 W m⁻²) (Εξισ. 3).

$$DSO = SC \cdot \sin(1 + 0.033 \cos(2\pi(t_d - 10)/365)) \cdot \int_0^{\text{DAYL}} \sin \beta dt \quad [\text{W m}^{-2}] \quad (3)$$

$$\sin \beta = s \sin + c \cos \cdot \cos(2\pi(t_h - 12)/24) \quad [-] \quad (4)$$

sin(β), ημίτονο της ηλιακής ανύψωσης.

(t_h), ηλιακός χρόνος σε ώρες.

(s sin), η εποχή - εξαρτώμενη από την ηλιακή μετατόπιση σε σχέση με τον ισημερινό.

(c cos), η εποχή - εξαρτώμενη από το πλάτος της ημιτονοειδούς ανύψωσης.

Οι ακριβείς εκφράσεις των $ssin$ και $ccos$ είναι:

$$ssin = \sin \lambda \sin \delta \quad [-] \quad (5)$$

$$ccos = \cos \lambda \cos \delta \quad [-] \quad (6)$$

$$\sin \delta = -\sin(\pi 23.45/180) \cos(2\pi(t_d + 10)/365) \quad [-] \quad (7)$$

$$\cos \delta = \sqrt{1 - \sin \delta \sin \delta} \quad [-] \quad (8)$$

λ , γεωγραφικό πλάτος σε μοίρες.

δ , η κλίση του ήλιου σε σχέση με τον ισημερινό.

Η αστρονομική διάρκεια της ημέρας υπολογίζεται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο (Εξισ. 9).

$$DAYL = 12[1 + (2/\pi)\arcsin(ssin/ccos)] \quad [h] \quad (9)$$

3.3.2 Διάχυτη και άμεση ακτινοβολία.

Η ηλιακή ακτινοβολία που βρίσκεται στην ατμόσφαιρα της γης διαιρείται σε άμεση, η οποία προέρχεται απ' ευθείας από την κατεύθυνση του ήλιου και σε διάχυτη η οποία προέρχεται από πολλές κατευθύνσεις ταυτόχρονα. Οι C.J.S Spitters (1986) απέδειξαν ότι υπάρχει συσχέτιση μεταξύ της ατμοσφαιρικής μεταφοράς και το κλάσμα της διάχυτης ακτινοβολίας, σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις.

$$FRDIF/S = 1 \quad \text{for} \quad t_a < 0.07$$

$$FRDIF/S = 1 - 2.3(t_a - 0.7)^2 \quad \text{for} \quad 0.07 \leq t_a < 0.35$$

$$FRDIF/S = 1.33 - 1.46t_a \quad \text{for} \quad 0.35 \leq t_a < 0.75$$

$$FRDIF/S = 0.23 \quad \text{for} \quad 0.75 \leq t_a$$

3.3.3 Φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία.

Φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία (PAR) είναι η ακτινοβολία που μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα φυτά (300-3000nm) και αποτελεί τη μισή της συνολικής ακτινοβολίας που δέχεται/υπάρχει στην γη. Η στιγμιαία ροή της δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$PAR = 0.5 S \sin' \beta / \int_0^{DAYL} \sin' \beta dt \quad [J m^{-2} s^{-1}] \quad (10)$$

Αντί του ημιτόνου της ηλιακής ανύψωσης $\sin(\beta)$, χρησιμοποιείται ένας διορθωμένος τύπος λόγω της χαμηλότερης ατμοσφαιρικής μετάδοσης ($\sin'(\beta)$) που παρατηρείται σε χαμηλότερα ηλιακά υψόμετρα, λαμβάνοντας υπόψη την χαμηλότερη μετάδοση στα άκρα της ημέρας, λόγω σύννεφων αλλά και της μεγαλύτερης απόστασης που πρέπει η ακτινοβολία διανύσει.

Τα κλάσματα της διάχυτης (PARDIF) και της άμεσης ακτινοβολίας (PARDIR) υπολογίζονται με βάση το συντελεστή διάχυτης ακτινοβολίας FRDIF (Εξισ. 11 and 12).

$$PARDIF = 0.5 \cdot SC \cdot \sin \beta \cdot FRDIF \cdot ATMTR \quad [J m^{-2} s^{-1}] \quad (11)$$

$$PARDIR = PAR - PARDIF \quad [J m^{-2} s^{-1}] \quad (12)$$

3.3.4 Ακτινοβολία μέσα στη φυλλοστοιβάδα

Η PAR εισερχόμενη στη φυλλοστοιβάδα μειώνεται εκθετικά όπως δείχνει η εξίσωση 13.

$$PAR_L = PAR_o(1 - \rho)e^{-kLAI_L} \quad [J m^{-2} s^{-1}] \quad (13)$$

Όπου PAR_L είναι η φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία σε βάθος L στη φυλλοστοιβάδα μετρούμενο σε μονάδες LAI, PAR_o είναι η PAR στην κορυφή της φυλλοστοιβάδας ($J m^{-2} s^{-1}$), LAI_L η τιμή του δείκτη φυλλικής επιφάνειας σε βάθος L από την κορυφή της φυλλοστοιβάδας ($ha (leaf) ha^{-1}(ground)$), ρ ο συντελεστής ανάκλασης της φυλλοστοιβάδας(-) και k ο συντελεστής μείωσης της PAR (-).

Η PAR που εισέρχεται στη φυλλοστοιβάδα διαιρείται σε τρεις συνιστώσες, κάθε μια από τις οποίες ακολουθεί φθίνουσα πορεία που εκφράζεται με έναν διαφορετικό συντελεστή μείωσης, k . Οι τρεις συνιστώσες είναι η άμεση ακτινοβολία VIST, η διάχυτη VISDF και η άμεση συνιστώσα της άμεσης ροής VISD. Η VISD εκφράζει την άμεση ακτινοβολία που περνά ανεμπόδιστη σε μεγαλύτερο βάθος της φυλλοστοιβάδας. [Goudriaan, (1977)].

$$VISDF = (1 - REFS) \times PARDIF \times KDIF \times e^{-KDIF \times LAI} \quad [Jm^{-2}(leaf)s^{-1}] \quad (14)$$

$$VIST = (1 - REFS) \times PARDIR \times KDIRT \times e^{-KDIRT \times LAI} \quad [Jm^{-2}(leaf)s^{-1}] \quad (15)$$

$$VISD = (1 - SCV) \times PARDIR \times KDIRBL \times e^{-KDIRBL \times LAI} \quad [Jm^{-2}(leaf)s^{-1}] \quad (16)$$

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

$$KDIF = 0.8 \times \sqrt{1 - SCV} \quad SCV = 0.2 \quad (18)$$

$$KDIRBL = \frac{0.5}{\sin(B)} \quad (19)$$

$$KDIRT = KDIRBL \times \sqrt{1 - SCV} \quad (20)$$

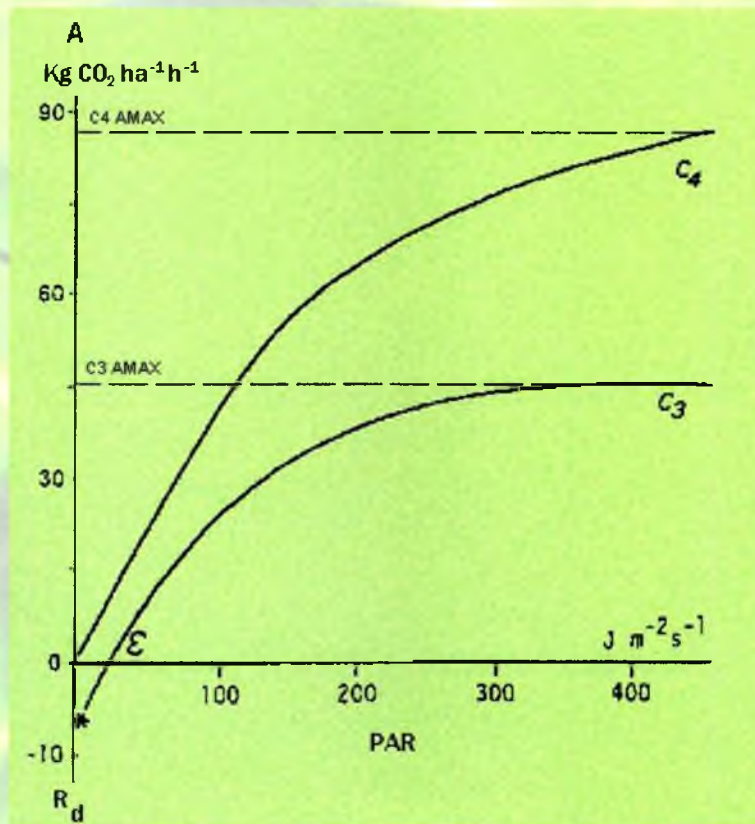
Η αντανάκλαση της ακτινοβολίας εισέρχεται στις εξισώσεις από το συντελεστή αντανάκλασης (REFS) και δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις.

$$REFH = \frac{1 - \sqrt{1 - SCV}}{1 + \sqrt{1 - SCV}} \quad (21)$$

$$REFS = REFH \times \frac{1}{0.5 + \sin(B)} \quad (22)$$

3.3.5 Φωτοσύνθεση ενός φύλλου.

Οι στιγμιαίες ροές της ακτινοβολίας μέσα στην φυλλοστοιβάδα μετατρέπονται σε φωτοσύνθεση με τη χρήση της καμπύλης φωτός-φωτοσύνθεσης ενός φύλλου, η οποία είναι διαφορετική για κάθε είδος φυτού.



Εικόνα 10. Καμπύλη φωτός-φωτοσύνθεσης

Η γενική εξίσωση (Εξισ. 23) της καμπύλης φωτός φωτοσύνθεσης δίνεται από τον τύπο:

$$A = AMAX \left(1 - e^{\frac{-eff \cdot PAR}{AMAX}} \right) \quad [\text{kg}(\text{CO}_2) \text{ ha}^{-1} (\text{leaf}) \text{ h}^{-1}] \quad (23)$$

Οι κύριες παράμετροι που χαρακτηρίζουν την καμπύλη είναι η αρχική κλίση της καμπύλης, γνωστή ως αρχική αποτελεσματικότητα (eff), ο ρυθμός αναπνοής στο σκοτάδι R_d , και ο μέγιστος ρυθμός καθαρής αφομοίωσης (A) σε μεγάλη ένταση κορεσμού φωτός, AMAX. Οι μέγιστοι ρυθμοί αφομοίωσης 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 .

3.3.6 Αφομοίωση φυλλοστοιβάδας

Ο ρυθμός αφομοίωσης ανά μονάδα φυλλικής επιφάνειας μέσα στη φυλλοστοιβάδα, είναι το άθροισμα του ρυθμού αφομοίωσης των σκιασμένων και ηλιόλουστων φύλλων. Η αφομοίωση προκύπτει χρησιμοποιώντας την καμπύλη φωτός-φωτοσύνθεσης και υπολογίζοντας την ποσότητα της ακτινοβολίας που φτάνει σε κάθε μια κατηγορία φύλλων. Το κλάσμα των ηλιόλουστων φύλλων δίνεται από τη σχέση 24:

$$FSLLA = e^{-KDIRBL \cdot LAI} \quad [-] \quad (24)$$

και η αφομοίωσή τους από τη σχέση 25.

$$FGRSUN = AMAX \times \left[1 - (AMAX - FGRSH) \times \frac{\left(1 - e^{-\frac{VISPP \times EFF}{AMAX}} \right)}{EFF - VISPP} \right] \quad kg(CO_2)ha^{-1}h^{-1} \quad (25)$$

Η αποροφούμενη ακτινοβολία από τα σκιασμένα φύλλα είναι το άθροισμα της διάχυτης ακτινοβολίας (VISDF) και του διάχυτου μέρους της άμεσης ακτινοβολίας VIST-VISD και η αφομοίωση δίνεται πάλι με τη χρήση της καμπύλης φωτός-φωτοσύνθεσης (Εξισ. 27).

$$VISSHD = VISDF + VIST - VISD \quad [Jm^{-2}(φύλλου)s^{-1}] \quad (26)$$

$$FGRSH = AMAX \times \left(1 - e^{-\frac{VISSHD \times EFF}{AMAX}} \right) \quad [kg(CO_2)ha^{-1}h^{-1}] \quad (27)$$

Το ποσοστό αφομοίωσης ανά μονάδα φυλλικής 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:

$$FGL = FSLLA \times FGRSUN + (1 - FSLLA) \times FGRSH \quad [kg(CO_2)ha^{-1}h^{-1}] \quad (28)$$

3.3.7 Ημερήσια αφομοίωση

Ο ημερήσιος ρυθμού αφομοίωσης της καλλιέργειας υπολογίζεται ολοκληρώνοντας τη στιγμιαία αφομοίωση ως προς LAI και ως προς τη διάρκεια της ημέρας. Η μέθοδος ολοκλήρωσης που χρησιμοποιείται είναι αυτή 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:

$$LAIC(I) = 0.5 \times LAI + I \times LAI \times \sqrt{0.15}, \text{ και} \quad (29)$$

$$HOUR(I) = 12 + DAYL \times 0.5 \times (0.5 + I \times \sqrt{0.15}) \quad I = -1,0,1 \quad (30)$$

Η συνολική αφομοίωση φυλλοστοιβάδας στις επιλεγμένες στιγμές της ημέρας δίνεται από τη σχέση 31:

$$FGROS(I) = (FGL(-1) + 1.6 \times FGL(0) + FGL(1)) \times \frac{LAI}{3.6} \quad [kg(CO_2)ha^{-1}d^{-1}] \quad (31)$$

Ενώ η συνολική αφομοίωση της ημέρας δίνεται από τη σχέση 32 που παρουσιάζει την ολοκλήρωση της στιγμιαίας αφομοίωσης της φυλλοστοιβάδας για τη διάρκεια της ημέρας.

$$FGC = (FGROS(-1) + 1.6 \times FGROSS(0) + FGROS(1)) \times \frac{DAYL}{3.6} \quad [kg(CO_2)ha^{-1}d^{-1}] \quad (32)$$

3.4 Προγραμματισμός μοντέλου στην Visual Basic.

Οι μαθηματικές εξισώσεις του μοντέλου προγραμματίστηκαν στη γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic. Η οργάνωση του έγινε σε προγραμματιστικές ενότητες (ρουτίνες-subs) με τη κάθε μια να εκτελεί κάποιες παρεμφερείς εργασίες έτσι ώστε να είναι κατανοητή η δομή του προγράμματος από τον αναγνώστη και να εκτελείται απρόσκοπτα από τον μεταγλωττιστή της γλώσσας. Παρακάτω παρουσιάζονται οι είσοδοι και οι έξοδοι της κάθε μιας ρουτίνας καθώς και οι λειτουργίες που εκτελούν.

ASTRO

Υπολογίζει την αστρονομική διάρκεια ημέρας και το ολοκλήρωμα του ημιτόνου της ηλιακής ανύψωσης.

TOTRAD

Υπολογίζει την ηλιακή σταθερά (SC), την ολική ημερήσια ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα (AVRAD), την ατμοσφαιρική διαπερατότητα (ATMTR) και το κλάσμα του διάχυτου φωτός στην ατμόσφαιρα (FRDIF).

RADIAT

Υπολογίζει το άμεσο και το διάχυτο κλάσμα της στιγμιαίας φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα.

ASSIM

Υπολογίζει την στιγμιαία άμεση και διάχυτη φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία, καθώς και το κλάσμα της άμεσης φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας, μέσα στη φυλλοστοιβάδα. Υπολογίζει το ποσοστό ηλιόλουστων και σκιασμένων φύλλων, καθώς και το ποσό της ακτινοβολίας που φτάνει σε κάθε ένα απ αυτά. Τέλος πραγματοποιεί ολοκλήρωση Gauss της ακτινοβολίας σε όλο το βάθος της φυλλοστοιβάδας, για μια συγκεκριμένη στιγμή της ημέρας, υπολογίζοντας την αφομοίωση της φυλλοστοιβάδας, χρησιμοποιώντας την καμπύλη ακτινοβολίας – φωτοσύνθεσης ενός φύλλου.

TOTASS

Υπολογίζει την συνολική ημερήσια ακαθάριστη αφομοίωση της φυλλοστοιβάδας εκτελώντας μία ολοκλήρωση Gauss για όλη τη διάρκεια της ημέρας.

Λογικό διάγραμμα μοντέλου



Είσοδοι και Έξοδοι Ρουτινών

Ρουτίνα	Είσοδος	Έξοδος
ASTRO	DAY , LAT	DAYL
TOTRAD	DAYL, SD	AVRAD, ATMTR, FRDIF, SC
TOTASS	DAYL,FGROS	DTGA
Radiat	Hour, SC, FRDIF, AVRAD, ATMTR	PAR, PARDIF, PARDIR
ASSIM	VISSD, VIST,VISDF,VISSHD, FGRSH, VISPP, FSLLA	FGROS

Πίνακας 5, για περισσότερες λεπτομέρειες ανατρέξτε στο παράρτημα.

3.5 Περιβάλλον εργασίας μοντέλου – Εφαρμογή Η/Υ

Με βάση το μοντέλο αυτό ο χρήστης μπορεί να υπολογίσει

Ημερήσια
Αφομοίωση

Μηνιαία
Αφομοίωση

3.5.1 Είσοδοι - Έξοδοι Μοντέλου

Οι είσοδοι που απαιτούνται από τον χρήστη για τη λειτουργία του μοντέλου είναι η Ιουλιανή ημέρα του έτους (DAY), το είδος της καλλιέργειας, η διάρκεια ηλιοφάνειας (SD), το γεωγραφικό πλάτος την περιοχής στην οποία έχει εγκατασταθεί η καλλιέργειά (LAT). Η επιλογή του Γεωγραφικού Πλάτους μπορεί να γίνει και από μια λίστα ελληνικών πόλεων.

Έξοδος του μοντέλου είναι η διάρκεια ημέρας (DAYL) σε ώρες (h), η διαπερατότητα της ατμόσφαιρας (ATMTR) (-), η ημερήσια αφομοίωση CO₂ (DTGA) σε kg(CO₂)h⁻¹d⁻¹, και η ολική ημερήσια ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα (AVRAD) σε J.

Είσοδοι	Έξοδοι
DAY	DAYL
LAT	ATMTR
SD	DTGA
	AVRAD

3.5.2 Ημερήσια αφομοίωση

Βήμα 1°

- Για την ημερήσια αφομοίωση, ο χρήστης πρέπει να εισάγει τιμές στα :
DAY, LAT, SD

	D	M
DAY	-	0
LAT	40	Περιοχή
AMAX	75	Καλλιέργεια
LAI	6	
SD	1	

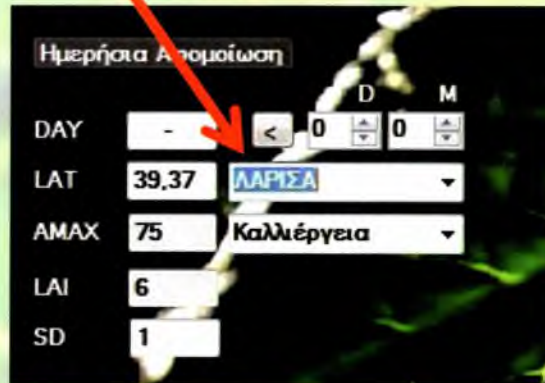
- Η μεταβλητή DAY παίρνει τιμές από 1 - 365 και για να μπορέσει ο χρήστης να την υπολογίσει μπορεί να δώσει τιμές στα κουτιά "D" (ημέρα) και "M" (μήνας) και στην συνέχεια να πιέσει το κουμπί "<".

	D	M
DAY	221	8
LAT	40	Περιοχή
AMAX	75	Καλλιέργεια
LAI	6	
SD	1	

Για παράδειγμα, εάν θέλει να υπολογίσει αφομοίωση για την ημέρα 25/8/2012 τότε πρέπει να βάλει όπου 'D' = 25 και όπου 'M' = 8 και στην συνέχεια να πιέσει το κουμπί "<" για να πάρει ως αποτέλεσμα την ημέρα 238.

- Η επιλογή 'Περιοχή' παρέχει στο χρήστη προεπιλεγμένες τιμές γεωγραφικού πλάτους για συγκεκριμένες περιοχές.

Συνεπώς η μεταβλητή LAT παίρνει τιμή αυτόματα αναλόγως την περιοχή που έχει επιλέξει ο χρήστης.

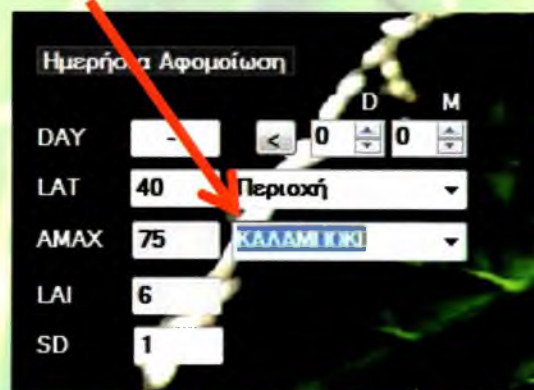


Ημερήσια Αφομοίωση

DAY	-	<	0	0
LAT	39.37		ΛΑΡΙΣΑ	
AMAX	75		Καλλιέργεια	
LAI	6			
SD	1			

- Η επιλογή 'Καλλιέργεια' παρέχει συγκεκριμένες τιμές 'AMAX' για συγκεκριμένες καλλιέργειες.

Συνεπώς η μεταβλητή AMAX παίρνει τιμή αυτόματα αναλόγως την καλλιέργεια που έχει επιλέξει ο χρήστης



Ημερήσια Αφομοίωση

DAY	-	<	0	0
LAT	40		Περιοχή	
AMAX	75		ΚΑΛΑΜΙΚΟ	
LAI	6			
SD	1			

Βήμα 2°

- Ο χρήστης αφού δώσει τιμές σωστές σε όλα τα παραπάνω θα πρέπει να πιάσει το κουμπί 'ΑΦΟΜΟΙΩΣΗ' για να πάρει τα αποτελέσματα.



ΑΦΟΜΟΙΩΣΗ

Clear

- Ο χρήστης μπορεί να κάνει απαληφή όλων των κελιών με την επιλογή 'Clear'.



3.5.3 Μηνιαία αφομοίωση

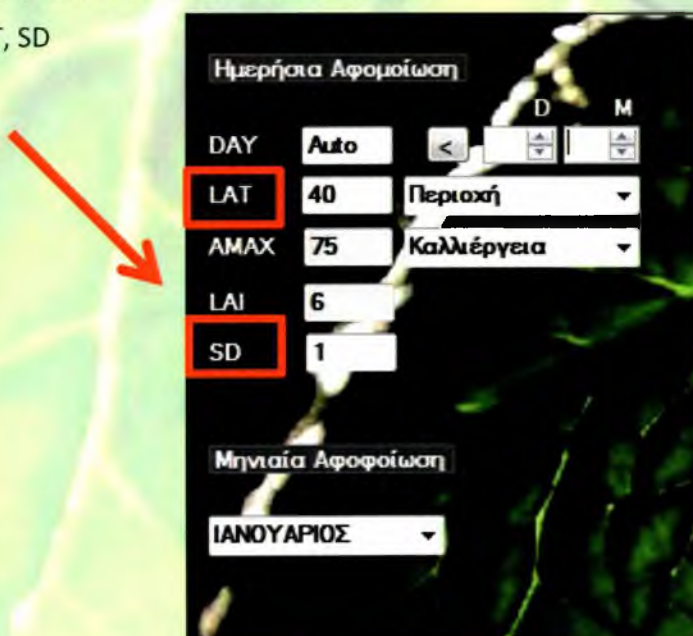
Βήμα 1°

Ο χρήστης πρέπει πρώτα να επιλέξει τον μήνα που τον ενδιαφέρει



Βήμα 2°

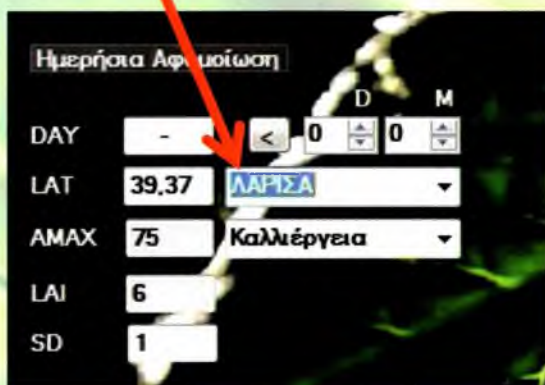
- Ο χρήστης πρέπει να δώσει τιμές στα :
LAT, SD



Η μεταβλητή 'DAY' αλλάζει σε 'Auto'

- Η επιλογή 'Περιοχή' παρέχει στο χρήστη προεπιλεγμένες τιμές γεωγραφικού πλάτους για συγκεκριμένες περιοχές.

Συνεπώς η μεταβλητή LAT παίρνει τιμή αυτόματα αναλόγως την περιοχή που έχει επιλέξει ο χρήστης.

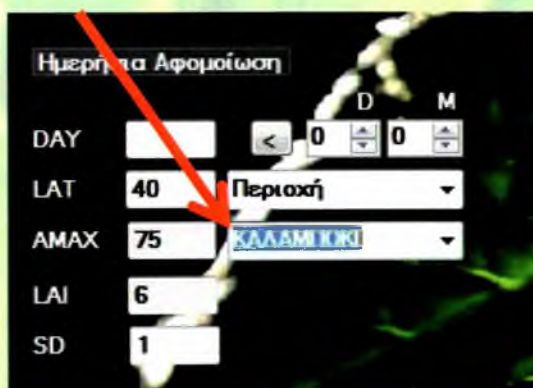


Ημερήσια Αφομοίωση

DAY	-	<	0	0
LAT	39.37	ΠΕΡΙΟΧΗ	▼	
AMAX	75	ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ	▼	
LAI	6			
SD	1			

- Η επιλογή 'Καλλιέργεια' παρέχει συγκεκριμένες τιμές 'AMAX' για συγκεκριμένες καλλιέργειες.

Συνεπώς η μεταβλητή AMAX παίρνει τιμή αυτόματα αναλόγως την καλλιέργεια που έχει επιλέξει ο χρήστης



Ημερήσια Αφομοίωση

DAY		<	0	0
LAT	40	Περιοχή	▼	
AMAX	75	ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ	▼	
LAI	6			
SD	1			

Βήμα 3°

- Ο χρήστης αφού δώσει τιμές σωστές σε όλα τα παραπάνω θα πρέπει να πατήσει το κουμπί 'ΑΦΟΜΟΙΩΣΗ' για να πάρει τα αποτελέσματα.



- Ο χρήστης μπορεί να κάνει απαληφή όλων των κελιών με την επιλογή 'Clear'.



3.5.4 Αποτελέσματα - Γραφήματα

Αποτελέσματα

Αποτελέσματα για την Ημέρα 2 / 9

DAYL = 12,762 (h d⁻¹)

ATMTR = 0,76(-)

AVRAD = 2,514952E+07(J m⁻² d⁻¹)

DTGA = 954,1998 (kg CO₂ ha⁻¹ d⁻¹)

Γραφήματα

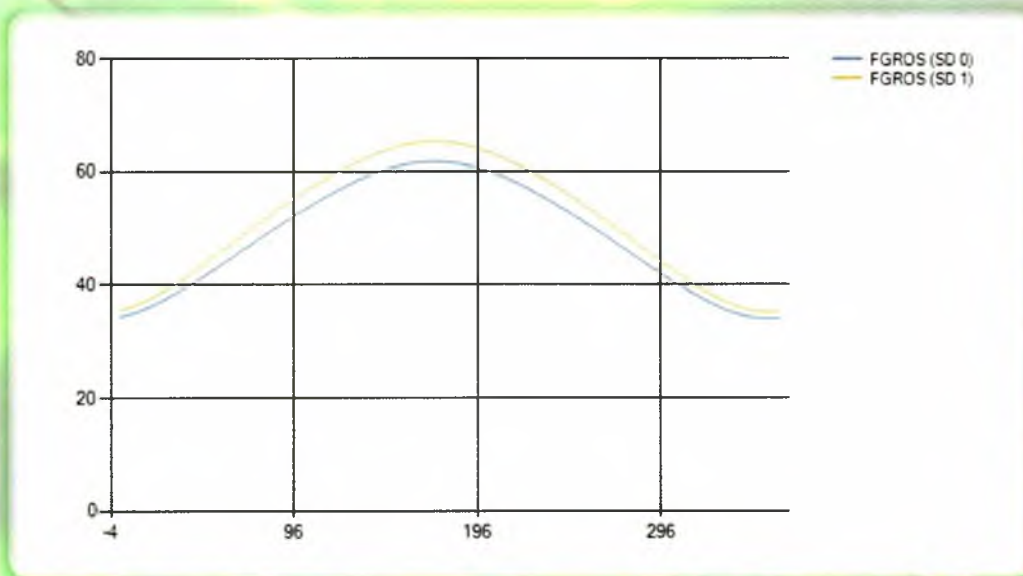
Ο χρήστης έχει στην διάθεσή του να επιλέξει για να δει 2 ειδών γραφήματα

A) Αφομοίωση ανά Ημέρα για SD (1 & 0)

B) DTGA ανά LAT (33-44) για SD (1 & 0)

Γραφήματα

- A** Αφομείωση ανά Ημέρα για SD (1 , 0)
- B** DTGA ανά LAT (33-44) για SD (1 , 0)



Γράφημα εξόδου εφαρμογής.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΧΕΙΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Παράδειγμα 1

Αφομοίωση CO₂ καλλιέργειας καλαμποκιού στην περιοχή της Λάρισας για την ημέρα 1 Σεπτεμβρίου (1/9) και για μέγιστη ηλιοφάνεια (SD = 1).

- ✓ Αρχικά πληκτρολογούμε την ημέρα «1/9» στα κουτάκια δεξιά της μεταβλητής «DAY» και πιέζουμε το κουμπί «<» (i)
- ✓ Στην συνέχεια επιλέγουμε από την επιλογή «Περιοχή» την πόλη ΛΑΡΙΣΑ (ii)
- ✓ Έπειτα προσδιορίζουμε την καλλιέργεια, που στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι το καλαμπόκι, που βρίσκεται δεξιά της μεταβλητής AMAX (iii)
- ✓ Τέλος πιέζουμε το κουμπί «Αφομοίωση» (iv)

The screenshot shows the model's input and output interface. The 'Ημερήσια Αφομοίωση' (Daily Assimilation) section includes a date selector (DAY) set to 245 (1/9), a location dropdown (LAT) set to ΛΑΡΙΣΑ, a crop dropdown (AMAX) set to ΚΑΛΑΜΠΟΚΙ, and other parameters (LAI=6, SD=1). A 'Μηνιαία Αφομοίωση' (Monthly Assimilation) section has a 'Μήνας' dropdown. The 'ΑΦΟΜΟΙΩΣΗ' (Assimilation) button is highlighted with a red box and labeled (iv). Below the inputs, the results for 'Αποτελέσματα για την Ημέρα 1 / 9' are displayed:

Variable	Value	Unit
DAYL	12.80393	(h d ⁻¹)
ATMTR	0.7600001	(-)
AVRAD	2.531361E+07	(J m ⁻² d ⁻¹)
DTGA	934.009	(kg CO ₂ ha ⁻¹ d ⁻¹)

Additional results are visible at the bottom of the screen:

Variable	Value	Unit
D10V	824'008	(μ ³ CO ₂ μ ³ μ ⁻³ d ⁻¹)
VALVD	5'221301E+03	(g μ ² s ⁻¹)
V1P1B	0'3000001	(-)
DVAL	15'80383	(μ ³ μ ⁻³ d ⁻¹)

Παράδειγμα 2

Αφομοίωση CO₂ καλλιέργειας βαμβακιού στην περιοχή της Καρδίτσας για τον μήνα Αύγουστο και για μέγιστη ηλιοφάνεια (SD = 1).

- ✓ Αρχικά επιλέγουμε τον μήνα Αύγουστο (i)
- ✓ Στην συνέχεια επιλέγουμε από την επιλογή «Περιοχή» την πόλη ΚΑΡΔΙΤΣΑ (ii)
- ✓ Έπειτα προσδιορίζουμε την καλλιέργεια, που στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι το βαμβάκι, που βρίσκεται δεξιά της μεταβλητής AMAX (iii)
- ✓ Τέλος πιέζουμε το κουμπί «Αφομοίωση» (iv)

Ημερήσια Αφομοίωση

DAY Auto < 0 0 >

LAT 39,21 ΚΑΡΔΙΤΣΑ

AMAX 50 ΒΑΜΒΑΚΙ

LAI 6

SD 1

Μηνιαία Αφομοίωση

ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ

ΑΦΟΜΟΙΩΣΗ

Clear

(i) (ii) (iii) (iv)

Αποτελέσματα Μήνα ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ

DAYL = 416,4779 h

ATMTR = 0,76

AVRAD = 8,580166E+08

DTGA = 27180,9 kg CO₂ ha⁻¹ d⁻¹

DTGA = 27180,9 kg CO₂ ha⁻¹ d⁻¹

AVRAD = 8,580166E+08

ATMTR = 0,76

DAYL = 416,4779 h

A close-up photograph of a green leaf, showing its intricate vein structure. The veins are a lighter green color, contrasting with the darker green of the leaf's surface. The veins form a complex, branching pattern across the leaf. The lighting is bright, highlighting the texture and color of the leaf. The word "Παράρτημα" is centered on the leaf in a bold, black font.

Παράρτημα

ASTRO

DAY	Ιουλιανή ημέρα έτους	[d]
DEC	Ηλιακή απόκλιση	[radians]
RAD	σταθερά μετατροπής των μοιρών σε ακτίνια	[π/180]
AOB	Βοηθητική μεταβλητή	[-]
SSIN	Βοηθητική μεταβλητή	[-]
CCOS	Βοηθητική μεταβλητή	[-]
DAYL	Διάρκεια ημέρας	[h]

TOTRAD

DSINB	Ολοκλήρωμα $\sin(B)$ για τη διάρκεια της ημέρας	$s d^{-1}$
DSINBE	Ολοκλήρωμα $\sin(B)$ διορθωμένο για χαμηλότερη ατμοσφαιρική μεταφορά σε μικρά ηλιακά ύψη	$s d^{-1}$
SC	Ηλιακή σταθερά	[$J m^{-2} s^{-1}$]
DSO	Ηλιακή ημερήσια ακτινοβολία που φθάνει στα όρια της ατμόσφαιρας	[$J m^{-2} d^{-1}$]
AVRAD	Μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα	[$J m^{-2} d^{-1}$]
ATMTR	Συντελεστής ατμοσφαιρικής διαπερατότητας	[-]
FRDIF	Κλάσμα διάχυτης ακτινοβολίας	[-]
SD	Διάρκεια ηλιοφάνειας μέσα στην ημέρα	[-]

TOTASS Fortran subroutine to calculate gross CO₂ assimilation of the crop

DTGA	Ημερήσια αφομοίωση	[$kg CO_2 ha^{-1} d^{-1}$]
Hour	Ώρα της ημέρας	[h]
AMAX	Αφομοίωση CO ₂ φύλλου σε κορεσμό φωτός	[$Kg CO_2 ha^{-1}(leaf) h^{-1}$]

RADIAT

<i>SINB</i>	Συνημίτονο ηλιακής ανύψωσης	[-]
<i>PAR</i>	Στιγμιαία ροή φωτοσυνθετικά ενεργής ηλιακής ακτινοβολίας	[W m ⁻²]
<i>PARDIF</i>	Στιγμιαία ροή διάχυτης φωτοσυνθετικά ενεργής ηλιακής ακτινοβολίας	[J m ⁻² (εδάφους) s ⁻¹]
<i>PARDIR</i>	Στιγμιαία ροή άμεσης φωτοσυνθετικά ενεργής ηλιακής ακτινοβολίας	[J m ⁻² (εδάφους) s ⁻¹]

ASSIM

<i>KDIRT</i>	Συντελεστής εξάλειψης άμεσης ακτινοβολίας	[ha(εδάφους)ha ⁻¹ (φύλλου)]
<i>KDIF</i>	Συντελεστής εξάλειψης διάχυτης ακτινοβολίας	[ha(εδάφους)ha ⁻¹ (φύλλου)]
<i>SCV</i>	Συντελεστής σκέδασης φωτός	[-]
<i>REFH</i>	Συντελεστής αντανάκλασης φωτός διάχυτης ακτινοβολία	[-]
<i>REFS</i>	Συντελεστής αντανάκλασης φωτός άμεσης ακτινοβολία	[-]
<i>KDIRBL</i>	Συντελεστής εξάλειψης άμεσου μέρους της άμεσης ακτινοβολίας	[ha(εδάφους)ha ⁻¹ (φύλλου)]
<i>FGROS</i>	Στιγμιαίος ρυθμός αφομοίωσης CO ₂ φυλλοστοιβάδας	[kg CO ₂ ha ⁻¹ h ⁻¹]
<i>LAIC</i>	Δείκτης φυλλικής επιφάνειας σε συγκεκριμένο ύψος πάνω από το έδαφος	[ha(φύλλων) ha ⁻¹ (εδάφους)]
<i>VISDF</i>	Απορροφούμενη διάχυτη ακτινοβολία ανα μονάδα φυλλικής επιφάνειας σε βάθος LAIC	[J m ⁻² (φύλλων) s ⁻¹]
<i>VIST</i>	Απορροφούμενη άμεση ακτινοβολία ανα μονάδα	[J m ⁻² (φύλλων) s ⁻¹]

φυλλικής επιφάνειας σε βάθος LAIC		
VISD	Απορροφούμενη ακτινοβολία του άμεσου μέρους της άμεσης ακτινοβολίας ανα μονάδα φυλλικής επιφάνειας σε βάθος LAIC	$[J m^{-2}(\text{φύλλων}) s^{-1}]$
VISSHD	Συνολική απορροφούμενη ακτινοβολία από σκιασμένα φύλλα ανά μονάδα φυλλικής επιφάνειας	$[J m^{-2}(\text{φύλλων}) s^{-1}]$
FGRSH	Αφομοίωση CO_2 σκιασμένων φύλλων	$[kg CO_2 ha^{-1}(\text{leaf}) h^{-1}]$
EFF	Αρχικός συντελεστής μετατροπής φωτός	$[Kg CO_2 ha^{-1}(\text{leaf}) h^{-1} (J m^{-2}(\text{leaf}) s^{-1})]$
VISPP	Απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία από φύλλα παράλληλα στις ηλιακές ακτίνες	$[J m^{-2}(\text{leaf}) s^{-1}]$
FGL	Ακαθάριστη στιγμιαία αφομοίωση φυλλοστοιβάδας	$[mg CO_2 m^{-2} s^{-1}]$
FSLLA	Κλάσμα ηλιόλουστων φύλλων	$[-]$
FGRSUN	Ρυθμός αφομοίωσης CO_2 ηλιόλουστων φύλλων	$[kg CO_2 ha^{-1}(\text{leaf}) h^{-1}]$

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

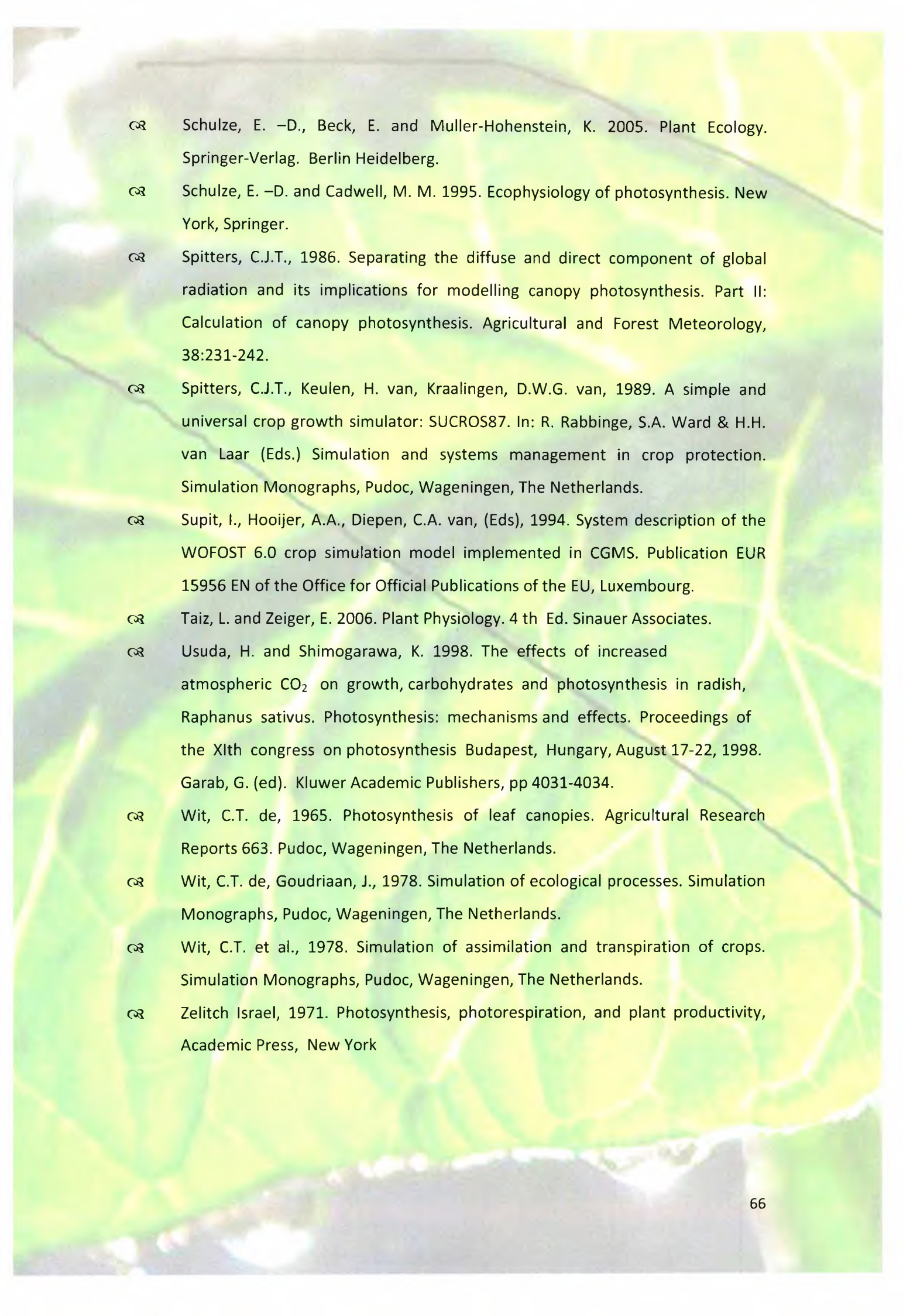
Ξένη

- ☞ A.M. Law, W.D. Kelton, 1991. Simulation Modeling and Analysis, 2nd ed., McGraw-Hill, New-York.
- ☞ Amthor, J.S., 1984. The role of maintenance respiration in plant growth. *Plant, Cell and Environment*, 7:561-569.
- ☞ Barker, H.W., 1992. Solar radioactive transfer through clouds possessing isotropic variable extinction coefficient. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 118:1145-1162.
- ☞ Bjorkman, O. 1981. Responses to different quantum flux densities. *Physiological Plant Ecology I. Responses to the physical environment. Encyclopedia of Plant Physiology, New Series. Lange, O., Nobel, P. S., Osmond, C. B. and Zeigler, H. Berlin, Springer-Verlag. 12A: 57-107.*
- ☞ Bjorkman, O. and Demmig, B. 1987. Photon yield of O₂ evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77 K among vascular plants of diverse origins. *Planta* 170 (4): 489-504.
- ☞ Boons-Prins, E.R., Koning, G.H.J. de, Diepen, C.A. van, Penning de Vries, F.W.T., 1993. Crop-specific parameters for yield forecasting across the European Community. *Simulation Reports CABO-TT, no 32. Wageningen, The Netherlands.*
- ☞ Bridge, D.W., 1976. A simulation model approach for relating effective climate to winter wheat yields on the Great Plains. *Agricultural Meteorology*, 17:185-194.
- ☞ Brinsfield, R., Yaramanoglu, M., Wheaton, F., 1984. Ground level solar radiation prediction model including cloud cover effects. *Solar Energy*, 33:493-499.
- ☞ Bristow, K., Campbell, G.S., 1984. On the relation between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 31:159-166.
- ☞ Causton, D.R., Venus, J. C., 1981. *The biometry of plant growth. Edward Arnold, London.*

- ☞ Danalatos, N., 1993. Countrified analysis of selected land used systems
- ☞ Davies, J.A., McKay, D.C., 1988. Estimating radiation from incomplete cloud data. *Solar Energy*, 41:15-18.
- ☞ Dennis, D. T. 1992. *Plant physiology, biochemistry and molecular biology*. Harlow Longman.
- ☞ Diepen, C.A. van, Koning, G.H.J. de, 1990. Crop data files for use with WOFOST Version 5.0. Not published.
- ☞ Diepen, C.A. van, Rappoldt, C., Wolf, J., Keulen, H. van, 1988. Crop growth simulation model WOFOST. Documentation version 4.1. Centre for World Food Studies, Wageningen, The Netherlands.
- ☞ Diepen, C.A. van, Wal, T. van der, 1995. Crop growth monitoring and yield forecasting at regional and national scale. In: Dallemard J.F., Vossen, P., (Eds). *Agrometeorological models: Theory and applications*. Publication EUR 16008 FR of the Office for Official Publications of the EU, Luxembourg.
- ☞ Diepen, C.A. van, Wolf, J., Keulen, H. van, 1989. WOFOST: a simulation model of crop production. *Soil Use and Management*, 5:16-24.
- ☞ Ehleringer, J. R., Cerling, T. E., Dearing, M. D., Vogelmann, T. C. and Critchley, C. 2004. A history of atmospheric CO₂ and its effects on plants, animals, and ecosystems. *Ecological studies* 177. Springer New York.
- ☞ Ehleringer, J.R., Pearcy, R.W., 1983. Variation in quantum yield for CO₂ uptake among C₃ and C₄ plants. *Plant Physiology*, 73:555-559.
- ☞ Evans, J. R. 1996. Developmental constraints on photosynthesis: effects of light and nutrition. *Advances in photosynthesis* 5. Photosynthesis and the environment. Baker, N. R. (ed). Kluwer Academic Publishers.
- ☞ Evans, J. R. 1998. Photosynthetic characteristics of fast- and slow- growing species. Inherent variation in plant growth. Physiological mechanisms ecological consequences. Lambers, Poorter, & Van Vuuren. Backhuys Publishers, Leiden. Pp 101-119.
- ☞ Farquhar, G.D., S van Caemmerer & J.A. Berry, 1980. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta*, 149:78-90.

- ☞ Goudriaan, J., 1982. Some techniques in dynamic simulation. In: F.W.T. Penning de Vries & H.H. van Laar (Eds.). Simulation of plant growth and crop production. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen, The Netherlands. pp. 66-84.
- ☞ Goudriaan, J., 1986. A simple and fast numerical method for the computation of daily totals of crop photosynthesis. *Agricultural and Forest Meteorology*, 38:249-254.
- ☞ Goudriaan, J., Laar, H.H. van, 1978. Calculation of daily totals of the gross simulation of leaf canopies. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 26:373-382.
- ☞ Hand, D.W., Wilson, J. W. and Acock, B. 1993. Effects of Light and CO₂ on Net Photosynthesis Rates of Stands of Aubergine and Amaranthus. *Annals of Botany* 71: 209-216.
- ☞ Hikosaka, K. and Terashima, I. 1995. A model for the acclimation of photosynthesis in the leaves of C3 plants to sun and shade with respect to nitrogen use. *Plant Cell and Environment* 18: 605-618.
- ☞ Hikosaka, K. and Terashima, I. 1995. A model for the acclimation of photosynthesis in the leaves of C3 plants to sun and shade with respect to nitrogen use. *Plant Cell and Environment* 18: 605-618.
- ☞ Huffaker, R. C. and Miller, B. L. 1978. Basic Life Sciences: Photosynthetic carbon assimilation. (Siegelman, H. W. and Hind, G., eds). Vol. 11, pp 139-152. Plenum Press, New York.
- ☞ K.D. Tocher, *The Art of Simulation*, English Universities Press, London, 1963.
- ☞ Lambers, H., Stuart Chapin III, F. and Pons, T. L. 2008. *Plant Physiological Ecology*. 2 nd Ed. Springer - Verlag, New York.
- ☞ Larcher, W. 2003. *Physiological Plant Ecology*. 4 th Ed. Springer, New York.
- ☞ Lawlor David W., 1993. *Photosynthesis : molecular, physiological and environmental processes*, Longman, Essex
- ☞ Lawlor, D. W. 2001. *Photosynthesis*. 3 rd Ed. BIOS Scientific Publishers Ltd.
- ☞ Loomis, R.S., Rabbinge, R., Ng, E., 1979. Explanatory models in crop physiology. *Annual Reviews Plant Physiology* 30:339-367.
- ☞ M.R. Lackner, 1962. «Toward a general Simulation Capability,» *Proceedings of the SJCC, San Francisco CA*, 1-3, 1-14.

- ☞ Marschner, H. 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. 2 nd Ed. Academic Press, London.
- ☞ Mohr, H. and Schopfer, P. 1995. Plant Physiology. Springer Berlin.
- ☞ Monteith, J.L., 1996. The quest for balance in crop modeling. *Agronomy Journal*, 88:695-697.
- ☞ Niinemets, U., Kull, O. and Tenhunen, J. D. 1998. An analysis of light effect on foliar morphology, physiology and light interception in temperate deciduous woody species of contrasting shade tolerance. *Tree Physiology* 18(10): 681-696.
- ☞ Noggle Glen Ray Fritz George J., 1983. Introductory plant physiology. Prentice-Hall, New Jersey
- ☞ Nonhebel. S., 1993. The importance of weather data in crop growth simulation models and assessment of climatic change effects. Ph.D. thesis, Wageningen Agricultural University, The Netherlands.
- ☞ Northington, D. K. and Schneider, E. L. 1996. The Botanical World. 2 nd Ed. Wm. C. Brown Publishers.
- ☞ Penning de Vries, F.W.T, Laar, H.H. van, 1982. Simulation of growth processes and the model BACROS. In: Penning de Vries, F.W.T. & H.H. van Laar (Eds.) Simulation of plant growth and crop production. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen, The Netherlands. pp. 114-135.
- ☞ Poels, R.L.H., Bijker, W., 1993. TROPFOR, a computer program to simulate growth and water use of tropical rain forests developed from the "WOFOST" programme. Wageningen University, Dept. of Soil science and geology, Wageningen, The Netherlands.
- ☞ Pulles, J.H.M., Kauffman J.H., Wolf, J., 1991. A user friendly menu and batch facility for the crop simulation model WOFOST v4.3. Supplement to WOFOST v4.1 User's Guide. Technical paper. International soil reference and information centre, Wageningen, The Netherlands.
- ☞ Ridge, I. 2002. Plants. Oxford University Press. Oxford, UK.
- ☞ Rost, T. L., Barbour, M. G., Stocking, C. R. and Murphy, T. M. 1998. Plant Biology. Wadsworth Publishing Company.
- ☞ Schapendonk, A.H.C.M., Gaastra, P., 1984. A simulation study on CO₂ concentration in protected cultivation. *Scientia Horticulturae*, 23:217-229.

- 
- ☞ Schulze, E. –D., Beck, E. and Muller-Hohenstein, K. 2005. Plant Ecology. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg.
 - ☞ Schulze, E. –D. and Cadwell, M. M. 1995. Ecophysiology of photosynthesis. New York, Springer.
 - ☞ Spitters, C.J.T., 1986. Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modelling canopy photosynthesis. Part II: Calculation of canopy photosynthesis. Agricultural and Forest Meteorology, 38:231-242.
 - ☞ Spitters, C.J.T., Keulen, H. van, Kraalingen, D.W.G. van, 1989. A simple and universal crop growth simulator: SUCROS87. In: R. Rabbinge, S.A. Ward & H.H. van Laar (Eds.) Simulation and systems management in crop protection. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen, The Netherlands.
 - ☞ Supit, I., Hooijer, A.A., Diepen, C.A. van, (Eds), 1994. System description of the WOFOST 6.0 crop simulation model implemented in CGMS. Publication EUR 15956 EN of the Office for Official Publications of the EU, Luxembourg.
 - ☞ Taiz, L. and Zeiger, E. 2006. Plant Physiology. 4 th Ed. Sinauer Associates.
 - ☞ Usuda, H. and Shimogarawa, K. 1998. The effects of increased atmospheric CO₂ on growth, carbohydrates and photosynthesis in radish, *Raphanus sativus*. Photosynthesis: mechanisms and effects. Proceedings of the XIth congress on photosynthesis Budapest, Hungary, August 17-22, 1998. Garab, G. (ed). Kluwer Academic Publishers, pp 4031-4034.
 - ☞ Wit, C.T. de, 1965. Photosynthesis of leaf canopies. Agricultural Research Reports 663. Pudoc, Wageningen, The Netherlands.
 - ☞ Wit, C.T. de, Goudriaan, J., 1978. Simulation of ecological processes. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen, The Netherlands.
 - ☞ Wit, C.T. et al., 1978. Simulation of assimilation and transpiration of crops. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen, The Netherlands.
 - ☞ Zelitch Israel, 1971. Photosynthesis, photorespiration, and plant productivity, Academic Press, New York

Ελληνική

- ☞ Δαναλάτος, Ν., 2001. Σημειώσεις μαθήματος εισαγωγή στην προσομοίωση – μοντέλα. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος
- ☞ Ζαφείρη Γ. Παπαζαφειρείου, 1999. Οι Ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη
- ☞ Ιωάννη Β. Τσέκου, 2004. Φυσιολογία φυτών, Κυριακίδη Αφοί, Θεσσαλονίκη
- ☞ Καραμπουρνιώτης Κ., Κοτζαμπάσης Ε. Ι., Κωνσταντινίδου Ι., Μανέτας Κ. Α., Ρουμπελάκη, 2003. Φυσιολογία φυτών, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Κρήτη
- ☞ Καρατάγλης Στυλιανός Σ., 1992. Φυσιολογία φυτών. Art of Text, Θεσσαλονίκη

Ηλεκτρονική

- ☞ http://www.google.gr/imgres?um=1&hl=el&sa=N&biw=1920&bih=993&tbn=isch&tbnid=nt1ufvTWi_GOhM:&imgrefurl=http://aprendavisualbasic.weebly.com/imagens.html&docid=Xvhl6KeoVYXIPM&imgurl=http://aprendavisualbasic.weebly.com/uploads/6/2/7/4/6274675/567893277_orig.png%253F1302209558&w=864&h=643&ei=CKVeULvFDImT0QX-z4HICg&zoom=1&iact=hc&vpx=823&vpy=157&dur=2405&hovh=194&hovw=260&tx=206&ty=180&sig=113858375308469501812&page=1&tbnh=149&tbnw=199&start=0&ndsp=40&ved=1t:429,r:3,s:0,i:77



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000114135