

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

Αυτοτροφική διατροφή

6.1 Αυτότροφοι – Ετερότροφοι οργανισμοί

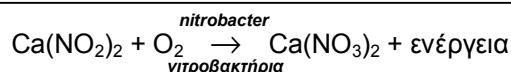
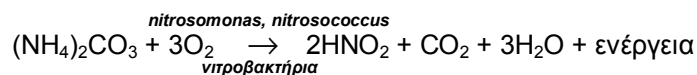
Η ζωή στον πλανήτη μας, από την εμφάνισή της, στηρίζεται στην ενέργεια του ήλιου. Από την ενέργεια αυτή, που εκπέμπεται υπό μορφή ακτινοβολίας, ένα πολύ μικρό μέρος παγιδεύεται από τους φωτοσυνθέτοντες οργανισμούς. Η φωτεινή ενέργεια που παγιδεύεται μετατρέπεται σε χημική και αποθηκεύεται σε οργανικά μόρια, τα οποία παράγουν οι οργανισμοί αυτοί μέσα από μια διαδικασία που την ονομάζουμε **φωτοσύνθεση**.

Η φωτοσύνθεση αποτελεί την πιο σημαντική μεταβολική πορεία απ' όσες γίνονται στη βίοςφαιρα. Η δέσμευση της φωτεινής ενέργειας κατά τη φωτοσύνθεση γίνεται από τη χλωροφύλλη και τις άλλες φωτοσυνθετικές χρωστικές. Με τη βοήθειά τους οι φωτοσυνθετικοί οργανισμοί συνθέτουν υδατάνθρακες (γλυκόζη), χρησιμοποιώντας απλές ανόργανες ενώσεις, όπως το διοξείδιο του άνθρακα και το νερό, που βρίσκουν άφθονες στο περιβάλλον τους.

Οι φωτοσυνθετικοί οργανισμοί ανήκουν στους **αυτότροφους** οργανισμούς, επειδή παράγουν μόνοι τους τις οργανικές ουσίες που τους είναι απαραίτητες, χρησιμοποιώντας ως πρώτες ύλες απλά μόρια ανόργανων ουσιών. Χαρακτηρίζονται γι' αυτό και ως **παραγωγοί**. Οι οργανισμοί που δεν μπορούν να συνθέσουν μόνοι τους οργανικές ενώσεις από απλές ανόργανες, αλλά είναι υποχρεωμένοι να τις προμηθεύονται έτοιμες από το περιβάλλον τους, χαρακτηρίζονται ως **ετερότροφοι**. Τους χαρακτηρίζουμε επίσης και ως **καταναλωτές**, γιατί εξασφαλίζουν την τροφή τους καταλώνοντας άλλους οργανισμούς. Ο άνθρωπος και όλα τα ζώα, οι μύκητες, πολλά βακτήρια και πολλά πρωτόζωα είναι ετερότροφοι οργανισμοί.

Ικανότητα φωτοσύνθεσης έχουν όλοι οι οργανισμοί που διαθέτουν φωτοσυνθετικές χρωστικές. Από τους ευκαρυωτικούς οργανισμούς φωτοσύνθεση γίνεται στα φυτά και στα φύκη, και από τους προκαρυωτικούς σε ορισμένα βακτήρια και στα κυανοφύκη (κυανοβακτήρια).

Ορισμένα βακτήρια έχουν τη δυνατότητα να συνθέτουν οργανικές ουσίες από ανόργανες με την ενέργεια που παίρνουν από την οξείδωση διαφόρων ανόργανων ουσιών. Οξειδώνουν τα διάφορα άλατα σιδήρου (σιδηροβακτήρια) ή τις θειούχες ενώσεις οργανικών ουσιών, που βρίσκονται σε αποσύνθεση (θειοβακτήρια). Μια σημαντική ομάδα τέτοιων οργανισμών είναι τα **νιτροβακτήρια** που ζουν στο έδαφος. Μερικά από αυτά (*Nitrosomonas*, *nitrosococcus*) εξασφαλίζουν την ενέργεια που χρειάζονται από την οξείδωση αμμωνίας, ενώ άλλα από την οξείδωση των νιτρωδών αλάτων (*nitrobacter*).



Η λειτουργία της σύνθεσης οργανικών ουσιών από μικροοργανισμούς με ενέργεια που παίρνουν από την οξείδωση ανόργανων αλάτων ονομάζεται **χημειοσύνθεση**.

Οι ετερότροφοι οργανισμοί παίρνουν τις οργανικές τους ουσίες με τρεις τρόπους, που ονομάζονται τύποι ετερότροφης διατροφής και είναι:

1. **Ολοζωική:** διάσπαση της τροφής με πέψη, όπως συμβαίνει σε όλα τα ζώα.
2. **Σαπροφυτική:** απορρόφηση οργανικών ουσιών από νεκρούς ιστούς ή από προϊόντα της διάσπασής τους. Χαρακτηριστικά σαπρόφυτα είναι πολλοί μύκητες και βακτήρια. Αυτοί οι οργανισμοί λέγονται και αποικοδομητές.
3. **Παρασιτική:** πρόσληψη τροφής από άλλο ζωντανό οργανισμό, το ξενιστή, χωρίς κατ' ανάγκη να το σκοτώνει. Χαρακτηριστικά παράσιτα είναι διάφορα βακτήρια, ορισμένοι μύκητες, οι ταινίες, οι αφίδες, οι κοριοί.

Στη συνέχεια θα μελετήσουμε την πηγή ενέργειας που τροφοδοτεί τη φωτοσύνθεση, δηλαδή, την ηλιακή ενέργεια.

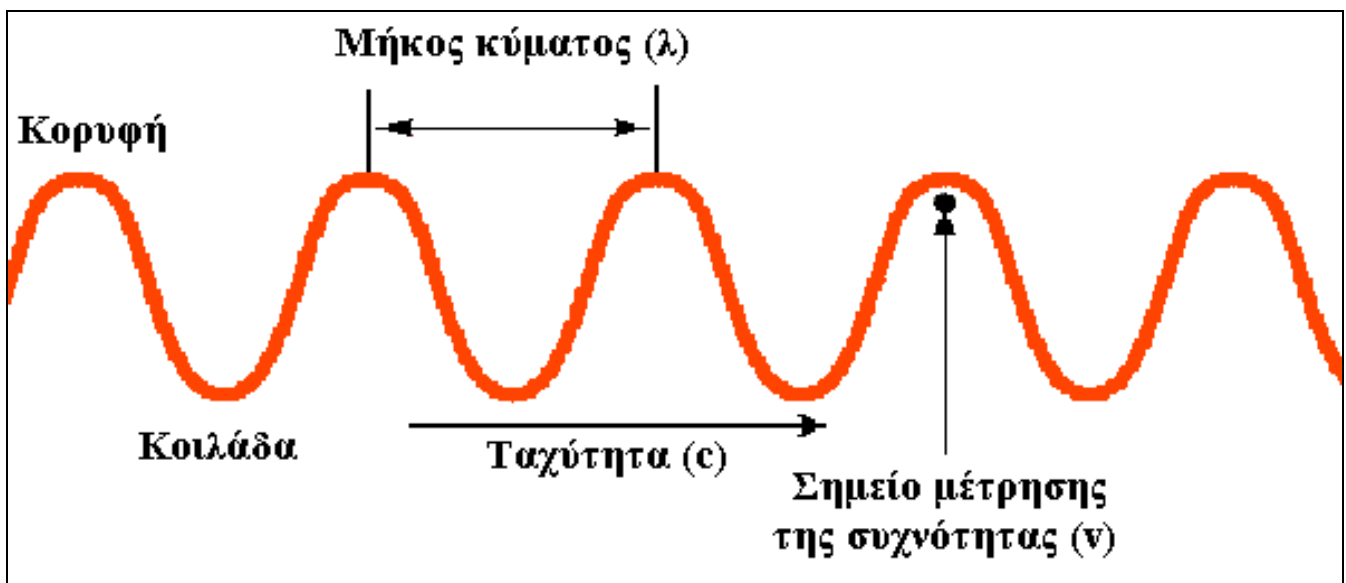
6.2 Ορατό φως και φωτοσυνθετικές χρωστικές

- Ηλιακή ενέργεια

Το ηλιακό φως παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη φωτοσύνθεση, επειδή χρησιμεύει ως πηγή ενέργειας. Η ακτινοβολία που προέρχεται από τον ήλιο, όμως, δεν είναι πάντοτε η ίδια. Στην πραγματικότητα υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία από **διάφορες ακτινοβολίες**, οι οποίες μπορεί να διαφέρουν:

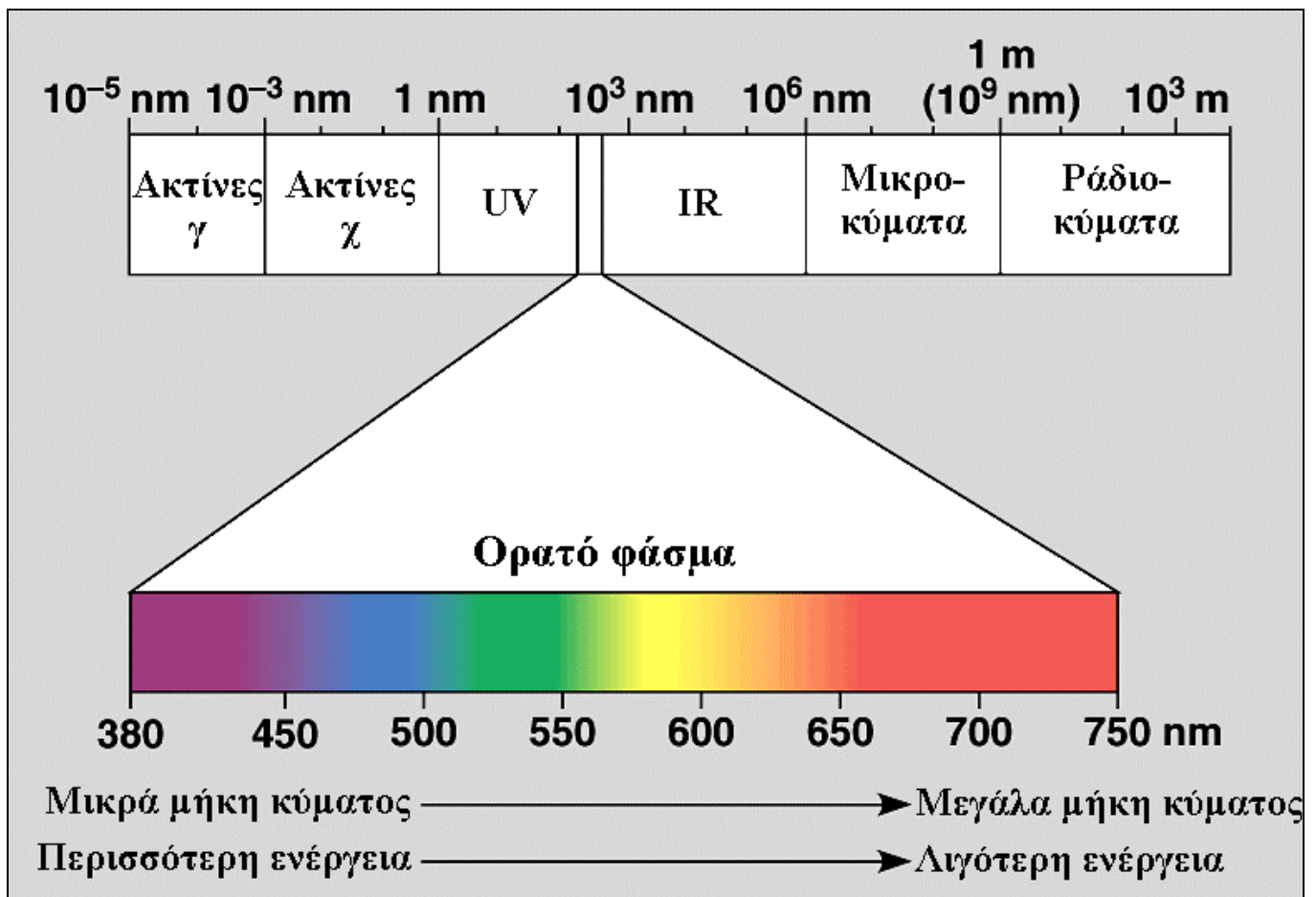
- στην ένταση (φωτεινότητα)
- στο χρώμα (μήκος κύματος)
- στη διάρκεια (μπορεί να είναι συνεχόμενη για μικρές ή για μεγάλες περιόδους).

Το φως είναι μια μορφή ενέργειας (ηλεκτρομαγνητική). Εκπέμπεται κατά ποσότητες που ονομάζονται φωτόνια ή κβάντα. Η διάδοσή του γίνεται με κύματα. Μήκος κύματος (λ) είναι η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών ενός κύματος. Συχνότητα (ν) είναι ο αριθμός των ράχων που διέρχονται από ένα σημείο, σε ένα δευτερόλεπτο. Η ταχύτητα με την οποία κινείται το σύνολο των κυμάτων συμβολίζεται με το γράμμα c . Η σχέση μεταξύ των πιο πάνω στοιχείων δίνεται από τον τύπο: $\nu = c/\lambda$



Εικόνα 6.1 Η μετάδοση του φωτός με κύματα

Οι άνθρωποι διακρίνουν στο φως διαφορετικά χρώματα. Τα χρώματα αυτά αντιστοιχούν στα διαφορετικά μήκη κύματος με τα οποία εκπέμπεται η ακτινοβολία, όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.2.



Εικόνα 6.2 Η ανάλυση του φωτός

Οι άνθρωποι μπορούν να διακρίνουν την ακτινοβολίες με μήκη κύματος από 380nm μέχρι 750 nm ($1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$). Οι ακτινοβολίες με μήκη κύματος από 380-750nm αποτελούν το **ορατό φάσμα**. Στα 380nm διακρίνουμε το ιώδες χρώμα, ενώ στα 750nm το κόκκινο χρώμα του ορατού φάσματος. Το υπεριώδες εκτείνεται σε μήκη κύματος μικρότερα από τα 380nm, ενώ το υπέρυθρο σε μεγαλύτερα από 750nm. Τόσο οι υπεριώδεις όσο και οι υπέρυθρες ακτινοβολίες βρίσκονται έξω από τα όρια του ορατού φάσματος και δε μπορούμε να τις δούμε.

Οι διαφορετικές ακτινοβολίες περιέχουν τις ίδιες ποσότητες ενέργειας;

Η ενέργεια (E), που περιέχεται σε ένα φωτόνιο, είναι αντιστρόφως ανάλογη του μήκους κύματος και δίνεται από τον τύπο:

$$E=h\nu, \text{ ή } E=h.c/\lambda \quad (h=\text{σταθερά του Planck})$$

Αυτό σημαίνει ότι, όσο πιο μικρού μήκους κύματος είναι η ακτινοβολία, τόσο μεγαλύτερα ποσά ενέργειας περιέχει. Ένα φωτόνιο κόκκινης ακτινοβολίας (660nm) περιέχει λιγότερη ενέργεια από ένα φωτόνιο μπλε ακτινοβολίας (430nm). Η υπεριώδης ακτινοβολία περιέχει μεγάλα ποσά ενέργειας.

Για τις βιολογικές διεργασίες που χρειάζονται φως, όπως η φωτοσύνθεση, ένα φωτόνιο μπορεί να είναι ενεργό, αν περιέχει το απαιτούμενο ποσό ενέργειας, που χρειάζεται για την εργασία που επιτελεί. Η ένταση του φωτός, σ' ένα σημείο, είναι το σύνολο της ενέργειας που πέφτει στο σημείο αυτό σε ένα δευτερόλεπτο.

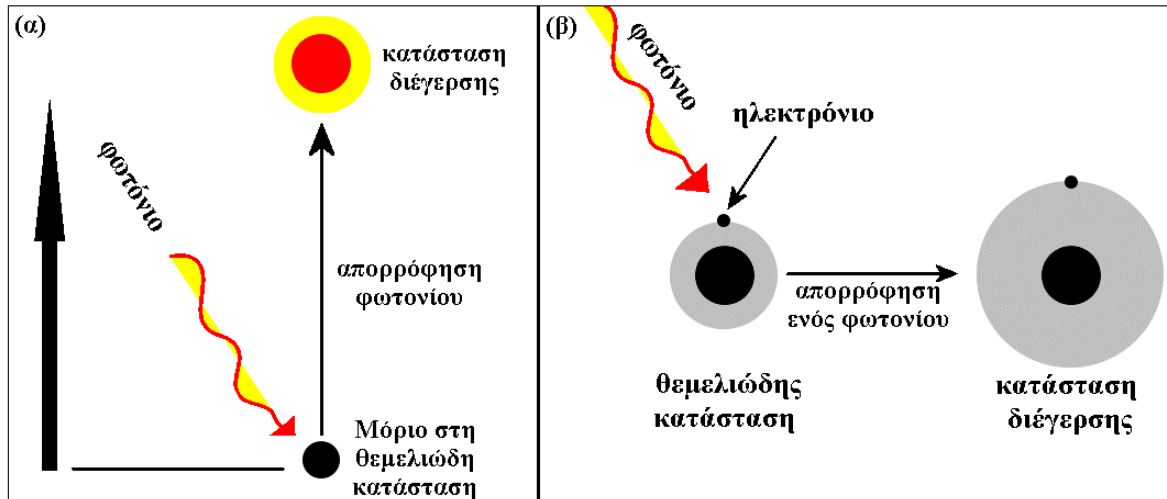
- Οι χρωστικές

*** Τι θα συμβεί αν ένα φωτόνιο συναντήσει ένα μόριο;**

Όταν ένα φωτόνιο συναντήσει ένα μόριο (ή άτομο), τρία πράγματα μπορεί να συμβούν:

- α) Το φωτόνιο μπορεί να κτυπήσει πάνω στο μόριο και να ανακλαστεί.
- β) Το φωτόνιο μπορεί απλά να περάσει μέσα από το μόριο.
- γ) Το φωτόνιο μπορεί να απορροφηθεί από το μόριο και να προκαλέσει διέγερση ή ιονισμό.

Στην τρίτη περίπτωση το φωτόνιο εξαφανίζεται.



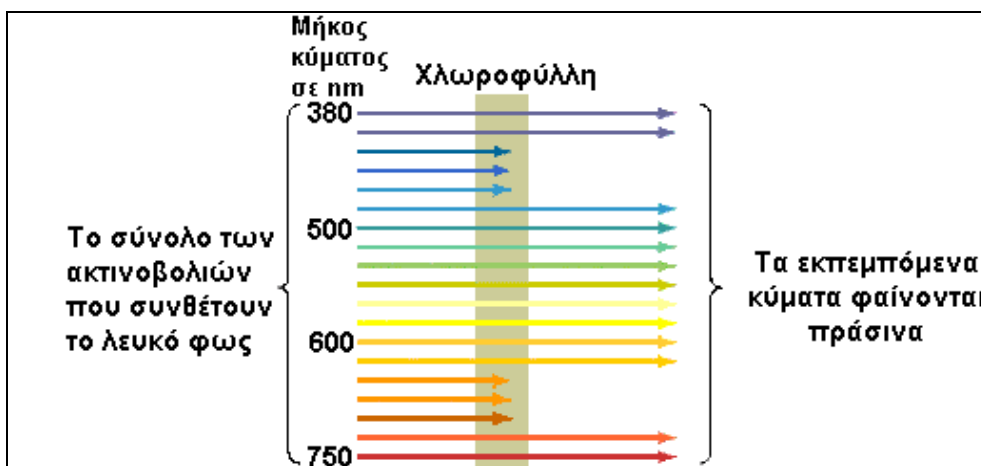
Εικόνα 6.3 Η απορρόφηση ενός φωτονίου από ένα μόριο

Τι γίνεται όμως με την ενέργεια που περιέχει το φωτόνιο; Μήπως εξαφανίζεται και αυτή;

Η ενέργεια, όπως γνωρίζουμε, δε δημιουργείται από το μηδέν ούτε και καταστρέφεται. Η ενέργεια του φωτονίου παραλαμβάνεται από το μόριο, το οποίο μεταβαίνει από μια **θεμελιώδη** κατάσταση (κατάσταση ηρεμίας), στην οποία βρισκόταν μέχρι τότε, σε μια **διεγερμένη κατάσταση**, όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.3(α).

Η διαφορά της ενέργειας του μορίου στη διεγερμένη κατάσταση και της ενέργειας στη θεμελιώδη κατάσταση, ισούται με την ενέργεια του απορροφηθέντος φωτονίου. Η ενέργεια αυτή σπρώχνει ένα ηλεκτρόνιο σε πιο μακρινή τροχιά από τον πυρήνα του ατόμου που βρίσκεται στο μόριο. Το ηλεκτρόνιο τώρα συγκρατείται με περισσότερη δυσκολία από το άτομο. (Σχήμα 6.3(β)). Αν το ηλεκτρόνιο απομακρυνθεί, τότε το άτομο ιονίζεται.

Όλα τα μόρια απορροφούν ακτινοβολίες. Κάθε μόριο, όμως, απορροφά ακτινοβολίες με διαφορετικό μήκος κύματος. Το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που απορροφά ένα μόριο, είναι χαρακτηριστικό για το μόριο εκείνο. Ωστόσο η ακτινοβολία που απορροφάται δεν είναι, συνήθως, από το ορατό φάσμα. Εκείνες οι ουσίες, των οποίων τα μόρια απορροφούν ακτινοβολίες από το ορατό φάσμα, ονομάζονται **χρωστικές**.

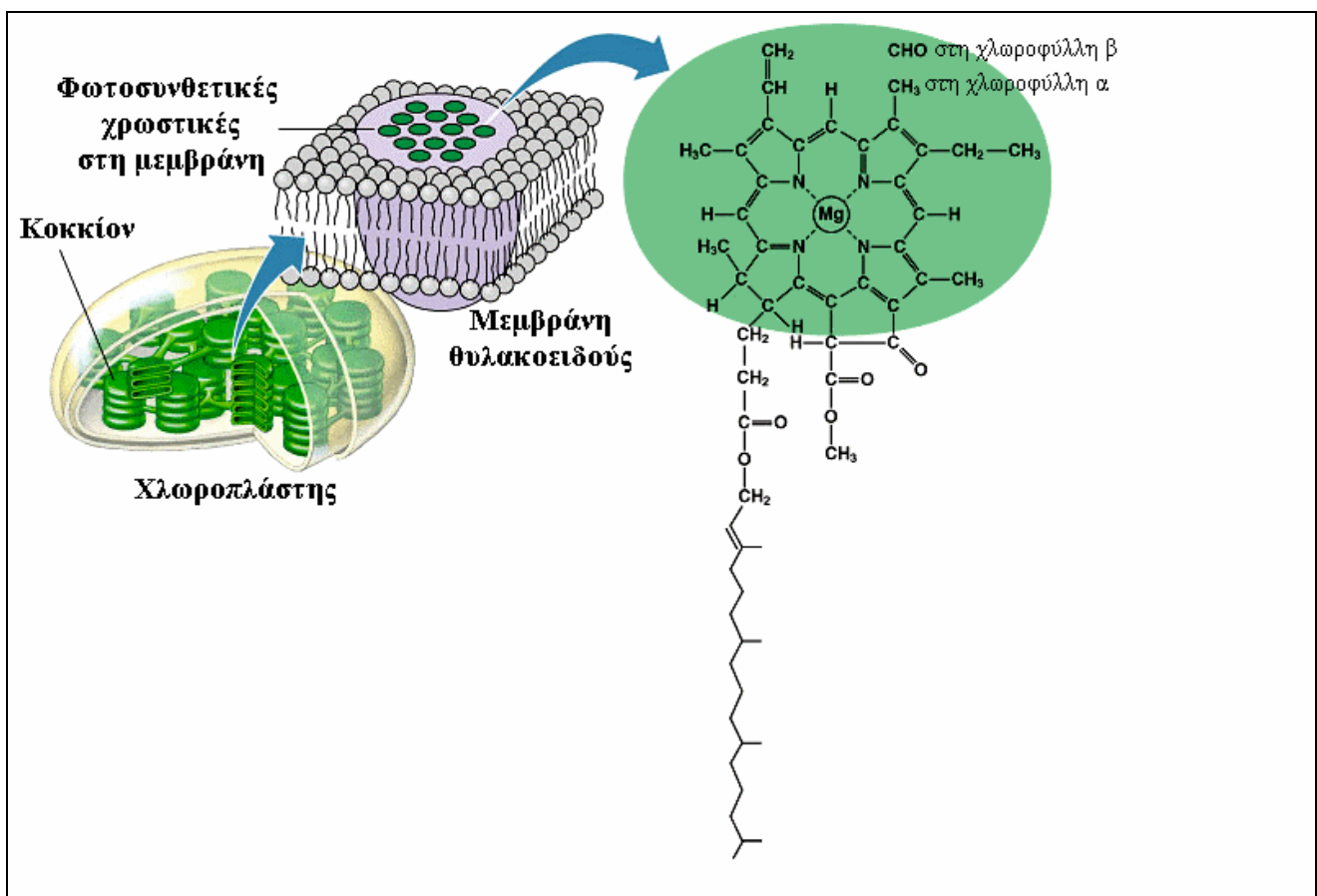


Εικόνα 6.4 Απορρόφηση ακτινοβολίας από τη χλωροφύλλη

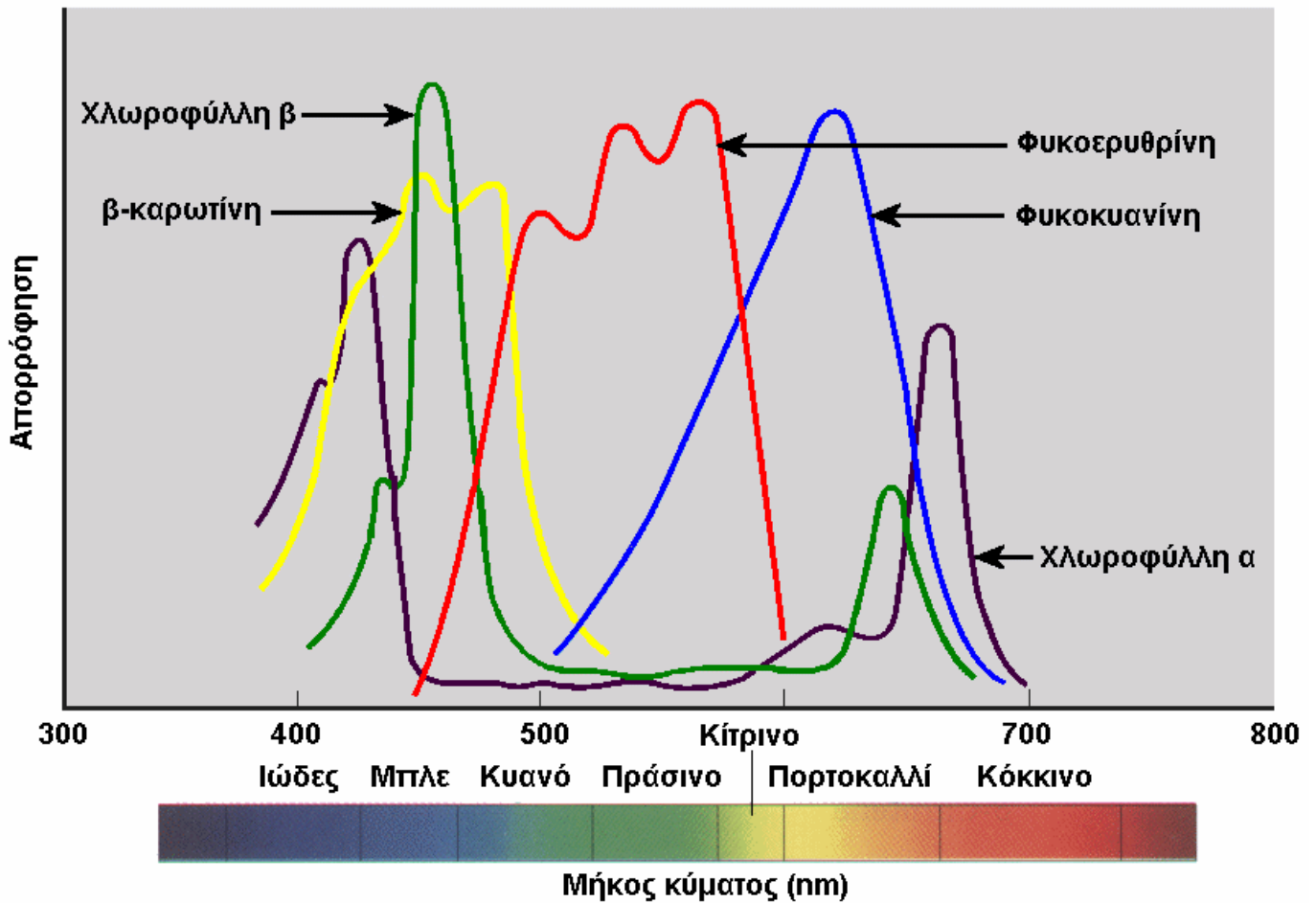
Όταν το λευκό φως (μίγμα από διάφορα μήκη κύματος) προσπίπτει πάνω σε ένα μόριο χρωστικής, απορροφούνται ακτινοβολίες συγκεκριμένου μήκους κύματος, ενώ οι υπόλοιπες ανακλώνται ή μεταβιβάζονται. Έτσι η χρωστική φαίνεται έγχρωμη. Αν, για παράδειγμα, από το λευκό φως η χρωστική απορροφά την περιοχή του μπλε και του κόκκινου, όπως η χλωροφύλλη, βλέπουμε το χρώμα που ανακλάται και είναι πράσινο-πρασινοκίτρινο.

- **Οι φωτοσυνθετικές χρωστικές**

Υπάρχουν αρκετές χρωστικές που συμμετέχουν σε βιολογικές αντιδράσεις. Οι χρωστικές που έχουν σχέση με τη φωτοσύνθεση και τις συναντούμε στα φύλλα και άλλα μέρη των οργανισμών που φωτοσυνθέτουν ονομάζονται **φωτοσυνθετικές χρωστικές**. Απ' αυτές οι πιο σημαντικές είναι οι χλωροφύλλες. Οι χλωροφύλλες είναι διαδεδομένες σε όλα τα φυτά, στα πρώτιστα, στα κυανοφύκη και σε αρκετά βακτήρια (βακτηριοχλωροφύλλες). Οι οργανισμοί αυτοί, χωρίς τη χλωροφύλλη, δε μπορούν να κάνουν φωτοσύνθεση και είναι καταδικασμένοι σε θάνατο. Τα κυριότερα είδη χλωροφύλλης είναι η **χλωροφύλλη α** και η **χλωροφύλλη β**, που διαφέρουν ελάχιστα στη δομή τους. Η χλωροφύλλη α διαφέρει ελάχιστα από τη β, όπως φαίνεται στην εικόνα 6.5. Για τη σύνθεση της χλωροφύλλης είναι απαραίτητο το μαγνήσιο (Mg).



Η χλωροφύλλη α απορροφά ακτινοβολίες με μήκη κύματος κοντά στα δύο άκρα του ορατού φάσματος, δηλαδή το κόκκινο και το μπλε. Εκτός όμως από τη χλωροφύλλη α, τα φυτά χρησιμοποιούν και άλλες χρωστικές, που απορροφούν ακτινοβολίες με ενδιάμεσα μήκη κύματος. Με τον τρόπο αυτό γίνεται καλύτερη αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας. Οι χρωστικές αυτές ονομάζονται **συμπληρωματικές χρωστικές** (εικόνα 6.6).



Εικόνα 6.6 Οι διάφορες χρωστικές απορροφούν ακτινοβολίες με διαφορετικά μήκη κύματος

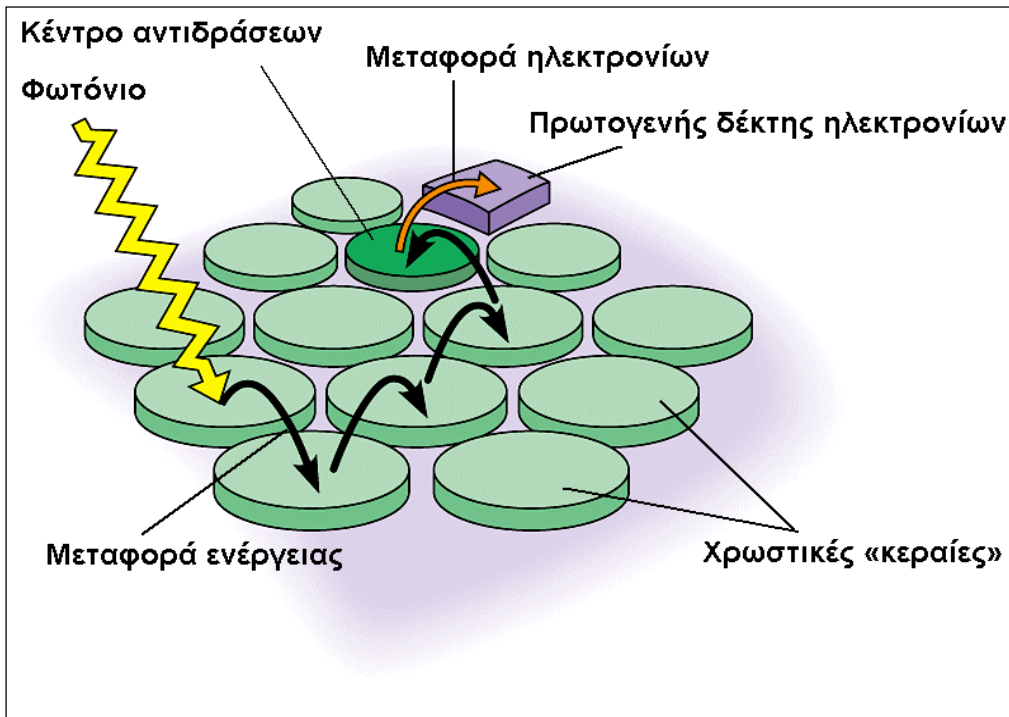
Ανάμεσα στις συμπληρωματικές χρωστικές είναι η χλωροφύλλη β και τα **καρωτινοειδή** που απορροφούν φωτόνια από το μπλε και το γαλαζοπράσινο και φαίνονται κίτρινα προς πορτοκαλί. Οι **ξανθοφύλλες** είναι συμπληρωματικές χρωστικές παράγωγα των καροτινοειδών, όπως και η **β-καρωτίνη** που αποτελεί το κυρίαρχο καροτινοειδές των καρότων. Οι **φυκοβιλλίνες** (**φυκοκυανίνη** και **φυκοερυθρίνη**) είναι οι κυρίαρχες συμπληρωματικές χρωστικές στα κυανοβακτήρια και στα ερυθρά φύκη.

Το φθινόπωρο, στα φυλλοβόλα φυτά, οι χλωροφύλλες αποδομούνται (διασπώνται) και δεν ξανασηματίζονται. Η απουσία χλωροφυλλών επιτρέπει σε άλλες χρωστικές, όπως τα καρωτινοειδή, να εμφανίζονται. Αυτές οι χρωστικές ανακλούν ακτινοβολίες διαφορετικού μήκους κύματος, όπως το κίτρινο και το πορτοκαλί. Αυτό εξηγεί την ποικιλία χρωμάτων που παρουσιάζουν τα φύλλα των διαφόρων φυλλοβόλων φυτών το φθινόπωρο (φωτογραφία στη σελ. 8).



Εικόνα 6.7 Εικόνες φθινοπωρινές

Μόρια χλωροφύλλης μαζί με μόρια συμπληρωματικών χρωστικών και μεταφορείς ηλεκτρονίων αποτελούν μονάδες που ονομάζονται **φωτοσυστήματα**. Τα φωτοσυστήματα περιέχουν 200-300 μόρια χρωστικών. Το



φωτοσύστημα I περιέχει ειδικό τύπο χλωροφύλλης α, την P700 (μέγιστη απορρόφηση στα 700nm). Το φωτοσύστημα II περιέχει ένα άλλο τύπο χλωροφύλλης α, την P680 (μέγιστη απορρόφηση στα 680nm).

Εικόνα 6.8 Ένα φωτοσύστημα παγιδεύει την ηλιακή ενέργεια

χρωστικής, όταν απορροφήσει ένα φωτόνιο, περνά από τη θεμελιώδη στη διεγερμένη κατάσταση. Αυτό συμβαίνει για ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα και αμέσως μετά το μόριο αποδιεγείρεται, ελευθερώνοντας ενέργεια. Η ενέργεια που ελευθερώνεται, διεγείρει το επόμενο μόριο χρωστικής και με αυτόν τον τρόπο η ενέργεια του

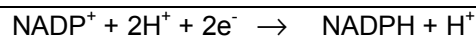
φωτονίου μεταβιβάζεται από το ένα μόριο χρωστικής στο άλλο. Τελικά, η ενέργεια πολλών φωτονίων από όλα τα μόρια φτάνει στο μόριο της χλωροφύλλης α, που καταλαμβάνει το χώρο του φωτοσυστήματος που ονομάζεται **κέντρο αντιδράσεων** (σχ. 7). Η χλωροφύλλη α με τον τρόπο αυτό διεγείρεται και στη συνέχεια χάνει ένα ηλεκτρόνιο (ιονίζεται). Το ηλεκτρόνιο που αποβάλλεται παραλαμβάνεται στη συνέχεια από τον **πρωτογενή δέκτη**, που είναι μια ειδική ουσία η οποία παραδίδει το ηλεκτρόνιο στη χλωροφύλλη P700 μέσω μιας αλυσίδας που σχηματίζουν οι μεταφορείς ηλεκτρονίων. Οι ουσίες που συμμετέχουν στην αλυσίδα μεταφοράς ηλεκτρονίων, όταν είναι οξειδωμένες προσλαμβάνουν ηλεκτρόνια και ανάγονται, ενώ στη συνέχεια χάνουν τα ηλεκτρόνια που πήραν και οξειδώνονται.

Κάθε φορά που ελευθερώνεται ένα ηλεκτρόνιο από ένα μεταφορέα και παραλαμβάνεται από έναν άλλο, ελευθερώνεται και ένα ποσό ενέργειας.

Στη φωτοσύνθεση ο κυριότερος μεταφορέας ηλεκτρονίων είναι το NADP (φωσφορο-νικοτιναμιδο-αδενινο-δινουκλεοτίδιο). Στην κυτταρική αναπνοή, που θα εξετάσουμε σε επόμενο κεφάλαιο, συμμετέχουν άλλοι μεταφορείς ηλεκτρονίων, όπως το NAD (νικοτιναμιδο-αδενινο-δινουκλεοτίδιο) και το FAD (φλαβινο-αδενινο-δινουκλεοτίδιο).

Το NADP είναι γνωστό σε δύο μορφές: το NADP⁺ που είναι η οξειδωμένη μορφή και το NADPH που είναι η ανηγμένη μορφή του. Το NADP μεταφέρει ηλεκτρόνια (στην πραγματικότητα μεταφέρει 2 ηλεκτρόνια και ένα ιόν υδρογόνου) από μια ουσία, η οποία με αυτόν τον τρόπο χάνει ενέργεια και οξειδώνεται, και τα δίνει σε μια άλλη ουσία, η οποία έτσι προσλαμβάνει την ενέργεια και τα άτομα υδρογόνου και ανάγεται.

Στην πιο κάτω αντίδραση φαίνεται η αναγωγή του NADP κατά την οποία δεσμεύεται αρκετή ενέργεια



Στη δομή του NAD και ορισμένων άλλων μεταφορέων περιλαμβάνονται ενώσεις, τις οποίες ο άνθρωπος χρειάζεται, αλλά ο οργανισμός μας δε μπορεί να τις συνθέσει και κατατάσσονται στις βιταμίνες. Τέτοιες ενώσεις είναι η **νικοτιναμίδη ή νιασίνη** (βιταμίνη B₃), που συναντούμε στο NAD, και η **ριβοφλαβίνη** (βιταμίνη B₂), που συναντούμε στο FAD.

Μεταφορά της ενέργειας που ελευθερώνεται κατά τις οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, κυριότερος μεταφορέας ενέργειας είναι το μόριο της ATP (τριφωσφορικής αδενοσίνης) η οποία αποτελείται από μια αδενοσίνη (ένωση αδενίνης και ριβόζης), που ενώνεται με τρεις φωσφορικές ομάδες. Οι δύο τελευταίες φωσφορικές ομάδες ενώνονται με το υπόλοιπο τμήμα του μορίου με δεσμούς ψηλής ενέργειας.

Η ένωση της αδενοσίνης με μια φωσφορική ομάδα αποτελεί ένα νουκλεοτίδιο, τη μονοφωσφορική αδενοσίνη (AMP). Η ένωση της αδενοσίνης με δύο φωσφορικές ομάδες είναι ένα φωσφορυλιωμένο νουκλεοτίδιο, γνωστό ως ADP (διφωσφορική αδενοσίνη).

Η ADP, που βρίσκεται στο περιβάλλον των θυλακοειδών μέσα στο στρώμα του χλωροπλάστη, παραλαμβάνει ακόμα μια φωσφορική ομάδα (Pi), που βρίσκεται ελεύθερη στο ίδιο περιβάλλον και σχηματίζει ένα μόριο ATP (τριφωσφορική αδενοσίνη). Για να γίνει η δέσμευση της τρίτης φωσφορικής ομάδας, απαιτείται ενέργεια. Η ενέργεια που χρησιμοποιείται για το σκοπό αυτό, δεν είναι άλλη από την ενέργεια που απελευθερώνεται στη διάρκεια των οξειδοαναγωγικών αντιδράσεων των κυτταροχρωμάτων κατά τη φωτεινή φάση της φωτοσύνθεσης.

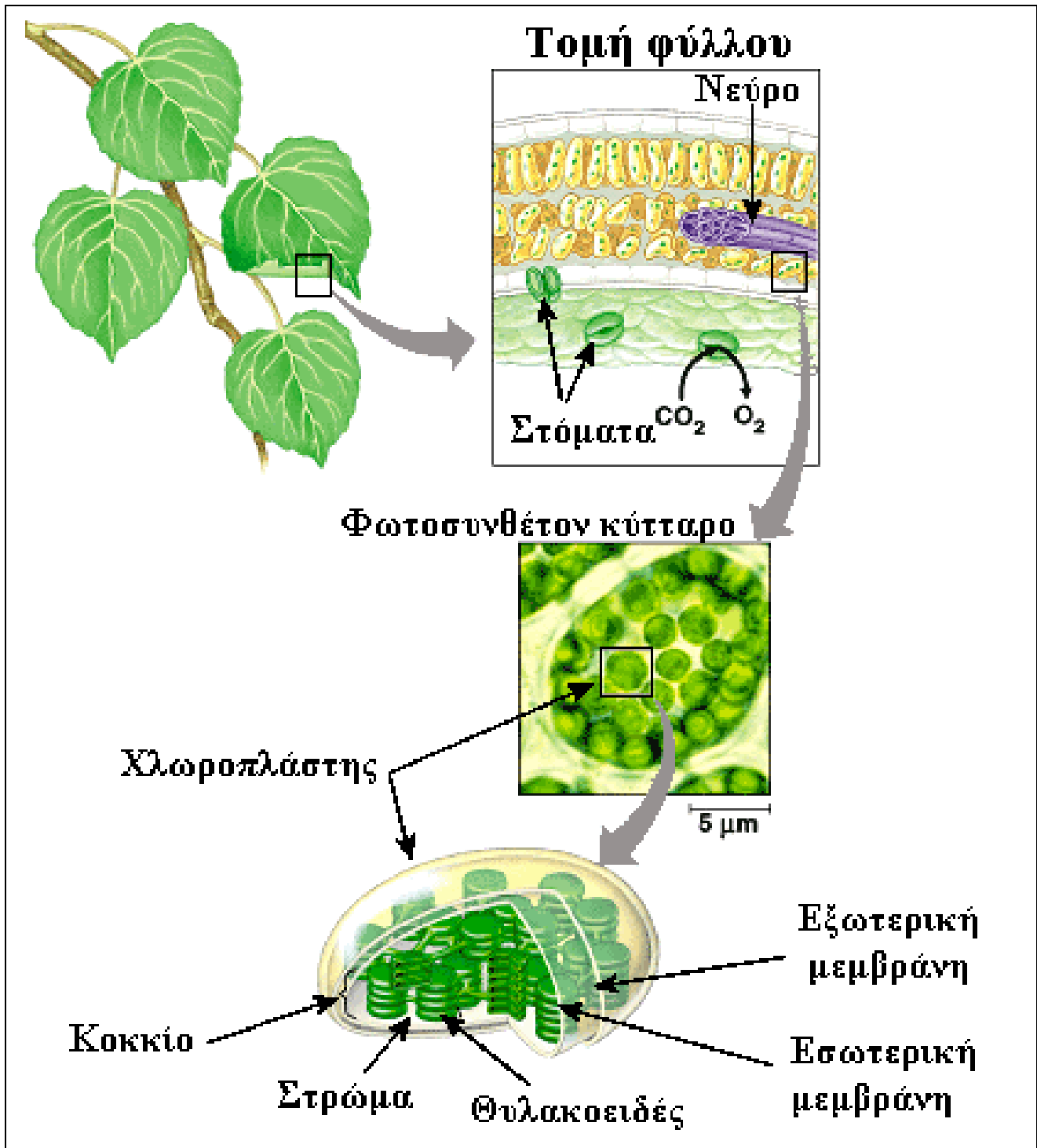
Η ATP βρίσκεται σε όλα τα κύτταρα, ζωικά και φυτικά. Θεωρείται ως ένα εύχρηστο «ενεργειακό νόμισμα» όλων των βιολογικών συστημάτων, γιατί με τη διάσπασή της παρέχει ενέργεια, όταν απαιτείται. Στην περίπτωση της φωτοσύνθεσης μεταφέρεται από τα κοκκία στο στρώμα των χλωροπλάστων, για να χρησιμοποιηθεί στη σκοτεινή φάση.

6.3 Το φύλλο και οι χλωροπλάστες

Οι χλωροπλάστες είναι οργανίδια του φυτικού κυττάρου με διπλά τοιχώματα που στο εσωτερικό τους, όπως φαίνονται στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, υπάρχουν πολλές διπλές μεμβράνες (τα θυλακοειδή). Η περισσότερη ομοιογενής περιοχή του χλωροπλάστη ονομάζεται **στρώμα** και σ' αυτό βρίσκονται τα **κοκκία**. Το στρώμα περιέχει πολλά από τα ένζυμα, που χρειάζονται για τις διαδικασίες της φωτοσύνθεσης. Τα κοκκία ή grana είναι στήλες από δίσκους με διπλές μεμβράνες, τα **θυλακοειδή**.

Τα κοκκία συνδέονται μεταξύ τους με ελασμάτια. Σ' όλα τα θυλακοειδή βρίσκεται η χλωροφύλλη μεταξύ λιπιδίων και πρωτεϊνών. Ο ρόλος των θυλακοειδών είναι να κρατούν τα μόρια της χλωροφύλλης στην κατάλληλη θέση, ώστε να απορροφούν (να δεσμεύουν) το μέγιστο δυνατό ποσό φωτεινής ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας.

Ένας χλωροπλάστης περιέχει 100 κοκκία περίπου, κάθε ένα από τα οποία αποτελείται από 50 θυλακοειδή περίπου. Η δέσμευση της φωτεινής ενέργειας από τις χρωστικές ουσίες του χλωροπλάστη και η μετατροπή της σε χημική, είναι αναγκαία για το σχηματισμό των οργανικών ουσιών (Εικ. 6.9)

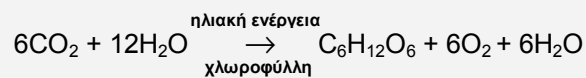


Εικόνα 6.9 Η δομή του χλωροπλάστη

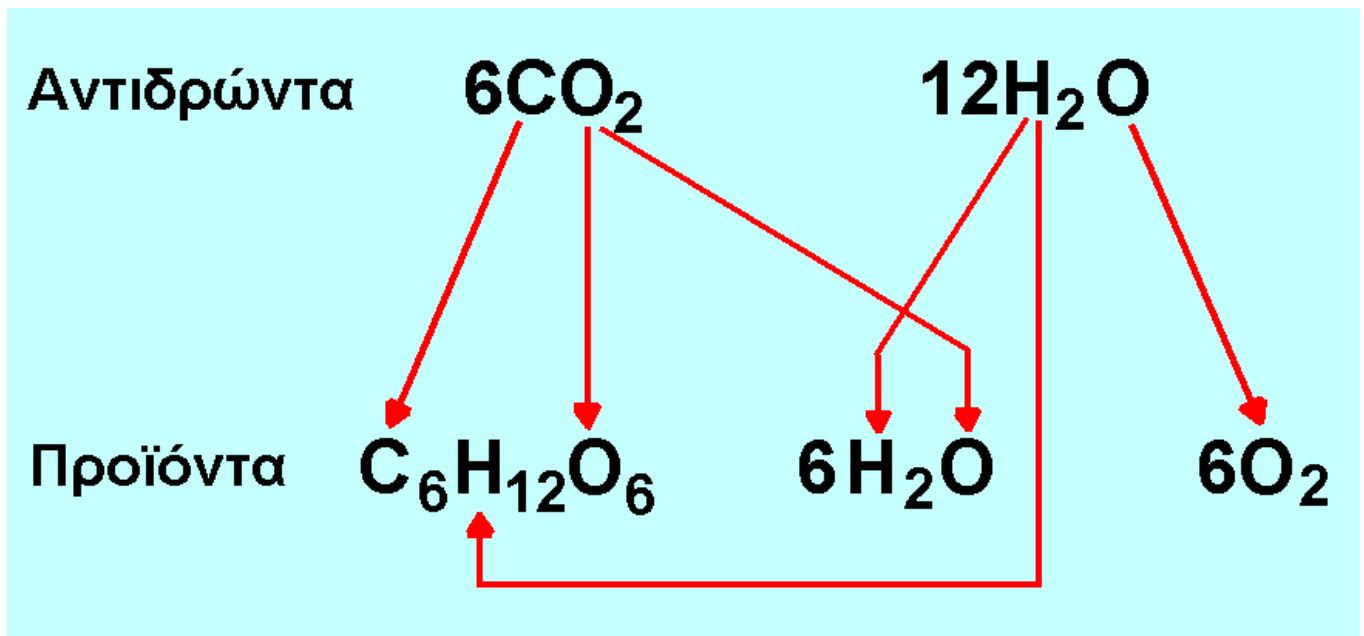
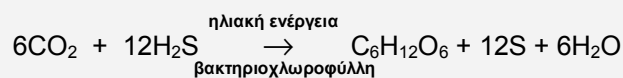
Τα φωτοσυστήματα αποτελούνται από κύριες και συμπληρωματικές χρωστικές, και από μεταφορείς ηλεκτρονίων. Βρίσκονται στις μεμβράνες των χλωροπλάστων. Οι χλωροπλάστες απαντώνται σε πολύ μεγάλους αριθμούς στα φωτοσυνθέτοντα κύτταρα του μεσόφυλλου.

6.4 Η φωτοσύνθεση

Στα ανώτερα φυτά η φωτοσύνθεση είναι μια βασική λειτουργία κατά την οποία γίνεται σύνθεση οργανικών ουσιών (γλυκόζη, άμυλο) από ανόργανα υλικά, όπως το διοξείδιο του άνθρακα και το νερό. Η ενέργεια, που χρησιμοποιείται για τη σύνθεση των οργανικών ουσιών, προέρχεται από τη μετατροπή της φωτεινής ενέργειας σε χημική και γίνεται στους χλωροπλάστες. Η φωτοσύνθεση στα φυτά παριστάνεται με τη γενική χημική εξίσωση:



Εκτός των φυτών και ορισμένα βακτήρια που είναι αυτότροφα, φωτοσυνθέτουν με τη βοήθεια του ηλιακού φωτός, αλλά αντί χλωροφύλλης έχουν άλλες χρωστικές, που ονομάζονται βακτηριοχλωροφύλλες. Επίσης, αντί για νερό χρησιμοποιούν άλλες ανόργανες ουσίες που περιέχουν υδρογόνο, όπως το υδρόθειο (H_2S). Η λειτουργία αυτή ονομάζεται βακτηριακή φωτοσύνθεση και παριστάνεται με τη γενική χημική αντίδραση:



Εικόνα 6.10 Η πορεία των ατόμων στη φωτοσύνθεση

6.5 Πειραματική μελέτη της φωτοσύνθεσης

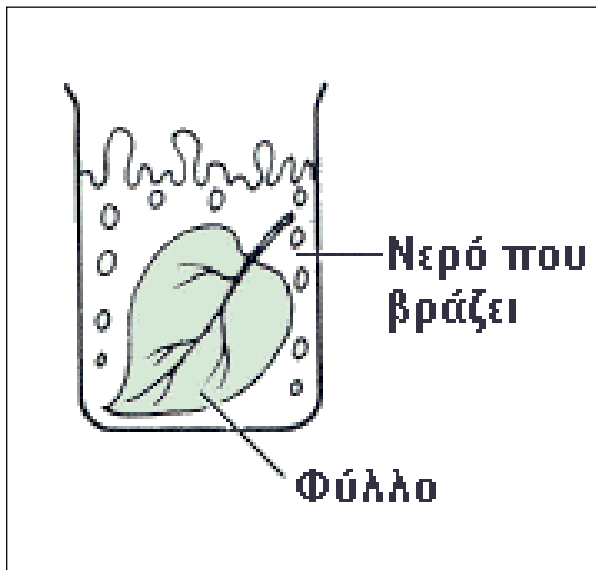
Όπως φαίνεται και από τη γενική χημική εξίσωση της φωτοσύνθεσης, το τελικό προϊόν που παράγεται με τη φωτοσύνθεση είναι η γλυκόζη που πολυμερίζεται σε άμυλο. Επομένως, η πειραματική ανίχνευση της παρουσίας του αμύλου στα φύλλα δείχνει ότι έγινε φωτοσύνθεση. Το άμυλο ανιχνεύεται με διάλυμα ιωδίου.

Για να γίνει η ανίχνευση του αμύλου στα φύλλα, πρέπει πρώτα να γίνει αποχρωματισμός του φύλλου, ώστε να απομακρυνθεί η χλωροφύλλη.

- **Αποχρωματισμός φύλλων και ανίχνευση αμύλου**

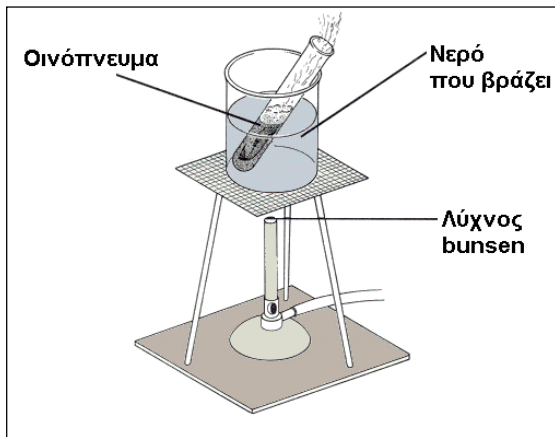
Υλικά που θα χρειαστείτε:

Φύλλα γερανιού (ή άλλου φυτού), τριπόδι, λύχνος, διάλυμα ιωδίου, οινόπνευμα, νερό, ξέβαθο πιατάκι, δοκιμαστικός σωλήνας, ποτήρι ζέσεως, λαβίδα.



Εικόνα 6.11

Κόψτε ένα φύλλο από φυτό γερανιού ή άλλου φυτού που ήταν εκτεθειμένο στον ήλιο. Βάλτε το σε νερό που βράζει (Εικ. 6.11) για μισό περίπου λεπτό. Η διαδικασία αυτή σκοτώνει τα κύτταρα του φύλλου και έτσι η κυτταρική του μεμβράνη γίνεται ολοπερατή (υποβοηθείται η διείσδυση του ιωδίου).



Εικόνα 6.12

Στη συνέχεια, σε ένα δοκιμαστικό σωλήνα βάλτε λίγο καθαρό οινόπνευμα και τοποθετήστε το δοκιμαστικό σωλήνα στο δοχείο με το βραστό νερό (λουτρό ύδατος). Βυθίστε το φύλλο στο δοκιμαστικό σωλήνα, ώστε να καλυφθεί με οινόπνευμα (Εικ. 6.12). Τοποθετήστε το δοχείο με το δοκιμαστικό σωλήνα σε σιγανή φωτιά γκαζιού. Παρακολουθήστε το δοκιμαστικό σωλήνα καθώς και το οινόπνευμα που βράζει.

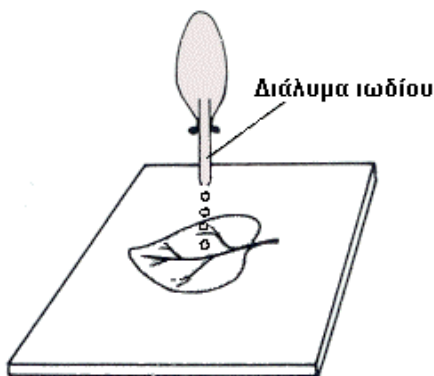
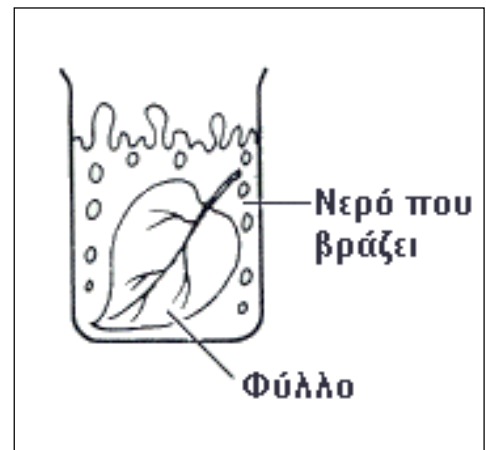
- Τι παρατηρείτε;
- Ουμνηθείτε ποια ιδιότητα έχει το οινόπνευμα.
- Γιατί δε βάζουμε το δοκιμαστικό σωλήνα, με το καθαρό

οινόπνευμα απευθείας στη φωτιά;

Εικόνα 6.13

Το οινόπνευμα έχει την ιδιότητα να διαλύει και να απομακρύνει τη χλωροφύλλη από τα φύλλα – είναι διαλύτης. Έτσι το φύλλο θα αποχρωματιστεί και το οινόπνευμα θα πρασινίσει.

Μετά από 5 περίπου λεπτά, όταν το φύλλο θα αποχρωματιστεί πλήρως, βγάλτε το από το οινόπνευμα και ξεπλύνετε το με ζεστό νερό, για να μαλακώσει. (Εικόνα 6.13).



Εικόνα 6.14

Στη συνέχεια βάλτε το σ' ένα ξέβαθο πιατάκι και ρίξτε σ' αυτό 2-3 σταγόνες διαλύματος ιωδίου (δ). (Εικ. 6.14)

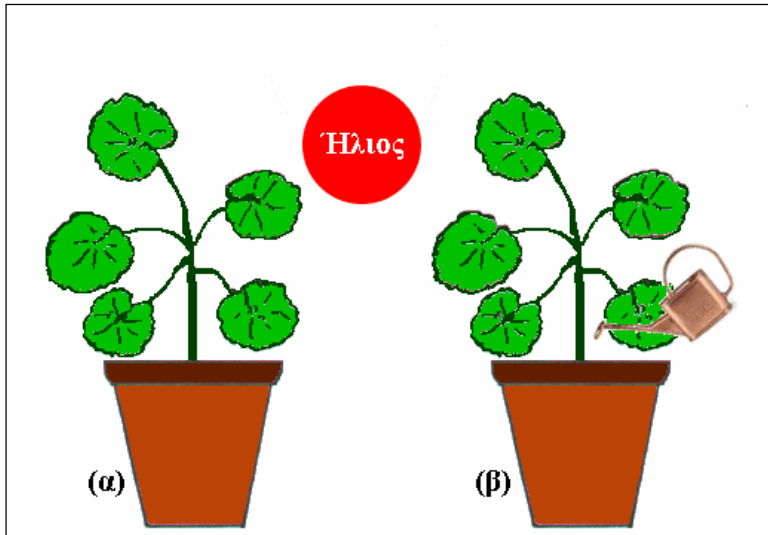
- Ποιο χρώμα έχει πάρει το φύλλο;
- Σε ποιο συμπέρασμα καταλήγετε;

Η εμφάνιση του χαρακτηριστικού μαύρου – μπλε χρώματος μας υποχρεώνει να δεχτούμε ότι το φύλλο περιέχει άμυλο, όπως ακριβώς έχει γίνει και στο καθαρό άμυλο που χρησιμοποιήθηκε ως πείραμα ελέγχου.

- **Η σημασία του νερού στη φωτοσύνθεση**

Υλικά που θα χρειαστείτε:

Δύο γλάστρες με φυτά γερανιού (α) και (β) και κλωστές διαφόρων χρωμάτων (Εικ.6.15):



Εικόνα 6.15

Αφήστε το ένα φυτό γερανιού σε μια γλάστρα απότιστο για αρκετές μέρες. Το χώμα της γλάστρας είναι κατάξηρο και τα φύλλα του φυτού μαραμένα λόγω έλλειψης νερού. Τοποθετήστε το φυτό στον ήλιο. Δίπλα του τοποθετήστε το δεύτερο φυτό γερανιού καλά ποτισμένο. Τα δύο φυτά είναι πράσινα, είναι εκτεθειμένα στον ήλιο, περιβάλλονται και τα δύο από αέρα που περιέχει διοξείδιο του άνθρακα. Αφήστε τα δύο φυτά στη θέση αυτή για 2-3 μέρες.

Κόψτε ένα φύλλο από κάθε φυτό, σημαδέψτε τα με διαφορετικό χρώμα κλωστής και κάνετε το πείραμα της ανίχνευσης του αμύλου.

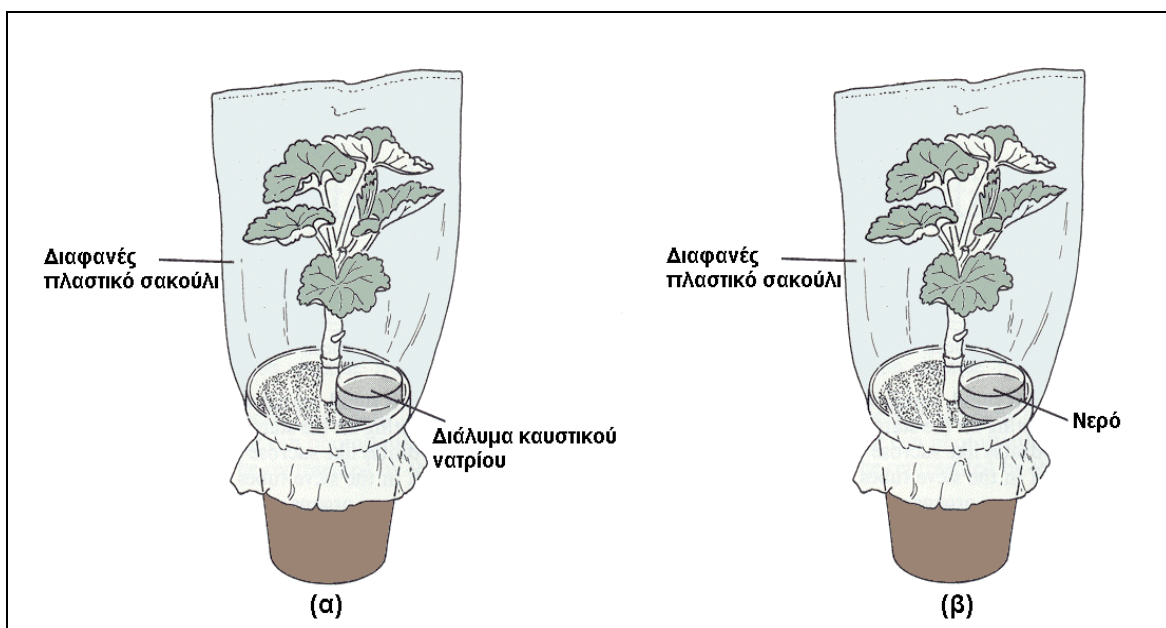
Τι παρατηρείτε;

Τα δύο φύλλα έχουν την ίδια ένταση του μπλε χρώματος;
Υπάρχει η ίδια ποσότητα αμύλου και στα δύο φύλλα;
Σε τι συμπέρασμα καταλήγετε;

Για να γίνει φωτοσύνθεση - να παραχθεί άμυλο στα φύλλα – χρειάζεται νερό. Χωρίς αυτό τα φύλλα δε μπορούν να σχηματίσουν άμυλο.

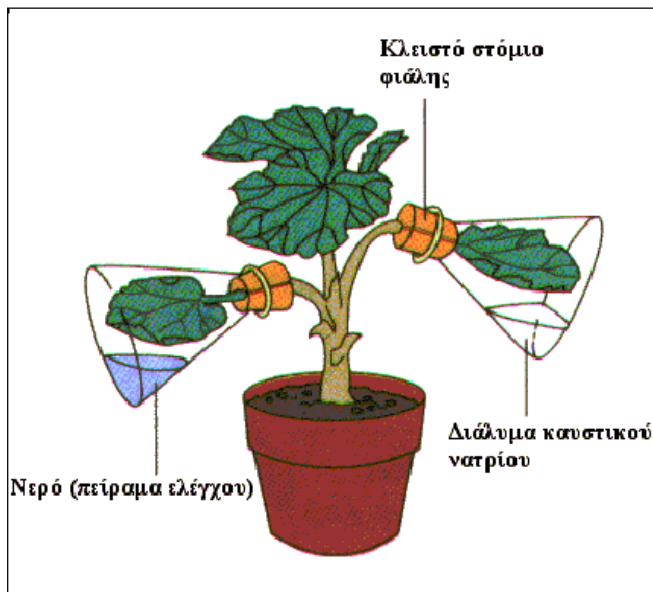
- **Η σημασία του CO₂ στη φωτοσύνθεση**

Υλικά που θα χρειαστείτε:



Εικόνα 6.16

Δύο γλάστρες με νεαρά φυτά γερανιού ή άλλου φυτού (Εικ. 6.16) (α) και (β), διαφανή πλαστικά σακούλια, νήμα, διάλυμα καυστικού νατρίου, κλωστής διαφορετικών χρωμάτων, πιατάκι. Στην εικόνα 6.17 παρουσιάζεται παραλλαγή της συσκευής που χρησιμοποιείται για το ίδιο πείραμα. Αφήστε τις γλάστρες σε σκοτεινό μέρος για 48 ώρες περίπου, ώστε να γίνει **απαμύλωση**.



Εικόνα 6.17

Στη συνέχεια, πάνω στη γλάστρα του ενός φυτού, βάλτε ένα πιατάκι με διάλυμα καυστικού νατρίου και στη γλάστρα του άλλου βάλτε πιατάκι με νερό. Με ένα διαφανές πλαστικό σακούλι σκεπάστε ολόκληρο το φυτό, όπως φαίνεται στην εικόνα 6.16, στερεώνοντας το σακούλι με νήμα στη γλάστρα, ώστε να παγιδευτεί ο αέρας μέσα στο διαφανές σακούλι.

- Σε λίγο, ο αέρας μέσα στο σακούλι με το καυστικό νάτριο δε θα περιέχει διοξείδιο του άνθρακα.
- Γιατί; Ποια ιδιότητα έχει το NaOH;

- Τοποθετήστε και τις δύο γλάστρες στον ήλιο. Τα φυτά είναι πράσινα, έχουν χλωροφύλλη και είναι στον ήλιο. Το μόνο που δεν έχει στη διάθεσή του το φυτό (α) είναι το διοξείδιο του άνθρακα. Αφήστε τις δύο γλάστρες στη θέση τους για 4-5 ώρες.

- Στη συνέχεια, κόψτε ένα φύλλο από κάθε φυτό, σημαδέψτε κατάλληλα, ώστε να μην ξεχάσετε από πού προέρχεται το κάθε φύλλο (δένοντάς τα με κλωστή διαφορετικού χρώματος), και κάνετε το πείραμα της ανίχνευσης του άμυλου.

- Τι παρατηρείτε; Υπάρχει άμυλο και στα δύο φύλλα;
- Ποια διαφορά υπάρχει ανάμεσα στα δύο φυτά;
- Σε ποιο συμπέρασμα καταλήγετε;

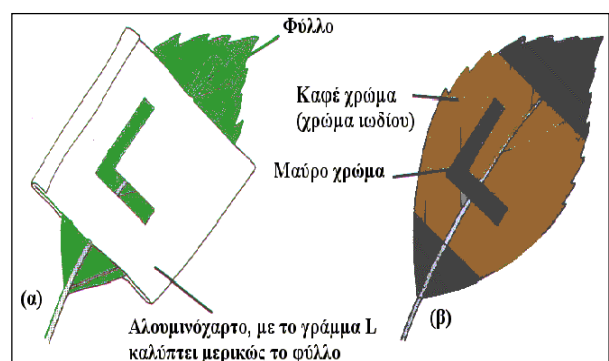
Για να γίνει φωτοσύνθεση – να παραχθεί άμυλο μέσα στα φύλλα – χρειάζεται απαραίτητα το διοξείδιο του άνθρακα. Χωρίς αυτό τα φύλλα δε μπορούν να σχηματίσουν άμυλο.

• **Η σημασία του ηλιακού φωτός στη φωτοσύνθεση**

Υλικά που θα χρειαστείτε:

Μια γλάστρα με ένα νεαρό φυτό γερανιού ή άλλου φυτού και αλουμινόχαρτο.

Εικόνα 6.18



- Αφήστε τη γλάστρα με το φυτό γερανιού σε σκοτεινό μέρος για 48 ώρες περίπου, ώστε να γίνει απαμύλωση. Καλύψτε στη συνέχεια ένα φύλλο του φυτού (και τις δύο επιφάνειές του) με αλουμινόχαρτο, όπως φαίνεται στο σχήμα 13. Τοποθετήστε το φυτό στον ήλιο για 4 – 5 ώρες. Στη συνέχεια κόψτε το φύλλο και κάνετε το πείραμα της ανίχνευσης του άμυλου.

- Τι παρατηρείτε; Χρωματίζεται το φύλλο με την ίδια ένταση μαύρου-μπλε χρώματος σ' όλη την επιφάνειά του; Το φύλλο έχει σχηματίσει άμυλο σ' όλη την επιφάνειά του;
- Πού οφείλεται αυτό; Η μόνη διαφορά είναι ότι το φύλλο είχε καλυμμένη μια περιοχή της επιφάνειάς του.
- Σε ποιο συμπέρασμα καταλήγετε;

Το (ηλιακό) φως είναι απαραίτητο για τη φωτοσύνθεση. Χωρίς αυτό τα φυτά δε μπορούν να συνθέσουν οργανικές ουσίες (άμυλο).

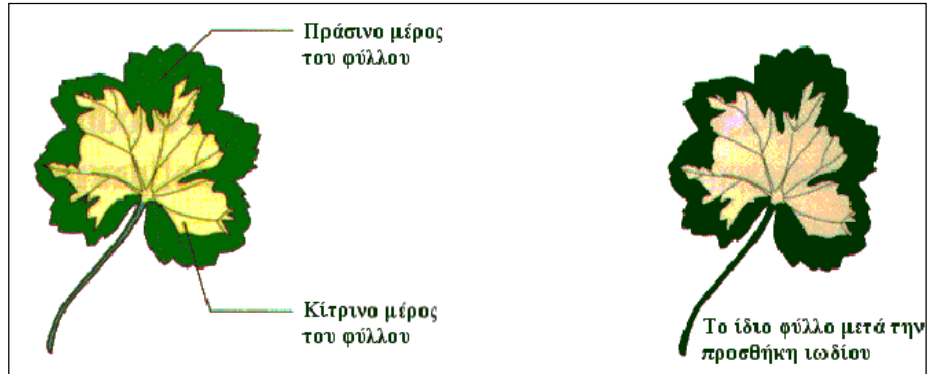
- **Η σημασία της χλωροφύλλης στη φωτοσύνθεση**

Υλικά που θα χρειαστείτε:

Γλάστρα με φυτά που έχει δίχρωμα φύλλα (κισσός ή άλλο φυτό).

Αφήστε το φυτό με τα δίχρωμα φύλλα για 48 ώρες σε σκοτεινό μέρος, ώστε να γίνει απαμύλωση και ακολούθως τοποθετήστε το στον ήλιο για 4 – 5 ώρες. Κόψτε ένα φύλλο και κάνετε το πείραμα της ανίχνευσης του αμύλου.

- Τι παρατηρείτε;
 - Τι χρώμα έχουν τώρα οι αρχικά πράσινες περιοχές, δηλαδή οι περιοχές που είχαν χλωροφύλλη;
 - Τι χρώμα έχουν οι αρχικά άσπρες περιοχές, δηλαδή οι περιοχές χωρίς χλωροφύλλη;
- Εικόνα 6.19**
- Σε ποιο συμπέρασμα καταλήγετε;



Τα φυτά εκτός από διοξείδιο του άνθρακα, νερό, και φως χρειάζονται για το σχηματισμό του αμύλου απαραίτητα και χλωροφύλλη.

Τέλος, παρατηρώντας τη γενική χημική αντίδραση της φωτοσύνθεσης, βλέπουμε ότι εκτός από τις οργανικές ενώσεις παράγεται και οξυγόνο κατά τη φωτοσύνθεση.

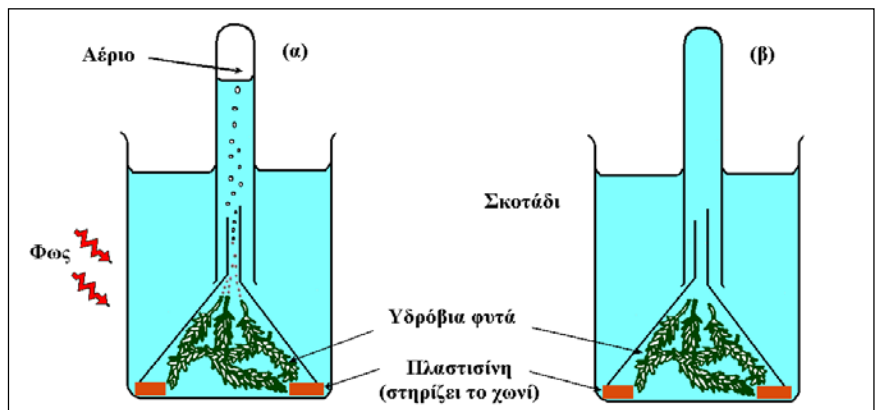
- **Σχηματισμός οξυγόνου κατά τη φωτοσύνθεση**

Τι θα χρειαστείτε:

Υδρόβια φυτά, δύο γυάλινα χωνιά, δύο λεκάνες ή μεγάλα ποτήρια, νερό, δύο δοκιμαστικούς σωλήνες, δύο ορθοστάτες, πλαστίσινη.

1. Πάρτε μερικά υδρόβια φυτά και βάλτε τα στο ανοικτό μέρος ενός γυάλινου χωνιού, που είναι αναποδογυρισμένο σε μια λεκάνη ή σ' ένα μεγάλο ποτήρι με νερό. Πάρτε ένα δοκιμαστικό σωλήνα και γεμίστε τον με νερό. Με προσοχή στρέψτε προς τα πλάγια το χωνί, ώστε να βυθιστεί ολόκληρος ο λαιμός του στο νερό. Βάλτε λίγη πλαστίσινη σε δύο σημεία, εκεί όπου το χωνί ακουμπά στη λεκάνη ή στο ποτήρι. Αυτό θα επιτρέψει στο νερό της λεκάνης να μπαίνει ελεύθερα στο χωνί. Κλείστε το δοκιμαστικό σωλήνα με το δάκτυλό σας και φέρτε τον πάνω από το λαιμό του χωνιού. Αποσύρετε το δάχτυλό σας (πάντοτε κάτω από το νερό) και σπρώξτε το σωλήνα, ώστε ο λαιμός του χωνιού να μπει στο δοκιμαστικό σωλήνα (συσκευή α).
2. Ετοιμάστε με τον ίδιο τρόπο ακόμη μια συσκευή (β). Τοποθετήστε τη συσκευή (α) σε μέρος όπου υπάρχει ηλιακό φως. Αφήστε τη σ' αυτή τη θέση για μερικές ημέρες. Τοποθετήστε τη συσκευή (β) σε σκοτεινό μέρος και αφήστε τη στη θέση αυτή για μερικές ημέρες. Παρακολουθήστε την εξέλιξη του πειράματος. Θα προσέξετε πως από τα υδρόβια φυτά της πρώτης συσκευής, που είναι εκτεθειμένα στο φως, δηλαδή από τα φυτά που φωτοσυνθέτουν, παράγεται κάποιο αέριο. Το αέριο αυτό υπό μορφή μικρότατων φυσαλίδων ανεβαίνει προς τα πάνω και μαζεύεται στην κορυφή του δοκιμαστικού σωλήνα. Το νερό του δοκιμαστικού σωλήνα, που στην αρχή το γέμιζε ολόκληρο, αρχίζει σιγά-σιγά να κατεβαίνει, ενώ στην κορυφή του σωλήνα μαζεύεται το αέριο που προέρχεται από τα υδρόβια φυτά.

Εικόνα 6.20



- Έχει παραχθεί αέριο και στη συσκευή που ήταν στο σκοτάδι; Αν όχι, σε ποιο συμπέρασμα καταλήγετε; Επομένως, όταν γίνεται φωτοσύνθεση, εκτός από άμυλο παράγεται και κάποιο αέριο.
- Ποιο, όμως, είναι αυτό το αέριο;

Το αέριο αυτό αναζωπυρώνει τη φλόγα κεριού που μόλις έχει σβήσει, είναι δηλαδή το οξυγόνο. Αυτό χρησιμοποιείται για την αναπνοή τόσο των φυτών όσο και των ζώων.

6.6 Οι φάσεις της φωτοσύνθεσης και ο σχηματισμός της γλυκόζης

Η φωτοσύνθεση δεν είναι μια απλή διαδικασία κατά την οποία το φυτό χρησιμοποιεί τα ανόργανα συστατικά για να συνθέσει τις οργανικές του ουσίες. Αντίθετα, η φωτοσύνθεση είναι μια πολύπλοκη σειρά χημικών αντιδράσεων, στην οποία συμμετέχουν ένζυμα και άλλες ουσίες και κάτω από ορισμένες συνθήκες, οδηγεί στο σχηματισμό γλυκόζης. Η γλυκόζη χρησιμοποιείται από τον αυτότροφο οργανισμό ως βάση για να σχηματίσει τις πιο πολύπλοκες οργανικές ουσίες του, όπως είναι το άμυλο, άλλοι υδατάνθρακες, πρωτεΐνες και λιπαρές ουσίες.

Η φωτοσύνθεση γίνεται στους χλωροπλάστες και χωρίζεται σε δύο φάσεις:

- α) Τη φωτεινή φάση
- β) Τη σκοτεινή φάση

Η φωτεινή φάση της φωτοσύνθεσης γίνεται στα θυλακοειδή των κοκκίων των χλωροπλάστων. Γίνεται μόνο στην παρουσία έντονης φωτεινής ακτινοβολίας, όπως είναι το ηλιακό φως, γι' αυτό συντελείται συνήθως μόνο την ημέρα. Κατά τη φάση αυτή το φυτό (και γενικά οι αυτότροφοι οργανισμοί) δεσμεύει τη φωτεινή ενέργεια και τη μετατρέπει σε χημική σχηματίζοντας ATP. Διασπάται, επίσης, το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο. Από τα προϊόντα που παράγονται κατά τη φωτεινή φάση, η ATP με την ενέργεια που περιέχει και το υδρογόνο μεταφέρονται από τα θυλακοειδή στο στρώμα του χλωροπλάστη, για να συνεχίσει η επόμενη φάση της φωτοσύνθεσης. Το οξυγόνο που παράγεται από τη διάσπαση του νερού αποβάλλεται στην ατμόσφαιρα.

Η σκοτεινή φάση της φωτοσύνθεσης γίνεται στο στρώμα του χλωροπλάστη. Κατά τη φάση αυτή το φυτό προσλαμβάνει διοξείδιο του άνθρακα από τον αέρα, παίρνει και τα προϊόντα που παράγονται στα θυλακοειδή κατά τη φωτεινή φάση (ATP και NADPH) και με τη βοήθεια ενζύμων, συνθέτει τη γλυκόζη. Φυσικά, αν προσπαθήσουμε να ανιχνεύσουμε γλυκόζη στα φύλλα, θα διαπιστώσουμε ότι δεν υπάρχει. Μόλις σχηματιστεί η γλυκόζη δημιουργείται μια πιο πολύπλοκη ουσία (με πολυμερισμό), το άμυλο. Γι' αυτό στις δραστηριότητες Α-Ε ανιχνεύουμε το άμυλο, για να επιβεβαιώσουμε τη φωτοσύνθεση. Το φως δεν είναι απαραίτητο, για να γίνει η σκοτεινή φάση της φωτοσύνθεσης. Αυτή όμως επηρεάζεται πολύ από τη θερμοκρασία. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η σκοτεινή φάση μπορεί να γίνεται και την ημέρα και την νύκτα. Τα πράγματα, όμως, είναι διαφορετικά. Η σκοτεινή φάση γίνεται συνήθως μόνο την ημέρα, γιατί εξαρτάται από τα προϊόντα που παράγονται κατά τη φωτεινή φάση κατά τη διάρκεια της ημέρας μόνο.

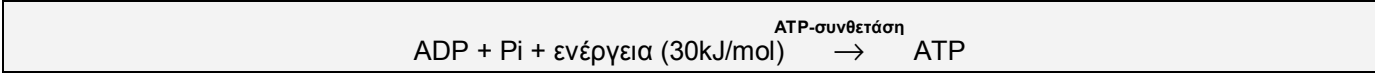
• Η φωτεινή φάση της φωτοσύνθεσης

Η φωτεινή φάση της φωτοσύνθεσης γίνεται μέσα στα θυλακοειδή των κοκκίων, στους χλωροπλάστες. Τα κυριότερα αποτελέσματά της είναι η μετατροπή της φωτεινής ενέργειας σε χημική ενέργεια, με φωσφορυλίωση της ADP και μετατροπή της σε ATP, η αναγωγή του NADP^+ (φωσφορο-νικοτιναμιδο-αδένινο-δινουκλεοτίδιο) σε NADPH και η φωτόλυση του νερού.

Η φωτεινή φάση γίνεται μόνο στα θυλακοειδή των κοκκίων, διότι μόνο εκεί βρίσκονται οι διάφορες χρωστικές που σχηματίζουν τα φωτοσυστήματα I και II που είναι απαραίτητα για τη δέσμευση της φωτεινής ενέργειας. Άλλα απαραίτητα συστατικά, για να γίνει η φωτεινή φάση της φωτοσύνθεσης, είναι το νερό (το προσλαμβάνει το φυτό με τις ρίζες του από το έδαφος), η ADP και το NADP^+ που έρχονται στα κοκκία από το στρώμα του χλωροπλάστη.

Η φωτοσύνθεση ξεκινά με δέσμευση της φωτεινής ενέργειας στα κέντρα αντιδράσεων των φωτοσυστημάτων. Ένα φωτόνιο από την ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται από τις διάφορες χρωστικές του φωτοσυστήματος (συμπληρωματικές χρωστικές) και η ενέργειά του μεταβιβάζεται στο **κέντρο αντιδράσεων** του φωτοσυστήματος και συγκεκριμένα στη χλωροφύλλη α. Το πρώτο μόριο που απορροφά το φωτόνιο, διεγείρεται και αμέσως αποδιεγείρεται (σε ένα δισεκατομμυριοστό του δευτερολέπτου) χάνοντας ενέργεια η οποία διεγείρει το επόμενο μόριο χρωστικής. Η χλωροφύλλη α, με τη συσσώρευση της ενέργειας των φωτονίων διεγείρεται, δηλαδή μεταφέρεται από τη θεμελιώδη στη διεγερμένη κατάσταση. (Ένα ηλεκτρόνιο απορροφά ένα φωτόνιο, ενεργοποιείται και μεταπηδά σε στιβάδα ψηλότερης ενέργειας). Σ' αυτή την κατάσταση η χλωροφύλλη α χάνει το

ενεργοποιημένο ηλεκτρόνιο, το οποίο παραλαμβάνεται από τον πρωτογενή δέκτη και η χλωροφύλλη α ιονίζεται. Ο πρωτογενής δέκτης, με τη βοήθεια των ειδικών μεταφορέων, μπορεί να οδηγήσει το ενεργοποιημένο ηλεκτρόνιο πίσω στη χλωροφύλλη από όπου προήλθε αρχικά (κυκλική φωτοφωσφορυλίωση), ή στην ιονισμένη χλωροφύλλη άλλου φωτοσυστήματος, για να την επαναφέρει στη θεμελιώδη κατάσταση (μη κυκλική φωτοφωσφορυλίωση). Η ενέργεια που ελευθερώνεται από τη μεταφορά των ηλεκτρονίων, χρησιμοποιείται για τη φωσφορυλίωση της ADP και τη μετατροπή της σε ATP.



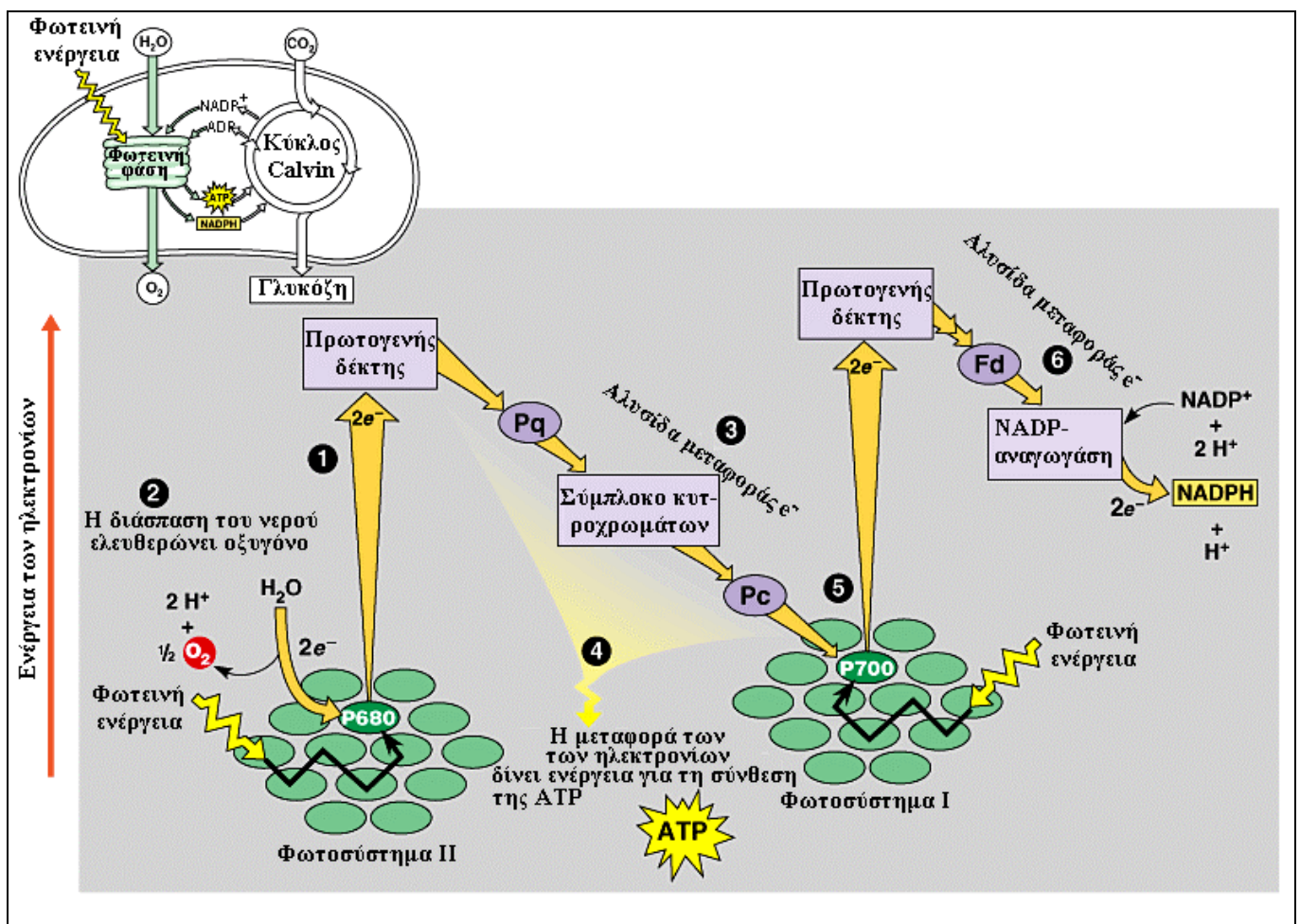
Αυτή η διαδικασία λέγεται **φωτοσυνθετική φωσφορυλίωση** ή **φωτοφωσφορυλίωση**.

Τα ηλεκτρόνια, λοιπόν, φεύγοντας από τη διεγερμένη χλωροφύλλη μπορούν να ακολουθήσουν μια από τις δύο πιο κάτω πορείες:

α. επιστρέφουν εκεί από όπου έφυγαν (στη χλωροφύλλη), δηλαδή σχηματίζουν ένα κύκλο και η διαδικασία αυτή λέγεται **κυκλική φωτοφωσφορυλίωση**.

β. πραγματοποιούν μια πορεία που δεν είναι κυκλική, γιατί δεν επιστρέφουν εκεί απ' όπου έφυγαν και η διαδικασία αυτή λέγεται **μη κυκλική φωτοφωσφορυλίωση**.

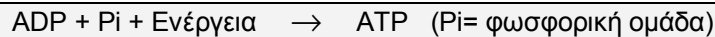
- **Μη κυκλική φωτοφωσφορυλίωση**



Εικόνα 6.21 Μη κυκλική φωτοφωσφορυλίωση (πορεία δύο ηλεκτρονίων από τη διάσπαση ενός μορίου νερού).

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 6.21 στη μη κυκλική φωτοφωσφορυλίωση χρησιμοποιούνται δύο φωτοσυστήματα, το φωτοσύστημα I με χλωροφύλλη α P700 και το φωτοσύστημα II με χλωροφύλλη α P680.

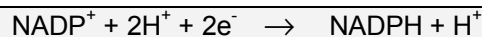
Κατά τη διαδικασία της μη κυκλικής φωτοφωσφορυλίωσης, η χλωροφύλλη α P680 του φωτοσυστήματος II απορροφά ένα φωτόνιο, διεγείρεται και αποβάλλει ένα ηλεκτρόνιο (στην εικόνα 6.21 φαίνεται η πορεία δύο ηλεκτρονίων). Το ηλεκτρόνιο παραλαμβάνεται από τον πρωτογενή δέκτη και μεταβιβάζεται στη συνέχεια στους διάφορους μεταφορείς ηλεκτρονίων, που βρίσκονται σε οξειδωμένη κατάσταση. Κάθε μεταφορέας που παραλαμβάνει ένα ηλεκτρόνιο ανάγεται και στη συνέχεια αποβάλλει το ηλεκτρόνιο και οξειδώνεται ξανά. Κάθε φορά που γίνεται η μεταβίβαση του ηλεκτρονίου από τον ένα μεταφορέα στον άλλο, αποβάλλεται και ένα μέρος της ενέργειάς του. Με την ενέργεια αυτή γίνεται η φωσφορυλίωση της ADP και ο σχηματισμός της ATP κατά την αντίδραση:



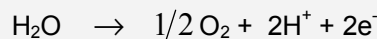
Η παραγωγή της ATP γίνεται με χημειωσμητικό μηχανισμό που θα επεξηγηθεί αργότερα.

Μεταξύ των δύο φωτοσυστημάτων σχηματίζεται έτσι μια αλυσίδα από ουσίες που μεταφέρουν το ηλεκτρόνιο, η οποία ονομάζεται **οξειδοαναγωγική αλυσίδα** ή **αλυσίδα μεταφοράς ηλεκτρονίων**. Το ηλεκτρόνιο, τώρα, φεύγοντας από την τελευταία ουσία της οξειδοαναγωγικής αλυσίδας, την πλαστοκυανίνη (Pc), αντί να επιστρέψει στη χλωροφύλλη του φωτοσυστήματος II, πηγαίνει στη χλωροφύλλη του φωτοσυστήματος I. Έτσι, η χλωροφύλλη του φωτοσυστήματος I, η οποία έχει ήδη απορροφήσει ένα φωτόνιο και έχει ιονισθεί, επαναφέρεται στη θεμελιώδη κατάσταση. Το ηλεκτρόνιο που αποβάλλεται από τη χλωροφύλλη του φωτοσυστήματος I παραλαμβάνεται από τον πρωτογενή παράγοντα και μεταβιβάζεται στη φερεδοξίνη (Fd) και μετά καταλήγει στο NADP⁺.

Στο τελευταίο στάδιο της μη κυκλικής φωτοφωσφορυλίωσης η ουσία NADP⁺ παίρνει 2 ηλεκτρόνια (2e⁻) από τους μεταφορείς ηλεκτρονίων του φωτοσυστήματος I και δύο πρωτόνια (2H⁺) από τη διάσπαση του νερού και ανάγεται σε NADPH κατά την αντίδραση:



Για να επανέλθει στη θεμελιώδη κατάσταση, η χλωροφύλλη του φωτοσυστήματος II, αποσπά ηλεκτρόνια από το νερό. Η οξειδωμένη P680 είναι ένα ισχυρότατο οξειδωτικό μέσο. Με την απόσπαση ηλεκτρονίων από το νερό, επαναφέρεται το κέντρο αντιδράσεων στο φωτοσύστημα II στη θεμελιώδη κατάσταση και δημιουργείται οξυγόνο καθώς και 4 πρωτόνια, κατά την αντίδραση:



Τα πρωτόνια (H⁺) παραμένουν στο εσωτερικό του θυλακοειδούς και ορισμένα προσλαμβάνονται από το NADP⁺ για το σχηματισμό του NADPH. Τα ηλεκτρόνια παραλαμβάνονται από τη χλωροφύλλη του φωτοσυστήματος II (P680), με τη βοήθεια της πρωτεΐνης Z (ένζυμο). Έτσι, η P680 επανέρχεται στη θεμελιώδη κατάσταση. Το οξυγόνο, που παράγεται κατά τη φωτόλυση του νερού, αποβάλλεται από το φύλλο του φυτού στην ατμόσφαιρα. Όταν ένα ιονισμένο μόριο χλωροφύλλης προσλάβει ένα ηλεκτρόνιο και επανέλθει στη θεμελιώδη κατάσταση, μπορεί να απορροφήσει ένα νέο φωτόνιο και να ιονισθεί ξανά. Η διάσπαση του νερού ενισχύεται και από τη φωτεινή ενέργεια, γι' αυτό και ονομάζεται **φωτόλυση** του νερού.

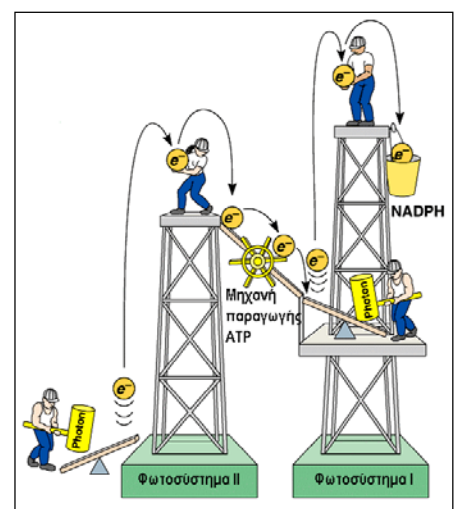
Συνολικά, κατά τη μη κυκλική φωτοφωσφορυλίωση:

α) η φωτεινή ενέργεια μετατρέπεται σε χημική και δεσμεύεται από την ATP. Η ATP σχηματίζεται από την ADP και χρησιμοποιείται κατά τη σκοτεινή φάση της φωτοσύνθεσης.

β) το NADP⁺ ανάγεται σε NADPH και χρησιμοποιείται κατά τη σκοτεινή φάση της φωτοσύνθεσης.

γ) το οξυγόνο, που παράγεται από τη φωτόλυση του νερού, απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα.

Εικόνα 6.22 Παραστατική απεικόνιση της πορείας των ηλεκτρονίων κατά τη μη κυκλική φωτοφωσφορυλίωση



Προέλευση του οξυγόνου που ελευθερώνεται κατά τη φωτοσύνθεση στην ατμόσφαιρα

Το οξυγόνο που απελευθερώνεται κατά τη φωτοσύνθεση από τα φυτά θα μπορούσε να προέρχεται είτε από το νερό είτε από το διοξείδιο του άνθρακα. Η προέλευση του οξυγόνου αυτού βρέθηκε με τη χρήση του ^{18}O (ραδιενεργού ισότοπου του ^{16}O). Χρησιμοποιώντας H_2O με μεγάλη αναλογία ισότοπου ^{18}O παρατηρείται ότι όλη η ποσότητα του οξυγόνου αυτού αποβάλλεται από το φυτό στην ατμόσφαιρα.

Αν όμως δοθεί στο φυτό CO_2 με μεγάλη αναλογία ισότοπου ^{18}O παρατηρείται ότι το ισότοπο αυτό καταλήγει στη γλυκόζη δηλαδή:

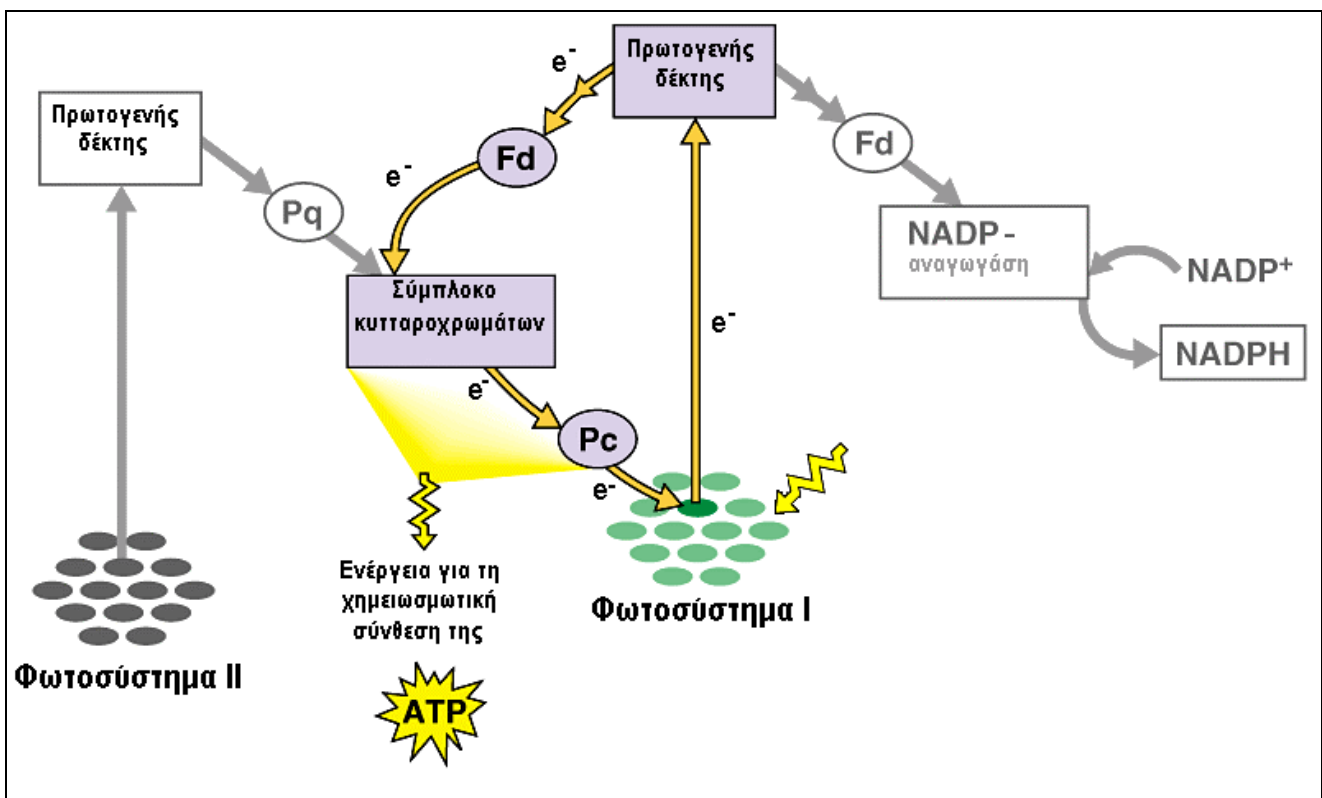
Η χρήση ραδιενεργού H_2O που περιέχει στο μόριό του ^{18}O δίνει ραδιενεργό οξυγόνο που ελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα

Η χρήση ραδιενεργού CO_2 που περιέχει στο μόριό του ^{18}O δίνει ραδιενεργό οξυγόνο που καταλήγει στη γλυκόζη και όχι στην ατμόσφαιρα

Κατά τον ίδιο τρόπο με τη βοήθεια του ραδιενεργού ^{14}C στο διοξείδιο του άνθρακα, είναι δυνατή η ανίχνευση της πορείας του κατά τη σκοτεινή φάση της φωτοσύνθεσης.

- **Κυκλική φωτοφωσφορυλίωση**

Όπως φαίνεται και από την εικόνα 6.23 στην κυκλική φωτοφωσφορυλίωση χρησιμοποιείται ένα μόνο φωτοσύστημα, το φωτοσύστημα I. Το φωτοσύστημα I έχει τη χλωροφύλλη αP700 και ενεργοποιείται με ακτινοβολία μικρότερης ενέργειας παρά το φωτοσύστημα II. Η κυκλική φωτοφωσφορυλίωση γίνεται παράλληλα με τη μη κυκλική.



Εικόνα 6.23 Κυκλική φωτοφωσφορυλίωση (το έγχρωμο σχήμα)

Η χλωροφύλλη α P700 του φωτοσυστήματος I προσλαμβάνει ένα φωτόνιο και ιονίζεται αποβάλλοντας ένα ηλεκτρόνιο. Το ηλεκτρόνιο προσλαμβάνεται, όπως και στη μη κυκλική φωτοφωσφορυλίωση, από τον πρωτογενή παράγοντα και μετά, παραδίδεται στους μεταφορείς ηλεκτρονίων, για να καταλήξει πίσω στο φωτοσύστημα I. Κατά την οξειδοαναγωγή των μεταφορέων αποβάλλεται ενέργεια η οποία δεσμεύεται από την ADP και σχηματίζει την ATP με χημειωσμωτικό μηχανισμό. Το ηλεκτρόνιο, φεύγοντας από την τελευταία ουσία της οξειδοαναγωγικής αλυσίδας, καταλήγει στη χλωροφύλλη του ίδιου φωτοσυστήματος και την επαναφέρει στη θεμελιώδη κατάσταση.

Αυτή είναι μια βασική διαφορά της κυκλικής από τη μη κυκλική φωτοφωσφορυλίωση. Μια άλλη διαφορά είναι ότι κατά την κυκλική φωτοφωσφορυλίωση δεν ελευθερώνεται O_2 και δεν παράγεται NADPH. Στην εικόνα 6.23 φαίνεται παραστατικά η πορεία των ηλεκτρονίων κατά την κυκλική φωτοφωσφορυλίωση.

Τελικά, κατά την κυκλική φωτοφωσφορυλίωση δεσμεύεται ενέργεια και παράγεται ATP από την ADP, για να χρησιμοποιηθεί και αυτή κατά τη σκοτεινή φάση της φωτοσύνθεσης.

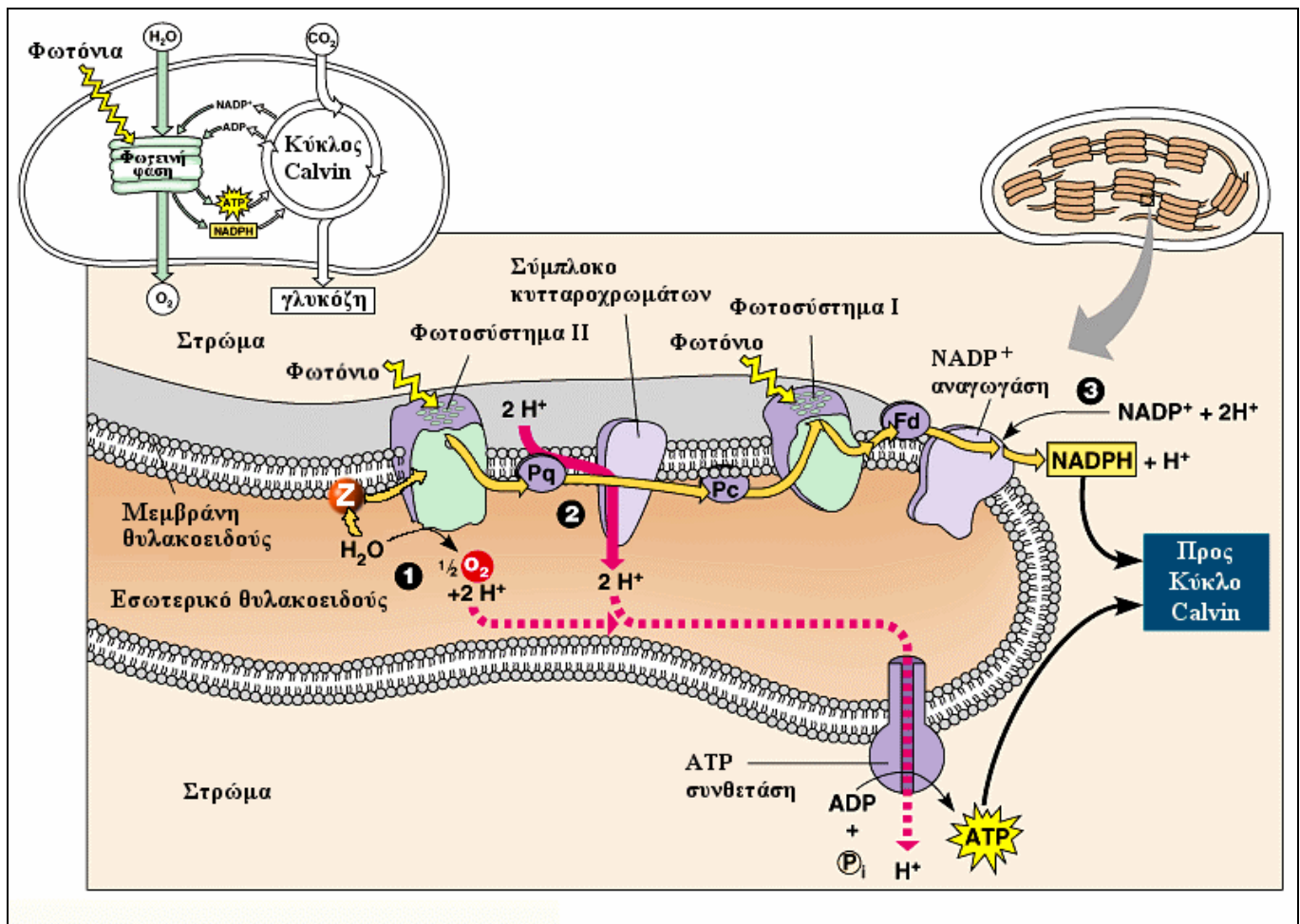
- **Χημειωσμητική σύνθεση της ATP κατά τη φωτοφωσφορυλίωση**

Κατά τη φωτεινή φάση της φωτοσύνθεσης γίνεται φωτοφωσφορυλίωση δηλαδή σχηματισμός ATP από τη φωσφορυλίωση της ADP. Η ATP που παράγεται χρησιμοποιείται στη σκοτεινή φάση.



Τόσο στην κυκλική όσο και στη μη κυκλική φωτοφωσφορυλίωση για το σχηματισμό της ATP είναι απαραίτητη η παρουσία του ενζύμου **ATP-συνθετάση**.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 6.24, πάνω στη μεμβράνη του θυλακοειδούς είναι τοποθετημένα το φωτοσύστημα I και το φωτοσύστημα II, διάφορα κυτταροχρώματα, το ένζυμο NADP-αναγωγάση και το ένζυμο ATP-συνθετάση.

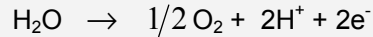


Εικόνα 6.24 Χημειωσμητική ερμηνεία της μη κυκλικής φωτοφωσφορυλίωσης

Κατά τη **μη κυκλική φωτοφωσφορυλίωση** όταν ένα φωτόνιο προσπέσει στη χλωροφύλλη του φωτοσυστήματος II, αποβάλλονται ηλεκτρόνια που διέρχονται μέσα από μια αλυσίδα κυτταροχρωμάτων (μεταφορείς ηλεκτρονίων), που βρίσκονται στις μεμβράνες των θυλακοειδών. Τα ηλεκτρόνια αυτά αποδίδουν την ενέργειά τους σε μια **αντλία πρωτονίων** (H^+), του συμπλόκου κυτταροχρωμάτων, η οποία μεταφέρει πρωτόνια από το στρώμα του χλωροπλάστη προς το εσωτερικό του θυλακοειδούς. Τα ηλεκτρόνια χάνοντας μ' αυτόν τον τρόπο την ενέργειά

τους δίνονται στο φωτοσύστημα I και επαναφέρουν τη χλωροφύλλη α P700 στη θεμελιώδη κατάσταση. Το φωτοσύστημα I, το οποίο προηγουμένως είχε δεχθεί και αυτό φωτόνια, δίνει τα ηλεκτρόνια του μέσω της φερρεδοξίνης στην **NADP-αναγωγία** για αναγωγή του NADP⁺ προς NADPH.

Η χλωροφύλλη αP680 του φωτοσυστήματος II αποσπά ηλεκτρόνια από το νερό, μέσω της πρωτεΐνης Z (ένζυμο) και επανέρχεται στη θεμελιώδη κατάσταση. Ταυτόχρονα, παράγεται οξυγόνο και ελευθερώνονται πρωτόνια:



Το φαινόμενο αυτό, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, λέγεται **φωτόλυση** του νερού, επειδή ενισχύεται από τη φωτεινή ενέργεια. Το οξυγόνο που παράγεται απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα.

Η αυξανόμενη συγκέντρωση πρωτονίων στο εσωτερικό του θυλακοειδούς από τη δράση των αντλιών πρωτονίων και τη διάσπαση (φωτόλυση) μορίων νερού δημιουργεί ανισορροπία μεταξύ του εσωτερικού του θυλακοειδούς και του στρώματος. Αυτή η διαφορά συγκέντρωσης H⁺ στις δύο περιοχές εξαναγκάζει τα H⁺ να κατευθύνονται από το εσωτερικό του θυλακοειδούς προς το στρώμα του χλωροπλάστη. Η έξοδος των H⁺ γίνεται μέσω ειδικού καναλιού της ATP-συνθετάσης που βρίσκεται στις μεμβράνες των θυλακοειδών. Ταυτόχρονα με την έξοδο των πρωτονίων ελευθερώνεται ενέργεια που δεσμεύεται από μόριο ADP + Pi για το σχηματισμό ATP. Η διαδικασία μοιάζει με φαινόμενα ώσμωσης και γι' αυτό το λόγο η σύνθεση της ATP, με αυτόν τον τρόπο, λέγεται **χημειωσμωτική**.

Στην **κυκλική φωτοφωσφορυλίωση** τα ηλεκτρόνια που ελευθερώνονται, μεταφέρονται από τα κυταροχρώματα της οξειδοαναγωγικής αλυσίδας και ξαναγυρίζουν πίσω στη χλωροφύλλη του φωτοσυστήματος I και την επαναφέρουν στη θεμελιώδη κατάσταση. Κατά τη μεταφορά των ηλεκτρονίων ελευθερώνεται ενέργεια η οποία χρησιμοποιείται και πάλι, για τη μεταφορά πρωτονίων (H⁺) από το στρώμα στο εσωτερικό του θυλακοειδούς μέσω αντλιών πρωτονίων. Όταν το περιβάλλον στο εσωτερικό του θυλακοειδούς γίνει πιο όξινο από το στρώμα τα H⁺ επιστρέφουν στο στρώμα. Η επιστροφή των H⁺ γίνεται μέσω της ATP-συνθετάσης και κατά τη δίοδο τους ελευθερώνεται ενέργεια που προκαλεί φωσφορυλίωση της ADP και τη δημιουργία ATP.

Κατά την κυκλική φωτοφωσφορυλίωση δεν παράγεται NADPH, αλλά η διαδικασία αυτή γίνεται για να παραχθούν επιπρόσθετες ποσότητες ATP που θα χρησιμοποιηθούν στον κύκλο του Calvin, δεδομένου ότι ο κύκλος χρησιμοποιεί περισσότερα ATP παρά NADPH. Ουσιαστικά, η κυκλική φωτοφωσφορυλίωση αρχίζει όταν αυξηθεί η συγκέντρωση NADPH στο στρώμα του χλωροπλάστη λόγω έλλειψης ATP.

Η φωτοφωσφορυλίωση στην εξέλιξη των οργανισμών

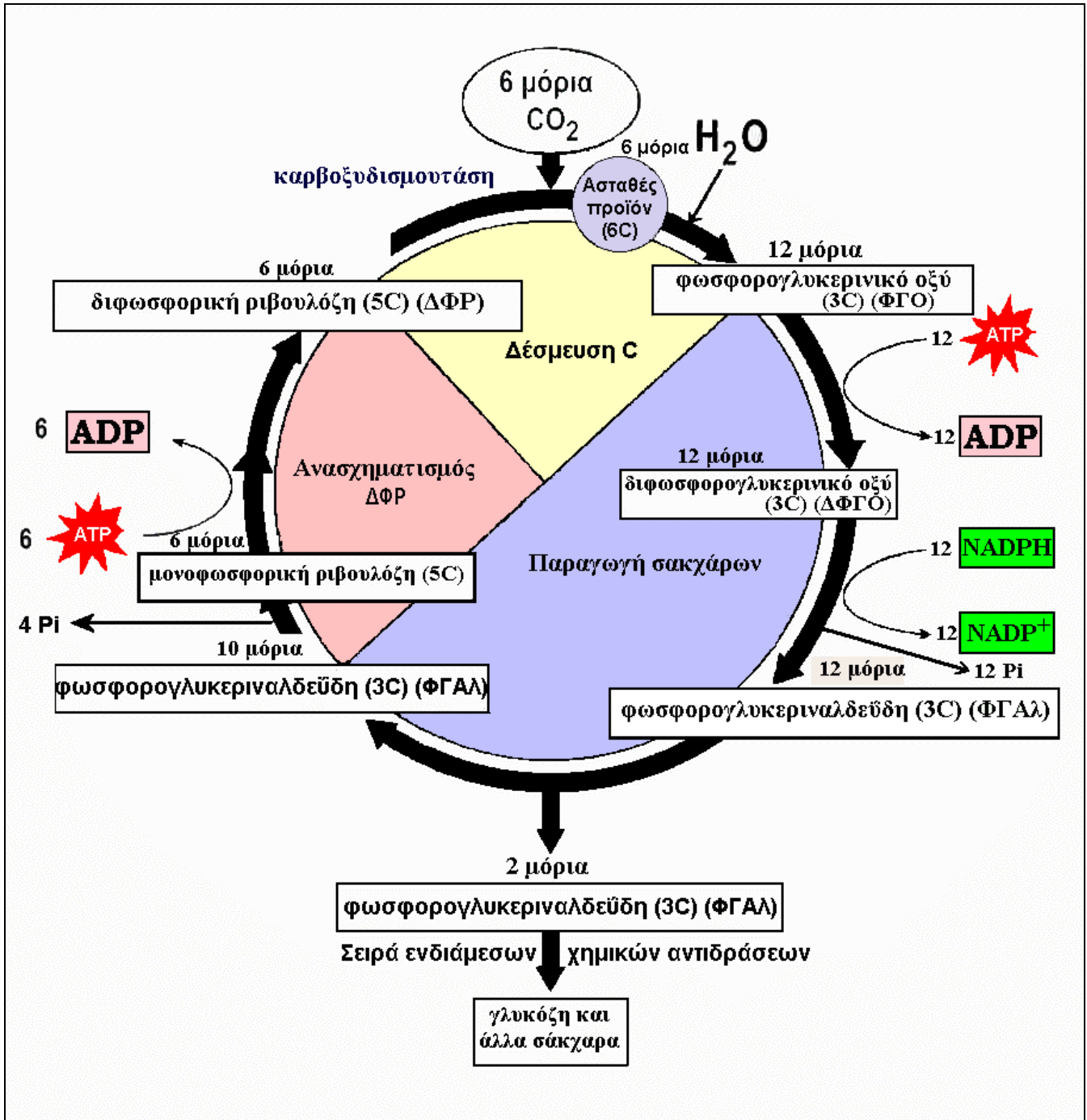
Πολύ νωρίς στην εξελικτική ιστορία της ζωής στον πλανήτη μας εμφανίστηκε το φωτοσύστημα I σε οργανισμούς που μοιάζουν με τα σημερινά θειοβακτήρια. Αυτό συνέβαινε πριν την εμφάνιση του οξυγόνου, πριν 3 περίπου δισεκατομμύρια χρόνια.

Το φωτοσύστημα II παρουσιάστηκε για πρώτη φορά στα κυανοβακτήρια πριν 2,7 περίπου δισεκατομμύρια χρόνια. Τα κυανοβακτήρια απέκτησαν έτσι την ικανότητα να κάνουν μη κυκλική φωτοφωσφορυλίωση.

Σήμερα, ορισμένα βακτήρια εξακολουθούν να κάνουν μόνο κυκλική φωτοφωσφορυλίωση. Αντίθετα, τα κυανοβακτήρια, τα φύκη και τα φυτά που κάνουν μη κυκλική φωτοφωσφορυλίωση, διατηρούν την ικανότητα να κάνουν και κυκλική, για να παράγουν ATP, όταν η αναλογία NADPH προς ATP είναι αρκετά ψηλή στους χλωροπλάστες.

- Η σκοτεινή φάση της φωτοσύνθεσης (Κύκλος του CALVIN)

Κατά τη σκοτεινή φάση της φωτοσύνθεσης χρησιμοποιούνται η ATP και το NADPH που παράγονται κατά τη φωτεινή φάση και το CO₂ που δεσμεύεται από την ατμόσφαιρα. Οι αντιδράσεις της σκοτεινής φάσης είναι πολύπλοκες και σχηματίζουν ένα κύκλο ο οποίος ονομάζεται **κύκλος του Calvin** (Εικόνα 6.25).



Εικόνα 6.25 Ο κύκλος του Calvin

Ο κύκλος του Calvin ξεκινά με μια πολύ σημαντική ουσία τη **διφωσφορική ριβουλόζη (ΔΦΡ)**. Με τη βοήθεια ενός ενζύμου (μιας καρβοξυλάσης που ονομάζεται **καρβοξυδισμουτάση**) η διφωσφορική ριβουλόζη (5C) ενώνεται με ένα μόριο CO₂ και σχηματίζεται ένα ασταθές προϊόν, ένας υδατάνθρακας (6C), ο οποίος αμέσως χωρίζεται σε δύο μόρια φωσφορογλυκερικού οξέος (ΦΓΟ) με τρεις άνθρακες το καθένα (3C). Στη συνέχεια, με ενέργεια και τις φωσφορικές ομάδες 2 μορίων της ATP παράγονται δύο μόρια διφωσφορογλυκερικού οξέος (ΔΦΓΟ) με φωσφορλίωση, τα οποία με τα υδρογόνα 2 μορίων NADPH και αποφωσφορλιώσεις δίνουν 2 μόρια φωσφορογλυκεριναλδεΐδης (ΦΓΑΛ). Μέρος της φωσφορογλυκεριναλδεΐδης χρησιμοποιείται για το σχηματισμό

της γλυκόζης, ενώ το υπόλοιπο για το σχηματισμό μονοφωσφορικής ριβουλόζης (ΜΦΡ), η οποία με ενέργεια και φωσφορική ομάδα από την ATP μετατρέπεται σε διφωσφορική ριβουλόζη.

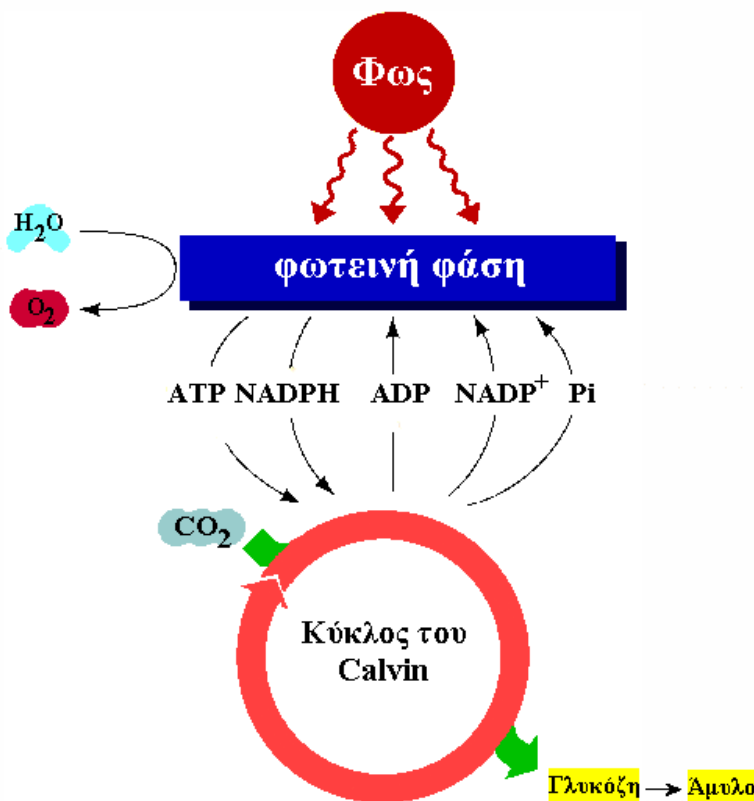
Τα αποτελέσματα της σκοτεινής φάσης της φωτοσύνθεσης είναι:

(α) ο σχηματισμός γλυκόζης

(β) η ανανέωση των αποθεμάτων της διφωσφορικής ριβουλόζης, ώστε να μπορεί να συνεχίσει η φωτοσύνθεση

Σε κάθε κύκλο του Calvin εισέρχεται ένα επιπλέον άτομο άνθρακα. Η νέα χημική ουσία που σχηματίζεται είναι η γλυκόζη που είναι εξόζη (6C). Εφόσον σε κάθε κύκλο ενσωματώνεται ένα άτομο άνθρακα, χρειάζονται 6 κύκλοι και επομένως 6 μόρια CO₂, για να σχηματιστεί ένα μόριο γλυκόζης.

Αν προσπαθήσουμε να ανιχνεύσουμε γλυκόζη στα φύλλα, θα διαπιστώσουμε ότι δεν υπάρχει.



Μόλις σχηματιστεί η γλυκόζη, λόγω του ότι είναι ωσμωτικά δραστήρια ουσία και επηρεάζει τη διακίνηση νερού προς και από τα κύτταρα, συμπυκνώνεται αμέσως προς πολυσακχαρίτες όπως άμυλο και κνιττρίνη.

Οι δύο φάσεις της φωτοσύνθεσης, η φωτεινή και η σκοτεινή είναι πολύ συνδεδεμένες μεταξύ τους και δε μπορεί να λειτουργήσει η μια ανεξάρτητα από την άλλη, όπως φαίνεται και στην εικόνα 6.26. Χωρίς την ATP και το NADPH, που παράγονται κατά τη φωτοφωσφορλίωση της φωτεινής φάσης, δε μπορούν να γίνουν οι αντιδράσεις της σκοτεινής φάσης. Αλλά και χωρίς την ADP και το NADP⁺, που παράγονται κατά τη σκοτεινή φάση και μεταφέρονται πίσω στα θυλακοειδή των χλωροπλαστών, δε μπορούν να παραχθούν η ATP και το NADPH κατά τη φωτεινή φάση.

Εικόνα 6.26 Συνοπτική εικόνα της φωτοσύνθεσης

6.7 Παράγοντες που επηρεάζουν το ρυθμό της φωτοσύνθεσης

Ο ρυθμός της φωτοσύνθεσης επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες. Οι σημαντικότεροι είναι η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα, η ένταση του φωτός, η θερμοκρασία, η ποσότητα της χλωροφύλλης, το νερό, διάφορα ανόργανα υλικά και η ρύπανση.

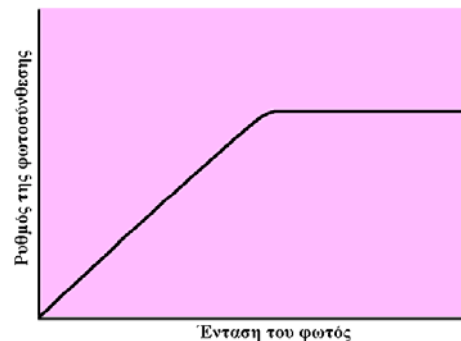
Ποιος από τους παράγοντες αυτούς επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό το ρυθμό της φωτοσύνθεσης;

Γενικά, ο ρυθμός της φωτοσύνθεσης, όπως και κάθε άλλης βιολογικής διεργασίας που ελέγχεται από περισσότερους από ένα βασικούς παράγοντες, επηρεάζεται περισσότερο από τον παράγοντα εκείνο που έχει τη μεγαλύτερη διαφορά από την άριστη τιμή, δηλαδή, τον παράγοντα που βρίσκεται πιο κοντά στην ελάχιστη τιμή του. Αν, για παράδειγμα, η συγκέντρωση του CO₂ είναι πολύ χαμηλή, ενώ όλοι οι άλλοι παράγοντες υπάρχουν σε ικανοποιητικές ποσότητες στο περιβάλλον του φυτού, τότε ο ρυθμός της φωτοσύνθεσης επηρεάζεται κυρίως από το CO₂. Αν η συγκέντρωση του CO₂ είναι ικανοποιητική, αλλά η ένταση της ακτινοβολίας είναι μικρή, τότε ο ρυθμός της φωτοσύνθεσης επηρεάζεται κυρίως από την ένταση της ακτινοβολίας.

Πιο κάτω εξετάζονται οι διάφοροι παράγοντες και ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζουν το ρυθμό της φωτοσύνθεσης.

- **Συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα**

Η συγκέντρωση του CO₂ στην ατμόσφαιρα είναι συνήθως 0.03%. Όσο ελαττώνεται η περιεκτικότητα του CO₂ στον αέρα, τόσο ελαττώνεται και ο ρυθμός της φωτοσύνθεσης. Αν η συγκέντρωση του CO₂ αυξηθεί με οποιοδήποτε τρόπο, όπως σ' ένα κλειστό θερμοκήπιο, τότε ο ρυθμός της φωτοσύνθεσης μεγαλώνει. Φυσικά, υπάρχει μια μέγιστη τιμή, την οποία όταν ξεπεράσει η συγκέντρωση του CO₂, τότε ο ρυθμός της φωτοσύνθεσης αρχίζει να μειώνεται. Η μέγιστη αυτή τιμή, ποικίλλει στα διάφορα είδη φυτών, κυμαίνεται γύρω στα 4-5%, ενώ σε ορισμένα είδη φτάνει στα 8-14%. Από πειράματα που έχουν γίνει στο εργαστήριο φαίνεται, ότι η συγκέντρωση του CO₂, κατά την οποία παρατηρείται μείωση του ρυθμού της φωτοσύνθεσης, εξαρτάται από το είδος του φυτού, το στάδιο ανάπτυξής του και το χρονικό διάστημα κατά το οποίο το φυτό είναι εκτεθειμένο σ' αυτή τη συγκέντρωση του CO₂.

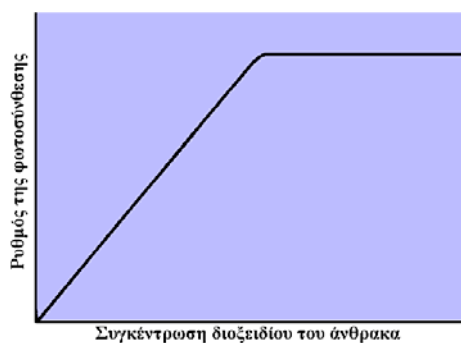


- **Ένταση του φωτός**

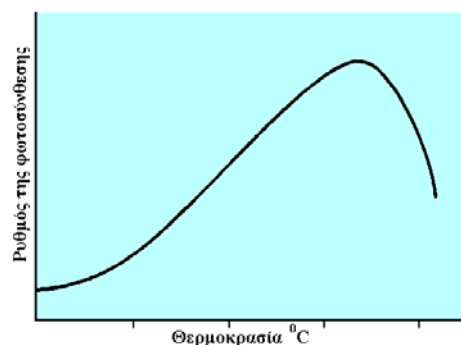
Το φως είναι απαραίτητο στη φωτεινή φάση της φωτοσύνθεσης, της οποίας ο ρυθμός μεγαλώνει όσο η ένταση του φωτός πλησιάζει την άριστη τιμή, που ποικίλλει στα διάφορα φυτά.

Ο ρυθμός της φωτοσύνθεσης είναι δυνατό να επιβραδυνθεί πολύ στο ασθενές φως ή και να μηδενιστεί. Τα φυτά μπορούν να φωτοσυνθέτουν και σε έντονο ηλεκτρικό φως. Εξάλλου το πολύ έντονο φως είναι δυνατό να προκαλέσει καταστροφή (αλλοίωση) της χλωροφύλλης και, επομένως, να σταματήσει η φωτοσύνθεση.

Η γραφική παράσταση πιο κάτω παρουσιάζει αποτέλεσμα πειράματος που μετρούσε το ρυθμό φωτοσύνθεσης σε σχέση με την αυξανόμενη ένταση του φωτός, με τη θερμοκρασία σταθερή στους 20°C και τη συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα στο 0,03%.



Όπως φαίνεται, ακόμη και μικρές αλλαγές στην ένταση του φωτός επηρεάζουν σημαντικά το ρυθμό της φωτοσύνθεσης. Είναι φανερό ότι στο σημείο που σταματά η αύξηση του ρυθμού της φωτοσύνθεσης, κάποιοι άλλοι παράγοντες περιορίζουν την περαιτέρω αύξηση του ρυθμού φωτοσύνθεσης. Στην προκειμένη περίπτωση αυτοί οι παράγοντες είναι το διοξείδιο του άνθρακα και η θερμοκρασία και η αύξηση των τιμών του ενός ή και των δύο παραγόντων οδηγεί στην αύξηση και του ρυθμού της φωτοσύνθεσης.



Εικόνα 6.27 Γραφική παράσταση της επίδρασης της έντασης του φωτός, της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα και της θερμοκρασίας στο ρυθμό της φωτοσύνθεσης.

- **Θερμοκρασία**

Όπως ήδη γνωρίζουμε η σκοτεινή φάση της φωτοσύνθεσης εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Για κάθε είδος φυτού υπάρχει μια άριστη τιμή της θερμοκρασίας, στην οποία επιτυγχάνεται ο μεγαλύτερος ρυθμός της φωτοσύνθεσης. Απομάκρυνση από την άριστη αυτή τιμή προκαλεί μείωση του ρυθμού της φωτοσύνθεσης. Για τις εύκρατες περιοχές η άριστη τιμή κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 10-35°C. Φυσικά για κάθε είδος φυτού υπάρχει μια ελάχιστη και μια μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας, πέρα από τις οποίες δε μπορεί να γίνει η φωτοσύνθεση.

- **Ποσότητα της χλωροφύλλης**

Ο ρυθμός της φωτοσύνθεσης μειώνεται, όταν περιορίζεται η ποσότητα της χλωροφύλλης στα φυτά, όπως π.χ. σε φυτά που μένοντας στο σκοτάδι περιορίζουν την ποσότητα της χλωροφύλλης τους. Το έντονο φως, επίσης, είναι δυνατό να προκαλέσει καταστροφή της χλωροφύλλης τους.

- **Νερό**

Τα φυτά, επειδή προσλαμβάνουν πολύ μεγαλύτερες ποσότητες νερού από όσες χρειάζονται, πολύ σπάνια αντιμετωπίζουν έλλειψη νερού στους χλωροπλάστες τους. Το νερό του περιβάλλοντος (βροχόπτωση, χιονόπτωση κτλ) απλώς καθορίζει τα φυτικά είδη, που μπορεί να υπάρχουν σε μια περιοχή. Η έλλειψη νερού έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του ρυθμού της φωτοσύνθεσης, αφού για να γίνει η φωτοσύνθεση χρειάζεται νερό. Στις περιπτώσεις αυτές τα φύλλα μαραίνονται, περιορίζεται το άνοιγμα των στομάτων και έτσι δεν προσλαμβάνεται αρκετή ποσότητα CO₂, με αποτέλεσμα να μειώνεται περισσότερο ο ρυθμός της φωτοσύνθεσης.

- **Ανόργανα άλατα**

Τα φυτά συνεχώς χρησιμοποιούν ανόργανα υλικά για την κατασκευή ουσιών που είναι απαραίτητες για τη φωτοσύνθεση και την ανάπτυξή τους. Το μαγνήσιο είναι αναγκαίο στη σύνθεση του μορίου της χλωροφύλλης ενώ ο σίδηρος, το θείο, το μαγγάνιο και ο φωσφόρος παίζουν σημαντικό ρόλο στη λειτουργία της φωτοσύνθεσης.

- **Ρύπανση**

Τελευταία αποδείχτηκε ότι η ρύπανση της ατμόσφαιρας από διάφορα υλικά (αιθάλη, οξείδια-όξινη βροχή) είναι δυνατό να επηρεάσει δυσμενώς τη λειτουργία της φωτοσύνθεσης και να μειώσει τη φυτική ανάπτυξη. Όμως και η ρύπανση του εδάφους και του νερού με βαρέα μέταλλα (υδράργυρο, χαλκό, κάδμιο, νικέλιο, ψευδάργυρο και μόλυβδο) δημιουργεί προβλήματα στη φωτοσύνθεση. Ιδιαίτερα σε χαμηλής έντασης ακτινοβολία γίνεται αντικατάσταση του μαγνησίου, που βρίσκεται στο κέντρο του μορίου της χλωροφύλλης, από άλλα βαρέα μέταλλα. Η αντικατάσταση αυτή εμποδίζει τη διέγερση του μορίου της χλωροφύλλης, με αποτέλεσμα να εμποδίζεται η φωτοσύνθεση. Αντίθετα, σε υψηλής έντασης ακτινοβολία δε γίνεται η αντικατάσταση του μαγνησίου από βαρέα μέταλλα.

6.8 Σημασία της φωτοσύνθεσης για το γήινο οικοσύστημα

1. Η φωτοσύνθεση είναι η σημαντικότερη λειτουργία που γίνεται στη βιόσφαιρα, γιατί με τις οργανικές ουσίες που παράγει, συντηρεί τη ζωή στο γήινο οικοσύστημα. Όλοι σχεδόν οι οργανισμοί στηρίζονται, άμεσα ή έμμεσα, στην εξασφάλιση της τροφής τους και της αναγκαίας ενέργειας, στις οργανικές ενώσεις που παράγουν οι φωτοσυνθέτοντες οργανισμοί. Τα υλικά που χρησιμοποιεί ο άνθρωπος, για να εξασφαλίσει ενέργεια, προέρχονται κυρίως από φωτοσυνθετικές διεργασίες, τωρινές ή παλιότερες. Το ξύλο, για παράδειγμα, είναι το πιο κοινό καύσιμο. Τα καύσιμα, όπως οι γαιάνθρακες, το φυσικό αέριο και οι γαιάνθρακες, προέρχονται από φυτά και άλλους οργανισμούς που έζησαν σε παλιότερες γεωλογικές εποχές. Υπολογίζεται ότι ο υδατάνθρακας που παράγεται από τη φωτοσύνθεση ετησίως θα μπορούσε να γεμίσει τα βαγόνια ενός τραίνου που είχε μήκος από τη Γη ως τη σελήνη, πενήντα φορές!
 2. Με τη φωτοσύνθεση δεσμεύονται τεράστιες ποσότητες CO₂ (ετησίως, υπολογίζονται σε 600 δισεκατομμύρια τόνοι) και έτσι, αφ' ενός μεν, καθαρίζεται η ατμόσφαιρα και, αφ' ετέρου, διατηρείται περίπου σταθερός ο άνθρακας στον κύκλο που ακολουθεί (αποβολή CO₂ με την αναπνοή των οργανισμών και δέσμευσή του με τη φωτοσύνθεση).
 3. Εμπλουτίζεται η ατμόσφαιρα και η υδρόσφαιρα με οξυγόνο (ετησίως υπολογίζονται σε 400 δισεκατομμύρια τόνοι), που είναι απαραίτητο για την επιβίωση των οργανισμών (οξειδωση οργανικών ουσιών και παραγωγή ενέργειας). Επομένως, χωρίς τη φωτοσύνθεση δεν είναι δυνατή η συντήρηση και η συνέχιση της ζωής στον πλανήτη μας.
-