# ΕΠΙΔΡΑΣΗ 26 ...ΣΤΗ ΒΙΟΧΗΜΕΙΑ: Απορόφηση φωτός κατά τη φωτοσύνθεση των φυτών

Μεγάλο ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας με μήκη κύματος κάτω από τα 400 nm και πάνω από τα 1000 nm απορροφάται από τα αέρια της ατμόσφαιρας όπως το όζον και το $O_2$, τα οποία απορροφούν υπεριώδη ακτινοβολία, και τα $CO_2$ και $H_2O$, τα οποία απορροφούν υπέρυθρη ακτινοβολία. Ως αποτέλεσμα, τα φυτά, τα άλγη και κάποια είδη βακτηρίων ανέπτυξαν φωτοσυνθετικούς μηχανισμούς που απορροφούν την ορατή και την κοντινή υπέρυθρη ακτινοβολία. Τα φυτά χρησιμοποιούν ακτινοβολία στο διάστημα από 400–700 nm για να οδηγήσουν την ενδόεργη αναγωγή του $CO_2$ σε γλυκόζη, με τη συνακόλουθη οξείδωση του νερού σε $O_2$ ($\Delta_r G^{\oplus} = +2880$ kJ mol$^{-1}$, ο άνω δείκτης $^{\oplus}$ δηλώνει βιολογική πρότυπη κατάσταση, με pH = 7):

$$6\,CO_2(g) + 6\,H_2O(l) \xrightarrow{\text{Φωτοσύνθεση}} C_6H_{12}O_6(aq) + 6\,O_2(g)$$

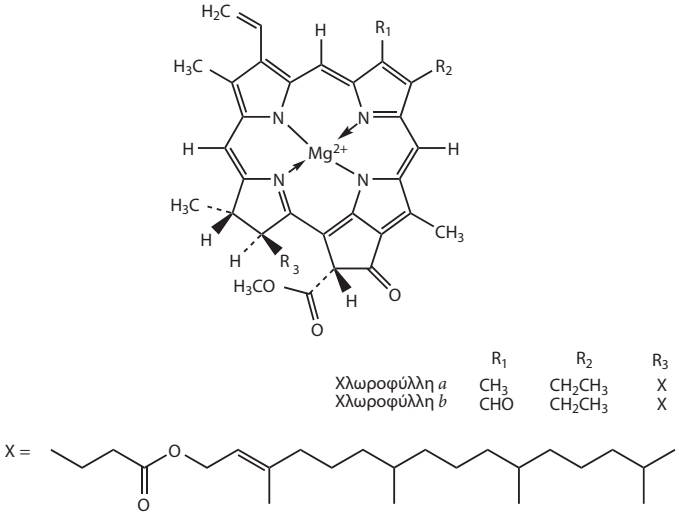
Τα ηλεκτρόνια ρέουν από το αναγωγικό στο οξειδωτικό μέσω μιας σειράς ηλεκτροχημικών αντιδράσεων που είναι συζευγμένες με τη σύνθεση του ATP. Η διεργασία λαμβάνει χώρα στον *χλωροπλάστη*, ένα ειδικό οργανίδιο του κυττάρου του φυτού, όπου οι χλωροφύλλες *a* και *b* (Εικ. **1**) και τα καροτενοειδή (εκ των οποίων το β-καροτένιο, Εικ. **2**, είναι ένα παράδειγμα) προσδένονται σε πρωτεΐνες που ονομάζονται *σύμπλοκα συλλογής φωτός*. Τα σύμπλοκα αυτά απορροφούν ηλιακή ενέργεια και τη μεταφέρουν σε σύμπλοκα πρωτεϊνών που είναι γνωστά ως *κέντρα αντίδρασης*, όπου συμβαίνουν αντιδράσεις μεταφοράς ηλεκτρονίων επαγόμενες από το φως. Σε συνεργασία, τα σύμπλοκα συλλογής φωτός και τα κέντρα αντίδρασης των φυτών οδηγούν την αναγωγή του $NADP^+$ (Εικ. **3**) από το νερό:

$$2\,H_2O + 2\,NADP^+ \xrightarrow{\text{Φως}} O_2 + 2\,NADPH + 2\,H^+$$

Είναι φανερό ότι ενέργεια από το φως απαιτείται για να οδηγήσει αυτή την αντίδραση διότι, στο σκοτάδι, $E^{\oplus} = -1{,}135$V και $\Delta_r G^{\oplus} = +438{,}0$ kJ mol$^{-1}$.

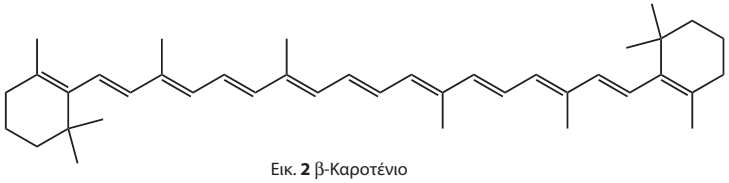
Τα σύμπλοκα συλλογής φωτός δεσμεύουν μεγάλους αριθμούς χρωστικών προκειμένου να παρέχουν ικανοποιητικά μεγάλη επιφάνεια για παγίδευση της ακτινοβολίας. Η απορρόφηση ενός φωτονίου ανυψώνει ένα μόριο χλωροφύλλης ή καροτενοειδούς σε μια διεγερμένη μονή κατάσταση και μέσα σε 0,1–5 ps η ενέργεια μεταπηδά σε μια κοντινή χρωστική μέσω του μηχανισμού Förster. Περίπου 100–200 ps αργότερα, που αντιστοιχεί σε χιλιάδες άλματα ενέργειας εντός του συμπλόκου συλλογής φωτός, περισσότερο από το 90 τοις εκατό της απορροφούμενης ενέργειας φτάνει στο κέντρο αντίδρασης. Εκεί, ένα διμερές χλωροφύλλης *a* διεγείρεται ηλεκτρονιακά και εκκινεί μια υπερταχεία αντίδραση μεταφοράς ηλεκτρονίων που συμβαίνει εντός μερικών ps. Από τη στιγμή που η διεγερμένη κατάσταση του διμερούς χλωροφύλλης έχει αποσβεστεί αποδοτικά από αυτή την πρώτη αντίδραση, τα συνακόλουθα στάδια που οδηγούν στην οξείδωση του νερού και την αναγωγή του $NADP^+$ συμβαίνουν πιο αργά, με τους χρόνους αντίδρασης να ποικίλλουν από 200 ps έως 1 ms. Δηλαδή, τα αρχικά συμβάντα μεταφοράς ενέργειας και ηλεκτρονίων της φωτοσύνθεσης υπόκεινται σε στενό κινητικό έλεγχο. Η φωτοσύνθεση δεσμεύει ηλιακή ενέργεια αποδοτικά διότι η διεγερμένη μονή κατάσταση της χλωροφύλλης αποσβέννυται γρήγορα από διεργασίες που συμβαίνουν με χρόνους αποκατάστασης που είναι πολύ μικρότεροι από τον χρόνο ζωής του φθορισμού, ο οποίος είναι τυπικά περίπου 1 ns σε οργανικούς διαλύτες σε θερμοκρασία δωματίου.

Συνοπτικά, η φυτική φωτοσύνθεση χρησιμοποιεί ηλιακή ενέργεια για να μεταφέρει ηλεκτρόνια από ένα φτωχό αναγω-

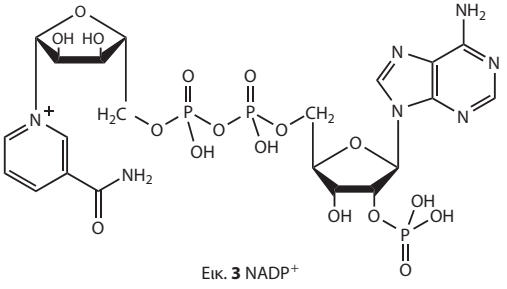



| | $R_1$ | $R_2$ | $R_3$ |
|---|---|---|---|
| Χλωροφύλλη *a* | $CH_3$ | $CH_2CH_3$ | X |
| Χλωροφύλλη *b* | CHO | $CH_2CH_3$ | X |

Εικ. **1** Χλωροφύλλη *a* και *b*



Εικ. **2** β-Καροτένιο




Εικ. **3** $NADP^+$

γικό (το νερό) στο διοξείδιο του άνθρακα. Κατά τη διεργασία συντίθενται στο κύτταρο μόρια υψηλής ενέργειας (υδατάνθρακες, όπως η γλυκόζη). Τα ζώα τρέφονται με τους υδατάνθρακες που προκύπτουν από τη φωτοσύνθεση. Κατά τη διάρκεια του αερόβιου μεταβολισμού, το $O_2$ που απελευθερώνεται από τη φωτοσύνθεση ως άχρηστο προϊόν χρησιμοποιείται για να οξειδώσει υδατάνθρακες προς $CO_2$, οδηγώντας βιολογικές διεργασίες, όπως η βιοσύνθεση, η συστολή των μυών, η διαίρεση των κυττάρων και η αγωγή των νεύρων. Έτσι, η διατήρηση της ζωής στη Γη εξαρτάται από έναν σφιχτά ρυθμισμένο κύκλο άνθρακα–οξυγόνου που οδηγείται από την ηλιακή ενέργεια.