

Βιολογία

Τμήμα Ωκεανογραφίας και Θαλάσσιων Βιοεπιστημών

Διδάσκουσα: Μεζίτη Αλεξάνδρα

Διάλεξη 9: Μεταβολισμός/ Φωτοσύνθεση

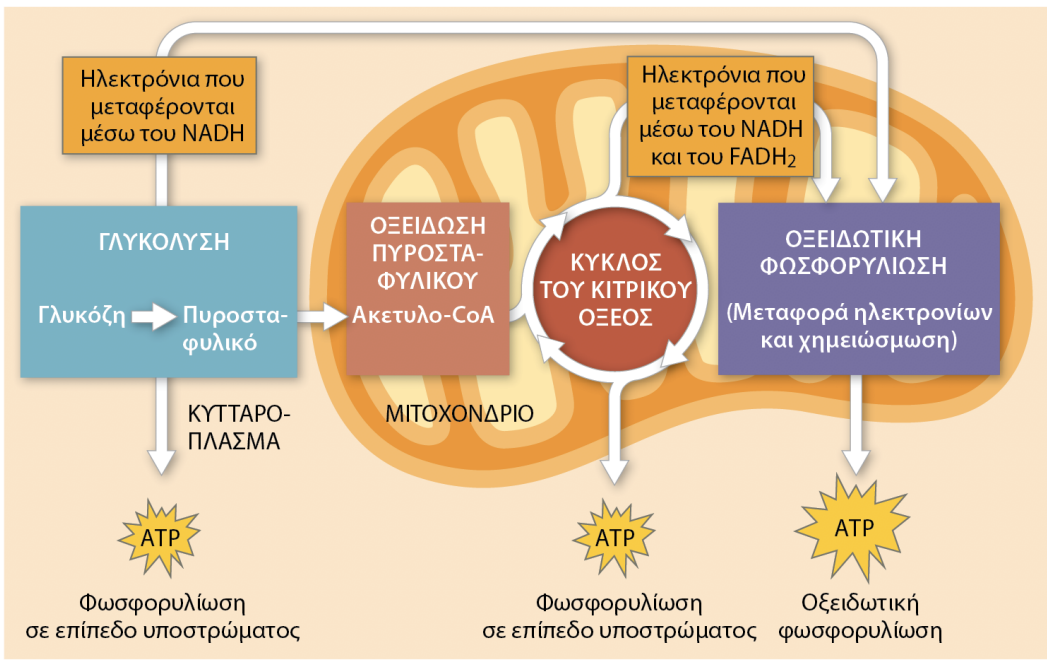
03/12/2025

Προεπισκόπηση των σταδίων της κυτταρικής αναπνοής

- 1. ΓΛΥΚΟΛΥΣΗ (μπλε χρώμα σε όλο το κεφάλαιο)
- 2. ΟΞΕΙΔΩΣΗ ΤΟΥ ΠΥΡΟΣΤΑΦΥΛΙΚΟΥ (ανοιχτό πορτοκαλί) και ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ ΚΙΤΡΙΚΟΥ ΟΞΕΟΣ (σκούρο πορτοκαλί)
- 3. ΟΞΕΙΔΩΤΙΚΗ ΦΩΣΦΟΡΥΛΙΩΣΗ: Μεταφορά ηλεκτρονίων και χημειώσωση (μοβ)

► **Εικόνα 9.5** Επισκόπηση της κυτταρικής αναπνοής.

Κατά τη γλυκόλυση, κάθε μόριο γλυκόζης διασπάται σε δύο μόρια πυροσταφυλικού οξέος. Εδώ παρουσιάζεται η κυτταρική αναπνοή των ευκαρυωτικών κυττάρων, κατά την οποία το πυροσταφυλικό εισέρχεται στο μιτοχόνδριο και οξειδώνεται προς CO_2 , μέσω του κύκλου του κιτρικού οξέος. Δύο μεταφορείς ηλεκτρονίων, το NADH και το FADH_2 , μεταφέρουν τα ηλεκτρόνια που προέρχονται από τη γλυκόζη σε αλυσίδες μεταφοράς ηλεκτρονίων. Κατά την οξειδωτική φωσφορυλίωση, οι αλυσίδες μεταφοράς ηλεκτρονίων μετατρέπουν τη χημική ενέργεια σε μια μορφή που μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για τη σύνθεση ATP, μέσω του μηχανισμού της χημειώσωσης. (Στη διάρκεια προηγούμενων σταδίων της κυτταρικής αναπνοής συντίθεται ένας μικρός αριθμός μορίων ATP μέσω ενός μηχανισμού που ονομάζεται φωσφορυλίωση σε επίπεδο υποστρώματος.) Για μια οπτική επισκόπηση των παραπάνω διεργασιών και τη σχέση τους με τις κυτταρικές λειτουργίες, βλ. Εικόνα 6.32β.



Κατά την Γλυκόλυση συγκομίζεται χημική ενέργεια μέσω της οξείδωσης της γλυκόζης σε πυροσταφυλικό

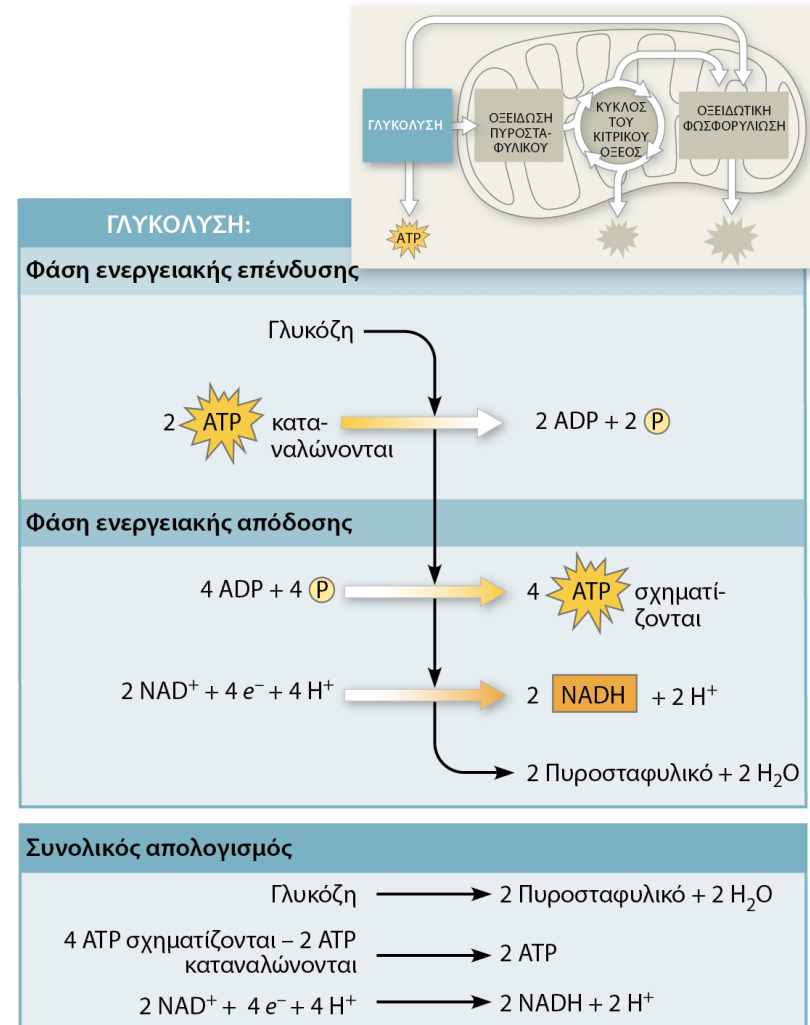
Γλυκόλυση → λύση της γλυκόζης σε δύο τρισακχαρίτες → Οξείδωση κ αναδιάταξη σε δύο μόρια πυροσταφυλικού

Επένδυση ενέργειας κ εξόφληση « με τόκο »

Τελική προσφορά 2 ATP κ 2 NADH

→ Όλοι οι ανθρακες καταλήγουν στα πυροσταφυλικά κ δεν απελευθερώνεται CO₂
→ **Η αντίδραση πραγματοποιείται ανεξάρτητα της παρουσίας O₂!!!!**

▼ **Εικόνα 9.7** Τι καταναλώνεται και τι παράγεται κατά τη γλυκόλυση.



Μετά την οξείδωση του πυροσταφυλικού, η συγκομιδή ενέργειας ολοκληρώνεται με την οξείδωση οργανικών οξέων στον κύκλο του κιτρικού οξέως

Οξείδωση του πυροσταφυλικού σε ακετυλο-CoA

Εισαγωγή πυροσταφυλικού στα μιτοχόνδρια με ενεργητική μεταφορά

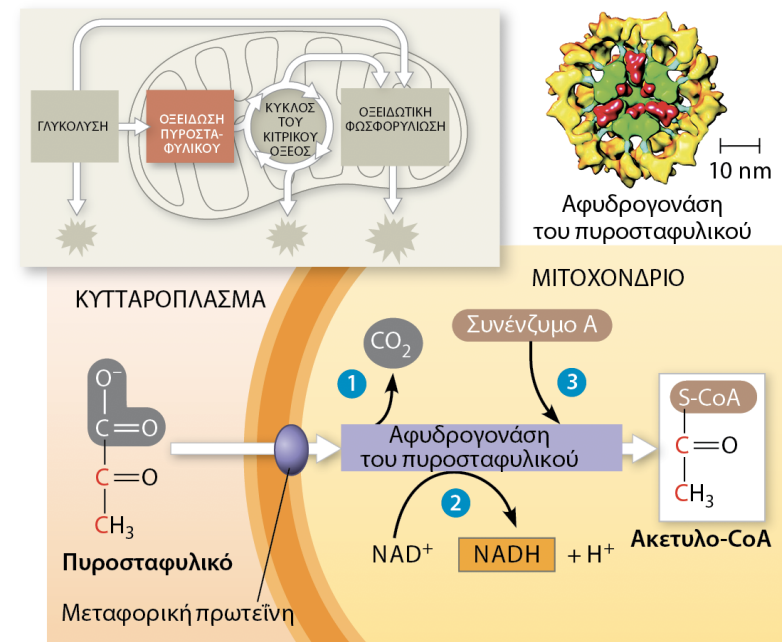
Συνδετικός κρίκος γλυκόλυσης με τον κύκλο του κιτρικού οξέος

Κατάλυση από πολυενζυμικό σύμπλοκο

Παραγωγή ενός NADH αλλά και ακετυλο-CoA → πολύ πλούσιο σε δυναμική ενέργεια

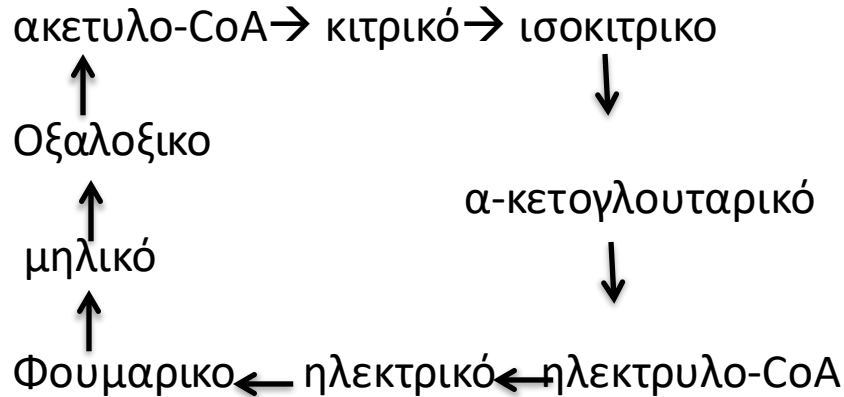
Μεταφορά ακετυλομάδας στον κύκλο του κιτρικού οξέως → εξώεργη αντίδραση

▼ **Εικόνα 9.9** Η οξείδωση του πυροσταφυλικού σε ακετυλο-CoA είναι το βήμα που γίνεται πριν από τον κύκλο του κιτρικού οξέος. Το μόριο του πυροσταφυλικού εισέρχεται στο μιτοχόνδριο μέσω μιας μεταφορικής πρωτεΐνης και υφίσταται επεξεργασία από ένα σύμπλοκο ενζύμων, τη λεγόμενη αφυδρογονάση του πυροσταφυλικού (η εικόνα στο ένθετο έχει δημιουργηθεί σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, βάσει τομών που έχουν ληφθεί με ηλεκτρονική κρυσταλλοσκοπία). Το εν λόγω σύμπλοκο καταλύει τα τρία αριθμημένα στάδια που περιγράφονται αναλυτικά στο κείμενο. Το μόριο του CO_2 θα διαχυθεί εκτός κυττάρου. Το NADH θα χρησιμοποιηθεί στην οξειδωτική φωσφορυλίωση. Η ακετυλομάδα του ακετυλοσυνενζύμου A θα εισέλθει στον κύκλο του κιτρικού οξέος. (Όταν το συνένζυμο A είναι συνδεδεμένο σε κάποιο μόριο, τότε συμβολίζεται ως S-CoA, για να τονιστεί η παρουσία του ατόμου θείου, S, στο μόριό του.)

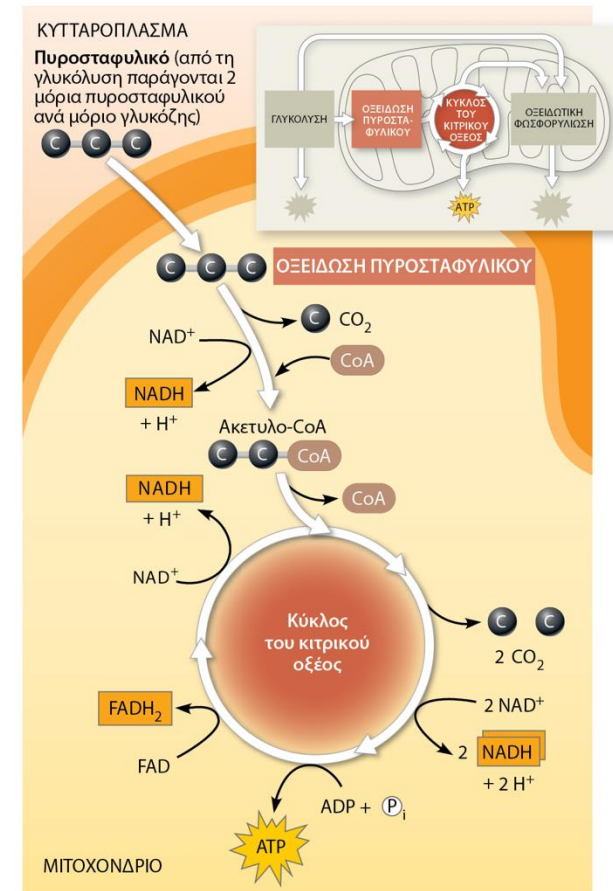
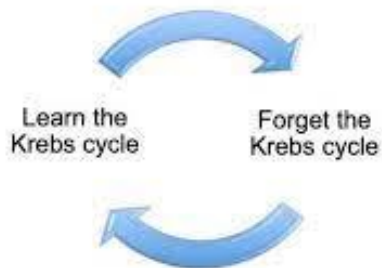


Μετά την οξείδωση του πυροσταφυλικού, η συγκομιδή ενέργειας ολοκληρώνεται με την οξείδωση οργανικών οξέων στον κύκλο του κιτρικού οξέως

Κύκλος του κιτρικού οξέως ή τρικαρβοξυλικού οξέως ή κυκλος του Krebs



The REAL Krebs cycle:



▲ Εικόνα 9.10 Μια γενική θεώρηση της οξείδωσης του πυροσταφυλικού και του κύκλου του κιτρικού οξέος. Εδώ παρουσιάζουμε τι εισέρχεται στον κύκλο του κιτρικού οξέος και τι εξέρχεται, ανά μόριο πυροσταφυλικού, δίνοντας έμφαση στα άτομα άνθρακα που εμπλέκονται. Για να υπολογίσουμε τι εισέρχεται και τι εξέρχεται ανά μόριο γλυκόζης, θα πρέπει να πολλαπλασιάσουμε επί 2, καθώς, κατά τη διάρκεια της γλυκόλυσης, κάθε μόριο γλυκόζης διασπάται σε δύο μόρια πυροσταφυλικού.

Κατά την οξειδωτική φωσφορυλίωση, η χημειώσμωση συζευγνυει τη μεταφορά ηλεκτρονίων με τη σύνθεση ATP

Οδός μεταφοράς ηλεκτρονίων

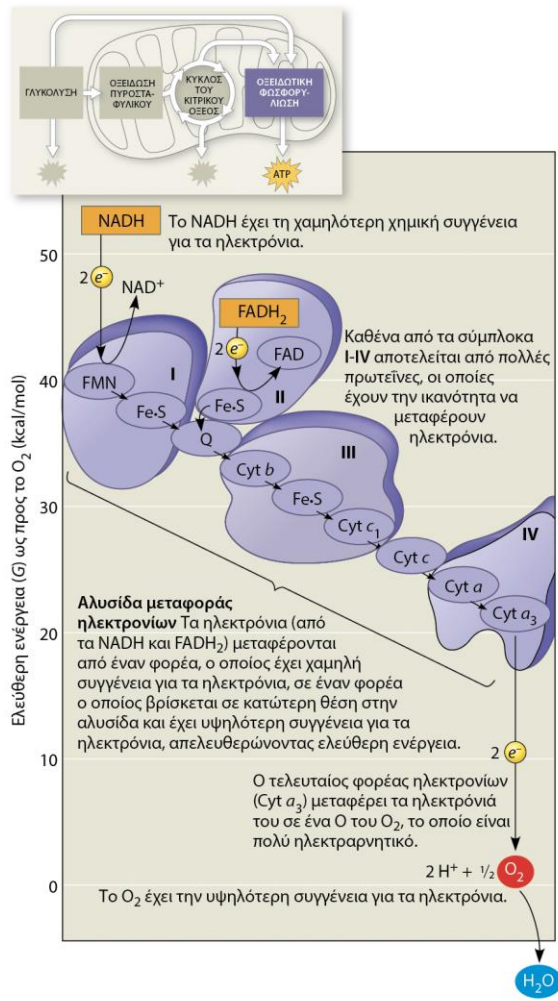
Η αλυσίδα μεταφοράς e^- αποτελείται από μία ομάδα πρωτεϊνικών μορίων ενσωματωμένων στην μεμβράνη των μιτοχονδρίων (ή στην ΚΜ στους προκαρυώτες).

Συνεχείς οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις που μεταφέρουν e^- από τα λιγότερο στα περισσότερα ηλεκτραρνητικά άτομα

Μεταφορά NADH από την γλυκόλυση στο σύμπλοκο I (flavin mononucleotide; FMN, πρωτεΐνη Fe-S, ουβικινόνη; Συνενζυμο Q), κυτοχρώματα).

Μεταφορά ηλεκτρονίων από το FADH₂ στο σύμπλοκο II

Εικόνα 9.12 Η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας κατά τη διάρκεια της μεταφοράς ηλεκτρονίων. Η συνολική απώλεια ενέργειας (ΔG) των ηλεκτρονίων που μεταφέρονται από το NADH στο οξυγόνο είναι 53 kcal/mol, αλλά αυτή η «πτώση» διαμοιράζεται σε μια σειρά μικρότερων βημάτων, μέσω της αλυσίδας μεταφοράς ηλεκτρονίων. (Το άτομο του οξυγόνου συμβολίζεται εδώ ως $\frac{1}{2} O_2$ για να δοθεί έμφαση στο γεγονός ότι αυτό που ανάγεται από την αλυσίδα είναι το μοριακό οξυγόνο, O_2 , και όχι μεμονωμένα άτομα οξυγόνου.) Η κυτταρική θέση των πρωτεϊνών που συμμετέχουν στην μεταφορά των ηλεκτρονίων παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.32β.



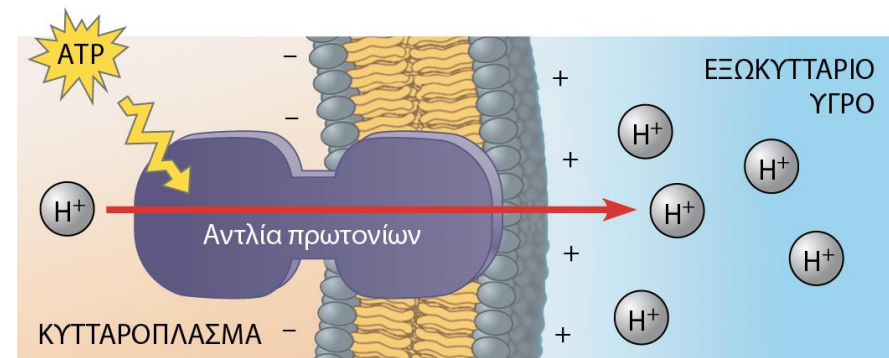
ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ Συγκρίνατε τη θέση των ηλεκτρονίων του NADH στην κορυφή της αλυσίδας (για τη δομή του NADH, βλ. Εικόνα 9.3), με τη θέση τους στο H₂O, στο τέρμα της αλυσίδας. Περιγράψτε γιατί τα ηλεκτρόνια του H₂O έχουν χαμηλότερη δυναμική ενέργεια, χρησιμοποιώντας στην περιγραφή σας τον όρο «ηλεκτραρνητικότητα».

Αντλίες πρωτονίων

- Στα φυτά, τους μύκητες και τα βακτήρια οι κύριες αντλίες είναι οι αντλίες πρωτονίων
- Μεταφορά (με κατανάλωση ενέργειας ιόντων H^+ έξω από το κύτταρο)
- Με τη δημιουργία διαφοράς δυναμικού οι ηλεκτρογόνες αντλίες αποθηκεύουν ενέργεια και βοηθούν στη σύνθεση ATP

AMPBELL, **ΒΙΟΛΟΓΙΑ** (12^η έκδ.), ΠΕΚ 2023, www.cup.gr

▼ **Εικόνα 7.18** Μια αντλία πρωτονίων. Η αντλία πρωτονίων είναι μια ηλεκτρογόνος αντλία που αποθηκεύει ενέργεια δημιουργώντας διαφορά δυναμικού (διαχωρισμό φορτίου) ανάμεσα στις δύο πλευρές της μεμβράνης: μεταθέτει δε θετικά φορτία, και πιο συγκεκριμένα ιόντα υδρογόνου (πρωτόνια, H^+). Οι δύο αυτές πηγές ενέργειας, δηλαδή η διαφορά δυναμικού και η διαβάθμιση της συγκέντρωσης των H^+ , μπορούν να τροφοδοτήσουν ενεργειακά άλλες διεργασίες, π.χ. την πρόσληψη θρεπτικών συστατικών. Για τη λειτουργία τους, οι περισσότερες αντλίες πρωτονίων τροφοδοτούνται ενεργειακά από την υδρόλυση της ATP. (Βλ. Εικόνα 6.32α.)

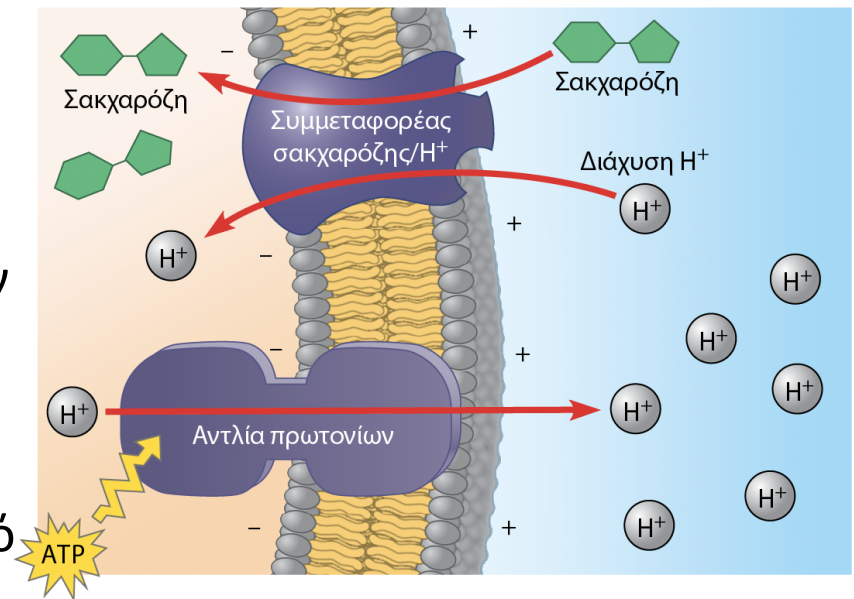


Συμμεταφορά

Όταν μία ουσία διαχέεται κατά τη διαβάθμιση της συγκέντρωσής της παράγει έργο.

Αυτό το έργο μπορεί να συζευχθεί με την μεταφορά άλλης ουσίας αντίθετα από την διαβάθμιση → συμμεταφορά

Συμμεταφορά σακχαρόζης (αντίθετα από την διαβάθμιση) με ενέργεια από την διάχυση H^+ η οποία συντηρείται από την διαβάθμιση που έχουν προκαλέσει οι αντλίες H^+ .



▲ Εικόνα 7.19 Συμμεταφορά: Ενεργητική μεταφορά τροφοδοτούμενη ενεργειακά από μια διαβάθμιση συγκέντρωσης. Μια πρωτεΐνη-φορέας, όπως αυτός ο συμμεταφορέας σακχαρόζης/ H^+ σε ένα φυτικό κύτταρο, έχει την ικανότητα να αξιοποιεί τη διάχυση του H^+ προς το εσωτερικό του κυττάρου (καθώς αυτό ακολουθεί τη διαβάθμιση της συγκέντρωσής του) προκειμένου να καθοδηγεί την πρόσληψη της σακχαρόζης. (Εδώ το κυτταρικό τοίχωμα δεν παρουσιάζεται.) Στο κάτω μέρος της εικόνας παρουσιάζεται επίσης μια ATP-τροφοδοτούμενη αντλία πρωτονίων, η οποία, αν και τεχνικά δεν αποτελεί συστατικό μέρος του μηχανισμού συμμεταφοράς, συγκεντρώνει πρωτόνια εκτός κυττάρου. Η προκύπτουσα διαβάθμιση συγκέντρωσης των H^+ αντιπροσωπεύει ένα δυναμικό ενέργειας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ενεργητική μεταφορά ουσιών – εν προκειμένω, της σακχαρόζης. Επομένως, η υδρόλυση της ATP παρέχει εμμέσως την απαραίτητη ενέργεια για τη συμμεταφορά.

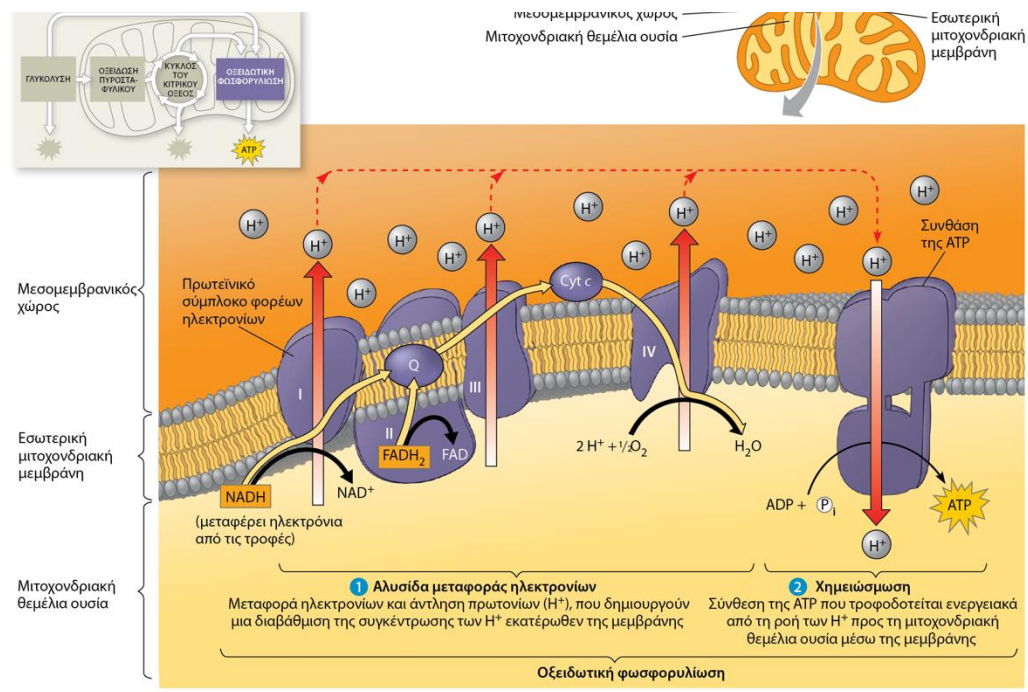
Χημειώσμωση: Ένας μηχανισμός σύζευξης ενέργειας

Συνθάση της ATP

- Ενζυμο που συνθέτει ATP απο ADP και ανόργανα φωσφορικά ιόντα
- Αντίστροφη αντλία ιόντων
 - δεν αντλεί H^+ αντίθετα προς την διαβάθμιση αλλά τροφοδοτεί τη σύνθεση ATP
 - η αντίδραση τροφοδοτείται ενεργειακά από το διαφορετικό pH εκατέρωθεν της μεμβράνης

Χημειώσμωση: η διαδικασία κατά την οποία κυτταρικές λειτουργίες τροφοδοτούνται ενεργειακά από τη διαφορά συγκέντρωσης H^+ εκατέρωθεν της ΚΜ.

Πρωτονιεγεργητική δύναμη
Η ικανότητα της διαβάθμισης
συγκέντρωσης να παράγει έργο



ΤΙ ΘΑ ΓΙΝΟΤΑΝ ΑΝ...; Θα μπορούσε η χημειώσμωση να παραγάγει ΑΤΡ, αν δεν ήταν λειτουργικό το σύμπλοκο IV; Αν ναι, θα ήταν διαφορετική η ταχύτητα σύνθεσης;

Ζύμωση κ αναερόβια αναπνοή → παραγωγή ATP χωρίς οξυγόνο

Αναερόβια αναπνοή: χρήση αλυσίδας μεταφοράς ηλεκτρονίων (αναπνευστική αλυσίδα) αλλά με άλλο τελικό αποδέκτη (όχι το οξυγόνο)

→ Χρήση SO_4^{-2} ως τελικού αποδέκτη και παραγωγή H_2S

Ζύμωση: απουσία αναπνευστικής αλυσίδας

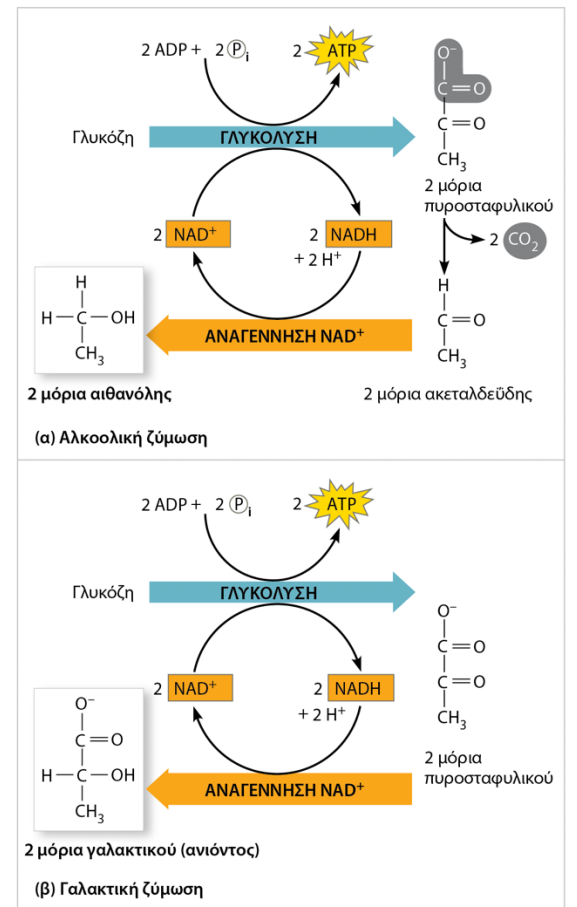
Η ζύμωση περιλαμβάνει την γλυκόλυση κ αντιδράσεις αναγέννησης του NAD^+ για τη μεταφορά e^- στο πυροσταφυλικό ή παραγωγά του.

Οι τύποι ζύμωσης διακρίνονται βάσει του τελικού προϊόντος απο το πυροσταφυλικό

→ Αλκοολική ζύμωση → τελικό προϊόν αιθανόλη (πολλά αναερόβια βακτήρια, αλλά κ η κοινή ζύμη (ψωμί, ζυθοποιία, οινοποιία)

→ Γαλακτική ζύμωση → άμεση αναγωγή πυροσταφυλικου από NADH σε γαλακτικό (Παρασκευή τυριών, γιαουρτιου)

▼ **Εικόνα 9.16 Ζύμωση.** Απουσία οξυγόνου, πολλά κύτταρα χρησιμοποιούν τον μηχανισμό της ζύμωσης για να παραγάγουν ATP με φωσφορυλίωση σε επίπεδο υποστρώματος. Το πυροσταφυλικό, το τελικό προϊόν της γλυκόλυσης, λειτουργεί ως δέκτης ηλεκτρονίων για την επανοξείδωση του NADH σε NAD^+ , το οποίο μπορεί να ξαναχρησιμοποιηθεί για έναν νέο κύκλο γλυκόλυσης. Δύο συνηθι τα τελικά προϊόντα που σχηματίζονται κατά τη ζύμωση είναι (α) η αιθανόλη και (β) το γαλακτικό (ανιόν), η ιοντισμένη μορφή του γαλακτικού οξέος.



Αναβολικές οδοί κ ρύθμιση της κυτταρικής αναπνοής

Δεν οξειδώνονται όλα τα οργανικά μόρια για να πάρουμε ATP → Δομικά υλικά!

→ Απευθείας ενσωμάτωση σε συνθετες δομες (π.χ. αμινοξέα)

→ Διοχέτευση ενδιάμεσων ενώσεων της γλυκόλυσης κ του κύκλου του krebs στις αναβολικές οδούς

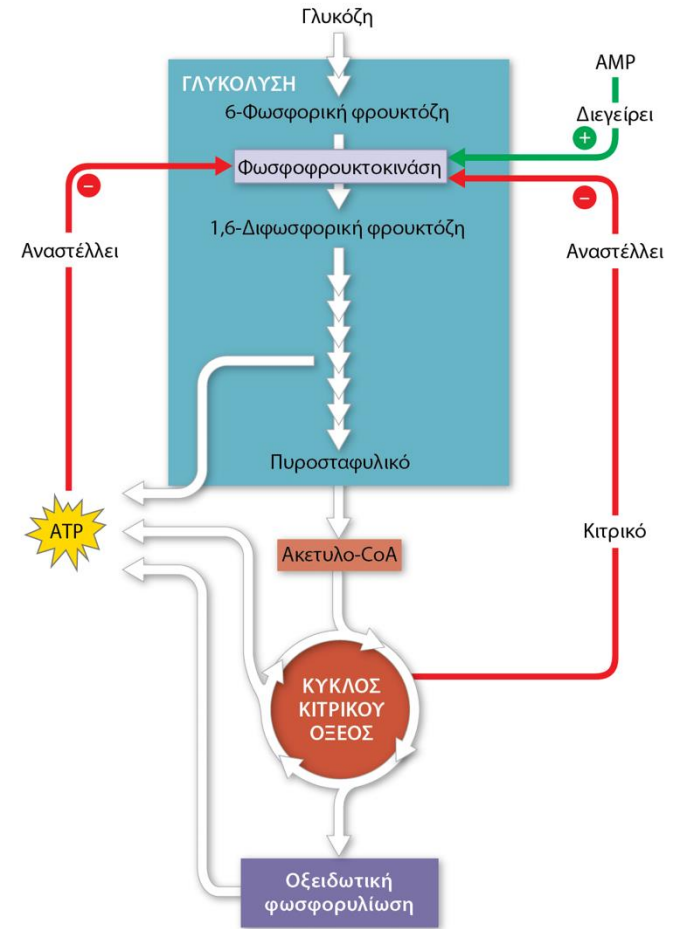
Τροποποίηση ενώσεων από τον κύκλο του Krebs → σύνθεση αμινοξέων

Πυροσταφυλικό → σύνθεση γλυκόζης

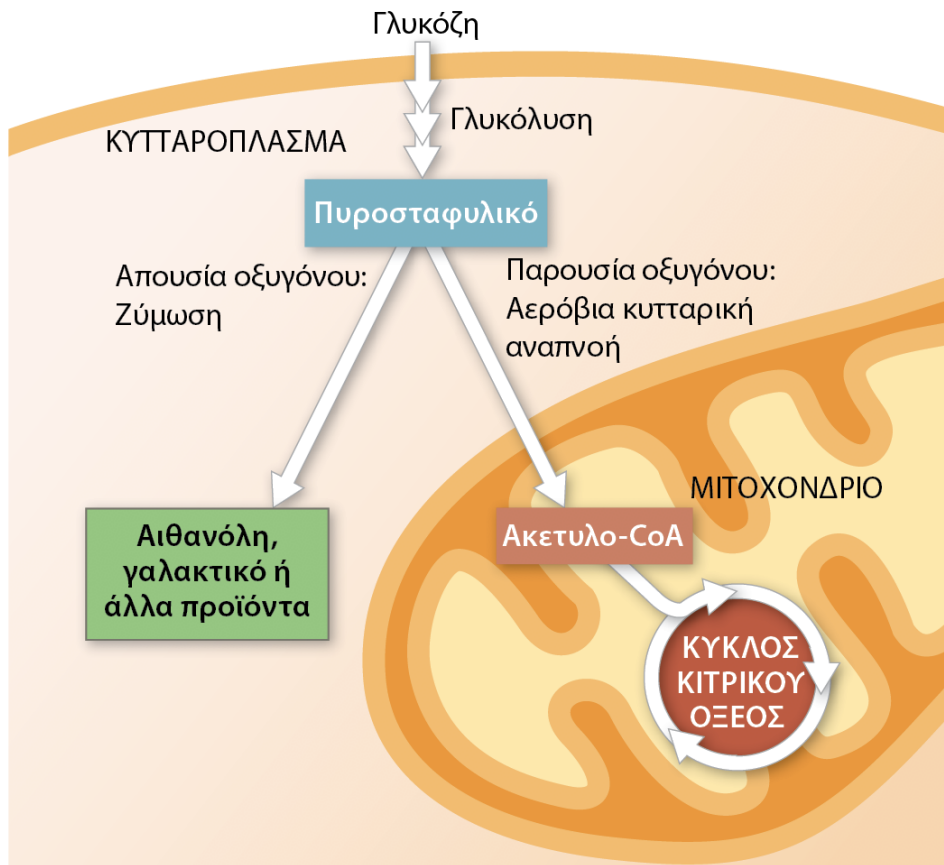
Ακετυλο-CoA → σύνθεση λιπαρών οξέων

Γλυκόλυση κ κύκλος Krebs → μεταβολικοί κόμβοι → διαφορετικά μονοπάτια αναλογα με τις ανάγκες

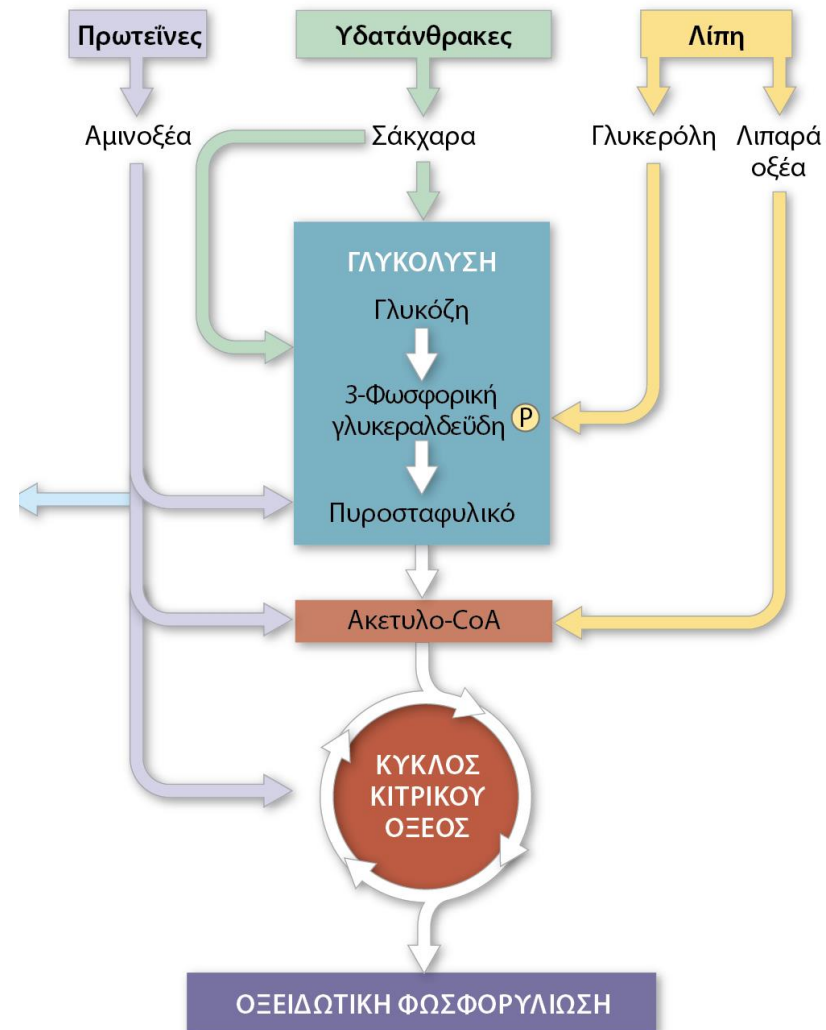
Ανδραστικοί μηχανισμοί για τη ρύθμιση της κυτταρικής αναπνοής



▲ **Εικόνα 9.19** Ο έλεγχος της κυτταρικής αναπνοής. Σε διάφορα σημεία της πορείας της κυτταρικής αναπνοής υπάρχουν αλλοστερικά ένζυμα τα οποία, επηρεαζόμενα από αναστολείς και ενεργοποιητές, καθορίζουν τον ρυθμό της γλυκόλυσης και του κύκλου του κιτρικού οξέος. Ένα τέτοιο ένζυμο είναι η φωσφοφρουκτοκινάση, η οποία καταλύει ένα από τα αρχικά βήματα της γλυκόλυσης (βλ. Εικόνα 9.8 και βήμα 3 στην Εικόνα 6.32β). Η φωσφοφρουκτοκινάση ενεργοποιείται από την AMP (που προκύπτει από την ADP) και αναστέλλεται από την ATP και το κιτρικό οξύ. Χάρη σε τούτο τον μηχανισμό αναδραστικής αναστολής, τα κύτταρα μπορούν να προσαρμόζουν την ταχύτητα της αναπνοής ανάλογα με τις μεταβαλλόμενες καταβολικές και αναβολικές τους απαιτήσεις.

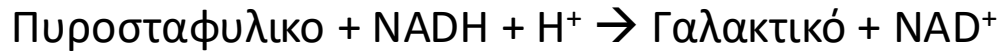


▲ Εικόνα 9.17 Το πυροσταφυλικό ως μείζων «κόμβος» του καταβολισμού. Γλυκόλυση πραγματοποιείται τόσο στη ζύμωση όσο και στην κυτταρική αναπνοή. Το πυροσταφυλικό, ως τελικό προϊόν της γλυκόλυσης, αποτελεί ένα σημείο «διακλάδωσης» των καταβολικών οδών της οξείδωσης της γλυκόζης. Σε έναν δυνητικά αναερόβιο οργανισμό που μπορεί να ακολουθήσει είτε αερόβια κυτταρική αναπνοή είτε ζύμωση, το πυροσταφυλικό οδεύει σε μία από τις δύο οδούς, ανάλογα με το αν υπάρχει οξυγόνο ή όχι.



Εικόνα 9.18 Ο καταβολισμός διαφόρων μορίων των βιολογικών οργανισμών. Ως καύσιμα μόρια για την κυτταρική αναπνοή μπορούν να χρησιμοποιηθούν υδατάνθρακες, λίπη και πρωτεΐνες. Τα μερή αυτών των μορίων εισέρχονται σε διάφορα στάδια είτε της γλυκόλυσης είτε του κύκλου του κιτρικού οξέος. Η γλυκόλυση και ο κύκλος του κιτρικού οξέος συνιστούν τις δύο καταβολικές «αγγκες» μέσα από τις οποίες τα ηλεκτρόνια, ακολουθώντας την εξωτερική διαδρομή τους από τα διάφορα είδη οργανικών μορίων, ρέουν προς το οξυγόνο.

Ποιος είναι ο αναγωγικός παράγοντας στην ακόλουθη αντίδραση;

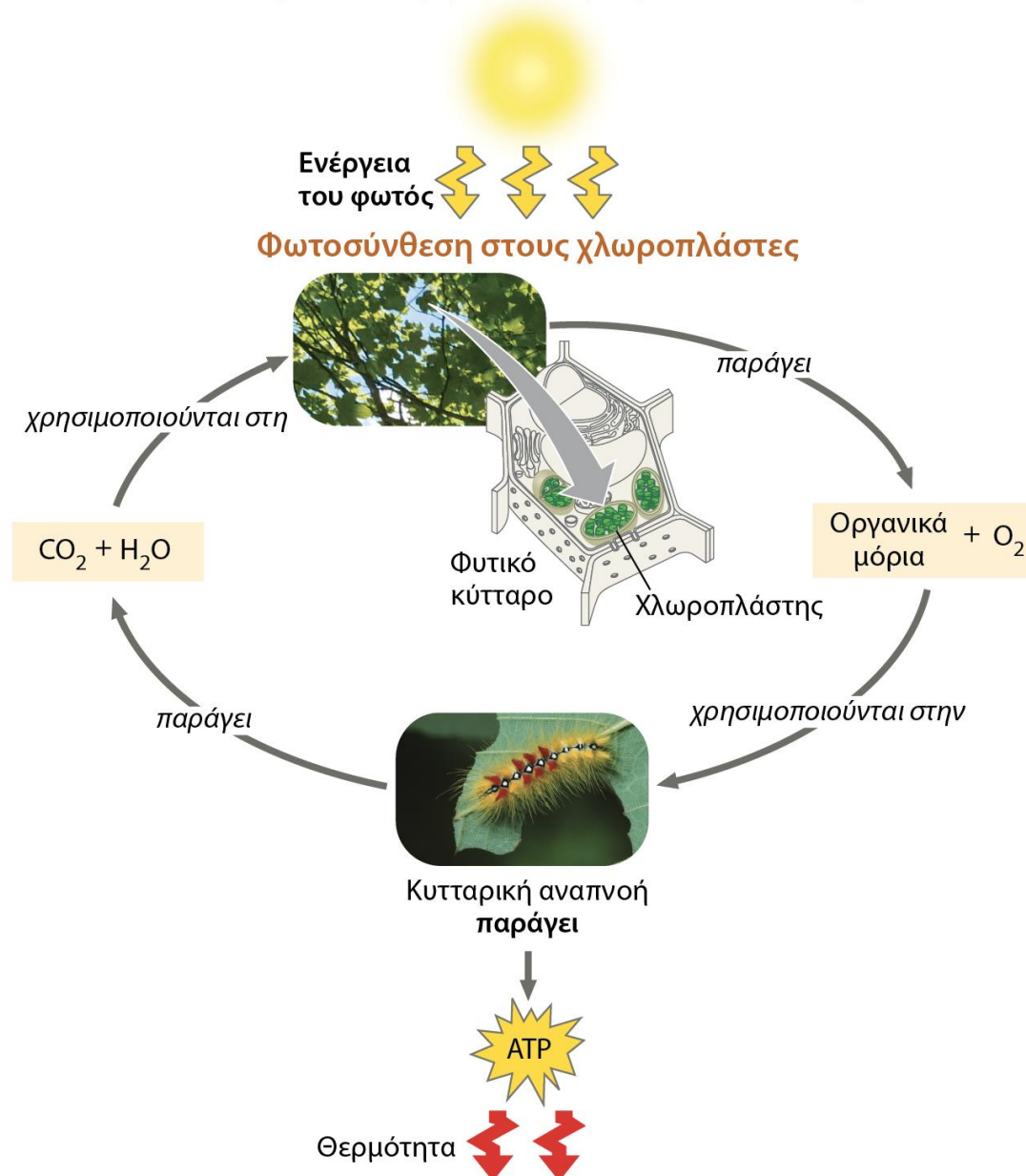


1. Το οξυγόνο
2. Το NADH
3. Το γαλακτικό
4. Το πυροσταφυλικό

Η άμεση πηγή ενέργειας που καθοδηγεί τη σύνθεση της ATP μέσω της σύνθεσης της συνθάσης της ATP κατά την οξειδωτική φωσφορυλίωση είναι

1. Οξείδωση της γλυκόζης κ των άλλων οργανικών ενώσεων
2. Η ροή των ηλεκτρονίων κατά μήκος της αλυσίδας μεταφοράς ηλεκτρονίων
3. Η διαβάθμιση της συγκέντρωσης των H^+ στις δύο πλευρές της εσωτερική μιτοχονδριακής μεμβράνης
4. Η μεταφορά των φωσφορικών στην ADP.

Πώς χρησιμοποιούν τα φωτοσυνθετικά κύτταρα το φως
για να μετατρέψουν το διοξείδιο του άνθρακα
και το νερό σε οργανικά μόρια και οξυγόνο;



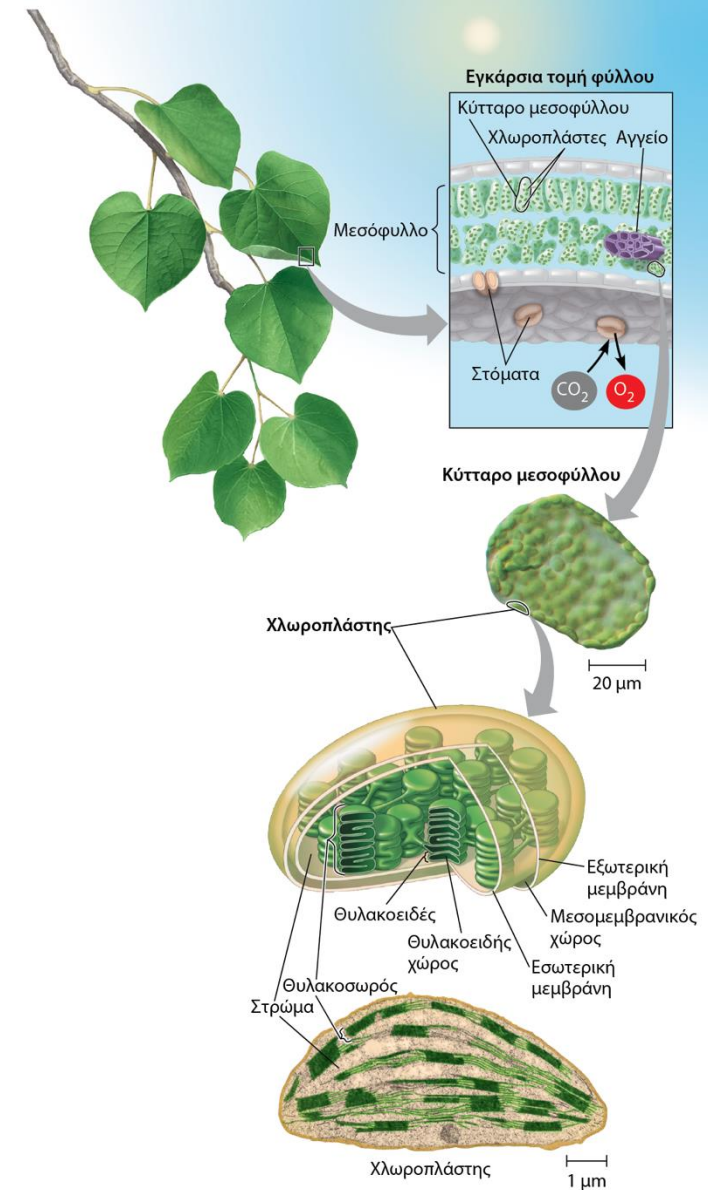
Η φωτοσύνθεση τροφοδοτεί τη βιοσφαιρα

Φωτοσύνθεση: η διεργασία μετατροπής της ηλιακής σε χημική ενέργεια κ η αποθήκευση σε μόρια σακχάρων κ άλλες οργανικές ενώσεις

Με τη φωτοσύνθεση τρέφεται έμμεσα ή άμεσα το σύνολο σχεδόν του έμβιου κόσμου στον πλανήτη → αυτότροφη θρέψη/ετεροτροφη θρέψη

Τα φωτοσυνθετικά ένζυμα είναι ομαδοποιημένα σε ειδικές βιολογικές μεμβράνες → επιτέλεση όλων των σημαντικών διεργασιών

Μεσόφυλλο → χλωροπλάστες → μεμβράνες + στρώμα → θυλακοειδή → χλωροφύλλη

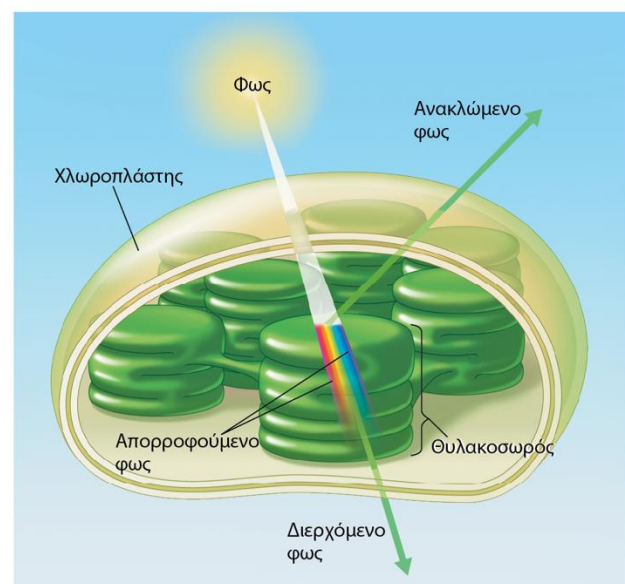


▲ **Εικόνα 10.3** Πλησιάζοντας με διαδοχικές μεγεθύνσεις το τμήμα των φυτών όπου γίνεται η φωτοσύνθεση. Το κύριο φωτοσυνθετικό όργανο των φυτών είναι τα φύλλα. Ξεκινώντας από τα φύλλα και την εσωτερική τους οργάνωση, πηγαίνουμε στο εσωτερικό ενός κυττάρου και, τελικά, στο εσωτερικό ενός χλωροπλάστη, του οργανιδίου στο οποίο γίνεται η φωτοσύνθεση. (Η μεσαία φωτογραφία είναι από οπτικό μικροσκόπιο, ενώ η κάτω από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο διέλευσης.)

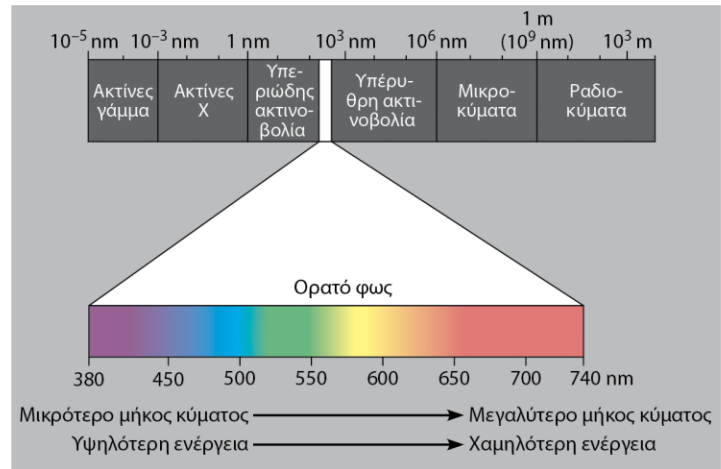
Η φύση του ηλιακού φωτός

Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα: το συνολικό εύρος μηκών κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας → μήκη κύματος <1nm->1km

Ορατό φώς: 380-740 nm
Μήκος κύματος αντιστροφά ανάλογο της ενέργειας



▲ **Εικόνα 10.7** Το πράσινο χρώμα των φύλλων: Η αλληλεπίδραση του φωτός με τους χλωροπλάστες. Τα μόρια της χλωροφύλλης των χλωροπλάστων απορροφούν το κυανό και το ερυθρό φως (τα δύο πιο αποτελεσματικά χρώματα για τη φωτοσύνθεση) και ανακλούν ή επιτρέπουν τη διέλευση του πράσινου φωτός. Γι' αυτό τον λόγο τα φύλλα φαίνονται πράσινα.



▲ **Εικόνα 10.6** Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Το λευκό φως είναι ένα μείγμα απ' όλα τα μήκη κύματος του ορατού φωτός. Ένα πρίσμα κάμπτει με διαφορετική γωνία το φως διαφορετικών μηκών κύματος και έτσι χωρίζει το λευκό φως στα συστατικά του χρώματα. (Το ουράνιο τόξο προκαλείται από σταγονίδια νερού της ατμόσφαιρας που δρουν ως πρίσματα.) Η φωτοσύνθεση τροφοδοτείται ενεργειακά από το ορατό φως.

Χρωστικές: οι ουσίες που απορροφούν το ορατό φως

Αν φωτίσουμε μία χρωστική με λευκό φως → βλέπουμε το χρώμα που ανακλάται ή διέρχεται μέσα από αυτή

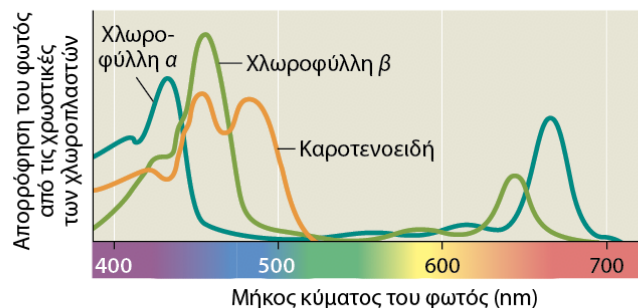
Χλωροφύλλη-α
Χλωροφύλλη-β
καροτενοειδή

▼ Εικόνα 10.9 Διερεύνηση

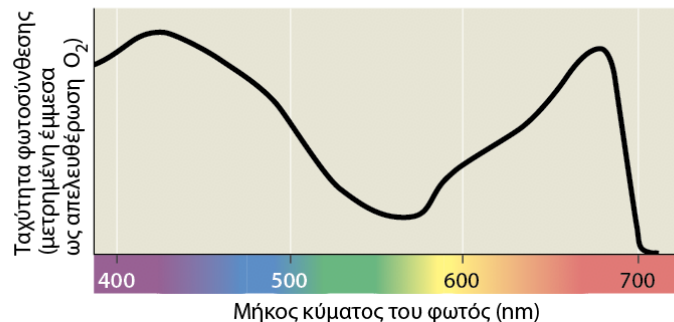
Ποια μήκη κύματος του φωτός είναι πιο αποτελεσματικά για την ενεργειακή τροφοδοσία της φωτοσύνθεσης;

Πείραμα Τα φάσματα απορρόφησης και δράσης, σε συνδυασμό με το κλασικό πείραμα του Theodor W. Engelmann, αποκαλύπτουν ποια μήκη κύματος του φωτός είναι σημαντικά για τη φωτοσύνθεση.

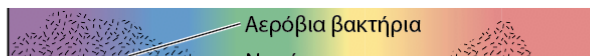
Αποτελέσματα



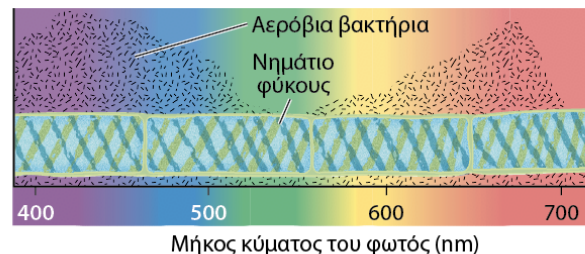
(α) **Φάσματα απορρόφησης.** Οι τρεις καμπύλες αναπαριστούν τα μήκη κύματος του φωτός που απορροφώνται περισσότερο, από τα τρία είδη χρωστικών των χλωροπλάστων.



(β) **Φάσμα δράσης.** Το γράφημα αναπαριστά την ταχύτητα της φωτοσύνθεσης ως προς το μήκος κύματος. Η καμπύλη που προκύπτει ονομάζεται φάσμα δράσης, και μοιάζει –χωρίς ωστόσο να ταυριάζει απόλυτα– με το φάσμα απορρόφησης της χλωροφύλλης (βλ. σχετική καμπύλη στο α). Εν μέρει, αυτό οφείλεται στην απορρόφηση του φωτός από ορισμένες βοηθητικές χρωστικές, όπως η χλωροφύλλη β και τα καροτενοειδή.



καρποφύλλο α). Εν μέρει, αυτό οφείλεται στην απορρόφηση του φωτός από ορισμένες βοηθητικές χρωστικές, όπως η χλωροφύλλη β και τα καροτενοειδή.



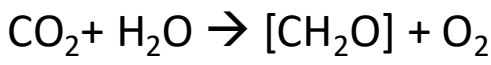
(γ) **Το πείραμα του Engelmann.** Το 1883, ο Theodor W. Engelmann διαχώρισε το λευκό φως (περνώντας το μέσα από ένα πρίσμα) στα συστατικά του χρώματα. Στη συνέχεια φώτισε με αυτά τα χρώματα τα διάφορα τμήματα ενός ημιατώδους φύκου. Χρησιμοποίησε επίσης έναν πληθυσμό αερόβιων βακτηρίων (που έχουν την ιδιότητα να συγκεντρώνονται κοντά στην πηγή οξυγόνου), για να προσδιορίσει ποιο τμήμα του φύκου απελευθερώνει τη μεγαλύτερη ποσότητα O_2 και επομένως εμφανίζει τη μεγαλύτερη φωτοσυνθετική δραστηριότητα. Η μεγαλύτερη πυκνότητα βακτηρίων εντοπίστηκε στα τμήματα του φύκου που φωτίζονταν με ιώδες (βαθύ κυανό) ή ερυθρό φως.

Συμπέρασμα Τα φάσματα δράσης, όπως επαληθεύονται με το πείραμα του Engelmann, δείχνουν ποια τμήματα του φάσματος είναι πιο αποτελεσματικά στην ενεργειακή τροφοδοσία της φωτοσύνθεσης.

Δεδομένα από: T. W. Engelmann, *Bacterium photometricum*. Ein Betrag zur vergleichenden Physiologie des Licht- und farbensinnes, *Archiv. für Physiologie*. 30:95–124 (1883).

ΕΡΜΗΝΕΥΣΤΕ ΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ Με βάση την καμπύλη, ποια μήκη κύματος του φωτός οδηγούν στη μεγαλύτερη ταχύτητα φωτοσύνθεσης;

Ακολουθώντας τα άτομα κατά τη διάρκεια της φωτοσύνθεσης



- Ουσιαστικά δεν παράγεται γλυκόζη αλλά ένας τρισακχαριτης (3-φωσφορική γλυκεραλδεΐδη; G3P) που μπορεί στη συνέχεια να δώσει γλυκόζη
- Οι αγκύλες δείχνουν ότι εννοούμε τον γενικό τύπο ενός υδατάνθρακα

Η διάσπαση του νερού

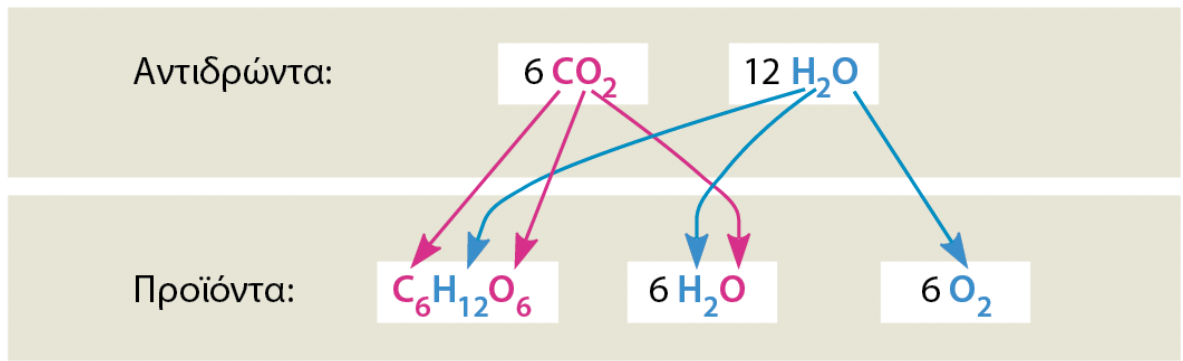
Το O₂ που παραγεται δεν προέρχεται από το CO₂ αλλά απο το νερό

Πείραμα van Niel (1930s)

- Χρήση H₂S αντι για H₂O από φωτοσυνθετικά βακτήρια
- παραγωγή κοκκίων θείου

Επιβεβαίωση στα 50s απο
Πειράματα με ¹⁸O

▼ **Εικόνα 10.4** Η πορεία των ατόμων κατά τη διάρκεια της φωτοσύνθεσης. Τα άτομα στο μόριο του CO₂ είναι χρωματισμένα με βυσσινί χρώμα, ενώ του H₂O με μπλε.



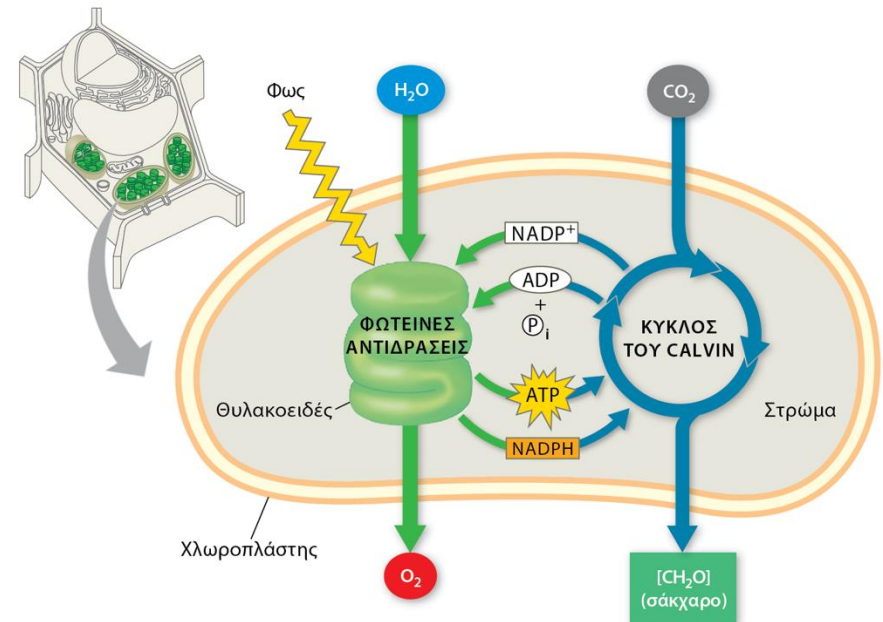
Τα δύο στάδια της φωτοσύνθεσης

Φωτεινές αντιδράσεις

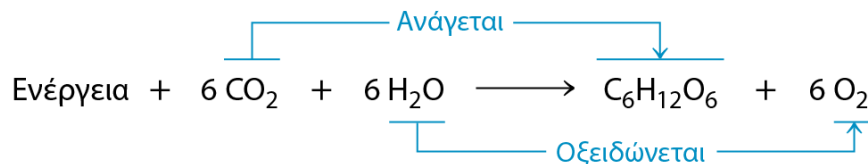
- Συμμετοχή φωτός
- Ηλιακή ενέργεια → χημική ενέργεια
- Διάσπαση νερού και απελευθέρωση e^- , H^+ και O_2 .
- Η ηλιακή ενέργεια τροφοδοτεί την αναγωγή του $NADP^+$ σε $NADPH$
- Παραγωγή ATP
- **Φωτοφωσφορυλίωση**

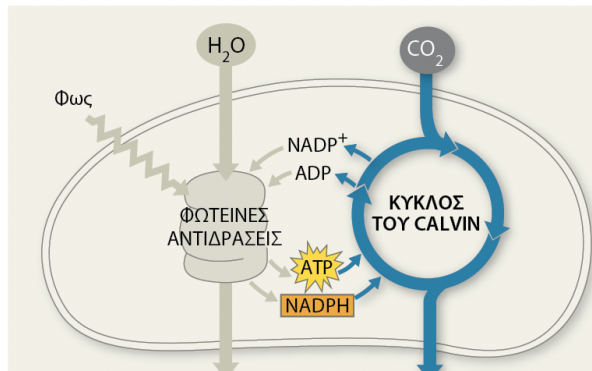
Κύκλος του Calvin

- Σύνθεση οργανικών ενώσεων



▲ **Εικόνα 10.5** Μια σύντομη επισκόπηση της φωτοσύνθεσης: Συνεργασία των φωτεινών αντιδράσεων με τον κύκλο του Calvin. Οι φωτεινές αντιδράσεις γίνονται στις θυλακοειδείς μεμβράνες (πράσινο), ενώ ο κύκλος του Calvin στο στρώμα του χλωροπλάστη (γκρι). Οι φωτεινές αντιδράσεις αξιοποιούν την ηλιακή ενέργεια για να συνθέσουν ATP και NADPH, τα οποία τροφοδοτούν τον κύκλο του Calvin με χημική ενέργεια και αναγωγική δύναμη, αντίστοιχα. Ο κύκλος του Calvin ενσωματώνει το CO_2 σε οργανικά μόρια, που στη συνέχεια μετατρέπονται σε σάκχαρα. (Υπενθυμίζεται ότι ο συντακτικός τύπος των περισσότερων απλών σακχαρών είναι ένα πολλαπλάσιο της δομικής μονάδας CH_2O .) Για περισσότερες λεπτομέρειες ως προς την κυτταρική θέση των παραπάνω διεργασιών, βλ. Εικόνα 6.32.





3. Αναγέννηση του μορίου δέκτη

2. Αναγωγή

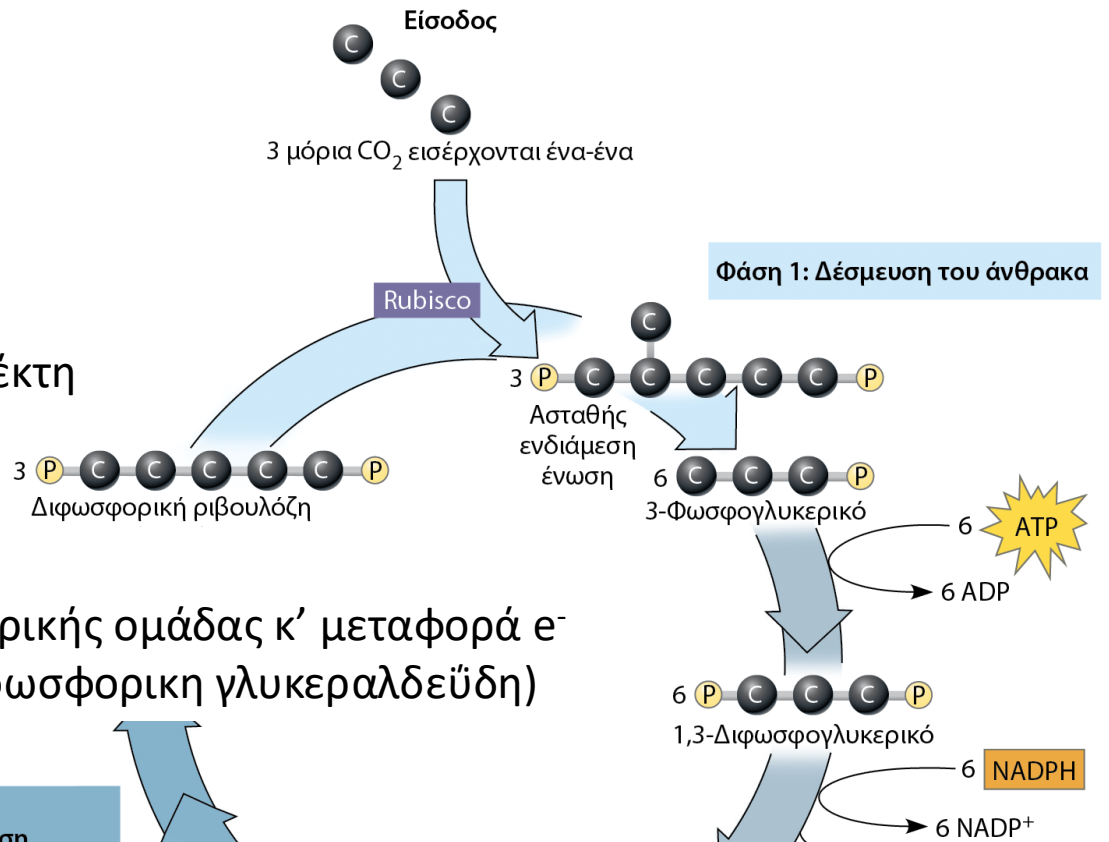
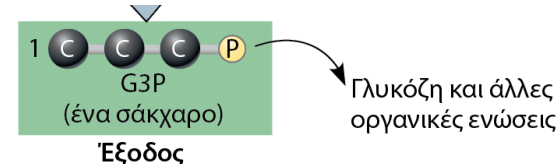
- Προσθήκη φωσφορικής ομάδας κ' μεταφορά e^-
- Παραγωγή G3P (φωσφορική γλυκεραλδεΐδη)

Φάση 3:
Αναγέννηση
του δέκτη του CO_2
(RuBP)

5

1. Δέσμευση του C

- Πρόσδεση CO_2 στη διφωσφορική ριβουλόζη
- Κατάλυση από rubisco
- Παραγωγή ασταθους μορίου 6C και άμεση διάσπαση σε 2X 3-φωσφογλυκερικό οξύ



▲ **Εικόνα 10.18** Ο κύκλος του Calvin. Το διάγραμμα παρουσιάζει συνοπτικά την πορεία των ατόμων άνθρακα (σκούρες γκρι σφαίρες) κατά την εκτέλεση τριών γύρων του κύκλου του Calvin. Οι τρεις φάσεις του κύκλου αντιστοιχούν στις τρεις φάσεις που αναλύονται στο κείμενο. Για κάθε τρία μόρια CO_2 που εισέρχονται στον κύκλο, τελικά παράγεται ένα μόριο 3-φωσφορικής γλυκεραλδεΐδης, δηλαδή ένα σάκχαρο με τρία άτομα άνθρακα. Οι φωτεινές αντιδράσεις διατηρούν σε κίνηση τον κύκλο του Calvin με το να αναγεννούν διαρκώς τα απαραίτητα για τον κύκλο ATP και NADPH.

Εναλλακτικοί μηχανισμοί δέσμευσης του Ανθρακα

Τα περισσότερα φυτά δεσμεύουν άνθρακα με τη βοήθεια του rubisco ακολουθώντας τον κύκλο του Calvin (C3 φυτά, ρύζι, σιτάρι, σόγια). Τις θερμές κ ξηρές μέρες → κλείσιμο στομάτων

Φωτοαναπνοή

- Δέσμευση O₂ αντι για CO₂ στα C3 φυτά και παραγωγή ένωσης 2C που διασπαστεί ταχυστα
- Εξελικτικό 'βαρίδι' μη εξειδίκευσης του rubisco

Φυτά C4 (αγρωστώδη, σακχαροκάλαμο, καλαμπόκι)

- Δέσμευση σε C4 ένωση στην αρχή του κύκλου του Calvin
- Εν μέρει κλείσιμο στομάτων τις ζεστές κ ξηρές μέρες (οικονομία στο νερό)
- Συνυπάρχει με το μονοπάτι C3 (εσωτερικά τμήματα του φύλλου)
- Καταλύεται από το ένζυμο φωσφοενολοπυροσταφυλική καρβοξυλάση (PEP) > Rubisco
- Μη αποδοτικός σε χαμηλό φωτισμό
- Πραγματοποίηση σύνθεσης οργανικών ενώσεων σε διαφορετικά στάδια κ διαφορετικά σημεία του φύλλου.

Φυτά CAM (παχύφυτα, κακτοειδή, ανανάς)

- Δέσμευση CO₂ την νύχτα (χρήση PEPC)
- Την ημέρα χρησιμοποιείται το Rubisco
- Πολύ αποδοτικά σε χαμηλή διαθεσιμότητα νερού

Role of C_4 carbon fixation in *Ulva prolifera*, the macroalga responsible for the world's largest green tides

Dongyan Liu¹, Qian Ma¹, Ivan Valiela², Donald M. Anderson³, John K. Keesing⁴, Kunshan Gao⁵, Yu Zhen⁶, Xiyun Sun⁷ & Yujue Wang¹

Most marine algae preferentially assimilate CO_2 via the Calvin-Benson Cycle (C_3) and catalyze HCO_3^- dehydration via carbonic anhydrase (CA) as a CO_2 -compensatory mechanism, but certain species utilize the Hatch-Slack Cycle (C_4) to enhance photosynthesis. The occurrence and importance of the C_4 pathway remains uncertain, however. Here, we demonstrate that carbon fixation in *Ulva prolifera*, a species responsible for massive green tides, involves a combination of C_3 and C_4 pathways, and a CA-supported HCO_3^- mechanism. Analysis of CA and key C_3 and C_4 enzymes, and subsequent analysis of $\delta^{13}C$ photosynthetic products showed that the species assimilates CO_2 predominately via the C_3 pathway, uses HCO_3^- via the CA mechanism at low CO_2 levels, and takes advantage of high irradiance using the C_4 pathway. This active and multi-faceted carbon acquisition strategy is advantageous for the formation of massive blooms, as thick floating mats are subject to intense surface irradiance and CO_2 limitation.



Οι φωτεινές αντιδράσεις τροφοδοτούν τον κύκλο του Calvin με

1. Φωτεινή ενέργεια
2. CO₂ και ATP
3. H₂O και NADPH
4. ATP και NADPH

Ποια από τις ακόλουθες προτάσεις περιγράφει ορθότερα τη διαφορά ανάμεσα στους ετερότροφους και τους αυτότροφους οργανισμούς;

1. Μόνο οι αυτότροφοι οργανισμοί μπορούν να τραφούν μόνοι τους χρησιμοποιώντας CO₂ και άλλα ανόργανα θρεπτικά συστατικά
2. Μόνο οι ετερότροφοι χρειάζονται οργανικές ενώσεις από το περιβάλλον τους
3. Μόνο οι ετερότροφοι επιτελούν κυτταρική αναπνοή
4. Μόνο οι ετερότροφοι έχουν μιτοχόνδρια