



# Κυτταρική Βιολογία

Ενότητα **10** : Τα μιτοχόνδρια και οι χλωροπλάστες ως τα ενεργειακά κέντρα των ευκαρυωτικών κυττάρων

Παναγιωτίδης Χρήστος  
Τμήμα Φαρμακευτικής ΑΠΘ



# Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.





# Τα μιτοχόνδρια και οι χλωροπλάστες ως τα ενεργειακά κέντρα των ευκαρυωτικών κυττάρων



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



# Σκοποί ενότητας

- Η περιγραφή των οργανιδίων όπου γίνεται η παραγωγή ενέργειας.
- Η κατανόηση των αντιδράσεων για την παραγωγή ενέργειας και ATP.



# Παραγωγή της ενέργειας του κυττάρου με διάσπαση των τροφών

---

- Κατά τη διάρκεια της διάσπασης των τροφών (πρωτεΐνες, υδατάνθρακες, λίπη) στα κύτταρα παράγεται ενέργεια (ATP).



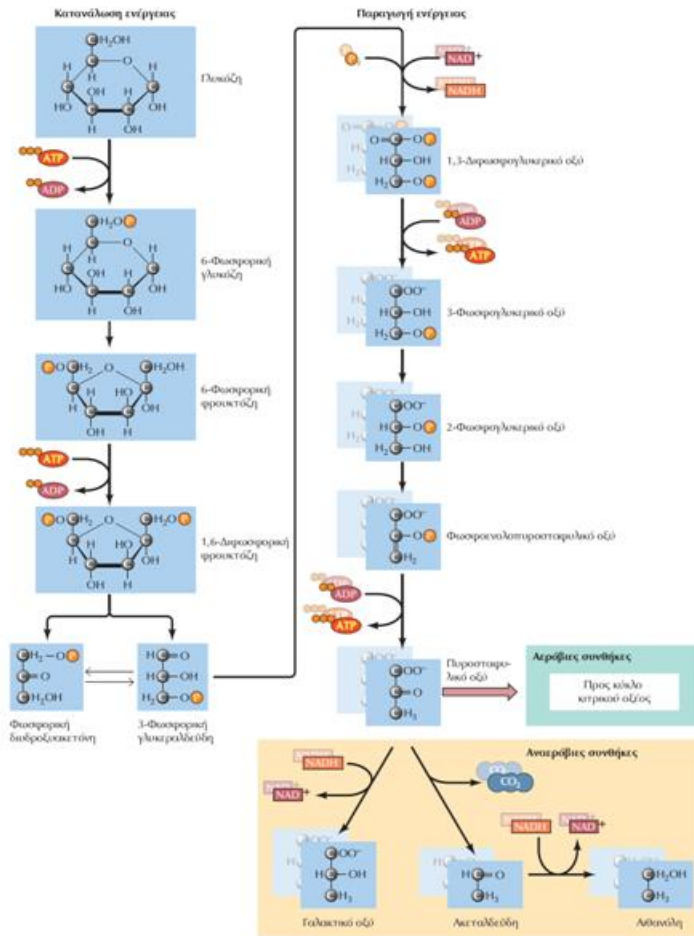
# Το παραγόμενο ακέτυλο-CoA συντίθεται στα μιτοχόνδρια

Τα σάκχαρα και οι πολυσακχαρίτες και τα λίπη των τροφών μετατρέπονται σε πυροσταφυλικό και λιπαρά οξέα, αντίστοιχα και τέλος σε ακέτυλο- CoA στα μιτοχόνδρια.



# Γλυκόλυση

- Η γλυκόζη διασπάται στο κυτταρόπλασμα προς πυροσταφυλικό οξύ με καθαρό κέρδος δύο μορίων ATP και δύο μορίων NADH.
- Σε αναερόβιες συνθήκες, το NADH επανοξειδώνεται από τη μετατροπή του πυροσταφυλικού οξέος σε αιθανόλη ή γαλακτικό οξύ. Σε αερόβιες συνθήκες, το πυροσταφυλικό οξύ μεταβολίζεται περαιτέρω στον κύκλο του κιτρικού οξέος (ή κύκλο των τρικαρβοξυλικών οξέων).
- Πρέπει να σημειωθεί ότι κάθε μόριο γλυκόζης αποδίδει δύο μόρια πυροσταφυλικού οξέως, με τρία άτομα άνθρακα το καθένα.
- Το πυροσταφυλικό οξύ μεταφέρεται στα μιτοχόνδρια όπου μετατρέπεται σε ακέτυλο-συνένζυμο A το οποίο και εισέρχεται στον κύκλο των τρικαρβοξυλικών οξέων με σκοπό την παραγωγή ενέργειας.

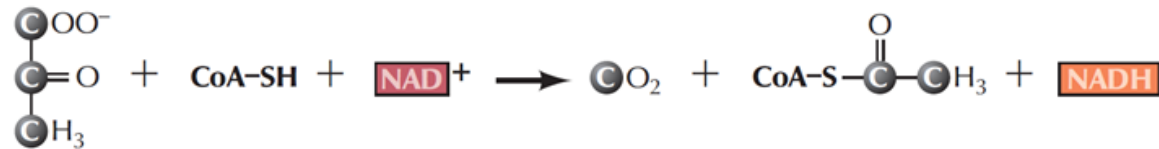


Ακαδημαϊκές Εκδόσεις 2011.  
**Το Κύτταρο-Μία Μοριακή Προσέγγιση**

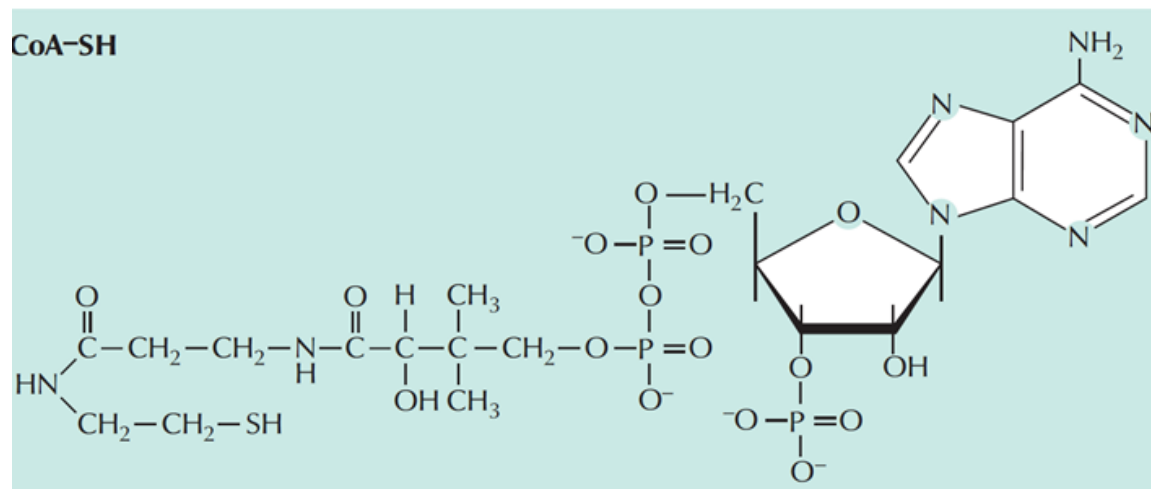




# Παραγωγή του ακέτυλο-CoA



Πυροσταφυλικό οξύ



Ακαδημαϊκές Εκδόσεις 2011.

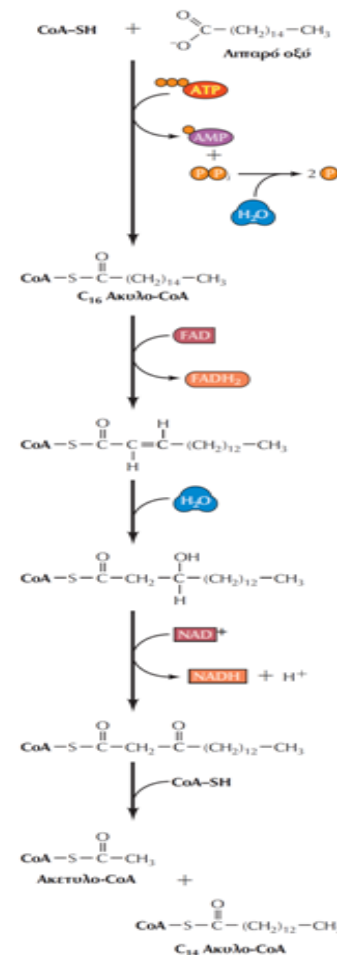
Το Κύτταρο-Μία Μοριακή Προσέγγιση

- Μετά την είσοδο του στα μιτοχόνδρια το πυροσταφυλικό οξύ μετατρέπεται σε  $\text{CO}_2$  και ακετυλο-CoA, με παράλληλη παραγωγή ενός μορίου NADH.
- Το συνένζυμο A (CoA-SH) είναι ένας γενικός μεταφορέας ενεργοποιημένων ακυλομάδων σε πληθώρα αντιδράσεων.



# Οξείδωση των λιπαρών οξέων και παραγωγή του ακετυλο-CoA

- Μέσα στα μιτοχόνδρια, τα λιπαρά οξέα (π.χ. το παλμιτικό οξύ, ένα κορεσμένο λιπαρό οξύ με 16 άτομα άνθρακα, που εμφανίζεται στη διπλανή εικόνα) αρχικά συνδέεται στο συνένζυμο A με κόστος ενός μορίου ATP.
- Η οξείδωση του λιπαρού οξέος συνεχίζεται με βαθμιαία απομάκρυνση μονάδων δύο ατόμων άνθρακα, υπό τη μορφή του ακετυλο-CoA, η οποία είναι συζευγμένη με τη σύνθεση ενός μορίου NADH κι ενός μορίου FADH<sub>2</sub>.
- Τα μόρια του ακετυλο-CoA που προκύπτου από την παραπάνω διαδικασία εισέρχονται στον κύκλο του κιτρικού οξέος (ή κύκλο των τρικαρβοξυλικών οξέων).

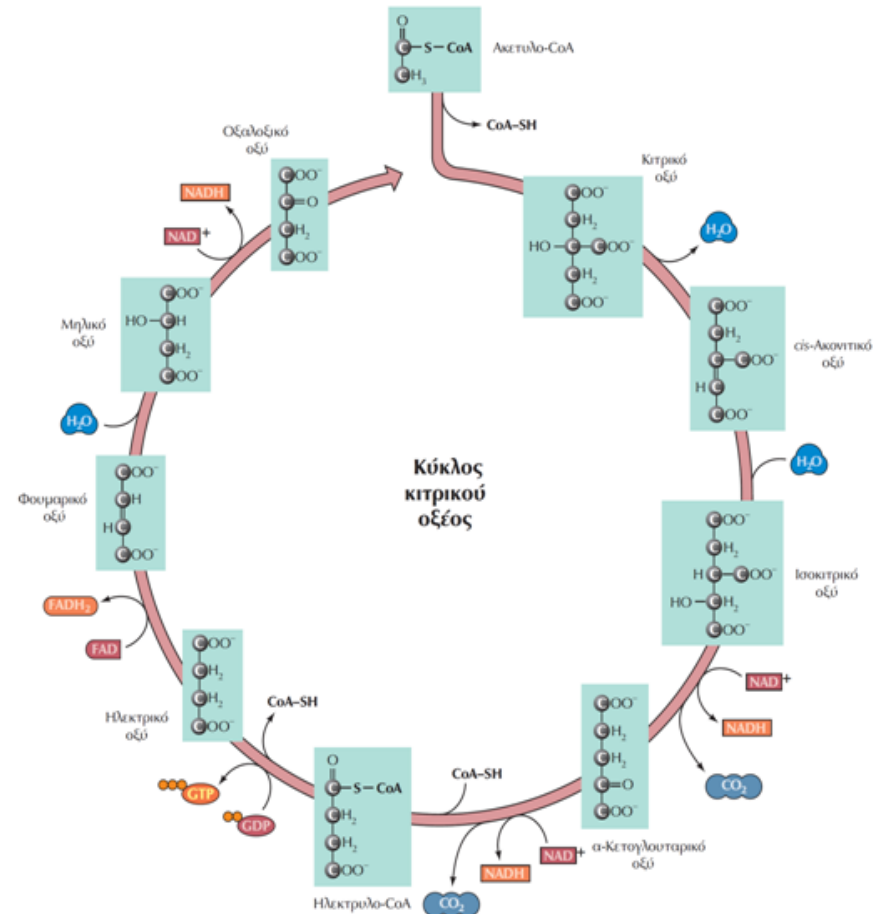


Ακαδημαϊκές Εκδόσεις 2011.  
Το Κύτταρο-Μία Μοριακή Προσέγγιση



# Χρησιμοποίηση του ακέτυλο-CoA στον κύκλο του κιτρικού οξέος

- Στον κύκλο του κιτρικού οξέος (κύκλος των τρικαρβοξυλικών οξέων ή κύκλος του Krebs), μια ακετυλομάδα δύο ατόμων άνθρακα μεταφέρεται από το ακετυλο-CoA στο οξαλοξικό οξύ, προκειμένου να σχηματιστεί κιτρικό οξύ.
- Στη συνέχεια, δύο άτομα άνθρακα του κιτρικού οξέος οξειδώνονται προς δύο μόρια  $\text{CO}_2$  και το οξαλοξικό οξύ αναγεννάται, στο τέλος του κύκλου.
- Με την ολοκλήρωση κάθε κύκλου παράγονται ένα μόριο GTP, τρία μόρια NADH κι ένα μόριο  $\text{FADH}_2$ .
- Ο κύκλος του κιτρικού οξέος λαμβάνει χώρα στο στρώμα των μιτοχονδρίων και τα μόρια NADH που προκύπτουν εισέρχονται στην αναπνευστική αλυσίδα.



Ακαδημαϊκές Εκδόσεις 2011.  
Το Κύτταρο-Μία Μοριακή Προσέγγιση



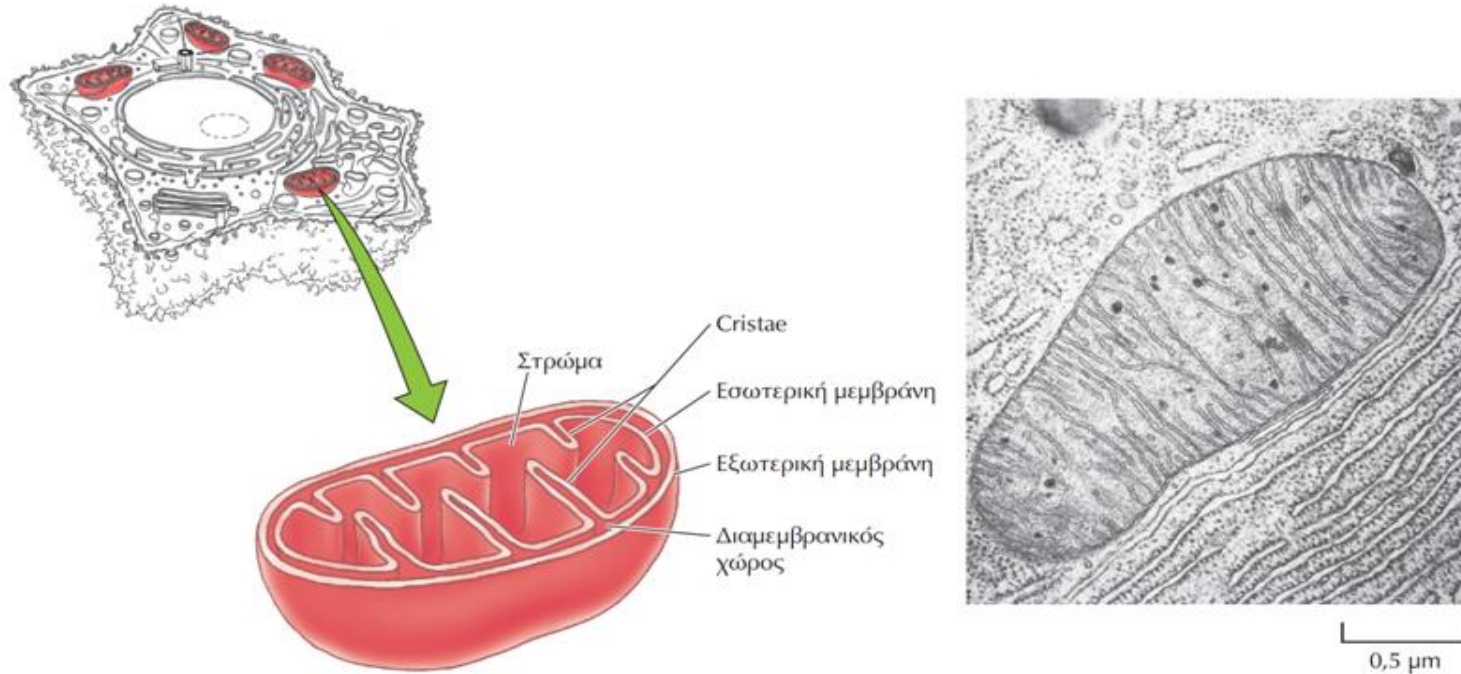
# Σύζευξη μεταξύ της μεταφοράς ηλεκτρονίων και της βαθμίδωσης H<sup>+</sup>

---

Τοπολογικά, σε ποιό μεμβρανικό διαμέρισμα του κυττάρου (και σε ποιά μεμβράνη ακριβώς) λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της σύζευξης των ηλεκτρονίων με τη βαθμίδωση του pH;



# Η δομή των μιτοχονδρίων



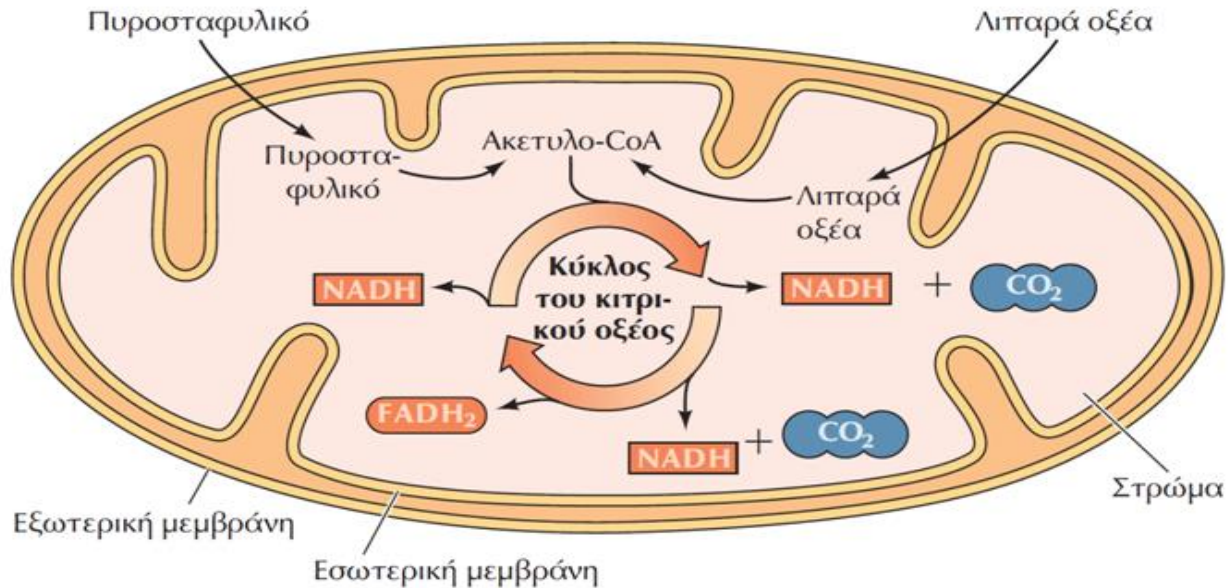
Ακαδημαϊκές Εκδόσεις 2011.

Το Κύτταρο-Μία Μοριακή Προσέγγιση

- Τα μιτοχόνδρια είναι μεμβρανικά οργανίδια που οριοθετούνται από ένα σύστημα δύο μεμβρανών, το οποίο αποτελείται από την εσωτερική και την εξωτερική μεμβράνη.
- Η εξωτερική μεμβράνη είναι λεία ενώ αντίθετα η εσωτερική μεμβράνη σχηματίζει αναδιπλώσεις (cristae) που εκτείνονται μέσα στο στρώμα του οργανιδίου.



# Μιτοχονδριακές αντιδράσεις παραγωγής ενέργειας



Ακαδημαϊκές Εκδόσεις 2011.

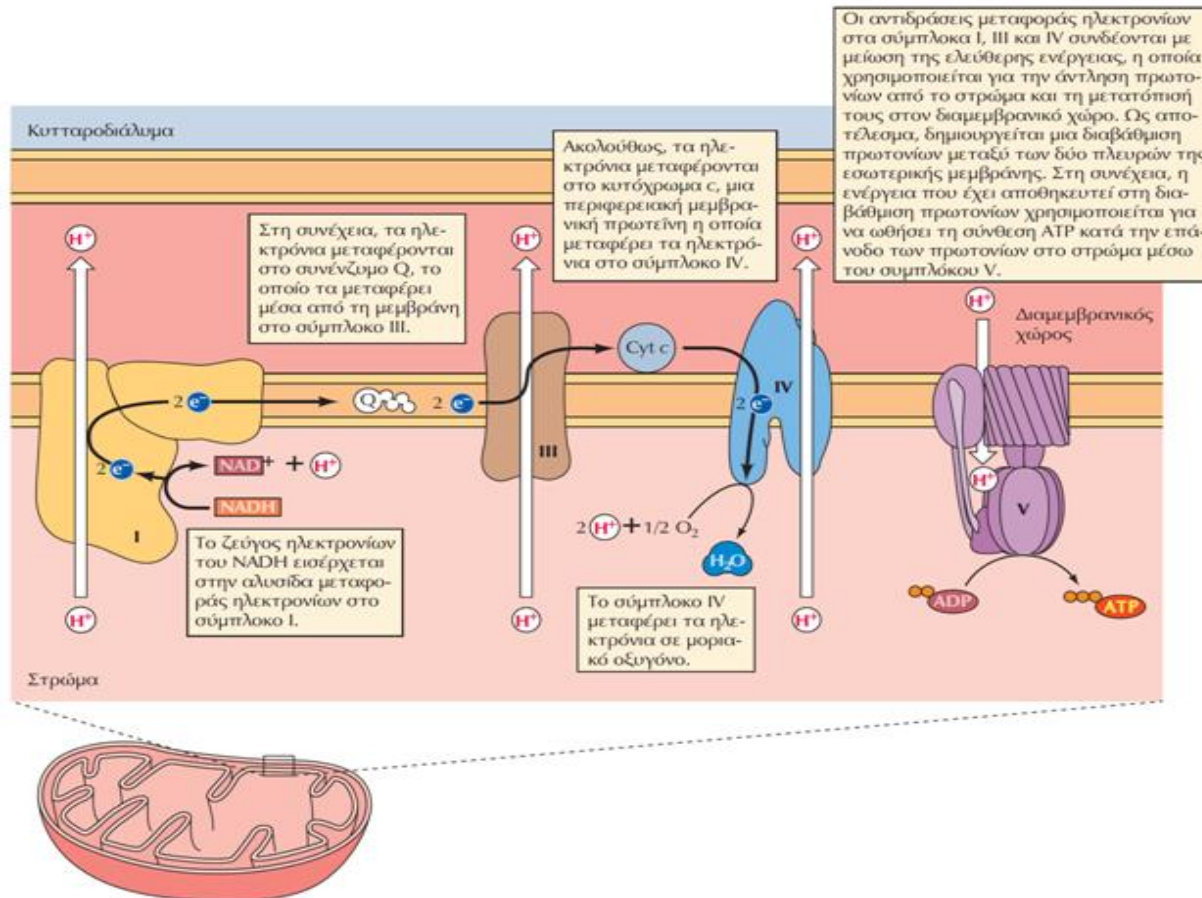
Το Κύτταρο-Μία Μοριακή Προσέγγιση

- Πυροσταφυλικό και λιπαρά οξέα εισάγονται από το κυτταροδιάλυμα στο στρώμα των μιτοχονδρίων και εκεί μετατρέπονται σε ακετυλο-CoA.
- Στη συνέχεια, το ακετυλο-CoA οξειδώνεται σε CO<sub>2</sub> μέσω του κύκλου του κιτρικού οξέος, ο οποίος αποτελεί το κεντρικό μονοπάτι του οξειδωτικού μεταβολισμού.





# Η μεταφορά των ηλεκτρονίων στην εσωτερική μιτοχονδριακή μεμβράνη

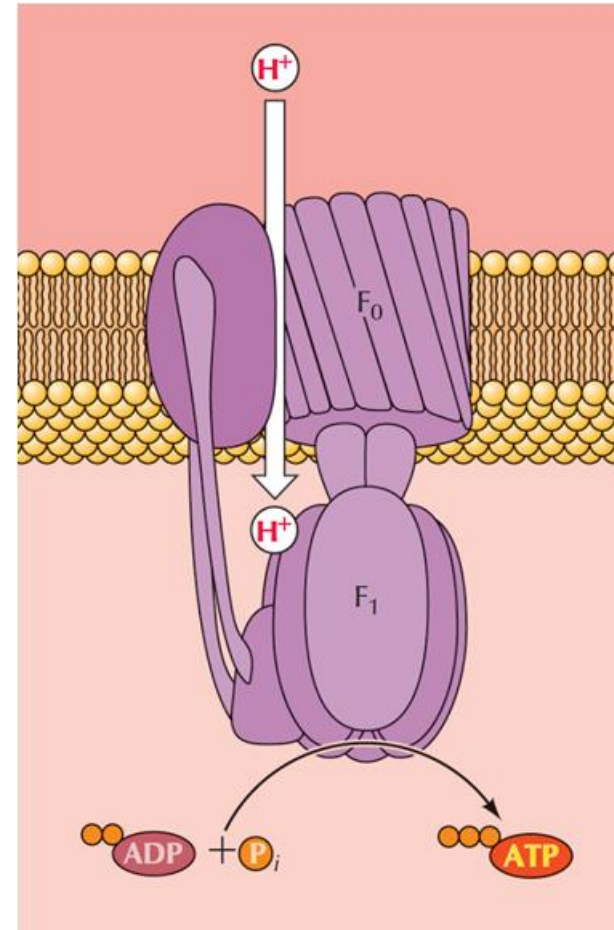


Ακαδημαϊκές Εκδόσεις 2011.

Το Κύτταρο-Μία Μοριακή Προσέγγιση

# Σύζευξη της κατεύθυνσης μεταφοράς πρωτονίων με τη σύνθεση του ATP

- Η μιτοχονδριακή  $F_1/F_0$  ATP συνθάση (το σύμπλοκο V), η οποία εντοπίζεται στην εσωτερική μιτοχονδριακή μεμβράνη, αποτελείται από δύο δομικά διακριτές επικράτειες, τις  $F_0$  και  $F_1$ , οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους μέσω μιας δομής που μοιάζει με λεπτό μίσχο.
- Η επικράτεια  $F_0$  διαπερνά τη φωσφολιπιδική διπλοστιβάδα, δημιουργώντας έναν διαμεμβρανικό διάυλο για τη διέλευση πρωτονίων.
- Η επικράτεια  $F_1$  συλλέγει την ελεύθερη ενέργεια που παράγεται από την κίνηση των πρωτονίων σύμφωνα με την ηλεκτροχημική τους διαβάθμιση και χρησιμοποιεί αυτή την ενέργεια για τη σύνθεση ATP.
- Η κίνηση των πρωτονίων, που γίνεται από τον διαμεμβρανικό χώρο προς το μιτοχονδριακό στρώμα, είναι ενεργειακά ευνοϊκή λόγω της διαβάθμισης της συγκέντρωσης πρωτονίων η οποία είναι υψηλότερη στον διαμεμβρανικό χώρο (λόγω της λειτουργίας αντλιών πρωτονίων της αναπνευστικής αλυσίδας).



Ακαδημαϊκές Εκδόσεις 2011.  
Το Κύτταρο-Μία Μοριακή Προσέγγιση





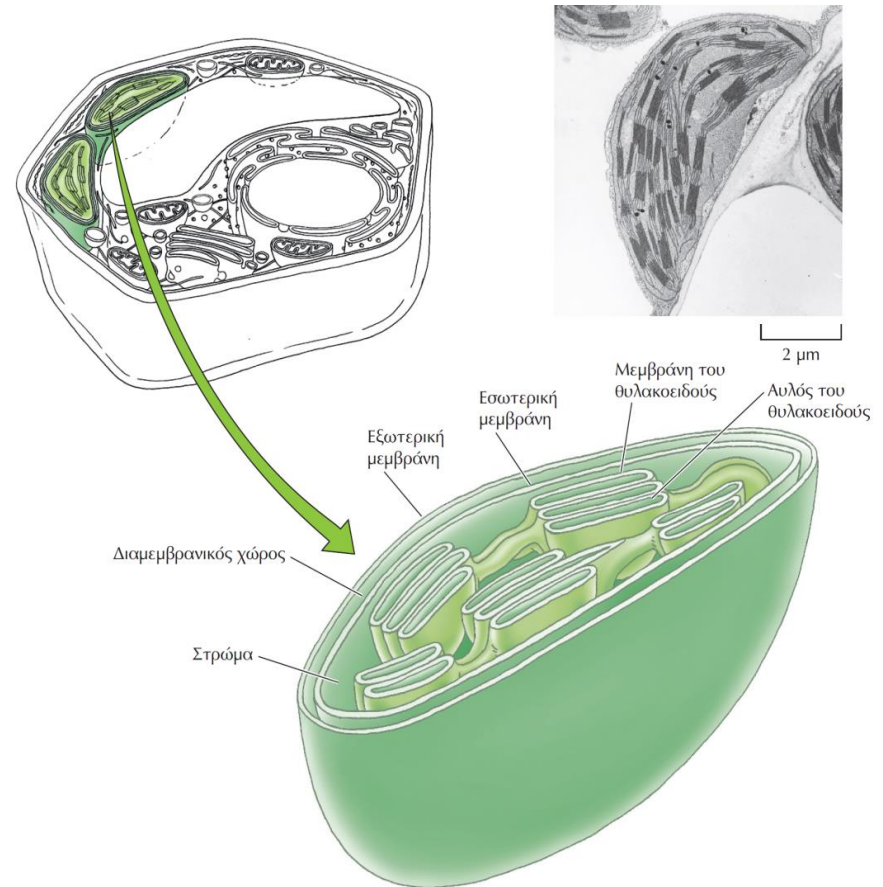
# Ηλεκτροχημικές βαθμιδώσεις [H<sup>+</sup>] και διαδικασίες ενεργού μεταφοράς

- Η βαθμίδωση του δυναμικού προωθεί την ανταλλαγή ADP-ATP.
- Η βαθμίδωση του pH προωθεί την εισαγωγή του πυροσταφυλικού.
- Η βαθμίδωση του pH προωθεί την εισαγωγή των φωσφορικών.



# Οι χλωροπλάστες και η δομή τους

- Οι χλωροπλάστες είναι μεμβρανικά οργανίδια που οριοθετούνται από ένα σύστημα δύο μεμβρανών, το οποίο αποτελείται από την εσωτερική και την εξωτερική μεμβράνη.
- Τόσο η εξωτερική όσο και η εσωτερική μεμβράνη είναι λείες.
- Στο εσωτερικό του χλωροπλάστη βρίσκεται το στρώμα, αλλά και ένα τρίτο μεμβρανικό διαμέρισμα, το σύστημα των θυλακοειδών μεμβρανών (grana).
- Οι θυλακοειδείς μεμβράνες χωρίζουν τους χλωροπλάστες σε τρία εσωτερικά διαμερίσματα, δηλ. α) χώρος μεταξύ της εξωτερικής και εσωτερικής μεμβράνης του χλωροπλάστη, β) στρώμα και γ) εσωτερικό διαμέρισμα των grana.
- Στις μεμβράνες των grana απαντώνται τα φωτοσυστήματα και εκεί λαμβάνουν χώρα οι διαδικασίες των φωτεινών αντιδράσεων της φωτοσύνθεσης.



Ακαδημαϊκές Εκδόσεις 2011.  
Το Κύτταρο-Μία Μοριακή Προσέγγιση



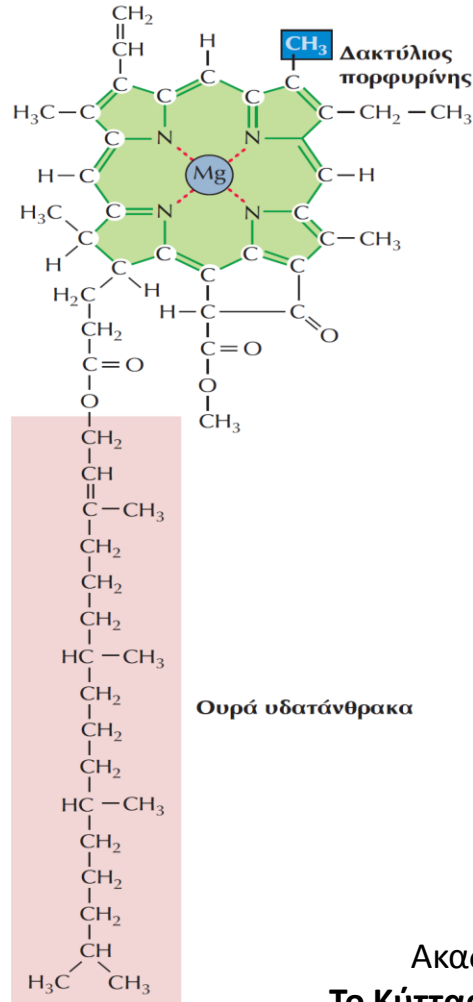
# Σύγκριση μιτοχονδρίων και χλωροπλαστών

- Σημαντικό κοινό στοιχείο μιτοχονδρίων και χλωροπλαστών είναι το γεγονός πως αποτελούν ημιαυτόνομα οργανίδια.
- Οι χλωροπλάστες είναι μεγαλύτερα σε μέγεθος οργανίδια συγκριτικά με τα μιτοχόνδρια.



# Η χλωροφύλλη

- Η χλωροφύλλη αποτελείται από δακτυλίους πορφυρίνης που συνδέονται με υδατανθρακική ουρά.
- Οι χλωροφύλλες α και β διαφέρουν σε μια λειτουργική ομάδα στον δακτύλιο πορφυρίνης.



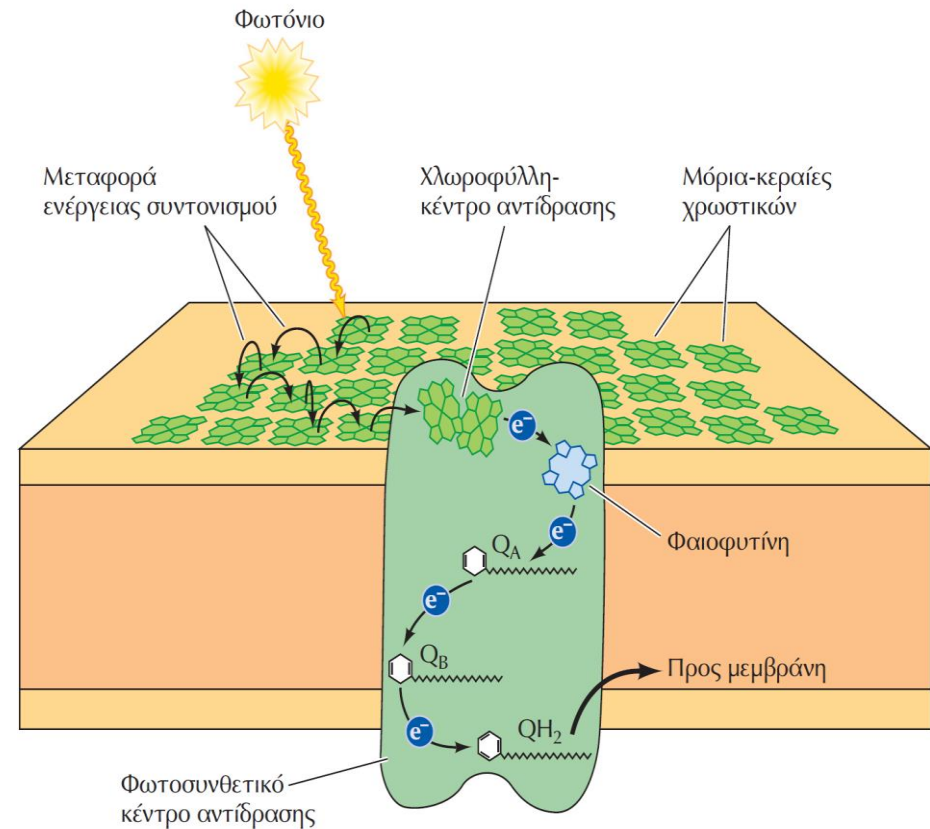
**CHO** στη χλωροφύλλη β

**CH<sub>3</sub>** στη χλωροφύλλη α

Ακαδημαϊκές Εκδόσεις 2011.  
Το Κύτταρο-Μία Μοριακή Προσέγγιση

# Η κεραία ενός φωτοσυστήματος

- Κάθε φωτοχημικό κέντρο αντιδράσεων αποτελείται από εκατοντάδες μόρια χρωστικής που δρουν ως κεραίες, δηλαδή απορροφούν φωτόνια και μεταφέρουν την ενέργεια σε μια χλωροφύλλη που λειτουργεί ως κέντρο αντίδρασης.
- Η χλωροφύλλη-κέντρο αντίδρασης μεταφέρει τα διεγερμένα ηλεκτρόνια της σε ένα μόριο-δέκτη μιας αλυσίδας μεταφοράς ηλεκτρονίων.
- Στην εικόνα παρουσιάζεται το φωτοσυνθετικό κέντρο αντίδρασης του φωτοσυστήματος II, στο οποίο τα ηλεκτρόνια της χλωροφύλλης-κέντρου αντίδρασης μεταφέρονται αρχικά σε φαιοφυτίνη και στη συνέχεια σε κινόνες ( $Q_A$ ,  $Q_B$  και  $QH_2$ ).



Ακαδημαϊκές Εκδόσεις 2011.  
Το Κύτταρο-Μία Μοριακή Προσέγγιση

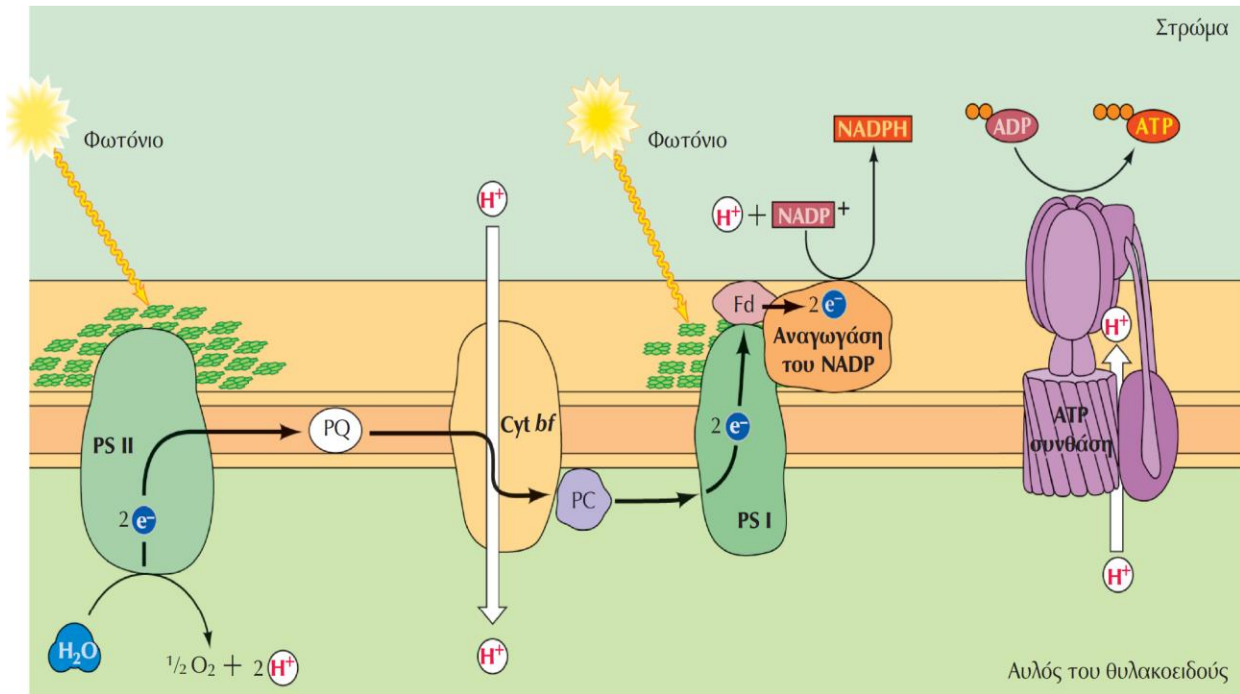


# Η ροή ηλεκτρονίων στη θυλακοειδή μεμβράνη κατά τη φωτοσύνθεση (1)

- Τέσσερα πρωτεϊνικά σύμπλοκα (1) Φωτοσύστημα II [PS II], 2) σύμπλοκο κυτοχρώματος *bf* [Cyt *bf*], 3) Φωτοσύστημα I [PS I] & 4) σύμπλοκο ATP συνθάσης) της μεμβράνης του θυλακοειδούς συμμετέχουν στη μεταφορά ηλεκτρονίων και στη σύνθεση ATP και NADPH.
- Τα φωτόνια απορροφώνται από σύμπλοκα μορίων χρωστικών που συνδέονται με τα φωτοσυστήματα I και II (PS I και PS II, Photosystem I και Photosystem II).
- Στο φωτοσύστημα II, η ενέργεια που προέρχεται από την απορρόφηση των φωτονίων χρησιμοποιείται για την οξειδοαναγωγική σχάση (splitting) ενός μορίου νερού στον αυλό του θυλακοειδούς.
- Στη συνέχεια, τα ηλεκτρόνια μεταφέρονται μέσω της πλαστοκινόνης (PQ) στο σύμπλοκο κυτοχρώματος *bf* (Cyt *bf*), όπου μεταπίπτουν σε χαμηλότερη στάθμη ενέργειας καθώς η ενέργειά τους χρησιμοποιείται εν μέρει για την άντληση πρωτονίων από το στρώμα προς τον αυλό του θυλακοειδούς. Αυτό έχει ως συνέπεια την ελάττωση του pH του αυλού των θυλακοειδών.
- Έπειτα τα ηλεκτρόνια μεταφέρονται μέσω της πλαστοκυανίνης (PC) στο φωτοσύστημα I. Στο φωτοσύστημα I, η ενέργεια που προέρχεται από την απορρόφηση φωτός παράγει και πάλι ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας, τα οποία μεταφέρονται στη φερρεδοξίνη (Fd) και χρησιμοποιούνται για την αναγωγή του NADP<sup>+</sup> σε NADPH στο στρώμα.
- Ακολούθως, η ATP συνθάση χρησιμοποιεί την ενέργεια που έχει αποθηκευτεί ως αποτέλεσμα της διαβάθμισης πρωτονίων (η οποία έχει δημιουργηθεί από την άντληση πρωτονίων από το σύμπλοκο Cyt *bf*) για τη μετατροπή του ADP σε ATP.



# Η ροή ηλεκτρονίων στη θυλακοειδή μεμβράνη κατά τη φωτοσύνθεση (2)



Ακαδημαϊκές Εκδόσεις 2011.

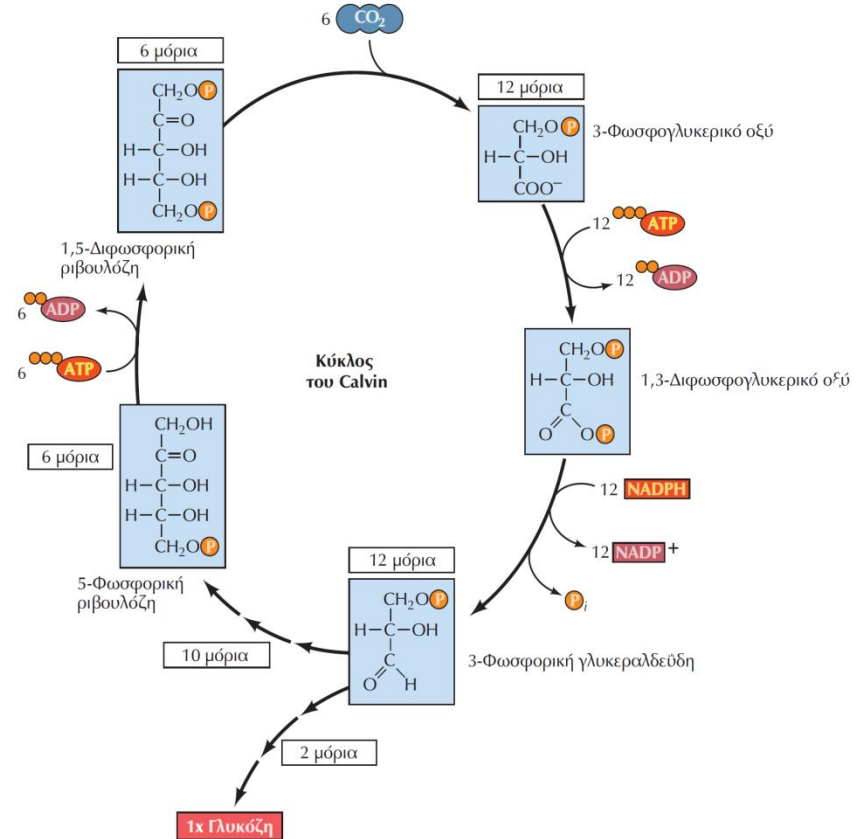
Το Κύτταρο-Μία Μοριακή Προσέγγιση





# Ο κύκλος του Calvin

- Εδώ περιγράφεται η σύνθεση ενός μορίου γλυκόζης από έξι μόρια  $\text{CO}_2$ .
- Κάθε μόριο  $\text{CO}_2$  προστίθεται στην 1,5-διφωσφορική ριβουλόζη, προκειμένου να σχηματιστούν δύο μόρια 3-φωσφογλυκερικού οξέος.
- Αυτά τα έξι μόρια  $\text{CO}_2$  συνεπώς οδηγούν στον σχηματισμό 12 μορίων 3-φωσφορικής γλυκεραλδεΐδης με κόστος 12 μορίων ATP και 12 μορίων NADPH.
- Στη συνέχεια, δύο μόρια 3-φωσφορικής γλυκεραλδεΐδης χρησιμοποιούνται για τη σύνθεση γλυκόζης και δέκα μόρια συνεχίζουν τον κύκλο του Calvin, ώστε να σχηματιστούν έξι μόρια 5-φωσφορικής ριβουλόζης.
- Ο κύκλος ολοκληρώνεται με την κατανάλωση έξι επιπρόσθετων μορίων ATP για τη σύνθεση 1,5-διφωσφορικής ριβουλόζης.



Ακαδημαϊκές Εκδόσεις 2011.  
Το Κύτταρο-Μία Μοριακή Προσέγγιση





# Προϊόντα των αντιδράσεων καθήλωσης άνθρακα στους χλωροπλάστες

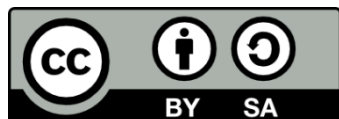
- Τα προϊόντα των αντιδράσεων καθήλωσης άνθρακα, όπως σάκχαρα και λιπαρά οξέα, στους χλωροπλάστες χρησιμοποιούνται στα μιτοχόνδρια για παραγωγή ATP.





# Τέλος ενότητας

Επεξεργασία: Τσαχουρίδου Βασιλική  
Θεσσαλονίκη, Εαρινό Εξάμηνο 2013-2014



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ