



BIOΧΗΜΕΙΑ

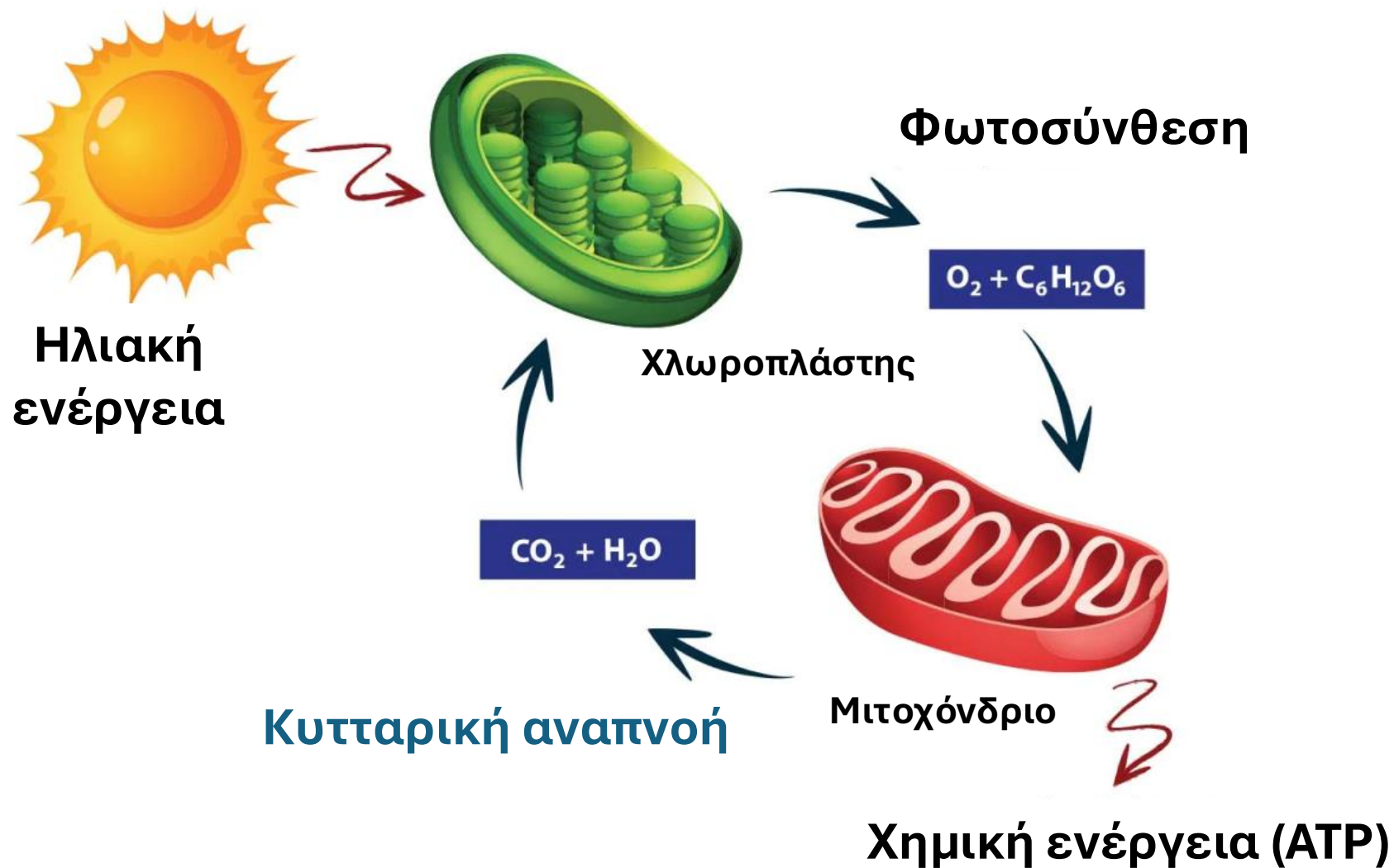
Κυτταρική Αναπνοή

Τμήμα Αειφορικής Γεωργίας

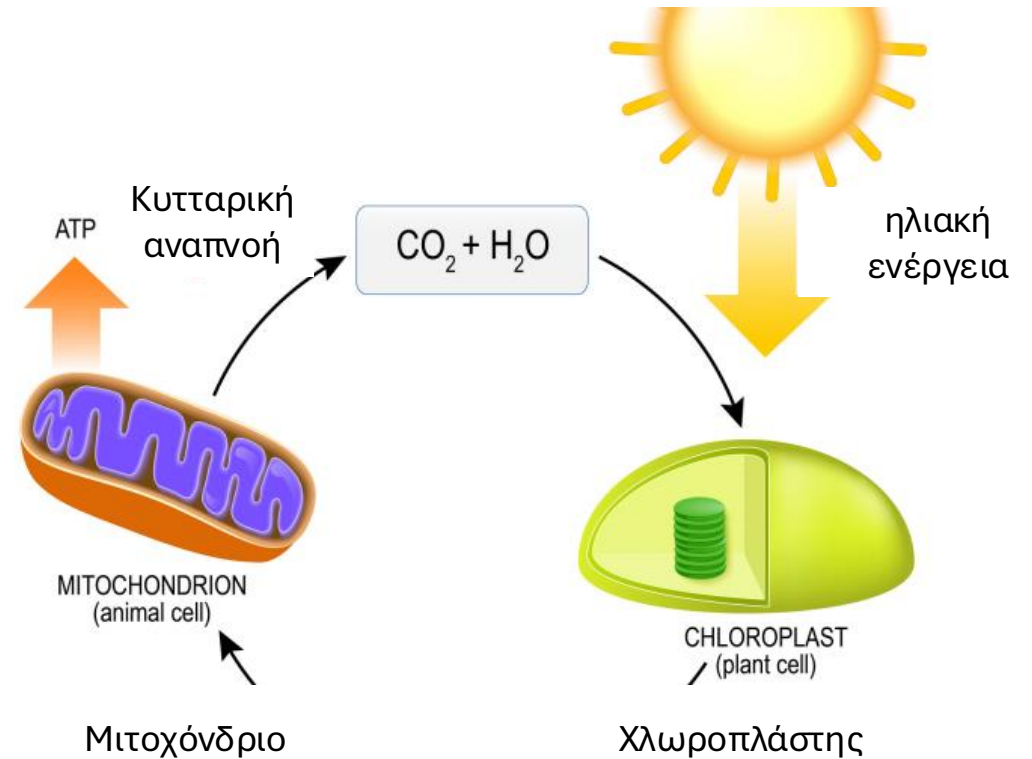
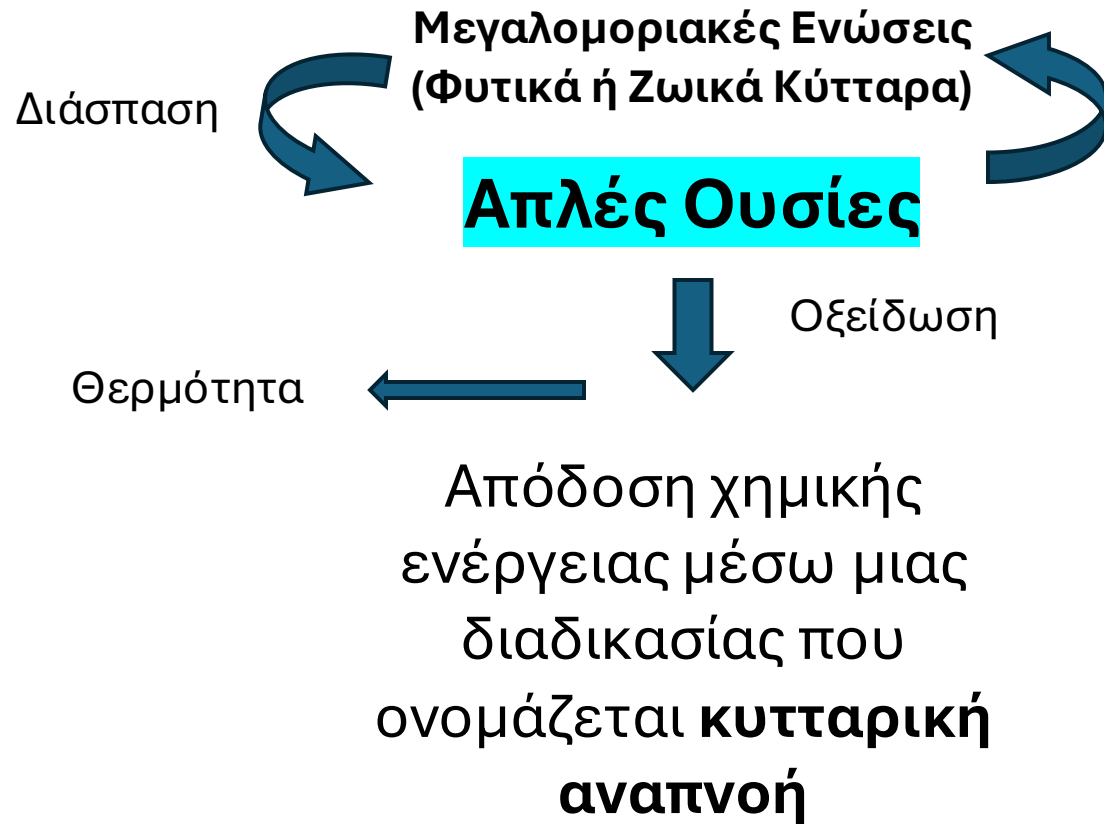
Παναγιώτα Σταθοπούλου

Μάιος, 2025

ΚΥΤΤΑΡΙΚΗ ΑΝΑΠΝΟΗ

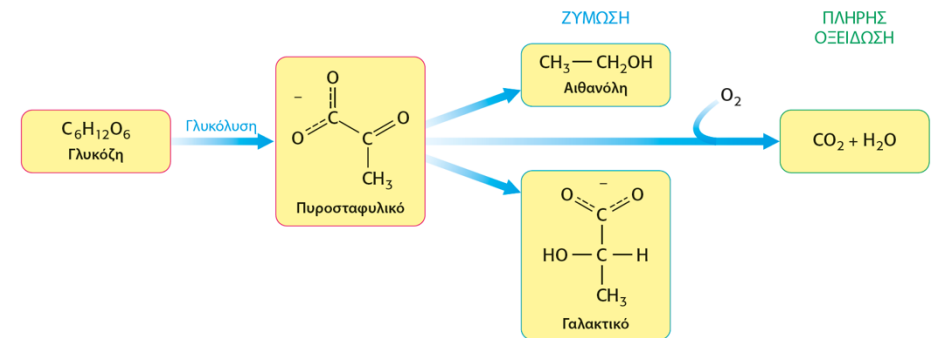
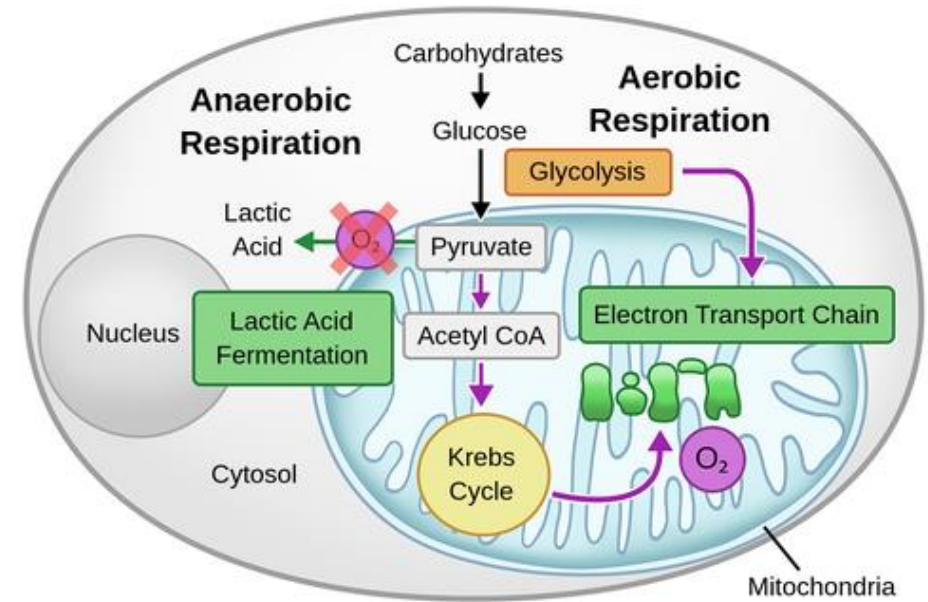


ΚΥΤΤΑΡΙΚΗ ΑΝΑΠΝΟΗ



ΚΥΤΤΑΡΙΚΗ ΑΝΑΠΝΟΗ

- **Αναπνοή** είναι η διαδικασία μετατροπής των υδατανθράκων (Γλυκόζη) σε χρήσιμη χημική ενέργεια (ATP) η οποία θα χρησιμοποιηθεί σε άλλες αντιδράσεις
- Η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στη γλυκόζη εκλύεται στα τρία στάδια της κυτταρικής αναπνοής: **τη γλυκόλυση, τον κύκλο του Krebs και την αλυσίδα μεταφοράς ηλεκτρονίων**
- Γίνεται **σε όλους τους ζώντες οργανισμούς** (φυτά και ζώα)
- Η κυτταρική αναπνοή μπορεί να γίνεται με τη βοήθεια οξυγόνου (οξειδωτικό), οπότε λέγεται **αερόβια αναπνοή**, ή χωρίς οξυγόνο και λέγεται **αναερόβια αναπνοή**.

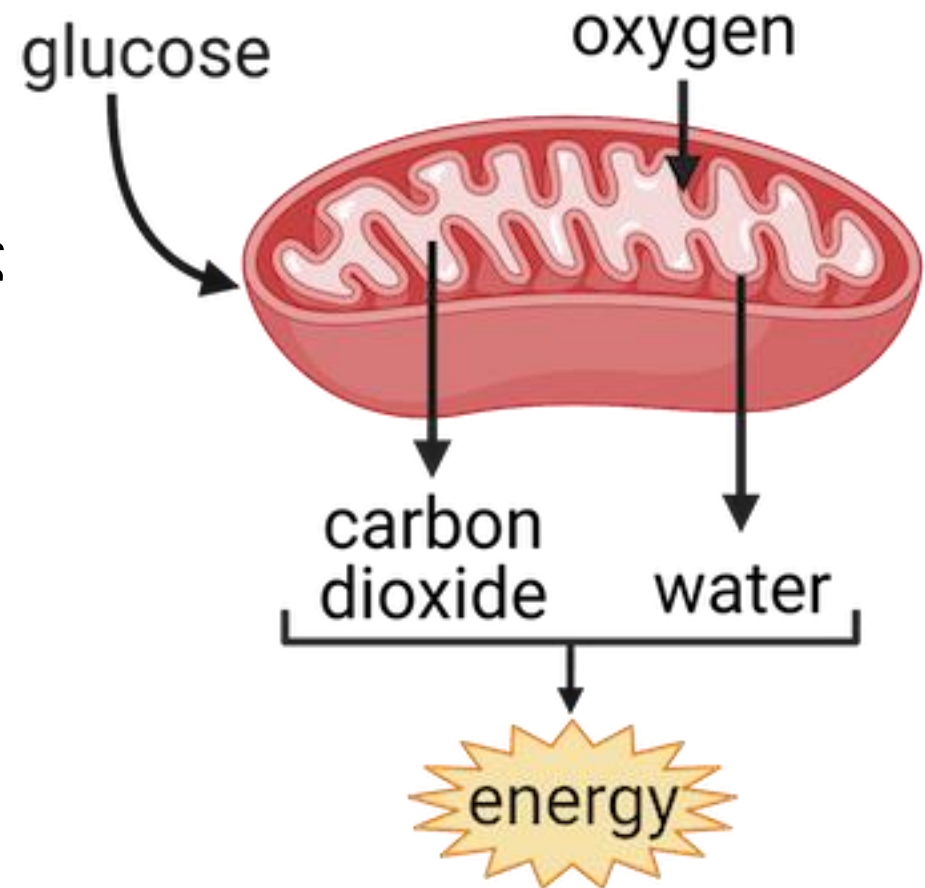


ΚΥΤΤΑΡΙΚΗ ΑΝΑΠΝΟΗ

Παραγωγή ενέργειας από τη διάσπαση υδατανθράκων (γλυκόζη)

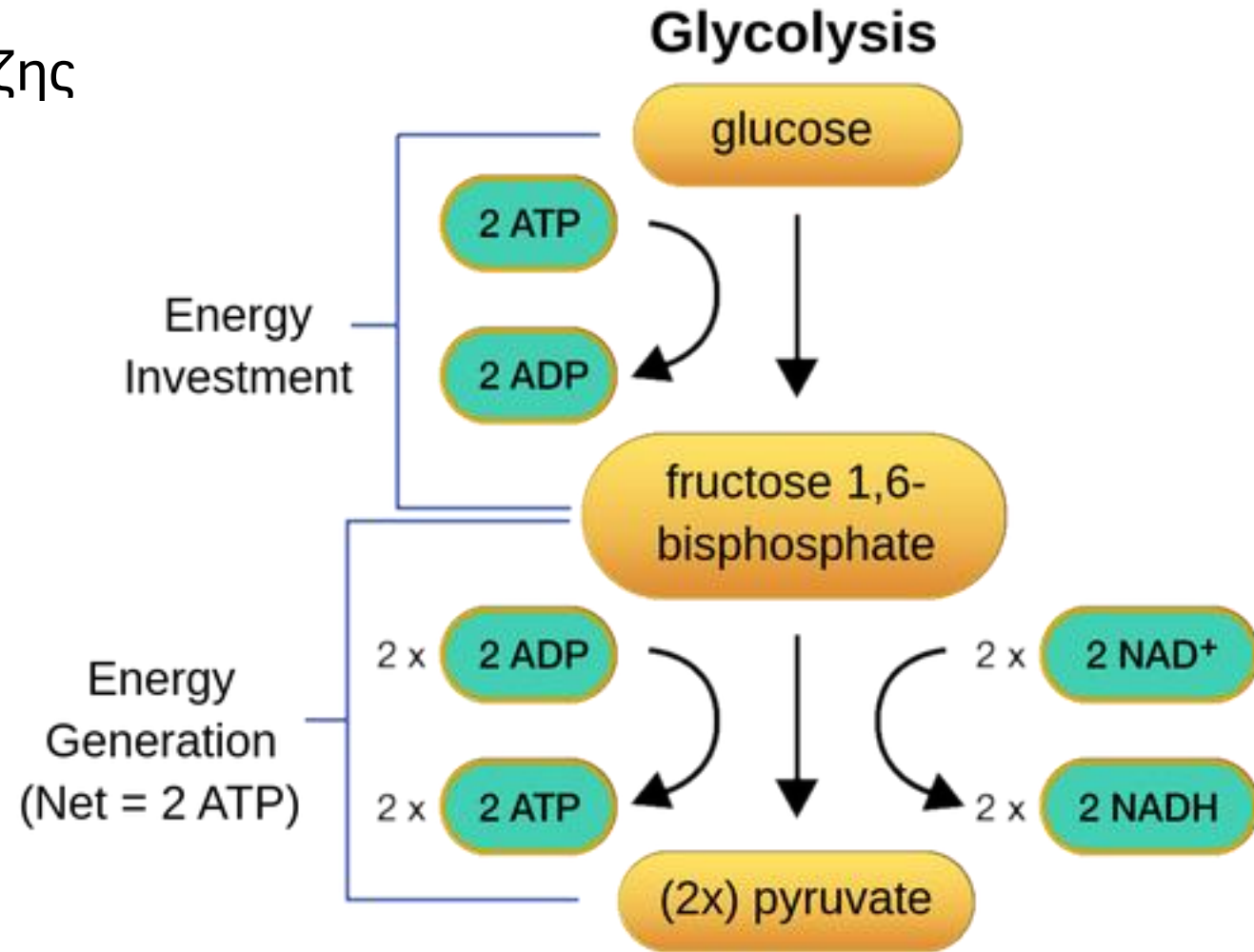
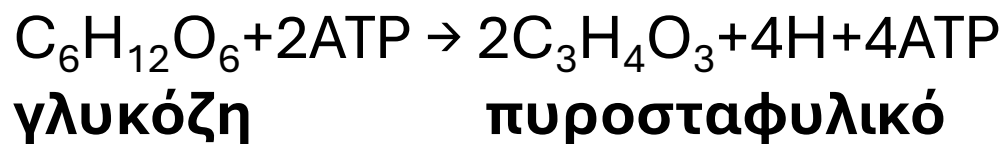
Η διάσπαση της γλυκόζης περιλαμβάνει τρεις διαδικασίες:

- τη γλυκόλυση
- τον κύκλο του κιτρικού οξέος ή κύκλο του Κρεμπς (Krebs)
- και την οξειδωτική φωσφορυλίωση.



Γλυκόλυση

- Κατά τη γλυκόλυση ένα μόριο γλυκόζης διασπάται σε δυο μόρια πυροσταφυλικού.
- Γίνεται στο κυτταρόπλασμα (όχι στα μιτοχόνδρια).
- Δεν χρειάζεται οξυγόνο.
- Μπορεί να συνοψισθεί:

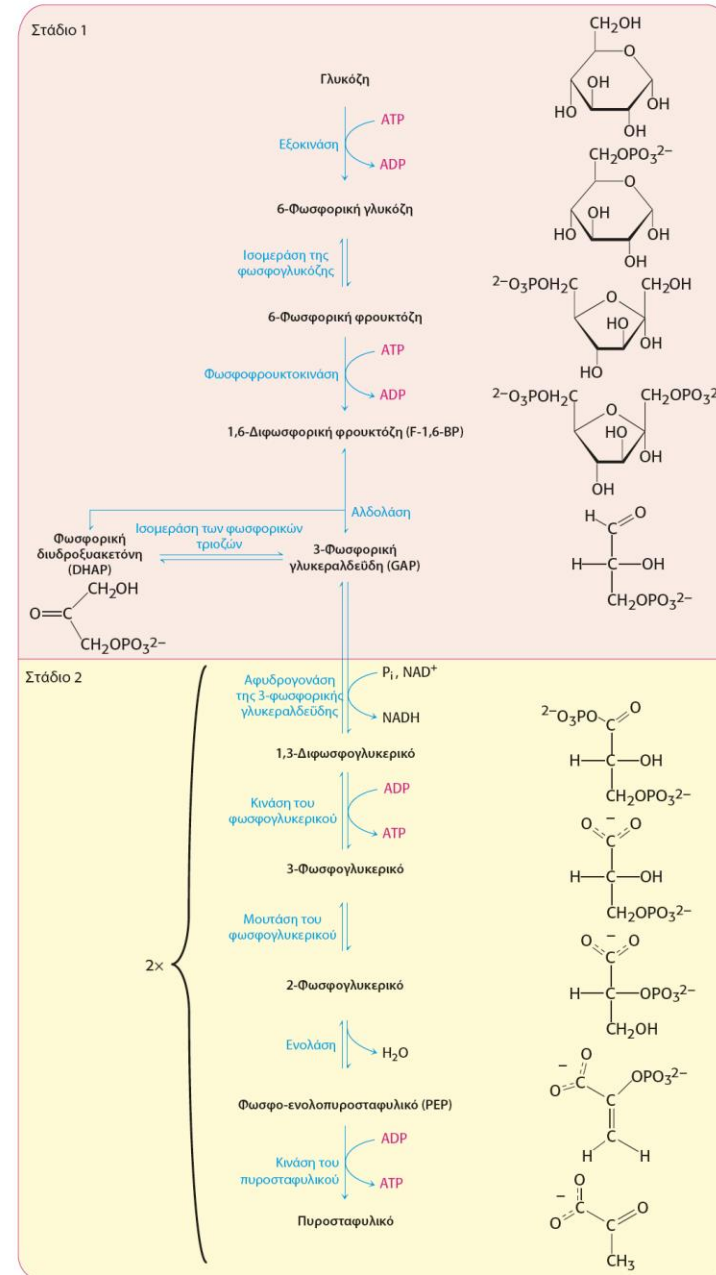


Γλυκόλυση

Με τον όρο **γλυκόλυση**, χαρακτηρίζεται γενικά η **βιοχημική διεργασία της διάσπασης σακχάρων** και ιδιαίτερα της γλυκόζης.

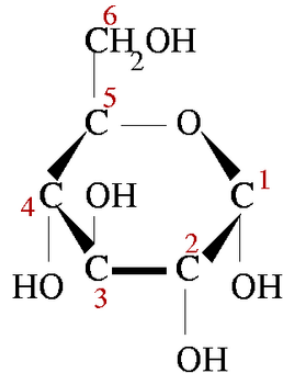
Η γλυκόλυση αποτελεί το **πρώτο στάδιο της κυτταρικής αναπνοής**, ανεξάρτητα της αναγκαίας παρουσίας ή όχι οξυγόνου, που σημαίνει ότι η γλυκόλυση πραγματοποιείται τόσο στην αεροβική όσο και στην αναεροβική αναπνοή, των κυττάρων.

Στα ευκαρυωτικά κύτταρα, η γλυκόλυση λαμβάνει χώρα στο **κυτταρόπλασμα**.



Γλυκόλυση

Γιατί γλυκόζη και όχι κάποιοι άλλοι μονοσακχαρίτες;

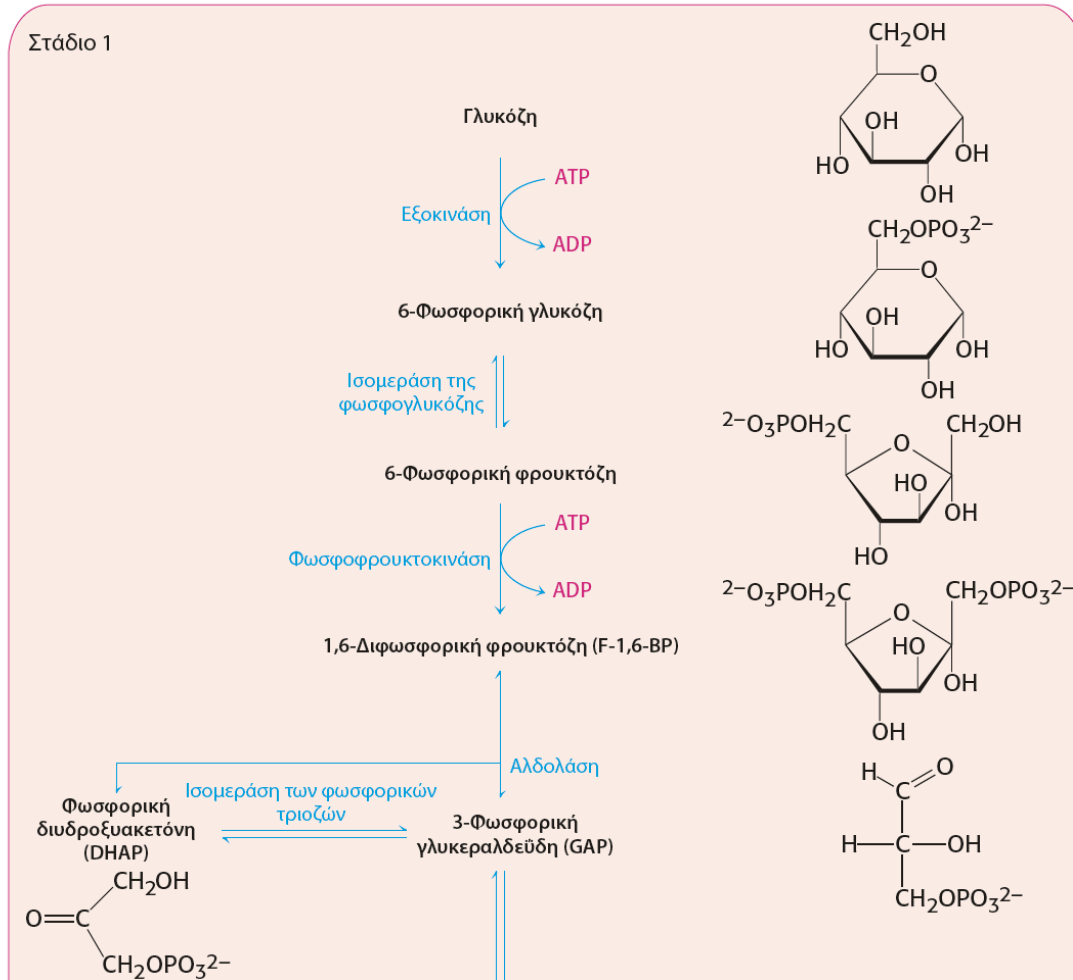


- Η γλυκόζη είναι από τους μονοσακχαρίτες που σχηματίστηκαν από φορμαλδεΰδη κάτω από προβιωτικές συνθήκες και ίσως ήταν η διαθέσιμη πηγή καυσίμου για τα πρωτόγονα βιοχημικά συστήματα
 - Γλυκόζη: είναι ένα σημαντικό κοινό καύσιμο.
- Η τάση της γλυκόζης να γλυκοζυλιώνει πρωτεΐνες μη ενζυμικά, σε σχέση με άλλους μονοσακχαρίτες, είναι χαμηλή.

Η γλυκόλυση μπορεί να διαιρεθεί σε δύο στάδια

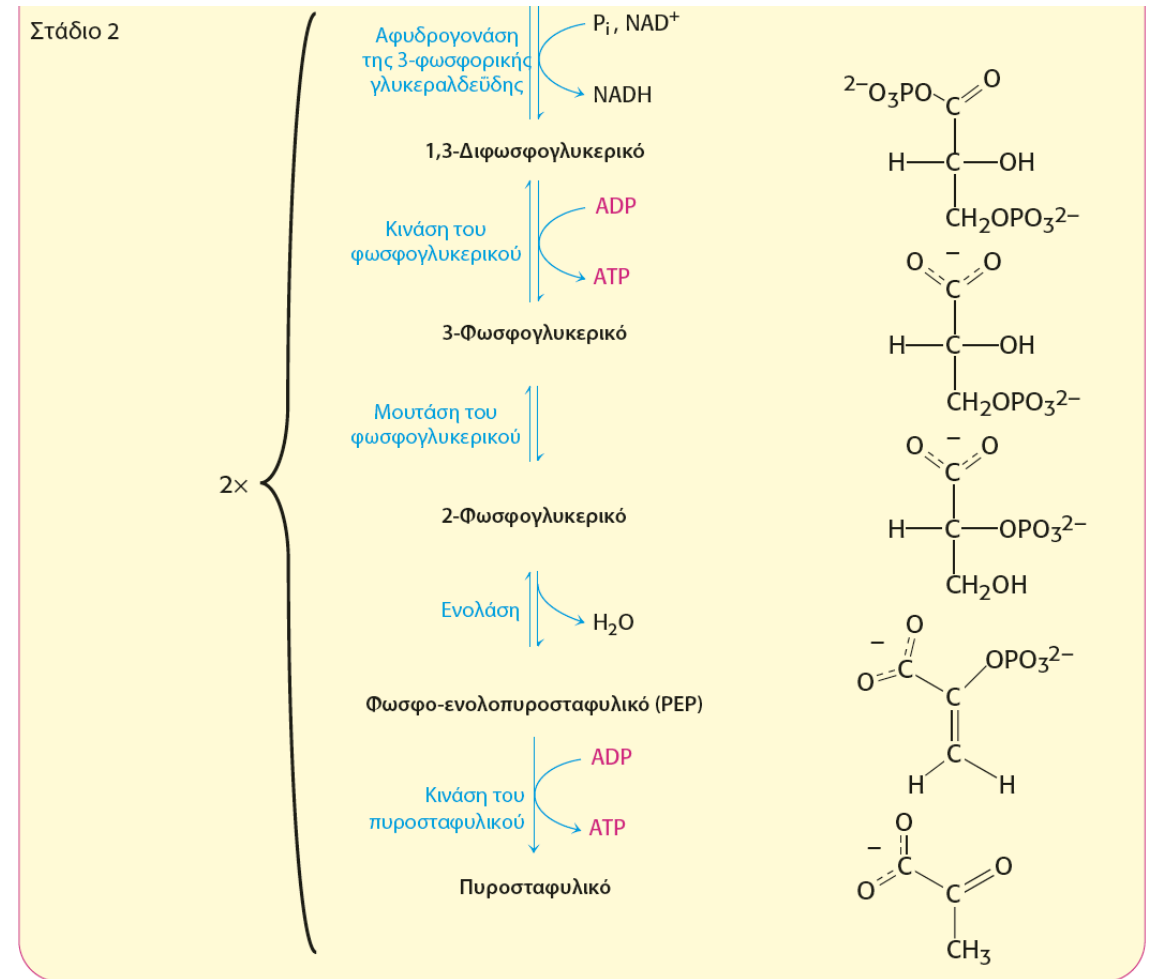
Στάδιο 1

φάση παγίδευσης και προετοιμασίας
(όχι παραγωγή ATP)



Στάδιο 2

συλλογή ATP όταν οι προκύπτουσες από τα στάδιο 1 μονάδες τριών ατόμων άνθρακα οξειδώνονται σε πυροσταφυλικό.



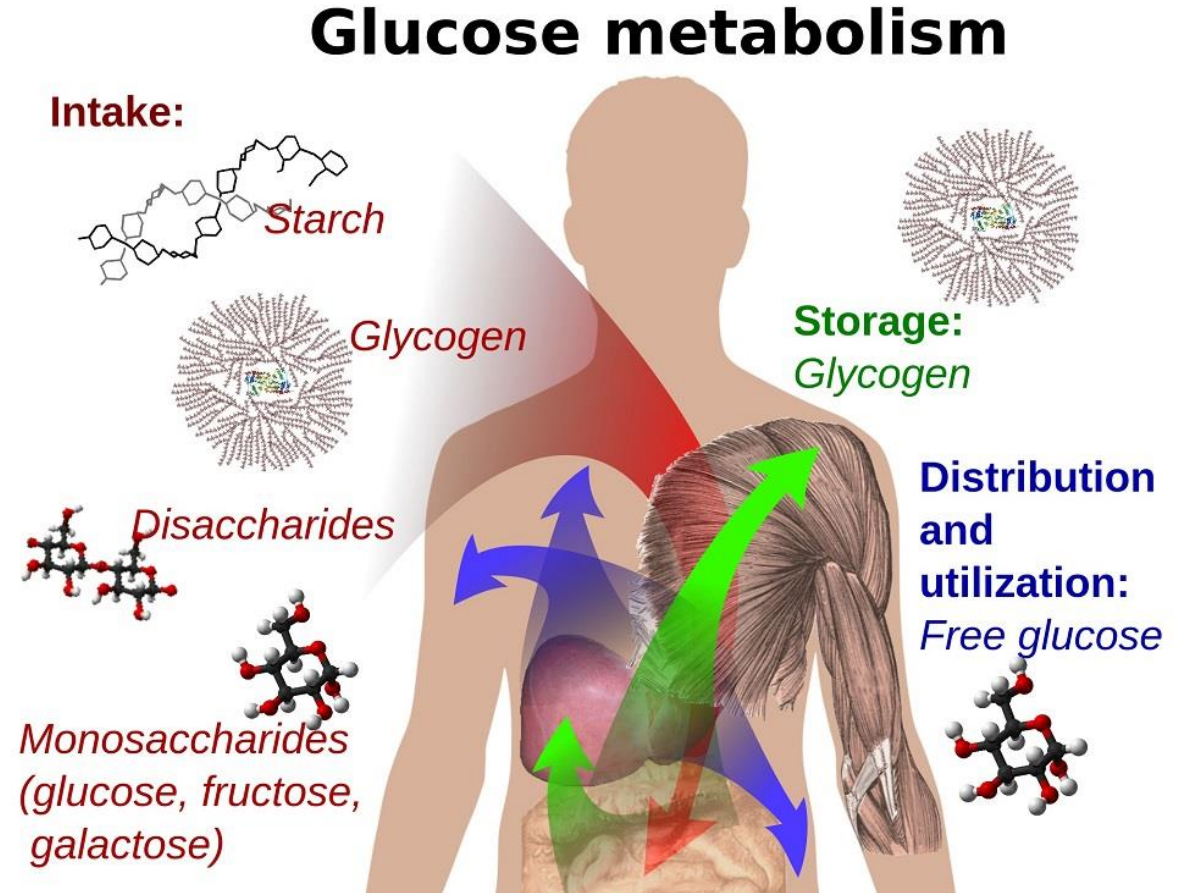
Η γλυκόζη παράγεται από υδατάνθρακες της διατροφής

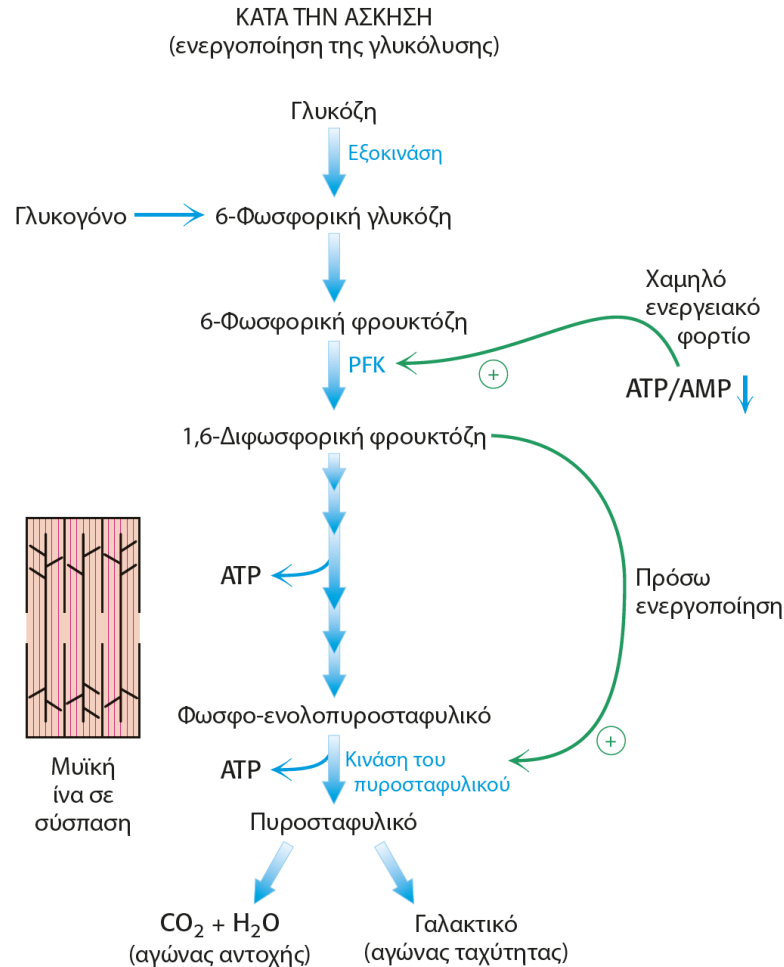
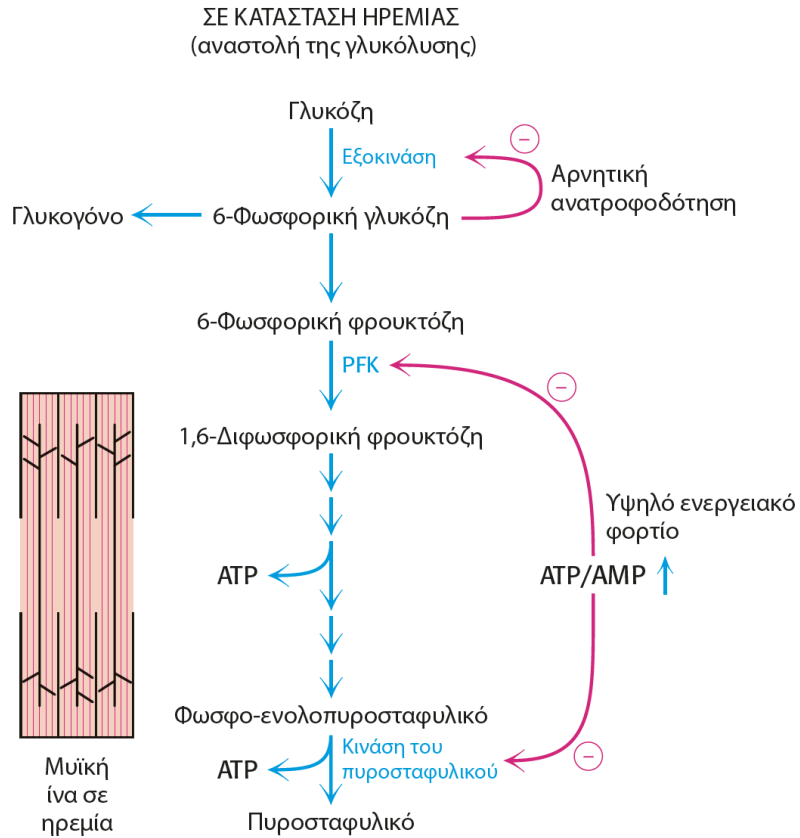
ΤΡΟΦΗ: πρόσληψη αμύλου και γλυκογόνου

Άμυλο και γλυκογόνο $\xrightarrow{\text{α-αμυλάση}}$ μαλτόζη και μαλτοτριόζη

Μαλτόζη $\xrightarrow{\text{μαλτάση}}$ 2 μόρια γλυκόζης

Οι μονοσακχαρίτες μεταφέρονται μέσα στα κύτταρα που επικαλύπτουν το έντερο και από εκεί στη κυκλοφορία του αίματος



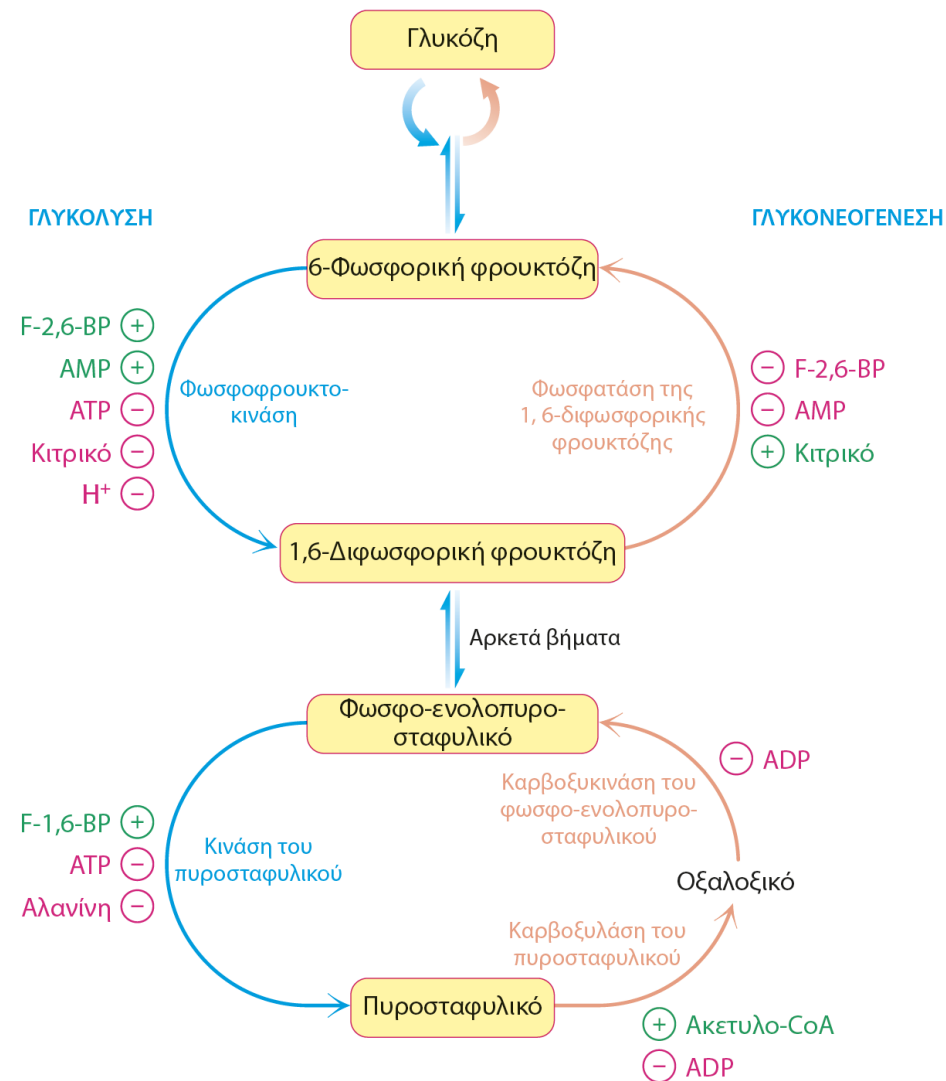


ΕΙΚΟΝΑ 16.17 Ρύθμιση της γλυκόλυσης στους μυς. Σε κατάσταση ηρεμίας (αριστερά) η γλυκόλυση δεν είναι πολύ ενεργός (λεπτά βέλη). Η υψηλή συγκέντρωση ATP αναστέλλει τη φωσφοφρουκτοκινάση (PFK), την κινάση του πυροσταφυλικού και την εξοκινάση. Η 6-φωσφορική γλυκόζη μετατρέπεται σε γλυκογόνο (Κεφάλαιο 21). Κατά τη διάρκεια της άσκησης (δεξιά), η ελάττωση του λόγου ATP/AMP λόγω της σύσπασης των μυών ενεργοποιεί τη φωσφοφρουκτοκινάση και, ως εκ τούτου, τη γλυκόλυση. Η ροή καθοδικά της πορείας αυξάνεται, όπως παριστάνεται με τα παχιά βέλη.

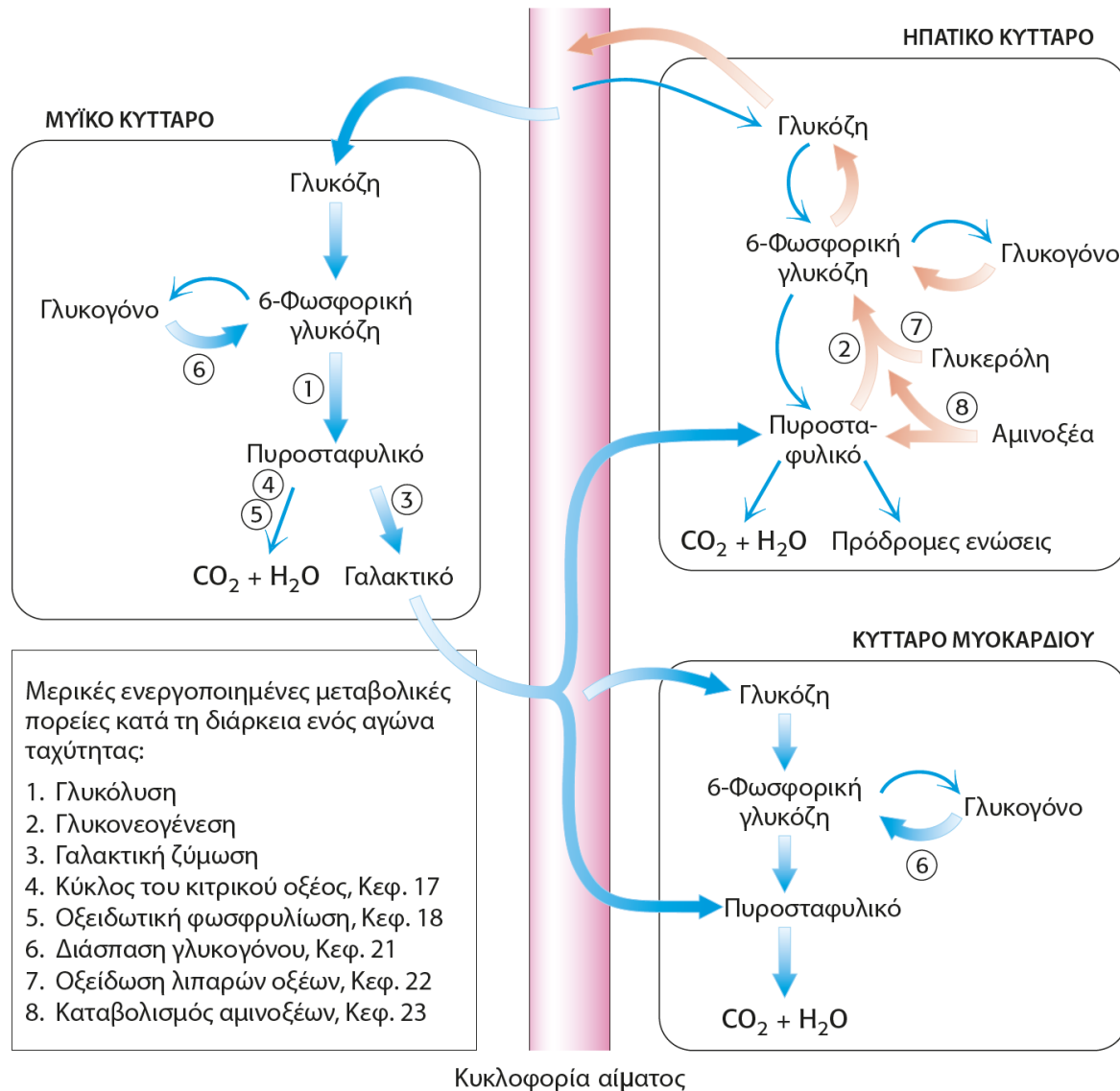
Γλυκονεογένεση

Η αντίστροφη πορεία της γλυκόλυσης είναι η γλυκονεογένεση

Δηλαδή η σύνθεση γλυκόζης από το πυροσταφυλικό και το γαλακτικό.



ΕΙΚΟΝΑ 16.28 Αντίρροπη ρύθμιση της γλυκόλυσης και της γλυκονεογένεσης στο ήπαρ. Η συγκέντρωση της 2,6-διφωσφορικής φρουκτόζης είναι υψηλή μετά από σίτιση και χαμηλή κατά την ασιτία. Ένας άλλος σημαντικός έλεγχος είναι η αναστολή της κινάσης του πυροσταφυλικού με φωσφορυλίωση κατά τη διάρκεια ασιτίας.



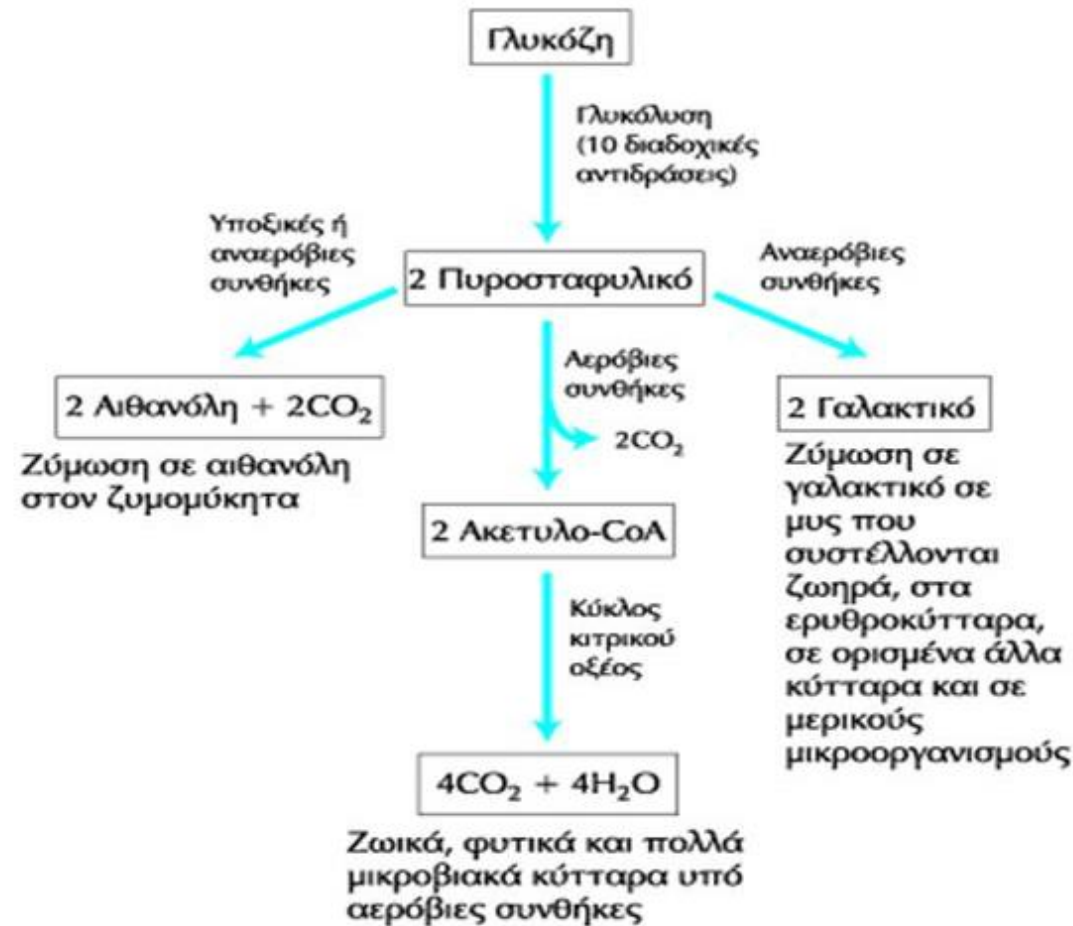
ΕΙΚΟΝΑ 16.33 ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΠΟΡΕΙΑΣ:

Συνεργασία μεταξύ γλυκόλυσης και γλυκονεογένεσης κατά τη διάρκεια ενός αγώνα ταχύτητας. Η γλυκόλυση και η γλυκονεογένεση συντονίζονται με εξειδίκευση κατά ιστό, για να εξασφαλιστεί η αντιμετώπιση των ενεργειακών αναγκών όλων των κυττάρων. Ας πάρουμε έναν δρομέα ταχύτητας. Στους σκελετικούς μυς των ποδιών, η γλυκόζη θα μεταβολιστεί αεροβίως σε CO_2 και H_2O ή, το πιθανότερο (παχιά βέλη) κατά τη διάρκεια ενός αγώνα ταχύτητας, αναεροβίως σε γαλακτικό. Στο μυοκάρδιο, το γαλακτικό μπορεί να μετατραπεί σε πυροσταφυλικό και να χρησιμοποιηθεί μαζί με τη γλυκόζη ως καύσιμο, προκειμένου να δώσει κινητήρια δύναμη για τη σύσπαση του μυοκαρδίου ώστε να διατηρήσει τη ροή του αίματος του δρομέα. Η γλυκονεογένεση, μία από τις κύριες λειτουργίες του ήπατος, θα λαμβάνει χώρα γρήγορα (παχιά βέλη) για να εξασφαλιστεί η παρουσία αρκετής γλυκόζης στο αίμα για τους σκελετικούς μυς και το μυοκάρδιο, καθώς και για άλλους ιστούς. Το γλυκογόνο, η γλυκερόλη και τα αμινοξέα είναι άλλες πηγές ενέργειας για τις οποίες θα μάθουμε σε επόμενα κεφάλαια.

Μεταβολισμός του πυροσταφυλικού

Αιθανόλη και Γαλακτικό: ζυμώσεις που γίνονται **απουσία οξυγόνου**

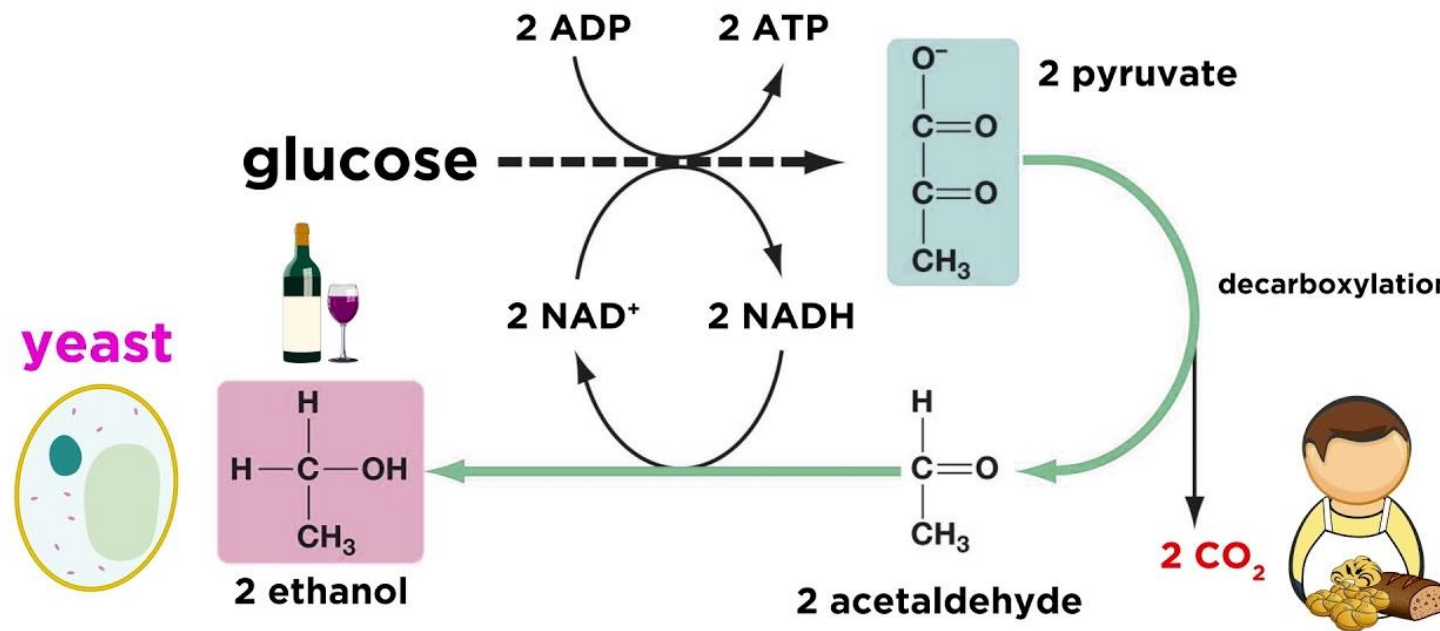
Παρουσία οξυγόνου:
πυροσταφυλικό → $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
(κύκλος του Krebs)



Μεταβολισμός του πυροσταφυλικού

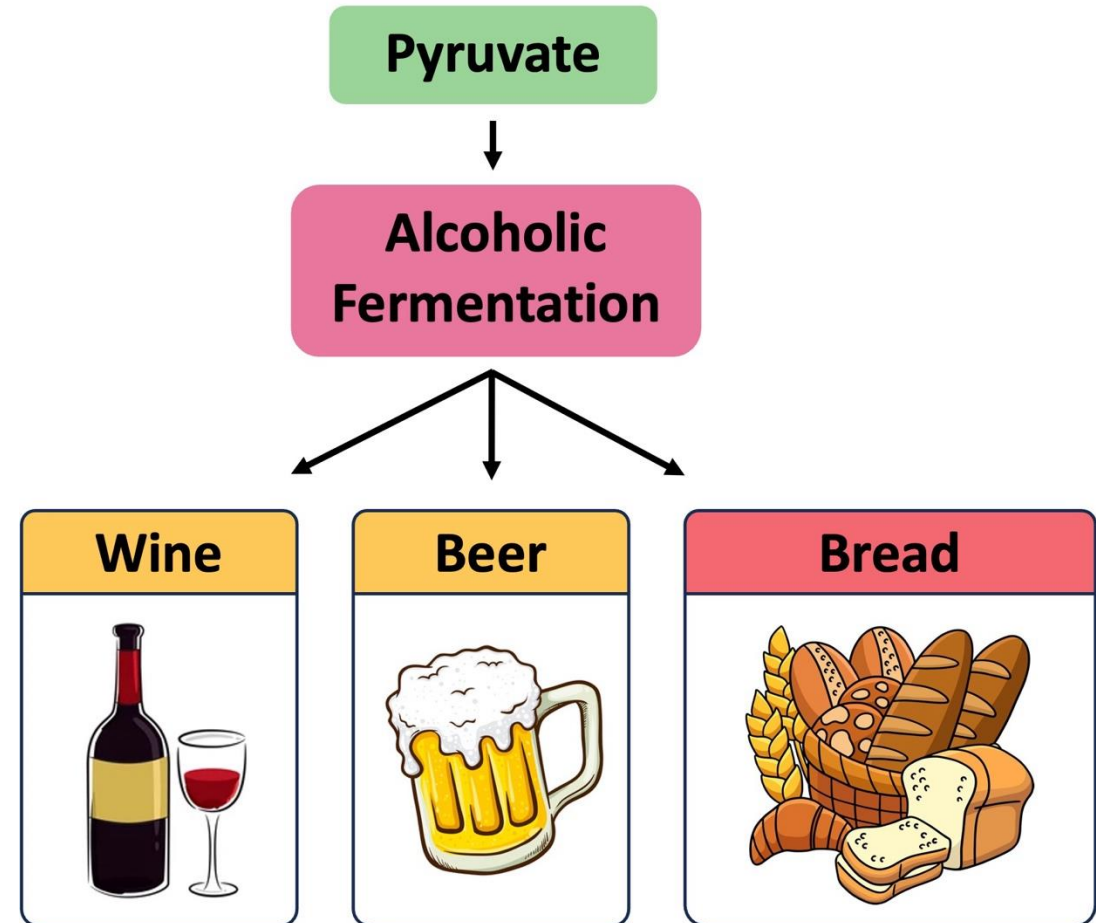
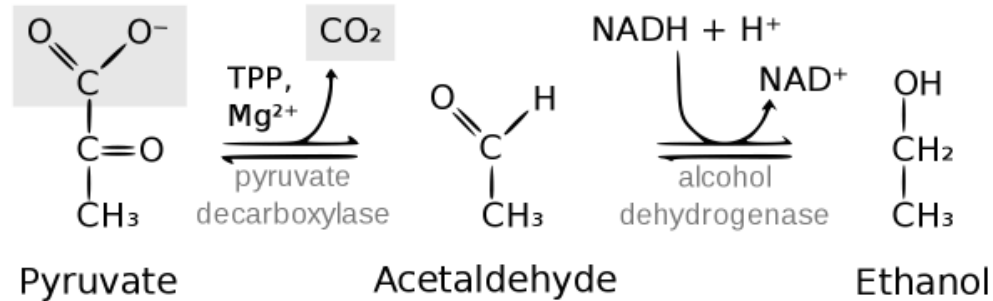
Τρεις πιθανές καταλήξεις του πυροσταφυλικού:

Αιθανόλη (αλκοολική ζύμωση)



Τρεις πιθανές καταλήξεις του πυροσταφυλικού:

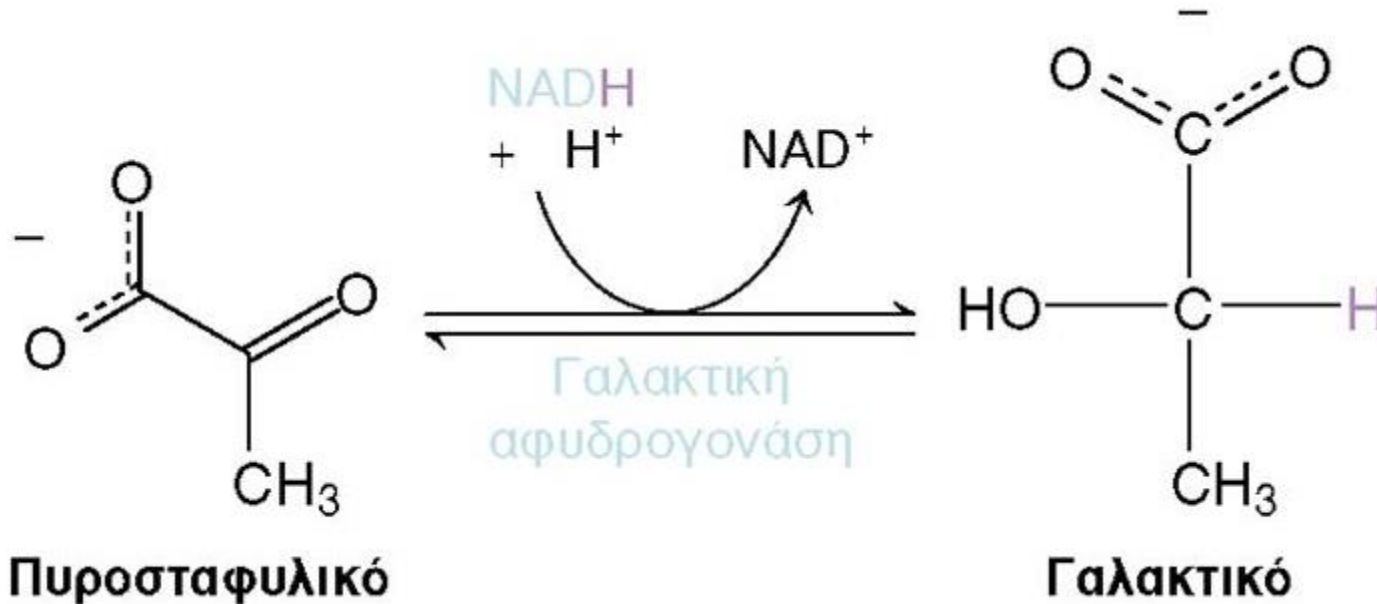
Αιθανόλη (αλκοολική ζύμωση)



Μεταβολισμός του πυροσταφυλικού

Τρεις πιθανές καταλήξεις του πυροσταφυλικού:

Γαλακτικό οξύ (γαλακτική ζύμωση)



Γάλα

σάκχαρα

γαλακτική ζύμωση



Γιαούρτι

γαλακτικό οξύ

Μεταβολισμός του πυροσταφυλικού

Τρεις πιθανές καταλήξεις του πυροσταφυλικού:

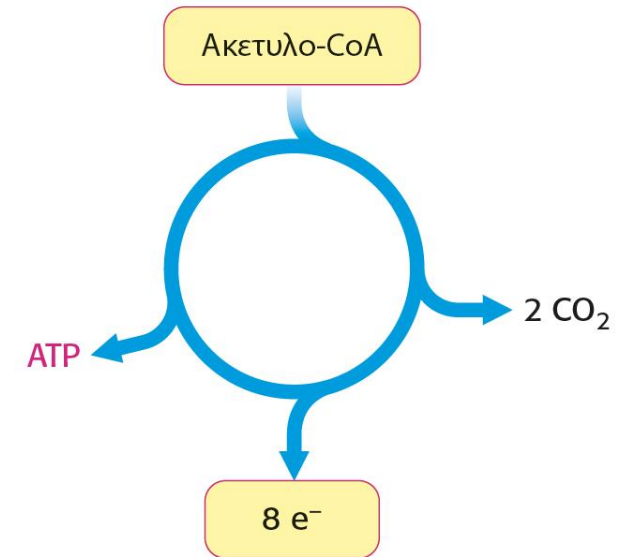
Ακέτυλοσυνένζυμο Α (ακέτυλο-CoA)

Η περισσότερη ενέργεια εξάγεται αεροβίως
μέσω του κύκλου του κιτρικού οξέος και της
αλυσίδας μεταφοράς ηλεκτρονίων

ΣΗΜΕΙΟ ΕΙΣΟΔΟΥ

ακέτυλοσυνένζυμο Α (ακέτυλο-CoA)

Κύκλος Κιτρικού Οξέος

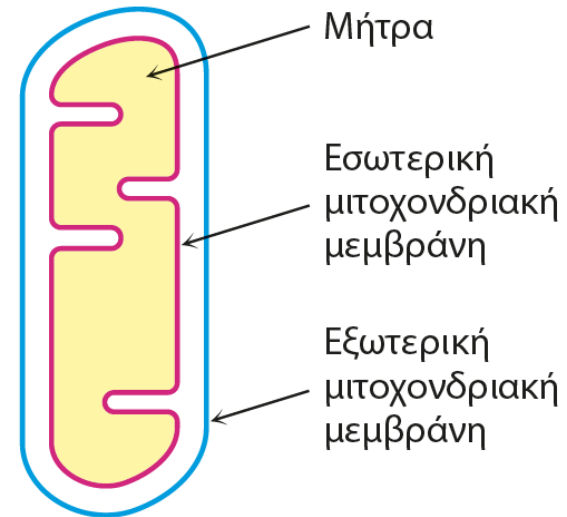


Οι υποχρεωτικές κυκλικές πορείες λειτουργούν ως κομβικά σημεία για να διευκολύνουν τη ροή της κυκλοφορίας. Ο κύκλος του κιτρικού οξέος είναι το βιοχημικό κομβικό σημείο του κυττάρου, που οξειδώνει τα καύσιμα οργανικά μόρια, συνήθως στη μορφή του ακετυλο-CoA. Επίσης, χρησιμεύει ως πηγή πρόδρομων μορίων για βιοσύνθεση. [Chalermkiat Seedokmai/Getty Images.]

Κύκλος Κιτρικού Οξέος



Στους ευκαρυωτικούς οργανισμούς, οι αντιδράσεις του κύκλου του κιτρικού οξέος λαμβάνουν χώρα μέσα στα μιτοχόνδρια, σε αντίθεση με εκείνες της γλυκόλυσης οι οποίες λαμβάνουν χώρα στο κυτταρόπλασμα

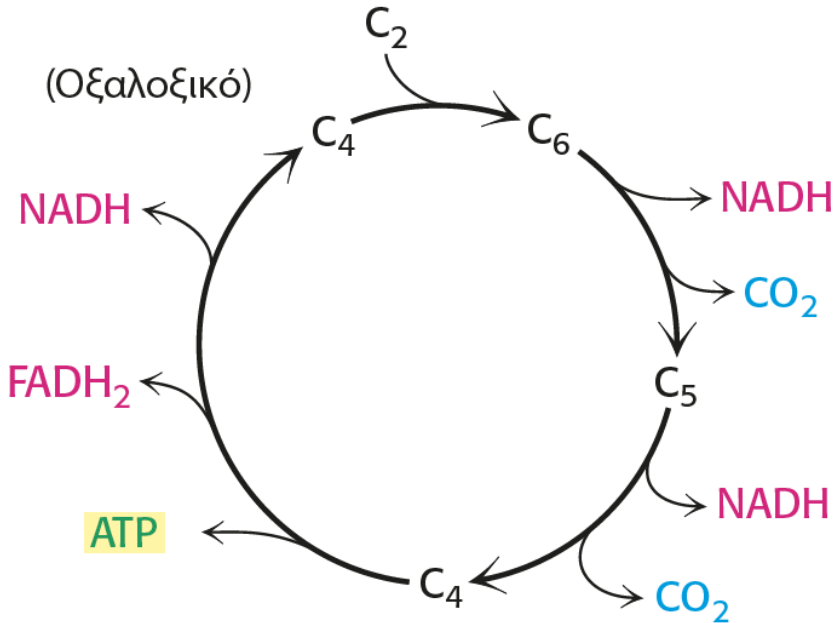


ΕΙΚΟΝΑ 17.1 Μιτοχόνδριο. Σ' αυτή την ηλεκτρονιομικρογραφία διακρίνεται η διπλή μεμβράνη του μιτοχονδρίου. Οι πολλές εγκολπώσεις της εσωτερικής μεμβράνης ονομάζονται ακρολοφίες. Η οξειδωτική αποκαρβοξυλίωση του πυροσταφυλικού και η αλληλουχία των αντιδράσεων στον κύκλο του κιτρικού οξέος λαμβάνουν χώρα μέσα στη μήτρα. [Omikron/Science Source.]

Κύκλος Κιτρικού Οξέος

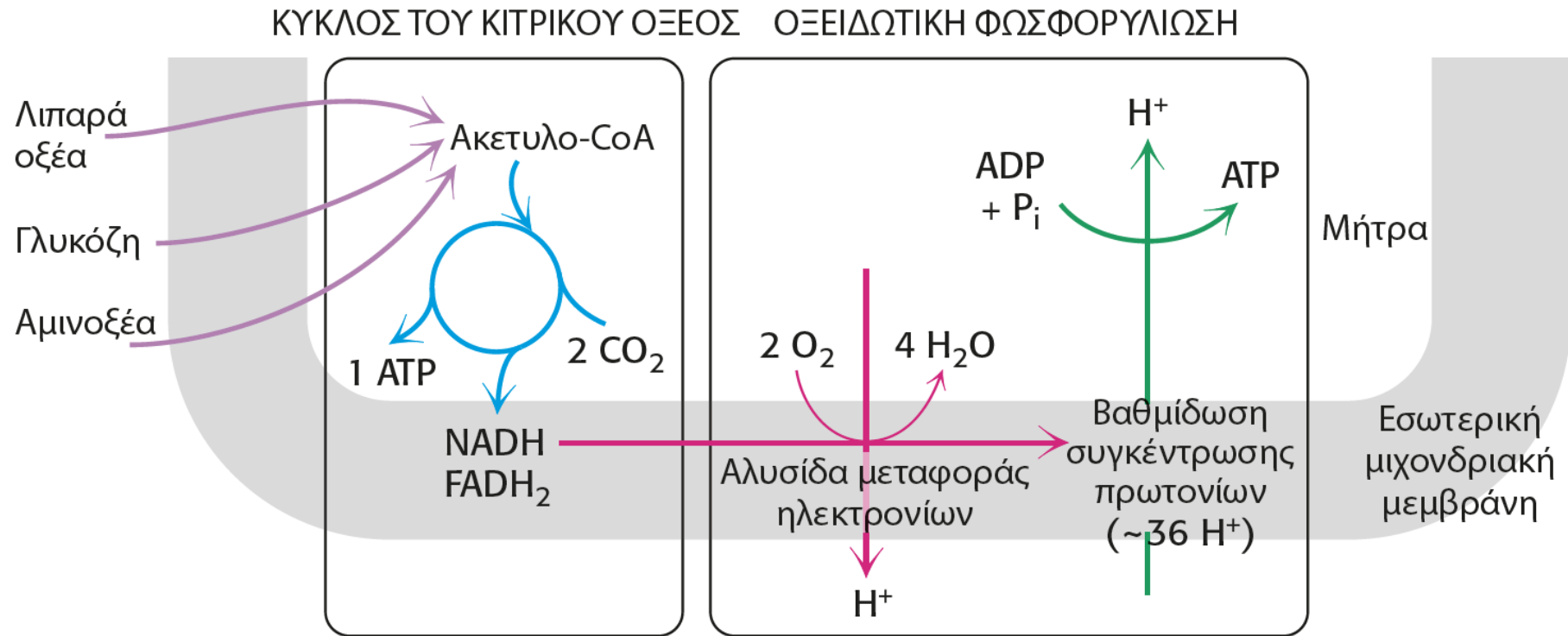
Ο κύκλος του κιτρικού οξέος είναι η τελική κοινή πορεία για την οξείδωση των καύσιμων οργανικών μορίων – υδατανθράκων, λιπαρών οξέων και αμινοξέων.

Τα περισσότερα καύσιμα μόρια εισέρχονται στον κύκλο ως ακετυλο-συνένζυμο Α.

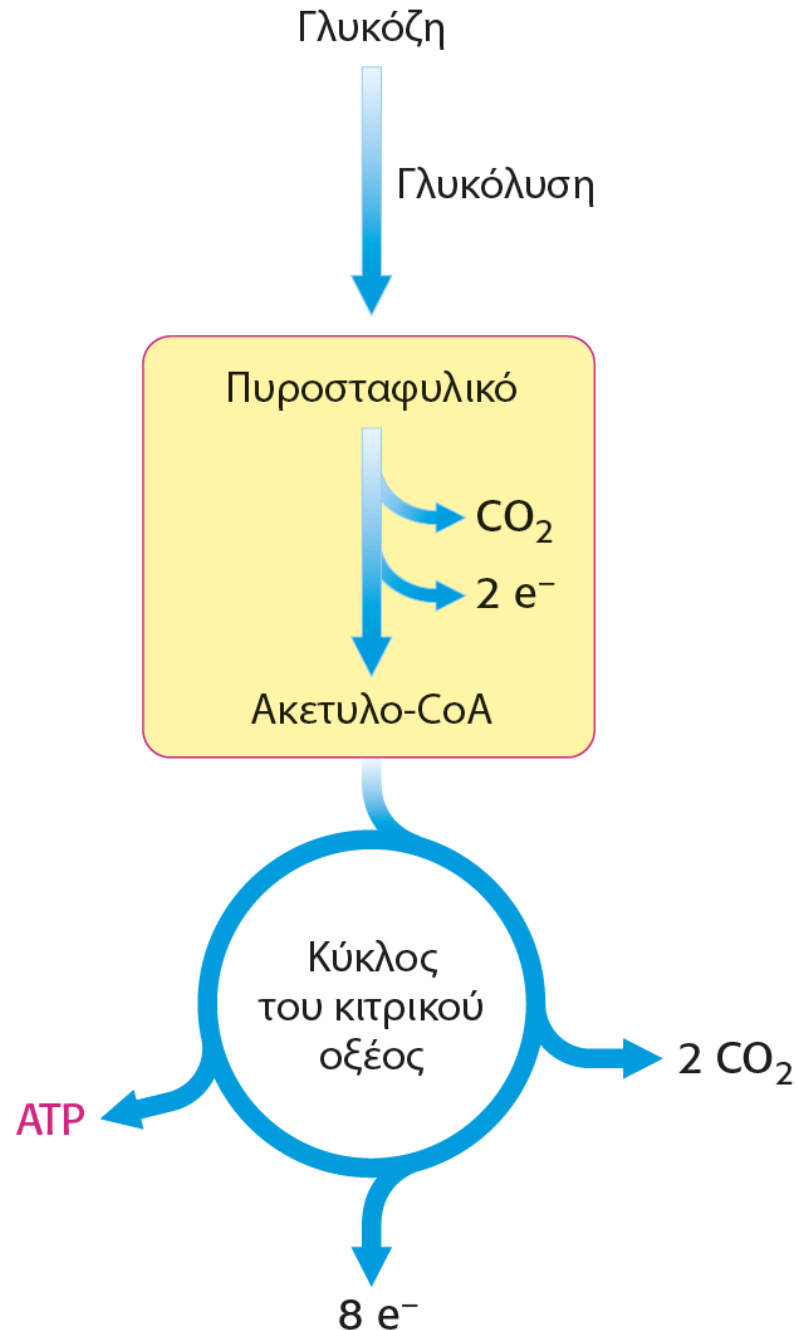


Ο κύκλος του κιτρικού οξέος οξειδώνει μονάδες δύο ατόμων άνθρακα, παράγοντας δύο μόρια CO_2 , ένα μόριο ATP και ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας στη μορφή του NADH και του FADH_2

Κύκλος Κιτρικού Οξέος

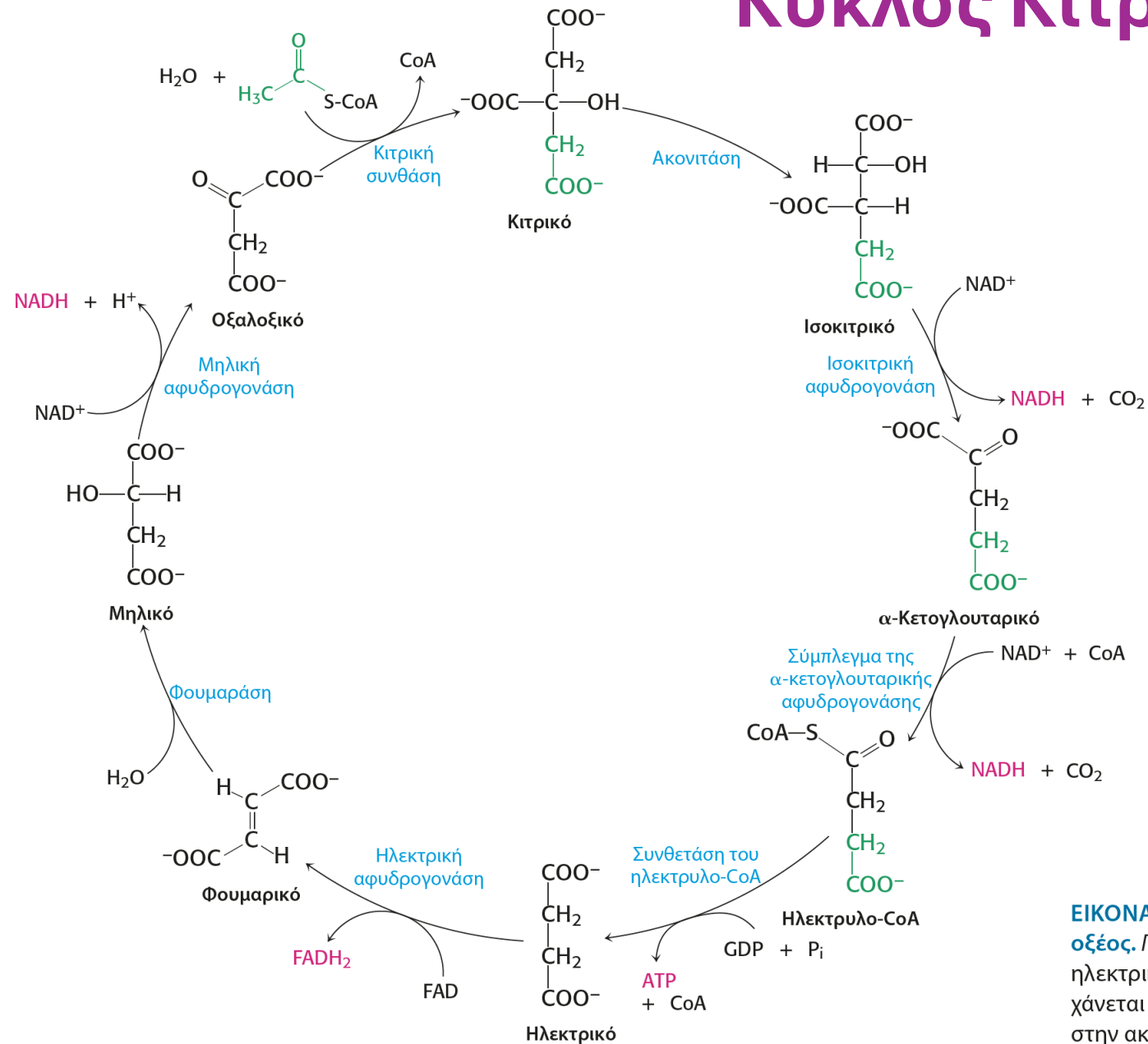


Κύκλος Κιτρικού Οξέος



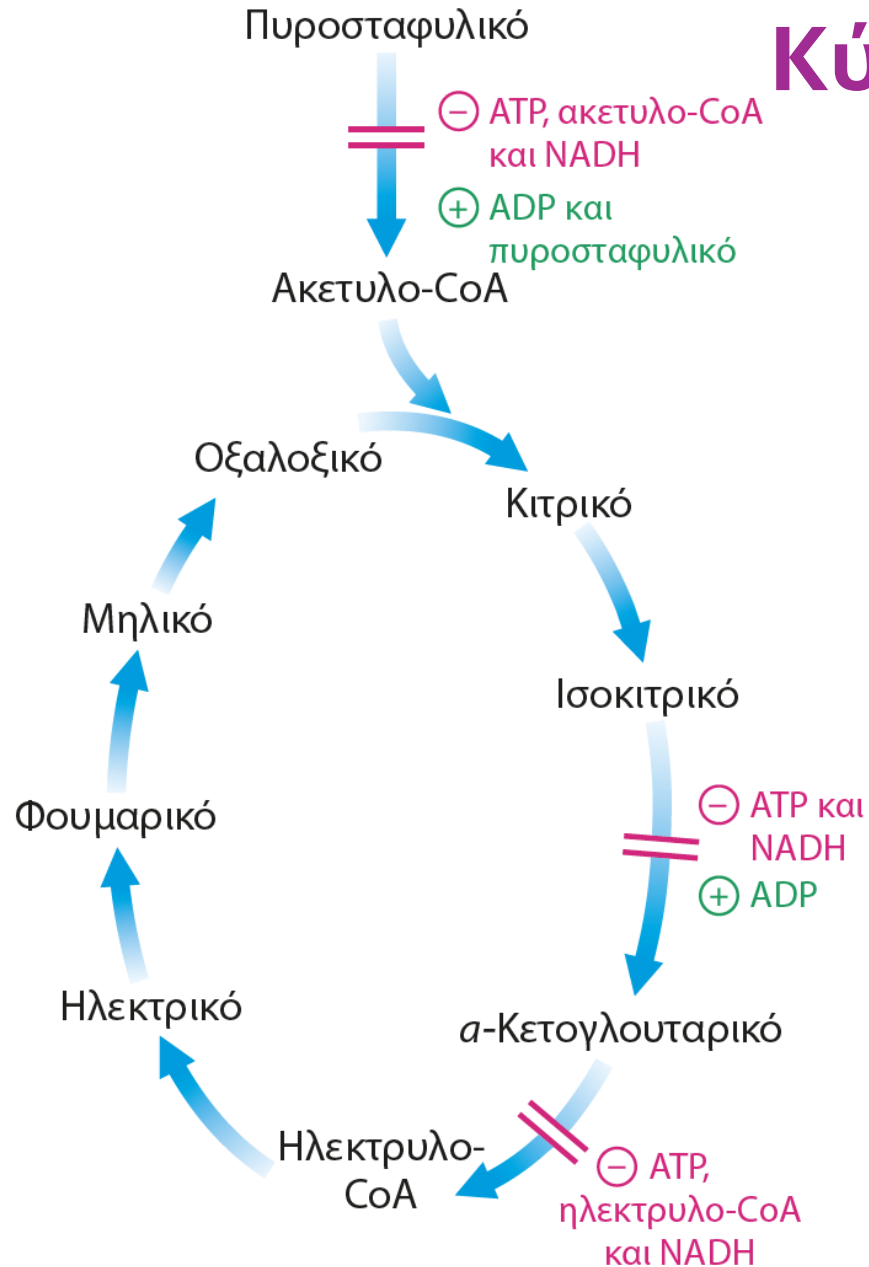
ΕΙΚΟΝΑ 17.4 Ο σύνδεσμος μεταξύ της γλυκόλυσης και του κύκλου του κιτρικού οξέος. Το πυροσταφυλικό που παράγεται από τη γλυκόλυση μετατρέπεται σε ακετυλο-CoA, το καύσιμο του κύκλου του κιτρικού οξέος.

Κύκλος Κιτρικού Οξέος



ΕΙΚΟΝΑ 17.13 Ο κύκλος του κιτρικού οξέος. Παρατηρήστε ότι, επειδή το ηλεκτρικό είναι συμμετρικό μόριο, χάνεται η «ταυτότητα» των ανθράκων στην ακετυλομονάδα.

Κύκλος Κιτρικού Οξέος



ΕΙΚΟΝΑ 17.17 Έλεγχος του κύκλου του κιτρικού οξέος. Ο κύκλος του κιτρικού οξέος ρυθμίζεται κυρίως από τη συγκέντρωση της ATP και του NADH. Τα βασικά σημεία ελέγχου είναι τα ένζυμα ισοκιτρική αφυδρογονάση και α-κετογλουταρική αφυδρογονάση.

Κύκλος Κιτρικού Οξέος



ΕΙΚΟΝΑ 17.18 Βιοσυνθετικοί ρόλοι του κύκλου του κιτρικού οξέος. Οι ενδιάμεσες ενώσεις αποσύρονται για βιοσυνθέσεις (υποδεικνύονται με κόκκινα βέλη) όταν ικανοποιούνται οι ενεργειακές ανάγκες του κυττάρου. Οι ενδιάμεσες ενώσεις αναπληρώνονται με τον σχηματισμό του οξαλοξικού από το πυροσταφυλικό.

Οξειδωτική Φωσφορυλίωση

Οι αντιδράσεις της οξειδωτικής φωσφορυλίωσης γίνονται στις αναδιπλώσεις της **εσωτερικής μεμβράνης του μιτοχονδρίου** και για τη διεξαγωγή τους χρησιμοποιείται οξυγόνο.

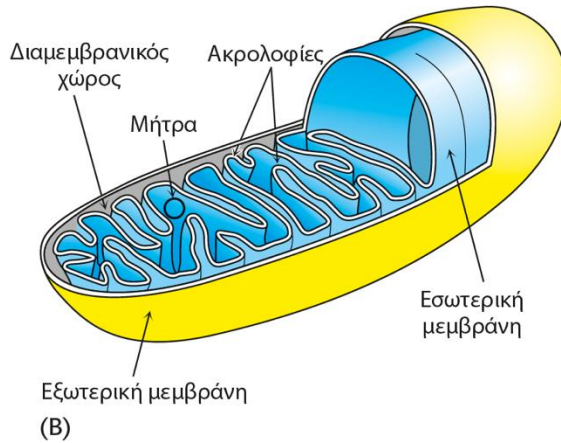
Κατά την πραγματοποίηση αυτών των αντιδράσεων γίνεται απελευθέρωση ενέργειας, μέρος της οποίας χρησιμοποιείται για την παραγωγή 32 μορίων ATP από ADP + P_i.

Στα τελικά προϊόντα αυτής της διαδικασίας περιλαμβάνεται και H₂O.

Τελικά, από την πλήρη οξείδωση ενός μορίου γλυκόζης σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό παράγονται συνολικά 36 μόρια ATP.

Η γενική εξίσωση της κυτταρικής αναπνοής είναι:

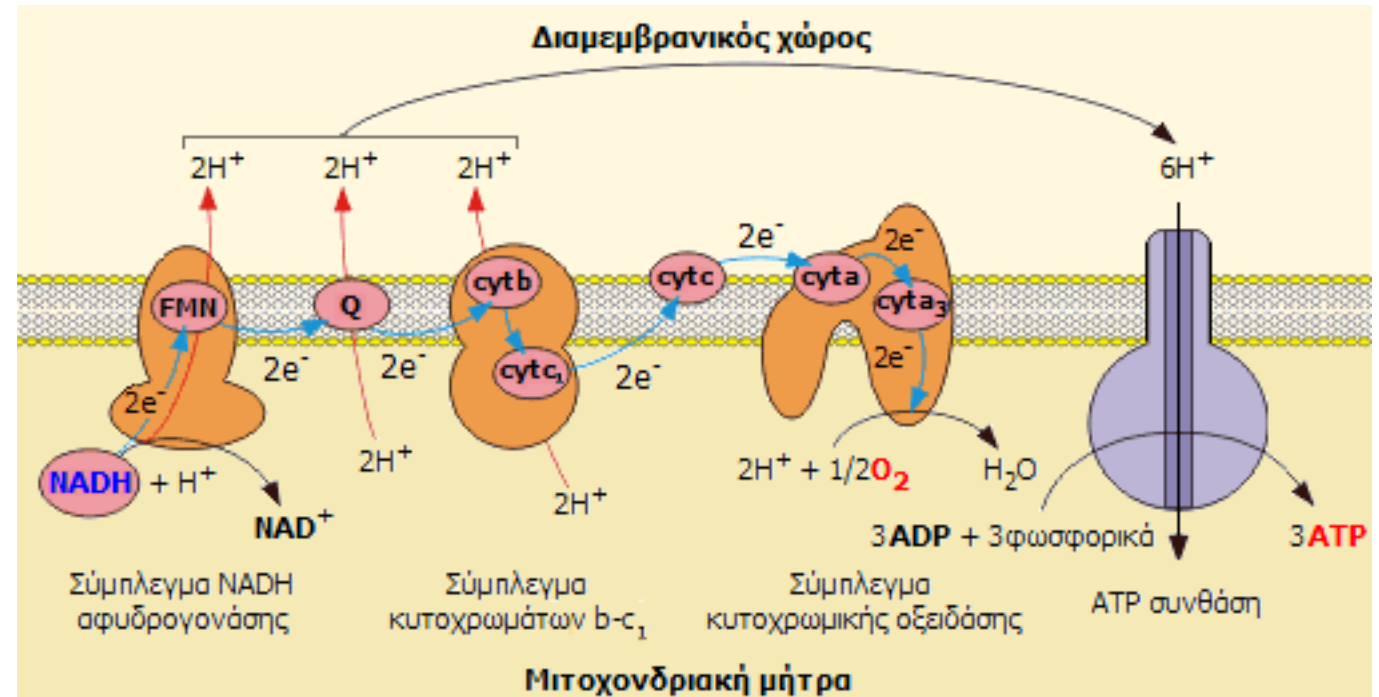




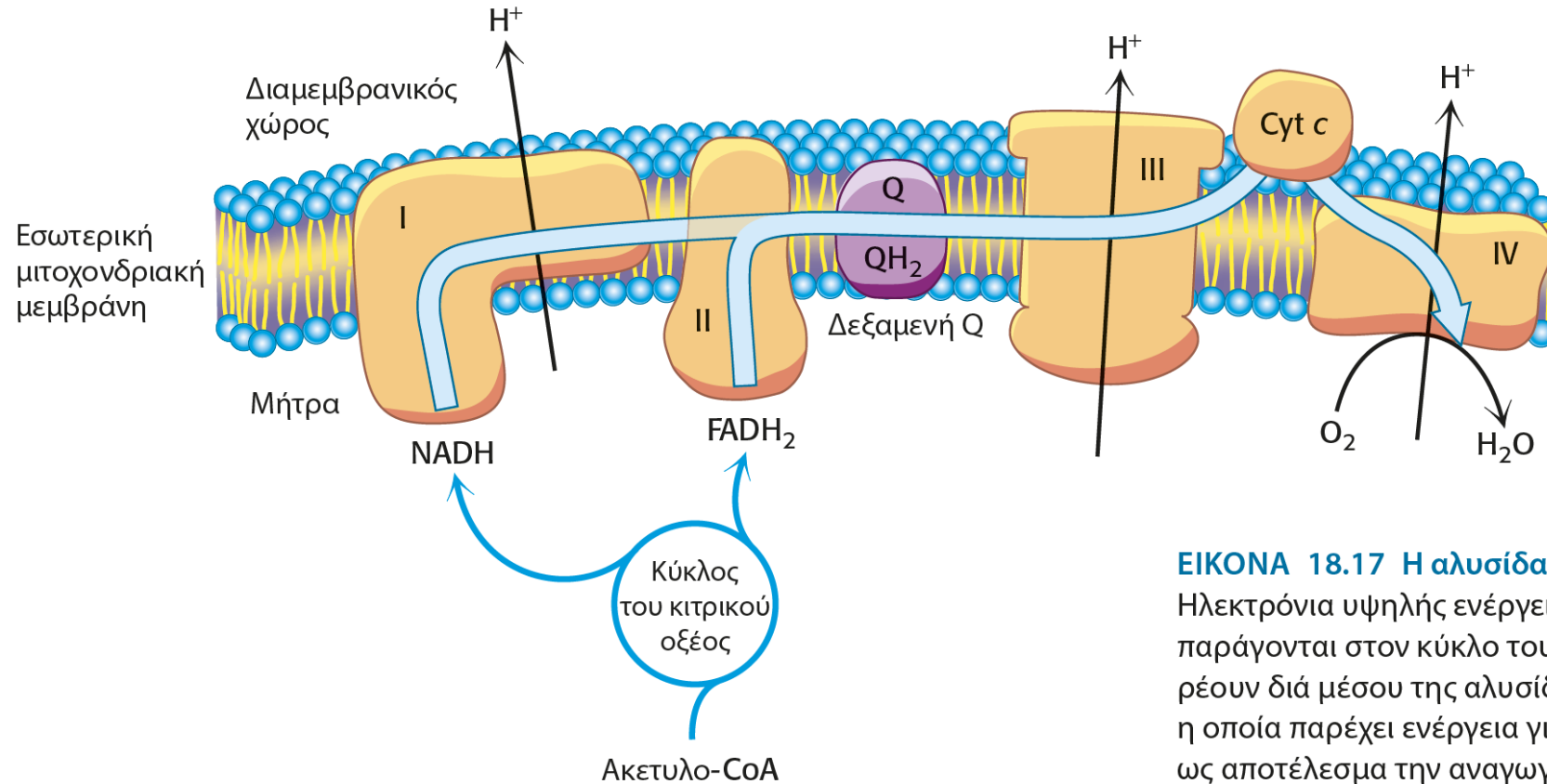
Οξειδωτική Φωσφορυλίωση

Η οξειδωτική αλυσίδα μεταφοράς ηλεκτρονίων (οξειδωτική φωσφορυλίωση ή αναπνευστική αλυσίδα)

- οξειδώνει το NADH (NADH σε NAD⁺)
- ανάγει το οξυγόνο (O₂ σε H₂O)

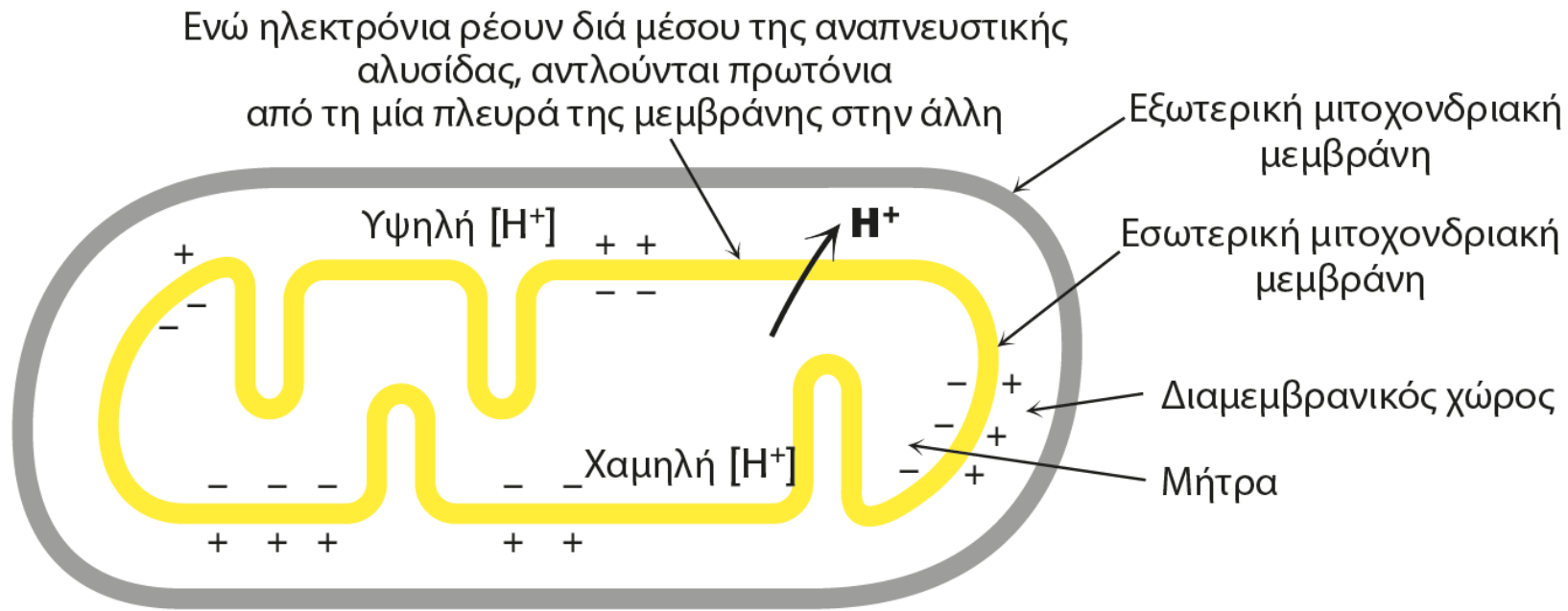


Οξειδωτική Φωσφορυλίωση



ΕΙΚΟΝΑ 18.17 Η αλυσίδα μεταφοράς ηλεκτρονίων.

Ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας στη μορφή των NADH και FADH₂ παράγονται στον κύκλο του κιτρικού οξέος. Αυτά τα ηλεκτρόνια ρέουν διά μέσου της αλυσίδας μεταφοράς ηλεκτρονίων, η οποία παρέχει ενέργεια για την άντληση πρωτονίων και έχει ως αποτέλεσμα την αναγωγή του O₂.

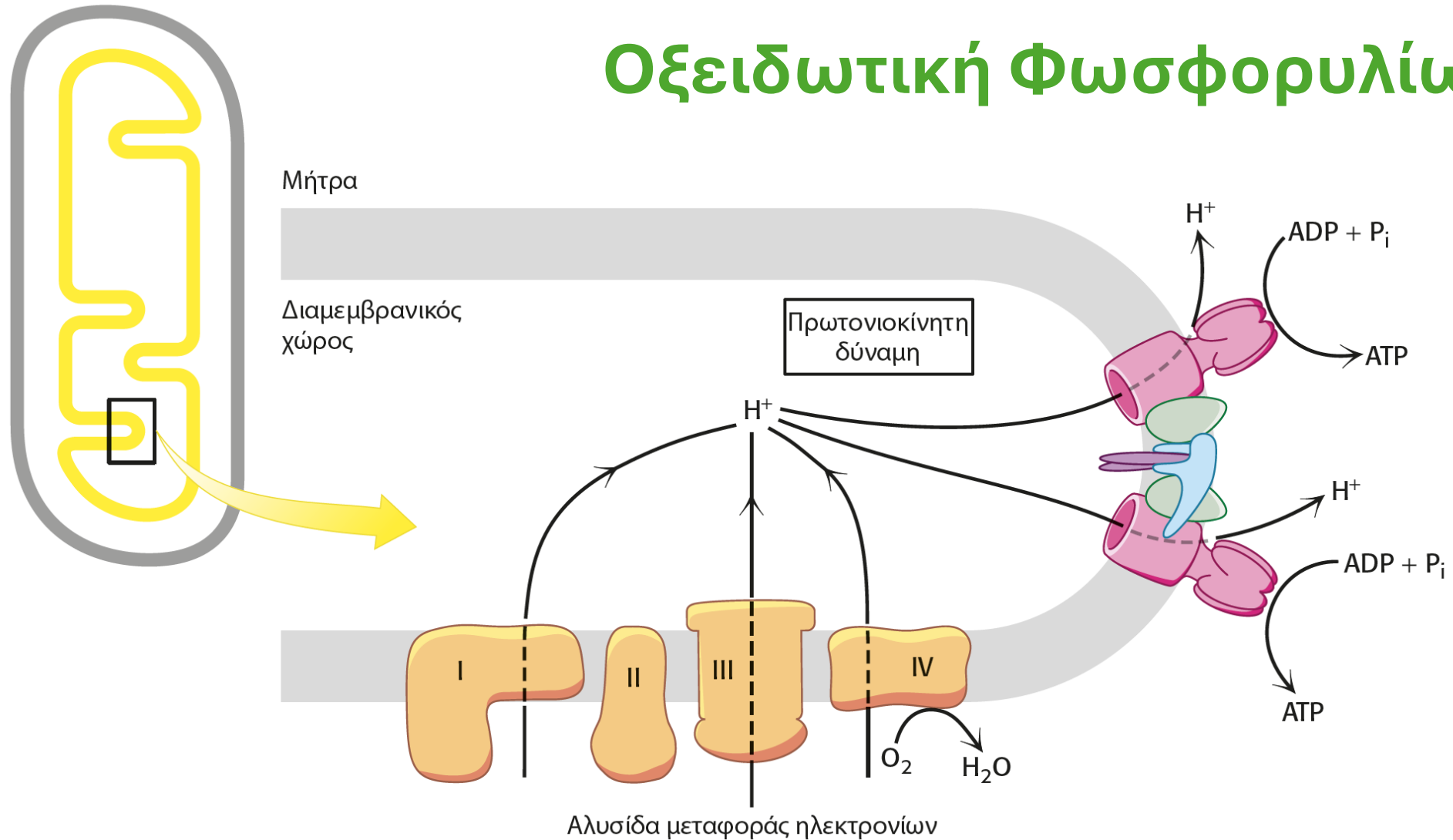


ΕΙΚΟΝΑ 18.23 Η χημειωσμωτική

υπόθεση. Η μεταφορά ηλεκτρονίων μέσω της αναπνευστικής αλυσίδας οδηγεί στην άντληση πρωτονίων από τη μήτρα προς τον διαμεμβρανικό χώρο των μιτοχονδρίων. Ο συνδυασμός βαθμίδωσης pH και ηλεκτρικού δυναμικού της εσωτερικής μεμβράνης αποτελούν μια πρωτονιοκίνητη δύναμη η οποία χρησιμοποιείται για να ωθήσει τη σύνθεση της ATP.

Οξειδωτική Φωσφορυλίωση

Οξειδωτική Φωσφορυλίωση



ΕΙΚΟΝΑ 18.36 Εποπτική εικόνα της οξειδωτικής φωσφορυλίωσης. Η αλυσίδα μεταφοράς ηλεκτρονίων παράγει μια βαθμίδωση συγκέντρωσης πρωτονίων, η οποία χρησιμοποιείται για τη σύνθεση ATP.

Οξειδωτική Φωσφορυλίωση

ΕΙΚΟΝΑ 18.43 Ολοκλήρωση της κυτταρικής αναπνοής. Ο κύκλος του κιτρικού οξέος (CAC) παράγει ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας οξειδώνοντας το ακετυλο-CoA. Τα ηλεκτρόνια χρησιμοποιούνται για την αναγωγή του οξυγόνου προς νερό και κατά τη διεργασία δημιουργείται μια βαθμίδωση συγκέντρωσης πρωτονίων. Η βαθμίδωση συγκέντρωσης πρωτονίων τροφοδοτεί με ενέργεια τη σύνθεση της ATP, η οποία απαιτεί τον συντονισμό της συνθάσης της ATP, της μετατοπής ATP-ADP και του φορέα φωσφορικών.

