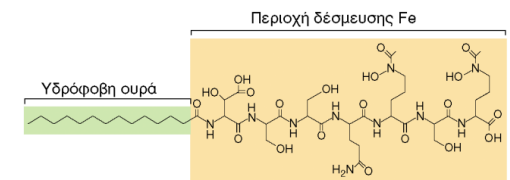
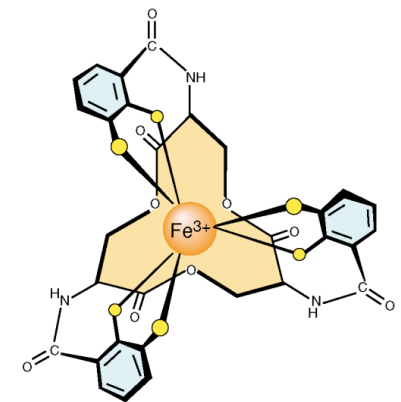
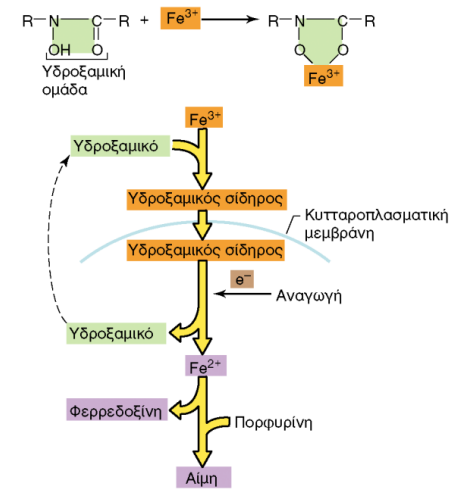


# **ΜΙΚΡΟΒΙΟΛΟΓΙΑ**

**Γιώργος Τσιάμης**

**Επίκουρος Καθηγητής**

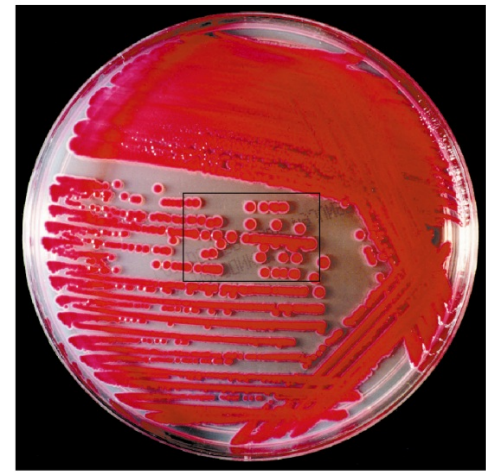
**Περιβαλλοντικής Μικροβιολογίας**



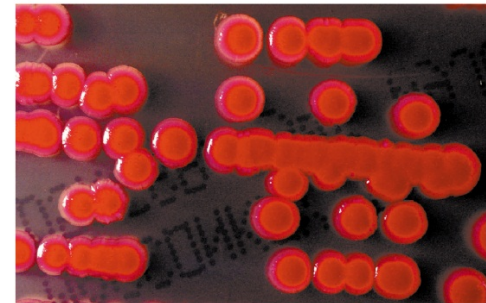
**Εικόνα 5.1** Χηλικές ενώσεις του σιδήρου που παράγονται από τους μικροοργανισμούς. (α) Υδροξαμικό οξύ. Ο σίδηρος προσδέεται υπό τη μορφή  $\text{Fe}^{3+}$  και απελευθερώνεται μέσα στο κύτταρο υπό τη μορφή  $\text{Fe}^{2+}$ . Κατόπιν, το υδροξαμικό οξύ βγαίνει από το κύτταρο και επαναλαμβάνει τον κύκλο. (β) Εντεροβακτήνη σιδήρου του βακτηρίου *Escherichia coli*. Τα άτομα οξυγόνου κάθε μορίου κατεχόλης υποδηλώνονται με κίτρινο χρώμα. (γ) Ο πεπτιδικός σιδηροφορέας υδατοχηλίνη.

### Εικόνα 5.2

Παραδείγματα βακτηριακών αποικιών. Οι αποικίες είναι ορατές μάζες κυττάρων που σχηματίζονται από διαδοχικές διαιρέσεις ενός ή λίγων κυττάρων. Το μέγεθος, το σχήμα, η υφή, και το χρώμα μιας βακτηριακής αποικίας καθορίζονται από τον οργανισμό που τις σχηματίζει. Ανάλογα με το μέγεθος και την οργάνωση των κυττάρων στην αποικία, ο αριθμός κυττάρων από τα οποία αυτή αποτελείται μπορεί να ποικίλλει σημαντικά. Δεν είναι ασυνήθιστες αποικίες με πάνω από ένα δισεκατομμύριο μεμονωμένα κύτταρα. (α) *Serratia marcescens*, ανάπτυξη σε άγαρ MacConkey. (β) Απεικόνιση σε μεγαλύτερη μεγέθυνση των αποικιών που περιέχονται στο τετράγωνο της εικόνας (α). (γ) *Pseudomonas aeruginosa*, που αναπτύσσεται σε άγαρ τρυπτικής και σόγιας. (δ) *Shigella flexneri*, ανάπτυξη σε άγαρ MacConkey.



(α)



(β)

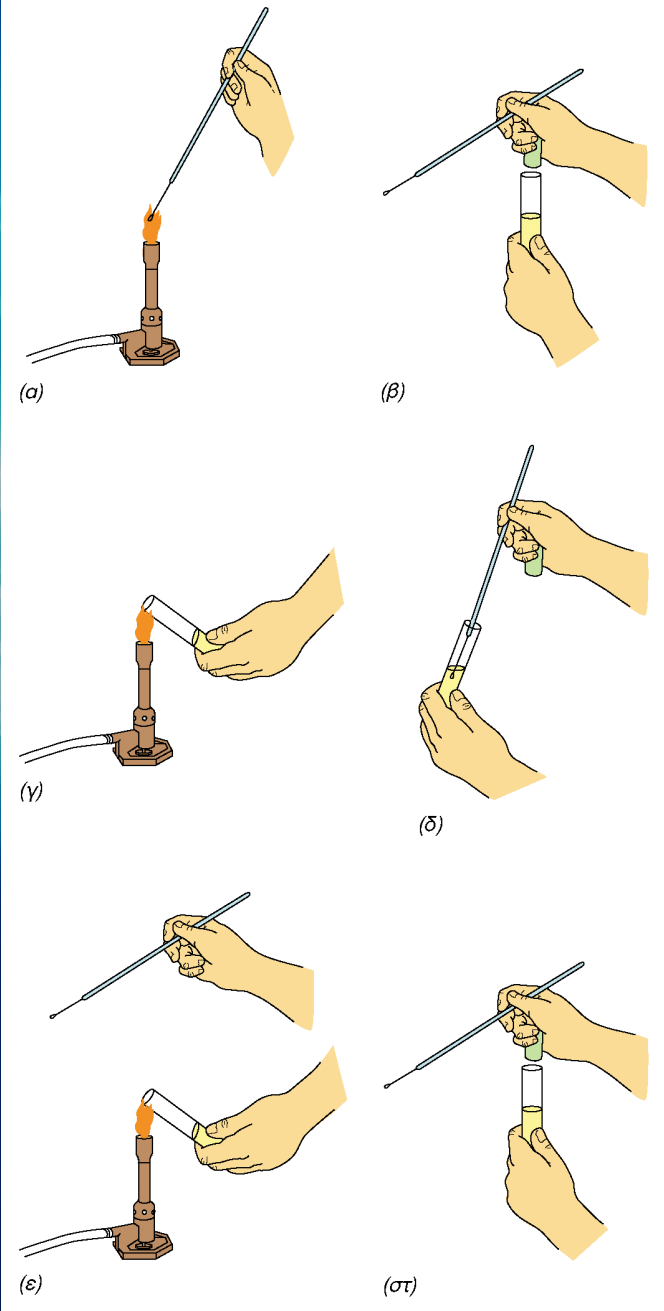


(γ)



(δ)

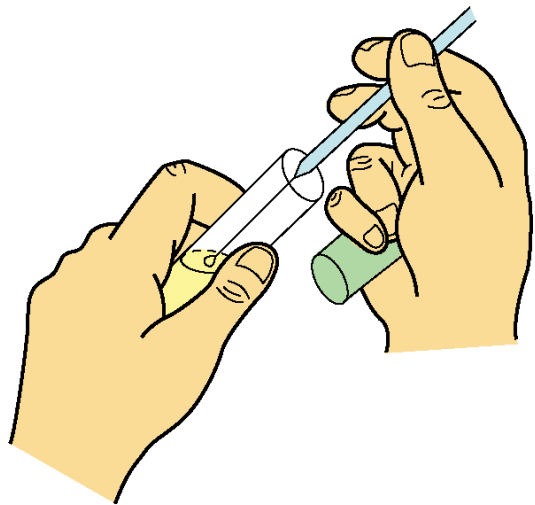




**Εικόνα 5.3**

Ασπτική μεταφορά. (α) Ο βρόχος ενοφθαλμισμού θερμαίνεται μέχρι να ερυθροπυρωθεί και ψύχεται για λίγο στον αέρα. (β) Αφαιρούμε το πώμα του δοκιμαστικού σωλήνα. (γ) Περνάμε το άκρο του σωλήνα μέσα από τη φλόγα. (δ) Το δείγμα μεταφέρεται στον αποστειρωμένο βρόχο ενοφθαλμισμού. (ε) Μετά τη λήψη του δείγματος με τον βρόχο ενοφθαλμισμού, περνάμε πάλι τον σωλήνα μέσα από τη φλόγα και μεταφέρουμε το δείγμα σε νέο αποστειρωμένο θρεπτικό υλικό. (στ) Επανατοποθετούμε το πώμα στον σωλήνα. Ο βρόχος ενοφθαλμισμού πυρακτώνεται πάλι πριν την περάτωση της εργασίας.



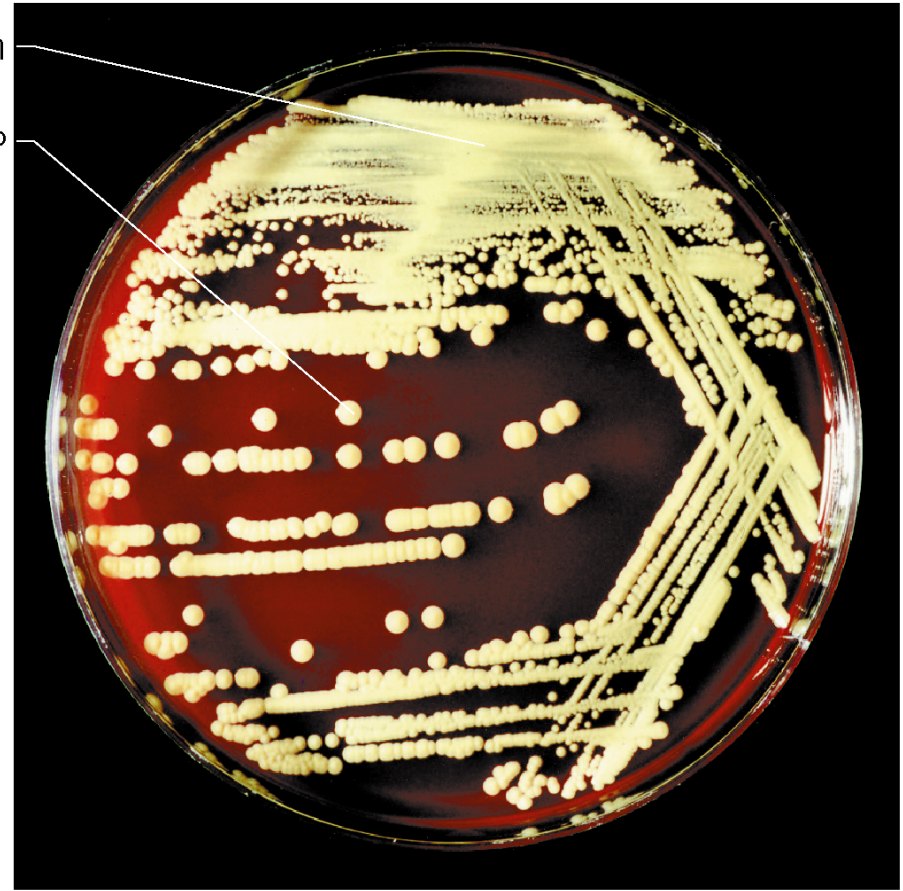


(α)

Πυκνή ανάπτυξη στην αρχή της επίστρωσης  
Μεμονωμένες αποικίες στο τέλος της επίστρωσης



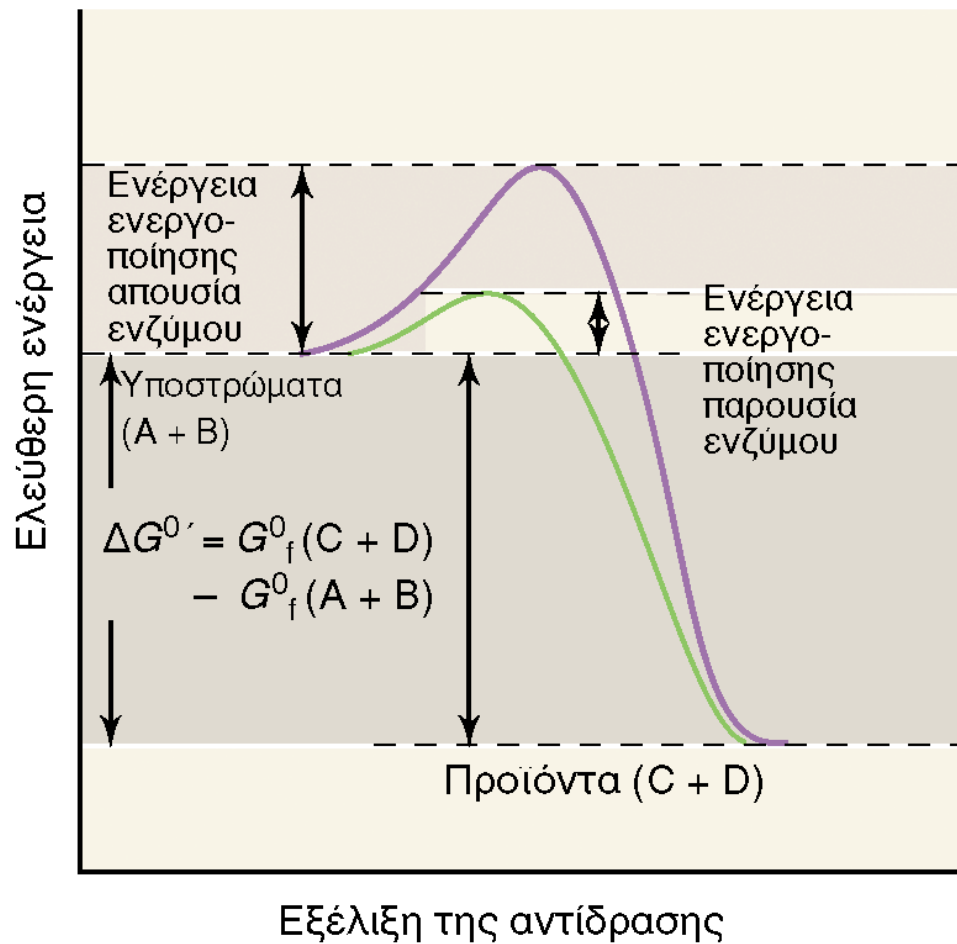
(β)



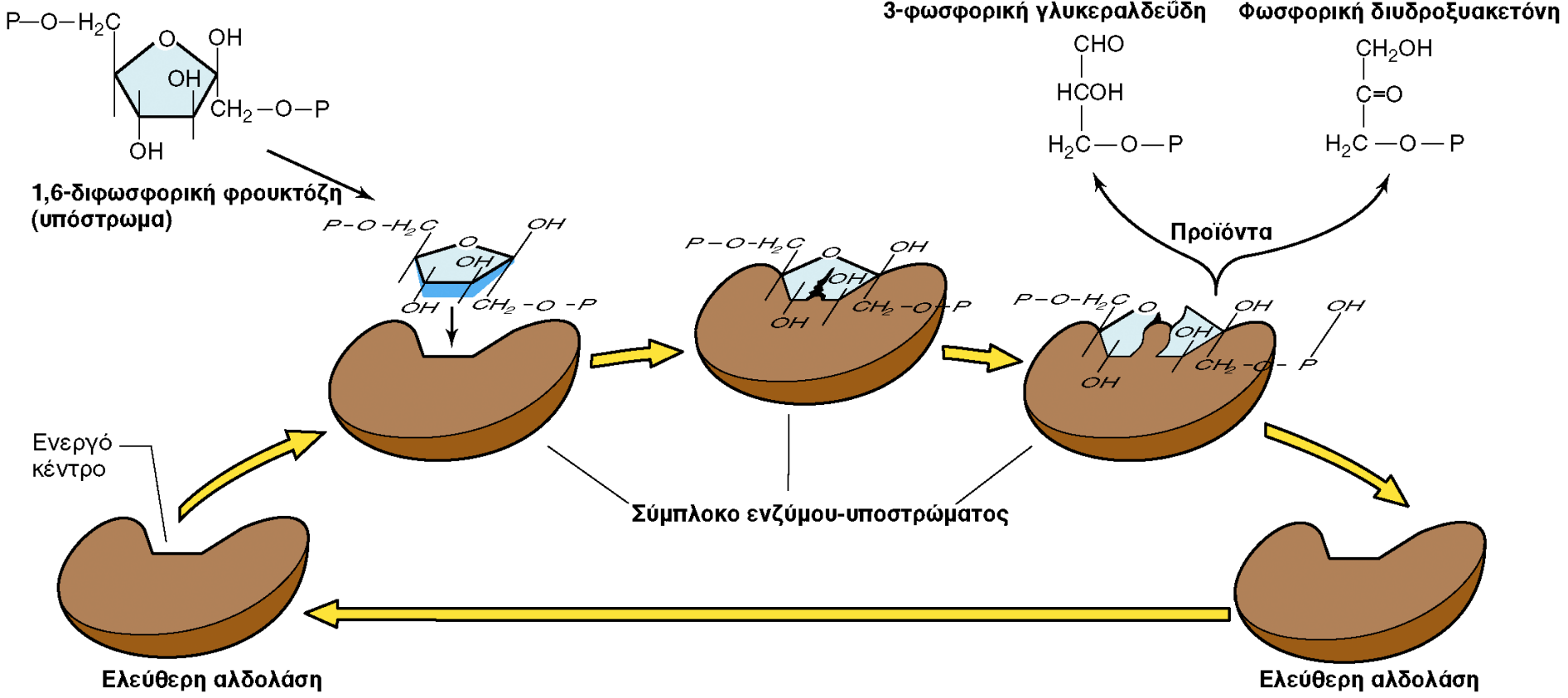
(γ)

James A. Shapiro, University of Chicago

**Εικόνα 5.4** Μέθοδος επίστρωσης μικροοργανισμών σε στερεά θρεπτικά μέσα για τη δημιουργία αμιγών καλλιιεργειών. (α) Ο βρόχος ενοφθαλμισμού αποστειρώνεται και κατόπιν εμβαπτίζεται στο υλικό του δοκιμαστικού σωλήνα. (β) Το δείγμα επιστρώνεται σε παράλληλες γραμμές πάνω σε τρυβλία Petri με στερεοποιημένο θρεπτικό μέσο, διασπείροντας τους μικροοργανισμούς ως εξής: Ακολουθώντας την αρχική επίστρωση σχηματίζουμε νέες παράλληλες γραμμές υπό γωνία, αποστειρώνοντας κάθε φορά τον βρόχο ενοφθαλμισμού. (γ) Η καλλιέργεια του μικροοργανισμού μετά από επώαση. Οι αποικίες του βακτηρίου *Micrococcus luteus* σε τρυβλία που περιέχουν άγαρ αίματος είναι τόσο ευδιάκριτες και καλά απομονωμένες, ώστε είναι δυνατή η δημιουργία αμιγών καλλιιεργειών.

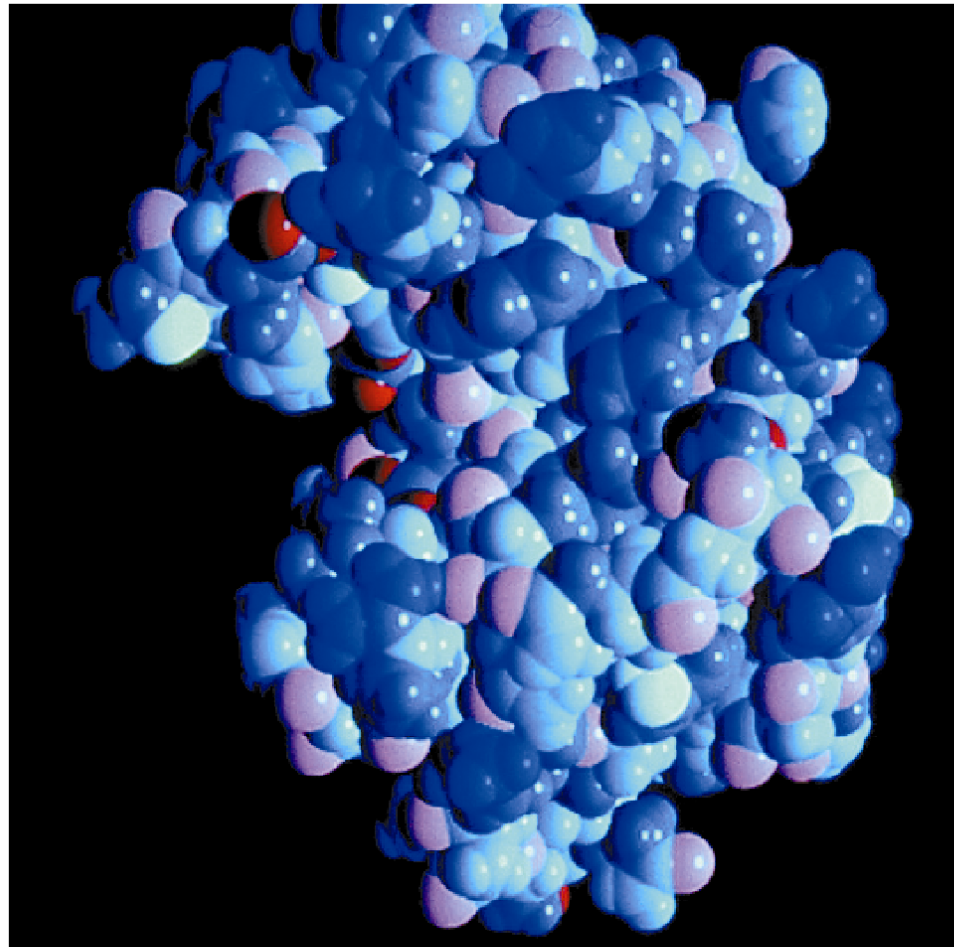


**Εικόνα 5.5** Εξέλιξη μιας υποθετικής εξώεργης αντίδρασης:  $A + B \rightarrow C + D$  και η έννοια της ενέργειας ενεργοποίησης. Οι χημικές αντιδράσεις μπορεί να μην εκτελούνται αυθόρμητα, έστω και αν απελευθερώνεται ενέργεια, διότι οι αντιδρώσες ουσίες πρέπει πρώτα να ενεργοποιηθούν. Μόλις λάβει χώρα η ενεργοποίηση, τότε η αντίδραση εκτελείται αυθόρμητα. Οι καταλύτες, όπως είναι τα ένζυμα, μειώνουν την απαιτούμενη ενέργεια ενεργοποίησης.



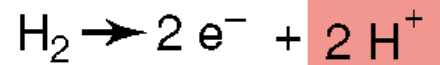
**Εικόνα 5.6** Ο καταλυτικός κύκλος ενός ενζύμου, όπως απεικονίζεται για το ένζυμο διφωσφορική αλδολάση της φρουκτόζης. Αυτό το ένζυμο καταλύει την αντίδραση της γλυκόλυσης: 1,6-διφωσφορική φρουκτόζη → 3-φωσφορική γλυκεραλδεΐδη + φωσφορική διϋδροξυακετόνη (βλ. Εικόνα 5.14). Ακολουθεί η πρόσδεση της 1,6-διφωσφορικής φρουκτόζης στον σχηματισμό του συμπλόκου ενζύμου-υποστρώματος, οπότε μεταβάλλεται η στερεοδιάταξη του ενζύμου και ασκείται πίεση σε συγκεκριμένους δεσμούς του υποστρώματος, οι οποίοι διασπώνται και παράγουν τα δύο προϊόντα.



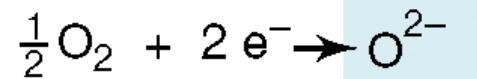


Richard Feldmann

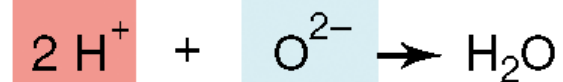
**Εικόνα 5.7** Ένα χωροδιατακτικό μοντέλο του ενζύμου λυσοζύμη, που δημιουργήθηκε με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Η θέση πρόσδεσης (ενεργό κέντρο) του υποστρώματος (πεπτιδογλυκάνη) βρίσκεται στη μεγάλη εσοχή της αριστερής πλευράς του μοντέλου (🌀 Τμήμα 4.8).



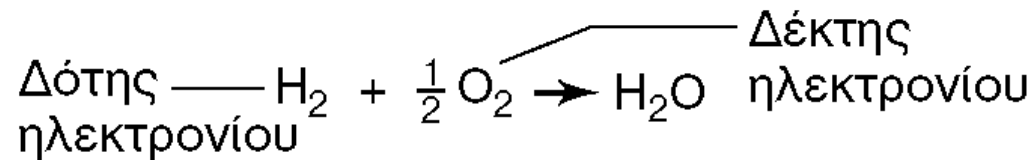
**Ημιαντίδραση δότη ηλεκτρονίου**



**Ημιαντίδραση δέκτη ηλεκτρονίου**



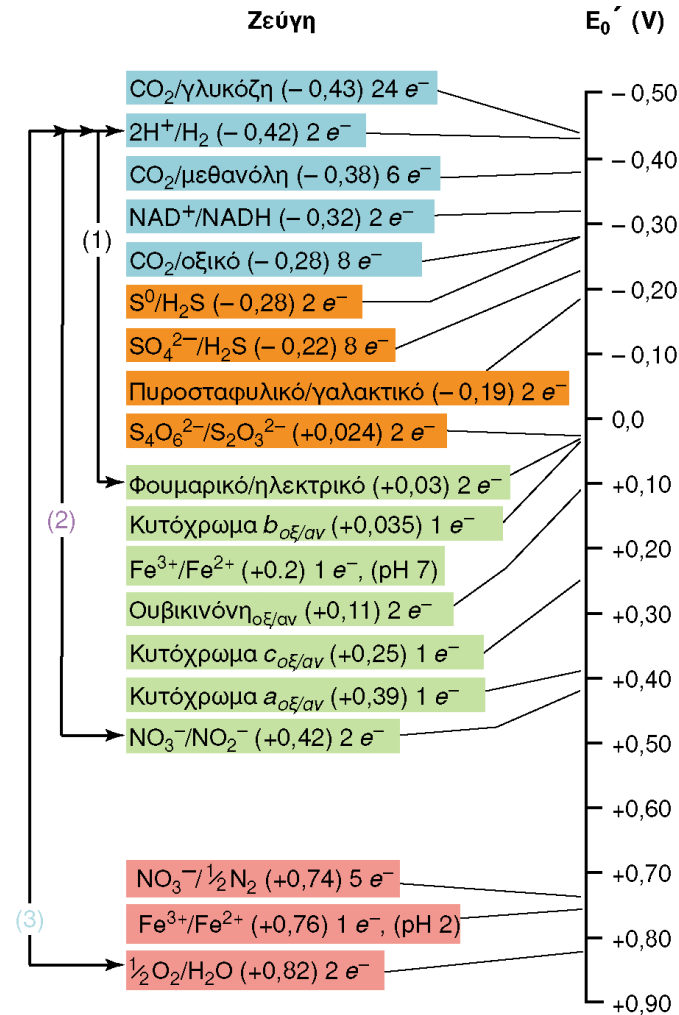
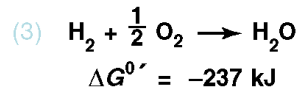
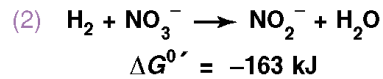
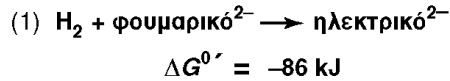
**Σχηματισμός νερού**



**Συνολική αντίδραση**

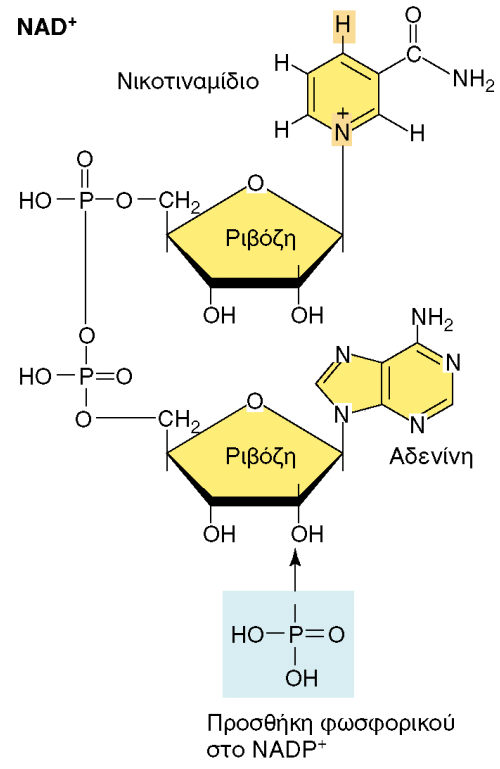
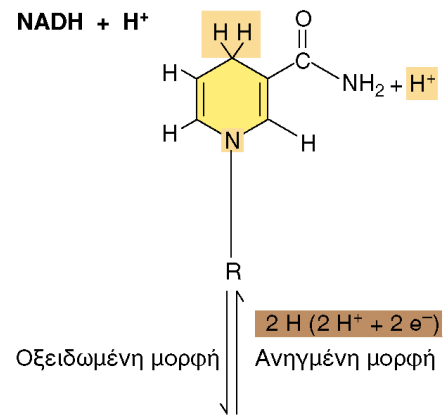
**Εικόνα 5.8** Παράδειγμα οξειδοαναγωγικής αντίδρασης: Σχηματισμός  $\text{H}_2\text{O}$  από τον δότη ηλεκτρονίων  $\text{H}_2$  και τον δέκτη ηλεκτρονίων  $\text{O}_2$ .

Παραδείγματα αντιδράσεων  
με δότη ηλεκτρονίων το H<sub>2</sub>

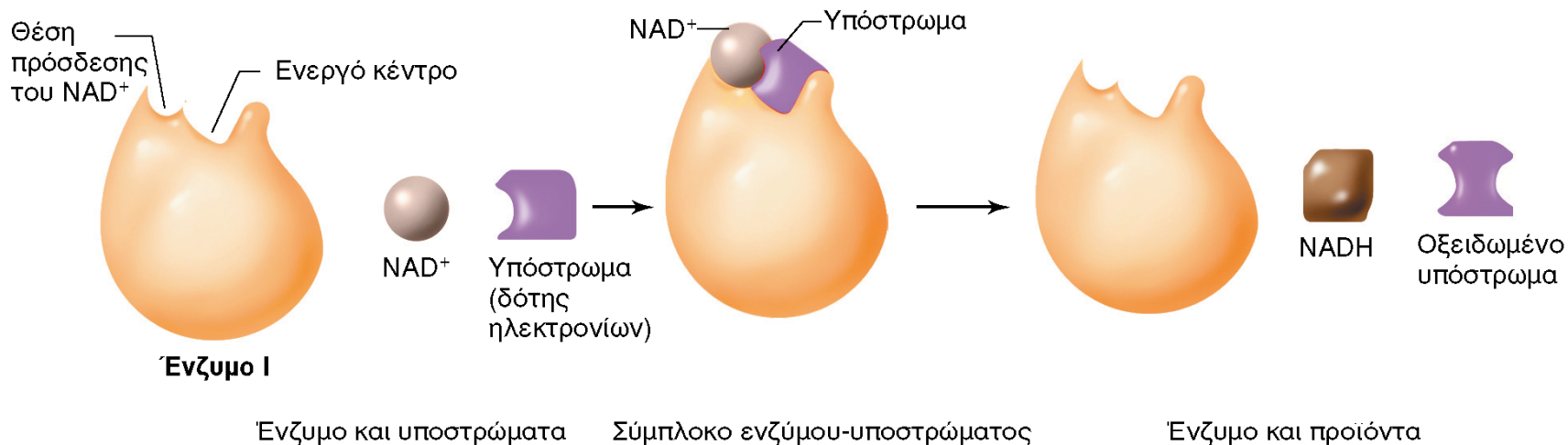


**Εικόνα 5.9** Ο πύργος των ηλεκτρονίων. Τα οξειδοαναγωγικά ζεύγη διευθετούνται κατά τρόπο ώστε οι ισχυρότερες αναγωγικές ουσίες (αρνητικό δυναμικό αναγωγής) να βρίσκονται στην κορυφή και οι ισχυρότερες οξειδωτικές (θετικό δυναμικό οξείδωσης) να βρίσκονται στη βάση. Τα ηλεκτρόνια που αποδεσμεύονται από την κορυφή του πύργου, μπορούν να ενσωματώνονται από τους δέκτες σε διάφορα επίπεδα. Όσο πιο «χαμηλά» δεσμεύονται τα ηλεκτρόνια, τόσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά του δυναμικού αναγωγής μεταξύ δότη και δέκτη ηλεκτρονίων και τόσο περισσότερη ενέργεια απελευθερώνεται. Παραδείγματος χάριν, στην αριστερή πλευρά της εικόνας φαίνεται η διαφορά της ενέργειας που απελευθερώνεται όταν ένας μόνο δότης ηλεκτρονίων, το H<sub>2</sub>, αντιδράσει με κάποιον από τους ακόλουθους τρεις διαφορετικούς δέκτες ηλεκτρονίων: το φουμαρικό, το νιτρικό, και το οξυγόνο.

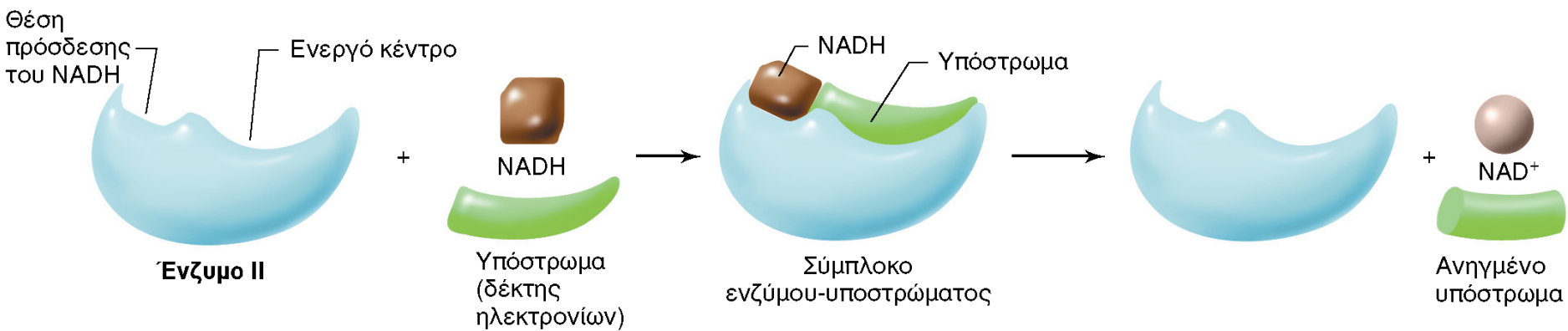




**Εικόνα 5.10** Δομή του οξειδοαναγωγικού συνενζύμου νικοτιναμιδο-αδενινο-δινουκλεοτίδιο (NAD<sup>+</sup>). Στο NADP<sup>+</sup>, όπως φαίνεται, υπάρχει μια φωσφορική ομάδα. Τόσο το NAD<sup>+</sup> όσο και το NADP<sup>+</sup> υφίστανται οξειδοαναγωγή, διαχέονται ελεύθερα, και είναι φορείς ατόμων υδρογόνου.

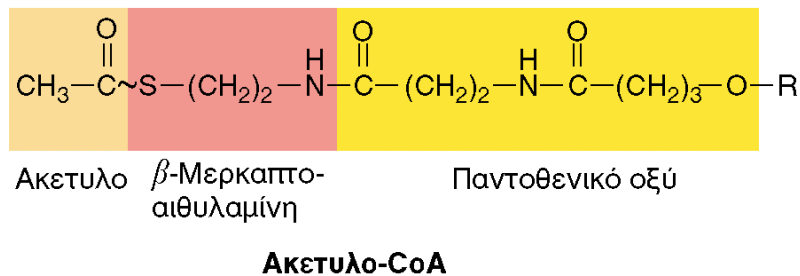
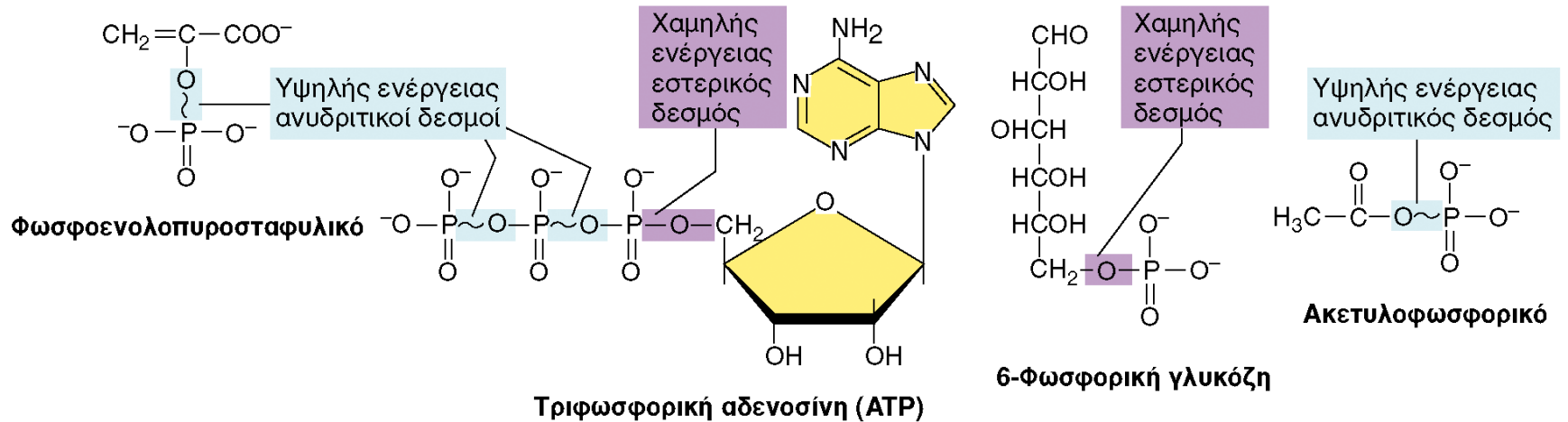


**Αντίδραση 1.** Το ένζυμο I αντιδρά με το υπόστρωμα (δότη ηλεκτρονίων) και την οξειδωμένη μορφή του συνενζύμου, NAD<sup>+</sup>



**Αντίδραση 2.** Το ένζυμο II αντιδρά με το υπόστρωμα (δέκτη ηλεκτρονίων) και την ανηγμένη μορφή του συνενζύμου, NADH.

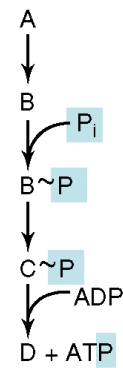
**Εικόνα 5.11** Σχηματικό παράδειγμα μιας οξειδοαναγωγικής αντίδρασης στην οποία συμμετέχουν οξειδωμένες και ανηγμένες μορφές του συνενζύμου νικοτιναμιδο-αδενινο-δινουκλεοτίδιο, NAD<sup>+</sup> και NADH.



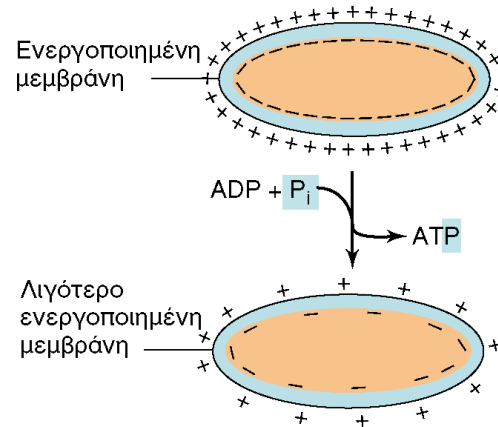
Χημική ένωση	$G^0$ kJ/mol
<b>Υψηλής ενέργειας</b>	
Φωσφοενολοπυροσταφυλικό	-51,6
1,3-Διφωσφογλυκερικό	-52,0
Ακετυλοφωσφορικό	-44,8
ATP	-31,8
ADP	-31,8
<b>Χαμηλής ενέργειας</b>	
AMP	-14,2
6-Φωσφορική γλυκόζη	-13,8

**Εικόνα 5.12** Δεσμοί υψηλής ενέργειας. Στον Πίνακα παρατίθεται η ελεύθερη ενέργεια υδρόλυσης ορισμένων φωσφορικών εστέρων και ανυδριτών, όπου φαίνεται ότι μερικοί δεσμοί φωσφορικών εστέρων είναι υψηλότερης ενέργειας από άλλους. Δίνεται η δομή τεσσάρων ενώσεων για να φανεί η θέση των δεσμών χαμηλής και υψηλής ενέργειας. Το ATP περιέχει τρεις φωσφορικές ομάδες, αλλά μόνο δύο από αυτές είναι υψηλής ενέργειας (υποδηλώνονται με μπλε χρώμα). Το ADP περιέχει δύο φωσφορικές ομάδες από τις οποίες μόνο η μία είναι υψηλής ενέργειας. Το AMP δεν περιέχει κανέναν φωσφορικό δεσμό υψηλής ενέργειας. Παρατίθεται επίσης η δομή του ακετυλο-CoA. Ο δεσμός C-S ανάμεσα στο τμήμα του ακετυλενίου και εκείνο της β-μερκαπτοαιθυλαμίνης είναι ένας θειοεστερικός δεσμός υψηλής ενέργειας (🔗 Πίνακας 3.1). Η ομάδα «R» του ακετυλο-CoA είναι μια 3'-φωσφορική ομάδα ADP.





(α) Φωσφορυλίωση σε επίπεδο υποστρώματος



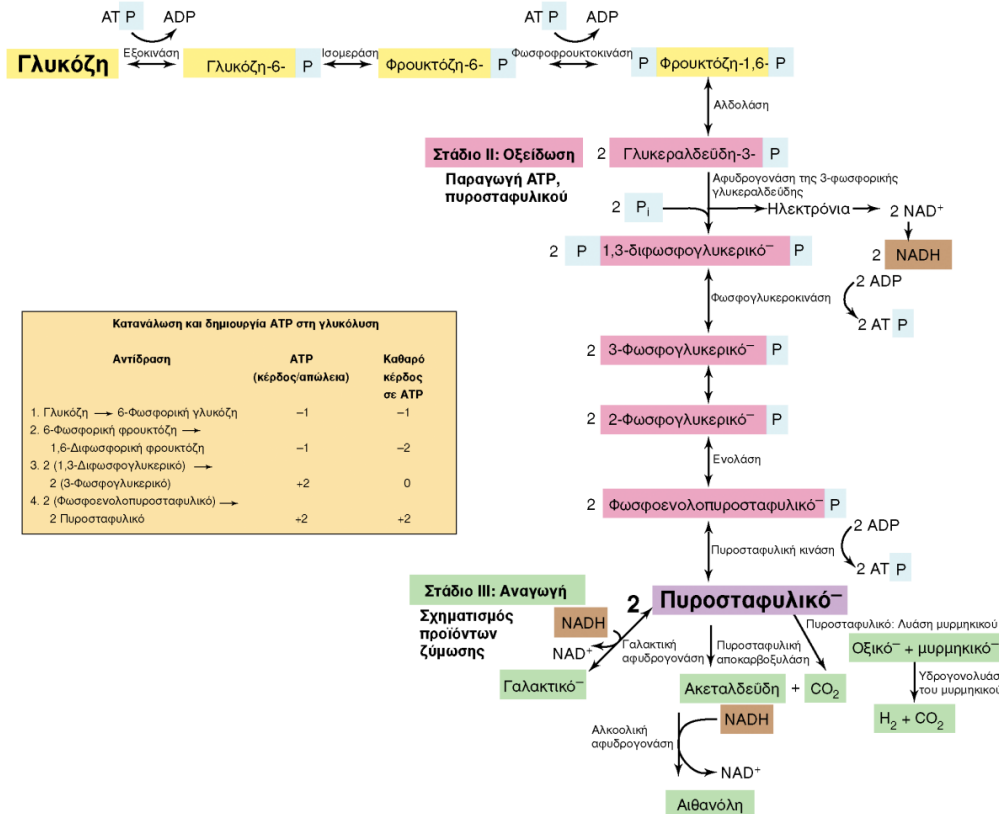
(β) Οξειδωτική φωσφορυλίωση

**Εικόνα 5.13** Διατήρηση της ενέργειας στη ζύμωση και την αναπνοή.

(α) Στη ζύμωση, η σύνθεση του ATP είναι αποτέλεσμα *φωσφορυλίωσης σε επίπεδο υποστρώματος*: μια φωσφορική ομάδα προστίθεται σε κάποιο ενδιάμεσο προϊόν της βιοχημικής οδού, στο πλαίσιο της οποίας μετατρέπεται σε φωσφορική ομάδα «υψηλής ενέργειας» και τελικά μεταφέρεται στο ADP για τον σχηματισμό ATP. (β) Στην αναπνοή, η κυτταροπλασματική μεμβράνη, που ενεργοποιείται από την πρωτονιεργετική δύναμη, δαπανά μέρος της ενέργειας αυτής για τον σχηματισμό του ATP από ADP και ανόργανο φωσφόρο (P<sub>i</sub>) στο πλαίσιο μιας διαδικασίας που λέγεται *οξειδωτική φωσφορυλίωση*. Η σύζευξη πρωτονιεργετικής δύναμης και σύνθεσης του ATP καταλύεται από ένα σύμπλοκο ενζύμου-μεμβράνης που ονομάζεται συνθάση του ATP (ATPάση) (βλ. Τμήμα 5.12 και Εικόνα 5.21).

**Στάδιο I: Προκαταρκτικές αντιδράσεις**

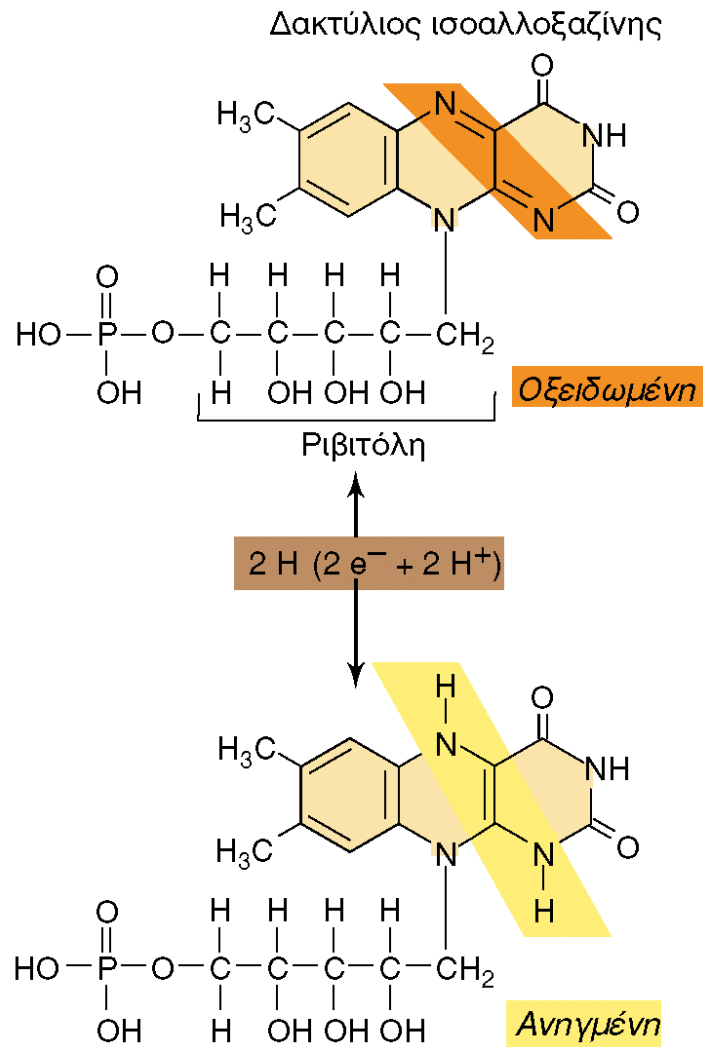
Παραγωγή 3-φωσφορικής γλυκεραλδεύδης



Αντίδραση	ATP (κέρδος/απώλεια)	Καθαρό κέρδος σε ATP
1. Γλυκόζη → 6-Φωσφορική γλυκόζη	-1	-1
2. 6-Φωσφορική φρουκτόζη → 1,6-Διφωσφορική φρουκτόζη	-1	-2
3. 2 (1,3-Διφωσφογλυκερικό) → 2 (3-Φωσφογλυκερικό)	+2	0
4. 2 (Φωσφονολοπιροσταφυλικό) → 2 Πυροσταφυλικό	-2	+2

Ενεργειακή σύνοψη της διαδικασίας της γλυκόλυσης		
Παραδείγματα συνολικής στοιχειομετρίας:	Οργανισμοί:	Απόδοση ελεύθερης ενέργειας:
(1) Γλυκόζη → 2 αιθανόλη + 2 CO <sub>2</sub>	Ζυμομύκητες	1. Αιθανόλη/CO <sub>2</sub> : -238,8 kJ/mol στη ζύμωση της γλυκόλυσης. Η ενεργειακή τιμή φωσφορικού δεσμού υψηλής ενέργειας στο ATP θεωρείται ίση με -31,8 kJ/mol -63,6 kJ διατηρούνται στο ATP, με συντελεστή απόδοσης 27%.
(2) Γλυκόζη → 2 γαλακτικό + 2 H <sup>+</sup>	Βακτήρια γαλακτικού οξέος	
(3) Γλυκόζη → 1 γαλακτικό + 1 οξικό + 1 μυρμηκικό + 3 H <sup>+</sup>	Εντεροβακτήρια	2. Γαλακτικό: -196 kJ, με συντελεστή απόδοσης 32%.
(4) Γλυκόζη → 1 γαλακτικό + 1 οξικό + H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> + 2 H <sup>+</sup>	Εντεροβακτήρια	

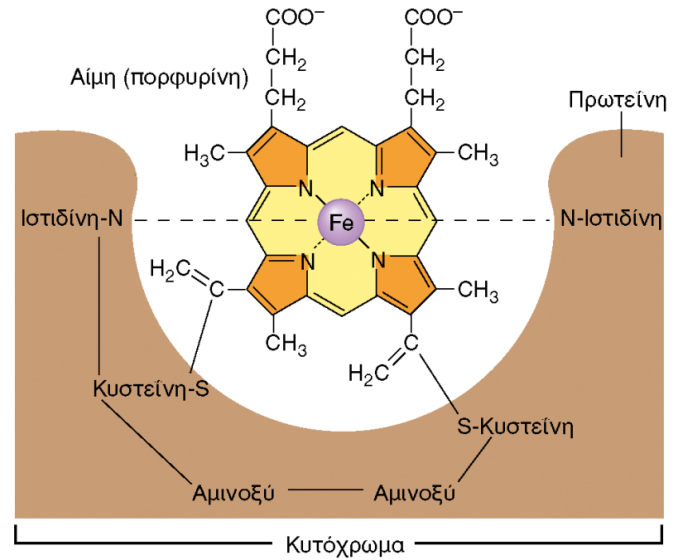
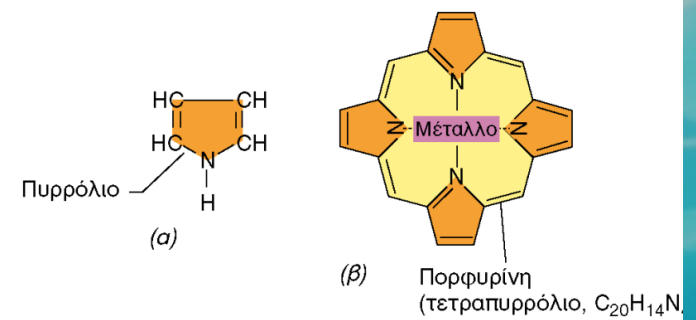
**Εικόνα 5.14** Η οδός Embden-Meyerhof (γλυκόλυση), δηλ. η αλληλουχία ενζυμικών αντιδράσεων κατά τη μετατροπή της γλυκόζης σε πυροσταφυλικό και κατόπιν σε προϊόντα ζύμωσης (τα ένζυμα υποδηλώνονται με μικρότερα στοιχεία). Το προϊόν της αλδολάσης είναι στην πραγματικότητα η 3-φωσφορική γλυκεραλδεύδη και η φωσφορική διυδροξυακετόνη, αλλά η τελευταία μετατρέπεται σε 3-φωσφορική γλυκεραλδεύδη. Σημειώστε ότι το πυροσταφυλικό είναι ο κεντρικός «κόμβος» της όλης διαδικασίας της γλυκόλυσης: όλα τα προϊόντα της ζύμωσης προέρχονται από το πυροσταφυλικό οξύ· δίνονται ορισμένα σχετικά παραδείγματα.



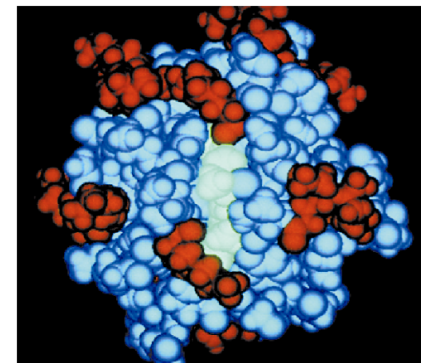
**Εικόνα 5.15** Το φλαβινομονονουκλεοτίδιο (FMN) (φωσφορική ριβοφλαβίνη, φορέας του ατόμου του υδρογόνου). Η θέση της οξειδοαναγωγής είναι η ίδια στο FMN και στο φλαβινοαδενινοδινουκλεοτίδιο (FAD).



**Εικόνα 5.16** Το κυτόχρωμα και η δομή του. (α) Δομή του πυρρολικού δακτυλίου. (β) Τέσσερις πυρρολικοί δακτύλιοι συμπικνώνονται και καταλήγουν στον σχηματισμό του δακτυλίου της πορφυρίνης. Στο σύστημα του πορφυρινικού δακτυλίου μπορούν να ενσωματωθούν διάφορα μέταλλα. Στις χρωστικές χλωροφύλλης, π.χ., το μέταλλο είναι  $Mg^{2+}$  (🔗 Τμήμα 17.2 και Εικόνα 17.3)· στη βιταμίνη  $B_{12}$  είναι  $Co^{2+}$  (🔗 Τμήμα 30.7 και Εικόνα 30.12)· και σε ορισμένα ιδιαίτερα πορφυρινικά συνένζυμα, το κεντρικό άτομο μέταλλο μπορεί να είναι  $Ni^{2+}$  (🔗 Τμήμα 17.17 και Εικόνα 17.42). (γ) Σε κάποια κυτοχρώματα, όπως στο κυτόχρωμα *c*, ο πορφυρινικός δακτύλιος είναι ομοιοπολικά συνδεδεμένος με κυστεϊνικά κατάλοιπα των μορίων της πρωτεΐνης μέσω δισουλφιδικών γεφυρών. Προσέξτε τη θέση του σιδήρου στο κέντρο του δακτυλίου. (δ) Μοντέλο του κυτοχρώματος *c* κατασκευασμένο με ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η πρωτεΐνη περιβάλλει πλήρως τον πορφυρινικό δακτύλιο στο κέντρο (γαλάζιο χρώμα). Τα κυτοχρώματα μεταφέρουν μόνο ηλεκτρόνια, όχι ολόκληρα άτομα υδρογόνου· η οξειδοαναγωγή λαμβάνει χώρα στο άτομο του σιδήρου, το οποίο μπορεί να μεταπίπτει από τη μία οξειδωτική κατάσταση ( $Fe^{2+}$ ) στην άλλη ( $Fe^{3+}$ ).

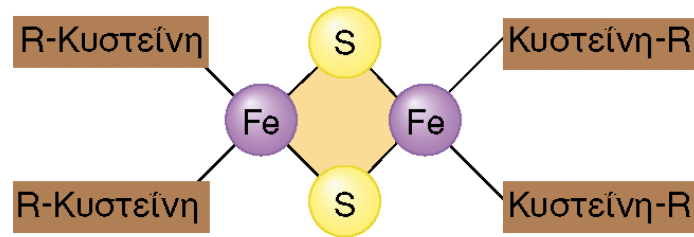


(γ)

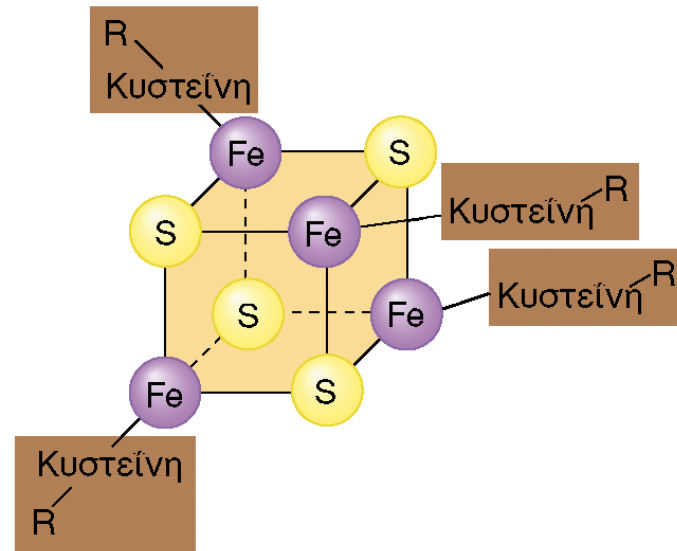


Richard Feldmann

(δ)



(a)

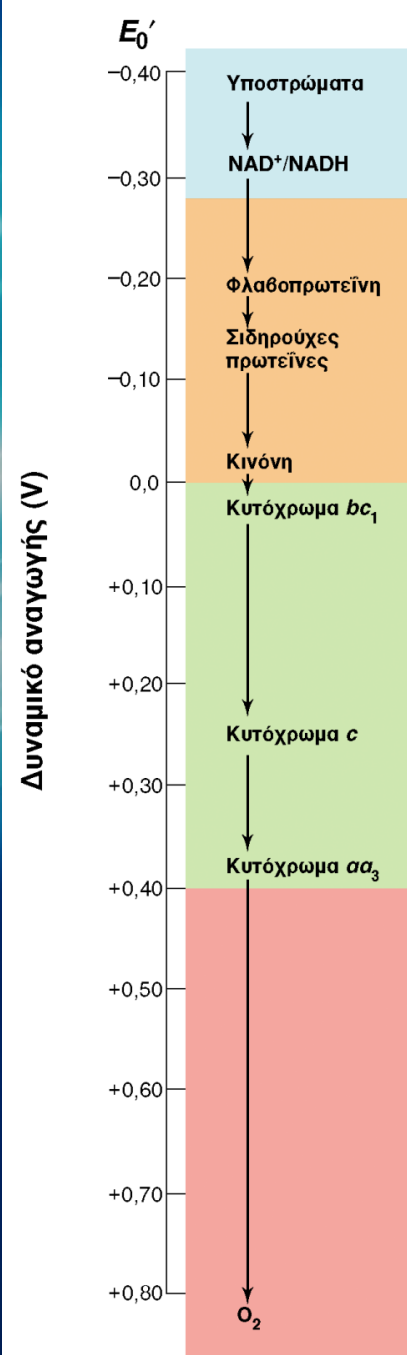


(β)

**Εικόνα 5.17** Διάταξη των κέντρων σιδήρου-θείου των μη αιμικών σιδηροθειούχων πρωτεϊνών. (α) Κέντρο  $\text{Fe}_2\text{S}_2$ . (β) Κέντρο  $\text{Fe}_4\text{S}_4$ . Οι συνδέσεις κυστεΐνης προέρχονται από το πρωτεϊνικό τμήμα του μορίου. Τυπικά, οι σιδηροθειούχες πρωτεΐνες μεταφέρουν μόνον ηλεκτρόνια.

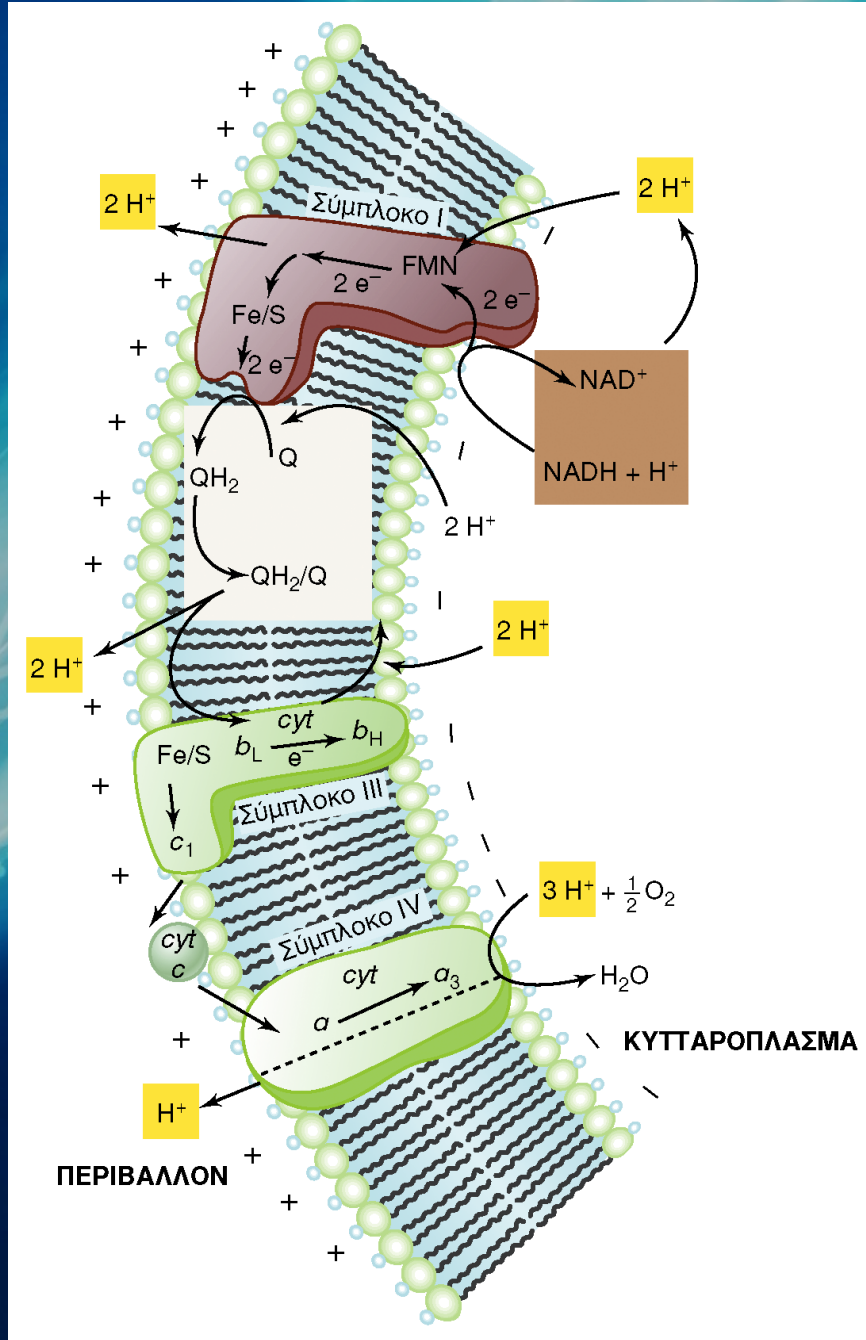


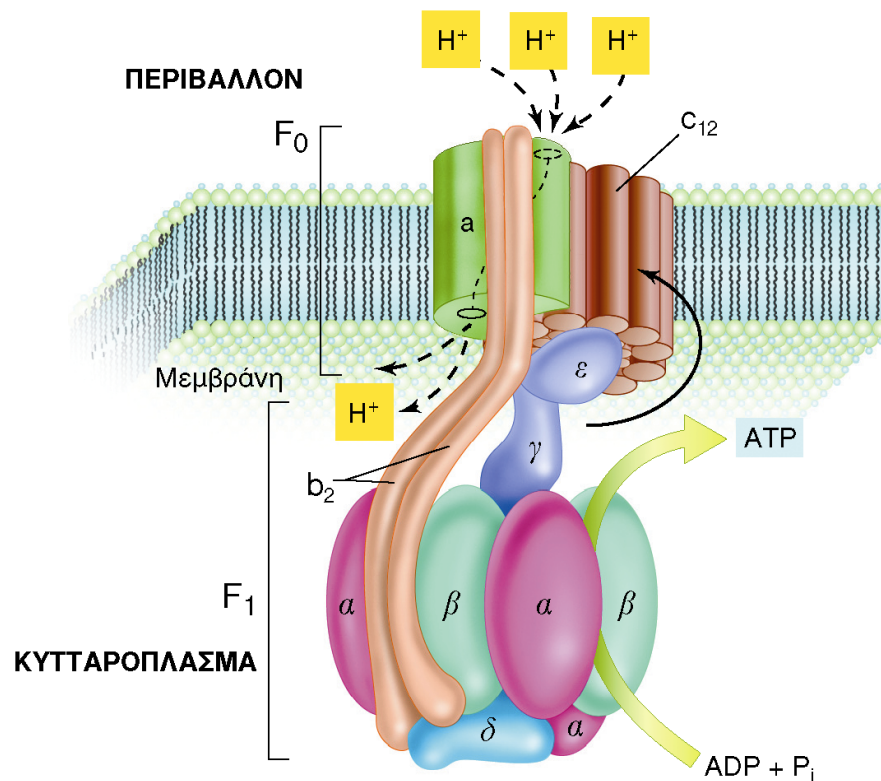
**Εικόνα 5.19** Αλυσίδες μεταφοράς ηλεκτρονίων και η σχέση τους με το  $E_0'$ . Εδώ έχουμε ένα παράδειγμα συστήματος μεταφοράς ηλεκτρονίων, που οδηγεί στη μεταφορά ηλεκτρονίων από το υπόστρωμα στο  $O_2$ . Η συγκεκριμένη αλληλουχία είναι τυπική για την αλυσίδα μεταφοράς ηλεκτρονίων στα μιτοχόνδρια των ευκαρυωτικών κυττάρων και ορισμένων βακτηρίων (π.χ. του *Paracoccus denitrificans*). Στην αλυσίδα μεταφοράς ηλεκτρονίων της *Escherichia coli* απουσιάζουν τα κυτόχρωμα *c* και *aa<sub>3</sub>*, και τα ηλεκτρόνια πηγαίνουν κατευθείαν από το κυτόχρωμα *b* στο *o* ή στο *d* (το τελευταίο έχει το ίδιο  $E_0'$  με το κυτόχρωμα *aa<sub>3</sub>*), που είναι και η τελική οξειδάση (Εικόνα 17.37). Με την κατάτμηση της ολοκληρωμένης οξειδωτικής διαδικασίας σε μια σειρά διακριτών σταδίων, είναι δυνατή η διατήρηση της ενέργειας μέσω της πρωτονιογενετικής δύναμης, που οδηγεί στη σύνθεση ATP. Συγκρίνετε τον χρωματικό κώδικα με εκείνον της Εικόνας 5.9.





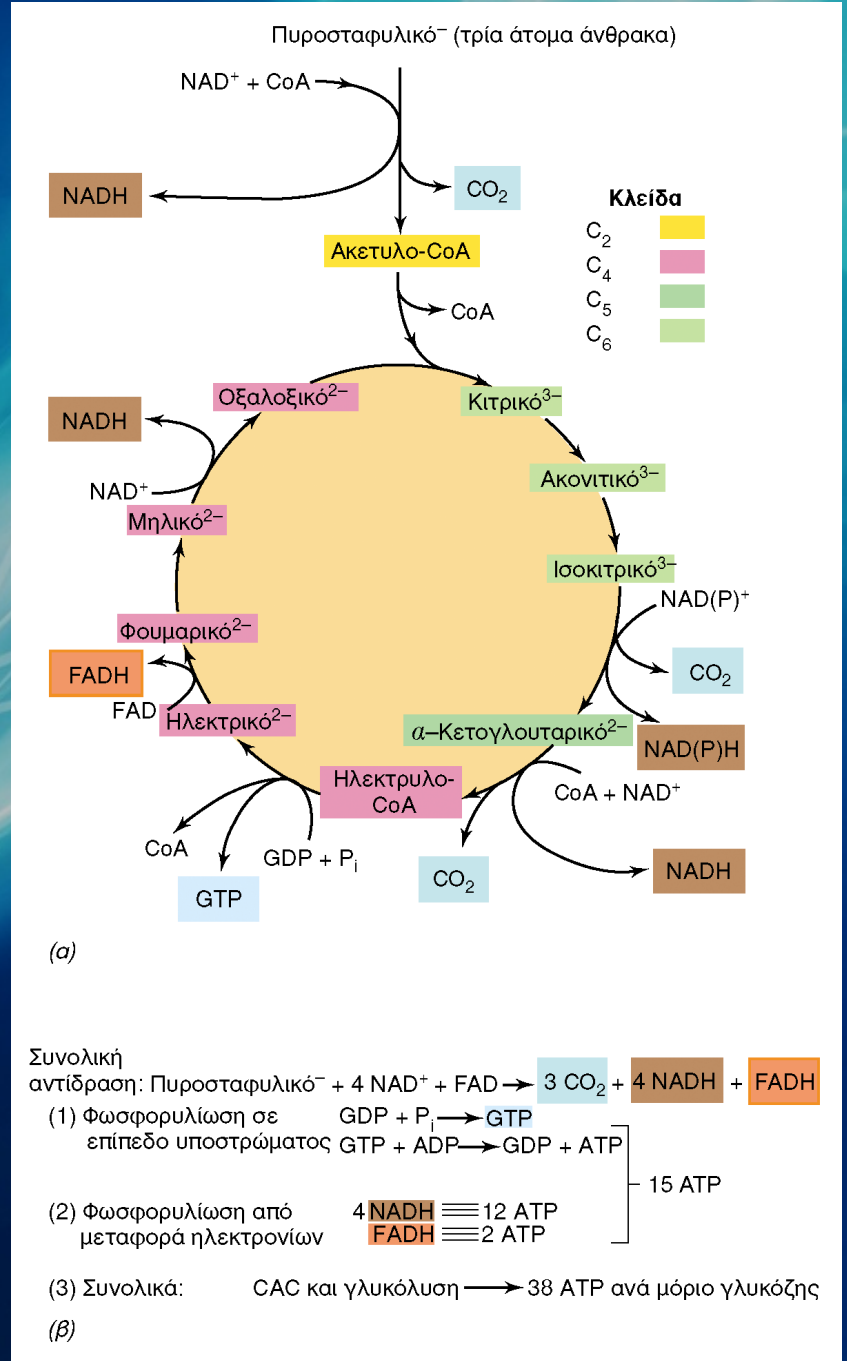
**Εικόνα 5.20** Δημιουργία της πρωτονιεργετικής δύναμης κατά την αερόβια αναπνοή. Η εικόνα δείχνει τον προσανατολισμό των κύριων φορέων ηλεκτρονίων στη μεμβράνη ενός οργανισμού, π.χ. του *Paracoccus denitrificans*, πρότυπου προκαρυώτη για τη μελέτη της αναπνοής. Τα θετικά και αρνητικά φορτία στις δύο πλευρές της μεμβράνης αντιστοιχούν σε  $H^+$  και  $OH^-$ , αντίστοιχα. Χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες συντομογραφίες: FMN, φλαβοπρωτεΐνη· Q, κινόνη· Fe/S, σιδηροθειούχες πρωτεΐνες· cyt *a*, *b*, *c*, κυτοχρώματα (*b<sub>L</sub>* και *b<sub>H</sub>*, κυτοχρώματα τύπου *b* χαμηλού και υψηλού δυναμικού, αντίστοιχα). Στη θέση της κινόνης γίνεται ανακύκλωση ηλεκτρονίων, στο πλαίσιο του «κύκλου Q», διότι τα ηλεκτρόνια από το  $QH_2$  μπορούν να διαμοιραστούν στο σύμπλοκο *bc<sub>1</sub>* (Σύμπλοκο III) ανάμεσα στην πρωτεΐνη Fe/S και στα κυτοχρώματα τύπου *b*. Τα ηλεκτρόνια που κινούνται μέσω των τελευταίων ανάγουν την Q (σε δύο στάδια, του ενός ηλεκτρονίου) πάλι προς  $QH_2$ , επομένως αυξάνουν τον αριθμό των πρωτονίων που αντλούνται στη θέση *Q-bc<sub>1</sub>*. Τα ηλεκτρόνια που κινούνται προς το Fe/S ανάγουν το κυτόχρωμα *c<sub>1</sub>*, κατόπιν το κυτόχρωμα *c*, και τέλος διάφορα κυτοχρώματα του τύπου *a* του Συμπλόκου IV, ανάγοντας σταδιακά το  $O_2$  σε  $H_2O$  (απαιτούνται δύο άτομα υδρογόνου για την αναγωγή  $\frac{1}{2} O_2$  σε  $H_2O$ ). Για λόγους απλούστευσης, το Σύμπλοκο II, δηλ. η αφυδρογονάση του ηλεκτρικού οξέος, δεν αναφέρεται. Οι αριθμοί των συμπλόκων είναι αυτοί που χρησιμοποιούνται κατά σύμβαση από τους επιστήμονες του πεδίου. Συγκρίνετε αυτή την αλυσίδα μεταφοράς ηλεκτρονίων με εκείνη της *Escherichia coli*, στην Εικόνα 17.37.

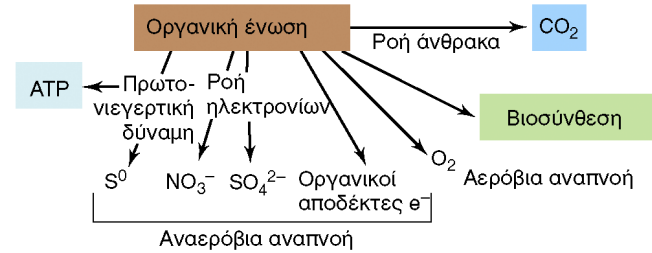




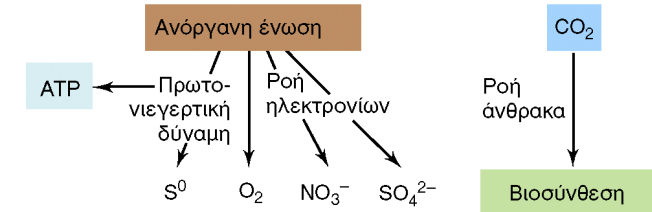
**Εικόνα 5.21** Δομή και λειτουργία της F<sub>1</sub>/F<sub>0</sub> συνθάσης του ATP-ATPάσης. Το τμήμα F<sub>1</sub> αποτελείται από πέντε διαφορετικά πολυπεπτίδια που απατούν ως ένα σύμπλοκο α<sub>3</sub>β<sub>3</sub>γεδ. Το F<sub>1</sub> είναι ένα καταλυτικό σύμπλοκο υπεύθυνο για την αλληλομετατροπή του ADP + P<sub>i</sub> και του ATP. Το τμήμα F<sub>0</sub> είναι ενσωματωμένο στη μεμβράνη και αποτελείται από τρία πολυπεπτίδια σε ένα σύμπλοκο α<sub>2</sub>β<sub>2</sub>c<sub>12</sub>. Η υπομονάδα α είναι υπεύθυνη για τη διοχέτευση των πρωτονίων μέσω της μεμβράνης, ενώ η υπομονάδα β<sub>2</sub> προεξέχει από τη μεμβράνη και σχηματίζει, μαζί με την υπομονάδα δ, τον στάτορα. Καθώς τα πρωτόνια εισέρχονται, η κατανάλωση της πρωτονιογενετικής δύναμης ωθεί τη σύνθεση ATP. Επιπρόσθετα, η λειτουργία της F<sub>1</sub>/F<sub>0</sub> είναι αντιστρέψιμη και το ένζυμο μπορεί να λειτουργήσει και σαν ATPάση: δηλαδή, υδρολύοντας ATP δημιουργεί πρωτονιογενετική δύναμη.

**Εικόνα 5.22** Ο κύκλος του κιτρικού οξέος (CAC). (α) Ο CAC αρχίζει όταν το ακετυλο-CoA (σχηματίζεται από το πυροσταφυλικό οξύ), που περιέχει 2 C, συμπικνώνεται με το οξαλοξικό, που περιέχει 4 C για να σχηματίσουν κιτρικό (με 6 C). Μέσω μιας σειράς από οξειδώσεις και μετασχηματισμούς, η ένωση αυτή μετατρέπεται τελικά σε οξαλοξικό, που αρχίζει έναν νέο κύκλο με το επόμενο μόριο ακετυλο-CoA. (β) Η συνολική ισορροπία του «καυσίμου» (NADH/FADH) για την αλυσίδα μεταφοράς ηλεκτρονίων και του CO<sub>2</sub> που δημιουργείται στον CAC. Συγκρίνετε με την Εικόνα 5.14 και προσέξτε τη μείζονα ενεργειακή διαφορά του μεταβολισμού της γλυκόζης στη ζύμωση και στην αναπνοή.

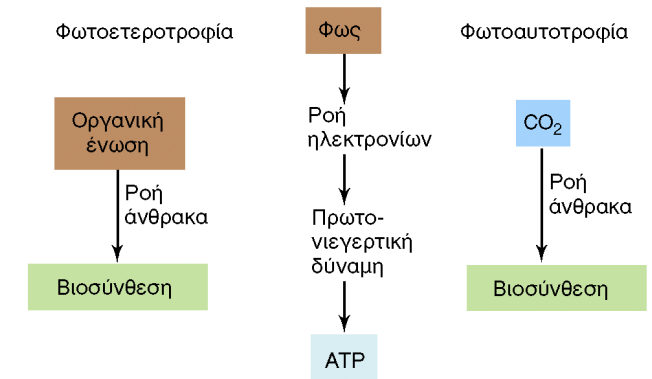




(α) Χημειοργανοτροφικός μεταβολισμός



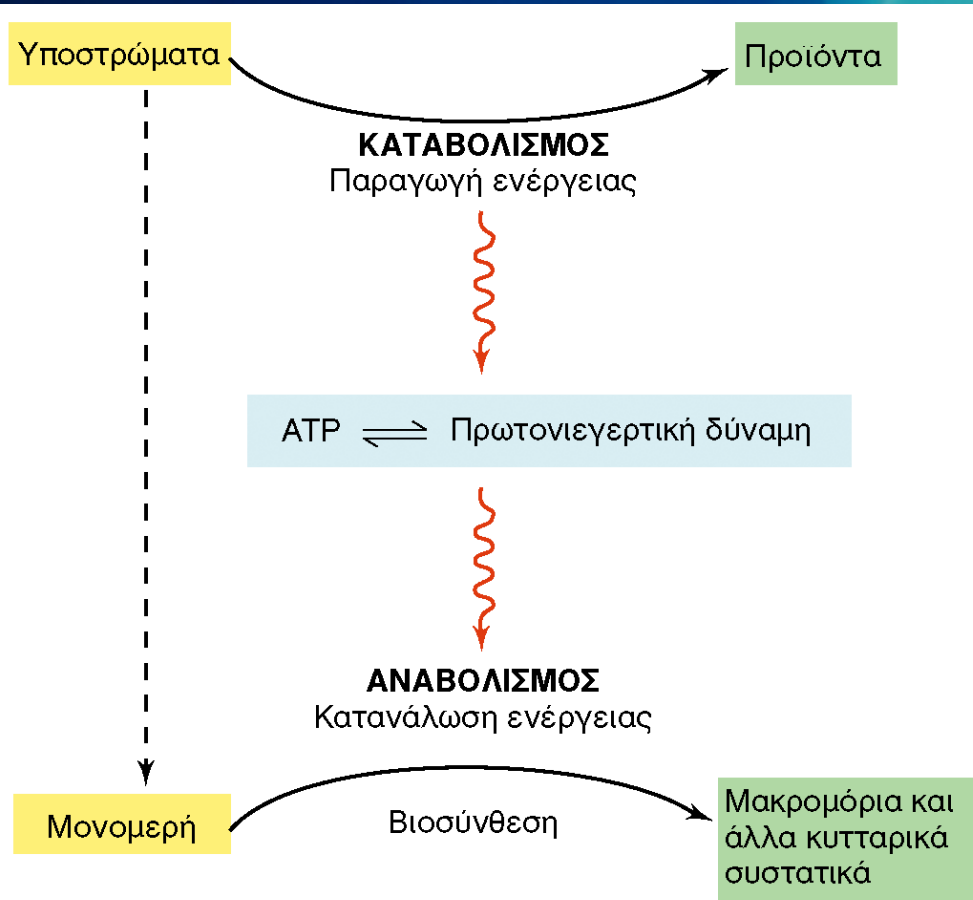
(β) Χημειολιθοτροφικός μεταβολισμός



(γ) Φωτοτροφικός μεταβολισμός

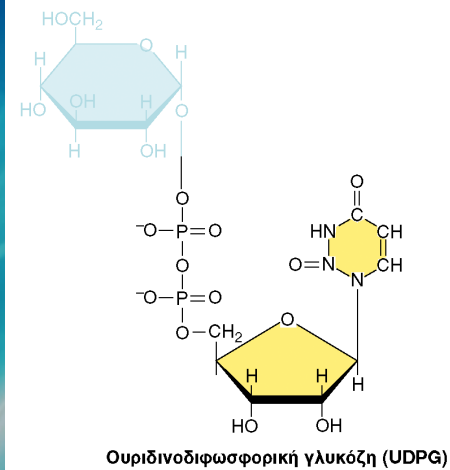
**Εικόνα 5.23** Ενεργειακή κατάσταση και ροή άνθρακα σε (α) χημειοργανοτροφικό μεταβολισμό μέσω της αναπνοής, (β) χημειολιθοτροφικό μεταβολισμό, και (γ) φωτοτροφικό μεταβολισμό. Προσέξτε ότι στον φωτοτροφικό μεταβολισμό ο άνθρακας της βιοσύνθεσης μπορεί να προέλθει είτε από το CO<sub>2</sub> (φωτοαυτοτροφία) είτε από οργανικές ενώσεις (φωτοετεροτροφία). Σημειώστε επίσης, σε κάθε περίπτωση, τη σημασία της μεταφοράς ηλεκτρονίων που οδηγεί στη δημιουργία πρωτονευγερτικής δύναμης.



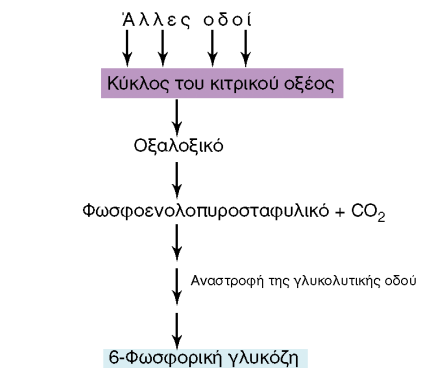
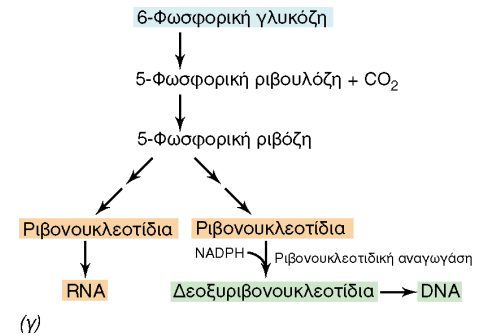
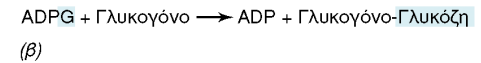


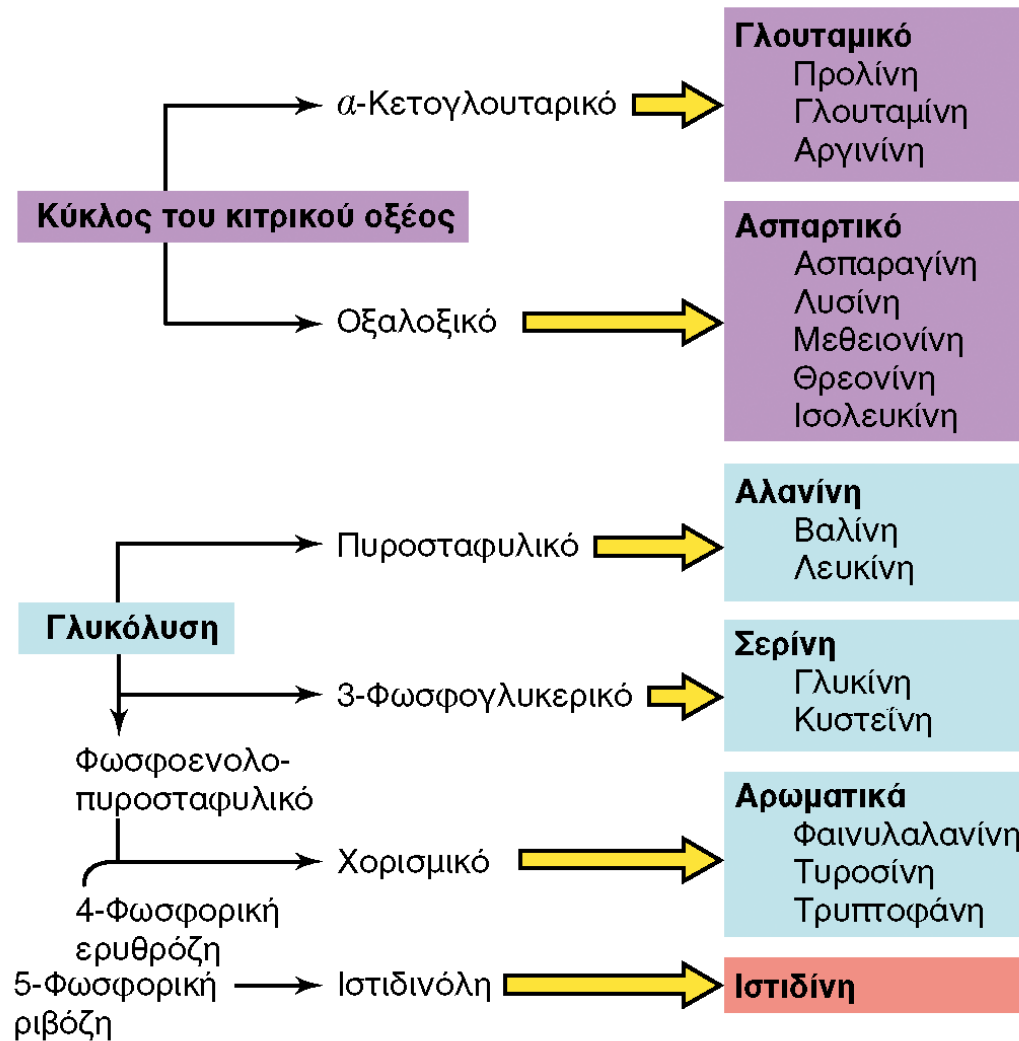
**Εικόνα 5.24** Σχηματική απεικόνιση του αναβολισμού και του καταβολισμού, όπου φαίνεται ο σημαντικός ρόλος του ATP και της πρωτονιεγερτικής δύναμης στην ολοκλήρωση των διεργασιών. Τα μονομερή μπορούν να έλθουν προσχηματισμένα, υπό τη μορφή θρεπτικών ουσιών από το περιβάλλον, ή να προκύψουν από καταβολικές οδούς, όπως είναι η γλυκόλυση και ο κύκλος του κιτρικού οξέος.

**Εικόνα 5.25** Μεταβολισμός των σακχάρων. (α) Πολυσακχαρίτες συντίθενται από ενεργοποιημένες μορφές εξοζών, όπως είναι το UDPG, του οποίου η δομή παρατίθεται εδώ. (β) Το γλυκογόνο βιοσυντίθεται από την αδενοσινοδιφωσφορική γλυκόζη (ADPG) με τη βαθμιαία προσθήκη γλυκόζης. (γ) Πεντόζες για τη σύνθεση νουκλεϊκών οξέων σχηματίζονται με την αποκαρβοξυλίωση εξοζών, όπως της 6-φωσφορικής γλυκόζης. Προσέξτε πώς σχηματίζονται τα πρόδρομα μόρια του DNA από πρόδρομα μόρια του RNA με τη βοήθεια του ενζύμου ριβονουκλεοτιδική αναγωγή. (δ) Γλυκογονονεογένεση. Όταν απαιτείται γλυκόζη, αυτή μπορεί να βιοσυντεθεί από άλλες ενώσεις του άνθρακα, εν γένει μέσω αναστροφής σταδίων της γλυκόλυσης.

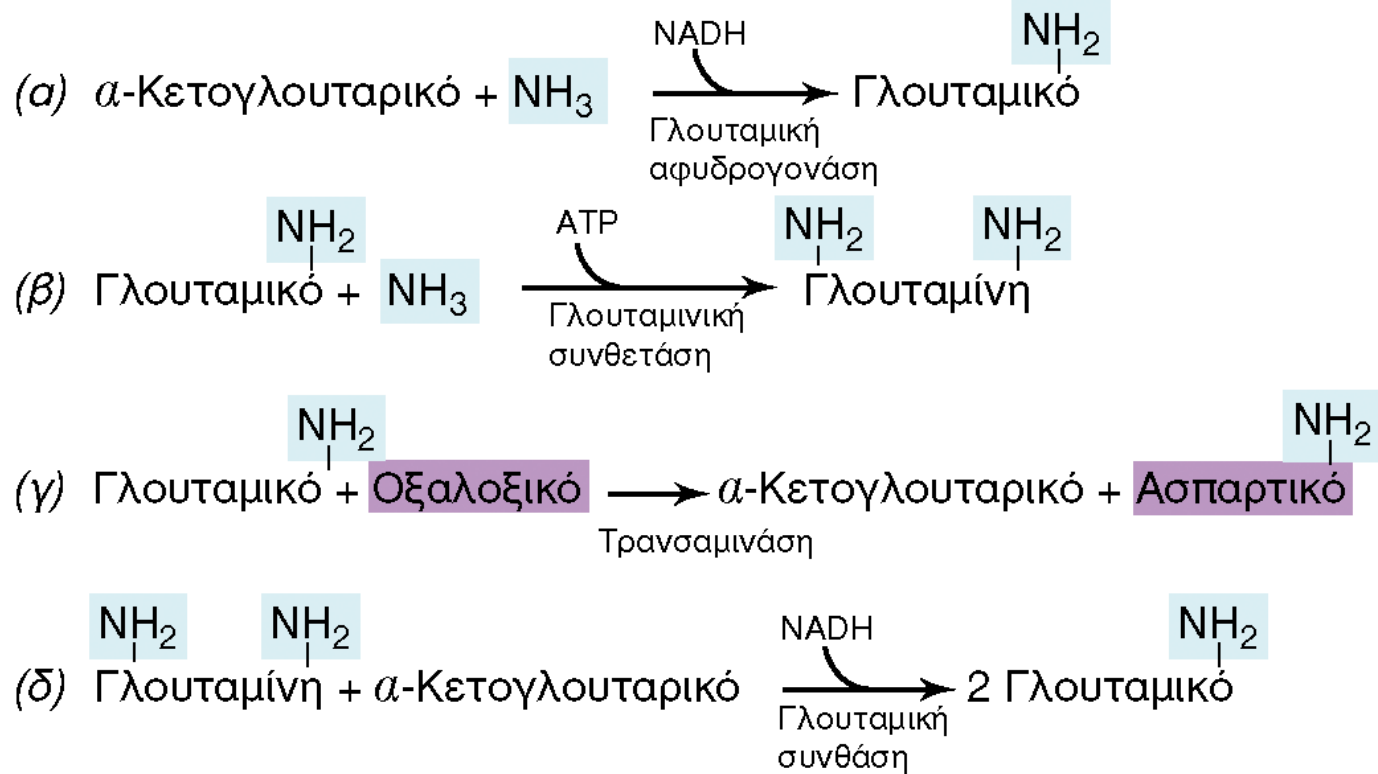


(α)





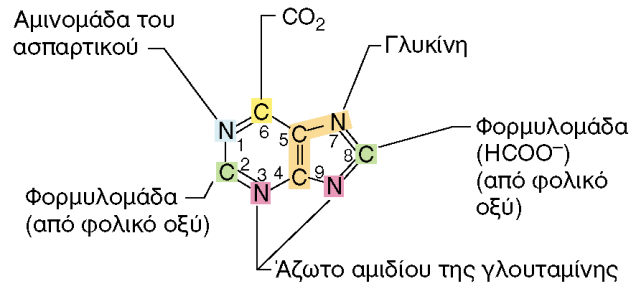
**Εικόνα 5.26** Οικογένειες αμινοξέων. Παρατηρήστε πώς οι σκελετοί άνθρακα των περισσότερων αμινοξέων προέρχονται είτε από τον κύκλο του κιτρικού οξέος είτε από τη γλυκόλυση. Η σύνθεση των διαφόρων αμινοξέων σε μια οικογένεια συχνά προϋποθέτει μια σειρά από διαφορετικά στάδια, που ξεκινούν από το πρόδρομο αμινοξύ (απεικονίζεται με έντονα στοιχεία) και καταλύονται από ένζυμα.



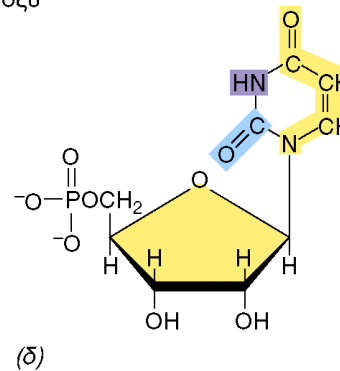
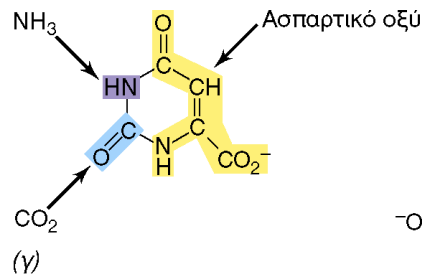
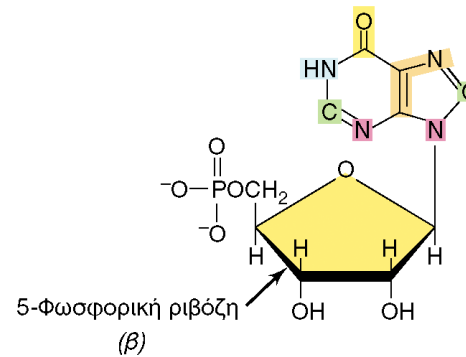
### Εικόνα 5.27

Ενσωμάτωση της αμμωνίας στα βακτήρια. Η ελεύθερη αμμωνία και οι αμινομάδες των αμινοξέων απεικονίζονται με γαλάζιο φόντο. Δύο σημαντικές οδοί αφομοίωσης NH<sub>3</sub> στα βακτήρια είναι αυτές που καταλύονται από τα ένζυμα (α) γλουταμική αφυδρογονάση και (β) γλουταμινική συνθετάση. (γ) Οι αντιδράσεις τρανσαμίνωσης απλώς μεταφέρουν μια αμινομάδα από ένα αμινοξύ σε κάποιο οργανικό οξύ. (δ) Στην αντίδραση που καταλύεται από το ένζυμο γλουταμική συνθάση, σχηματίζονται δύο γλουταμικές ομάδες από μία γλουταμίνη και μία  $\alpha$ -κετογλουταρική ομάδα.

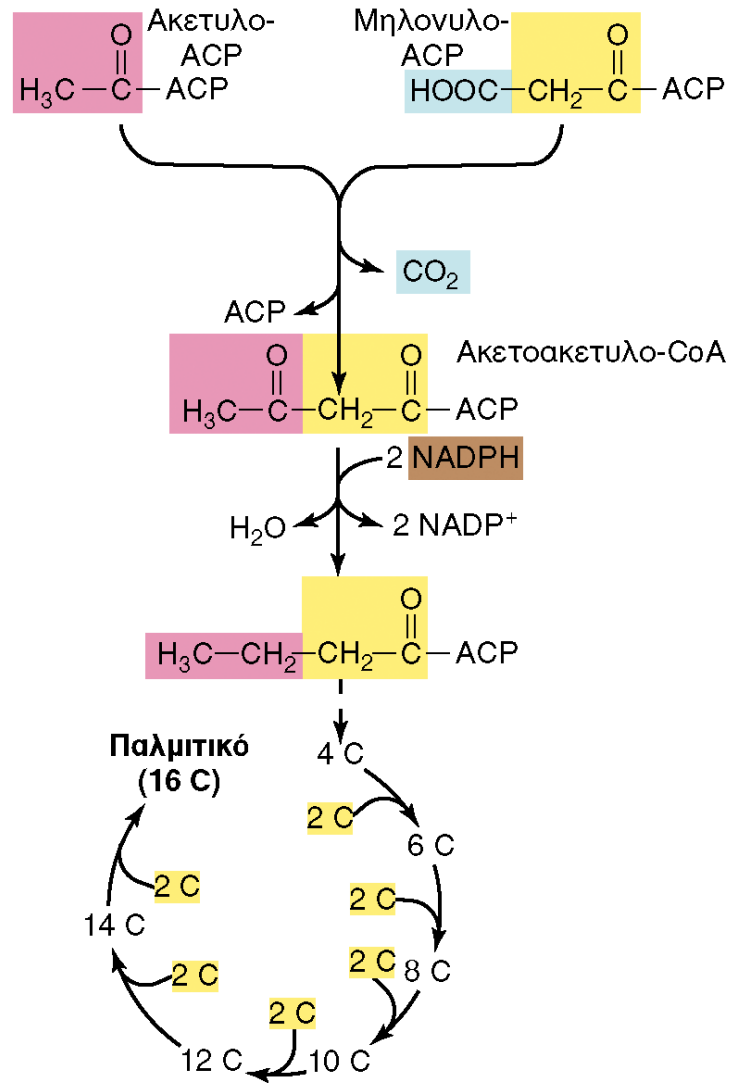




(α)



**Εικόνα 5.28** Η βιοσύνθεση της πουρίνης και της πυριμιδίνης. (α) Τα πρόδρομα μόρια του πουρινικού σκελετού. (β) Το ινωσητικό οξύ, πρόδρομο μόριο όλων των νουκλεοτιδίων της πουρίνης. (γ) Το πρόδρομο μόριο του πυριμιδινικού σκελετού, το οροτικό οξύ. (δ) Ουριδυλικό, το πρόδρομο μόριο όλων των νουκλεοτιδίων της πυριμιδίνης. Το ουριδυλικό σχηματίζεται από την αποκαρβοξυλίωση της οροτικής ομάδας και την προσθήκη 5-φωσφορικής ριβόζης.



**Εικόνα 5.29** Η βιοσύνθεση των λιπαρών οξέων. Παρατίθεται η βιοσύνθεση του *παλμιτικού* (Eικόνα 3.7), ενός λιπαρού οξέος με 16 άτομα C. Η συμπύκνωση ακετυλο-ACP και μηλονυλο-ACP σχηματίζει ακετοακετυλο-CoA. Κάθε διαδοχική προσθήκη ομάδας ακετυλίου προέρχεται από το μηλονυλο-CoA.