



ΜΕΤΑΒΟΛΙΣΜΟΣ

Ένζυμα: οι καταλύτες στο σώμα
μας ...

Βιοενεργητική

Η **Βιοενεργητική** είναι ιδιαίτερος κλάδος της **Βιολογίας** της οποίας κύριο αντικείμενο έρευνας και μελέτης είναι οι τρόποι με τους οποίους οι οργανισμοί χρησιμοποιούν την **ενέργεια** προκειμένου να υλοποιήσουν τις δραστηριότητες του φαινομένου της ζωής.

Διαπιστώνεται πως σε όλες τις δραστηριότητες (διαδικασίες) της ζωής απαιτείται ενέργεια. Συνεπώς η κατανόηση των σχέσεων ενέργειας με τους διάφορους οργανισμούς όχι μόνο δίνει απαντήσεις σε ερωτήματα σχετικά με την ύπαρξη και διατήρηση της ζωής των οργανισμών, αλλά μπορεί ακόμα και να βελτιώσει την ποιότητα ζωής του ανθρώπου.

Ενέργεια και Οργανισμοί

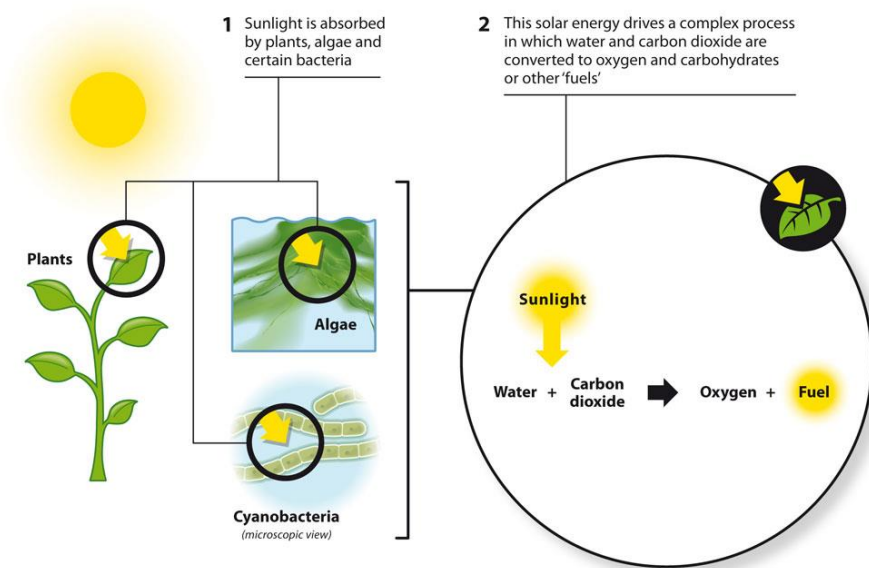
Ανάλογα με τον τρόπο που εξασφαλίζουν την ενέργειά τους οι οργανισμοί διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- **Αυτότροφοι οργανισμοί:** χαρακτηρίζονται και ως **παραγωγοί**. Είναι οι οργανισμοί που **φωτοσυνθέτουν**. Χαρακτηρίζονται ως αυτότροφοι, γιατί **παράγουν** οι ίδιοι τις **χημικές ουσίες** από τις οποίες εξασφαλίζεται η απαραίτητη ενέργεια για την επιβίωσή τους.
- **Ετερότροφοι οργανισμοί:** όλοι οι άλλοι οργανισμοί των οικοσυστημάτων, οι οποίοι **δεν φωτοσυνθέτουν**. Χαρακτηρίζονται ως ετερότροφοι, γιατί **παραλαμβάνουν** με την τροφή τους τις **χημικές ουσίες** που είναι απαραίτητες για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών τους.

Αυτότροφοι οργανισμοί

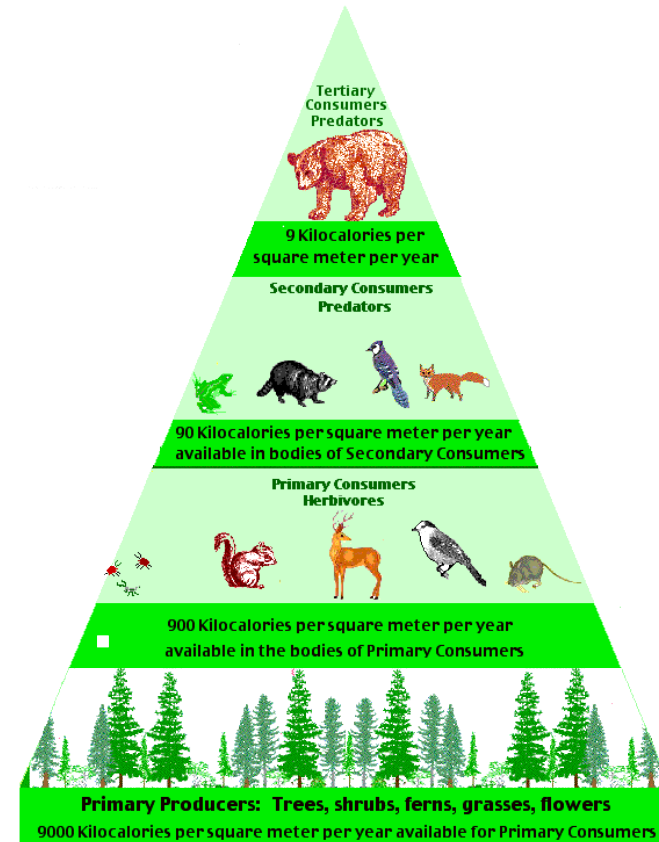
- Είναι οι οργανισμοί που φωτοσυνθέτουν, έχουν δηλαδή την ικανότητα να δεσμεύουν την ηλιακή ενέργεια και να την αξιοποιούν για την παραγωγή γλυκόζης και άλλων υδατανθράκων από απλά ανόργανα μόρια (διοξείδιο του άνθρακα CO_2 και νερό H_2O).
- Στους αυτότροφους οργανισμούς υπάγονται:
 - ❖ οι πολυκύτταροι φυτικοί οργανισμοί.
 - ❖ τα φύκη (και φυτοπλαγκτόν).
 - ❖ τα κυανοβακτήρια.

Photosynthesis: Nature's way of making solar fuel



Ετερότροφοι οργανισμοί

- Περιλαμβάνουν τους **καταναλωτές** και τους **αποικοδομητές**.
- Οι καταναλωτές τρέφονται με φυτικούς ή άλλους ζωϊκούς οργανισμούς. Σε αυτούς ανήκουν:
 - ❖ οι πολυκύτταροι ζωϊκοί οργανισμοί.
 - ❖ οι μονοκύτταροι π.χ. ζωοπλαγκτόν.
- Οι αποικοδομητές τρέφονται με τη νεκρή οργανική ύλη (φύλλα, καρπούς, απεκκρίσεις, τρίχες, σώματα νεκρών οργανισμών). Σε αυτούς ανήκουν:
 - ❖ τα βακτήρια του εδάφους.
 - ❖ οι μύκητες.



Μεταβολισμός

Με το μεταβολισμό τους τα κύτταρα, και κατ' επέκταση οι οργανισμοί, διατηρούν σταθερές τις συνθήκες λειτουργίας τους παρά τις μεταβολές που μπορεί να συμβαίνουν στο περιβάλλον. Ο μεταβολισμός έχει δύο σκέλη:

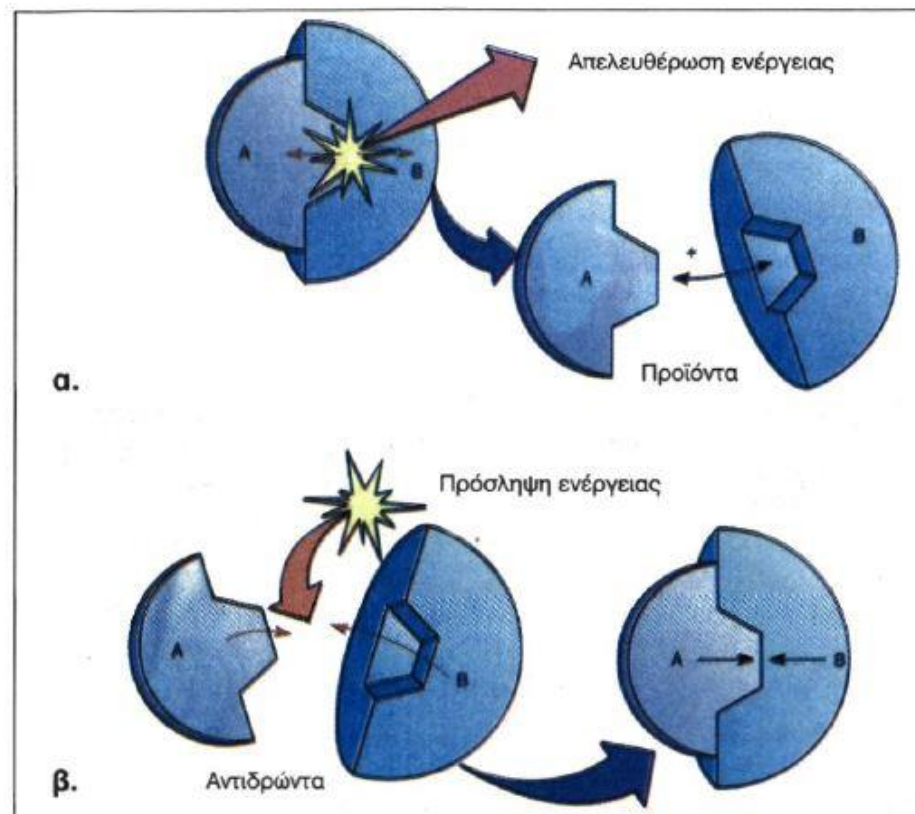
- **Καταβολισμός:** περιλαμβάνει τις **αντιδράσεις διάσπασης** πολύπλοκων χημικών ουσιών σε απλούστερες, με παράλληλη συνήθως **απόδοση ενέργειας**. Οι αντιδράσεις που αποδίδουν ενέργεια ονομάζονται **εξώθερμες**.
- **Αναβολισμός:** περιλαμβάνει **αντιδράσεις σύνθεσης** πολύπλοκων χημικών ουσιών από πιο απλές, με παράλληλη συνήθως **κατανάλωση ενέργειας**. Οι αντιδράσεις που απορροφούν ενέργεια ονομάζονται **ενδόθερμες**.

Μεταφορά ενέργειας στα κύτταρα

Μέσα στα κύτταρα η μεταφορά ενέργειας από το σημείο όπου αυτή παράγεται (αντιδράσεις διάσπασης – εξώθερμες) στο σημείο όπου καταναλώνεται (αντιδράσεις σύνθεσης – ενδόθερμες) επιτυγχάνεται με τη **σύζευξη** εξώθερμων με ενδόθερμες αντιδράσεις.

- Όταν γίνεται μία αντίδραση διάσπασης, ελευθερώνεται ενέργεια. Ένα μέρος της ενέργειας που αποδίδεται μετατρέπεται σε θερμότητα και απελευθερώνεται στο περιβάλλον. Το υπόλοιπο μέρος χρησιμοποιείται για να προχωρήσει μία αντίδραση σύνθεσης που απαιτεί ενέργεια.
- Η ενέργεια αυτή αποθηκεύεται στους χημικούς δεσμούς της σύνθετης χημικής ένωσης που σχηματίζεται.

Σύζευξη αντιδράσεων

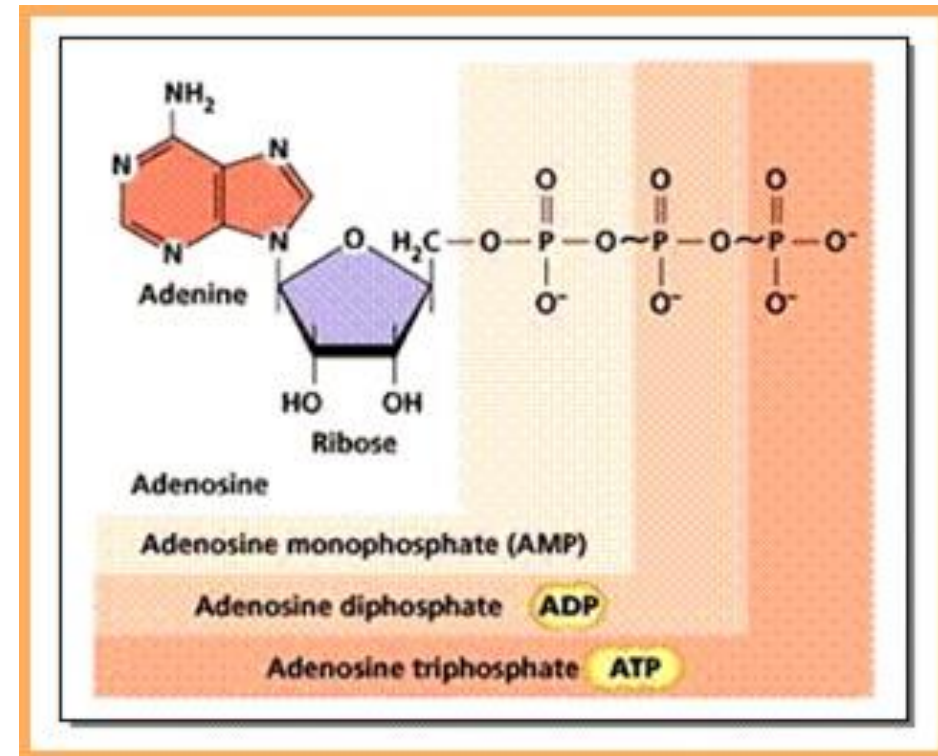


Τύποι χημικών αντιδράσεων:
(α) Εξώθερμη αντίδραση,
(β) Ενδόθερμη αντίδραση.

Τριφωσφορική Αδενοσίνη (ATP)

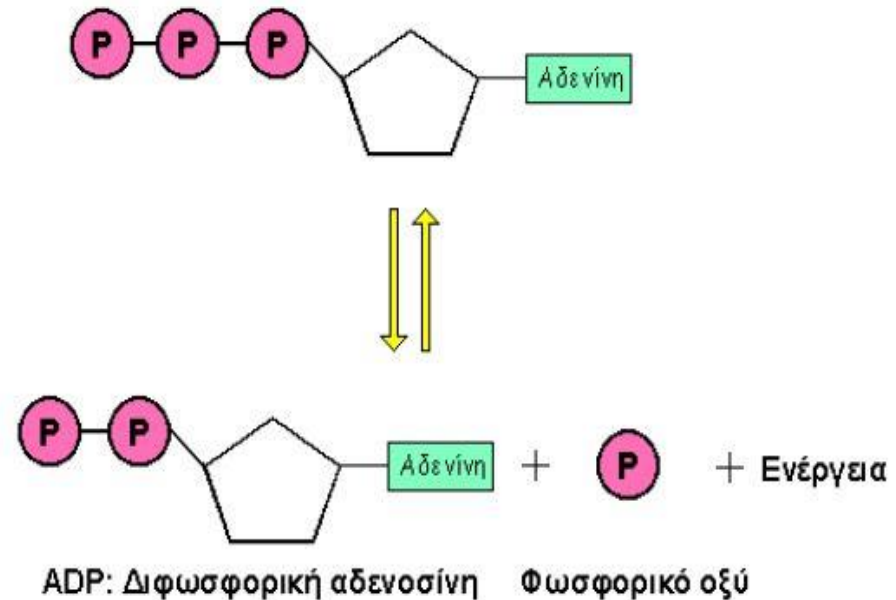
Για τη μεταφορά της χημικής ενέργειας από τις εξώθερμες αντιδράσεις στις ενδόθερμες χρησιμοποιείται το μόριο **τριφωσφορική αδενοσίνη (ATP)**.

- Το ATP είναι ένα **τριφωσφορικό νουκλεοτίδιο**, δηλαδή περιέχει τρεις φωσφορικές ομάδες, οι οποίες βρίσκονται σε σειρά. Οι χημικοί δεσμοί που ενώνουν τις δύο τελευταίες περικλείουν μεγάλο ποσό ενέργειας και γι' αυτό ονομάζονται **δεσμοί υψηλής ενέργειας**. Οι δεσμοί υψηλής ενέργειας είναι ασταθείς και διασπώνται εύκολα με υδρόλυση.

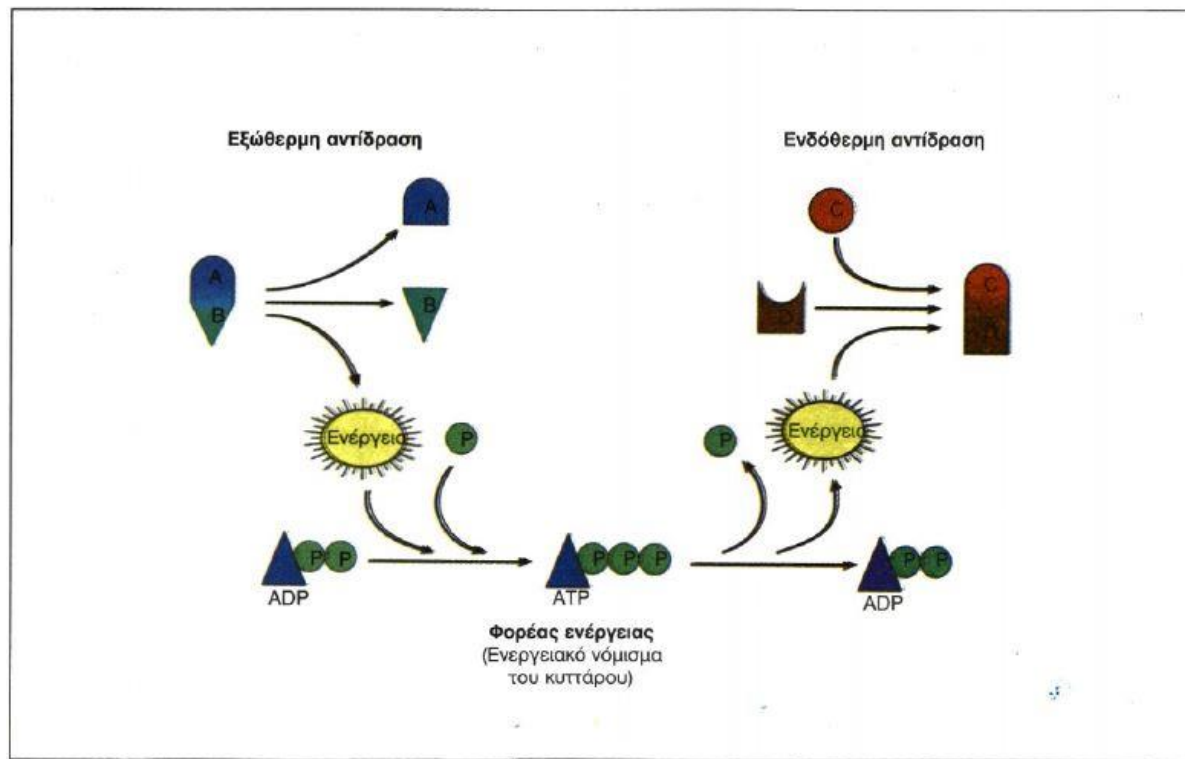


Διάσπαση και επανασύνθεση ATP

- Το ATP παραλαμβάνει και μεταφέρει ενέργεια σε οποιοδήποτε μέρος του κυττάρου και την αποδίδει γρήγορα με μία και μόνο χημική αντίδραση, κατά την οποία παράγεται ADP, ένα μόριο φωσφορικού οξέος και ενέργεια.
- Η αντίδραση είναι αμφίδρομη, δηλαδή το ADP, όταν προσφερθεί ενέργεια από κάποια εξώθερμη αντίδραση του κυττάρου, μετατρέπεται και πάλι σε ATP.
- Επειδή το ATP μεσολαβεί στις συναλλαγές μεταξύ των κυτταρικών διεργασιών που αποδίδουν και αυτών που καταναλώνουν ενέργεια, χαρακτηρίζεται ως ενεργειακό νόμισμα και αποτελεί τη **στοιχειώδη μονάδα ενέργειας** των κυττάρων.



Μεταφορά ενέργειας μέσω ATP

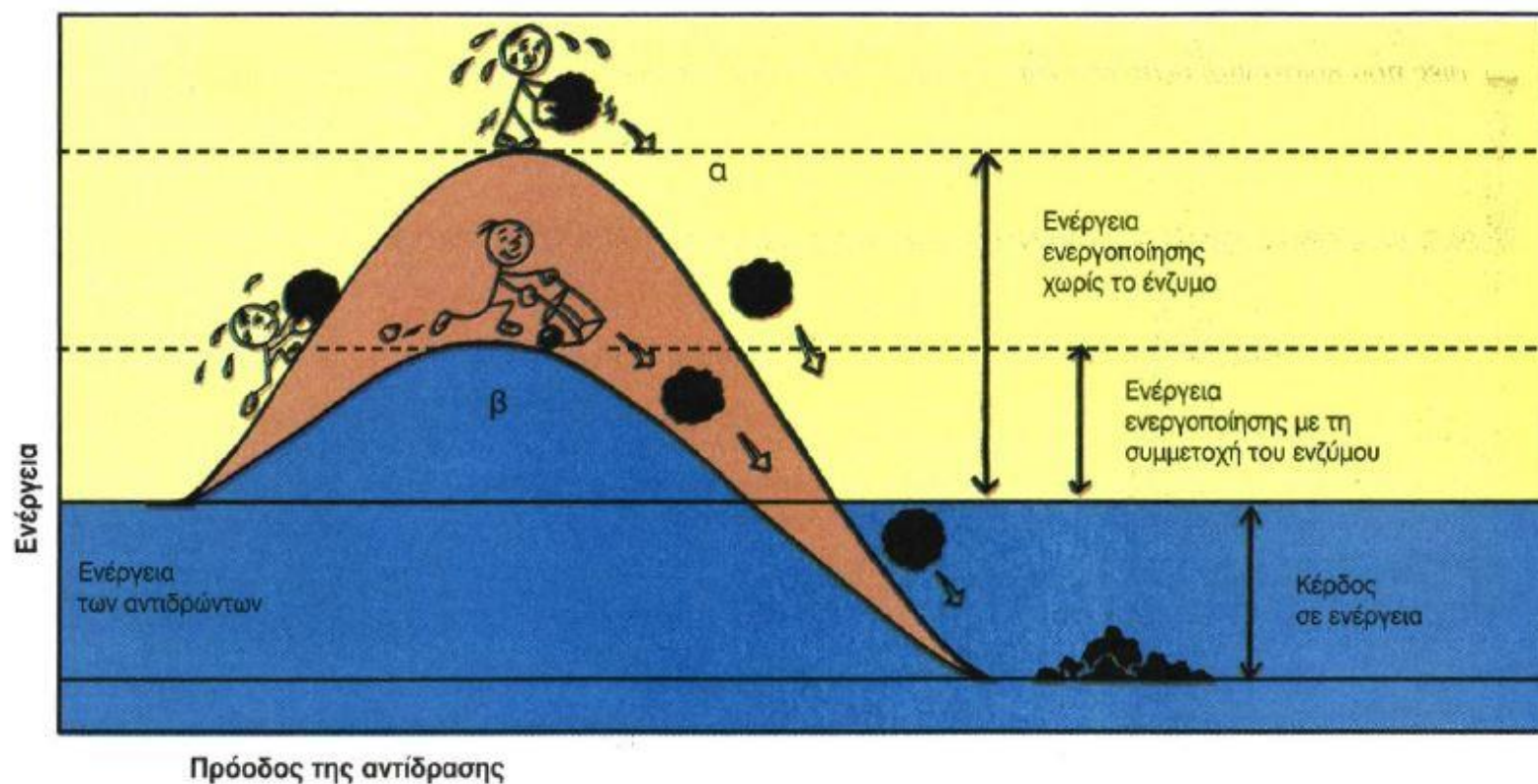


Μεταφορά ενέργειας από μια εξώθερμη αντίδραση σε μια ενδόθερμη μέσω του ATP.

Ενέργεια Ενεργοποίησης

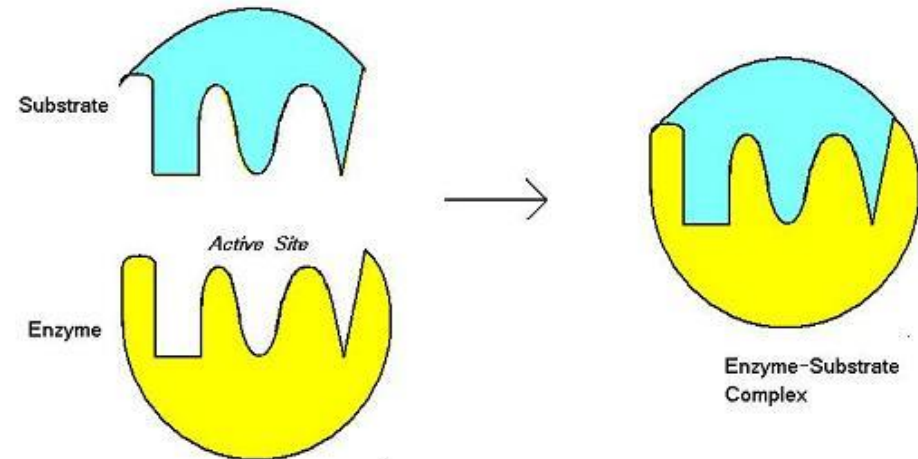
- Για να πραγματοποιηθούν πολλές από τις χημικές αντιδράσεις, ακόμα και αυτές που τελικά αποδίδουν ενέργεια, πρέπει αρχικά να προσφερθεί ενέργεια στα αντιδρώντα μόρια. Η ενέργεια αυτή ονομάζεται **ενέργεια ενεργοποίησης**.
- Στο περιβάλλον η ενέργεια ενεργοποίησης μπορεί να εξασφαλιστεί με προσφορά θερμότητας. Στους οργανισμούς, το απαιτούμενο ποσό θερμότητας για τις μεταβολικές αντιδράσεις θα ήταν απαγορευτικό για την επιβίωση του κυττάρου. Επιπλέον ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωσή τους είναι πολύ μεγάλος.
- Τα κύτταρα, για να αντιμετωπίσουν αυτό το πρόβλημα, διαθέτουν **μηχανισμό μείωσης της ενέργειας ενεργοποίησης** των μεταβολικών τους αντιδράσεων. Ο μηχανισμός αυτός στηρίζεται στη δράση των **ενζύμων** που είναι πρωτεΐνες. Τα ένζυμα **επιταχύνουν** τις αντιδράσεις ελαττώνοντας την ενέργεια ενεργοποίησης. Με την παρουσία τους, η ταχύτητα των αντιδράσεων αυξάνεται ακόμα και μέχρι 100 εκατομμύρια φορές.

Μηχανισμός δράσης ενζύμων



Ενεργό κέντρο ενζύμου

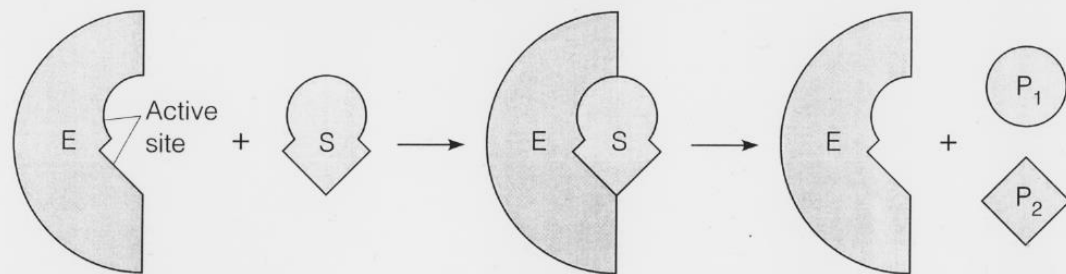
- Η επιτάχυνση των αντιδράσεων του μεταβολισμού από τα ένζυμα επιτυγχάνεται με τον κατάλληλο προσανατολισμό των αντιδρώντων μορίων ή **μορίων - υποστρωμάτων**.
- Ο προσανατολισμός πραγματοποιείται στο **ενεργό κέντρο του ενζύμου**, που αποτελεί μια μικρή περιοχή του. Η σύνδεση των αντιδρώντων μορίων με αυτό μοιάζει με το «ταίριασμα του κλειδιού στην κλειδαριά» (lock-and-key model).
- Η σύνδεση των υποστρωμάτων με το ένζυμο έχει ως αποτέλεσμα να γίνονται ασταθείς οι δεσμοί των αντιδρώντων μορίων. «Σπάνε» πιο εύκολα, κάτι που αποτελεί προϋπόθεση για το σχηματισμό των προϊόντων. Σε ορισμένες περιπτώσεις, το ενεργό κέντρο αποκτά σχήμα συμπληρωματικό του σχήματος του υποστρώματος μόνο μετά την πρόσδεση του υποστρώματος στο ενεργό κέντρο (επαγόμενη προσαρμογή - induced fit model).



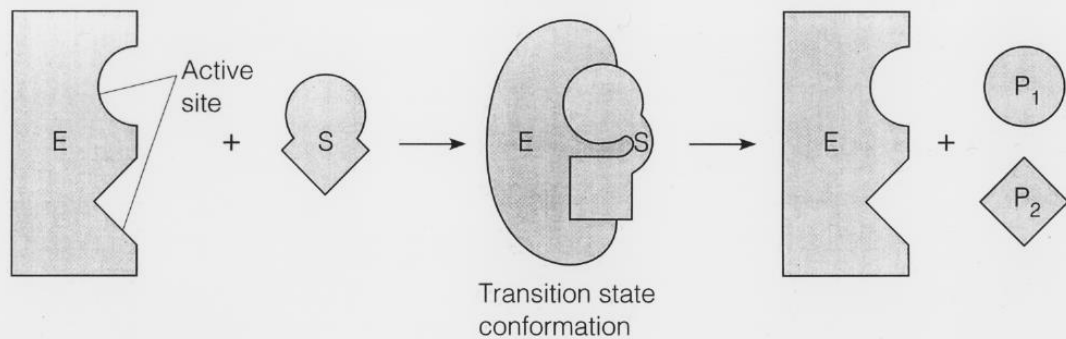
Lock-and-key Model.- The substrate and enzyme active site have complementary shapes

Τρόποι δράσης ενζύμων

Figure 11.7 Two models for enzyme-substrate interaction



(a) Lock-and-key model



(b) Induced fit model

Ιδιότητες ενζύμων

- Αρκετές από τις ιδιότητες των ενζύμων είναι αποτέλεσμα του γεγονότος ότι είναι πρωτεϊνικά μόρια. Οι κυριότερες από αυτές είναι οι εξής:
- Η **καταλυτική δράση** των ενζύμων καθορίζεται από την **τριτοταγή δομή** του πρωτεϊνικού μορίου τους. Συνεπώς η δράση τους μειώνεται ή χάνεται, όταν μεταβάλλεται η δομή τους.
- **Δρουν πολύ γρήγορα**. Για παράδειγμα, ένα μόριο **καταλάσης** μπορεί να καταλύσει τη διάσπαση έξι εκατομμυρίων μορίων υπεροξειδίου του υδρογόνου σε ένα λεπτό ($2\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$).
- **Δε συμμετέχουν στην αντίδραση που καταλύουν**. Παραμένουν αναλλοίωτα και μετά το τέλος της αντίδρασης μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλές φορές ώσπου να καταστραφούν.
- Εμφανίζουν **υψηλό βαθμό εξειδίκευσης**, που οφείλεται στη διάταξή τους στο χώρο και στη δυνατότητα σύνδεσης του ενεργού κέντρου με το υπόστρωμα. Αυτό συνήθως σημαίνει ότι κάθε ένζυμο δρα με ένα συγκεκριμένο υπόστρωμα, καταλύοντας μία μόνο χημική αντίδραση, όπως η καταλάση. Ορισμένα ένζυμα καταλύουν πολύ συγγενικές αντιδράσεις, όπως η παγκρεατική λιπάση που καταλύει τις αντιδράσεις διάσπασης μιας σειράς διαφορετικών λιπιδίων.
- Η δραστηριότητα των ενζύμων επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως η **θερμοκρασία**, **pH** κλπ.

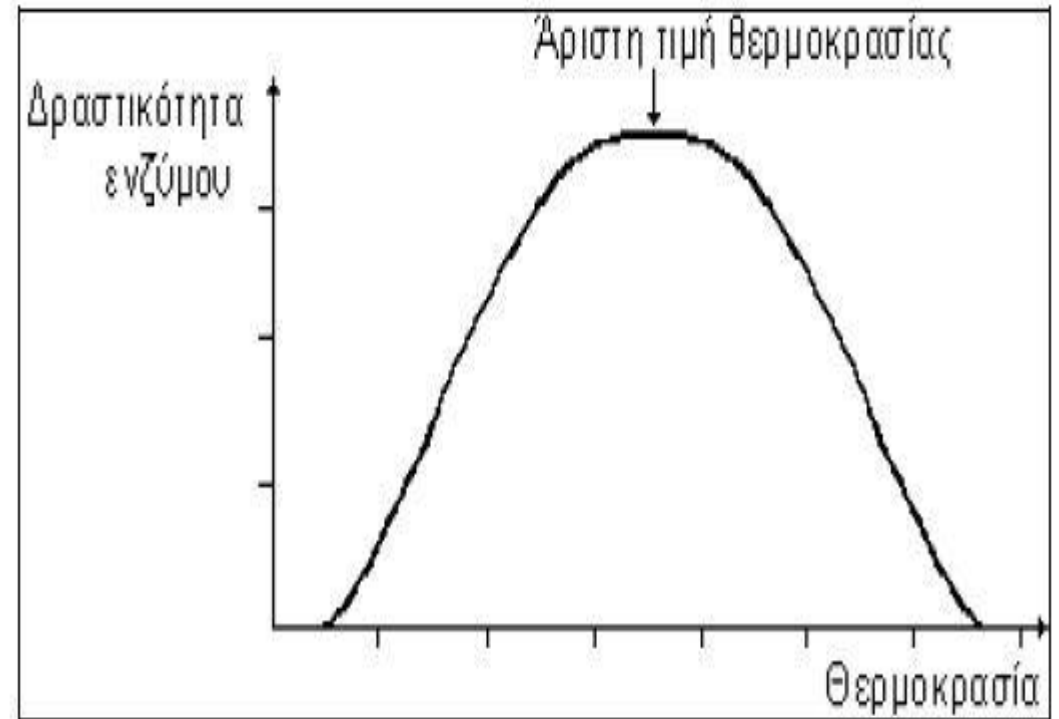
Παράγοντες που επηρεάζουν τη δράση των ενζύμων

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη δράση των ενζύμων είναι οι εξής:

- Θερμοκρασία.
- pH.
- Συγκέντρωση υποστρώματος.
- Συγκέντρωση ενζύμου.

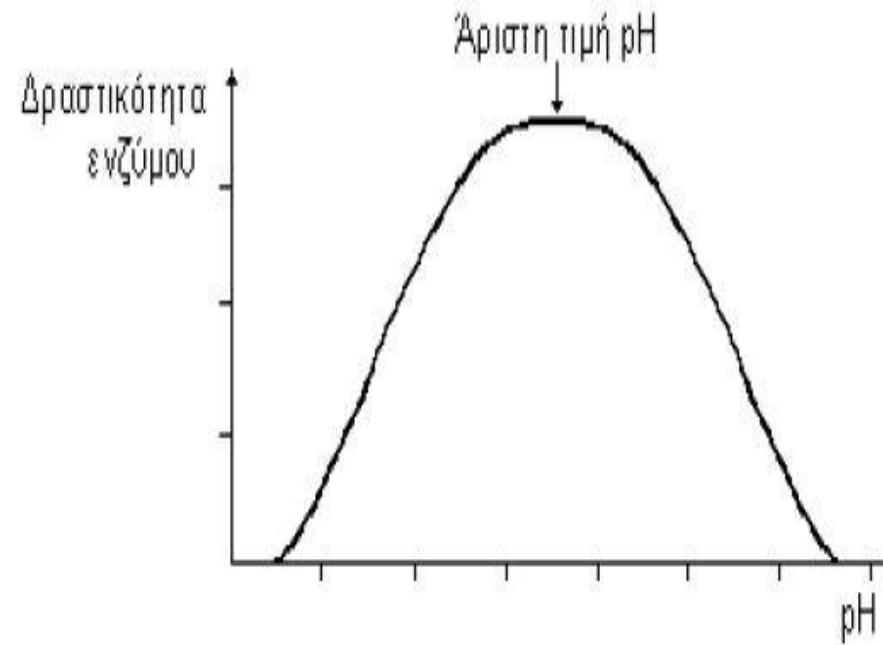
Θερμοκρασία

- Η ταχύτητα της αντίδρασης που καταλύει ένα ένζυμο μεταβάλλεται ανάλογα με τη μεταβολή της θερμοκρασίας.
- Για κάθε ένζυμο υπάρχει μια ορισμένη θερμοκρασία (άριστη), στην οποία η ταχύτητα της αντίδρασης γίνεται μέγιστη.
- Αν η θερμοκρασία αυξηθεί αρκετά καταστρέφεται η τριτοταγής δομή τους και χάνεται η δραστηρότητά τους.



pH

- Τα ένζυμα επηρεάζονται από τις μεταβολές του pH. Ισχυρά όξινο ή αλκαλικό περιβάλλον μπορεί να προκαλέσει τη μερική ή την ολική καταστροφή τους.
- Για κάθε ένζυμο υπάρχει μια ορισμένη τιμή, στην οποία η ταχύτητα της αντίδρασης που καταλύει είναι μέγιστη, συνήθως μεταξύ pH5 και pH9.
- Τα περισσότερα ενδοκυτταρικά ένζυμα δρουν άριστα γύρω στο pH7. Αντίθετα, ένζυμα όπως τα πεπτικά, που εκκρίνονται και δρουν σε κοιλότητες του οργανισμού, συμπεριφέρονται διαφορετικά. Η **πεψίνη**, ένζυμο που δρα στο στομάχι, εμφανίζει άριστη δράση σε pH2 περίπου. Αντίθετα η **θρυψίνη**, ένζυμο που δρα στο λεπτό έντερο, εμφανίζει άριστη δράση σε pH8,5 περίπου.



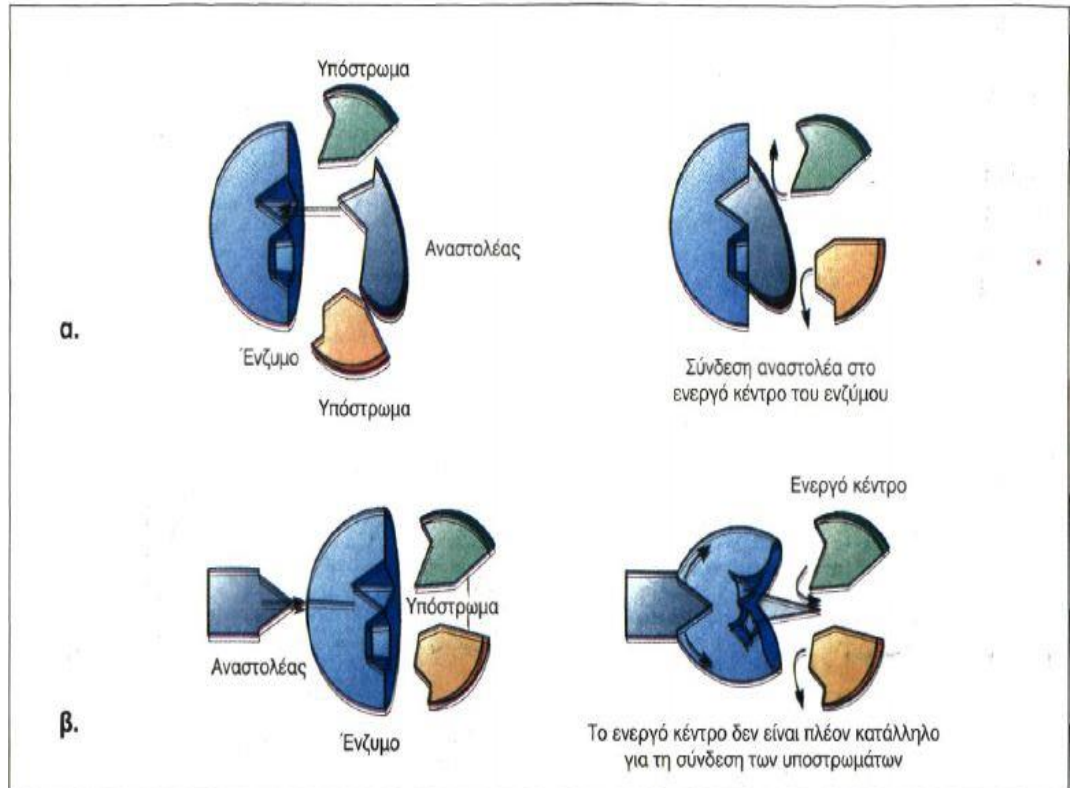
Συγκέντρωση υποστρώματος - ενζύμου

- **Συγκέντρωση υποστρώματος:** η αύξηση της συγκέντρωσης του υποστρώματος οδηγεί συνήθως σε αύξηση της ταχύτητας της αντίδρασης. Από ένα σημείο και πέρα όμως, περισσότερα μόρια υποστρώματος δεν οδηγούν σε μεγαλύτερη ταχύτητα αντίδρασης. Αυτό οφείλεται στην πλήρη κάλυψη από το υπόστρωμα του ενεργού κέντρου των διαθέσιμων μορίων του ενζύμου. Τα επιπλέον μόρια υποστρώματος πρέπει να περιμένουν «τη σειρά τους», ώσπου τα μόρια του ενζύμου να ολοκληρώσουν τις αντιδράσεις που έχουν ήδη αναλάβει και να είναι ελεύθερα να δεσμεύσουν άλλα μόρια – υποστρώματα.
- **Συγκέντρωση ενζύμου:** για δεδομένη συγκέντρωση υποστρώματος και για συγκεκριμένη τιμή του pH και της θερμοκρασίας, η ταχύτητα της αντίδρασης αυξάνεται με την αύξηση της ποσότητας του ενζύμου.

Αναστολείς της δράσης των ενζύμων

Αναστολείς ενζύμων είναι οι ουσίες που μπορούν να αναστείλουν τη δράση των ενζύμων. Διακρίνονται σε:

- **Αντιστρεπτοί αναστολείς:** συνδέονται με το ένζυμο και αναστέλλουν τη δράση του παροδικά.
- **Μη αντιστρεπτοί αναστολείς:** συνδέονται μόνιμα με το ένζυμο και δεν το αφήνουν να δράσει πλέον. Σε αυτούς ανήκουν διάφορα αέρια (π.χ. εντομοκτόνα) και ιόντα βαρέων μετάλλων, όπως τα Hg^{2+} , Pb^{2+} , Ag^{+} .

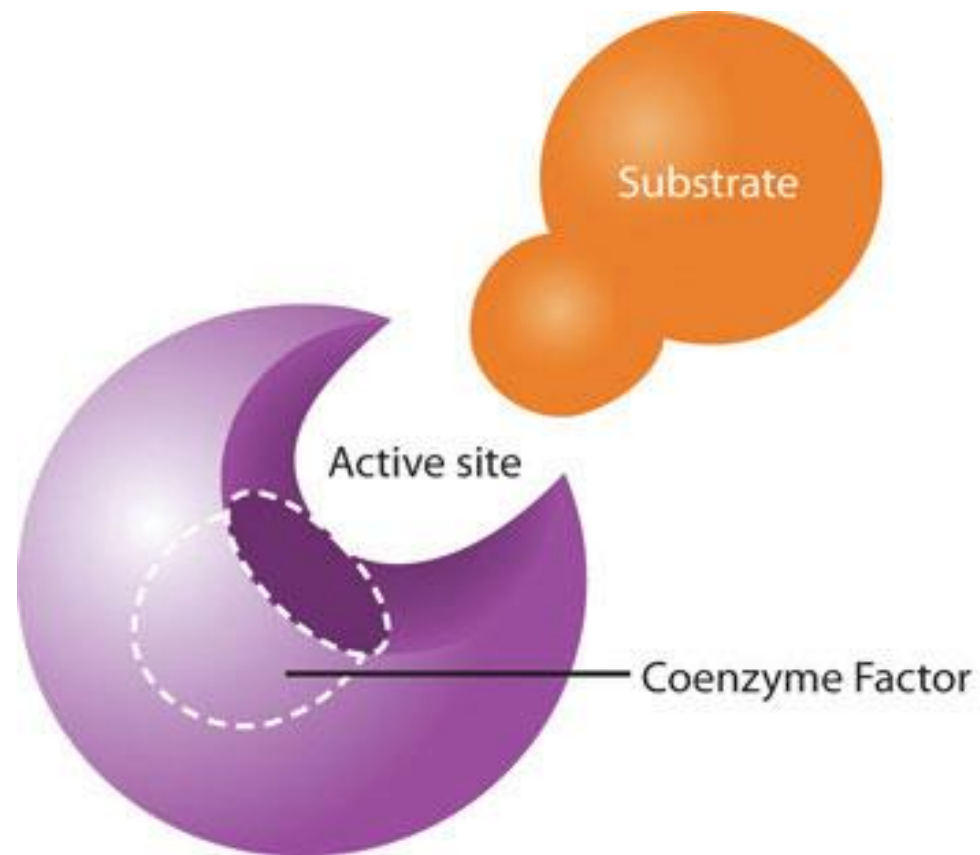


Συμπαράγοντες ενζύμων

Ορισμένα ένζυμα είναι δραστικά μόνο με την παρουσία ουσιών, μη πρωτεϊνικής φύσης, που ονομάζονται **συμπαράγοντες**. Οι συμπαράγοντες μπορεί να είναι:

- **Ανόργανα ιόντα:** Zn^{2+} , Cu^{2+} , Mn^{2+} κ.ά.
- **Συνένζυμα:** πρόκειται για διάφορες οργανικές ενώσεις. Πολλά από τα συνένζυμα είναι **βιταμίνες** ή περιέχουν στο μόριό τους βιταμίνες.

Στην περίπτωση που κάποιο ένζυμο, για να δράσει, χρειάζεται να συνδεθεί με ένα συνένζυμο, τότε μόνο του, όπως μόνο του και το συνένζυμο, θα είναι ανενεργό.



Εφαρμογές ενζύμων

Η σημασία των ενζύμων για τις εφαρμογές της **Βιοχημείας**, της **Βιοτεχνολογίας** και της **Βιοϊατρικής** είναι μεγάλη. Παραδείγματα εφαρμογών ορισμένων κατηγοριών ενζύμων είναι τα εξής:

- **Αμυλάσες:** υδρολύουν το άμυλο σε γλυκόζη και μαλτόζη. Χρησιμοποιούνται από τη βιομηχανία τροφίμων, την οινοποιία, τη ζυθοποιία κ.λ.π.
- **Λιπάσες:** υδρολύουν τα λιπίδια. Χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία απορρυπαντικών, στην επεξεργασία αποβλήτων κ.λ.π.
- **Πρωτεάσες:** υδρολύουν τις πρωτεΐνες. Χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία απορρυπαντικών, στην πήξη του γάλακτος και στη μετατροπή του σε γιαούρτι και τυρί, στο σίτεμα του κρέατος κ.λ.π.
- **Κυτταρινάσες:** υδρολύουν την κυτταρίνη. Χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία των λαχανικών και των δημητριακών.

Φωτοσύνθεση

- Φωτοσύνθεση είναι η διαδικασία κατά την οποία οι φωτοσυνθετικοί οργανισμοί παγιδεύουν τη **φωτεινή ενέργεια** και τη μετατρέπουν σε **χημική**, η οποία αποθηκεύεται σε οργανικά μόρια που παράγονται από τους ίδιους.
- Η δέσμευση της φωτεινής ενέργειας γίνεται από τη **χλωροφύλλη** και άλλες **φωτοσυνθετικές χρωστικές**.
- Οι φωτοσυνθετικοί οργανισμοί ανήκουν στους **αυτότροφους** οργανισμούς που συνθέτουν υδατάνθρακες (γλυκόζη), χρησιμοποιώντας απλές ανόργανες ενώσεις όπως CO_2 και H_2O .
- Από τους ευκαρυωτικούς οργανισμούς, φωτοσύνθεση γίνεται στα φυτά και στα φύκη και από τους προκαρυωτικούς σε ορισμένα βακτήρια και στα κυανοφύκη (κυανοβακτήρια).

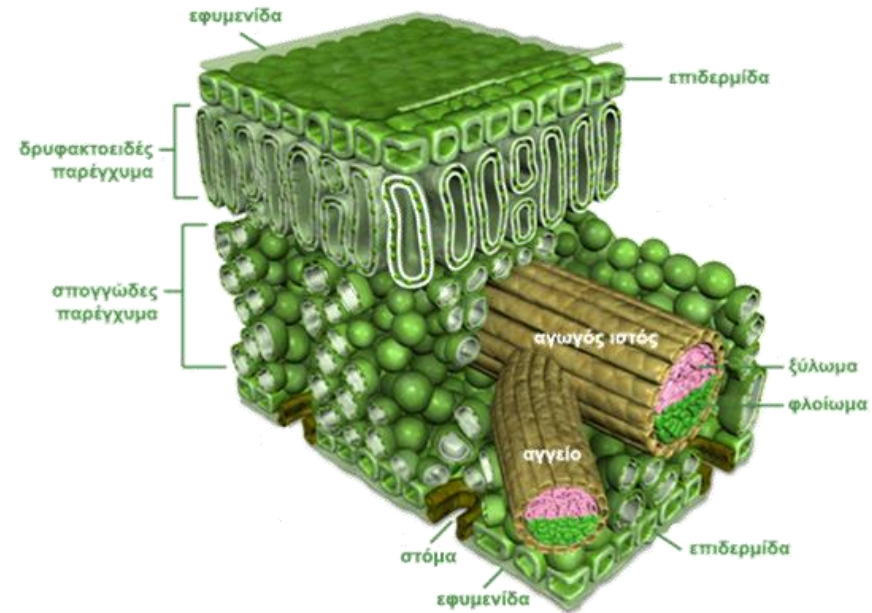
Σημασία της φωτοσύνθεσης

- Όλοι οι οργανισμοί του πλανήτη εξαρτώνται **άμεσα** ή **έμμεσα** από τη φωτοσύνθεση.
- Οι σύνθετες οργανικές ουσίες που παράγονται από τους φωτοσυνθετικούς οργανισμούς αποτελούν, μέσω των **τροφικών αλυσίδων**, πηγές θρεπτικών ουσιών για τους ετερότροφους οργανισμούς: άμεσα για τους καταναλωτές πρώτης τάξης (φυτοφάγους) και έμμεσα για τους καταναλωτές δεύτερης ή ανώτερης τάξης (σαρκοφάγους).
- Οι νεκροί οργανισμοί, τα απεκκρίματα των ζώϊκών και τα τμήματα των φυτικών που έχουν αποκοπεί (φύλλα, κλαδιά κ.ά) διασπώνται από τους αποικοδομητές. Τα προϊόντα της αποικοδόμησης (π.χ. CO_2 , H_2O) μπορούν να ξαναχρησιμοποιηθούν από τους φωτοσυνθετικούς οργανισμούς (κυκλική πορεία ύλης μέσα στα οικοσυστήματα).

Η δομή του φύλλου

Η δομή του φύλλου είναι κατάλληλα προσαρμοσμένη για να εξυπηρετεί τη λειτουργία της φωτοσύνθεσης. Σε εγκάρσια τομή παρατηρούμε:

- δύο **επιδερμίδες**, την πάνω και την κάτω, που καλύπτονται συνήθως από **εφυμενίδα**.
- το **μεσόφυλλο** που βρίσκεται ανάμεσα στις δύο επιδερμίδες και διασχίζεται από **αγγεία**. Τα κύτταρα του μεσόφυλλου διαθέτουν πολλούς χλωροπλάστες.
- τα **στόματα** που είναι μικρά ανοίγματα στην κάτω επιδερμίδα. Το καθένα από αυτά περιβάλλεται από ένα ζευγάρι κυττάρων, τα **καταφρακτικά κύτταρα**.



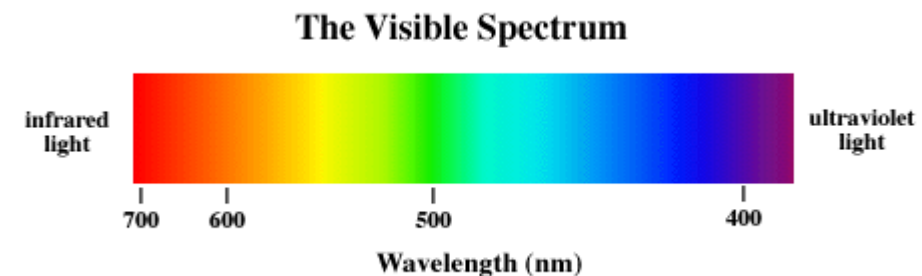
Το φύλλο ως όργανο φωτοσύνθεσης

- Η φωτοσύνθεση γίνεται στα πράσινα μέρη των φυτών, που είναι κυρίως τα φύλλα και συχνά ο βλαστός τους.
- Η είσοδος του ατμοσφαιρικού CO_2 γίνεται με διάχυση από τα στόματα προς τους μεσοκυττάριους χώρους των κυττάρων του μεσόφυλλου και τελικά φτάνει στους χλωροπλάστες. Το O_2 που παράγεται κατά τη φωτοσύνθεση, εξέρχεται από τα στόματα των φύλλων στην ατμόσφαιρα.
- Το νερό εισέρχεται στις ρίζες από το έδαφος και μέσω των αγγείων φτάνει στα φύλλα. Μαζί με το νερό μεταφέρονται ιόντα, όπως νιτρικά, φωσφορικά, θειικά, μαγνησίου κ.ά., που χρησιμεύουν στη σύνθεση πρωτεϊνών και άλλων ουσιών. Η άντληση του νερού από το έδαφος και η ροή του στα αγγεία διευκολύνεται με την εξάτμιση νερού από τα στόματα (**διαπνοή**). Το άνοιγμα και κλείσιμο των στομάτων επιτρέπει στο φυτό να ελέγχει το ρυθμό εξάτμισης του νερού, ανάλογα με τη διαθεσιμότητά του στο έδαφος.

Ορατό φως

Το **ορατό φως**, που αποτελεί ένα μικρό μόνο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας, όταν περνά μέσα από ένα πρίσμα, **αναλύεται** σε ακτινοβολίες διάφορων μηκών κύματος.

Αυτές αντιστοιχούν στα χρώματα ιώδες, μπλε, πράσινο, κίτρινο, πορτοκαλί και κόκκινο (εικόνα φάσματος).

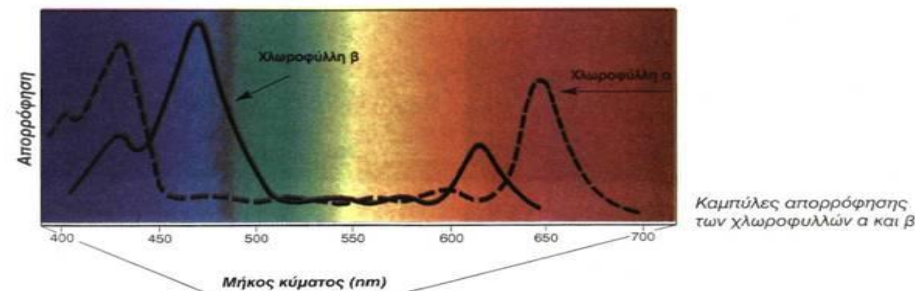
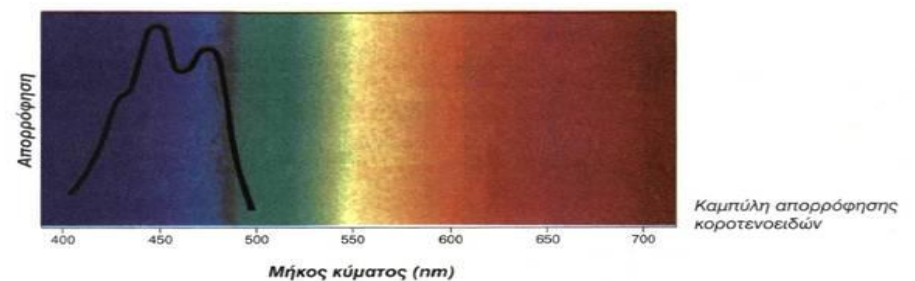


© 1995 CHP

Φωτοσυνθετικές χρωστικές

Στο κύτταρο η φωτεινή ακτινοβολία δεσμεύεται από τις φωτοσυνθετικές χρωστικές, οι οποίες στα ανώτερα φυτά βρίσκονται μέσα στα grana των χλωροπλαστών. Ανήκουν σε δύο κατηγορίες:

- τις **χλωροφύλλες**. Συνηθέστερες είναι οι χλωροφύλλες α και β που απορροφούν κυρίως την ερυθρή και μπλε ακτινοβολία αντίστοιχα και ανακλούν την πράσινη.
- τα **καροτενοειδή**. Απορροφούν κυρίως τη μπλε ακτινοβολία και ανακλούν το κίτρινο και το πορτοκαλί.



Πορεία της φωτοσύνθεσης

Η φωτοσύνθεση περιλαμβάνει δύο ομάδες αντιδράσεων:

1. τις αντιδράσεις που εξαρτώνται από το φως (**φωτεινή φάση**) που γίνονται στα grana των χλωροπλαστών και κατά τις οποίες η φωτεινή ενέργεια χρησιμοποιείται για τη σύνθεση μορίων ATP και τη δημιουργία υδρογόνου ($H^+ + e^-$).
2. τις αντιδράσεις που είναι ανεξάρτητες από την ύπαρξη φωτός (**σκοτεινή φάση**) που γίνονται στο στρώμα των χλωροπλαστών και κατά τις οποίες τα μόρια του ATP και του υδρογόνου (που παρήχθησαν κατά τη φωτεινή φάση) χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή του CO_2 σε υδατάνθρακες (γλυκόζη).

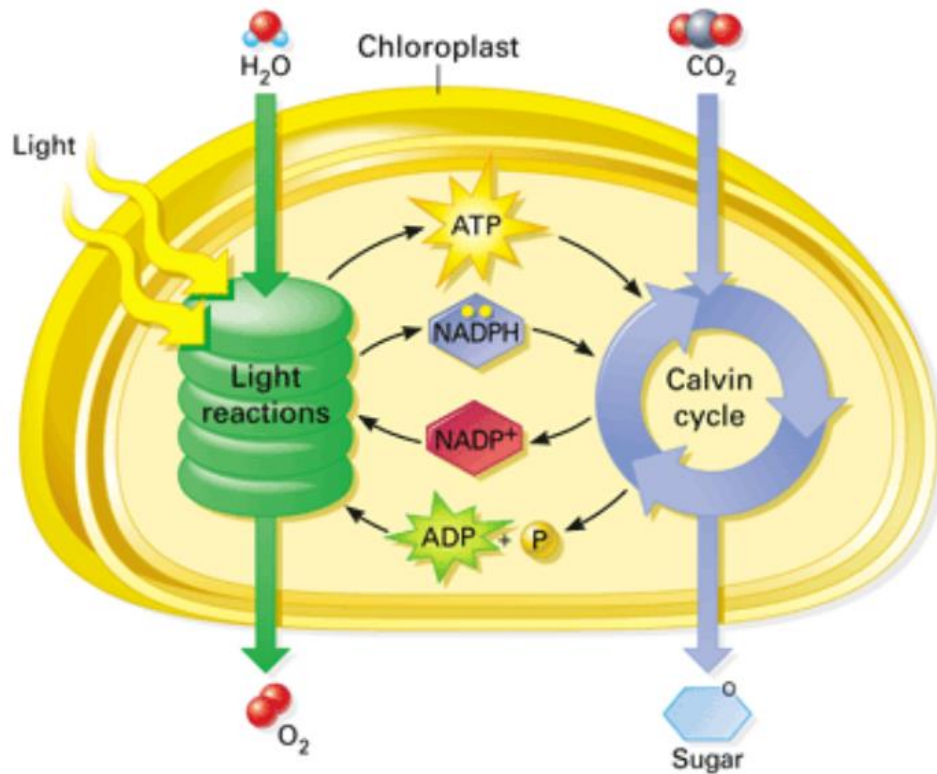
Φωτεινή φάση

Κατά τη φωτεινή φάση συμβαίνουν τα εξής:

1. Μόρια χλωροφύλλης δεσμεύουν **φωτεινή ενέργεια**, **διεγείρονται** και στη συνέχεια **αποδιεγείρονται**. Η ενέργεια που αποδίδεται κατά την αποδιέγερση προκαλεί τον **ιονισμό** (απώλεια e^-) άλλων μορίων χλωροφύλλης.
2. Μέρος της ενέργειας που παράγεται προκαλεί τη διάσπαση μορίων νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο (**φωτόλυση νερού**) και σχηματίζεται **ATP** από ADP.
3. Το O_2 που παράγεται από τη φωτόλυση του H_2O ελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα.
4. Το υδρογόνο δεσμεύεται από μόρια του **συνενζύμου NADP** τα οποία μετατρέπονται σε **NADPH**.
5. Τα μόρια **ATP** και **NADPH** χρησιμοποιούνται στις αντιδράσεις της σκοτεινής φάσης.

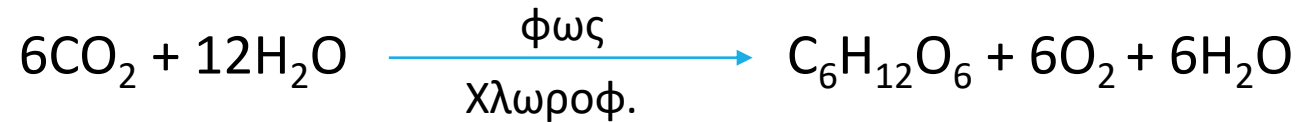
Σκοτεινή φάση

- Κατά τη φάση αυτή χρησιμοποιούνται το **ATP** και το **NADPH** που παράγονται κατά τη φωτεινή φάση και το **CO₂** που δεσμεύεται από την ατμόσφαιρα.
- Οι αντιδράσεις της σκοτεινής φάσης είναι πολύπλοκες και σχηματίζουν έναν κύκλο που ονομάζεται **κύκλος του Calvin**.
- Το πρώτο βήμα του κύκλου είναι η δέσμευση του **CO₂** από μία πεντόζη. Ακολουθεί σειρά αντιδράσεων και τελικά παράγεται **γλυκόζη** και άλλες ουσίες καθώς και **H₂O**.



Γενική αντίδραση φωτοσύνθεσης

Η αντίδραση που περιγράφει συνολικά τη φωτοσύνθεση είναι:



Στα φυτά, μέρος της γλυκόζης που σχηματίζεται κατά τη φωτοσύνθεση, αποθηκεύεται με τη μορφή αμύλου στους αμυλοπλάστες. Οι αμυλοπλάστες βρίσκονται στα φυτικά κύτταρα αλλά και σε ειδικά αποταμιευτικά μέρη των φυτών, όπως είναι οι κόνδυλοι της πατάτας.

Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση της φωτοσύνθεσης

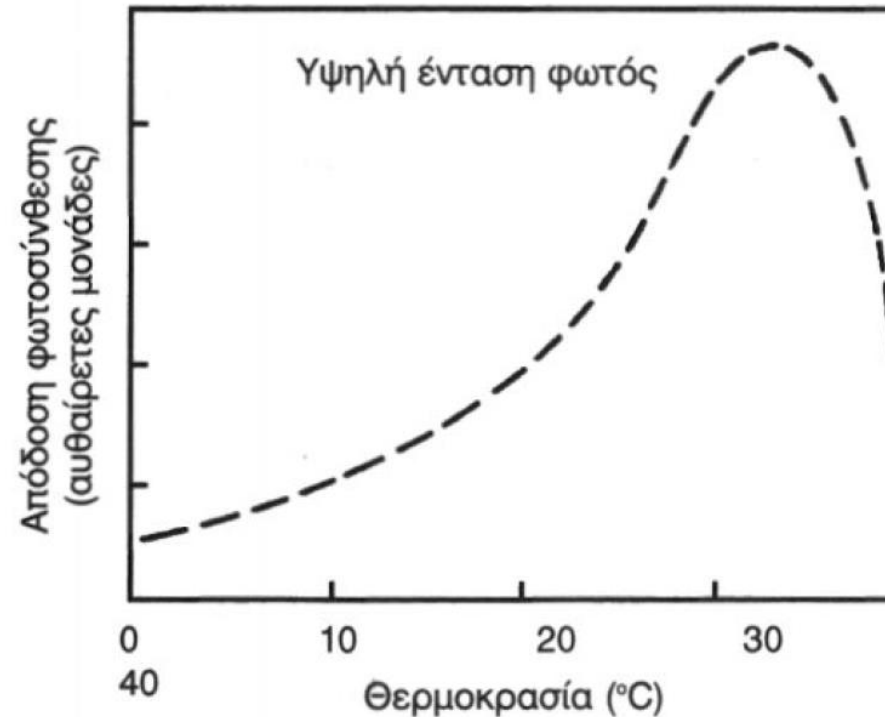
Η **απόδοση** της φωτοσύνθεσης υπολογίζεται μετρώντας το οξυγόνο που παράγεται στη μονάδα του χρόνου. Η απόδοση αυτή μεταβάλλεται γιατί η φωτοσύνθεση επηρεάζεται από περιβαλλοντικούς παράγοντες, που δε μένουν σταθεροί στη διάρκεια του έτους.

Οι κυριότεροι περιβαλλοντικοί παράγοντες είναι:

1. Η θερμοκρασία.
2. Το φως.
3. Το διοξείδιο του άνθρακα.
4. Το νερό.
5. Τα ανόργανα άλατα.

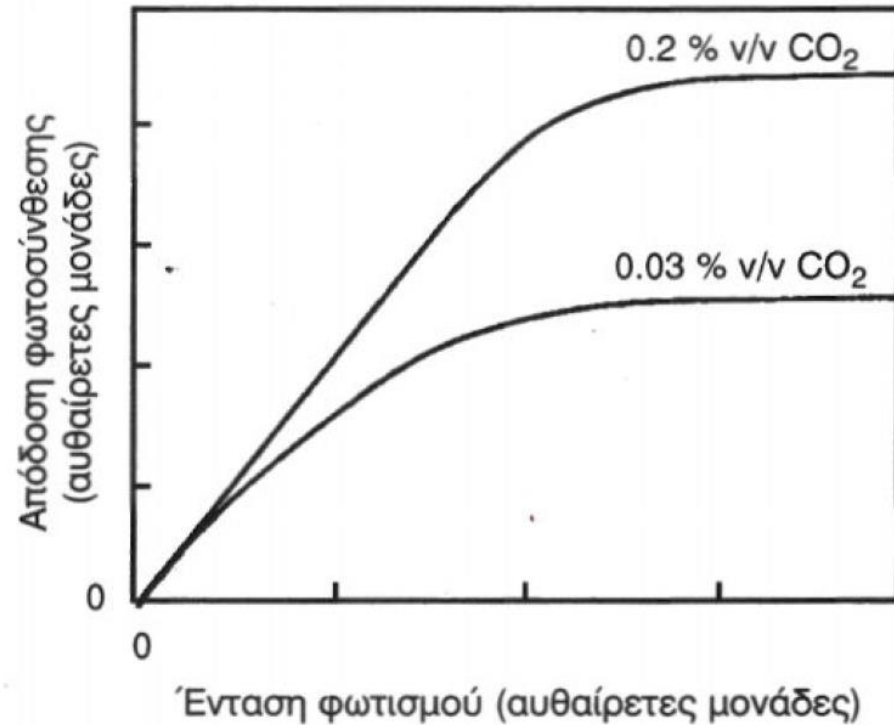
Η θερμοκρασία

- Η θερμοκρασία επηρεάζει την ταχύτητα της φωτοσύνθεσης γιατί επηρεάζει τη δράση των ενζύμων.
- Σε υψηλή και σταθερή ένταση φωτός, με την **αύξηση** της θερμοκρασίας, **αυξάνεται** και η απόδοση της φωτοσύνθεσης.
- Όταν η θερμοκρασία ξεπεράσει τους 30 °C, τα ένζυμα καταστρέφονται και η απόδοση της φωτοσύνθεσης μειώνεται.



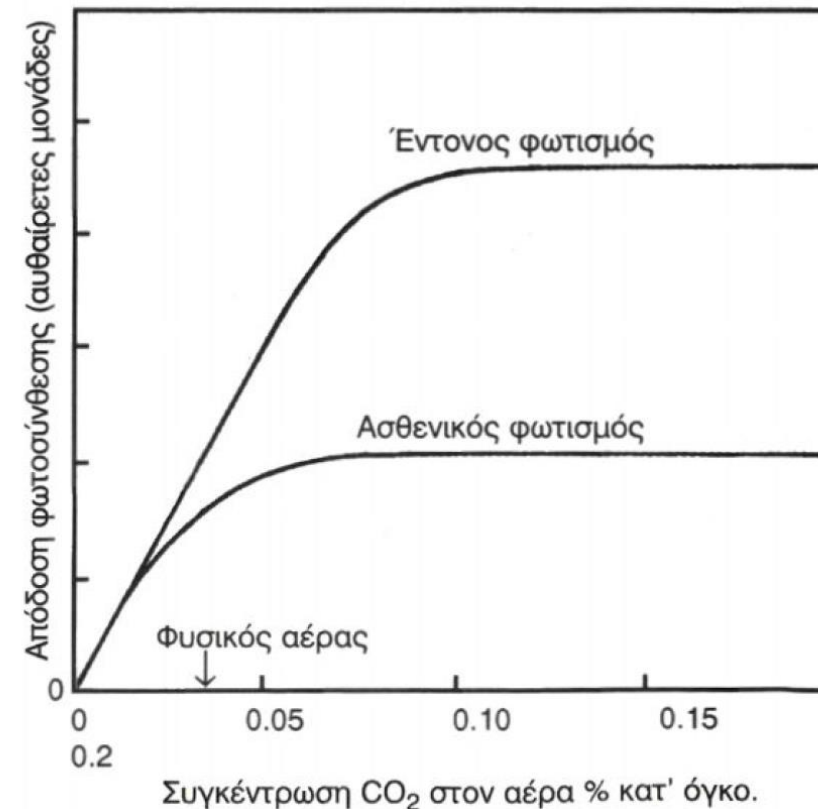
Το φως

- Σε θερμοκρασία 20 °C και κανονική συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα (0,03% κατ' όγκο) στην ατμόσφαιρα, η απόδοση της φωτοσύνθεσης **αυξάνεται** με την **αύξηση** της έντασης του φωτός.
- Αυτό συμβαίνει μέχρι ενός ορισμένου σημείου γιατί στη συνέχεια η απόδοση της φωτοσύνθεσης παραμένει σταθερή.



Το διοξείδιο του άνθρακα

- Η απόδοση της φωτοσύνθεσης εξαρτάται και από τη συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα. Αυτό είναι φυσικό αφού το CO_2 συμμετέχει στις αντιδράσεις της σκοτεινής φάσης.
- Σε υψηλή ένταση φωτός και σταθερή θερμοκρασία η απόδοση της φωτοσύνθεσης **αυξάνεται με την αύξηση** της συγκέντρωσης του CO_2 .
- Αυτό συμβαίνει μέχρι ενός σημείου και στη συνέχεια παραμένει σταθερή.



Το νερό

Σε συνθήκες έλλειψης νερού (ξηρασία) παρατηρείται **ελάττωση** της απόδοσης της φωτοσύνθεσης που οφείλεται:

- στην έλλειψη νερού που θα πάρει μέρος στις αντιδράσεις της φωτεινής φάσης.
- στο κλείσιμο των στομάτων. Το φυτό κλείνει τα στόματα για να εμποδίσει την απώλεια νερού μέσω της διαπνοής. Ταυτόχρονα όμως κλείνει την είσοδο και για το CO_2 που είναι απαραίτητο για τη σύνθεση των υδατανθράκων κατά τη σκοτεινή φάση της φωτοσύνθεσης.

Τα ανόργανα άλατα

- Τα φυτά δεν μπορούν να αναπτυχθούν χρησιμοποιώντας μόνο CO_2 και H_2O .
- Για να διατηρήσουν τη δομή και τη λειτουργικότητά τους χρειάζονται στοιχεία και χημικές ενώσεις που δεν παράγονται με τη φωτοσύνθεση π.χ. για τη σύνθεση του μορίου της χλωροφύλλης είναι απαραίτητο το **άζωτο** και το **μαγνήσιο**.
- Όταν στο έδαφος στο οποίο αναπτύσσεται το φυτό υπάρχει **έλλειψη** αυτών των στοιχείων, τότε τα φύλλα του παραμένουν κίτρινα (**χλώρωση**), με συνέπεια η ταχύτητα της φωτοσύνθεσης να παραμένει χαμηλή.

Διάσπαση χημικών ουσιών

- Η τροφή εισέρχεται στο πεπτικό σύστημα και αρχίζει να διασπάται σταδιακά.
- Οι ουσίες μεγάλου ΜΒ που την αποτελούν (πρωτεΐνες, υδατάνθρακες, λιπίδια, νουκλεϊκά οξέα) διασπώνται σε απλούστερες (αμινοξέα, απλά σάκχαρα, λιπαρά οξέα και γλυκερόλη, νουκλεοτίδια) που φτάνουν στους ιστούς μέσω του κυκλοφορικού ή του λεμφικού συστήματος.
- Η διάσπαση των πολύπλοκων οργανικών ουσιών σε απλούστερες (πέψη) δεν αποδίδει ενέργεια με τη μορφή ATP για τον οργανισμό.

Αξιοποίηση χημικών ουσιών

Σε κάθε κύτταρο (φυτικό ή ζωικό) οι απλές ουσίες, που προέρχονται από τη διάσπαση των μεγαλομοριακών ενώσεων, αξιοποιούνται με δύο τρόπους:

1. χρησιμοποιούνται πάλι για τη σύνθεση νέων μεγαλομοριακών ενώσεων που είναι απαραίτητες ως δομικά ή λειτουργικά συστατικά του κυττάρου.
2. **οξειδώνονται**, αποδίδοντας σταδιακά χημική ενέργεια μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται **κυτταρική αναπνοή**. Ένα μέρος της ενέργειας που παράγεται ελευθερώνεται ως θερμότητα και δεν αξιοποιείται για τις κυτταρικές λειτουργίες. Το υπόλοιπο ποσό ενέργειας διατίθεται στα κύτταρα με τη μορφή ATP.

Κυτταρική αναπνοή

Η κυτταρική αναπνοή διακρίνεται σε:

- **αερόβια αναπνοή** που γίνεται με τη βοήθεια οξυγόνου (οξειδωτικό),
- **αναερόβια αναπνοή** που γίνεται χωρίς οξυγόνο.

Το κύτταρο παράγει ενέργεια διασπώντας συνήθως υδατάνθρακες ή λίπη. Όταν όμως υπάρχει ανάγκη, μπορεί να παράγει ενέργεια και από τη διάσπαση πρωτεϊνών.

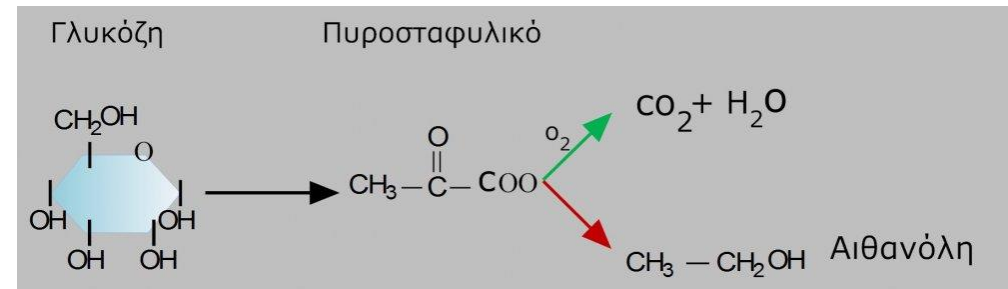
Διάσπαση γλυκόζης

Η διάσπαση της γλυκόζης περιλαμβάνει τρεις διαδικασίες:

1. τη γλυκόλυση,
2. τον κύκλο του κιτρικού οξέος ή κύκλο του Krebs,
3. την οξειδωτική φωσφορυλίωση.

Γλυκόλυση

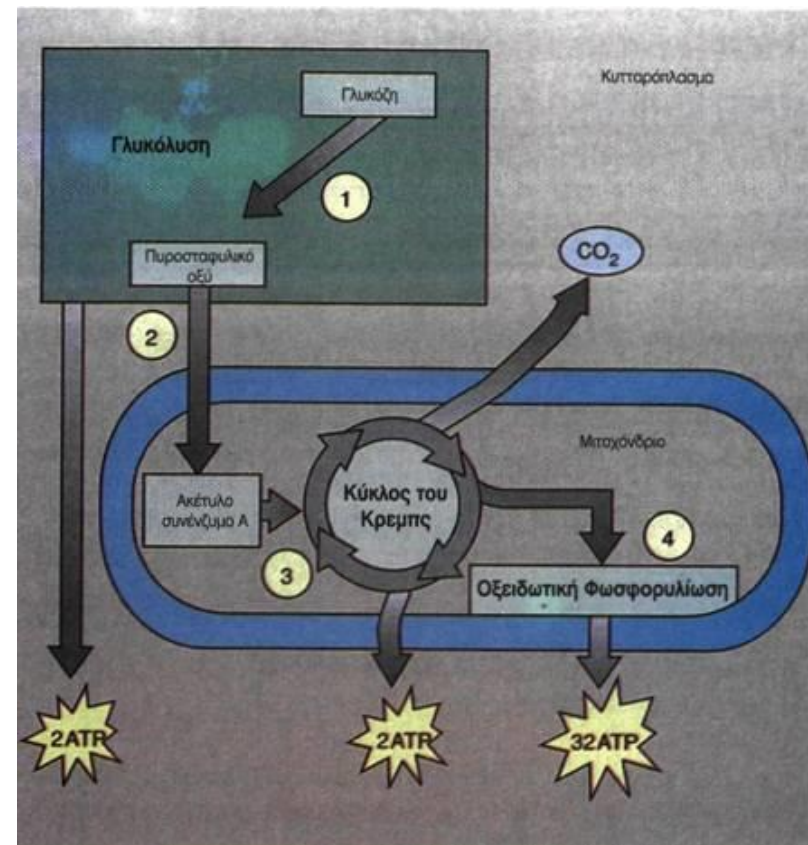
- Η γλυκόλυση είναι το 1^ο στάδιο διάσπασης της γλυκόζης. Γίνεται στο **κυτταρόπλασμα χωρίς O₂**.
- 1 μόριο γλυκόζης διασπάται αρχικά σε 2 μόρια τριοζών, οι οποίες μετατρέπονται σε 2 μόρια **πυροσταφυλικού οξέος**. Το κέρδος σε ενέργεια είναι **δύο μόρια ATP**.
- Παρουσία O₂, το πυροσταφυλικό εισέρχεται στο μιτοχόνδριο και οξειδώνεται πλήρως προς CO₂ (**αερόβια αναπνοή**). Απουσία O₂, το πυροσταφυλικό μετατρέπεται, ανάλογα με το είδος του κυττάρου, σε αιθυλική αλκοόλη και CO₂ ή σε γαλακτικό οξύ (**αναερόβια αναπνοή**).



Αερόβια αναπνοή

Στην αερόβια αναπνοή, η πλήρης οξείδωση του πυροσταφυλικού οξέος, που έχει παραχθεί από τη γλυκόλυση, γίνεται σε δύο στάδια:

- τον κύκλο του κιτρικού οξέος ή κύκλο του Krebs,
- την οξειδωτική φωσφορυλίωση.



Κύκλος κιτρικού οξέος

- Ο κύκλος του κιτρικού οξέος ή κύκλος του Krebs περιλαμβάνει μια σειρά αντιδράσεων που γίνονται στη **μήτρα** των μιτοχονδρίων **χωρίς O_2** .
- Το πυροσταφυλικό οξύ μετατρέπεται σε **ακετυλο-συνένζυμο A** και με τη μορφή αυτή εισέρχεται στον κύκλο του κιτρικού οξέος. Κατά τη μετατροπή αυτή παράγεται και CO_2 .
- Από το ακετυλο-συνένζυμο A σχηματίζονται μεταξύ άλλων ATP και CO_2 .
- Το **κέρδος σε ενέργεια** από τη διάσπαση κάθε αρχικού μορίου γλυκόζης σε αυτό το στάδιο είναι **2 μόρια ATP**.

Οξειδωτική φωσφορυλίωση

- Οι αντιδράσεις της οξειδωτικής φωσφορυλίωσης γίνονται στις **αναδιπλώσεις της εσωτερικής μεμβράνης** του μιτοχονδρίου.
- Απαιτείται O_2 .
- 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 H_2O .

Ενεργειακό κέρδος

Συμπερασματικά, από την πλήρη οξείδωση ενός μορίου γλυκόζης σε CO_2 και H_2O παράγονται **36 μόρια ATP**:

- 2 από το στάδιο της γλυκόλυσης,
- 2 από τον κύκλο του κιτρικού οξέος και
- 32 από το στάδιο της οξειδωτικής φωσφορυλίωσης.

Η γενική εξίσωση της κυτταρικής αναπνοής είναι:



Έλεγχος αερόβιας κυτταρικής αναπνοής

- Υπάρχει **μηχανισμός** που ελέγχει τη διεξαγωγή των αντιδράσεων της κυτταρικής αναπνοής ανάλογα με τις ανάγκες του οργανισμού.
- Όταν παράγονται περισσότερα ATP από όσα χρειάζεται το κύτταρο, **αναστέλλεται** η δράση ενός από τα ένζυμα που εξυπηρετούν τη διαδικασία της **γλυκόλυσης**. Διακόπτεται έτσι η διάσπαση των σακχάρων. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται, μόλις ελαττωθούν τα μόρια ATP.
- Οι αντιδράσεις του κύκλου του Krebs, παρά το ότι δε χρησιμοποιούν O_2 , **δε γίνονται** σε αναερόβιες συνθήκες. Αυτό συμβαίνει γιατί τα προϊόντα του κύκλου πρέπει να καταναλώνονται –αλλιώς συσσωρεύονται- και η κατανάλωση αυτή γίνεται μόνο μέσω οξειδωτικής φωσφορυλίωσης που απαιτεί O_2 .

Αναερόβια αναπνοή

Αναερόβια αναπνοή πραγματοποιείται από:

- μία μεγάλη ποικιλία μικροοργανισμών που οξειδώνουν τη γλυκόζη για την παραγωγή ATP χωρίς την παρουσία οξυγόνου.
- κύτταρα πολυκύτταρων οργανισμών που περιστασιακά κάνουν αναερόβια αναπνοή όταν είναι αναγκασμένα να παράγουν ενέργεια και δεν υπάρχει αρκετό οξυγόνο στο περιβάλλον τους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα μυϊκά κύτταρα.

Αλκοολική ζύμωση

- Κατά την αλκοολική ζύμωση, ένα μόριο γλυκόζης, μέσω της γλυκόλυσης, διασπάται σε δύο μόρια πυροσταφυλικού οξέος, με απόδοση δύο μορίων ATP, όπως γίνεται και κατά την αερόβια αναπνοή. Τα δύο μόρια πυροσταφυλικού οξέος μετατρέπονται σε δύο μόρια **αιθυλικής αλκοόλης** και δύο μόρια **CO₂**.
- Η αλκοολική ζύμωση γίνεται κυρίως στις **ζύμες**. Γίνεται όμως και σε τμήματα φυτών π.χ. στο εσωτερικό των κονδύλων της πατάτας, όπου δε φτάνει O₂ ή αυτό βρίσκεται σε πολύ μικρή συγκέντρωση.
- Σε εφαρμογές της αλκοολικής ζύμωσης στηρίζεται η παραγωγή μπίρας, κρασιού και άρτου.

Γαλακτική ζύμωση

- Κατά τη γαλακτική ζύμωση, τα δύο μόρια πυροσταφυλικού οξέος μετατρέπονται σε δύο μόρια **γαλακτικού οξέος**.
- Η γαλακτική ζύμωση γίνεται σε **μικροοργανισμούς** (βακτήρια) αλλά και σε **κύτταρα ανώτερων οργανισμών** π.χ. μυϊκά, όταν η διαθέσιμη ποσότητα οξυγόνου στο περιβάλλον τους είναι περιορισμένη.
- Η παρασκευή των κυριότερων προϊόντων του γάλακτος, όπως το γιαούρτι και το τυρί, γίνονται με τη συμμετοχή μικροοργανισμών που κάνουν γαλακτική ζύμωση.

Διάσπαση λιπιδίων

- Οι πρώτες ουσίες που οξειδώνονται με τη διαδικασία της κυτταρικής αναπνοής είναι οι **υδατάνθρακες** εφόσον υπάρχουν διαθέσιμοι στο κύτταρο.
- Επόμενα στη σειρά «προτίμησης» του κυττάρου έρχονται τα **ουδέτερα λίπη**, που αρχικά διασπώνται σε γλυκερόλη και λιπαρά οξέα. Τα **λιπαρά οξέα** είναι μόρια πλούσια σε ενέργεια και γ'αυτό κάποια κύτταρα π.χ. τα κύτταρα των σκελετικών μυών, εξασφαλίζουν από τα μόρια αυτά – και κάτω από φυσιολογικές συνθήκες- ένα μέρος της ενέργειας που τους είναι απαραίτητη.

Διάσπαση πρωτεϊνών

- Οι πρωτεΐνες, λόγω του σημαντικού δομικού και λειτουργικού ρόλου στο κύτταρο, χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας, μόνο αν δεν υπάρχουν καθόλου σάκχαρα ή λιπίδια π.χ. σε μακρόχρονη ασιτία.
- Οι πρωτεΐνες **υδρολύονται** σε αμινοξέα και στη συνέχεια **απομακρύνονται** οι αμινομάδες.
- Το υπόλοιπο μέρος του μορίου μπορεί να εισέλθει στον κύκλο του κιτρικού οξέος ή να μετατραπεί πρώτα σε λιπαρό οξύ ή σε πυροσταφυλικό οξύ ή σε ακετυλο-συνένζυμο Α και στη συνέχεια να ακολουθήσει η οξείδωσή του.

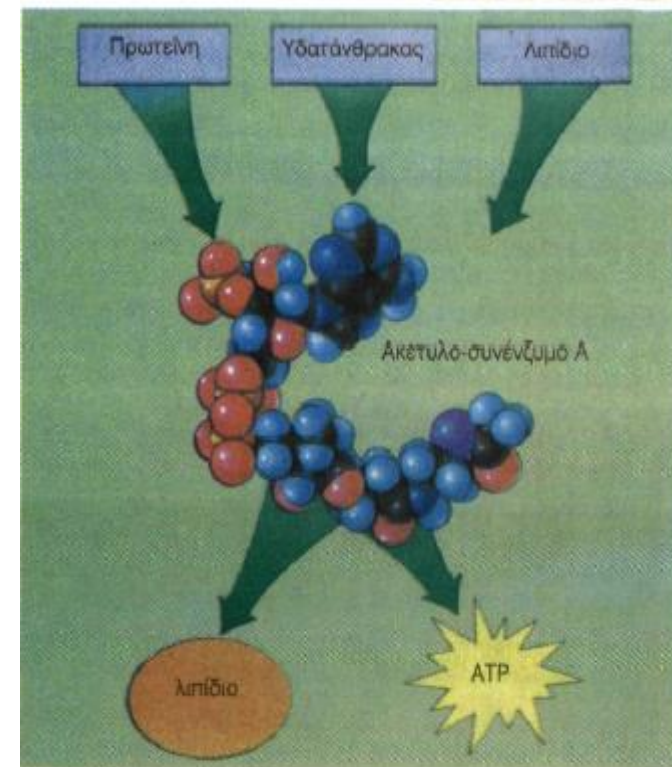
Κοινή μεταβολική πορεία

Σχεδόν όλες οι ουσίες που παίρνουμε με την τροφή μας μπορούν, κατά το μεταβολισμό, να μετατραπούν σε **ακετυλο-συνένζυμο Α**.

Η πορεία του ακετυλο-συνενζύμου Α είναι:

- είτε χρησιμοποιείται για τη σύνθεση λιπιδίου,
- είτε μπαίνει στον κύκλο του κιτρικού οξέος για να παραχθεί ενέργεια,

ανάλογα κάθε φορά με τις ανάγκες του κυττάρου.



Σχέση φωτοσύνθεσης και κυτταρικής αναπνοής

Σε ό,τι αφορά τους υδατάνθρακες, η κυτταρική αναπνοή ως μεταβολική πορεία είναι αντίστροφη της φωτοσύνθεσης.

Η ισορροπία ανάμεσα σε αυτές τις δύο διαδικασίες διατηρεί την ισορροπία ανάμεσα στο CO_2 και στο O_2 της ατμόσφαιρας.

