

Σύνοψη του ενδιαμέσου μεταβολισμού των φυτών

Γλυκόλυση, αναπνοή, οδός φωσφορικών πεντοζών & μεταβολισμός λιπιδίων



Ο ενδιαμέσος μεταβολισμός παρέχει ενέργεια και πρόδρομα βιοσυνθετικά μόρια για όλες τις ανάγκες του φυτού

Μεταβολισμός **αμύλου**
(αποθήκευση)

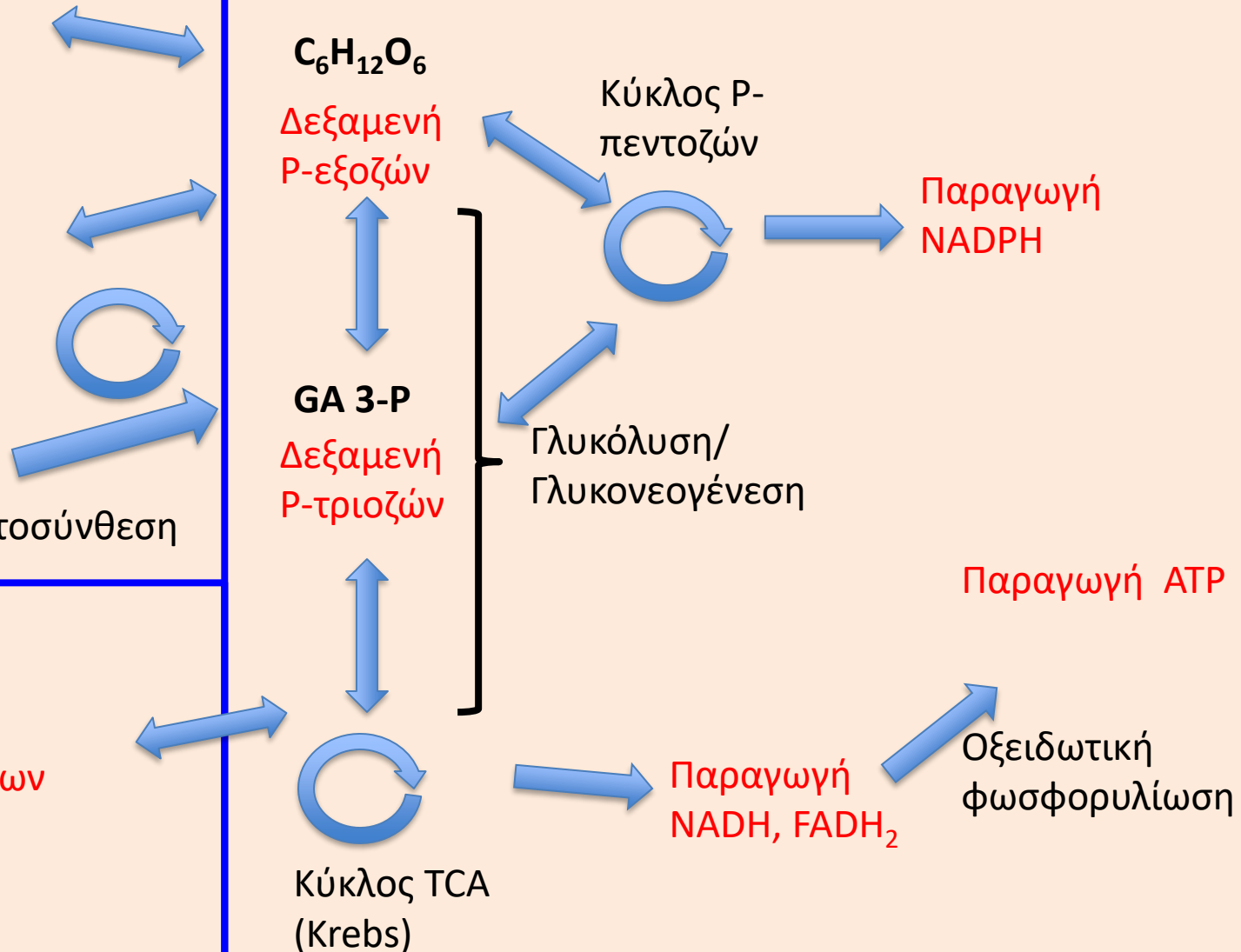
Μεταβολισμός **σουκρόζης**
(μεταφορά/σημ
ατοδότηση)



CO₂

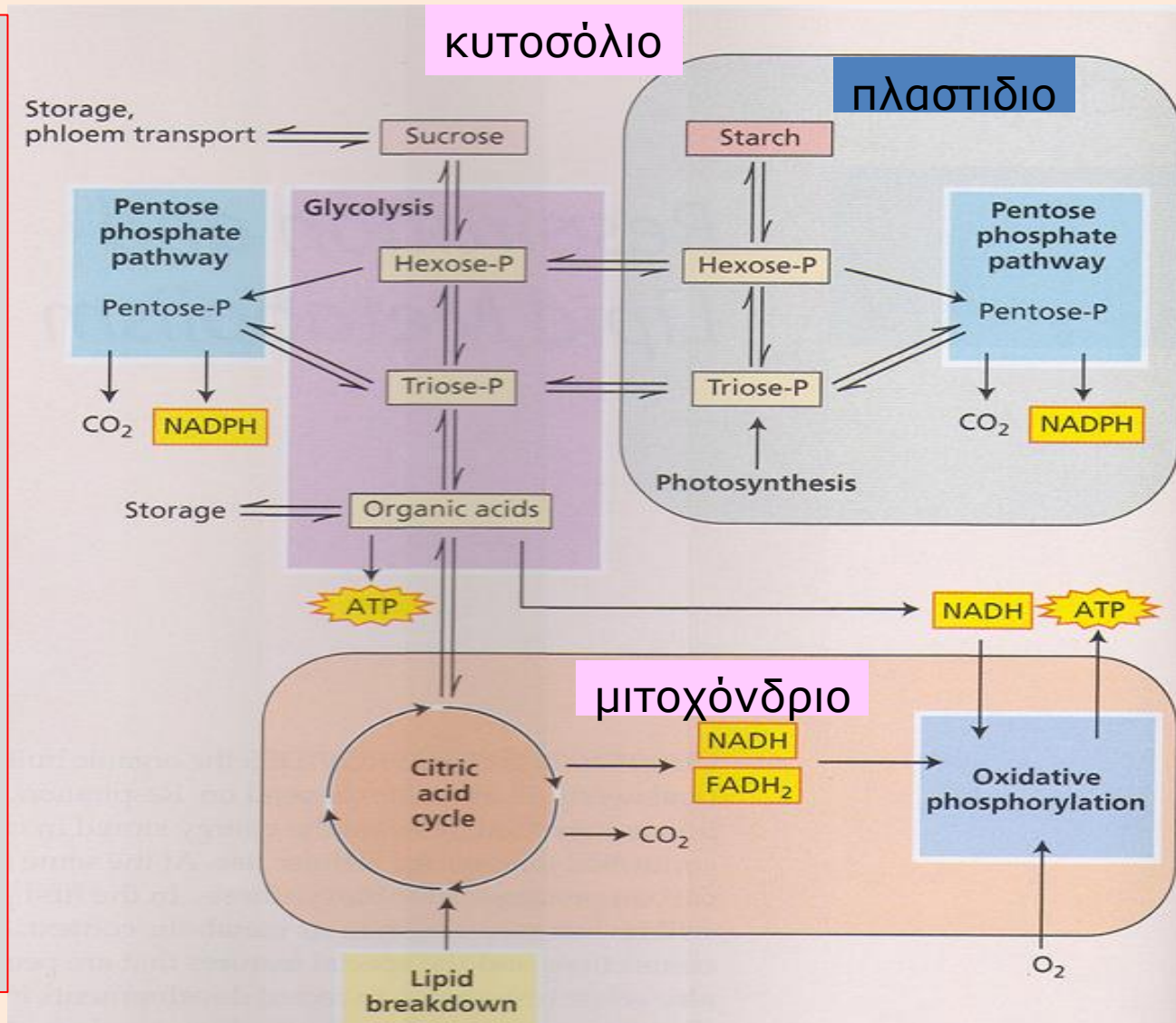
Φωτοσύνθεση

Σύνθεση/
β-οξείδωση **λιπιδίων**



Ο βασικός, κεντρικός μεταβολισμός των φυτών μοιάζει με άλλους ευκαρυώτες

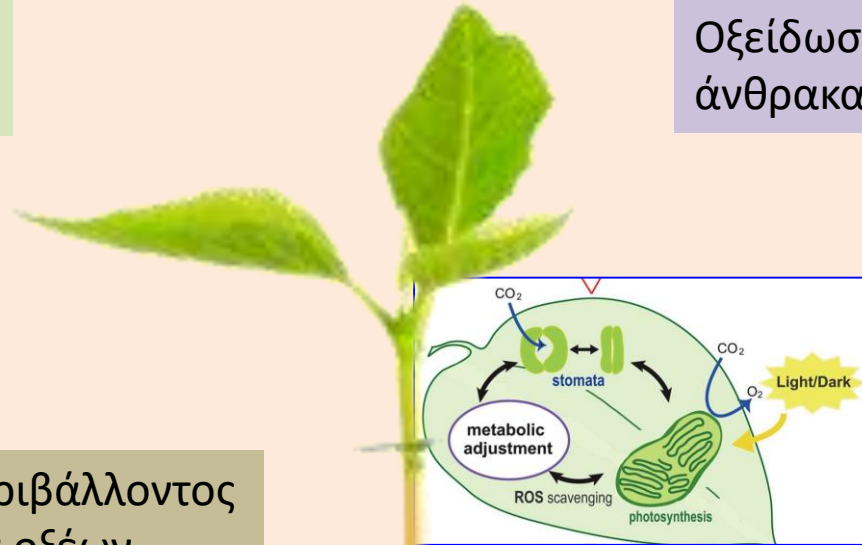
Σε γενικές γραμμές ο κεντρικός μεταβολισμός άνθρακα των φυτών είναι παρόμοιος με άλλους ευκαρυώτες. Ωστόσο, υπάρχουν **παραλλαγές** σε διάφορα βήματα & πολλές **παραπάνω διακλαδώσεις**. Πολλές βασικές διαδικασίες συμβαίνουν σε **διαφορετικά υποκυτταρικά οργανίδια** στα φυτά. Βασικότερη διαφορά παραμένει η **παρουσία των πλαστιδίων & της φωτοσύνθεσης**.



Εχει εξελιχθεί για να καλύπτει τις ιδιαιότερες ανάγκες των φυτών:

Δέσμευση άνθρακα
(CO₂)

Οξείδωση φωτοσυνθετικού
άνθρακα



Φυτικός μεταβολισμός

Τροποποίηση μικρο-περιβάλλοντος
λ.χ., έκκριση οργανικών οξέων
για αλλαγή του pH

Δέσμευση και αφομοίωση
ανόργανου αζώτου (N)

Αντιμετώπιση καταπονήσεων
χωρίς μετακίνηση.

Τα πολλαπλά ισοένζυμα δίνουν μεγαλύτερη «πλαστικότητα» στον φυτικό μεταβολισμό για απόκριση στις καταπονήσεις

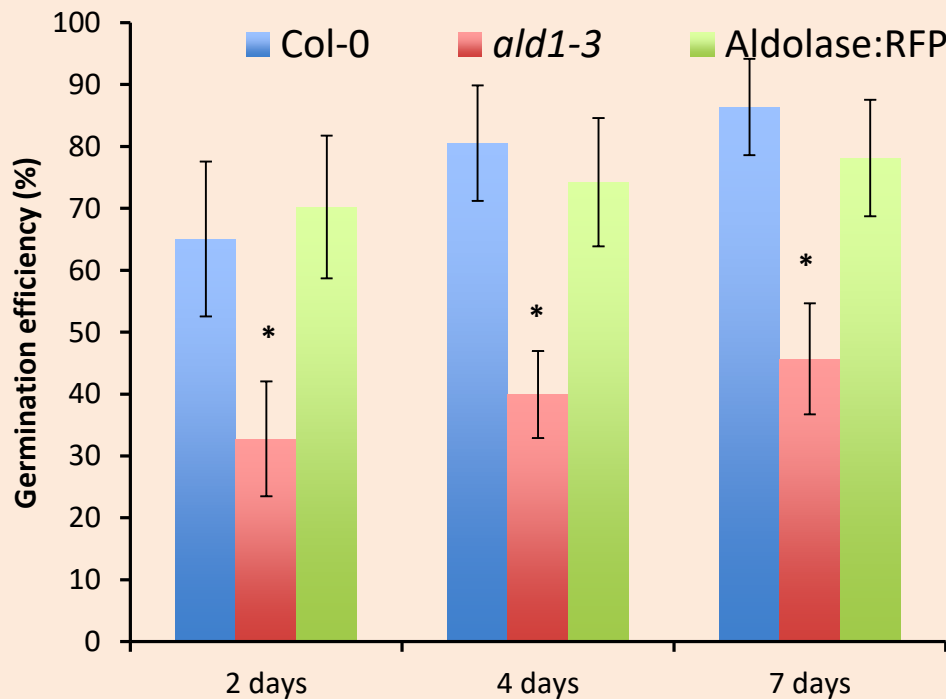
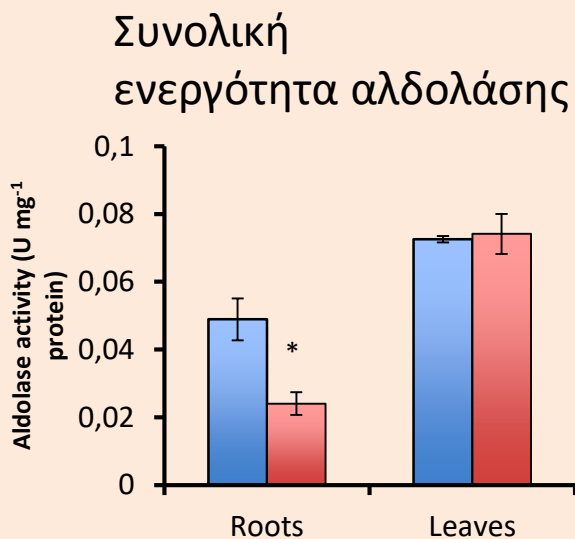
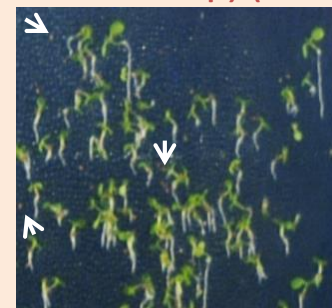
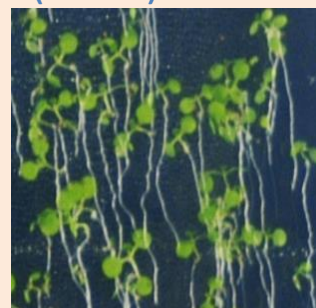
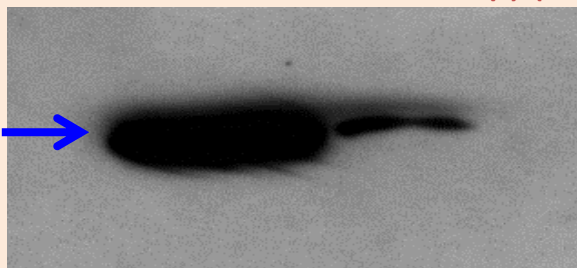
Wild type
(Col-0)

Μετάλλαγμα
Αλδολάσης (*ald1-3*)

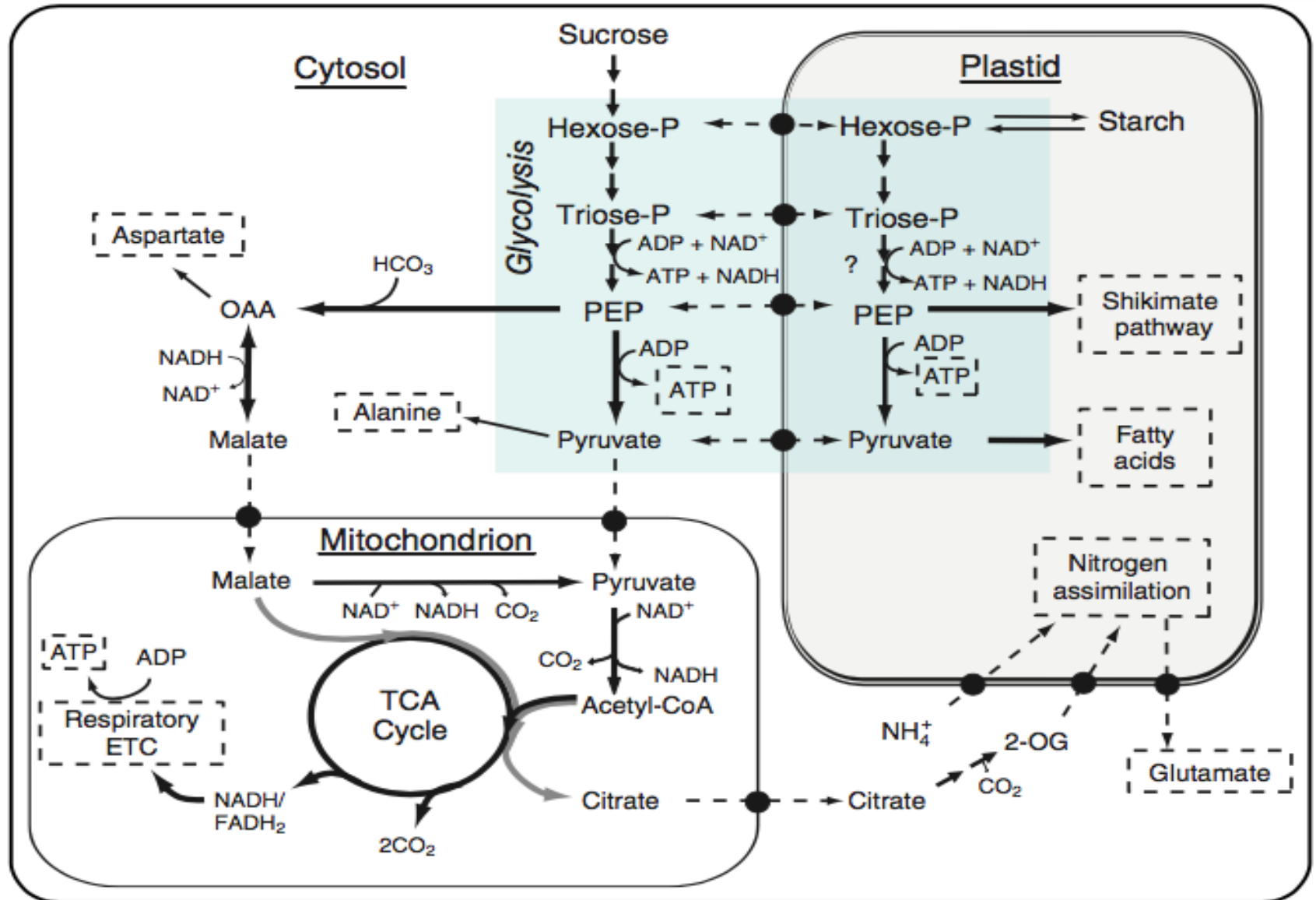
Wild type
(Col-0)

Μετάλλαγμα
αλδολάσης (*ald1-3*)

Anti-
Κυτοσολικ
ή
αλδολάση

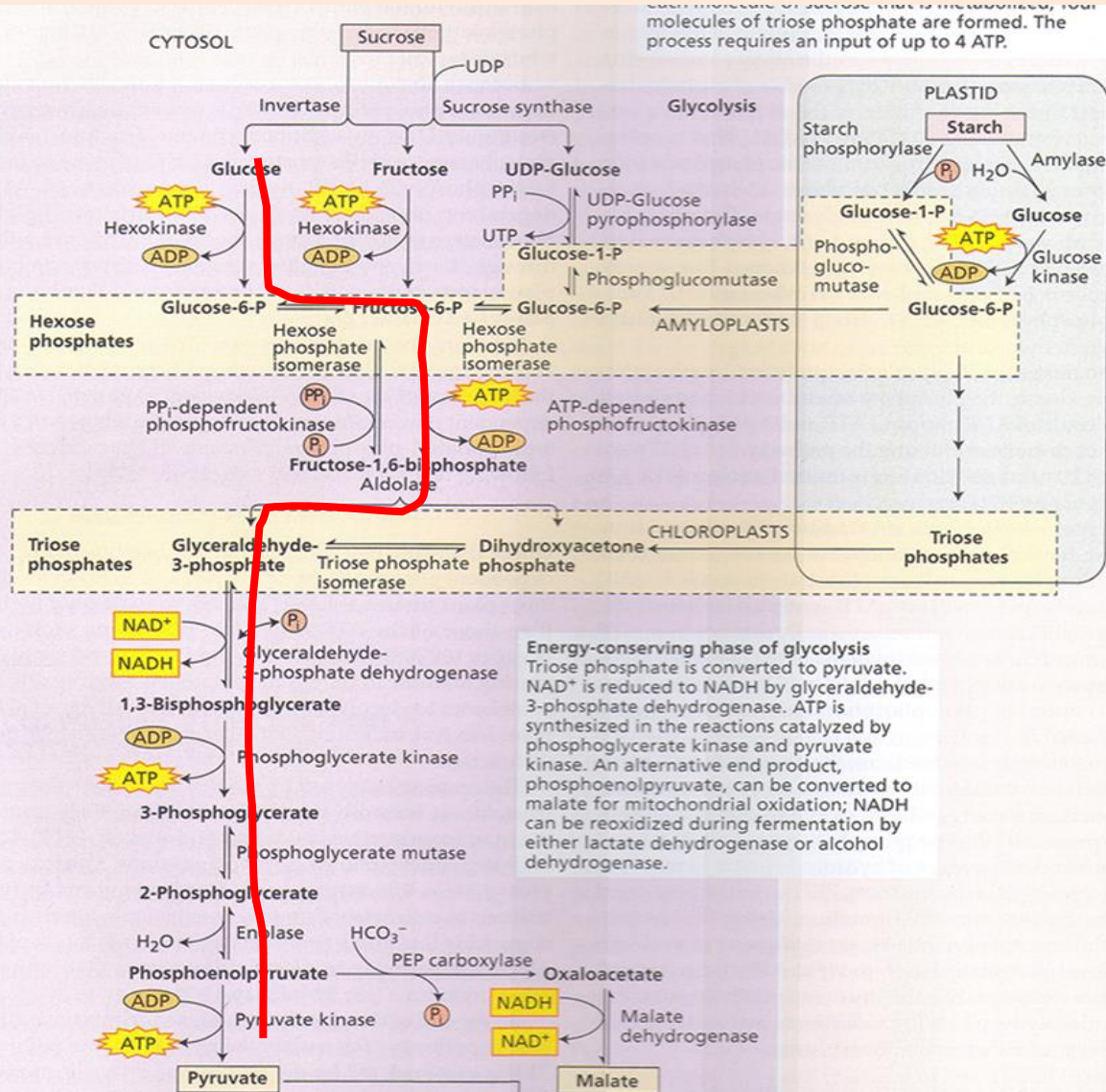


Η γλυκόλυση/γλυκονεογένεση συμβαίνουν στο κυτοσόλιο και τα πλαστίδια

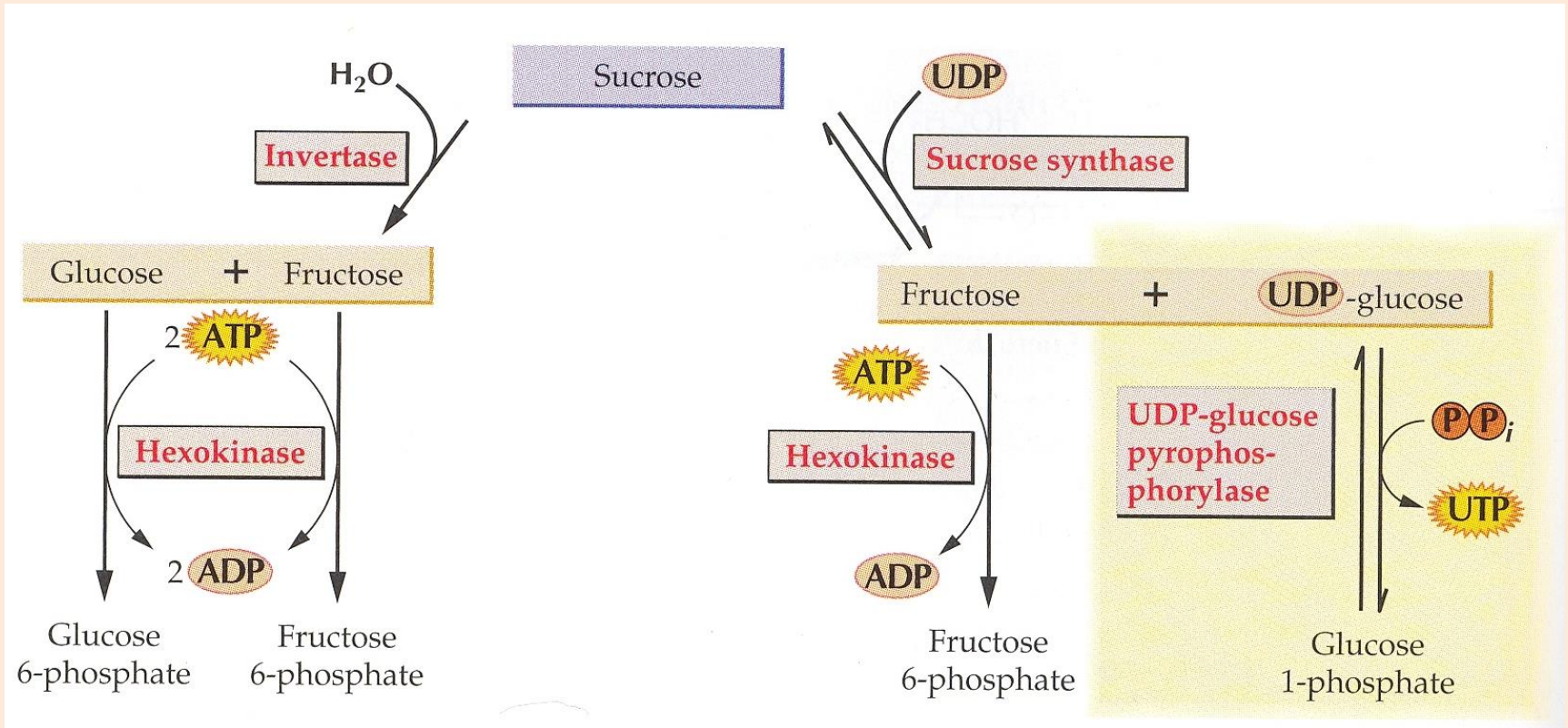


Τα φυτά επιτελούν την κλασική οδό της γλυκόλυσης αλλά & εναλλακτικές οδούς

Τα φυτά επιτελούν **EMP γλυκόλυση** (Embden, Meyerhoff, Parnas-κόκκινη γραμμή δίπλα). Αλλά εκτός από γλυκόζη, δέχονται UDP-γλυκόζη & φρουκτόζη από την **σουκρόζη**, φωσφορικές εξόζες από τον **καταβολισμό του αμύλου**, και φωσφορικές τριόζες απ' ευθείας από την **φωτοσύνθεση**. Επίσης, **παραλλαγές** γίνονται στις αντιδράσεις της **φωσφοφρουκτοκινάσης**, της **GAPDH** και της **κινάσης του πυροσταφυλικού**.



Ο άνθρακας φθάνει στα φυτικά κύτταρα σε μορφή σουκρόζης

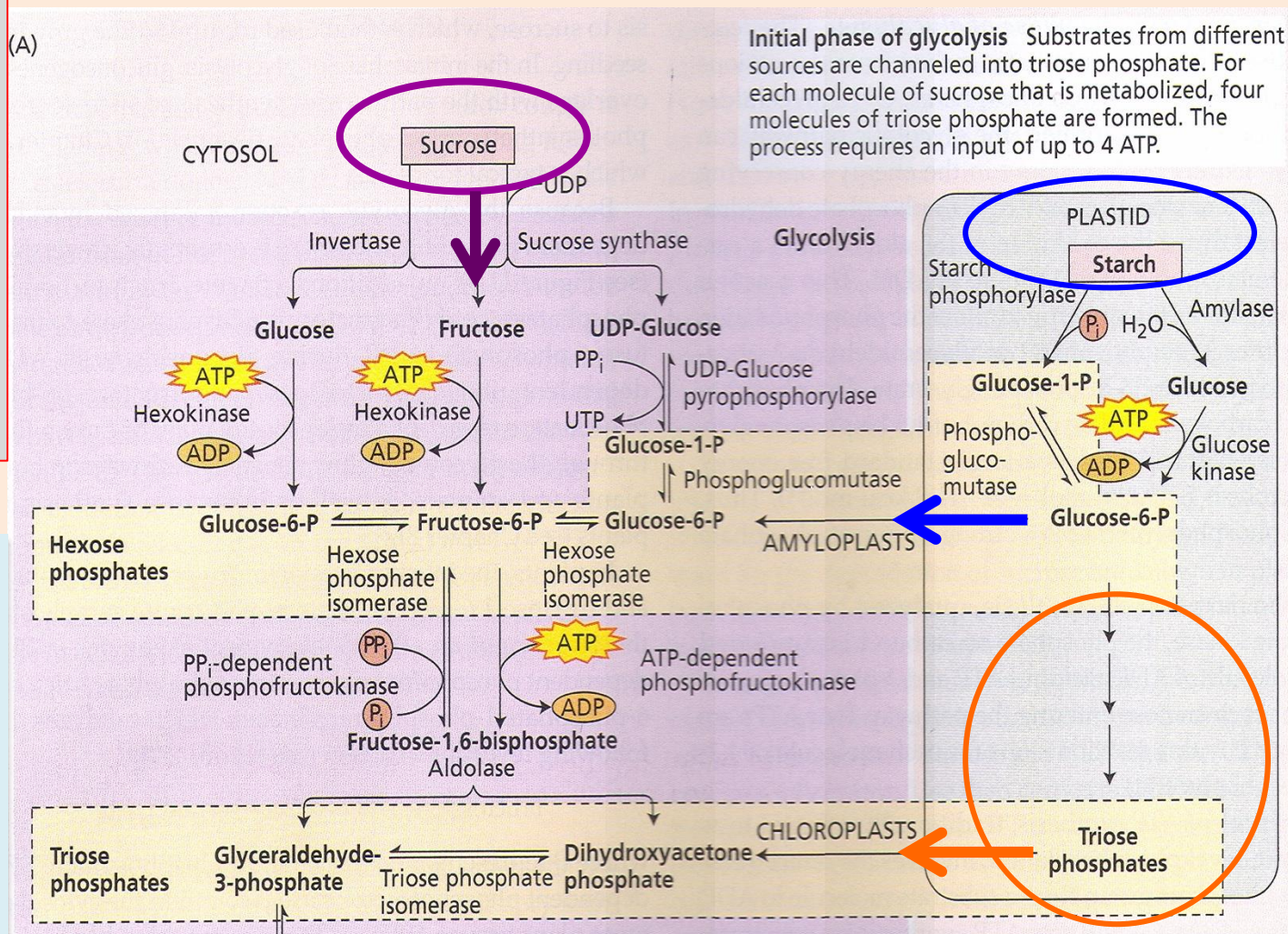


Ανάλογα με ποιό ένζυμο διασπά την σουκρόζη που φθάνει στο κύτταρο, **ινβερτάση** ή **συνθάση της σουκρόζης**, παράγονται αντίστοιχα, **γλυκόζη** και **φρουκτόζη** ή **UDP-γλυκόζη** και φρουκτόζη. Η εξοκινάση (hexokinase) δρα πάνω στην γλυκόζη και την φρουκτόζη. Η UDP-γλυκόζη απαιτεί αφαίρεση του UDP (με αντίστροφη δράση της πυροφωσφορυλάσης της UDP-γλυκόζης) πριν χρησιμοποιηθεί στην γλυκόλυση.

Στη γλυκόλυση των φυτών ο άνθρακας φθάνει και απο τα πλαστίδια

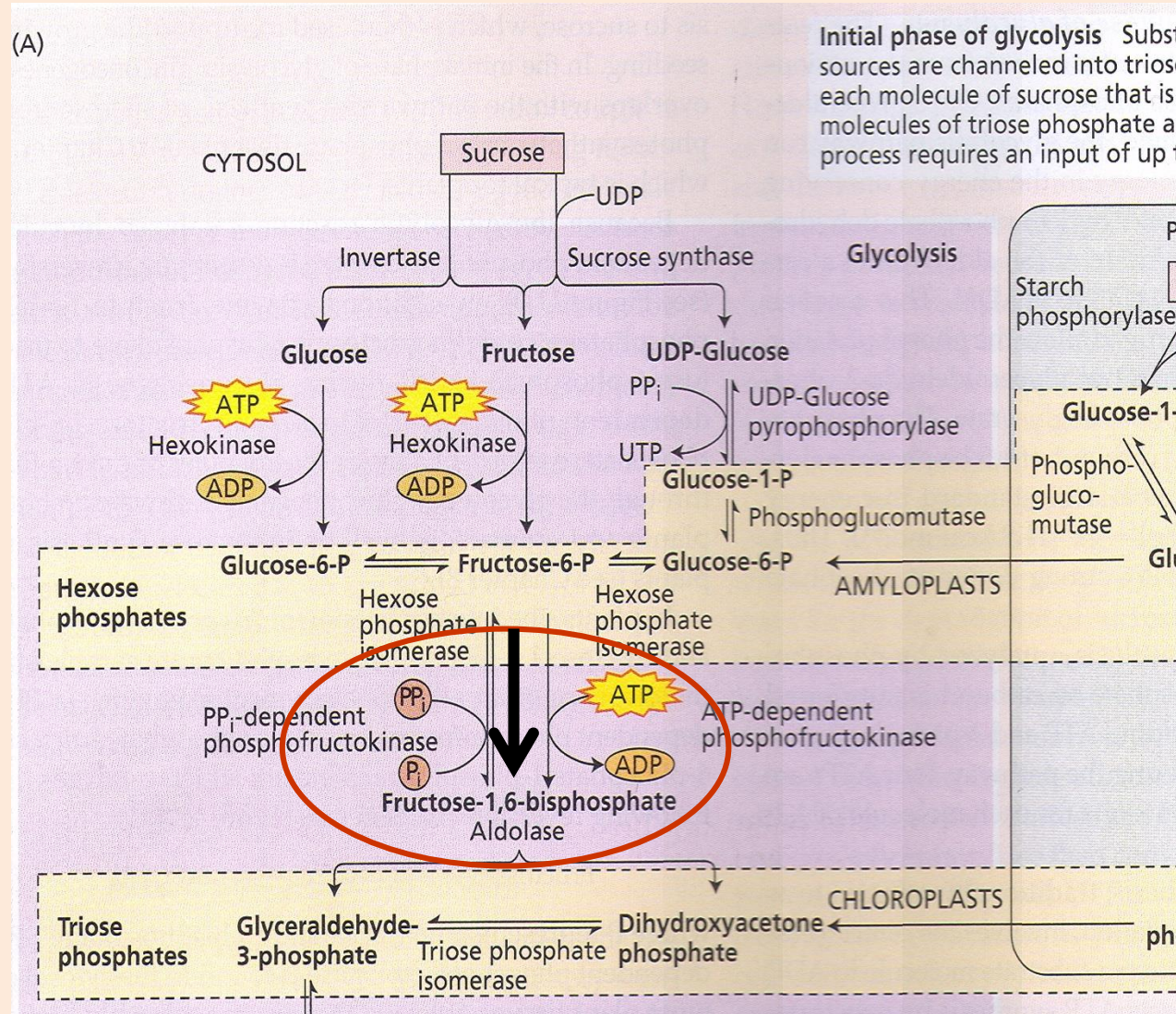
Τα πλαστίδια έχουν **ισοένζυμα** και των 10 **γλυκολυτικών ενζύμων**, μπορούν να μετατρέψουν το αποθηκευμένο άμυλο σε **φωσφορικές εξόζες** ή **τριόζες**, εως και πυροσταφυλικό ή να **επιτελέσουν γλυκονεογένεση**.

Μεταλλάγματα ενός **ισοενζύμου** φυτικών γλυκολυτικών ενζύμων συνήθως δεν είναι **θησιγόνα** & **επιφέρουν ήπιους, εώς και καθόλου, φαινότυπους**



Η PFi-φωσφοφρουκτοκινάση είναι ένα εναλλακτικό ένζυμο της φυτικής γλυκόλυσης

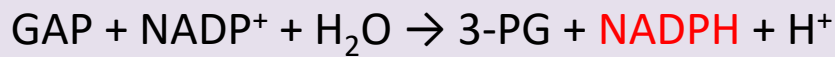
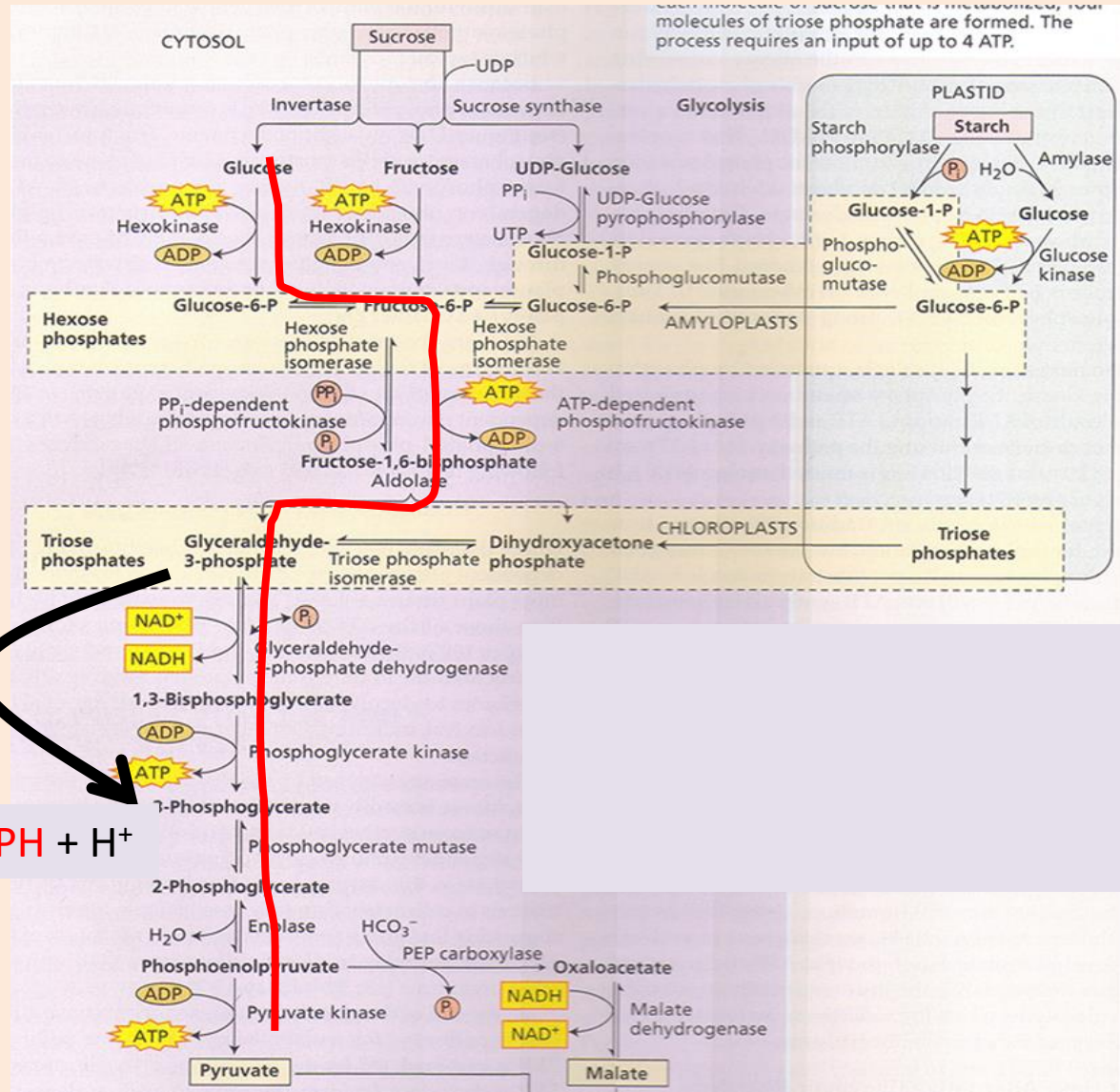
Η εξαρτώμενη από πυροφωσφορικά (PPi) φωσφοφρουκτοκινάση (PFK) αποσυνδέει αυτό το βήμα της γλυκόλυσης από την δεξαμενή ATP/ADP, από μη-αντιστρεπτή η αντίδραση της PFK γίνεται αντιστρεπτή.



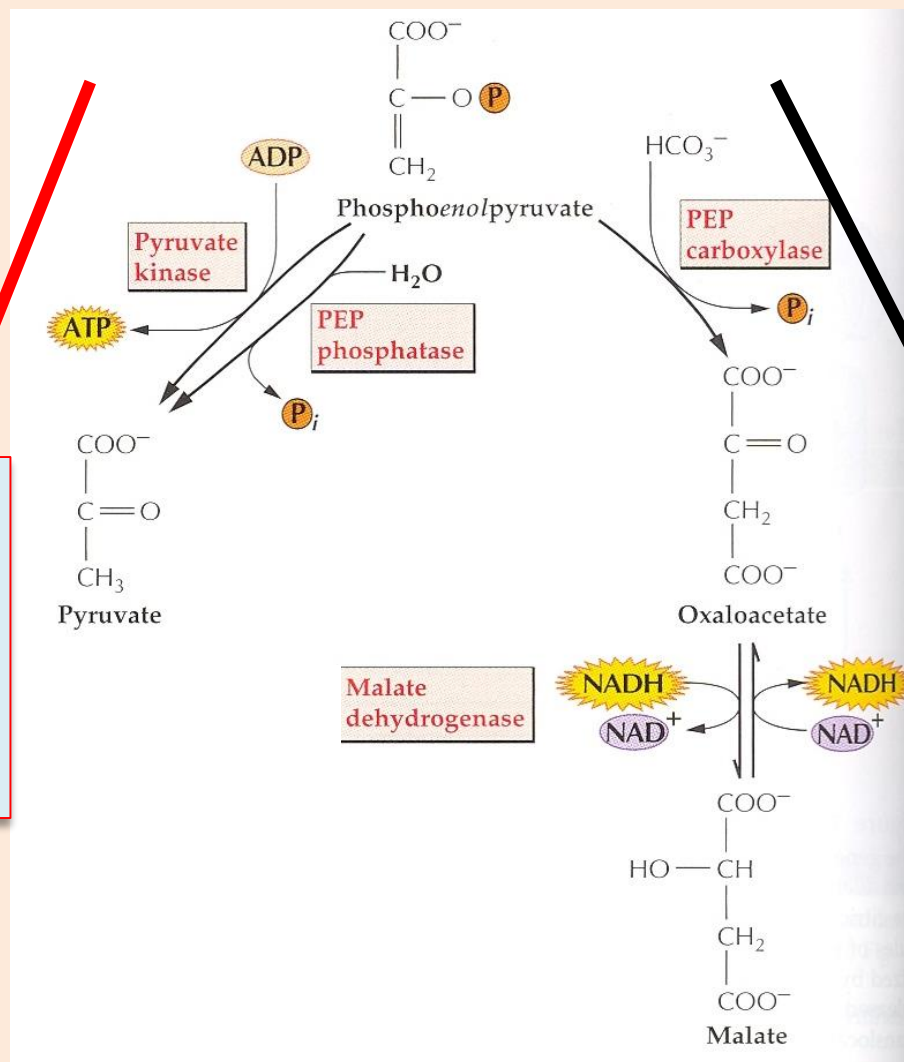
2^η διαφορά στη φυτική γλυκόλυση είναι η δράση της μη-φωσφορυλιωτικής GAPDH (GAPN)

Η μη-φωσφορυλιωτική αφυδρογονάση της 3-φωσφορικής γλυκεραλδεΐδης (**GAPN**) καταλύει τη σύνθεση 3-φωσφογλυκερικού, παραλείποντας το βήμα της κινάσης του φωσφογλυκερικού. Παράγει NADPH, αντί ATP.

NP-GAPDH

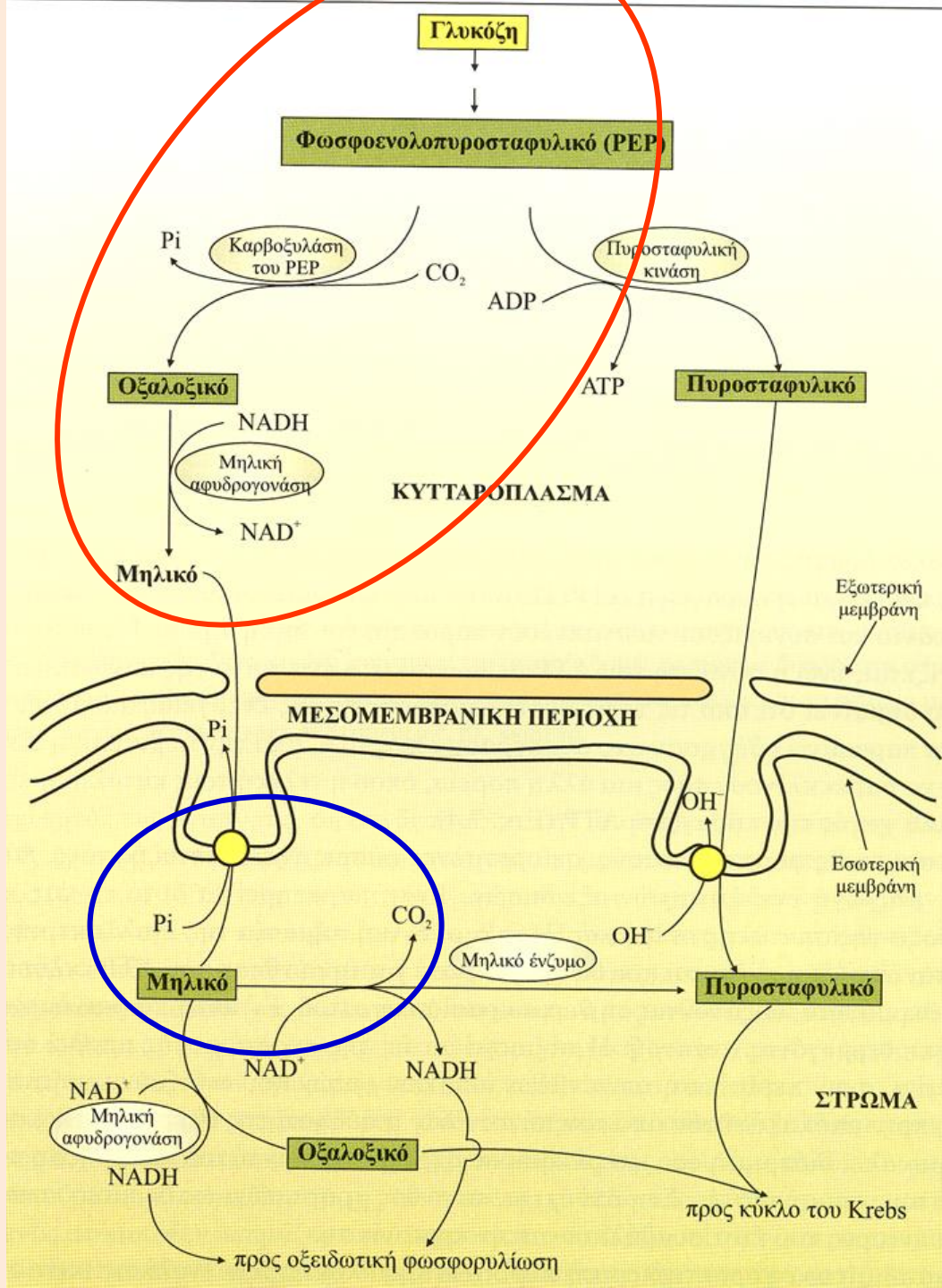


3η παραλλαγή της φυτικής γλυκόλυσης είναι η δέσμευση άνθρακα απο την ΡΕΡC αντί για δράση της κινάσης του πυροσταφυλικού



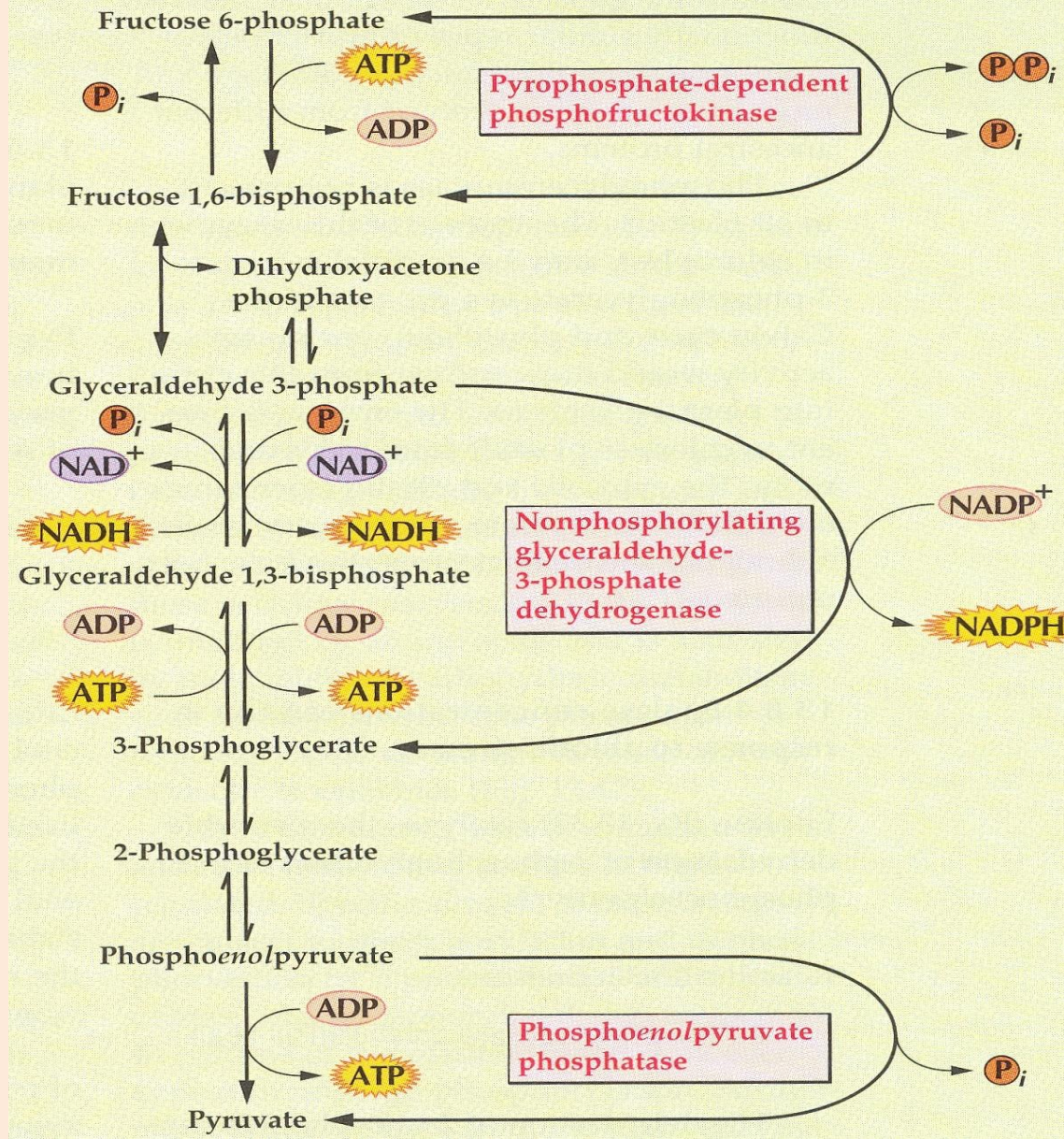
EMP γλυκόλυση:
παραγωγή **ATP** &
πυροσταφυλικού μέσω
κινάσης του
πυροσταφυλικού (PK)
για **κύκλο TCA** (Krebs)

PEPC & MDH:
Παραγωγή οξαλοξικού
& μηλικού,
αναπλήρωση του
κύκλου TCA & για
βιοσυνθετικά
μονοπάτια. **Δέσμευση**
CO₂ στα C-4 και CAM
φυτά

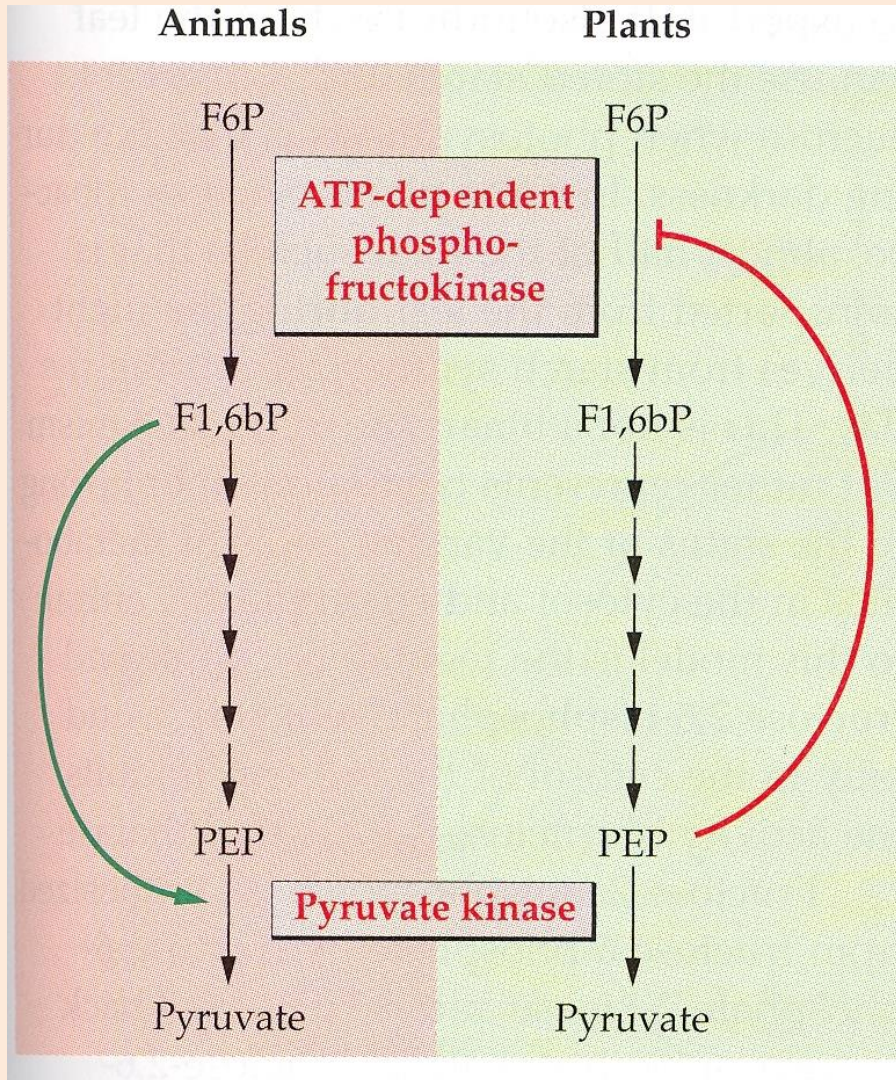


Εναλλακτικές οδοί της φυτικής γλυκόλυσης εξυπηρετούν συγκεκριμένους σκοπούς

- Η **PPi-PFK**: αποσυνδέει την γλυκόλυση από την παραγωγή ATP
- GAPN**: Παράγει ενέργεια ως αναγωγική δύναμη (NADPH) αντί ως ATP.
- PEPC/MDH**: Δεσμεύουν CO₂ στα C-4 & CAM φυτά, & αναπληρώνουν ανδιάμεσα του κύκλου TCA

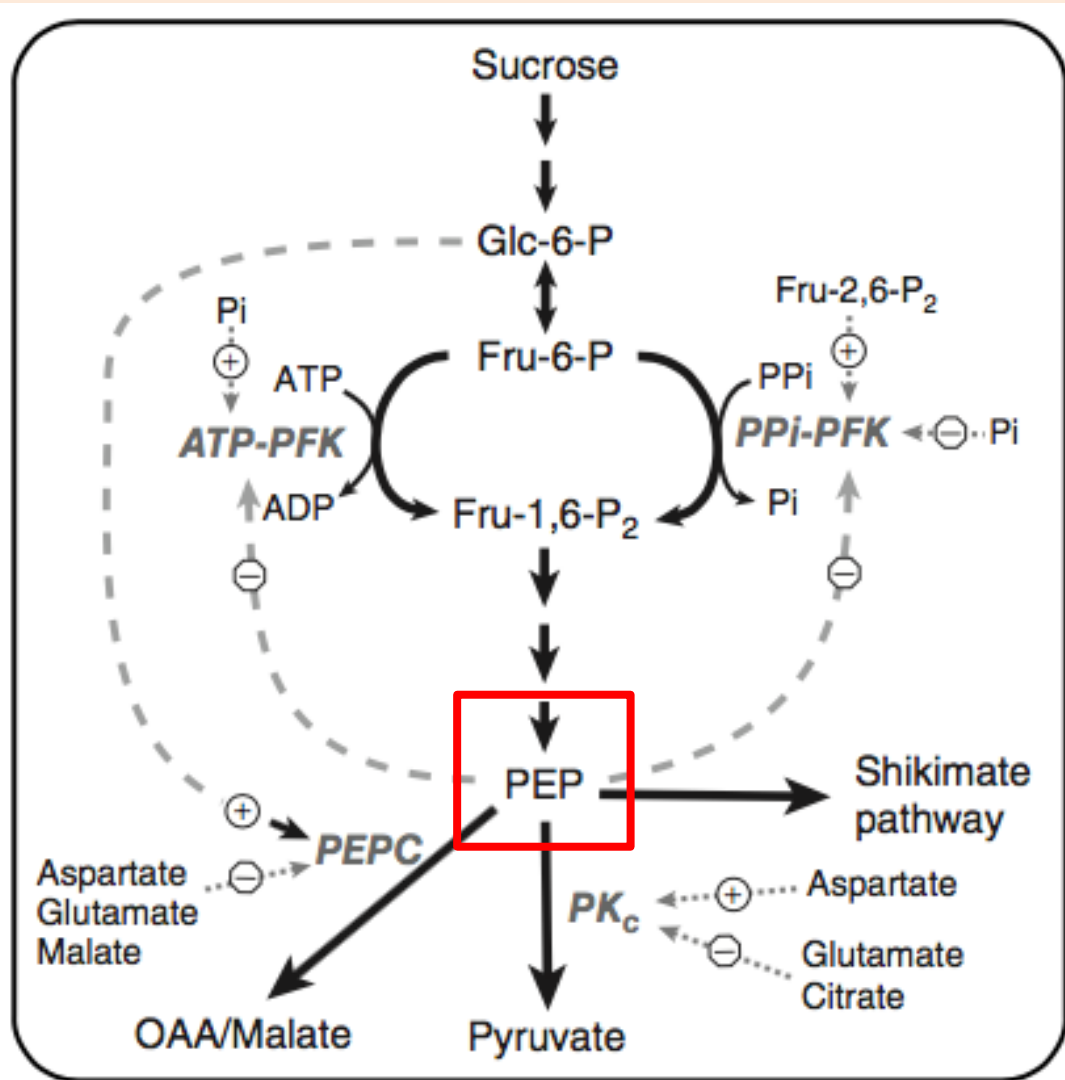


Η ρύθμιση της γλυκόλυσης είναι διαφορετική σε φυτά & ζώα



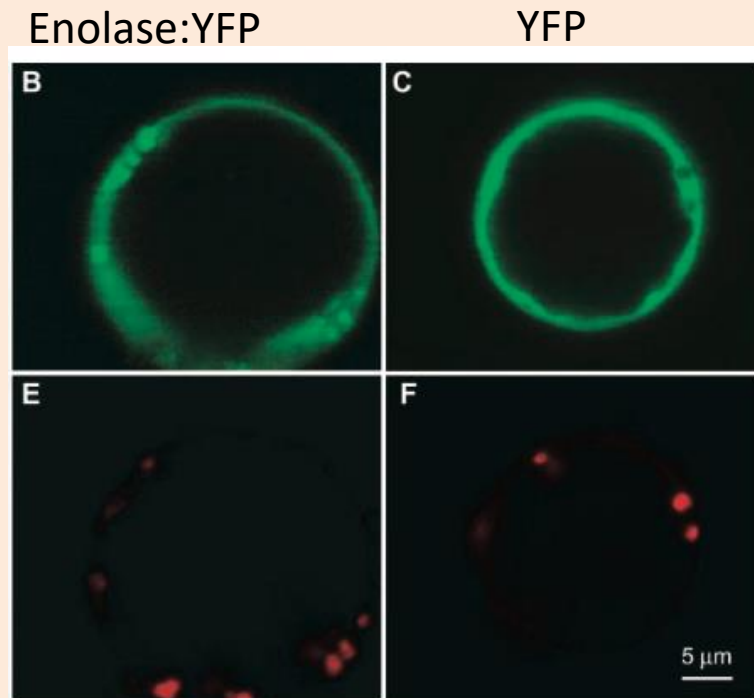
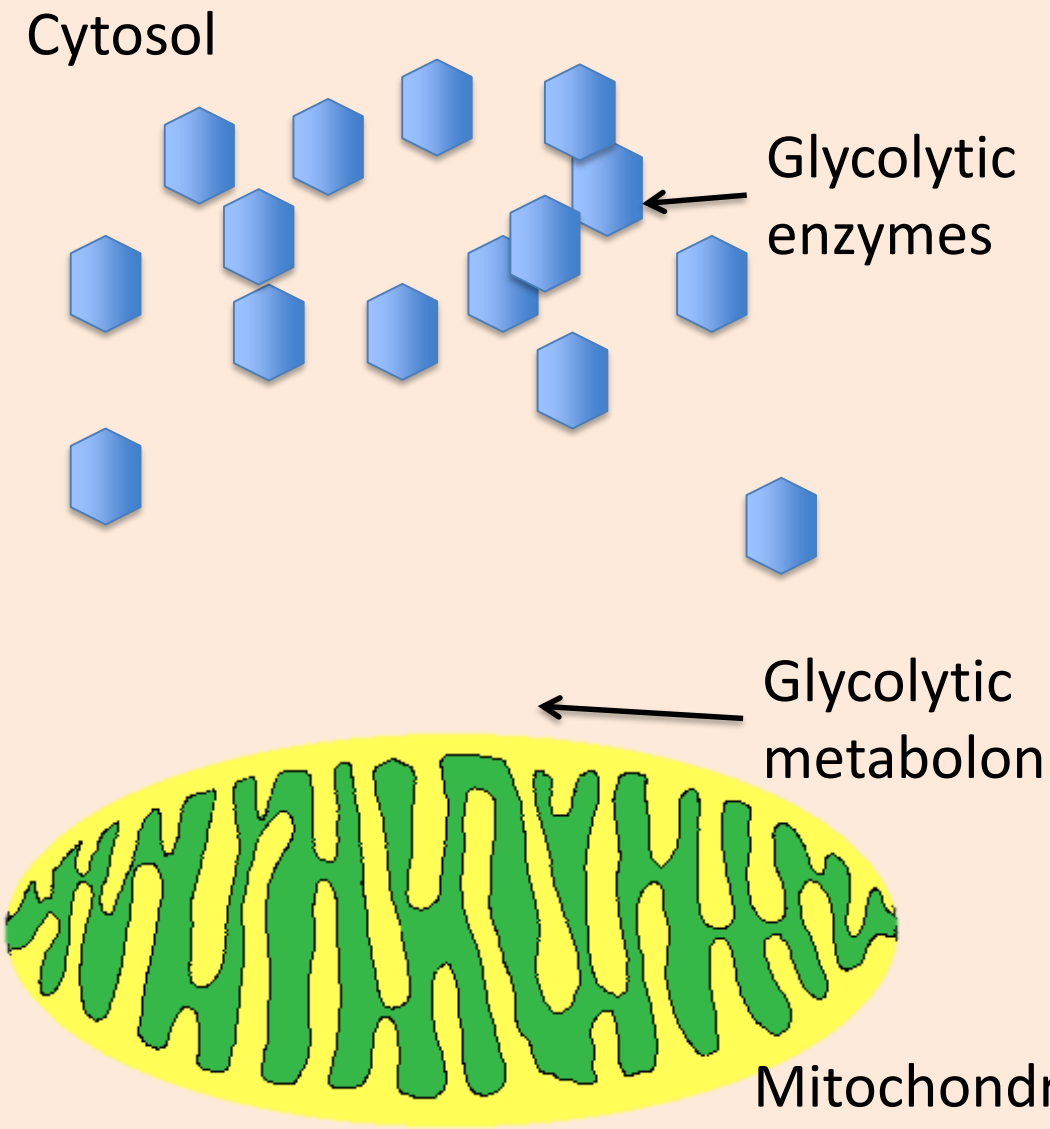
Θυμηθείτε και τον μηχανισμό ρύθμισης μέσω της 2,6-διφωσφορικής φρουκτόζης που ισορροπεί τη γλυκόλυση με την σύνθεση σουκρόζης

Η φυτική γλυκόλυση ρυθμίζεται αλλοστερικά από πολλούς μεταβολίτες της



PEPC is a tightly regulated enzyme situated at a crucial branch point of plant metabolism that controls anaplerotic replenishment of TCA cycle intermediates withdrawn for biosynthesis and N-assimilation.

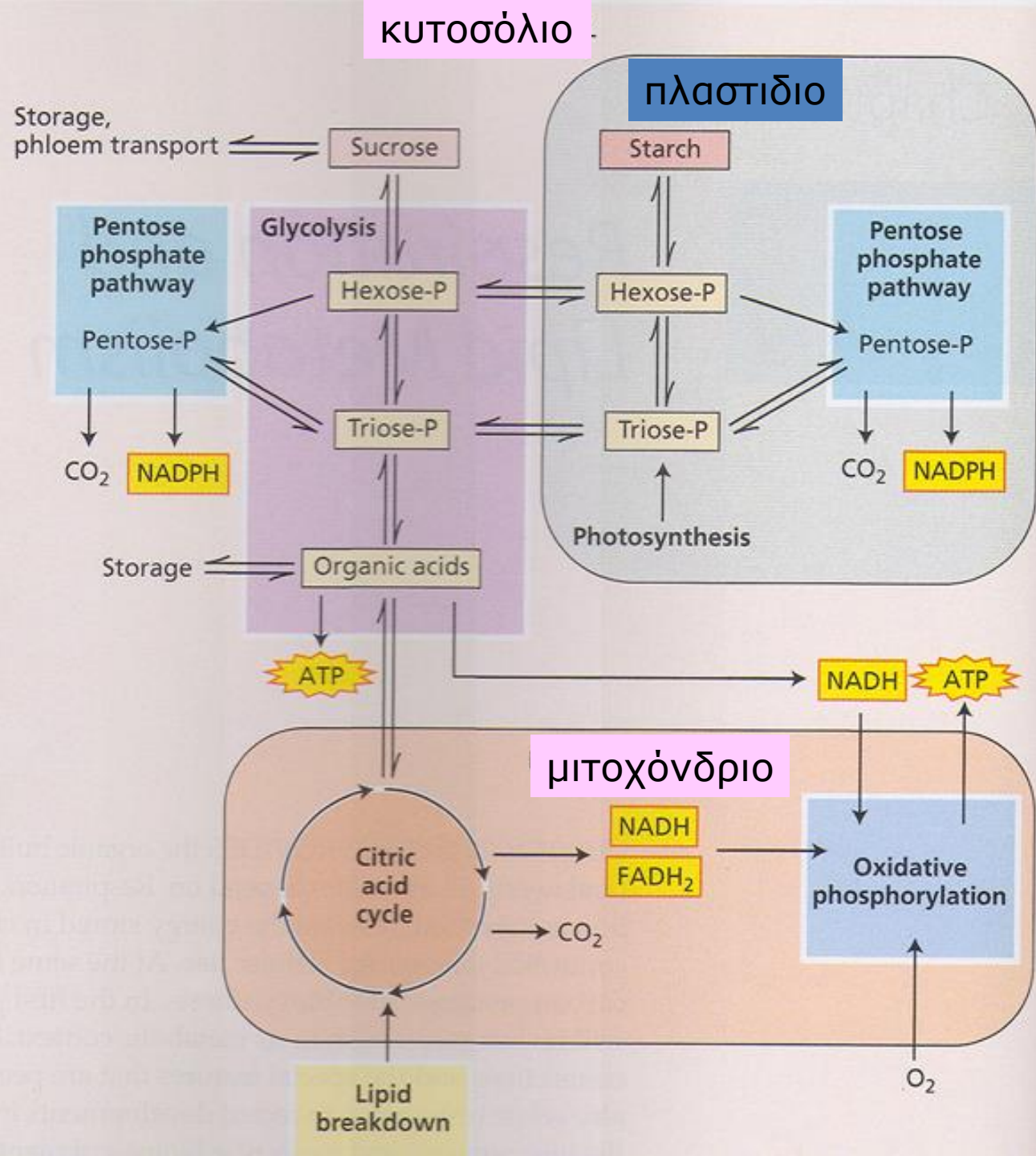
Η φυτική γλυκόλυση ρυθμίζεται και μέσω μικροδιαμερισματοποίησης των ενζύμων της



A glycolytic complex forms on Arabidopsis mitochondria:
-Dynamic partitioning
-Responds to respiratory demand

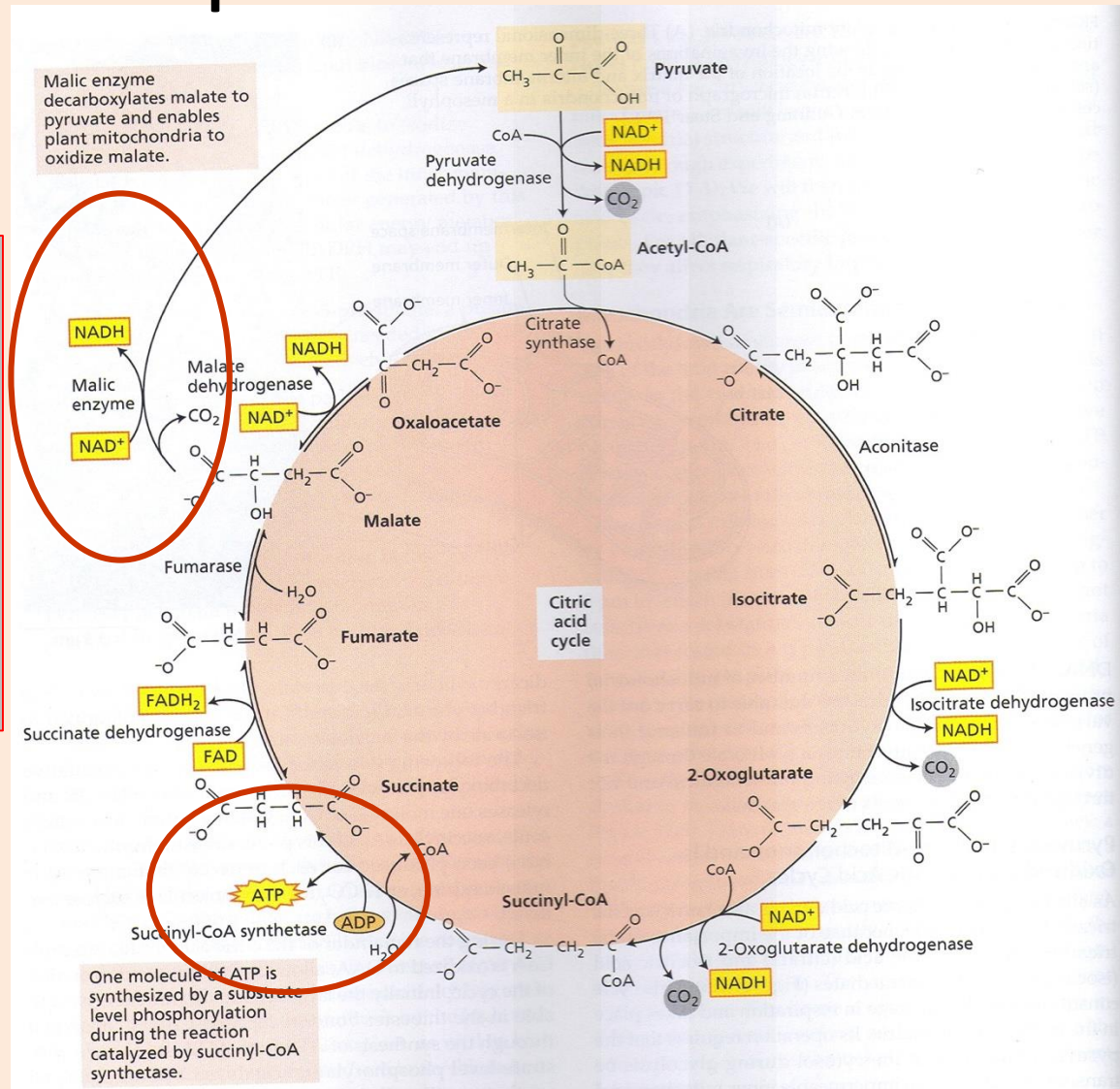
Giege et al, 2003
Graham et al, 2007

Σύνοψη αναπνοής- κύκλος τρικαρβοξυλικών οξέων (TCA)



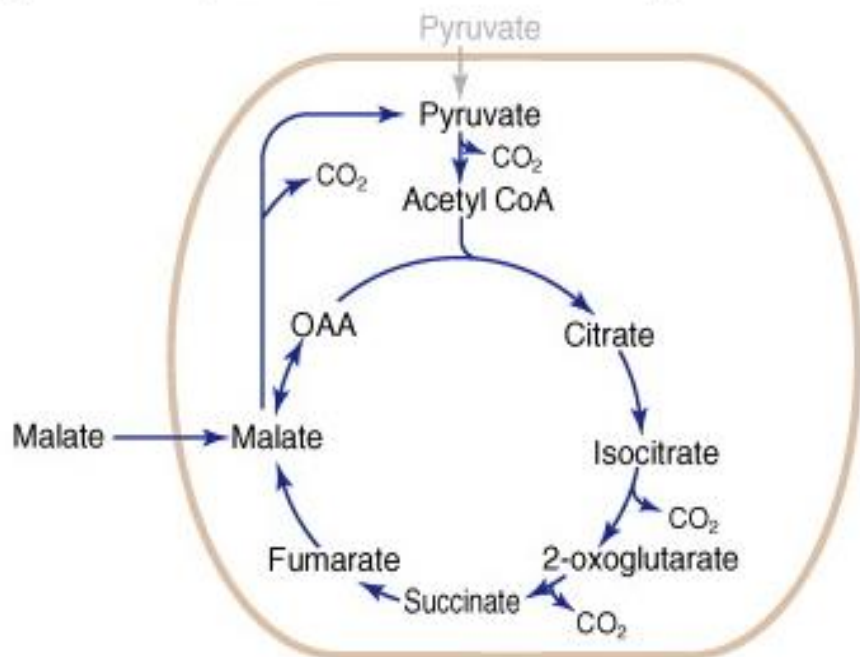
Ο κύκλος TCA έχει επίσης παραλλαγές στα φυτά

Η συνθετάση του σουκίνυλο-(ή ηλέκτρολυλο-) CoA παράγει ATP αντί για GTP (όπως στα ζώα/ζύμη). Το μηλικό ένζυμο επιτρέπει την οξείδωση μηλικού οξέως. Επίσης, δέχεται αναπληρωτικά οξαλοξικό & μηλικό οξύ απο τη δράση των ΡΕΡC/MDH

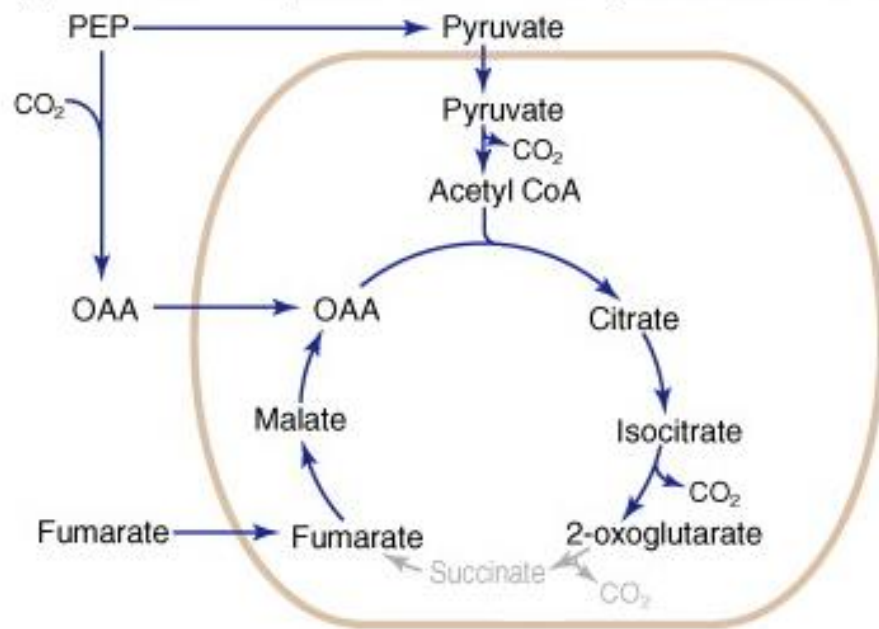


Ο κύκλος TCA στα φυτά μπορεί να δράσει και ως δύο γραμμικές μεταβολικές οδοί

(b) Predicted cyclic flux mode from kinetic analysis



(d) Predicted non-cyclic flux mode from a genome-scale model

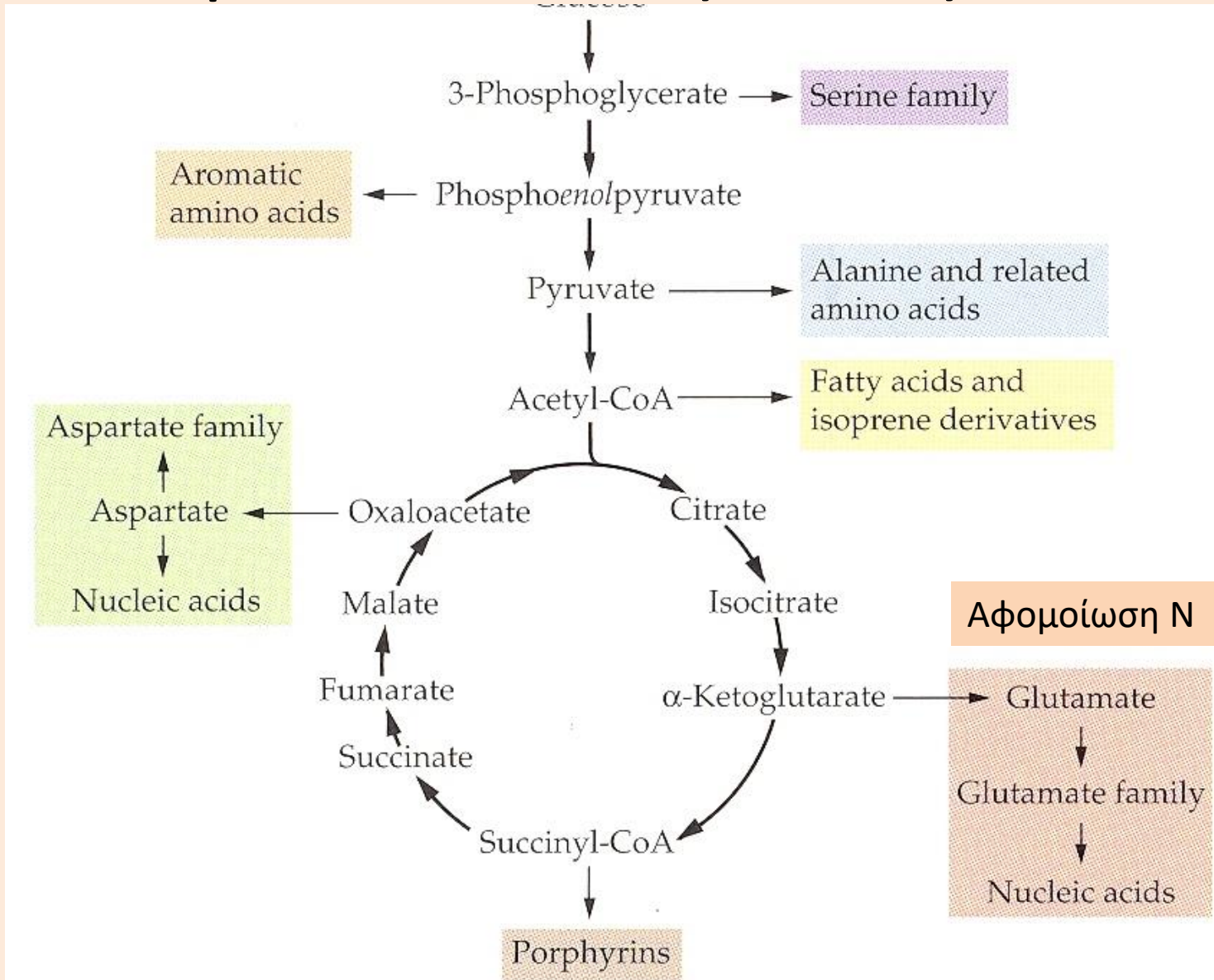


TRENDS in Plant Science

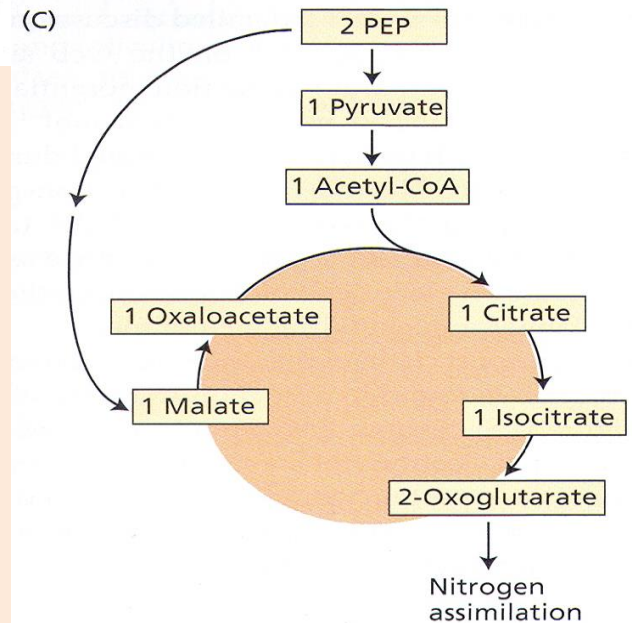
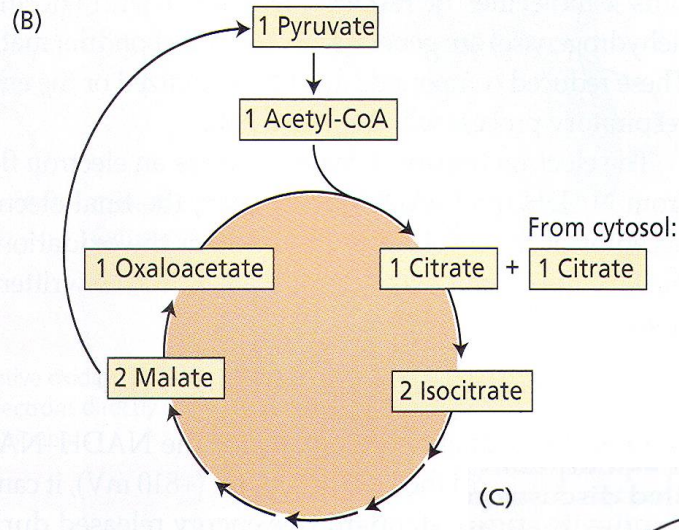
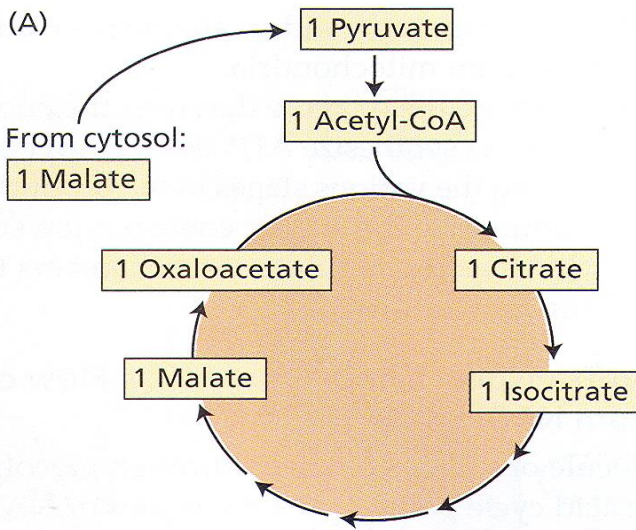
Σε συνθήκες που οι απαιτήσεις σε ATP καλύπτονται (λ.χ. κατά την φωτοσύνθεση) ο κύκλος TCA λειτουργεί σαν δύο ανεξάρτητες γραμμικές οδοί. Μία προς το 2-οξογλουταρικό (αφομοίωση N) και μία προς μηλικό-φουμαρικό (μεταβολικά ενδιάμεσα)

Sweetlove et al., 2010

Η αναπνοή συνδέεται με πολλές βιοσυνθετικές οδούς



Τα φυτά μπορούν ν' αναπληρώσουν τα ενδιάμεσα του κύκλου TCA



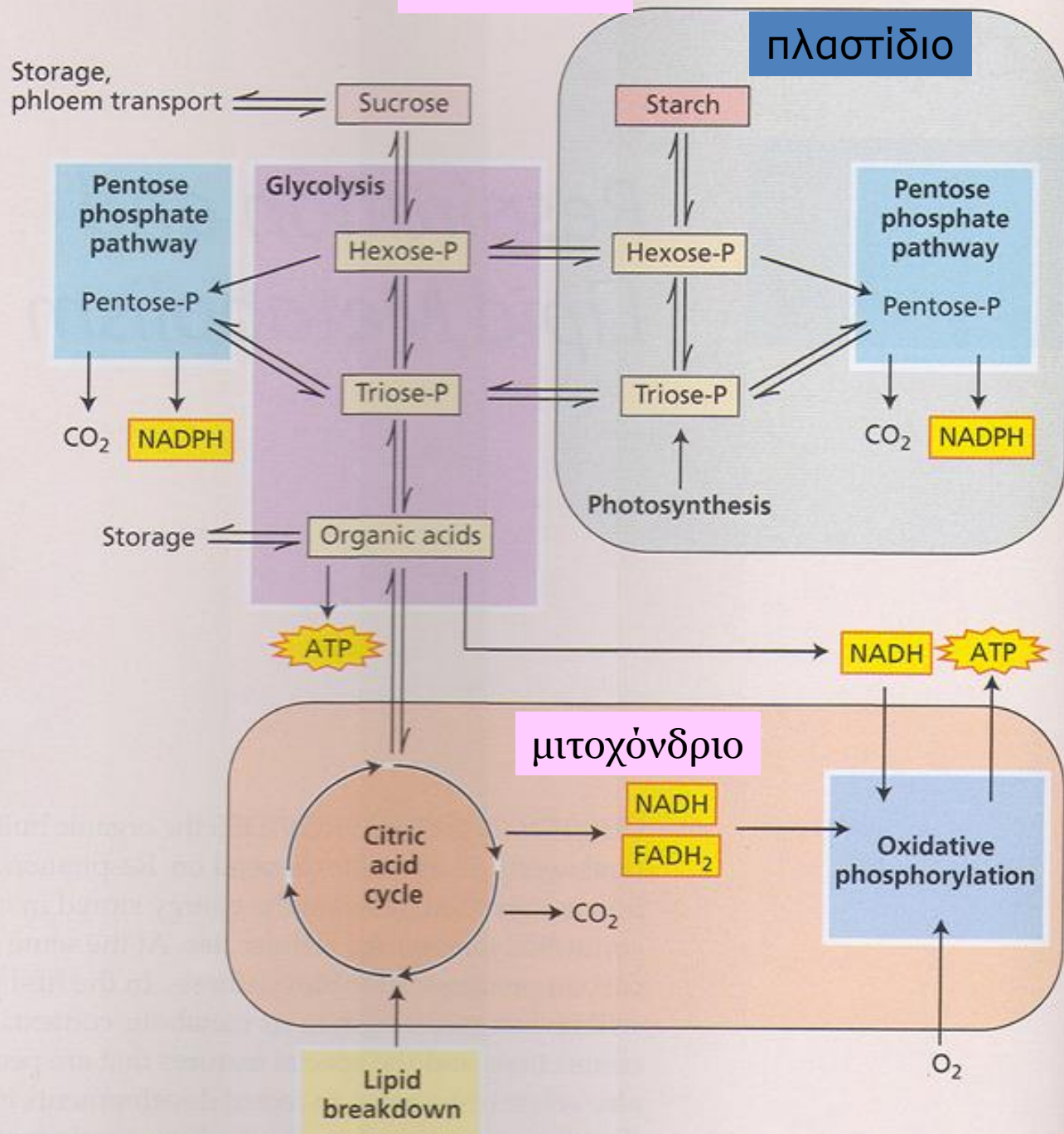
Μπορούν να οξειδώσουν πλήρως μηλικό & κιτρικό οξύ, ή να μετατρέψουν μηλικό οξύ με την δράση των PEPC/MDH σε 2-οξογλουταρικό για την αφομοίωση του αζώτου

ΚΥΤΟΣΟΛΙΟ

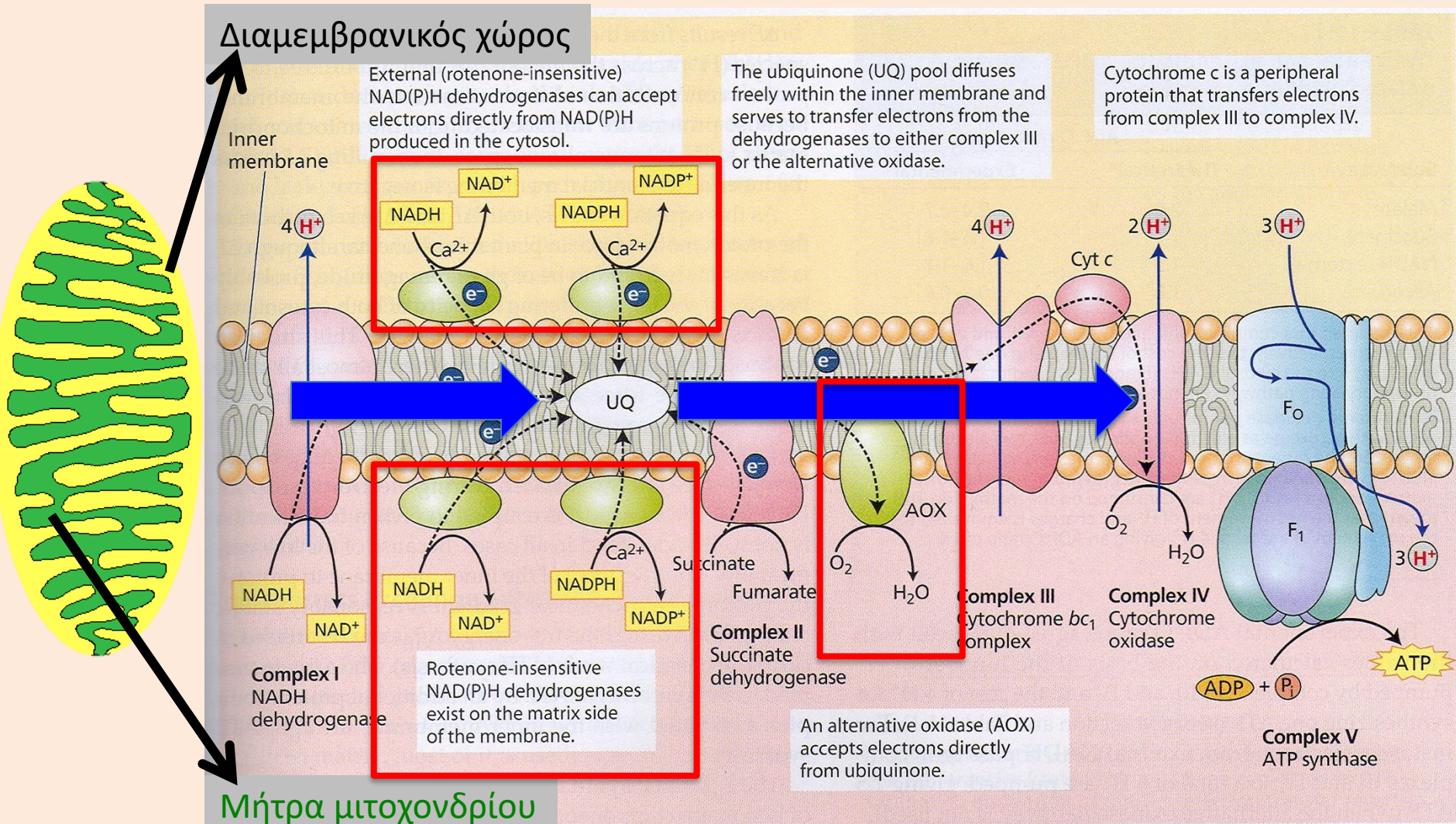
πλαστίδιο

μιτοχόνδριο

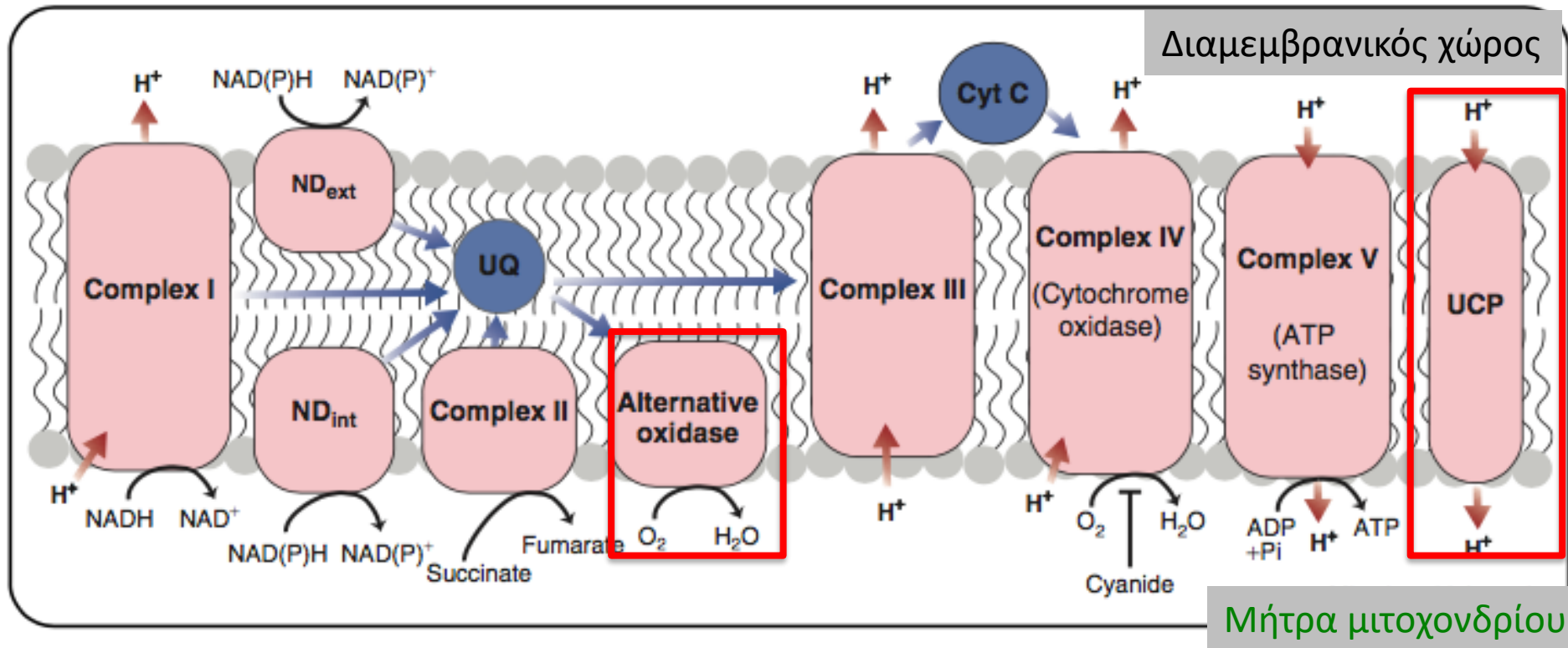
Σύνοψη αναπνοής



Η οξειδωτική φωσφορυλίωση στα φυτά διαφέρει από αυτή των ζώων



Η εναλλακτική οξειδάση (ΑΟΧ) εξυπηρετεί ρυθμιστικούς & προστατευτικούς ρόλους



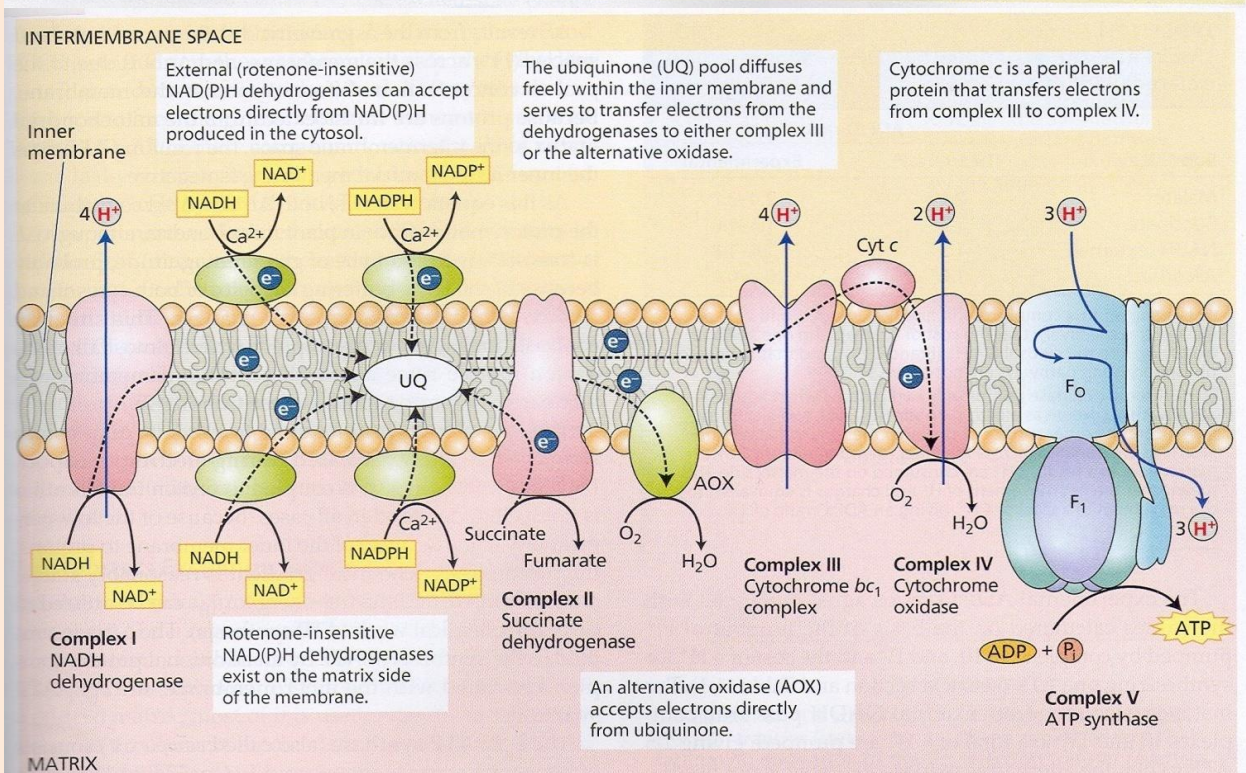
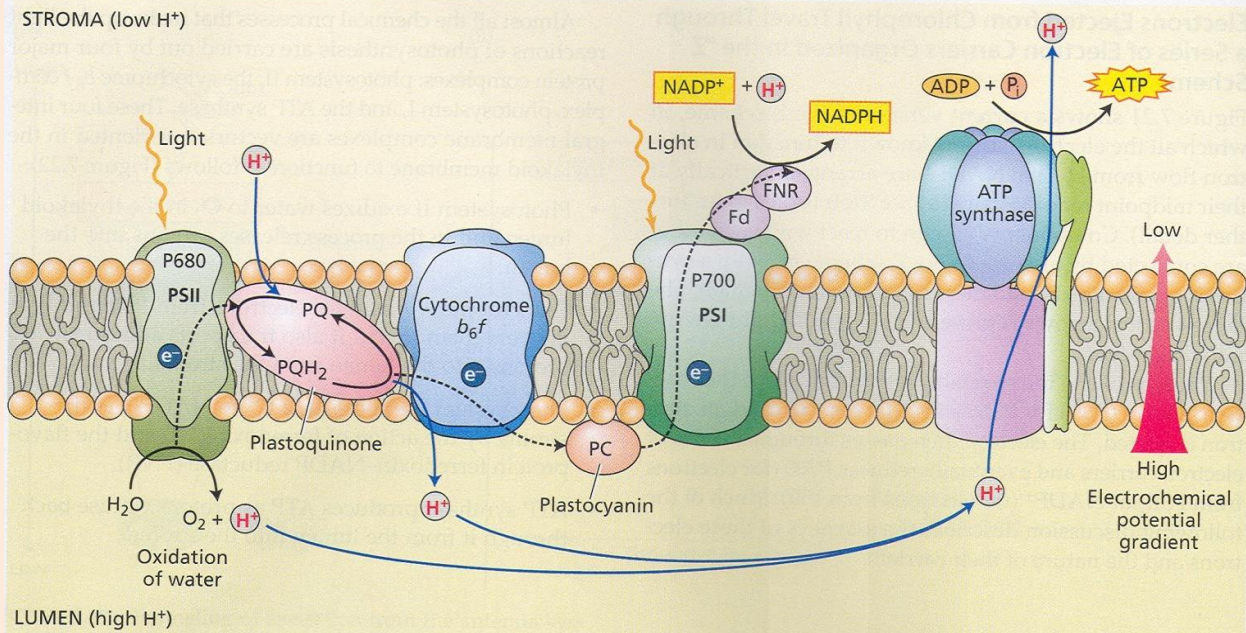
- Προσαρμογή της παραγωγής ATP και της σύνθεσης ανθρακικών σκελετών στις άλλες βιοσυνθετικές διαδικασίες
- Αντίδραση σε καταστάσεις καταπόνησης οπότε υπάρχει αναστολή της αναπνοής
- Προστασία από την παραγωγή ROS από την ανεξέλεγκτη αναγωγή της ουβικινόνης

Οι αλυσίδες μεταφοράς ηλεκτρονίων της **φωτοσύνθεσης (PS)** και της **οξειδωτικής φωσφορυλίωσης (OP)** έχουν παρόμοια βασικά χαρακτηριστικά, αλλά και διαφορές. Οι δύο αλυσίδες

- δημιουργούν διαβάθμιση H^+ για την παραγωγή ATP εκκατέρωθεν μεμβρανών
- Χρησιμοποιούν λιποδιαλυτούς μεταφορείς e^- (UQ vs PQ),
- έχουν μηχανισμούς προστασίας απο την υπερβολική διέγερση.

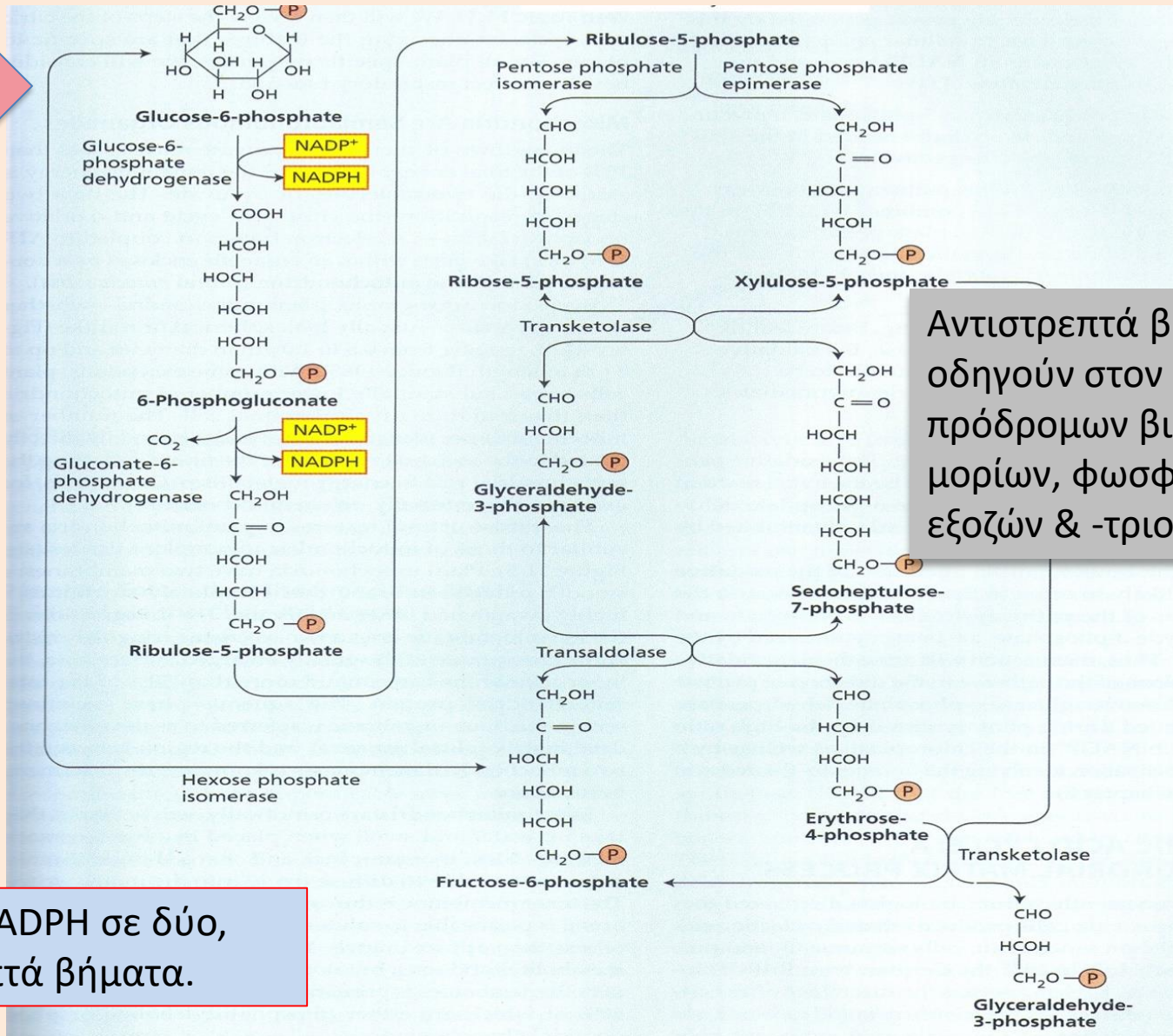
Αλλά:

- η PS οξειδώνει H_2O & εκλύει O_2 , η OP ανάγει O_2 σε H_2O .
- Η OP καταναλώνει αναγωγική δύναμη, η PS παράγει.
- Η συσσώρευση H^+ στην PS γίνεται μέσα στα θυλακοειδή ενώ στην OP, έξω, στον διαμεμβρανικό χώρο.



Η οξειδωτική οδός των φωσφορικών πεντοζών (OPP) παράγει NADPH και πρόδρομα βιοσυνθετικά μόρια

Απο
δεξαμενή
P-εξοζών

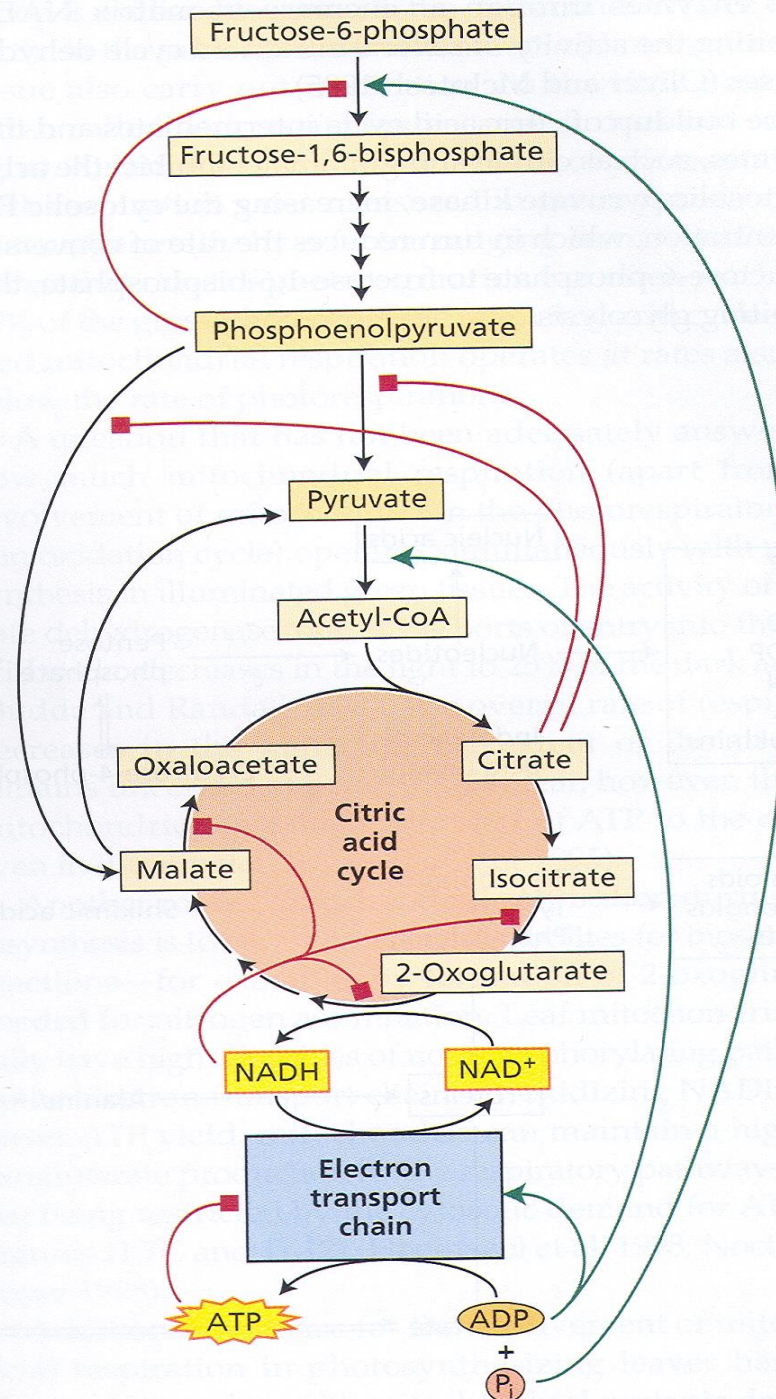


Αντιστρεπτά βήματα οδηγούν στον σχηματισμό πρόδρομων βιοσυνθετικών μορίων, φωσφορικών-εξοζών & -τριοζών.

Παραγωγή NADPH σε δύο, μή-αντιστρεπτά βήματα.

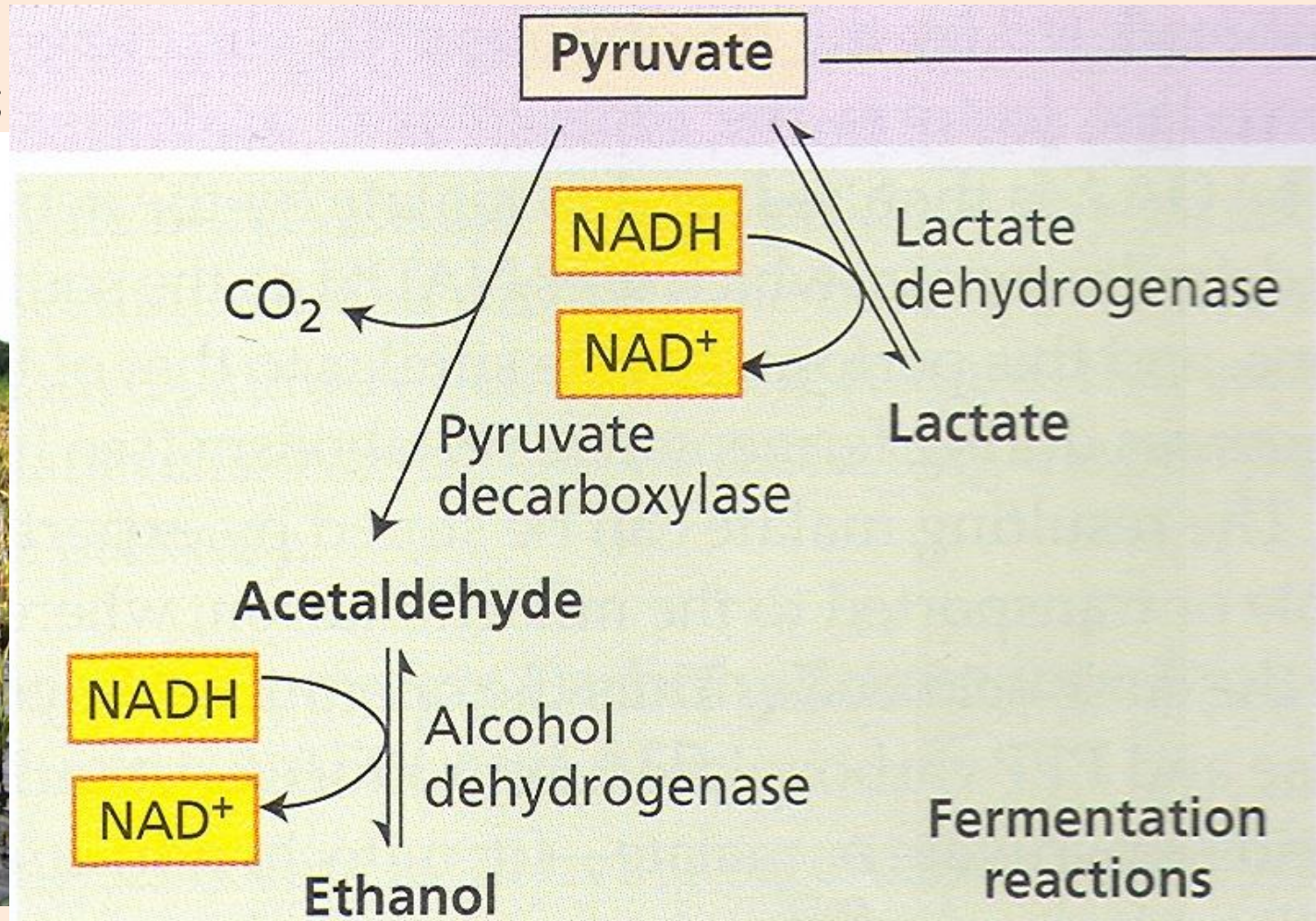
Ρύθμιση της αναπνοής γίνεται με επανατροφοδοτικούς μηχανισμούς (φυσικά) σε πολλά στάδια.

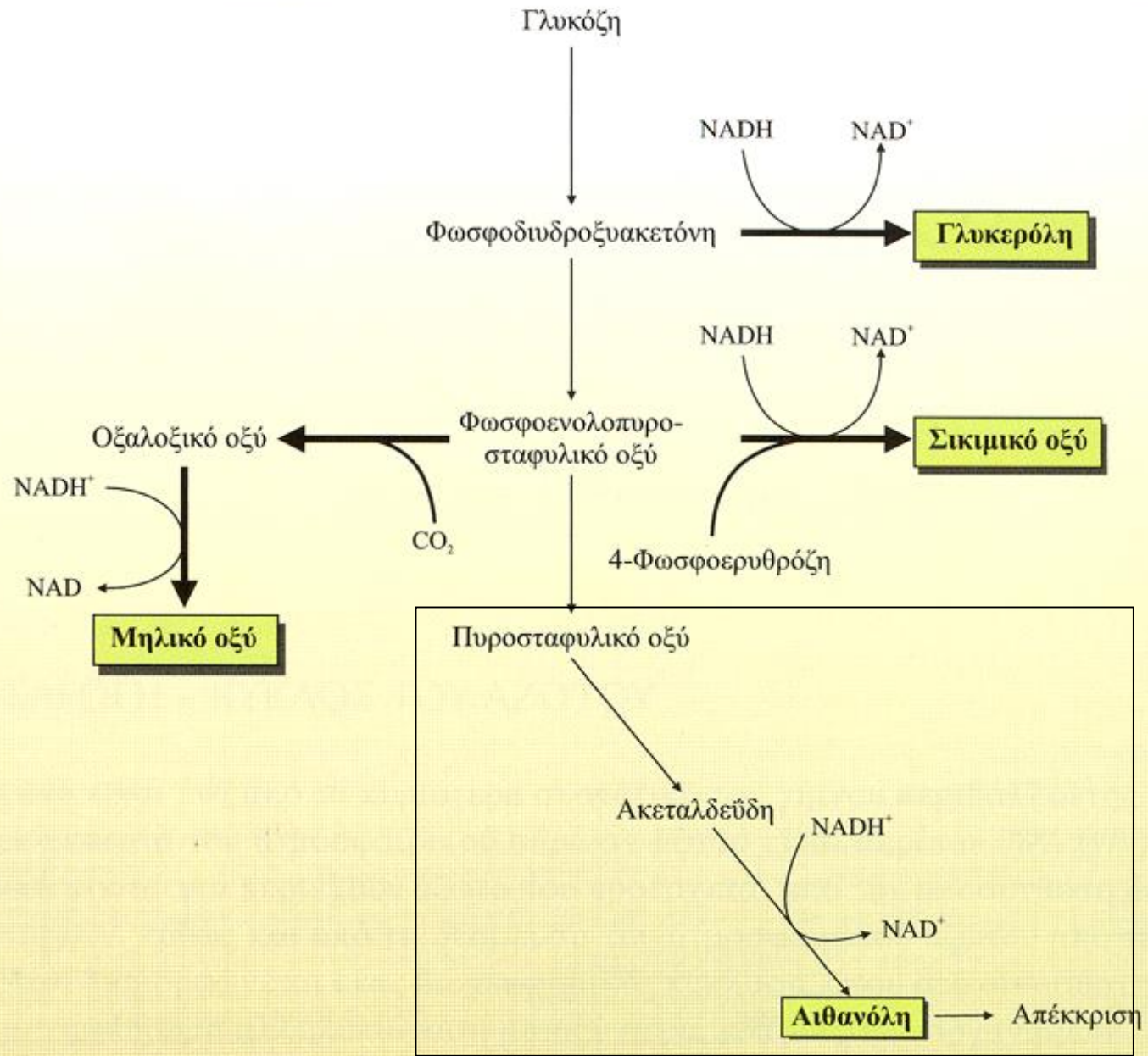
- Το PEP αναστέλλει την PFK.
- Το κιτρικό αναστέλλει την κινάση του πυροσταφυλικού και το σύστημα PEPC/MDH.
- Συσσώρευση NADH, αναστέλλει την αφυδρογονάση του ισοκιτρικού & του 2-οξογλουταρικού, και την MDH (στον κύκλο TCA)
- Συσσώρευση ATP εμποδίζει την οξειδωτική φωσφορυλίωση (OP)
- Το ADP επάγει τόσο την OP, όσο και την αφυδρογονάση του πυροσταφυλικού
- Τα φωσφορικά επάγουν την PFK.



Τα φυτά μπορούν να κάνουν και αναερόβια αναπνοή

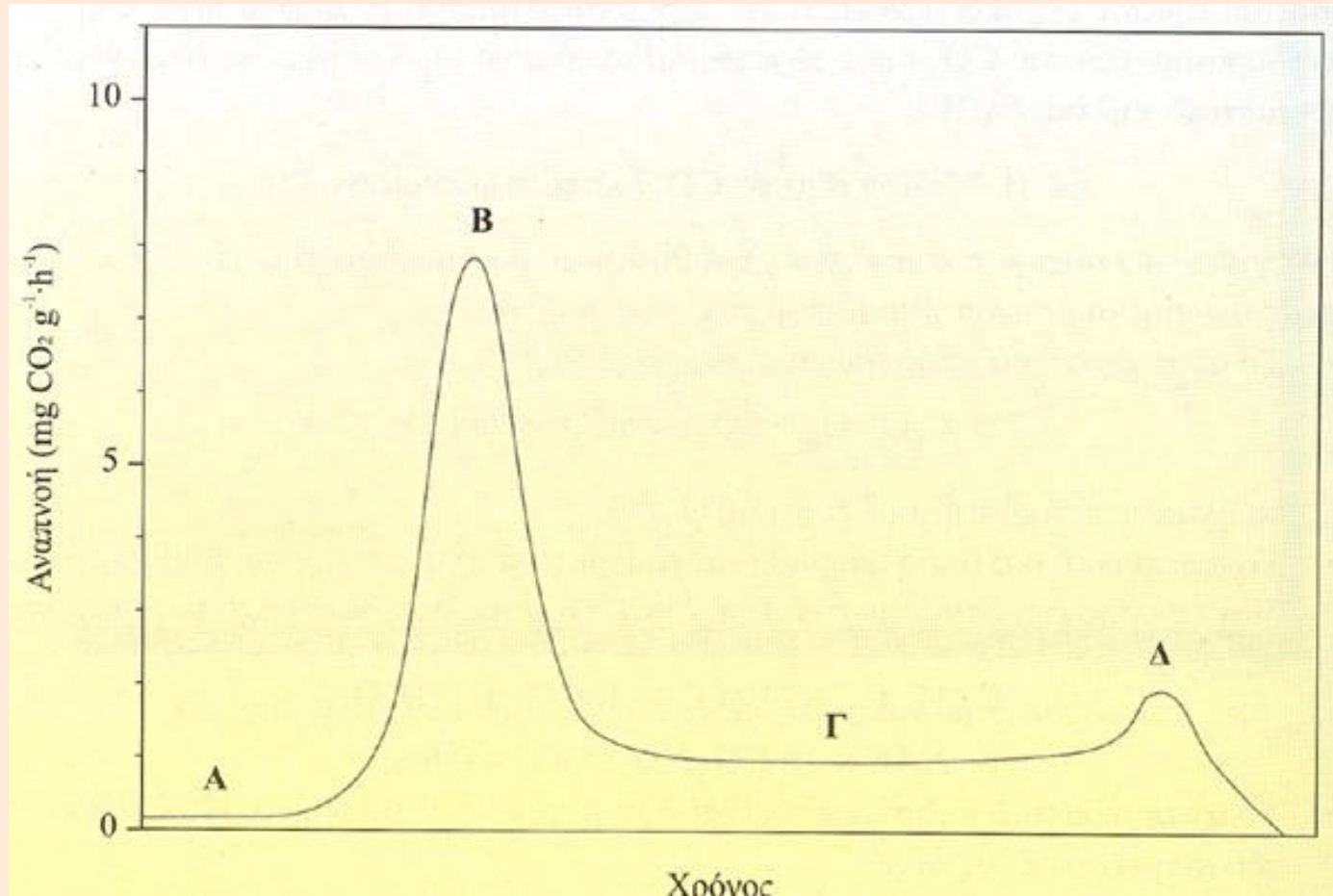
Σε συνθήκες υποξίας/καταπόνησης





Αναπνοή στους φυτικούς ιστούς και φυτά

❖ Επίδραση της ηλικίας και του τύπου του ιστού



(α) Ληθαργος (οφθαλμός) (β) Εκπυσομενο φύλλο (γ) Ώριμο φύλλο (δ) Γήρανση

Κάποια φυτά αναπνέουν γρηγορότερα από τον άνθρωπο σε ηρεμία

Πίνακας 7.2. Ταχύτητες αναπνευστικής λειτουργίας.

Ιστός	Αναπνοή (moles $O_2 \cdot h \cdot gfw$)
Άνθρωπος	
αναπαυόμενος	10
ασκούμενος	200
Ποντίκι	
αναπαυόμενο	100
ασκούμενο	900
Σπέρματα κριθαριού	0,003
Νεαρό φυτάριο σίτου	65
Φύλλο	
νεαρό	22
ώριμο	8
Ρίζα	
κριθαριού	50
καρότου	1
Κόνδυλος πατάτας	0,3
Μήλο	
ανώριμο	10
ώριμο	0,5
Άνθος του <i>Arum</i>	2000

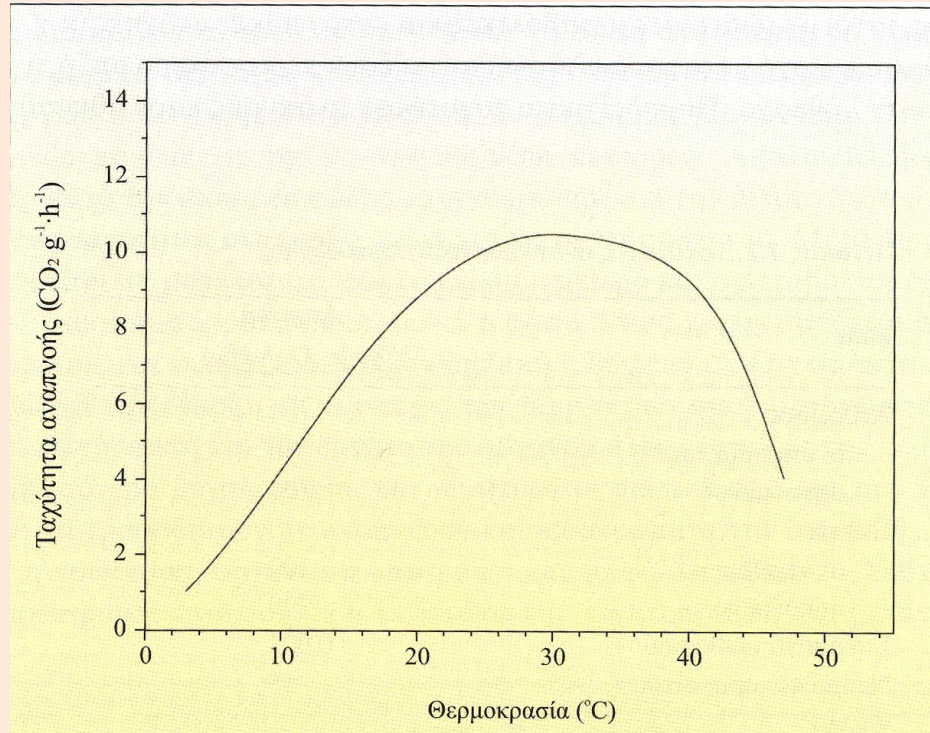


Arum maculatum

Αναπνοή στους φυτικούς ιστούς και φυτά

❖ Επίδραση περιβαλλοντικών παραγόντων

✓ Θερμοκρασία



✓ CO₂

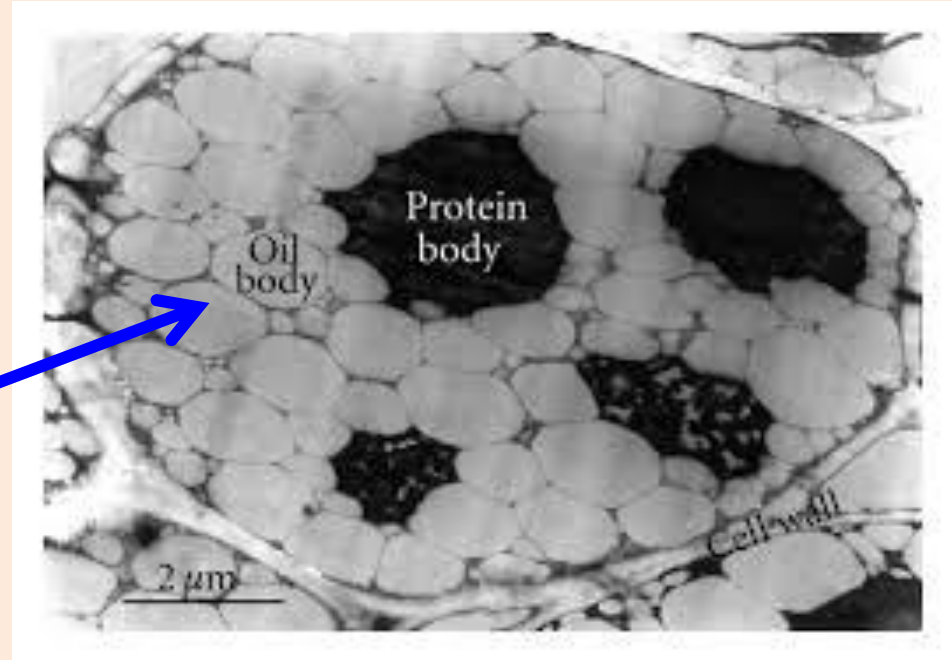
✓ Οξυγόνο

- Μορφολογικές και ανατομικές προσαρμογές (αερέγχυμα, πνευματοφόρα)
- Βιοχημικές προσαρμογές

Τα φυτά μεταβολίζουν και λιπίδια

Πολλά φυτά χρησιμοποιούν λιπίδια ως αποθηκευτική μορφή άνθρακα, π.χ., η ελιά, πολλά σπέρματα (Brassicacea)

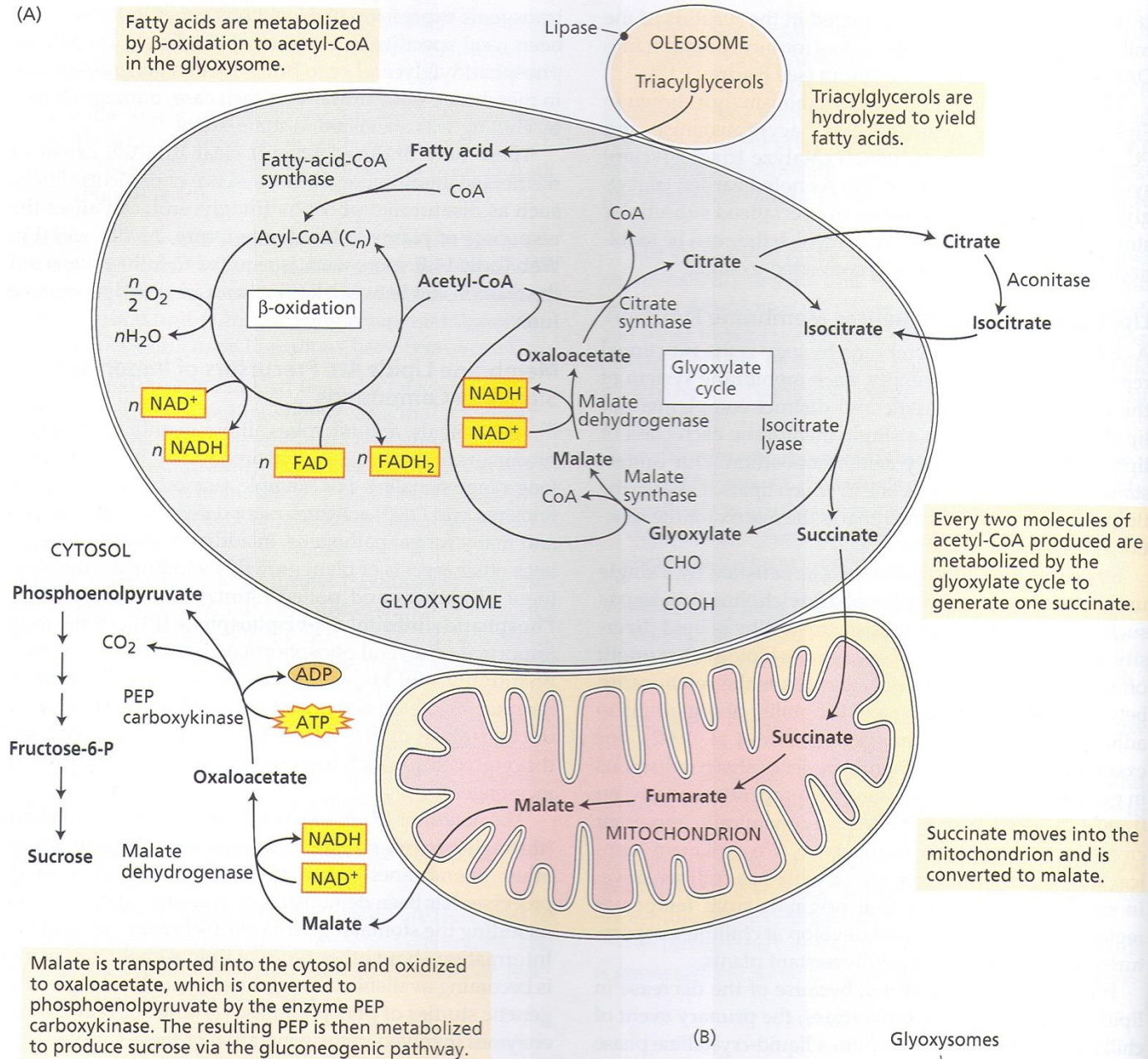
Ελαιόσωματα
σε φυτικό κύτταρο



Η σύνθεση λιπαρών οξέων στα φυτά γίνεται κυρίως στα πλαστίδια, ενώ η β-οξείδωση σ' εξειδικευμένα οργανίδια, τα γλυοξυσώματα

Τα φυτά, σε αντίθεση με τα ζώα, μπορούν να ξαναπαράγουν υδατάνθρακες από λιπίδια. Μάλιστα **δεν οξειδώνουν λιπίδια** άμεσα, αλλά τα μετατρέπουν σε γλυκόζη και τα καταβολίζουν μέσω της **γλυκόλυσης-TCA-OP**

(A)



Ο μεταβολισμός λιπιδίων διαφέρει στα φυτά σε σχέση με τα ζώα

D.E. Vance and J.E. Vance (Eds.) *Biochemistry of Lipids, Lipoproteins and Membranes (4th Edn.)*
© 2002 Elsevier Science B.V. All rights reserved

Lipid metabolism

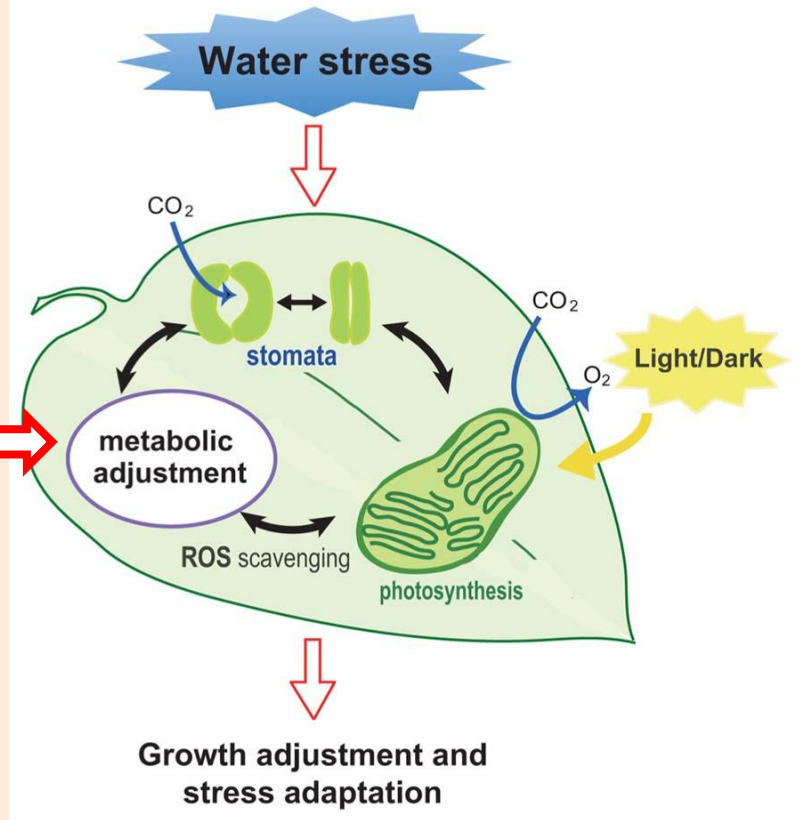
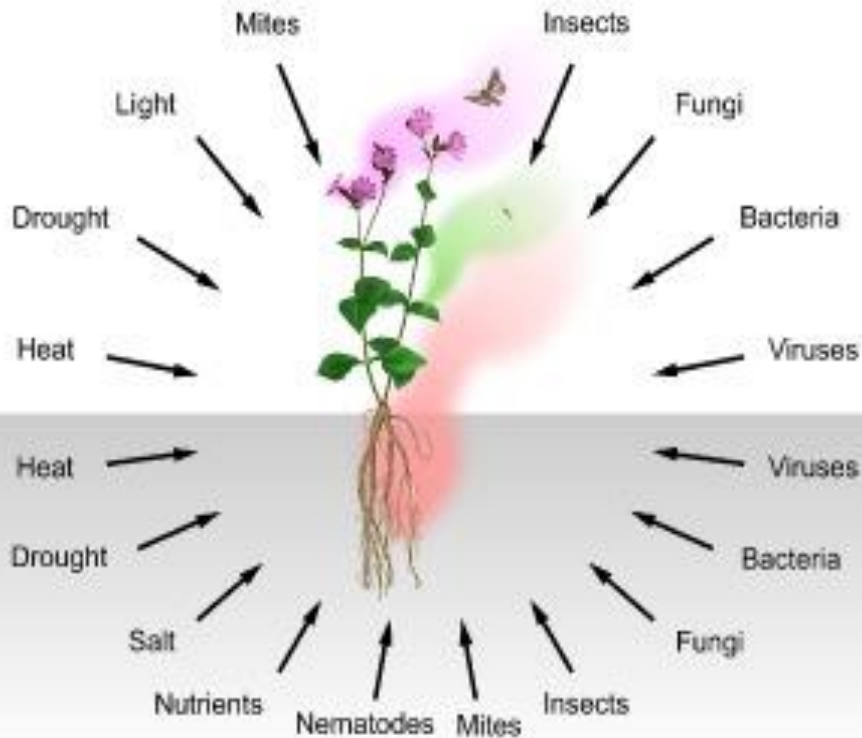
Katherine M. Schmid¹ and John

¹ *Department of Biological Sciences, Butler University, Indianapolis,
Tel.: +1 (317) 940-9956; Fax: +1 (317) 940-9519; E-mail*

² *Department of Plant Biology, Michigan State University, East Lan
Tel.: +1 (517) 353-0611; Fax: +1 (517) 353-1926; E-mail: oh*

1. Introduction

Σύνοψη: Ενδιάμεσος μεταβολισμός των φυτών



Τα φυτά δεν έχουν την επιλογή να μετακινηθούν όταν αντιμετωπίζουν καταπονήσεις.
Η μόνη άμεση λύση είναι η μεταβολική απόκριση (και κάποιες φυσιολογικές προσαρμογές)

Σύνοψη: Ενδιάμεσος μεταβολισμός των φυτών

Μεταβολισμός **αμύλου**
(αποθήκευση)

Μεταβολισμός **σουκρόζης**
(μεταφορά/σημ
ατοδότηση)



CO₂

Φωτοσύνθεση

Σύνθεση/
β-οξείδωση **λιπιδίων**

