



ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

AGRICULTURAL UNIVERSITY OF ATHENS

Φυσιολογία Καταπονήσεων των Φυτών

Ενότητα 5:

Ακτινοβολία (3/3), 2ΔΩ

Τμήμα: Επιστήμης Φυτικής Παραγωγής

Διδάσκοντες: Γεώργιος Καραμπουρνιώτης

Γεώργιος Λιακόπουλος



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης





Μαθησιακοί Στόχοι

- Καταπρόληψη από υψηλές εντάσεις ακτινοβολίας, φωτοπαρεμπόδιση, στρατηγικές αντιμετώπισης των υψηλών εντάσεων ακτινοβολίας.



Λέξεις Κλειδιά 1/3

- ακτινοβολία,
- φωτοσυνθετικά ενεργός ακτινοβολία,
- φωτοσύνθεση,
- ορατή,
- φωτοκορεσμός,
- χλωροπλάστης,
- φωτολεύκανση,
- φωτοσυνθετικά ενεργός ακτινοβολία,
- φωτοβλάβη,
- φωτοπαρεμπόδιση,



Λέξεις Κλειδιά 2/3

- φάσμα απορρόφησης,
- φάσμα δράσης,
- φωτοσύστημα II,
- φωτοσύστημα I,
- αποσύσταση,
- ανασύσταση,
- πρωτεΐνη D1,
- φωτοπροστασία,
- φωτοοξείδωση,



Λέξεις Κλειδιά 3/3

- κέντρο αντίδρασης,
- φωτόλυση νερού,
- φωτεινές αντιδράσεις,
- κύκλος Calvin-Benson,
- φθορισμός χλωροφύλλης,
- κύκλος ξανθοφυλλών,
- φωτοαναπνοή,
- κύκλος νερού-νερού.



Φυσιολογία Καταπονήσεων των Φυτών



ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ



Καταπόνηση από Υψηλές Εντάσεις Ακτινοβολίας 1/16

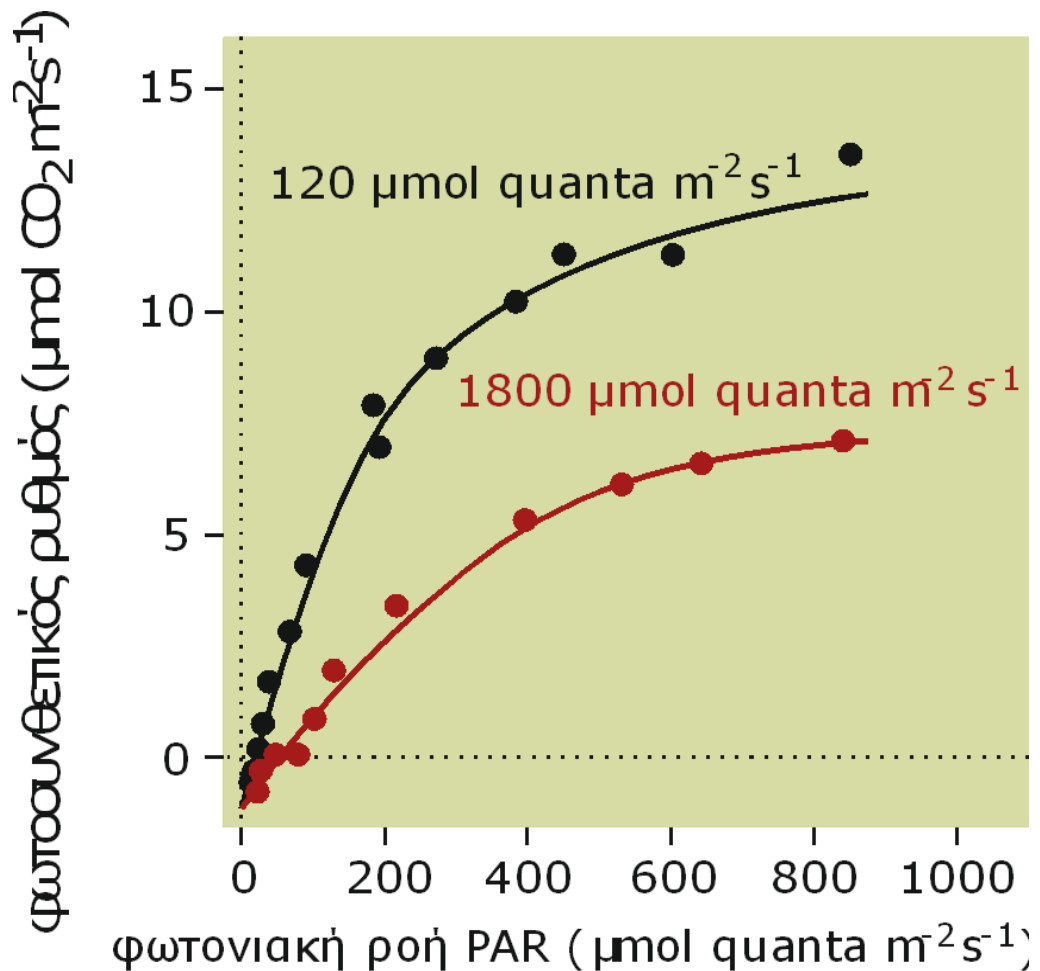
- Οι υψηλές εντάσεις PAR προκαλούν καταπόνηση.
 - Επιφέρει σημαντική ελάττωση της φωτοσυνθετικής ικανότητας ή ελάττωσης της απόδοσης ανά φωτόνιο (photon yield)
 - Προκαλεί φωτολεύκανση
 - Προκαλεί εκτεταμένες βλάβες από οξειδωτική καταπόνηση





Καταπόνηση από Υψηλές Εντάσεις Ακτινοβολίας 2/16

- Οι υψηλές εντάσεις PAR προκαλούν καταπόνηση.





Καταπόνηση από Υψηλές Εντάσεις Ακτινοβολίας 3/16

- **Οι υψηλές εντάσεις PAR προκαλούν καταπόνηση.**
 1. Εμφανίζεται ιδιαίτερα σε φυτά τα οποία δεν είναι προσαρμοσμένα ή δεν έχουν εγκλιματιστεί σε περιβάλλον άπλετου φωτισμού.
 2. Εμφανίζεται εποχιακά σε φυτά τα οποία διαβιούν στον υποόροφο δασών φυλλοβόλων δένδρων ή παροδικά κατά τη διάρκεια της φωτοπεριόδου λόγω μετακίνησης του υπερκείμενου φυλλώματος ή της γης.
 3. Ιδιαίτερα σοβαρές φωτοβλάβες συσσωρεύουν οι χλωροπλάστες των εξώτατων στοιβάδων
 4. Το φάσμα δράσης της φωτοπαρεμπόδισης υποδηλώνει ότι η καταπόνηση προκαλείται από την απορρόφηση φωτονίων στην ορατή αλλά ιδιαίτερα στην UV περιοχή.



Φάσματα Δράσης της Ακτινοβολίας 1/2

- **Φάσματα απορρόφησης**

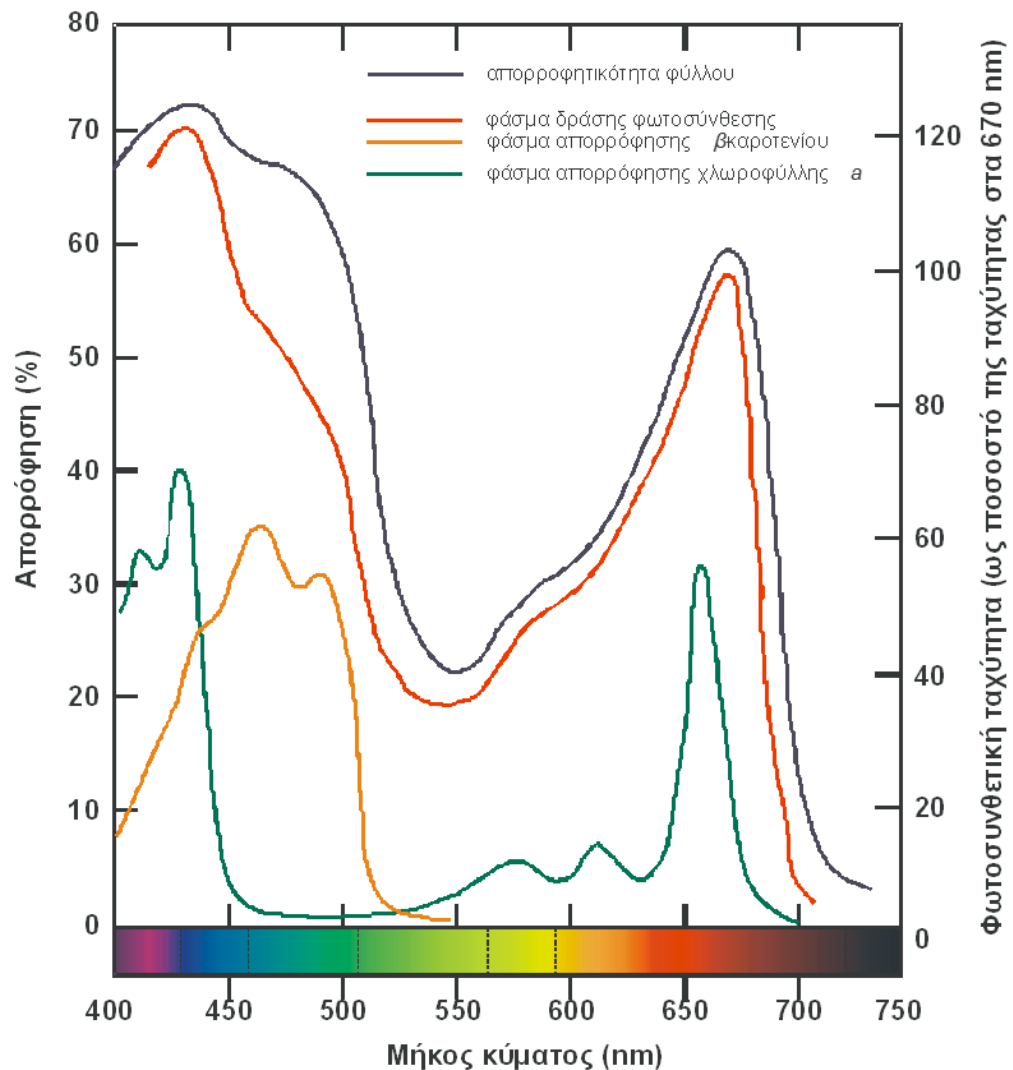
- Αφορούν στον τρόπο με τον οποίο ένα μόριο απορροφά φωτόνια σε μια περιοχή μηκών κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

- **Φάσματα δράσης**

- Μας δίνουν μια εικόνα της σχετικής αποτελεσματικότητας των φωτονίων διαφόρων μηκών κύματος σε έναν φυσιολογικό μηχανισμό.

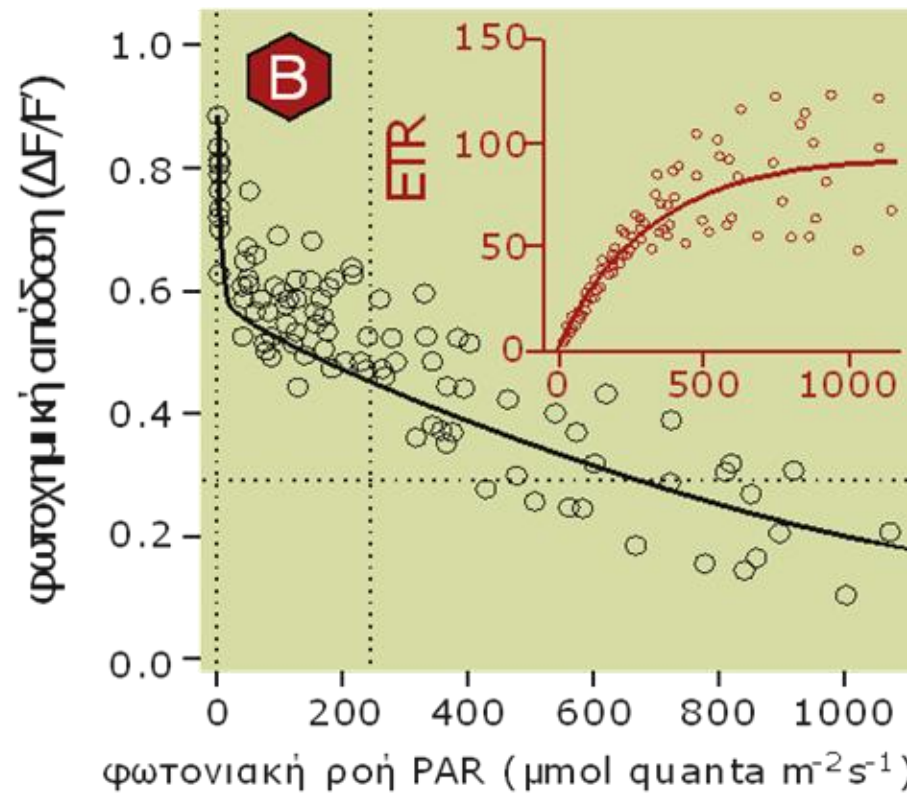
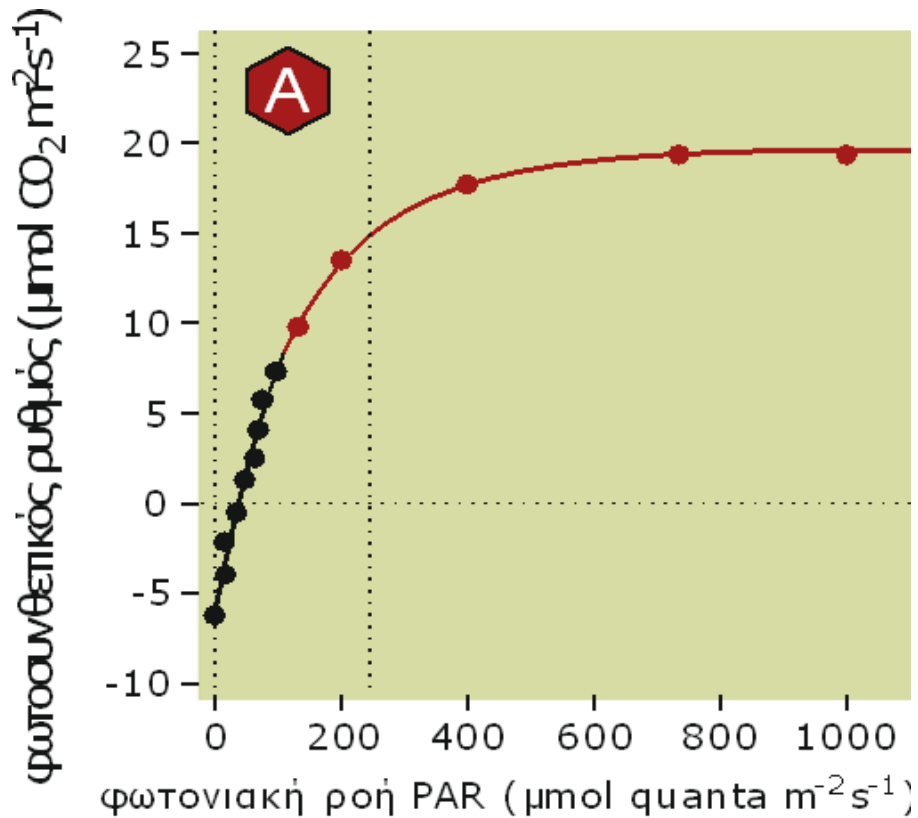


Φάσματα Δράσης της Ακτινοβολίας 2/2



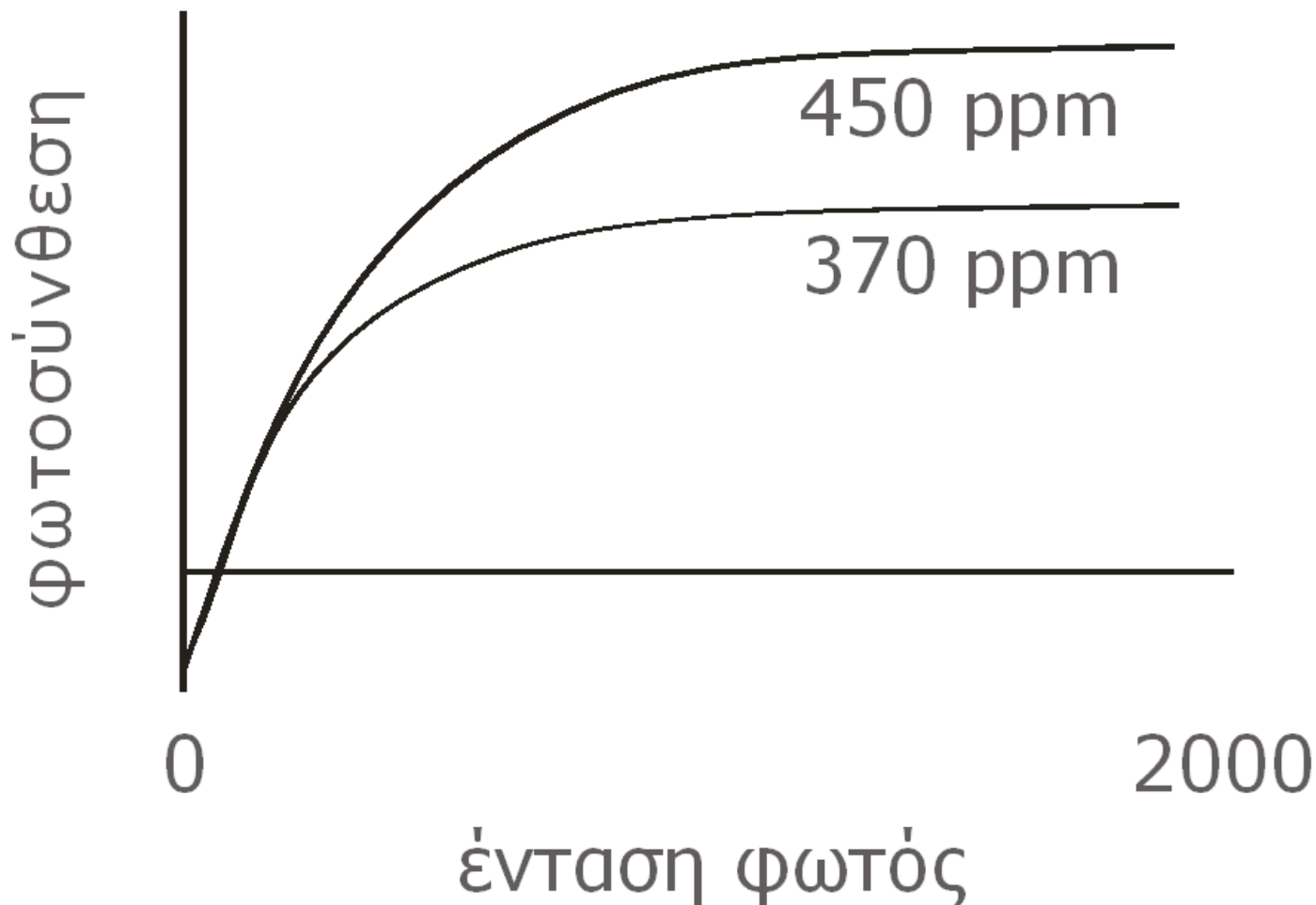


Καταπόνηση από Υψηλές Εντάσεις Ακτινοβολίας 4/16





Καταπόνηση από Υψηλές Εντάσεις Ακτινοβολίας 5/16

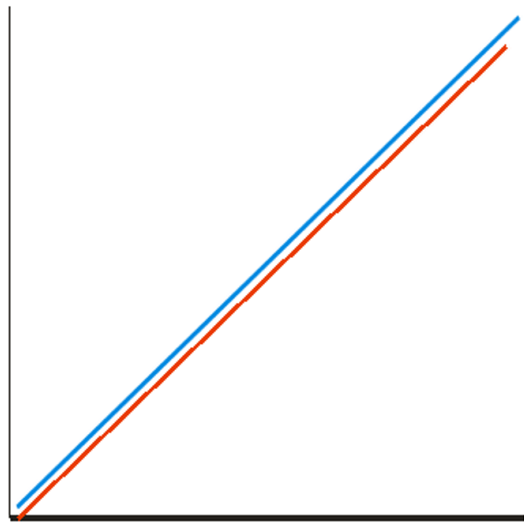




Καταπόνηση από Υψηλές Εντάσεις Ακτινοβολίας 6/16

περίσσεια CO_2

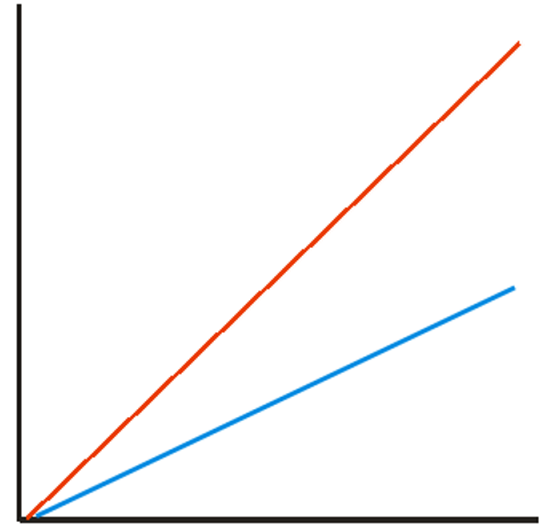
φωτοσύνθεση



ένταση φωτός

περίσσεια φωτός

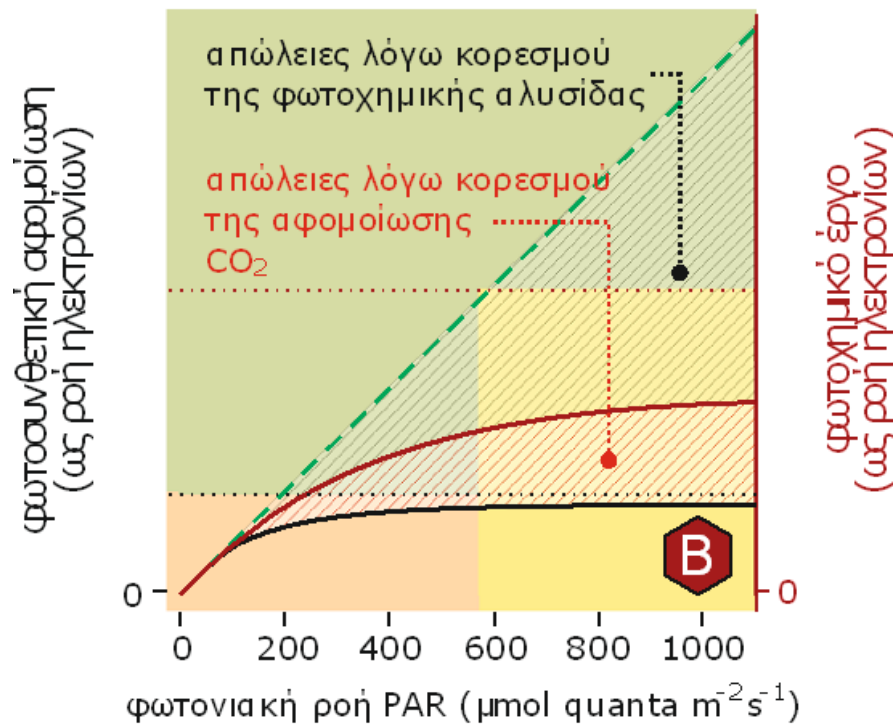
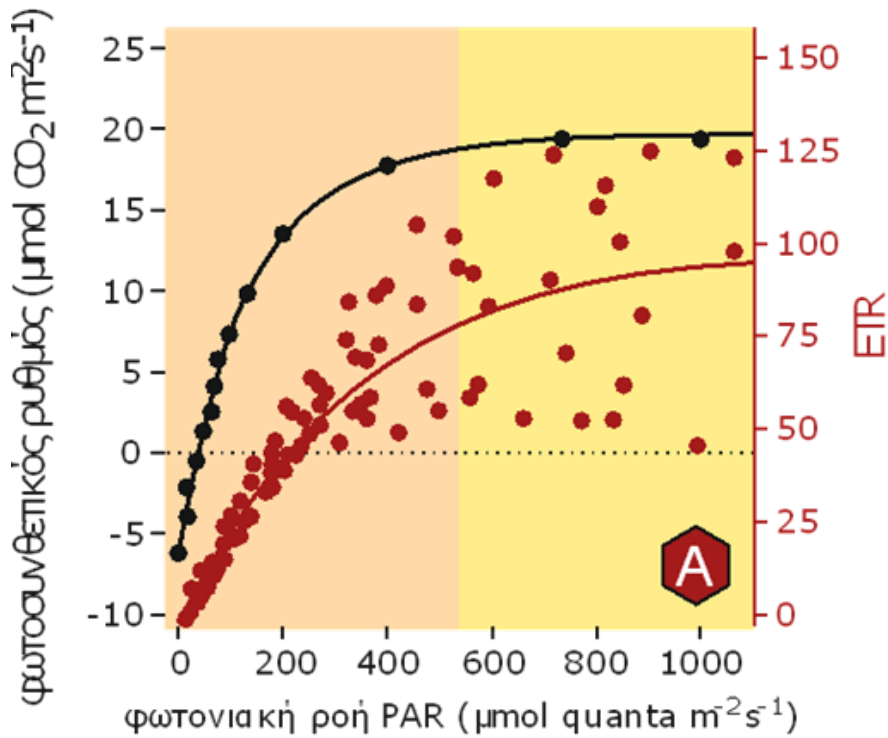
φωτοσύνθεση



συγκ. CO_2

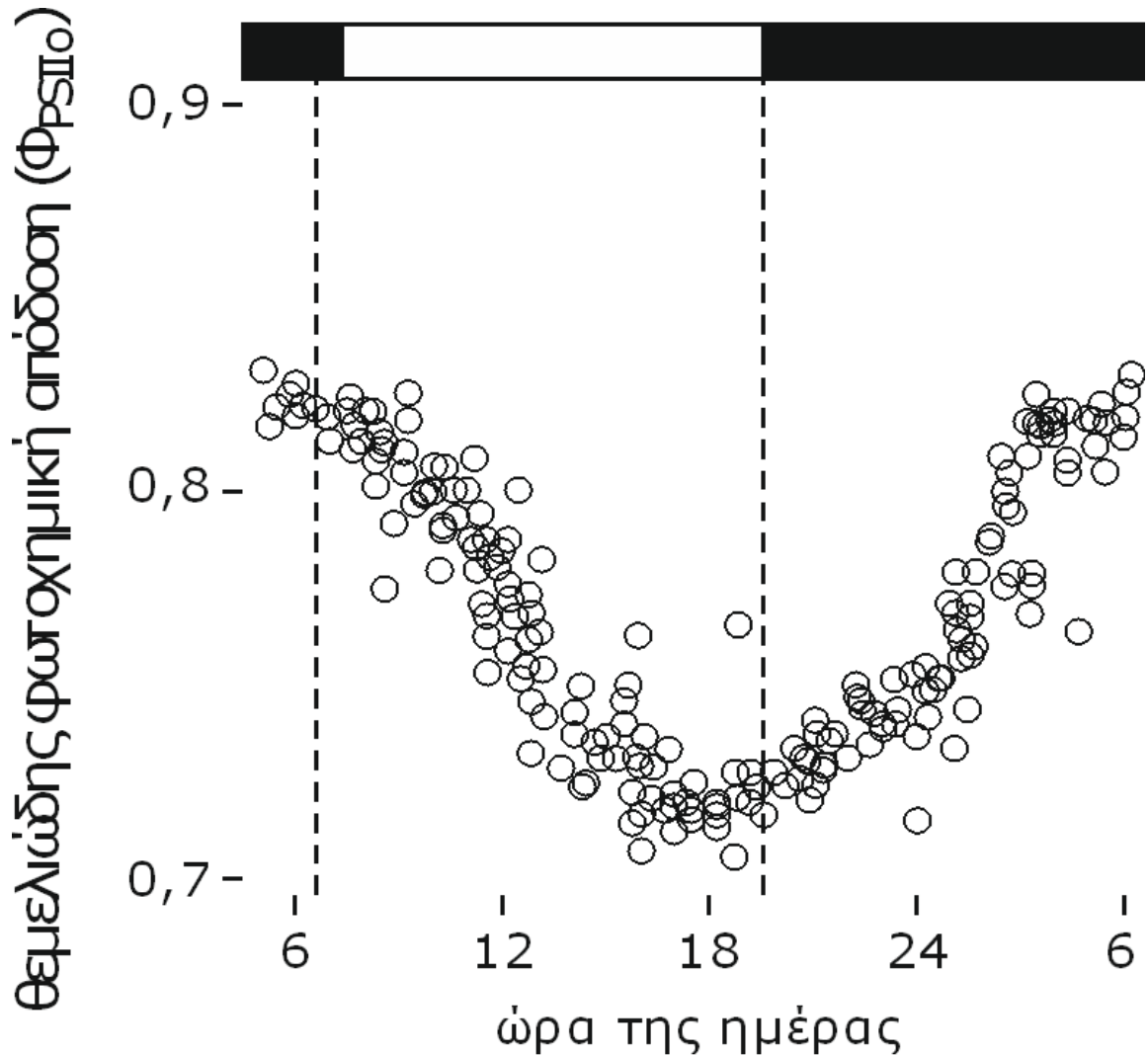


Καταπόνηση από Υψηλές Εντάσεις Ακτινοβολίας 7/16





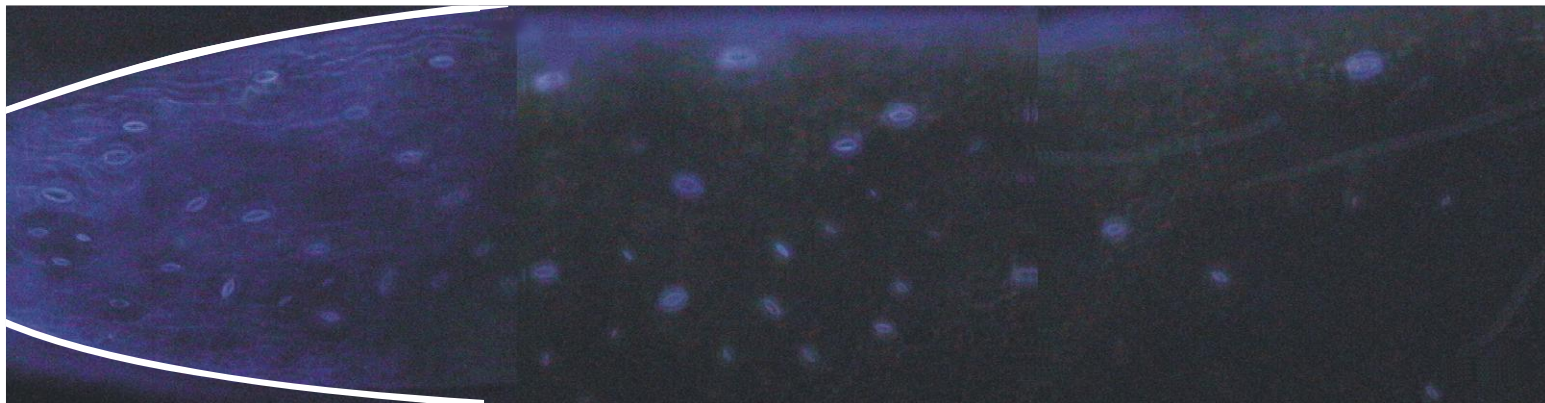
Καταπόνηση από Υψηλές Εντάσεις Ακτινοβολίας 8/16





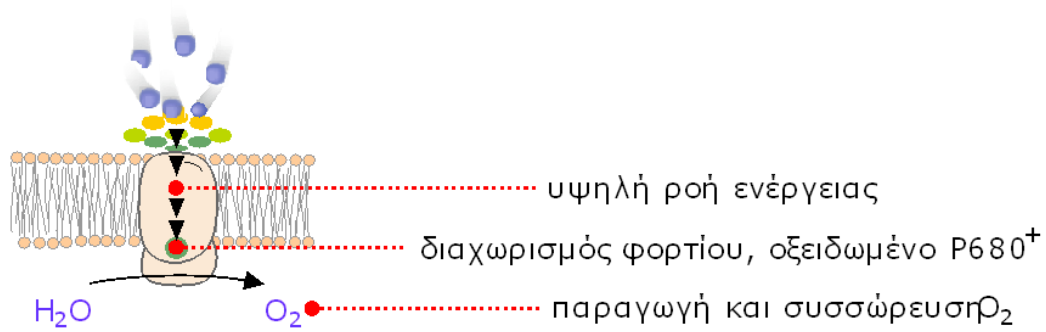
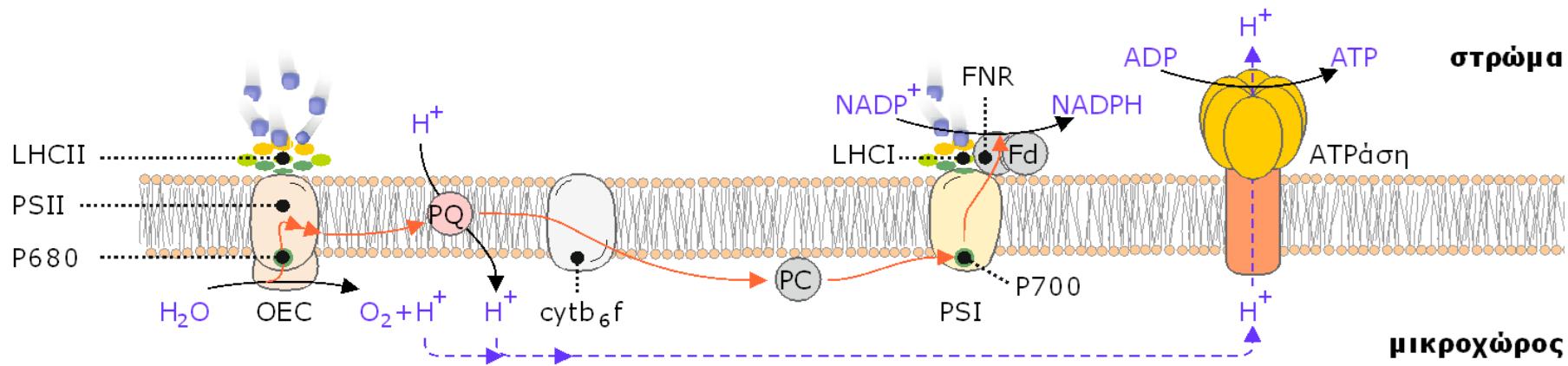
Καταπόνηση από Υψηλές Εντάσεις Ακτινοβολίας 9/16

- **Περιβαλλοντικές παράμετροι**
 - Ακραίες θερμοκρασίες
 - Υψηλές εντάσεις PAR
 - Υδατική καταπόνηση
 - Τροφοπενίες θρεπτικών στοιχείων
- **Φυσιολογικές παράμετροι**
 - Στάδιο ανάπτυξης



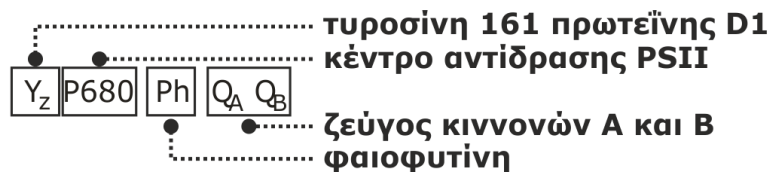


Καταπόνηση από Υψηλές Εντάσεις Ακτινοβολίας 10/16





Καταπόνηση από Υψηλές Εντάσεις Ακτινοβολίας 11/16



Y_z P680 Ph Q_A Q_B PSII ανοικτό

Y_z P680 Ph Q_A Q_B απορρόφηση φωτονίου

Y_z $^1P680^*$ Ph Q_A Q_B διέγερση Chl του P680

Y_z P680⁺ Ph⁻ Q_A Q_B διαχωρισμός φορτίου

Y_z P680⁺ Ph Q_A^- Q_B μεταφορά e

Y_z^+ P680 Ph Q_A Q_B^- αναγωγή P680

**μικρή ενεργειακή πίεση,
εναρμόνιση ροής ενέργειας
και φωτοσυνθετικού αναβολισμού**

Y_z P680 Ph Q_A Q_B προώθηση e προς το PSI

Y_z P680 Ph Q_A Q_B PSII ανοικτό

Y_z P680 Ph Q_A Q_B απορρόφηση φωτονίου

**μεγάλη ενεργειακή
πίεση, αδυναμία
προώθησης
e προς το PSI,
δέκτες ηλεκτρονίων
ανηγμένοι**

Y_z P680 Ph Q_A Q_B^- PSII ανοικτό

Y_z P680 Ph Q_A Q_B^- απορρόφηση φωτονίου

Y_z $^1P680^*$ Ph Q_A Q_B^- διέγερση Chla του P680

Y_z P680⁺ Ph⁻ Q_A Q_B^- διαχωρισμός φορτίου

Y_z P680⁺ Ph Q_A^- Q_B^- μεταφορά e, ζεύγος Q ανηγμένο (PSII κλειστό)

Y_z^+ P680 Ph⁻ Q_A^- Q_B^- αναγωγή P680

Y_z P680 Ph⁻ Q_A^- Q_B^- αδυναμία προώθησης e

Y_z P680 Ph⁻ Q_A^- Q_B^- απορρόφηση φωτονίου

Y_z $^1P680^*$ Ph⁻ Q_A^- Q_B^- διέγερση Chl του P680, αδυναμία διαχωρισμού φορτίου

Y_z $^1P680^*$ Ph⁻ Q_A^- Q_B^- παραμονή Chla στη διέγερση απλότητας

**διεσωτερική μετάβαση
της $^1Chla^*$ σε $^3Chla^*$**



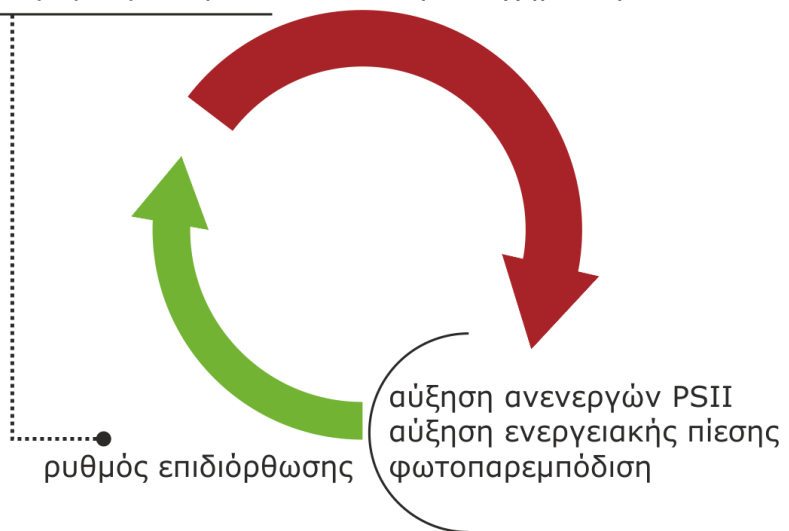
Καταπόνηση από Υψηλές Εντάσεις Ακτινοβολίας 12/16

επανάληψη διαδικασίας

η πορεία συσσώρευσης φωτοπαρεμπόδισης

περιβαλλοντικοί παράγοντες
 ύπαρξη καταπονήσεων
 στάδιο ανάπτυξης φυτού
 είδος φυτού
 βαθμός εγκλιματισμού

ρυθμός
 μετασχηματισμού P680



διεσωτερική μετάβαση
 της $^1\text{Chla}^*$ σε $^3\text{Chla}^*$

$^3\text{P680} \rightsquigarrow ^3\text{O}_2$

P680 $^1\text{O}_2$

P680 $^1\text{O}_2$

[P680]

αποδιέγερση προς το
 οξυγόνο τριπλότητας
 δημιουργία ROS (μετατροπή
 σε οξυγόνο απλότητας)

προσβολή του P680

μετασχηματισμένο P680
 (μη λειτουργικό PSII)

επιδιόρθωση

αποσύσταση PSII

αποδόμηση πρωτεΐνης D_1

de novo βιοσύνθεση

επανασύσταση PSII



Καταπόνηση από Υψηλές Εντάσεις Ακτινοβολίας 13/16

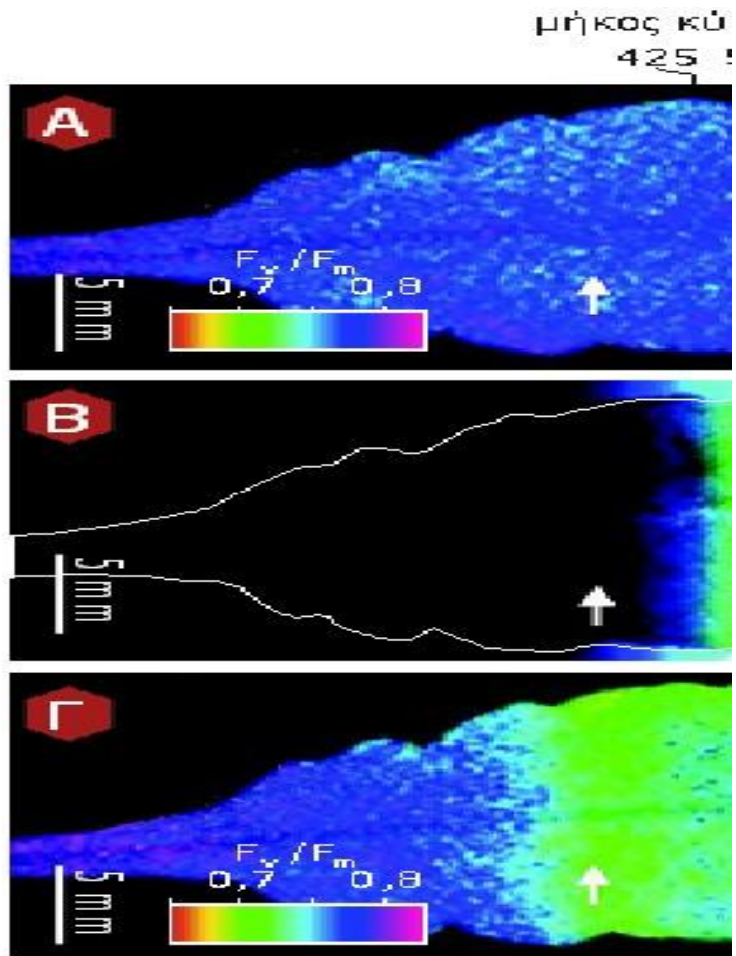
● Αίτια της φωτοπαρεμπόδισης

1. Ο υπάρχων βιοχημικός εξοπλισμός μεταφοράς ηλεκτρονίων και αφομοίωσης του CO_2 μέσω του κύκλου Calvin-Benson δεν επαρκεί για την φωτοσυνθετική απόσβεση του συνόλου της συλλεγόμενης ενέργειας.
2. Το φαινόμενο επιτείνεται με την αύξηση της αντίστασης των στοματίων στην διάχυση του CO_2 .
3. Στις συνθήκες αυτές η φωτοχημική ροή ηλεκτρονίων διακόπτεται ενώ οι ενδιάμεσοι φορείς ηλεκτρονίων παραμένουν πολύ χρόνο σε ανηγμένη μορφή.
4. Ιδιαίτερα ευαίσθητο είναι το PSII του οποίου η πρωτεΐνη D1 καταστρέφεται με ρυθμούς ανώτερους από εκείνους της επιδιόρθωσης.



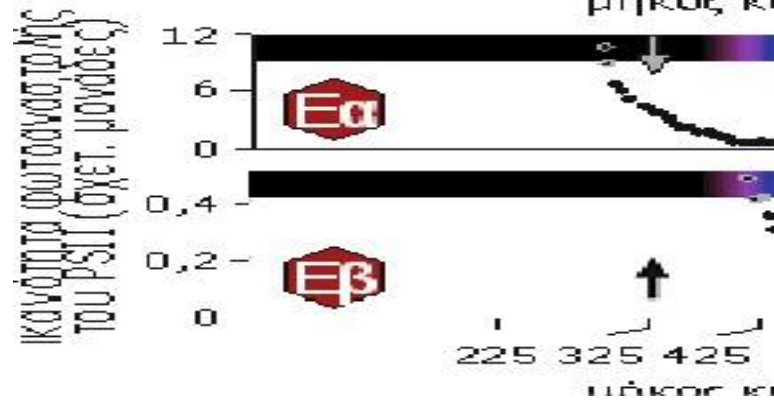
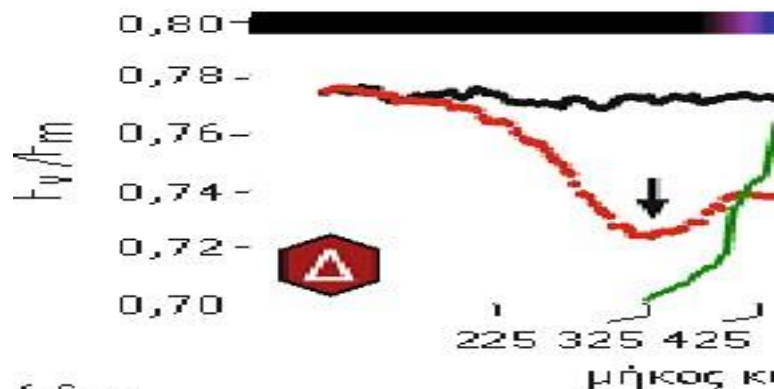
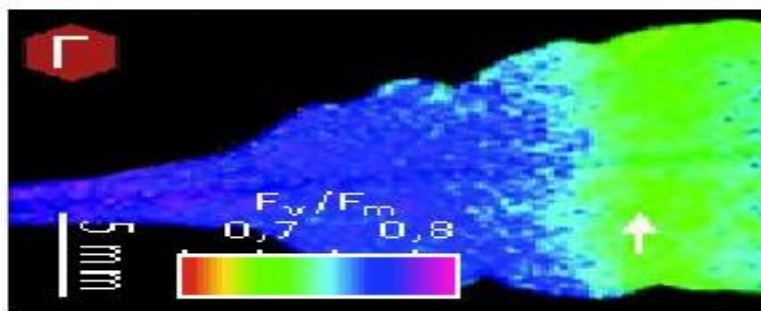
Καταπόνηση από Υψηλές Εντάσεις Ακτινοβολίας 14/16

- Αίτια της φωτοπαρεμπόδισης.





Καταπόνηση από Υψηλές Εντάσεις Ακτινοβολίας 15/16





Καταπόνηση από Υψηλές Εντάσεις Ακτινοβολίας 16/16

- Τελική κατάληξη της φωτοπαρεμπόδισης
 1. Ο υπερκορεσμός των φωτοχημικών κέντρων με ενέργεια διέγερσης εκφράζεται με μια χαρακτηριστική αύξηση των επιπέδων του φθορισμού της χλωροφύλλης και μείωση της φωτοχημικής απόδοσης (ΦPSII).
 2. Το πλεόνασμα της ενέργειας συμμετέχει σε φωτοχημικές αντιδράσεις άλλες από αυτές της φωτοχημικής ροής ηλεκτρονίων με συνέπεια την παραγωγή ενεργών μορφών οξυγόνου (ROS).
 3. Η συσσώρευση ROS υπερβαίνει την ικανότητα του αντιοξειδωτικού μεταβολισμού με συνέπεια την ανεξέλεγκτη οξείδωση λιπιδίων, πρωτεϊνών και νουκλεϊκών οξέων.



Διακρίνονται Τρεις Κύριες Στρατηγικές

- Η στρατηγική της διαφυγής
- Η στρατηγική της αποφυγής
- Η στρατηγική της ανθεκτικότητας



Η Στρατηγική της Διαφυγής

- Επιλέγεται από ετήσιες ή εφήμερες μορφές ζωής. Τα φυτά αυτά ολοκληρώνουν τον βιολογικό τους κύκλο μέσα στα στενά όρια της ευνοϊκής περιόδου κατά την οποία υφίσταται σκίαση από υπερκείμενα φυλλώματα.



Η Στρατηγική της Αποφυγής 1/3

- Αφορά στην αποφυγή της συλλογής υπερβολικών ποσών ενέργειας της φωτεινής ακτινοβολίας. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της ύπαρξης οπτικών φραγμάτων ή φίλτρων τα οποία ανακλούν, σκεδάζουν ή απορροφούν μέρος της ορατής ακτινοβολίας με σκοπό την αποτροπή υπερδιέγερσης των φωτοσυνθετικών χρωστικών. Μια άλλη ομάδα μηχανισμών αφορά στην διεύθυνση φύλλων ή ακόμα και χλωροπλαστών με τέτοιο τρόπο ώστε να μειώνεται η έκθεσή τους στην προσπίπτουσα ακτινοβολία.



Η Στρατηγική της Ανθεκτικότητας 1/7

- Τα φυτικά είδη που έχουν επιλέξει αυτή την στρατηγική συλλέγουν υψηλά ποσά ενέργειας της φωτεινής ακτινοβολίας μέρος των οποίων είναι συχνά πλεονασματικό αναφορικά με την ενέργεια που μπορούν να διοχετεύσουν για τη φωτοσυνθετική αφομοίωση του CO₂. Ως εκ τούτου, οι χλωροπλάστες των φυτών αυτών υφίστανται μεγάλης έκτασης ενεργειακή πίεση.
- Η ανθεκτικότητά τους συνίσταται στην ύπαρξη αποτελεσματικών μηχανισμών διοχέτευσης της πλεονάζουσας ενέργειας καθώς και μηχανισμών επιδιόρθωσης των βλαβών από το φως σε συνδυασμό με έναν αποδοτικό αντιοξειδωτικό μεταβολισμό.



Η Στρατηγική της Αποφυγής 2/3

- **Χαρακτηριστικά προσαρμογής**
 - Οπτικά φίλτρα και φράγματα:
 - Χρωστικές (ανθοκυανίνες)
 - Επιεφυμενιδικοί κηροί
 - Τρίχωμα
 - Ανατομικά χαρακτηριστικά και οπτικές ιδιότητες:
 - Κλίση ελάσματος
 - Γεωμετρία ελάσματος και μηχανική του μίσχου
 - Ανατομικά στοιχεία που άγουν το φως
 - Σκληρεΐδες
 - Προεκτάσεις δεσμικών κολεών

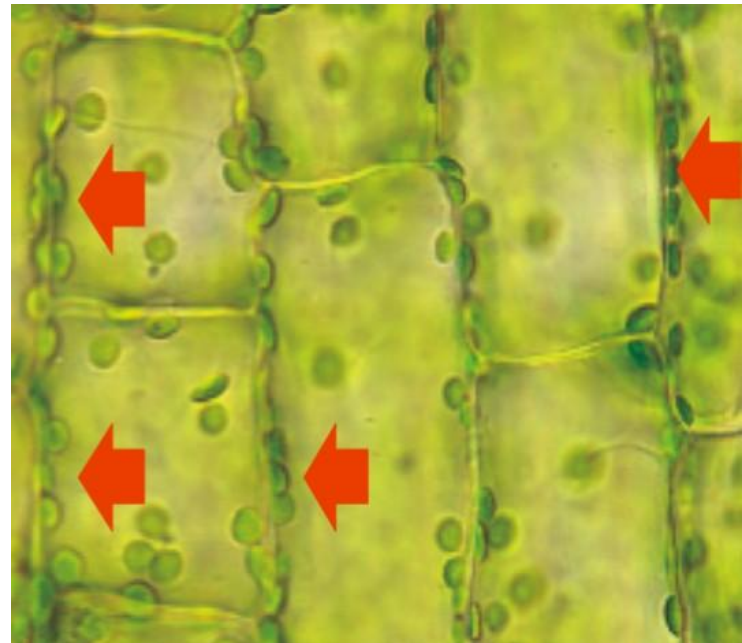


Η Στρατηγική της Αποφυγής 3/3

- Χαρακτηριστικά εγκλιματισμού

- Κινήσεις:

- Παραηλιοτροπικές κινήσεις του ελάσματος
- Αυξητικές κινήσεις
- Χλωροπλαστικές κινήσεις





Η Στρατηγική της Ανθεκτικότητας 2/7

● Εναλλακτικές οδοί απόσβεσης της ενέργειας

– Απόσβεση στο επίπεδο της ροής ηλεκτρονίων (μεταβολική απόσβεση)

● Α. Φωτοχημική-φωτοσυνθετική απόσβεση

1. Αφομοίωση CO_2 μέσω κατανάλωσης ανηγμένων μορίων (NADPH_2) και ATP

● Β. Φωτοχημική-μη φωτοσυνθετική απόσβεση

2. Φωτοαναπνοή

3. Αντίδραση Mehler (κύκλος νερού)

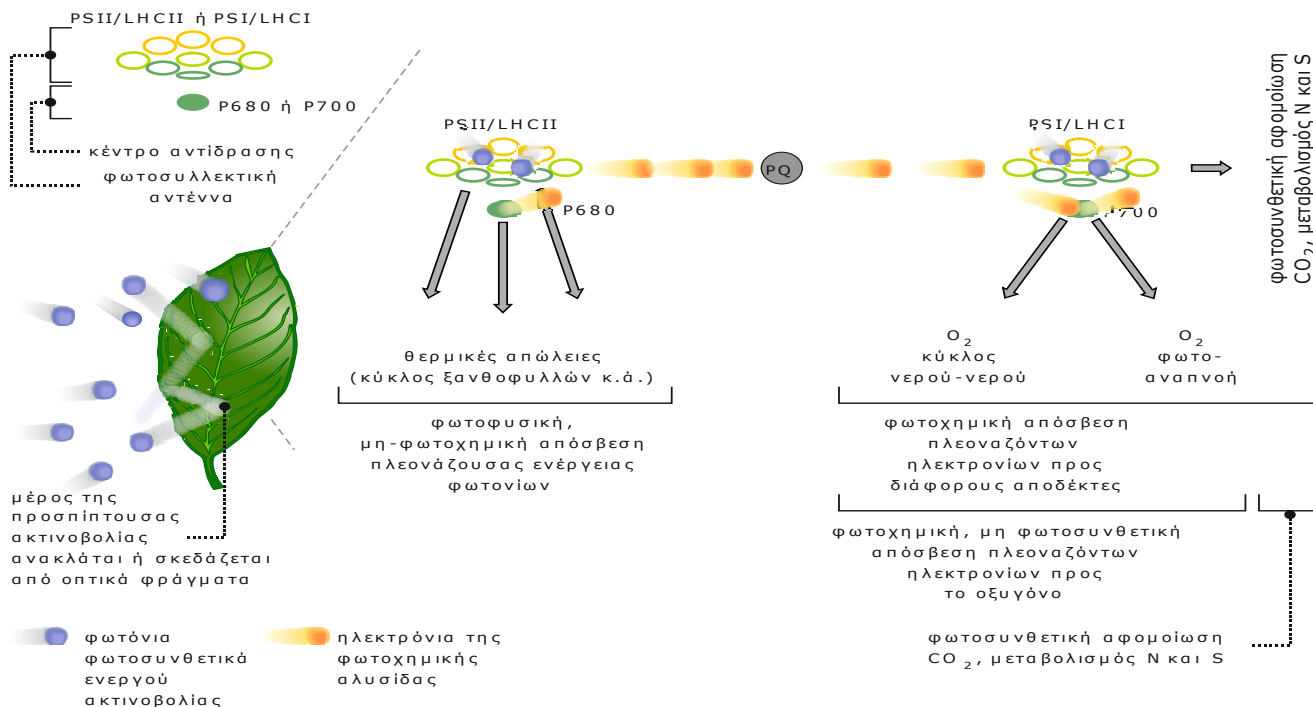
– Απόσβεση στο επίπεδο της φωτοσυλλογής (φωτονιακή απόσβεση)

● Γ. Μη φωτοχημική απόσβεση

4. Μέσω ενεργειακά εξαρτώμενης απόσβεσης (qE)

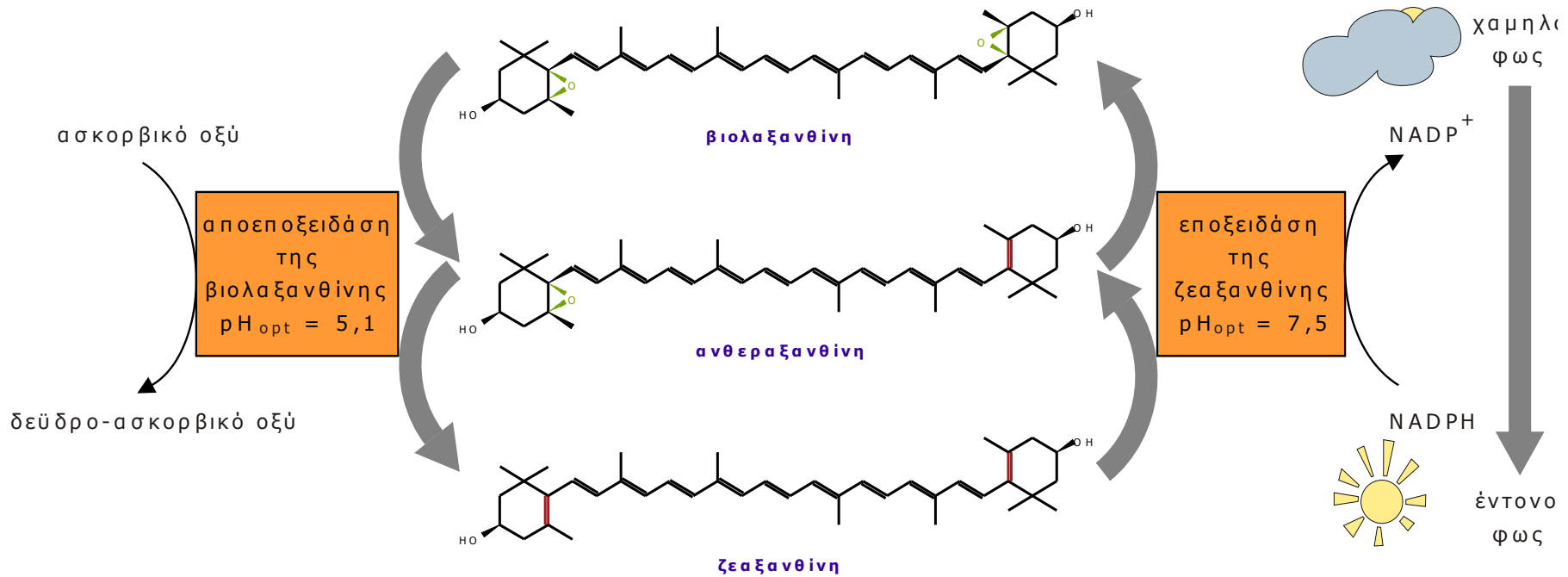


Η Στρατηγική της Ανθεκτικότητας 3/7



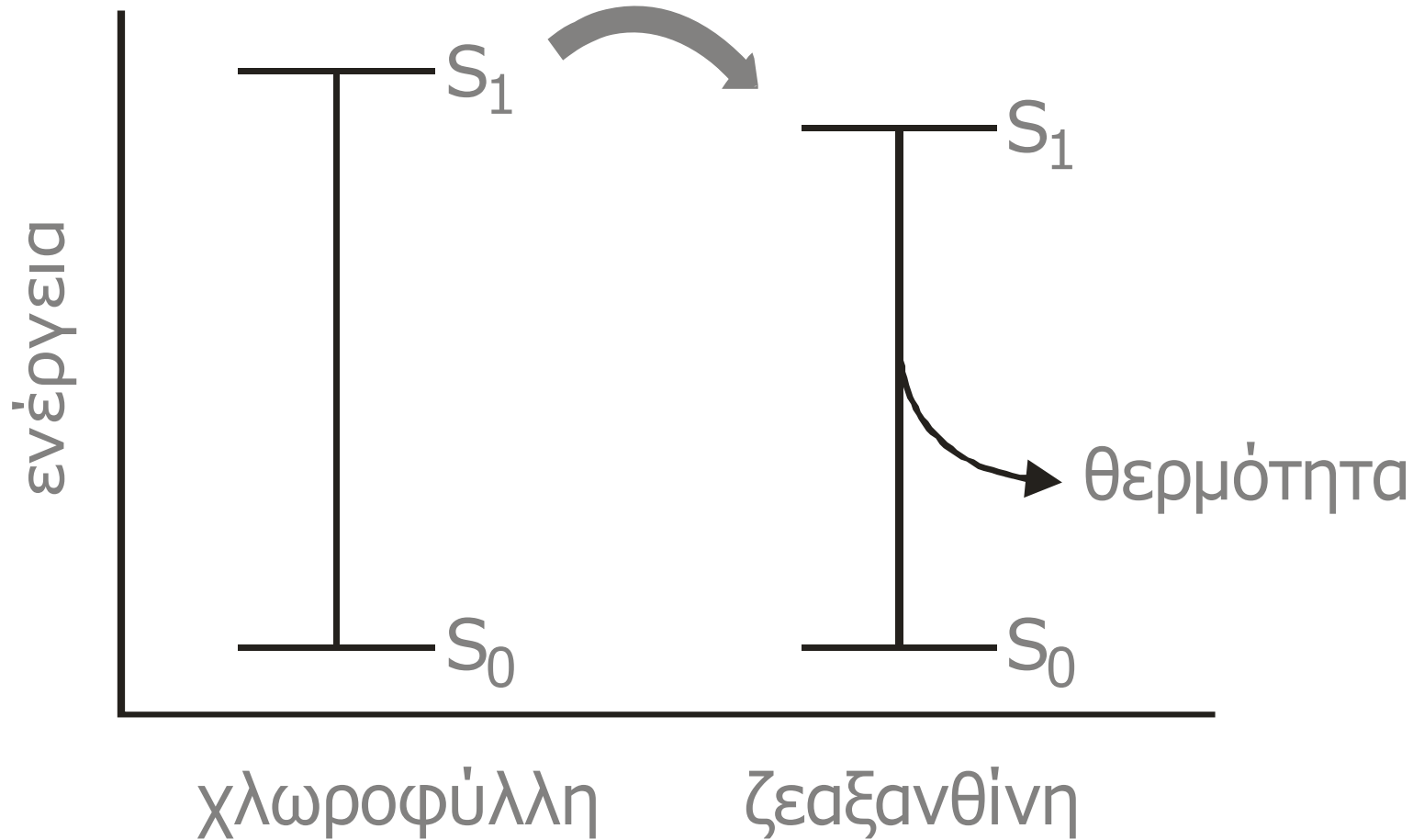


Η Στρατηγική της Ανθεκτικότητας 4/7



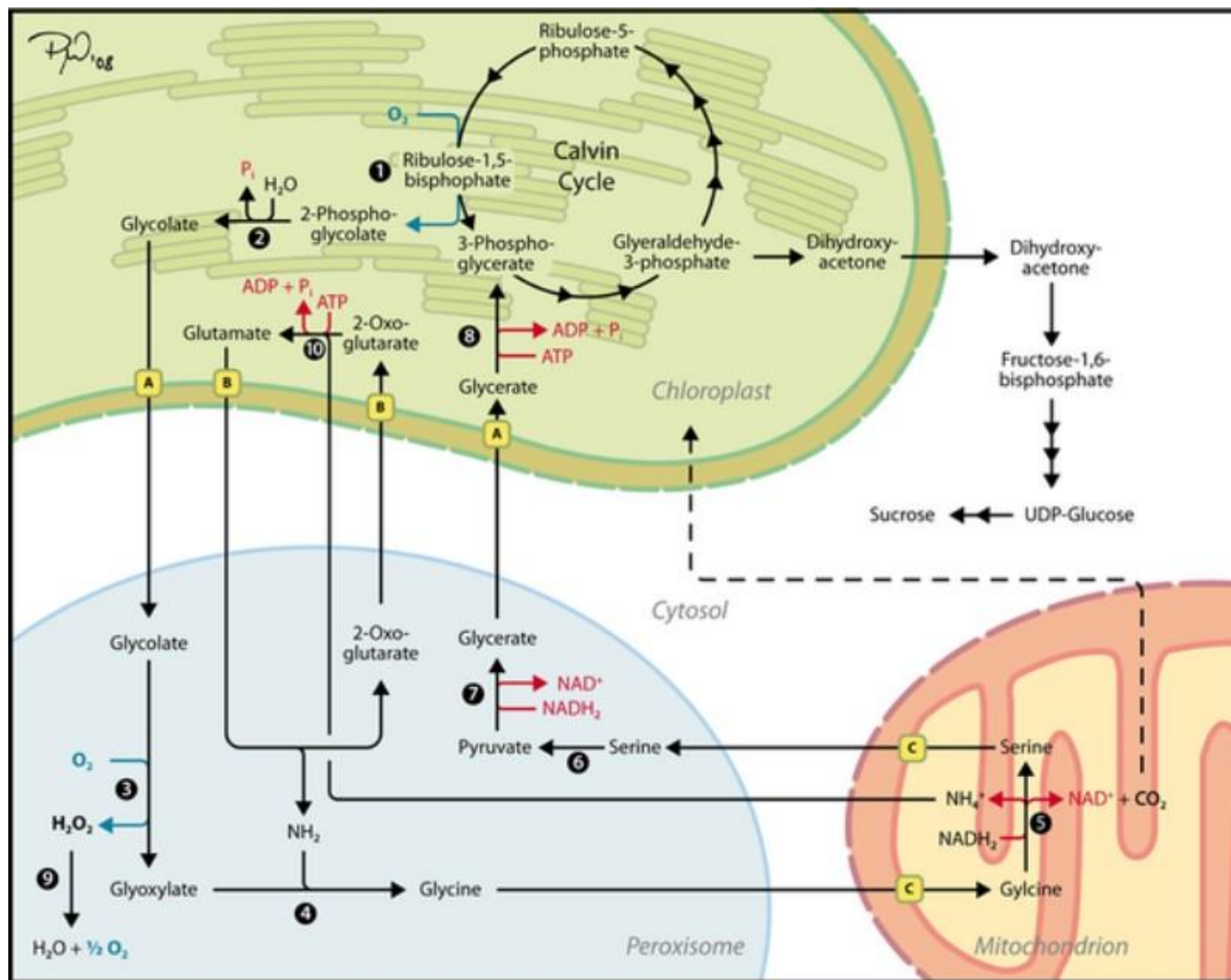


Η Στρατηγική της Ανθεκτικότητας 5/7



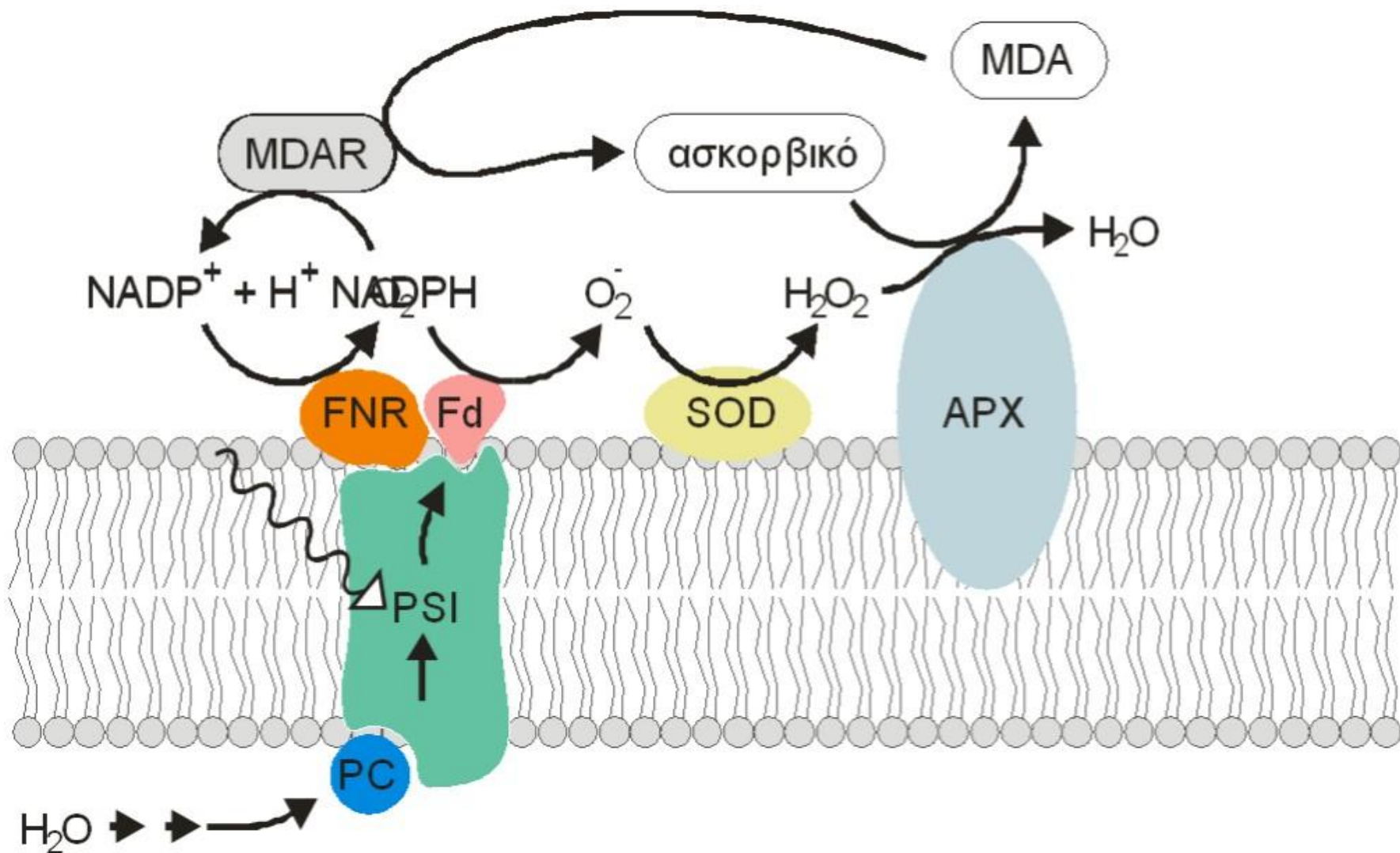


Η Στρατηγική της Ανθεκτικότητας 6/7





Η Στρατηγική της Ανθεκτικότητας 7/7





Βιβλιογραφία 1/2

- Baker, N.R. 2008. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo. *Annual Review of Plant Biology*, 59: 89-113.
- Demmig-Adams, B., Adams, W.W. 1996. The role of xanthophyll cycle carotenoids in the protection of photosynthesis. *Trends in Plant Science*, 1: 21-26.
- Jansen, M. A. K., Gaba, V. and Greenberg, B. M. 1998. Higher plants and UV-B radiation: balancing damage, repair and acclimation. *Trends Plant Sci.* 3:131-135.
- Maxwell, K., Johnson, G.N. 2000. Chlorophyll fluorescence-a practical guide. *Journal of Experimental Botany*, 51: 659-668.
- Niyogi, K.K. 2000. Safety valves for photosynthesis. *Current Opinion in Plant Biology*. 3: 455-460.



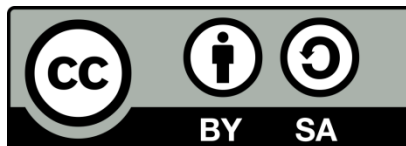
Βιβλιογραφία 2/2

- Ort, D. R. 2001. When there is too much light. *Plant Physiology* 125: 29-32.
- Stoch, M., Spunda, V., Kurasová, I. 2004. Non-radiative dissipation of absorbed excitation energy within photosynthetic apparatus of higher plants. *Photosynthetica*, 42: 323-337.
- Takahashi, S., Murata, N. 2008. How do environmental stresses accelerate photoinhibition? *Trends in Plant Science*, 13: 178-182.
- Takahashi, S., Milward, S.E., Yamori, W., Evans, J.R., Hillier, W., Badger, M.R. 2010. The solar action spectrum of photosystem II damage. *Plant Physiology*, doi: 10.1104/pp.110.155747.



Άδειες Χρήσης

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





Χρηματοδότηση

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



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ
επένδυση στην κοινωνία της γνώσης

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ
2007-2013
πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ



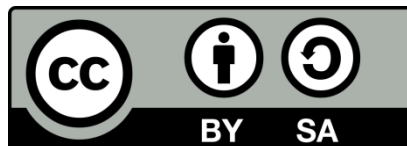
Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών 2014. Τμήμα Επιστήμης Φυτικής Παραγωγής, Γεώργιος Καραμπουρνιώτης/ Γεώργιος Λιακόπουλος. «Φυσιολογία Καταπονήσεων των Φυτών». Έκδοση: 1.0. Αθήνα 2014. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <https://mediasrv.aua.gr/eclass/courses/OCDCS100/>



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων, π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



Η άδεια αυτή ανήκει στις άδειες που ακολουθούν τις προδιαγραφές του Ορισμού Ανοικτής Γνώσης [2], είναι ανοικτό πολιτιστικό έργο [3] και για το λόγο αυτό αποτελεί ανοικτό περιεχόμενο [4].

[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

[2] <http://opendefinition.org/okd/ellinika/>

[3] <http://freedomdefined.org/Definition/EI>

[4] <http://opendefinition.org/buttons/>



Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
 - το Σημείωμα Αδειοδότησης
 - τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
 - το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)
- μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.