

# Η άμυνα των φυτών ή αλλιώς γιατί η γη είναι πράσινη...

οι φυτικοί οργανισμοί βρίσκονται συνεχώς σε επαφή με ένα εχθρικό βιοτικό περιβάλλον

βακτήρια

νηματώδεις

ιοί

έντομα

μύκητες

ακάρεα

φυτοφάγα ζώα

# Η άμυνα των φυτών ή αλλιώς γιατί η γη είναι πράσινη...

Τα φυτά αναγκάστηκαν μέσω της εξέλιξης να θωρακίσουν τα κύτταρα τους έναντι των επίδοξων εχθρών, εφοδιαζόμενα με:

κατάλληλη δομή

αγκάθια  
τρίχες  
εφυμενίδα κ.α.

αποτέλεσμα εξέλιξης -  
συνεξέλιξης

βιοχημικό οπλοστάσιο

δευτερογενείς  
μεταβολίτες

# Η εξέλιξη και η άμυνα των φυτών

Η αμυντική θωράκιση οικοδομήθηκε **σταδιακά** μέσω της

**εξέλιξης (ή και της συνεξέλιξης με τους εχθρούς)** από

τυχαίες ή «κατευθυνόμενες» μεταλλάξεις οι οποίες οδηγούσαν

στην παραγωγή ενός νέου αμυντικού μορίου με τοξική δράση

έναντι των παθογόνων ή/και των άλλων εχθρών



διαιώνιση των ατόμων που διέθεταν βελτιωμένα  
αμυντικά χαρακτηριστικά

# Δευτερογενείς μεταβολίτες

Οι φυτικοί οργανισμοί παράγουν έναν μεγάλο αριθμό οργανικών μορίων (>100.000 χημικές δομές), η σύνθεση των οποίων δεν φαίνεται να σχετίζεται ευθέως με τις ανάγκες της αύξησης και της ανάπτυξης



**δευτερογενείς μεταβολίτες ή προϊόντα του δευτερογενούς μεταβολισμού**

# Αντίστιξη: πρωτογενής μεταβολισμός

Πρωτογενής μεταβολισμός: Ο μεταβολισμός που σχετίζεται με ζωτικές λειτουργίες και λειτουργεί σε όλα τα φυτικά κύτταρα

αμινοξέα,  
λιπίδια,  
νουκλεοτίδια,  
υδατάνθρακες,  
οργανικά οξέα κ.ά.

διαδραματίζουν  
ζωτικής σημασίας  
ρόλους

αναπνοή, φωτοσύνθεση,  
αφομοίωση ανόργανων  
θρεπτικών στοιχείων κ.ά.

# Δευτερογενείς μεταβολίτες

η σύνθεση και συσσώρευση των δευτερογενών μεταβολιτών συνδέεται στενά με τη **λειτουργία αμυντικών μηχανισμών** έναντι κυρίως βιοτικών αλλά και αβιοτικών καταπονήσεων

επίσης  
συνδέεται με:

πλειάδα οικολογικών ρόλων:

- ✓ αναπαραγωγή
- ✓ εγκαθίδρυση συμβιωτικών σχέσεων
- ✓ ανταγωνισμό με γειτονικά φυτά κ.ά.

# Άρα, ο δευτερογενής μεταβολισμός είναι...

**Ο μεταβολισμός τα προϊόντα του οποίου εμπλέκονται κυρίως σε αλληλεπιδράσεις μεταξύ του φυτού και του (βιοτικού ή αβιοτικού) περιβάλλοντος**

Οι μεταβολίτες αυτοί προέρχονται από ενδιάμεσες ενώσεις του πρωτογενούς μεταβολισμού

# Οι δευτερογενείς μεταβολίτες κατατάσσονται σε τρεις μεγάλες ομάδες

Με βάση τη βιοσυνθετική οδό μέσω της οποίας παράγονται και τα χαρακτηριστικά του μορίου, οι δευτερογενείς μεταβολίτες κατατάσσονται σε:

- ❖ Φαινολικές ενώσεις

- ❖ Τερπένια

- ❖ Αζωτούχες ενώσεις



# Η άμυνα του φυτού έναντι των παθογόνων

Τα παθογόνα επηρεάζουν σημαντικές λειτουργίες του ξενιστή

Εύρος και μορφή αλλαγών εξαρτώνται από

- είδος του παθογόνου
- είδος του οργάνου που εκδηλώνεται η προσβολή
- χρονική στιγμή που εκδηλώνεται η προσβολή
- αναπτυξιακό στάδιο του οργάνου
- παράλληλες καταπονήσεις

# Πώς επηρεάζεται η φωτοσύνθεση

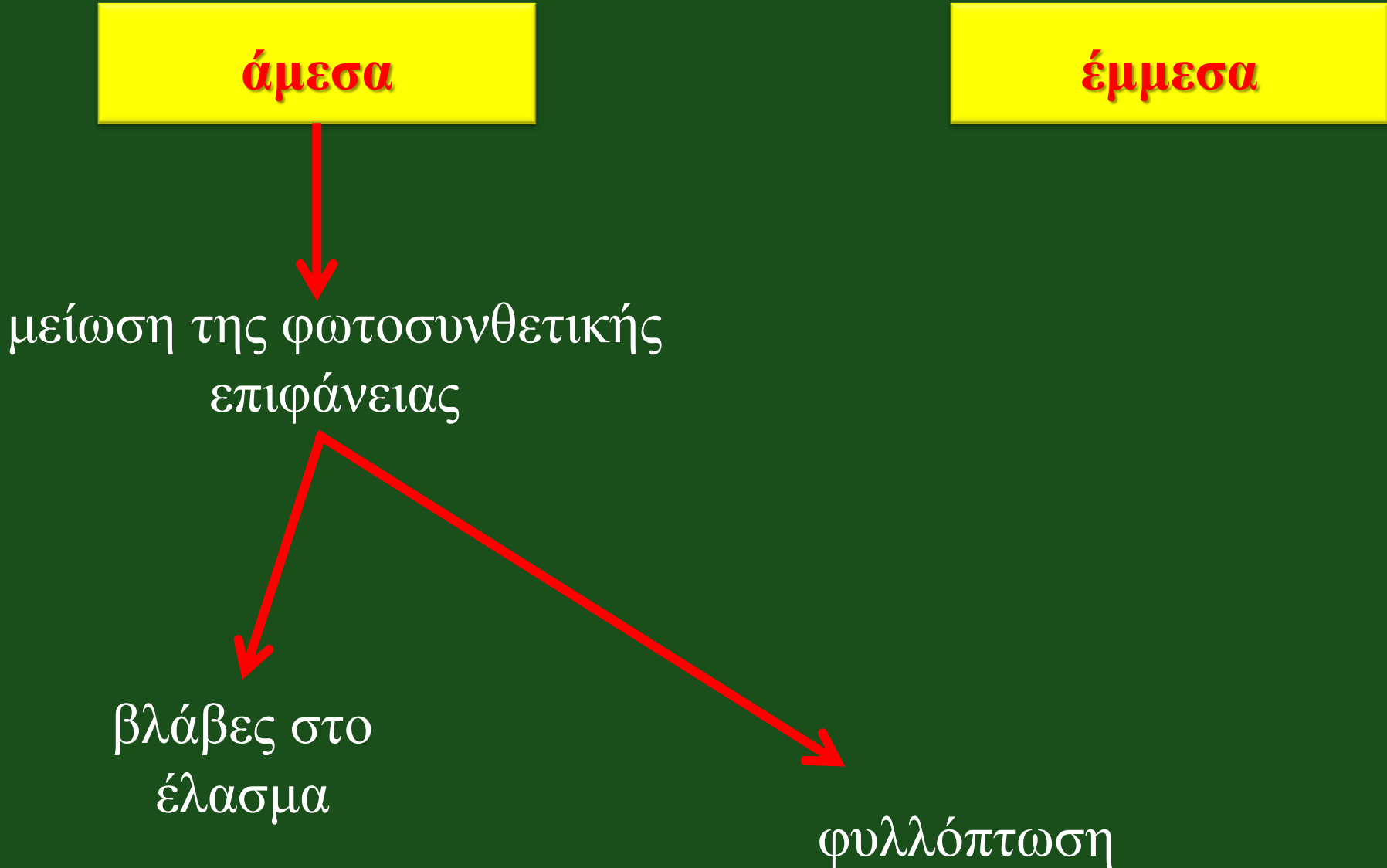
**άμεσα**

**έμμεσα**

μείωση της φωτοσυνθετικής  
επιφάνειας

βλάβες στο  
έλασμα

φυλλόπτωση



# Πώς επηρεάζεται η φωτοσύνθεση

**άμεσα**

**έμμεσα**

παθογόνα που προσβάλλουν τις  
ηθμαγγειώδεις δεσμίδες  
προκαλούν  
κλείσιμο των στομάτων

άμεσες βλάβες στους  
χλωροπλάστες

μολυσματικοί παράγοντες ή  
τοξίνες των παθογόνων παρεμποδίζουν τη  
δραστηριότητα φωτοσυνθετικών ενζύμων

# Πώς επηρεάζεται η φωτοσύνθεση

άμεσα

έμμεσα

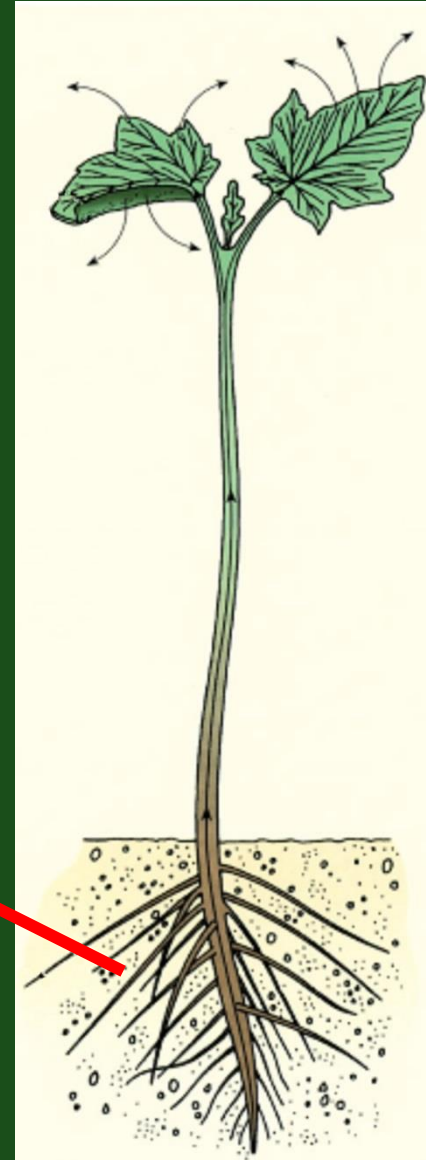
Η αντίληψη διεγερτών\* από τα φυτικά κύτταρα προκαλεί **παρεμπόδιση** της έκφρασης γονιδίων που σχετίζονται με τη **φωτοσυνθετική λειτουργία**, ενώ **επάγεται** η έκφραση γονιδίων που σχετίζονται με την **άμυνα**

\*Διεγέρτες: Μόρια τα οποία αναγνωρίζονται από αισθητήρες που ενεργοποιούν το ανοσοποιητικό σύστημα των φυτικών κυττάρων

# Πώς επηρεάζεται η μεταφορά νερού & θρεπτικών συστατικών

επηρεάζουν άμεσα την  
**άντληση** από το έδαφος  
και τη **μεταφορά νερού**  
**και θρεπτικών**  
συστατικών προς το  
υπέργειο τμήμα

παθογόνα  
της ρίζας



# Πώς επηρεάζεται η μεταφορά νερού & θρεπτικών συστατικών

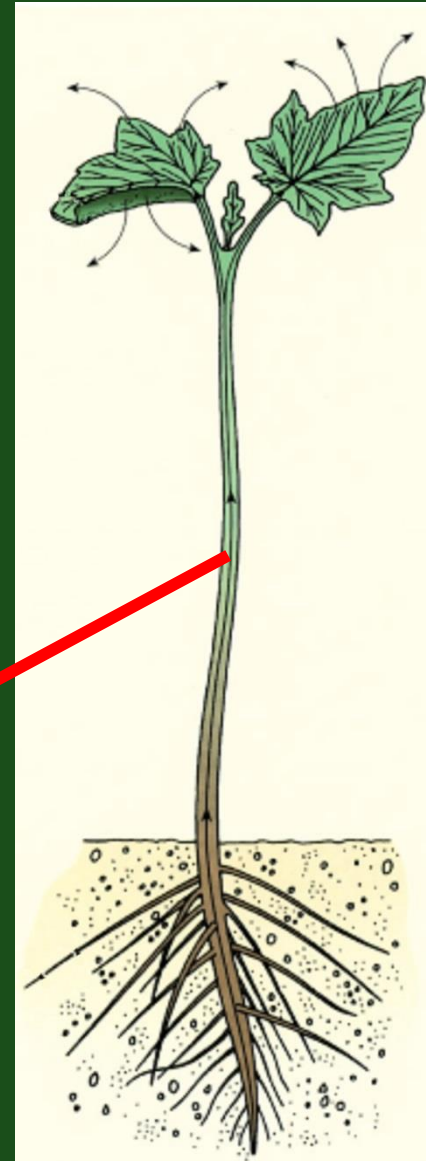
λόγω της παρουσία τους

**άμεσα**

λόγω παραγωγής  
πολυσακχαριτών

μερική ή ολική έμφραξη  
των στοιχείων μεταφοράς

παθογόνα  
του ξύλου



# Πώς επηρεάζεται η μεταφορά νερού & θρεπτικών συστατικών

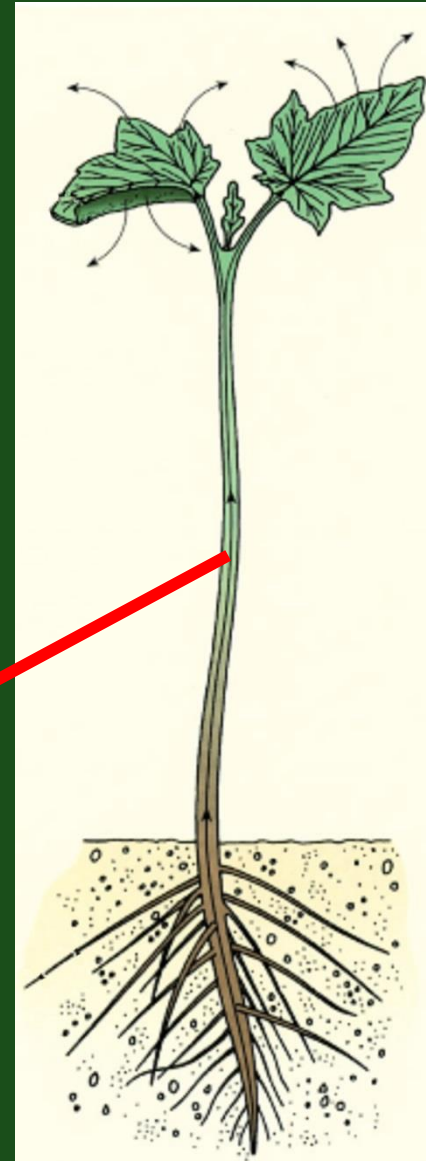
καταστροφή κυττάρων του ξενιστή και απελευθέρωση του περιεχομένου τους στα αγγεία

δημιουργία τυλώσεων

έμμεσα

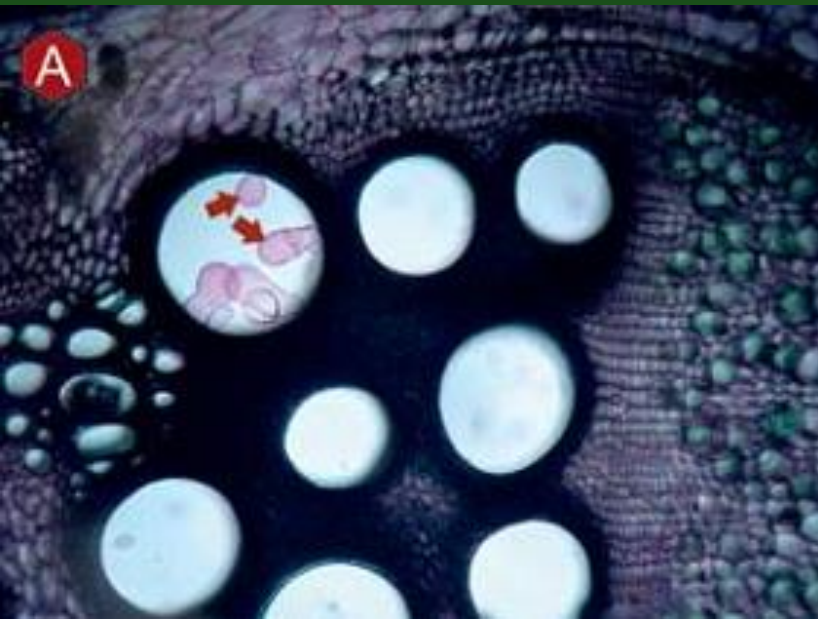
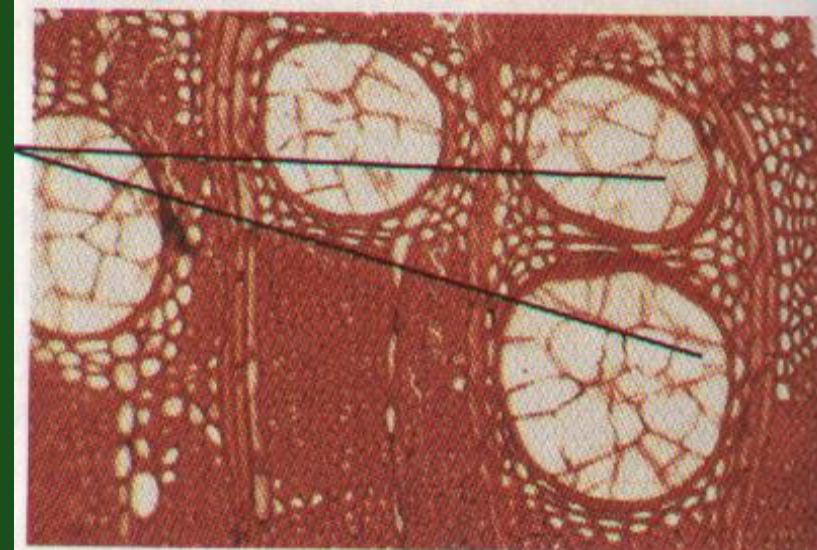
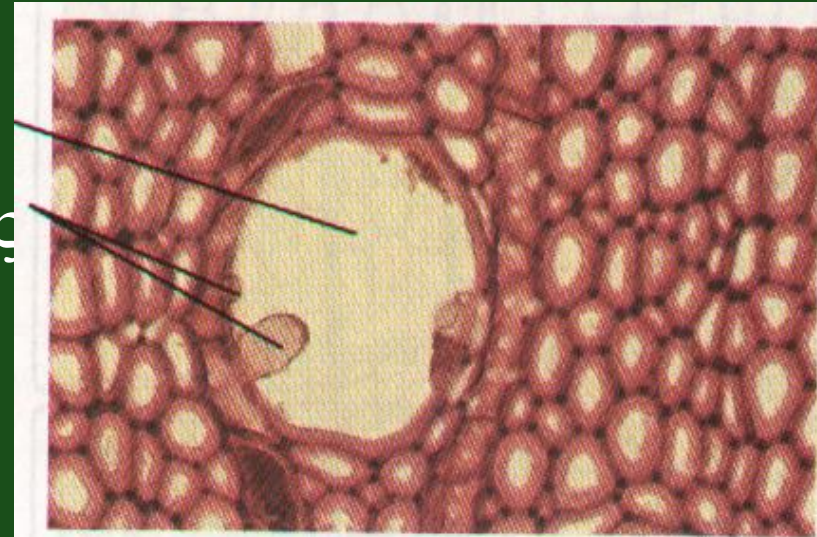
παθογόνα του ξύλου

μερική ή ολική έμφραξη των στοιχείων μεταφοράς



# Τι είναι η τύλωση

Προεκβολή των κυττάρων του ξυλώδους παρεγχύματος στην κοιλότητα ενός αγγείου που έχει ως αποτέλεσμα το μερικό ή ολικό φράξιμο του αγγείου: σε περιπτώσεις τραυματισμών, προσβολών και παύσης της λειτουργίας του αγγείου





# Πώς επηρεάζεται η αναπνοή

Η αναπνοή κατά κανόνα αυξάνεται, κυρίως σε τοπικό  
επίπεδο



εξυπηρετεί

Την κάλυψη των αναγκών της επαγόμενης από την  
προσβολή άμυνας

# Πώς επηρεάζονται οι μεμβράνες

διαταραχή της λειτουργίας των μεμβρανών

απώλεια διαμερισματοποίησης

διαρροή ηλεκτρολυτών

κυτταρικός θάνατος

Τα φυτά διαθέτουν δύο βασικές στρατηγικές ώστε να αντιμετωπίζουν βιοτικούς παράγοντες καταπόνησης

❖ Αποφυγή

❖ Ανθεκτικότητα

# Αποφυγή

Τα φυτά τα οποία επιλέγουν τη στρατηγική αυτή ενισχύουν αμυντικά τους ιστούς τους έτσι ώστε να **αποκλείσουν την είσοδο** των παθογόνων στο εσωτερικό, ή να **αποτρέψουν την κατανάλωση** από τα φυτοφάγα



**θεμελιώδης προϋπάρχουσα άμυνα**

# Θεμελιώδης προϋπάρχουσα άμυνα

Το σύνολο των αμυντικών μηχανισμών που έχουν αναλάβει τη **μόνιμη προστασία** των φυτικών ιστών και οργάνων

μορφολογικοί χαρακτήρες που παρέχουν κυρίως **μηχανική** προστασία

δομές που εξασφαλίζουν τροφή ή καταφύγιο σε αρπακτικά

δομές που παρέχουν σύνθετη προστασία

εκτεταμένο χημικό οπλοστάσιο δευτερογενών μεταβολιτών

# Ανθεκτικότητα

Τα φυτά τα οποία χαρακτηρίζονται από τη στρατηγική αυτή διαθέτουν την ικανότητα να αντιμετωπίζουν τη βιοτική καταπόνηση στο **εσωτερικό πλέον των ιστών τους**, ενεργοποιώντας μια σειρά από αμυντικούς μηχανισμούς



**επαγόμενη άμυνα**

# Επαγόμενη άμυνα

Το σύνολο αμυντικών βιοχημικών μηχανισμών που **εκδηλώνονται μόνον όταν** τα φυτικά κύτταρα **αντιληφθούν προσβολή** ή άλλου είδους καταπόνηση

Έκφραση ανθεκτικότητας δεν σημαίνει ότι δεν θα παρατηρηθούν ζημιές σε ιστούς

Είδος και ένταση άμυνας και από το περιβάλλον εξάπλωσης

Βασική προϋπόθεση: ύπαρξη ενός συστήματος επιτήρησης σε κάθε φυτικό κύτταρο που να ανιχνεύει προσβολές

# Ανάπτυξη vs άμυνα

Το φωτοσυνθετικό προϊόν κατανέμεται ανάλογα με τις ανάγκες για ανάπτυξη, ώστε να αντιμετωπιστούν οι ανταγωνιστές, και τις ανάγκες άμυνας και προστασίας έναντι κυρίως βιοτικών παραγόντων καταπόνησης. Το φωτοσυνθετικό προϊόν στην περίπτωση αυτή επενδύεται ώστε να λειτουργούν δύο επίπεδα άμυνας, η θεμελιώδης προϋπάρχουσα και η επαγόμενη. Η επάρκεια θρεπτικών στοιχείων πριμοδοτεί τις διαδικασίες ανάπτυξης, ενώ η ανεπάρκειά τους ευνοεί τις διαδικασίες άμυνας/προστασίας.





# Αποφυγή: μορφολογικοί και βιοχημικοί μηχανισμοί θεμελιώδους προϋπάρχουσας άμυνας

προτεραιότητα στην αμυντική θωράκιση των επιφανειών που είναι εκτεθειμένες στο εξωτερικό περιβάλλον

## Συνιστώσες θεμελιώδους άμυνας



- Επιδερμίδα και τα εξαρτήματά της
- υμενίνη
- κηροί της εφυμενίδας των υπέργειων οργάνων
- φελλίνη που καλύπτει κυρίως τα υπόγεια όργανα

δευτερογενείς μεταβολίτες που εντοπίζονται σε περιοχές πάνω ή κοντά στην επιφάνεια των οργάνων

# Τα επιμέρους συστατικά της θεμελιώδους προϋπάρχουσας άμυνας

Η θεμελιώδης προϋπάρχουσα άμυνα βασίζεται σε  
επιτυχημένη σχέση δομής-λειτουργίας ορισμένων  
μορφολογικών χαρακτήρων

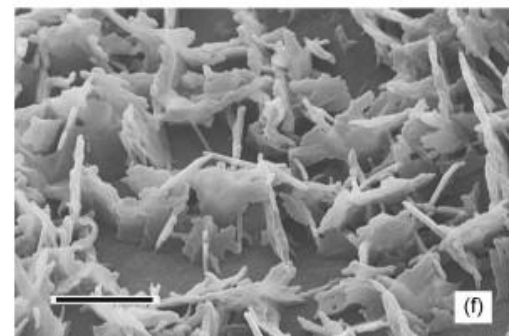
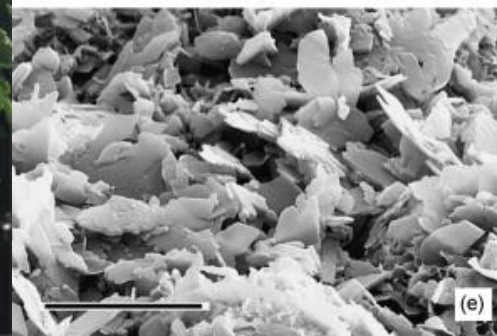
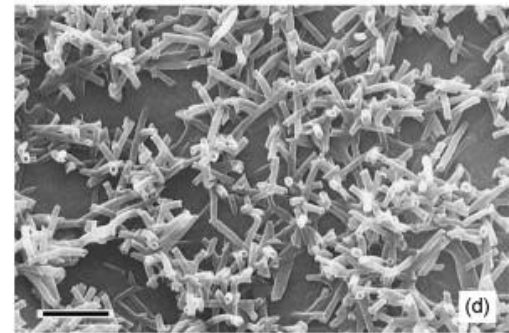
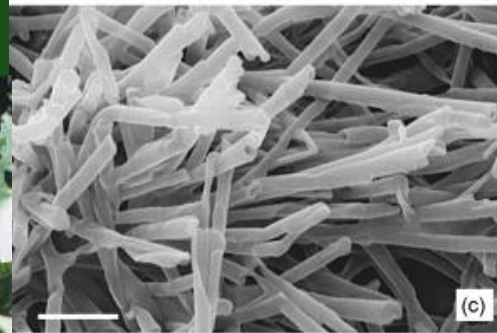
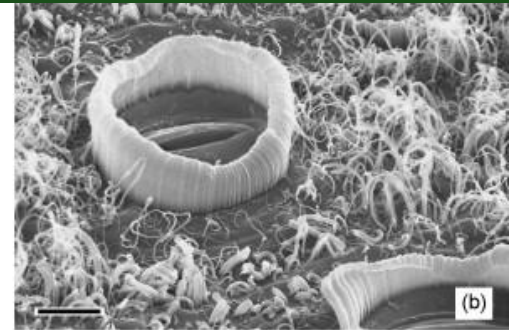
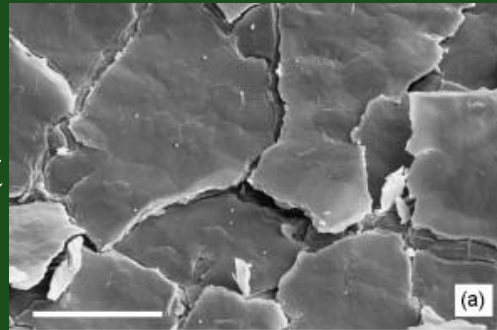
# Η εφυμενίδα και οι κηροί αποτελούν την πρώτη γραμμή άμυνας



Ευμενίδα: καλύπτει με τη μορφή ενός συνεχούς στρώματος κάθε υπέργειο φυτικό όργανο εκτός των ξυλωδών βλαστών και τις περιοχές των τραυμάτων

# Η εφυμενίδα και οι κηροί αποτελούν την πρώτη γραμμή άμυνας

The hydrophobic coatings of plant surfaces



# Εφυμενίδα και άμυνα

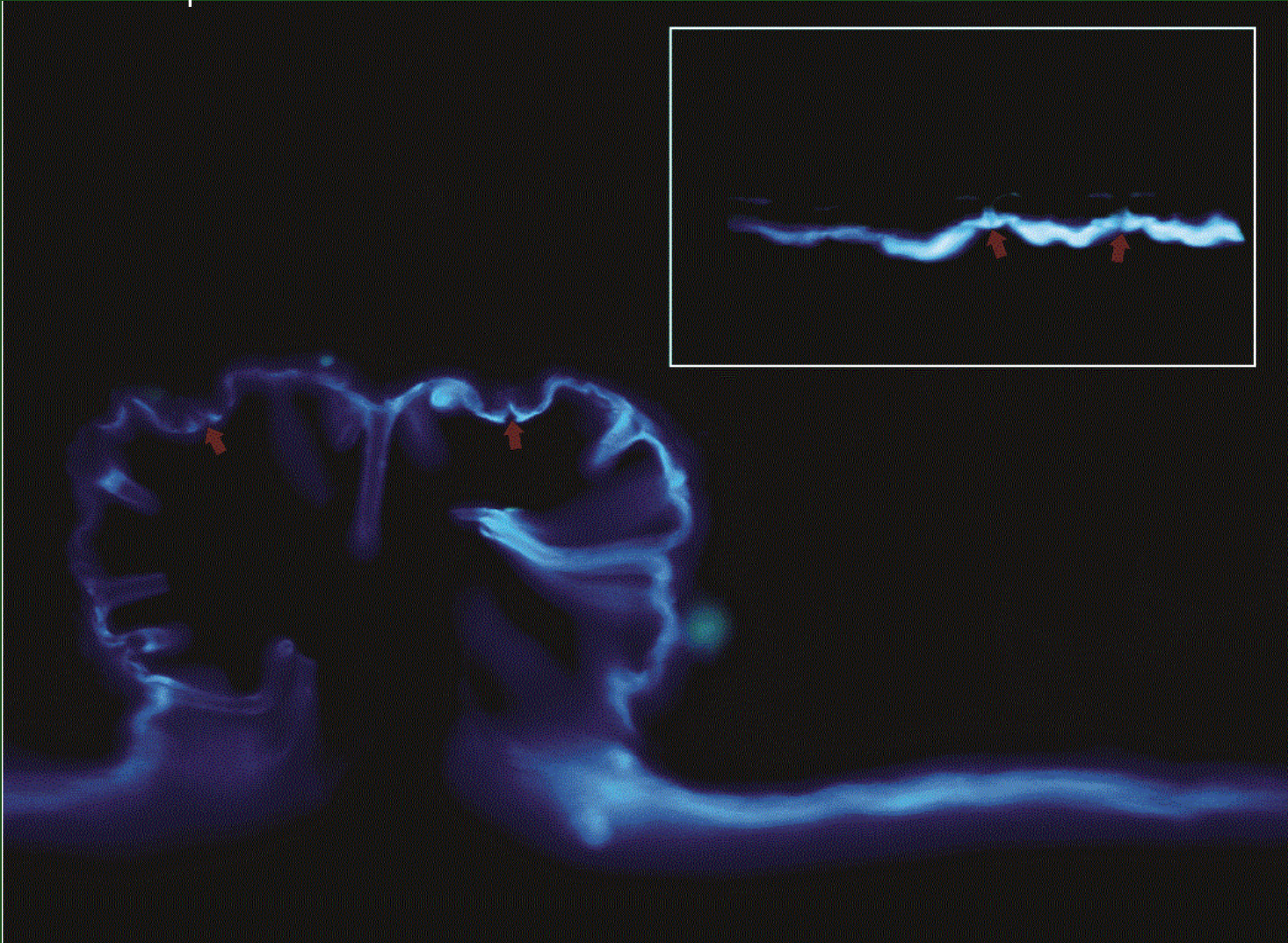
## Αντοχή

- ✓ προστατεύει τους ιστούς από μηχανικές καταπονήσεις
- ✓ εμποδίζει την εισχώρηση των υφών των μυκήτων και των μυζητήρων των εντόμων

Απάντηση και σε αβιοτική καταπόνηση: περιορίζει την είσοδο ακτινοβολίας μέσω ανάκλασης και απορρόφησης

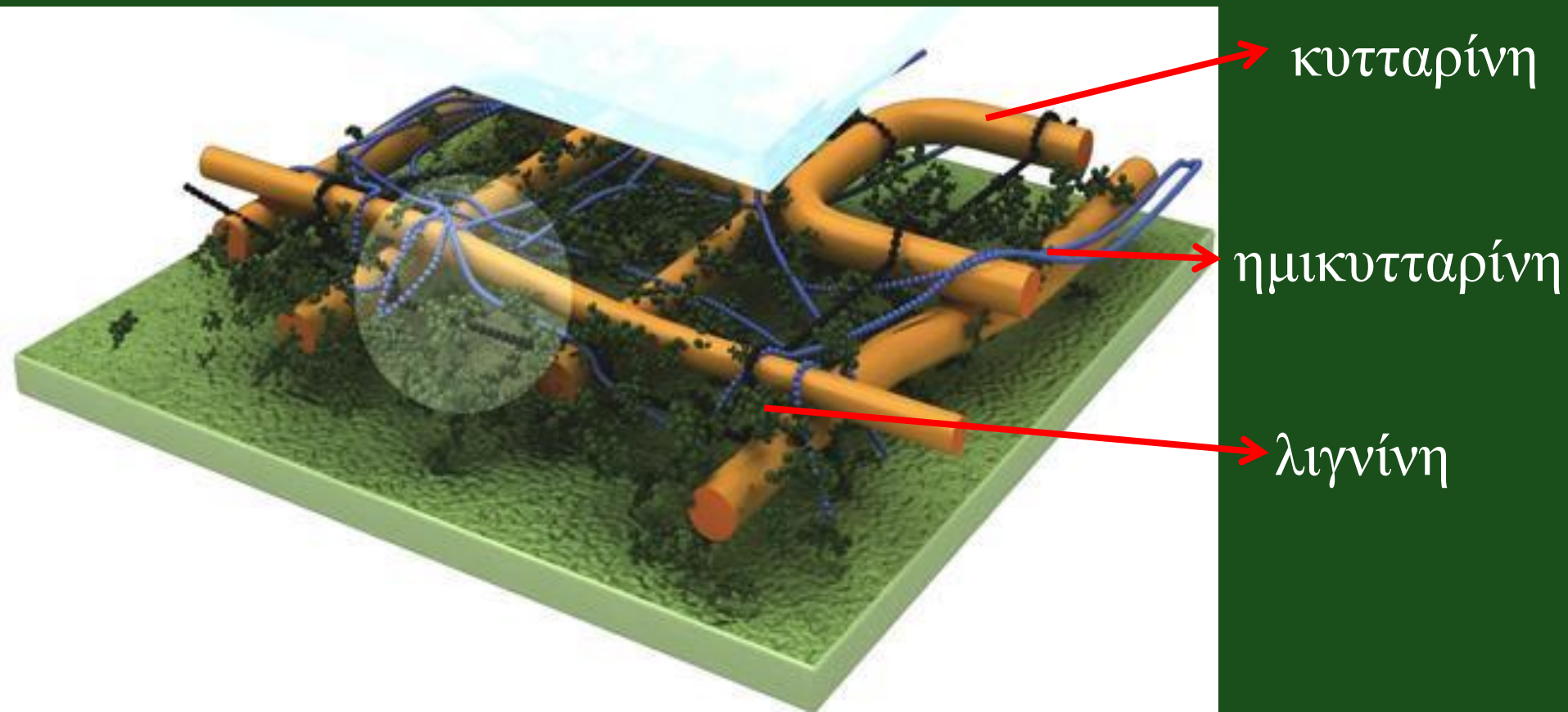
# Εφυμενίδα και άμυνα


μπλε φθορισμός από την εφυμενίδα λόγω της παρουσίας απλών φαινολικών συστατικών



# Τα κυτταρικά τοιχώματα ενισχύονται με δευτερογενείς μεταβολίτες

Ισχυροποίηση των κυτταρικών τοιχωμάτων με λιγνίνη



A microscopic cross-section of a plant stem, likely a dicot, stained with a purple dye. The image shows various tissues: a central vascular cylinder with xylem and phloem, a surrounding cortex, and a pith. The cells are stained in shades of purple, blue, and green. The text is overlaid on the lower half of the image.

Λιγνίνη: το αφθονότερο προϊόν του δευτερογενούς μεταβολισμού (το 15-20% του άνθρακα ο οποίος αφομοιώνεται ετησίως από τα ανώτερα φυτά, ενσωματώνεται στο πολυμερές αυτό)



# Τα επιδερμικά εξαρτήματα συνεισφέρουν στην προστασία των φυτικών ιστών

Περιλαμβάνουν μεγάλη ποικιλία μορφών, πρόκειται δε για ανατομικούς σχηματισμούς με καθαρά αμυντικό προορισμό

αδενώδεις τρίχες

μη αδενώδεις τρίχες

# Αδενώδεις τρίχες

Η λειτουργία τους αφορά κυρίως την παραγωγή και απέκκριση δευτερογενών μεταβολιτών οι οποίοι είτε είναι **τοξικοί για τα παθογόνα και τα φυτοφάγα**, είτε μεσολαβούν στην επικονίαση

τα προϊόντα

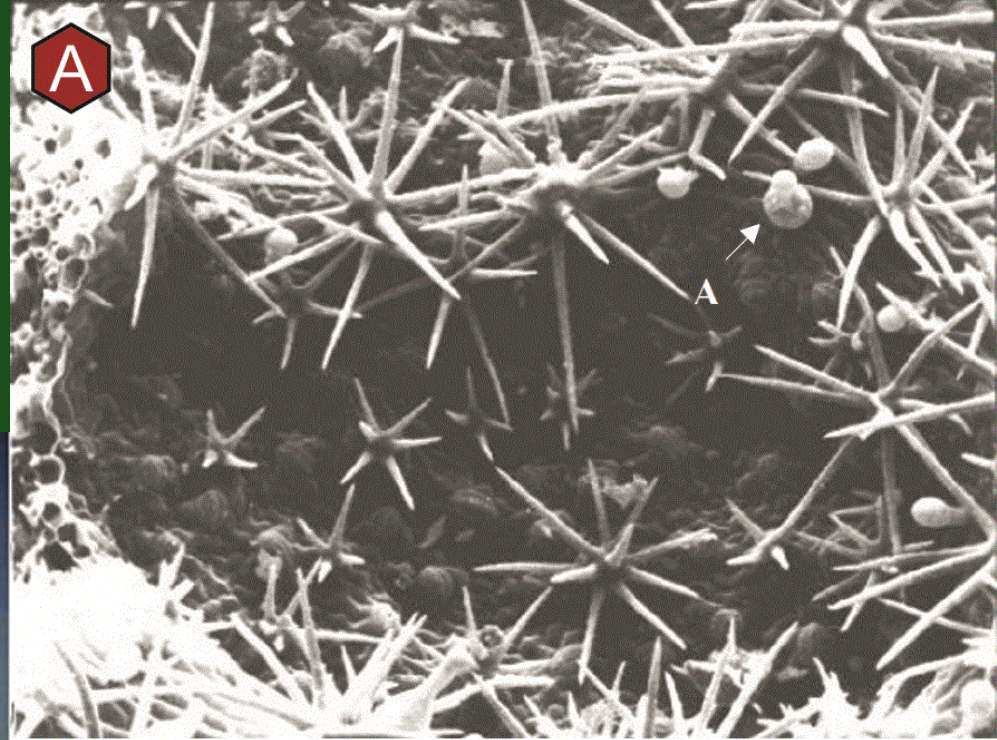
**αιθέρια έλαια** (πτητικά μίγματα μονοτερπενίων και διτερπενίων) τα οποία διαφεύγουν στην ατμόσφαιρα με τη ρήξη ενός υμένα ή από πόρους

μενθόλη (από μέντα)

λιμονένιο (από λεμονιά)

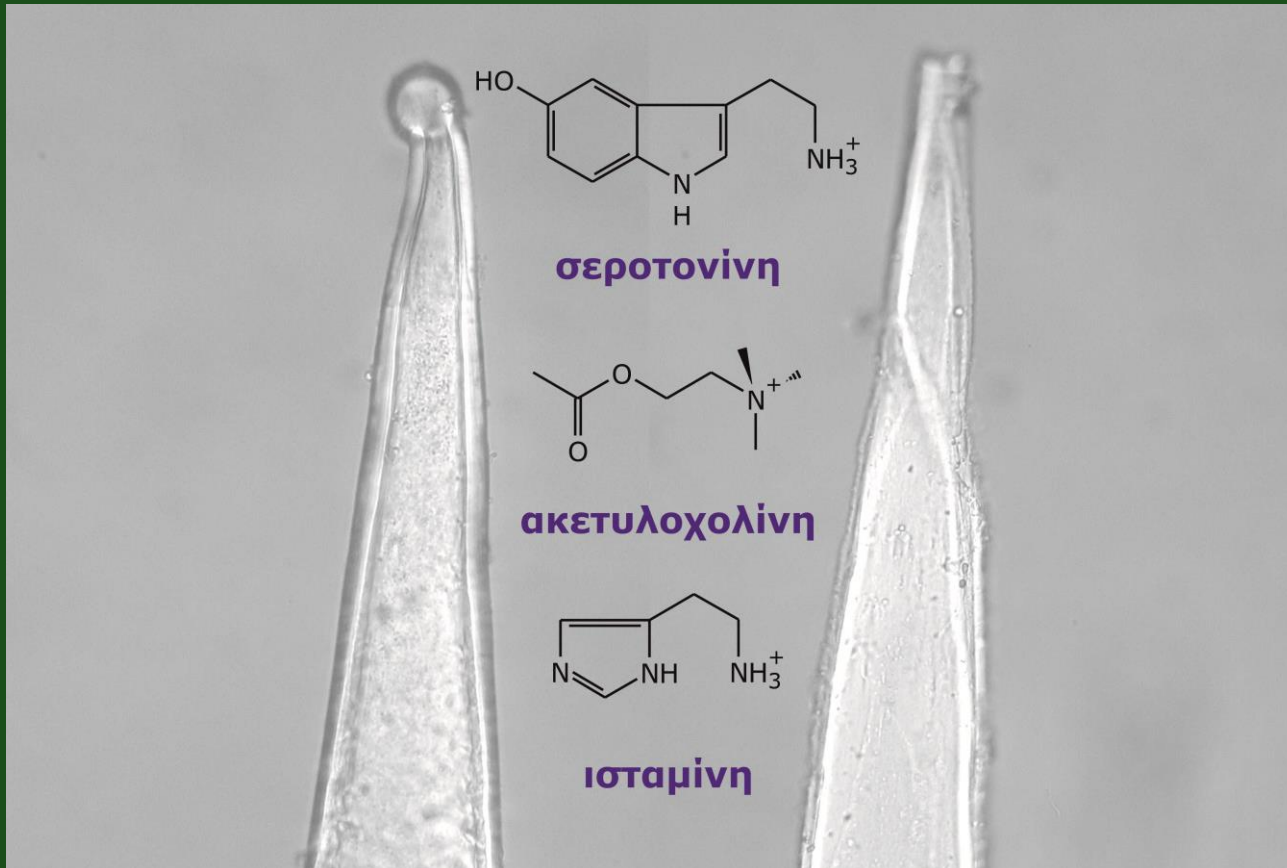
# Αδενώδεις τρίχες

Συνύπαρξη αδενωδών-  
μη αδενωδών τριχών



# Αδενώδεις τρίχες

Παράδειγμα τσουκνίδας: νύσσουσες τρίχες



ειδική  
ανατομία  
για έκχυση


Οι ενώσεις αυτές είναι νευροδιαβιβαστές που προκαλούν πόνο και κνησμό εάν εισαχθούν στο σώμα σπονδυλωτών

# Οι γαλακτοφόροι σωλήνες αποτελούν ένα εκτεταμένο αμυντικό σύστημα σε ορισμένα φυτά

ετερογενής ομάδα εκκριτικών ιστών οι οποίοι παράγουν τον γαλακτώδη χυμό

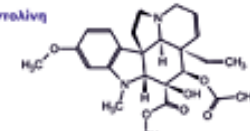
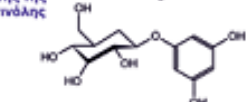
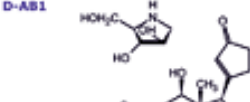
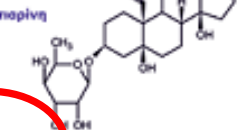
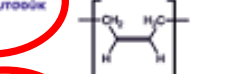
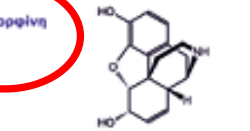
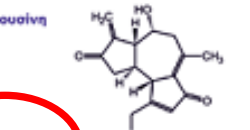
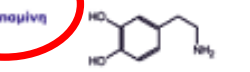
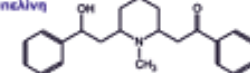
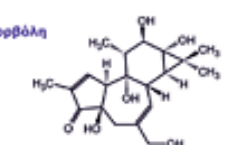


παχύρρευστο εναιώρημα –  
μείγμα πολυάριθμων ουσιών



μηχανισμός προστασίας  
από τους φυτοφάγους οργανισμούς

# Αντιπροσωπευτικά φυτικά είδη που παράγουν γαλακτώδη χυμό, συστατικά του και χρήσεις

φυτό	κλάση ένωσης	εκπρόσωπος και δομή	ιδιότητες/χρήση
<i>Catharanthus roseus</i> Apocynaceae	μονοτερπενικό αλκαλοειδές της ομάδας του ινδολίου		πρόδρομο του αντικαρκινικού φαρμάκου vinorelbine
<i>Cannabis sativa</i> Cannabaceae	φαινολικός γλυκοζίτης		διάφορες φαρμακευτικές εφαρμογές
<i>Morus spp.</i> Moraceae	αλκαλοειδές της ομάδας της πυρολιδίνης		δηλητήριο με γλυκιά γεύση
<i>Antiaris toxicaria</i> Moraceae	καρδενολίδιο, διτερπένιο		τοξικό δηλητήριο για επάλθηψη (του χυμού σε βέλη από ιθαγενείς της ΝΑ Ασίας)
<i>Hevea brasiliensis</i> Euphorbiaceae	ισοπρενοειδές		βιομηχανία ελαστικών και πλαστικών υλικών
<i>Papaver somniferum</i> Papaveraceae	αλκαλοειδές της ομάδας της βενζυλμορφίνης		οπιογόνα παρασκευάσματα
<i>Lactuca sativa</i> Asteraceae	σαסקιτερπενική λακτόνη		προσδίδει πικρή γεύση, φαρμακευτική δράση
<i>Papaver bracteatum</i> Papaveraceae	κατεχολαμίνη		φαρμακευτική ψυχότροπος δράση
<i>Loberia spp.</i> Campanulaceae	αλκαλοειδές της ομάδας της πιπεριδίνης		φαρμακευτικές χρήσεις έναντι εθισμών στον καπνό και σε ναρκωτικές ουσίες
<i>Croton tiglium</i> Euphorbiaceae	τιγλιάνιο, διτερπένιο		οι εστέρες της σακούν τοξική και ερεθιστική δράση έναντι ζώων, προαγωγείς ανάπτυξης καρκινικών όγκων, αντικαρκινικό φάρμακο

# Οι ρητινοφόροι αγωγοί αποτελούν το χαρακτηριστικό αμυντικό σύστημα των κωνοφόρων

Οι αγωγοί αυτοί απαντώνται κυρίως στα κωνοφόρα των οποίων διασχίζουν ολόκληρο το φυτικό σώμα



μείγμα πτητικών και μη  
τερπενίων

τοξική δράση κυρίως έναντι εντόμων, αλλά και φυτοπαθογόνων μικροοργανισμών των οποίων οι φορείς είναι τα έντομα

# Επαγόμενη άμυνα: η ύστατη -και πλέον αποτελεσματική- αντίσταση

Το σύνολο αμυντικών βιοχημικών μηχανισμών που εκδηλώνονται **μόνον όταν** τα φυτικά κύτταρα **αντιληφθούν προσβολή** ή άλλου είδους καταπόνηση



**ανθεκτικότητα**

ικανότητα να αντιμετωπίζουν τη βιοτική καταπόνηση στο **εσωτερικό πλέον των ιστών τους**



# Πώς αναγνωρίζουν τα φυτά τους εχθρούς

Ευαίσθητο σύστημα ανίχνευσης και αντίληψης χημικών ουσιών που προέρχονται αμέσως ή εμμέσως από τους μικροοργανισμούς

## *εξωγενείς διεγέρτες*

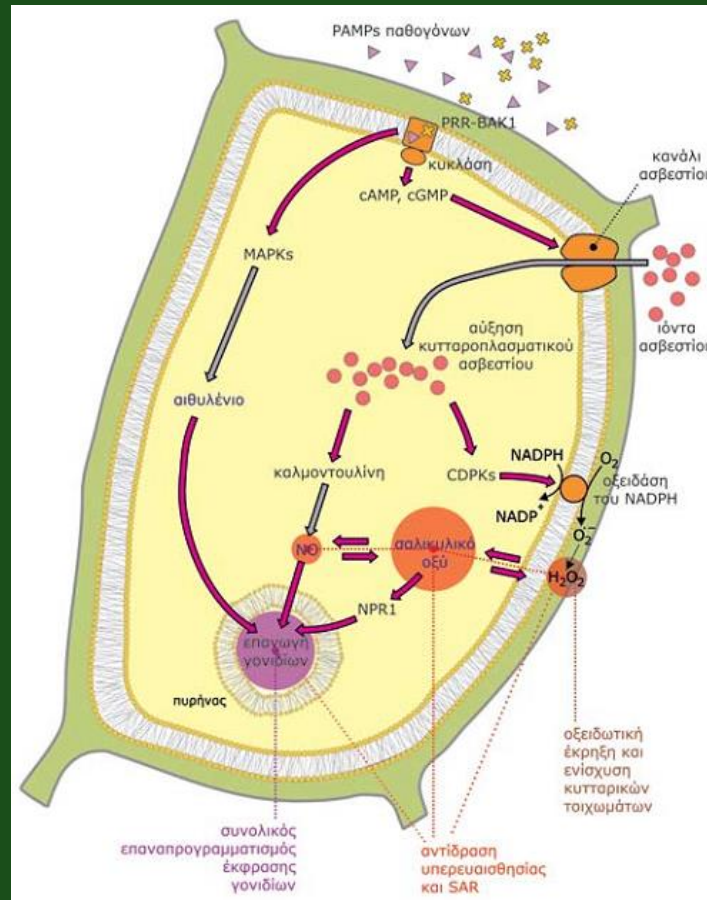
συστατικά κυτταρικών τοιχωμάτων  
πολυσακχαρίτες  
λιπίδια  
πρωτεΐνες  
και ειδικώς ένζυμα «διάρρηξης»

## *ενδογενείς διεγέρτες*

τμήματα κυτταρικών  
τοιχωμάτων ξενιστή

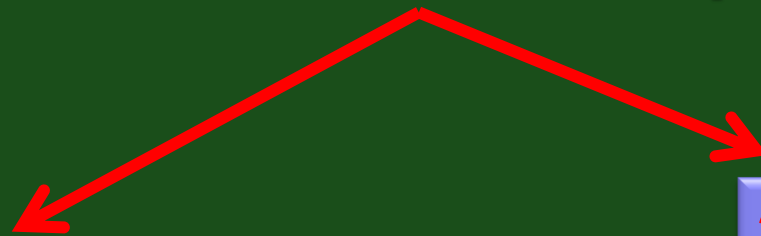
# Μετά την αναγνώριση, η διαβίβαση σήματος

Πολύπλοκη διαδικασία «ειδοποίησης» για την προσβολή που έχει ως αποτέλεσμα την επαγωγή αμυντικών γονιδίων



# Το στάδιο της απάντησης: η εξουδετέρωση του παθογόνου

Το ανοσοποιητικό σύστημα των φυτικών κυττάρων αναπτύσσεται **σε δύο γραμμές άμυνας** οι οποίες ενεργοποιούνται από τους **κατάλληλους διεγέρτες**



10-30 λεπτά μετά την επαφή του φυτού με το παθογόνο

γενική και όχι εξειδικευμένη αντίδραση

2-3 ώρες μετά

υψηλή εξειδίκευση, δηλ. εκδηλώνεται σε συγκεκριμένες φυλές ή στελέχη παθογόνων

# οι δύο γραμμές άμυνας χρησιμοποιούν συνήθως τους ίδιους μηχανισμούς

A) οξειδωτική έκρηξη

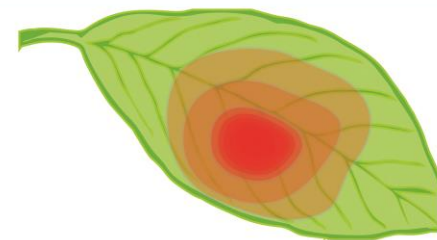
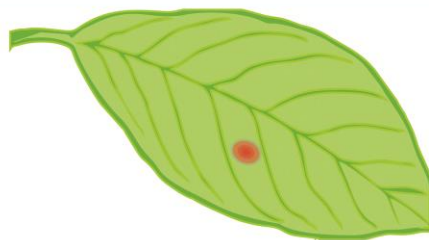
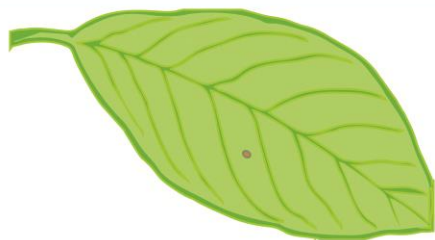
B) συνολικό επαναπρογραμματισμό της μεταγραφής γονιδίων

Γ) σύνθεση μορίων-σημάτων συναγερμού

Δ) ισχυροποίηση των κυτταρικών τοιχωμάτων

E) κλείσιμο των στομάτων

# Η ακολουθία ενεργοποίησης των μηχανισμών επαγόμενης άμυνας έναντι παθογόνων



**άμεσες αντιδράσεις των προσβεβλημένων κυττάρων (λεπτά)**

**αντιδράσεις σε τοπικό επίπεδο (λεπτά-ώρες)**

**αντιδράσεις σε διασυστηματικό επίπεδο (ώρες)**

1. Παραγωγή ROS
2. Σύνθεση μορίων-σημάτων συναγερμού
3. Διαρροή ηλεκτρολυτών
4. Παρεμπόδιση ή ενεργοποίηση υπαρχόντων ενζυμικών μορίων
5. Επαναδιευθέτηση κυτταροσκελετού
6. Επαγωγή γονιδίων

1. Συνολικός επαναπρογραμματισμός της μεταγραφής γονιδίων
2. Ρυθμίσεις σε επίπεδο δευτερογενούς μεταβολισμού
3. Προγραμματισμένος κυτταρικός θάνατος-αντίδραση υπερευαισθησίας
4. Σύνθεση PRPs
5. Κλείσιμο στοματίων
6. Ισχυροποίηση κυτταρικών τοιχωμάτων

Επαγωγή γονιδίων και σύνθεση νέων PRPs σε διασυστηματικό επίπεδο