

Γενετική βελτίωση δασοπονικών ειδών

ΒΕΛΤΙΩΣΗ & ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΔΑΣΟΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ



Σύνοψη

Τα γνωρίσματα που παρατηρούμε (φαινότυπος) είναι η συνδυασμένη έκφραση του γενοτύπου και του περιβάλλοντος

- $P=G+E$
- $P=A+D+I+E$

Η φαινοτυπική ποικιλότητα μπορεί να διαχωριστεί σε γενετική (κληρονομούμενη) και περιβαλλοντική (μη κληρονομούμενη)

- Ο διαχωρισμός της ποικιλότητας σε γενετική και περιβαλλοντική είναι το κύριο αντικείμενο της ποσοτικής γενετικής
- Ο υπολογισμός των παραμέτρων ποσοτικής γενετικής που χαρακτηρίζουν οικογένειες απογόνων και ποσοτικά γνωρίσματα γίνεται σε ειδικές δοκιμές απογόνων, σε ομοιόμορφο κοινό περιβάλλον και με ειδικό πειραματικό σχεδιασμό

Τα δασικά είδη διατηρούν σημαντικά μεγέθη γενετικής ποικιλότητας μέσα στους πληθυσμούς και γεωγραφικής ποικιλότητας (διαφοροποίησης) ανάμεσα στους πληθυσμούς

Η προέλευση του αναπαραγωγικού υλικού σημαίνει κυρίως την ύπαρξη γενετικών προσαρμογών στο περιβάλλον της προέλευσης

- Η επιλογή της κατάλληλης προέλευσης είναι εξαιρετικά σημαντική για την ίδρυση τεχνητών συστάδων
- Η τοπική προέλευση δεν είναι πάντα η πιο κατάλληλη για τη δασοπονία αλλά είναι εξελικτικά η ασφαλέστερη επιλογή

Βελτίωση δέντρων

Περιλαμβάνει την εφαρμογή των αρχών της δασικής γενετικής μαζί με δασοκομικούς χειρισμούς για την ανάπτυξη παραγωγικών, υγιών και αιειφόρων δασικών φυτειών

- Κάθε πρόγραμμα βελτίωσης στοχεύει στην παραγωγή βελτιωμένων ποικιλιών δασικών ειδών με έναν οικονομικά αποτελεσματικό τρόπο
 - Μεγιστοποίηση κέρδους και μείωση κόστους
- Ως δασική φυτεία θεωρούμε κάθε νέο πληθυσμό που ιδρύεται τεχνητά σε επιλεγμένη έκταση με σκοπό την παραγωγή δασικών προϊόντων, με εκ νέου τεχνητή ανανέωση του φυτευτικού υλικού στην επόμενη γενιά
 - Χωρίς φυσική αναγέννηση

Δεν έχει μόνο παραγωγική διάσταση, αλλά στοχεύει και στη βελτίωση προσαρμοστικών χαρακτήρων για την ανάπτυξη πετυχημένων αναδασώσεων που δεν αποσκοπούν απαραίτητα στην αύξηση του οικονομικού κέρδους

- Ένα πρόγραμμα βελτίωσης μπορεί να αποσκοπεί στην παραγωγή βελτιωμένου υλικού για τη διεξαγωγή αναδασώσεων που στόχο έχουν τη δημιουργία νέων καλά προσαρμοσμένων δασών που θα προσφέρουν υπηρεσίες στην κοινωνία (σταθεροποίηση εδαφών, αποκατάσταση υποβαθμισμένων εκτάσεων, δέσμευση άνθρακα, προστασία υδρολογικού κύκλου, διατήρηση δασοκάλυψης, αναψυχή, κ.α.)
 - Με φυσική αναγέννηση

Δασική φυτεία και αναδάσωση

Δασική φυτεία: στόχος η παραγωγή σε μικρούς περίτροπους χρόνους χωρίς φυσική αναγέννηση



Φυτεία παραγωγής βιομάζας στην Ινδία

Αναδάσωση: στόχος η διατήρηση της δασοκάλυψης και η παραγωγή πολλαπλών προϊόντων και υπηρεσιών με φυσική αναγέννηση



Σταθεροποίηση αμμοθινών στη Γαλλία

Βελτίωση δασοπονικών ειδών



Στόχος της γενετικής βελτίωσης είναι η «αξιοποίηση» των γενετικών διαφορών ανάμεσα στα άτομα ενός πληθυσμού με σκοπό την αλλαγή των μέσων εκφράσεων των χαρακτηριστικών αυτών που είναι σημαντικά για τη δασική παραγωγή

- Ή άλλα χαρακτηριστικά που ενδιαφέρουν πέρα από την παραγωγή
- Π.χ. αντοχή σε βιοτικούς και αβιοτικούς παράγοντες

Τεχνητή επιλογή

Το κύριο εργαλείο της βελτίωσης δασικών δέντρων είναι η τεχνητή επιλογή

- Σε αντίθεση με τη φυσική επιλογή

Ο άνθρωπος επιλέγει γονείς με βάση το φαινότυπο τους και πολλαπλασιάζει τους απογόνους τους με βλαστικό ή εγγενή τρόπο σε νέες θέσεις

- Προσδοκία για βελτιωμένο φαινότυπο των απογόνων



Ιστορική αναδρομή

Τα καλλιεργούμενα φυτά έχουν γίνει αντικείμενο βελτίωσης εδώ και πολλούς αιώνες

- Τεχνητή επιλογή από την πρώτη εφαρμογή της γεωργίας
- Η βελτίωση των γεωργικών φυτών είχε εφαρμοστεί πολύ πριν τον Mendel

Η ανθρώπινη επίδραση πάνω στις γενετικές δομές των δασοπονικών ειδών άρχισε πριν από χιλιάδες χρόνια

- Με την εντατικοποίηση της δασοπονίας στην Ευρώπη ξεκίνησε η μαζική μετακίνηση φυτευτικού υλικού και η εγκατάσταση τεχνητών δασών

Η βελτίωση των δασοπονικών ειδών δεν εφαρμόστηκε πριν από τα μέσα του 20ού αιώνα

- Σήμερα η βελτίωση δασικών δέντρων είναι κοινή πρακτική σε πολλές χώρες
- Τα πρώτα δέντρα για τα οποία υπήρξαν προγράμματα γενετικής βελτίωσης ήταν τα κωνοφόρα της βόρειας εύκρατης ζώνης (ερυθρελάτη, δασική πεύκη, κλπ.)
- Μεγάλη προσπάθεια έχει γίνει επίσης και για ταχυαυξή είδη, όπως είναι ο ευκάλυπτος, η ιτιά και η λεύκη
- Στην Ελλάδα, η βελτίωση έχει εφαρμοστεί σε είδη όπως η μαύρη πεύκη, η ελάτη, το κυπαρίσσι, ο πλάτανος, η λεύκη και άλλα

Προγράμματα βελτίωσης

Ουσιαστικά χαρακτηριστικά για ένα επιτυχημένο πρόγραμμα βελτίωσης

- Ξεκάθαροι στόχοι του προγράμματος βελτίωσης σε σχέση με τις ανάγκες της δασοπονίας και τις οργανωτικές δυνατότητες
- Καλή γνώση της δασοκομίας, της βιολογίας και της γενετικής του είδους που υπάγεται σε ένα πρόγραμμα βελτίωσης
- Μια ορθή βελτιωτική στρατηγική, βραχυπρόθεσμα (5 έτη) και μακροπρόθεσμα (15 έτη)
- Καλά εκπαιδευμένο προσωπικό και εξασφαλισμένος προϋπολογισμός
- Αποτελεσματικοί τρόποι μαζικής παραγωγής πολλαπλασιαστικού υλικού και καλλιέργειας και φροντίδας των φυταρίων
- Διατήρηση μιας ευρείας γενετικής βάσης με υψηλή γενετική ποικιλότητα για μελλοντικές ανάγκες
- Υποστήριξη από έρευνα

Γενετικό κέρδος ενός προγράμματος βελτίωσης

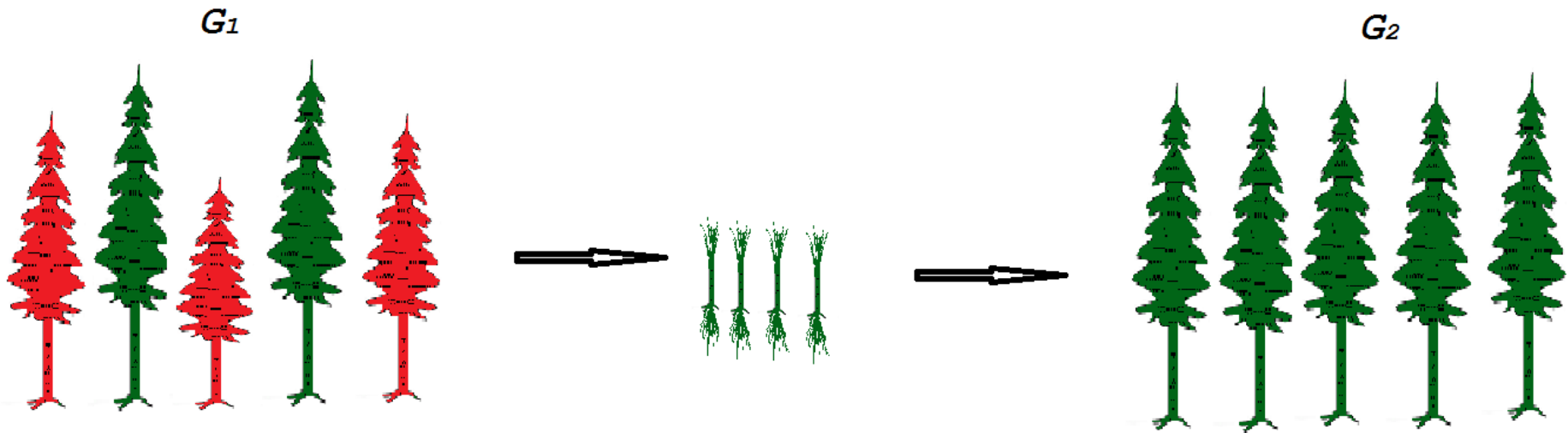
Σε ένα πρόγραμμα βελτίωσης στοχεύουμε να αυξήσουμε τις συχνότητες των αλληλομόρφων που βελτιώνουν τα χαρακτηριστικά που επιθυμούμε

- Στα ποσοτικά χαρακτηριστικά δεν μπορούμε να μετρήσουμε συχνότητες αλληλομόρφων

Η αποτελεσματικότητα ενός προγράμματος βελτίωσης μετριέται με το **γενετικό κέρδος**

- Η πρόοδος που θα προκύψει για ένα συγκεκριμένο χαρακτηριστικό, ύστερα από διαδοχικές γενιές επιλογής
- Η μεταβολή του μέσου όρου στο νέο πληθυσμό (αναδάσωση ή φυτεία), σε σχέση με το μέσο όρο του ίδιου χαρακτηριστικού του αρχικού πληθυσμού, από τον οποίο έγινε η επιλογή
- Η αύξηση στη μέση γενοτυπική (G) ή βελτιωτική αξία (A)

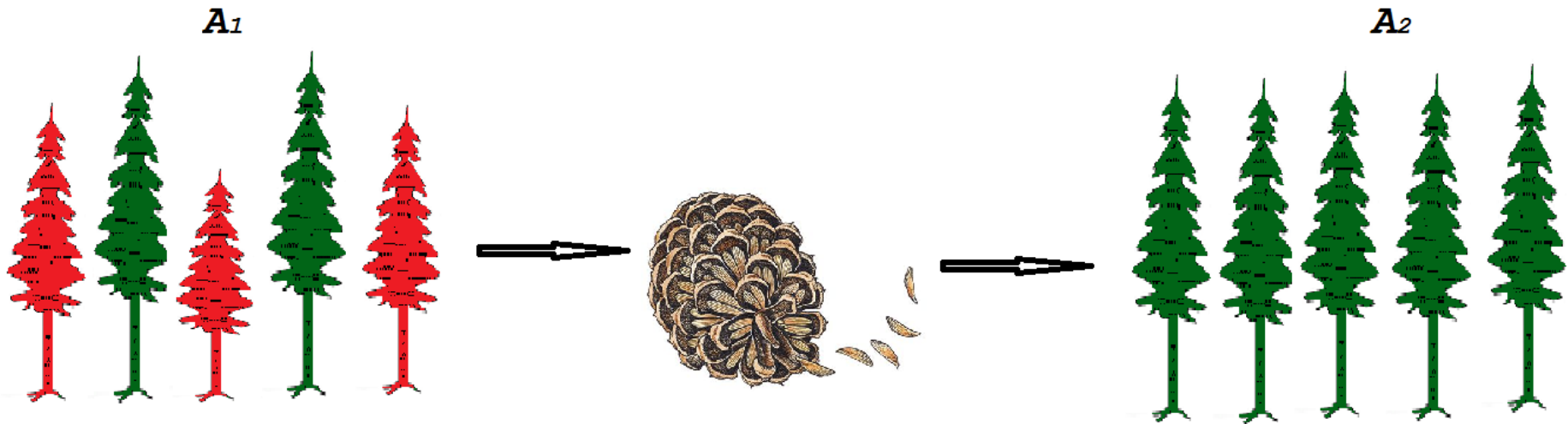
Γενετικό κέρδος σε πρόγραμμα παραγωγής κλώνων (αγενής πολλαπλασιασμός)



Το γενετικό κέρδος σε ένα πρόγραμμα που περιλαμβάνει κύκλους τεχνητής επιλογής και πολλαπλασιασμό των επιλεγμένων δέντρων με αγενή πολλαπλασιασμό είναι

- Η διαφορά της γενοτυπικής αξίας G ανάμεσα στον αρχικό και στον τελικό πληθυσμό
- $G_k = \Delta G = G_2 - G_1$
- $P = G + E = A + D + I + E$

Γενετικό κέρδος σε πρόγραμμα παραγωγής σποροφύτων (εγγενής πολλαπλασιασμός)



Το γενετικό κέρδος σε ένα πρόγραμμα που περιλαμβάνει κύκλους τεχνητής επιλογής και πολλαπλασιασμό των επιλεγμένων δέντρων με εγγενή πολλαπλασιασμό είναι

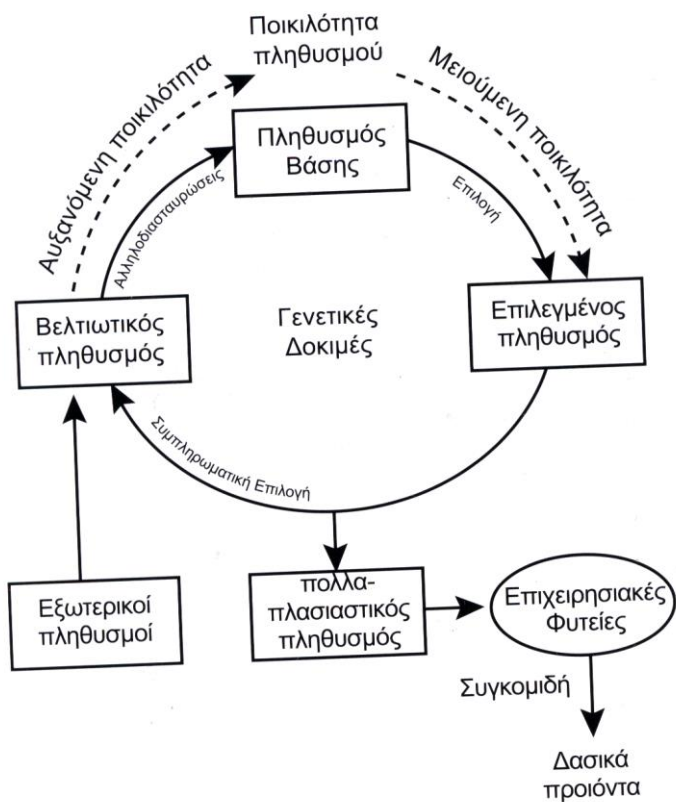
- Η διαφορά της βελτιωτικής αξίας A ανάμεσα στον αρχικό και στον τελικό πληθυσμό
- $GK = \Delta A = A_2 - A_1$
- $P = G + E = A + D + I + E$

Γενετικό κέρδος

Το γενετικό κέρδος εξαρτάται από το συντελεστή κληρονομικότητας του χαρακτήρα που επιλέγουμε, την ύπαρξη γενετικής ποικιλότητας και την ένταση επιλογής, δηλαδή το ποσοστό δέντρων που θα επιλεγθούν από τον αρχικό πληθυσμό

- Όσο πιο μεγάλος είναι ο συντελεστής κληρονομικής ικανότητας με την ευρεία (H_b^2) ή με τη στενή έννοια (H_n^2) τόσο πιο αποτελεσματική θα είναι η τεχνητή επιλογή και η αύξηση της μέσης γενοτυπικής ή βελτιωτικής (G) αξίας (A) στον τελικό πληθυσμό
- Όσο πιο μεγάλη είναι η γενετική ποικιλότητα των δέντρων στον αρχικό πληθυσμό (ατομικές γενοτυπικές και βελτιωτικές τιμές), τόσο μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα θα έχει η τεχνητή επιλογή
- Όσο πιο μεγάλη είναι η ένταση επιλογής (λιγότερα επιλεγμένα άτομα στον αρχικό πληθυσμό) τόσο μεγαλύτερος θα είναι ο μέσος όρος της γενοτυπικής ή της βελτιωτικής τιμής στον τελικό πληθυσμό

Βελτιωτικός κύκλος



Πληθυσμός βάσης: όλα τα διαθέσιμα δέντρα που μπορούν να επιλεγούν

- Συνήθως φυσικές συστάδες ενός είδους σε μια πιθανή ζώνη βελτίωσης ή φυτείες γενετικών δοκιμών

Επιλεγμένος πληθυσμός: όλα τα δέντρα που έχουν επιλεγεί

- Π.χ. τα σημασμένα δέντρα σε έναν πληθυσμό βάσης με βελτιωμένα χαρακτηριστικά

Βελτιωτικός πληθυσμός: μερικά ή όλα τα άτομα του επιλεγμένου πληθυσμού που διασταυρώνονται για τον επόμενο κύκλο βελτίωσης

- Οι απόγονοι αποτελούν τον πληθυσμό βάσης του νέου κύκλου βελτίωσης

Πολλαπλασιαστικός πληθυσμός: μερικά ή όλα τα άτομα του επιλεγμένου πληθυσμού που διασταυρώνονται για την παραγωγή πολλαπλασιαστικού υλικού

- Τελικός πληθυσμός που οδηγεί στη φυτεία ή στην αναδάσωση

White et al (2007), μετάφραση
Σκαλτσογιάννης & Ζαραγκότας (2009)

Άριστοι φαινότυποι

Τεχνητή επιλογή μέσα από παρατήρηση της έκφρασης των φαινοτύπων σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά

Η επιλογή γίνεται ανάμεσα στα ενήλικα άτομα ενός πληθυσμού με σκοπό τη βελτίωση των χαρακτηριστικών στους απογόνους τους

Δέντρα που επιλέγονται με βάση τη φαινοτυπική υπεροχή τους σε κάποια χαρακτηριστικά, λέγονται δέντρα με **άριστο φαινότυπο** (plus trees)



Βήματα τεχνητής επιλογής

Προσδιορισμός χαρακτήρων επιλογής

Φαινοτυπικές μετρήσεις στον πληθυσμό βάσης

Επεξεργασία μετρήσεων για τον προσδιορισμό της γενοτυπικής ή βελτιωτικής αξίας

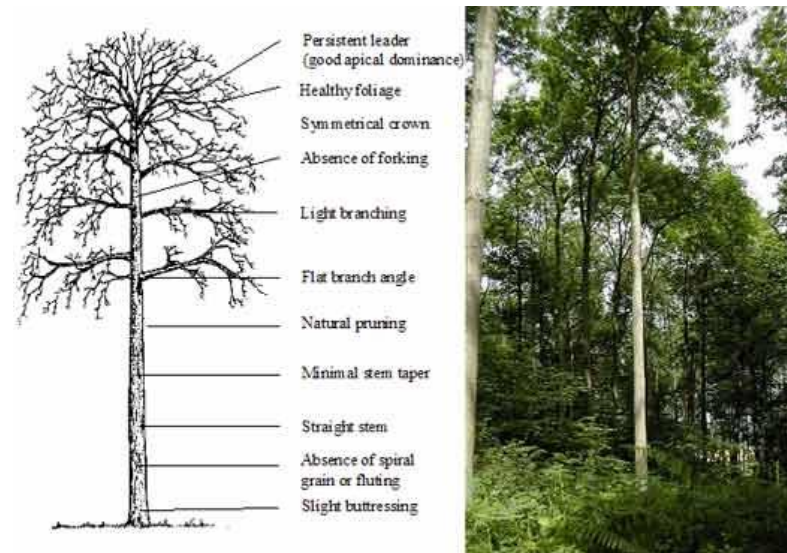
Υπολογισμός ενός «δείκτη επιλογής»

- Με συνδυασμό των μετρήσεων στα χαρακτηριστικά επιλογής

Κατάταξη και επιλογή άριστων φαινοτύπων

Υπολογισμός αναμενόμενου γενετικού κέρδους για κάθε χαρακτήρα

Σήμανση και διατήρηση των άριστων φαινοτύπων



Πηγή: <http://www.futuretrees.org/our-work/birch/the-tree-breeding-programme/>

Μαζική επιλογή

Μαζική επιλογή στο τροπικό δέντρο *Tectona grandis*
στην Ινδία



Μαζική επιλογή (mass selection)

- Μέθοδος βελτίωσης όπου ιδρύονται συστάδες από απογόνους άριστων φαινοτύπων από πληθυσμούς βάσης
- Χωρίς πειραματισμό
- Επιλογή με οπτική αξιολόγηση και σύγκριση
- Η πιο απλή και φτηνή, αλλά και πιο αβέβαιη μέθοδος ως προς το γενετικό κέρδος

Στην Ελλάδα είναι η πιο συχνή μέθοδος βελτίωσης

- Εφαρμόζεται στη συλλογή σπόρων
- Σήμανση δέντρων σε **σποροπαραγωγούς συστάδες**

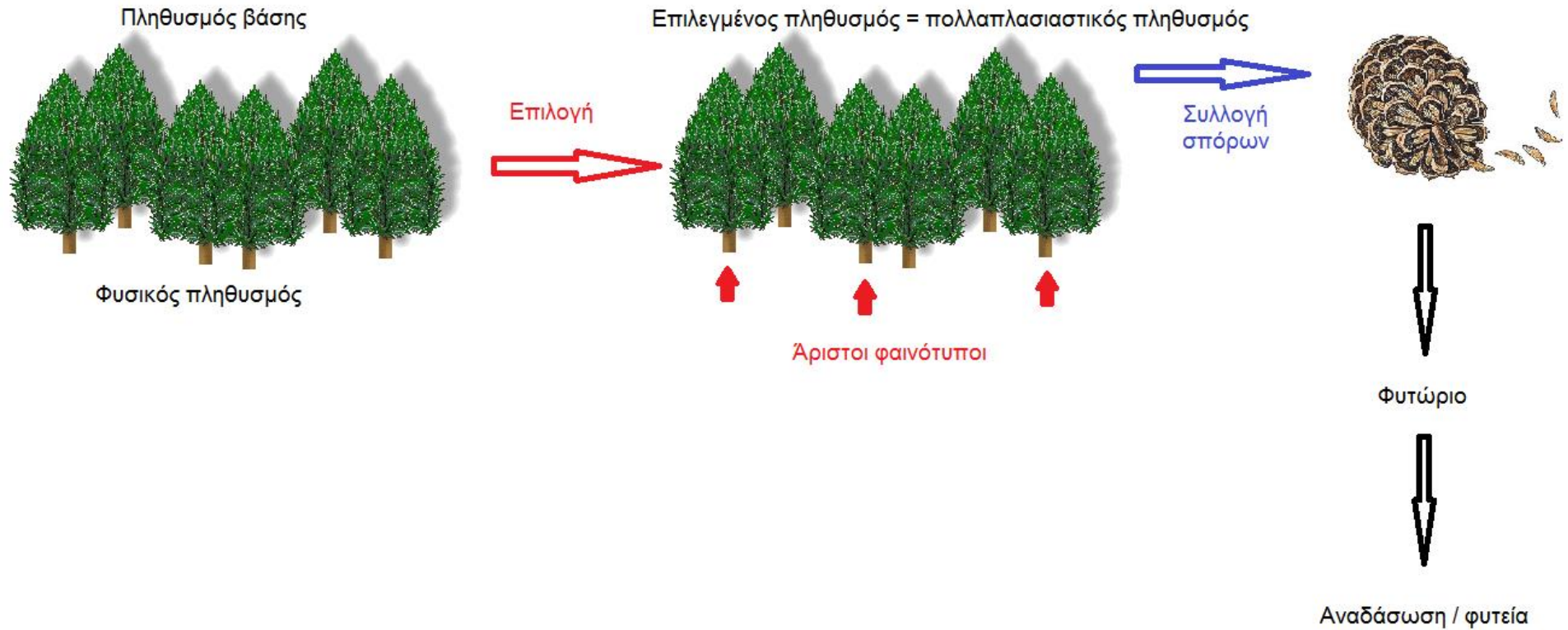


Πηγή: <http://www.metla.fi/metinfo/tietopaketti/treebreeding/slides/edia14.htm>

Σήμανση άριστων φαινοτύπων

Σε φυσικές συστάδες (σποροπαραγωγές) μπορούν να επιλεγούν άριστοι φαινότυποι για συλλογή σπόρων για άμεση χρήση σε φυτεύσεις (μαζική επιλογή), όπως γίνεται για παράδειγμα για την οξιά στην Ιταλία (αριστερά) και την ερυθρελάτη στη Φινλανδία (δεξιά)

Μαζική επιλογή



Δοκιμές απογόνων

Ο γενετικός πειραματισμός κάνει την τεχνητή επιλογή πιο αξιόπιστη και ένα πρόγραμμα βελτίωσης πιο αποτελεσματικό

- Κοστίζει περισσότερο σε πόρους και χρόνο
- Αξιοποιεί καλύτερα τον κύκλο της βελτίωσης και οδηγεί σε μεγαλύτερο γενετικό κέρδος

Οι εκφράσεις των φαινοτύπων ποσοτικών χαρακτηριστικών παρατηρούνται ανάμεσα στους απογόνους των άριστων φαινοτύπων

- Απαιτείται πείραμα σε κοινό περιβάλλον

Για μία οικογένεια **ετεροθαλών** αδερφών αρκεί να μαζέψουμε σπόρους από το ίδιο δέντρο (άριστο φαινότυπο) που προέρχονται από ελεύθερη επικονίαση

Για μια οικογένεια **πλήρων** (ομοθαλών) αδερφών απαιτούνται ελεγχόμενες διασταυρώσεις ανάμεσα σε άριστους φαινότυπους

Μετά την επιλογή των άριστων φαινότυπων μπορεί να ακολουθήσει **δοκιμή κλώνων** ανάμεσα σε απογόνους με βλαστικό πολλαπλασιασμό (γενότυπους)

Ετεροθαλείς οικογένειες

Το πιο συχνό πείραμα απογόνων

- Απόγονοι δέντρων σπορέων από ελεύθερη επικονίαση

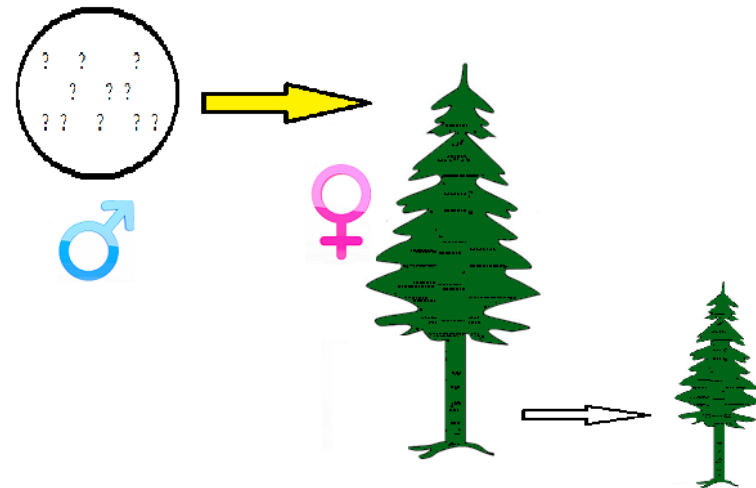
Ο βαθμός συγγένειας μεταξύ των ετεροθαλών απογόνων ενός δέντρου δεν είναι απλός

- Όλοι οι απόγονοι έχουν κοινό θηλυκό γονέα (σπορέας), αλλά κάποιοι από αυτούς έχουν και κοινό αρσενικό γονέα

Μπορούμε να βρούμε τη βελτιωτική αξία των δέντρων σπορέων από τη γενική συνδυαστική ικανότητα

- $\bar{A}_{HS} = \frac{1}{2} A_F = GCA_F$

Μπορούμε να υπολογίσουμε το συντελεστή κληρονομικής ικανότητας με τη στενή έννοια (H_n^2)



Πολλαπλές διασταυρώσεις

Μια ειδική περίπτωση ετεροθαλών οικογενειών είναι αυτές που δημιουργούνται ύστερα από πολλαπλές διασταυρώσεις

Παίρνουμε γύρη από έναν αριθμό δέντρων (αρσενικών γονέων) και την αναμειγνύουμε

- Το μείγμα γύρης χρησιμοποιείται για τη γονιμοποίηση ενός δέντρου σπορέα με θηλυκά άνθη σε ένα πείραμα πολλαπλών διασταυρώσεων (polycross)

Προκύπτουν λιγότερο διαφοροποιημένοι απόγονοι από ότι με την ελεύθερη επικονίαση, καθώς το μείγμα της γύρης είναι πιο ομοιομορφο από ότι το τυχαίο «νέφος γύρης» που γονιμοποιεί ένα δέντρο στη φύση

Η μέθοδος των πολλαπλών διασταυρώσεων είναι ένας τρόπος ελεγχόμενης διασταύρωσης, που όμως στοχεύει στην αποφυγή της δημιουργίας πλήρων οικογενειών

- Σε ένα πείραμα απογόνων από πολλαπλές διασταυρώσεις, ο υπολογισμός της γενικής συνδυαστικής ικανότητας και του συντελεστή κληρονομικής ικανότητας είναι πολύ πιο αξιόπιστος
- Κοστίζει περισσότερο καθώς απαιτεί ελεγχόμενες διασταυρώσεις

Πλήρεις οικογένειες

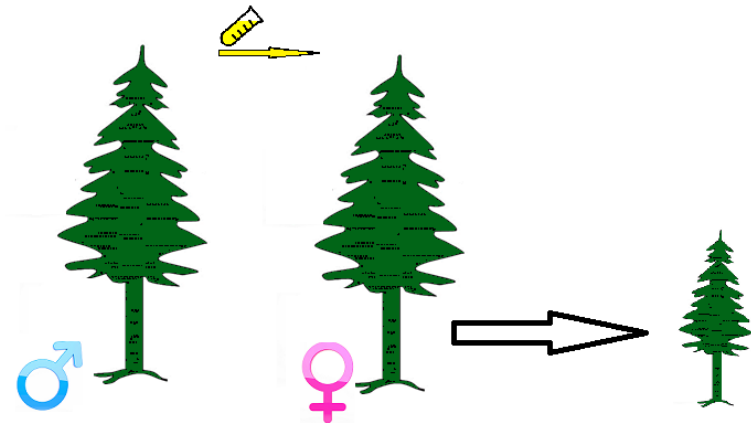
Πείραμα απογόνων που προέρχονται από τεχνητή διασταύρωση

- Και οι δύο γονείς είναι γνωστοί
- Σε μια πλήρη οικογένεια και οι δύο γονείς είναι κοινοί

Μπορούμε να βρούμε τη βελτιωτική αξία και των δύο γονέων από τη γενική συνδυαστική ικανότητα, αλλά και την ειδική συνδυαστική ικανότητα της διασταύρωσης

- $\bar{A}_{FS} = \frac{1}{2}(A_F + A_M) = GCA_F + GCA_M$
- $\bar{P}_{FS} = \mu_0 + GCA_F + GCA_M + SCA_{FM}$

Μπορούμε να υπολογίσουμε το συντελεστή κληρονομικής ικανότητας με τη στενή έννοια (H_n^2)



Πλήρεις οικογένειες

Η τεχνητή διασταύρωση κοστίζει σε χρόνο και πόρους, ενώ ο συνδυασμός πολλών γονέων απαιτεί μεγάλο χώρο για τη δοκιμή

- Τα οφέλη από τον υπολογισμό των γενετικών μεγεθών είναι σημαντικά και αναμένεται μεγαλύτερο γενετικό κέρδος

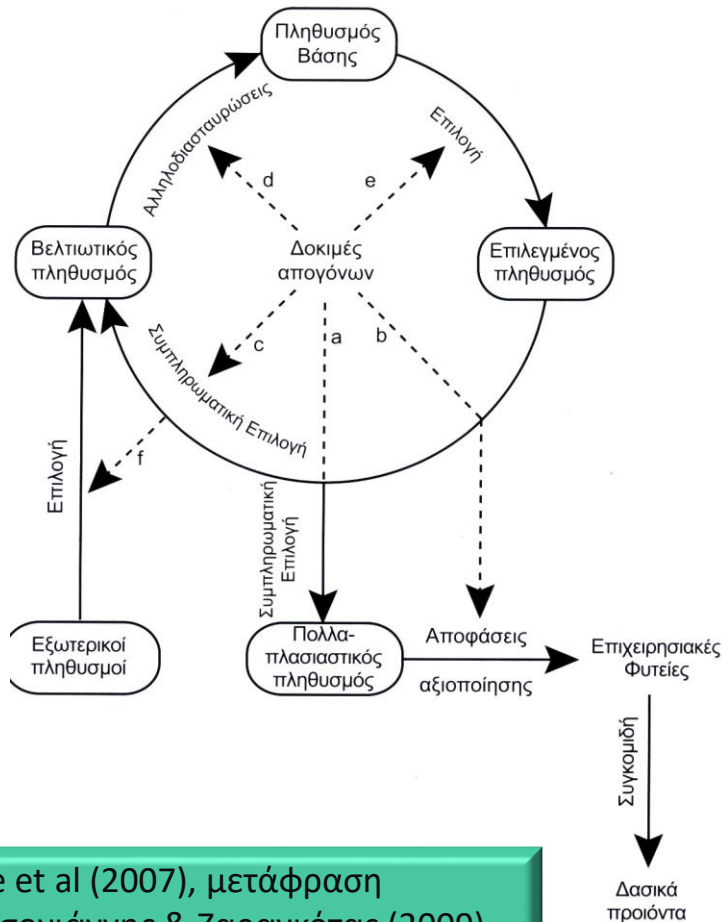
Πολλά σχήματα αναπαραγωγής είναι δυνατά ανάλογα με τον αριθμό και τον τύπο των οικογενειών που θα παράγουμε

- Πειραματικός σχεδιασμός των φυτειών

Ένα απλό σχήμα αναπαραγωγής είναι η επικονίαση όλων των δέντρων που έχουν θηλυκά άνθη με τη γύρη μόνο ενός δέντρου (**πείραμα κορυφαίας διασταύρωσης**)

- το σύνολο των απογόνων από σπόρους ενός δέντρου σπορέα είναι πλήρη αδέρφια
- Οι απόγονοι από σπόρους διαφορετικών δέντρων σπορέων είναι ετεροθαλή αδέρφια

Πειράματα απογόνων από εγγενή πολλαπλασιασμό

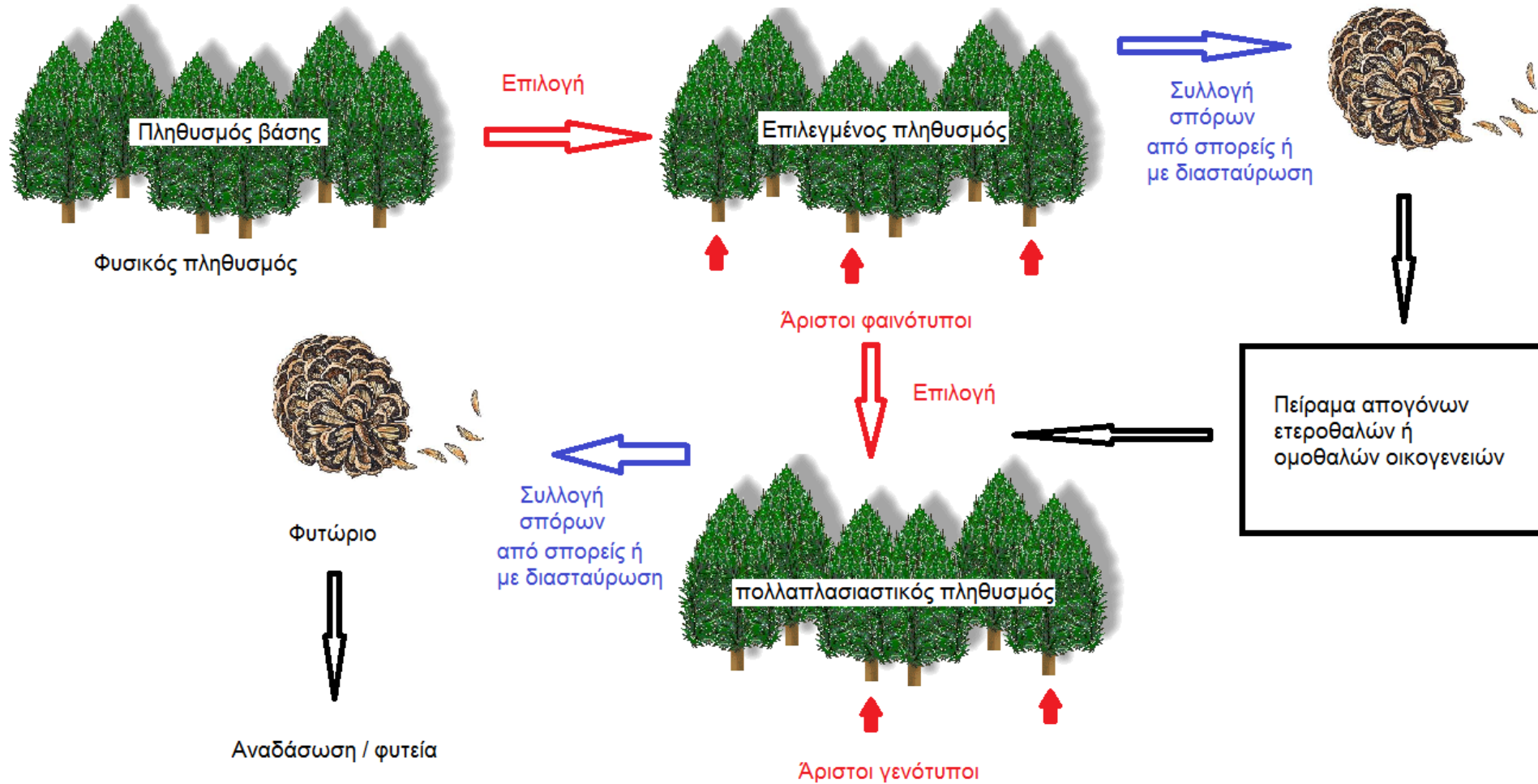


Μετά την αξιολόγηση των πειραμάτων απογόνων, ετεροθαλών ή πλήρων οικογενειών, γνωρίζουμε ποιοι γονείς του επιλεγμένου πληθυσμού έχουν μεγαλύτερη βελτιωτική αξία και ποια ζευγάρια γονέων έχουν μεγαλύτερη ειδική συνδυαστική ικανότητα

- Άριστοι γενότυποι (elite trees)
- Μπορούμε να αξιοποιήσουμε τη γνώση αυτή και να προχωρήσουμε σε επιλογή και δημιουργία πολλαπλασιαστικού πληθυσμού
- Μπορούμε επίσης να προχωρήσουμε σε δημιουργία βελτιωτικού πληθυσμού και από τους απογόνους που θα προκύψουν σαν πληθυσμό βάσης να οδηγηθούμε σε νέο κύκλο βελτίωσης

White et al (2007), μετάφραση
Σκαλτσογιάννης & Ζαραγκότας (2009)

Επιλογή με δοκιμή απογόνων



Πειράματα απογόνων

- a) Δοκιμή προελεύσεων και απογόνων του *Pinus taeda* στην Αργεντινή, 2.5 ετών από σπορόφυτα
- b) Δοκιμή κλώνων ευκαλύπτου 11 ετών στην Κολομβία, όπου ο κλώνος δεξιά υπερέρχει πολύ του κλώνου αριστερά (τα πρώτα δέντρα είναι μάρτυρες και δεν ανήκουν στο πείραμα)



Πείραμα απογόνων

Πειραματική επιφάνεια
απογόνων για το είδος
Pinus taeda στην Αλαμπάμα
(ΗΠΑ)



Πηγή: <http://thewildlandjournal.com/talladega-national-forest-pinhoti-trail/>

Πειράματα κλώνων

Όταν ελέγχονται οι απόγονοι των άριστων φαινοτύπων που προέκυψαν με βλαστικό πολλαπλασιασμό, τότε έχουμε δοκιμή κλώνων

- Διακρίνονται οι κλώνοι με τη μεγαλύτερη γενοτυπική αξία G

Σε ένα πρόγραμμα βελτίωσης με κλώνους, οι άριστοι φαινότυποι που επιλέγονται από έναν πληθυσμό βάσης δίνουν απογόνους με βλαστικό πολλαπλασιασμό

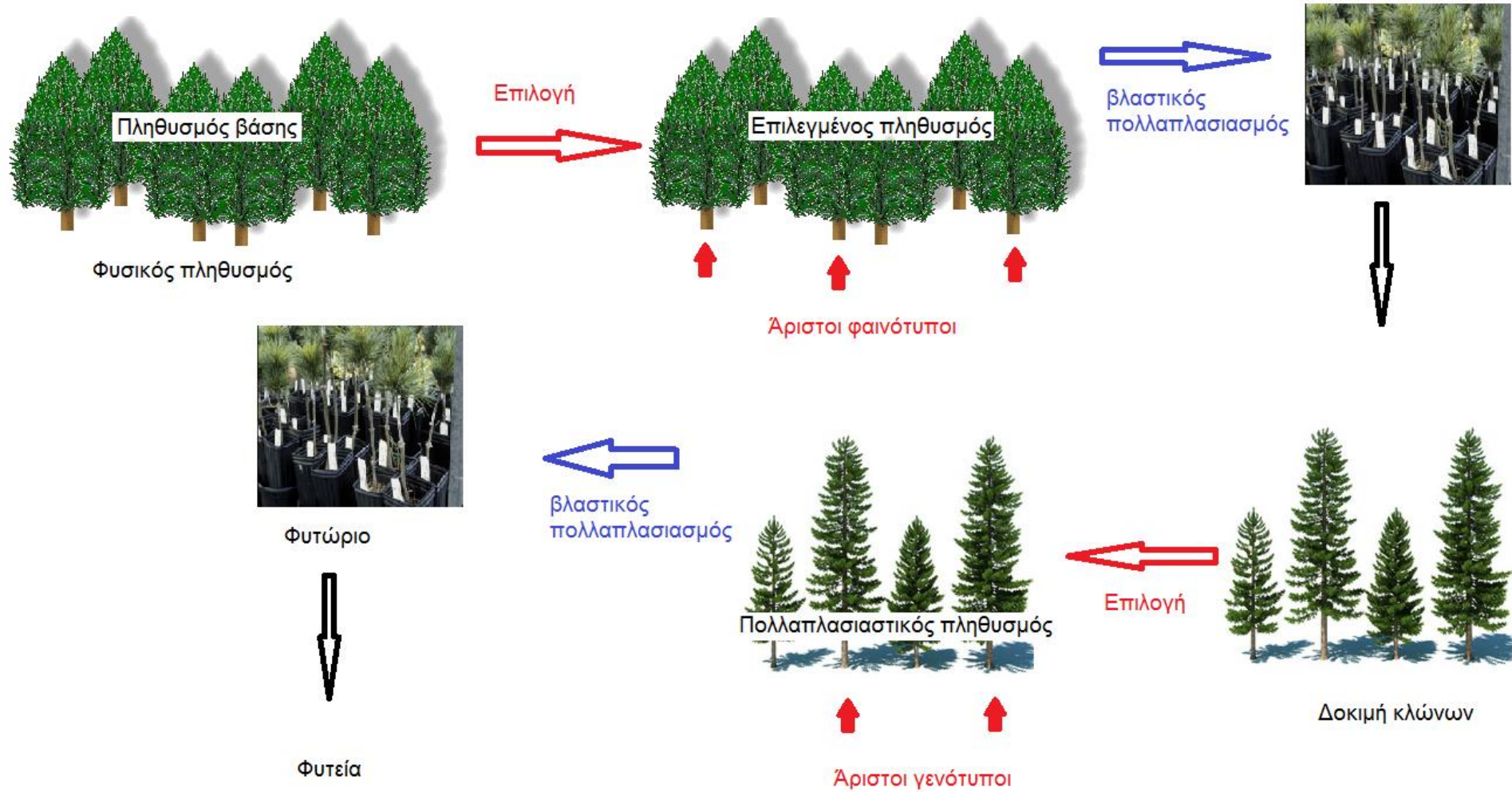
- Ο πληθυσμός βάσης μπορεί να είναι ένα σύνολο κλώνων που προέρχονται από παλαιότερα προγράμματα, ή από εισαγωγή, ή από φυσικά δάση

Οι κλώνοι που προκύπτουν ελέγχονται σε μια δοκιμή κλώνων και επιλέγονται οι άριστοι γενότυποι

- Από τους άριστους γενότυπους μπορούμε να πάρουμε υλικό για βλαστικό πολλαπλασιασμό και να προχωρήσουμε σε παραγωγή
- Η δοκιμή κλώνων γίνεται παραγωγικός πληθυσμός

Εναλλακτικά, μπορούμε από τη δοκιμή κλώνων να δημιουργήσουμε ένα βελτιωτικό πληθυσμό με άριστους γενότυπους και να προβούμε σε διασταυρώσεις μεταξύ των δέντρων δημιουργώντας στην επόμενη γενιά ένα νέο πληθυσμό βάσης για τον επόμενο κύκλο

Επιλογή με δοκιμή κλώνων



Βελτίωση με κλώνους

Με το βλαστικό πολλαπλασιασμό και τη δημιουργία κλώνων, μεταφέρονται αυτούσιοι οι «πολυγονιδιακοί γενότυποι» (multi-locus genotypes), που έχουν επιλεγεί

- Αξιοποίηση της μη αθροιστικής γενετικής ποικιλότητας

Απλή και σύντομη μέθοδος με μεγαλύτερη αναμενόμενη γενετική πρόοδο από οποιαδήποτε άλλη μέθοδο βελτίωσης

- Ιδανική μέθοδος για μεταφορά και «διατήρηση» γενοτύπων

Μειονεκτήματα

- Η ποικιλότητα μειώνεται περισσότερο από ότι με βελτίωση με σπορόφυτα
- Επικινδυνότητα λόγω των πιθανών αλλαγών του περιβάλλοντος
- Αδυναμία περαιτέρω σταδίων επιλογής, μετά την επιλογή των κλώνων
 - Για να δημιουργηθεί νέος πληθυσμός βάσης πρέπει να γίνουν ξανά διασταυρώσεις

Διασταυρώσεις μεταξύ διαφορετικών ειδών και υβρίδια

Σε πολλές περιπτώσεις, ο πληθυσμός βάσης αποτελείται από υβρίδια που σχηματίζονται από τεχνητές διασταυρώσεις μεταξύ δέντρων διαφορετικών ειδών

Τα υβρίδια πιθανόν να εμφανίζουν καλύτερη απόδοση από τους γονείς τους

- Υβριδική ρώμη

Ο γενετικός μηχανισμός δεν είναι ξεκάθαρος

- Υπερκυριαρχία
- Συνδυασμός κυρίαρχων αλληλομόρφων

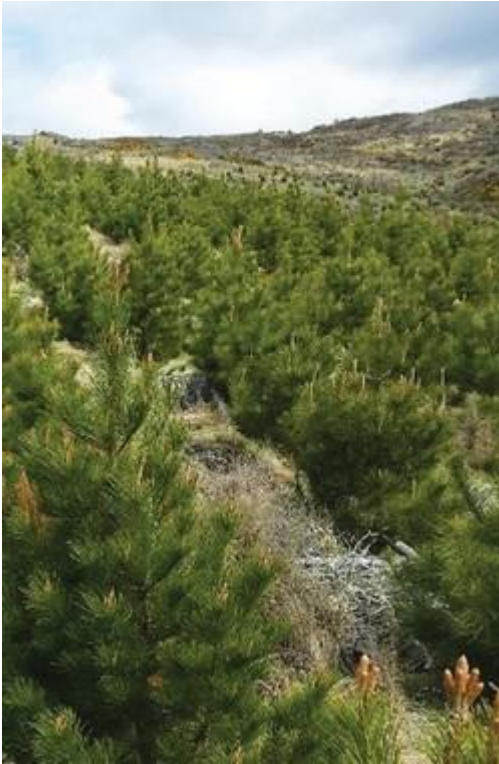
Ελπίζουμε να έχουμε έναν ιδανικό συνδυασμό χρήσιμων χαρακτηριστικών

- Σύνθεση των πλεονεκτημάτων των δύο γονέων



Ο κλώνος λεύκης I-214 είναι υβρίδιο ανάμεσα στην *Populus nigra* και *P. deltoides*

Βελτίωση με υβρίδια



Υβρίδια ανάμεσα στην *Pinus attenuata* και *P. radiata* στη Νέα Ζηλανδία

Πηγή: <http://www.scionresearch.com>

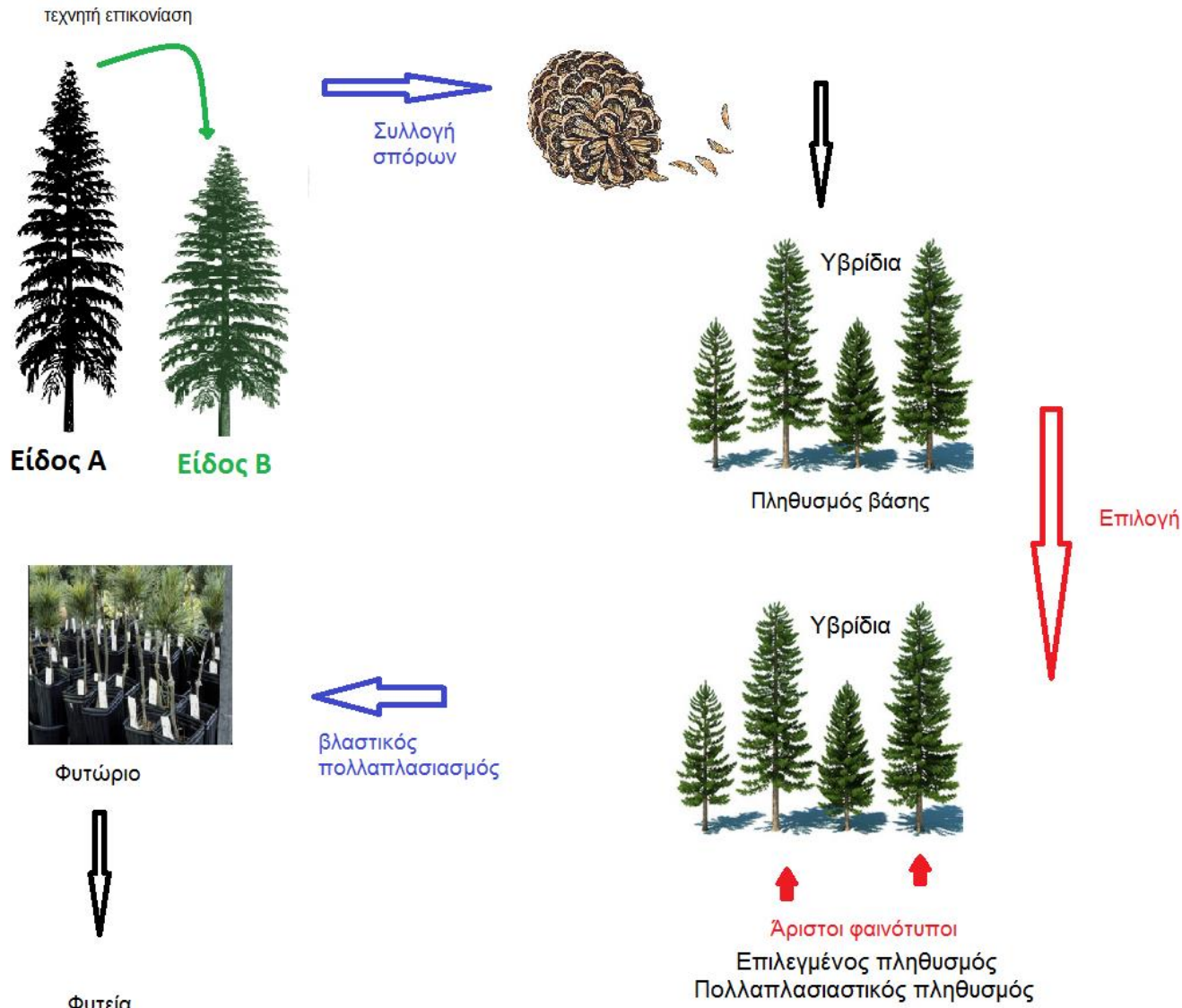
Δοκιμάζουμε τα υβρίδια μιας διασταύρωσης μεταξύ γονέων διαφορετικών ειδών και επιλέγουμε αυτά που πληρούν τα κριτήρια επιλογής

- Στη συνέχεια δημιουργούμε κλώνους με αγενή πολλαπλασιασμό

Ο υβριδισμός αποκτά πρακτική σημασία σε συνδυασμό με το βλαστικό πολλαπλασιασμό

Διατηρούμε και αναπαράγουμε τους υπερέχοντες γενότυπους που προκύπτουν από τον υβριδισμό, χωρίς να χάσουμε τον «ιδανικό» συνδυασμό μέσα από τον ανασυνδυασμό

Επιλογή με υβρίδια



Υβρίδια πεύκης στην Ελλάδα

Υβρίδια χαλεπίου και
τραχείας πεύκης (μέσο) σε
σύγκριση με του γονείς
Pinus halepensis (δεξιά)
και *P. brutia* (αριστερά)

Από πειραματική επιφάνεια
του Εργαστηρίου Δασικής
Γενετικής & Βελτίωσης
Δασοπονικών Ειδών του
ΑΠΘ

Panetsos 1989



ΒΕΛΤΙΩΣΗ

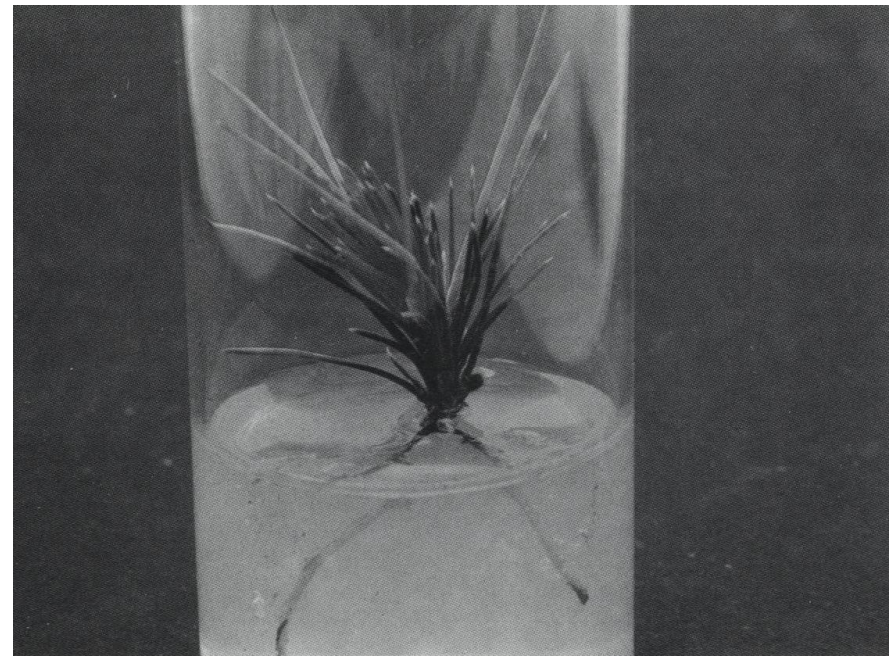
34

Υβρίδια πεύκης στην Ελλάδα

Υβρίδια δασικής και μαύρης
πεύκης (αριστερά) σε
σύγκριση με του γονείς
Pinus sylvestris (δεξιά) και *P.
nigra* (μέσο)

Από πειραματική επιφάνεια
του Εργαστηρίου Δασικής
Γενετικής & Βελτίωσης
Δασοπονικών Ειδών του
ΑΠΘ





Panetsos 1989

Διαδικασία παραγωγής υβριδίων

Τα θηλυκά άνθη του ενός γονέα απομονώνονται με ειδικές σακούλες πριν την αναπαραγωγική περίοδο (αριστερά) και στη συνέχεια επικονιάζονται τεχνητά με γύρη που συλλέγεται από τον αρσενικό γονέα. Τα επιλεγμένα υβρίδια πολλαπλασιάζονται βλαστικά, π.χ. με ιστοκαλλιέργεια (δεξιά)

Επιπτώσεις της βελτίωσης

Η βελτίωση δασοπονικών ειδών είναι μια διαδικασία που βασίζεται στην τεχνητή επιλογή σε ένα ή περισσότερα στάδια, που μειώνει το μέγεθος του πληθυσμού σε κάθε στάδιο

Η τεχνητή επιλογή δεν είναι πάντα συμβατή με τη φυσική επιλογή και δεν εξασφαλίζει απαραίτητα την προσαρμογή των φυτών στο περιβάλλον τους

- Ειδικά για καθαρά παραγωγικούς χαρακτήρες

Οι μειώσεις στο μέγεθος του πληθυσμού προκαλεί μείωση της γενετικής βάσης και γενετική εκτροπή

- Η προσαρμοστικότητα του πληθυσμού επηρεάζεται αρνητικά

Η ευρεία φύτευση των προϊόντων της βελτίωσης (βελτιωμένες ποικιλίες) μπορεί να αποτελέσουν κίνδυνο για τοπικά προσαρμοσμένους πληθυσμούς

- Αντικατάσταση των φυσικών πληθυσμών από φυτείες
- Ροή γονιδίων από τις φυτείες στους αυτόχθονες πληθυσμούς

Η μειωμένη γενετική ποικιλότητα αυξάνει τον κίνδυνο από προσβολές εντόμων και ασθeneιών

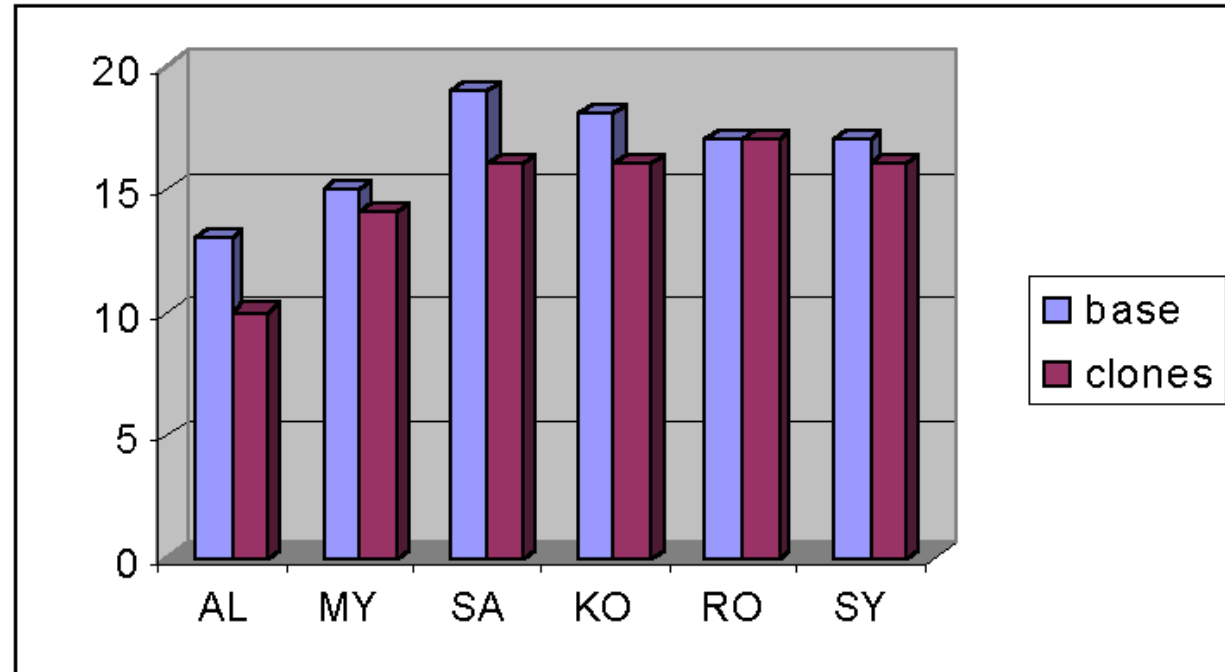
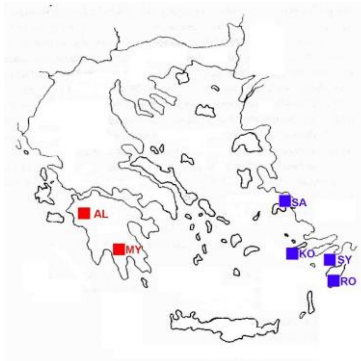
Το ρίσκο αυξάνει ιδιαίτερα μεγάλο στη δασοπονία κλώνων

Επιπτώσεις της βελτίωσης στο κυπαρίσσι

Το κυπαρίσσι είναι ευπαθές στο μύκητα *Seiridium cardinale* και για το λόγο αυτό δημιουργήθηκαν ανθεκτικοί κλώνοι του είδους στην ασθένεια

Έγινε σύγκριση γενετικής ποικιλότητας 6 ομάδων ανθεκτικών κλώνων και των 6 φυσικών πληθυσμών βάσης

Η διαδικασία της βελτίωσης προκάλεσε απώλεια αλληλομόρφων στα βελτιωμένα φυτά (γενετική εκτροπή)



Εισαγωγή ξενικών ειδών

Σημαντική παράμετρος των φυτειών, των υποδομών αναψυχής και του αστικού πρασίνου

- Στην Ελλάδα υπάρχει χρήση ξενικών ειδών σε φυτείες ταχυαυξών ειδών, σε περιοχές πρασίνου και δενδροστοιχίες, σαν καλλωπιστικά είδη και σε πρανή δρόμων
- Δεν είναι συνηθισμένες οι αναδασώσεις μεγάλης έκτασης με ξενικά είδη
 - Κάποιες εξαιρέσεις με *Pinus maritima* και *P. radiata* στη Β. Ελλάδα με μειωμένη επιτυχία
- Έχουν υπάρξει δοκιμές ξενικών παραγωγικών δασικών ειδών με επιτυχία

Προβλήματα που προκύπτουν συνήθως

- Μη καταγραφή των μετακινήσεων σπόρων
- Στενή γενετική βάση
- Ακατάλληλα είδη και προελεύσεις
- Αντικατάσταση ντόπιων

Επιτόπιες φυλές

- Διαφοροποίηση από πληθυσμό προορισμού
- Προσαρμογή
- Συνήθως χαμηλή γενετική ποικιλότητα (εκτροπή)

Η εμπειρία της *Pinus maritima* στην Ελλάδα

Η παραθαλάσσια πεύκη, εισήχθη στην Ελλάδα το 1912 στην Αχαΐα και στο Πήλιο. Μέχρι το 1970 χρησιμοποιούνταν σε αναδασώσεις στη Β. Ελλάδα (Χαλκιδική, Κιλκίς, Πιερία, Καστοριά, Νιγρίτα, Πόρτο Λάγος, Θέρμη)

Αρχικά είχε καλή απόδοση, αργότερα όμως υστερούσε των τοπικών δασικών ειδών, ενώ εμφάνισε και μαζικές νεκρώσεις σε κάποιες περιοχές (π.χ. στην Κομοτηνή το 1970)



Αναδάσωση *Pinus maritima* στον Πολύγυρο Χαλκιδικής

Αρχές εισαγωγής ξενικών ειδών

Τα ξενικά είδη μπορούν να χρησιμοποιούνται σε φυτείες παραγωγής δασικών προϊόντων ή σε πάρκα, άλση και σε αστικούς χώρους

- Να αποφεύγεται η εγκατάστασή τους σε φυσικά οικοσυστήματα

Η προέλευση και το πρόσφατο ιστορικό των φυσικών συστάδων στο χώρο καταγωγής τους πρέπει να είναι γνωστά

- Να αποφεύγουμε πληθυσμούς που έχουν διέλθει από γενετική στένωση, ή έχουν πολύ μικρό μέγεθος και χαμηλή πυκνότητα
- Η «καταλληλότητα» ενός ξενικού είδους για μια φυτεία δεν εκτιμάται αν δεν υπάρχει βεβαιότητα και πληροφορία για την προέλευση

Να εγκαθιστούμε πειράματα προελεύσεων ξενικών ειδών πριν τη δημιουργία φυτειών

Οι επιτόπιες φυλές δεν είναι πάντα οι κατάλληλες πηγές υλικού για μια νέα αναδάσωση ή δάσωση

- Μπορεί να έχει επέλθει μείωση γενετικής ποικιλότητας
- Άγνωστο ιστορικό εγκατάστασης

Ξενικά είδη που έχουν πετύχει

Cupressus sempervirens στην
Τοσκάνη



Cupressus lusitanica στην
Πορτογαλία



Σποροπαραγωγές συστάδες (seed production area)

Συνήθως φυσικοί πληθυσμοί που ξεχωρίζουν σε δοκιμές προελεύσεων και διαθέτουν πολλούς άριστους φαινότυπους

- Πολλές φορές δεν επιλέγονται με βάση δοκιμές προελεύσεων, παρά μόνο εμπειρικά

Η κληρονομικότητα για συγκεκριμένους χαρακτήρες και η διαφοροποίηση από άλλες συστάδες δεν είναι γνωστές, καθώς δεν έχει γίνει πειραματισμός (δοκιμές απογόνων)

- Δεν μπορούμε να υπολογίσουμε με ακρίβεια την αποτελεσματικότητα της επιλογής
- Βάση για μαζική επιλογή και αρχικό σημείο γενετικού πειραματισμού

Χρησιμοποιούνται συστηματικά για σποροσυλλογή από τις αρχές και έχουν σημαδεμένους τους άριστους φαινότυπους

Σημαντικά στοιχεία κατά την επιλογή μιας σποροπαραγωγού συστάδας, πέρα της ύπαρξης άριστων φαινοτύπων

- Μέγεθος και πυκνότητα πληθυσμού
- Απομόνωση (θετικό και αρνητικό)
- Προσβασιμότητα για πρακτικούς λόγους
- Δυνατότητα προστασίας από εξωτερικούς παράγοντες (π.χ. φωτιά)

Χειρισμός σποροπαραγωγών συστάδων

Αρνητική επιλογή

- Οι αραιώσεις είναι ο πιο σημαντικός δασοκομικός χειρισμός, όπου άτομα άλλων ειδών και «ακατάλληλοι» φαινότυποι απομακρύνονται
- Προσοχή: όχι ισχυρή αρνητική επιλογή

Η ροή γονιδίων είναι επιθυμητή αλλά με μέτρο

- Έλλειψη ροής γονιδίων οδηγεί σε εκτροπή
- Μεγάλη ροή γονιδίων εμποδίζει την προσαρμογή και φέρνει «μη επιθυμητά» αλληλόμορφα στη συστάδα

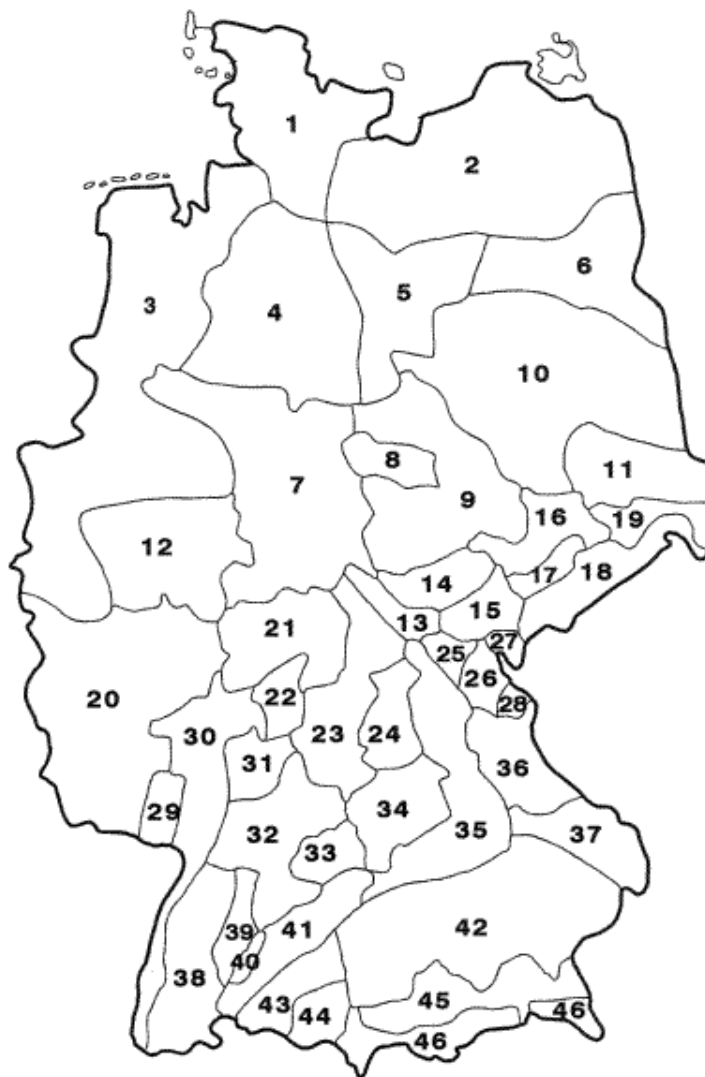


Περιοχές συλλογής δασικού σπόρου στη Γερμανία

Η επικράτεια της χώρας είναι χωρισμένη σε περιοχές με οικολογικά κριτήρια (βιοκλιματικές ζώνες)

Σε κάθε περιοχή, για τα βασικά δασοπονικά είδη, υπάρχουν σποροπαραγωγές συστάδες

Υπάρχουν συγκεκριμένοι κανόνες συλλογής, διατήρησης και διακίνησης του δασικού σπόρου, με βάση την οδηγία της ΕΕ 1999/105/ΕΓ



Συστάδες προελεύσεων

Παράλληλα με τις δοκιμές προελεύσεων, δημιουργούμε μια τυχαία μείξη από απογόνους πολλών δέντρων μιας προέλευσης, χωρίς κανένα στατιστικό σχεδιασμό

- Απομόνωση για διατήρηση της γενετικής σύστασης της αρχικής προέλευσης

Προστασία των γενετικών πόρων μιας προέλευσης εκτός φυσικού τόπου

- Λειτουργεί σαν «backup» αν χαθεί μέρος της αρχικής συστάδας

Όριμες συστάδες προελεύσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν σποροπαραγωγές συστάδες

- Προϋπόθεση να έχει παραμείνει η γενετική σύσταση παρόμοια με αυτήν της αρχικής συστάδας και η δειγματοληψία να έχει περιλάβει πολλά γονικά δέντρα και να είναι αντιπροσωπευτική

Δεν χρησιμοποιούμε δοκιμές προελεύσεων για συλλογή σπόρων

Σε ένα πείραμα δοκιμής προελεύσεων δεν συλλέγουμε απευθείας σπόρο από τα δέντρα των προελεύσεων που υπερέχουν

- Η γύρη προέρχεται από άλλες προελεύσεις

Πρέπει να επιστρέψουμε στις φυσικές περιοχές των προελεύσεων να συλλέξουμε ξανά σπόρο





Σποροπαραγωγός
κήπος *Larix decidua*
στη Βαυαρία

Πηγή: <http://www.lwf.bayern.de/waldbau-bergwald/waldbau>

Σποροπαραγωγός κήπος

Η συλλογή επιλεγμένων κλώνων ή σποροφύτων (οικογένειες) σε μία περιοχή με σκοπό την παραγωγή γενετικά βελτιωμένου δασικού σπόρου για τη δασική παραγωγή. Τόσο οι θηλυκοί όσο και οι αρσενικοί γονείς είναι επιλεγμένοι και έτσι διπλασιάζεται το γενετικό κέρδος.

Σποροπαραγωγός κήπος κλώνων

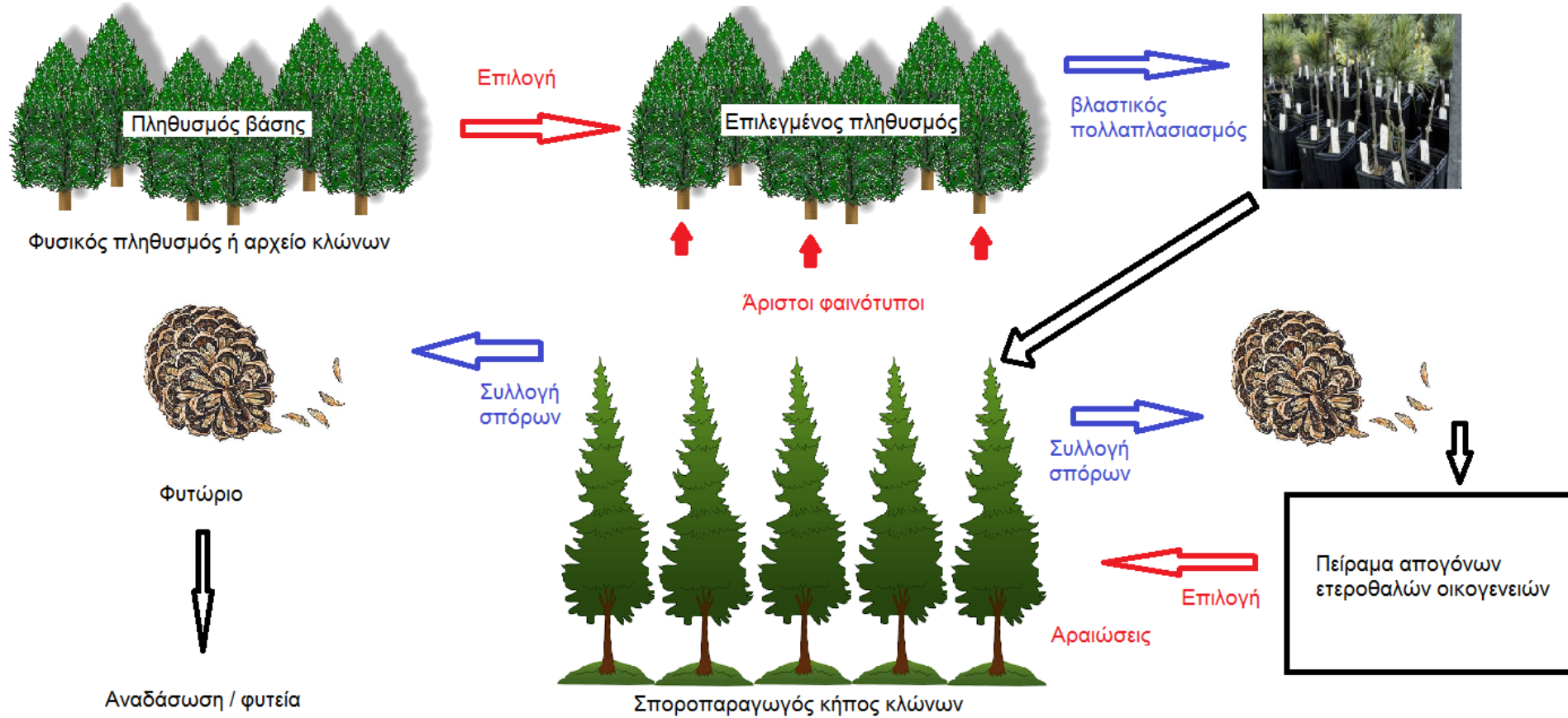
Σποροπαραγωγός κήπος που έχει ιδρυθεί από τη μεταφορά επιλεγμένων γενοτύπων με βλαστικό πολλαπλασιασμό (κλώνοι)

- Ο πιο κοινός τρόπος μαζικής παραγωγής γενετικά επιλεγμένου σπόρου για τις ανάγκες της δασοπονίας
- Επιτυγχάνουμε παραγωγή μεγάλης ποσότητας σπόρων από λίγους επιλεγμένους γενότυπους (μεγάλο γενετικό κέρδος)
- Οι κλώνοι συμμετέχουν στον σποροπαραγωγό κήπο σε πολλά αντίγραφα

Συνήθως με εμβολιασμό από δέντρα που έχουν επιλεγεί από φυσικό πληθυσμό ή από ένα σύνολο γενοτύπων (αρχείο κλώνων) που έχουν προκύψει από προηγούμενο κύκλο βελτίωσης

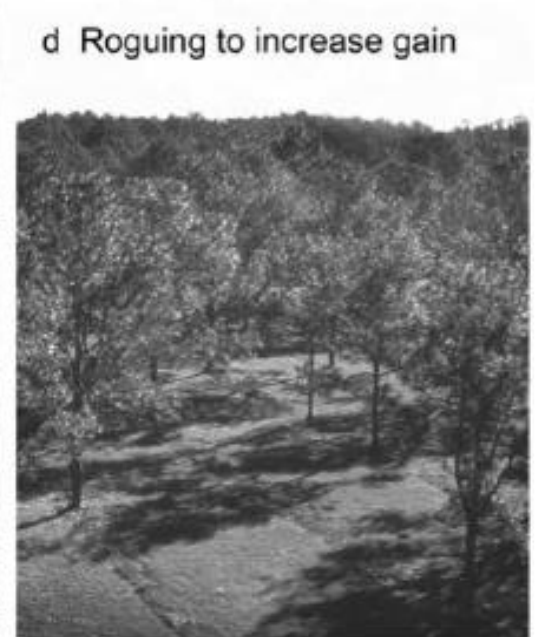
- Η επιλογή των κατάλληλων κλώνων γίνεται με βάση την υπεροχή που καταγράφεται σε φαινοτυπικά χαρακτηριστικά άριστων φαινοτύπων
- Δεν γνωρίζουμε τους απογόνους τους και γι αυτό ιδρύουμε παράλληλα με τον σποροπαραγωγό κήπο και ένα πείραμα απογόνων με υλικό από τον κήπο, προκειμένου να απομακρύνουμε τους γονείς που είναι ακατάλληλοι

Ίδρυση σποροπαραγωγού κήπου κλώνων



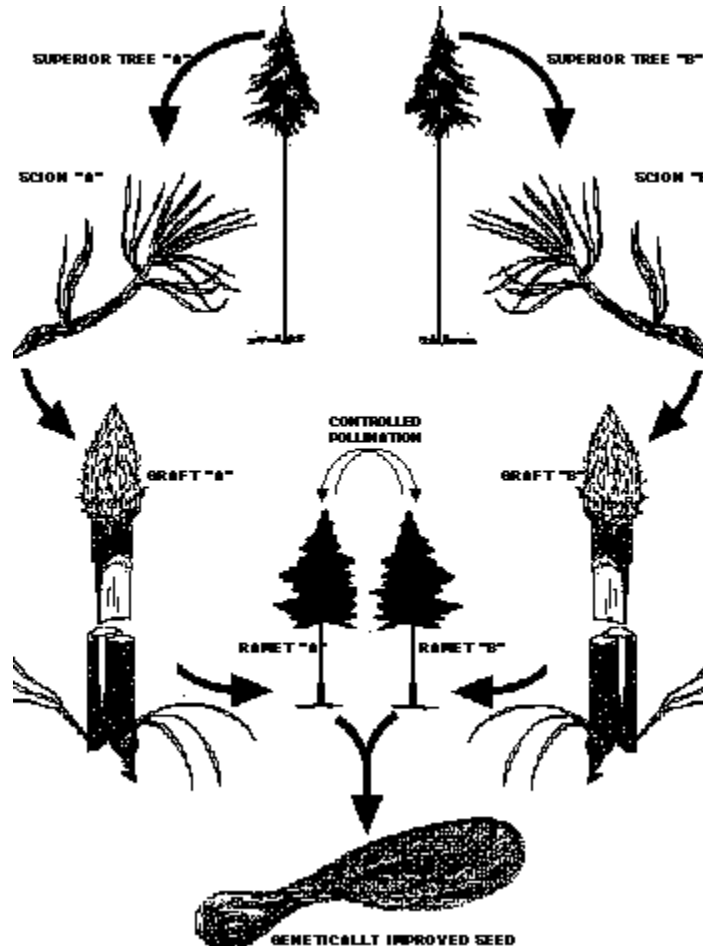
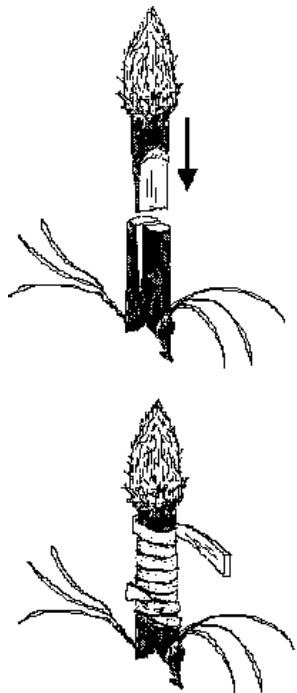
Ίδρυση σποροπαραγωγού κήπου κλώνων

- a) Συλλογή εμβολίων από άριστους φαινότυπους
- b) Εμβολιασμός επιλεγμένων γενοτύπων πάνω σε υποκείμενα
- c) Εγκατάσταση σποροπαραγωγού κήπου κλώνων
- d) Αρνητική επιλογή με βάση τα αποτελέσματα δοκιμής απογόνων



Ο εμβολιασμός στη βελτίωση

Εμβόλιο και υποκείμενο



Μεταφορά
επιλεγμένων γενοτύπων
για σποροπαραγωγή

Σποροπαραγωγοί κήποι κλώνων



Συγκομιδή κλώνων από σποροπαραγωγό κήπο δασικής πεύκης 15 ετών στη Φινλανδία

Ruotsalainen (2014)

Το γενετικό κέρδος αυξάνει όσο μειώνεται ο αριθμός των επιλεγμένων κλώνων

- Μειώνεται όμως η γενετική ποικιλότητα
- Συνήθως επιλέγουμε πολλούς κλώνους (ως 100) με λιγότερα αντίτυπα ο καθένας (2-16)

Απαιτείται ειδικός στατιστικός σχεδιασμός της διάταξης του κήπου για την αποφυγή ομομιξίας

Απομόνωση από άλλες συστάδες του είδους

Μεγάλες αποστάσεις φύτευσης για τη διευκόλυνση της κίνησης οχημάτων και προσωπικού

- Αρχικά πιο πυκνά για τη διευκόλυνση αραιώσεων

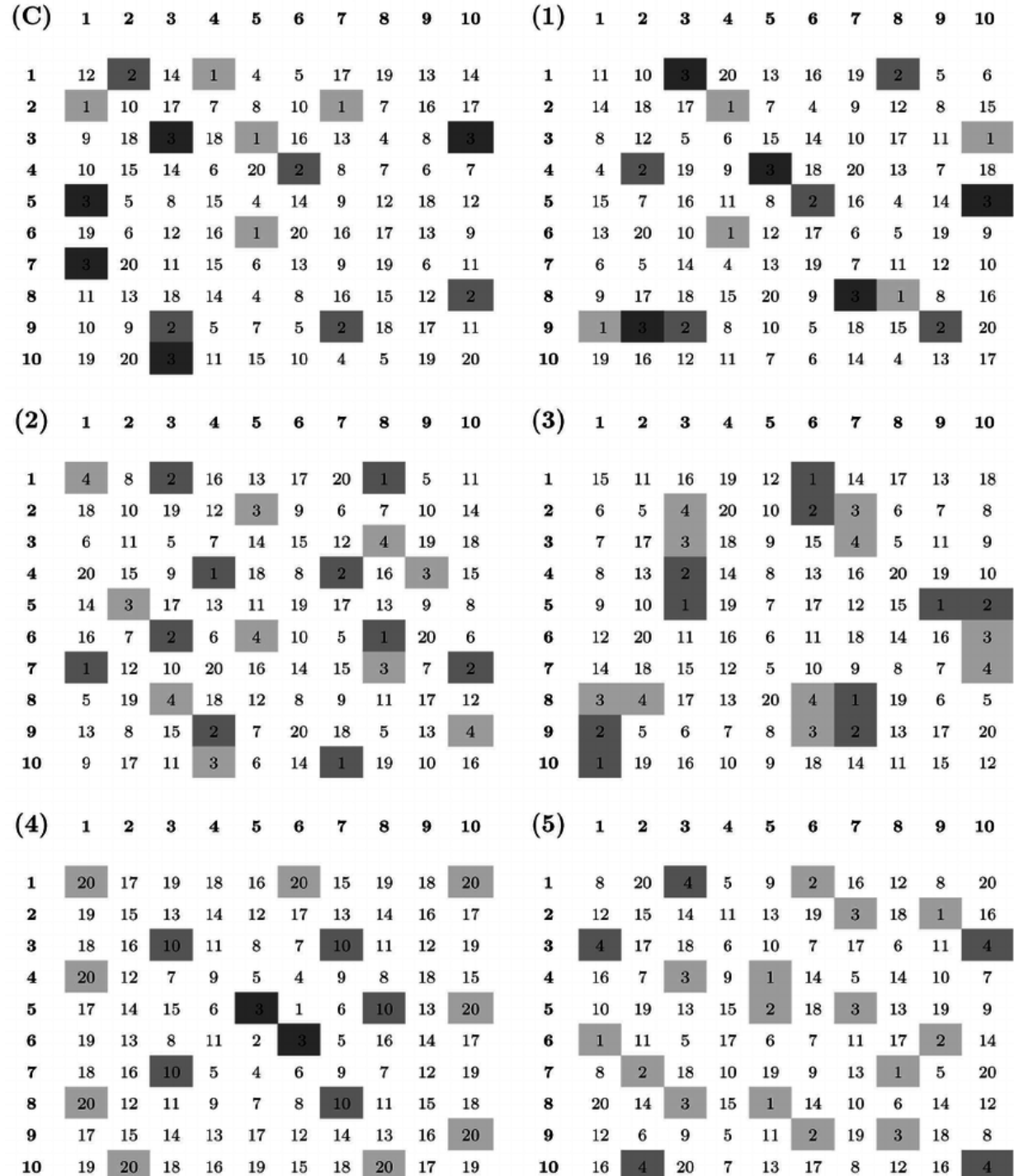
Χειρισμοί αραιώσεων (αρνητική επιλογή) για αφαίρεση ακατάλληλων κλώνων ή αποτυχημένων εμβολιασμών

Διάταξη σποροπαραγωγού κήπου κλώνων

Παραδείγματα χωρικής
διάταξης 100 γενοτύπων σε
έναν σποροπαραγωγό κήπο
(20 κλώνοι από 5 μέλη
καθένας)

Πάνω αριστερά με τη χρήση
της μεθόδου COOL
(coordinated orchard layout)
για αποφυγή γειτνίασης
φυτών του ίδιου κλώνου

Από (1) ως (5) προτάσεις
αλγορίθμων για
ελαχιστοποίηση της
ομομιξίας MI (Minimum
Inbreeding)



Σποροπαραγωγοί κήποι σποροφύτων

Ένα σύνολο φυτών που προέρχονται από φυλετικό πολλαπλασιασμό επιλεγμένων γονέων (συνήθως ετεροθαλείς οικογένειες) και συγκεντρώνονται στην ίδια έκταση με σκοπό την παραγωγή σπόρων

- Συνήθως η εξέλιξη μιας πειραματικής φυτείας με δοκιμή απογόνων από ελεύθερη επικονίαση (ετεροθαλών οικογενειών)

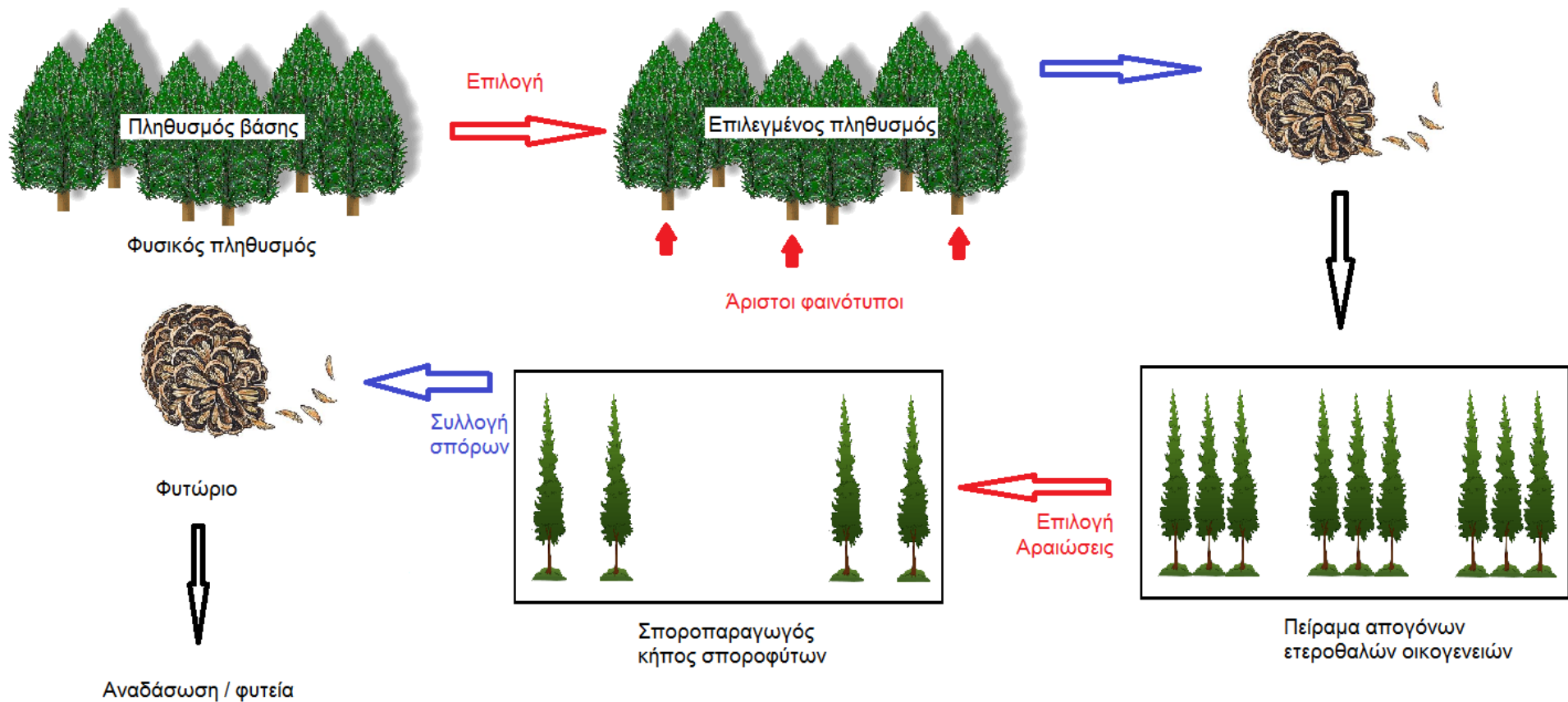
Αρχικά ο κήπος λειτουργεί σαν πείραμα απογόνων και στη συνέχεια, οι οικογένειες με κατώτερη απόδοση απομακρύνονται

- Απομακρύνονται οι κατώτεροι γενότυποι μέσα στις οικογένειες
- Οι σπόροι που παράγονται χρησιμοποιούνται για αναδασώσεις ή φυτείες

Είναι σκόπιμο να μην αφήνουμε πολύ λίγες οικογένειες γιατί έχουμε γονιμοποίηση μεταξύ συγγενών και μείωση της γενετικής βάσης

Πρέπει να υπάρχει αναπαραγωγική απομόνωση από εξωτερικές συστάδες του ίδιου είδους

Ίδρυση σποροπαραγωγού κήπου σποροφύτων



	Σποροπαραγωγός κήπος σποροφύτων	Σποροπαραγωγός κήπος κλώνων
Πλεονεκτήματα	<ul style="list-style-type: none"> • Συνδυάζει δοκιμή απογόνων και παραγωγή σπόρων • Δύο κύκλοι επιλογής σε μια φυτεία • Εφαρμόζεται και για είδη που δεν πολλαπλασιάζονται βλαστικά • Δεν έχει δυσκολίες εγκατάστασης • Πλατιά γενετική βάση 	<ul style="list-style-type: none"> • Είναι γνωστοί οι γενότυποι των ατόμων σπορέων • Γρήγορη ανθοφορία και παραγωγή σπόρων • Ο κήπος εγκαθίσταται σε βολική θέση • Μικρή πιθανότητα επικονίασης μεταξύ συγγενών
Μειονεκτήματα	<ul style="list-style-type: none"> • Πρέπει να εγκατασταθεί σε ευνοϊκό μέρος για το είδος • Απαιτείται μεγάλη έκταση • Ο γενότυπος των σπορέων είναι άγνωστος • Υπάρχει κίνδυνος επικονίασης μεταξύ συγγενών ατόμων 	<ul style="list-style-type: none"> • Ένας μόνο κύκλος επιλογής • Ο εμβολιασμός είναι πολλές φορές δύσκολος • Η δοκιμή απογόνων γίνεται χωριστά • Υπάρχει κίνδυνος περιορισμού της γενετικής βάσης

Μαζική παραγωγή υβριδίων

Κατά τη διασταύρωση δύο διαφορετικών ειδών, οι υπερέχοντες χαρακτήρες αναμένονται στην F1 γενιά

- Στην F2 η υπεροχή χάνεται λόγω του ανασυνδυασμού

Η πιο απλή και φτηνή μέθοδος παραγωγής υβριδίων είναι η εγκατάσταση μεικτών φυτειών με διαφορετικά είδη και προελεύσεις

- Αβέβαια αποτελέσματα υβριδισμού
- Έλλειψη επιλογής ανάμεσα στα υβρίδια
- Υψηλή γενετική ποικιλότητα

Παραγωγή υβριδίων με ελεγχόμενες διασταυρώσεις

- Κόστος σε χρόνο και χρήμα
- Σε σποροπαραγωγό κήπο κλώνων με υβρίδια, η υβριδική ρώμη χάνεται στην F2

Ο πιο κοινός τρόπος μαζικής παραγωγής υβριδίων είναι ο βλαστικός πολλαπλασιασμός

- Δημιουργούμε το υβρίδιο με τεχνητή διασταύρωση και κατόπιν διαδίδουμε το γενότυπο αυτό με κλώνους
- Δεν χάνεται η υβριδική ρώμη που επιτεύχθηκε στην F1 γενιά, αφού δεν χρειάζεται να μεσολαβήσει άλλη διασταύρωση για τη μαζική παραγωγή
- Μειωμένη γενετική ποικιλότητα

Βελτίωση: συμπεράσματα

Η βελτίωση δασοπονικών ειδών οδηγεί σε βελτίωση παραγωγικών και προσαρμοστικών χαρακτηριστικών

Είναι απαραίτητη διαδικασία και μπορεί να έχει μεγάλα οφέλη

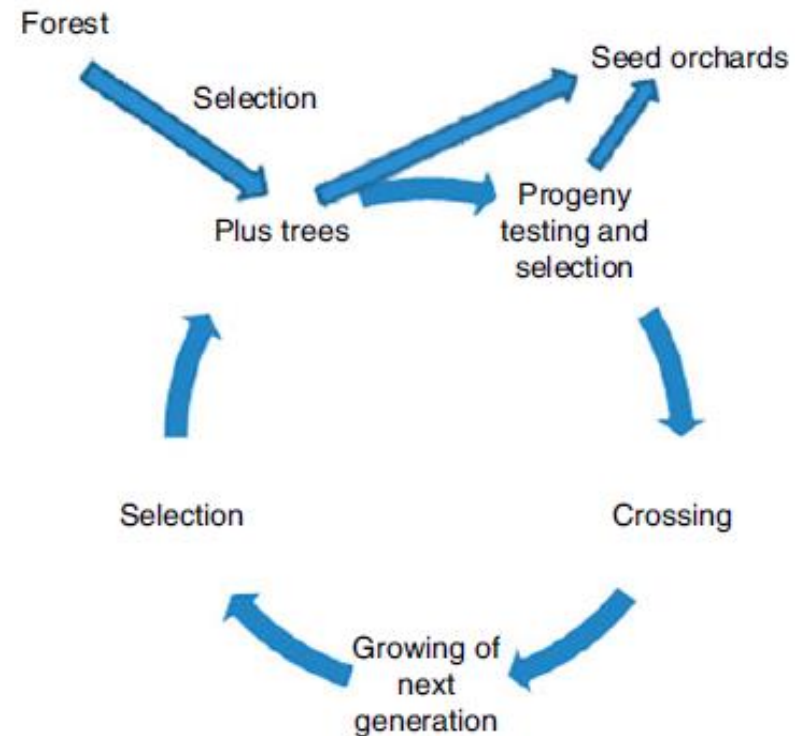
Είναι μακροπρόθεσμη διαδικασία και απαιτεί σχεδιασμό

Μειώνει τη γενετική ποικιλότητα μέσα από την τεχνητή επιλογή

- Απαιτείται προσοχή στη χρήση των προϊόντων της βελτίωσης στη δασοπονία

Μπορεί να βοηθήσει σημαντικά στην ελληνική δασοπονία

- Αύξηση αγροτικού εισοδήματος
- Αντιμετώπιση επιπτώσεων κλιματικής αλλαγής στα δάση



Ruotsalainen (2014)

Χρήση κλώνων κυπαρισσιού στην Αρχαία Ολυμπία

Το 2007, μετά την πυρκαγιά που έκαψε τον αρχαιολογικό χώρο της Ολυμπίας, χρησιμοποιήθηκαν επιλεγμένοι κλώνοι κυπαρισσιού για αντοχή στο *Seiridium cardinale*

Οι κλώνοι ήταν αποτέλεσμα διακρατικού προγράμματος βελτίωσης διάρκειας 25 ετών

Οι πληθυσμοί βάσης για τους κλώνους αυτούς είναι ελληνικοί πληθυσμοί της Πελοποννήσου



Πηγή: Ίδρυμα
Δασικών Ερευνών
Αθηνών

2007



2008



2013



2017

