ΕΛΙΔΕΚ
Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας & Καινοτομίας

Οι αγώνες δρόμου της «Κόκκινης Βασίλισσας»

Ένα πειραματικό παιχνίδι με κάρτες για τη διδασκαλία της συνεξέλιξης

ΕΡΓΟ 01956/Evo.Res.Con.Edu

Ανάδειξη της εκπαιδευτικής συμβολής της έρευνας και των εννοιών της εξέλιξης – Unraveling the educational potential of the research and concepts of evolution

ΕΛΙΔΕΚ Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας & Καινοτομίας
ΓΓΕΚ ΓΕΝΙΚΗ ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΕΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Υπουργείο Παιδείας, Θρησκευμάτων και Αθλητισμού

Οι αγώνες δρόμου της «Κόκκινης Βασίλισσας»

Ένα πειραματικό παιχνίδι με κάρτες για τη διδασκαλία της συνεξέλιξης

Ελεύθερο κείμενο, βασισμένο κυρίως στο άρθρο: Gibson, A.K., Drown, D.M., and Lively, C.M. (2015), The Red Queen's race: An experimental card game to teach coevolution, *Evo. Edu. Outreach* **8**:10. https://doi.org/10.1186/s12052-015-0039-2

Εισαγωγή: Παρανοήσεις της εξελικτικής θεωρίας που μπορούν να αναδειχθούν με τη διδασκαλία της συνεξέλιξης

Η κατανόηση των εννοιών της εξέλιξης έχει θεμελιώδη σημασία σε όλα τα πεδία της Βιολογίας αλλά και στη βασική επιστημονική προπαρασκευαστική εκπαίδευση γενικότερα. Μας μαθαίνει, κυρίως, να σκεφτόμαστε κάθε διεργασία στη φύση όχι μόνο στο πλαίσιο του μηχανισμού με τον οποίο γίνεται σήμερα αλλά και ως μέρος μιας ευρύτερης εξελικτικής ιστορίας. Ωστόσο, η μετάδοση των εννοιών της εξέλιξης με τη διδασκαλία δεν είναι εύκολη υπόθεση καθώς έρχεται αντιμέτωπη με εδραιωμένες λάθος αντιλήψεις ή παρανοήσεις σχετικά με την εξέλιξη. Κάποιες από τις παρανοήσεις αυτές θα μπορούσαν να αναδειχθούν και να αρθούν μέσα από τη διδασκαλία του θέματος της συνεξέλιξης (coevolution).

Ο όρος **συνεξέλιξη** χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά για να περιγράψει τις σχέσεις αλληλεξάρτησης στη φύση μεταξύ φυτών και εντόμων ή άλλων επικονιαστών τους (Ehrlich and Raven, 1964). Ιστορικά, η πρώτη πρόβλεψη μιας τέτοιας σχέσης συνεξέλιξης αποδίδεται στον ίδιο τον Δαρβίνο (Darwin, 1862; Rothschild and Jordan, 1903), ο οποίος, μελετώντας δείγματα ενός σπάνιου είδους ορχιδέας της Μαδαγασκάρης με ασυνήθιστα μακρύ ανθικό νεκτάριο (σωλήνα όπου φυλάσσεται το νέκταρ), προέβλεψε ότι το φυτό αυτό εξαρτάται από κάποιο, άγνωστο έως τότε, εξειδικευμένο έντομο επικονιαστή που θα πρέπει να διαθέτει προβοσκίδα με ανάλογα μεγάλο μήκος ώστε να μπορεί τόσο να μεταφέρει τη γύρη όσο και να τρέφεται από το νέκταρ της ορχιδέας. Αυτό ακριβώς το τόσο εξειδικευμένο έντομο (ένα είδος μεγάλης πεταλούδας, ή σφίγγας (hawk moth)) ανακαλύφθηκε 40 χρόνια αργότερα (1903), ακριβώς όπως το είχε προβλέψει ο C. Darwin. Ωστόσο, ο ακριβής ορισμός του όρου συνεξέλιξη και ο διαχωρισμός του από άλλες συναφείς έννοιες, όπως αλληλεπίδραση, αλληλεξάρτηση, συμβίωση ή αμοιβαία συνεισφορά, δόθηκε μόλις το 1980 από τον D. Janzen (Janzen, 1980). Συνεξέλιξη σημαίνει ότι δύο διαφορετικά είδη συνδέονται μεταξύ τους με κάποια **σταθερή σχέση αλληλεπίδρασης, η οποία είναι απαραίτητη για την εξέλιξη και των δύο ειδών**, ή, με άλλα λόγια, ότι **η εξέλιξη του ενός είδους λειτουργεί σαν συνθήκη φυσικής επιλογής για την εξέλιξη του άλλου είδους** και το αντίστροφο. Τέτοιες σχέσεις συνεξέλιξης δεν είναι μόνο οι σχέσεις αμοιβαίας συνεισφοράς όπως μεταξύ των φυτών και των εντόμων επικονιαστών τους, αλλά ακόμη και ανταγωνιστικές σχέσεις όπως μεταξύ θηραμάτων και θηρευτών ή παρασίτων και ξενιστών τους.

Η **συνεξέλιξη** (coevolution), δηλαδή η αμοιβαία εξέλιξη ειδών που συνδέονται μεταξύ τους με σχέσεις αλληλεξάρτησης, είναι **πολύ διαδεδομένη στη φύση**. Η συνεξέλιξη είναι εμφανής σε όλα τα οικοσυστήματα, έχει πολλές και διάφορες μορφές και τα αποτελέσματά της είναι δυνατόν να φανούν γρήγορα, σε λίγες μόνο γενιές. Το σημαντικότερο, όμως, είναι ότι μας εξοικειώνει με την ιδέα ότι κάθε οργανισμός περιορίζεται ως προς την προσαρμογή του από τις προσαρμογές και άλλων οργανισμών που ζουν στο περιβάλλον του και, επομένως, η εξέλιξη εξαρτάται από μια διαρκή ανάγκη για «συμβιβασμούς» και, κατά συνέπεια, **δεν υπάρχουν «τέλειες» προσαρμογές** σε οποιοδήποτε περιβάλλον.

σύνθεση κειμένου: Ε. Φριλίγγος-19.10.2022

Η εισαγωγή της έννοιας της συνεξέλιξης μπορεί να γίνει παρουσιάζοντας μερικά από τα παραδείγματα συνεξέλιξης που αφθονούν στη φύση. Μέσα από τα παραδείγματα αυτά, που μπορεί να αναφέρονται σε σχέσεις θηράματος-θηρευτή, ανταγωνισμού για τροφή στο ίδιο περιβάλλον, φυτών και ζώων σε ένα χερσαίο οικοσύστημα, ανθρώπου ή άλλων ζώων και των συμβιωτικών μικροοργανισμών του εντέρου τους, παρασίτων και ξενιστών τους, είναι δυνατόν να ξεκαθαριστούν κάποιες κοινές **παρανοήσεις** σχετικά με την εξέλιξη. Δύο κοινά χαρακτηριστικά των σχέσεων συνεξέλιξης είναι ότι:

(α) οδηγούν σε **γρήγορες αλλαγές** στους πληθυσμούς των οργανισμών ως απόκριση σε συνεχείς αλλαγές στο βιοτικό (έμβιο) περιβάλλον τους, και

(β) οδηγούν σε **αμοιβαίο περιορισμό** των ειδών που συνεξελίσσονται ώστε να επιβιώσουν και να αναπαραχθούν περισσότερα από ένα είδη στο ίδιο περιβάλλον (δηλαδή, τα είδη «συμβιβάζονται» με μέρος μόνο των εξελικτικών τους δυνατοτήτων λόγω της εξάρτησής τους από τα άλλα είδη).

Η εμπέδωση των παραπάνω δύο σημείων βοηθά να αντιμετωπιστούν και δύο κοινές παρανοήσεις σχετικά με την εξέλιξη: (α) ότι η εξέλιξη είναι μια αργή διεργασία που μπορεί να φανεί μόνο σε πολύ μεγάλες χρονικές περιόδους βαθμιαίων γεωλογικών αλλαγών, και (β) ότι η εξέλιξη προχωρεί διαρκώς προς μια κατεύθυνση προόδου ή κάποιο στόχο εξελικτικής «τελειότητας» (Thanukos, 2010).

Μια κλασική θεωρία συνεξέλιξης που συνδέει τη συνεξέλιξη με έναν διαρκή αγώνα ανταγωνισμού μεταξύ δύο ειδών στο πλαίσιο της οικολογικής τους προσαρμογής

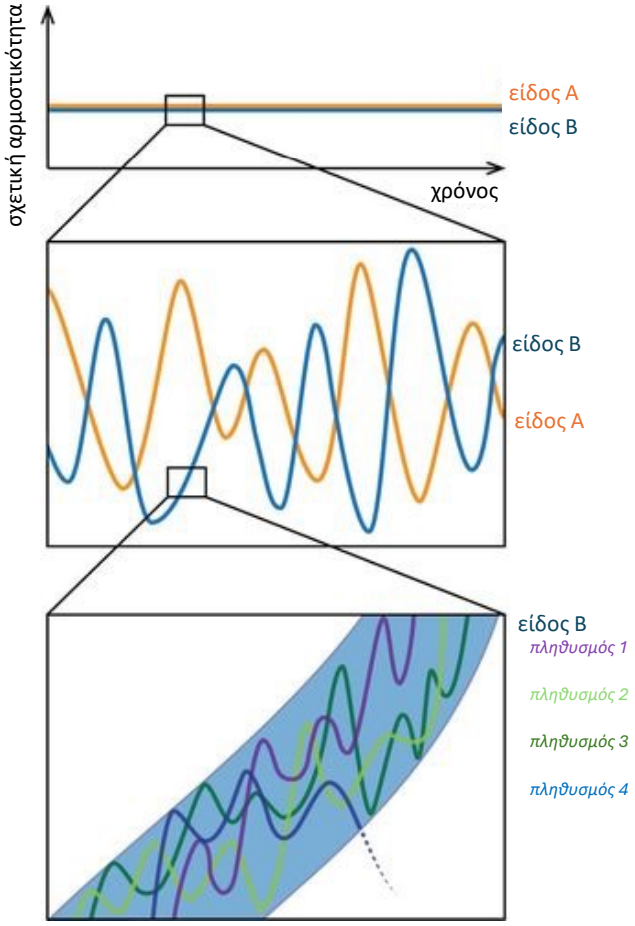
Ας δούμε τώρα μια βασική θεωρία για τη συνεξέλιξη και πώς θα μπορούσε να μεταφερθεί στη διδασκαλία της εξέλιξης στη μέση και ανώτερη εκπαίδευση με ένα απλό εκπαιδευτικό παιχνίδι (παιχνίδι με κάρτες).

Η εν λόγω κλασική θεωρία συνεξέλιξης, η ***Υπόθεση της Κόκκινης Βασίλισσας*** (Red Queen Hypothesis) όπως λέγεται (Van Valen, 1973), περιγράφει έναν διαρκή **ανταγωνιστικό αγώνα** μεταξύ δύο ειδών που συνδέονται μεταξύ τους με σχέσεις αλληλεξάρτησης, για τη διατήρηση της εξελικτικής τους θέσης σε ένα οικοσύστημα. Ένα κοινό παράδειγμα, που έχει και άμεσο ενδιαφέρον για την κατανόηση της εξέλιξης των μολυσματικών ασθενειών του ανθρώπου, είναι οι σχέσεις μεταξύ ξενιστών και παρασίτων. Άλλο κοινό παράδειγμα, το οποίο συνδέεται έντονα με τα θέματα της διατήρησης της βιοποικιλότητας και της οικολογικής ισορροπίας στη φύση, είναι οι σχέσεις μεταξύ των θηραμάτων και των θηρευτών τους.

Η *Υπόθεση της Κόκκινης Βασίλισσας* ξεκινά από την προσπάθεια να ερμηνεύσει γιατί είναι διαδεδομένες στη φύση οι εξαφανίσεις πληθυσμών και ειδών και καταλήγει στη γενίκευση ότι οι σχέσεις της συνεξέλιξης είναι βασικές για τη συγκράτηση της γενετικής ποικιλότητας σε ένα οικοσύστημα. Συγκεκριμένα, μια πολύ γνωστή γενική διαπίστωση που προέρχεται από τη μελέτη των παλαιοντολογικών ευρημάτων είναι ότι **υψηλοί ρυθμοί εμφάνισης νέων ειδών συσχετίζονται με υψηλούς ρυθμούς εξαφανίσεων ειδών** στις αντίστοιχες ταξινομικές ομάδες που εξετάζονται (όπως γένη, οικογένειες, ή ομοταξίες ειδών). Η διαπίστωση αυτή, μάλιστα, είναι γνωστή ως ένας νόμος της παλαιοβιολογίας (***νόμος της εξαφάνισης*** (extinction law) (Stanley, 1979; Marshall, 2017). Η *Υπόθεση της Κόκκινης Βασίλισσας* που διατυπώθηκε με αφορμή μια προσπάθεια ερμηνείας του νόμου της εξαφάνισης, συνδέει τις πιθανότητες εξαφάνισης με τον **ανταγωνισμό** μεταξύ των ειδών που είναι ένας βασικός τρόπος για να διατηρήσουν τα είδη τη θέση τους (την «προσαρμογή» ή, πιο σωστά με όρους εξέλιξης, την

αρμοστικότητά τους (fitness)) σε ένα οικοσύστημα (Van Valen, 1973). Η ονομασία «Κόκκινη Βασίλισσα» είναι μια άμεση αναφορά στον χαρακτήρα της Κόκκινης Βασίλισσας (**Red Queen**) από το γνωστό βιβλίο του Lewis Carroll ***Through the Looking-Glass*** (Carroll, 1871) και, συγκεκριμένα, στην συμβουλευτική ρήση της Κόκκινης Βασίλισσας προς την Αλίκη «It takes all the running you can do to keep in the same place». Όπως τα πιόνια σε μια παρτίδα σκακιού πρέπει να κινηθούν για να αποφύγουν τη σύλληψη από τα κομμάτια του αντιπάλου, έτσι και τα διαφορετικά είδη πρέπει να επιδοθούν σε έναν αγώνα ανταγωνισμού μεταξύ τους για να αποφύγουν την εξαφάνιση.

Κατά τον Leigh Van Valen (1973), η πιθανότητα εξαφάνισης εξαρτάται ιδιαίτερα από τις **ζώνες προσαρμογής** στις οποίες κύριο ρόλο παίζει ο ανταγωνισμός μεταξύ των ειδών για εδραίωση της οικολογικής προσαρμογής τους: μια αύξηση της αρμοστικότητας (fitness) του ενός είδους μειώνει την αρμοστικότητα των άλλων ειδών που ζουν στον ίδιο οικολογικό θώκο, επειδή όμως όλα τα είδη εξελίσσονται, κανένα δεν αποκτά μακροπρόθεσμα πλεονέκτημα προσαρμογής. Ως σύνολο, η αρμοστικότητα του συστήματος παραμένει σχεδόν σταθερή ενώ τα είδη είτε εξελίσσονται διαρκώς (ρυθμίζουν αντισταθμιστικά την αρμοστικότητά τους ως απόκριση στην εξέλιξη των άλλων ειδών) είτε αποτυγχάνουν στον «αγώνα» αυτόν και εξαφανίζονται. Το ίδιο εφαρμόζεται και σε επιμέρους πληθυσμούς των ειδών που συνεξελίσσονται (**Εικόνα 1**).



Εικόνα 1. Σχέσεις συνεξέλιξης μεταξύ δύο ανταγωνιστικών ειδών και επί μέρους πληθυσμών των ειδών αυτών, κατά το πρότυπο της *Υπόθεσης της Κόκκινης Βασίλισσας* (Αρχική πηγή εικόνας: από το άρθρο Strotz *et al.,* 2018).

Ένα πειραματικό παιχνίδι με κάρτες για τη συνεξέλιξη ξενιστή-παρασίτου

Μια βασική πρόβλεψη της *Υπόθεσης της Κόκκινης Βασίλισσας* είναι ότι η συνεξέλιξη μεταξύ δύο ανταγωνιστικών ειδών που αλληλεξαρτώνται, για παράδειγμα μεταξύ ξενιστών και παρασίτων, λειτουργεί προς την κατεύθυνση της **διατήρησης της γενετικής ποικιλότητας**. Το μοντέλο της συνεξέλιξης ξενιστών-παρασίτων υποθέτει ότι οι παρασιτικοί οργανισμοί που μπορούν να μολύνουν τους πιο κοινούς γενοτύπους ξενιστών (αυτούς που υπάρχουν σε μεγαλύτερη συχνότητα σε έναν πληθυσμό) έχουν πλεονέκτημα προσαρμογής. Ωστόσο, καθώς οι ξενιστές με τους πιο κοινούς γενοτύπους εκτίθενται περισσότερο στα παράσιτα, οι γενότυποι αυτοί μειώνονται βαθμιαία σε συχνότητα ενώ ξενιστές με σπανιότερους γενοτύπους που αποφεύγουν τη συχνή μόλυνση από παράσιτα αρχίζουν να αυξάνονται. Ασκείται, δηλαδή αρνητική επίδραση επιλογής στους συχνότερους γενοτύπους και θετική επίδραση επιλογής στους σπανιότερους. Το ίδιο, αντίστοιχα, ισχύει και για τους γενοτύπους των παρασίτων. Ως συνέπεια, το σύστημα ξενιστών-παρασίτων εμφανίζει συνεχείς ταλαντώσεις στις συχνότητες των διαφόρων γενοτύπων ευνοώντας τη διατήρηση αρκετών γενοτύπων και, επομένως, και τη διατήρηση της γενετικής ποικιλότητας τόσο στους ξενιστές όσο και στα παράσιτα (Hamilton *et al.,* 1990; Howard and Lively, 1994).

Στο πειραματικό παιχνίδι που έχει προταθεί από τους Gibson *et al.* (2015), οι εκπαιδευόμενοι αναλαμβάνουν εναλλάξ τους ρόλους των παρασίτων και των ξενιστών τους παίζοντας με αντίστοιχες τράπουλες και, στην εξέλιξη του παιχνιδιού, καταγράφουν τις αλλαγές στις συχνότητες των επιμέρους «γενοτύπων» (καρτών του ίδιου χρώματος) και τις αυξομειώσεις των αντίστοιχων πληθυσμών ξενιστών και παρασίτων. Τα αποτελέσματα του παιχνιδιού, όπως καταγράφονται από τις αλλαγές στις συχνότητες των καρτών κάθε χρώματος στη διάρκεια αρκετών γύρων παιξίματος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ελεγχθεί η πρόβλεψη της *Υπόθεσης της Κόκκινης Βασίλισσας* περί διατήρησης της γενετικής ποικιλότητας (**Εικόνα 2**).

Συνοπτικά, μέσω του παιχνιδιού αυτού γίνεται μια προσπάθεια προσομοίωσης των σχέσεων συνεξέλιξης ξενιστών-παρασίτων που θα μπορούσε να αναδείξει με εποπτικό τρόπο μερικές βασικές έννοιες για τη συνεξέλιξη:

(α) Ότι η συνεξέλιξη οδηγεί σε γρήγορες αλλαγές.

(β) Ότι η επιτυχία προσαρμογής ενός γενοτύπου μπορεί να αλλάζει δραματικά (από το μέγιστο στο ελάχιστο) σε λίγες μόνο γενιές.

(γ) Ότι οι γενότυποι που εμφανίζονται σε δεδομένη στιγμή με χαμηλή συχνότητα έχουν πλεονέκτημα έναντι των άλλων.

(δ) Ότι αυτό το πλεονέκτημα προσαρμογής των σπάνιων γενοτύπων οδηγεί σε βάθος χρόνου στη διατήρηση της γενετικής ποικιλότητας.

Πώς παίζεται το παιχνίδι

Το παιχνίδι παίζεται ανά δύο. Οι δύο παίκτες παίζουν με ξεχωριστή τράπουλα ο καθένας. Η μία τράπουλα αντιπροσωπεύει την ομάδα «γενοτύπων» του ξενιστή (τράπουλα με μπλε σύμβολα, **Εικόνα 3**) και η άλλη του παρασίτου (τράπουλα με κόκκινα σύμβολα, **Εικόνα 3**).

Για να υπάρχει επαρκές στατιστικό δείγμα, το παιχνίδι παίζεται σε 15-16 γύρους και από 7-8 ζεύγη παικτών (ζεύγη ξενιστή-παρασίτου) τουλάχιστον. Οι παίκτες κάθε ζεύγους αλλάζουν ρόλους στη μέση του παιχνιδιού (δηλαδή, κάθε παίκτης παίζει με την τράπουλα του ξενιστή τους μισούς γύρους και με την τράπουλα του παρασίτου τους άλλους μισούς).

Κάθε γύρος παιχνιδιού έχει 4 βήματα.

Βήμα 1. Επαφή ξενιστή-παρασίτου. Κάθε παίκτης «κατεβάζει» από την τράπουλά του 12 κάρτες, πρώτα ο παίκτης-ξενιστής και μετά ο παίκτης-παράσιτο. Οι κάρτες του παρασίτου «πέφτουν» με τη σειρά απέναντι σε καθεμία από τις κάρτες του ξενιστή και σχηματίζονται έτσι 12 ζεύγη.

Βήμα 2. Μόλυνση και επιλογή. Από τα 12 τυχαία ζεύγη καρτών ξενιστή-παρασίτου που έχουν σχηματιστεί, παραμένει στο παιχνίδι μόνο μία από τις δύο κάρτες. Αν η κάρτα του παρασίτου είναι ίδιου χρώματος με την αντίστοιχη κάρτα του ξενιστή, η κάρτα του ξενιστή «ακυρώνεται» (επιστρέφει δηλαδή στο απόθεμα με τις υπόλοιπες κάρτες της τράπουλας του ξενιστή). Αν η κάρτα του παρασίτου είναι διαφορετικού χρώματος από την κάρτα του ξενιστή, τότε «ακυρώνεται» η κάρτα του παρασίτου (επιστρέφει δηλαδή στο απόθεμα με τις υπόλοιπες κάρτες της τράπουλας του παρασίτου) (**Εικόνα 3**). Η πρώτη περίπτωση αναπαριστά μια επιτυχία μόλυνσης που οδηγεί σε αδυναμία αναπαραγωγής του ξενιστή, ενώ η δεύτερη μια αποτυχία μόλυνσης που οδηγεί σε αδυναμία επιβίωσης του παρασίτου.

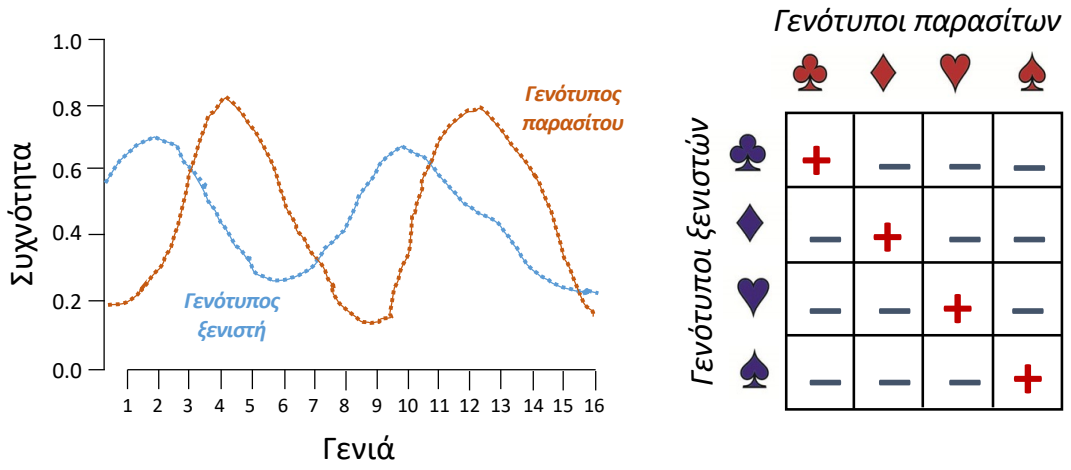
Βήμα 3. Αναπαραγωγή. Οι κάρτες που έχουν «επιβιώσει» από κάθε ζεύγος αυξάνονται σε αριθμό, με την προσθήκη καρτών του ίδιου χρώματος από την αντίστοιχη τράπουλα. Σε κάθε κάρτα του ξενιστή προστίθεται μία ακόμη ίδιου χρώματος από την τράπουλα του ξενιστή. Σε κάθε κάρτα του παρασίτου προστίθενται δύο ακόμη ίδιου χρώματος από την τράπουλα του παρασίτου. Οι προσθήκες αυτές αναπαριστούν το αποτέλεσμα της «αναπαραγωγής» του ξενιστή και του παρασίτου, αντίστοιχα, δεχόμενοι, όπως άλλωστε συμβαίνει και στη φύση, έναν ταχύτερο ρυθμό αναπαραγωγής του παρασίτου σε σχέση με αυτόν του ξενιστή (3:2). Σε περίπτωση που το απόθεμα καρτών μιας τράπουλας δεν έχει άλλες κάρτες ενός χρώματος («γενοτύπου») που χρειάζεται για τις προσθήκες στο βήμα αυτό, η συμπλήρωση των επιπλέον καρτών γίνεται με τυχαία επιλογή από το απόθεμα των υπολοίπων καρτών της τράπουλας. Σε μια τέτοια περίπτωση, θα προστεθούν κάρτες που δεν ταιριάζουν με το χρώμα κάποιας από τις κάρτες του βήματος 2, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στο αποτέλεσμα κάποιας μετάλλαξης.

Βήμα 4. Ρύθμιση του μεγέθους των πληθυσμών. Μετά το βήμα 3, ο παίκτης-ξενιστής και ο παίκτης-παράσιτο μπορεί έχουν περισσότερες ή λιγότερες από 12 κάρτες. Για να διατηρηθεί ο πληθυσμός στις 12 κάρτες (ένα μέγεθος πληθυσμού που δεχόμαστε κατά σύμβαση ότι αντιστοιχεί στο μέγιστο που μπορεί να στηρίξει το σύστημα), γίνεται απόρριψη καρτών ή συμπλήρωση με κάρτες, με τυχαίο τρόπο, από το απόθεμα της αντίστοιχης τράπουλας. Το βήμα αυτό μπορεί να αναπαριστά μεταναστεύσεις που ανανεώνουν το γονιδιακό απόθεμα ενός πληθυσμού (συμπλήρωση καρτών) ή περιορισμό των απογόνων λόγω υπέρβασης ενός μεγίστου ορίου ατόμων που μπορεί να επιβιώσει στο οικοσύστημα (απόρριψη καρτών). Ο παίκτης με λιγότερες από 12 κάρτες (συχνότερο για παίκτες στον ρόλο του παρασίτου) «τραβά» από το απόθεμα κλειστών καρτών τον αριθμό καρτών που του λείπουν αφού ανακατέψει την τράπουλα. Ο παίκτης με περισσότερες από 12 κάρτες (συχνότερο για παίκτες στον ρόλο του ξενιστή) απορρίπτει στο απόθεμα των κλειστών καρτών του τον πλεονάζοντα αριθμό καρτών που έχει στο χέρι του μετά το βήμα 3, αφού πρώτα τις ανακατέψει ώστε κάρτες που θα απορριφθούν να «επιλεγούν» με τυχαίο τρόπο.

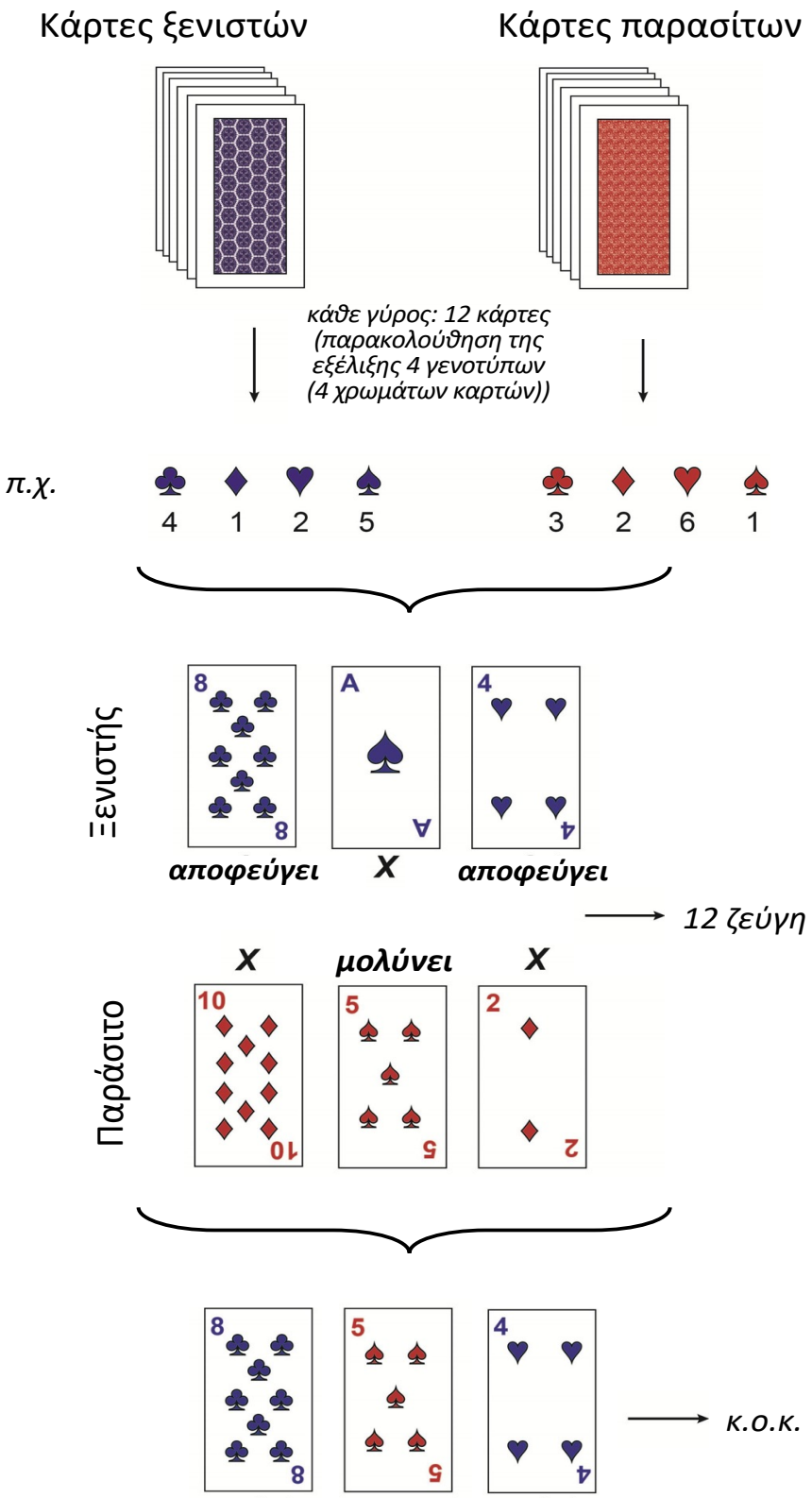
Βήμα 1 του επόμενου γύρου.
Κάθε παίκτης ξεκινάει με τις 12 κάρτες που έχει μετά το βήμα 4 του προηγούμενου γύρου. Αφού τις ανακατέψει, τις «κατεβάζει» με τυχαία σειρά, όπως στο προηγούμενο βήμα 1. **Το παιχνίδι συνεχίζεται με επανάληψη των βημάτων 1-4 μέχρι να ολοκληρωθεί ο κάθε γύρος**.

Καταγραφή των συχνοτήτων και αποτελέσματα
Σε κάθε γύρο παιχνιδιού (μία γενιά «συνεξέλιξης» παρασίτων-ξενιστών) καταγράφονται τα ποσοστά των καρτών κάθε χρώματος και από τις δύο τράπουλες. Στο τέλος του βήματος 4 κάθε γύρου, κάθε ζεύγος παικτών καταγράφει τους αριθμούς των καρτών κάθε χρώματος που απομένουν, τόσο για τον πληθυσμό του ξενιστή όσο και για τον πληθυσμό του παρασίτου. Οι αριθμοί αυτοί διαιρούμενοι διά του συνολικού μεγέθους πληθυσμού (12 άτομα) δίνουν τις σχετικές συχνότητες κάθε χρώματος/γενοτύπου για τους ξενιστές και για τα παράσιτα.

Κάθε ζεύγος παικτών (ζεύγος ξενιστή-παρασίτου) καταγράφει τους αριθμούς και τις σχετικές συχνότητες των καρτών κάθε χρώματος για 15-16 γύρους παιχνιδιού. Αν το παιχνίδι παιχθεί παράλληλα από 7-8 ζεύγη παικτών, οι καταγραφές συχνοτήτων από όλα τα ζεύγη παικτών χρησιμοποιούνται για μια στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων που μπορεί να αναδείξει καλύτερα τη δυναμική του συστήματος και τη διατήρηση της ποικιλότητας (**Εικόνα 4**).

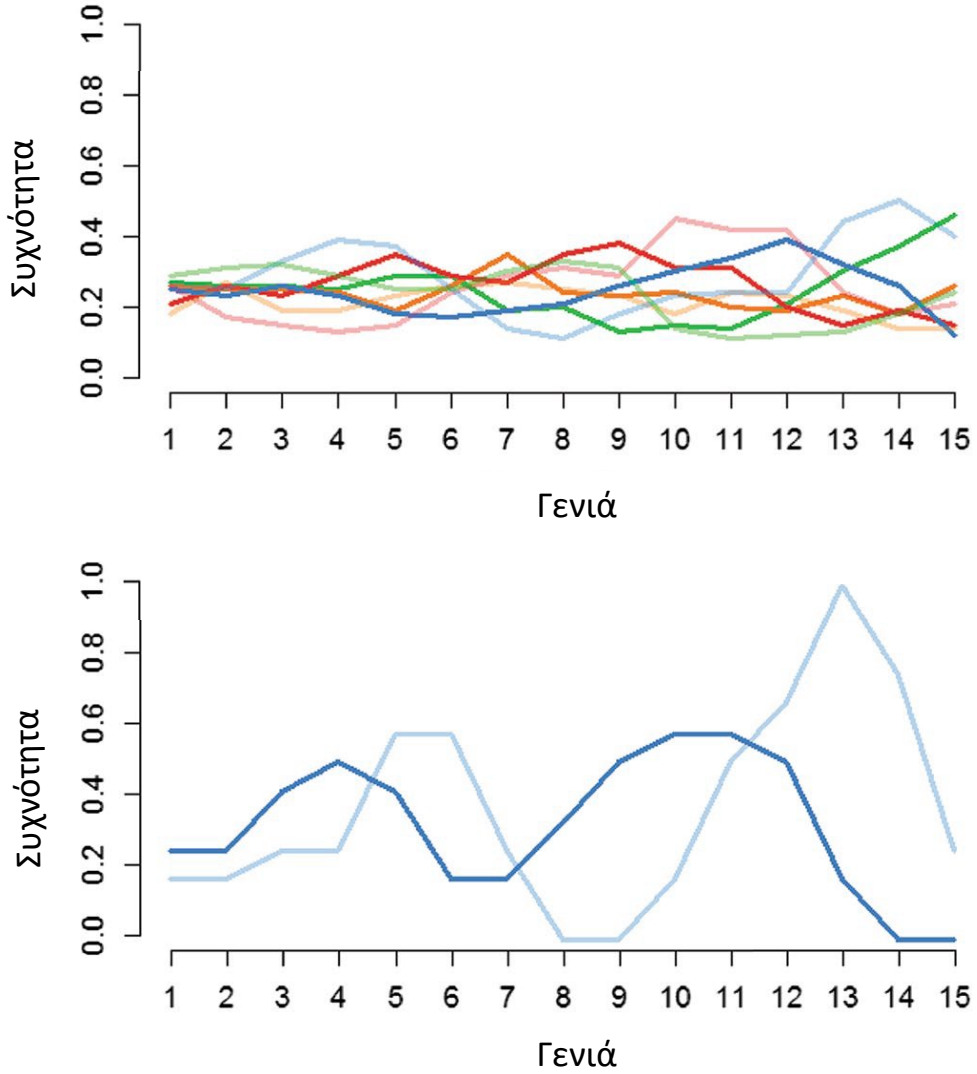


Εικόνα 2. Βασική ιδέα του παιχνιδιού. Για να προσομοιωθεί η περιοδική επάλληλη κύμανση των γενοτύπων των ξενιστών και των παρασίτων τους (*αριστερά*) το παιχνίδι έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε οι κάρτες των παρασίτων (από την τράπουλα με τα κόκκινα σύμβολα) να «ακυρώνουν» τις κάρτες ίδιου χρώματος των ξενιστών (από την τράπουλα με τα μπλε σύμβολα) με τις οποίες ζευγαρώνουν (+) αλλά να «ακυρώνονται» οι ίδιες όταν ζευγαρώνουν με κάρτες ξενιστών διαφορετικού χρώματος, τις οποίες δεν μπορούν να επηρεάσουν (–) (*δεξιά*). Οι κάρτες που «επιβιώνουν» από τα ζευγαρώματα αυτά «αναπαράγονται» (με προσθήκη καρτών ίδιου χρώματος από την αντίστοιχη τράπουλα) ενώ οι άλλες «απορρίπτονται». Σε κάθε γύρο παιχνιδιού (μία γενιά συνεξέλιξης παρασίτων-ξενιστών) καταγράφονται οι σχετικές συχνότητες των 4 τύπων καρτών (των 4 γενοτύπων παρασίτων και ξενιστών τους). Οι διακυμάνσεις των συχνοτήτων που μπορούν να παρατηρηθούν σε 15-16 γύρους του παιχνιδιού αναδεικνύουν την πρόβλεψη του μοντέλου *της Υπόθεσης της Κόκκινης Βασίλισσας* ότι οι διαφορετικοί γενότυποι στους πληθυσμούς των δύο ειδών που συνεξελίσσονται διατηρούν μια δυναμική ισορροπία μεταξύ τους, διατηρώντας έτσι και τη γενετική ποικιλότητα. Η ερμηνεία είναι ότι οι ξενιστές που αφθονούν στον πληθυσμό επειδή έχουν προσωρινό πλεονέκτημα προσαρμογής είναι ευάλωτοι στα παράσιτα που μπορούν να τους μολύνουν (έχοντας «συμβατούς» γενοτύπους, δηλαδή κάρτες ίδιου χρώματος με αυτές των ξενιστών τους) και σταδιακά μειώνονται λόγω της μεγαλύτερης έκθεσης στα παράσιτα αυτά. Έτσι, οι γενότυποι των ξενιστών που αφθονούσαν σε προηγούμενους γύρους τείνουν να μειωθούν σε αριθμό, ενώ, παράλληλα, οι γενότυποι των «συμβατών» παρασίτων τείνουν να αυξηθούν σε αριθμό, καθώς τα παράσιτα αυτά έχουν επιτυχία αναπαραγωγής διότι μπορούν να μολύνουν μια μεγαλύτερη δεξαμενή ξενιστών. Με τον τρόπο αυτόν, ένας τύπος (συγκεκριμένο χρώμα καρτών) του ξενιστή που παροδικά υπερέχει σε πληθυσμό υπόκειται σε **αρνητική δράση επιλογής** και αρχίζει να μειώνεται, ενώ ο πληθυσμός των παρασίτων του ίδιου τύπου (ίδιου χρώματος καρτών) αυξάνεται. Σε επόμενους γύρους, η συνθήκη αυτή οδηγεί αντισταθμιστικά σε μείωση των παρασίτων του συγκεκριμένου τύπου (χρώματος καρτών) όταν μειωθεί κατά πολύ ο αντίστοιχος πληθυσμός (ίδιου χρώματος καρτών) του ξενιστή και, τελικά, σε έναν κύκλο αυξομειώσεων των πληθυσμών ο οποίος ευνοεί κάθε φορά τους γενοτύπους που υπάρχουν σε σχετικά χαμηλή συχνότητα. Με τη διατήρηση όλων των επιμέρους γενοτύπων των παρασίτων και των ξενιστών σε χαμηλά ποσοστά, διατηρείται συνολικά η γενετική ποικιλότητα.



Εικόνα 3. Τα δύο πρώτα βήματα κάθε γύρου του παιχνιδιού (επαφή ξενιστή-παρασίτου, μόλυνση και επιλογή). Οι κάρτες του παίκτη-ξενιστή συμβολίζονται με μπλε και οι κάρτες του παίκτη-παρασίτου με κόκκινο. Από τα τρία ζεύγη καρτών που φαίνονται στο παραπάνω παράδειγμα, στο μεσαίο παραμένει στο παιχνίδι η κάρτα του παρασίτου, επειδή είναι ίδιου «χρώματος» με την κάρτα του ξενιστή (μπαστούνια), ενώ στα άλλα δύο ζεύγη παραμένει η κάρτα του ξενιστή επειδή είναι διαφορετικού «χρώματος» από την κάρτα του παρασίτου (σπαθιά-καρό και κούπες-καρό).

σύνθεση κειμένου: Ε. Φριλίγγος-19.10.2022



Εικόνα 4. Ενδεικτικά αποτελέσματα του παιχνιδιού μετά από 15 γύρους που παίχθηκαν από 7 ζεύγη φοιτητών σε ρόλους ξενιστή-παρασίτου (Gibson et *al.,* 2015). Στο *πάνω διάγραμμα* φαίνεται η **διακύμανση της μέσης συχνότητας** των πληθυσμών καθενός από τους 4 γενοτύπους του ξενιστή (έντονες γραμμές) ή του παρασίτου (λεπτές γραμμές). Στο *κάτω διάγραμμα* φαίνεται το αποτέλεσμα ενός από τα παιχνίδια ξενιστή-παρασίτου (ενός από τα 7 ζεύγη παικτών) για έναν μόνο γενότυπο (ένα από τα 4 χρώματα του πάνω διαγράμματος).

Επικουρικό υλικό – πιθανές ερωτήσεις εμπέδωσης

Δίνεται ένα πρότυπο αρχείου excel για τη συμπλήρωση των πινάκων με τους αριθμούς και τις σχετικές συχνότητες των τεσσάρων χρωμάτων των καρτών ξενιστή και παρασίτου. Το πρότυπο αυτό βασίζεται στο συμπληρωματικό υλικό του άρθρου Gibson *et al.* (2015).

Μετά το παιχνίδι, μπορούν να δοθούν μερικές απλές ερωτήσεις προς σκέψη και εμπέδωση βασικών εννοιών της συνεξέλιξης, όπως:

- Ποιος κέρδισε το παιχνίδι, ο ξενιστής ή το παράσιτο;
- Διατηρήθηκε η γενετική ποικιλότητα στον πληθυσμό του ξενιστή;
- Διατηρήθηκε η γενετική ποικιλότητα στον πληθυσμό του παρασίτου;
- Τί πιστεύετε ότι θα συνέβαινε με τις συχνότητες των τεσσάρων γενοτύπων στον πληθυσμό του ξενιστή αν δεν υπήρχαν παράσιτα;
- Γιατί οι κυμάνσεις των γενοτύπων του ξενιστή δεν είναι συγχρονισμένες με τις κυμάνσεις των γενοτύπων του παρασίτου αλλά υπάρχει χρονική υστέρηση μεταξύ τους;
- Πόσες περίπου γενιές διαρκεί αυτή η χρονική υστέρηση;
- Γιατί οι κυμάνσεις των πληθυσμών από κάθε παρτίδα παιχνιδιού που παίχτηκε παράλληλα διαφέρουν τόσο πολύ μεταξύ τους;
- Γιατί οι κυμάνσεις από τους μέσους όρους όλων των παρτίδων παιχνιδιού που παίχτηκαν είναι πολύ μικρότερες από τις κυμάνσεις σε κάθε ξεχωριστή παρτίδα;
- Σχετίζεται η ικανότητα προσαρμογής με την συχνότητα εμφάνισης ενός γενοτύπου στο σύστημα παρασίτου-ξενιστή και με ποιο τρόπο;
- Πιστεύετε ότι το ανταγωνιστικό μοντέλο που είδαμε στο παιχνίδι αυτό μπορεί να περιγράψει όλες τις σχέσεις συνεξέλιξης στη φύση ή υπάρχουν και άλλες, διαφορετικές σχέσεις συνεξέλιξης που περιγράφονται με άλλα μοντέλα;

Αναφορές

Carroll, L. (1871). *Through the Looking-Glass, and what Alice found there*. Macmillan & Co., London, UK.

Darwin, C. (1862). *Fertilization of Orchids*: *On the various contrivances by which British and foreign orchids are fertilised by insects and on the good effects of intercrossing*. John Murray, ed., London, UK.

Ehrlich, P. R., and Raven, P. H. (1964). Butterflies and plants: A study in coevolution. *Evolution* 18, 586-608. https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.1964.tb01674.x

Gibson, A.K., Drown, D.M., and Lively, C.M. (2015). The Red Queen's race: An experimental card game to teach coevolution. *Evo. Edu. Outreach* **8**:10. https://doi.org/10.1186/s12052-015-0039-2

Hamilton, W. D., Axelrod, R., and Tanese, R. (1990). Sexual reproduction as an adaptation to resist parasites. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **87**, 3566-3573. https://doi.org/10.1073/pnas.87.9.3566

Howard, R. S., and Lively, C. M. (1994). Parasitism, mutation accumulation and the maintenance of sex. *Nature* **367**, 554-557. https://doi.org/10.1038/367554a0

Janzen, D. H. (1980). What is coevolution? *Evolution* **34**, 611-612. https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.1980.tb04849.x

Rothschild, L. W., and Jordan, K. (1903). A revision of the Lepidopterous family Sphingidae. *Novit. Zool.* 9 (Suppl.), 1-813 (page 32). https://biostor.org/reference/143466

Marshall, C. R. (2017). Five paleobiological laws needed to understand the evolution of the living biota. *Nat. Ecol. Evol.* **1**, 0165. https://doi.org/10.1038/s41559-017-0165

Stanley, S. M. (1979). *Macroevolution: Pattern and process*. W. H. Freeman & Co., NY.

Strotz, L. C., Simoes, M., Girard, M. G., Breitkreuz, L., Kimmig, J., and Lieberman, B. S. (2018). Getting somewhere with the Red Queen: chasing a biologically modern definition of the hypothesis. *Biol. Lett.* **14**, 20170734. http://dx.doi.org/10.1098/rsbl.2017.0734

Thanukos, A. (2010). Coevolution in the classroom. *Evo. Edu. Outreach* **3**, 71-77. https://doi.org/10.1007/s12052-009-0203-7

Van Valen, L. (1973). A new evolutionary law. *Evol. Theory* **10**, 71-74. https://www.mn.uio.no/cees/english/services/van-valen/