



18

Εισαγωγή στη Δαρβινική Εξέλιξη

Πολλά στοιχεία καταδεικνύουν ότι η βιοποικιλότητα που αντιπρωσωπεύεται από τα εκατομμύρια των ειδών που ζουν σήμερα στον πλανήτη μας εξελίχθηκε από έναν και μόνο πρόγονο κατά τη μακρά ιστορία της Γης. Έτσι, οι οργανισμοί που είναι ριζικά διαφορετικοί ο ένας από τον άλλο είναι στην πραγματικότητα μακρινά σχετιζόμενοι, συνδέονται μέσω πολυάριθμων ενδιάμεσων προγόνων με έναν και μόνο κοινό πρόγονο. Ο Βρετανός φυσιοδίφης Charles Darwin (1809-1882) ανέπτυξε έναν απλό, επιστημονικά ελέγξιμο μηχανισμό για να εξηγήσει τη σχέση μεταξύ της ποικιλομορφίας των οργανισμών της Γης. Ισχυρίστηκε πειστικά ότι όλα τα είδη που υπάρχουν σήμερα, καθώς και τα αμέτρητα εξαφανισμένα είδη που υπήρχαν στο παρελθόν, προέκυψαν από προηγούμενα, με μια διαδικασία σταδιακής απόκλισης (χωρισμός σε ξεχωριστές γενεές) ή εξέλιξης.

Η έννοια της εξέλιξης είναι ο ακρογωνιαίος λίθος της βιολογίας επειδή συνδέει όλα τα πεδία των βιοεπιστημών σε ένα ενιαίο σώμα γνώσης. Όπως δήλωσε ο Αμερικανός γενετιστής Theodosius Dobzhansky, «Τίποτα στη βιολογία δεν έχει νόημα παρά μόνο υπό το φως της εξέλιξης.»¹ Οι βιολόγοι επιδιώκουν να κατανοήσουν τόσο την αξιοσημείωτη ποικιλία όσο και τις θεμελιώδεις ομοιότητες των οργανισμών στο πλαίσιο της εξέλιξης. Η επιστήμη της εξέλιξης επιτρέπει στους βιολόγους να συγκρίνουν τα κοινά νήματα μεταξύ των οργανισμών ως φαινομενικά διαφορετικά όπως τα βακτήρια, οι φάλαινες, οι κρίνοι, οι μυξομύκητες και οι ταινίες. Η συμπεριφορά των ζώων, η αναπτυξιακή βιολογία, η γενετική, η εξελικτική οικολογία,

η συστηματική και η μοριακή εξέλιξη είναι παραδείγματα μερικών από τους βιολογικούς κλάδους που στηρίζονται στην εξέλιξη.



ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

- 18.1** Η εξέλιξη είναι η συσσώρευση κληρονομούμενων αλλαγών στους πληθυσμούς με την πάροδο του χρόνου.
- 18.2** Οι ιδέες για την εξέλιξη προήλθαν πολύ πριν από την εποχή του Δαρβίνου.
- 18.3** Η επιστημονική θεωρία της εξέλιξης του Δαρβίνου, η φυσική επιλογή, εξήγησε πώς οι φυσικές δυνάμεις στο περιβάλλον θα μπορούσαν να προκαλέσουν εξέλιξη. Η φυσική επιλογή συμβαίνει επειδή άτομα με χαρακτηριστικά που τα καθιστούν καλύτερα προσαρμοσμένα στις τοπικές συνθήκες είναι πιο πιθανό να επιβιώσουν και να παράγουν απογόνους από ό,τι τα άτομα που δεν είναι τόσο καλά προσαρμοσμένα. Η σύγχρονη σύνθεση συνδυάζει την επιστημονική θεωρία του Δαρβίνου με τις επιστημονικές βάσεις της σύγχρονης γενετικής.
- 18.4** Τα δεδομένα που δείχνουν ότι η εξέλιξη έχει λάβει χώρα και εξακολουθεί να συμβαίνει είναι συντριπτικά. Αυτά τα δεδομένα περιλαμβάνουν απολιθώματα, βιογεωγραφία, συγκριτική ανατομία, μοριακή βιολογία, αναπτυξιακή βιολογία και εξελικτικά πειράματα με ζωντανούς οργανισμούς.

ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ: (HMS Beagle). Από το 1831 έως το 1836, ο Κάρολος Δαρβίνος ταξίδεψε σε όλο τον κόσμο σε ένα ταξίδι εξερεύνησης σε αυτό το πλοίο Βασιλικού Ναυτικού. Αυτό το σκίτσο από τον καλλιτέχνη του πλοίου, Conrad Martens, απεικονίζει το Beagle σε ένα κανάλι από το Tierra del Fuego το 1833. Νέα Υόρκη Δημόσια Βιβλιοθήκη/Πηγή Επιστημών

¹Dobzhansky, T., "Nothing in Biology Makes Sense Except in the Light of Evolution," *American Biology Teacher*, Vol. 35, No. 125 (1973): 125–129.

Αυτό το κεφάλαιο συζητά τον Κάρολο Δαρβίνο και την εξέλιξη της επιστημονικής του θεωρίας της εξέλιξης μέσω του μηχανισμού φυσικής επιλογής. Παρουσιάζει επίσης στοιχεία που υποστηρίζουν την εξέλιξη, συμπεριλαμβανομένων των απολιθωμάτων, της βιογεωγραφίας, της συγκριτικής ανατομίας, της μοριακής βιολογίας, της αναπτυξιακής βιολογίας και των πειραματικών μελετών της συνεχιζόμενης εξελικτικής αλλαγής τόσο στο εργαστήριο όσο και στη φύση.

18.1. Τι Είναι η Εξέλιξη;

ΜΑΘΗΣΙΑΚΟΣ ΣΤΟΧΟΣ

1. Καθορίστε την επιστημονική θεωρία της εξέλιξης.

Στην αρχή της μελέτης μας για την εξέλιξη, ορίζουμε την **εξέλιξη** ως τη συσσώρευση γενετικών αλλαγών στους πληθυσμούς με την πάροδο του χρόνου. Ένας **πληθυσμός** είναι μια ομάδα ατόμων ενός είδους που ζουν ταυτόχρονα στην ίδια γεωγραφική περιοχή. Όπως ακριβώς άλλαξε ο ορισμός ενός γονιδίου καθώς μελετήσατε τη γενετική, θα διαπιστώσετε ότι ο ορισμός της εξέλιξης θα γίνει πιο ακριβής στα επόμενα κεφάλαια.

Ο όρος **εξέλιξη** δεν αναφέρεται σε αλλαγές που συμβαίνουν σε ένα άτομο κατά τη διάρκεια της ζωής του. Αντίθετα, αναφέρεται σε αλλαγές στα χαρακτηριστικά των πληθυσμών κατά τη διάρκεια των γενεών. Αυτές οι αλλαγές μπορεί να είναι τόσο μικρές ώστε να είναι δύσκολο να εντοπιστούν ή τόσο μεγάλες ώστε ο πληθυσμός να διαφέρει σημαντικά από τον προγονικό πληθυσμό του.

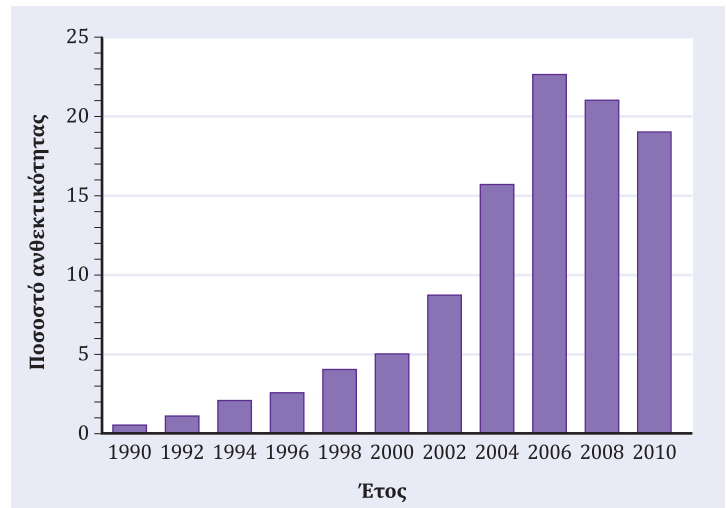
Τελικά, δύο πληθυσμοί μπορεί να αποκλίνουν σε τέτοιο βαθμό ώστε να τους αναφέρουμε ως διαφορετικά είδη. Η έννοια των ειδών αναπτύσσεται εκτενώς στο Κεφάλαιο 20. Προς το παρόν, ένας απλός ορισμός της εργασίας είναι ότι ένα **είδος** είναι μια ομάδα οργανισμών, με παρόμοιες γενετικές πληροφορίες, δομή, λειτουργία και συμπεριφορά, ικανών να αναπαραχθούν μεταξύ τους.

Η εξέλιξη έχει δύο κύριες προοπτικές. Οι μικρές εξελικτικές μεταβολές των πληθυσμών (**μικροεξέλιξη**, που συζητείται στο Κεφάλαιο 19) εξετάζονται συνήθως σε λίγες γενεές και μεγάλα εξελικτικά γεγονότα (**μακροεξέλιξη**, που συζητείται στο Κεφάλαιο 20), όπως ο σχηματισμός διαφορετικών ειδών από κοινούς προγόνους, εξετάζονται συνήθως κατά μια μακρά περίοδο.

Η εξέλιξη έχει σημαντικές πρακτικές εφαρμογές. Η γεωργία πρέπει να ασχοληθεί με την εξέλιξη της αντοχής των φυτοφαρμάκων σε έντομα και άλλα παράσιτα. Παρομοίως, το φάρμακο πρέπει να ανταποκρίνεται στο ταχέως εξελικτικό δυναμικό των οργανισμών που προκαλούν ασθένειες όπως τα βακτήρια και οι ιοί (**Εικόνα 18-1**). (Σημαντική εξελικτική αλλαγή συμβαίνει σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα σε έντομα, βακτήρια και άλλους οργανισμούς με σύντομη διάρκεια ζωής.) Οι ιατροί-ερευνητές χρησιμοποιούν εξελικτικές αρχές για να προβλέψουν ποια στελέχη γρίπης εξελίσσονται ταχύτερα από άλλα, πληροφορίες που οι επιστήμονες εξελίσσονται ταχύτερα από άλλα, πληροφορίες που οι επιστήμονες χρειάζονται για να φτιάξουν το εμβόλιο της γρίπης της επόμενης χρονιάς. Επίσης, οι ερευνητές που αναπτύσσουν αποτελεσματικές στρατηγικές θεραπείας για τον ιό της ανθρώπινης ανοσοανεπάρκειας (HIV) πρέπει να κατανοούν την εξέλιξη του, τόσο εντός όσο και μεταξύ των ξενιστών (βλ. Εικόνα 23-12).

Η διαχείριση της διατήρησης σπάνιων και απειλούμενων ειδών χρησιμοποιεί τις εξελικτικές αρχές της γενετικής πληθυσμών. Η ταχεία εξέλιξη βακτηρίων και μυκήτων σε μολυσμένα εδάφη χρησιμοποιείται στον τομέα της **βιοαποκατάστασης**, στην οποία χρησιμοποιούνται μικροοργανισμοί για τον καθαρισμό των χώρων με επικίνδυνα απόβλητα.

Η εξέλιξη έχει ακόμη εφαρμογές πέρα από τη βιολογία. Για παράδειγμα, ορισμένες εφαρμογές ηλεκτρονικών υπολογιστών κά-



ΕΙΚΟΝΑ 18-1 Εξέλιξη της ανθεκτικότητας της *Escherichia coli* στο αντιβιοτικό σιπροφλοξασίνη (ciprofloxacin). Τα στοιχεία αυτά δείχνουν αυξημένη αντίσταση στην σιπροφλοξασίνη της *E. coli* που απομονώθηκε από τις λοιμώξεις του αίματος και του εγκεφαλονωτιαίου υγρού στην Αγγλία, την Ουαλία και τη Βόρειο Ιρλανδία από το 1990 έως το 2010. Οι επιστήμονες πιστεύουν ότι η μείωση στην αντίσταση που παρατηρήθηκε μετά το 2006 μπορεί να οφείλεται σε χαλαρή πίεση επιλογής ως αποτέλεσμα της μείωσης της χρήσης της σιπροφλοξασίνης στο Ηνωμένο Βασίλειο. Δεδομένα από Livermore, D., "Fourteen Years in Resistance," *International Journal of Antimicrobial Agents*, Vol. 39 (2012): 283–294.

νουν χρήση αλγορίθμων που μιμούνται τη φυσική επιλογή στα βιολογικά συστήματα.



ΣΗΜΕΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ 18.1

- **ΣΥΝΔΕΣΤΕ** Πώς σχετίζεται η μικροεξέλιξη με την μακροεξέλιξη;
- Τα άτομα εξελίσσονται; Εξηγήστε την απάντησή σας.

18.2 Προ-Δαρβινικές Ιδέες για την Εξέλιξη

ΜΑΘΗΣΙΑΚΟΣ ΣΤΟΧΟΣ

2. Συζητήστε την ιστορική ανάπτυξη της εξελικτικής σκέψης.

Παρόλο που ο Δαρβίνος συνδέεται παγκοσμίως με την εξέλιξη, οι ιδέες της εξέλιξης προηγούνται του Δαρβίνου από αιώνες. Ο Αριστοτέλης (384–322 π.Χ.) είδε πολλές αποδείξεις για φυσικές συγγένειες μεταξύ των οργανισμών, που τον οδήγησαν να οργανώσει όλους τους οργανισμούς που γνώριζε σε μια «κλίμακα της φύσης» που επεκτάθηκε από το υπερβολικά απλό στο πιο περίπλοκο. Ο Αριστοτέλης απεικόνισε τους οργανισμούς ως ατελείς αλλά «κινείται προς μια πιο τέλεια κατάσταση». Ορισμένοι ιστορικοί της επιστήμης ερμήνευσαν αυτήν την ιδέα ως πρόδρομο της εξελικτικής σκέψης, αλλά ο Αριστοτέλης ήταν ασαφής για τη φύση αυτής της «κίνησης προς την τελειότητα» και σίγουρα δεν πρότεινε ότι οι φυσικές διεργασίες οδήγησαν την διαδικασία της εξέλιξης. Επιπλέον, η σύγχρονη επιστημονική εξελικτική θεωρία αναγνωρίζει τώρα ότι η εξέλιξη δεν κινείται προς τις πιο «τέλειες» καταστάσεις ή ακόμα και απαραίτητα προς μεγαλύτερη πολυπλοκότητα.

Πολύ πριν από την εποχή του Δαρβίνου, είχαν ανακαλυφθεί απολιθώματα ενσωματωμένα σε βράχους. Μερικά από αυτά τα απολιθώματα αντιστοιχούσαν σε μέρη γνωστών ειδών, ενώ άλλα ήταν παραδόξως διαφορετικά από οποιοδήποτε γνωστό είδος. Τα απολιθώματα συχνά βρισκόντουσαν σε μη αναμενόμενα περιβάλλοντα.

λοντα.. Για παράδειγμα, θαλάσσια ασπόνδυλα (θαλάσσια ζώα χωρίς σπονδυλική στήλη) ανακαλύφθηκαν μερικές φορές σε βράχους ψηλά στα βουνά. Ο Λεονάρντο ντα Βίντσι (1452-1519) ήταν από τους πρώτους που ερμήνευσαν σωστά αυτά τα ασυνήθιστα ευρήματα ως υπολείμματα ζώων που είχαν υπάρξει σε προηγούμενες εποχές αλλά είχαν εξαφανιστεί.

Ο Γάλλος φυσιοδίφης Jean Baptiste de Lamarck (1744-1829) ήταν ο πρώτος επιστήμονας που πρότεινε ότι οι οργανισμοί υφίστανται αλλαγή με την πάροδο του χρόνου, ως αποτέλεσμα κάποιου φυσικού φαινομένου παρά θείας παρέμβασης. Σύμφωνα με τον Lamarck, ένα μεταβαλλόμενο περιβάλλον προκάλεσε έναν οργανισμό να αλλάξει τη συμπεριφορά του, χρησιμοποιώντας μερικά όργανα ή μέρη του σώματος περισσότερο και άλλα λιγότερο. Σε αρκετές γενιές, ένα δεδομένο όργανο ή τμήμα σώματος θα αυξανόταν σε μέγεθος αν χρησιμοποιήθηκε πολύ ή θα συρρικνωνόταν και ενδεχομένως θα εξαφανιζόταν εάν χρησιμοποιούταν λιγότερο. Η υπόθεση του Lamarck απαιτούσε οι οργανισμοί να περάσουν χαρακτηριστικά που απέκτησαν κατά τη διάρκεια της ζωής τους στους απογόνους τους. Για παράδειγμα, ο Lamarck πρότεινε ότι ο μακρύς λαιμός της καμηλοπάρδαλης αναπτύχθηκε όταν ένας πρόγονος με κοντό λαιμό τέντωνε το λαιμό του για να προσεγγίσει τα φύλλα των δέντρων. Ο απόγονός του κληρονόμησε τον μακρύτερο λαιμό, ο οποίος τεντωνόταν ακόμη περισσότερο καθώς έτρωγε. Αυτή η διαδικασία, που επαναλήφθηκε σε πολλές γενιές, είχε ως αποτέλεσμα τους μακριούς λαιμούς των σύγχρονων καμηλοπάρδαλεων. Ο Lamarck πίστευε επίσης ότι όλοι οι οργανισμοί ήταν προικισμένοι με μια ζωτική δύναμη που τους οδηγούσε να αλλάζουν προς μεγαλύτερη πολυπλοκότητα και «τελειότητα» με την πάροδο του χρόνου.

Ο προτεινόμενος μηχανισμός εξέλιξης του Lamarck είναι αρκετά διαφορετικός από τον μηχανισμό που προτάθηκε αργότερα από τον Δαρβίνο. Ωστόσο, η υπόθεση του Lamarck παρέμεινε μια λογική εξήγηση για την εξέλιξη έως ότου η βάση της κληρονομικότητας του Mendel ξανα-ανακαλυφθεί στις αρχές του 20ού αιώνα. Εκείνη την εποχή, οι ιδέες του Lamarck ήταν σε μεγάλο βαθμό δυσφημισμένες.



ΣΗΜΕΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ 18.2

- **ΣΥΝΔΕΣΤΕ** Πώς συνδέεται η ιδέα της «κλίμακας της φύσης» του Αριστοτέλη με την πρώιμη εξελικτική σκέψη; Με ποιους τρόπους διαφέρει από τη σύγχρονη επιστημονική εξελικτική θεωρία;
- **ΣΥΝΔΕΣΤΕ** Πώς ο προτεινόμενος μηχανισμός για την εξέλιξη του Jean Baptiste de Lamarck διαφέρει από αυτόν του Charles Darwin;

18.3 Ο Δαρβίνος και η Εξέλιξη



ΜΑΘΗΣΙΑΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ

3. Εξηγήστε τις τέσσερις δηλώσεις της εξέλιξης με φυσική επιλογή όπως πρότεινε ο Κάρολος Δαρβίνος.
4. Συγκρίνετε τη σύγχρονη σύνθεση με την αρχική άποψη της εξέλιξης του Δαρβίνου.

Ο Δαρβίνος, ο γιος ενός διακεκριμένου ιατρού, στάλθηκε στην ηλικία των 15 ετών για να σπουδάσει ιατρική στο Πανεπιστήμιο του Εδιμβούργου. Βρίσκοντας τον εαυτό του ακατάλληλο για ιατρική, μεταφέρθηκε στο Πανεπιστήμιο του Κέμπριτζ για να μελετήσει τη θεολογία. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, έγινε ο προστατευόμενος του Αιδεσιμότατου John Henslow, ο οποίος ήταν καθη-

γητής βοτανικής. Ο Henslow ενθάρρυνε το ενδιαφέρον του Δαρβίνου για τον φυσικό κόσμο. Λίγο μετά τη λήψη του πτυχίου του, ο Δαρβίνος επιβιβάστηκε στο HMS Beagle, το οποίο έκανε μια πενταετή διερευνητική κρουαζιέρα σε όλο τον κόσμο για να προετοιμάσει τα διαγράμματα πλοήγησης για το βρετανικό ναυτικό.

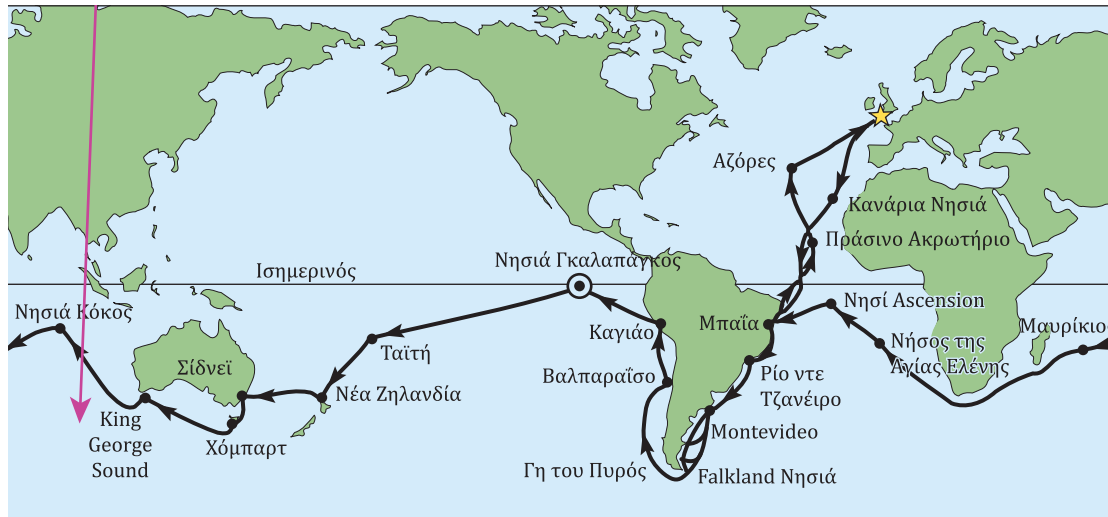
Το Beagle έφυγε από το Plymouth της Αγγλίας το 1831 και ταξίδεψε κατά μήκος των ανατολικών και δυτικών ακτών της Νότιας Αμερικής (Εικόνα 18-2). Ενώ άλλα μέλη του πληρώματος χαρτογράφησαν τις ακτές και τα λιμάνια, ο Δαρβίνος πέρασε πολλές εβδομάδες στην ξηρά, μελετώντας τα ζώα, τα φυτά, τα απολιθώματα και τους γεωλογικούς σχηματισμούς τόσο των παράκτιων όσο και των εσωτερικών περιοχών, περιοχές που δεν είχαν εξερευνηθεί εκτενώς. Σύλλεξε και καταλογογράφησε χιλιάδες φυτικά και ζωικά δείγματα και κράτησε σημειώσεις των παρατηρήσεών του, πληροφορίες που έγιναν ουσιαστικές για την ανάπτυξη των ιδεών του.

Το Beagle πέρασε σχεδόν δύο μήνες στα *Νησιά Γκαλαπάγκος*, 965 χλμ. δυτικά του Ισημερινού, όπου ο Δαρβίνος συνέχισε τις παρατηρήσεις και τις συλλογές του. Σύγκρινε τα ζώα και τα φυτά των Γκαλαπάγκος με αυτά της ηπειρωτικής Νότιας Αμερικής. Εντυπωσιάστηκε ιδιαίτερα από τις ομοιότητές τους και αναρωτήθηκε γιατί οι οργανισμοί των Γκαλαπάγκος πρέπει να μοιάζουν περισσότερο με εκείνους της Νότιας Αμερικής από αυτούς άλλων νησιών σε διάφορα μέρη του κόσμου. Επιπλέον, παρόλο που υπήρχαν ομοιότητες μεταξύ των ειδών των Γκαλαπάγκος και της Νότιας Αμερικής, υπήρχαν επίσης διακριτές διαφορές. Υπήρχαν ακόμη και αναγνωρίσιμες διαφορές στα ερπετά και τα πτηνά από το ένα νησί στο άλλο. Ο Δαρβίνος αναρωτιόταν γιατί αυτά τα απομακρυσμένα νησιά θα πρέπει να έχουν τέτοια βιολογική ποικιλότητα. Αφού επέστρεψε στην πατρίδα του, ο Δαρβίνος διερεύνησε αυτές τις παρατηρήσεις και προσπάθησε να αναπτύξει μια ικανοποιητική εξήγηση για την κατανομή των ειδών στα νησιά.

Ο Δαρβίνος συνέλεξε διάφορες ενδείξεις κατά την εξέταση του τρόπου με τον οποίο προέκυψαν τα είδη. Παρά τη δουλειά του Lamarck, η γενική ιδέα στα μέσα του 1800 ήταν ότι η Γη ήταν πολύ μικρή για να έχουν αλλάξει σημαντικά οι οργανισμοί από τότε που εμφανίστηκαν για πρώτη φορά. Ωστόσο, στις αρχές του 19ου αιώνα, οι γεωλόγοι προώθησαν την ιδέα ότι τα βουνά, οι κοιλάδες και άλλα φυσικά χαρακτηριστικά της γήινης επιφάνειας δεν προέρχονταν από τις παρούσες μορφές τους. Αντ' αυτού, τα χαρακτηριστικά αυτά αναπτύχθηκαν αργά σε μεγάλες χρονικές περιόδους από τις γεωλογικές διαδικασίες ηφαιστειακής δραστηριότητας, ανύψωσης, διάβρωσης και παγετώνων. Στο ταξίδι του ο Δαρβίνος πήρε μαζί του τις *Αρχές της Γεωλογίας (Principles of Geology)*, που δημοσίευσε ο αγγλικός γεωλόγος Charles Lyell το 1830, και το μελέτησε προσεκτικά. Ο Lyell παρείχε μια σημαντική ιδέα για τον Δαρβίνο: ότι ο αργός ρυθμός των γεωλογικών διαδικασιών, που συμβαίνουν ακόμα σήμερα, έδειξε ότι η Γη ήταν εξαιρετικά παλιά.

Άλλες σημαντικές ενδείξεις που επηρέασαν τον Δαρβίνο ήταν ότι οι εκτροφείς και οι αγρότες θα μπορούσαν να αναπτύξουν πολλές ποικιλίες κατοικίδιων ζώων σε λίγες μόνο γενιές. Το έπραξαν επιλέγοντας ορισμένα χαρακτηριστικά και εκτρέφοντας μόνο τα άτομα που παρουσίαζαν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά, μια διαδικασία γνωστή ως **τεχνητή επιλογή**. Οι εκτροφείς, για παράδειγμα, έχουν παράξει πολυάριθμες ποικιλίες σκυλιών - όπως τα bloodhound, golden retriever, Chihuahua, Great Danes, and Pekinese - με τεχνητή επιλογή.

Πολλές ποικιλίες φυτών παράχθηκαν επίσης με τεχνητή επιλογή. Για παράδειγμα, το λάχανο, το μπρόκολο, τα λαχανάκια Βρυξελλών, το κουνουπίδι, οι λαχανίδες, το kale και η γογγυλοκράμβη είναι διακριτές καλλιέργειες λαχανικών που είναι όλα μέλη του ίδιου είδους, του *Brassica oleracea* (Εικόνα 18-3). Η εκλεκτική αναπαραγωγή της λαχανίδας ή του άγριου λάχανου, ενός φυλλώδους



ΕΙΚΟΝΑ 18-2 Το ταξίδι του HMS Beagle. Το πέντε χρόνων ταξίδι ξεκίνησε το 1831 από το Plymouth της Αγγλίας. Οι παρατηρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στα νησιά Γκαλαπάγκος από τη δυτική ακτή της Νότιας Αμερικής, βοήθησαν τον Δαρβίνο να αναπτύξει έναν ικανοποιητικό μηχανισμό για να εξηγήσει το πώς ένας πληθυσμός οργανισμών θα μπορούσε να αλλάξει με την πάροδο του χρόνου.

φυτού που ευδοκιμεί στην Ευρώπη και την Ασία, παρήγαγε και τα επτά λαχανικά. Αρχίζοντας από περισσότερα από 4.000 χρόνια, ορισμένοι γεωργοί επέλεξαν τεχνητά, φυτά άγριων λάχανων που σχημάτιζαν επικαλυπτόμενα φύλλα. Με την πάροδο του χρόνου, αυτά τα φύλλα έγιναν τόσο εμφανή ώστε τα φυτά, που μοιάζουν με μοντέρνα λάχανα, αναγνωρίστηκαν ως ξεχωριστά και διακριτά από τον πρόγονο τους, το άγριο λάχανο. Άλλοι αγρότες επέλεξαν διαφορετικά χαρακτηριστικά του άγριου λάχανου, δημιουργώντας τις άλλες τροποποιήσεις. Για παράδειγμα, η γογγυλοκράμβη παρήχθη με επιλογή για ένα μακρύ στέλεχος και βλαστούς Βρυξελλών με επιλογή μεγεθυμένων μασχαλιαίων μπουμπουκιών. Έτσι, οι άνθρωποι ευθύνονται για την εξέλιξη του *B. oleracea* σε επτά διαφορετικές καλλιέργειες λαχανικών. Ο Δαρβίνος εντυπωσιάστηκε από τις αλλαγές που προκάλεσε η τεχνητή επιλογή και υποθέτει ότι μια παρόμοια εκλεκτική διαδικασία συνέβη στη φύση. Ως εκ τούτου χρησιμοποίησε την τεχνητή επιλογή ως μοντέλο όταν ανέπτυξε την έννοια της φυσικής επιλογής.



ΕΙΚΟΝΑ 18-3 Τεχνητή επιλογή στο *Brassica oleracea*. Ένας διευρυμένος ακραίος οφθαλμός (το «κεφάλι») επιλέχθηκε στο λάχανο (κάτω αριστερά), συστοιχίες λουλουδιών στο μπρόκολο (πάνω αριστερά) και στο κουνουπίδι (μέσο προς δεξιά), μασχαλιαία μπουμπουκία στα λαχανάκια Βρυξελλών (κάτω μέσο), φύλλα στις λαχανίδες (πάνω δεξιά) και kale (κάτω δεξιά), και βλαστοί στη γογγυλοκράμβη (μέσο).

Οι ιδέες του Thomas Malthus (1766-1834), ενός Βρετανού κληρικού και οικονομολόγου, ήταν μια άλλη σημαντική επιρροή στον Δαρβίνο. Στο *Δοκίμιο για την Αρχή του Πληθυσμού που Επηρεάζει τη Μελλοντική Βελτίωση της Κοινωνίας* (*An Essay on the Principle of Population as It Affects the Future Improvement of Society*), που δημοσιεύθηκε το 1798, ο Malthus σημείωσε ότι η αύξηση του πληθυσμού δεν είναι πάντοτε επιθυμητή, άποψη αντίθετη με τις πεποιθήσεις της εποχής του. Παρατήρησε ότι οι πληθυσμοί έχουν την ικανότητα να αυξάνουν γεωμετρικά (1 2 4 8 16) και έτσι να υπερβαίνουν την προσφορά τροφίμων, η οποία έχει μόνο την ικανότητα να αυξάνει αριθμητικά (1, 2, 3, 4, 5). Στην περίπτωση των ανθρώπων, ο Malthus πρότεινε ότι η σύγκρουση μεταξύ της αύξησης του πληθυσμού και της προσφοράς τροφίμων προκαλεί πείνα, ασθένειες και πόλεμο, τα οποία χρησιμεύουν ως αναπόφευκτα φρένα για την αύξηση του πληθυσμού.

Η ιδέα του Malthus ότι υπάρχει έντονος και συνεχής έλεγχος της ανάπτυξης του ανθρώπινου πληθυσμού επηρέασε έντονα την εξήγηση της εξέλιξης του Δαρβίνου. Η επί χρόνια παρατήρησης του Δαρβίνου των συνθηκών των ζώων και των φυτών τον είχε εισαγάγει στον αγώνα για ύπαρξη που περιγράφει ο Malthus. Ο Δαρβίνος αντιλήφθηκε ότι σε αυτόν τον αγώνα κληρονομήσιμες παραλλαγές ευνοϊκές για την επιβίωση θα τείνουν να διατηρούνται, ενώ οι δυσμενείς θα εξαλειφθούν.

Το αποτέλεσμα θα ήταν η **προσαρμογή**, μια εξελικτική τροποποίηση που βελτιώνει τις πιθανότητες επιβίωσης και αναπαραγωγικής επιτυχίας σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον. Τελικά, η συσσώρευση τροποποιήσεων μπορεί να οδηγήσει σε ένα νέο είδος. Ο χρόνος ήταν το μόνο που απαιτείται για την προέλευση των νέων ειδών και οι γεωλόγοι της εποχής, συμπεριλαμβανομένου του Lyell, προσκόμισαν στοιχεία ότι η Γη ήταν πράγματι αρκετά γηραδιά ώστε να παρέχει επαρκή χρόνο.

Ο Δαρβίνος ανέπτυξε επιτέλους μια εφικτή επιστημονική εξήγηση της εξέλιξης, αυτή της **φυσικής επιλογής**, στην οποία οι πιο προσαρμοσμένοι οργανισμοί είναι πιθανότερο να επιβιώσουν και να γίνουν οι γονείς της επόμενης γενιάς. Ως αποτέλεσμα της φυσικής επιλογής, ο πληθυσμός αλλάζει με την πάροδο του χρόνου. Η συχνότητα των ευνοϊκών χαρακτηριστικών αυξάνεται σε διαδοχικές γενιές, ενώ τα λιγότερο ευνοϊκά γνωρίσματα καθίστανται σπάνια ή εξαφανίζονται. Ο Δαρβίνος πέρασε τα επόμενα 20 χρόνια διατυπώνοντας τα επιχειρήματά του για την φυσική επιλογή, συσσωρεύοντας ένα τεράστιο σύνολο αποδεικτικών στοιχείων για να υποστηρίξει αυτόν τον επεξηγηματικό μηχανισμό και αλληλογραφώντας με άλλους επιστήμονες.

Καθώς ο Δαρβίνος μελετούσε τις ιδέες του, ο Alfred Russel Wal-

lace (1823-1913), ένας βρετανός φυσιολόγος που είχε μελετήσει τα φυτά και τα ζώα του Μαλαισιακού αρχιπελάγους για οκτώ χρόνια, ξεπλάγη εξίσου από την ποικιλία των ειδών και τις ιδιαιτερότητες της διανομής τους. Έγραψε ένα σύντομο δοκίμιο σχετικά με αυτό το θέμα και το έστειλε στον Δαρβίνο, τότε παγκοσμίου φήμης βιολόγο, ζητώντας τη γνώμη του. Ο Δαρβίνος αναγνώρισε τις δικές του ιδέες και συνειδητοποίησε ότι ο Wallace είχε καταλήξει ανεξάρτητα στο ίδιο συμπέρασμα. Αυτή η εξέλιξη παρουσιάζεται με τη φυσική επιλογή. Οι συνάδελφοι του Δαρβίνου τον έπεισαν να παρουσιάσει το χειρόγραφο του Wallace μαζί με μια περίληψη του έργου του, την οποία είχε ετοιμάσει και κυκλοφορήσει σε μερικούς φίλους αρκετά χρόνια νωρίτερα. Και οι δύο εργασίες παρουσιάστηκαν τον Ιούλιο του 1858 σε συνάντηση του Linnaean Society στο Λονδίνο. Το μνημειακό βιβλίο του Δαρβίνου, *Για την Προέλευση των Ειδών με Φυσική επιλογή ή, Η Διατήρηση των Ευνοημένων Ειδών στον Αγώνα για τη Ζωή (On the Origin of Species by Natural Selection; or, The Preservation of Favored Races in the Struggle for Life)*, δημοσιεύθηκε το 1859. Το 1870, δημοσιεύθηκε το βιβλίο του Wallace, *Συμβολές στη Θεωρία της Φυσικής Επιλογής (Contributions to the Theory of Natural Selection)*, οκτώ χρόνια μετά την επιστροφή του από το Αρχιπέλαγος της Μαλαισίας.

Ο Δαρβίνος πρότεινε ότι η εξέλιξη γίνεται με τη φυσική επιλογή

Ο μηχανισμός εξέλιξης του Δαρβίνου με φυσική επιλογή αποτελείται από παρατηρήσεις σε τέσσερις πλευρές του φυσικού κόσμου: ποικιλομορφία, υπερπαραγωγή, όρια για την αύξηση του πληθυσμού ή αγώνα για ύπαρξη και διαφορική αναπαραγωγική επιτυχία.

1. **Ποικιλομορφία.** Τα άτομα σε έναν πληθυσμό εμφανίζουν παραλλαγές (Εικόνα 18-4). Κάθε άτομο έχει έναν μοναδικό συνδυασμό χαρακτηριστικών, όπως το μέγεθος, το χρώμα, την ικανότητα να ανέχεται σκληρές περιβαλλοντικές συνθήκες και την αντίσταση σε ορισμένα παράσιτα ή μολύνσεις. Μερικά χαρακτηριστικά βελτιώνουν τις πιθανότητες επιβίωσης και αναπαραγωγικής επιτυχίας ενός ατόμου, ενώ άλλα όχι. Θυμηθείτε ότι η μεταβολή που είναι αναγκαία για την εξέλιξη με φυσική επιλογή πρέπει να κληρονομηθεί. Αν και ο Δαρβίνος αναγνώρισε τη σημασία της εξέλιξης της κληρονομικής διακύμανσης, δεν γνώριζε τον μηχανισμό κληρονομικότητας.
2. **Υπερπαραγωγή.** Η αναπαραγωγική ικανότητα κάθε είδους έχει τη δυνατότητα να προκαλέσει γεωμετρική αύξηση του



ΕΙΚΟΝΑ 18-4 Γενετική διαφοροποίηση των δεινόδρων. Αυτά τα νεαρά φίδια, όλα του ίδιου είδους (*Corallus enydri*), εντοπίστηκαν σε ένα μικρό τμήμα δάσους στη Γαλλική Γουιάνα. Πολλά είδη φιδιών παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις στον χρωματισμό και τα σχέδια τους.

πληθυσμού του με την πάροδο του χρόνου. Ένας θηλυκός βάτραχος αφίνει περίπου 10.000 αυγά, και ένας θηλυκός γάδος παράγει πιθανόν 40 εκατομμύρια αυγά! Σε κάθε περίπτωση, όμως, μόνο δύο απόγονοι επιβιώνουν για να αναπαραχθούν. Έτσι, σε κάθε γενιά κάθε είδος έχει την ικανότητα να παράγει περισσότερους απογόνους από όσους μπορούν να επιβιώσουν.

3. **Όρια στην πληθυσμιακή ανάπτυξη ή αγώνας για ύπαρξη.** Υπάρχουν μόνο τόσα τρόφιμα, νερό, φως, αυξανόμενος χώρος και άλλοι πόροι που διατίθενται σε έναν πληθυσμό, έτσι ώστε οι οργανισμοί να ανταγωνίζονται μεταξύ τους για αυτούς τους περιορισμένους πόρους. Επειδή υπάρχουν περισσότερα άτομα από όσα μπορεί να υποστηρίξει το περιβάλλον, δεν επιβιώνουν όλα για να αναπαραχθούν. Άλλα όρια στην πληθυσμιακή ανάπτυξη περιλαμβάνουν αρπακτικά ζώα, οργανισμοί ασθενειών και δυσμενείς καιρικές συνθήκες.
4. **Διαφορική αναπαραγωγική επιτυχία.** Τα άτομα εκείνα που έχουν τον πιο ευνοϊκό συνδυασμό χαρακτηριστικών (εκείνων που καθιστούν τα άτομα καλύτερα προσαρμοσμένα στο περιβάλλον τους) είναι πιο πιθανό να επιβιώσουν και να αναπαραχθούν. Οι απόγονοι τείνουν να μοιάζουν με τους γονείς τους επειδή η επόμενη γενιά κληρονομεί τα γενετικά χαρακτηριστικά των γονέων. Η επιτυχής αναπαραγωγή είναι το κλειδί της φυσικής επιλογής. Τα καλύτερα προσαρμοσμένα άτομα παράγουν τους περισσότερους απογόνους, ενώ τα άτομα που είναι λιγότερο καλά προσαρμοσμένα πεθαίνουν πρόωρα ή παράγουν λιγότερους ή κατώτερους απογόνους.

Με την πάροδο του χρόνου, αρκετές αλλαγές μπορούν να συσσωρευτούν σε γεωγραφικά διαχωρισμένους πληθυσμούς (συχνά με ελαφρώς διαφορετικά περιβάλλοντα) για την παραγωγή νέων ειδών. Ο Δαρβίνος επισήμανε ότι οι σπιζίδες των Γκαλαπάγκος φαίνεται να έχουν εξελιχθεί με αυτόν τον τρόπο. Τα 14 είδη είναι στενά συγγενικά. Όλα προέρχονταν από έναν κοινό πρόγονο, ένα μόνο είδος που βρήκε τον δρόμο του από τη ενδοχώρα της Νότιας Αμερικής δύο εκατομμύρια έως τρία εκατομμύρια χρόνια πριν. (Οι γενετικά πλησιέστεροι συγγενείς των σπιζίδων των Γκαλαπάγκος είναι μικρά πτηνά που τρέφονται με σπόρους, γνωστά ως grassquits που ζουν στη δυτική Νότια Αμερική.)

Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου δύο έως τριών εκατομμυρίων ετών, ο αριθμός των νησιών αυξήθηκε, το κλίμα άλλαξε και άλλαξαν τα φυτά και η παροχή τροφίμων. Τα διάφορα νησιά των Γκαλαπάγκος κράτησαν τις σπιζίδες απομονωμένες την μία από την άλλη, επιτρέποντάς τους έτσι να αποκλίνουν σε ξεχωριστά είδη σε απόκριση ποικίλων συνθηκών (Εικόνα 18-5).

Ο Peter Grant, η Rosemary Grant και οι συνάδελφοί τους έχουν τεκμηριώσει την φυσική επιλογή στις σπιζίδες των Γκαλαπάγκος στο φυσικό περιβάλλον τους από τις αρχές της δεκαετίας του 1970. Ως παράδειγμα της δράσης της εξελικτικής διαδικασίας, εξετάστε τον σπινό με το αιχμηρό ρύγχος (*Geospiza difficilis*). Το είδος αυτό ζει σε πολλά διαφορετικά νησιά και διαφορετικά σχήματα και μεγέθη ράμφους έχουν εξελιχθεί σε κάθε πληθυσμό ανάλογα με τη διατροφή που διατίθεται στο νησί όπου διαβιούν. Επανεξετάζουμε τις σπιζίδες του Γκαλαπάγκος σε επόμενα κεφάλαια. Ορισμένες μακροπρόθεσμες έρευνες από τους Peter Grant, Rosemary Grant και τους συναδέλφους τους σχετικά με τη μικροεξέλιξη των σπιζίδων των Γκαλαπάγκος όταν οι ξηρασίες επηρέασαν την διαθεσιμότητα τροφίμων περιγράφεται στο Κεφάλαιο 19. Οι μελέτες αυτές κατέδειξαν ότι η περιβαλλοντική αλλαγή μπορεί να οδηγήσει την φυσική επιλογή. Η μετατόπιση χαρακτηριστικών, μια πτυχή της εξελικτικής οικολογίας, περιγράφεται στις σπιζίδες των Γκαλαπάγκος στο Κεφάλαιο 54.



Charles Martin

(Α) Ο σπίνος του κάκτου (*Geospiza scandens*), ο οποίος τρέφεται με τμήματα του φλοιού των κάκτων, έχει μακρύ, αιχμηρό ράμφος



Charles Martin

(Β) Ο μεγάλος χερσαίος σπίνος (*Geospiza magnirostris*) έχει ένα εξαιρετικά βαρύ ράμφος τύπου καρυοθραύστη, προσαρμοσμένο για κατανάλωση παχιών σπόρων με σκληρά τοιχώματα



Charles Martin

(Γ) Το χερσαίο σπίνος με το αιχμηρό ράμφος (*Geospiza difficilis*) έχει ένα οξύ ράμφος προσαρμοσμένο στην απομάκρυνση κροτώνων και άλλων παρασίτων από χελώνες και ιγκουάνα



Miguel Castro/Science Source

(Δ) Ο σπίνος δρυοκολάπτης (*Camarhynchus pallidus*) ξετρυνώνει τα έντομα από το φλοιό και τις σχισμές χρησιμοποιώντας αγκάθια, κλαδιά ή ακόμα νεκρά φύλλα

ΕΙΚΟΝΑ 18-5 Οι σπιζίδες των Γκαλαπάγκος. Ο Δαρβίνος συνήγαγε ότι αυτά τα πτηνά προέρχονται από έναν κοινό προγονικό πληθυσμό πτηνών που τρώει σπόρους από τη Νότια Αμερική. Η μεταβολή στα ράμφη τους είναι αποτέλεσμα προσαρμογής στη διαθεσιμότητα διαφόρων ειδών τροφίμων.

Η σύγχρονη σύνθεση συνδυάζει την επιστημονική θεωρία της εξέλιξης του Δαρβίνου με τη γενετική

Μια προϋπόθεση στην οποία βασίστηκε η επιστημονική θεωρία της εξέλιξης του Δαρβίνου με τη φυσική επιλογή είναι ότι τα άτομα μεταφέρουν χαρακτηριστικά στην επόμενη γενιά. Ωστόσο, ο Δαρβίνος δεν ήταν σε θέση να εξηγήσει πώς συμβαίνει αυτό ή γιατί τα άτομα διαφέρουν μέσα σε έναν πληθυσμό. Όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 11, ο Gregor Mendel εξέθεσε τα βασικά πρότυπα κληρονομικότητας. Ο Δαρβίνος, ο οποίος ήταν σύγχρονος του Mendel, προφανώς δεν ήταν εξοικειωμένος με το έργο του Mendel. Πράγματι, η επιστημονική κοινότητα δεν αναγνώρισε το έργο του Mendel έως τις αρχές του 20ου αιώνα.

Αρχίζοντας από τη δεκαετία του 1930 και 1940, οι βιολόγοι βίωσαν μια εννοιολογική ανακάλυψη όταν συνδυάζονταν οι αρχές της Μενδελικής κληρονομικότητας με την αρχή της φυσικής επιλογής του Δαρβίνου. Το αποτέλεσμα ήταν μια ενοποιημένη εξήγηση της εξέλιξης γνωστή ως η σύγχρονη σύνθεση. Σε αυτό το πλαίσιο, η σύνθεση αναφέρεται σε συνδυασμό μερών διαφόρων επιστημονικών θεωριών για να σχηματίσουν ένα ενιαίο σύνολο. Μερικοί από τους ιδρυτές της σύγχρονης σύνθεσης ήταν ο Αμερικανός γενετιστής Theodosius Dobzhansky, Βρετανός γενετιστής και στατιστικός Ronald Fisher, ο Βρετανός γενετιστής J.B.S. Haldane, ο Βρετανός βιολόγος Julian Huxley, ο Αμερικανός βιολόγος Ernst Mayr, ο Αμερικανός παλαιοντολόγος George Gaylord Simpson, ο Αμερικανός βοτανολόγος G. Ledyard Stebbins και ο Αμερικανός γενετιστής Sewell Wright.

Σήμερα, η σύγχρονη σύνθεση ενσωματώνει την εκτεταμένη μας γνώση στη γενετική (η οποία από μόνη της διαμορφώνει μια αδιαμφισβήτητη περίπτωση εξέλιξης), τη συστηματική, την παλαιοντολογία, την αναπτυξιακή βιολογία, τη συμπεριφορά και την οικολογία. Η σύγχρονη σύνθεση εξηγεί την παρατήρηση του Δαρβίνου για την ποικιλομορφία μεταξύ των απογόνων όσον αφορά τη **μεταλλαγή** ή τις αλλαγές στο DNA, όπως οι υποκαταστάσεις νουκλεοτιδίων. Οι μεταλλαγές παρέχουν τη γενετική ποικιλομορφία στην οποία δρα η φυσική επιλογή κατά τη διάρκεια της εξέλιξης. Η σύγχρονη σύνθεση, η οποία δίνει έμφαση στη γενετική των πληθυσμών ως το επίκεντρο της εξέλιξης, διατηρήθηκε καλά από τότε που αναπτύχθηκε. Έχει κυριαρχήσει στη σκέψη και την έρευνα βιολόγων που εργάζονται σε πολλούς τομείς και έχει οδηγήσει σε μια τεράστια συσσώρευση νέων ανακαλύψεων που επικυρώνουν την εξέλιξη με φυσική επιλογή.

Οι περισσότεροι βιολόγοι όχι μόνο δέχονται τις βασικές αρχές

της σύγχρονης σύνθεσης αλλά και προσπαθούν να κατανοήσουν καλύτερα τις αιτιώδεις διαδικασίες της εξέλιξης. Για παράδειγμα, ποιος είναι ο ρόλος της τυχαιότητας στην εξέλιξη; Πόσο γρήγορα εξελίσσονται τα νέα είδη; Αυτά και άλλα ερωτήματα έχουν προκύψει εν μέρει από μια επαναξιολόγηση του αρχείου απολιθωμάτων και εν μέρει από νέες ανακαλύψεις σε μοριακές πτυχές της κληρονομιάς. Τέτοιες κρίσιμες αναλύσεις αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της επιστημονικής διαδικασίας, διότι διεγείρουν επιπλέον παρατήρηση και πειραματισμό μαζί με την επανεξέταση των προηγούμενων στοιχείων. Η επιστήμη είναι μια συνεχής διαδικασία και οι πληροφορίες που λαμβάνονται στο μέλλον μπορεί να απαιτούν τροποποιήσεις σε ορισμένα μέρη της σύγχρονης σύνθεσης.

Εξετάζουμε τώρα ένα από τα πολλά εξελικτικά ερωτήματα που αντιμετωπίζουν σήμερα οι βιολόγοι: Ποιες είναι οι σχετικές επιπτώσεις της τυχαιότητας και της φυσικής επιλογής στην εξέλιξη;

Οι βιολόγοι μελετούν την επίδραση της τυχαιότητας στην εξέλιξη

Οι βιολόγοι έχουν αναρωτηθεί εάν θα έχουμε τα ίδια αποτελέσματα αν μπορούσαμε να επαναλάβουμε την εξέλιξη ξεκινώντας από παρόμοιους οργανισμούς που εκτίθενται σε παρόμοιες περιβαλλοντικές συνθήκες. Δηλαδή, οι ίδιες αλλαγές θα εξελιχθούν ως αποτέλεσμα της φυσικής επιλογής, ή θα ήταν διαφορετικοί οι οργανισμοί ως αποτέλεσμα τυχαιών γεγονότων; Μελέτες της εξέλιξης σε δράση υποδηλώνουν ότι η τυχαιότητα δεν μπορεί να είναι τόσο σημαντική όσο η φυσική επιλογή, τουλάχιστον σε επίπεδο πληθυσμού.

Ένα είδος φρουτόμυγας (*Drosophila subobscura*) που προέρχεται από την Ευρώπη κατοικεί περιοχές από τη Δανία στην Ισπανία. Οι βιολόγοι σημείωσαν ότι οι βόρειες μύγες έχουν μεγαλύτερες πτέρυγες από τις νότιες μύγες (Εικόνα 18-6). Το ίδιο είδος μύγας εισήχθη τυχαία στη Βόρεια Αμερική στα τέλη της δεκαετίας του 1970. Δέκα χρόνια μετά την εισαγωγή του, οι βιολόγοι διαπίστωσαν ότι δεν σημειώθηκαν στατιστικά σημαντικές μεταβολές στο μέγεθος των πτερύγων στις διάφορες περιοχές της Βόρειας Αμερικής. Ωστόσο, 20 χρόνια μετά την εισαγωγή τους, οι φρουτόμυγες που πετάνε στη Βόρεια Αμερική παρουσίασαν τον ίδιο τύπο αλλαγών πτέρυγας βορρά-νότου όπως στην Ευρώπη. (Δεν είναι γνωστό γιατί τα μεγαλύτερα φτερά εξελίσσονται στις βόρειες περιοχές και μικρότερα φτερά στα νότια κλίματα).

Μια μελέτη σχετικά με την εξέλιξη των ψαριών που είναι γνωστά ως *sticklebacks* σε τρεις παράκτιες λίμνες του δυτικού Καναδά