

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΚΟΙΝΩΝΙΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΨΥΧΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Θέμα: "Η μαγνητική πλοήγηση των ζώων και το  
νευρωνικό της υπόστρωμα"**

**της Λειβαδάρου Κατερίνας**

**A.M. 2549**

**Επιβλέπων Καθηγητής: Καστελλάκης Ανδρέας**

**ΡΕΘΥΜΝΟ, 2017**

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Περίληψη.....	2
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ - Εισαγωγή στη μαγνητική πλοήγηση.....	6
1.1 Το γεωμαγνητικό πεδίο.....	6
1.2 Μαγνητικός προσανατολισμός (Μαγνητικές πυξίδες και μαγνητικοί χάρτες) .....	7
1.3 Ερευνητικές μέθοδοι για τη μελέτη της μαγνητικής πλοήγησης.....	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ - Ερευνητικά δεδομένα μαγνητικής πλοήγησης των ζώων.....	15
2.1 Ερευνητικά δεδομένα για τις θαλάσσιες χελώνες.....	15
2.2 Ερευνητικά δεδομένα για τον αγκαθωτό αστακό του Ατλαντικού ( <i>Panulirus argus</i> ).....	24
2.3 Ερευνητικά δεδομένα για τον Ανατολικό τρίτονα ( <i>Notophthalmus viridescens</i> ).....	27
2.4 Ερευνητικά δεδομένα για τα πτηνά.....	30
2.5 Σύγκριση συμπεριφορικών δεδομένων.....	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ - Νευρωνικό υπόβαθρο μαγνητικής πλοήγησης των ζώων.....	38
3.1 Προτεινόμενοι νευρωνικοί μηχανισμοί μαγνητικής πλοήγησης.....	38
3.2 Σύγκριση νευρωνικών δεδομένων.....	42
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	46
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	51
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	56

## Περίληψη

Η ικανότητα των ζώων να αντιλαμβάνονται το μαγνητικό πεδίο της γης και να το χρησιμοποιούν ως μέσο προσανατολισμού και πλοήγησης έχει κεντρίσει για χρόνια το ερευνητικό ενδιαφέρον. Πολλές είναι οι ερευνητικές προσπάθειες που έχουν γίνει για να κατανοήσουν τον μηχανισμό που κρύβεται πίσω από αυτή την ικανότητα και όλο και περισσότερα είδη ζώων εντάσσονται στη λίστα εκείνων που μπορούν να πλοηγηθούν με γεωμαγνητικά στοιχεία. Μέχρι στιγμής, οι περισσότερες μελέτες εστιάζουν σε συμπεριφορικά δεδομένα τα οποία έχουν οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι πολλά ζώα έχουν την ικανότητα να χρησιμοποιούν ενός είδους μαγνητική πυξίδα και μαγνητικό χάρτη. Τα ευρήματα αυτά, έχουν βρεθεί σε είδη ζώων όπως οι θαλάσσιες χελώνες, τα πουλιά, οι αστακοί και οι τρίτωνες, πράγμα που υπονοεί πως η μαγνητική πλοήγηση είναι φυλογενετικά διάσπαρτη και μπορεί να λειτουργήσει σε ένα ευρύ φάσμα χωρικής κλίμακας. Στην παρούσα μελέτη γίνεται σύγκριση των σχετικών με την μαγνητική αντίληψη ευρημάτων για τα είδη ζώων που προαναφέρθηκαν. Πέρα από την συμπεριφορική πλευρά της μαγνητικής αντίληψης η παρούσα εργασία θα εστιάσει και στο νευρωνικό της υπόστρωμα. Αν και η έρευνα που αφορά την νευρωνική υπόσταση της μαγνητικής πλοήγησης είναι αρκετά περιορισμένη, το μοντέλο των κρυπτοχρωμάτων και εκείνο που αφορά την ύπαρξη μαγνητίτη στο βιολογικό ιστό έχουν ρίξει μια μικρή ακτίνα φωτός στο μυστήριο της νευρωνικής υπόστασης της μαγνητικής αντίληψης.

**Λέξεις κλειδιά:** Μαγνητική πλοήγηση, μαγνητικός χάρτης μαγνητική πυξίδα, κρυπτοχρωμία, μαγνητίτης,

## **Εισαγωγή**

Απο τις απαρχές τις ανθρώπινης ιστορίας οι άνθρωποι ταξίδευαν. Για λόγους οικονομικούς, κοινωνικούς, πολιτιστικούς ή και εξερευνητικούς, όποιος και να ήταν ο λόγος του ταξιδιού, όλοι οι θαλασσοπόροι και ταξιδευτές αντιμετώπιζαν το ίδιο πρόβλημα: πώς θα φτάσουν από το σημείο που βρίσκονταν στο σημείο που ήθελαν να βρεθούν, δηλαδή πώς να πλοηγηθούν. Ιδιαίτερα τα πρώτα χρόνια της ναυτιλίας, ήταν εξαιρετικά δύσκολο για τους ναυτικούς να μπορέσουν να πλοηγηθούν με ακρίβεια και πιο ουσιαστικά με ασφάλεια γιατί απλά δεν διέθεταν τα μέσα να γνωρίζουν την ακριβή τους θέση και την ακριβή θέση του προορισμού. Επιπλέον, ορισμένες φορές, λόγω διάφορων φυσικών ή και τεχνητών εμποδίων, η πορεία που έπρεπε να ακολουθήσουν δεν ήταν μία ευθεία γραμμή, με αποτέλεσμα να χρειάζεται να αλλάζουν κατευθύνσεις και πορείες πολλές φορές κατά το ταξίδι τους, πράγμα εξαιρετικά δύσκολο λόγω της έλλειψης ακρίβειας των συστημάτων πλοήγησης. Με τα χρόνια και με την εξέλιξη της τεχνολογίας, όλα τα παραπάνω προβλήματα λύθηκαν το ένα μετά το άλλο, με την ανακάλυψη της τριγωνομετρίας και της γεωγραφίας, με την χαρτογράφηση του κόσμου κομμάτι-κομμάτι, με την ανακάλυψη και την χρήση του αστρολάβου και της πυξίδας και άλλων οργάνων ναυσιπλοΐας και πλέον στη σύγχρονη εποχή με την χρήση γεωστατικών και μη δορυφόρων και του παγκόσμιου συστήματος στιγματοθέτησης (GPS). Ιδιαίτερα η πυξίδα έπαιξε έναν σημαντικό, αν όχι τον πιο σημαντικό, ρόλο στην πλοήγηση έως και σήμερα καθώς αποτελούσε και αποτελεί μια πάντα διαθέσιμη σταθερά.

Όμως εμείς οι άνθρωποι, παρά τις αυξημένες νοητικές ικανότητές μας, δεν ήμασταν το πρώτο είδος που ταξίδεψε γενικώς και σίγουρα δεν ήμασταν το πρώτο είδος που ταξίδεψε και πλοηγήθηκε τεράστιες αποστάσεις πέρα από ωκεανούς, βουνά και ερήμους. Πριν από μας, υπήρχαν οργανισμοί μέσα στο ζωικό βασίλειο ικανοί να πλοηγηθούν με εξαιρετική ακρίβεια και αποτελεσματικότητα, ορισμένες φορές καλύτερη και από τις πιο σύγχρονες μεθόδους πλοήγησης του ανθρώπου (Bowditch, 2002).

Μία από τις μεθόδους που αξιοποιούν πολλά ζώα για την πλοήγησή τους είναι η αξιοποίηση του μαγνητικού πεδίου της γης, το οποίο είναι σχετικά σταθερό, αλλά και

παρόν σε όλα τα σημεία του πλανήτη. Τα ζώα που πραγματοποιούν μαγνητική πλοήγηση έχουν τραβήξει το ερευνητικό ενδιαφέρον αρκετά χρόνια τώρα και η λίστα με τα είδη ζώων που γνωρίζουμε ότι διαθέτουν κάποιου είδους μαγνητική πλοήγηση αυξάνεται συνεχώς, με νέες έρευνες.

Σπονδυλωτά όπως τα πουλιά, οι θαλάσσιες χελώνες, οι σαλαμάνδρες, οι φάλαινες, και ο σολωμός έχει παρατηρηθεί ότι διαθέτουν ένα είδος μαγνητικής αντίληψης η οποία λειτουργεί είτε με τη μορφή μαγνητικής πυξίδας η οποία αλληλεπιδρά με το πεδίο της γης, ή ως μαγνητικός χάρτης, που επιτρέπει στα ζώα αυτά να μπορούν σε οποιαδήποτε στιγμή να γνωρίζουν την θέση τους (Walker, Kirschvink, Ahmed & Diction, 1992. Bingman & Cheng, 2005). Πέρα όμως από τα σπονδυλωτά, και έρευνες που έγιναν σε ασπόνδυλα, τα οποία έχουν λιγότερο ανεπτυγμένα νευρωνικά συστήματα έδειξαν ότι και αυτά μπορούν να αξιοποιήσουν το γεωμαγνητικό πεδίο. Για παράδειγμα, ένα είδος σκουληκιού το οποίο κινείται κάθετα στο έδαφος για να τραφεί, το κάνει αυτό με τη βοήθεια ενός είδους πυξίδας Βορρά-Νότου (Vidal-Gadea, Ward, Beron, Chorashian, Gokce, Russell et al., 2015). Ακόμη, έντομα όπως οι μέλισσες, τα μυρμήγκια και οι τερμίτες μετακινούνται έξω από τις φωλιές τους χωρίς να χάνονται αξιοποιώντας τη μαγνητική τους αντίληψη (Pereira-Bomfim, Antonialli-Junior & Acosta-Avalos, 2015). Επιπλέον, ερευνητικά δεδομένα έδειξαν ότι ένα συγκεκριμένο είδος αστακού, αποτελεί το πρώτο γνωστό ασπόνδυλο που ίσως μπορεί να πλοηγηθεί με χρήση μαγνητικού χάρτη (Boles & Lohmann, 2003).

Το κομμάτι με το μεγαλύτερο, ίσως, ενδιαφέρον στην έρευνα της μαγνητικής αντίληψης, αφορά τον βιολογικό μηχανισμό που δίνει στα ζώα αυτά τη δυνατότητα να αντιληφθούν και να αξιοποιήσουν το μαγνητικό πεδίο, και ακόμη πιο ενδιαφέρον είναι το γεγονός ότι η αντίληψη αυτή φαίνεται να είναι εν μέρει ανεξάρτητη από την πολυπλοκότητα του νευρωνικού συστήματος. Μεχρι σήμερα όμως, και παρά τις προσπάθειες της επιστημονικής κοινότητας τα ευρήματα και οι θεωρίες για το νευρωνικό υπόστρωμα της μαγνητικής πλοήγησης δεν είναι ακόμη ιδιαίτερα διαμορφωμένα.

Παρότι, όπως προαναφέρθηκε, τα αποτελέσματα διάσπαρτων ερευνών υποστηρίζουν πως μεγάλος αριθμός διαφορετικών ειδών ζώων έχουν την ικανότητα να πραγματοποιήσουν μαγνητική πλοήγηση, η ερευνητική βιβλιογραφία πάνω σε ένα τόσο πολύπλοκο ζήτημα και για όλα τόσα πολλά διαφορετικά είδη είναι ακόμη ελλιπής. Η

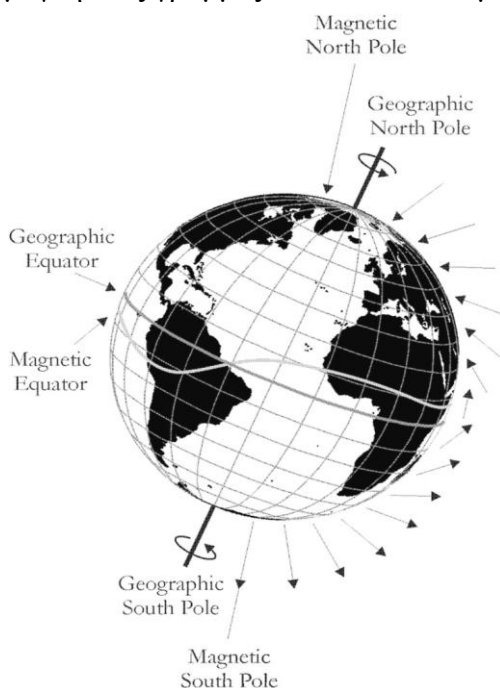
παρούσα εργασία θα αναφερθεί σε συγκεκριμένα είδη θαλάσσιων χελώνων (*Caretta caretta* & *Chelonia mydas*), πτηνών (παρδαλός μυγοχάφτης, τσιγλαηδόνι, ευρωπαϊκός κοκκινολαίμης, ευρωπαϊκό ψαρόνι και ταχυδρομικό περιστέρι), στο είδος τρίτωνια *Notophthalmus viridescens* και στο είδος αστακού *Panulirus argus*. Τα συγκεκριμένα είδη επιλέχθηκαν επειδή με βάση την υπάρχουσα βιβλιογραφία και έρευνα έχουν μελετηθεί εκτενέστερα, παρέχοντας έτσι μία πιο ολοκληρωμένη εικόνα για συμπεριφορικό και νευρωνικό μηχανισμό της μαγνητικής αντίληψης. Ένας επιπλέον λόγος για τον οποίο επιλέχθηκαν τα συγκεκριμένα ζώα, είναι ότι το καθένα ανήκει σε διαφορετικό οικοσύστημα, γεγονός που αναδεικνύει ότι η μαγνητική πλοήγηση μπορεί να λειτουργήσει ανεξάρτητα από το ιδιαίτερο περιβάλλον του οργανισμού (Freaker, Muheim & Phillips, 2006).

Σκοπός της εργασίας είναι να παραθέσει τα ευρήματα συμπεριφορικών και νευρωνικών μελετών ώστε να διερευνηθεί η ικανότητα μαγνητικής πλοήγησης για το καθένα από τα είδη που επιλέχθηκαν. Στη συνέχεια, θα γίνει σύγκριση των ευρημάτων αυτών ώστε να βρεθούν ομοιότητες και διαφορές των τεχνικών πλοήγησης και των νευρωνικών συστημάτων που περιβάλλουν την μαγνητική αντίληψη του κάθε είδους.

## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>

### 1.1 Το γεωμαγνητικό πεδίο

Η γη λειτουργεί σαν ένας τεράστιος φυσικός μαγνήτης, του οποίου οι ιδιότητες μοιάζουν με εκείνες του διπόλου μιας απλής μαγνητικής ράβδου. Ο Βόρειος και Νότιος μαγνητικός πόλος της γης δεν συμπίπτουν με τους γεωγραφικούς πόλους, αλλά σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία η οποία ονομάζεται απόκλιση (Εικ. 1). Η μαγνητική απόκλιση παρουσιάζει μικρή ετήσια μεταβολή, αλλά και διαφέρει από τόπο σε τόπο. (Hollenbach & Herndon, 2001. Στρούζας, 2001). Οι μαγνητικές γραμμές του γεωμαγνητικού πεδίου, ξεκινούν από το Νότιο μαγνητικό πόλο, κινούνται προς τα πάνω καμπυλώνοντας γύρω από την υδρόγειο και καταλήγουν στο Βόρειο μαγνητικό πόλο (Lohmann, Lohmann & Putman, 2007). Εξαιτίας της σφαιρικότητας της γης, οι μαγνητικές γραμμές σε κάθε τόπο τέμνουν την επιφάνεια της γης με διαφορετική γωνία



κλίσης. Η γωνία αυτή, που ονομάζεται μαγνητική έγκλιση, ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος μπορεί να κυμανθεί από  $-90^\circ$  στο Νότιο μαγνητικό πόλο, έως  $+90^\circ$  στο Βόρειο. Οι μόνες περιοχές που οι μαγνητικές γραμμές εμφανίζονται παράλληλες στην επιφάνεια της γης βρίσκονται επάνω στον μαγνητικό ισημερινό, όπου η μαγνητική έγκλιση είναι  $0^\circ$ . Λόγω αυτής της διάταξης των μαγνητικών γραμμών, η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι μεγαλύτερη στους πόλους και μικρότερη κοντά στον μαγνητικό ισημερινό.

**Εικ. 1.** Διαγραμματική απεικόνιση του μαγνητικού πεδίου της γης που αναπαριστά τον τρόπο με τον οποίο οι μαγνητικές γραμμές (απεικονίζονται με βελάκια) τέμνουν την επιφάνεια της γης, και πώς η γωνία κλίσης (η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ των μαγνητικών γραμμών και της Γης) ποικίλλει ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος. Στο μαγνητικό ισημερινό (την καμπύλη που διαπερνά τη Γη) οι μαγνητικές γραμμές είναι παράλληλες με την επιφάνεια της Γης, ενώ όσο κινείται κάποιος προς τους μαγνητικούς πόλους, η γωνία κλίσης τους γίνεται όλο και πιο απότομη.

Αν και οι παράμετροι του γεωμαγνητικού πεδίου χαρακτηρίζονται από χρονική σταθερότητα, δύνανται να τροποποιηθούν τοπικά, από περιστασιακές μαγνητικές ανωμαλίες. Στις περιοχές της εύκρατης ζώνης σημειώνονται καθημερινά μικρές διακυμάνσεις στην ένταση του μαγνητικού ως αποτέλεσμα της επίδρασης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από τον ήλιο, ενώ περισσότερο έντονες αλλαγές σημειώνονται στην περίπτωση μαγνητικής καταιγίδας, η οποία επηρεάζει όλες τις μαγνητικές παραμέτρους. Παρόλα αυτά, οι αλλαγές αυτές είναι πολύ μικρές συγκριτικά με τη κανονικότητα του πεδίου (Wiltschko & Wiltschko, 2005).

## 1.2 Μαγνητικός Προσανατολισμός (Μαγνητικές πυξίδες και μαγνητικοί χάρτες)

Το μαγνητικό πεδίο της γης αποτελεί, επομένως, μια εξαιρετική πηγή πληροφοριών, η οποία παραμένει ανεπηρέαστη από τις εναλλαγές ημέρας-νύχτας, και των καιρικών συνθηκών, ενώ ταυτόχρονα παραμένει αναλλοίωτη ακόμη και σε όλα τα βάθη των ωκεανών (Lohmann, Lohmann & Endres, 2008). Βασισμένα στην αξιοπιστία των πληροφοριών του μαγνητικού πεδίου, πολλά είδη ζώων χρησιμοποιούν τις πληροφορίες που παρέχει ώστε να πλοηγηθούν. Για να γίνει, όμως, περισσότερο αντιληπτό το θέμα της μαγνητικής πλοήγησης, χρειάζεται να ληφθεί υπόψη το είδος της πληροφορίας που μπορεί να προσφέρει το γεωμαγνητικό πεδίο και στη συνέχεια πώς αξιοποιείται αυτή η πληροφορία από τα ζώα.

Το γεωμαγνητικό πεδίο παρέχει δύο είδη πληροφοριών τις οποίες μπορούν και αξιοποιούν τα ζώα. Η πρώτη, η οποία είναι και η απλούστερη, επιτρέπει τη διατήρηση σταθερής πορείας προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση, με τρόπο παρόμοιο με αυτόν που λειτουργεί η *μαγνητική πυξίδα*. Η χρήση της μαγνητικής πυξίδας μελετάται με έρευνες προσανατολισμού, όπου το ζώο αποκρίνεται σε μετατόπιση του μαγνητικού Βορρά με αλλαγή στην κατεύθυνση του (Wiltschko & Wiltschko, 2005). Παρόλα, αυτά οι πληροφορίες που παρέχει η μαγνητική πυξίδα δεν είναι αρκετές ώστε να οδηγηθεί ένα ζώο σε συγκεκριμένο προορισμό ακολουθώντας μία πολύπλοκη μεταναστευτική οδό (Lohmann, Lohmann & Putman, 2007).

Η δεύτερη πληροφορία, η οποία αντισταθμίζει τις αδυναμίες της μαγνητικής πυξίδας, παρέχεται από διάφορα γεωμαγνητικά στοιχεία που καλύπτουν την επιφάνεια της Γης. Αυτά τα στοιχεία ποικίλουν με προβλεπόμενο τρόπο και δημιουργούν έναν *‘μαγνητικό χάρτη’*, επιτρέποντας στα ζώα που τον διαθέτουν να γνωρίζουν την ακριβή



τους γεωγραφική θέση σε σχέση με τον προορισμό στον οποίο επιθυμούν να φτάσουν (Lohmann, Lohmann & Endres, 2008).

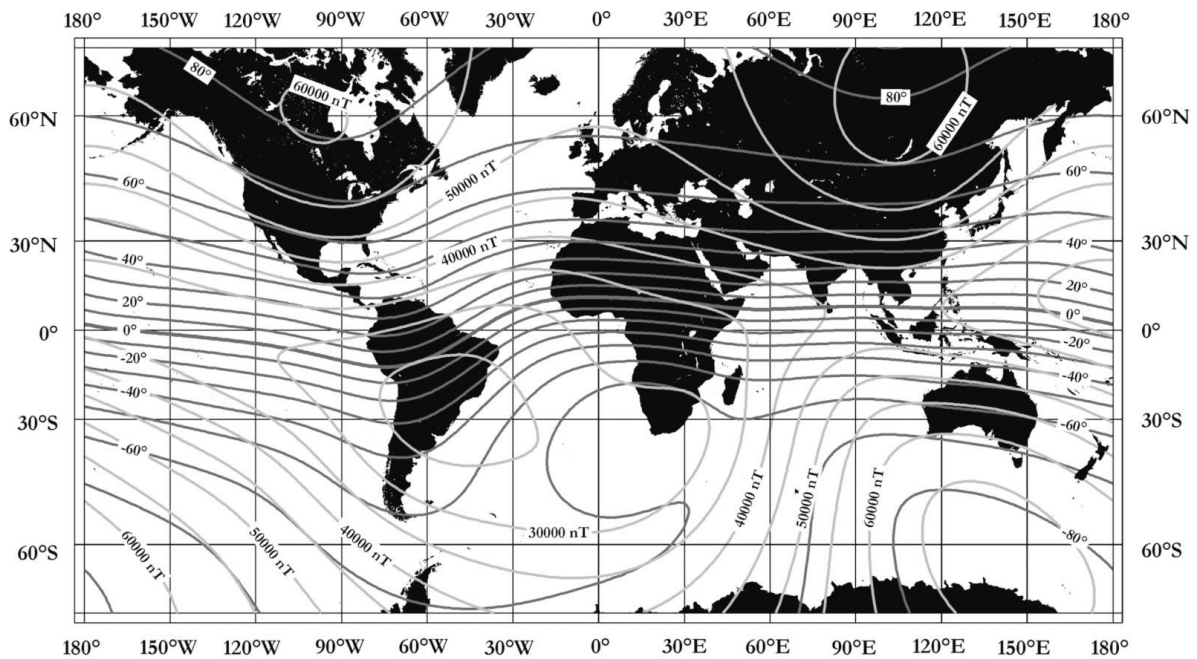
Ένα από τα στοιχεία του μαγνητικού χάρτη είναι η **μαγνητική έγκλιση**, η οποία, όπως προαναφέρθηκε, ποικίλλει με προβλεπόμενο τρόπο ανάλογα το γεωγραφικό πλάτος. Οι περιοχές με ίση μαγνητική έγκλιση συνδέονται με γραμμές που ονομάζονται ισοκλινείς. Οι ισοκλινείς γραμμές δημιουργούν ένα μαγνητικό χάρτη, ο οποίος παρέχει πληροφορίες στα ζώα που μπορούν να τις αξιοποιήσουν, σχετικά με το πόσο βόρεια ή νότια βρίσκεται μια περιοχή (Εικ. 3).

Ένα ακόμη στοιχείο που χρησιμοποιείται από τα ζώα για τον προσδιορισμό της θέσης τους, είναι η **ολική ένταση του μαγνητικού πεδίου**, ένα διανυσματικό μέγεθος που αποτελείται από την κατακόρυφη και την οριζόντια συνιστώσα (Εικ.2). Η γεωγραφική μεταβολή της ολικής έντασης του μαγνητικού πεδίου αναπαριστάται με καμπύλες ίσης έντασης που λέγονται ισομαγνητικές γραμμές και σχηματίζουν τον ισομαγνητικό χάρτη [Εικ. 3] (Freake, Muheim & Phillips, 2006).



*Εικ. 2. Διάγραμμα στο οποίο απεικονίζονται τα διανυσματικά μεγέθη τεσσάρων γεωμαγνητικών στοιχείων τα οποία παρέχουν πληροφορίες θέσεως σε ζώα με μαγνητική αντίληψη. Το μαγνητικό πεδίο κάθε σημείου πάνω στη Γη μπορεί να περιγραφεί με όρους μαγνητική έγκλισης και ολικής έντασης του. Η ολική ένταση του μαγνητικού πεδίου αναλύεται σε δύο διανυσματικούς παραμέτρους: τη συνολική οριζόντια συνιστώσα και τη συνολική κάθετη συνιστώσα.*

Η μαγνητική έγκλιση και η ένταση του μαγνητικού πεδίου αποτελούν τις δύο παραμέτρους που συνθέτουν το μοντέλο του χάρτη δύο συντεταγμένων. Η χρήση του χάρτη δύο συντεταγμένων είναι απαραίτητη προϋπόθεση για να πούμε ότι ένας οργανισμός πραγματοποιεί πραγματική πλοήγηση και σε αυτήν την περίπτωση, **πραγματική μαγνητική πλοήγηση**.



**Εικ. 3.** Απεικόνιση των ισοκλινών γραμμών που συνδέουν σημεία ίσης μαγνητικής έγκλισης (μέτρηση σε μοίρες) και των ισοδυναμικών γραμμών που συνδέουν σημεία ίσης ολικής έντασης του μαγνητικού πεδίου της γής [μέτρηση με nanotesla (nT)].

Συμφωνα με τον ορισμό του Griffin (1952), η πραγματική πλοήγηση είναι η ικανότητα ενός οργανισμού, που εκτοπίζεται σε μία άγνωστη τοποθεσία, να προσανατολιστεί προς την κατεύθυνση η οποία θα το οδηγήσει στην τοποθεσία που βρισκόταν πριν την εκτόπιση (παλιννόστηση), χωρίς αναφορά σε γνωστούς σηματοδότες (landmarks) ή πληροφορίες κατεύθυνσης που αποκτήθηκαν κατά την εκτόπιση. Συνεπώς, η ικανότητα πλοήγησης απαιτεί μία αίσθηση κατεύθυνσης (πυξίδα) αλλά και αίσθηση της γεωγραφικής θέσης (χάρτης) η οποία προέρχεται από τις πληροφορίες που ‘αποσπά’ ο οργανισμός στον τόπο απελευθέρωσης.

Η διαδικασία εκμάθησης του μαγνητικού χάρτη είναι κρίσιμη, καθώς οι μαγνητικές παράμετροι μπορούν να αλλάξουν σημαντικά ακόμη και σε τοπικό επίπεδο, είτε ευθύγραμμα ή κατακόρυφα. Επιπλέον, καθώς το γεωμαγνητικό πεδίο αλλάζει και μέσα στο χρόνο, τα μοτίβα των παραμέτρων του δύναται να αλλάξουν δραματικά σε τοπική αλλά και παγκόσμια κλίματα. Λαμβάνοντας, τα παραπάνω υπ’ όψη είναι πιθανότερο να παρατηρηθεί πραγματική μαγνητική πλοήγηση σε έμπειρα, ενήλικα ζώα, ενώ τα νεαρά άτομα πιθανόν βασίζονται σε εναλλακτικές στρατηγικές πλοήγησης όπως

ενσωμάτωση διαδρομής (path integration) ή εγγενείς προτιμήσεις κατεύθυνσης (innate directional preferences).

Προκειμένου, λοιπόν, να λειτουργήσει ένας μαγνητικός χάρτης, το ζώο που τον αξιοποιεί θα πρέπει να υπερβεί συγκεκριμένες προκλήσεις που προκύπτουν από τα χαρακτηριστικά του μαγνητικού πεδίου.

(1) Οι διακυμάνσεις των παγκόσμιων παραμέτρων της συνολικής έντασης και της μαγνητικής έγκλισης είναι εξαιρετικά ασθενείς, πράγμα που σημαίνει ότι είναι πολύ δύσκολο να γίνουν αντιληπτές και ειδικά από τα ζώα που πραγματοποιούν μεταναστεύσεις μικρής απόστασης. Επομένως ο αισθητηριακός μηχανισμός ανίχνευσης των διακυμάνσεων του μαγνητικού πεδίου των ζώων, θα πρέπει να είναι εξαιρετικά ευαίσθητος.

(2) Τοπικές παράμετροι του μαγνητικού πεδίου μπορεί να διαφέρουν στην οριζόντια ή/και κάθετη κατεύθυνση, σε σχέση με περιφερειακές παραμέτρους και αυτό συμβαίνει λόγω ανωμαλιών στα υποκείμενα στρώματα πετρωμάτων. Αναπόφευκτα λοιπόν, οι ανωμαλίες αυτές, προκαλούν σημαντικά σφάλματα στον προσδιορισμό της θέσης των μεταναστευτικών οργανισμών.

(3) Αλληλεπιδράσεις μεταξύ της μαγνητόσφαιρας της γης και του ηλιακού ανέμου προκαλούν καθημερινές διακυμάνσεις στη συνολική ένταση του πεδίου και στην μαγνητική έγκλιση, δημιουργώντας σημαντικά σφάλματα προσανατολισμού. Βέβαια, εικάζεται ότι τα ζώα είναι ικανά να αναγνωρίζουν τις μαγνητικές καταγίδες από τις ακραίες και ξαφνικές αλλαγές που προκαλούν στο μαγνητικό πεδίο και επομένως ίσως να αποφεύγουν τις μετακινήσεις τις μέρες αυτές.

(4) Επιπλέον, το μαγνητικό πεδίο της γης παρουσιάζει σταδιακές αλλαγές σε βάθος χρόνου. Η ύπαρξη της αλλαγής αυτής, που ονομάζεται μαγνητική απόκλιση, σημαίνει ότι το μαγνητικό πεδίο μιας συγκεκριμένης περιοχής δεν θα παραμείνει το ίδιο καθ' όλη τη διάρκεια ζωής ενός μακρόβιου ζώου. Η εκτίμηση των σφαλμάτων που προκύπτουν λόγω της μαγνητικής απόκλισης είναι δύσκολο να εκτιμηθούν για διάφορους λόγους. Ένας από αυτούς είναι ότι η συχνότητα με την οποία το μαγνητικό πεδίο αλλάζει, διαφέρει ταυτόχρονα χρονικά αλλά και τοπικά και επομένως δεν υπάρχει μία 'τυπική' παγκόσμια τιμή. Επίσης, η συχνότητα των αλλαγών μεταξύ διαφορετικών στοιχείων του μαγνητικού πεδίου διαφέρουν και έτσι, στοιχεία συγκεκριμένων

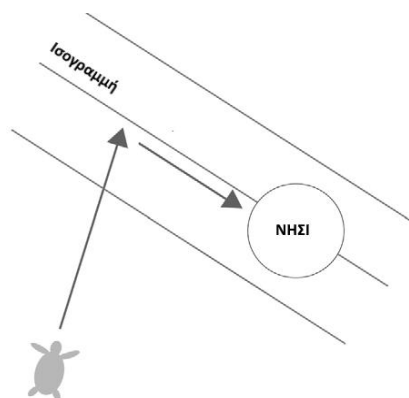
περιοχών είναι περισσότερο σταθερά σε σχέση με στοιχεία άλλων περιοχών (Lohmann, Luschi & Hays, 2008. Freake, Muheim & Phillips, 2006).

Πολλές έρευνες, έχουν προσπαθήσει να υποστηρίξουν ότι οι δύο συντεταγμένες που χρησιμοποιούν τα ζώα είναι αντίστοιχες με τις συντεταγμένες του γεωγραφικού μήκους και πλάτους. Η επεξήγηση αυτή, αν και ελκυστική, πιθανώς να μην είναι απόλυτα ακριβής, καθώς επιβάλλει στα ζώα μια πολύ συγκεκριμένη ανθρώπινη αντίληψη για την έννοια του χάρτη. Επιπλέον, για τη χρήση του χάρτη όπως τον αντιλαμβάνεται ο άνθρωπος απαιτούνται σημαντικές γνωστικές και υπολογιστικές ικανότητες πράγμα το οποίο καθιστά τη παραπάνω συσχέτιση ακόμη πιο δυσχερή. Σε μια περισσότερο ρεαλιστική προσέγγιση τα ζώα πιθανώς να χρησιμοποιούν τις δύο μαγνητικές παραμέτρους ξεχωριστά και ταυτόχρονα σαν δύο συντεταγμένες. Με τον τρόπο αυτό, εάν για παράδειγμα ένα ζώο γνωρίζει την μαγνητική έγκλιση και τη συνολική ένταση του πεδίου μιας περιοχής, τότε μπορεί να φτάσει στο σημείο αυτό χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους με διαδοχική ή και εναλλασσόμενη σειρά. Βέβαια, ακόμη και με τη στρατηγική αυτή, το ζώο θα ακολουθούσε μία οφιοειδή αντί για ευθεία πορεία, όμως η αξιοποίηση αυτής της μεθόδου δεν θα απαιτούσε εξειδικευμένες γνωστικές ή υπολογιστικές ικανότητες.

### 1.2.1 Μαγνητικός χάρτης μίας συντεταγμένης

Σε κάποιες περιπτώσεις η μαθημένη χρήση μίας μόνο συντεταγμένης (μαγνητικής έγκλισης ή ολική ένταση του πεδίου) μπορεί να είναι αρκετή ώστε το ζώο να πλοηγηθεί προς μια περιοχή-στόχο. Η τρόπος, όμως, με τον οποίο αξιοποιείται αυτή η συντεταγμένη πιθανός να ποικίλλει.

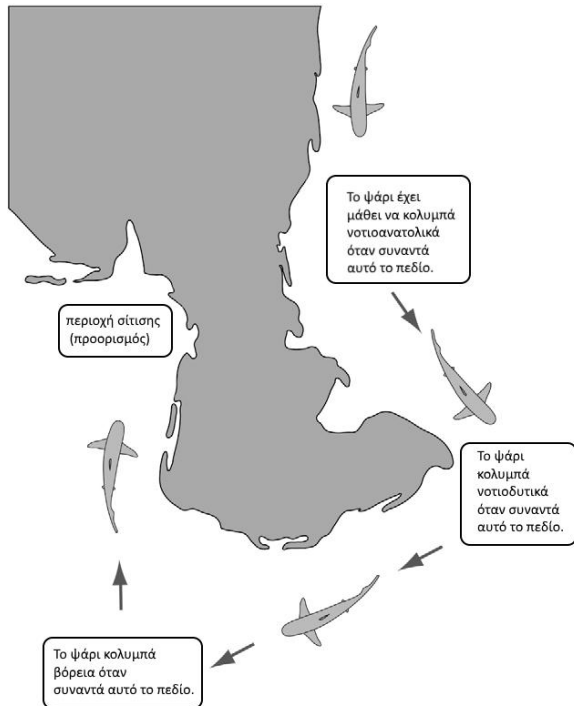
Μια περίπτωση είναι ότι το ζώο γνωρίζει από προηγούμενη εμπειρία, ένα μαγνητικό στοιχείο (τη μαγνητική έγκλιση ή τη συνολική ένταση του πεδίου) το οποίο χαρακτηρίζει την περιοχή που θέλει να φτάσει. Γνωρίζοντας ένα από τα στοιχεία αυτά, αναγνωρίζει και την μαγνητική γραμμή (Εικ.



**Εικ.4.** Η στρατηγική μαγνητικής πλοήγησης με χρήση ενός μοναδικού μαγνητικού στοιχείου, της μαγνητικής έγκλισης ή της ολικής έντασης, απεικονίζεται με το παράδειγμα μιας χελώνας που αξιοποιεί τη στρατηγική για να πλησιάσει ένα νησί.

4) πάνω στην οποία βρίσκεται ο στόχος. Ακολουθώντας λοιπόν την κατεύθυνση της μαγνητικής γραμμής το ζώο κάποια στιγμή θα διασταυρωθεί με την περιοχή στην οποία θέλει να φτάσει.

### 1.2.2 Πλοήγηση με μαγνητικούς σηματοδότες (waymarks)



**Εικ. 5.** Παράδειγμα πλοήγησης καρχαρία με μαγνητικούς σηματοδότες. Ο καρχαρίας αλλάζει κατεύθυνση σε κρίσιμα σημεία, τα οποία χαρακτηρίζονται από ένα διακριτικό μαγνητικό πεδίο.

Σε μία δεύτερη περίπτωση, αντί το ζώο να μαθαίνει το πρότυπο των μαγνητικών γραμμών, μαθαίνει να αποκρίνεται σε συγκεκριμένα γεωγραφικά στοιχεία αλλάζοντας την κατεύθυνση του (Εικ. 5). Έτσι, καθώς τα ζώα πλοηγούνται και αποκτούν εμπειρία, η μετανάστευση τους πραγματοποιείται σαν μια ακολουθία μαθημένων βημάτων, όπου συγκεκριμένες κρίσιμες θέσεις με διακριτό μαγνητικό πεδίο, σηματοδοτούν σημεία αλλαγής της κατεύθυνσης (Lohmann, Lohmann & Putman, 2007).

### 1.3 Ερευνητικές προσεγγίσεις για τη μελέτη της υποθαλάσσιας πλοήγησης

Ο αμερικάνος ζωολόγος Archie Carr ήταν ένας από τους πρώτους μελετητές που έδειξε επιστημονικό ενδιαφέρον για τον τρόπο πλοήγησης των θαλάσσιων χελωνών. Σε μια πρώτη ερευνητική απόπειρα ο Carr, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο σημαδέματος και επανεντοπισμού, προσπάθησε να καθιερώσει μεταναστευτικά μοτίβα που ακολουθούσαν διαφορετικά είδη χελώνας. Επιπλέον, συμμετείχε σε μερικές από τις πρώιμες εφαρμογές των μελετών αποπροσανατολισμού, οι οποίες σήμερα αποτελούν μια παραδοσιακή μέθοδο μελέτης των μεταναστευτικών οργανισμών. Στις μελέτες αυτές, το υπό μελέτη ζώο αιχμαλωτίζεται, μεταφέρεται σε μια μακρινή και άγνωστη τοποθεσία, και στη συνέχεια παρατηρείται η συμπεριφορά πλοήγησής του.

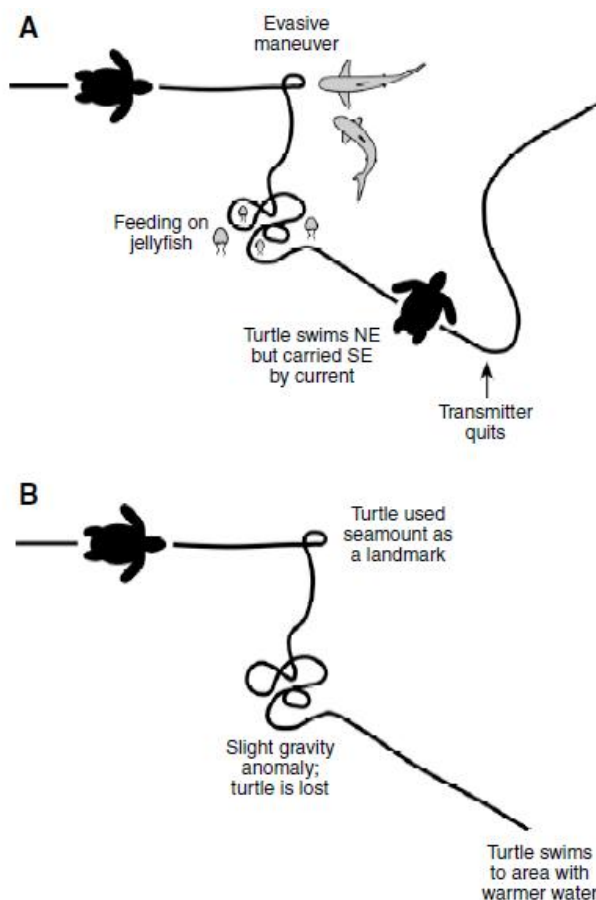
Οι πρώιμες μελέτες αποπροσανατολισμού βασίζονταν σε μια έξυπνη αλλά χρονοβόρα διαδικασία κατά την οποία οι ερευνητές έδεναν μεγάλα μπαλόνια επάνω στις χελώνες και στη συνέχεια παρακολουθούσαν τις κινήσεις τους ακολουθώντας τις με βάρκα. Οι τεχνικές αυτές, αποδείχθηκαν, εν τέλει, μη αποδοτικές γιατί οι ερευνητές μπορούσαν να ακολουθήσουν τις χελώνες μόνο για μικρό χρονικό διάστημα. Παρόλα αυτοί, οι πρώτες αυτές προσπάθειες σηματοδότησαν την αρχή για ένα συνεχώς εξελισσόμενο ρεύμα τηλεμετρικών τεχνικών, που σήμερα περιλαμβάνει τη χρήση συστημάτων ραδιοφώνου, δορυφόρου και GPS (Lohman, Luschi & Hays, 2008). Προφανώς, από την εποχή που ο Carr επιχείρησε τις πρώτες μελέτες μέχρι και τη σύγχρονη εποχή, οι τεχνικές για τη μελέτη της πλοήγησης των θαλάσσιων οργανισμών έχουν εξελιχθεί και πολλαπλασιαστεί.

Μια από τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι η έρευνα σε πειραματικό εργαστήριο. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει τη διεξαγωγή έρευνας υπό ελεγχόμενες συνθήκες αλλά και το χειρισμό μιας συγκεκριμένης μεταβλητής (π.χ., Lohmann, Cain, Dodge & Lohmann, 2001. Lohmann, Lohmann, Ehrhart et al., 2004. Avens & Lohmann, 2004). Από την άλλη, η συγκεκριμένη τεχνική δεν μπορεί να αποκαλύψει τις πραγματικές συνθήκες κάτω από τις οποίες κάθε μηχανισμός χρησιμοποιείται στη φύση. Για παράδειγμα, η απόδειξη πως ένα ζώο διαθέτει μαγνητική αντίληψη, δεν αποκαλύπτει πότε και πού αυτή η ικανότητα αξιοποιείται στο φυσικό του περιβάλλον.

Τις αδυναμίες των εργαστηριακών μελετών αντισταθμίζουν έρευνες που πραγματοποιούνται στο φυσικό περιβάλλον του οργανισμού. Αντίθετα με τις εργαστηριακές μελέτες οι έρευνες αυτές, σε ευνοϊκές συνθήκες, μπορούν να αποκαλύψουν σε ποιές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται συγκεκριμένα αισθητήρια ερεθίσματα (π.χ., Lohmann, Pentcheff, Nevitt, Stetten, Zimmer-Faust, Jarrard et al., 1995. Sinsch & Kirst, 2015). Από την άλλη, όμως, οι διαθέσιμες πληροφορίες θέσης και κατεύθυνσης ποικίλλουν σημαντικά μέσα στο θαλάσσιο περιβάλλον και πολλά ζώα χρησιμοποιούν τις πηγές αυτές ως εναλλακτικές λύσεις σε περίπτωση ανάγκης. Επομένως, η αδυναμία ελέγχου σημαντικού αριθμού μεταβλητών στο θαλάσσιο περιβάλλον καθιστά εξαιρετικά δύσκολη την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Για παράδειγμα, αν καλυφθούν τα μάτια ενός ζώου που μεταναστεύει δεν θα αλλάξει υποχρεωτικά πορεία. Αυτό όμως δεν σημαίνει απαραίτητα ότι οπτικές ενδείξεις δεν

χρησιμοποιούνται. Μπορεί να σημαίνει ότι εναλλακτικές αισθήσεις ήταν διαθέσιμες υπό τις συνθήκες της δοκιμής.

Μια τρίτη ερευνητική προσέγγιση αφορά την ανάλυση της διαδρομής που ακολουθούν τα ζώα καθώς πλοηγούνται. Η τηλεμετρία με τη βοήθεια δορυφόρου έχει βοηθήσει σημαντικά στη χαρτογράφηση της διαδρομής εκατοντάδων θαλάσσιων ζώων που μεταναστεύουν σε μεγάλες αποστάσεις (π.χ., Luschi, Benhamou, Girard, Ciccione, Roos, Sudre et al., 2007). Παράλληλα, διάφορες προσπάθειες έχουν γίνει ώστε να συσχετιστούν οι διαδρομές αυτές με συγκεκριμένα ωκεανογραφικά, γεωφυσικά και τοπογραφικά χαρακτηριστικά. Δυστυχώς, η γνώση και μόνο της διαδρομής που ακολουθεί ένα ζώο, δεν αποδεικνύει απαραίτητα και τον τρόπο με τον οποίο πλοηγείται (Εικ. 6). Οι συσχετίσεις από μόνες τους δεν είναι αρκετές, ώστε να αναδείξουν κάποιο συγκεκριμένο στοιχείο που αξιοποιεί το ζώο για την πλοήγησή του (Lohmann, Lohmann & Endres, 2008).



**Εικ. 6.** Το διάγραμμα απεικονίζει τα πιθανά προβλήματα στην προσπάθεια να συμπεράνουμε τους μηχανισμούς πλοήγησης από τη διαδρομή που ακολουθούν τα ζώα.

(A) Η διαδρομή που ακολούθησε μια υποθετική χελώνα η οποία ταξιδεύει εκατοντάδες χιλιόμετρα στη θάλασσα και παρακολουθείται από δορυφορική τηλεμετρία. Αναγράφονται τα δεδομένα που συνέβησαν κατά τη διαδρομή.

(B) Μια πιθανή αλλά λανθασμένη ερμηνεία της διαδρομής που ακολούθησε η χελώνα. Στο παράδειγμα αυτό, οι ερευνητές αποδίδουν τη διαδρομή σε τοπογραφικούς και γεωφυσικούς χάρτες μέχρι να βρεθούν συσχετίσεις μεταξύ των αλλαγών στη συμπεριφορά των χελωνών και των ειδικών χαρακτηριστικών του περιβάλλοντος. Οι συμπεριφορικές αλλαγές, ύστερα αποδίδονται στα ειδικά περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά, οδηγώντας σε λανθασμένα συμπεράσματα σχετικά με τους μηχανισμούς πλοήγησης του ζώου.

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>

### **Ερευνητικά δεδομένα μαγνητικής πλοήγησης σε διαφορετικά είδη ζώων**

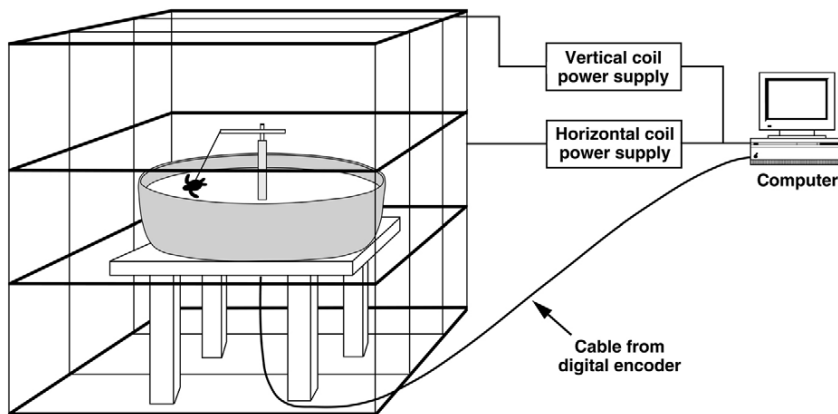
#### 2.1 Ερευνητικά δεδομένα για τις θαλάσσιες χελώνες

##### *Η μαγνητική πλοήγηση των νεογέννητων θαλάσσιων χελωνών*

Οι νεογέννητες χελώνες *Caretta caretta* που εκκολάπτονται στη παραλία της Φλόριντα στην Αμερική, πραγματοποιούν μια από τις μεγαλύτερες θαλάσσιες μεταναστεύσεις. Αφού εισέλθουν στη θάλασσα, ακολουθούν το Ρεύμα του Κόλπου (Gulf Stream) με σκοπό να καταλήξουν στο ωκεάνιο ρεύμα του Βόρειου Ατλαντικού (North Atlantic Gyre) και ύστερα στη Θάλασσα των Σαργασσών η οποία περικλείεται από ένα σύστημα θαλάσσιων ρευμάτων που ακολουθούν κυκλική πορεία. Εντός της κυκλικής αυτής πορείας, όπου τα επιπλέοντα φύκια παρέχουν προστασία από τους θηρευτές και η τροφή είναι άφθονη, οι νεογέννητες χελώνες περνούν τα πρώτα χρόνια της ζωής τους (Collett & Collett, 2011).

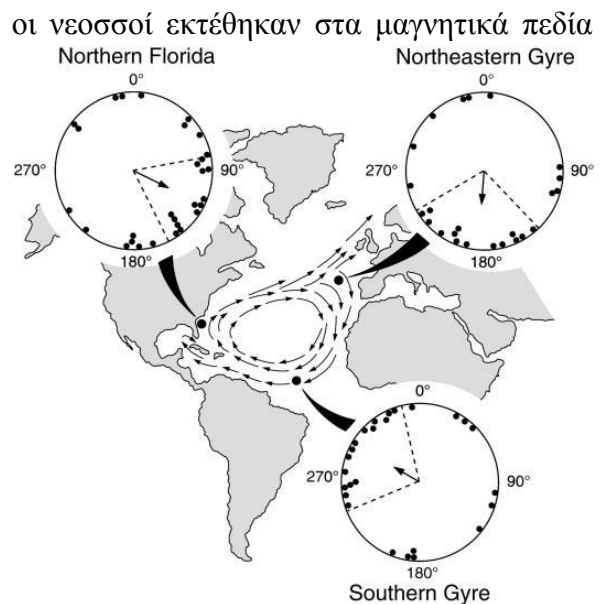
Ο τρόπος με τον οποίο οι νεογέννητες χελώνες καταφέρνουν αποτελεσματικά να μετακινηθούν τόσο μεγάλες αποστάσεις έχει ερευνηθεί μέσω εργαστηριακών ερευνών στις οποίες προσομοιάζεται το μαγνητικό πεδίο από διαφορετικά σημεία της μεταναστευτικής διαδρομής που ακολουθούν οι νεοσσοί. Σε όλες τις σχετικές έρευνες, τα μικρά χελωνάκια απομακρύνονται από τις φωλιές μερικές ώρες πριν την εκκόλαψη και τοποθετούνται σε ατομικές κυκλικές πλατφόρμες με νερό. Έπειτα, προσδένονται σε ένα ηλεκτρονικό σύστημα εντοπισμού που αναμεταδίδει την κατεύθυνση προς την οποία οι νεοσσοί κολυμπούν. Οι πλατφόρμες περιβάλλονται από ένα σύστημα μαγνητικού πηνίου το οποίο κάνει προσομοίωση των μαγνητικών πεδίων από διαφορετικές περιοχές της μεταναστευτικής διαδρομής των χελωνών. Η ρύθμιση του συστήματος αυτού, καθώς και οι μετρήσεις των αποκρίσεων προσανατολισμού των νεοσσών, γίνονται με υπολογιστή [Εικ. 7] (Lohmann, Putman & Lohmann, 2012).





*Εικ. 7. Πειραματική κατασκευή με την οποία παρακολουθούνται οι αποκρίσεις κατεύθυνσης των νεογέννητων χελωνών ύστερα από έκθεση σε συγκεκριμένα μαγνητικά πεδία.*

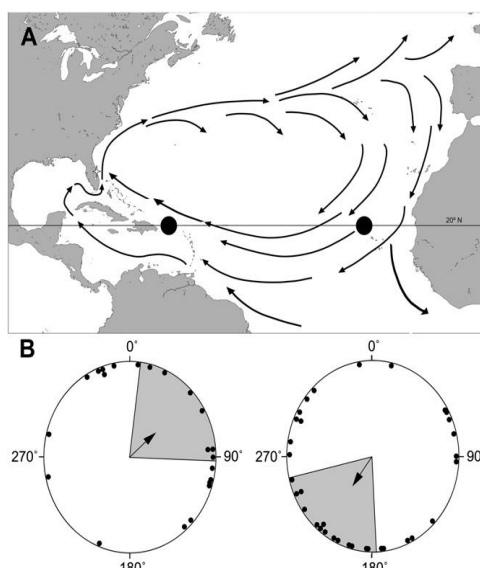
Σε μία μελέτη αυτού του είδους, τριών απομακρυσμένων μεταξύ τους περιοχών τα οποία, όμως, βρίσκονταν εντός του μεταναστευτικού ρεύματος. Δύο από τα μαγνητικά πεδία προσομοίαζαν περιοχές που βρίσκονταν στο βόρειο τμήμα του μεταναστευτικού ρεύματος, ενώ το τρίτο πεδίο προσομοίαζε περιοχή που βρισκόταν στο νότιο κομμάτι του ρεύματος. Οι νεοσσοί αποκρίθηκαν κολυμπώντας προς την κατεύθυνση που θα τους βοηθούσε, σε κάθε περίπτωση, να παραμείνουν εντός του ρεύματος ώστε να μην ξεφύγουν από την μεταναστευτική τους διαδρομή (Εικ. 8). Τα αποτελέσματα έδειξαν πως οι νεοσσοί διαθέτουν ένα σύστημα πλοήγησης, σύμφωνα με το οποίο τοπικά μαγνητικά πεδία λειτουργούν ως σημεία αναφοράς. Όταν οι νεοσσοί βρεθούν κοντά σε κάποιο από αυτά σημεία αναφοράς, αλλάζουν κατεύθυνση, ώστε να παραμείνουν εντός του μεταναστευτικού ρεύματος (Lohmann, Cain, Dodge & Lohmann, 2001).



*Εικ. 8. Προσανατολισμός των νεογέννητων χελωνών στα μαγνητικά πεδία τριών απομακρυσμένων μεταξύ τους περιοχών, που εντοπίζονται εντός της μεταναστευτικής διαδρομής. Στα διαγράμματα προσανατολισμού κάθε κουκίδα αντιπροσωπεύει τη μέση γωνία κάθε νεοσσού, ενώ το βέλος στο κέντρο του κύκλου υποδεικνύει τη μέση γωνία της πειραματικής ομάδας.*

Επειδή τα πεδία που χρησιμοποιήθηκαν στην προαναφερθείσα έρευνα, αντιστοιχούσαν σε περιοχές της μεταναστευτικής οδού με σημαντικά διαφορετικό γεωγραφικό πλάτος, έμεινε ανοιχτό το ερώτημα σχετικά με την ικανότητα των νεοσσών να αναγνωρίζουν αντίστοιχα περιοχές διαφορετικού γεωγραφικού μήκους. Για να διευλευκανθεί αυτό το ερώτημα, αντίστοιχο πείραμα επαναλήφθηκε με προσομοίωση δύο περιοχών που βρίσκονταν στο ίδιο γεωγραφικό πλάτος, αλλά σε αντίθετες πλευρές του Βόρειου Ατλαντικού ωκεάνιου ρεύματος.

Οι νεοσσοί που εκτέθηκαν σε μαγνητικό πεδίο το οποίο προσομοίαζε περιοχή στη δυτική μεριά του Ατλαντικού, κοντά στο Πουέρτο Ρίκο, κολύμπησαν κατα προσέγγιση βόρειο-ανατολικά. Από την άλλη, οι νεοσσοί που εκτέθηκαν σε μαγνητικό πεδίο που προσομοίαζε περιοχή στην ανατολική μεριά του Ατλάντικου, κοντά στα νησιά του Πράσινου Ακρωτηρίου (Cape Verde islands), κολύμπησαν κατά βάση νοτιοδυτικά (Εικ. 9). Τα αποτελέσματα αυτά, σε συνδυασμό με τα δεδομένα της προηγούμενης έρευνας υποδεικνύουν ότι ο μαγνητικός χάρτης των νεοσσών χρησιμοποιεί πληροφορίες γεωγραφικού πλάτους και αλλά και γεωγραφικού μήκους, ταυτόχρονα (Putman, Endres, Lohmann & Lohmann, 2011).



**Εικ. 9.** (A) Οι νεογέννητες χελώνες εκτέθηκαν στα μαγνητικά πεδία δύο περιοχών με ίδιο γεωγραφικό πλάτος αλλά διαφορετικό γεωγραφικό μήκος (με μαύρες κουκίδες). (B) Η μέση γωνία προσανατολισμού των νεοσσών στην περιοχή του Πουέρτο Ρίκο και στα νησιά του Πράσινου Ακρωτηρίου.

### Ο μαγνητικός χάρτης των νεοσσών και η λειτουργικότητα της 'ενεργούς' πλοήγησης

Τα παραπάνω δεδομένα, υποδεικνύουν ότι οι νεογέννητες χελώνες αξιοποιούν το πεδίο της Γης σαν ένα χάρτη με δύο μαγνητικές συντεταγμένες, οι οποίες παρέχουν πληροφορίες γεωγραφικού πλάτους και μήκους. Παρόλα αυτά, ο ακριβής τρόπος με τον οποίο είναι οργανωμένος ο μαγνητικός χάρτης των νεοσσών δεν είναι ακόμη γνωστός. Κάθε μία από τις μαγνητικές παραμέτρους που μπορούν να αξιοποιήσουν οι νεοσσοί κατά μήκος της μεταναστευτικής τους διαδρομής μπορούν να δώσουν πληροφορίες για το γεωγραφικό πλάτος, αλλά καμία από μόνη της δεν μπορεί να δώσει

πληροφορίες γεωγραφικού μήκους. Επομένως δεν θα πρέπει να υποτεθεί πως οι χελώνες χρησιμοποιούν μία μαγνητική μεταβλητή, αντίστοιχη του γεωγραφικού πλάτους και μία άλλη του γεωγραφικού μήκους. Με βάση μία περισσότερο λογική ερμηνεία, πιθανώς να αξιοποιούνται δύο διαφορετικές μαγνητικές παραμέτρους, η μαγνητική έγκλιση και η συνολική ένταση του πεδίου, οι οποίες μέσω μοναδικών συνδυασμών μεταξύ τους δημιουργούν ‘μαγνητικές υπογραφές’ (magnetic signatures), οι οποίες αν και δεν κωδικοποιούν το γεωγραφικό μήκος και πλάτος ακριβώς, δίνουν πληροφορίες θέσης που αφορούν το πόσο βόρεια ή νότια και πόσο ανατολικά ή δυτικά βρίσκεται μία θέση.

Η αναφορά στον όρο ‘μαγνητικός χάρτης’, παραπέμπει αυτόματα σε κάποια νοητική χωρική αναπαράσταση. Παρόλα αυτά, δεν θα πρέπει να θεωρηθεί ότι οι χελώνες έχουν την ίδια ικανότητα. Είναι πολύ πιθανό οι νεοσσοί να μην έχουν πραγματική αντίληψη της γεωγραφικής τους θέσης και απλά να κινούνται ‘τυφλά’ εντός της μεταναστευτικής τους διαδρομής, ακολουθώντας διαδρομές οι οποίες προέκυψαν ως απόκριση σε συγκεκριμένα μαγνητικά πεδία. Βέβαια, πέρα από την αξιοποίηση των μαγνητικών στοιχείων, σημαντικό ρόλο στη πλοήγηση τους οι χελώνες πιθανώς να αξιοποιούν και άλλες στρατηγικές και στοιχεία, που βοηθούν στην υπερωκεάνια μετανάστευσή τους (Putman, Endres, Lohmann & Lohmann, 2011).

Σύμφωνα με τους Fuxjager και συν., οι απόκρισεις προσανατολισμού των νεογέννητων χελωνών σε συγκεκριμένα μαγνητικά πεδία της μεταναστευτικής διαδρομής, υποδεικνύουν πως η ενεργή πλοήγηση ενέχει κάποια λειτουργική σημαντικότητα η οποία αφορά την επιβίωση. Τα ρεύματα που ακολουθούν οι χελώνες σχηματίζουν δίνες οι οποίες ενδέχεται να εκτοπίσουν τους νεοσσούς από την μεταναστευτική τους διαδρομή και να καθυστερήσουν την άφιξή τους στις περιοχές σίτισης. Στην περίπτωση αυτή, εάν οι νεοσσοί δεν κολυμπήσουν προσανατολισμένα, αλλά παρασυρθούν παθητικά από το ρεύμα, η πιθανότητα να εκτοπιστούν από την διαδρομή και να βρεθούν σε δυσμενείς για την επιβίωση τους περιοχές, αυξάνονται. Μία σχετική περίπτωση προκύπτει κοντά στις παραλίες της Φλόριντα όπου χελώνες οι οποίες παρασύρονται παθητικά, παραμένουν για εβδομάδες στα ρηχά νερά της νοτιοανατολικής ακτής των Η.Π.Α, σε μια επικίνδυνη περιοχή όπου ευδοκούν αρπακτικά πουλιά και ψάρια. Αντιθέτως, εάν οι νεοσσοί κινηθούν ενεργά κολυμπώντας προς την κατεύθυνση στην οποία επιθυμούν να φτάσουν, έχουν μεγαλύτερες

πιθανότητες να παραμείνουν εντός της μεταναστευτικής οδού (Fuxjager, Eastwood & Lohmann, 2011).

Την επίδραση της ενεργούς πλοήγησης των νεοσσών μελέτησε και μία έρευνα προσομοίωσης διαφορετικών συμπεριφορικών σεναρίων. Σύμφωνα με ήδη υπάρχοντα ερευνητικά δεδομένα για την μαγνητική πλοήγηση των νεοσσών, σε ένα από αυτά τα σενάρια οι χελώνες παρασύρονταν παθητικά, ενώ σε ένα άλλο κολυπούσαν για ένα σύντομο χρονικό διάστημα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ακόμη και μικρά διαστήματα προσανατολισμένης πλοήγησης (1-3 ώρες / μέρα) αύξαναν σημαντικά τις πιθανότητες των χελωνών να φτάσουν στον προορισμό τους και να παραμείνουν εντός του μεταναστευτικού ρεύματος. Έτσι, αντί να βασίζονται σε μία ενεργειακά δαπανηρή στρατηγική συνεχόμενης κολύμβησης, οι νεοσσοί μπορούν να πραγματοποιήσουν την μετανάστευση τους με σχετική ευκολία, μέσω σύντομων διαστημάτων προσανατολισμένης κολύμβησης. Με την ελάχιστη αυτή προσπάθεια οι νεοσσοί καταφέρνουν και εισέρχονται σε ρεύματα τα οποία τους παρασέρνουν σε κατάλληλες ωκεάνιες περιοχές (Putman, Verley, Shay & Lohmann, 2012).

#### Ένα εξελικτικά ευέλικτο σύστημα πλοήγησης

Ένα από τα πιο αξιοπρόσεκτα χαρακτηριστικά της μαγνητικής πλοήγησης των νεοσσών είναι ότι συμβαίνει άμεσα, χωρίς καμία προηγούμενη εμπειρία. Όλες οδηγίες για το παρθενικό μεταναστευτικό ταξίδι, είναι γνωστές στις χελώνες μέσω κληρονομικότητας (Collett & Collet, 2011). Βέβαια, οι κληρονομήσιμες πληροφορίες δεν περιλαμβάνουν τα δεδομένα ενός ολοκληρωμένου μαγνητικού χάρτη. Αντίθετα, ένας απλούστερος μηχανισμός είναι η υιοθέτηση μίας σταθερής πορείας (ή μίας συγκεκριμένης αλλαγής του προσανατολισμού) όταν συναντούν τιμές του μαγνητικού πεδίου οι οποίες οριοθετούν την εμβέλεια του είδους (range boundary hypothesis). Επομένως, οι χελώνες έχουν την ευαισθησία να αντιληφθούν μικρές αλλαγές στην μαγνητική έγκλιση και ένταση, δηλαδή κρίσιμες τιμές που ουσιαστικά είναι γενετικά αποτυπωμένες ως ‘σημάδια’ ή σημεία αναφοράς, τα οποία και υποδηλώνουν τα όρια της εμβέλειάς τους (Freake, Muheim, Phillips, 2006).

Αυτή η λειτουργικά χρήσιμη μέθοδος μαγνητικής πλοήγησης έχει μια πιθανή επιπλοκή. Το μαγνητικό πεδίο της γης δεν είναι στατικό, αλλά με τα χρόνια παρουσιάζει μία σταδιακή αλλαγή. Η αλλαγή των στοιχείων του μαγνητικού πεδίου,

γνωστή και ως μαγνητική απόκλιση, σημαίνει πως το μαγνητικό πεδίο μιας συγκεκριμένης περιοχής, δεν θα παραμείνει απαραίτητα σταθερό καθόλη τη διάρκεια ζωής ενός μακρόβιου ζώου (Lohmann, Lohmann & Putman, 2007).

Οι αλλαγές στο μαγνητικό πεδίο της γης σημαίνουν πως, προκειμένου οι επόμενες γενεές να επιβιώσουν το μεταναστευτικό τους ταξίδι, οι κληρονομήσιμες πληροφορίες πρέπει να αλλάζουν, αντίστοιχα. Καθώς στις νεογέννητες χελώνες, η κακή πλοήγηση ισούται με βέβαιο θάνατο, η πιθανότερη εξήγηση σχετικά με τον τρόπο προσαρμογής των νεοσσών σχετίζεται με τις ισχυρές πιέσεις της φυσικής επιλογής. Για παράδειγμα, στις παρούσες συνθήκες, οι χελώνες που θα βγουν εκτός του μεταναστευτικού ρεύματος, θα εξαλειφθούν από τον πληθυσμό, ενώ εκείνες που θα προσανατολιστούν σωστά μένοντας εντός του ρεύματος, θα ευνοηθούν από τη φυσική επιλογή. Παρόμοια, καθώς το μαγνητικό πεδίο μιας περιοχής αλλάζει, μόνο οι χελώνες που θα καταφέρουν να αποκριθούν με τρόπο που θα τους επιτρέψει να μεταναστεύσουν επιτυχώς, θα είναι εκείνες των οποίων τα γονίδια θα περάσουν στις επόμενες γενιές (Lohmann, Putman & Lohmann, 2012).

Όσον αφορά την κληρονομική προσαρμοστικότητα των χελωνών, τα ευρήματα της ανασκόπησης των Lohmann και συν. (2015) επιβεβαιώνουν την υπόθεση, ότι οι νεογέννητες χελώνες αποτυπώνουν τα μοναδικά γεωμαγνητικά χαρακτηριστικά της περιοχής που γεννήθηκαν, ώστε να μπορούν έπειτα να ξαναγυρίσουν σ' αυτήν. Συγκεκριμένα, βρέθηκε ότι η πυκνότητα ωτοκίας αυξανόταν σημαντικά σε παραλίες, όπου οι γραμμές της μαγνητικής έγκλισης γειτονικών παραλιών συγκλίνουν μέσα στο χρόνο, ενώ αντίστοιχα, μείωση ωτοκίας σημειωνόταν ύστερα από απόκλιση των γραμμών μαγνητικής έγκλισης.

Συνεπώς, οι αλλαγές στην πυκνότητα ωτοκίας σε περιοχές που τα ιδιαίτερα γεωμαγνητικά χαρακτηριστικά παρουσιάζουν απόκλιση, επιβεβαιώνουν ότι οι χελώνες αποτυπώνουν και αξιοποιούν γεωμαγνητικά στοιχεία της περιοχής ωτοκίας τους ώστε να ξαναγυρίσουν σ' αυτή. Όσον αφορά την κληρονομική προσαρμοστικότητα στις μαγνητικές αλλαγές που συμβαίνουν στα σημεία αναφοράς της μεταναστευτικής διαδρομής, εικάζεται ότι διαμεσολαβεί η διαδικασία της φυσικής επιλογής (Roger Brothers & Lohmann, 2015).

### Η μαγνητική πλοήγηση νεαρών θαλάσσιων χελωνών

Ύστερα από μερικά χρόνια παραμονής τους στον ωκεανό, οι νεαρές καρέττα και πράσινες (*Chelonia mydas*) χελώνες φτάνουν σε ένα στάδιο ανάπτυξης κατά το οποίο εγκαταλείπουν το ωκεάνιο τους περιβάλλον και μετακινούνται σε περιοχές σίτισης οι οποίες βρίσκονται σε ρηγά νερά, συνήθως κατά μήκος της ακτογραμμής. Κατά τη μετάβαση τους αυτή από την ωκεάνια στη νηριτική<sup>1</sup> φάση οι νεαρές χελώνες αν και δεν είναι ακόμη έτοιμες για αναπαραγωγή, επιλέγουν ένα συγκεκριμένο τόπο σίτισης στον οποίο τείνουν να επιστρέφουν συνεχώς, είτε ύστερα από εποχιακές μεταναστεύσεις ή κατά τη διάρκεια μελετών. Τόσο συγκεκριμένες μετακινήσεις προϋποθέτουν ότι οι χελώνες διαθέτουν την ικανότητα να αναγνωρίζουν την θέση τους σε σχέση με το στόχο που θέλουν να φτάσουν, πράγμα το οποίο θα μπορούσε να επιτευχθεί αξιοποιώντας μαγνητικό χάρτη (Lohmann, Luschi, Hays, 2008).

Σε μία από τις μελέτες που προσπάθησε να ερευνήσει την ύπαρξη μαγνητικού χάρτη σε νεαρές πράσινες χελώνες, χρησιμοποιήθηκαν και πάλι πλατφόρμες προσομοίωσης μαγνητικού πεδίου, καθώς το μέγεθος των χελωνών στο αναπτυξιακό αυτό στάδιο δεν αποτελεί πρόβλημα για αυτή τη μέθοδο. Χελώνες που βρέθηκαν στις περιοχές σίτισης της Φλόριντα, εκτέθηκαν στα μαγνητικά πεδία περιοχών που βρίσκονταν 337χλμ βόρεια και νότια από την παραλία σίτισης. Οι αποκρίσεις προσανατολισμού των χελωνών σε κάθε περίπτωση θα τις βοηθούσε να επιστρέψουν στο σημείο σίτισης.

Παρόμοια αποτελέσματα είχε και μία δεύτερη έρευνα, όπου χελώνες καρέττα και πράσινες χελώνες εκτοπίστηκαν 30-167 χλμ από περιοχές σίτισης και μεταφέρθηκαν σε πλατφόρμες προσανατολισμού οι οποίες κατέγραφαν την κατεύθυνση τους. Καθώς η πραγματοποίηση της έρευνας έγινε στο διάστημα μεταξύ Μαΐου και Νοεμβρίου, οι αποκρίσεις προσανατολισμού των χελωνών επέδειξαν εποχιακές διαφορές. Από τον Μάιο έως τον Σεπτέμβριο οι αποκρίσεις προσανατολισμού κατά την εκτόπιση από τις περιοχές σίτισης έδειξαν πώς οι νεαρές χελώνες διαθέτουν ικανότητα παλλινόστησης. Αντιθέτως, όταν οι χελώνες εκτοπίστηκαν κατά τον Οκτώβριο και Νοέμβριο, οι

---

<sup>1</sup> Νηριτική Φάση: Περίοδος της ζωής των χελωνών κατά την οποία διαμένουν σε ρηγά νερά, κυρίως κοντά στις ακτές.

αποκρίσεις προσανατολισμού τους ήταν σύμφωνες με την κατεύθυνση που θα τις οδηγούσε εντός της διαδρομής για την φθινοπωρινή τους μετανάστευση.

Τα αποτελέσματα αυτών των ερευνών κατέληγουν στο συμπέρασμα, ότι οι νεαρές χελώνες διαθέτουν ένα μαγνητικό χάρτη, ο οποίος τους επιτρέπει να εκτιμήσουν τη θέση τους σε σχέση με κάποιο συγκεκριμένο γεωγραφικό προορισμό. Μάλιστα, η ικανότητα να επιδείξουν προσανατολισμό παλλινόστησης αλλά και μετανάστευσης, ταυτόχρονα, αποδεικνύει ότι, καθώς οι χελώνες ωριμάζουν, αξιοποιούν τις πληροφορίες του μαγνητικού χάρτη με όλο και περισσότερο πολύπλοκο τρόπο απ'ότι οι νεογέννητες χελώνες. Αξιοσημείωτο είναι επίσης, ότι οι εποχιακές διαφορές προσανατολισμού που σημειώθηκαν κατά τους φθινοπωρινούς μήνες, είναι έντονα παρόμοιες με την αντίστοιχη συμπεριφορά που επιδεικνύουν τα αποδημητικά πουλιά την περίοδο της μετανάστευσης (Lohmann, Lohmann, Ehrhart et al., 2004. Avens & Lohmann, 2004).

#### Η μαγνητική πλοήγηση ενήλικών θαλάσσιων χελωνών

Στην μελέτη των Luschi και συν. 20 ενήλικες θηλυκές πράσινες χελώνες (*Chelonia mydas*) εκτοπίστηκαν σε 4 διαφορετικά σημεία της ανοιχτής θάλασσας, τα οποία βρίσκονταν 100-120 χλμ από την παραλία ωτοκίας στο νησί Mayotte, στο κανάλι του Μοζαμπικ. Σε 13 από τις χελώνες τοποθετήθηκε ισχυρός μαγνήτης στο κεφάλι τους είτε κατά την εκτόπιση ή κατά το ταξίδι της επιστροφής. Ο μαγνήτης ήταν τοποθετημένος με τρόπο ώστε να μπορεί να πραγματοποιήσει μικρές τυχαίες ταλαντώσεις οι οποίες θα εξασφάλιζαν ότι ο μαγνητική αίσθηση των χελωνών θα παρέμενε αποσυντονισμένη.

Η ανακατασκευή της διαδρομής έγινε με χρήση δορυφορικής τηλεμετρίας και βρέθηκε ότι, εκτός από μία χελώνα, όλες οι υπόλοιπες κατάφεραν να βρουν τον δρόμο της επιστροφής για το νησί Moyotte, παρά το γεγονός ότι οι διαδρομές που ακολούθησαν ήταν περίπλοκες. Οι χελώνες στις οποίες είχαν τοποθετηθεί μαγνήτες είτε κατά την εκτόπιση ή κατά την επιστροφή τους, ακολούθησαν μια σημαντικά μεγαλύτερη διαδρομή παλλινόστησης σε σχέση με τις χελώνες της ομάδας ελέγχου.

Τα ευρήματα της έρευνας αποτελούν τα πρώτα αποδεικτικά στοιχεία σε μελέτη πεδίου που επιβεβαιώνουν ότι το γεωμαγνητικό πεδίο παρέχει σημαντικά, όχι όμως

απόλυτα απαραίτητα, στοιχεία για την παλιννόστηση των χελωνών μετά από εκτόπισή τους (Luschi, Benhamou, Girard, Ciccione, Roos, Sudre et al., 2007).

Σε μια παρόμοια ερευνητική προσπάθεια που έλαβε μέρος μερικά χρόνια αργότερα, 24 πράσινες χελώνες εκτοπίστηκαν 200 μέτρα από την παραλία ωοτοκίας και για πρώτη φορά ο εντοπισμός τους έγινε με χρήση του παγκόσμιου συστήματος εντοπισμού θέσης (GPS) το οποίο μπορεί να παρέχει πληροφορίες θέσης με μεγαλύτερη ακρίβεια και συχνότητα.

Η έρευνα αποτελούνταν από δύο (2) πειραματικές ομάδες. Η πρώτη αποτελούνταν από 8 χελώνες που ακόμη βρίσκονταν στην παραλία ωοτοκίας, στις οποίες τοποθετήθηκαν μαγνήτες για 24-48ώρες πριν την εκτόπιση. Στις 8 χελώνες της δεύτερης ομάδας, τοποθετήθηκε μαγνήτης στο κεφάλι τους κατά την ελευθέρωση τους στο σημείο εκτοπισμού, ενώ οι τελευταίες 8 αποτέλεσαν την ομάδα ελέγχου.

Λεπτομερείς αναλύσεις των διαδρομών παλιννόστησης, έδειξαν ότι οι χελώνες της πρώτης ομάδας κατάφεραν να επιστρέψουν στην παραλία ωοτοκίας τόσο αποτελεσματικά όσο και οι χελώνες της ομάδας ελέγχου. Αντίθετα, στη δεύτερη ομάδα, η ικανότητα πλοήγησης των χελωνών επηρεάστηκε σημαντικά όταν έφτασαν 50 χλμ. από τον προορισμό τους.

Συμπερασματικά, οι πράσινες χελώνες φαίνονται να μην χρειάζονται γεωμαγνητικά στοιχεία για να πλοηγηθούν όταν βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση από ένα στόχο. Αυτά όμως καθίστανται αναγκαία όταν φτάσουν σε απόσταση 50 χλμ. από αυτόν. Αυτό το εύρημα, υπάρχει πιθανότητα να σχετίζεται άμεσα και με την υπόθεση αποτύπωσης των μαγνητικών χαρακτηριστικών της περιοχής εκκόλαψης.

Υπό αυτό το πρίσμα, οι χελώνες ακολουθούν τρεις (3) διαδοχικές μεθόδους ώστε να πλοηγηθούν στις μεγάλες αποστάσεις της ανοιχτής θάλασσας. Αρχικά χρειάζονται μία μη μαγνητική μέθοδο μεγάλης κλίμακας, η οποία θα τις οδηγήσει από την ευρύτερη θαλάσσια περιοχή σε μία σχετικά κοντινότερη απόσταση από το στόχο. Έπειτα, γίνεται μετάβαση σε μία μεσαίας κλίμακας μαγνητική διαδικασία κατά την οποία αξιοποιούνται τα ιδιαίτερα μαγνητικά χαρακτηριστικά της περιοχής ωοτοκίας, τα οποία για τις χελώνες είναι ήδη γνωστά και προβλέψιμα, μετά από επανειλημμένες μετακινήσεις σ' αυτήν. Τέλος, μία μικρής κλίμακας μέθοδος (βασισμένη σε οπτικές / αιολικές ενδείξεις), χρησιμοποιείται ώστε να εντοπιστεί η ακριβής θέση του στόχου.



Ως ενδιάμεση μέθοδος, η χρήση μαγνητικών στοιχείων πιθανών να παίζει βασικό ρόλο στη γεφύρωση των άλλων δύο μη μαγνητικών μεθόδων πλοήγησης (Benhamou, Sudre, Bourjea, Ciccione, De Santis & Luschi, 2011).

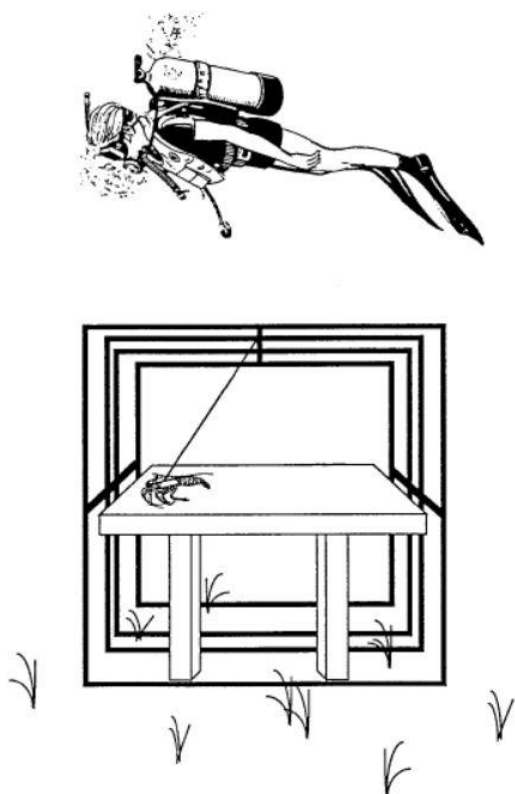
## 2.2 Ερευνητικά δεδομένα για τον αγκαθωτό αστακό του Ατλαντικού (*Panulirus argus*)

Το είδος αγκαθωτού αστακού Atlantic spiny lobster ή *Panulirus argus*, του οποίου περιοχή κατοικίας εκτείνεται από την Βραζιλία έως τις Βερμούδες, μέχρι και τα 10 χλμ. από την ακτή, πραγματοποιεί μια ετήσια μαζική μετανάστευση κατά την οποία χιλιάδες άτομα του είδους μετακινούνται από παράκτιες σε θαλάσσιες περιοχές. Η μετακίνηση τους αποτελεί ιδιαίτερο φαινόμενο καθώς πραγματοποιείται ως μία πομπή κατά την οποία όλοι οι αστακοί κινούνται σε μία σειρά ακολουθώντας τον ‘αρχηγό’.

Σύμφωνα με παλαιότερες θεωρήσεις, ζώα με τόσο απλό νευρικό σύστημα δεν διαθέτουν την ικανότητα για πολύπλοκες δραστηριότητες όπως η μαγνητική πλοήγηση. Παρόλα αυτά, σύμφωνα με νεότερα ευρήματα, το συγκεκριμένο είδος αστακών αποτελεί το μοναδικό ασπόνδυλο που έχει παρατηρηθεί ότι μπορεί να αξιοποιήσει μαγνητικό προσανατολισμό (Butler, Cockcroft et al., 2013).

Τα πρώτα πειράματα, τα οποία έγιναν το 1992 και 1993, πραγματοποιήθηκαν εντός του θαλάσσιου υποστρώματος, και αστακοί που βρέθηκαν σε ύφαλο της Φλόριντα (Three sisters reef) μεταφέρθηκαν με κλεισμένα τα μάτια σε μια υποβρύχια πλατφόρμα. Η πλατφόρμα περιβάλλονταν από πηνία, η λειτουργία των οποίων ελέγχονταν εκτός θαλάσσης. Οι μετρήσεις γίνονταν από δύτη ο οποίος παρατηρούσε τις κινήσεις των αστακών σε κάθε συνθήκη (Εικ. 10). Στην πρώτη συνθήκη πραγματοποιήθηκε αντιστροφή της οριζόντιας συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου ενώ στη δεύτερη συνθήκη αντιστροφή της κάθετης συνιστώσας.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι αστακοί έχουν πυξίδες απλής πολικότητας (simple polarity compass), δηλαδή μπορούν να αντιληφθούν μόνο τα 4 σημεία του ορίζοντα (Βορρά-Νότο-Ανατολή-Δύση) και κατά πάσα πιθανότητα χρησιμοποιούσαν αυτό το σύστημα για να μην βγαίνουν προς την ξηρά και να μπορούν να ταξιδεύουν σε ευθείες γραμμές (Lohmann, Pentcheff, Nevitt, Stetten, Zimmer-Faust, Jarrard et al., 1995).



*Εικ. 10. Δύτης παρακολουθεί τον προσανατολισμό ενός αστακού, ο οποίος βρίσκεται δεμένος εντός της υποβρύχιας πλατφόρμας που περιβάλλεται από συστήματα πηνίου.*

Σε επόμενες έρευνες οι οποίες διεξήχθησαν το 2002 και 2003 σε αστακούς του ίδιου είδους ανακαλύφθηκε ότι διαθέτουν πιο ανεπτυγμένα συστήματα μαγνητικής πλοήγησης (true navigation) δηλαδή όχι μόνο αντιλαμβάνονται τα 4 σημεία του ορίζοντα, αλλά μπορούν να πλοηγηθούν στον τρισδιάστατο χώρο χρησιμοποιώντας αποκλειστικά την μαγνητική πλοήγηση καθώς και να γνωρίζουν την ακριβή τους θέση και την θέση του προορισμού τους. Τα πειράματα αυτά διαφέρουν στη μεθοδολογία από τα πειράματα του 1993 και 1994.

Η μελέτη πραγματοποιήθηκε ως μία σειρά από δύο (2) διαφορετικές πειραματικές δοκιμές. Στην πρώτη δοκιμή οι αστακοί εκτοπίστηκαν από δύο διαφορετικά σημεία και τοποθετήθηκαν σε δύο πειραματικές δεξαμενές η μία Βόρεια και η άλλη Νότια από το σημείο εκτοπισμού. Όλες οι θέσεις βρίσκονταν σε αποστάσεις 12-18 χλμ. μεταξύ τους και οι αστακοί κλήθηκαν να προσανατολιστούν αφού στερήθηκαν κάθε οπτικό ερέθισμα. Σε κάθε περίπτωση οι αστακοί κινήθηκαν προς

κατευθύνσεις που θα τους βοηθούσαν να επιστρέψουν στην περιοχή από την οποία εκτοπίστηκαν.

Σύμφωνα με την πρώτη δοκιμή οι αστακοί αξιοποιούν το μαγνητικό πεδίο για να προσανατολιστούν. Παρόλα αυτά ο μαγνητικός προσανατολισμός προϋποθέτει ότι οι πληροφορίες θέσης λαμβάνονται από διαθέσιμα τοπικά στοιχεία και όχι αξιοποιώντας πληροφορίες που συλλέχθηκαν κατά το ταξίδι μετάβασης. Η δεύτερη δοκιμή είχε σκοπό να ελέγξει εάν οι αστακοί μπορούν να επιστρέψουν στην αρχική τους θέση όταν κατά τον εκτοπισμό αποκλειστούν όλα τα αισθητικά αλλά και μαγνητικά στοιχεία.

Καθόλη τη διάρκεια του ταξιδιού εκτοπισμού χρησιμοποιήθηκαν μαγνήτες, αρκετά ισχυροί ώστε να αποτρέψουν την ευθυγράμμιση της πυξίδας. Παρόλα αυτά οι αστακοί ήταν και πάλι ικανοί να πλοηγηθούν σωστά προς την αρχική τους θέση, πράγμα το οποίο αποδεικνύει πως πληρούν τα κριτήρια για πραγματική μαγνητική πλοήγηση (Boles & Lohmann, 2003).

Και στα δύο αυτά πειράματα, παρατηρήθηκε ότι νεαροί-ανώριμοι αστακοί ήταν λιγότερο πρόθυμοι να γυρίσουν στην αρχική τους θέση, σε σύγκρισή με τους μεγαλύτερους σε ηλικία. Επίσης στο 2ο πείραμα, παρατηρήθηκε, ότι οι αστακοί έχουν εξαιρετική ευαισθησία ακόμη και στις πολύ μικρές αλλαγές του μαγνητικού πεδίου και αντιδρούσαν σε αυτές αγνοώντας την πραγματική τους θέση.

Παρότι το σύστημα που δίνει στον αστακό αυτήν την ικανότητα δεν μπορεί να προσδιοριστεί ακριβώς από τα μέχρι τώρα πειράματα, υπάρχουν κάποιες θεωρίες βασισμένες σε παρατηρήσεις, οι οποίες μπορούν να εξηγήσουν εν μέρει αυτή την ικανότητα. Αρχικά, έχει παρατηρηθεί ότι στον εγκεφαλοθώρακα του συγκεκριμένου αστακού υπάρχουν μαγνητικά σωματίδια τα οποία είναι διαταγμένα σε συγκεκριμένο γεωμετρικό σχηματισμό, ο οποίος συναντάται σε όλα τα άτομα του είδους.

Αυτοί οι γεωμετρικοί σχηματισμοί προσδίδουν στον αστακό την ικανότητα να αντιλαμβάνεται τον Βορρά και τον Νότο (δηλαδή την μαγνητική πυξίδα) χρησιμοποιώντας ένα μοναδιαίο μαγνητικό χαρακτηριστικό (όπως την μαγνητική έγκλιση ή τη συνολική ένταση του πεδίου) το οποίο διαφοροποιείται κατά την διεύθυνση Βορρά-Νότου δίνοντας του έτσι την ικανότητα να δημιουργεί χάρτη μίας συντεταγμένης. Παρόλα αυτά, αυτός ο χάρτης και αυτό το νευρωνικό σύστημα δεν δικαιολογεί την ικανότητα του αστακού να προσανατολίζεται προς το μέρος από το

οποίο μετατοπίστηκε αρχικά. Αυτό μας οδηγεί στην αντίληψη ότι κατά πάσα πιθανότητα ο αστακός θα πρέπει να βασίζεται σε πλοήγηση διπλής συντεταγμένης, είτε ανιχνεύοντας δύο διαφορετικά μαγνητικά χαρακτηριστικά, είτε ανιχνεύοντας ένα άγνωστο, μη μαγνητικό στοιχείο που χρησιμεύει σαν δεύτερη συντεταγμένη. Εναλλακτικά, οι αστακοί μαθαίνουν την τοπική μαγνητική τοπογραφία και εκμεταλλεύονται χαρακτηριστικά, όπως η μαγνητική εκτόνωση<sup>2</sup>. Συμπερασματικά, μπορεί να ειπωθεί, ότι οι αστακοί είναι πράγματι ικανοί να αξιοποιούν έναν πραγματικό (μαγνητικό) χάρτη πλοήγησης (Jeffs, Montgomery & Tindle, 2005. Lohmann, Pentcheff, Nevitt, Stetten, Zimmer-Faust, Jarrard et al., 1995. Boles & Lohmann, 2003).

### 2.3 Ερευνητικά δεδομένα για τον Ανατολικό τρίτωννα (*Notophthalmus viridescens*)

Μία ενδιαφέρουσα κατηγορία ζώων για την μελέτη της ύπαρξης μαγνητικής πλοήγησης είναι τα αμφίβια. Το 95% των αμφίβιων ειδών του πλανήτη, έχει μικρότερη μεταναστευτική εμβέλεια από 2 χιλιόμετρα, οπότε, εάν τα αμφίβια διαθέτουν σύστημα μαγνητικής πλοήγησης, θα πρέπει να υποθέσουμε ότι είναι ένα σύστημα αντίληψης του μαγνητικού πεδίου μεγάλης ακρίβειας, καθώς η μαγνητική έγκλιση ανά χιλιόμετρο είναι μικρότερη από 0.01°. Σε εκτενή πειράματα που έγιναν ανά τα χρόνια, παρατηρήθηκε ότι τα ουροδελή αμφίβια, σε αντίθεση με τα άνουρα, παρουσιάζουν την ικανότητα μαγνητικής πλοήγησης. Πιο συγκεκριμένα, η ικανότητα μαγνητικής πλοήγησης παρατηρήθηκε στο είδος τρίτωννα με κόκκινη κοιλιά ή red-bellied newt (*Taricha rivularis*), στον Αλπικό τρίτωννα (*Ichthyosaura alpestris*) και στον Ανατολικό τρίτωννα (*Notophthalmus viridescens*), ενώ στα είδη Northern crested newt (*Triturus cristatus*) και Smooth newt (*Lissotriton vulgaris*) ήταν απύσχα. Όμως κανένα από τα πειράματα που έδωσαν δεδομένα για την ικανότητα μαγνητικής πλοήγησης του Αλπικού τρίτωννα και του τρίτωννα με κόκκινη κοιλιά δεν κατάφεραν να επιβεβαιωθούν από νεότερες μελέτες. Το μόνο είδος, που σε μελέτη του 2015, επιβεβαιώθηκε ότι διαθέτει μαγνητική πλοήγηση ήταν ο Ανατολικός τρίτωννας (Sinsch & Kirst, 2015).

---

<sup>2</sup> Μαγνητική εκτόνωση: Παρόμοιο με τα γεωγραφικά ορόσημα (landmarks) αλλά υφίστανται μόνο σε μαγνητικό πεδίο. Στα αγγλικά χαρακτηρίζεται ως 'μαγνητική ανακούφιση' (magnetic relief), καθώς αποτελεί μια μικρή διαφοροποίηση σε ένα, κατά τ' άλλα, απέραντα ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο.

Πιο συγκεκριμένα σε μελέτες που έγιναν το 1999-2000, οι οποίες προσπάθησαν να καλύψουν σημαντικά κενά προηγούμενων ερευνών, ώστε να δώσουν πιο αξιόλογα αποτελέσματα, ερευνήθηκε η ικανότητα του Ανατολικού τρίτωνα (*Notophthalmus viridescens*) να πραγματοποιεί μαγνητική πλοήγηση. Χρησιμοποιώντας τις διαθέσιμες τεχνολογίες εκείνης της περιόδου, ήταν σε θέση να ελέγξουν μόνο μία παράμετρο του μαγνητικού πεδίου, διατηρώντας σταθères όλες τις υπόλοιπες. Αυτό έδωσε την δυνατότητα πραγματοποίησης περισσότερο ξεκάθαρων παρατηρήσεων και οδήγησε σε μία σειρά υποθέσεων, οι οποίες αν ισχύαν, θα αποτελούσαν ισχυρή απόδειξη για την ύπαρξη μαγνητικής πλοήγησης στο συγκεκριμένο είδος.

Η πρώτη υπόθεση πραγματευόταν πως, εάν εφαρμοστούν μαγνητικές συνθήκες, αντιδιαμετρικές από εκείνες του τόπου κατοικίας του Ανατολικού τρίτωνα, θα πρέπει να παρατηρηθούν αντίστροφες κατευθύνσεις παλλινόστησης, σύμφωνες με τις εφαρμοσμένες μαγνητικές παραμέτρους. Κάτι το οποίο και παρατηρήθηκε, σε ποσοστό 95% του είδους. Επιπρόσθετα, οι παρατηρήσεις της προηγούμενης περίπτωσης θα πρέπει να είναι ανεπηρέαστες από άλλες μορφές προσανατολισμού, κάτι που παρατηρήθηκε άμεσα κατά τη διάρκεια του 1<sup>ου</sup> πειράματος.

Η επόμενη υπόθεση ανέφερε ότι οι ενδείξεις αλλαγής προσανατολισμού του Ανατολικού τρίτωνα θα πρέπει να είναι πιο εμφανής κοντά στις μαγνητικές τιμές του τόπου κατοικίας. Παρόλα αυτά, σχετικά πειράματα δεν έχουν ολοκληρωθεί.

Η τελευταία υπόθεση παρέθετε πως οι τροποποιήσεις στα μαγνητικά χαρακτηριστικά του τόπου κατοικίας, θα επέφεραν και αλλαγές στον προσανατολισμό παλλινόστησης των τριτώνων. Κάτι τέτοιο δεν ήταν δυνατό να ερευνηθεί διότι δεν υπάρχουν επαρκή και αναλυτικά δεδομένα του μαγνητικού χάρτη της περιοχής κατοικίας των υποκειμένων.

Επιπρόσθετα χαρακτηριστικά που δίνουν πληροφορίες για την πλοήγηση των τριτώνων, ενώ ταυτόχρονα παρέχουν στοιχεία που σχετίζονται με την αξιοποίηση του μαγνητικού χάρτη από το συγκεκριμένο είδος, είναι διαθέσιμα από παλαιότερα ερευνητικά δεδομένα.

Ο ανατολικός τρίτων όντας μεταναστευτικό είδος, αφήνει τη συνήθη κατοικία του για να αποφύγει συνθήκες ξηρασίας. Όταν επιστρέψει, κατά τη περίοδο αναπαραγωγής, μετατοπίζει τον προσανατολισμό του από προσάκτιο σε παλλινοστησιακό (ιδιαίτερα τα αρσενικά). Σε μελέτες κατά τις οποίες υπήρξε

απόκρυψη διαδρομής (από όλες τις αισθητήριες πληροφορίες ακόμη κι τις μαγνητικές) αποδείχτηκε ότι ο προσανατολισμός παλλινόστησης των Ανατολικών τριτώνων στο σημείο μετατόπισης εμπεριείχε την γνώση των τοπικών μαγνητικών χαρακτηριστικών.

Επίσης οι ενήλικες Ανατολικοί τρίτωνες δύναται να διαθέτουν δύο ανεξάρτητα συστήματα μαγνητικής αντίληψης. Μία πυξίδα που βασίζεται στην αντίληψη του φωτός, πιθανότατα μέσω φωτοαισθητικού μηχανισμού και ένα μη βασιζόμενο στο φως μηχανισμό, ο οποίος λειτουργεί με μόνιμο μαγνητικό υλικό. Αυτό το δευτερεύον σύστημα, βοηθά το ζώο να γνωρίζει την ακριβή του θέση κάθε στιγμή, λειτουργώντας έτσι και ως προσθήκη στον μαγνητικό χάρτη.

Ακόμη, έγινε εμφανές ότι οι τρίτωνες χρησιμοποιούν για την πλοήγηση τους και την αναγνώριση της θέσης τους μαγνητικά ορόσημα, δηλαδή πολύ έντονα και μοναδικά γεωμαγνητικά χαρακτηριστικά μιας περιοχής.

Τέλος, μετά από σύγκριση με νεαρό αμερικάνικο αλιγάτορα (*Alligator mississippiensis*), που είναι αμφίβιο ερπετό και ουροδελές και όπως ο ανατολικός τρίτωνας, φάνηκε πως η ακτίνα στην οποία κινείται είναι παρόμοια με την ακτίνα των ενήλικων ανατολικών τριτώνων. Συμπερασματικά, είναι πιθανό η μαγνητική εγκλιση και οριζόντια ένταση (horizontal intensity) την οποία είναι γνωστό ότι χρησιμοποιεί το συγκεκριμένο είδος αλιγάτορα για να μετακινείται σε κοντινές αποστάσεις, να χρησιμοποιεί αντίστοιχα και ο ανατολικό τρίτωνας.

Ένα βασικό ερώτημα το οποίο καλούνται να απαντήσουν όσοι κάνουν έρευνες σε ζώα που διαθέτουν ή που δύναται να διαθέτουν μαγνητική πλοήγηση, είναι για τα ζώα αυτά χρησιμοποιούν χάρτες μονής ή διπλής συντεταγμένης. Όσον αφορά συγκεκριμένα τους ανατολικό τρίτωνες, υπάρχουν πολλοί παράγοντες οι οποίοι υποδεικνύουν τη χρήση 2 παραγόντων. Αρχικά, πειράματα έδειξαν μεγάλης ακρίβειας προσδιορισμού θέσης που είναι απίθανος να συμβεί χρησιμοποιώντας μόνο μία μεταβλητή. Παράλληλα, εναλλακτικές στρατηγικές που συνδυάζουν χάρτες μονής συντεταγμένης με μη μαγνητικές πληροφορίες (π.χ. ενσωμάτωση διαδρομής) είναι μη ικανοποιητικές καθώς η στέρηση αντίληψης της διαδρομής δεν είχε επίδραση στην μαγνητική πλοήγηση. Ταυτόχρονα, οι αλλαγές στη μαγνητική εγκλιση κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων, ήταν εξαιρετικά μεγάλες πέρα από οτιδήποτε είχε ή έχουν βιώσει οι τρίτωνες στο φυσικό τους περιβάλλον, καθιστώντας τους ανίκανους να πλοηγηθούν στον τόπο κατοικίας τους μέσω οικείων μαγνητικών ορόσημων.

Συμπερασματικά, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των ερευνών, οι τρίτωνες χρησιμοποιούν χάρτη δύο συνεταγμένων - η μαγνητική έγκλιση προσδιορίστηκε ως η μία από αυτές (Fisher, Freake, Borland & Phillips, 2001).

Συμπληρωματικά μια ενδιαφέρουσα έρευνα η οποία έγινε το 1999 μελέτησε μία πρόταση των βιοφυσικών μοντέλων η οποία προτείνει ότι το γεωμαγνητικό πεδίο αλληλεπιδρά με φωτοαισθητήρες. Κατά τη διάρκεια πειραματικών διαδικασιών κατά τις οποίες οι Ανατολικοί τρίτωνες εκτέθηκαν σε φως μεγάλου μήκους κύματος, ο προσάκτικος προσανατολισμός τους άλλαξε κατά  $90^{\circ}$  χωρίς να έχει γίνει καμία αλλαγή στο μαγνητικό πεδίο και στις άλλες πειραματικές συνιστώσες. Με βάση αυτήν την απόκριση φάνηκε πως οι συγκεκριμένοι τρίτωνες χρησιμοποιούν ένα είδος φωτοεξαρτώμενου μαγνητικού προσανατολισμού, του οποίου το νευρωνικό κέντρο εντοπίζεται στο επιφυσιακό σύμπλεγμα (Geim, Simon, Boamfa & Heflinger, 1999).

#### 2.4 Ερευνητικά δεδομένα για τα πτηνά

Τα πτηνά, και πιο συγκεκριμένα να μεταναστευτικά πτηνά, εμφανίζουν τις περισσότερες ενδείξεις, ανά τα διαφορετικά τους είδη, μαγνητικής πλοήγησης. Τα πουλιά από τα αρχαία χρόνια ήταν γνωστό ότι είναι εξαιρετικοί πλοηγοί και κάποια είδη χρησιμοποιήθηκαν ακόμη και από τους ανθρώπους για τη μεταφορά μηνυμάτων εξαιτίας της, σχεδόν τέλειας, πλοηγητικής τους ικανότητας. Παρότι δεν έχουν γίνει έρευνες σε όλα τα είδη των μεταναστευτικών πτηνών, εικάζεται, λόγω συμπεριφορικής ομοιότητας μεταξύ των περισσοτέρων, ότι η πλειονότητα τους διαθέτει σύστημα πραγματικής μαγνητικής πλοήγησης. Παρακάτω θα γίνει αναφορά σε 5 ενδεικτικά είδη μεταναστευτικών πουλιών τα οποία έχουν μελετηθεί ευρέως από επιστήμονες και έχουν υποβληθεί σε πολυάριθμα πειράματα και διαδικασίες, αποδεικνύοντας την ικανότητά τους για μαγνητική πλοήγηση. Τα πέντε (5) αυτά είδη αναφορικά είναι τα εξής: Παρδαλός μυγοχάφτης (*Ficedula hypoleuca*), τσιγλαηδόνι (*Luscinia luscinia*), ευρωπαϊκός κοκκινολαίμης (*Erithacus rubecula*), ευρωπαϊκό ψαρόνι (*Sturnus vulgaris*) και ταχυδρομικό περιστέρι (*Columba livia domestica*) [Bingman & Cheng, 2005].

Πιο συγκεκριμένα, ο μυγοχάφτης και το τσιγλαηδόνι έχουν εξαιρετικό ενδιαφέρον, καθώς πειράματα εκτόπισης αιχμαλωτισμένων ομάδων του εκάστοτε είδους μας έδειξαν δύο εντελώς διαφορετικούς διακεκριμένους τρόπους πλοήγησης, οι

οποίοι είναι εμφανείς και σε άλλα πουλιά συγγενών ειδών. Ο μυγοχάφτης έδειξε ότι χρησιμοποιεί μία μίξη εσωτερικού χρονικού προγραμματισμού (βασισμένο στον κερκαδιανό ρυθμό του πουλιού) και μαγνητικών παραμέτρων, πιο συγκεκριμένα, μαγνητικής πυξίδας. Όταν, δηλαδή, έφτασε η στιγμή της μετανάστευσης, ο κερκαδιανός του ρυθμός ενεργοποίησε τον χρονικό προγραμματισμό, που σε συνδυασμό με την μαγνητική πυξίδα (που από εδώ και πέρα θα ονομάζεται μηχανισμός ρολόι-πυξίδα) αναγκάσε τα πτηνά να πετάνε ανά συγκεκριμένα διαστήματα, σε διαδρομές προκαθορισμένης διάρκειας και κατεύθυνσης, έτσι ώστε να φτάσουν στον επιθυμητό προορισμό τους. Άλλες εξωγενείς παρεμβολές, όπως για παράδειγμα αλλαγές στην ένταση του μαγνητικού πεδίου δεν φάνηκαν να επηρεάζουν σε κανένα βαθμό την όλη διαδικασία μετανάστευσης. Ένα επιπρόσθετο χαρακτηριστικό της μεταναστευτικής διαδικασίας του μυγοχάφτη είναι ότι αυτός ο μηχανισμός (ρολόι-πυξίδα) μπορεί να χωρίζει τη μεταναστευτική διαδικασία του πτηνού σε μεταναστευτικά βήματα, κάνοντας το έτσι να παραμένει για σημαντικά χρονικά διαστήματα σε διάφορες περιοχές (σταθμούς) μέχρι ως ότου να περάσει συγκεκριμένο χρονικό διάστημα για να συνεχίσει το ταξίδι του.

Αντίθετα με τον μυγοχάφτη, το τσιχλαηδόνι χρησιμοποιεί συγκεκριμένα τοπικά γεωμαγνητικά πεδία ή καλύτερα, μία αλληλουχία από συγκεκριμένα τοπικά μαγνητικά πεδία που συναντάει φυσιολογικά κατά τη διάρκεια του ταξιδιού προς το σημείο μετανάστευσης. Τα πεδία αυτά, εκτός του ότι οδηγούν το πτηνό στο σημείο μετανάστευσης, πυροδοτούν και αλλαγές στην συμπεριφορά και στη φυσιολογία των πτηνών με αποτέλεσμα, για παράδειγμα, κάποια πτηνά που θα αναγκαστούν να περάσουν ερήμους στο ταξίδι τους προς την περιοχή μετανάστευσης, πριν φτάσουν σε αυτές να έχουν ήδη προετοιμαστεί παίρνοντας βάρος.

Όταν το τσιχλαηδόνι υποβλήθηκε σε τεχνητές αλλαγές στο μαγνητικό πεδίο που ομοιάζαν με τις αλλαγές που φυσικά συναντά στο ταξίδι του, άλλαξε κατεύθυνση αλλά και συμπεριφορά, σαν να βρισκόταν στις περιοχές με το συγκεκριμένο μαγνητικό πεδίο. Αυτό όμως, συνέβη μόνο όταν οι τεχνητές διαδοχικές αλλαγές που υποβλήθηκε το πτηνό ήταν με την ίδια σειρά που θα συναντούσε φυσικά στο ταξίδι του. Όταν οι αλλαγές ήταν με διαφορετική σειρά, τα πτηνά δεν αντέδρασαν καθόλου (Lohmann, Lohmann & Putman, 2007. Kishkinev, 2007. Alerstam, 2006).



Όσον αφορά το ευρωπαϊκό ψαρόνι, μέσα από πειράματα εκτόπισης ύστερα από αιχμαλωσία, παρατηρήθηκε ότι τα έμπειρα πουλιά (αυτά που είχαν μεταναστεύσει στο παρελθόν έστω μία φορά πριν την αιχμαλωσία τους) μπόρεσαν να ακολουθήσουν με σχετική ευκολία το δρόμο προς τον προορισμό μετανάστευσης χωρίς να τους επηρεάσει η μετατόπιση από την αρχική τους θέση, που έγινε στο πλαίσιο του πειράματος, επιδεικνύοντας χαρακτηριστικά πραγματικής μαγνητικής πλοήγησης. Αντίθετα, τα νεαρά, μη έμπειρα άτομα του είδους αντί να κατευθυνθούν στην ακριβή τοποθεσία μετανάστευσης, βρέθηκαν σε σχετικά κοντινές περιοχές, δείχνοντας ότι δεν διαθέτουν ακόμα το μηχανισμό πραγματικής μαγνητικής πλοήγησης. Αυτή η ιδιαίτερη διαφορά μεταξύ των έμπειρων μελών του είδους και των μη έμπειρων μας δείχνει ότι τα άτομα του είδους αυτού αποκτούν την ικανότητα πραγματικής μαγνητικής πλοήγησης μετά την πρώτη μετανάστευση τους και αφού έχουν επισκευθεί τουλάχιστον μία φορά το σημείο μετανάστευσης. Έτσι, αποκτούν γνώση των γεωμαγνητικών χαρακτηριστικών της περιοχής που μεταναστεύουν και την απομνημονεύουν στον μαγνητικό τους χάρτη. Αυτή η ιδιαίτερη συμπεριφορά απόκτησης εμπειρίας μετά την πρώτη μετανάστευση, παρατηρήθηκε αργότερα και σε μία πληθώρα άλλων μεταναστευτικών πτηνών, αποδεικνύοντας την ευρεία κλίμακα του φαινομένου. Σε περαιτέρω έρευνες του φαινομένου αυτού παρατηρήθηκε ότι τα μη έμπειρα άτομα του είδους, για να μεταναστεύσουν χρησιμοποιούν ένα σύστημα ρολογιού-τυξίδας, παρόμοιο με αυτό του παρδαλού μυγοχάφτη (Bingman & Cheng, 2005).

Το πιο ενδιαφέρον από τα μεταναστευτικά πουλιά είναι ο Ευρωπαϊκός κοκκινολαίμης. Σύγχρονες έρευνες μας δείχνουν ότι ο κοκκινολαίμης μπορεί να χρησιμοποιεί ένα πολύ εξειδικευμένο και ενδιαφέρον σύστημα αντίληψης του μαγνητικού χάρτη. Αυτό το σύστημα αντίληψης είναι οπτικό δηλαδή, ο κοκκινολαίμης μπορεί να δει την παρουσία του μαγνητικού πεδίου της γης μέσω ενός φωτοεξαρτώμενου μηχανισμού και έτσι μπορεί να δει τα χαρακτηριστικά του σημείου που θέλει να πάει σαν αερογραμμή (Εικ. 11). Επιπλέον, διαθέτει ένα γεωμαγνητικό χάρτη, ο οποίος περιέχει τα μαγνητικά χαρακτηριστικά της περιοχής που βρίσκεται αλλά και των περιοχών που ταξιδεύει, του οποίου η εμβέλεια μπορεί να επεκταθεί όταν ο ευρωπαϊκός κοκκινολαίμης ταξιδεύει σε νέες περιοχές (Kishkinev, 2015).

Τέλος το ταχυδρομικό περιστέρι, μέσω παρατήρησης και πειραμάτων έχει δείξει πολύ έντονα τα χαρακτηριστικά πραγματικής μαγνητικής πλοήγησης. Ύστερα από

μετατόπιση σε άγνωστη τοποθεσία, συγκρίνε τις τοπικές συνιστώσες X και Y με τις τιμές του τόπου κατοικίας. Με τον τρόπο αυτό, μπορούσε να αντιληφθεί την μετατόπισή του ως προς την αρχική του θέση και ύστερα να υπολογίσει μιας διανύσματικής φύσεως διαδρομή ή τουλάχιστον μια σχετική κατεύθυνση επιστροφής. Αυτή η εξαιρετική ικανότητα του ταχυδρομικού περιστεριού να βρίσκει με ακρίβεια τον στόχο του (ακόμη και σε διαφορά μέτρων) βασίζεται σε ένα εξαιρετικά καλό μηχανισμό συνδυασμού του γεωμαγνητικού χάρτη και άλλων αισθητηριακών ερεθισμάτων (Wiltschko, Ritz, Stapput, Thalau & Wiltschko, 2005. Bingman & Cheng, 2005).



*Εικ. 11. Αναπαράσταση της οπτικής αντίληψης του μαγνητικού πεδίου όπως το αντιλαμβάνεται ο ευρωπαϊκός κοκκινολαίμης.*

## 2.5 Σύγκριση συμπεριφορικών δεδομένων

Τα ερευνητικά δεδομένα που αναφέρθηκαν εστίασαν κυρίως σε συμπεριφορές ζώων, οι οποίες εμφανίζονται κατά τη μετακίνηση ή μετανάστευση τους και σχετίζονται άμεσα με την αξιοποίηση του μηχανισμού της μαγνητικής πλοήγησης. Στην ενότητα αυτή θα πραγματοποιηθεί μία σύγκριση μεταξύ των σχετικών με τη μαγνητική πλοήγηση συμπεριφορών για τα είδη που προαναφέρθηκαν, με σκοπό να αποδοθεί μία πιο ολοκληρωμένη εικόνα για το συμπεριφορικό υπόβαθρο του μηχανισμού. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης παρουσιάζονται διαγραμματικά στον Πίνακα 1.

Παρόλο που τα ζώα που αναφέρθηκαν διαφέρουν σημαντικά στη συστηματική τους ταξινόμηση, η μάθηση και αξιοποίηση της μαγνητικής πλοήγησης πραγματοποιήθηκαν με όμοιο τρόπο. Σε όλα τα είδη εκτός του παρδαλού μυγοχάφτη, παρατηρήθηκε ότι τα ενήλικα άτομα ήταν περισσότερο ικανά στη μετανάστευση με χρήση μαγνητικών δεδομένων και ταυτόχρονα η εμπειρία της πρώτης μετανάστευσης φάνηκε να είναι καθοριστική για την αποτελεσματικότητα των μετέπειτα μετακινήσεων. Επιπλέον, με εξαίρεση τον ευρωπαϊκό κοκκινολαίμη και το ταχυδρομικό περιστέρι, τα υπόλοιπα είδη έδειξαν πως διαθέτουν την ικανότητα να πλοηγούνται ακόμη και χωρίς προηγούμενη εμπειρία, βασιζόμενα και μόνο σε μία γενετική μνήμη πλοήγησης (Lohmann, Putman & Lohmann, 2012. Jeffs, Montgomery & Tindle, 2005. Boles & Lohmann, 2003. Fisher, Freake, Borland & Phillips, 2001. Bingman & Cheng, 2005. Lohmann, Lohmann & Putman, 2007. Kishkinev, 2007. Alerstam, 2006 ).

Ένα από τα πρώτα πράγματα που μαθαίνει ένα ζώο το οποίο μεταναστεύει για πρώτη φορά είναι τα τοπικά μαγνητικά πεδία που εμφανίζονται στη μεταναστευτική του διαδρομή. Την ικανότητα απομνημόνευσης και αξιοποίησης των τοπικών μαγνητικών πεδίων για τις μετακινήσεις τους διέθεταν ως κοινό χαρακτηριστικό τα περισσότερα είδη που μελετήθηκαν εκτός από τον παρδαλό μυγοχάφτη και τον ευρωπαϊκό κοκκινολαίμη (Freake, Muheim, Phillips, 2006. Boles & Lohmann, 2003. Fisher, Freake, Borland & Phillips, 2001. Lohmann, Lohmann & Putman, 2007. Kishkinev, 2007. Alerstam, 2006. Bingman & Cheng, 2005. Benhamou, Sudre, Bourjea, Ciccione, De Santis & Luschi, 2011).

Παράλληλα, τα περισσότερα είδη φάνηκαν να διαθέτουν την ικανότητα να γνωρίζουν τη θέση τους σε σχέση με τον προορισμό που θέλανε να φτάσουν με εξαίρεση τον παρδαλό μυγοχάφτη και το τσιχλαηδόνι. Ενδιαφέρον έχει σ' αυτό το σημείο να σημειωθεί ότι η ικανότητα αντίληψης θέσης-προορισμού και τοπικών μαγνητικών πεδίων συνδυαστικά, αναφέρθηκαν από πολλές έρευνες ως χαρακτηριστικά, ικανά να προσδώσουν σε ένα ζώο την δυνατότητα χρήσης μαγνητικού χάρτη (Lohmann, Lohmann, Ehrhart et al., 2004. Avens & Lohmann, 2004. Boles & Lohmann, 2003. Fisher, Freake, Borland & Phillips, 2001. Lohmann, Lohmann & Putman, 2007. Bingman & Cheng, 2005. Kishkinev, 2015).

Ένα άλλο κοινό σημείο αυτών των ειδών είναι οι αιτίες για τις οποίες μεταναστεύουν. Όλα τα είδη πουλιών, εκτός από το ταχυδρομικό περιστέρι που δεν

μεταναστεύει, πραγματοποιούν εποχιακή μετανάστευση προκειμένου να βρουν καλύτερες συνθηκές διαβίωσης και αφθονία τροφής. Για τον ίδιο λόγο μεταναστεύουν και οι αστακοί *P. argus*, ο τρίτωνας *N. viridescens*. Ένας επιπλέον λόγος για μετανάστευση είναι και η προστασία από πιθανούς θηρευτές αλλά και η αναπαραγωγή. Παράδειγμα αποτελούν οι θαλάσσιες χελώνες, οι οποίες κατά τη γέννησή τους είναι ευάλωτες και μεταναστεύουν για να βρεθούν σε ένα ασφαλές απο θηρευτές περιβάλλον, που παρέχει επίσης και άφθονη τροφή. Στα επόμενα χρόνια της ζωής τους μεταναστεύουν κυρίως για λόγους σίτισης και ωοτοκίας, ενώ με παρόμοιο τρόπο λειτουργούν και οι τρίτωνες οι οποίοι μεταναστεύουν τη περίοδο της ξηρασίας και επιστρέφουν όταν έρθει η ώρα να αναπαραχθούν (Collett & Collett, 2011. Lohmann, Luschi, Hays, 2008. Luschi, Benhamou, Girard, Ciccione, Roos, Sudre et al., 2007. Butler, Cockcroft et al., 2013. Fisher, Freake, Borland & Phillips, 2001. Bingman & Cheng, 2005).

Παρόλο που ο εντοπισμός ομοιοτήτων μεταξύ των ειδών δίνει μία περισσότερο καθολική εικόνα για το συμπεριφορικό υπόβαθρο της μαγνητικής πλοήγησης, υπάρχουν και συμπεριφορικές διαφορές από είδος σε είδος, οι οποίες είναι απόρροια διαφορετικής προσαρμογής αλλά και διαφορετικού περιβάλλοντος.

Μία απο τις διαφορές σχετίζεται με κάποιες ιδιαίτερες στρατηγικές και συστήματα που ακολουθεί κάθε είδος. Τα μικρά νεογέννητα χελωνάκια *Caretta caretta* που βγαίνουν στην πρώτη τους μετανάστευση ακολουθώντας συγκεκριμένα μαγνητικά ορόσημα, χρησιμοποιούν τη μέθοδο της ενεργής πλοήγησης όπου κολυμπούν ενεργά για συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Με τον τρόπο αυτό καταφέρνουν να εξοικονομήσουν ενέργεια αλλά και να μην παρασυρθούν εκτός του μεταναστευτικού ρεύματος (Putman, Verley, Shay & Lohmann, 2012).

Από την άλλη οι αγκαθωτοί αστακοί, παρόλο που μπορούν να μεταναστεύσουν με πραγματική μαγνητική πλοήγηση και επομένως καθένας ξεχωριστά μπορεί να βρει το δρόμο του, επιλέγουν να κινούνται με τη μορφή πομπής την οποία οδηγεί ένας αρχηγός (Butler, Cockcroft et al., 2013).

Όσον αφορά τα πουλιά, ο μυγοχάφτης, το τσιχλαhdόνι και το ευρωπαϊκό ψαρόνι αξιοποιούν τον μηχανισμό ρολογιού-πυξίδας, όπου η μετανάστευση ορίζεται απο τον κερκάδιο ρυθμό που συνδυαστικά με την μαγνητική πυξίδα ορίζει τα χρονικά διαστήματα της μετακίνησης, τη διαδρομή που θα ακολουθηθεί αλλά και τους

μεταναστευτικούς σταθμούς μέχρι τον τελικό προορισμό (Lohmann, Lohmann & Putman, 2007. Kishkinev, 2007, Alerstam, 2006. Bingman & Cheng, 2005).

Ο Ευρωπαϊκός κοκκινολαίμης απο την άλλη χρησιμοποιεί ένα οπτικό σύστημα με το οποίο μπορεί να βλέπει τα μαγνητικά χαρακτηριστικά της πορείας του και έτσι η διαδρομή που θέλει να ακολουθήσει εμφανίζεται με τη μορφή αερογραμμής (Wiltschko, Ritz, Stapput, Thalau & Wiltschko, 2005).

Ένα τελευταίο σημείο διαφοροποίησης σχετίζεται με το πόσο εξειδικευμένο είναι το σύστημα πλοήγησης του κάθε είδους. Ο Αγκαθωτός αστακός και ο Ανατολικός τρίτωνας έχουν μικρή μεταναστευτική εμβέλεια και γι'αυτό είναι ευαίσθητοι ακόμη και σε πολύ μικρές αλλαγές των τοπικών μαγνητικών παραμέτρων (Butler, Cockcroft et al., 2013. Fisher, Freaque, Borland & Phillips, 2001). Αντίθετα, οι θαλάσσιες χελώνες και τα πτηνά που διανύουν τεράστιες αποστάσεις αντιλαμβάνονται τις μαγνητικές διακυμάνσεις περισσότερο αποτελεσματικά σε ένα ευρύτερο μεταναστευτικό πεδίο παρά σε ένα πιο περιορισμένο (Collett & Collett, 2011. Lohmann, Lohmann, Ehrhart et al., 2004. Avens & Lohmann, 2004. Luschi, Benhamou, Girard, Ciccione, Roos, Sudre et al., 2007. Lohmann, Lohmann & Putman, 2007. Kishkinev, 2007. Alerstam, 2006. Bingman & Cheng, 2005. Wiltschko, Ritz, Stapput, Thalau & Wiltschko, 2005).

## Πίνακας 1

Σχεδιαγραμματική απεικόνιση της σύγκρισης των συμπεριφορικών δεδομένων που παρουσίασαν τα είδη ζώων κατά τη μετακίνηση ή μετανάστευση τους και σχετίζονται με την αξιοποίηση του μηχανισμού της μαγνητικής πλοήγησης

	Χελώνα Καρέττα	Πράσινη Χελώνα	Ανατολικός τριτων	Αγκαθωτός αστακός	Παρδαλός Μυγογάφτης	Τσιχληδόνη	Ευρωπαϊκός κοκκινολαιμης	Ευρωπαϊκό ψαρόνι	Ταχυδρομικό περιστέρι
Γενετική μνήμη πλοήγησης	+	+	●	+	+	●	-	+	-
Εκμάθηση μαγνητικού πεδίου	+	+	+	+	-	+	+	+	+
Χρήση τοπικών μαγνητικών πεδίων	+	+	+	+	-	+	-	+	+
Γνώση θέσης σε σχέση με προορισμό	+	+	+	+	-	-	+	+	+
(Προστασία, εύρεση τροφής, ωοτοκία αναπαραγωγή καλύτερες συνθήκες διαβίωσης.)	Χρήση Μαγνητικής πλοήγησης για μετανάστευση.	+	+	+	+	+	+	+	-
Συστήματα / στρατηγικές μετανάστευσης	Ενεργή πλοήγηση	+	-	-	-	-	-	-	-
	εναλλαγή προσάκτιας πυξίδας σε παλλινοστησιακή	-	-	+	-	-	-	-	-
	Πομπή με αρχηγό	-	-	-	+	-	-	-	-
	Ρολόι-Πυξίδα	-	-	-	-	+	+	-	+
	Οπτικό σύστημα 'αερογραμμής'	-	-	-	-	-	-	+	-
	Συνδυασμός γεωμαγνητικών & αισθητηριακών στοιχείων	+	+	+	+	+	+	+	+
Εξειδίκευση λόγω απόστασης	Μεγάλη μεταναστευτική εμβέλια => μικρότερη εξειδίκευση	+	+	-	-	+	+	+	+
	Μικρή μεταναστευτική εμβέλια => μεγάλη εξειδίκευση	-	-	+	+	-	-	-	-

+	διαθέτει
-	δεν διαθέτει/ δεν γνωρίζουμε αν διαθέτει
●	υπάρχουν ενδείξεις ότι μπορεί να διαθέτει

Πηγές προέλευσης: Alerstam, 2006. Avens & Lohmann, 2004. Benhamou, Sudre, Bourjea, Ciccione, De Santis & Luschi, 2011. Bingman & Cheng, 2005. Boles & Lohmann, 2003. Butler, Cockcroft et al., 2013. Collett & Collett, 2011. Fisher, Freake, Borland & Phillips, 2001. Freake, Muheim & Phillips, 2006. Jeffs, Montgomery & Tindle, 2005. Kishkinev, 2007 & 2015. Lohmann, Lohmann & Putman, 2007. Lohmann, Lohmann, Ehrhart et al., 2004. Lohmann, Luschi, Hays, 2008. Lohmann, Putman & Lohmann, 2012. Luschi, Benhamou, Girard, Ciccione, Roos, Sudre et al., 2007. Putman, Verley, Shay & Lohmann, 2012. Wiltschko, Ritz, Stapput, Thalau & Wiltschko, 2005.

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>

### Το νευρωνικό υπόβαθρο μαγνητικής πλοήγησης των ζώων

#### 3.1. Προτεινόμενοι νευρωνικοί μηχανισμοί μαγνητικής πλοήγησης

Παρόλο που οι συμπεριφορικές έρευνες έχουν αναδείξει ότι πολλά είδη ζώων είναι ικανά να αντιληφθούν το μαγνητικό πεδίο της γής και να το αξιοποιήσουν ως μέσο προσανατολισμού στις όποιες μετακινήσεις τους, τα δεδομένα για τους φυσιολογικούς μηχανισμούς πίσω από την ικανότητα αυτή είναι αρκετά περιορισμένα. Η δυσκολία στο να εντοπιστούν με ακρίβεια οι μαγνητοϋποδοχείς έγκειται σε διάφορους παράγοντες. Ένας από αυτούς είναι ότι τα μαγνητικά πεδία μπορούν και διαπερνούν ελεύθερα τον βιολογικό ιστό. Συνεπώς, οι μαγνητοϋποδοχείς δεν χρειάζεται να αλληλεπιδράσουν με το εξωτερικό περιβάλλον, πράγμα που σημαίνει ότι η τοποθεσία τους μπορεί να είναι σε οποιοδήποτε σημείο στο σώμα ενός ζώου. Επιπλέον, οι μαγνητοϋποδοχείς πιθανώς να είναι πολύ μικροί σε μέγεθος αλλά και διασκορπισμένοι σε μεγάλο μέρος του ιστού ή εναλλάκτικα η διαδικασία επαγωγής να πραγματοποιείται μέσω συγκεκριμένων χημικών αντιδράσεων, και συνεπώς να μην υπάρχει κάποιο όργανο ή δομή για αυτή τη διαδικασία (Lohmann & Johnsen, 2000).

Όλοι οι μηχανισμοί που θα αναφερθούν παρακάτω, αποτελούν προτεινόμενα μοντέλα βασισμένα σε έρευνες που έχουν γίνει σε διάφορα είδη ζώων, καθώς δεν υπάρχουν μέχρι αυτή τη στιγμή καμία θεωρία δεν είναι απόλυτα επιβεβαιωμένη. Τα περισσότερα μελετημένα νευροβιολογικά μοντέλα μαγνητικής αντίληψης είναι 5.

#### • **Ο μηχανισμός ζεύγους χημικών ριζών (radical pair)**

Από όλους τους υποθετικούς μηχανισμούς που έχουν ως τώρα προταθεί σχετικά με την επίδραση ασθενούς μαγνητικού πεδίου σε βιολογικά μόρια ή σε χημικές αντιδράσεις υπό συγκεκριμένες συνθήκες, μόνο η υπόθεση του ζεύγους ριζών έχει γίνει ευρέως αποδεκτή.

Ο μηχανισμός αυτός λειτουργεί ως εξής: Υπό την επήρεια του φωτός, και ιδιαίτερα του μπλε φωτός, ή από την επανοξειδωση του συμπαραγωγού φλαβίνη υπό

σκοτάδι, η πρωτεΐνη του κρυπτοχρώματος δημιουργεί ζευγάρια χημικής ρίζας. Κάθε ρίζα έχει ένα μονήρες ηλεκτρόνιο στην εξωτερική στιβάδα το οποίο βρίσκεται σε κβαντική διεμπλοκή με το ομόλογό του. Όταν ένα φωτόνιο συγκρούεται με ζεύγος ριζών τότε σταματάει την διεμπλοκή των ηλεκτρονίων του και το ζεύγος σπάει. Μετά την παύση της διεμπλοκής τα ηλεκτρόνια έχουν τη δυνατότητα να επαναδιεμπλακούν, αλλά αυτό θα συμβεί μόνο αν έχουν αντίρροπη ιδιοπεριστροφή. Οι πιθανότητες να έχουν αντίρροπη ιδιοπεριστροφή αυξάνονται σε κατάλληλο μαγνητικό πεδίο. Αντίθετα, υπό την επίδραση μη κατάλληλου μαγνητικού πεδίου αυξάνονται οι πιθανότητες τα ηλεκτρόνια να έχουν ομόρροπη ιδιοπεριστροφή και δεν θα μπορούν να επαναδιεμπλακούν. Στην περίπτωση επαναδιεμπλοκής τους, οι ελεύθερες ρίζες γίνονται πάλι ζεύγος και απελευθερώνουν ενέργεια την οποία αντιλαμβάνεται το οπτικό νεύρο στέλνοντας την πληροφορία στον εγκέφαλο των πουλιών καθιστώντας τα ικανά να 'βλέπουν' το μαγνητικό πεδίο της γης (Johnsen & Lohmann, 2005).

- **Διαδικασία που περιλαμβάνει μόνιμα μαγνητικά υλικά, όπως ο μαγνητίτης, μέσα σε βιολογικό ιστό.**

Μετά από έρευνες σε ιστούς ζώων που πραγματοποιούν μαγνητική πλοήγηση, διαπιστώθηκε η ύπαρξη μόνιμα μαγνητικών υλικών, τα οποία συναντώνται σε δύο μορφές.

Η πρώτη μορφή, η οποία είναι και η περισσότερο κοινή, αφορά μαγνητίτη που διαθέτει χαρακτηριστικά παρόμοια με μαγνήτη σταθερής φύσεως και μόνιμων μαγνητικών χαρακτηριστικών, ο οποίος, εάν είχε τη δυνατότητα να κινηθεί ελεύθερα, θα προσπαθούσε να ευθυγραμμισθεί με το μαγνητικό πεδίο της γης (όπως μια πυξίδα). Ένα ζώο μπορεί να αντιληφθεί το μαγνητικό πεδίο χρησιμοποιώντας αυτό τον τύπο μαγνητίτη με δύο τρόπους. Στην πρώτη περίπτωση, ο μαγνητίτης ασκεί ροπή ή πίεση (προσπαθώντας να προσανατολισθεί με το μαγνητικό πεδίο,) σε ειδικούς αισθητήρες παραμόρφωσης, οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι με τους περιβάλλοντες ιστούς, ενώ στην δεύτερη περίπτωση λειτουργεί βιοχημικά, μέσω διάνοιξης καναλιών για την διέλευση ιόντων.



Η δεύτερη μορφή, αποτελείται από συσσωματώματα πολλών μικρότερων κρυστάλλων μαγνητίτη, οι οποίοι συμπεριφέρονται συνολικά σαν ένα υπερπαραμαγνητικό υλικό. Δεν έχουν μόνιμη μαγνητική κατάσταση, οπότε δεν μπορούν να ασκηθούν φυσική ροπή ή πίεση, αλλά αντιθέτως, ευθυγραμμίζουν το συνολικό τους μαγνητικό πεδίο, ώστε να είναι παράλληλο με το περιβάλλον μαγνητικό πεδίο. Τα συσσωματώματα κρυστάλλων μαγνητίτη, περιέχονται σε μήτρες (matrix), οι οποίες αφού διασταλούν ή συσταλθούν εξαιτίας των ομόροπων ή αντίροπων μαγνητικών πεδίων των εκάστοτε συσσωματωμάτων, επιτρέπουν στο ζώο να αντιλαμβάνεται το μαγνητικό πεδίο και τις αλλαγές του (Perry, Bauer & Dizon, 1985. Lohmann & Johnsen 2000. Shaw, Boyd, House, Woodward, Mathes, Cowin et al., 2015).

- **Φυσικές ή χημικές αλλαγές στις ιδιότητες του νερού που προκαλούνται από μαγνητικά πεδία**

Χαμηλής συχνότητας ασθενή μαγνητικά πεδία μπορούν να επηρεάσουν τις μαγνητικές ροπές των πρωτονίων στο νερό (στην υγρή του μορφή) και έτσι μπορεί οι καταστάσεις των ιδιοπεριστροφών των πρωτονίων να επαναδιατάξουν τους δεσμούς του υδρογόνου στο μόριο του νερού ή να αλλάξουν το φυσιολογικό σχηματισμό ιόντων (ανιόντα-κατιόντα) ή ακόμη και να αλλάξουν στιγμιαία και ίδιο το ιξώδες του νερού. Αυτές οι αλλαγές στις φυσικές ή και χημικές ιδιότητες του νερού μπορούν να επηρεάσουν τις βιοχημικές διεργασίες μέσα σε ένα οργανισμό και έτσι να τον επηρεάσουν μακροσκοπικά (να επηρεάσουν τις επιλογές του όσον αφορά την πλοήγηση).

- **Η ύπαρξη μακρόβιων ιδιοπεριστροφικών καταστάσεων ορισμένων μορίων μέσα σε πρωτεϊνικές δομές.**

Το μαγνητικό πεδίο επιδρά στο νερό, το οποίο βρίσκεται μέσα στο σώμα του ζώου και περικλείει διάφορες πρωτεΐνες. Ο τρόπος που πραγματοποιείται η επίδραση του μαγνητικού πεδίου στο νερό, οφείλεται, κατά πάσα πιθανότητα στις ροπές των ηλεκτρονίων που σχηματίζουν δεσμούς υδρογόνου. Στην περίπτωση της συνεχόμενης και ταυτόχρονης επίδρασης του μαγνητικού πεδίου στις μαγνητικές ροπές και συνεπώς

στις καταστάσεις ιδιοπεριστροφής των πρωτονίων, είναι δυνατόν να επηρεαστούν οι αναδιατάξεις των δεσμών υδρογόνου (λόγω της αρχής αποκλεισμού του Pauli για τις ιδιοπεριστροφές) και επειδή η κατάσταση του νερού επηρεάζει τις αλλαγές στη διαμόρφωση πρωτεϊνών επηρεάζει και τη δραστηριότητά τους. Η αλλαγή στην κατάσταση των πρωτεϊνών δίνει στο ζώο την ικανότητα της μαγνητικής πλοήγησης.

Επίσης, ένας άλλος τρόπος που θα μπορούσαν να λειτουργούν τα μαγνητικά φαινόμενα που σχετίζονται με την αλλαγή της κατάστασης του νερού, είναι μέσω νερού με χαμηλό ιξώδες. Τα μαγνητικά πεδία εξασφαλίζουν μία συνεκτική κίνηση για ένα μέρος των ιόντων που βρίσκονται μέσα στο νερό και έτσι, με τη σειρά της, η κίνηση αυτή εξασφαλίζει τη σίγουρη αλληλεπίδραση με τα μαγνητικά πεδία (αλυσιδωτή αντίδραση). Επομένως, και σε αυτή τη περίπτωση, τα μαγνητικά πεδία ελέγχουν την πιθανότητα των αντιδράσεων μέσω μεταφοράς φορτίου στις πρωτεΐνες.

Και στις δύο περιπτώσεις, ο στόχος του μαγνητικού πεδίου είναι ένα κατανεμημένο σύστημα στοιχειωδών στόχων, είτε είναι μαγνητικές ροπές πρωτονίων νερού ή είναι ιόντα σε ορισμένες περιοχές νερού, οι οποίες βρίσκονται σε μεταστατικές καταστάσεις μακράς διάρκειας ζωής. Με αυτόν τον τρόπο, το μαγνητικό πεδίο μπορεί να επηρεάσει τη διαμόρφωση κινητικότητας των πρωτεϊνών (Binhi & Rubin, 2007).

- **Μαγνητική επαγωγή**

Το σύστημα μαγνητικής επαγωγής μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε θαλάσσια ζώα, επειδή το περιβάλλον μέσο είναι εξαιρετικά αγωγίμο (αλμυρό νερό). Επίσης, τα ζώα που μπορούν να αντιληφθούν με τον τρόπο αυτό το μαγνητικό πεδίο της γης, είναι θαλάσσια ζώα τα οποία διαθέτουν κάποιου είδους αισθητήρια όργανα ηλεκτρικού φορτίου. Η εναλλαγή του μαγνητικού πεδίου, όταν το ζώο κινείται, προκαλεί την παραγωγή ηλεκτρικού φορτίου στο αισθητήριο όργανο (amplulae of Lorenzini). [Johnsen & Lohmann, 2005].

### 3.2 Σύγκριση νευρωνικών μηχανισμών

Όλα τα είδη ζώων που προαναφέρθηκαν, μέσω νευρωνικών μελετών φάνηκε ότι αντιλαμβάνονται το μαγνητικό πεδίο με 3 μηχανισμούς. Ο ένας σχετίζεται με την παρουσία μαγνητίτη στο βιολογικό ιστό, ο δεύτερος με την ιδιαίτερη δράση της πρωτεΐνης του κρυπτοχρώματος (ζεύγος ριζών) και ο τελευταίος σχετίζεται με την παρουσία υπερπαραμαγνητικού υλικού. Παρακάτω θα γίνει αναλυτική σύγκριση των νευρωνικών μηχανισμών για τα είδη ζώων που προαναφέρθηκαν η οποία απεικονίζεται και σχηματικά στον Πίνακα 2.

Τα δύο είδη χελώνας (*Caretta caretta* & πράσινη χελώνα), ο αγκαθωτός αστακός, αλλά και το ταχυδρομικό περιστέρι, φαίνεται πως αντιλαμβάνονται το μαγνητικό πεδίο με μαγνητίτη σταθερής φύσεως. Επιπλέον εικάζεται, ότι ο μηχανισμός αυτός, πιθανώς να χρησιμοποιείται ως δευτερεύον σύστημα πλοήγησης από τον ανατολικό τρίτων, το ευρωπαϊκό ψαρόνι και τον ευρωπαϊκό κοκκινολαίμη ενώ δεν είναι ακόμη βέβαιο ότι είναι παρόν και στα υπόλοιπα είδη πουλιών που προαναφέρθηκαν, τον παρδαλό μυγοχάφτη και το τσιγλαηδόνι (Irwin & Lohmann, 2005. Perry, Bauer & Dizon, 1985. Lohmann, Pentcheff, Nevitt, Stetten, Zimmer-Faust, Jarrard et al., 1995. Wiltschko & Wiltschko, 2005. Shaw, Boyd, House, Woodward, Mathes, Cowin et al., 2015. Philips, Borland, Freake, Brassart & Kirschvink, 2002. Wiltschko & Wiltschko, 2012. Edwards, Schnell & Dubois, 1992). Παράλληλα, στα ταχυδρομικά περιστέρια, σε συγκεκριμένες περιοχές εντός του δέρματος του άνω ράμφους, αναφέρθηκε η παρουσία συσσωματωμάτων κρυστάλλων μαγνητίτη. Τα άτομα των συσσωματωμάτων αυτών, αναφέρονται και ως υπερπαραμαγνητικός μαγνητίτης και είναι πιθανό να λειτουργούν ως ένας εναλλακτικός μηχανισμός μαγνητικής αντίληψης των περιστεριών. Παρόμοια ευρήματα υπερπαραμαγνητικού υλικού έχουν αναφερθεί και στον ευρωπαϊκό κοκκινολαίμη. (Wiltschko & Wiltschko, 2005, 2013).

Παρά το γεγονός ότι τα είδη αυτά αξιοποιούν τον ίδιο μηχανισμό μαγνητικής αντίληψης, έχουν βρεθεί και συγκεκριμένες διαφορές. Στις χελώνες οι κρύσταλλοι μαγνητίτη, βρέθηκαν στην περιοχή της κεφαλής και συγκεκριμένα στο προσθιο μέρος της σκληρής μήνιγγας, ενώ στον αστακό, ο μαγνητίτης εντοπίστηκε στον κεφαλοθώρακα. Αντίθετα, στα ταχυδρομικά περιστέρια, μαγνητίτης βρέθηκε στο πάνω

μέρος του ράμφους συνδεδεμένος με το τρίδυμο νεύρο αλλά και στον κοχλία του έσω ωτός. Και στα 3 είδη ζώων παρότι βρίσκονται σε διαφορετικά σημεία η πληροφορία που δίνουν στο ζώο βασίζεται στην ‘παραμόρφωση’ ή τον ερεθισμό της περιοχής που βρίσκονται τα μαγνητικά υλικά, εξαιτίας της δύναμης που ασκεί πάνω τους το μαγνητικό πεδίο της γής. Επίσης, πιο συγκεκριμένα στα πουλιά, φαίνεται το σύστημα αυτό να παρέχει πληροφορίες ποσοτικές (μαγνητική ένταση) ή μαγνητικής πολικότητας (Perry, Bauer & Dizon, 1985. Lohmann, Pentcheff, Nevitt, Stetten, Zimmer-Faust, Jarrard et al., 1995. Wiltschko, Ritz, Stapput, Thalau & Wiltschko, 2005. Shaw, Boyd, House, Woodward, Mathes, Cowin et al., 2015).

Ο ανατολικός τρίτωνας, ο ευρωπαϊκός κοκκινολαίμης και το ευρωπαϊκό ψαρόνι αξιοποιούν το μηχανισμό των κρυπτοχρωμάτων (ζεύγους ριζών) για να αντιληφθούν το μαγνητικό πεδίο. Αυτός ο μηχανισμός, εντοπίζεται κυρίως στα πουλιά και ιδιαίτερα μέσα στους οφθαλμούς, ενώ στο τρίτονα εντοπίζεται σε ένα σύμπλεγμα που αποτελείται από την επίφυση και τον βρεγματικό οφθαλμό (Tosini, 1997). Εκτός από αυτά τα είδη πιθανολογείται ότι και τα υπόλοιπα είδη πουλιών (παρδαλό μυγοχάφτη, τσιχλαηδόνι και ταχυδρομικό περιστέρι) ίσως διαθέτουν τον μηχανισμό αυτό (Geim, Simon, Boamfa, Heflinger, 1999. Wiltschko, Ritz, Stapput, Thalau & Wiltschko, 2005. Schneider, Thalau, Semm, Wiltschko, 1994. Rozhok, 2008. Lohmann, Lohmann & Putman, 2007).

Επιπλέον, ο ανατολικός τρίτωνας, όπως και τα ταχυδρομικά περιστέρια πιθανώς διαθέτουν συνδυαστικά δύο συστήματα μαγνητικής αντίληψης τα οποία λειτουργούν συδυαστικά. Το ένα βασίζεται στο μηχανισμό κρυστάλλων μαγνητίτη, μέσω των οποίων λαμβάνουν δεδομένα για την ένταση και πολικότητα του μαγνητικού πεδίου και το δεύτερο είναι βασίζεται στο μηχανισμό κρυπτοχρωμάτων ο οποίος λειτουργεί ως πυξίδα της μαγνητικής έγκλισης (Geim, Simon, Boamfa, Heflinger, 1999. Fisher, Freake, Borland & Phillips, 2001).

Στις χελώνες, ενώ δεν έχει βρεθεί να διαθέτουν μηχανισμό κρυπτοχρωμάτων, έρευνες σε δερματοχελώνες (*Dermochelys coriacea*) έδειξαν ότι ο επιφυσιακός αδένας τους είναι εξαιρετικά ευαίσθητος στο φως (συγκεκριμένα κόκκινο φως) και λειτουργεί ως βιολογικός δείκτης για τον έλεγχο του κερκάδιου ρυθμού μέσω έκκρισης μελατονίνης. Πιθανολογείται ότι, καθώς οι μέρες μικραίνουν στο τέλος της θερινής

ισημερίας παρέχουν στις χελώνες ένα αξιόπιστο φαινολογικό<sup>3</sup> στοιχείο, το οποίο λειτουργώντας μέσω του επιφυσιακού αδένου, εκκινεί τις διαδικασίες της μετανάστευσής τους (Davenport, Jones, Work & Balazs, 2014). Λόγω της ομοιότητας της λειτουργίας του επιφυσιακού αδένου αυτών των δερματοχελωνών με εκείνο του ανατολικού τρίωνα, είναι πιθανό και οι χελώνες να αντιλαμβάνονται το μαγνητικό πεδίο μέσω κρυπτοχρωμάτων.

---

<sup>3</sup> Φαινολογία: επιστημονικός κλάδος που περιλαμβάνει τον προσδιορισμό, την καταγραφή, τη μελέτη και τη διερεύνηση της έναρξης και λήξης των διαφόρων σταδίων ανάπτυξης των φυτών, καθώς και των δραστηριοτήτων της πανίδας από έτος σε έτος και σε σχέση πάντοτε με τις μεταβολές και αλλαγές του καιρού και του κλίματος. Ο Βρετανός Charles Moran το 1836 χρησιμοποίησε για πρώτη φορά τον όρο φαινολογία (Phenology) για να ορίσει τον επιστημονικό κλάδο που μελετά σε ετήσια βάση τις δραστηριότητες των φυτών και ζώων που είναι ορατές (Μπαλούτσος, Μπουρλέτσικας & Καούκης, 2006).

## Πίνακας 2

Σχεδιαγραμματική απεικόνιση ενός η περισσότερων νευρωνικών μηχανισμών που διαθέτει κάθε είδος, μέσω των οποίων αντιλαμβάνεται τη παρουσία του γεωμαγνητικού πεδίου.

	Χελώνα καρέττα ( <i>Caretta-caretta</i> )	Πράσινη χελώνα ( <i>Chelonia mydas viridescens</i> )	Ανατολικός Τρίτων ( <i>Notophthalmus viridescens</i> )	Αγκαθωτός αστακός ( <i>Panulirus Argus</i> )	Παρδαλός μυγοχάφτης ( <i>Ficedula hypoleuca</i> )	Τσιγλαιδόνι ( <i>Luscinia luscinia</i> )	Ευρωπαϊκός κοκκινολαίμη ( <i>Erithacus rubecula</i> )	Ευρωπαϊκό ψαρόνι ( <i>Sturnus vulgaris</i> )	Ταχυδρομικό Περιστέρι ( <i>Columba livia domestica</i> )
Κρυπτοχρωμία (ζεύγος ριζών)	-	-	+	-	●	●	+	+	●
Μαγνητίτης σταθερής φύσεως	+	+	●	+	-	-	●	●	+
Μαγνητίτης Υπερπαραμαγνητικής φύσεως	-	-	-	-	-	-	+	-	+

+	διαθέτει
-	δεν διαθέτει/ δεν γνωρίζουμε αν διαθέτει
●	υπάρχουν ενδείξεις ότι μπορεί να διαθέτει

Πηγές προέλευσης: Davenport, Jones, Work & Balazs, 2014. Edwards, Schnell & Dubois, 1992. Fisher, Freake, Borland & Phillips, 2001. Geim, Simon, Boamfa, Heflinger, 1999. Irwin & Lohmann, 2005. Lohmann, Lohmann & Putman, 2007. Lohmann, Pentcheff, Nevitt, Stetten, Zimmer-Faust, Jarrard et al., 1995. Perry, Bauer & Dizon, 1985. Philips, Borland, Freake, Brassart & Kirschvink, 2002. Rozhok, 2008. Schneider, Thalau, Semm, Wiltschko, 1994. Shaw, Boyd, House, Woodward, Mathes, Cowin et al., 2015. Wiltschko & Wiltschko, 2005, 2012 & 2013. Wiltschko, Ritz, Stapput, Thalau & Wiltschko, 2005.

## Συμπεράσματα

Κάθε είδος για να μεταβεί από ένα τόπο σε ένα άλλο, ειδικά αν οι αποστάσεις είναι τεράστιες, πρέπει να βασίζεται σε ένα αξιόπιστο, σταθερό, αλλά και παγκόσμιας κλίμακας σύστημα πλοήγησης. Εμείς οι άνθρωποι, βασιζόμαστε, όπως αναφέραμε και στην εισαγωγή, σε μία πλειάδα τεχνολογικών επιτευγμάτων τα οποία μας δίνουν την ευχέρεια να ταξιδέψουμε μεγάλες αποστάσεις με ακρίβεια, ταχύτητα και αξιοπιστία. Η χρήση όμως αυτών των τεχνολογικών επιτευγμάτων μας έδειξε πόσο απαραίτητη είναι η γνώση της ακριβούς θέσης μας, της ακριβούς θέσης του προορισμού μας, της διαδρομής και όλων των στοιχείων που αυτή εμπεριέχει. Τα ίδια εμπόδια εφαρμόζονται και στο ζωικό βασίλειο όπου η φύση επέλεξε να αξιοποιήσει ένα εξαιρετικά ακριβή μηχανισμό για την πλοήγηση των μεταναστευτικών ζώων, την χρήση των γεωμαγνητικών πεδίων. Το μαγνητικό πεδίο καλύπτει ολόκληρο τον πλανήτη και αποτελεί μια μόνιμη παράμετρος η οποία εμπεριέχει πολλά δεδομένα έτσι ώστε να είναι ικανή να προσφέρει σε όλα τα οικοσυστήματα αξιόπιστα δεδομένα για πλοήγηση. Σε σχέση με άλλες μεθόδους πλοήγησης που χρησιμοποιούν άλλα μέσα, όπως οπτικά, χημικά ή ακουστικά είναι αυτό που επηρεάζεται λιγότερο από εξωγενείς παράγοντες με αποτέλεσμα να παρέχει αμετάβλητα δεδομένα σε όλες τις συνθήκες. Συνεπώς, χρησιμοποιείται ευρέως από ζώα που ανήκουν σε διαφορετικά οικοσυστήματα αλλά και σε διαφορετική συστηματική ταξινόμηση. Παρά το γεγονός ότι η παρούσα μελέτη εστίασε σε συγκεκριμένα είδη ζώων που μετακινούνται με χρήση μαγνητικής αντίληψης, ο συνολικός αριθμός εκείνων που διαθέτουν την ικανότητα μαγνητικής αντίληψης είναι πολύ μεγαλύτερος.

Από τα δεδομένα που συγκεντρώθηκαν στην παρούσα μελέτη για τη ικανότητα μαγνητικής αντίληψης των συγκεκριμένων ειδών προκύπτουν κάποια γενικά συμπεράσματα.

Όλα τα είδη που αναφέρθηκαν χρησιμοποιούν την μαγνητική τους αντίληψη για μεταναστευτικούς λόγους, με εξαίρεση την περίπτωση του ταχυδρομικού περιστεριού, το οποίο ως είδος είναι αποτέλεσμα επιλεκτικών διασταυρώσεων από τον άνθρωπο και δεν μεταναστεύει. Βέβαια, σε ορισμένες περιπτώσεις ζώων που κινούνται μικρές αποστάσεις και διαθέτουν μεγάλης ακρίβειας μαγνητικό χάρτη, η μαγνητική αντίληψη αποτελεί εργαλείο και για καθημερινή μετακίνηση, όπως για παράδειγμα στην

περίπτωση του αγκαθωτού αστακού ο οποίος μετακινείται καθημερινά προκειμένου να βρεθεί είτε στον τόπο σίτισης είτε στο μέρος κατοικίας (Collett & Collett, 2011. Lohmann, Luschi, Hays, 2008. Luschi, Benhamou, Girard, Ciccione, Roos, Sudre et al., 2007. Butler, Cockcroft et al., 2013. Fisher, Freake, Borland & Phillips, 2001. Bingman & Cheng, 2005).

Παράλληλα, όλα τα είδη παρουσίασαν την ικανότητα να πραγματοποιήσουν κάποιου είδους μαγνητική πλοήγηση. Ορισμένα φάνηκαν να αξιοποιούν μία γενικής μορφής μαγνητική πλοήγηση, όπως συνέβη στην περίπτωση των πουλιών που διέθεταν το μηχανισμό ρολογιού-πυξίδας, ενώ άλλα παρουσίασαν πραγματική μαγνητική πλοήγηση η οποία προϋποθέτει την ικανότητα χρήσης μαγνητικής πυξίδας και μαγνητικού χάρτη, όπως στην περίπτωση των θαλάσσιων χελώνων και του αγκαθωτού αστακού. Επίσης, όλα τα είδη ζώων φάνηκαν να είναι πολύ ικανά στην αξιοποίηση του μαγνητικού πεδίου και στην προσαρμογή τους σε όποιες αλλαγές ή ανωμαλίες αυτό παρουσιάζει. Παράλληλα, αποδείχθηκε πως η μαγνητική αντίληψη δεν είναι παθητική αίσθηση αλλά ενεργή, ενώ σε πολλές περιπτώσεις αποτελεί το βασικό σύστημα πλοήγησης ((Lohmann, Lohmann & Putman, 2007. Kishkinev, 2007, Alerstam, 2006. Bingman & Cheng, 2005. Butler, Cockcroft et al., 2013. Putman, Verley, Shay & Lohmann, 2012. Benhamou, Sudre, Bourjea, Ciccione, De Santis & Luschi, 2011. Fisher, Freake, Borland & Phillips, 2001).

Ο νευρωνικός μηχανισμός πίσω από την ικανότητα μαγνητικής αντίληψης αποτελεί ένα πολύπλοκο και ερευνητικά δύσκολο πρόβλημα. Τα νευροβιολογικά μοντέλα που έχουν προταθεί για την μαγνητική πλοήγηση των ζώων είναι 5, αλλά ακόμη βρίσκονται σε θεωρητικό πλαίσιο καθώς η μελέτη για την απόδειξή τους είναι ακόμη ελλιπής. Οι λόγοι της ύπαρξης των 5 διαφορετικών μηχανισμών υπόκειται πιθανότατα στην αντιμετώπιση των διαφορετικών συνθηκών, οπότε και προβλημάτων, που έχει να αντιμετωπίσει το κάθε είδος είτε ως προς το τόπο διαβίωσης, είτε ως προς το μέσο μετακίνησης, είτε ως προς το βιολογικό υπόβαθρο του ίδιου του οργανισμού, είτε στις εκάστοτε ιδιαιτερότητες της γεωγραφικής περιοχής, διαμονής, ή μετανάστευσης του εκάστοτε είδους (Binhi & Rubin, 2007). Παρόλο που κάποια από αυτά τα μοντέλα βρίσκονται ακόμη σε καθαρά θεωρητικό υπόβαθρο, ο μηχανισμός αντίληψης του μαγνητικού πεδίου μέσω μαγνητίτη και ο μηχανισμός των κρυπτοχρωμάτων έχουν, μέχρι ένα βαθμό, αποδειχθεί μέσω έρευνας (Johnsen &



Lohmann, 2005. Perry, Bauer & Dizon, 1985. Lohmann & Johnsen 2000. Shaw, Boyd, House, Woodward, Mathes, Cowin et al., 2015). Επιπλέον, ο εντοπισμός του νευρωνικού συστήματος που είναι υπεύθυνος για την μαγνητική πλοήγηση διαφέρει σε κάθε είδος (όπως στο ταχυδρομικό περιστέρι που εντοπίζεται στο ράμφος, ενώ στη πράσινη χελώνα στο κεφάλι) και ταυτόχρονα, ένα είδος είναι δυνατό να είναι ικανό να χρησιμοποιήσει και δύο διαφορετικούς μηχανισμούς (όπως στην περίπτωση του ανατολικού τρίωνα και του ταχυδρομικού περιστεριού) [Geim, Simon, Boamfa, Heflinger, 1999. Fisher, Freake, Borland & Phillips, 2001]. Ακόμη, κάποια από τα είδη που αναφέρθηκαν φάνηκαν να έχουν μία γενετική μνήμη που αφορά την μετατόπισή τους και η οποία βελτιώνεται με την πρώτη μετακίνηση αλλά και με περαιτέρω εμπειρία (Lohmann, Putman & Lohmann, 2012. Jeffs, Montgomery & Tindle, 2005. Boles & Lohmann, 2003. Fisher, Freake, Borland & Phillips, 2001. Bingman & Cheng, 2005. Lohmann, Lohmann & Putman, 2007. Kishkinev, 2007. Alerstam, 2006 ).

Μέχρι στιγμής, τα ερευνητικά δεδομένα για το νευρωνικό υπόστρωμα της μαγνητικής αντίληψης είναι σημαντικά περιορισμένα σε σχέση με την πολυπλοκότητα του εν λόγω μηχανισμού. Συνεπώς, μεγαλύτερη εστίαση του ερευνητικού ενδιαφέροντος στο νευρωνικό και βιολογικό υπόστρωμα της μαγνητικής αντίληψης θα καλύψει σημαντικά κενά, καθώς η σύγκριση των υπαρχόντων δεδομένων μπορεί να προσφέρει μονάχα περιορισμένη και αποσπασματική γνώση, και όχι μια ολοκληρωμένη εικόνα για το μηχανισμό.

Από την άλλη, η συμπεριφορική πλευρά της μαγνητικής πλοήγησης έχει διερευνηθεί σε μεγαλύτερο βαθμό και συνεπώς, η σύγκριση των ειδών που επιλέχθηκαν δίνει πιο ευρεία και ορθά δεδομένα. Παρόλα αυτά, και σε αυτή την περίπτωση υπάρχουν προβλήματα ή αδιευκρίνιστα και ελλιπή θέματα που χρειάζονται περαιτέρω έρευνα. Ένα βασικό πρόβλημα είναι ότι δεν έχουν γίνει έρευνες σε όλα τα είδη σε όλα τα στάδια της ζωής τους (νεογέννητα, νεαρά, ενήλικα και υπερήλικα) έτσι ώστε να υπάρχει μια πιο ξεκάθαρη εικόνα για την εξέλιξη της μαγνητικής πλοήγησης σε κάθε στάδιο.

Η παρούσα εργασία δεν επεκτάθηκε σε όλα τα είδη για τα οποία υπάρχουν δεδομένα πως διαθέτουν μαγνητική αντίληψη, αλλά επικεντρώθηκε σε ζώα που έχουν βιολογικές διαφορές, ζουν σε διαφορετικό περιβάλλον και διαφοροποιούνται στους τρόπους με τους οποίους μεταναστεύουν. Παρά τη διαφορετικότητα των ειδών, το

γεγονός ότι όλα διέθεταν μαγνητική αντίληψη οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η αξιοποίηση του μαγνητικού πεδίου ως μέθοδος πλοήγησης είναι εξαιρετικά διαδεδομένη στο ζωικό βασίλειο και παράλληλα αποτελεί μια από τις πιο ακριβείς και αποδοτικές μεθόδους πλοήγησης. Βέβαια, η επέκταση της μελέτης και σε άλλα είδη που διαθέτουν μαγνητική πλοήγηση και πιθανώς διαφορετικά συστήματα αξιοποίησης της θα έδινε μια πιο συνολική εικόνα για τον μαγνητικό προσανατολισμό των ζώων.

Μέχρι και πρόσφατα η μελέτη του αντικειμένου της μαγνητικής αντίληψης και πλοήγησης δεν υπήρξε αρκετά διαδεδομένη στον ερευνητικό κόσμο και μόνο τα τελευταία χρόνια σχετικές μελέτες έχουν αρχίσει να γίνονται περισσότερο ευρείες. Στην σημερινή πρόοδο συνέβαλε σημαντικά η εξέλιξη των μεθόδων έρευνας, η ανάπτυξη της τεχνολογίας αλλά και η καλύτερη γνώση πάνω σε τομείς όπως η κβαντομηχανική (πάνω στην οποία βασίζεται και ο μηχανισμός του κρυπτοχρώματος), η οποία παρέχει πλέον τη δυνατότητα αντίληψης φαινομένων που μέχρι σήμερα δε ήταν γνωστό που βασίζονται και για ποιο λόγο.

Επιπλέον, με την ολοκλήρωση παρελθοντικών ερευνών που για διάφορους λόγους παρέμειναν ατελής, είναι πιθανό να αποδειχθεί πως και άλλα είδη έχουν μαγνητική αντίληψη ή πιθανώς είδη που δεν θεωρούνταν ότι διαθέτουν μαγνητική αντίληψη εν τέλει να διαθέτουν. Είναι πιθανό, επίσης, να βρεθεί πως υπάρχουν επιπρόσθετοι μηχανισμοί αντίληψης του μαγνητικού πεδίου ή να κατανοηθούν καλύτερα όσοι είναι ήδη γνωστοί.

Καταλήγοντας, μία παρατήρηση η οποία εξάγεται από την συνολική έρευνα για τη συγγραφή της παρούσας εργασίας, είναι ότι η φύση εκμεταλλεύεται οποιαδήποτε πηγή δεδομένων προκειμένου να δώσει πλεονέκτημα στους μεταναστευτικούς έμβιους οργανισμούς. Για παράδειγμα το φως είναι παρόν σε όλη την επιφάνεια του πλανήτη και επομένως, όλα τα ζώα που έρχονται σε επαφή μαζί του διαθέτουν όραση και συστήματα με οποία μπορούν να το αξιοποιήσουν για να μετακινηθούν. Παρόμοια, η ύπαρξη ήχου σημαίνει πως οι οργανισμοί διαθέτουν ακοή αλλά και ηχητικά συστήματα πλοήγησης, η ύπαρξη χημικής υπογραφής σημαίνει παρουσία οσφρητικού συστήματος για να την αντιληφθεί και να την ακολουθήσει ή να την αποφύγει (Bingman & Cheng, 2005). Με παρόμοιο τρόπο, πριν ακόμη υπάρξει ερευνητική απόδειξη, η παρουσία του μαγνητικού πεδίου θα μπορούσε να θεωρηθεί ως δεδομένο και η μαγνητική αντίληψη ως λογικό επακόλουθο. Με βάση αυτό το σκεπτικό, πιθανώς οι οργανισμοί να

πλοηγούνται βασισμένοι και σε άλλα φυσικά φαινόμενα που η παρουσία τους είναι ευρεία πάνω στον πλανήτη, όπως για παράδειγμα η περιστροφή της γης (coriolis effect) και η βαρύτητα.

## **Βιβλιογραφία**

- Alerstam, T. (2006). Conflicting evidence about long-distance animal navigation. *Science* 313, 791-793.
- Avens, L., & Lohmann, K.J. (2004). Navigation and seasonal migratory orientation in juvenile sea turtles. *Journal of Experimental Biology*, 207, 1771-1778.
- Benhamou, S., Sudre, J., Bourjea, J., Ciccione, S., De Santis, A., & Luschi, P. (2011). The role of geomagnetic cues in green turtle open sea navigation. *PLoS ONE*, 6(10), e26672, 1-11.
- Bingman, V.P., & Cheng, K. (2005). Mechanisms of animal global navigation: comparative perspectives and enduring challenges. *Ethology, Ecology & Evolution*, 17, 295-318.
- Binhi, V.N., & Rubin, A.B. (2007). Magnetobiology: The kT paradox and possible solutions. *Electromagnetic Biology and Medicine*, 26, 45-62.
- Boles, L.C., & Lohmann, K.J. (2003). True navigation and magnetic maps in spiny lobsters. *Nature*, 421, 60-63.
- Bowditch, N. (2002). *The American Practical Navigator*. Bethesda, MD: National Imagery and Mapping Agency (Original work published 1802).
- Butler, M., Cockcroft, A., MacDiarmid, A., & Wahle, R. (2013). Panulirus argus, Caribbean spiny lobster. *The IUCN Red List of Threatened Species (Version 2012.2)*, 1-11.
- Collet, S.T., & Collet, M. (2011). Animal Navigation: Following Signposts in the Sea. *Current Biology*, 21(20), 843-846.
- Davenport, J., Jones, T.T., Work, T.M., & Balazs, G.H. (2014). Pink spot, white spot: The pineal skylight of the leatherback turtle (*Dermochelys coriacea* Vandelli 1761) skull and its possible role in the phenology of feeding migrations. *Journal of Experimental Biology and Ecology*, 461, 1-6.
- Edwards, H.H., Schnell, G.D., & Dubois, R.L. (1992). Natural and induced remanent magnetism in birds. *The Auk*, 109(1), 43-56.

- Fischer, J.H., Freake, M.J., Borland, S.C., & Phillips, J.B. (2001). Evidence for the use of magnetic map information by an amphibian. *Animal Behaviour*, *62*, 1-10.
- Freake, M.J., Muheim, R., & Phillips, J.B. (2006). Magnetic maps in animals: A theory comes of age? *The Quarterly Review of Biology*, *81*(4), 327-343.
- Fuxjager, M.J., Eastwood, B.S., & Lohmann, K.J. (2011). Orientation of hatchling loggerhead sea turtles to regional magnetic fields along a transoceanic migratory pathway. *The Journal of Experimental Biology*, *214*, 2504-2508.
- Geim, A.K., Simon, M.D., Boamfa, M.I., & Heflinger, L.O. (1999). Extraocular magnetic compass in newts. *Nature*, *400*, 324-325.
- Griffin, D.R. (1952). Bird navigation. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, *27*, 359-400.
- Hollenbach, D.F., & Herndon, J.M. (2001). Deep-Earth reactor: Nuclear fission, helium, and the geomagnetic field. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, *98*(20), 11085-11090.
- Irwin, W.P., & Lohmann, K.J. (2005). Disruption of magnetic orientation in hatchling loggerhead sea turtles by magnetic fields. *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, *191*, 475-480.
- Jeffs, A.G., Montgomery, C.J., & Tindle, C.T. (2005). How do spiny lobster post-larvae find the coast? *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, *39*, 605-617.
- Johnsen, S., & Lohmann, K. (2005). The physics and neurobiology of magnetoreception. *Nature Reviews Neuroscience*, *6*, 703-712.
- Kishkinev, D. (2015). Sensory mechanisms of long-distance navigation in birds: a recent advance in the context of previous studies. *Journal of Ornithology*, *156*, 145-161.
- Lohmann, K., & Johnsen, S. (2000). The neurobiology of magnetoreception in vertebrate animals. *Trends in Neurosciences*, *23*(4), 153-159.
- Lohmann, K.J., Cain, S.D., Dodge, S.A., & Lohmann, C.M.F. (2001). Regional magnetic fields as navigational markers for sea turtles. *Science*, *294*, 364-366.

- Lohmann, K.J., Lohmann, C.M.F., Ehrhart, L.M., Bagley, D.A., & Swing, T. (2004). Geomagnetic map used in sea-turtle navigation. *Nature*, *428*, 909-910.
- Lohmann, K.J., Lohmann, C.M.F., & Endres, C.S. (2008). The sensory ecology of ocean navigation. *The Journal of Experimental Biology*, *211*(11), 1719-1728.
- Lohmann, K.J., Lohmann, C.M.F., & Putman, N.F. (2007). Magnetic maps in animals: nature's GPS. *The Journal of Experimental Biology*, *210*, 3697-3705.
- Lohmann, K.J., Luschi, P., & Hays, G.C. (2008). Goal navigation and island-finding in sea turtles. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, *356*(1-2), 83-95.
- Lohmann, K.J., Pentcheff, N.D., Nevitt, G.A., Stetten, G.T., Zimmer-Faust, R.K., Jarrard, H.E., & Boles, L.C. (1995). Magnetic orientation of spiny lobsters in the ocean: Experiments with undersea coil systems. *The Journal of Experimental Biology*, *198*, 2041-2048
- Lohmann, K.J., Putman, N.F., & Lohmann, C.M.F. (2012). The magnetic map of hatchling loggerhead sea turtles. *Current Opinion in Neurobiology*, *22*(2), 336-342.
- Luschi, P., Benhamou, S., Girard, C., Ciccione, S., Roos, D., Sudre, J., & Benvenuti, S. (2007). Marine turtles use geomagnetic cues during open-sea homing. *Current Biology*, *17*, 126-133.
- Μπαλούτσος, Γ., Μπουρλέτσικας, Α., & Καούκης, Κ. (2006). Η φαινολογία και οι εφαρμογές της στο περιβάλλον και στην αλλαγή του κλίματος. *ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε*, *23*, 12-16.
- Pereira-Bomfim, M.G.C., Antoniali-Junior, W.F., & Acosta-Avalos, D. (2015). Effect of magnetic field on the foraging rhythm and behavior of the swarm-founding paper wasp *Polybia paulista* Ihering (Hymenoptera: Vespidae). *Sociobiology*, *62*(1), 99-104.
- Perry, A., Bauer, G.B., & Dizon, A.E. (1985). Magnetoreception and Biomineralization of Magnetite in Amphibians and Reptiles. *Topics in Geobiology*, *5*, 439-453.
- Phillips, J. B., Adler, K., & Borland, S.C. (1995). True navigation by an amphibian. *Animal Behaviour*, *50*, 855-858.

- Phillips, J.B., Borland, S.C., Freake, M.J., Brassart, J., & Kirschvink, J. L. (2002). 'Fixed-axis' magnetic orientation by an amphibian: non-shoreward-directed compass orientation, misdirected homing or positioning a magnetite-based map detector in a consistent alignment relative to the magnetic field? *The Journal of Experimental Biology*, 205, 3903-3914.
- Putman, N.F., Endres, C.S., Lohmann, C.M.F., & Lohmann, K.J. (2011). Longitude perception and bi-coordinate magnetic maps in sea turtles. *Current Biology*, 21, 463-466.
- Putman, N.F., Verley, P., Shay, T.J., & Lohmann, K. (2012). Simulating transoceanic migrations of young loggerhead sea turtles: merging magnetic navigation with an ocean circulation model. *Journal of Experimental Biology* 215, 1863-1870.
- Ramos, R., & González-Solís, J. (2012). Trace me if you can: the use of intrinsic biogeochemical markers in marine top predators. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 10(5), 258-266.
- Roger Brothers, J., & Lohmann, K.J. (2015). Evidence for geomagnetic imprinting and magnetic navigation in the natal homing of sea turtles. *Current Biology*, 25, 392-396.
- Rozhok, A. (2008). *Orientation and Navigation in Vertebrates*. Berlin: Springer
- Schneider, T., Thalau, H.P., Semm, P., & Wiltschko, W. (1994). Melatonin is crucial for the migratory orientation of pied flycatchers (*Ficedula hypoleuca pallas*). *Journal of Experimental Biology*, 194, 255:262.
- Shaw, J., Boyd, A., House, M., Woodward, R., Mathes, F., Cowin, F., Saunders, M., & Baer, B. (2015). Magnetic particle-mediated magnetoreception. *Journal of the Royal Society Interface*, 12(110), 1-15.
- Sinsch, U., & Kirst, C. (2015). Homeward orientation of displaced newts (*Triturus cristatus*, *Lissotriton vulgaris*) is restricted to the range of routine movements. *Ethology, Ecology & Evolution*, 28(3), 1-17.
- Στρούζας, Π.Γ. (2001). *Ιστοπλῖα και Ναυτική Τέχνη* (4<sup>η</sup> έκδ.). Πειραιάς: Π.Ο.Ι.Α.Θ.
- Tosini, G. (1997). The pineal complex of reptiles: physiological and behavioral roles. *Ethology, Ecology & Evolution*, 9(4), 313-333.

- Vidal-Gadea, A., Ward, K., Beron, C., Chorashian, N., Gokce, S., Russell, J., Truong, N., Parikh, A., Gadea, O., Ben-Yakar, A., & Pierce-Shimomura, J. (2015). Magnetosensory neurons mediate geomagnetic orientation in *Caenorhabditis elegans*. *eLife*, *4*, 1-49.
- Walker, M.M., Kirschvink, J.L., Ahmed, G., & Diction, A.E. (1992). Evidence that fin whales respond to the geomagnetic field during migration. *Journal of Experimental Biology*, *171*, 67-78.
- Wiltschko, R., Ritz, T., Stapput, K., Thalau, P., & Wiltschko, W. (2005). Two different types of light-dependent responses to magnetic fields in birds. *Current Biology*, *15*, 1518-1523.
- Wiltschko, W., & Wiltschko, R. (2005). Magnetic orientation and magnetoreception in birds and other animals. *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, *191*(8), 675-693.
- Wiltschko, R., & Wiltschko, W. (2012). The magnetite-based receptors in the beak of birds and their role in avian navigation. *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, *199*(2), 89-98.



## **Παράρτημα**

Για την πραγματοποίηση της παρούσας μελέτης χρησιμοποιήθηκαν ερευνητικά άρθρα από τις βάσεις δεδομένων Google Scholar και Science Direct. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν αναλογικά αλλά και ψηφιακά βιβλία και περιοδικά από τη βιβλιοθήκη του Πανεπιστημίου Κρήτης (Ρέθυμνο).