

## موضوع: گیرندگی مغناطیسی در پرندگان و ناوبری آنان (Magnetoreception)

Sina Amirrajab

نگارش: سینا امیررجب

دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک) – دانشکده مهندسی پزشکی

[sina.amirrajab@gmail.com](mailto:sina.amirrajab@gmail.com)

[s.amirrajab@aut.ac.ir](mailto:s.amirrajab@aut.ac.ir)

پست الکترونیک:

### بخش اول:

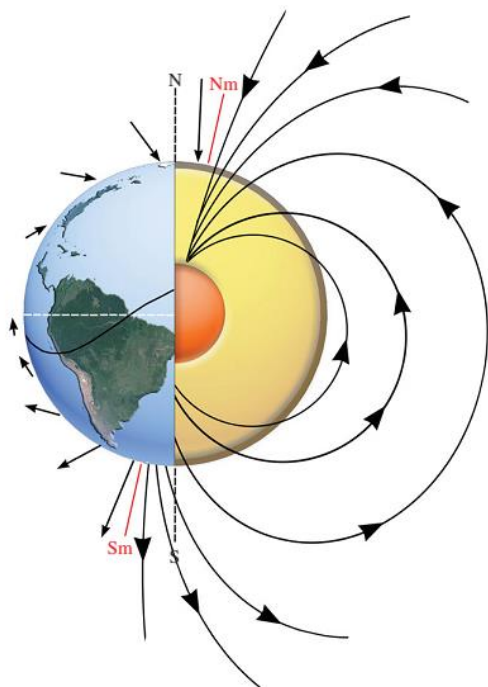
#### پیشگفتار

حیوان ها در زندگی روزمره خود به منظور پیدا کردن غذا، فرار از شکار شدن، پیدا کردن جفت و همچنین رسیدن به مناطق غنی برای زنده ماندن، حمل و نقل های روزانه یا فصلی انجام می دهند. برای صرفه جویی در انرژی، مسیر های نقل و انتقال و انتخاب زمان های حرکت اهمیت پیدا می کند. با وجود اینکه سوال هایی مثل: چگونه حیوان ها مسیر های خود را پیدا می کنند و چگونه این اطلاعات را حس کرده و در مغز پردازش می کنند؟ قرن هاست که مطرح شده است، تنها در چند دهه ی اخیر مطالعه در زمینه های جهت یابی و ناوبری حیوان ها گسترش پیدا کرده است. به علاوه، دانش ما به صورت شایانی در زمینه مکانسیم های مختلف سلولی و قطب نما های بیولوژیکی در حیوان ها و کمک گرفتن از آن برای جهت یابی و ناوبریشان پیشرفت کرده است. قابل توجه ترین این پیشرفت ها در فهمیدن این است که چگونه حیوان ها می توانند اطلاعات ایجاد شده توسط میدان های مغناطیسی جغرافیایی زمین را حس کرده و از این اطلاعات برای وظایف ذاتی خودشان، مثل جهت یابی با استفاده از مفهوم قطب نما در طول مهاجرت، بهره گیرند. با وجود تحقیق های گسترده بین رشته ای و کاملاً یکپارچه در دهه های اخیر هنوز کاملاً نمی دانیم که حیوان ها چگونه میدان مغناطیسی زمین را درک می کنند. ما می دانیم که حیوان ها از اطلاعات مغناطیسی جغرافیایی برای جهت یابی خود استفاده می کنند ولی گیرنده ای که این اطلاعات را دریافت می کند نامعلوم باقی مانده است. در بخش 3 کتاب *Animal Movement Across Scales* در مرجع [1] اطلاعات مفیدی در زمینه ناوبری و جهت یابی حیوان ها نوشته شده است. در ادامه به ناوبری با کمک میدان مغناطیسی می پردازیم.

پذیرش مغناطیسی (Magnetoreception) به عنوان یک حس شناخته شده است که با کمک این حس موجود زنده قادر خواهد بود میدان مغناطیسی را تشخیص دهد و از آن برای درک جهت، تعیین مسیر و میزان ارتفاع از سطح دریا استفاده کند. این حس توسط رنج وسیعی از حیوان های برای جهت یابی و ناوبری و یک روش برای ایجاد نقشه های محلی توسط آنها به کار گرفته می شود. پذیرش مغناطیسی به منظور جهت یابی و ناوبری به درک میدان مغناطیسی زمین می پردازد. پذیرش مغناطیسی همچنین در باکتری ها، بندپایان، نرم تنان و گروه وسیعی از مهره داران وجود دارد این در

حالی است که وجود این حس در انسان هنوز مساله بحث برانگیزی است. فصل 8 کتاب Sensing in Nature در مرجع [2].

برای درک کامل پذیرش مغناطیسی ابتدا باید بفهمیم که میدان مغناطیسی جغرافیایی چه اطلاعاتی را می تواند فراهم آورد و از آن مهم تر فهمیدن این است که حیوان ها از چه نوع اطلاعاتی استفاده می کنند. زمین به خودی خود یک آهنربای قوی است که قطب های این آهنربا نزدیک قطب های چرخش زمین قرار دارند خطوط میدان در نیم کره جنوبی از سطح زمین به سمت بیرون است و به دور کره زمین چرخیده و در نیم کره شمالی به درون سطح زمین وارد می شود. به عنوان یک نتیجه همانگونه که در شکل مشاهده می کنید جهت خطوط میدان در نیم کره جنوبی از سطح زمین به سمت بالا، در خط استوای مغناطیسی خطوط موازی با زمین و در نیم کره شمالی جهت خطوط به سمت سطح زمین است پس با این تغییرات شیب و جهت گیری خطوط می توان یک تغییرات مکانی منظم برای خطوط میدان مغناطیسی زمین در نظر گرفت. همچنین چگالی یا شدت میدان در دو قطب زمین بیشترین مقدار (60 الی 65 میکروتسلا) و در نزدیک استوای مغناطیسی کمترین مقدار (25 الی 30 میکروتسلا) دارد که این یعنی از قطب به استوای مغناطیسی یک تغییرات شدت میدان به صورت متغیر با مکان (گرادیان شدت) در هر نیم کره خواهیم داشت. این میدان ممکن است به صورت مکانی هم به صورت زمانی تغییراتی داشته باشد ولی این تغییرات نسبت به اندازه میدان اصلی کوچک است. پس بنابراین این میدان مغناطیسی جغرافیایی یک اطلاعات ناوبری قابل اعتماد و همیشه در دسترس فراهم آورده است. این اطلاعات را می توان به دو گونه طبقه بندی کرد: اولاً بردار مغناطیسی که اطلاعات جهت یابی را برای استفاده به صورت قطب نما فراهم می کند و ثانیاً شدت کل میدان (به همراه شیب تغییر) که اطلاعاتی شبیه طول و عرض جغرافیایی را فراهم می کند که ممکن است به صورت بخشی از ناوبری، به عنوان نقشه نشان دهنده ی موقعیت مورد استفاده قرار گیرد که در حیوان ها نشان داده شده که از هر دوی این اطلاعات استفاده می کنند.



شکل 1: تصویر به صورت نمادین میدان مغناطیسی جغرافیایی زمین را نشان می دهد که حیوان ها می توانند از آن برای پذیرفتاری مغناطیسی استفاده کنند. خطوط شار میدان، شمال و جنوب مغناطیسی، شمال و جنوب جغرافیایی، استوای مغناطیسی و استوای جغرافیایی نمایش داده شده است. سمت چپ نشان دهنده ی دو قطبی های مغناطیسی است که می توان از آن به عنوان اطلاعاتی برای جهت یابی توسط قطب نما استفاده کرد. همچنین اندازه ی آنها نشانگر شدت میدان در نواحی مختلف است که از آن می توان به صورت نقشه برای ناوبری استفاده کرد. علاوه بر این از شیب زاویه ورود به زمین نیز می تواند به عنوان قطب نما یا نقشه به کار گرفته شود [3].

در اینجا لازم است که دو مفهوم جهت یابی (Orientation) و ناوبری (Navigation) بیان شوند. جهت یابی و ناوبری به صورت دو مفهوم متفاوت شناخته می شوند جهت یابی به معنی توانایی شناسایی مسیر و جهت اصلی شناخته می شود که با مفهوم قطب نما قابل تعیین است. ناوبری به معنی تعیین موقعیت با توجه به مقصد حرکت است که نیاز به یک نقشه مهاجرت دارد که اگر بر اساس میدان مغناطیسی زمین باشد لازم است شدت میدان و انحراف مغناطیسی زمین اندازه گیری شود.

### نظریه های کلی در پذیرش مغناطیسی به صورت زیر است:

به دلیل استفاده از پارامتر های مغناطیسی مختلف، پذیرش مغناطیسی به صورت یک پدیده ی یکدست نیست. ما باید از حیوان ها انتظار داشتن گیرنده های مغناطیسی مخصوص خودشان را داشته باشیم به طور مثال یک گیرنده برای درک اطلاعات جهت و دیگری برای درک اطلاعات شدت میدان و شیب آن.

برای درک کامل این حس مغناطیسی نیاز است چند نکته را بدانیم: 1- دانستن جزئیات فرایند های اساسی که واسطه ی ورودی مغناطیسی هستند، 2- محل قرار گیری اندام حس کننده، ساختار و طریقه اتصال آن به سیستم عصبی مرکزی و 3- بخشی از مغز که در پردازش اطلاعات مغناطیسی درگیر است. متأسفانه مطالعه ها در زمینه فعالیت های فیزیولوژی و نوروبیولوژی که همراه پذیرش مغناطیس هستند هنوز محدود است و ویژگی های اندکی از حیوان های پراکنده بدست آمده و به صورت جزئی بررسی شده است. مقاله های نوشته شده در موضوع پذیرش مغناطیسی هر کدام یافته های جدا از همی دارند که جنبه های مختلفی از ویژگی ها را مورد مطالعه قرار داده اند. تا کنون پرندگان بهترین گروه برای مطالعه بوده اند و شواهدی از اندام های نورونی و الکتروفیزیولوژیکی و ویژگی های رفتاری از آنها در دسترس است.

چندین مدل برای پذیرش مغناطیسی بر پایه تفاوت های بنیادی کارکردی پیشنهاد شده است که برجسته ترین آنها عبارت اند از: 1- القا 2- برهم کنش های فرایند های شیمیایی با میدان مغناطیسی اطراف 3- فرایند هایی با مواد مغناطیسی (فلز ها) در تعامل هستند. دنیای القا به جانوران دریایی محدود می شود چون در این مدل به آب دریا با رسانایی بالا در محیط اطراف نیاز است. این مدل برای یک گونه ماهی چهارگوش مطرح شده که یک اندام حساس به الکترونیک دارد. این اندام با نام Ampulla به اندازه کافی به تغییر ولتاژی که زمانی که ماهی سر خود را در جهت های مختلف در میدان تکان می دهد حساس است [4]. با این وجود شواهد مستقیمی برای نشان دادن اینکه این مدل دقیقاً برای جهت یابی استفاده می شود وجود ندارد.

دو مدل دیگر عمومی تر بوده و همچنین حیوان هایی که در خشکی یا در آب زندگی می کنند قادر به استفاده از آن هستند. شواهد تجربی (دست کم برای پرندگان) وجود دارد که حتی محل قرار گیری این گیرنده ها را تعیین می کند. در بخش بعد به شرح بیشتر این مدل های پذیرندگی مغناطیسی می پردازیم.

## بخش دوم [5]:

### 1- گیرندگی مغناطیسی درون رتینا بر اساس واکنش های جفت رادیکال

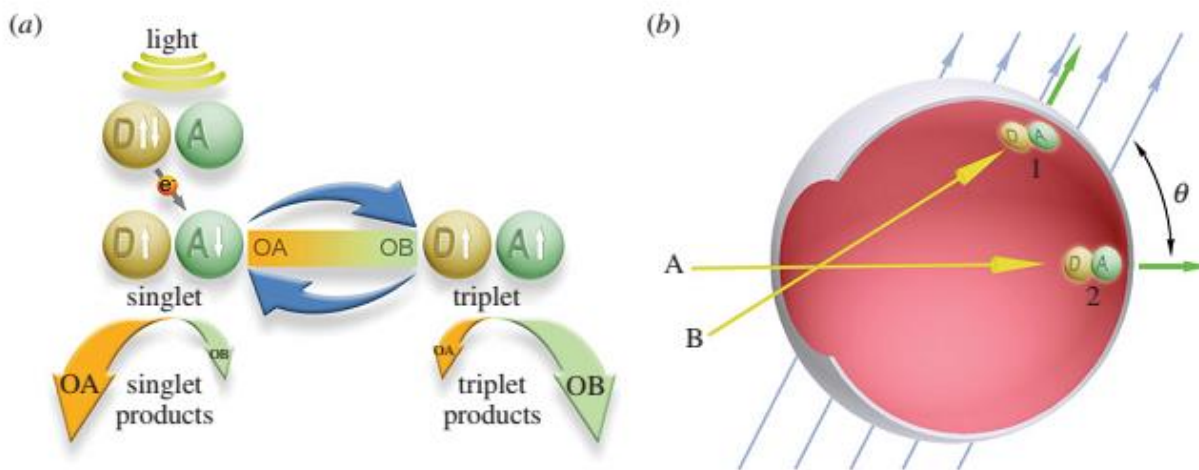
[6-8] Klaus Schulten -1970 این نظریه را بیان کرد که واکنش های شیمیایی ممکن است پایه و اساس پذیرندگی مغناطیسی پرندگان را تشکیل دهند.

[9] Steiner و Ulrich -1980 نشان دادند که میدان های مغناطیسی قوی (10 الی 100 گوس) می توانند در عملکرد واکنش های جفت رادیکال ها تاثیر بگذارند.

[10] 1987- تقریباً در همان دوران Kuznetsov و Vanag اولین بار تئوری را پیش بینی کردند که بیان می کرد میدان های مغناطیسی ضعیف در حدود میدان زمین (حدود 0.56 گوس) می تواند خروجی واکنش های دو رادیکال را تغییر دهد و این نظریه در 1993 توسط Batchelor به صورت آزمایشی نشان داده شد [11]. با این حال این نظریه به علت اینکه به صورت پراکنده و کوتاه بیان شده بود و در تحقیقات آن زمان جای نگرفته بود، تا سال های 2000 توجه بیولوژیست ها را به خود جلب نکرد.

[12] Thorsten Ritz -2000 مقاله ای منتشر کرد که ایده های Schulten را گسترش می داد و یک مدل به نام جفت رادیکال (radical pair) ارائه داد. این مدل پیشنهاد کرد که پرندگان احتمالاً از مولکول های پروتئینی حساس به نور به نام کریپتوکروم (cryptochrome) برای پذیرش مغناطیسی استفاده می کنند. نویسنده فرض کرد که کریپتوکروم ها باید درون رتینای پرندگان جای گرفته باشند و اکسیداسیون نوری به عنوان محصولی از جذب فوتون ها با انرژی مشخص بوجود می آید.

[13-15] 1978 الی 2008- در آزمایش های رفتاری بسیاری توسط Roswitha و Wolfgang Wiltshcko نشان داده شد که عملگری شبیه قطب نمای مغناطیسی در حیوان ها به ترکیب طیف های موجود در نور آزمایشگاه وابسته است.



شکل 2: تصویر به صورت نمادین مکانیسم جفت رادیکال را برای پذیرش مغناطیسی نشان می دهد. (a) در مولکول های نوری خاصی (کریپتوکروم) نور باعث انتقال یک الکترون بین دهنده (D) و گیرنده ی الکترون (A) می شود و مولکول ها یک جفت رادیکال در حالت تکی (با اسپین خلاف جهت) یا سه تایی (با اسپین هم جهت) تولید می کند. گذار بین حالت تکی و سه تایی ( فلش آبی) تحت تاثیر شرایط مختلف میدان مغناطیسی تغییر می کند در نتیجه با تغییر نرخ گذار بین حالت ها میزان محصول تولید شده توسط حالت تکی یا سه تایی تغییر می کند. (b) نور تابیده شده به چشم (پرتو های A و B) در محل های 1 و 2 از برخورد با کریپتوکروم هایی که به صورت عمود روی رتینا قرار گرفته اند (بردار سبز) باعث بوجود آمدن جفت رادیکال ها می شود که نسبت به میدان مغناطیسی خارجی (بردار آبی) زاویه ای برابر  $\theta$  دارند. این تفاوت در زاویه می تواند اثر اضافه ای روی زاویه دید پرنده داشته باشد [3].

## 2- پذیرش مغناطیسی به کمک ذره های اکسید آهن که به عصب های سه قلو وصل شده و در منقار بالایی قرار دارند

از آنجا که قطب نمای مغناطیسی انسان از ویژگی های مواد فلزی استفاده می کند اینکه یک مکانیسم مشابهی برای پرندگان پیشنهاد شود غافلگیرکننده نیست و وجود یک ماده مغناطیسی شامل آهن، مثل مگنتیت (اکسید آهن  $Fe_3O_4$ ) در اندام های حساس به میدان مغناطیسی می تواند به صورت یک فرضیه بررسی شود.

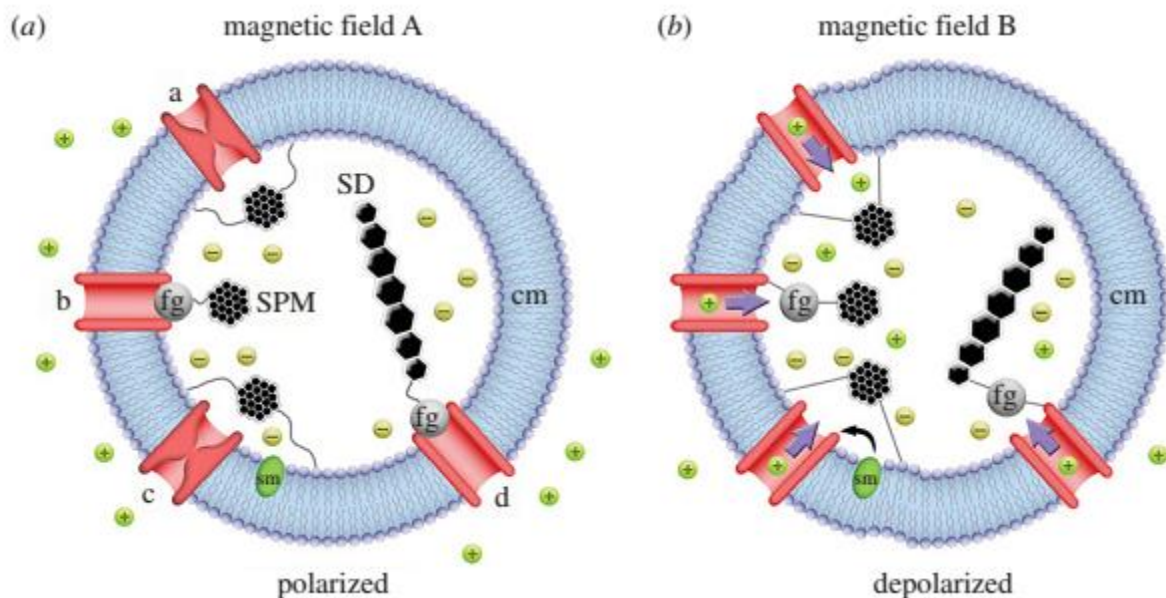
[16] 1962- وجود مگنتیت در ارگان های زنده برای گونه ای از نرم تنان گزارش شد اگرچه این مگنتیت به علت عملکرد پذیرفتاری مغناطیسیش پدیدار نشده بود ولی به علت اینکه رفتاری کاملا مکانیکی از خود نشان می داد مورد توجه قرار گرفت و مشاهده شد که این ماده می تواند در بافت حیوان ها هم وجود داشته باشد.

[17] 1975- باکتری مگنتوتاکتیک (Magnetotactic bacteria) کشف شد که از مگنتیت درون سلول خود برای هم ترازی مغناطیسی استفاده می کرد. این کشف اولین گواه شناخته شده برای پذیرش مغناطیسی بر پایه ی آهن در جانوران زنده و تشویق برای یافتن و تمرکز روی تعیین ساختار های مشابه مغناطیسی در رنج وسیعی از جانداران به ویژه پرندگان بود [18]. در همان سال ها مهاجرت پرندگان مانند سینه سرخ های اروپایی و مرغ های نغمه خوان و استفاده از میدان های مغناطیسی زمین برای تعیین مناسب جهت های فصلی برای کوچ شناخته شده بود همچنین مطالعه هایی روی بازگشت کبوتران به آشیانه و استفاده های آنها از میدان مغناطیسی برای ناوبری انجام گرفته بود اما مکانیسم های پذیرفتاری مغناطیسی در پرندگان در سال های 1970، با وجود تحقیق های گسترده در یافتن مگنتیت در بافت های پرندگان، همچنان به صورت یک راز باقی مانده بود.

[19] 1985- طبق این مقاله در دمای بدن پرندگان کیفیت مغناطیسی مگنتیت به اندازه ذره ی آن وابسته است به گونه ای که ذره های بزرگ (>100nm) حاوی چندین نواحی مغناطیسی بوده و در غیاب میدان مغناطیسی خارجی تمایل دارند یک ممان مغناطیسی ضعیف داشته باشند در صورتی که ذرات کوچکتر (10-100nm) ممکن است حاوی یک ناحیه مغناطیسی با ممان مغناطیسی پایدار، جهت گیری شده به سوی محور ناهمسانگرد کریستال، باشد و همانند یک ذره ممکن است عملکردی مانند یک سوزن مغناطیسی که با خطوط میدان مغناطیسی می چرخد داشته باشد. علاوه بر ایندو ذره های کوچکتر (<10nm) سوپرپارامگناطیس می باشند به آن معنا که ممان مغناطیسی آنها، که ممکن است نسبتا بزرگ باشد، احتمال دارد به صورت تصادفی در جهت هایی نسبت به محور های کریستال قرار گیرد یعنی تا زمانی که میدان مغناطیسی خارجی اعمال نشده باشد جهت گیری نخواهند کرد.

[20] 2001- ساختاری شامل مگنتیت در حفره های هوایی کبوتر های مشاهده شد و پیشنهاد شد که این سلول هایی که دارای خاصیت فلزی هستند می توانند اطلاعات مغناطیسی را از طریق شاخه های چشمی عصب های سه قلو به مغز انتقال دهند.

[3] 2015- مقاله مروری که کارهای انجام شده در این مدل را بررسی کرده است. عنوان مقاله: "Magnetic particle-mediated magnetoreception".



شکل 3: تصویر به صورت نمادین مکانیسم مختلف پذیرش مغناطیسی بر پایه ی ذرات مغناطیسی را در دو میدان مغناطیسی متفاوت نشان می دهد. پذیرنده های مغناطیسی متفاوت با دسته بندی ذرات سوپرپارامغناطیس (SPM) در نیم کره ی چپ و سیستم تک ناحیه (SD) در نیم کره راست دیده می شود. در میدان مغناطیسی A سلول پلاریزه است و کانال های یونی که در غشای سلول قرار دارند بسته هستند و تبادل یون نداریم. با اعمال میدان B مگنتیت SD جابجا شده و کانال وابسته به نیروی (fg) باز می شود همچنین بقیه کانل ها نیز اجازه عبور یون را می دهند. کانال a مشابه C بوده و به یک مسنجر ثانویه نیاز دارد. در تمام موارد سلول دیپلاریزه شده باعث بوجود آمدن پتانسیل عمل می شود و این پتانسیل عمل از طریق عصب های تو برنده باعث فعال شدن ناحیه از مغز می شود [3].

### 3- پذیرندگی مغناطیسی در گوش داخلی؟؟

[4] 2015- علاوه بر دو مکانیسم گفته شده برای پذیرش مغناطیسی، شواهدی برای یک مکانیسم دیگر نیز وجود دارد که در بخش سوم مقاله ای مروری با عنوان "Magnetoreception Systems in Birds: A Review of Current Research" بیان شده است و تاریخچه آن به صورت زیر است.

[21] 2001- نویسنده ادعا کرد که ذرات مغناطیسی شامل اکسید آهن در اندامی به نام لاجنا (lagena) بخشی از گوش میانی در ماهی ها و پرندگان وجود دارد. ولی این گزارش ها مورد توجه محققان قرار نگرفته بود تا جایی که در

[22] 2011- تحریک های مغناطیسی انجام گرفت و فعالیت های نورونی در نواحی مختلف مغز به ثبت رسید. جالب اینجا بود که با جراحی لاجنا سطح فعالیت ثبت شده در مغز به شدت کاهش یافت و این مشاهده باعث شد که محققان دریابند که پذیرنده های مغناطیسی باید در درون لاجنا قرار گرفته باشند. مشکلی که در مطالعه ی این مدل وجود دارد این است که دست بردن در این اندام برای پرندگان خطرناک است و امکان مرگ آنها را بالا می برد و نمی توان آزمایش های رفتاری روی آنها انجام داد.

[23] 2012- تلاش هایی انجام شد تا نشان دهند که برخی از نورون ها در هسته ی دهلیزی (Vestibular nuclei) به تغییرات میدان مغناطیسی پاسخ نشان می دهند. نتایج این مطالعه پیشنهاد کرد که نورون ها جهت، شدت و قطبش میدان را کد می کنند. لازم به ذکر است که این نورن های ممکن است از نواحی سنسوری دیگری هم سیگنال را دریافت کنند در نتیجه پاسخ نورون های دهلیزی به تحریک مغناطیسی نمی تواند اثبات کند که گیرنده ها در سیستم دهلیزی و لاجنا قرار دارند. البته این نکته را نمی توان رد کرد که ممکن است اطلاعات مغناطیسی از هر جای دیگری دریافت شوند و هسته ی دهلیزی تنها این اطلاعات را تلفیق می کند.

[24] 2013- وجود مقدار زیادی از فریهدریت (ferrihydrite) در سلول های مو درون گوش داخلی کبوتر ها ممکن است به طور غیر مستقیم به وجود پذیرندگی مغناطیسی در این اندام اشاره کند، دلیل آن است که فریهدریت درون بافت بیولوژیکی دارای خاصیت های مغناطیسی است.

## مراجع:

[1] Hansson, Lars-Anders, Susanne Åkesson, and Susanne Akesson, eds. *Animal movement across scales*. Oxford University Press, USA, 2014.

[2] Wiltschko, F.R. and Wiltschko, W. (2012). "Chapter 8 - Magnetoreception". In Carlos López-Larrea. *Sensing in Nature*. Springer.

[3] Shaw, Jeremy, et al. "Magnetic particle-mediated magnetoreception." *Journal of The Royal Society Interface* 12.110 (2015): 20150499.

[4] Kalmijn, Ad J. "Electric and magnetic sensory world of sharks, skates, and rays." *Sensory biology of sharks, skates and rays* (1978): 507-528.

[5] Kishkinev, D. A., and N. S. Chernetsov. "Magnetoreception systems in birds: A review of current research." *Biology Bulletin Reviews* 5.1 (2015): 46-62.

[6] Schulten, Klaus, Charles E. Swenberg, and Albert Weller. "A biomagnetic sensory mechanism based on magnetic field modulated coherent electron spin motion." *Zeitschrift für Physikalische Chemie* 111.1 (1978): 1-5.

[7] Schulten, Klaus. "Magnetic field effects in chemistry and biology." *Festkörperprobleme 22*. Springer Berlin Heidelberg, 1982. 61-83.

[8] Schulten, K., and A. Windemuth. "Model for a physiological magnetic compass." *Biophysical effects of steady magnetic fields* 11 (1986): 99-106.

[9] Steiner, Ulrich E., and Thomas Ulrich. "Magnetic field effects in chemical kinetics and related phenomena." *Chemical Reviews* 89.1 (1989): 51-147.



- [10] Kuznetsov, A. N., and V. K. Vanag. "Mechanism of action of magnetic fields on biological systems." *Izvestiia Akademii nauk SSSR. Serii biologicheskaiia* 6 (1987): 814.
- [11] Batchelor, S. N., et al. "Time-resolved and modulation methods in the study of the effects of magnetic fields on the yields of free-radical reactions." *The Journal of Physical Chemistry* 97.50 (1993): 13250-13258.
- [12] Ritz, Thorsten, Salih Adem, and Klaus Schulten. "A model for photoreceptor-based magnetoreception in birds." *Biophysical journal* 78.2 (2000): 707-718.
- [13] Wiltschko, Wolfgang. "Further analysis of the magnetic compass of migratory birds." *Animal migration, navigation, and homing*. Springer Berlin Heidelberg, 1978. 302-310.
- [14] Wiltschko, Wolfgang, Marcus Gesson, and Roswitha Wiltschko. "Magnetic compass orientation of European robins under 565 nm green light." *Naturwissenschaften* 88.9 (2001): 387-390.
- [15] Wiltschko, Roswitha, et al. "Light-dependent magnetoreception: orientation behaviour of migratory birds under dim red light." *The Journal of experimental biology* 211.20 (2008): 3344-3350.
- [16] Lowenstam, Heinz A. "Magnetite in denticle capping in recent chitons (Polyplacophora)." *Geological Society of America Bulletin* 73.4 (1962): 435-438.
- [17] Blakemore, Richard. "Magnetotactic bacteria." *Science* 190.4212 (1975): 377-379.
- [18] Kirschvink, Joseph L., and Michael M. Walker. "Particle-size considerations for magnetite-based magnetoreceptors." *Magnetite biomineralization and magnetoreception in organisms*. Springer US, 1985. 243-254.
- [19] Banerjee, Subir K., and Bruce M. Moskowitz. "Ferrimagnetic properties of magnetite." *Magnetite biomineralization and magnetoreception in organisms*. Springer US, 1985. 17-41.
- [20] Williams, Matthew N., and J. Martin Wild. "Trigeminally innervated iron-containing structures in the beak of homing pigeons, and other birds." *Brain research* 889.1 (2001): 243-246.
- [21] Harada, Masaki Taniguchi, Hirofumi Namatame, Atsuo Iida, Yasuo. "Magnetic materials in otoliths of bird and fish lagena and their function." *Acta oto-laryngologica* 121.5 (2001): 590-595.
- [22] Wu, Le-Qing, and J. David Dickman. "Magnetoreception in an avian brain in part mediated by inner ear lagena." *Current Biology* 21.5 (2011): 418-423.
- [23] Wu, Le-Qing, and J. David Dickman. "Neural correlates of a magnetic sense." *science* 336.6084 (2012): 1054-1057.
- [24] Lauwers, Mattias, et al. "An iron-rich organelle in the cuticular plate of avian hair cells." *Current Biology* 23.10 (2013): 924-929.