کاربرد درک الکتریکی در ماهیان با تأکید بر ماهیان خاویاری

فائزه مرتضائی [*۱]، سهیل یوسفی [۲]

[۱] گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان، صومعه‌سرا، گیلان، ایران

[۲] انستیتو تحقیقات بین‌المللی ماهیان خاویاری، موسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران

چکیده

سیستم درک الکتریکی در بسیاری از گونه‌های ماهیان مورد مطالعه قرار گرفته است. میدان‌های الکتریکی از طریق تحریک اندام‌های الکتریکی به‌وجود می‌آیند. در ماهیان دارای سیستم الکتریکی ضعیف، بر اثر آشفتگی در میدان مغناطیسی، اجسام توسط اندام‌های الکتریکی تشخیص داده می‌شوند. میدان الکتریکی در ماهیان خاویاری، دو قطبی بوده و دربرگیرنده قطب منفی در سر و قطب مثبت در دم است که سبب می‌شود تا سایر ماهیان را در میان گله بر اساس قطب‌های سر و دم ردیابی کنند. ماهیان خاویاری دارای تعداد زیادی از گیرنده‌های الکتریکی (تحت عنوان آمپول لورنزینی) در بخش پوزه خود هستند. سیستم درک الکتریکی در تغذیه، مهاجرت، جفت‌گیری و تعیین جنسیت ماهیان خاویاری نقش دارد. این مطالعه مروری، بر ساختار اندام الکتریکی، سازوکارها، کاربرد حس الکتریکی در فرآیند تعیین جنسیت به‌عنوان یک روش غیر تهاجمی نوین و نقش‌های اساسی آن در تغذیه ماهیان خاویاری به‌عنوان گونه‌های با ارزش در صنعت آبزی‌پروری متمرکز است.

کلمات کلیدی: تعیین جنسیت، درک الکتریکی، ماهیان خاویاری، میدان‌های الکتریکی

[۱] نویسنده مسئول * mortezaei_faeze@yahoo.com

بیان مسئله

الکترومغناطیس مفهومی است که برای اشاره به نیروهای الکتریکی و مغناطیسی و یا نیروی ایجاد شده در نتیجه یک جریان الکتریکی به‌کار می‌رود. این نیرو یکی از چهار نیروی اساسی در جهان است؛ به‌نحوی که برهم‌کنش‌های الکترومغناطیس به طرق مختلفی بر جهان زنده تأثیرگذار هستند. برهمکنش بین الکترون‌ها و پروتون‌ها عمدتاً شیمی بین جهان زنده و غیر زنده و ساختار حیات را تشکیل می‌دهد. توزیع و پویایی این ذرات باردار درون ماده منجر به ایجاد میدان الکتریکی شده و اثر خود را در مقیاسی بزرگتر از اتم و مولکول‌های کوچک بلکه ساختارهای نمایان می‌سازند (Zhou and Pang, 2018). از اواسط قرن بیستم با گسترش هرچه بیشتر علوم، انسان موفق به کشف سیگنال‌های ضعیفی گردید که توسط سایر جانداران تولید می‌شدند. این کشف باعث افزایش استقبال محققان از نقش سیستم الکتریکی و سایر حواس محیطی، مکان‌یابی، رفتار اجتماعی و جفت‌یابی شد. درک الکتریکی در بسیاری از گونه‌های ماهیان مانند مارماهی الکتریکی آفریقای جنوبی (*Electrophorus electricus*) با قابلیت تخلیه الکتریکی با ولتاژ بالا، ماهیان الاسموبرانش، اعضای خانواده کاردماهیان (Apteronotidae) و ماهیان خاویاری مورد مطالعه قرار گرفته است (Smith, 2013).

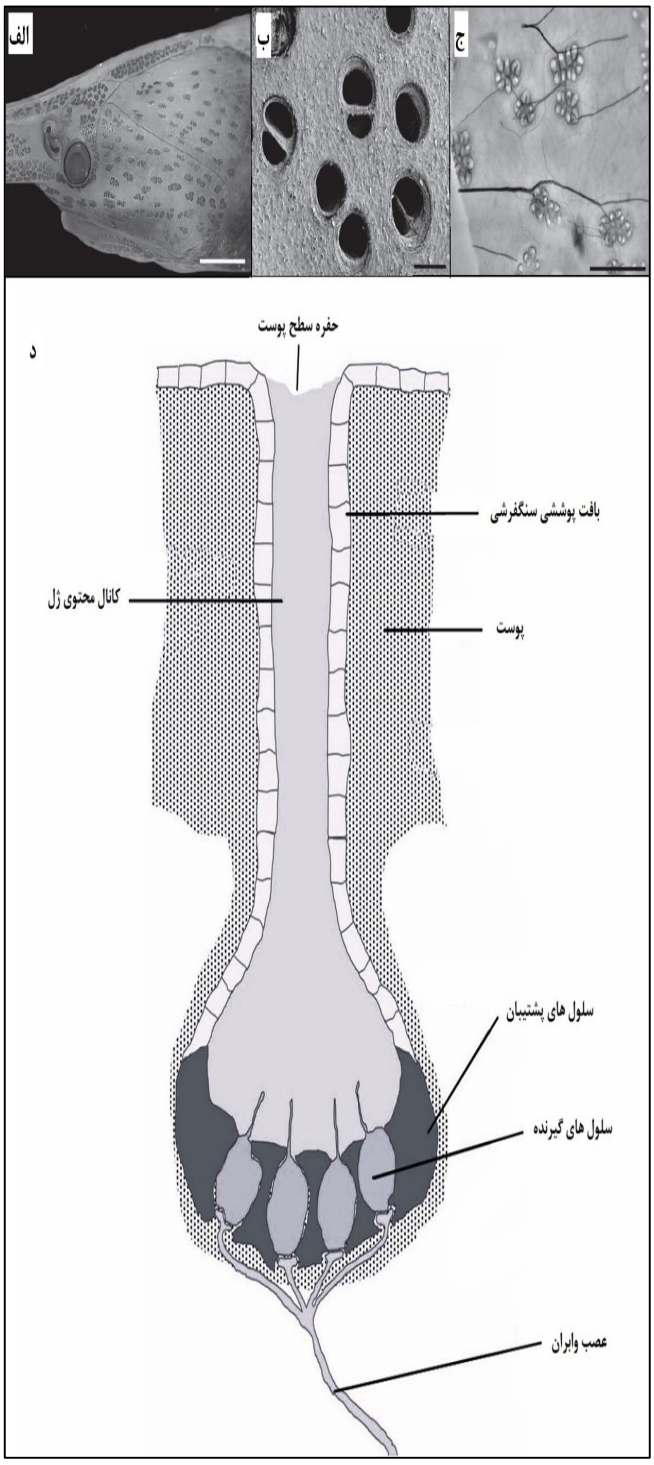
ماهیان خاویاری، از جایگاه تکاملی ویژه‌ای برخوردار هستند. آنها دارای حدود ۵۰۰۰ گیرنده الکتریکی قابل تشخیصی به‌نام آمپول لورنزینی بر بخش زیرین پوزه خود هستند (Jørgensen, 2005; Zhang *et al.,* 2012). گیرنده های الکتریکی یا آمپول‌های لورنزینی گروهی از اندام‌های حسی بوده که شامل شبکه‌ای از مجاری پر شده از نوعی ماده ژلاتینی هستند و در گونه‌های مختلفی مانند تاسماهی استرلیاد (*Acipenser ruthenus*) و تاسماهی چینی (*A. sinensis*) شناسایی شده‌اند (Jørgensen, 1980). کارکرد این گیرنده‌ها مشابه آمپول‌های حسی–الکتریکی در ماهیان غضروفی غول‌پیکر (الاسموبرانش‌ها) مثل کوسه‌ها و سفره ماهیان بوده و به میدان‌های الکتریکی ضعیف تولید شده از محیط آبی حساس هستند. تعداد زیاد اندام‌های الکتریکی در ماهیان خاویاری بیانگر نقش مهم این حس در چرخه زندگی آنها است. حس الکتریکی که در ماهیان خاویاری جهت شکار استفاده می‌شود، می‌تواند در عملکرد جفت‌گیری و تشکیل گله نیز نقش داشته باشد (Zhang *et al.,* 2012). با توجه به نقش‌های متنوع گیرنده‌های الکتریکی در چرخه حیات ماهیان، در مطالعه مروری حاضر، به تعریف ویژگی‌های حس الکتریکی و عملکردهای مرتبط با آن شامل نقش گیرنده‌های الکتریکی در جفت‌یابی، تعیین جنسیت، ردیابی شکار و تغذیه گونه‌های مختلف به‌ویژه ماهیان خاویاری پرداخته می‌شود.

ویژگی‌های گیرنده الکتریکی

ماهیان از اندام‌های الکتریکی به‌منظور درک محیط، بروز رفتارهای تولیدمثلی، شکار و فعالیت‌های گروهی بهره می‌برند. میدان‌های الکتریکی غیر زنده، حاصل از آهن‌ربای زمین بوده و ماهیان با شنای خود در محدوده این آهن‌ربا یک جریان الکتریکی القایی تولید می‌کنند. همچنین، حرکت آبشش‌ها و انقباضات عضلات از دیگر منشاءهای میادین الکتریکی هستند. گیرنده‌های الکتریکی از لحاظ ویژگی‌های ساختاری و فیلوژنیک به سه گروه گیرنده‌های آمپولی، کیسه‌ای و پوستی دسته‌بندی می‌شوند. گیرنده‌های آمپولی از کانالی در سطح پوست که به آمپول واجد سلول‌های حسی منتهی می‌شود، تشکیل شده‌اند. اندام‌های آمپولی، به دو دسته آمپول‌های لورنزینی و خط جانبی تقسیم‌بندی می‌شوند.

آمپول لورنزینی (شکل ۱) در اطراف سر کوسه‌ها، ماهیان خاویاری و سطح پشتی و شکمی باله‌های سپرماهیان قرار

داشته که معمولا با چشم غیر مسلح قابل رویت هستند. این آمپول‌ها، میدان مغناطیسی که توسط ماهیان دیگر تولید می‌شود را تشخیص داده و آن‌ها را قادر می‌سازد تا طعمه‌هایی که در شن و ماسه بستر قرار دارند را شناسایی کنند. تحقیقات جدید نشان می‌دهد که ماهیان به‌وسیله آمپول‌های لورنزینی می‌توانند تغییرات درجه حرارت آب را درک کنند. این قابلیت به ژل درون آمپول‌ها ارتباط داشته که توسط سلول‌های غده‌ای لایه‌پوششی درون آمپول‌ها ترشح می‌شود. این ژل‌ها دارای خواص الکتریکی شبیه یک نیمه هادی بوده که اجازه می‌دهند تغییرات درجه حرارت به سیگنال‌های الکتریکی ترجمه شده و ماهی آن‌ها را درک کند (Zlenko *et al*., 2023).



شکل ۱- نمایی شماتیک از ساختار گیرنده الکتریکی در ماهیان خاویاری. الف: نمای سر و پراکنش دسته‌ای گیرنده‌های آمپولی در سطح آن. ب: تصویر میکروسکوپ الکترونی از حفره‌های گیرنده‌های آمپولی در سر ماهی. ج: رنگ‌آمیزی بافت پوست سر ماهی و عصب‌رسانی حفره‌های اندام‌های الکتریکی. د: نمای شماتیک آمپول لورنزینی (تصاویر برگرفته از Hofmann, 2011).

مکانیسم تحریک الکتریکی

در اکثر ماهیان، اندام الکتریکی الیاف تغییر شکل‌یافته ماهیچه‌های مخطط هستند و از دسته سلول‌های تخت عصب‌دهی شده‌ای تشکیل شده‌اند. ماهیان دارای سیستم الکتریکی ضعیف مانند ماهیان خاویاری می‌توانند اجسامی با مقاومت ظاهری متفاوت از محیط را در اثر آشفتگی که در میدان حاصل از اندام‌های الکتریکی به‌وجود می‌آید، تشخیص دهند. تخلیه‌های اندام‌های الکتریکی در اطراف بدن ماهی یک میدان الکتریکی ایجاد می‌کند که ماهی را به یک دوقطبی الکتریکی نوسانگر تبدیل کرده و از سر تا دم ماهی را در بر می‌گیرد. با تکرار چرخه تخلیه اندام‌های الکتریکی، قطب مثبت و منفی به صورت تناوبی تغییر می‌یابد (Ladich *et al.,* 2006).

تخلیه‌های الکتریکی در ماهیان دارای سیستم الکتریکی ضعیف مانند ماهیان خاویاری را می‌توان در دو رده ساختاری طبقه‌بندی کرد. فرکانس‌های پالسی که رشته‌ای وابسته از نوسان‌های کوتاه هستند و به‌وسیله دوره‌های سکون الکتریکی از هم جدا می‌شوند. هر پالس می‌تواند شامل ۱ تا ۶ فاز مجزای قطبی متناوب باشد. انواع موجی‌شکل که موج‌های شبه‌سینوسی ممتدی، فاقد بازه‌های سکون الکتریکی و دارای ۱ تا ۴ فاز هستند. سیگنال‌های پالسی تولیدی در ماهیان دارای سیستم الکتریکی ضعیف بین ۱۵۰–۱ هرتز و سیگنال‌های موجی در حدود ۲۲۰۰–۲۰ هرتز گزارش شده است (Ladich *et al.,* 2006).

نقش درک الکتریکی در تعیین جنسیت

ماهیان دارای تنوع جنسیتی بالایی در بین مهره‌داران بوده، با این حال، در بسیاری از گونه‌ها علائم ظاهری قابل تشخیص نبوده و تعیین جنسیت توسط تمایزات ریخت-شناسی امر دشواری است. در این گونه‌ها از روش‌های تهاجمی و غیر تهاجمی جهت تعیین جنسیت استفاده می‌شود. در روش‌های غیرتهاجمی نظیر سونوگرافی و اندوسکوپی، عمل جراحی صورت نگرفته و به بافت‌های ماهی آسیب کمتری وارد می‌شود. این روش در تعیین جنسیت ماهیان مختلفی به‌کار رفته است (Whiteman *et al.,* 2005). روش‌های تهاجمی که مبتنی بر برداشت نمونه بافت، برای مطالعات میکروسکوپی یا ماکروسکوپی هستند؛ دقت بالایی داشته، ولی به ماهی آسیب رسانده و آن را در معرض عفونت‌های ثانویه قرار می‌دهند. بیوپسی گناد از دسته روش‌های تعیین جنسیت تهاجمی به شمار می‌رود و روشی شناخته شده در تعیین جنسیت و آزمایش‌های هیستولوژیک ماهیان، به‌ویژه ماهیان خاویاری است. البته این روش، سبب بروز استرس بالایی به ماهیان در مقایسه با تکنیک‌های کمتر تهاجمی می‌شود (Falahatkar and Poursaeid, 2013).

نمونه‌گیری از خون که با تعیین سطوح هورمونی ماهیان در ارتباط است، نیز از جمله روش‌های تعیین جنسیت ماهیان به شمار می‌رود. اگرچه این روش نیز مستلزم صرف زمان و آنالیز هورمون‌های جنسی نیازمند تجهیزات آزمایشگاهی است که نمی‌توان در مدت کوتاهی نتایج دلخواه را حاصل نمود. در این بین، اولتراسونوگرافی یک روش غیرتهاجمی بوده که دقت و سرعت بالایی در تعیین جنسیت داشته اما، نیازمند هزینه و تجهیزات پیشرفته و افراد مجرب در این زمینه است (Kynard and Kieffer, 2002). سایر روش‌ها مانند اندوسکوپی و لاپراسکوپی در ماهیانی که در مرحله دوم رسیدگی یا بالاتر قرار دارند، قابل استفاده بوده و نیازمند ابزارهایی دقیق اما هزینه‌بردار هستند (Falahatkar *et al.,* 2011).

به طور کلی، تعیین جنسیت در تعداد بسیاری از ماهیان، باید مبتنی بر سرعت عمل و دقت بالا باشد. زیرا در برخی مواقع فرصتی برای بیهوش کردن ماهیان وجود نداشته و ممکن است تعداد زیادی از مولدین در یک روز کاری تعیین

جنسیت شوند. در این بین به نظر می‌رسد، روشی باید در تعیین جنسیت مد نظر قرار گیرد که بتواند علاوه بر دقت و سرعت عمل، از کارایی بالا در شرایط مختلف نیز برخوردار باشد. همچنین، افراد با سطح دانش پایین‌تر هم بتوانند این روش را به کار گیرند. علاوه بر روش‌های فوق، روش دیگری نیز برای تعیین جنسیت به‌صورت غیرتهاجمی وجود دارد که مبتنی بر سیستم الکتریکی بدن ماهیان است. با توجه به وجود تولیدات الکتریکی در گونه‌های مختلف ماهیان این انتظار می‌رود که بتوان با ثبت و تحلیل فرکانس این میدان‌های الکتریکی به نتایجی در زمینه جنسیت و مرحله رسیدگی ماهیان دست یافت.

تفاوت فرکانس تخلیه اندام‌های الکتریکی در جنس‌های نر و ماده ماهیان

ماهیان دارای سیستم الکتریکی ضعیف، مدل‌های جانوری خوبی به‌منظور مطالعه تفاوت‌های جنسی و سیگنال‌های الکتریکی ارتباطی بین گونه‌ای هستند. به‌عبارت دیگر، جریان‌های عصبی تولیدکننده این سیگنال‌ها، ساده، پایدار، خاص هر گونه، مرتبط با تمایزات جنسی، تحت کنترل هورمون‌ها و برخی از پارمترهای محیطی هستند (Zakon and Dunlap, 1999). فرکانس تخلیه اندام‌های الکتریکی می‌تواند تابعی از نوع و میزان تولید هورمون‌های استروئیدی باشد. مطالعه‌ای نشان داده است که تیمار ماهیان شبح سیاه (*Aptronotus albifrons*) و شبح قهوه‌ای (*Apteronotus leptorhynchus*) با سطوح مختلف آندروژن سبب کاهش فرکانس تولیدی می‌شود (Dunlap *et al.*, 1998).

ماهیان الکتریکی ضعیف فرکانس‌های الکتریکی تقریبا ثابتی را تولید می‌کنند. زمانی که دو یا چند گونه به یکدیگر نزدیک می‌شوند، میدان الکتریکی تلفیق و تولید خواهد شد. تمایزات جنسی می‌توانند سبب تولید فرکانس‌های متفاوتی در بین گونه‌ها شوند. این تفاوت‌ها در ساختار و مدت زمان فرکانس تولید شده خود را نمایان می‌سازد (Zhou and Smith, 2006). سیستم گیرنده الکتریکی خط جانبی نیز سیر اولیه تکاملی را در تاریخچه حیات ماهیان پدیدار می‌سازد. محدوده پایه فرکانس به عنوان یک شاخص در هر گونه، به جنسیت و سن وابسته است. این فرکانس پایه تحت شرایط دمایی ثابت تقریبا پایدار بوده، اما در حضور هر نوع عامل متفرقه‌ای دستخوش تغییر می‌شوند (Moortgat *et al.*, 1998). مطالعات اندکی بر روی تعیین جنسیت ماهیان خاویاری توسط بررسی فرکانس الکتریکی تولید شده از ماهیان نر و ماده تمرکز داشته‌اند. برای مثال، یوسفی و فلاحتکار (۱۴۰۰) به بررسی تولید و ثبت فرکانس‌های تخلیه اندام الکتریکی توسط جنس‌های نر و ماده سه گونه مختلف از ماهیان آب شیرین شامل ماهی شبح سیاه از خانواده کاردماهیان، ماهی طلایی (*Carassius auratus*) از خانواده کپورماهیان و تاسماهی استرلیاد از خانواده تاسماهیان پرداختند. پس از تعیین جنسیت ماهیان توسط ویژگی‌های ریخت‌شناسی و یا بافت‌برداری، فرکانس‌های تخلیه اندام‌های الکتریکی تولید شده، توسط دستگاه اسیلوسکوپ ثبت شد. در این مطالعه برای اولین بار فرکانس تخلیه اندام‌های الکتریکی تولید شده توسط جنس‌های نر و ماده ماهی استرلیاد ثبت و گزارش گردید. مقادیر فرکانس ثبت شده در جنس‌های نر (۸۴۹۰ هرتز) و ماده (۸۴۳۷ هرتز) ماهی استرلیاد، با یکدیگر تفاوت معنی‌داری را نشان داد. همچنین، این محققان توصیه کردند تا جهت دستیابی به فرکانس دقیق مرتبط با هر جنس تجهیزات تخصصی و پیشرفته‌تری استفاده شود. Dunlap و همکاران (۱۹۹۸) نیز بیان نمودند که برخی از جمعیت‌های گونه شبح سیاه تفاوت‌های بسیاری در محدوده فرکانس سیگنال تخلیه الکتریکی نر و ماده دارند. بر اساس نتایج مطالعه Kolodziejski و همکاران (۲۰۰۵) فرکانس تخلیه

اندام‌های الکتریکی ماهیان نر شبح سیاه در محدوده ۱۰۰۰–۸۵۰ هرتز و در ماده‌ها ۱۱۵۰–۱۰۰۰ هرتز بود.

نقش درک الکتریکی در تغذیه ماهیان

در محیط‌های آبی میدان‌های الکتریکی نقش اساسی و منحصر به فردی در ارتباط با شکار طعمه ایفا می‌کنند. برای مثال، تخلیه اندام‌های الکتریکی در ماهیان سبب تسهیل صید طعمه‌های مختلف حتی انواع ساکن می‌شوند (Catania, 2014). ماهیان خاویاری در محیط‌های طبیعی، گونه‌هایی فرصت‌طلب و کفزی‌خوار بوده که طعمه‌های طبیعی را در محیط‌های تاریک و کدر بدون وابستگی به حس بینایی، ردیابی و شکار می‌کنند. با این حال، تلفیقی از حواس مختلف دیگر نظیر بویایی و الکتریکی در این مسئله دخیل هستند. در پژوهشی، Kasumyan و Kazhlayev (۱۹۹۳) لارو گونه‌های مختلف ماهیان خاویاری اعم از ازون‌برون (*A. stellatus*)، تاسماهی روسی (*A. gueldenstaedtii*) و تاسماهی سیبری در سنین مختلف را در معرض عصاره‌های غذایی مختلف قرار دادند. واکنش ماهیان نسبت به عصاره‌ها در زمان گذار به تغذیه خارجی (فاز تغذیه ترکیبی از مواد مغذی طبیعی و غیر طبیعی) بیشتر تحت تاثیر حواسی همچون چشایی و لامسه و گیرنده‌های الکتریکی قرار داشت. زیرا توانایی تشخیص طعم‌های مختلف توسط سیگنال‌های ویژه در طول روزهای نخستین تغییر به تغذیه فعال اتفاق می‌افتد. رفتار تغذیه‌ای ممکن است در تفریخگاه‌های مربوط به ماهیان خاویاری به منظور بررسی پاسخ لارو به جیره‌های مختلف و ترجیح آن‌ها به مصرف انواع جیره، بر اساس آیتم‌هایی از قبیل خواص ارگانولپتیک و بویایی انجام گیرد.

مطالعات نشان داده‌اند که ماهیان خاویاری به اسیدهای آمینه آزاد حساس بوده و محرک‌های شیمیایی نخستین مکانیسم حسی در جستجوی غذا در این گونه از ماهیان هستند (Zhuang *et al.*, 2008). در مطالعه‌ای، میدان الکتریکی تولید شده توسط طعمه جهت بررسی و ثبت پاسخ اعصاب نسبت به غذای طبیعی شبیه‌سازی شد. پاسخ حس الکتریکی با تغییر دامنه محرک الکتریکی افزایش یافت که با ویژگی های الکتریکی گیرنده‌های آمپولی سایر ماهیان همسو بود. در محیط‌های طبیعی نیز شدت بالای میدان الکتریکی می‌تواند بیانگر طعمه و یا گله بزرگی از ماهیان باشد. حس الکتریکی به ماهیان در محیط‌هایی با کدورت بالا و مملو از ترکیبات شیمیایی کمک شایانی می‌کند. مطالعات نشان داده اند که میدان زیستی الکتریکی موجودات آبزی دو قطبی بوده و دربرگیرنده قطب منفی در سر و قطب مثبت در دم جاندار است (Zhang *et al.*, 2012). این مسئله ماهیان خاویاری را قادر می‌سازد تا ماهیان دیگر را در میان گله بر اساس قطب‌های سر و دم تعقیب کنند.

اعصابی که به ارتعاش اشیاء پاسخ می‌دهند در سیستم خط جانبی وجود داشته و در جستجوی طعمه به‌کار گرفته می شوند. همچنین، عادت‌دهی ماهیان خاویاری به تغذیه با جیره مصنوعی در شرایط کنترل شده سبب نمی‌شود که توانایی درک الکتریکی را در شکار طعمه از دست بدهند. مطالعات مختلفی نشان داده است که جانوران آبزی دوقطبی بوده، به نحوی که دارای یک قطب منفی در بخش سر و یک قطب مثبت در دم خود می‌باشند. این ویژگی به همراه سیستم خط جانبی حسی مکانیکی که ممکن است در اطرف طعمه استفاده شود، به ماهیان خاویاری کمک می‌کند تا طعمه‌های انفرادی را از مجموعه طعمه‌ها تشخیص داده و تحت تعقیب قرار دهند (Zhang *et al.*, 2012).

در مطالعه‌ای عملکرد و ویژگی‌های حس الکتریکی ماهیان خاویاری پرورشی توسط آزمایش‌های الکتروفیزیولوژیک (خصوصیات الکتریکی سلول‌ها و بافت‌های زیستی) و رفتارشناسی بررسی گردید. نتایج این مطالعه نشان داد که نرخ تغذیه تاسماهی سیبری تحت میدان‌های الکتریکی

طبیعی ایجاد شده توسط طعمه زنده محصور شده و همینطور میدان مصنوعی مشابه تولید شده توسط میله فلزی به طور معنی‌داری افزایش یافت. این مطالعه برای نخستین بار، شواهدی مبنی بر همبستگی رفتارهای ناشی از حس الکتریکی و پاسخ‌های الکتروفیزیولوژیک در ماهیان خاویاری پرورشی ارائه و نشان داد که حس الکتریکی دارای نقشی ذاتی در بروز رفتار تغذیه‌ای است. این ویژگی منحصربه‌فرد در حفظ بقای ماهیان خاویاری در طبیعت حائز اهمیت می‌باشد (Zhang *et al.*, 2012). در مطالعه دیگری، توسعه سیستم آمپولی در تاسماهی سیبری متعلق به جمعیت رودخانه Lena در طول ۴ هفته پس از تفریخ مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدای مرحله لاروی، ۸۶ درصد از ساختار آمپول‌ها تشکیل و در بخش زیرین سر متمرکز شد. پراکنش آمپول‌ها، خاص گونه‌ای بوده و افزایش شدت میدان بیوالکتریک در محیط‌های طبیعی سبب شکار طعمه‌های بزرگ‌تر و یا تعداد بیشتری از طعمه‌ها شد که در این باره، حساسیت سیستم الکتریکی به ماهی در یافتن طعمه بیشتر در محیط‌های کدر و مملو از امواج مبهم و ترکیبی کمک می‌کند (Zhang *et al.*, 2012).

در مجموع، ماهیان خاویاری در حین تغذیه، مهاجرت و رسیدگی جنسی از مجموعه‌ای از حواس از قبیل حس بویایی، گیرنده‌های چشایی و گیرنده‌های الکتریکی بهره می‌برند. با این حال، بررسی نقش سیستم الکتریکی و کاربرد آن در این ماهیان نیازمند مطالعات بیشتری است. این امکان وجود دارد که سیگنال‌های ایجاد شده توسط ماهیان در شرایط مختلف را دریافت و ثبت کرد. بر اساس یافته‌های به‌دست آمده می‌توان اذعان داشت که فرکانس الکتریکی تولیدی در ماهیان خاویاری تحت شرایط مختلف محیطی، برای مثال دامنه‌های دمایی مختلف و سطوح کدورت آب و یا در مراحل مختلف چرخه زندگی بسته به تغییر پارامترهای فیزیولوژیک مانند هورمون‌ها در بدن دستخوش تغییر شده که شناسایی و درک این تغییرات می‌تواند در بهبود شرایط پرورشی ماهیان اثرگذار باشند. در این راستا، می‌توان تحقیقاتی را در زمینه استفاده از تجهیزات پیشرفته جهت ثبت فرکانس، تغییر شرایط پرورشی مانند اثر انواع عوامل استرس‌زا، آلاینده‌ها، سطوح تراکم ذخیره، ترکیبات غذایی، هورمون‌تراپی بر تغییر دامنه فرکانس ماهیان خاویاری در آینده ترتیب داد.

توصیه ترویجی

تعیین جنسیت ماهیان خاویاری یکی از موارد مهم در مدیریت پرورش آنها است. این موضوع اغلب با پیچیدگی‌ها و چالش‌های زیادی همراه بوده و دلیل آن عدم وجود نشانه‌های ظاهری در جنس‌های نر و ماده است. بر اساس مطالبی که در این مطالعه گردآوری شده است، به‌شکل رایج از روش‌های بیوپسی، لاپراسکوپی، اندوسکوپی و یا اولتراسونوگرافی جهت تعیین جنسیت ماهیان خاویاری‌استفاده می‌شود که عموماً با استرس و دستکاری فراوان مولدین همراه بوده و در برخی موارد علاوه بر پرهزینه بودن، نیازمند آگاهی و تجربه بالا نیز هستند. از طرفی، روش‌های تعیین جنسیت باید علی‌رغم وارد ساختن کمترین فشار به ماهی بتوانند بهترین تحلیل را از جنسیت آن ارائه داده و به‌راحتی توسط افراد به‌کار گرفته شوند. استفاده از فرکانس‌های الکتریکی تولید شده توسط گیرنده‌های جنس‌های نر و ماده ماهیان، یکی از روش‌های نوین در این زمینه بوده که در بسیاری از گونه‌های الکتریکی ضعیف از خانواده کارد ماهیان (مانند شبح سیاه) قابل استفاده است. لذا توصیه می‌شود تا با به‌کارگیری تجهیزات ثبت فرکانس مناسب و انجام ارزیابی‌های مختلف از این روش جهت تعیین جنسیت ماهیان خاویاری نیز استفاده شود. همچنین، با توجه به اثرگذاری میدان‌های الکترومغناطیسی بر رفتار ماهیان، توصیه می‌شود

پرورش‌دهندگان نسبت به به‌کارگیری هر گونه ابزار الکتریکی در محیط پرورش ماهیان خاویاری مراقبت لازم را به‌عمل آورند.

منابع

یوسفی، س.، فلاحتکار، ب.، ۱۴۰۰. امکان‌سنجی ثبت فرکانس الکتریکی با هدف تعیین جنسیت در برخی از ماهیان آب شیرین. مجله تحقیقات دامپزشکی. ۷۶: ۳۴۱-۳۳۴.

Catania, K. 2014. The shocking predatory strike of the electric eel. Science, 346: 1231-1234.

Dunlap, K.D., Thomas, P., Zakon, H.H. 1998. Diversity of sexual dimorphism in electrocommunication signals and its androgen regulation in a genus of electric fish, Apteronotus. Journal of Comparative Physiology A, 183: 77-86.

Falahatkar, B., Akhavan, S.R., Tolouei Gilani, M.H., Abbasalizadeh, A. 2013. Sex identification and sexual maturity stages in farmed great sturgeon, *Huso huso* L. through biopsy. Iranian Journal of Veterinary Research, 14: 133-139.

Falahatkar, B., Tolouei, M.H., Falahatkar, S., Abbasalizadeh, A. 2011. Laparoscopy, a minimally-invasive technique for sex identification in cultured great sturgeon *Huso huso*. Aquaculture, 321: 273-279.

Hofmann, M.H. 2011. Physiology of ampullary electrosensory systems. In: Alderman S.L., Gillis T.E. (eds.). Encyclopedia of Fish Physiology. Academic Press, Cambridge, USA, pp: 336-343.

Jørgensen, J.M. 1980. The morphology of the lorenzinian ampullae of the sturgeon *Acipenser ruthenus* (Pisces: Chondrostei). Acta Zoologica, 61: 87-92.

Jørgensen, J.M. 2005. Morphology of electroreceptive sensory organs. In: Hopkins, T.H., Popper, C.D., Fay, R.R., (eds.). Electroreception. Bullock. Springer, New York, USA, pp: 47-67.

Kasumyan, A.O., Kazhlayev, A.A. 1993. Formation of searching behavioral reaction and olfactory sensitivity of food chemical signals during ontogeny of sturgeons (Acipenseridae). Journal of Ichthyology, 33: 51-65.

Kolodziejski, J.A., Nelson, B.S., Smith, G.T. 2005. Sex and species differences in neuromodulatory input to a premotor nucleus: a comparative study of substance P and communication behavior in weakly electric fish. Journal of Neurobiology, 62: 299-315.

Kynard, B., Kieffer, M. 2002. Use of a borescope to determine the sex and egg maturity stage of sturgeons and the effect of borescope use on reproductive structures. Journal of Applied Ichthyology, 18: 505-508.

Ladich, F., Collin, S., Moller, P., Kapoor, B.G. 2006. Communication in fishes, Science Publishers. Enfield. New Hampshire, USA, 870 p.

Moortgat, K.T., Keller, C.H., Bullock, T.H., Sejnowski, T.J. 1998. Submicrosecond pacemaker precision is behaviorally modulated: the gymnotiform electromotor pathway. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 95: 4684-4689.

Smith, G.T. 2013. Evolution and hormonal regulation of sex differences in the electrocommunication behavior of ghost knife fishes (Apteronotidae). Journal of Experimental Biology, 216: 2421-2433.

Whiteman, E.A., Jennings, C.A., Nemeth, R.S. 2005. Sex structure and potential female fecundity in a *Epinephelus guttatus* spawning aggregation: applying ultrasonic imaging. Journal of Fish Biology, 66: 983-995.

Zakon, H.H., Dunlap, K.D. 1999. Sex steroids and communication signals in electric fish: a tale of two species. Brain, Behavior and Evolution, 54: 61-69.

Zhang, X., Song, J., Fan, C., Guo, H., Wang, X., Bleckmann, H. 2012. Use of electrosense in the feeding behavior of sturgeons. Integrative Zoology, 7: 74-82.

Zhou, H.X., Pang, X. 2018. Electrostatic interactions in protein structure, folding, binding, and condensation. Chemical reviews, 118: 1691-1741.

Zhou, M., Smith, G.T. 2006. Structure and sexual dimorphism of the electrocommunication signals of the weakly electric fish, *Adontosternarchus devenanzii*. The Journal of Experimental Biology, 209: 4809-4818.

Zhuang, P., Zhang, L. Z., Luo, G., Zhang, T., Feng, G. P., Liu, J. 2008. Function of sense organs to the feeding behavior of juveniles Chinese sturgeon captured from the Yangtze estuary. Acta Hydrobiologica Sinica, 32: 475-481.

Zlenko, D.V., Olshanskiy, V.M., Orlov, A.A., Kasumyan, A.O., MacMahon, E., Wei, X., Moller, P. 2023. Visualization of electric fields and associated behavior in fish and other aquatic animals. Behavior Research Methods, 1-22.

Application of electroreception in fish emphasizing on sturgeon

Faezeh Mortezaei[1], Soheil Yousefi[2]*

1. Fisheries Department, Faculty of Natural Resources, University of Guilan, Sowmeh Sara, Guilan, Iran

2. International Sturgeon Research Institute, Iranian Fisheries Science Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Rasht, Iran

Corresponding author: mortezaei_faeze@yahoo.com

Abstract

The electroreception system has been studied in many fish species. The electric fields could be generated by stimulating the electric organs. In weakly electric fishes, objects could be recognized by electric organs as a result of distribution in the magnetic field. In sturgeons, the electric field is dipolar, including negative at the head and positive at the tail, which leads to tracking the prey from schools according to the directions of their head-tail dipoles. The sturgeon species have many electric receptors called ampullae of Lorenzini in their rostrum. The electroreception system contributes to the nutrition, migration, mating, and sex determination of the sturgeon fish. This review concentrates on the electric organ structure, the mechanisms, the application of electrosensory in sex determination as a new non-invasive, and the substantial roles in sturgeon feeding as an invaluable species in the aquaculture industry.

Keywords: Sex determination, Electroreception, Sturgeons, Electric fields