**نقش سیگنال‌دهی بیوالکترومغناطیسی در سیستم‌های بیولوژیکی و کاربردهای آن**

**محمد توکلیان راد1، حسن قلمی باویل علیایی2 ، نرگس پوراخلاقی3، سید سروش وکیلی قاهانی4،**

1. نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی پزشکی-بیوالکتریک، واحد بین الملل کیش، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. پست الکترونیک : [amir2010\_rad@yahoo.com](mailto:amir2010_rad@yahoo.com)
2. هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب. پست الکترونیک : Olyaee@azad.ac.ir
3. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی پزشکی-بیوالکتریک، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. پست الکترونیک : [narges.pourakhlaghi@yahoo.com](mailto:narges.pourakhlaghi@yahoo.com)
4. دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی پزشکی-بیوالکتریک، واحد بین الملل کیش، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. پست الکترونیک : [Soroush.p.m@gmail.com](mailto:Soroush.p.m@gmail.com)

|  |
| --- |
| **چکیده**  **این مقاله به‌ نقش سیگنال دهی بیوالکترومغناطیسی در سیستم‌های بیولوژیکی، از سطح سلولی تا ارتباط بین موجودات، پرداخته است.شواهد نشان می‌دهند که این سیگنال‌ها در فرآیندهای کلیدی مانند هدایت فعالیت‌های سلولی و تسهیل ارتباطات درون و بین موجودات نقش اساسی دارند. همچنین به نقش بالقوه درمانی سیگنال دهی بیوالکترومغناطیسی در درمان بیماری‌های خاص، به‌ویژه اختلالات عصبی و دردهای مزمن، و کاربرد آن در کشف مکانیسم‌های ناشناخته فیزیولوژیکی و باز کردن مسیرهای جدید تحقیقاتی درزمینه بیماری‌های پیچیده مانند سرطان و اختلالات خود ایمنی اشاره می‌کند.اندازه‌گیری میدان‌های بیوالکترومغناطیسی می‌توانند در تشخیص زودهنگام بیماری‌ها، به‌ویژه سیستم‌های عصبی و قلبی عروقی، مؤثر واقع شوند.** |

کلمات کليدي: میدان‌های بیوالکترومغناطیسی، جریان‌های سیگنال دهنده حیات، تفاوت‌های الکتروفیزیولوژیکی در انسان‌ها، روش‌های نوین EEG، MRI و ECGI

**The Role of Bioelectromagnetic Signaling in Biological Systems and Its Applications in Disease Diagnosis**

**Introduction:**

**Biological systems, at all levels—from cellular processes to inter-organism communication—are influenced by bioelectromagnetic signals. These signals are crucial in vital processes such as regulating cellular activities, transmitting information within the nervous system, and coordinating intercellular functions.**

**Recent research has demonstrated that bioelectromagnetic signaling is not only essential for the normal functioning of biological systems but also holds great potential as a tool for diagnosing and treating various diseases. Particularly in the field of neurological disorders and chronic pain, the application of these signals may contribute to uncovering unknown mechanisms and developing innovative therapeutic approaches.**

**Moreover, precise measurement of bioelectromagnetic fields can facilitate the early detection of complex diseases such as cancer, autoimmune disorders, and cardiovascular conditions, thereby paving the way for new advancements in medical research. This paper explores the fundamental role of these signals in enhancing our understanding of biological systems and developing novel diagnostic and therapeutic strategies.**

1. **مقدمه:**

**سیگنال‌دهی بیوالکترومغناطیسی نقش کلیدی در ارتباطات سلولی و عملکرد سیستم‌های بیولوژیکی دارد. روش‌های پیشرفته‌ای مانند EEG، MRI و ECGI امکان تحلیل دقیق این سیگنال‌ها را فراهم کرده‌اند و به تشخیص زودهنگام بیماری‌ها و بهینه‌سازی درمان کمک می‌کنند. این فناوری‌ها افق‌های نوینی را در پزشکی شخصی‌سازی‌شده و درمان هدفمند بیماری‌های عصبی و قلبی گشوده‌اند. سیستم‌های بیولوژیکی در تمام سطوح خود، از سلولی تا ارتباطات بین موجودات، تحت تأثیر سیگنال‌های بیوالکترومغناطیسی قرار دارند. این سیگنال‌ها در فرآیندهای حیاتی همچون تنظیم فعالیت‌های سلولی، انتقال اطلاعات در سیستم عصبی و حتی در هماهنگی عملکردهای بین‌ سلولی نقش کلیدی ایفا می‌کنند.**

**تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که سیگنال‌دهی بیوالکترومغناطیسی نه تنها در عملکرد طبیعی سیستم‌های زیستی اهمیت دارد، بلکه می‌تواند به‌عنوان یک ابزار بالقوه در تشخیص و درمان بیماری‌های مختلف مورد استفاده قرار گیرد. به‌ویژه در حوزه بیماری‌های عصبی و دردهای مزمن، کاربرد این سیگنال‌ها می‌تواند به کشف مکانیسم‌های ناشناخته و توسعه روش‌های درمانی نوین کمک کند. علاوه بر این، اندازه‌گیری دقیق میدان‌های بیوالکترومغناطیسی می‌تواند به شناسایی زودهنگام بیماری‌های پیچیده‌ای همچون سرطان، اختلالات خودایمنی و مشکلات قلبی-عروقی کمک کرده و مسیرهای جدیدی را در تحقیقات پزشکی بگشاید. این مقاله با بررسی نقش بنیادی این سیگنال‌ها، به اهمیت آن‌ها در درک بهتر سیستم‌های بیولوژیکی و توسعه روش‌های نوین تشخیصی و درمانی می‌پردازد.**

**2. روش­شناسی**

این مرور جامع از رویکرد جستجوي سیستماتیک در ادبیات استفاده کرده است که شامل یک چشم­انداز تاریخی گسترده می‌شود و درعین‌حال بر پیشرفته‌ای اخیر در حوزه سیگنال دهی بیوالکترومغناطیسی تمرکز دارد. ما جستجوهاي گسترده­اي در پایگاه­هاي داده علمی معتبر انجام دادیم، ازجمله Web of Science، PubMed وScopus، که ادبیات علمی از اواخر قرن هجدهم تا سال 2024 را پوشش می‌دهد. این دامنه زمانی وسیع به­منظور دربرگیري هم بنیان‌های تاریخی و هم پیشرفت‌های نوین در این حوزه انتخاب شد.

استراتژي جستجوي ما از ترکیب‌های مختلفی از واژه‌های کلیدي مانند "بیوالکترومغناطیسی"، "میدان‌های الکترومغناطیسی"، "سیگنال دهی سلولی"، "بیوفیزیک" و "الکتروفیزیولوژي" استفاده کرد. در فرایند انتخاب خود، مقالات داوری شده را در اولویت قراردادیم، با تأکید ویژه‌بر مجلات با تأثیر بالا و آثار بنیانی که به­طور قابل‌توجهی بر شکل‌گیری این حوزه تأثیر گذاشته‌اند. براي اطمینان از پوشش جامع، همچنین کتاب‌ها و مجموعه مقالات کنفرانس‌های مرتبط را نیز بررسی کردیم.

فرایند انتخاب ادبیات ما از یک فرایند چندمرحله­اي پیروي کرد، که با غربالگري اولیه بر اساس عناوین و چکیده‌ها آغاز شد تا آثار کاملاً بی‌ربط حذف شوند. پس‌ازآن، یک بازبینی کامل و دقیق از متن کامل مقالات باقیمانده انجام شد تا مطالعات مرتبط و تأثیرگذار شناسایی شوند. به­منظور ارج نهادن به تاریخ غنی این حوزه، چندین اثر اولیه بااهمیت تاریخی، مانند کشف "الکتریسیته حیوانی" توسط لوئیجی گالوانی در سال 1791، در نظر گرفته شد.

هم‌زمان با این کار، توجه ویژه‌ای به ادبیات منتشرشده در پنج سال گذشته (2019-2024) داشتیم تا جدیدترین روندهاي تحقیقاتی و پیشرفت‌های علمی در حوزه سیگنال دهی بیوالکترومغناطیسی را منعکس کنیم. ادبیات منتخب تحت تحلیل و ترکیب انتقادي قرار گرفت تا یک نماي کلی به­روز از این حوزه ارائه دهیم. هدف ما این بود که تعادلی بین زمینه تاریخی و مرزهاي تحقیقاتی کنونی برقرار کنیم و یک روایت جامع از تکامل این حوزه و چشم­اندازهاي آینده آن ارائه دهیم. این رویکرد به ما این امکان را داد که توسعه مفاهیم کلیدي را در طول زمان ردیابی کنیم، درحالی‌که نوآوری‌های معاصر و حوزه‌های نوظهور مطالعه در سیگنال دهی بیوالکترومغناطیسی را نیز برجسته کنیم.

**3. اصول بنیادي سیگنال دهی بیوالکترومغناطیسی**

**3-1. ماهیت میدان‌های الکترومغناطیسی در زیست‌شناسی**

پدیده­هاي بیوالکترومغناطیسی دامنه وسیعی از تعاملات الکترومغناطیسی در درون و بین موجودات زنده را در برمی‌گیرند. این میدان‌ها با ویژگی‌هایی چون فرکانس، شدت و توزیع فضایی خود شناخته می­شوند، که هرکدام نقشی منحصربه‌فرد در فرآیندهاي بیولوژیکی ایفا می‌کنند. مهم است که پدیده‌های بیوالکترومغناطیسی در سیستم‌های زنده، دامنه وسیعی از طیف الکترومغناطیسی را شامل می­شوند، از میدان‌های ایستا گرفته تا میدان‌های فرکانس بسیار پایین، و تا فرکانس‌های بالاتر شامل نور مرئی و فراتر از آن گسترش می‌یابند [10].

میدان‌های ایستا نمایانگر میدان‌های الکتریکی پایدار هستند که از غشاي سلولی عبور می‌کنند، همچنین میدان‌های مغناطیسی ظریف از اندام‌هایی مانند قلب و مغز ساطع می­شوند. این میدان‌ها براي حفظ قطبیت سلولی و تنظیم توزیع مولکول‌های باردار بنیادین هستند و به‌این‌ترتیب زمینه­سازي براي هموستازي سلولی را فراهم می‌کنند [1و21].

میدان‌های فرکانس بسیار پایین (ELF) که از 0 تا 300 هرتز متغیر هستند، با ریتم‌های فیزیولوژیکی بدن ما هماهنگ می­شوند. این میدان‌ها بخش مهمی از نوسانات عصبی، ریتم‌های قلبی و چرخه‌های شبانه­روزي هستند و به‌عنوان سیگنال‌های هماهنگی عمل می‌کنند که به تسهیل عملکردهاي هماهنگ بدن کمک می‌کنند. در انتهاي بالاتر طیف، میدان‌هایی که فراتر از دامنه ELF قرار دارند، به فرکانس‌های رادیویی و طیف نوري می­رسند. انتشارات بیوفوتونیک نمونه‌ای از این دسته هستند، که نشان‌دهنده نقش آن‌ها در ارتباطات سلولی و فرآیندهای تنظیمی می­باشند].9[

**4. تولید میدان‌های بیوالکترومغناطیسی**

مکانیسم‌هایی که سیستم‌های زیستی از طریق آن‌ها میدان‌های الکترومغناطیسی تولید می‌کنند، متنوع و به‌هم‌پیوسته هستند. در سطح سلولی، حرکت یون‌ها در غشاها ، جریان‌های الکتریکی و میدان‌های مغناطیسی مرتبط با آن را ایجاد می‌کند. این تحرک یونی، پایه­گذار پتانسیل استراحت غشا و پتانسیل عمل پویا است که شریان حیاتی ارتباطات عصبی به شمار می­روند [10].

فراتر از سلول‌های فردي، فعالیت هم‌زمان جمعیت‌های سلولی، مانند شبکه‌های عصبی، می‌تواند میدان‌های الکترومغناطیسی مقیاس بزرگ‌تری تولید کند که در بافت‌ها و اعضاي بدن گسترش می‌یابند. برخی از مواد زیستی، مانند استخوان و کلاژن، خواص پیزوالکتریک دارند؛ به این معنا که قادر به تولید بار الکتریکی در پاسخ به فشار مکانیکی واردشده هستند و میدان‌های الکتریکی را هنگام اعمال فشار مکانیکی تولید می‌کنند [1و21].

در اعماق متابولیسم سلولی، زنجیره انتقال الکترون در میتوکندريها میدان‌های الکترومغناطیسی ضعیفی به‌عنوان محصول جانبی تولید انرژي ایجاد می‌کند. پویایی‌های مکانی و زمانی میدان‌های بیوالکترومغناطیسی لایه‌های بیشتری از پیچیدگی را اضافه می‌کنند. ­ازنظر زمانی، این میدان‌ها تنوع زیادي از ریتم‌ها و نوسانات را نشان می­دهند؛ از انفجار سریع پتانسیل‌های عمل عصبی گرفته تا نوسانات کندتر ریتم‌های سیرکادین [16].

**5. تعاملات بین میدان‌های الکترومغناطیسی و سیستم‌های زیستی**

میدان‌های الکترومغناطیسی (EMF) به دلیل گسترش فناوری‌های ارتباطی و تجهیزات الکترونیکی به بخش جدایی‌ناپذیر زندگی انسان تبدیل شده‌اند. تعامل این میدان‌ها با سیستم‌های زیستی می‌تواند بر عملکرد سلول‌ها، سیستم عصبی و حتی فعالیت قلب تأثیر بگذارد. بررسی این تعاملات برای ارزیابی ایمنی زیستی و توسعه استانداردهای حفاظت در برابر مواجهه با میدان‌های الکترومغناطیسی ضروری است. تعامل میان میدان‌های الکترومغناطیسی و سیستم‌های زیستی شامل چندین مکانیسم بنیادي است که اثرات بیولوژیکی مختلفی را در دامنه‌های فرکانسی گوناگون تولید می‌کنند. این مکانیسم‌ها می‌توانند در چندین حوزه اصلی طبقه‌بندی شوند که هر یک به درك ما از چگونگی تأثیر میدان‌های الکترومغناطیسی بر موجودات زنده کمک می‌کند. در سطح مولکولی، میدان‌های الکترومغناطیسی ممکن است تغییرات قابل قبولی در پروتئین‌ها ایجاد کنند، همان‌طور که توسط فانک و همکاران پیشنهادشده است. این ، به‌طور بالقوه از طریق تأثیرگذاري بر سینتیک آنزیمی و مسیرهاي سیگنال دهی مفهوم امکانات جدیدي را براي درك چگونگی تنظیم عملکردهاي سلولی توسط میدان‌های الکترومغناطیسی فراهم می‌آورد.

این تعاملات در سطح مولکولی روش‌های ظریف اما مهمی را نشان می­دهند که در آن‌ها میدان‌های الکترومغناطیسی می‌توانند فرآیندهاي زیستی را تعدیل کنند. تعاملات در سطح سلولی عمدتاً شامل فعال‌سازی کانال‌های یون است. تحقیقات نشان داده‌اند که میدان‌های الکترومغناطیسی با فرکانس بسیار پایین می‌توانند کانال‌های کلسیم وابسته به ولتاژ را فعال کنند؛ این کانال‌ها یون‌های کلسیم را در پاسخ به تغییرات پتانسیل الکتریکی غشا سلولی باز می‌کنند که منجر به افزایش سریع یون‌های کلسیم درداخل سلول می‌شود[4، 21].

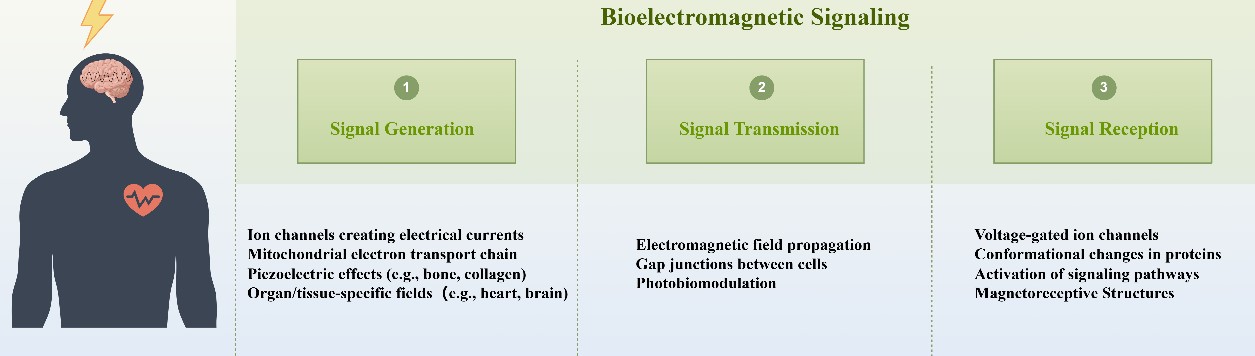
تحقیقات پال نشان می‌دهد که این مکانیزم ممکن است تغییرات فیزیولوژیکی مانند فعالیت عصبی و انقباض عضلات را القا کند، که تأثیر مستقیم میدان‌های الکترومغناطیسی بر عملکرد سلولی را نشان می‌دهد. در سطح بافتی، القاي الکترومغناطیسی نقش حیاتی دارد. میدان‌های مغناطیسی متغیر بازمان می‌توانند میدان‌های الکتریکی القاشده در بافت‌های هادي ایجاد کنند، که این اصل در تحریک مغناطیسی ترانس کرانیال (TMS) براي نورومدولاسیون مورداستفاده قرارگرفته است. تحقیقات روسی و همکاران بر کاربردهاي متنوع TMS در زمینه­هاي تحقیقاتی و بالینی تأکید کرده­اند، ازجمله نقشه­برداري از عملکرد مغز تا درمان افسردگی، که پتانسیل وسیع این مکانیزم را نشان می‌دهد. تعاملات مبتنی بر نور، به‌ویژه فتوبیومدولاسیون، مکانیزم مهم دیگري است. تابش الکترومغناطیسی در طیف مرئی و نزدیک به فروسرخ می‌تواند بر عملکرد سلولی تأثیر بگذارد. تحقیقات هامبلین نشان داده است که نور قرمز و نزدیک به فروسرخ می‌تواند عملکرد میتوکندري را تحریک کرده و مکانیسم‌های محافظتی سلولی را فعال کند، که نشان‌دهنده پتانسیل کاربردهاي درمانی طول‌موج‌های خاص تابش الکترومغناطیسی است.

در سطح پیچیده­تر، مکانیزم جفت رادیکال در مغناطیسی شناسی، به­ویژه در گونه­هاي پرندگان، نقش دارد. این اثر مکانیک کوانتومی شامل تأثیر میدان‌های مغناطیسی بر حالات اسپین جفت‌های رادیکال است که در واکنش‌های بیوشیمیایی خاصی تشکیل می­شوند. پروتئین‌های کریپتوکروم به­عنوان گیرنده­هاي اصلی مغناطیسی که از این مکانیزم استفاده می‌کنند، شناخته می­شوند و به ما بینش‌هایی در مورد چگونگی توانایی ارگانیسم‌ها براي حس کردن و جهت‌یابی با استفاده از میدان مغناطیسی زمین می­دهند. این مکانیزم‌های بنیادي به فرآیندهاي زیستی مختلفی کمک می‌کنند، از سیگنال دهی سلولی گرفته تا بازسازي بافت. مایروفیتز و همکاران نشان داده­اند که درمان با میدان‌های الکترومغناطیسی در مدیریت شرایط بهداشتی مختلف، ازجمله تسکین درد و بازسازي بافت، پتانسیل زیادي دارد و کاربردهاي عملی این مکانیزم‏ها را در درمان‌های پزشکی نشان می­دهند. با پیشرفت درك ما از این مکانیزم‌های بنیادي، نه‌تنها دانش ما از فرآیندهاي زیستی پایه افزایش می‌یابد، بلکه مسیر را براي مداخلات درمانی نوآورانه و نوآوری‌های تکنولوژیکی هموار می‌کنیم. تحقیقات آینده در این حوزه نیاز دارد تا نقش‌های خاص این مکانیزمها را درزمینه­هاي زیستی مختلف بیشتر روشن کند و بررسی کند که چگونه این مکانیزمها با یکدیگر تعامل دارند تا اثرات فیزیولوژیکی پیچیده‌ای تولید کنند [18].

شکل 1 نماي بصري جامع از فرآیند سیگنال دهی بیوالکترومغناطیسی را ارائه می‌دهد که مفاهیم کلیدي مطرح­شده در بخش‌های قبلی را به هم می­آمیزد.

این دیاگرام به­طور زیبا و دقیق تعامل پیچیده میان تولید سیگنال، انتقال و دریافت آن در سیستم‌های زیستی را به تصویر می­کشد. با نشان دادن مکانیزم‌های مختلفی مانند فعالیت کانال‌های یون، فرآیندهاي میتوکندریایی، و اثرات پیزوالکتریک در تولید سیگنال، شکل بر ماهیت چندوجهی منشأ میدان‌های بیوالکترومغناطیسی تأکید می‌کند. فاز انتقال، که از طریق گسترش میدان الکترومغناطیسی، اتصالات شکاف(gap junctions)، و فتوبیومدولاسیون نمایش داده‌شده است، مسیرهاي مختلفی را نشان می‌دهد که از طریق آن‌ها این سیگنال‌ها از سیستم‌های زیستی عبور می‌کنند. مکانیزم‌های دریافت، شامل کانال‌های یون وابسته به ولتاژ، تغییرات ساختاري پروتئین‌ها، و ساختارهاي ویژه مغناطیسی حساس، شیوه­هاي پیچیده‌ای را که ارگانیسم‌ها براي شناسایی و پاسخ به این میدان‌ها استفاده می‌کنند، نشان می­دهند. این شکل نه‌تنها اصول بنیادي سیگنال دهی بیوالکترومغناطیسی را خلاصه می‌کند، بلکه به­عنوان پلی براي بخش‌های بعدي که شواهد ارتباط بیوالکترومغناطیسی را بررسی می‌کنند، عمل می‌کند. این نمودار چارچوب بصري براي درك ماهیت پیچیده و به‌هم‌پیوسته پدیده­هاي الکترومغناطیسی در سیستم‌های زنده فراهم می‌آورد، از سطح سلولی گرفته تا شبکه‌های ارتباطی در سطح ارگانیسم [10، 16].

این دیاگرام به‌طور خلاصه ماهیت سیگنال دهی بیوالکترومغناطیسی را نمایش می‌دهد و به‌تفصیل فرآیند تولید، انتقال و دریافت میدان‌های الکترومغناطیسی در سیستم‌های زیستی را توضیح می‌دهد. این نمودار تولید سیگنال‌ها از طریق فعالیت کانال‌های یونی، زنجیره انتقال الکترون در میتوکندري و اثرات پیزوالکتریک در بافت‌هایی مانند استخوان و کلاژن را نشان می‌دهد [12]. انتقال این سیگنال‌ها از طریق انتشار میدان‌های الکترومغناطیسی، پیوندهاي شکافی(gap junctions) و فوتوبیومودولاسیون تسهیل می‌شود. دریافت سیگنال‌ها نیز با کمک کانال‌های یونی حساس به ولتاژ، تغییرات ساختاري پروتئین‌ها، فعال‌سازی مسیرهاي سیگنال دهی و ساختارهاي مغناطیس پذیر انجام می‌گیرد که براي ارتباط سلولی و جهت‌یابی ارگانیسم‌ها ضروري هستند.



**شکل 1. مکانیسم‌های تولید، انتقال و دریافت سیگنال‌های بیوالکترومغناطیسی در سیستم‌های زیستی**

**6. شواهدي براي ارتباط بیوالکترومغناطیسی**

به‌طورکلی، سیگنال‌های بیوالکترومغناطیسی یک شبکه پیچیده و حیاتی براي ارتباط و تنظیمات درون و بین سیستم‌های زنده ایجاد می‌کنند. کارکردهاي متنوع این سیگنال‌ها بر اهمیت بنیادي پدیده­هاي الکترومغناطیسی در زیست‌شناسی تأکید دارد و شامل انتقال سریع اطلاعات، تنظیم فیزیولوژیک، الگوهاي فضایی، انتقال انرژي احتمالی و حس محیطی می‌شود [10، 16، 18، 21].

**7. دریافت و انتقال سیگنال‌های بیوالکترومغناطیسی**

دریافت و انتقال سیگنال‌های بیوالکترومغناطیسی فرایندی است که در آن سیگنال‌های الکتریکی و مغناطیسی تولید شده توسط فعالیت‌های زیستی بدن مانند ضربان قلب یا فعالیت مغز، از طریق حسگرها یا دستگاه‌های خاص ضبط و منتقل می‌شوند. این سیگنال‌ها برای تحلیل و تشخیص وضعیت‌های پزشکی مانند آریتمی‌های قلبی، اختلالات عصبی یا دیگر بیماری‌های سیستم‌های بیولوژیکی استفاده می‌شوند. فناوری‌های مدرن در این حوزه، نقش مهمی در پیشرفت پزشکی و توسعه سیستم‌های پایش سلامت ایفا می‌کنند. دریافت و انتقال سیگنال‌های بیوالکترومغناطیسی شامل مکانیسم‌های گوناگونی است که هر یک به‌دقت براي تشخیص و واکنش به جنبه­هاي خاصی از میدان‌های الکترومغناطیسی تنظیم‌شده‌اند. این انتقال سریع اطلاعات به ارگانیسم‌ها اجازه می‌دهد که به محرک‌های داخلی و خارجی به‌سرعت واکنش نشان دهند، توانایی‌های تطبیقی و بقاي آن‌ها را بهبود بخشد. کانال‌های یونی حساس به ولتاژ مانند دروازه‏بان‏هاي مولکولی عمل می‌کنند که با تغییر شکل در واکنش به نوسانات ولتاژ، جریان یون‌ها و انتشار سیگنال‌ها را به­طور دقیق کنترل می‌کنند. این مکانیسم پایه‌ای براي تشخیص و انتقال سیگنال‌های الکتریکی در سطح سلولی است.

در حوزه مغناطیس پذیری، برخی از ارگانیسم‌ها ساختارهاي تخصصی حاوي کریستال‌های مگنتیت (آهنرباهاي زیستی) تکامل‌یافته‌اند. این قطب‌نماهای کوچک زیستی با میدان‌های مغناطیسی خارجی هم‌راستا می­شوند و مکانیسمی براي تشخیص و واکنش به میدان مغناطیسی زمین فراهم می‌کنند. این توانایی شگفت­انگیز به مسیریابی و جهت‌گیری فضایی گونه­هاي مختلف، از باکتری‌ها تا پرندگان، کمک می‌کند. مطالعات نشان داده­اند که سلول‌ها می‌توانند از طریق تولید و دریافت سیگنال‌های الکترومغناطیسی با یکدیگر ارتباط برقرار کنند. برخی نظریه­هاي حوزه بیوانرژي پیشنهاد می‌کنند که میدان‌های الکترومغناطیسی ممکن است انتقال انرژي در سیستم‌های زیستی را نیز تسهیل کنند و احتمالاً بر فرآیندهاي متابولیک تأثیر بگذارند. هرچند این حوزه به تحقیقات بیشتري نیاز دارد، اما امکان‌های هیجان‌انگیزی براي درك و حتی دست‌کاری پویایی‌های انرژي زیستی فراهم می‌کند [12، 18، 21].

**8. سیگنال‌های الکترومغناطیسی در ارتباطات بین سلولی**

شواهد فرایندهاي نشان می‌دهد که سیگنال دهی بیوالکترومغناطیسی نقش مهمی در هماهنگی فعالیت‌های سلولی ایفا می‌کند و به­عنوان مکمل مسیرهاي سنتی سیگنال دهی شیمیایی عمل می‌کند. مطالعه کانستانتینی و همکاران نشان داد که میدان‌های الکترومغناطیسی با فرکانس بسیار پایین می‌توانند تکثیر، تمایز و رسوب ماتریکس خارج سلولی را در سلول‌های بنیادي پالپ دندان انسان تعدیل کنند و این یافته­ها به کاربردهاي بالقوه‌ای در پزشکی بازساختی اشاره دارند.

این میدان‌ها ممکن است بر مسیرهاي سیگنال دهی کلسیم تأثیر بگذارند، خواص غشاي سلولی را تغییر دهند و حتی باعث تغییرات ساختاري در پروتئین‌ها شوند، که می‌تواند بر عملکرد یا ویژگی‌های اتصال آن‌ها تأثیر بگذارد. در تحقیق شلکمن و همکاران، پدیده‌ی همگام‌سازی میتوزي در کشت‌های سلولی مشاهده شد؛ آن‌ها نشان دادند که جمعیت‌های سلولی جدا از یکدیگر می‌توانند از طریق تعاملات الکترومغناطیسی چرخه‌های تقسیم خود را همگام­سازي کنند. این همگام‌سازی حتی زمانی که ارتباط شیمیایی مسدود شده باشد نیز ادامه دارد، که نشان‌دهنده‌ی یک مکانیسم مستقیم الکترومغناطیسی است. علاوه بر این، پیوندهاي شکافی (gap junctions) که امکان اتصال الکتریکی مستقیم بین سلول‌های مجاور را فراهم می‌کنند، ممکن است در انتشار سیگنال‌های بیوالکترومغناطیسی در بافت‌ها نقش داشته باشند. بااین‌حال، محدودیت‌های این مطالعه نیز باید در نظر گرفته شود. آزمایش‌ها به‌صورت آزمایشگاهی(in vitro) انجام‌شده‌اند و محیط پیچیده‌ای درون بدنی(in vivo) ممکن است بر این تعاملات الکترومغناطیسی تأثیر بگذارد.

علاوه بر این، توضیحات جایگزین، مانند سیگنال دهی شیمیایی غیرقابل تشخیص یا عوامل محیطی مشترك، کاملاً قابل رد نیستند. تحقیقات بیشتر، ازجمله مطالعات درون ­بدنی و کنترل‌های سخت‌گیرانه‌تر، براي اعتبارسنجی کامل این یافته­ها و درك اهمیت فیزیولوژیکی آن‌ها موردنیاز است. انتشار بیوفوتون، یعنی نور فوق‌العاده ضعیفی که از تمام سلول‌های زنده ساطع می‌شود، به­عنوان یک مکانیسم بالقوه براي ارتباط الکترومغناطیسی بین سلولی مطرح‌شده است.این بیوفوتون‏ها که معمولاً در محدوده نور مرئی و فرابنفش قرار دارند، ممکن است اطلاعاتی درباره وضعیت‌های متابولیکی سلول‌ها را حمل کنند و بر سلول‌های مجاور تأثیر بگذارند [16، 18، 4، 15].

**9. ارتباطات الکترومغناطیسی بین اندام‌ها و بین افراد**

ارتباطات الکترومغناطیسی بین اندام‌ها و افراد به انتقال سیگنال‌های الکترومغناطیسی از طریق بدن یا میان انسان‌ها اشاره دارد. این نوع ارتباطات در فرآیندهای بیولوژیکی نظیر انتقال سیگنال‌های عصبی و قلبی نقش دارد و می‌تواند تحت تأثیر دستگاه‌های الکترونیکی پزشکی یا فناوری‌های بی‌سیم قرار گیرد. مطالعه این پدیده‌ها برای درک بهتر تعاملات فیزیولوژیکی و بهبود فناوری‌های پزشکی و ارتباطی ضروری است. ارتباطات الکترومغناطیسی در سطح ارگانیسم‌ها هم در درون یک ارگانیسم (ارتباط بین اندام‌ها) و هم بین افراد مختلف (ارتباط بین فردی) رخ می‌دهد. درون ارگانیسم‌ها، سیگنال‌های الکترومغناطیسی نقش حیاتی در هماهنگی فعالیت‌های اندام‌های مختلف دارند. مطالعه مک کراتی و همکاران نشان داد که قلب انسان یک میدان الکترومغناطیسی قابل‌توجه ایجاد می‌کند که از چندین قدم دورتر از بدن قابل­شناسایی است. مککراتی و همکاران پیشنهاد کردند که این میدان الکترومغناطیسی قلبی ممکن است حامل اطلاعات احساسی باشد و بر دیگر اندام‌ها و فرآیندهاي فیزیولوژیکی تأثیر بگذارد. تکنیک‌های پیشرفته تصویربرداري مانند مگنتوانسفالوگرافی (MEG) و تصویربرداري رزونانس مغناطیسی عملکردي (fMRI) الگوهاي پیچیده­اي از فعالیت الکترومغناطیسی را در مغز انسان آشکار کرده­اند که با فرآیندهاي شناختی و حالات ذهنی مختلف مرتبط است [11، 21].

میدان‌های بیوالکترومغناطیسی تأثیر عمیقی بر سیستم‌های زیستی در مقیاسه‏هاي مختلف، از الگوهاي فعالیت عصبی تا رشد جنینی، دارند. این میدان‌ها به حفظ هم ایستایی (هومئوستاز)، هماهنگی فعالیت‌های سلولی و عملکرد مناسب اندام‌ها و سیستم‌های اندامی کمک می‌کنند. این میدان‌ها همچنین به سازمان‌دهی سلولی و تشکیل بافت در طی جنین زایی، ارگان زایی و ترمیم زخم با ایجاد گرادیان‌ها و الگوهاي بیوالکتریکی کمک می‌کنند [10، 21].

ارتباطات الکترومغناطیسی بین فردی نیز در گونه­هاي مختلف مشاهده‌شده است. مطالعاتی بر روي سیستم‌های زیستی "جداشده "نشان داده است که تحریک یک نمونه می‌تواند در نمونه دیگر نیز واکنشی ایجاد کند، حتی در غیاب ارتباط شیمیایی. در قلمرو حیوانات، چندین مثال از ارتباطات الکترومغناطیسی بین فردی مستند شده است. براي مثال، پرندگان داراي توانایی مغناطیس پذیري هستند که به آن‌ها امکان می‌دهد از میدان مغناطیسی زمین براي جهت‌یابی در مهاجرت‌های طولانی استفاده کنند. زنبورهاي عسل نیز از میدان‌های الکترومغناطیسی زمین براي مسیریابی و ارتباطات درون کندو استفاده می‌کنند؛ تغییرات در محیط الکترومغناطیسی محلی، رقص وگلی و کارایی جستجوي غذا را مختل می‌کند. برخی گونه­هاي ماهی مانند مارماهی الکتریکی داراي حسی الکتریکی هستند که به آن‌ها امکان می‌دهد میدان‌های الکتریکی ضعیف را در آب تشخیص دهند و به مکان‌یابی طعمه، اجتناب از شکارچیان و ارتباطات اجتماعی کمک می‌کند. حتی در دنیاي گیاهان، مطالعات جدید نشان داده-اند که درختان می‌توانند از طریق انتقال سیگنال‌های الکتریکی با یکدیگر ارتباط برقرار کنند و به‌طور بالقوه به هماهنگی واکنش‌ها نسبت به تنش‌های محیطی کمک کنند. این توانایی‌های شگفت‌انگیز بر پیچیدگی راه‌هایی که موجودات زنده از پدیده­هاي الکترومغناطیسی براي بقا و تعامل با محیط خود استفاده کرده­اند، تأکید دارد.[6و8]

این مجموعه جامع از شواهد بر گستردگی و ضرورت ارتباطات بیوالکترومغناطیسی در سیستم‌های زنده، از سطح سلولی تا تعاملات بین فردي، تأکید می‌کند و فرصت‌های جدیدي براي تحقیق و کاربردهاي بالقوه درزمینه­هاي مختلف زیست‌شناسی و پزشکی ایجاد می‌کند.

كارديوميوپاتي هايپرتروفيك (HCM) يك بيماري ژنتيكي است كه به ضخيم شدن دیواره‌های قلب (به‌ویژه ديواره­هاي بطن چپ) منجر می‌شود. اين بيماري می‌تواند عملكرد طبيعي قلب را مختل كند و در صورت عدم‌تشخیص و درمان به‌موقع، خطر مرگ ناگهاني را به همراه داشته باشد. برخي از افراد ممكن است پيش از اينكه علائم واضحي از بيماري نشان دهند، تغييراتي در ويژگي­هاي الكتريكي قلب خود داشته باشند، كه به اين افراد گروه زير باليني گفته می‌شود. در حال حاضر، بسياري از روش‌های تشخيصي براي HCM (عمدتاً بر اساس تصويربرداري ساختاري )مثل اكوكارديوگرافي يا MRIهستند، كه قادر به شناسايي تغييرات ساختاري و فيزيكي قلب مي­باشند. بااین‌حال، ممكن است اين تغييرات پيش از بروز علائم جدي هنوز در الگوهاي الكتريكي قلب ظاهر شوند. در افراد سالم، فعاليت الكتريكي قلب به‌صورت طبيعي بود. در افراد زير باليني (با ژن معيوب ولي بدون ضخیم شدگی قلب)، تغييرات كوچكي در فعاليت الكتريكي قلب مشاهده شد كه نشان‌دهنده اين است كه حتي قبل از تغييرات ساختاري، قلب ممكن است ازنظر الكتريكي تغييراتي داشته باشد. در افراد با HCM پيشرفته، تغييرات واضح‌تری در فعاليت الكتريكي قلب مشاهده شد. اين تغييرات مي­توانند شامل ناهنجاری‌هایی در هدايت الكتريكي يا آريتمي‏هاي خطرناك باشند [6].

**10. الگوريتم اسپلان سطحي كروي براي برآورد چگالي منبع جريان فعلي(CSD) براي پتانسیل‌های سطحي**

**(EEG, ERP)**

شایان‌ذکر است كه زمينه ضرر توجه بيشتري را جلب می‌کند و تأثيرات منفي بيشتري نسبت به زمينه سود دارد و چارچوب ضرر می‌تواند بر انتخاب‌ها و ترجيحات افراد تأثير بگذارد. هنگام مواجهه با ضرر در وظيفه قمار، انسان‌ها گاهي تمايل دارند كه شرط‌های بزرگي يعني (HRG) براي كسب منافع بالا بگذارند، درحالی‌که ديگران استراتژي محتاطانه‌تری را اتخاذ كرده و شرط‌های کوچک‌تری يعني(LRG) مي­زنند. ازنظر رفتاري، اين مطالعه نشان داد كه زمان واكنش(RT) در گروهLRG طولانی‌تر از گروهHRG بود زماني كه آن‌ها تحت زمينه ضرر يك انتخاب پرخطر داشتند. اين نشان می‌دهد كه گروهLRG بايد زمان بيشتري را صرف تنظيم استراتژي تصمیم‌گیری براي مواجهه با وضعيت ضرر كند، درحالی‌که گروهHRG بدون تأمل كافي و با بالاترين سطح تکانش گری، سریع‌تر تصميم می‌گیرد، كه با تحقیق‌های قبلي هم‌راستا است. هنگام بررسي تفاوتMFN در ناحيه پيشاني بين دو گروه تحت زمينه ضرر، آمپليتودMFN در گروهLRG به‌طور قابلت وجهي بزرگ‌تر بود. به‌طور قابل‌توجه، اثر ارزشيMFN توسط افراد با سطوح مختلف ريسك تحت زمينه ضرر تعديل می‌شود. به نظر می‌رسد كه افراد با ريسك پايين، آستانه كمتري براي بازخورد ضرر دارند و بيشتر تحت تأثير احساسات منفي ناشي از بازخورد ضرر قرار می‌گیرند. در حقيقت، ما ثابت کرده‌ایم كهMFN پيشاني می‌تواند به‌طور مؤثري درجه انزجار را در هنگام تصمیم‌گیری منعكس كند، زيرا آمپليتود MFN براي پيشنهادات ناعادلانه نسبت به پيشنهادات عادلانه قوی‌تر است و آمپليتودهاي بزرگ‏ترMFN معمولاً با رفتارهاي تصمیم‌گیری فردي كه واکنش‌های عاطفي منفي دارند مرتبط هستند. نظريه انگيزشي نيز نشان می‌دهد كه MFN يك ارزيابي سريع از تأثير انگيزشي يك رويداد در حال وقوع را نشان می‌دهد، به‌ویژه در برابر محرک‌های منفي حساس است [5، 19].

ازاین‌رو، هنگام اتخاذ انتخاب‌های پرخطر تحت زمينه ضرر، گروه LRG احساس قوی‌تری از انزجار را القا می‌کند كه منجر به تقويت MFN می‌شود . علاوه بر اين، مطالعات متعدد نشان داده­اند كه ناحيه پيشاني نقش حياتي در نظارت داخلي مستمر بر فعاليت انسان در طول پردازش تصمیم‌ها دارد و در همين حال، يافته­هايMFN بازمان واكنش(RT) هم‌راستا بود و نشان می‌دهد كه زماني كه افراد با موقعیت‌های ضرر مواجه مي­شوند، گروهLRG اثر منفي بزرگ‌تری را تجربه كرده و درنتیجه زمان بيشتري براي تنظيم استراتژي و نظارت مستمر بر اعمال خود نياز دارند تا احتمال ضرر را كاهش دهند [3، 22، 17].

**11. کاربردهاي درمانی و نوآوری‌های فناوري در سیگنال دهی بیوالکترومغناطیسی**

**11-1. کاربردهاي فناوري**

دانش گسترده‌تر درزمینه سیگنال دهی بیوالکترومغناطیسی منجر به توسعه بسیاري از کاربردهاي درمانی و نوآوری‌های فناورانه با تأثیرات قابل‌توجهی بر سلامت انسان شده است. تکنیک‌های تحریک الکترومغناطیسی به­عنوان روش‌های امیدبخشی براي درمان اختلالات عصبی و اسکلتی عضلانی ظاهرشده‌اند. تحریک مغناطیسی ترانس کرانیال (TMS) در درمان اختلالات سلامت روان، به‌ویژه افسردگی، امیدبخش بوده است. مطالعه‌ی لفوشور و همکاران نشان داده که TMS، که روشی غیرتهاجمی براي تعدیل فعالیت مغزي از طریق میدان‌های الکترومغناطیسی است، می‌تواند به­طور مؤثري علائم افسردگی و احتمالاً سایرشرایط عصبی راکاهش دهد [8]. این روش، یک مداخله‌ی نوین و غیر دارویی براي بیمارانی است که به درمان‌های سنتی پاسخ نمی­دهند. درمان با میدان الکترومغناطیسی پالسی (PEMF) نیز در رفع مشکلات اسکلتی عضلانی پتانسیل خود را نشان داده است. تحقیقات مارکوف حاکی از آن است که PEMF می‌تواند فرایندهاي ترمیم استخوان را تسریع کرده و درد ناشی از شرایط ارتوپدي مختلف را کاهش دهد [10، 23]. این امر کاربرد گسترده­تري از درمان‌های الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد که فراتر از اختلالات عصبی به حوزه‌های توان‌بخشی فیزیکی و مدیریت درد نیز گسترش می‌یابد. تحقیقات نوظهور حاکی از آن است که درمان‌های الکترومغناطیسی در پزشکی بازساختی نیز پتانسیل دارند، به‌ویژه در هدایت فرآیندهاي تمایز سلول‌های بنیادي و ترمیم بافت. این یافته­ها امکان‌های هیجان‌انگیزی را براي تقویت مکانیسم‌های طبیعی بهبود بدن و حتی ایجاد انقلاب در روش‌های درمانی درزمینه‏هایی مانند ارتوپدي و مراقبت از زخم باز می‌کنند. حوزه نوپاي پزشکی بیوالکترونیکی نیز نمایانگر یک مرز نویدبخش در پژوهش‌های بیوالکترومغناطیسی است. هدف این حوزه توسعه‌ی دستگاه‌های قابل کاشت براي تعدیل فعالیت عصبی به­منظور درمان طیف گسترده­اي از بیماری‌ها ازجمله دردهاي مزمن تا بیماری‌های خود ایمنی است. این دستگاه‌ها می‌توانند مداخلات دقیق‌تر و هدفمندتري نسبت به روش‌های دارویی سنتی ارائه دهند و احتمالاً راه­حلی براي درمان شرایطی که پیش‌تر غیرقابل درمان به نظر می­رسیدند، فراهم کنند.

درزمینه انکولوژي، میدان‌های درمانی تومور(TTFields) ، که از میدان‌های الکتریکی متناوب براي اختلال در تقسیم سلول‌های سرطانی استفاده می‌کنند، امیدهاي زیادي براي درمان گلیوبلاستوما به همراه داشته و در حال بررسی براي سایر انواع سرطان نیز هستند. این روش نوآورانه می‌تواند جایگزینی هدفمندتر و کمتر سمی نسبت به روش‌های درمانی مرسوم سرطان باشد، هرچند تحقیقات بیشتري براي درك و بهره‌برداری کامل از این پدیده لازم است [18]. پیامدها و نوآوری‌های فناوري درك پیشرفته از سیگنال‌های بیوالکترومغناطیسی، توسعه حسگرهاي زیستی بسیار حساس را براي تشخیص پزشکی و پایش محیطی تسریع کرده است. نوآوری‌های اخیر توانایی ما را در شناسایی و اندازه‌گیری سیگنال‌های بیوالکترومغناطیسی بیشتر بهبود بخشیده‌اند. یکی از این پیشرفت‌های مهم، استفاده از مغناطیس‌سنج‌های پمپ شده نوري و سنسورهاي فوق حساس میدان الکتریکی بر پایه ترانزیستورهاي اثر میدان گرافنی (GFET) است. این سنسورها توانایی تشخیص میدان‌های الکتریکی بسیار ضعیف تولیدشده توسط نورون‌های منفرد را نشان داده‌اند و راه‌های جدیدي براي مطالعه فعالیت عصبی در سطح سلولی بازکرده‌اند. علاوه بر این، مغناطیس‌سنج SQUIDکه قادر به شناسایی میدان‌های مغناطیسی فوق‌العاده ضعیف ناشی از فرآیندهاي سلولی است، توسعه‌یافته است. درزمینه انتقال دارو، محققان درحال‌توسعه نانو ذراتی هستند که می‌توانند توسط میدان‌های مغناطیسی خارجی هدایت‌شده و داروها را به­دقت به بافت‌های هدف تحویل دهند. این تلفیق کنترل الکترومغناطیسی و مهندسی نانومقیاس می‌تواند کارآیی درمان‌ها را افزایش داده و عوارض جانبی را به حداقل برساند و به­طور بالقوه روش‌های انتقال دارو در درمان بیماری‌های مختلف را متحول کند. پیشرفت در رمزگشایی سیگنال‌های الکترومغناطیسی مغز باعث توسعه رابطه‌ای مغز و رایانه پیچیده­تر شده و پتانسیل بازگرداندن توانایی ارتباط و حرکت را به افرادي با ناتوانی‌های عصبی به همراه دارد و حتی می‌تواند قابلیت‌های شناختی انسان را افزایش دهد. علاوه بر این، مطالعه پدیده­هاي طبیعی بیوالکترومغناطیسی، الهام‌بخش فناوری‌های زیست تقلیدي بوده است. از فناوري ارتباطات تا برداشت انرژي، پژوهشگران از استفاده­هاي هوشمندانه طبیعت از سیگنال‌های الکترومغناطیسی براي توسعه راه‌حل‌های فناورانه کارآمدتر و پایدارتر بهره می‌گیرند. این رویکرد زیست الهام می‌تواند به پیشرفت‌های مهمی در حوزه‌هایی مانند ارتباطات بیسیم، تولید انرژي و سنجش محیطی منجر شود.

جدول 1 یک نماي کلی از کاربردهاي متنوع سیگنال دهی بیوالکترومغناطیسی درزمینه­هاي پزشکی و فناوري ارائه می‌دهد. این جدول وضعیت کنونی پژوهش‌ها و پیاده‌سازی‌های عملی را گردآوري کرده و تأثیر گسترده اصول بیوالکترومغناطیسی را در حوزه‌های مختلف نشان می‌دهد [,14و15].

**جدول 1. کاربردها/نوآوری‌های درمانی سیگنال دهی بیوالکترومغناطیسی**

|  |  |
| --- | --- |
| کاربرد/ نوآوري | شرح |
| تحریک مغناطیسی ترانس کرانیال(TMS) | براي درمان اختلالات روانی، به‌ویژه افسردگی، با مدولاسیون فعالیت مغزي از طریق میدان‌های الکترومغناطیسی استفاده می‌شود. |
| درمان با میدان الکترومغناطیسی پالسدار (PEMF) | پتانسیل بالایی در درمان مشکلات اسکلتی-عضلانی دارد، فرآیندهاي ترمیم استخوان را تسریع کرده و دردهاي مرتبط با شرایط ارتوپدي را کاهش می‌دهد. |
| درمان‌های الکترومغناطیسی در پزشکی‌ترمیم | هدایت تمایز سلول‌های بنیادي و فرآیندهاي ترمیم بافت، تقویت مکانیسم‌های طبیعی بهبود بدن. |
| دستگاه‌های کاشتنی | براي مدولاسیون فعالیت عصبی در شرایطی مانند درد مزمن و بیماری‌های خود ایمنی. |
| میدان‌های درمانی تومور(TTFields) | استفاده از میدان‌های الکتریکی متناوب براي مختل کردن تقسیم سلول‌های سرطانی، که در درمان گلیوبلاستوما نویدبخش است. |
| حسگرهاي زیستی براي تشخیص پزشکی | حسگرهاي پیشرفته براي شناسایی و اندازه‌گیری سیگنال‌های بیوالکترومغناطیسی، که تشخیص پزشکی و نظارت بر محیط‌زیست را بهبود می‌بخشد. |
| مگنتومترهاي پمپ شده نوري(OPMs) | توسعه سیستم‌های مغناطانسفالوگرافی پوشیدنی(MEG) براي انجام مطالعات طبیعی‌تر از فعالیت مغزي. |
| فناوری‌های حسگري مقیاس نانو | پیشرفت در فناوری‌هایی مانند مراکز نیتروژن-خلا(NV) در الماس براي شناسایی میدان‌های بیوالکترومغناطیسی با وضوح‌بالا. |
| ترانزیستورهاي اثر میدان گرافنی(GFETs) | براي شناسایی میدان‌های الکتریکی بسیار ضعیف تولیدشده توسط نورون‌های فردي. |
| مگنتومترهايSQUID (دستگاه تداخل کوانتومی ابررسانا) | براي شناسایی میدان‌های مغناطیسی فوق‌العاده ضعیف تولیدشده توسط فرآیندهاي سلولی. |
| رسانش دارویی مغناطیسی | توسعه نانو ذرات هدایت‌شده توسط میدان‌های مغناطیسی خارجی براي تحویل دقیق دارو به بافت‌های هدف. |
| رابطه‌ای مغز-کامپیوتر | رمزگشایی سیگنال‌های الکترومغناطیسی مغزي براي تسهیل رابطه‌ای پیچیده‌تر مغز-کامپیوتر. |
| فناوری‌های بیومیمتیک | توسعه‌های جدید در ارتباطات بیسیم، تولید انرژي و حسگري محیطی. |

این جدول خلاصه‌ای از کاربردهاي کلیدي و نوآوری‌ها درزمینه‏ي سیگنال دهی بیوالکترومغناطیسی و تأثیر آن‌ها در حوزه‌های درمانی و تکنولوژیکی است. [14و15].

**2. جهت‌گیری‌های آینده در پژوهش سیگنال دهی بیوالکترومغناطیسی**

پژوهش در زمینه سیگنال‌دهی بیوالکترومغناطیسی به سرعت در حال تکامل است و به ویژه در حوزه‌های پزشکی و نانوتکنولوژی تحولات چشمگیری داشته است. در آینده، توسعه تکنیک‌های پیشرفته‌تری برای تجزیه و تحلیل و تداخل سیگنال‌های الکترومغناطیسی در سیستم‌های بیولوژیکی می‌تواند به تشخیص زودهنگام بیماری‌ها، بهبود درمان‌های غیرتهاجمی و افزایش دقت دستگاه‌های پزشکی منجر شود. همچنین، تحقیقاتی در زمینه تعاملات سیگنال‌های الکترومغناطیسی با سلول‌ها و بافت‌های بیولوژیکی می‌تواند به طراحی درمان‌های هدفمند و پیشرفته‌تر کمک کند. حوزه سیگنال دهی بیوالکترومغناطیسی در آستانه کشف‌های علمی بزرگ قرار دارد و بینش‌های عمیقی را در مورد ماهیت بنیادي زندگی و سازمان‌دهی زیستی ارائه می‌دهد. با ادامه باز کردن پیچیدگی‌های این جریان‌های بی‌صدا، به نظر می­رسد که در آستانه تحولات پارادایمی (Paradigm Shifts) هستیم که می‌توانند درك ما از زیست‌شناسی، پزشکی و فناوري را متحول کنند. یک مسیر تحقیقاتی حیاتی در توسعه ابزارهاي حساس‌تر براي شناسایی و اندازه‌گیری میدان‌های بیوالکترومغناطیسی ضعیف قرار دارد. این پیشرفت‌ها به ما این امکان را می­دهند که به تعاملات الکترومغناطیسی ظریفی که در درون و بین موجودات زنده رخ می­دهند، نفوذ کنیم و احتمالاً مکانیزم‏هاي ناشناخته‌ای از ارتباط و تنظیم بیولوژیکی را کشف کنیم. کشف اثرات کوانتومی در پدیده­هاي بیوالکترومغناطیسی نمایانگر یک مرز هیجان­انگیز است. با گسترش درك ما از زیست‌شناسی کوانتومی، ممکن است متوجه شویم که فرآیندهاي کوانتومی نقش مهم‌تری در "سمفونی" الکترومغناطیسی حیات دارند نسبت به آنچه پیش‌تر تصور می­شد. این ممکن است پل ارتباطی بین جهان­هاي میکروسکوپی و ماکروسکوپی عملکرد بیولوژیکی ایجاد کند [14و2].

یک حوزه مهم تحقیقاتی دیگر، بررسی تعامل پیچیده بین سیگنال دهی شیمیایی و الکترومغناطیسی در سیستم‌های بیولوژیکی است. با روشن ساختن چگونگی تعامل و تکمیل این دو نوع ارتباط، می‌توانیم درك جامع‌تری از فرآیندهاي بیولوژیکی به ­دست آوریم و احتمالاً درمان‌های مؤثرتري براي مداخلات درمانی توسعه دهیم [13].

پیشرفت‌های در کاربردهاي درمانی مبتنی بر اصول بیوالکترومغناطیسی پتانسیل عظیمی براي بهبود سلامت انسان دارند. از تکنیک‌های پیشرفته تحریک الکترومغناطیسی گرفته تا دستگاه‌های بیوالکترونیکی پیچیده، این رویکردها می‌توانند امید جدیدي براي درمان طیف وسیعی از شرایط پزشکی ایجاد کنند، به‌ویژه در شرایطی که درمان‌های سنتی به نتایج مؤثري نرسیده‌اند. توسعه‌های اخیر در اپتوژنیک و مغنتوژنیک راه‌های جدیدي را براي مدولاسیون عصبی غیرتهاجمی با دقت فضایی و زمانی بی‌سابقه بازکرده‌اند [7]. با استفاده از قدرت سیگنال دهی بیوالکترومغناطیسی، ضروري است که اثرات بلندمدت میدان‌های الکترومغناطیسی محیطی بر سلامت و اکوسیستم‌ها را نیز موردبررسی قرار دهیم. این پژوهش نه‌تنها براي حفظ سلامت عمومی و یکپارچگی محیط‌زیست حیاتی است، بلکه براي راهنمایی در توسعه و کاربرد مسئولانه فناوری‌های الکترومغناطیسی نیز ضروري است. این جهت‌گیری‌های تحقیقاتی آینده به­طور متقابل به هم مرتبط هستند و هرکدام اطلاعات و پیشرفت‌هایی را براي دیگري فراهم می‌کنند. موفقیت در این حوزه به تلاش‌های مشترك زیست شناسان، فیزیکدانان، مهندسان و متخصصان پزشکی بستگی دارد که هر یک از تخصص‌های منحصربه‌فرد خود را براي حل مشکلات پیچیده به کار می‌گیرند. همان‌طور که این حوزه پیشرفت می‌کند، مهم است که به پیامدهاي اخلاقی پژوهش‌ها و کاربردهاي بیوالکترومغناطیسی، به‌ویژه درزمینه­هایی مانند مدولاسیون عصبی و کاشت‏هاي بیوالکترونیکی توجه داشته باشیم [20].

**13. نتیجه­گیري**

این مرور، نقش بنیادي سیگنال دهی بیوالکترومغناطیسی در سیستم‌های بیولوژیکی را از سطح سلولی تا ارتباط بین موجوداتی بررسی کرده است. ما ماهیت و تولید میدان‌های بیوالکترومغناطیسی، مکانیسم‌های دریافت و تبدیل آن‌ها، و عملکردهاي متنوع آن‌ها در موجودات زنده را موردبررسی قرار داده‏ایم. شواهد به‌دست‌آمده نشان می­دهند که این سیگنال‌ها در فرآیندهاي مهمی مانند هدایت فعالیت‌های سلولی، راهنمایی فرآیندهاي توسعه­اي و تسهیل ارتباط درون و بین موجودات نقش دارند. با ادامه کشف پیچیدگی‌های سیگنال دهی بیوالکترومغناطیسی، در آستانه تحولات احتمالی درك ما از فرآیندهاي زیستی قرار داریم. پژوهش‌های آینده در این زمینه نه‌تنها به کشف عمیق‌تر مکانیسم‌های زیستی بنیادي منجر خواهد شد، بلکه راه‌حل‌های نوآورانه‌ای براي چالش‌های پزشکی و فناوري موجود ارائه خواهد داد. اولاً، درزمینه درمان‌های غیرتهاجمی، درمان‌هایی مبتنی بر اصول بیوالکترومغناطیسی می‌توانند در مدیریت بیماری‌های خاص انقلاب ایجاد کنند. به‌عنوان‌مثال، مدولاسیون دقیق میدان‌های الکترومغناطیسی در بافت‌های خاص ممکن است به درمان‌های جدید براي اختلالات عصبی یا دردهاي مزمن منجر شود که به­طور بالقوه مؤثرتر و با عوارض جانبی کمتري نسبت به درمان‌های دارویی سنتی هستند.

ثانیاً، تحقیق در مورد سیگنال دهی بیوالکترومغناطیسی ممکن است الگوهاي جدیدي براي درك ارتباطات سلولی ایجاد کند. درك عمیق‌تر از نحوه ارتباط سلول‌ها از راه دور از طریق میدان‌های الکترومغناطیسی می‌تواند مکانیسم‌های تنظیم فیزیولوژیکی ناشناخته‌ای را آشکار کند که مسیرهاي تحقیقاتی جدیدي در بیماری‌های پیچیده مانند سرطان و اختلالات خود ایمنی باز کند. درنهایت، درزمینه تشخیص، تکنیک‌های دقیق‌تر براي اندازه‌گیری میدان‌های بیوالکترومغناطیسی ممکن است امکان تشخیص زودهنگام بیماری‌ها، به­ویژه در سیستم‌های عصبی و قلبی عروقی را فراهم کنند. مطالعه سیگنال دهی بیوالکترومغناطیسی تقاطع پرجنب‌وجوشی از زیست‌شناسی، فیزیک و مهندسی است. با پیشرفت در این زمینه، همکاری‌های بین­رشته­اي براي پاسخ به سؤالات پیچیده­­اي که پیش رو داریم و تحقق پتانسیل کامل این حوزه شگفت­انگیز حیاتی خواهد بود. این بررسی اهمیت این "جریان‌های بی‌صدا" در هماهنگی فعالیت‌های سلولی و سازمان‌دهی سیستم‌های زیستی را برجسته می‌کند.

**14. مراجع**

1. *Alivisatos, A.P., et al., Biological Applications of Nanotechnology: Harnessing Bioelectromagnetic Signals, Nature Biotechnology, 2021. 20*
2. *Cifra, F., et al., Quantum Biophysics: Foundations and Applications in Bioelectromagnetics, Progress in Biophysics and Molecular Biology, 2020.*
3. *Cohen, R., Behavioral and Neural Responses to Risk and Loss: Insights From fMRI Studies, Trends in Neuroscience, 2019.*
4. *Funk, J., & Monsees, M., Effects of Electromagnetic Fields on Cellular Signal Transduction Pathways, Biochemistry and Cell Biology, Vol. 84, No. 4, 2006, pp. 287-297.*
5. *Gehring, S., & Willoughby, A. R., The Medial Frontal Negativity as a Predictor of Decision Outcomes in Gambling Tasks, Journal of Cognitive Neuroscience, 2002.*
6. *Joy, G., Lopez, L.R., & Webber, M., Electrophysiological Characterization of Subclinical and Overt Hypertrophic Cardiomyopathy by Magnetic Resonance Imaging-Guided Electrocardiography, 2024. (JOURNAL OF THE AMERICAN COLLEGE OF CARDIOLOGY 2024*

*PUBLISHED BY ELSEVIER ON BEHALF OF THE AMERICAN COLLEGE OF CARDIOLOGY FOUNDATION ).*

1. *Knopfel, T., et al., Advances in Optogenetics and Magnetogenetics: Tools for Precision Neuromodulation, Annual Review of Neuroscience, 2022.*
2. *Lefaucheur, M., et al., Evidence-Based Guidelines on the Therapeutic Use of Transcranial Magnetic Stimulation (TMS) in Clinical Practice, Clinical Neurophysiology, 2020.*
3. *Liu, X., et al., Bioelectromagnetic Interventions in Regenerative Medicine: Emerging Trends and Opportunities, Journal of Regenerative Medicine, 2022.*
4. *Liu, X., et al., The Effects of Electromagnetic Fields on Human Health: Recent Advances and Future Prospects, Journal of Bionic Engineering, Vol. 18, 2021. pp. 210-237.*
5. *McCraty, R., et al., The Energetic Heart: Bioelectromagnetic Interactions Within and Between People, HeartMath Institute.2023*
6. *Mognaschi, M.E., et al., Field Models and Numerical Dosimetry Inside an Extremely-Low-Frequency Electromagnetic Bioreactor, arXiv preprint, Aug. 2019.*
7. *Neves, M., et al., Electromagnetic Interactions and Chemical Signaling in Biological Systems, Journal of Molecular Biology, 2022.*
8. *Polhemus, J., et al., Advances in Graphene-Based Sensors for Bioelectromagnetic Signal Detection, Nature Electronics, 2021.*
9. *Popp, K., Biophotons – The Light in Our Cells, NeuroQuantology Journal, 2016.*
10. *Ravin, R., et al., A Novel In Vitro Device to Deliver Induced Electromagnetic Fields to Cell and Tissue Cultures, arXiv preprint, Nov. 2020.*
11. *Rigoni, K., et al., Prefrontal Cortex and Risk Assessment: The Role of Medial Frontal Negativity in Monitoring Errors, Neuropsychologia, 2020.*
12. *Salari, V., et al., Towards Non-Invasive Cancer Diagnostics and Treatment Based on Electromagnetic Fields, Optomechanics and Microtubules, arXiv preprint, Aug. 2017.*
13. *Si, Y., Jiang, L., & Yi, C., The Electrophysiology and Structural Difference Between Humans With Distinct Risky Preference: A Study Based on EEG and MRI, 2024. Corresponding author:, Chengdu, Sichuan 611731, China.*
14. *Smith, J., et al., Bioelectronic Implants: Ethical Considerations and Future Directions, Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2023.*
15. *Wang, H., W. Zou, W., & Cao, Y., Bioelectromagnetic Fields as Signaling Currents of Life, Radiation Medicine and Protection. 29 July 2024*
16. *Yi, C., et al., Motivational and Emotional Influences on Feedback-Related Negativity: Evidence From Risk Decision-Making Tasks, Frontiers in Human Neuroscience, 2021.*
17. *Zhang, R., et al., Pulsed Electromagnetic Field Therapy for Bone Healing: A Systematic Review and Meta-Analysis, Journal of Orthopaedic Research, 2021.*