مغز: موتور رابطه

مغز: موتور رابطه

نظریه‌ای کاربردی برای سیستم عصبی

دِیل پِروِس

ترجمه‌ی **دکتر محمد اسماعیل فلزی**

انتشارات مازیار

فهرست مطالب

پیشگفتار ۷

بخش اول: فایده سیستم عصبی برای جانوران

۱. طرح پرسش در نگاهی گسترده ۱۳
۲. ارگانیسم‌های بدون سیستم عصبی ۲۵
۳. ارگانیسم‌های دارای سیستم عصبی ۳۷

بخش دوم: سیستم عصبی به عنوان موتور ارتباط

۴. سازمان‌دهی سیستم عصبی ۵۳
۵. مسئله ۶۷
۶. ارتباط‌های عصبی ۸۱

بخش سوم: گواه کارکرد تجربی سیستم‌های عصبی

۷. شواهد نور و رنگ ۹۹
۸. شواهد هندسه ۱۱۸
۹. شواهد حرکت ۱۳۱
۱۰. شواهد صوت ۱۴۵

بخش چهارم: سایر دیدگاه‌ها درباره کارکرد عصبی

۱۱. نظریه‌های اصلی ۱۶۳
۱۲. جمع‌بندی ۱۷۷

واژه‌نامه ۱۹۳
منابع و کتاب‌شناسی ۲۱۲
نمایه ۲۱۳

پیشگفتار

موضوع این کتاب سوآلی است که فکر من و بدون تردید بسیاری از محققان دیگر را از دیرباز درگیر کرده است: مغز آدمی و باقی قسمت‌های سیستم عصبی در اصل چه کاری انجام می‌دهند؟

بر مبنای برداشت تجربی، شاید این سوآل بیهوده به نظر برسد: مگر مغز سازمان‌دهنده اصلی رفتار و جایگاه هویت «**من**» به هنگام تفکر و عمل نیست؟ اما واژه رفتار دربرگیرنده دامنه گسترده‌ای از پاسخ‌های موجود زنده در برابر عوامل داخلی و خارجی است و وقتی از «سازمان‌دهنده» این واکنش‌ها سخن به میان می‌آوریم ابهام به وجود می‌آید. همچنین مفهوم «من» در قلمرو علوم عصبی چندین قرن مورد بحث قرار گرفته، اما نتیجه مشخصی حاصل نشده است.

اگر هدف زیست‌شناسی آن باشد که دریابد موجودات زنده چگونه می‌توانند در جهان به گونه‌ای موفق حضور یابند و مکانیسم‌هایی که در این راه به آنان کمک می‌کند کدام است، لذا چنین پاسخی تنها بر نادانی ما در مورد کارکرد سیستم عصبی سرپوش می‌گذارد. مثلا همه دانش‌آموزان مدارس متوسطه می‌دانند که وظیفه دستگاه تنفس، اکسیژن‌رسانی است یا وظیفه دستگاه گوارش هضم غذاست و وظیفه دستگاه قلب و عروق حمل اکسیژن و مواد غذایی به بافت‌های بدن است و غیره. هر یک از دستگاه‌های بدن انسان دارای هدفی عملی هستند غیر از مغز و سیستم عصبی.[1] در کتاب‌های درسی یکی دو قرن اخیر مطالب زیادی درباره سیستم عصبی ذکر شده، اما مطلب قانع‌کننده‌ای در این باره که هدف و وظیفه اصلی سیستم عصبی چیست در آن‌ها دیده نمی‌شود.

۱. معمولا واژه مغز طوری ذکر می‌شود که گویی باقی اجزای سیستم عصبی اهمیت چندانی ندارند. اما در واقع تعداد سلول‌های موجود در طناب نخاعی و سیستم عصبی محیطی به اندازه تعداد سلول‌های موجود در مخ، مخچه و ساقه مغز (اجزای سه گانه مغز) است.

این نقص محققان را بر آن داشته که تصور کنند برای پی بردن به هدف عملی مغز در مقایسه با سایر اعضا به رویکرد متفاوتی نیاز دارند. به عبارتی آناتومی و فیزیولوژی نمی‌تواند ما را به شناخت مناسبی از مغز که گاهی «پیچیده‌ترین شیء شناخته‌شده در عالم» نامیده می‌شود، برساند. کریستف کخ دانشمند ارشد مؤسسه آلن در زمینه علوم مغز، نیز چنین نظری دارد. برخی از علومی که برای یافتن این پاسخ وارد میدان شده‌اند عبارتند از: علوم کامپیوتری، ریاضیات، آمار، نظریه شبکه، نظریه بازی، نظریه گراف، سیبرنتیک، مهندسی سیستم‌ها، روان‌شناسی‌شناختی، فیزیک کوانتومی، فلسفه و توجه به کلان داده‌ها. رویکرد «کلان داده» که «کانکتومی» نامیده می‌شود بر این پایه استوار است که اگر همه رویکردهای دیگر عاجز از حل مسئله باشند، از راه بازسازی ارتباط بین ۸۶ میلیارد نورن مغز انسان می‌توانیم جواب را پیدا کنیم. برخی تا آنجا پیش رفته‌اند که می‌گویند درک مغز انسان نیاز به رشته‌های علمی و نظریه‌هایی دارد که هنوز به آن‌ها دست نیافته‌ایم. حتی عده‌ای معتقدند مغز به حدی پیچیده است که نحوه عملی آن ممکن است تا ابد ناشناخته باقی بماند.[۱] از آنجا که شناخت مغز با مسئله سلامت انسان نیز رابطه تنگاتنگ دارد، امروزه بودجه کلانی معادل میلیون‌ها دلار را برای تحقیق در زمینه ژنتیک عصبی و کشف داروهای روانگردان اختصاص داده‌اند و هم اینک تلاش‌های گسترده‌ای با هدف حل مشکلات پزشکی برای درک و شناخت مغز در حال انجام است.

در مقایسه با نظریه‌های یاد شده، مطلبی که در این کتاب عنوان می‌کنیم بسیار ساده است: اساس کار مغز و باقی قسمت‌های سیستم عصبی ایجاد و به روز کردن ارتباط نورونی بر پایه‌ای کاملا تجربی بین ورودی (محرک) و خروجی (رفتار) است. شاید این مطلب در نگاه اول خشک و بی‌روح جلوه کند. اما اینکه در مورد مغز «ارتباط» را در مرکز توجه قرار دهیم، نگرش جدیدی نیست. افلاطون و ارسطو نیز بر اهمیت ارتباط در حیات ذهن تأکید کرده بودند. بسیاری از فلاسفه بعد نیز مانند برکلی، هابز، هیوم و کانت نیز چنین نظری داشتند. در روان‌شناسی ارتباط به معنی تداعی از یک سده گذشته در عرصه متون کلاسیک و شرطی

---

۱. نوام چامسکی از مهم‌ترین طرفداران این نظریه است، رجوع کنید به مقاله: «علم، ذهن و محدودیت‌های ادراک»

شدن فعال مطرح بوده است و با کشف سیناپس در اواخر قرن نوزده ارتباط‌های نورونی بر پایه تعدیل ارتباط‌های سیناپسی (انعطاف‌پذیری عصبی) به عنوان اساس یادگیری و حافظه مورد پذیرش قرار گرفته‌اند. در اینجا بحث بر سر اهمیت آشکار ارتباط‌های نورونی در کارکرد سیستم عصبی نیست. می‌خواهیم شرح دهیم که چرا ارتباط‌های نورونی به دلایل تجربی اجتناب‌ناپذیرند و اینکه این موضوع چه پیامدهایی برای درک پاسخ‌های رفتاری در برابر ورودی‌های عصبی یا محرک‌ها دارد.

استدلال اصلی این است که سامانه‌های حسی، توانایی سنجش ویژگی‌های جهان عینی را ندارند که محل بروز رفتارهاست. با توجه به این معضل، لب کلام آن است که ما و همه ارگانیسم‌های (با یا بدون سیستم عصبی) کاملا به ارتباط‌های بین محرک و رفتار که بر پایه تجربه موجود زنده طی زمان به وجود می‌آید، وابسته‌ایم. تکامل سیستم‌های عصبی به اعضای قلمرو جانوری نسبت به اشکال ساده حیات امکان بیشتری برای تولید مثل و بقا می‌دهد. اگر ارتباط‌های عصبی را که طی فرگشت یا حیات جاندار به وجود می‌آیند دلیل پیدایش سیستم عصبی بدانیم، به سایر نظریه‌های علمی و سرمایه‌گذاری برای بازسازی مغز با سیلیکون یا شناسایی همه ارتباط‌های سیناپسی مغز نیازی نخواهیم داشت.

البته تلاش در زمینه‌های یادشده بی‌فایده نیستند، مثلا پیشرفت‌های اخیر در زمینه هوش مصنوعی به نفع نظریه تجربی کارکرد سیستم عصبی بوده است. با پذیرفتن این ایده می‌توانیم این فرض را که «مغز مسئول سنجش و بررسی دریافت‌های ذهنی ما از جهان یا هر چیز دیگر است» کنار بگذاریم. فرضی که امروزه کمتر کسی آن را می‌تواند قبول کند. در هر گونه تلاش علمی برای ارائه نظریه‌ای مناسب، باید دید آیا نظریه ارائه شده می‌تواند پدیده‌هایی را که مدت‌ها بدون توضیح بودند روشن کنند یا خیر. در علم اعصاب مدرن مهم‌ترین پدیده‌ای که نیاز به توضیح دارد، ادراک است. ادراک یکی از فرآورده‌های نهایی کنش سیستم عصبی در جانورانی مانند انسان است. ادراک ــ چیزهایی می‌بینیم، می‌شنویم، لمس می‌کنیم، می‌چشیم، می‌بوییم و مانند آن ــ در اصل مایه شگفتی بسیار است و در مرحله کنونی سیر علوم عصبی شاید فهم پدیدارشناسی ادراک بهترین راه پی بردن به نحوه کارکرد مغز باشد. نظریه ما از کارکرد مغز باید

بتواند مسئله ادراک را روشن کند.

این کتاب به طور کلی ۴ بخش دارد: در بخش اول (فایده سیستم عصبی برای جانوران) هدف آن است که زمینه‌ای برای درک ظهور سیستم عصبی به منزله راهی مؤثر برای بقا و باروری که منظور همه جانداران است فراهم کنیم. در قسمت دوم (سیستم عصبی به عنوان موتور ارتباط) به این بحث می‌پردازیم که سیستم‌های زیستی دارای قابلیت حسی با مسئله‌ای دشوار روبرو هستند. این سیستم‌ها نمی‌توانند پارامترهای جهانی را که در آن به سر می‌بریم مانند ابزارهای فیزیکی با دقت اندازه‌گیری کنند. لذا ناگزیرند ارتباط‌های نوینی موسوم به سیناپس‌های عصبی پدید آورند و آن‌ها را بر پایه آزمون و خطا در مسیر تکامل یا طی زندگی فردی بهبود بخشند و به روز کنند. در قسمت سوم (گواه کارکرد تجربی سیستم‌های عصبی)، شواهد سیستم‌های حسی به ویژه بینایی و شنوایی را که طی بیست سال گذشته گرد آمده‌اند، مرور می‌کنیم. سرانجام در قسمت چهارم (سایر دیدگاه‌ها درباره کارکرد سیستم عصبی)، نظریه‌های دیگری را که در مورد کارکرد مغز وجود دارد بررسی می‌کنیم و به دلیل‌هایی که در تأیید یا رد آن‌هاست توجه می‌کنیم.

چون این کتاب را برای طیف گسترده‌ای از مخاطبان نوشته‌ام، برخی از خوانندگان ممکن است تصور کنند بعضی از بخش‌های کتاب خیلی سطحی است. نیز دیگرانی هستند که شاید برخی از قسمت‌های کتاب را حاوی توضیح‌های بیش از حد بدانند. امیدوارم این نکته که کوشیده‌ام میانه‌روی کنم عده زیادی از خوانندگان را دلسرد نکند. بدیهی است برای فهم کارکرد سیستم عصبی (حتی اگر نتوانیم از عهده حل این معما برآییم) باید سخت به آن بیندیشیم.

دیل پروس

دورهام، کارولینای شمالی ۲۰۱۸

بخش ۱

فایده سیستم عصبی برای جانوران

What Nervous Systems Do for Animals

۱
طرح پرسش در نگاهی گسترده

مقدمه

در پس این سوآل که آیا مغز و باقی قسمت‌های سیستم عصبی دارای روش کار ساده‌ای هستند یا خیر، تعدادی واقعیت‌های مهم زیستی و ارتباط آن‌ها با علوم اعصاب وجود دارند. برای آنکه بدانیم سیستم عصبی چه کاری انجام می‌دهد باید بپرسیم موجودات زنده به منظور بقاء و باروری (با یا بدون سیستم عصبی) باید چه توانایی‌هایی را کسب کنند.

طبق تعریف، بیولوژی عبارت است از مطالعه حیات. فیزیک و شیمی با قوانین و اصولی که بر رفتار اشیاء موجود در جهان حاکم است سر و کار دارند. اما زیست‌شناسی با زیرمجموعه‌ای از موجودات عالم که دارای حیات هستند، تولید مثل می‌کنند و می‌میرند سر و کار دارد. لذا به منظور درک سیستم عصبی باید تصوری از حیات و چگونگی پیدایش آن بر زمین و اعمالی که ارگانیسم‌ها برای گذران امور در جایگاه طبیعی خود انجام می‌دهند، داشته باشیم. من از این مسائل بیش از دانشجویی که اطلاعات مختصری درباره سیر پیشرفت علوم دارد چیزی نمی‌دانم. با این حال در این فصل به نکاتی که علماً بر سر آن توافق دارند نگاهی می‌اندازیم و هدف آن است که ببینیم در متون زیستی، چه هدفی برای کارکرد سیستم عصبی قائلند.

حیات در زمین

امروزه در آمریکا ۴ نفر از هر ۱۰ نفر به غلط باور دارند که آغاز حیات بر روی زمین چنانکه در انجیل آمده حدود ۶,۰۰۰ سال قبل می‌باشد.[۱]

۱. طبق یک نظرسنجی که توسط مؤسسه گالوپ در آمریکا در سال ۲۰۱۴ انجام شد ۴۲٪ شهروندان آمریکایی معتقد بودند که انسان‌ها در کمتر از ده هزار سال قبل به وجود آمده‌اند، ←

براساس یافته‌های زمین‌شناختی، تابش زمینه کیهانی، واپاشی رادیواکتیو و محاسبه سرعت انبساط عالم می‌توان تخمین زد که حدود ۱۳ـ۱۴ میلیارد سال از پیدایش شگفت عالم می‌گذرد. البته منظومه شمسی بسیار جوان‌تر است. خورشید ستاره متوسطی است از گروه کوتوله‌های زرد که در نیمه راه عمر خود قرار دارد و تقریبا همزمان با سیاره‌های منظومه شمسی از طریق تراکم ابری گازی از مواد در حدود ۴/۶ سال قبل به وجود آمده است و تا زمانی که به یک غول سرخ تبدیل شود و نزدیک‌ترین سیارات از جمله زمین را در خود ببلعد حدود پنج میلیارد سال فرصت دارد. سپس خورشید به تدریج سرد و به کوتوله‌ای سفید و در نهایت به کوتوله‌ای سیاه تبدیل می‌شود.[۱] پس عمر زمین حدود ۴/۵ میلیارد سال است و حدود ۵ میلیارد سال دیگر نیز در پیش دارد.

وقتی سطح گداخته و مذاب زمین نخستین به آهستگی سرد شد و به دمای حدود ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد رسید، پیدایش حیات در مدتی کوتاه با ترکیب آب و مواد آلی که از پیش وجود داشتند امکان‌پذیر شد. احتمالا فقط چند صد میلیون سال طول کشید تا سطح زمین سرد شود. به عبارتی قدمت حیات روی زمین حدود ۴ میلیارد سال است.

کهن‌ترین گواه فسیلی حیات صخره‌هایی هستند که حدود ۳ـ۴ میلیارد سال پیش به وجود آمده‌اند.[۲] (شکل ۱.۱) این ارگانیسم‌ها بسیار شبیه سیانوباکتری‌هایی هستند که امروزه روی زمین زندگی می‌کنند و در گذشته آن‌ها را جلبک‌های سبز ـ آبی می‌نامیدند. سیانوباکتری‌ها شاخه‌ای از باکتری‌های دارای قابلیت فتوسنتز هستند که هنوز به فراوانی روی زمین وجود دارند.[۳] این ارگانیسم‌ها

← آماری که دال بر کاستی و ضعف نظام آموزشی ما و سیاستی است که آموزش ضعیف به دنبال آن به وجود آمده است. شهروندان سایر کشورهای توسعه یافته نسبت به ما خیلی وضع بهتری دارند.

۱. چون کوتوله‌ها خیلی آهسته سرد می‌شوند عمرشان بسیار طولانی است و بنابراین سرنوشت نهایی خورشید با سرنوشت عالم گره خورده است.

۲. اخیرا فسیل‌های لوله‌ای شکلی را در کانادا یافته‌اند که احتمالا توسط باکتری‌ها ساخته شده‌اند و لذا عمر حیات روی زمین باید چیزی حدود ۴/۲ میلیارد سال باشد.

۳. فرمانروهای حیات طبق تقسیم‌بندی کنونی عبارتند از: ۱) یوباکتری‌ها (مثل سیانوباکتری‌ها و باکتری‌های دستگاه گوارش انسان)، ۲) آراکی باکتری‌ها (که امروزه در مجاورت چاه‌های گرمابی نواحی عمقی اقیانوس‌ها و جاهای ویژه یافت می‌شوند) و ۳) پروتیست‌ها یا تک‌یاختگان ←

مثل گیاهانی که اکسیژن را به عنوان فرآورده زائد متابولیسم خود دفع می‌کنند، به افزایش میزان اکسیژن در اتمسفر اولیه زمین که فاقد اکسیژن بود کمک کردند.

۱.۱ صخره‌های رسوبی غرب استرالیا (استروماتولیت‌ها) که از تجمع باکتری‌هایی که چند میلیارد سال قبل می‌زیستند به وجود آمده‌اند. (با تشکر از پل هاریسون)

بنابراین حیات در همان مراحل نخستین تاریخ زمین به وجود آمد. البته احتمال اینکه حیات فقط خاص زمین یا پدیده‌ای منحصر به فرد باشد ناچیز است. چون در کهکشان راه شیری حدود صد الی چهارصد میلیارد ستاره داریم که در مراحل مختلف سیر عمر خود هستند و بسیاری از آن‌ها دارای سیاره‌های سنگی مانند زمین هستند که در فاصله مناسبی از ستاره مرکزی برای پیدایش حیات قرار دارند. از طرفی در عالم غیر از کهکشان راه شیری حدود صد میلیارد کهکشان دیگر نیز وجود دارد. پس می‌توان نتیجه گرفت عالم سرشار از حیات است.

← (ارگانیسم‌های تک سلولی هسته‌دار)، قارچ‌ها، گیاهان و حیوانات. این چهار گروه آخر را یوکاریوت می‌نامند. چون سلول‌های آن‌ها دارای هسته مشخص هستند. اما اعضای فرمانروی باکتری‌ها که هسته ندارند پروکاریوت نام دارند.

تعریف حیات

تلاش برای تعریف حیات تاریخچه‌ای بس طولانی و پرپیچ و خم دارد و معمولا در غرب شرح این تاریخچه را از ارسطو شروع می‌کنند.[۱] بحث‌های حاشیه‌ای بسیاری بر سر تعریف حیات وجود دارد، اما بحث‌های اصلی مدت‌هاست که به پایان رسیده‌اند. یکی از بحث‌های فلسفی مطرح در سده‌های گذشته این بود که آیا حیات دارای کیفیتی فراتر و متعالی‌تر از قوانین فیزیک و شیمی است یا خیر. این ایده را ویتالیسم (زیست‌گرایی) می‌نامند که دکارت در قرن هفدهم، نیچه در قرن هیجدهم و هنری برگسون در قرن نوزدهم و اوایل قرن بیستم از طرفداران آن بودند. اینها مانند ارسطو براساس تفکر متافیزیکی گمان می‌کردند نوعی «نیروی حیاتی» life force در موجودات جاندار وجود دارد که هویت‌های مادی به کمک آن برای نیل به هدفی مشخص پیش می‌روند. هدفی که نیچه آن را خیر «اخلاقی» می‌داند. برگسون اصطلاح «شور حیاتی» elan vital را به کار برد. او این شور یا انگیزه را مکمل ضروری انتخاب طبیعی «کور» داروین می‌دانست. در حلقه‌های علمی افرادی مثل هرمان فون هلمهولتز با نشان دادن این نکته که بافت‌های زنده مانند عضله که انرژی مصرف کرده و گرما تولید می‌کنند تابع قانون اول ترمودینامیک و رفتار فیزیکی سایر اشیاء عالم هستند، از اعتبار نظریه او کاستند. با این همه تلاش برای کشف اهمیت معنوی یا مذهبی حیات و سیر آن بر زمین همچنان ادامه یافت و بر ذهن بسیاری از زیست‌شناسان بزرگ تأثیر گذاشت. از جمله جنین‌شناسی به نام هانس دریش، جمعیت‌شناسی به نام سیوال رایت، ژنتیک دانی به نام جولیان هاکسلی و دیرین زیست‌شناسی به نام پیر تیلهارد دو شاردن. اما امروزه بیشتر زیست‌شناسان در مورد وجود هر گونه هدفی برای حیات اعم از اخلاقی یا غیر از آن اظهار نادانی می‌کنند. اجماع علما آن است که حیات وابسته به قوانین فیزیک و شیمی است نه نوعی ویژگی یا راز پنهان که توسط قوانین حاکم بر اشیاء قابل توجیه نباشد.

---

۱. شرح مناسبی از تعریف حیات را می‌توان در کتاب "خاستگاه حیات" (۱۹۹۹) از فریمن دایسون خواند.

با این حال ناگفته نماند که این عقاید هر اندازه شایع باشند، تعریف ساده حیات بر پایه اصول مادی گویا نیست. طبق تعریف فرهنگ لغات «در نظر گرفتن کیفیت برای جداسازی اشیاء جاندار از بیجان» چیز تازه‌ای به معلومات ما اضافه نمی‌کند. تعاریف دقیق‌تری نیز وجود دارند که در آن‌ها فهرستی از صفات ردیف شده‌اند. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی حیات عبارتند از وجود ترکیب‌های آلی، دارا بودن متابولیسم و تولید فرآورده‌های دفعی سوخت و ساز مانند متان و دی‌اکسید کربن (یا در مورد ارگانیسم‌هایی که توان فتوسنتز دارند) اکسیژن. این‌ها ساده‌ترین ویژگی‌های حیات زمینی هستند و لذا دانشمندانی که در پی یافتن حیات فرازمینی در مریخ و سایر سیاره‌های منظومه شمسی یا سیارات منظومه‌های دیگر و اقمار آن‌ها هستند، همین ویژگی‌ها را مد نظر دارند. می‌توان در این فهرست ویژگی‌های پیچیده‌تری را نیز قرار داد مثل همانند سازی، ایجاد نظم موضعی (یا کاهش آنتروپی در اصطلاح ترمودینامیک)، رشد از راه تقسیم سلولی و فرگشت. ولی آن ویژگی موجودات زنده که در زمینه روش کار سیستم‌های عصبی بیش از همه اهمیت دارد جستجوی فعال برای یافتن منابع انرژی است.

انرژی

خواه به زبان روزمره سخن بگوییم یا زبان فیزیک، برای انجام هر گونه کار به انرژی نیاز داریم. اما این جمله فقط می‌گوید که انرژی چه کاری انجام می‌دهد و در مورد ماهیت آن سکوت می‌کند. فیزیکدان‌ها (از جمله یکی از مشهورترین آن‌ها ریچارد فاینمن،[1] در خطابه‌ای در دانشگاه کُرنل در ۱۹۶۴) آشکارا می‌پذیرند که مفهوم انرژی به درستی معلوم نیست. انرژی اشکال بسیاری دارد (از جمله انرژی جنبشی، الکترومغناطیسی، شیمیایی، مکانیکی، گرانشی و هسته‌ای)، اما نمی‌توان انرژی را به نوعی شیء تقلیل داد.

اگر غیر از بقای انرژی بخواهیم جنبه مشترکی برای همه انواع انرژی در نظر

۱. کتاب او به اسم «ویژگی قانون فیزیکی» (۲۰۰۱) به لطف بیل گیتس که حقوق آن را خریداری کرده به طور رایگان در اینترنت موجود است. فاینمن علاوه بر اینکه یکی از فیزیکدانان بزرگ قرن بیستم بود بدون شک نخبه‌ترین و کاریزماتیک‌ترین معلم ولو گمنام این رشته نیز بود.

بگیریم، باید گفت انرژی عاملی است که برای بروز همه رویدادها لازم است.[۱] بدون وجود انرژی هیچ چیزی اتفاق نمی‌افتد. بنابراین رویداد عبارت است از انتقال انرژی از یک موجودیت مادی به موجودیت دیگر در لحظه خاصی از زمان و نقطه خاصی از مکان.

لذا ارگانیسم باید انرژی کسب کند تا بتواند به کمک آن زنده بماند و به تولید مثل بپردازد. موجودات زنده از جمله انسان‌ها باید با سایر ارگانیسم‌ها در محیط اکولوژیک برای کسب انرژی رقابت کنند.

اگرچه اشیاء بیجان به طور منفعل تحت تأثیر انرژی قرار می‌گیرند و تغییر می‌کنند (مثل تغییرات زمین شناختی)، اما موجودات زنده به طور فعال در پی منابع انرژی می‌روند تا غذای لازم برای متابولیسم، رشد، تولید مثل و به وجود آوردن فرزندان سالم (و در مورد انسان‌ها پول، قدرت سیاسی و تحسین دیگران و غیره) را به دست آورند. بنابراین جستجوی انرژی جنبه اصلی تمایز موجود زنده از موجود بی‌جان است.

فرگشت

فرایندی که موجود زنده یا ارگانیسم طی آن در جاهای مختلف زمین انرژی مورد نیاز خود را تأمین می‌کند «فرگشت یا تکامل» نام دارد. یکی از متخصصان ژنتیک به نام تئودوسیوس دوبژانسکی در مقاله‌ای به سال ۱۹۷۳ نوشت «بدون فرگشت هیچ چیز در زیست‌شناسی معنی ندارد.» باید این تعمیم قانع‌کننده را به هنگام بررسی کارکردهای هر ارگانیسم یا هر عضو بدن مورد توجه قرار دهیم. از آنجا که فرگشت جایی در میانه مسیر از سیانوباکتری‌ها تا انسان به پیدایش سیستم عصبی انجامید، لازم است جنبه‌های اصلی این روند را روشن کنیم. بدون وجود تغییراتی که توسط فرگشت طی زمان به وجود آمدند شاید امروز چیزی به نام سیستم عصبی نداشتیم.

در سال ۲۰۰۹ مصادف با صد و پنجاهمین سالگرد انتشار شاهکار داروین به نام درباره‌ی منشأ گونه‌ها از راه انتخاب طبیعی (۱۸۵۹) مقاله‌ها و کتاب‌های زیادی

۱. یک نکته آن است که در شرایط خاص حرکت بدون انتقال انرژی امکان‌پذیر است و لذا امکان رویداد وجود دارد. نکته دیگر آن است که در جهان کوانتومی همه چیز ممکن است

درباره تأثیر فرگشت به مدد انتخاب طبیعی بر زیست‌شناسی و تفکر مدرن منتشر شد. به نظر دانشمندان کتاب منشأ گونه‌ها حداقل در عرصه زیست‌شناسی مهم‌ترین کتابی است که تاکنون در این‌باره نوشته شده است. لب کلام داروین (بر کنار از برخی استثناها) این است که تنوع موجودات زمین را می‌توان با ایده انتخاب طبیعی به طور کامل توضیح داد.[۱]

یکی از کسانی که در همان ایام کمک شایانی برای ارائه شواهدی به نفع فرگشت کرد، زیست‌شناسی بود به نام آلفرد راسل والاس که سفرهای او به منظور گردآوری شواهد فرگشت به آمازون و مالزی از بسیاری جهات شبیه سفرهای پنج ساله داروین با کشتی بیگل به جنوب آمریکا بود.[۲] والاس شرحی از سفر اکتشافی خود را در سال ۱۸۵۳ منتشر کرد، و داستان سفر بیگل داروین را که به سال ۱۸۳۹ منتشر شده بود مطالعه کرده بود. در اصل هر دو داشتند در مورد چگونگی ایجاد تنوع در گونه‌های جانوری فکر می‌کردند، اما در مورد مکانیسم ایجاد این تنوع به نتیجه مشخصی نرسیده بودند.

والاس در سال ۱۸۵۴ به مدت هشت سال عازم سفری به مجمع‌الجزایر مالایی شد که مشتمل بود بر سنگاپور، جاوه، برونئی و گینه نو و شرح جامعی از این سفر را با عنوان توزیع جغرافیایی حیوانات در سال ۱۸۷۶ منتشر کرد. او در سال ۱۸۵۸ مقاله‌ای نه صفحه‌ای نوشته بود با عنوان تمایل گونه‌های جانوری به انشعاب از اصل تا بی‌نهایت و در آن ایده‌هایی را مطرح کرد که داروین ۲۰ سال در مورد آن‌ها فکر کرده، اما چیزی ننوشته بود.

والاس این مقاله را برای داروین فرستاد تا نظر او را جویا شود. داروین با

---

۱. چنانکه بسیاری متذکر شده‌اند مفهوم فرگشت اولین بار توسط داروین مطرح نشد. بلکه او توانست ایده فرگشت را که دیگران عرضه کرده بودند به بهترین و گویاترین وجه معرفی کند. در میانه قرن نوزدهم اروپایی‌ها با ایده فرگشت از طریق کسانی که قبل از داروین آن را معرفی کرده بودند آشنا بودند، از جمله مقاله لامارک درباره فرگشت که سال ۱۸۰۹ منتشر شد، شواهد زمین شناختی دال بر قدمت زمین که توسط چارلز لیل در کتاب «اصول زمین‌شناسی» به سال ۱۸۳۰ ارائه شد و فرضیه فرگشت اراسموس داروین نیز زمینه را برای ابراز عقاید چارلز داروین فراهم کرد. آنچه دیدگاه داروین را از دیگران متمایز می‌کرد شرح مکانیسمی بود به نام انتخاب طبیعی.

۲. هدف این سفر که سال ۱۸۳۱ شروع شد (دومین سفر این کشتی) نقشه‌برداری از ساحل آمریکای جنوبی بود. در سفر اول کاپیتان کشتی که در بسیاری از شروح نام او را ذکر کرده‌اند رابرت فیتزروی بود که پس از خودکشی کاپیتان اصلی کشتی هدایت بیگل را برعهده گرفت.

مطالعه مقاله والاس به سرعت خلاصه‌ای از کار خود را تألیف کرد. او که پسرش در همان ایام گرفتار بیماری سختی شده بود، برای اطمینان از اینکه نام والاس ذکر شود ترتیبی داد که دوستانش چارلز لیل و جوزف هوکر مقاله والاس را همراه با نظریه خودش درباره این موضوع در سال ۱۸۵۸ به انجمن لینه لندن ارائه دهند.[۱]

اما ملاحظه برخی شواهد که داروین قادر به درک آن‌ها نبود او را گیج و سردرگم کرده بود، از جمله معضل سازگاری (آداپتاسیون) که در آن زمان نیز مانند اکنون محل مناقشه بود. سازگاری ایده‌ای کلی است که می‌گوید اساس تکامل شایستگی fitness است یا به قول هربرت اسپنسر «بقای اصلح». از این دیدگاه همه تغییرهایی که از راه انتخاب طبیعی به وجود می‌آیند سازگارانه هستند. یعنی اعضایی که تغییر کرده‌اند در مقایسه با سایر اعضای گروه که فاقد صفت جدید هستند، از شانس باروری بیشتری برخوردارند. اما داروین خوب می‌دانست که استثناهای زیادی نیز وجود دارند، از جمله دم طاووس نر یا آشیانه‌های پیچیده و ظریفی که مرغ‌های کریچ‌ساز (Dowerbirds) درست می‌کنند. داروین استدلال می‌کرد که این رفتارها و جنبه‌های فنوتیپی[۲] به ظاهر غیرسازگارانه در همسریابی مؤثرند و با توجه به گزینش جنسی در روند سازگاری نقش مهمی ایفا می‌کنند. در گزینش جنسی، گیرایی پیش از همسریابی به عنوان عاملی برای کسب موفقیت در باروری عمل می‌کند. این ایده در دهه ۳۰ توسط کار کمّی آمارشناس بریتانیایی به نام رونالد فیشر دوباره جان گرفت و حتی امروزه نیز بخش مهمی از بحث زیست‌شناسی تکاملی است.

---

۱. عجله داروین در انتشار نظریه‌اش به اصرار توماس هنری هاکسلی بود. نام والاس با سپری شدن سال‌ها از انتشار مقاله‌اش کمتر مورد توجه قرار گرفت و به فراموشی سپرده شد. داروین نویسنده قابل‌تری بود و افکار روشن‌تری داشت و از نظر اجتماعی و علمی با افرادی مثل هاکسلی و لیل و هوکر ارتباط‌های بیشتری داشت. کار والاس این ایراد را هم داشت که او اخلاق و فرهنگ انسان را از نظریه تکاملی خود کنار گذاشته بود. اما داروین در کتاب هبوط انسان ۱۸۷۱ این بحث را مطرح کرد که انسان‌ها نیز صرفا یکی از گونه‌های زیستی هستند. باید قبول کنیم که داروین در مشترک دانستن ایده تکامل با والاس، آن هم در عصری که دانشمندان در مورد حق تقدم در بسیاری از مسائل جزیی‌تر با هم درگیر می‌شدند، بسیار منصفانه رفتار کرد.

۲. فنوتیپ‌ها معمولاً مجموعه‌ای از جنبه‌های تشریحی هستند، اما در اصل همه ویژگی‌های یک ارگانیسم از مکانیسم‌های مولکولی تا تفکر جزء آن هستند. اینکه یک صفت نقش سازگارانه دارد یا نه، مسئله ساده و روشنی نیست.

مکانیسم‌ها

داروین و والاس از چگونگی ایفای نقش عامل ارث از راه انتخاب طبیعی اطلاعی نداشتند. داروین و مندل با هم در یک عصر می‌زیستند اما مندل مطالعه در مورد نخود سبز را از سال ۱۸۵۶ شروع کرد، این مطالعه تا اوایل قرن بیستم در انگلستان معروف نبود.[۱] بنابراین والاس و داروین از بنیادهای ارثی فرگشت که امروزه در نظریه‌های نوداروینی‌ها امری بدیهی است، چندان مطلع نبودند.

علاوه بر رشد و پیشرفت علم ژنتیک عامل دیگری که به فهم مکانیسم‌های زمینه‌ای فرگشت یاری رساند، کتاب حیات چیست؟اروین شرودینگر فیزیکدان بود که در سال ۱۹۴۴ منتشر شد. شرودینگر در این کتاب ۱۰۰ صفحه‌ای گفت که به نظر او جنبه اصلی تکامل عبارت است از وراثت با واسطه مواد شیمیایی که از راه کُدهای نهفته در مواد شبه کریستال انتقال می‌یابد. او با ذکر این نکته در واقع کشف ساختار DNA و بیولوژی مولکولی را که در اوایل دهه ۶۰ امکان‌پذیر شد، پیش‌بینی کرد. شرودینگر می‌گفت اساس انتخاب طبیعی بروز تغییرهای ارثی «جهشی» یا موتاسیون در مولکول‌هاست که جاده را برای انتخاب طبیعی صاف می‌کند. فیزیکدان آلمانی ماکس دلبروک مفهوم دقیق‌تری از ژن‌ها و توانایی آن‌ها برای موتاسیون ارائه داد و نقش مهمی در راه‌اندازی انقلاب در عرصه ژنتیک مولکولی ایفا کرد.[۲] دلبروک در تابستان سال ۱۹۴۵ درباره باکتریوفاژها یا ویروس‌هایی که به باکتری‌ها حمله می‌کنند در کلد اسپرینگ هاربر لانگ آیلند دوره‌ای آموزشی برگزار کرد که بسیاری از پیشگامان بیولوژی مولکولی مانند سالوادور لوریا و آلفرد هرشی در آن شرکت کردند.[۳]

بیولوژی مولکولی نمی‌تواند به همه سوآل‌های مربوط به انتخاب طبیعی یا عامل پیشبرنده فرگشت جواب دهد. مثلا توجیه نوع‌دوستی، پدیده‌ای که

---

۱. برعکس داروین که از کار مندل اطلاعی نداشت، مندل ترجمه آلمانی خاستگاه گونه‌ها را در سال ۱۸۶۳ خوانده بود.

۲. او یک تقلیل گرای قاطع بود و ایده عدم قطعیت کوانتومی را قبول نداشت و معتقد بود که ما از حیث آماری ماشین‌هایی جبری هستیم.

۳. دلبروک، هرشی و لوریا در سال ۱۹۶۹ جایزه فیزیولوژی طب را برای مطالعه در زمینه ژنتیک مولکولی گرفتند.

در حشرات مثال‌های خوبی از آن می‌توان یافت با مطالعه ژنتیک امکان‌پذیر نیست. هر کسی که مختصری با زندگی مورچه‌ها، زنبورهای عسل و زنبورهای معمولی و موریانه‌ها آشنا باشد، این پدیده را می‌شناسد. بسیاری از این گونه‌های حشرات در کلونی‌هایی با یک ملکه و جمعی از کارگران عقیم که شایستگی آن‌ها برای باروری به قول داروین صفر است به سر می‌برند. لذا بیشتر اعضای این انواع حشرات که در زمره شایع‌ترین گونه‌های روی زمین هستند حداقل با تعاریف مرسوم به طور انفرادی دارای صلاحیت تولید مثل نیستند. داروین که علاقه‌اش به زیست‌شناسی با مطالعه سوسک‌ها آغاز شد از این موضوع به خوبی آگاه بود و آن را یکی از دشواری‌های خاص نظریه خود می‌دانست. این معما با نظریه انتخاب خویشاوندی ویلیام هامیلتون در سال ۱۹۶۴ حل شد. این نظریه می‌گوید از دست رفتن یک فرصت تولید مثلی در عین حال اگر ژن‌های نوع‌دوستی به دنبال رفتار ایثارگرانه توسط خویشاوندان انتقال یابند، می‌تواند برای گونه سازگارانه باشد.

یکی از بحث‌های همیشگی درباره مکانیسم تکامل داروینی مربوط به «هدف» انتخاب طبیعی است. ریچارد داکینز ــ که در کنار جان هالدن، پیتر مداوار و استفن. جی. گولد یکی از بهترین نویسندگان مردم پسند قلمرو بیولوژی مدرن است می‌گوید هدف خود «ژن» است. این ایده می‌گوید جانداران یا ارگانیسم‌ها حامل ژن‌های خاصی هستند که او آن‌ها را ژن‌های خودخواه می‌نامد. از این دیدگاه فنوتیپ‌ها از جمله «ابزارهایی» که بسیاری از جانداران به وجود می‌آورند (مانند پیله پروانه یا تور عنکبوت یا چوبی که میمون‌ها برای شکار موریانه از آن استفاده می‌کنند یا ابزارهای انسانی) همه راه‌هایی برای تقویت یک ژن خاص هستند. با وجود سادگی این ایده هنوز بسیاری از زیست‌شناسان پیرو ایده داروین هستند که می‌گفت انتخاب طبیعی می‌تواند با واسطه هر فنوتیپی به وجود آید. بد نیست کتاب «تبیین‌های ژنتیک: معنادار و بی‌معنا)» را مطالعه کنید تا بدانید که بسیاری از مسائل ژنتیک مورد مناقشه هستند و جای بحث دارند. مثلا یکی از مسائل مهم ژنتیک کنونی آن است که کسی نمی‌داند تعریف دقیق ژن چیست. چیزی که ژنوتیپ و فنوتیپ را به هم مربوط می‌کند ناشناخته است و همیشه نمی‌توانیم بیماری‌های انسان را به ژن خاصی نسبت دهیم. با همه

این‌ها فرگشت و مکانیسم‌های آن شاید بتوانند روشن کنند که چرا سرانجام تعدادی از جانداران صاحب سیستم عصبی شدند.

پایان‌شناسی[۱]

شاید جالب‌ترین سوآلی که تاکنون در این زمینه مطرح شده این باشد که آیا تکامل حیات از راه انتخاب طبیعی «هدف» یا حتی جهت مشخصی دارد؟ پاسخ استفن. جی. گولد (یکی از زیست‌شناسانی که در این باره مطالعه کرد) به این سوآل منفی بود. می‌دانیم که مسیر تکامل در چند میلیارد سال گذشته نشان‌دهنده افزایش پیچیدگی جانداران است. بنابراین حداقل به این معنا، تکامل جانداران دارای «جهت» است. اما احتمالا گرایش به پیچیدگی ناشی از حضور جانداران در جاهای متنوع‌تر و لزوم تخصصی‌تر شدن بود.[۲] گولد با وجود این هدف روشن همچنان معتقد بود که افزایش پیچیدگی در مورد هر فنوتیپ خاص روندی کور است، بگذریم از افزایش پیچیدگی جاندارانی که کُنام یا نیش‌های گوناگونی را اشغال می‌کنند. به نظر او اگر بساط زندگی را جمع می‌کردند و همه چیز از نو شروع می‌شد احتمالا گونه‌های متفاوتی روی زمین به وجود می‌آمدند.

این ایده بر استدلالی استوار است که گولد و همکارش نیلز الدریج در دهه ۱۹۷۰ عنوان کردند. آن‌ها پیشنهاد دادند که فرگشت چنانکه داروین می‌گفت مجموعه‌ای از تغییرهای کوچک نیست، بلکه مشخصه آن دوره‌های طولانی ایستایی و ثبات همراه با تغییرهای ناگهانی است. آن‌ها برای تأیید نظریه خود به شواهد تجربی فسیل بی‌مهرگان متوسل شدند. ایده فرگشت از راه «تعادل نقطه‌ای» (punctuated equilibrium) اگرچه در اصل نوعی اصلاح و بازسازی نظریه نو داروینی است (مثلا در مورد اینکه سرعت تغییرهای فرگشتی در دوره‌های مختلف یکی نیستند و اینکه بسیاری از شواهد فسیلی تکامل هنوز

۱. teleology: فرجام‌شناسی، اعتقاد به تقدیر هم گفته می‌شود.
۲. اینک در تمام نقاط غیرآبی سیاره زمین این نکته صدق می‌کند.

یافت نشده‌اند) بحث‌های مفصل و گاهی تندی را برانگیخته است.[۱]

احتمال دارد با کشف حیات در دیگر سیاره‌های منظومه شمسی یا اقمار آن‌ها و حتی یافتن حیات در ورای منظومه شمسی شواهد بیشتری برای روشن کردن این مباحث به دست آوریم.

نتیجه

در این فصل به طور خلاصه شرحی از تاریخ حیات را مرور کردیم. این فصل مقدمه است برای پرسیدن سوآلی اساسی: وجود مغز یا به طور دقیق‌تر سیستم عصبی در تاریخ حیات چه جایگاهی دارد؟

۱. یکی از یافته‌های اخیر که ایده تعادل نقطه‌ای را تضعیف می‌کند آن است که ئی کولای با زندگی در یک محیط طی ۶۰۰۰۰ سال فقط مختصری پیشرفت می‌کند. بنابراین چیزی که ایستایی یا ثبات طولانی به نظر می‌رسد شاید فقط کندی تغییر پیوسته باشد.

۲
ارگانیسم‌های بدون سیستم عصبی

مقدمه

طبق برآورد کنونی قلمرو حیات روی زمین مشتمل بر حداقل ۸/۷ میلیون گونه یوکاریوت (تک‌یاختگان، قارچ‌ها، گیاهان و حیوانات) و بسیاری از گونه‌های پروکاریوت (یوباکتریا و آراکی باکتریا) است. این اعداد کلی و پیوسته در حال تغییر هستند. وجود ابهام در این اعداد قابل درک است، چون هر روز گونه‌های جدیدی کشف و تعدادی از گونه‌های موجود نابود می‌شوند و همواره چنین بوده است. علاوه بر این «گونه» معنای روشن و سرراستی ندارد. تعریف کتابی گونه زیستی عبارت است از «جمعیت منفردی از ارگانیسم‌های دارای قابلیت تکثیر.» این تعریف شاید برای فرق گذاشتن سگ‌ها و گربه‌ها از هم خوب باشد، اما برای فرق گذاشتن باکتری‌ها و سایر ارگانیسم‌هایی که از راه تقسیم سلولی تکثیر می‌یابند یا ارگانیسم‌هایی که مواد ژنتیکی را مبادله می‌کنند کافی نباشد.[۱] از طرفی این تعریف در مورد گیاهان و جانوران هیبرید نیز نارساست. به هر حال بر کنار از تعداد، بیشتر گونه‌های موجود در گذشته و حال فاقد سیستم عصبی بودند و هستند. بنابراین قبل از اینکه بپرسیم سیستم عصبی چه کارکرد یا کارکردهایی در زیست‌شناسی جانوری دارد باید بپرسیم ارگانیسم‌های بدون سیستم عصبی چگونه می‌توانند کارهای خود را به راحتی انجام دهند و زندگی کنند.

باکتری‌ها

چنانکه گفتیم دو فرمانروی باکتری‌ها (یوباکتریا و آراکی باکتریا) اشکال عمده و موفقی از حیات به شمار می‌آیند. اینها نخستین اشکال حیات بودند که بر زمین

۱. تعریف گونه در میان باکتری‌ها بسیار پیچیده است. چون بسیاری از باکتری‌ها مواد ژنتیک را طی فرایند کنژوگاسیون (هم یوغی) انتقال می‌دهند.

پدیدار شدند. باکتری‌ها مثل همه ارگانیسم‌ها برای تحقق رویدادهای زیستی از جمله بقاء و باروری به انرژی نیاز دارند. بسته به گونه مورد نظر، انرژی می‌تواند نور، گرما یا انرژی حاصل از واکنش‌های شیمیایی باشد. باکتری‌ها با کاربرد بهینه قوانین متابولیسم گیاهی و جانوری بیشتر کُنام‌های اکولوژیک زمین را اشغال کرده‌اند، حتی کُنام‌های بسیار پرخطر. مثلا باکتری‌های کیمولیتوتروف در حفره‌های عمقی اقیانوس‌ها که فاقد نور بوده و دما و فشار زیاد و شرایط مناسب برای فعالیت‌های شیمیایی را دارند به سر می‌برند. این باکتری‌ها انرژی را با اکسیداسیون کانی‌های غیر آلی و سایر ترکیبات‌دهنده الکترون تأمین می‌کنند.[۱] برخی از باکتری‌ها کیلومترها زیر زمین زندگی می‌کنند و انرژی مورد نیاز خود را از گرمای رادیواکتیو به دست می‌آورند. گونه‌هایی از باکتری‌ها نیز وجود دارند که در شرایط اسیدی، قلیایی و شوری افراطی زندگی می‌کنند، شرایطی که تقریبا مانع وجود هر گونه حیات می‌شوند.

باکتری‌ها با تنوع بسیاری که دارند مثل همه ارگانیسم‌ها نیاز به کسب اطلاعات درباره منابع انرژی موجود در محیط دارند که این کار با کمک حسگرها یا برخی از روش‌های پاسخ به اطلاعات محیطی یا رفتارهای دیگر انجام می‌شود.[۲] چگونه باکتری‌ها بدون داشتن سیستم عصبی یا سازوکارهای پیچیده فراملکولی این کارهای دشوار را انجام می‌دهند؟

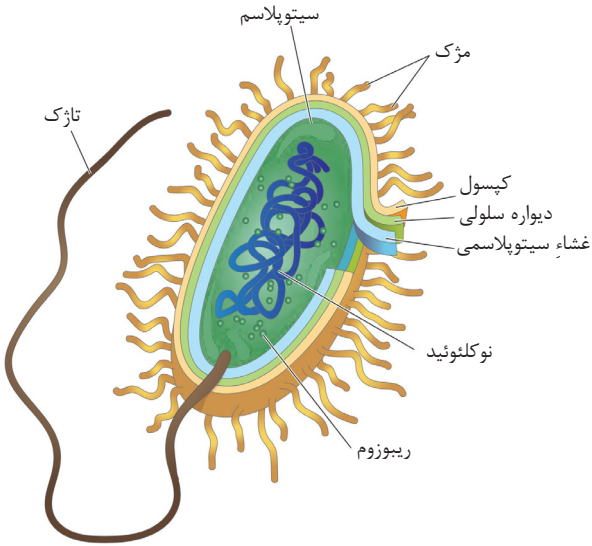
باکتری‌ها را با توجه به نقش آن‌ها در ایجاد بیماری‌های انسانی و حیوانی بسیار مطالعه کرده‌اند، از جمله نوعی باکتری که در روده انسان زندگی می‌کند به نام ئی. کولای.[۳] (شکل ۱.۲) آشکارترین رفتار این سلول میله‌ای شکل حرکت آن است که توسط تاژکی که در یک انتهای آن قرار دارد به وجود

---

۱. برخی از جانوران بزرگ مانند کرم‌ها و دیگر گونه‌های عجیب که در مجاورت چاه‌های گرمابی کف اقیانوس‌ها زندگی می‌کنند نیز کیمولیتوتروف هستند.

۲. رفتار واژه فریبنده‌ای است. گاهی آن را مترادف پاسخ‌های حرکتی می‌دانند، اما رفتار می‌تواند به هر نوع پاسخ در برابر محرک اطلاق شود. این پاسخ‌ها حتی در مورد ارگانیسم‌های ساده‌ای مانند باکتری‌ها دارای تنوع بسیارند. در انسان‌ها و بسیاری از دیگر جانوران پاسخ به محرک‌ها عبارتند از ادراک، توجه، هیجان، حافظه، تفکر، هومئوستاز و غیره.

۳. ئی. کولای متعلق به گونه اشریشیا از خانواده آنتروباکتریا و راسته آنتروباکتریاسه و رده گاماپروتئوباکتریا و شاخه پرتئوباکتریا در فرمانروی باکتری‌هاست. خوشمان بیاید یا نه این روش معرفی یک ارگانیسم یا گروهی از ارگانیسم‌ها در علم رده‌بندی یا آرایه‌شناسی است.



۱.۲ باکتری‌های علاوه بر دارا بودن اندامک‌های درون سلولی مانند ریبوزوم که مسئول ساخت پروتئین در همه سلول‌ها هستند کرموزوم منفردی نیز دارند که حالتی حلقوی و درهم پیچیده به نام نوکلئوئید دارد (باکتری‌ها مثل همه پروکاریوت‌ها فاقد هسته‌اند، هسته مشخصه ارگانیسم‌های یوکاریوت است). گیرنده‌های مولکولی غشاء سیتوپلاسمی محرکی به وجود می‌اورند که تاژک در پاسخ به آن به حرکت در می‌آید و با چرخیدن خود نیروی حرکتی باکتری را تأمین می‌کند. زوائد دیگر نیز در سطح باکتری موسوم به مژک وجود دارند که در مکانیسم هم یوغی یا کنژوگاسیون (فرایندی که طی آن باکتری‌ها به هم متصل می‌شوند و تعدادی از ژن‌ها را در بسته‌هایی به نام پلاسمید بین خود جابجا می‌کنند) به کار گرفته می‌شوند. بر خلاف کنژوگاسیون در فرایند تقسیم سلولی کل ژنوم باکتری همانندسازی می‌کند.

می‌آید. این تاژک در پاسخ به گرادیان‌های موضعی شیمیایی مانند آمینواسید، قند، اکسیژن و دی‌اکسید کربن در جهت عقربه ساعت به گردش در می‌آید و موجب حرکت باکتری می‌شود.[۱] هر دور از این حرکت که شبیه حرکات یک شناگر است حدود یک ثانیه طول می‌کشد و در حد فاصل آن‌ها تاژک در خلاف جهت عقربه‌های ساعت به حرکت در می‌آید و رشته گره خورده باز می‌شود، در چنین لحظاتی باکتری کم و بیش بی‌هدف و سرگردان باقی می‌ماند. برایند

۱. ئی. کولای یک بیهوازی اختیاری است. یعنی می‌تواند بسته به شرایط محیطی از متابولیسم اکسیداتیو و متابولیسم بیهوازی (مثلا تخمیر) استفاده کند.

کلی حرکت در یک مسیر خاص، مثلا حرکت به طرف یک ماده غذایی از مجموع این «ایست و حرکت»ها به دست می‌آید.

باکتری‌ها برای حرکت به طرف گرادیان‌های سودمند و دوری از گرادیان‌های زیان بار به حسگرهای سطحی که غلظت مولکول‌های غذا یا مواد بالقوه زیان‌بار مانند آنتی‌بیوتیک‌ها، یون‌های هیدروژن (خاصیت اسیدی)، و یون‌های هیدروکسیل (خاصیت قلیایی) و غیره را درک می‌کنند، وابسته هستند. باکتری‌ها بسته به گونه‌ای که به آن تعلق دارند می‌توانند نسبت به نور، گرما، نیروهای مکانیکی و حمله باکتریوفاژها پاسخ دهند. در میان حسگرها بیش از همه با حسگرهای شیمیایی آشنا هستیم که از جنس پروتئین هستند و از غشاء سلولی باکتری به طرف محیط امتداد دارند. تعیین چگونگی ارتباط بین ورودی حسی و خروجی مؤثر مانند چرخش تاژک‌ها، بخشی از مطالعه میکروب‌هاست که با کمک آن گروهی از راه‌های انتقال پیام داخل سلول را (که مشابه و نه چندان پیچیده‌تر از سایر راه‌های ارسال پیام در مورد سایر سلول‌ها هستند) شناسایی کرده‌اند. برخی از باکتری‌ها حتی از تغییرات ولتاژ برای امکان‌پذیر ساختن همکاری بین گروه‌های مختلف باکتری استفاده می‌کنند.[۱]

این کار به نحو حیرت آوری دقیق و ظریف و شبیه کاری است که سلول‌های یوکاریوت پیچیده‌تر نیز انجام می‌دهند. حتی در این سطح «بدوی» ورودی‌های محیط اطراف از راه ایجاد ارتباط بین علت و معلول‌های فیزیکی و شیمیایی منجر به بروز خروجی‌ها یا رفتارهای مفید می‌شوند. این ارتباط‌ها با گذشت زمان می‌توانند از راه انتخاب طبیعی تغییر یابند، امری که در عمل اتفاق می‌افتد. با توجه به سرعت تکثیر باکتری‌ها، زمان تکثیر بسیار کوتاه است. در شرایط مناسب یک گروه باکتری می‌تواند ظرف ۳۰ دقیقه یا کمتر دو برابر شود. این امر روند تکامل را سریع می‌کند و مثلا به ظهور سوش‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک می‌انجامد که از معضلات طب امروز است.

باکتری همچنین می‌تواند از راه تجربه مطالبی بیاموزد و اطلاعات مربوط را ذخیره کند و نوعی حافظه بسازد که روش شناخته شده جانوران دارای سیستم

---

۱. پریندل و همکاران. مجله نیچر. کانال‌های یونی امکان ارتباط الکتریکی را بین گروه‌های مختلف باکتری فراهم می‌کنند.