

شناسنامه

The Feynman Lectures on Physics, Vol. 1, Ch. 36

درسنامه‌های فیزیک فاینمن، جلد ۱، فصل ۳۶

مترجم: علی قبله

ویراستار: زهره رشنودی

حروفچین: علیرضا رضوی

نسخه‌ی ۱۰۰ بهار ۱۴۰۱

حلقه‌ی مترجمان ژرفا

این اثر با کسب مجوز از ناشر بین‌المللی به منظور انتشار رایگان نسخه‌ی الکترونیکی آن تهیه شده است و حق نشر آن برای انجمن علمی ژرفا مستقر در دانشگاه صنعتی شریف محفوظ می‌باشد. ایرادات این نسخه را با ما در میان بگذارید و در پیشبرد این پروژه‌ی عام‌المنفعه مشارکت کنید. برای دریافت ترجمه‌ی دیگر فصل‌های این کتاب به وبسایت ژرفا مراجعه کنید.

www.Zharfa90.ir

این صفحه از قصد خالی گذاشته شده است.

فصل ۳۶

سازوکار بینایی^۱

۱.۳۶ احساس رنگ

درباره حس بینایی، باید به این موضوع دقت شود که (بیرون از یک نمایشگاه هنر مدرن!) هیچکس، لکه‌های رنگ و نقاط نورانی را نمی‌بیند که به تصادف به هر سو پاشیده شده باشند. هنگامی که به یک جسم می‌نگریم، یک مرد یا یک شیء را می‌بینیم، در واقع این مغز ماست که چیزی که می‌بینیم را درک می‌کند. اینکه چگونه این کار را می‌کند، برای هیچکس مشخص نیست؛ اما می‌دانیم که این کار از پیچیدگی زیادی برخوردار است. بدون شک ما پس از تکرار و تجربه درک خواهیم کرد که شکل یک مرد چگونه است؛ اما ویژگی‌های بینایی بسیار ساده‌تری وجود دارند که شامل تلفیق اطلاعات، از جنبه‌های مختلف چیزی هستند که ما می‌بینیم. برای اینکه مشخص شود چگونه یک تصویر را درک می‌کنیم بهتر است مراحل اولیه جمع‌آوری اطلاعات توسط سلول‌های بینایی را بررسی کنیم. در این بخش بر این جنبه از بینایی تمرکز شده است؛ اما، به یک سری از مسائل جانبی نیز در ادامه خواهیم پرداخت.

یک مثال ساده و خوب درباره این موضوع که چشم در آن واحد، بدون دخالت میل یا توان یادگیری ما، به جمع‌آوری اطلاعات از بخش‌های مختلف می‌پردازد، دیدن سایه آبی‌ای است که خود از نور سفیدی تشکیل شده که همزمان با نوری قرمز بر یک صفحه تابیده می‌شود. این اثر باعث می‌شود فکر کنیم که پس‌زمینه صفحه، به رنگ صورتی است در حالی که وقتی به سایه آبی نگاه می‌کردیم، این تنها نور سفید بود که به نقطه‌ای خاص در چشم می‌رسید و این نشان می‌دهد که جایی تکه‌های مختلف اطلاعات در حال تلفیق هستند. هرچقدر که مفهومی آشناتر و کامل‌تر باشد، چشم بیشتر برای رفع بی‌قاعدگی‌های آن تلاش می‌کند. در واقع، لند نشان داده است که اگر آن آبی و قرمز دیده‌شده را به نسبت‌های مختلف ترکیب کنیم، با استفاده از دو شفافیت تصویری با امکان جذب نورهای قرمز و سفید در مقادیر مختلف، می‌توان یک صحنه واقعی را نشان داد که دارای اجسام واقعی

^۱ Mechanisms of Seeing



شکل ۱۰۳۶: هنگامی که دیسک بالا می‌چرخد، رنگ تنها در یکی از دو حلقه تاریک دیده می‌شود. حال اگر جهت چرخش برعکس شود، رنگ در حلقه دیگر قابل مشاهده است.

است. در این مورد رنگ‌های میانی واضحی نیز خواهیم داشت مشابه آن چیزی که از ترکیب قرمز و سبز-آبی به دست می‌آیند. به نظر می‌آید که یک مجموعه کامل از رنگ‌ها هستند؛ ولی با بررسی دقیق مشخص می‌شود که این طور نیست. اینکه چه طیف گسترده‌ای از رنگ‌ها فقط از ترکیب سفید و قرمز به دست می‌آید شگفت‌آور است؛ اما هرچه این صحنه واقعی‌تر به نظر بیاید، بهتر می‌توان فهمید که همه این نور در واقع چیزی نیست جز همان رنگ صورتی.

یک مثال دیگر نمایش «رنگ‌ها» در یک دیسک چرخان سیاه و سفید است که نواحی سیاه و سفید آن در شکل (۱۰۳۶) نشان داده شده است. هنگامی که دیسک چرخانده می‌شود تغییر و تناوب روشنی و تاریکی برای هر شعاع مشخص، یکسان است؛ تنها پس‌زمینه است که برای این نوارهای سیاه و سفید فرق می‌کند؛ با این حال در هنگام چرخش، یکی از حلقه‌ها به یک رنگ درمی‌آید و آن یکی به رنگی دیگر^۲. هیچ‌کسی دلیل مشاهده این رنگ‌ها را نمی‌داند؛ اما به احتمال زیاد به این دلیل است که اطلاعات در سطحی بسیار ابتدایی در خود چشم با هم ترکیب می‌شوند.

تقریباً تمامی نظریه‌های موجود درباره دیدن رنگ بر این باورند که ایده ترکیب رنگ نشان از این دارد که چشم فقط سه رنگ را در سلول‌های مخروطی در اختیار دارد. و در واقع جذب توسط این سه رنگ است که حس دیدن رنگ را به وجود می‌آورد. ولی حس کلی که به خاصیت جذب این سه رنگ در کنار یکدیگر مربوط است لزوماً ترکیب حس‌های جداگانه نیست. همه ما بر سر این موضوع توافق داریم که زرد، سبز مایل به قرمز نیست، در واقع، شاید تعجب کنید اگر به شما گفته شود که نور از ترکیب چندین رنگ ایجاد می‌شود، به دلیل اینکه این طور تلقی می‌شود که حس کردن نور پدیده‌ای متفاوت از زدن چند نوت موسیقی به طور همزمان است که اگر به آن با دقت گوش بدهید می‌توانید هرکدام را جداگانه درک کنید. ما نمی‌توانیم با دقت بنگریم تا سبز یا قرمز نور را به شکلی مجزا ببینیم.

^۲اینکه چه رنگی ظاهر شود بستگی به سرعت چرخش و مقدار نور دارد و تا حدی هم به این وابسته است که چه کسی و با چه دقتی به آنها نگاه می‌کند.

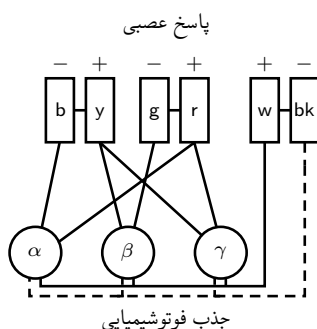
نظریه‌های ابتدایی دربارهٔ بینایی حاکی از آن هستند که سه نوع رنگدانه و سه نوع سلول مخروطی در چشم وجود دارد که هرکدام از این سلول‌ها دارای یک رنگدانه هستند. از هر سلول یک عصب به سمت مغز می‌رود، پس با احتساب وجود سه سلول مخروطی، سه بخش اطلاعاتی به سمت مغز هدایت می‌شود و آنجا همه چیز رخ می‌دهد. واضح است که این نظریه کامل نیست و کمک چندانی به کشف اطلاعاتی که از طریق اعصاب بینایی به سمت مغز می‌روند، نمی‌کند؛ چراکه ما هنوز شروع به حل مشکل نکرده‌ایم. بایستی سؤال‌های ساده‌تری بپرسیم: آیا تفاوتی می‌کند که اطلاعات کجا جمع شوند؟ آیا مهم است که این اطلاعات توسط اعصاب بینایی مستقیم به سمت مغز هدایت شود یا شبکه می‌تواند خودش بخشی از اطلاعات را تحلیل کند؟ ما تصویری از شبکه دیدیم که بسیار پیچیده و دارای اتصالات داخلی بسیاری بود، (شکل ۲۰۳۵) و طبق آن شاید بتوان گفت که شبکه برخی از تحلیل‌ها را خودش انجام می‌دهد.

در واقع افرادی که دربارهٔ آناتومی و تکامل چشم مطالعه می‌کنند، نشان داده‌اند که شبکه چشم در حقیقت همان مغز است: در تکامل جنین، قطعه‌ای از مغز در جلوی سر بیرون می‌آید و الیاف بلند به عقب رشد می‌کنند و چشم‌ها را به مغز متصل می‌کند. شبکه همانند مغز، سازماندهی شده است. به عبارت دیگر می‌توان به زیبایی گفت: «مغز راهی برای نگاه کردن به جهان گشوده است.» چشم یک تکه از مغز است که نور را لمس می‌کند. بنابراین، اصلاً بعید نیست که برخی تحلیل‌های رنگ در شبکه انجام شود.

این به ما فرصت بسیار جالبی می‌دهد. هیچ‌یک از حواس دیگر ما دارای چنین سطحی از محاسبه نیستند. پس می‌توان گفت که قبل از آنکه سیگنال به عصب برود، محاسباتی روی آن انجام می‌شود. محاسبات برای بقیه حواس معمولاً در خود مغز اتفاق می‌افتد، در اینجا مشخص کردن مکانی خاص برای رخ دادن محاسبات بسیار دشوار است؛ چراکه اتصالات بسیار زیادی میان عصب‌ها وجود دارد. در اینجا، برای حس بینایی؛ نور و سه لایه سلول در حال انجام محاسبات و نتایج محاسباتی را داریم که از طریق عصب بینایی منتقل می‌شوند. بنابراین اولین جایی که شانس آن را داریم که فیزیولوژی فرایند را مشاهده کنیم، لایه‌های نخستین مغز است که در حال انجام کار خود در مراحل اولیه هستند. پس علاقه ما در این موضوع صرفاً به خاطر مسئله دیدن به تنهایی نیست بلکه دربارهٔ فیزیولوژی کل مسئله است.

این واقعیت که سه رنگدانه وجود دارد به این معنا نیست که باید سه نوع احساس مختلف وجود داشته باشد. یکی از دیگر نظریه‌های دید رنگی آن است که واقعاً طرح‌های رنگ مخالف وجود دارد (شکل ۲۰۳۶)؛ به گونه‌ای که، یکی از رشته‌های عصبی بازخوردهای بسیاری از دیده شدن رنگ زرد را حمل می‌کند و بازخوردهای کمتری را برای آبی و یکی دیگر از رشته‌های عصبی به همین نحو حامل اطلاعات سبز و قرمز است و دیگری، سفید و سیاه. به عبارت دیگر، در این نظریه دربارهٔ سیستم سیم‌کشی به مثابه روش محاسبات، حدس‌هایی وجود دارد.

مسائلی که ما سعی داریم با حدس زدن دربارهٔ محاسبات اولیه، آنها را حل کنیم، سؤال‌هایی هستند در مورد رنگ‌هایی که در پس‌زمینه صورتی دیده می‌شوند: زمانی که چشم با رنگ‌های مختلف سازگار می‌شود یا در هنگام بروز آنچه پدیده‌های روانی نامیده می‌شود، در واقع چه اتفاقی می‌افتد؟ پدیده‌های روانی بخشی از طبیعت هستند، برای مثال، در سفید نشانی از «حس» قرمز و زرد و آبی نیست، و این نظریه‌ای پیشرو بوده است،



$$\begin{aligned}
 y - b &= k_1(\beta + \gamma - 2\alpha) \\
 r - g &= k_2(\alpha + \gamma - 2\beta) \\
 w - bk &= k_3(\alpha + \gamma + \beta) - k_4(\alpha + \beta + \gamma)
 \end{aligned}$$

شکل ۲۰۳۶: اتصالات عصبی بنابر یک نظریه دیگر بینایی رنگی.

زیرا روان‌شناسان می‌گویند که چهار رنگ آشکار وجود دارد. رنگ‌های خالص: «چهار محرک وجود دارد که ظرفیت قابل توجهی برای برانگیختن دارند که به ترتیب رنگ‌های آبی، زرد، سبز و قرمز هستند. برخلاف رنگ‌های خردلی، سرخابی، بنفش و بیشتر رنگ‌های قابل تشخیص دیگر، این رنگ‌های خالص هیچ‌کدام ماهیت دیگری را نمی‌پذیرند و مخلوط نشده‌اند؛ یعنی رنگ آبی، مایل به زرد، مایل به قرمز یا مایل به سبز نیست، و دربارهٔ بقیهٔ رنگ‌های این طبقه نیز وضع به همین گونه است؛ اینها از نظر روان‌شناسی رنگ‌های اولیه هستند.» و این یک واقعیت روان‌شناختی است. برای آنکه دریابیم که این واقعیت روان‌شناختی چگونه به دست آمده است باید تمام مطالعات گذشته را مرور کنیم: در تحقیقات جدید همهٔ آنچه در مورد این موضوع پیدا می‌شود، تکرار همان چیزی است که روان‌شناس آلمانی با استناد به لئوناردو داوینچی بیان کرده است و البته همهٔ ما اعتراف می‌کنیم که داوینچی هنرمند بزرگی بوده است. این روان‌شناس آلمانی می‌گوید: «لئوناردو فکر می‌کرد پنج رنگ وجود دارد.» و در جست‌وجویی دیگر در یک کتاب قدیمی‌تر، شواهدی برای این موضوع می‌یابیم. در این کتاب چیزی شبیه این آمده است: «بنفش آبی مایل به قرمز است، نارنجی زرد مایل به قرمز است؛ اما آیا می‌توان گفت که قرمز هم نارنجی مایل به بنفش است؟ آیا قرمز و زرد خالص‌تر از بنفش و نارنجی نیستند؟ وقتی از مردم خواسته می‌شود که بگویند کدام رنگ‌ها خالص هستند، بیشتر آنها قرمز، زرد و آبی را نام می‌برند و برخی هم سبز را اضافه می‌کنند. روان‌شناسان عادت دارند که این چهار رنگ را به عنوان رنگ‌هایی متمایز بپذیرند.» بنابراین، وضعیت در تحلیل روان‌شناسی این موضوع این‌گونه است: اگر همه بگویند سه رنگ وجود دارد؛ اما برخی باور داشته باشند که چهار رنگ وجود دارد پس چهار رنگ وجود خواهد داشت. از همین رو تحقیقات روان‌شناسی پیچیده به نظر می‌آید. واضح است که ما چنین احساساتی داریم، و به دست آوردن اطلاعات بیشتر دربارهٔ آنها به کمک روان‌شناسی به نظر بسیار دشوار است.

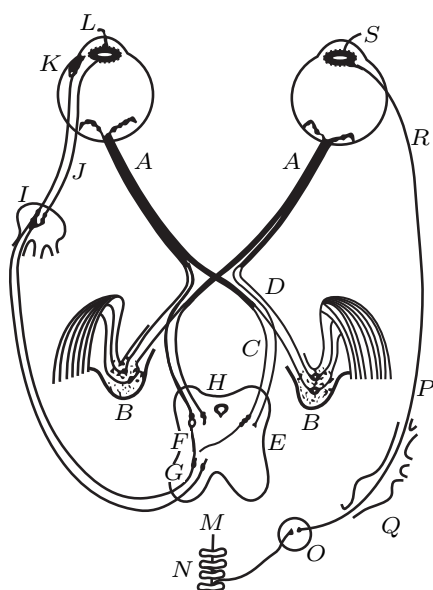
بنابراین، باید به جنبه‌های فیزیولوژی مسئله بپردازیم تا به تجربه آنچه در واقع در مغز، چشم، شبکه یا هر

کجای دیگری اتفاق می‌افتد دریابیم و شاید کشف کنیم که برخی از ترکیبات تکانه‌ها در سلول‌های مختلف در امتداد الیاف عصبی خاصی حرکت می‌کنند. اتفاقاً رنگدانه‌های اولیه لازم نیست که در سلول‌های جداگانه‌ای باشند. می‌توان سلول‌هایی داشت که در آنها مخلوطی از رنگدانه‌های مختلف، سلول‌هایی با رنگدانه‌های قرمز و سبز یا سلول‌هایی با هر سه رنگ (که ترکیب اطلاعات هر سه آنها سفید خواهد بود) و دیگر حالت‌های ممکن داشت. روش‌های زیادی برای شبکه‌بندی سیستم وجود دارد، و ما باید دریابیم که طبیعت از چه روشی استفاده کرده است. در نهایت می‌توان امیدوار بود که وقتی پیوندهای فیزیولوژیکی را درک کنیم، از برخی از جنبه‌های روان‌شناسی آن هم درک کمی پیدا خواهیم کرد. بنابراین، ما با این هدف به مطالعه این فرایند ادامه می‌دهیم.

۲۰۳۶ فیزیولوژی چشم

می‌خواهیم در مورد دیدن رنگ و همچنین بینایی به‌طور کلی، صحبت کنیم تا اتصالات درونی شبکه، که در شکل ۲۰۳۵ نشان داده شده است را به‌یاد آوریم. شبکه واقعاً مانند سطح مغز است. اگرچه تصویر واقعی زیر میکروسکوپ به‌نظر کمی پیچیده‌تر از این نقاشی‌ای است که در اینجا کشیده شده است. با تجزیه و تحلیلی دقیق می‌توان همه این اتصالات درونی را مشاهده کرد. شکی نیست که یک قسمت از سطح شبکه به قسمت‌های دیگر متصل شده است و اطلاعاتی که در آکسون‌های طولانی به‌وجود می‌آید و عصب بینایی را تولید می‌کند، در واقع ترکیبی از اطلاعات بسیاری از سلول‌های مختلف است. سه لایه سلول پشت‌سرهم برای عملکرد چشم وجود دارد: اول سلول‌های شبکه وجود دارند که نور روی آنها تأثیر می‌گذارد، یک سلول واسطه‌ای که اطلاعات را از یک یا چند سلول شبکه می‌گیرد و دوباره آنها را به چندین سلول دیگر در لایه سوم می‌دهد و سلول‌ها اطلاعات را به مغز منتقل می‌کنند. همه‌چیز اتصالات درونی در میان سلول‌های این لایه‌ها وجود دارد.

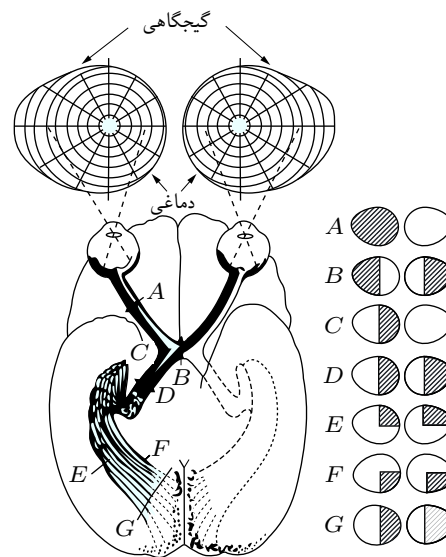
اکنون به برخی از جنبه‌های ساختار و عملکرد چشم می‌پردازیم (به شکل ۱۰۳۵ نگاه کنید). قرنیه نور را متمرکز (کانونی) می‌کند، زیرا دارای سطح خمیده‌ای است که می‌تواند نور را «خم» کند. به همین دلیل است که ما نمی‌توانیم در زیر آب خوب ببینیم، زیرا ضریب شکست برای قرنیه ۳۷/۱ است و برای آب ۳۳/۱. در پشت قرنیه آب وجود دارد که ضریب شکستش طبیعتاً ۳۳/۱ است و در پشت آن یک لنز وجود دارد که ساختارش بسیار جالب است: در واقع مانند یک پیاز، پوششی از لایه‌هاست، جز اینکه همه این لایه‌ها شفاف هستند، و درونش دارای ضریب شکست ۴۰/۱ است و ضریب شکست بیرونش ۳۸/۱ است. (خیلی خوب می‌شد اگر می‌توانستیم یک عدسی بسازیم که امکان تنظیم ضریب شکست در کل آن وجود می‌داشت؛ در این صورت مجبور نبودیم به‌خاطر ثابت بودن ضریب، عدسی را خم کنیم.) به‌علاوه، شکل قرنیه بخشی از یک کره نیست. لنز کره‌ای شکل به میزان مشخصی دارای انحراف کروی است، درحالی‌که قرنیه در بخش بیرونی خود «مسطح‌تر» از یک کره است و دقیقاً در همان‌جا میزان انحراف کروی قرنیه کمتر از لنز کروی است که در آنجا قرار می‌دهیم! سیستم عدسی قرنیه نور را روی شبکه متمرکز می‌کند. وقتی که به نزدیک و دور نگاه می‌کنیم، لنزها به‌ترتیب سفت و سست می‌شوند و طبق فواصل مختلف، فوکوس (تمرکز نور) را تغییر می‌دهند. تنظیم مقدار کل نور را عنبیه بر عهده



شکل ۳۰۳۶: اتصالات عصبی اعمال حرکتی چشم‌ها.

دارد، همان چیزی که رنگ چشم را مشخص می‌کند، آبی یا قهوه‌ای. بسته به افزایش یا کاهش میزان نور، عنبیه به داخل و خارج حرکت می‌کند.

بیابید حالا به سازوکار عصبی کنترل محل قرارگیری لنزها، حرکت چشم، ماهیچه‌هایی که چشم را در جایگاهش قرار می‌دهند و عنبیه، که طرحی از آن در شکل ۳۰۳۶ نشان داده شده است، بپردازیم. بیشتر اطلاعاتی که از عصب بینایی A خارج می‌شود، به یکی از دو بافت عصبی راه می‌یابند (که بعد در مورد آنها صحبت خواهیم کرد) و از آنجا به مغز هدایت می‌شوند. اما در حال حاضر چند عصب مهم وجود دارد، که مستقیماً به قشر بینایی مغز، جایی که تصاویر را می‌بینیم نمی‌روند، بلکه در عوض وارد مغز میانی می‌شوند. اینها اعصابی هستند که میزان نور را اندازه‌گیری و عنبیه را تنظیم می‌کنند یا اگر تصویر مبهم باشد، تلاش می‌کنند تا لنزها را تطبیق دهند یا اگر یک تصویر دوتایی وجود داشته باشد، آنها سعی می‌کنند چشم را برای دید دوچشمی تنظیم کنند. به هر حال، آنها به میانه مغز می‌روند و به چشم بازخورد می‌دهند. عضلاتی در K وجود دارند که محل قرارگیری لنزهاست و در L عضلات دیگری هست که به عنبیه متصل هستند. عنبیه دارای دو سیستم عضلانی است. یکی ماهیچه دایره‌ای L است که وقتی هیجان‌زده می‌شوید، عنبیه را جمع می‌کند و می‌بندد. خیلی سریع عمل می‌کند و اعصاب از طریق آکسون‌های کوتاه مستقیم از مغز به عنبیه متصل می‌شوند. عضلات متضاد عضلات شعاعی هستند، به‌طوری که وقتی همه چیز تاریک می‌شود و عضله مدور شل می‌شود، این عضلات شعاعی بیرون می‌آیند. در اینجا، مانند بسیاری از نقاط بدن، یک جفت ماهیچه که در جهت‌های مخالف کار می‌کنند، وجود دارد و تقریباً در هر حالت سیستم عصبی‌ای که این دو را کنترل می‌کند بسیار ظریف تنظیم شده است به‌طوری که هنگام ارسال سیگنال‌ها برای محکم‌کردن یکی، سیگنال‌ها به‌طور خودکار وارد می‌شوند تا دیگری را سست کنند. عنبیه یک



شکل ۴۰۳۶: اتصالات عصبی از چشم تا کورتکس (لایه بیرونی، قشر بینایی)

استثنای عجیب است: اعصابی که باعث ایجاد انقباض عنبیه می‌شوند، همان‌هایی هستند که قبلاً توضیح دادیم، اما هیچ‌کس دقیقاً نمی‌داند اعصابی که باعث گسترش عنبیه می‌شوند از کجا می‌آیند؛ سیگنالی از نخاع پشت قفسه سینه پایین می‌رود، به قفسه سینه می‌رود، بیرون از نخاع، از طریق گانگلیون گردن بالا می‌آید، و اطراف سر به عقب برگردانده می‌شود تا به انتهای دیگر عنبیه راه یابد. در حقیقت، این سیگنال از یک سیستم عصبی کاملاً متفاوت عبور می‌کند، نه سیستم عصبی مرکزی، بلکه از سیستم عصبی سمپاتیک عبور می‌کند. که روش بسیار عجیبی برای انجام این کار است.

پیش از این به چیز عجیب دیگری در مورد چشم اشاره کردیم و آن اینکه سلول‌های حساس به نور در طرف اشتباه قرار دارند، به‌طوری که نور باید قبل از رسیدن به گیرنده‌هایی که درون آن ساخته شده است چندین لایه سلول دیگر را طی کند! بنابراین، برخی از ویژگی‌های چشم فوق‌العاده و برخی به‌ظاهر احمقانه هستند.

شکل ۴۰۳۶ اتصالات چشم را به بخشی از مغز نشان می‌دهد که مستقیماً مربوط به روند بینایی است. الیاف عصبی نوری در ناحیه خاصی فراتر از D قرار دارند، که ژنیکولات جانبی گفته می‌شود، و از آنجا به قسمتی از مغز که قشر بینایی نامیده می‌شود، خاتمه می‌یابد. توجه کنید که برخی از الیاف از هر چشم به طرف دیگر مغز ارسال می‌شوند، بنابراین، تصویر تشکیل شده ناقص است. اعصاب نوری از سمت چپ چشم راست در سراسر کیاسمای نوری B جریان می‌یابد، در حالی که آنهایی که در سمت چپ چشم چپ وجود دارند، دور هم جمع می‌شوند و به همین روش پیش می‌روند. بنابراین، سمت چپ مغز تمام اطلاعاتی را که از سمت چپ هر چشم، یعنی در سمت راست میدان بینایی حاصل می‌شود، دریافت می‌کند، در حالی که سمت راست مغز سمت چپ میدان بینایی را مشاهده می‌کند. این روشی است که می‌تواند اطلاعات مربوط به هر دو چشم را با هم جمع کند تا بفهماند چقدر

چیزها دور هستند. این سیستم دید دوچشمی است.

اتصالات بین شبکه و قشر بینایی جالب است. اگر نقطه‌ای در شبکه به هر طریقی خراب یا دچار بریدگی شود، تمام عصب از بین می‌رود و از این طریق می‌دانیم که به کجا وصل بوده است. به این ترتیب روشن می‌شود که این اتصالات یک به یک هستند. برای هر نقطه در شبکه یک نقطه در قشر بینایی وجود دارد و نقاطی که در شبکه بسیار نزدیک به هم هستند، در قشر بینایی نیز بسیار نزدیک هم هستند. بنابراین، قشر بینایی هنوز نمایانگر ترتیب مکانی میله‌ها و مخروط‌هاست، اما البته بسیار تحریف شده است. چیزهایی که در مرکز میدان قرار دارند، که بخش بسیار کمی از شبکه را اشغال می‌کنند، بر سطح سلول‌های بسیار زیادی در قشر بینایی گسترده شده است. واضح است که داشتن چیزهایی که در اصل به هم نزدیک هستند، بسیار مفید است. جالب‌ترین جنبه موضوع، با این حال، موارد زیر است. مکانی که به نظر می‌آید نزدیک‌بودن چیزها در کنار هم بسیار مهم باشد، در وسط میدان دید درست است. باور کنید یا نه، خط بالا و پایین در میدان دید ما وقتی به چیزی نگاه می‌کنیم از چنین ماهیتی برخوردار است که اطلاعات از تمام نقاط سمت راست آن خط به سمت چپ مغز می‌رود، و اطلاعات از نقاط در سمت چپ به سمت راست مغز می‌رود، و نحوه ساخت این ناحیه، برشی درست از وسط است، به‌طوری که چیزهایی که خیلی نزدیک به هم در وسط قرار دارند بسیار در مغز از هم دور هستند! به‌نوعی اطلاعات باید از طریق برخی کانال‌های دیگر از یک طرف مغز به طرف دیگر بروند، که بسیار جای تعجب دارد.

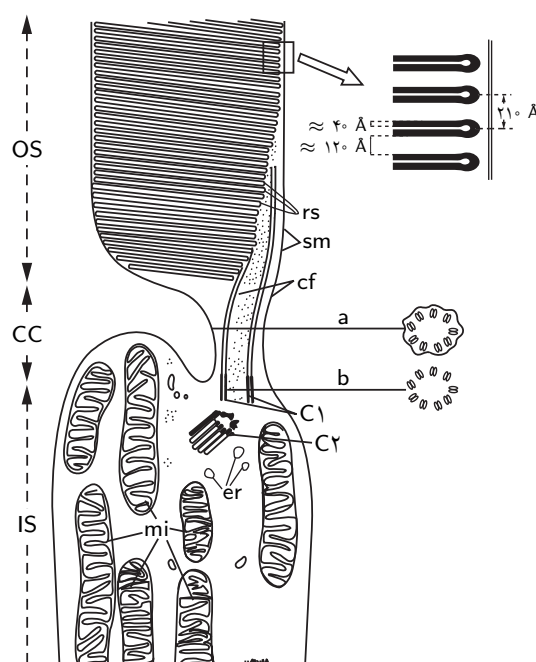
این سؤال که چگونه این شبکه همیشه به هم وصل می‌شود بسیار جالب است. اینکه چقدر قبلاً سیم‌کشی شده است و چه مقدار آموخته شده است مسئله‌ای قدیمی است. قبلاً تصور می‌شد که شاید اصلاً نیازی به سیم‌کشی نباشد و فقط تقریباً به هم پیوسته باشد و پس از آن، با تجربه، کودک خردسال می‌آموزد که وقتی یک چیز «آنجاست»، حسی ایجاد می‌کند. پزشکان همیشه درباره مغز به ما می‌گویند که کودک خردسال چه احساسی دارد، اما چگونه می‌دانند کودک در سن یک‌سالگی چه احساسی دارد؟ کودک در سن یک‌سالگی ظاهراً می‌بیند که یک جسم در آنجا قرار دارد. یک احساس خاص، و یاد می‌گیرد که به «آنجا» برسد، زیرا وقتی به «اینجا» برسد، کار نمی‌کند. این رویکرد احتمالاً صحیح نیست، زیرا ما در حال حاضر می‌بینیم که در بسیاری از موارد، این اتصالات مفصل ویژه وجود دارد. نورپردازی بیشتر برخی از برجسته‌ترین آزمایش‌های انجام‌شده بر روی یک سمندر است. اتفاقاً با سمندر ارتباط متقاطع مستقیم، بدون کیاسم نوری وجود دارد، زیرا چشم‌ها در هر طرف سر قرار دارند و ناحیه مشترک ندارند. ما می‌توانیم عصب بینایی را در یک سمندر قطع کنیم و عصب دوباره از چشم خارج شود. بنابراین هزاران و هزاران عصب سلولی خود را دوباره احیا می‌کنند. اکنون، در عصب بینایی، الیاف در مجاورت یکدیگر باقی نمی‌مانند - مانند یک کابل تلفنی عالی و شیب‌دار است، همه الیاف پیچ‌خورده و در حال چرخش هستند، اما هنگامی که به مغز می‌رسد، همه دوباره مرتب می‌شوند. وقتی عصب بینایی سمندر را قطع می‌کنیم، سؤال جالب اینجاست که آیا باز هم بینایی واضح می‌شود؟ جواب قابل توجه است: بله. اگر عصب بینایی سمندر را قطع کنیم و دوباره رشد کند، سمندر دوباره بینایی خوبی خواهد داشت. با این حال، اگر عصب بینایی را برش دهیم و چشم را وارونه بپیچانیم و عصب دوباره رشد کند، حدوداً بینایی خوبی خواهد داشت،

اما خطای دید وحشتناکی دارد: وقتی سمندر مگس را از اینجا می‌بیند، می‌پرد آنجا، پس هرگز یاد نمی‌گیرد. بنابراین، روشی مرموز وجود دارد که هزاران هزار عصب مکان‌های مناسب خود را در مغز پیدا می‌کنند. این مسئله در مورد چگونگی سیم‌کشی و مقدار نیست، یک مشکل مهم در تئوری رشد موجودات است. پاسخ مشخص نیست، اما به‌طور جدی درباره آن پژوهش می‌شود.

همین آزمایش در مورد ماهی قرمز نشان می‌دهد که در عصب بینایی که برش می‌دهیم گره وحشتناکی مانند یک زخم یا عارضه فوق‌العاده وجود دارد، اما علی‌رغم همه اینها اعصاب در مکان‌های مناسب خود در مغز رشد می‌کنند.

برای انجام این کار، هنگامی که آنها در کانال‌های قدیمی عصب بینایی رشد می‌کنند، باید درباره مسیر رشد تصمیم‌گیری کنند. آنها چگونه این کار را انجام می‌دهند؟ به نظر می‌رسد سرنخ‌های شیمیایی وجود دارد که الیاف مختلف به‌گونه‌ای متفاوت پاسخ می‌دهند. به تعداد بی‌شماری از الیاف در حال رشد، که هریک از آنها فردی متفاوت از همسایگان است، فکر کنید. در پاسخ به هرچه سرنخ‌های شیمیایی است، به‌شکلی کافی و منحصربه‌فرد پاسخ می‌دهد تا مکان مناسب خود را برای اتصال نهایی در مغز پیدا کند! این یک چیز جالب و خارق‌العاده است. این یکی از پدیده‌های بزرگ زیست‌شناسی است که اخیراً کشف شده است و بدون شک به بسیاری از مشکلات قدیمی حل‌نشده رشد، سازماندهی و رشد موجودات بدن و به‌ویژه جنین‌ها مرتبط است.

یک پدیده جالب دیگر مربوط به حرکت چشم است. باید به‌منظور جابه‌جایی دو تصویر در شرایط مختلف، چشم‌ها جابه‌جا شوند. این حرکات انواع مختلفی دارند: یکی دنبال‌کردن چیزی است که این امر مستلزم آن است که هر دو چشم باید در یک جهت، راست یا چپ حرکت کنند و دیگری اینکه آنها را به‌سمت همان مکان در فواصل مختلف دورتر هدایت کنید، که این امر مستلزم آن است که آنها باید مخالف حرکت کنند اعصاب واردشده به عضلات چشم در حال حاضر فقط برای چنین اهدافی سیم‌کشی شده‌اند. یک مجموعه اعصاب وجود دارد که باعث می‌شود عضلات در قسمت داخلی یک چشم و قسمت بیرونی دیگر کشیده شود و عضلات مقابل را شل کند تا دو چشم با هم یک پدیده جالب دیگر مربوط به حرکت چشم است. باید به‌منظور جابه‌جایی دو تصویر در شرایط مختلف، چشم‌ها جابه‌جا شوند. این حرکات انواع مختلفی دارند: یکی دنبال‌کردن چیزی است که این امر مستلزم آن است که هر دو چشم باید در یک جهت، راست یا چپ حرکت کنند و دیگری اینکه آنها را به‌سمت همان مکان در فواصل مختلف دورتر هدایت کنید، که این امر مستلزم آن است که آنها باید مخالف حرکت کنند اعصاب واردشده به عضلات چشم در حال حاضر فقط برای چنین اهدافی سیم‌کشی شده‌اند. یک مجموعه اعصاب وجود دارد که باعث می‌شود عضلات در قسمت داخلی یک چشم و قسمت بیرونی دیگر کشیده شود و عضلات مقابل را شل کند تا دو چشم با هم حرکت کنند. مرکز دیگری وجود دارد که تحریک باعث می‌شود چشم‌ها از حالت موازی به‌سمت یکدیگر حرکت کنند. اگر چشم دیگر به‌سمت بینی حرکت کند، هر دو چشم را می‌توان به‌گوشه تبدیل کرد، اما آگاهانه یا ناخودآگاه غیرممکن است که هر دو چشم را به‌طور همزمان برگردانیم، نه به این دلیل که ماهیچه‌ای وجود ندارد، بلکه به این دلیل که امکان ارسال وجود ندارد. یک سیگنال برای خاموش کردن هر دو چشم، مگر اینکه دچار سانحه شویم یا مسئله‌ای در این زمینه وجود داشته باشد، برای نمونه،

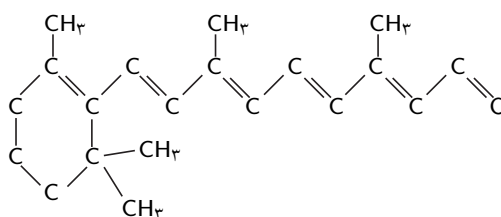


شکل ۵.۳۶: تصویری در میکروسکوپ الکترونی از سلول‌های میله‌ای.

اگر یک عصب قطع شده باشد. اگرچه ماهیچه‌های یک چشم مطمئناً می‌توانند آن چشم را کنترل کنند، حتی یک یوگی هم قادر نیست هر دو چشم را آزادانه و به اختیار خود حرکت دهد، زیرا به نظر نمی‌رسد راهی برای انجام آن وجود داشته باشد. ما قبلاً تا حدودی سیم‌کشی شده‌ایم. این نکته مهمی است، زیرا بیشتر کتاب‌های اولیه دربارهٔ آناتومی و روانشناسی و غیره، این واقعیت را که ما کاملاً سیمی هستیم را تأیید نمی‌کنند - آنها می‌گویند که همه چیز تازه آموخته شده است.

۳.۳۶ سلول‌های میله‌ای

بیایید با جزئیات بیشتری آزمایش کنیم و ببینیم چه اتفاقی برای سلول‌های میله‌ای رخ می‌دهد. شکل ۵.۳۶ ریزنگاری الکترونی از میان یک سلول میله‌ای (سلول میله‌ای در خارج از تصویر ادامه دارد) نشان می‌دهد. لایه پس از لایه ساختمان‌های صفحه‌ای وجود دارد که در سمت راست بزرگ‌نمایی شده‌اند و حامل ماده رودوپسین (بنفش دیداری)، رنگ یا رنگدانه‌اند که اثر بینایی را در میله‌ها تولید می‌کند. رودوپسین که رنگدانه است یک پروتئین بزرگ است شامل گروهی خاص به نام رتینن می‌شود که می‌تواند از پروتئین جدا شود و بدون شک دلیل اصلی جذب نور است. ما دلیل این حالت صفحه‌ها را نمی‌دانیم، اما به نظر می‌رسد که دلیلی برای نگه داشتن مولکول‌های رودوپسین به صورت موازی وجود دارد. قسمت شیمیایی ماجرا به اندازه زیادی مشخص شده، اما



شکل ۳.۳۶: ساختار رتینن.

فیزیک ماجرا شاید کمی جای کار داشته باشد. شاید این‌گونه باشد که همهٔ مولکول‌ها به‌گونه‌ای در یک ردیف چیده شده‌اند که وقتی یکی برانگیخته می‌شود، الکترونی تولید می‌شود که می‌توان گفت تمام مسیر را تا قسمتی در انتها طی می‌کند تا سیگنال را منتقل کند یا چیزی شبیه به این.

چنین بنای چندلایه‌ای در شرایط دیگری که نور اهمیت دارد نیز پدیدار می‌شود، برای مثال در کلروپلاست در گیاهان که نور باعث فوتوسنتز می‌شود. اگر آنها را بزرگ‌نمایی کنیم شبیه همان ساختار را با لایه‌هایی مشابه می‌یابیم، و البته در آنجا کلروفیل به‌جای رتینن وجود دارد.

فرم شیمیایی رتینن در شکل ۳.۳۶ نشان داده شده است که یک سری پیوندهای دوگانه جایگزین در امتداد زنجیرهٔ فرعی، که مشخصهٔ تقریباً تمام مواد ارگانیک جذب‌شونده مثل کلروفیل، خون و... است، دارد. انسان‌ها قابلیت تولید این ماده را در سلول‌های خود ندارند، ما باید آن را مصرف کنیم. پس ما آن را به‌شکل یک مادهٔ خاص می‌خوریم، ماده‌ای که دقیقاً مثل رتینن است با این تفاوت که یک هیدورژن به انتهای سمت راست آن متصل شده است. این ماده ویتامین آ نام دارد، و اگر ما به‌اندازهٔ کافی ویتامین آ مصرف نکنیم، منع رتینن به مقدار مورد نیاز نخواهیم داشت و به این سبب چشم به حالتی که آن را «شب‌کوری» می‌نامیم درمی‌آید، زیرا مقدار کافی رنگدانه در رودوپسین وجود ندارد که به‌وسیلهٔ سلول‌های میله‌ای بتوانیم در شب ببینیم.

دلیل اینکه چرا یک سری پیوندهای دوگانه با شدت نور را جذب می‌کنند نیز مشخص است. شاید یک راهنمایی کافی باشد: سری پیوندهای دوگانه جایگزین، پیوند دوگانه هم‌یوغ نامیده می‌شود، یک پیوند دوگانه به این معنی است که در آنجا یک الکترون اضافه وجود دارد و این الکترون به‌سادگی به‌سمت چپ یا راست تغییر مکان می‌دهد. وقتی نور به مولکول برخورد می‌کند، الکترون هر پیوند دوگانه، یک گام جابه‌جا می‌شود. تمام الکترون‌های زنجیره مثل دومینوهایی که به هم می‌خورند، جابه‌جا می‌شوند و اگرچه هرکدام مسافت کمی را طی می‌کنند (ما این را در یک اتم انتظار داریم، الکترون را فقط کمی می‌توانیم جابه‌جا کنیم)، اثر آنها مثل این است که یک الکترون از یک سمت به انتهای سمت دیگر جابه‌جا شود! دقیقاً مانند این است که یک الکترون کل مسافت را برود و بازگردد و از این طریق ما جذب بسیار شدیدتری تحت‌تأثیر میدان الکتریکی در مقایسه با حالتی که الکترون فقط به‌اندازهٔ مشخص شده توسط یک اتم حرکت کند خواهیم گرفت. پس به‌خاطر اینکه به‌سادگی یک الکترون به‌سمت ابتدا و انتها حرکت می‌کند، رتینن به‌شدت نور را جذب می‌کند. این تشکیلات پایان داستان فیزیکی-شیمیایی این قضیه است.

۴.۳۶ چشم مرکب حشره

بیایید به زیست‌شناسی بازگردیم. چشم انسان تنها نوع چشم نیست. در مهره‌داران تقریباً تمام چشم‌ها ضرورتاً مانند چشم انسان است. در جانداران رده‌ پایین‌تر انواع مختلفی از چشم‌ها وجود دارد، لکه‌های چشم، حلقه‌های چشم مختلف و چیزهای کمتر حساس دیگر که زمانی برای بررسی‌شان نداریم. اما یک چشم پیشرفته‌تر در میان بی‌مهرگان وجود دارد و آن چشم مرکب حشرات است. اغلب حشرات با چشم‌های مرکب بزرگ، چشم‌های ساده‌تر اضافی نیز دارند. زنبور حشره‌ای است که بینایی آن به‌دقت مطالعه شده است. مطالعه ویژگی‌های چشم‌های زنبور کار راحتی است، زیرا آنها جذب عسل می‌شوند و ما می‌توانیم آزمایش‌هایی طراحی کنیم که در آن عسل را با قراردادن بر روی کاغذهای قرمز یا آبی مشخص کنیم و ببینیم که به‌سمت کدام یک می‌روند. با استفاده از این روش نکات بسیار جالبی در مورد بینایی زنبورها کشف شده است.

در مرحله نخست، برای اندازه‌گیری تیزبینی زنبورها در تشخیص تفاوت رنگ بین دو کاغذ «سفید»، بعضی از محققین دریافتند که آنها تیزبینی زیادی در تشخیص رنگ ندارد و محققین دیگری دریافتند که آنها در این زمینه بسیار قوی هستند. حتی اگر دو قسمت کاغذ سفید، رنگ‌های خیلی نزدیکی به هم داشتند، زنبورها همچنان می‌توانستند تفاوت آنها را تشخیص دهند. محققان از یک قسمت کاغذ به رنگ سفید رویی و قسمت دیگر به رنگ سفید سربی استفاده کردند، اگرچه این دو رنگ برای ما دقیقاً یکسان به نظر می‌رسند، زنبورها می‌توانستند به‌سادگی تفاوت بین آنها را تشخیص دهند، زیرا این دو رنگ مقادیر متفاوتی از فرابنفش را بازتاب می‌کنند. از آن طریق کشف شد که چشم زنبورها به بازه بزرگ‌تری نسبت به چشم ما حساس است. چشمان ما بین ۷۰۰ تا ۴۰۰۰ انگستروم کار می‌کند، از قرمز تا بنفش، اما زنبورها می‌توانند تا ۳۰۰۰ انگستروم، در فرابنفش ببینند! این باعث چند اثر جالب می‌شود. اول اینکه زنبورها می‌توانند تفاوت بین گل‌هایی را تشخیص دهند که برای ما یک شکل به نظر می‌رسند. البته که باید بدانیم که رنگ‌های گل‌ها برای چشمان ما طراحی نشده‌اند، اما برای زنبورها، آنها سیگنال‌هایی برای جذبشان به‌سمت یک نوع گل مشخص هستند. همه ما می‌دانیم که گل‌های زیادی به رنگ سفید وجود دارد. ظاهراً سفید رنگ جذابی برای زنبورها نیست، زیرا مشخص شده که تمام گل‌های سفید درجه‌های مختلفی از بازتاب در فرابنفش دارند، آنها صددرصد فرابنفش را مثل یک سفید واقعی بازتاب نمی‌کنند. تمام نور بازتاب نمی‌شود، فرابنفش ناپدید شده و این یک رنگ است، همان طوری که برای ما اگر آبی ناپدید شود، به رنگ زرد دیده می‌شود. پس تمام گل‌ها برای زنبورها رنگی هستند. همچنین ما می‌دانیم که قرمز برای زنبورها قابل دیدن نیست. به همین دلیل انتظار داریم که تمام گل‌های قرمز برای زنبورها مشکی دیدن شود. اما این طور نیست! یک مطالعه دقیق درباره گل‌های قرمز نشان می‌دهد که اول از هرچیز با همین چشم‌های خودمان می‌توانیم ببینیم که اکثر گل‌های قرمز یک سایه کوچکی از رنگ آبی نیز دارند که به‌دلیل بازتاب رنگ آبی از آنها دیده می‌شود و این همان قسمتی است که زنبورها می‌بینند. از این گذشته، آزمایش‌ها نشان داده که گل‌ها در بازتاب فرابنفش در قسمت‌های مختلف گلبرگ‌هایشان نیز تفاوت دارد. پس اگر می‌توانستیم مثل زنبورها گل‌ها را ببینیم، بیش از این زیبا و گوناگون بودند!

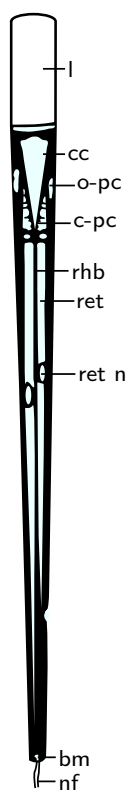
البته نشان داده شده که تعدادی از گل‌های قرمز، آبی یا فرابنفش را از خود بازتاب نمی‌کنند و به همین دلیل برای زنبورها مشکلی دیده می‌شوند. این قضیه برای بعضی‌ها که به این موضوع اهمیت می‌دهند نگران‌کننده بود، زیرا سیاه رنگ جذابی نیست از آنجایی که تفاوتش با یک سایه مشخص نیست. دیده شد که این گل‌ها توسط زنبورها قابل دیدن نیستند، اما توسط مرغ‌های مگس‌خوار قابل دیدن‌اند و مرغ‌های مگس‌خوار می‌توانند قرمز را ببینند!

یکی دیگر از قابلیت‌های بینایی زنبور این است که می‌تواند جهت خورشید را با استفاده از مشاهده قسمتی از آسمان و بدون دیدن خود خورشید تشخیص دهد. ما نمی‌توانیم به‌سادگی این کار را انجام دهیم. اگر از پنجره به آسمان نگاه کنیم و ببینیم که آبی‌رنگ است، خورشید در کدام جهت قرار دارد؟ زنبور می‌تواند پاسخ دهد، زیرا زنبور به قطبش نور حساس است و نور پراکنده در آسمان قطبیده است. هنوز در مورد اینکه این حساسیت چگونه کار می‌کند بحث‌هایی وجود دارد. اینکه آیا بازتابش نور در شرایط مختلف، متفاوت است یا چشم‌های زنبور مستقیماً حساس است هنوز مشخص نیست.

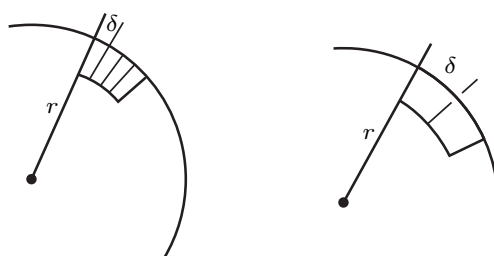
همچنین گفته شده است که زنبور می‌تواند لرزش را تا ۲۰۰ بار در ثانیه تشخیص دهد در حالی که ما فقط تا ۲۰ بار در ثانیه را تشخیص می‌دهیم. حرکات زنبورها در کندو بسیار سریع است. پاها حرکت می‌کنند و بال‌ها می‌لرزند، اما دیدن این حرکات برای ما بسیار دشوار است. اگر می‌توانستیم تندتر ببینیم، می‌توانستیم این حرکات را ببینیم. احتمالاً برای زنبورها اهمیت دارد که چشم‌هایشان چنین واکنش سریعی داشته باشد.

حال بیایید راجع به تیزبینی‌ای که از زنبور انتظار داریم صحبت کنیم. چشم‌های زنبور چشم‌هایی مرکب‌اند، و از تعداد زیادی سلول ویژه به نام ریزچشمک تشکیل شده‌اند که به‌صورت مخروطی روی سطح یک کره، تقریباً خارج از سر زنبور، قرار گرفته‌اند. شکل ۷.۳۶ تصویری از چنین ریزچشمکی را نشان می‌دهد. در قسمت بالا یک ناحیه شفاف وجود دارد، نوعی لنز، اما بیشتر شبیه به یک فیلتر یا لوله نوری عمل می‌کند و نور را به سمت رشته نازکی هدایت می‌کند، جایی که احتمالاً جذب نور در آن رخ می‌دهد. در انتهای دیگر آن رشته عصبی قرار دارد. رشته مرکزی توسط ۶ سلول در اطراف آن احاطه شده است، در واقع از رشته محافظت می‌شود. این توضیحات برای ما کافی است. نکته اینجاست که این یک چیز مخروطی است و تعداد زیادی از آن می‌توانند در کنار یکدیگر روی سطح چشم زنبور قرار گیرند.

حال بیایید درباره تفکیک‌پذیری چشم‌های زنبور صحبت کنیم. اگر از خطوط شکل (۸.۳۶) برای نشان دادن ریزچشمک‌های روی سطح، که آن را کره‌ای به شعاع r در نظر می‌گیریم استفاده کنیم، شاید بتوانیم با استفاده از عقلمان و در نظر گرفتن اینکه تکامل نیز به‌اندازه ما باهوش است، عرض هر ریزچشمک را محاسبه کنیم. اگر یک ریزچشمک خیلی بزرگ را در نظر بگیریم تفکیک‌پذیری خیلی زیادی نداریم. به این صورت که هر سلول قسمتی از اطلاعات را از یک جهت دریافت می‌کند و سلول مجاور نیز قسمت دیگری از اطلاعات را از جهتی دیگر دریافت می‌کند و زنبور نمی‌تواند چیزهای میان آنها را به‌خوبی ببیند. پس عدم قطعیت دقت بینایی قطعاً به یک زاویه وابسته است، زاویه انتهای ریزچشمک نسبت به مرکز انحنای چشم. سلول‌های چشم، قطعاً فقط روی سطح کره قرار دارند. درون کره سر زنبور این زاویه از یک ریزچشمک تا ریزچشمک بعدی قطعاً برابر با



شکل ۷۰.۳۶: ساختار ریزچشمک (یک تک سلول از یک چشم مرکب).



شکل ۸۰.۳۶: طرحی از شکل ریزچشمکها در چشمان یک زنبور.

قطر ریزچشمک تقسیم بر شعاع سطح چشم است:

$$\Delta\theta_g = \delta/r. \quad (۱.۳۶)$$

پس می‌توانیم بگوییم، هرچه δ را کوچک‌تر کنیم دقت بینایی نیز افزایش می‌یابد. پس چرا زنبور از ریزچشمک‌های خیلی نازک استفاده نمی‌کند؟ پاسخ: ما به اندازه‌ای فیزیک می‌دانیم که پی ببریم که اگر می‌خواهیم نور را از یک روزنه نازک عبور دهیم، به‌خاطر پدیده پراش نمی‌توانیم در هیچ جهتی با دقت ببینیم. نور از زوایای مختلفی وارد می‌شود و به‌دلیل پراش ما نور را با زاویه $\Delta\theta_d$ دریافت می‌کنیم، به این صورت که:

$$\Delta\theta_d = \lambda/\delta. \quad (۲.۳۶)$$

اکنون دیدیم اگر δ را خیلی کوچک کنیم به‌دلیل پراش ریزچشمک دیگر نمی‌تواند فقط به یک جهت نگاه کند! اگر هم آنها را خیلی بزرگ کنیم، هرکدام از آنها جهت محدودی را می‌بینند، اما تعداد کافی از آنها برای دیدن همه جهتها وجود نخواهد داشت. پس برای اینکه اثر این دو اتفاق را کمینه کنیم δ را تنظیم می‌کنیم. اگر این دو را به هم اضافه کنیم و جایی که جمع آنها کمینه است را پیدا کنیم، درمی‌یابیم:

$$\frac{d(\Delta\theta_g + \Delta\theta_d)}{d\delta} = 0 = \frac{1}{r} - \frac{\lambda}{\delta^2}, \quad (۳.۳۶)$$

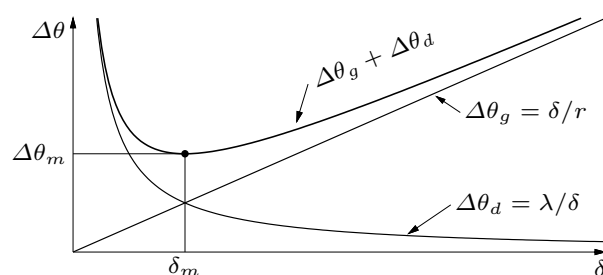
که مسافت زیر را به ما می‌دهد

$$\delta = \sqrt{\lambda r}. \quad (۴.۳۶)$$

اگر r را حدود ۳ میلی‌متر و نوری که زنبور می‌بیند را 400 نانگستروم در نظر بگیریم و این دو را در معادله قرار دهیم، می‌یابیم:

$$\begin{aligned} \delta &= (3 \times 10^{-3} \times 4 \times 10^{-7})^{1/2} \text{ m} \\ &= 3.5 \times 10^{-5} \text{ m} = 35 \mu. \end{aligned} \quad (۵.۳۶)$$

کتاب می‌گوید که قطر $30 \mu m$ است که به نظر تقریب خوبی باشد. پس ظاهراً، این‌گونه است و ما می‌توانیم درک کنیم که چه چیزی اندازه چشم زنبور را مشخص می‌کند! همچنین کاری ندارد که عدد بالا را در معادلات قرار دهیم و ببینیم که چشم زنبور در دقت تفکیک زاویه‌ای چقدر خوب است. که شباهت خیلی ضعیفی به چشم ما دارد. ما می‌توانیم چیزهایی را ببینیم که در اندازه ظاهری 30 مرتبه کوچک‌تر از چیزی است که زنبور می‌بیند. همچنین زنبور دید تیره و خارج از مرکز متمرکزی نسبت به ما دارد. با این همه مشکلی وجود ندارد و این بهترین حالت برای زنبور است. شاید بپرسم که چرا زنبورها چشم‌های خود را به چشم‌هایی مثل ما با لنز و همه‌چیز



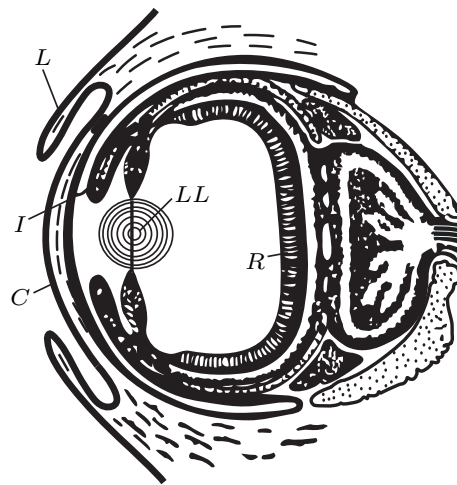
شکل ۹.۳۶: اندازه ایتیمیم برای اوماتدیوم که δ_m است.

توسعه نمی‌دهند. یک اینکه زنبور خیلی کوچک است، اگر چشمی مثل ما در اندازه خودشان داشتند، دهانه آن حدود $30 \mu m$ می‌شد و تأثیر پراش به قدری مهم می‌شد که در واقع خیلی هم خوب نمی‌دیدند. دو، اگر به اندازه سر زنبور بزرگ بود، آن موقع کل سر زنبور را اشغال می‌کرد. زیبایی چشم مرکب این است که فضای زیادی نمی‌گیرد، فقط یک لایه خیلی نازک روی سطح زنبور است. پس اگر سر این بحث می‌کنیم که باید چشم‌هایی مثل ما می‌داشتند باید به یاد بیاوریم که آنها مشکلات خودشان را داشتند!

۵.۳۶ چشم جانداران دیگر

علاوه بر زنبورها، بسیاری از حیوانات دیگر می‌توانند رنگ‌ها را ببینند. ماهی‌ها، پروانه‌ها، پرندگان و خزندگان می‌توانند رنگ‌ها را ببینند، اما اعتقاد بر این است که بیشتر پستانداران نمی‌توانند. نخستی‌سانان می‌توانند رنگ را ببینند. پرندگان مطمئناً رنگ را می‌بینند و گرنه وجود این پرندگان نر رنگارنگ چه معنایی داشت اگر پرندگان ماده نمی‌توانستند متوجه آن شوند. یعنی تکامل «هرچه هست» جنسی که پرندگان از آن برخوردارند نتیجه این است که جنس ماده قادر به دیدن رنگ است. بنابراین، دفعه بعد که ما یک طاووس را بررسی می‌کنیم و فکر می‌کنیم که چه نمایشگر درخشانی از رنگ‌های زرق و برق‌دار است و همه رنگ‌های آن چقدر ظریف هستند و چه حس زیبایی‌شناسی فوق‌العاده‌ای می‌طلبد که از آن‌همه زیبایی‌های قدرانی کند، ما نباید از طاووس نر تعریف کنیم، بلکه باید از توانایی بینایی و زیبایی‌شناسی طاووس ماده تمجید کنیم، زیرا به‌خاطر اوست که چنین صحنه زیبایی ایجاد شده است!

تمام بی‌مهرگان دارای چشمانی ضعیف یا چشم مرکب هستند، اما همه مهره‌داران چشمی بسیار شبیه به خود ما دارند، با یک استثناء. اگر بالاترین شکل یک حیوان را در نظر بگیریم، معمولاً می‌گوییم اینجا ما هستیم! اما اگر دیدگاه کم‌تعصبی داشته باشیم و تنها به بی‌مهرگان بپردازیم، و این مقایسه خودمان را در بر نگیرد، می‌پرسیم بالاترین حیوان در بی‌مهرگان کدام است؟ بیشتر جانورشناسان قبول دارند که اختاپوس بالاترین حیوان است! بسیار جالب است که، علاوه بر رشد مغز و واکنش‌های آن و غیره، که برای یک مهره‌دار خوب نیست، چشم دیگری نیز ایجاد کرده است. این یک چشم مرکب یا یک چشم نقطه‌ای نیست، بلکه قرنيه دارد، دارای سرپوش

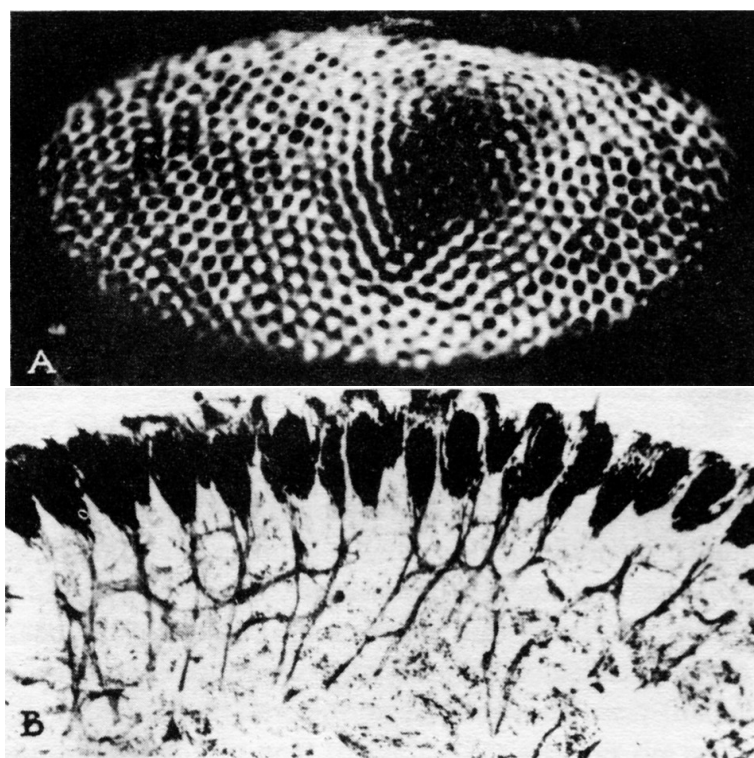


شکل ۱۰.۳۶: ساختار چشم یک اختاپوس.

است، عنبیه دارد، لنز دارد، دارای دو ناحیه آب است و پشت آن شبکیه دارد. در اصل همان چشم مهره‌داران است! این یک نمونه قابل توجه از تصادف در تکامل است که طبیعت دوباره راه‌حل یکسانی برای یک مسئله را پیدا کرده است، با یک پیشرفت جزئی. در اختاپوس نیز به طرز شگفت‌انگیزی مشخص می‌شود که شبکیه قطعه‌ای از مغز است که به همان شکل در رشد جنینی خود بیرون آمده است همان‌طور که در مورد مهره‌داران صادق است، اما نکته جالب و متفاوت این است که سلول‌های موجود که نسبت به نور در قسمت داخلی حساس هستند و سلول‌هایی که محاسبه را انجام می‌دهند بیشتر از آنچه در چشم ما قرار دارد پشت‌ورو (inside out) هستند. حداقل، ما می‌بینیم که دلیل خوبی برای وجود آن در خارج وجود ندارد (نگاه کنید به شکل ۱۰.۳۶). بزرگ‌ترین چشم در جهان چشم‌های اختاپوس غول‌پیکر است. قطر آنها تا ۱۵ اینچ نیز می‌رسد!

۶.۳۶ عصب‌شناسی دیدن

یکی از نکات اصلی موضوع ما، ارتباط بین اطلاعات یک بخش از چشم با بخش دیگر آن است. بگذارید چشم مرکب خرچنگ نعل‌اسبی که آزمایش قابل توجهی روی آن انجام شده است را در نظر بگیریم. اول از همه، ما باید ببینیم که چه نوع اطلاعاتی می‌توانند در اعصاب به وجود بیایند. یک عصب حامل نوعی اختلال است که دارای اثر الکتریکی بوده و به راحتی قابل تشخیص است، نوعی اختلال موجی که باعث تخلیه عصب می‌شود و در انتهای دیگر آن اثری ایجاد می‌کند: یک تکه طولانی از سلول عصبی به نام آکسون اطلاعات را حمل می‌کند و همچنین در بردارنده نوع خاصی از تغییر ولتاژ (تکانه) است موسوم به «سنبله» (spike، سنبله) که در صورت اثرپذیری (برانگیختگی) انتهای دیگر عصب بر آن بار می‌شود. وقتی یکی سنبله از عصب می‌رود، سنبله دیگر نمی‌تواند بلافاصله به دنبال آن خارج شود. تمام سنبله‌ها به یک اندازه هستند، البته این بدان معنا نیست که با



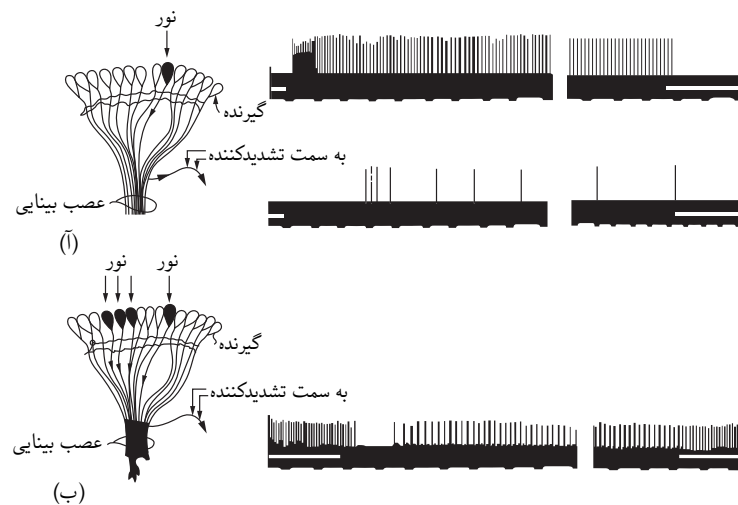
شکل ۱۱.۳۶: چشم مرکب خرچنگ نعل اسبی را نشان می‌دهد. (A) نمای روبه‌رو. (B) نمای مقطعی.

شکل‌های ۷.۳۶، ۱۱، ۱۲، ۱۳ با اجازه گلداسمیت، از کتاب ارتباطات حسی، نوشته دلیو. ای. روزنبلیت، ۱۹۶۱، مؤسسه فناوری ماساچوست در اینجا چاپ شده‌اند.

برانگیختگی عصبی بیشتر باید منتظر خروج سنبله‌های بزرگتر باشیم، بلکه با افزایش خروج سنبله‌ها در هر ثانیه مواجه می‌شویم. فیبر تعیین‌کننده اندازه سنبله است. و باید به این موضوع برای درک آنچه در ادامه رخ می‌دهد، توجه کنیم.

شکل ۱۱.۳۶ (A) چشم مرکب خرچنگ نعل اسبی را نشان می‌دهد؛ خیلی به نظر شبیه چشم نیست و تنها هزاران اوماتیدیا (ریزچشمک) در آن مشاهده می‌شود. شکل ۱۱.۳۶ (B) برشی مقطعی است که در آن می‌توان ریزچشمک‌ها را با الیاف‌های عصبی که از آن بیرون زده است و به‌سوی مغز می‌روند، مشاهده کرد. اما باید به خاطر داشت که حتی در سیستم بینایی یک خرچنگ نعل اسبی اتصالات بسیار ریزی وجود دارد. هرچند این اتصالات از اتصالات درون سیستم بینایی انسان پیچیدگی کمتری دارند. و این نمونه به ما امکان می‌دهد که نمونه ساده‌تری را مطالعه کنیم.

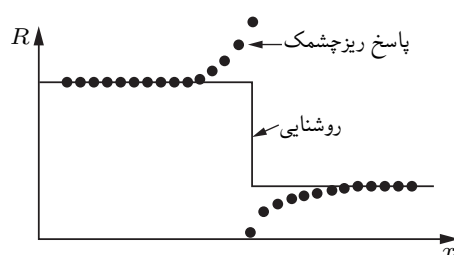
بگذارید اکنون به آزمایش‌هایی که با قراردادن الکترودهای ریز در عصب بینایی خرچنگ نعل اسبی انجام شده است، بپردازیم و تنها بر یکی از ریزچشمک‌ها نور را بتابانیم که انجام این کار با لنزها آسان است. اگر در یک لحظه t_0 یک چراغ روشن کنیم و پالس‌های الکتریکی را که از آن بیرون می‌آید، اندازه بگیریم، همان‌طور که در شکل ۱۲.۳۶ (a) نشان داده شده است، می‌فهمیم که یک تأخیر جزئی وجود دارد و سپس توالی سریع تخلیه که



شکل ۱۲.۳۶: پاسخ عصبی به نور تابیده‌شده به چشم خرچنگ نعل‌اسبی.

به تدریج کاهش می‌یابد و به یک سرعت یکنواخت می‌رسد. هنگامی که نور خارج می‌شود، تخلیه متوقف می‌شود. حال بسیار جالب است که اگر تقویت‌کننده ما به همین فیبر عصبی متصل باشد و ما بر روی یک ریزچشمک دیگر نور را بتابانیم، هیچ اتفاقی نمی‌افتد و هیچ سیگنالی در کار نخواهد بود.

اکنون یک آزمایش دیگر انجام می‌دهیم: ما نور را روی ریزچشمک اصلی می‌تابانیم و همان جواب را می‌گیریم، اما اگر نور را بر یک ریزچشمک دیگر در آن نزدیکی بتابانیم پالس‌ها برای مدت کوتاهی قطع می‌شوند و سپس به میزان کمتری ادامه می‌یابند، شکل ۱۲.۳۶ (ب). میزان یکی توسط تکانه‌هایی که از دیگری بیرون می‌آیند مهار می‌شود! به عبارت دیگر، هر فیبر عصبی تنها اطلاعات یک ریزچشمک را حمل می‌کند، اما مقداری که حمل می‌کند توسط سیگنال‌های دیگر ریزچشمک‌ها مهار می‌شود. بنابراین، به عنوان مثال، اگر به کل چشم کم‌وبیش به طور یکنواخت نور تابانده شود، اطلاعاتی که از هریک از ریزچشمک‌ها دریافت می‌شود، نسبتاً ضعیف خواهد بود، زیرا توسط ریزچشمک‌های دیگر که تعدادشان زیاد است مهار می‌شود. در واقع این مهار افزایشی است. اگر ما بر روی چندین ریزچشمک که در نزدیکی هم هستند نوری بتابانیم، مهار بسیار قوی است. وقتی ریزچشمک‌ها به هم نزدیک‌تر باشند میزان این مهار نیز بیشتر خواهد شد و اگر ریزچشمک‌ها به قدر کافی از هم دور باشند، مهار عملاً صفر خواهد بود. بنابراین مهار افزایشی است و به فاصله بستگی دارد. این اولین نمونه اطلاعاتی است که از بخش‌های مختلف چشم به دست آمده و در خود چشم ترکیب شده‌اند. می‌بینیم که شاید این‌طور به نظر بیاید که ریزچشمک‌ها امکانی برای افزایش تمایز در کناره‌های اشیاء هستند، زیرا ممکن است بخشی از آن شی در فضایی روشن و بخش دیگر آن در فضایی تاریک باشد، به این ترتیب ریزچشمک‌هایی که تحت تابش نور در فضای روشن‌تر قرار گرفته‌اند، تکانه‌هایی از خود منتشر می‌کنند که تحت تأثیر نور موجود در آن نزدیکی مهار می‌شود، بنابراین، تکانه ضعیف خواهد بود. از طرف دیگر، یک ریزچشمک در محدوده‌ای که به آن نور سفید تابانده می‌شود توسط دیگر ریزچشمک‌های موجود در این محل مهار می‌شود، اما تعداد زیادی از آنها



شکل ۱۳.۳۶: تغییرات کلی پاسخ ریزچشمک به تغییرات شدید نوری.

در این محدوده وجود ندارد، زیرا به بعضی از آنها نوری تابانده نشده و تاریک باقی مانده‌اند. بنابراین، سیگنال خالص به دست آمده از آن ریزچشمک قوی‌تر است. نتیجه آن را می‌توان به شکل یک منحنی مشاهده کرد، چیزی شبیه به شکل ۱۳.۳۶. خرچنگ شاهد افزایش نماهای قابل مشاهده خواهد بود.

این واقعیت که تعداد نماهای قابل مشاهده افزایش می‌یابد از دیرباز شناخته شده است. در حقیقت درباره این نکته قابل توجه بارها روانشناسان اظهار نظر کرده‌اند. برای کشیدن یک شی، فقط باید طرح کلی آن را ترسیم کنیم. ما به دیدن تصاویری که فقط طرحی کلی دارند عادت کرده‌ایم! طرح کلی چیست؟ طرح کلی فقط تفاوت لبه بین نور و تاریک یا یک رنگ و رنگ دیگر است. و یک چیز قطعی و مشخص نیست. این طور نیست، باور کنید یا نه، هر جسم خطی در اطراف خود دارد! چنین خطی وجود ندارد. فقط در آرایش روانشناختی ماست که بحث از وجود خط است. کم‌کم درک می‌کنیم که چرا «خط» سرنخ خوبی برای درک کلیت یک شیء است. احتمالاً، چشم خود ما به روشی مشابه همین کار می‌کند - بسیار پیچیده‌تر، اما مشابه.

در آخر، به طور خلاصه کار دقیق‌تر، زیبا و پیشرفته‌ای که روی قورباغه انجام شده است را شرح می‌دهیم. با قراردادن آشکارسازی سوزنی و بسیار ریز که به زیبایی ساخته شده، در عصب بینایی یک قورباغه، می‌توان سیگنال‌هایی را که در امتداد یک آکسون خاص پیش می‌روند، به دست آورد. و درست همانند مورد خرچنگ نعل‌اسبی دریافت که اطلاعات فقط به یک نقطه در چشم بستگی ندارد، بلکه مجموعه‌ای از اطلاعات چندین نقطه است.

جدیدترین تصویر از عملکرد چشم قورباغه به شرح زیر است. می‌توان چهار نوع مختلف از الیاف عصبی نوری را پیدا کرد، به این معنا که چهار نوع پاسخ متفاوت وجود دارد. این آزمایش‌ها با درخشش تکانه‌های روشن و خاموش نور انجام نمی‌شود، زیرا این چیزی نیست که یک قورباغه می‌بیند. یک قورباغه فقط در آنجا می‌نشیند و چشمانش هرگز حرکت نمی‌کند، مگر اینکه به دلیلی در حال عقب و جلو باشد و در این حالت، چشمان او به چرخیدن خود تا زمانی که تصویر ثابت شود ادامه می‌دهد. چشمش را نمی‌چرخاند. اگر هر چیزی در زمینه بینایی او حرکت کند، مانند یک مگس کوچک او باید بتواند چیز کوچکی را در پس زمینه ثابت مشاهده کند، معلوم می‌شود که چهار نوع الیاف مختلف وجود دارد که تخلیه می‌شوند، که خصوصیات آنها در جدول ۱۰.۳۶ خلاصه شده است. تشخیص لبه پایدار، غیرقابل حمل بودن، به این معنی است که اگر ما یک جسم را با یک لبه وارد میدان

جدول ۱.۳۶: انواع پاسخ‌های عصبی در عصب بینایی یک قورباغه

نوع	سرعت	میدان زاویه‌ای
۱. تشخیص لبه به صورت پایدار (پاک‌نشدنی)	$0.2-0.5$ m/sec	1°
۲. تشخیص لبه محدب (پاک‌شدنی)	0.5 متر بر ثانیه	$2^\circ-3^\circ$
۳. تشخیص تغییر کُنتراست	$1-2$ متر بر ثانیه	$10^\circ-7^\circ$
۴. تشخیص تیرگی	تا $\frac{1}{4}$ متر بر ثانیه	تا 15°
۵. تشخیص تاریکی	؟	خیلی بزرگ

دید قورباغه کنیم، در حالی که جسم در حال حرکت است، تعداد زیادی تکانه در این فیبر خاص وجود دارد، اما آنها در یک روند پایدار از بین می‌روند. که تا زمانی که لبه وجود دارد، ادامه می‌یابد، حتی اگر هنوز ایستاده باشد. اگر ما نور را روشن کنیم، تکانه‌ها متوقف می‌شوند. اگر دوباره آن را روشن کنیم در حالی که لبه هنوز در حال مشاهده است، آنها دوباره شروع می‌کنند. بسیاری از تکانه‌ها در این فیبر خاص در حالی که جسم در حال حرکت است، می‌گیرند، اما آنها به یک ضربه پایدار می‌میرند که تا زمانی که لبه در آنجا باشد، ادامه می‌یابد، حتی اگر هنوز ایستاده باشد. اگر ما نور را روشن کنیم، تکانه‌ها متوقف می‌شوند. اگر دوباره آن را روشن کنیم در حالی که لبه هنوز در حال مشاهده است، آنها دوباره شروع می‌کنند. قابل پاک‌کردن نیستند. نوع دیگری از فیبر بسیار مشابه است، به جز اینکه اگر لبه مستقیم باشد کار نمی‌کند. این باید یک لبه محدب باشد که پشت آن تاریک است! چقدر باید سیستم اتصالات در شبکیه چشم قورباغه پیچیده باشد تا درک کند که یک سطح محدب به داخل جابه‌جا شده است! علاوه بر این، اگرچه این فیبر تا حدودی پایدار است، اما تا زمانی که دیگری پایدار نباشد، و اگر ما چراغ را روشن کنیم و دوباره آن را روشن کنیم دوباره تولید نمی‌شود. بستگی به حرکت سطح محدب دارد. چشم می‌بیند که در آن حرکت می‌کند و به یاد می‌آورد که در آنجا است، اما اگر صرفاً لحظه‌ای نور را روشن کنیم، آن را به راحتی فراموش می‌کند و دیگر آن را نمی‌بیند.

مثال دیگر تشخیص تغییر در کُنتراست است. اگر یک لبه در حال حرکت به داخل یا خارج وجود داشته باشد، پالس‌ها وجود دارند، اما اگر چیزی ایستاده باشد، به هیچ وجه پالس وجود ندارد. سپس یک آشکارساز کم‌نور است. اگر شدت نور از آن پایین می‌رود پالس ایجاد می‌کند، اما اگر بماند، ضربان متوقف شود. فقط در حالی که نور کم است کار می‌کند.

سرانجام، چند فیبر وجود دارد که آشکارسازهای تاریک هستند، شگفت‌انگیزترین چیز، همه وقت آنها آتش می‌گیرند! اگر ما نور را زیاد کنیم، آنها سریع‌تر آتش می‌گیرند، اما همیشه. اگر ما نور را کاهش دهیم، آنها همیشه با سرعت بیشتری آتش می‌گیرند. آنها در تاریکی مانند دیوانگان آتش می‌گیرند و می‌گویند: «تاریک است! تاریک است! تاریک است!» حال، به نظر می‌رسد که این پاسخ‌ها برای طبقه‌بندی کاملاً پیچیده هستند، و ممکن است



شکل ۱۴.۳۶: میان مغز یک قورباغه.

تعجب کنیم که شاید این آزمایش‌ها به اشتباه تفسیر شده است یا نه. اما بسیار جالب است که همین کلاس‌ها در آناتومی کاملاً واضح هستند. از قورباغه! با اندازه‌گیری‌های دیگر، پس از طبقه‌بندی این پاسخ‌ها پس از آن، این همان چیزی است که در این مورد مهم است، کشف شد که سرعت سیگنال‌ها بر روی الیاف مختلف یکسان نیست، بنابراین روش مستقل دیگری برای بررسی وجود دارد که نوع الیافی که پیدا کردیم! سؤال جالب دیگر این است که یک فیبر خاص در محاسبات خود چقدر مساحت دارد؟ جواب برای کلاس‌های مختلف متفاوت است.

شکل ۱۴.۳۶ سطح به اصطلاح میان مغز قورباغه را نشان می‌دهد، جایی که اعصاب از عصب بینایی وارد مغز می‌شوند. تمام الیاف عصبی که از عصب نوری وارد می‌شوند، در لایه‌های مختلف تک‌توم اتصال ایجاد می‌کنند. این ساختار لایه‌ای شبکه‌ای است. به همین دلیل است که می‌دانیم مغز و شبکه‌ی شباهت زیادی به هم دارند. حال با گرفتن الکتروود و پایین آوردن آن به صورت متوالی از طریق لایه‌ها، می‌توان فهمید که انواع عصب بینایی در کجا به پایان می‌رسد و نتیجه‌ی زیبا و شگفت‌انگیز این است که انواع مختلف الیاف به لایه‌های مختلف ختم می‌شوند! نفر اول به نوع شماره ۱ ختم می‌شود، دومی به شماره ۲، سه و پنج در یک مکان ختم می‌شوند و عمیق‌ترین

آنها شماره چهار است. چه تصادفی، آنها اعداد را تقریباً به ترتیب صحیح به دست آوردند! نه، به همین دلیل آنها را از این طریق شماره‌گذاری می‌کردند، مقاله اول این اعداد را به ترتیب دیگری داشت!

می‌توانیم چیزهایی را که تا اینجا آموخته‌ایم خلاصه کنیم: احتمالاً سه رنگدانه وجود دارد. ممکن است انواع مختلف سلول‌های گیرنده‌ای حاوی سه رنگدانه در نسبت‌های مختلف وجود داشته باشد، اما اتصالات متقابل زیادی وجود دارد که ممکن است از طریق افزودن و تقویت در سیستم عصبی، اضافات و تفریق را انجام دهند. بنابراین، قبل از اینکه واقعاً بینایی رنگ را درک کنیم، باید احساس نهایی را درک کنیم. این موضوع هنوز هم یک موضوع باز است، اما این تحقیقات با میکروالکترودها و مواردی از این دست شاید در نهایت اطلاعات بیشتری در مورد چگونگی دیدن رنگ به ما ارائه دهند.