زبان و مغز

راهنمای مختصر عصب‌شناسی زبان

فهرست

سخن مترجم ۹

۱: مقدمه ۱۱
پیوندِ سلول‌های عصبی به گروه‌های اسمی ۱۲
تاریخچهٔ مختصر ۱۹
ادامهٔ مطالب این کتاب ۲۵
خلاصهٔ فصل ۲۵
پی‌نوشت‌های فصل اول ۲۷
۲: جعبه ابزار ۲۸
جغرافیای مغز ۲۸
خلاصهٔ آنچه تاکنون بیان شد ۳۶
تصویربرداری ساختار مغزی با **MRI** ۳۶
دربارهٔ نقص‌ها و ضایعه‌ها ۳۸
جریان خون و کارکرد ۴۲
مغز الکتریکی ۴۵
تحریک و بازداری کارکرد مغزی ۵۰
خلاصهٔ فصل ۲ ..... ۵۱
پی‌نوشت‌های فصل دوم ۵۴
۳: آواها در مغز ۵۵
کدهای مکانی و زمانی برای صدا ۵۵
عصب‌نگارها و طرح اولیهٔ واج‌شناختی ۶۳
خلاصهٔ فصل ۳ ..... ۷۱
پی‌نوشت‌های فصل سوم ۷۳
۴: رمز یا کد عصبی برای گفتار ۷۴
کدی عصبی برای واج‌ها ۷۶
شواهد عصبی برای بازنمایی‌های واجی؟ ۸۰
آیا گفتار ویژه است؟ سیستم حرکتی و ادراکی ۸۴
شواهدی از اختلالات ادراک گفتار؟ ۸۹
خلاصهٔ فصل ۴ ..... ۹۱
پی‌نوشت‌های فصل چهارم ۹۳
۵: فعال‌سازی واژه‌ها ۹۴
واژه‌ها و ورنیکه ۹۵

دورهٔ زمانی بازشناسی واژه ۹۹
اجزای واحدهای واژگانی ۱۰۵
خلاصهٔ فصل ۵ ۱۱۰
پی‌نوشت‌های فصل پنجم ۱۱۲
۶: بازنمایی معنا ۱۱۳
بازنمایی‌های مفهومی توزیع‌شده و غیرتوزیع‌شده ۱۱۳
آیا بازنمایی‌های مفهومی تجسم‌یافته‌اند؟ ۱۲۳
خلاصهٔ فصل ۶ ۱۲۷
پی‌نوشت‌های فصل ششم ۱۲۹
۷: ساختار و پیش‌بینی ۱۳۰
ساخت جمله ۱۳۰
Nها [منفی‌ها] و **P**ها [مثبت‌ها]یِ پیش‌بینی‌های جمله ۱۳۴
پیش‌بینی‌ها پویا هستند ۱۵۱
خلاصهٔ فصل ۷ ۱۵۴
پی‌نوشت‌های فصل هفتم ۱۵۶
۸: تشکیل جمله‌ها ۱۵۷
شبکه‌ای همبسته ۱۵۷
ساختن عبارت‌های ساده ۱۶۱
نحو و لوب گیجگاهی خلفی ۱۶۶
خلاصهٔ فصل ۸ ۱۷۳
پی‌نوشت‌های فصل هشتم ۱۷۴
۹: ساختار وابستگی‌ها ۱۷۵
وابستگی‌ها، پیش‌بینی و حافظه ۱۷۵
کجا، کِی و سپس چه ۱۸۱
خلاصهٔ فصل ۹ ۱۸۳
پی‌نوشت‌های فصل نهم ۱۸۴
۱۰: جمع‌بندی ۱۸۵
کجا بودیم (در طول بخش‌های این کتاب)؟ ۱۸۵
ما (در این زمینهٔ پژوهشی) کجا ایستاده‌ایم؟ ۱۸۹
دعوت به اقدام ۱۹۱
پی‌نوشت‌های فصل دهم ۱۹۲

فهرست اصطلاحات ۱۹۳
واژه‌نامهٔ انگلیسی به فارسی ۱۹۶
واژه‌نامهٔ فارسی به انگلیسی ۱۹۹

۱

مقدمه

انسان‌ها از زبان استفاده می‌کنند. دیگر جانداران این‌چنین نیستند. بیایید بحثمان را از همین مسئله آغاز کنیم. اگر بپرسید «چرا این‌طور است؟» ممکن است با این پاسخ کاملاً پذیرفتنی روبه‌رو شوید که انسان‌ها مغزی انسانی دارند و مغز انسان برای به‌کارگیری زبان انسانی تجهیز شده است. اما این استدلال و نتیجه‌گیری با مشاهداتی مانند اینکه من (انسان) هرگز نمی‌توانم مانند زنبورعسل گردهٔ گل را پیدا کنم یا آوازِ سار را یاد بگیرم، چون زنبور یا سار نیستم، تفاوت چندانی ندارد. البته من جداً در بحث یادگیری آوازِ پرنده اصلاً خوب نیستم. من همان چیزی را ندارم که پیتر مارلرِ (۱۹۹۱) رفتارشناس آن را «غریزهٔ یادگیری»[1] نامید که مهارت ویژه‌ای است. بنابراین باید پرسید کدام ویژگی مغز انسان سبب می‌شود که بتواند زبان را به کار ببرد؟

پژوهش‌های بسیاری در زمینه‌های علمی بی‌شماری بر یافتن پاسخی برای این پرسش تمرکز کرده‌اند، ازجمله دانشمندان زبان، که به شفاف‌سازی محاسبات ذهنی و بازنمایی‌هایی علاقه‌مندند که زبان را ممکن می‌سازد؛ و متخصصان علوم اعصاب، که بر چگونگی سیم‌کشی مغز در یادگیری و استفاده از اطلاعات تمرکز دارند. از بیان اینکه دانشمندان هنوز نتوانسته‌اند پاسخی جامع به این پرسش بدهند متأسفم (البته خیلی هم متأسف و ناراحت نیستم. اگر این پاسخ جامع به دست آمده بود من بیکار می‌شدم). آنچه تاکنون به دست آورده‌ایم بنیادهای استواری از مشاهدات دقیق و نظریه‌های متقاعدکننده همراه با مجموعه‌ای از مسیرهایِ پژوهشِ فعال است. این کتاب این زمینهٔ پژوهشی هیجان‌انگیز، یعنی عصب‌شناسیِ زبان،[2] را به شما معرفی می‌کند.

ما به این مسائل خواهیم پرداخت که مغز چگونه امواج صوتی (فشار صدا) را به واژه‌های معنادار تبدیل می‌کند، معنا چگونه توسط شبکه‌هایِ گسترده‌ای از سلول‌های عصبی بازنمایی می‌شود، و مناطق مغزی چطور با هم کار می‌کنند تا معنایِ عبارت‌ها و جمله‌هایی را بفهمید که هر روز با آن‌ها روبه‌رو می‌شوید، خودتان می‌سازید و هرگز قبلاً آن‌ها را نشنیده‌اید. این موضوع‌ها و دیگر موارد قطعه‌هایی از پازل بسیار بزرگی است که عصب‌شناسان با آن روبه‌رو هستند.

---

1. instinct to learn
2. Neurolinguistics: عصب‌زبان‌شناسی

من می‌خواهم شما یاد بگیرید که این قطعه‌ها چطور با یکدیگر هماهنگ می‌شوند. اگر شما هم مثل من باشید، فقط برای اینکه تصویر کاملِ پازل ببینید روی آن کار نمی‌کنید. فعالیت حل‌کردن پازل–حتی دریافتن اینکه یک قطعهٔ خاص را چطور قرار دهید نیز– لذت‌بخش است. بنابراین همراه با بحث دربارهٔ آمار و ارقام مربوط به پاسخ‌ها، در واقع من مدت زیادی دربارهٔ خودِ پرسش‌ها نیز صحبت می‌کنم. کدام پرسش‌ها زمینه‌ساز برخی بنیادهای عصب‌زبان‌شناسی بوده‌اند؟ چه پرسش‌هایی پژوهش‌هایِ کنونی را هدایت می‌کنند و پیش می‌برند، این پرسش‌ها چه نتایجی دارند و ما را به کجا خواهند برد، البته اگر هنوز به آنجا نرسیده‌ایم؟

مسئله این است که مشاهدات، واقعیت‌ها، نتایج، یافته‌ها– «عناصر» معمولِ علم– واقعاً درست به همان اندازهٔ پرسش‌های این حوزه مفید هستند. پرسیدن یک پرسش بد و نه‌چندان پیچیده همراه با مشاهدات دقیق حقیقتاً می‌تواند دانشی عمیق به دنبال آورد. پس بیایید به این مسئله توجه کنیم که چه چیزی «پرسش خوب» را می‌سازد.

پیوندِ سلول‌های عصبی به گروه‌های اسمی

پرسشی خوب است که پاسخی قابل شناسایی داشته باشد. به بیان دیگر، من فکر می‌کنم پرسش‌های علمیِ کارآمد آن‌هایی هستند که می‌توان برایشان پاسخی مناسب پیدا کرد. برای مثال، پرسش زیر را در نظر بگیرید:

مغز چگونه اسم‌ها را بازنمایی می‌کند؟

پاسخ این پرسش چگونه خواهد بود؟ آیا پاسخِ این پرسش نقشه‌ای از مناطق مغزیِ درگیر در فهم و تولید اسم‌ها خواهد بود؟ آیا تعریفی خواهد بود ازآنچه در یک زبانِ خاص گروه اسمی خوش‌ساخت نامیده می‌شود؟ یا مثلاً الگوریتمی رایانه‌ای که اسم‌ها را شناسایی می‌کند و آنها را درون جمله قرار می‌دهد؟ فرض کنید من به یک کتاب زبان‌شناسی ارجاع دهم و بگویم «اینجا را ببینید اسم‌ها این‌گونه تعریف می‌شوند و در اینجا قواعد دستوری و چگونگی کارایی آنها در انگلیسی را می‌بینید». آیا به این صورت من به پرسشِ شما پاسخ داده‌ام؟ شک دارم که شما چنین فکری بکنید شما حتی احتمالاً مطمئن نیستید پاسخ قانع‌کننده به این پرسش چگونه خواهد بود.

دانشمندانِ شناختی برای طرح دقیق‌تر پرسش‌ها سه نوع متفاوت از پاسخ یا *سطح توصیفیِ* محتمل را در نظر می‌گیرند.[i] اولین سطح توصیفی تعریف مسئله‌ای است که مغز می‌کوشد آن را حل کند. در بینایی مغز باید الگوی دوبعدی از نور و تاریکی دریافت‌شده از شبکیهٔ[1] چشمتان را به نقشه‌ای سه‌بعدی

1. retina

از اتاق ناهارخوری‌تان، شامل میز و صندلی‌ها و گربهٔ شما و مانند این‌ها، تبدیل کند. در گفتار، مغز امواج صوتی پیوسته را به آواهای گفتاری مجزا و *واج‌هایی*[1] مانند /t/, /æ/, /k/ تبدیل می‌کند. سپس این این آواهای گفتاری واژه‌ها و معنی‌هایشان را به کار می‌اندازند، مانند اسمی که به حیوانِ کوچکِ پشمالویی در خانهٔ من ارجاع دارد. پاسخ‌هایی از این دست، که بیان مسئله‌ای هستند که مغز آن را حل می‌کند –درون‌داد و برون‌دادِ آن مسئله– توصیف *محاسباتی*[2] مغز نامیده می‌شود.

سطح دیگری از توصیف گام‌هایی را هدف می‌گیرد که سیستم برای حل مسئلهٔ محاسباتی خاصی می‌پیماید. برای نمونه شاید به نظرتان برسد که اگر مغز آواهای گفتار را با توجه به جدول یا فهرستی بازشناسایی می‌کند که در آن امواج صوتی با آواهای گفتاریِ مناسب تطبیق می‌یابد، پس هرگاه آوایی بشنود بررسی می‌کند تا ببیند کدام آوای گفتار با این موج صوت‌شناختی «تطبیق» می‌یابد. این نوع پاسخ توصیفی *الگوریتمی* به دست می‌دهد. این توصیف‌های الگوریتمی گام‌های مورد نیاز مغز برای انجام و حل مسائل محاسباتیِ خاصی را مشخص می‌کنند.

در پایان شما ممکن است به چگونگی انجام این گام‌ها و الگوریتمِ حل مسائل توسط سلول‌های عصبی توجه کنید. سلول‌های عصبی چگونه فهرستی از اطلاعات را بازنمایی می‌کنند؟ این سلول‌های عصبی چگونه برای «بررسی» موارد موجود در این فهرست با یکدیگر تعامل دارند؟ این آخرین نوع از پاسخ، توصیفی *اجرایی* از مغز به دست می‌دهد.

هر سطح توصیفی نوع متفاوتی از پرسش دربارهٔ چگونگی کارایی مغز را در بر می‌گیرد. پاسخ‌های احتمالی ما هنگامی که پرسش‌های مناسبی برای آغاز پژوهش داشته باشیم یک نام دارند: *فرضیه‌ها*. جداسازی فرضیه‌ها و قرار دادن آن‌ها در سطوح مختلف توصیفی نقش مفید و اثبات‌شده‌ای در پرسیدن و پاسخ‌دادن به پرسش‌های دقیق‌تری دارند. برای مثال می‌توانیم ببینیم هرکدام از پاسخ‌هایِ مرتبط به پرسش «مغز چگونه اسم‌ها را بازنمایی می‌کند؟» *نوع* متفاوتی از پاسخ به دست می‌دهد- به بیان دیگر، هرکدام از پاسخ‌ها در سطح توصیفیِ متفاوتی قرار می‌گیرند.

جدول ۱: سطوح توصیفی. دانستن دربارهٔ نظامی شناختی مانند زبان به فرمول‌بندی پرسش‌ها (و پاسخ‌ها) در سه سطح مختلف توصیفی نیاز دارد.

محاسباتی	مسئله‌ای شامل درون‌دادها و برون‌دادها که نظام شناختی به دنبال حل آن است.
الگوریتمی	گام‌هایی که نظام شناختی برای حل مسئله برمی‌دارد و سبب تولید برون‌دادهای درست از درون‌دادهای در دسترس می‌شود.
اجرایی	چگونگی به اجرا درآوردن الگوریتمی خاص توسط نظامی فیزیکی (مانند مدار عصبی).

1. phonemes
2. computational description

یکی از پیامدهای بررسی زبان از دریچهٔ این سطوح توصیفی این است که انواع پژوهش‌ها از هم تفکیک می‌شوند. بنابراین متخصص بررسی نحو ممکن است دربارهٔ ماهیت ساخت‌های دستوری یافت‌شده در زبان‌های بشری پژوهش کند (پرسشی در سطح محاسباتی)، بی‌آنکه خیلی دربارهٔ چگونگی تعامل احتمالی مدارهایِ مغزی مرتبط با این ساخت‌ها فکر کند یا نگران آن‌ها باشد. کمابیش همانند چگونگی شفاف‌سازیِ نظامِ ارتباطیِ پیچیدهٔ زنبورعسل توسط جانورشناس است بدون اینکه حتی میزان و سرعت شلیک عصبی در زنبورها اندازه‌گیری شوند.[ii] همچنین، این دیدگاه روشن می‌کند که ما نمی‌توانیم فقط، برای مثال، با اندازه‌گیری فعالیت مغزی و بررسی اینکه چه اتفاقاتی در مغز می‌افتد، به سادگی متوجه شویم مغز چگونه اسم‌ها را بازنمایی می‌کند. برای پاسخ‌دادن به این نوع پرسش ابتدا باید دربارهٔ چیستی «اسم» ایده‌پردازی کنیم (توصیفی در سطح محاسباتی). همچنین به فرضیه‌هایی دربارهٔ چگونگی بازشناسی چنین چیزهایی (الگوریتم) توسط مغز نیاز داریم و سپس باید به این مسئله توجه کنیم که سلول‌های عصبی احتمالاً چگونه آن مراحل را اجرا می‌کنند.[iii]

بیایید برای ملموس‌ترشدن این ایده‌ها به چند مثال توجه کنیم. مثال اول به این مسئله می‌پردازد که چه اتفاقی خواهد افتاد اگر ما فقط بر روی یک سطح توصیفی تمرکز کنیم: سطح اجرایی. بازی‌های ویدیویی را در نظر بگیرید. ایدهٔ کلیدی این است که ببینیم متخصص عصب‌شناس تا چه‌اندازه خوب می‌تواند تنها با توجه به مدارهای الکتریکی به بررسی سیستم بازی ویدئویی بپردازد. این عصب‌شناسان به‌جای اندازه‌گیری ویژگی‌های سلول‌های عصبی، ارتباطات و تخلیه‌های الکتریکی ریزپردازندهٔ کامپیوتر[1] را ضبط کردند (جونس و کوردینگ، ۲۰۱۷). در واقع پژوهشگران با این چالش‌ها با رویکردهای متفاوتی روبه‌رو شدند و از ابزارها و تکنیک‌های موجود در علوم‌اعصاب کمک‌های بسیاری گرفتند (تمرکز اصلی فصل ۲ بر این ابزارها خواهد بود). برای مثال، یک راهبرد این است که عملکرد هریک از ترانزیستورها[2] مختل شود و تأثیر چنین اختلالی بر عملکرد کل سیستم بررسی گردد. این روش تا اندازه‌ای مشابه مطالعهٔ مغز از طریق اختلال‌های عصب‌شناختی است: ما نیز عملاً در بخش بعدی رویکردی مشابه در پیش خواهیم گرفت. راهبرد دیگر ضبط تخلیه‌های الکتریکی از برخی بخش‌های ریزپردازنده‌ها[3] و کوشش برای همبسته‌ساختن آن‌ها با وضعیت بازی ویدئوییِ در حال انجام است.

نه هیچ‌یک از این راهبردها و نه دیگر راهبردهای این پژوهش برای تبیین ریزپردازنده‌ها پاسخ‌گو نبودند. این را می‌دانیم چون روش کار آن ریزپردازندهٔ خاص (از پیش) کاملاً مشخص و شناخته‌شده است. همه‌چیز به کنار، این ریزپردازنده مهندسی شده است. بنابراین پژوهشگران می‌توانند حقیقت

1. computer microprocessor
2. transistors
3. microprocessor

هرکدام از بسیار تعمیم‌های آماری را، که پس از تخلیهٔ ترانزیستورها، همبسته‌های الکتریکی تخلیه‌ها و نگاشت‌های ارتباطات الکتریکی روی می‌دهند، ارزیابی کنند. همان‌طور که آن‌ها بیان می‌کنند: «در مورد پردازنده‌ها ما کارکرد و ساخت آن‌ها را می‌دانیم و یافته‌های ما فهم مطلوب ما از آن‌ها را به دنبال ندارد» (جونس و کوردینگ، ۲۰۱۷: ١٤). هشدار روشن است: دانشمندان تنها با تمرکزکردن بر چگونگی اجرای پردازش زبان در مغز می‌کوشند به فهم عمیقی از آن دست یابند. پژوهش باید شواهدی از همهٔ سطوح توصیفی به دست دهد.

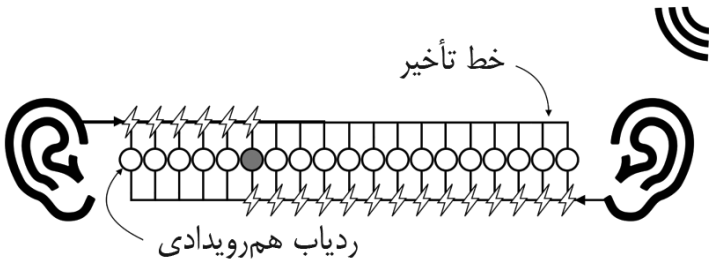
نمونهٔ دوم نشان می‌دهد که پاسخ‌ها در این سطوح مختلف چگونه می‌توانند به‌صورت مفیدی با هم ترکیب شوند. این مثال دربارهٔ جغدها است. جغد انباراز صدا برای پیداکردن (و گرفتن) طعمهٔ خود استفاده می‌کند. پژوهش دربارهٔ چگونگی این کار توسط این پرنده تصویری شگفت‌انگیز از اهمیت توجه به سطوح مختلف توصیفی به دست می‌دهد.[iv] این پژوهش با توصیف محاسباتی مسئله‌ای آغاز می‌شود که مغز جغد باید آن را حل کند: امواج صوتی رسیده به هر گوش باید به مکانی تبدیل شوند که صدا از آنجا می‌آید. برای ساده‌سازی بیایید فقط مسیر صدا نسبت به سر جغد را در نظر بگیریم. جغدها دو صدایاب متقارن دارند (مشهور به «گوش‌ها»). این مسئله سبب بروز یکی از بسیار الگوریتم‌هایی می‌شود که می‌تواند این محاسبات را با حساب‌کردن اختلاف در زمان‌بندی و بلندی صدایی انجام دهد که در هر گوش ردیابی و شناسایی شده است.

یکی از راه‌های محاسبهٔ این اختلاف‌ها به‌کارگیری دو سازهٔ زیربنایی مهندسی آن‌ها است: خطوط تأخیر و ردیاب‌های هم‌رویداد.[1] دو مسیر موازی را تصور کنید یکی در گوش چپ آغاز می‌شود و دیگری در راست. هر مسیر شاخه‌هایی با فاصله‌های ثابت دارد. وقتی سیگنال به هر گوش می‌رسد از آن مسیر به سمت پایین می‌گذرد و با میزان و نرخ ثابتی یکی پس از دیگری به هر شاخه می‌رسد؛ این خط تأخیر است. در برخی نقاط این دو سیگنال، که در جهت مسیر مخالف حرکت می‌کنند، به یکدیگر می‌رسند. شاخه‌های هر خط به ردیفی از ردیاب‌ها متصل هستند. این مدارهای ردیابی هم‌رویداد «روشن» می‌شوند، اگر و تنها اگر درون‌دادهای هر دوی آن‌ها سیگنالی را همزمان دریافت کنند. این نقطه همراه با ردیف‌هایی که در همان زمان ردیاب هم‌رویداد روشن شده است –یعنی جایی که سیگنال از دو خط تأخیر همدیگر را قطع می‌کنند– مستقیماً متناسب با *مکانی* هستند که صدا در اصل از آنجا می‌آید. اگر صدا از سمت راست جغد می‌آید پس به گوش راست می‌رسد و سفر خود را نخست به سمت پایین آن خط تأخیر آغاز می‌کند. چون سیگنالی که نخست به گوش راست می‌رسد بیشتر در راستای خط تأخیر راست حرکت می‌کند تا چپ. بنابراین نقطه‌ای که در آن سیگنال‌ها یکدیگر را قطع می‌کنند و ردیاب هم‌رویدادی روشن می‌شود از گوش راست دورتر (و نزدیک‌تر به

1. delay lines and coincidence detectors

چپ) است. این نوع مدار در تصویر۱ نمایش داده شده است. هستهٔ لامیناریس[1] مجموعه‌ای از سلول‌های عصبی در بخش کوچکی از ساقهٔ مغزی[2] جغد است که به نظر می‌رسد دقیقاً درست همان‌طور که شرح یافت کار می‌کنند. این مدار عصبی الگوریتم ردیابی هم‌رویدادی را اجرا می‌کند که این الگوریتم به نوبهٔ خود محاسبات نگاشت صدا به مکانی در فضا را برعهده دارد.

واقعاً مهم و قابل‌توجه است که دیگر مغزها صداها را به‌صورت کاملاً متفاوتی به مکان تبدیل می‌کند. موش مزرعه[3] که در موقعیت بالا ممکن است طعمهٔ خوبی برای جغدِ به شمار رود نیز برای تخمین‌زدن جای احتمالیِ چیزها (مانند مکان حرکت و فروجهیدن جغد) از صداها استفاده می‌کند. اما موش‌ها از الگوریتم‌های متفاوتی استفاده می‌کنند و عملکردهای اجرایی عصبی متفاوتی دارند. برای مثال برای حل چالش محاسباتی یکسان یعنی تبدیل صدا به مکان آن‌ها بیشتر از تفاوت در شدت و بسامد[4] صدا استفاده می‌کنند تا زمان‌بندی (گروث و همکاران، ۲۰۱۰).



تصویر ۱: مکان‌یابی شنیداری در مغز جغد انبار. جغد انبار برای پیدا کردن طعمه باید صداهای شنیده‌شده را به مکان تبدیل کند. یک الگوریتم برای دستیابی به این محاسبات یک جفت از خطوط تأخیر را که هرکدام از یک گوش است، با ردیاب‌های هم‌رویداد ترکیب می‌کند. با آغاز تأثیرهای آوایی بر گوش (رسیدن صدا به هر گوش) فعال‌سازی در آن گوش با نرخ ثابتی از خط تأخیر به سمت پایین می‌گذرد؛ در تصویر این پدیده ابتدا برای گوش راست و سپس چپ روی می‌دهد. ردیاب‌های هم‌رویدادی، زمانی را شناسایی می‌کنند که سیگنال‌ها یکدیگر را قطع می‌کنند. مکان صدا با ردیابی هم‌رویدادی‌ای کدگذاری می‌شود که فعال شده است و در تصویر بالا با دایرهٔ خاکستری مشخص شده است. تصویر نشان‌دهندهٔ مدار عصبی‌ای است که این الگوریتم خاص را در مغز جغد انبار اجرا می‌کند.

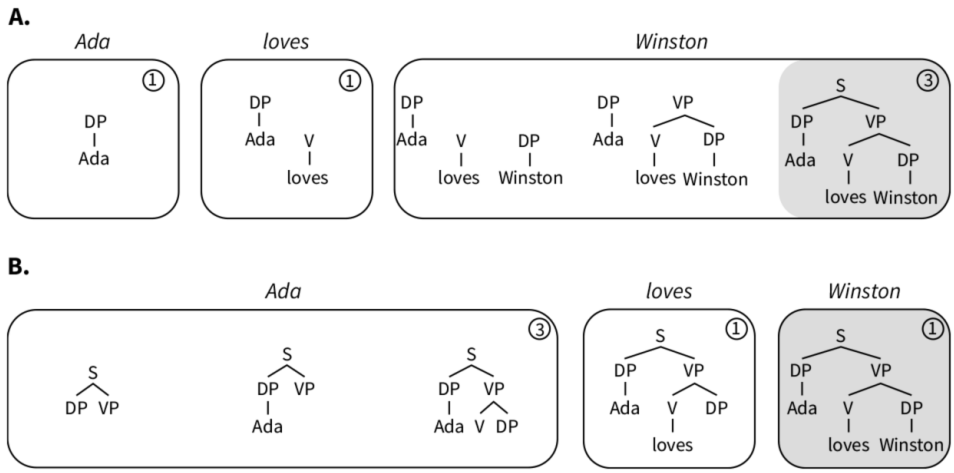
1. nucleuslaminaris
2. brain stem
3. field mouse
4. intensity and frequency

در اینجا می‌بینیم که مطالعهٔ سیستم به‌صورت همزمان با رویکردهای چندگانه چقدر می‌تواند مفید باشد: رویکردهای محاسباتی، الگوریتمی و اجرایی. همان‌طور که در جغد انبار مشاهده شد پاسخ‌ها در هر سطح مجزا می‌تواند با یکدیگر پیوند یابد تا شرحی منسجم از کل سیستم به دست دهد. هرچند همچنین شما مشاهده می‌کنید که چنین پیوندهاییاصلاً ساده نیستند؛ تفاوت‌های بین موش مزرعه و جغد نشان می‌دهد پاسخ‌ها در یک سطح توصیفی لزوماً چگونگی عملکرد سیستم‌ها در سطح دیگر را مشخص نمی‌کنند.

مثال سوم و آخرین نمونه از زبان است. در پایان، می‌خواهم مخصوصاً سرنخی از چگونگی این پیوندها بین سطوح محاسباتی، الگوریتمی و اجرایی در زبان به دست آوریم. جملهٔ سادهٔ زیر را در نظر بگیرید:

ایدا وینستون را دوست دارد.

Winston Ada loves



تصویر ۲: دو راهبرد برای ساخت سازه. این تصویر دو راهبرد الگوریتمی متفاوت برای چگونگی محاسبهٔ احتمالی ساخت دستوری جملهٔ «Ada loves Winston» توسط مغز را نشان می‌دهد. A) راهبرد «پایین به بالا» غیر-پیشگویانه[1] را نشان می‌دهد که در آن ساخت فقط در هنگام رویارویی با همهٔ واژه‌های جمله ساخته می‌شود. اعددی که دور آن‌ها دایره کشیده شده است شمار ساخت‌های دستوری «ساخته‌شده» در هر مرحله را نشان می‌دهد. B) راهبرد بیشتر متمایل به رویکرد «بالا به پایین» را نشان می‌دهد که در آن ساخت دستوری همراه با پیش‌بینی واژه‌های بعدی ساخته می‌شود. هریک از کادرهای مربعی شکل ساخت نحوی‌ای را نشان می‌دهد که پس از رویارویی با هر واژه در جمله ساخته می‌شود. به این نکته توجه شود که ساخت دستوری پایانی در هر دو راهبرد A و B، که با رنگ خاکستری نشان داده شده است، کاملاً یکسان هستند.

1. non-predictive