جريس لينزي

# نماذج العقل

## كيف شكلت الفيزياء والهندسة والرياضيات فهمنا للدماغ

ترجمة نهى صلاح

# نماذج العقل

## كيف شكلت الفيزياء والهندسة والرياضيات فهمنا للدماغ

**تأليف**
**جريس لينزي**

ترجمة
نهى صلاح

مراجعة
هاني فتحي سليمان

هنـــداوي

# نماذج العقل

جريس لينزي

# Models of the Mind

Grace Lindsay

**الناشر مؤسسة هنداوي**
المشهرة برقم ١٠٥٨٥٩٧٠ بتاريخ ٢٦ / ١ / ٢٠١٧

يورك هاوس، شييت ستريت، وندسور، SL4 1DD، المملكة المتحدة
**تليفون:** ٨٣٢٥٢٢ ١٧٥٣ (٠) ٤٤ +
**البريد الإلكتروني:** hindawi@hindawi.org
**الموقع الإلكتروني:** https://www.hindawi.org

إنَّ مؤسسة هنداوي غير مسئولة عن آراء المؤلف وأفكاره، وإنما يعبِّر الكتاب عن آراء مؤلفه.

---

تصميم الغلاف: ولاء الشاهد

الترقيم الدولي: ٠ ٣٣٧١ ٥٢٧٣ ١ ٩٧٨

صدر الكتاب الأصلي باللغة الإنجليزية عام ٢٠٢١.
صدرت هذه الترجمة عن مؤسسة هنداوي عام ٢٠٢٣.

جميع حقوق النشر الخاصة بتصميم هذا الكتاب وتصميم الغلاف محفوظة لمؤسسة هنداوي.
جميع حقوق النشر الخاصة بالترجمة العربية لنص هذا الكتاب محفوظة لمؤسسة هنداوي.
جميع حقوق النشر الخاصة بنص العمل الأصلي محفوظة لدار نشر بلومزبري بابليشينج بي إل سي.

Copyright © Grace Lindsay, 2021. This translation of Models of the Mind is published by Hindawi Foundation by arrangement with Bloomsbury Publishing Plc.

# المحتويات


| | |
|---|---|
| شكر وتقدير | ٧ |
| ١- الأبقار الكروية | ٩ |
| ٢- آلية إطلاق جهد الفعل في الخلايا العصبية | ١٧ |
| ٣- تعلُّم الحَوْسَبة | ٤٣ |
| ٤- تكوين الذكريات والاحتفاظ بها | ٧١ |
| ٥- الاستثارة والتثبيط | ٩٩ |
| ٦- مراحل الرؤية | ١٢٥ |
| ٧- فك الشفرة العصبية | ١٥١ |
| ٨- الحركة بأبعاد محدودة | ١٧٧ |
| ٩- من البنية إلى الوظيفة | ٢٠٣ |
| ١٠- اتخاذ قرارات عقلانية | ٢٢٧ |
| ١١- كيف توجه المكافآت الأفعال | ٢٥١ |
| ١٢- النظريات الموحدة العظمى الخاصة بالدماغ | ٢٧٧ |
| ملحق الرياضيات | ٢٩٥ |
| المراجع | ٣٠٥ |

# شكر وتقدير

حين كنتُ أؤلف هذا الكتاب كنت حاملًا في طفلي الأول. يقال إن تربية طفل تحتاج لدعم من المجتمع المحيط ككل. وأظن أن هذه المقولة صحيحة في نهاية المطاف، إلا أنها حتى الآن تُمثِّل تجربة فردية بالنسبة لي. في المقابل، تتطلب مهمة تأليف كتاب مساعدة الجميع منذ البداية.

في البداية أودُّ أن أتوجه بالشكر إلى زوجي جوش. التقينا أثناء حصولنا على درجة الدكتوراه في مركز علم الأعصاب النظري في كولومبيا، وهو ما يعني أنه كانت تقع عليه مسئولية تقديم الدعم المعنوي والعلمي المتمثل في التحقُّق من الحقائق خلال عملية التأليف. كما أنه لم يألُ جهدًا في التأكد من أنني أتناول الوجبات المناسبة وأرى بعض الأصدقاء أحيانًا. أود أيضًا أن أشكر أفراد عائلتي شارون وروجر ولوري على دعمهم وتشجيعهم.

أدين لجماعة نيورايت بدَينٍ هائل. لقد انضمَمت لمجموعة العلماء والكُتاب حين كنت طالبةَ دراسات عُليا في نيويورك، وسرعان ما التحقت بفرعهم في لندن حين انتقلت إلى المملكة المتحدة. بالإضافة إلى إيصالي بالأشخاص في سيجما، قدَّم لي أعضاءُ نيورايت المشورة والدعم المعنوي فيما يتعلق بتأليف كتاب بشكلٍ عام. ساعدت فرصة عقد ورَش عمل لمناقشة فصول الكتاب على تهدئة قلقي من الكتابة، كما جعلت الكتاب أفضل. وأوجِّه شكري الخاص لكلٍّ من ليام درو وهيلين سكيلز وروما أجراوال وإيما برايس.

لقد اعتمدت على العديد من الأصدقاء — سواء أكانوا علماء أعصاب ممارسين أم لا — في الحصول على البيانات وتلقِّي التقييم بشأن الكتاب. إنهم جعلوا هذه الفصول أكثر وضوحًا. أتوجَّه بمزيد من الشكر إلى نانسي باديلا ويول كانج وفيشال سوني، وجيسيكا أوبيسيكير وفيكتور بوب وسراجين تيرني، وجانا كوين وجيسيكا جريفز وأليكس كايكو جاجيتش، ويان سويني و(أختي) آن لينزي.

بالإضافة إلى ذلك، اعتمدتُ على مجتمع الباحثين في مجال علم الأعصاب المتنوع وغير المنظم على «تويتر»، لاستخلاص الأفكار وحشد الموارد. أوجِّه الكثير من الشكر لهذا الحشد الملتزم من الأصدقاء والغُرباء على حدٍّ سواء!

لقد تواصلت مع بعض الباحثين ذوي الخبرة الخاصة للنظر في فصولٍ مختلفة. وأنا مُمتنَّة جدًّا لوقت ومعرفة أثاناسيا بابوتسي وريتشارد جولدن، وستيفانو فوسي وهنينج سبريكيلر، وكوري مالي ومارك همفريز، وجان دروجويتش وبليك ريتشاردز. أي أخطاء وُجدت في النص هي خَطَئي بالتأكيد.

يُعد فريق بلوومزبيري سيجما السبب في جعل هذا الكتاب حقيقة، بدلًا من أن يظل مجرد أمنية عشوائية في عقلي. أود شكر جيم مارتن وآنا ماكديارميد على رعايتي أنا والكتاب خلال هذه العملية.

أتوجَّه بالشكر العام إلى عائلتي (خاصة شقيقتَيَّ سارة وآن) وأصدقائي الذين كانوا يسمعون بصبرٍ عن «الكتاب» لبعض الوقت. وأخيرًا، أودُّ أن أُعرب عن امتناني لمجتمع علم الأعصاب الحاسوبي ككل. لقد منحني التجوُّل في هذا المجال لما يقرب من ١٠ سنوات، والانغماس في المعرفة المستقاة من العديد من الباحثين المختلفين؛ الأساسَ المناسب لتأليف هذا الكتاب.

الفصل الأول

# الأبقار الكروية

ما الذي تقدمه الرياضيات؟

يسكن العنكبوت الغازل المداري «سايكلوسا أوكتوتيوبركيولاتا» العديد من المواقع داخل اليابان وحولها. هذا العنكبوت — الذي لا يتجاوز حجمُه حجم ظُفر الإصبع، وتغطيه بقعٌ صغيرة للتخفِّي بألوانٍ ثلاثةٍ هي الأسود والأبيض والبني — يُعد من المفترسات الماكرة. يتمركز العنكبوت الغازل المداري في الشبكة التي غزلها بعناية، وينتظر إلى أن يشعر بالاهتزازات التي تحدثها الفريسة في خيوط الشبكة محاوِلةً الفرار. وبمجرد أن يستشعر العنكبوت هذه الحركة، يندفع في اتجاه الإشارة، مستعدًّا لالتهام فريسته.

في بعض الأحيان، يشيع وجود الفريسة في أحد المواقع على الشبكة أكثر من غيره. والمفترسات الماكرة هي التي تُتابع مرات التكرار هذه وتستغل ذلك. فبعض الطيور، على سبيل المثال، تتذكر الأماكن التي كان الغذاء فيها وفيرًا، وتعود إلى هذه الأماكن فيما بعد. ويفعل العنكبوت الغازل المداري شيئًا مشابهًا، لكن ليس متطابقًا. فبدلًا من تذكُّر الأماكن التي حالفه فيها الحظ — أي بدلًا من أن يخزِّن هذه الأماكن في عقله ويجعل ذلك يُوجِّه انتباهه في المستقبل — يغزل هذا العنكبوت حرفيًّا هذه المعلومات على شبكته. وعلى وجه التحديد، يستخدم أرجُله ليشدَّ الخيوط الحريرية المحددة التي عثر فيها مؤخرًا على الفريسة، جاعلًا هذه الخيوط مشدودةً أكثر من غيرها. تتسم الخيوط المشدودة أكثر بأنها أشد حساسيةً للاهتزازات، وهو ما يُسهِّل عملية اكتشاف الفريسة القادمة على هذه الخيوط.

بإدخال العنكبوت الغازل المداري هذه التغييرات على شبكته، يتخفف من بعض الأعباء المتعلقة بالإدراك ويلقي بها على البيئة. فهو يُطلق معرفته الحالية وذاكرته في صورة مادية مضغوطة، لكنها ذات معنًى، واضعًا بذلك علامة في العالم المادي ترشده في عمله المستقبلي. ويُعد النظام التفاعلي المؤلف من العنكبوت وشبكته أكثر ذكاءً مما يمكن أن يكون عليه العنكبوت بمفرده. ويُطلَق على الاستعانة بمصدرٍ خارجيٍّ من البيئة بهدف الإدراك مصطلح «الإدراك الممتد».

وتعدُّ الرياضيات من أشكال الإدراك الممتد.

عندما يُدوِّن عالم أو عالم رياضيات أو مهندس معادلةً ما، فإنه يوسع نطاق قدراته الذهنية. فهو يخفف من حمل معرفته بالعلاقات المعقدة من خلال تحويلها إلى رموز على الورق. بتدوين هذه الرموز، فإنه يترك أثرًا لتفكيره للآخرين أو لنفسه في المستقبل. يَفترض علماء الإدراك أن العناكب والحيوانات الدقيقة الأخرى تعتمد على الإدراك الممتد؛ لأن أدمغة هذه الكائنات محدودة جدًّا، بحيث لا يمكنها أداء جميع المهام العقلية المعقدة اللازمة كي تزدهر في بيئتها. ونحن لسنا بمنأًى عن ذلك. فبدون أدوات، مثل الرياضيات، كانت قدرتنا على التفكير والتصرُّف بفاعليةٍ في العالم ستُصبح محدودةً بشدَّة.

وتُحسِّن الرياضيات من قدراتنا في بعض الجوانب بالقدر الذي تحسن به اللغة المكتوبة من قدراتنا. إلا أن الرياضيات تتجاوز في تأثيرها لغة الحياة اليومية؛ نظرًا لأنها لغة يمكن تطبيقها عمليًّا. فميكانيكا الرياضيات — ويُقصد بها قواعد إعادة ترتيب الرموز والتعويض عنها وفكُّ الأقواس التي تحتوي عليها — ليست اعتباطية. بل هي طريقة منهجية لنقل عملية التفكير إلى الورق أو الآلات. أعيدت صياغة ما قاله عالم الرياضيات الجليل ألفريد وايتهيد — الذي عاش في القرن العشرين، والذي سنتناول أعماله في الفصل الثالث — على النحو التالي: «يتمثل الهدف الأسمى للرياضيات في التخلص من الحاجة إلى التفكير البشري.»

وبناءً على هذه السمة المفيدة التي تتسم بها الرياضيات، أرست بعض المجالات العلمية — على رأسها الفيزياء — تقاليد تتمحور حول التفكير الكمِّي الدقيق. استفاد العلماء في هذه المجالات من قوة الرياضيات لقرون. فقد كانوا على دراية بأن الرياضيات هي اللغة الوحيدة التي تتسم بالدقة والكفاءة الكافيتَين لوصف العالم الطبيعي. وكانوا على علمٍ بأن الترميز المتخصص للمعادلات يضغط المعلومات ويختصرها، جاعلًا المعادلة أشبه بصورة تَعدِل ألف كلمة. وكانوا على علم أيضًا بأن الرياضيات تحافظ على نزاهة العلماء. فعند

التواصل باستخدام الصيغ الرياضية، يُكشف مدى صحة الافتراضات ولا يكون هناك مكان للغموض. وبهذه الطريقة، تفرض المعادلات التفكير الواضح المترابط. في هذا الصدد، كتب برتراند راسل (زميل وايتهيد الذي سنأتي على ذكره في الفصل الثالث): «كل الأشياء تكون مبهمة بدرجةٍ لا ندركها إلى أن نحاول أن نُوَصِّفها بطريقة محددة.»

الدرس الأخير الذي تعلمه العلماء الذين يتبعون التفكير الكمِّي هو أن جمال الرياضيات يكمن في قدرتها على الجمع بين ما هو محدَّد وما هو عامٌّ. على سبيل المثال، يمكن للمعادلة أن تُحدِّد بالضبط كيفية تأرجُح البندول في الساعة البارومترية عند مدخل الوزراء في قصر باكنجهام، ويمكن للمعادلة نفسها وصف الدوائر الكهربية المسئولة عن بث محطات الإذاعة حول العالم. عند وجود تشابهٍ بين آليتَين أساسيتَين، فإن المعادلات تُشكِّل تجسيدًا لهذا التشابه. وكما أن ثمة خيطًا غير مرئي يربط الموضوعات المتباينة معًا، فإن الرياضيات هي الوسيلة التي يمكن من خلالها أن يكون للتطوُّرات في أحد المجالات تأثيراتٌ مدهشةٌ ومتباينةٌ على مجالاتٍ أخرى بعيدة.

استوعب علم الأحياء — بما في ذلك دراسة الدماغ — الرياضيات ببطءٍ أكبر مقارنةً بالمجالات الأخرى. فعلى مدار التاريخ، رَمَق بعضُ علماء الأحياء الرياضياتِ — لأسبابٍ وجيهة وأخرى غير منطقية — بعين الشك. فقد كانوا يَرَوْن أن الرياضياتِ أكثر تعقيدًا من اللازم، وفي الوقت نفسه أبسط من اللازم بحيث لا تَتسنَّى الاستفادة منها كثيرًا.

رأى بعض علماء الأحياء الرياضيات بالغةَ التعقيد؛ لأنهم، نظرًا لكونهم مُدرَّبين على الممارسات العملية المتمثِّلة في إجراء التجارب في المختبر وليس على التفاصيل المجردة التي تتضمَّنها المفاهيم الرياضية، يَرَون المعادلات الطويلة مجرد حبرٍ على ورق. فمن دون رؤية المغزى من الرموز يمكنهم الاستغناء عنها. كتب عالم الأحياء يوري لازيبنيك عام ٢٠٠٢ التماسًا للاستعانة بالمزيد من الرياضيات في مجاله على النحو الآتي: «في علم الأحياء، نستخدم العديد من الحُجج لإقناع أنفسنا بأن المسائل التي تتطلَّب التفاضُل والتكامُل يمكن حلها باستخدام الحساب، إذا حاول المرء جاهدًا وأجرى مجموعة أخرى من التجارب.»

وفي الوقت نفسه، تُعتبر الرياضيات أبسط بكثير من أن تستوعب الثراء الساحق الذي تتسم به الظواهر الحيوية. وقد أبرزت إحدى النكات القديمة المتبادلة بين علماء الفيزياء المستوى السخيف من التبسيط الذي تتطلَّبه بعض النُّهُج الرياضية في بعض الأحيان. تبدأ النكتة بأحد المزارعين في مزرعة ألبان يواجه صعوبات في إنتاج الألبان. وبعد أن جرَّب كل شيء خطر بباله، كي يجعل أبقاره الحبيبة تدرُّ مزيدًا من اللبن، قرر أن يطلب المساعدة

من عالم فيزياء يعمل في الجامعة المحلية. استمع عالم الفيزياء إلى المشكلة بعناية وعاد إلى مكتبه كي يفكر. بعد بعض التفكير، عاد إلى المزارع وقال: «وجدت حلًّا. أولًا: علينا أن نفترض وجود أبقار كُرَوية في الفراغ ...»

المقصد من هذه النكتة هو أن تبسيط المشكلة لأبسط صيغة هو ما يسهل تحليلها رياضيًّا، لكن هذا التبسيط يؤدي إلى فقدان بعض التفاصيل البَيولوجية حتميًّا، عند تحويل المشكلة من أرض الواقع إلى معادلة. نتيجةً لذلك، يتعرَّض الذين يتبعون النُّهُج الرياضية للاستخفاف بهم من آنٍ لآخر؛ نظرًا لكونهم لا يُعيرون مثل هذه التفاصيل اهتمامًا. في كتابه «نصيحة لباحث شاب» الصادر عام ١٨٩٧، كتب سانتياجو رامون إي كاخال (الأب الروحي لعلم الأعصاب الحديث الذي سنتناول إسهاماته في الفصل التاسع) عن العلماء النظريين الذين يتجنَّبون الحقيقة، في فصل بعنوان: «عِلل الإرادة». وقد عرَّف أعراض هذه العِلَل على النحو الآتي: «سهولة الشرح التفصيلي، والخيال الإبداعي المضطرب، والنفور من المختبر، والكراهية الشديدة للعلم المحسوس، والبيانات التي يتضح ظاهريًّا أنها غير مهمة.» وقد تحسَّر كاخال أيضًا على تفضيل العلماء النظريين للجمال على حساب الحقائق. يدرس علماء الأحياء الكائنات الحية التي تتوفر فيها سمات محددة، واستثناءات دقيقة لأي قاعدة. أما علماء الرياضيات، الذين تحكمهم البساطة والتنظيم وتسهيل الأشياء كي تسهل إدارتها، فيقضون على هذه الوفرة عند تمثيل هذه المواقف الحياتية في صورة معادلات.

يمثل التبسيط المفرط والوَلَع بالجماليات العراقيل التي ينبغي تجنبها عند تطبيق الرياضيات على العالم الواقعي. وفي الوقت نفسه، ثراء علم الأحياء وتعقيده هما ما يجعلانه في حاجة إلى الرياضيات.

لنتأمل مسألةً بيولوجية بسيطة. ثمة نوعان من الحيوانات في الغابة، وهما الأرانب والثعالب. تتغذى الثعالب على الأرانب، وتتغذى الأرانب على الحشائش. إذا احتوت الغابة منذ البداية على عدد محدد من الثعالب وعدد محدد من الأرانب، فماذا سيحدث لهاتَين الجماعتَين؟

ربما تلتهم الثعالبُ الأرانب بشراسة، متسبِّبة في انقراضها. لكن الثعالب ستموت جوعًا وستهلك تلقائيًّا بعدما ينضب مصدر غذائها. هذا يخلِّف لنا غابة فارغة. في المقابل، قد لا تكون جماعة الثعالب نهِمةً بدرجةٍ كبيرة. ربما تُخفِّض أعداد الأرانب إلى عددٍ يقترب من الصفر، لكنه ليس صفرًا. سيقلُّ عدد الثعالب بينما يكافح كلُّ واحدٍ منها للعثور على الأرانب المتبقِّية. بعد ذلك، مع تساقط معظم أعداد الثعالب، يمكن للأرانب العودة مرةً

أخرى والتجمُّع. بالطبع يصبح غذاء الثعالب وفيرًا مرةً أخرى، وإذا تبقَّى عددٌ كافٍ، يمكن أن تزداد أعدادها مرة أخرى أيضًا.

فيما يتعلق بمعرفة انعكاسات هذا الأمر على الغابة، ثمة قيدٌ واضح يُقلص اعتمادنا على الحدس. فمحاولة التأمل في هذا السيناريو، بهذه البساطة، باستخدام الكلمات والقصص وحدها؛ تُعد أمرًا غير كافٍ. لتحقيق تقدُّم، علينا تعريف الحدود أو الأطراف بدقةٍ وصوغ العلاقة بينها بالضبط، وهذا يعني أننا نؤدي عملياتٍ حِسابية.

في الواقع، النموذج الحسابي الذي يمثل العلاقة بين المفترس والفريسة، الذي يمكنه مساعدتنا في هذه الحالة يُطلق عليه نموذج «لوتكا-فولتيرا»، وقد طُوِّر في عشرينيات القرن العشرين. يتكون نموذج «لوتكا-فولتيرا» من معادلتَين: إحداهما تصف معدل زيادة أعداد الفرائس بدلالة أعداد الفرائس والمفترِسات، والأخرى تصف معدل زيادة أعداد المفترِسات بدلالة أعداد المفترِسات والفرائس. باستخدام نظرية النظم الديناميكية، وهي مجموعة من الأدوات الرياضية التي وُضِعت لوصف العلاقات المتبادلة بين الأجرام السماوية، يمكن لكلٍّ من هاتَين المعادلتَين أن يخبرنا عما إذا كانت الثعالب ستنقرض، أم الأرانب هي التي ستنقرض، أم سيستمرُّ تزايد إحدى المجموعتَين وتناقص الأخرى إلى الأبد. بهذه الطريقة، يساعدنا علم الرياضيات على فَهْم علم الأحياء على نحوٍ أفضل. ومن دونه، سنصبح مقيَّدين بمواهبنا المعرفية الفِطرية. في هذا الصدد، كتب لازيبنيك ما يأتي: «فَهْم نظام [معقد] دون أدوات تحليلية شكلية يتطلب عباقرة، وهم نُدرة، حتى خارج مجال علم الأحياء.»

النظرُ إلى بعض موضوعات علم الأحياء ومعرفةُ كيفية اختصارها في صورة متغيراتٍ ومعادلات يتطلَّبان إبداعًا وخبرة وحُسن تمييز. يتعيَّن على العالِم أن ينظر عن كثَب إلى تفاصيل العالَم الواقعي المبعثرة هُنا وهُناك، ويُحدد الهيكل الأساسي الذي تُبنى عليه هذه التفاصيل. ولا بد أن يكون كل مكوِّن من مكونات النموذج مُعرَّفًا تعريفًا صحيحًا ودقيقًا. وبمجرد أن يوجد الهيكل الأساسي وتُكتب المعادلة، تصبح ثمار هذا النظام واضحة جَلِية. النماذج الرياضية تُعد طريقة لوصف نظريةٍ تتناول آلية عمل نظام بيولوجي بدقة تكفي لتوصيل هذه الآلية للآخرين. فإذا كانت هذه النظرية صالحة، يمكن استخدامُ النموذج أيضًا للتنبُّؤ بنتائج التجارب المستقبلية ولتجميع النتائج السابقة. وبحلِّ هذه المعادلات على الكمبيوتر، تقدِّم لنا هذه النماذج «مختبرًا افتراضيًّا»، أي طريقة تُمكِّننا من التعويض بقيم مختلفة، لنرى كيف يؤدي ذلك إلى الحصول على سيناريوهاتٍ مختلفة، حتى إنها تمكننا من إجراء المعادلات التي لا تزال تتعذَّر في العالم الواقعي. بالتعامل مع هذه السيناريوهات

والافتراضات ومعالجتها رقميًّا بهذه الطريقة، تساعد النماذجُ العلماء على تحديد عناصر النظام التي تؤدي الغرض منها، والأهم من ذلك، تلك التي لا تؤدي الغرض منها.

هذا العمل المتكامل يصعب إجراؤه باستخدام القصص البسيطة التي لا تدعمها الرياضيات. في هذا الصدد، أوضَح لاري أبوت — أحد العلماء البارزين في مجال علم الأعصاب النظري، وأحد المؤلفين المشاركين في تأليف[1] واحدٍ من أكثر الكتب استخدامًا في هذا المجال — في مقالٍ نُشر عام ٢٠٠٨ ما يأتي:

> تفرض المعادلات على النموذج الدقة والاكتمال والاتساق الذاتي، كما تُتيح فهم تضميناته الكاملة. ليس من الصعب إيجاد نماذج كلامية تبدو منطقية في خاتمة الأوراق البحثية الأقدم التي تتناول موضوعاتٍ في علم الأعصاب، إلا أننا عند التعبير عنها في صورة نماذج رياضية، يتضح أنها متناقضة ولا يمكن التعامل معها. الصياغة الرياضية لنموذج ما تُحتم عليه أن يكون مُتَّسقًا مع ذاته، وعلى الرغم من أن الاتساق الذاتي لا يُعد حقيقة بالضرورة، فإن التضارب الذاتي يُعد خطأ.

يُعد الدماغُ — الذي يتكون (في حالة البشر) من نحو ١٠٠ مليار خلية عصبية، وتعدُّ كلُّ خلية عصبية مَصنعًا مُفعمًا بالحيوية من المواد الكيميائية والكهرباء، وتتواصل جميع الخلايا العصبية بعدة طرقٍ مع الخلايا المجاورة لها، القريبة منها والبعيدة — المثالَ الأبرز على الأجسام البيولوجية المعقدة لدرجة أنه لا يمكن فهمها دون رياضيات. الدماغ هو مركز الإدراك والوعي. فهو مسئول عن آلية الشعور والتفكير والحركة وإدراك الذات. وهو المكان الذي يَجري فيه التخطيط للأحداث اليومية وتخزين الذكريات، وهو مصدر الشعور بالعواطف، والمكان الذي تُتَّخَذ فيه القرارات، وتُقرأ الكلمات. وهو مصدر الإلهام للذكاء الاصطناعي، ومصدر الاعتلال النفسي. فَهْمُنا لكيفية إنجاز مجموعة من الخلايا الفردية كلَّ هذه الأمور، لتصبح بذلك حلقة الوصل بين الجسم والعالم الخارجي، يتطلبُ نماذج رياضية على عِدة مستويات.

على الرغم من التردد الذي شعر به بعض علماء الأحياء حِيال الاستعانة بالنماذج الرياضية، يمكن إيجاد هذه النماذج مستترة في كل ركن من أركان تاريخ علم الأعصاب.

[1] بالاشتراك مع بيتر دايان الذي سنأتي على ذكره في الفصل الحادي عشر.

فيما مضى، كان علم الأعصاب النظري أو الحاسوبي هو مجال دراسة الفيزيائيين المحبين للمغامرة وعلماءِ الرياضيات الهائمين، أما الآن، فقد أصبح علم الأعصاب النظري أو الحاسوبي أحد الأقسام المطَوَّرة بالكامل التي يشتمل عليها مشروع علم الأعصاب، وله دوريات ومؤتمرات وكتب، ومصادر تمويل مخصصة. وتؤثر طريقة التفكير الرياضية على دراسة الدماغ بالكامل. في هذا الصدد، أوضَح أبوت الآتي: «اعتاد الناس على أن علم الأحياء هو الملجأ الذي يفِرُّ إليه الطلاب الهاربون من دراسة الرياضيات، أما الآن، فقد أصبح طلاب العلوم الحيوية يتمتعون بمعرفة جيدة بمبادئ الرياضيات والبرمجة الحاسوبية، وهؤلاء هم الذين لم يندموا على عدم تعلم مبادئ الرياضيات.»[٢]

في الوقت نفسه، لا يمكننا أن نتجاهل تمامًا تخوُّفات علماء الأحياء من النماذج الرياضية. يقول عالم الإحصاء جورج بوكس في بداية عبارته الشهيرة: «كل النماذج مغلوطة.» بالفعل كل النماذج «مغلوطة»؛ لأن كل النماذج تتجاهل بعض التفاصيل. كل النماذج مغلوطة أيضًا؛ لأنها لا تُمثِّل إلا وجهة نظر مُتحيِّزة للعمليات التي تزعم أنها تتناولها. كل النماذج مغلوطة؛ لأنها تفضل البساطة على الدقة المطلقة. جميع النماذج مغلوطة على النحو الذي تكون به القصائد مغلوطة؛ فهي تركز على الجوهر حتى وإن لم يكُنِ الحقيقةَ التامة. يقول بوكس: «كل النماذج مغلوطة، لكن بعضها مفيد.» لو كان المزارع ذكَّر عالم الفيزياء بأن الأبقار ليست كُرَوية الشكل في حقيقة الأمر، لأجابه عالم الفيزياء قائلًا: «ومن يهتم؟» أو لمزيد من الدقة: «هل علينا أن نعبأ بهذا؟» فالتفصيل، لا لشيءٍ إلا للتفصيل فحسب، ليس فضيلةً في حد ذاته. الأمر أشبه بخريطة المدن، إذا كانت في حجم المدن تمامًا وتعرض ما في المدن بالتفصيل، فلن تفيدنا عمليًّا. تكمن المهارة عند تكوين النماذج الرياضية في تحديد التفاصيل المهمة، وتجاهل التفاصيل التي ليست لها أهمية.

يتناول هذا الكتاب باختصار تأثير التفكير الرياضي — المستمد من الفيزياء والهندسة والإحصاء وعلوم الكمبيوتر — على دراسة الدماغ. يروي كل فصل قصة علم الأحياء

[٢] هذا الشعور بالذنب قد لا يكون جديدًا كليًّا. كتب تشارلز داروين، وهو عالم أحياء ناجح بالتأكيد، في سيرته الذاتية عام ١٨٨٧: «لقد ندمت بشدَّة على أنني لم أمضِ قُدمًا بما يكفي لفَهْم بعض المبادئ الرائدة العظيمة في الرياضيات؛ إذ يُنظر إلى الأشخاص الذين يفهمون تلك المبادئ باعتبار أن لديهم حاسةً زائدة.»

والرياضيات، والتأثير المتبادل بين العلمَين في سياق موضوع مختلف من موضوعات علم الأعصاب. لا يشترط الكتاب أن تكون لدى القارئ معرفةٌ متخصصة في الرياضيات؛ إذ ستُشرح الأفكار التي تستند إليها المعادلات.[٣] لن يكتفي الكتاب بعرض نظرية واحدة للدماغ، بل ستحل النماذج المختلفة مسائل مختلفة وتعرض مناهج مُكمِّلة للفهم.

الفصول مرتبة من المستويات الأدنى للمستويات الأعلى؛ بدءًا من فيزياء الخلايا الفردية، ووصولًا إلى رياضيات السلوك. تتضمن الحكايات في هذه الفصول العقبات التي كانت تقف في طريق الجمع بين علم الرياضيات وعلم الأحياء، والعلماء الذين واجهوا تلك العقبات. أوضح هؤلاء العلماء أن النماذج تستفيد من التجارب العملية في بعض الأحيان، وفي أحيان أخرى تستفيد التجارب العملية من النماذج. كما أوضحوا أن النموذج قد يتراوح من بضعة معادلات مكتوبة في صفحة واحدة إلى كُود من عدد لا نهائي من السطور، يتم تشغيله على أجهزة كمبيوتر فائقة. ومن ثم، فإن الكتاب أشبه بسجادة جدارية مُطرَّز عليها الأشكال المختلفة التي تتخذها النماذج الرياضية الخاصة بالدماغ. وعلى الرغم من أن الموضوعات والنماذج التي يتناولها الكتاب متنوعة، فثمة أفكار مشتركة تتكرر عبر الصفحات.

بالطبع، قد يكون كل شيء في هذا الكتاب مغلوطًا. قد يكون مغلوطًا لأنه يتناول موضوعات علمية، وفهمنا للعالَم في تطور مستمر. وقد يكون مغلوطًا لأنه يتناول أحداثًا تاريخية، وثمة طرق متعددة تُروَى بها الحكاية الواحدة. والأهم من ذلك، قد يكون مغلوطًا لأنه يتناول الرياضيات. أنماط العقل الرياضية لا تُسهم في تكوين نسخة طبق الأصل تمامًا من الدماغ، ونحن لا نُكرِّسها لذلك من الأساس. ومع هذا فإنه في حالة دراسة أكثر الأجسام تعقيدًا في العالم المعروف بأسره لا تكون النماذج الرياضية مفيدة فحَسْب؛ بل تصبح ضرورة. فلا يمكن فَهْم الدماغ من خلال الكلمات وحدها.

[٣] أما بالنسبة لمحبِّي الرياضيات، فثمة ملحق، يشرح إحدى المعادلات الأساسية في كل فصل، مرفق في آخر الكتاب.

الفصل الثاني

# آلية إطلاق جهد الفعل في الخلايا العصبية

نموذج «التسريب – التجميع – الإطلاق»، ونموذج «هودجكين وهكسلي»

«القوانين التي تحكم المبدأ الذي يقوم عليه عمل الجهاز العصبي مختلفة تمامًا عن قوانين الكهرباء. ومن ثم فإن الحديث عن تيارٍ كهربيٍّ في الأعصاب يعني أننا نستخدم تعبيرًا رمزيًّا، وكأننا نُقارن المبدأ الذي يقوم عليه عمل الجهاز العصبي بالضوء أو المغناطيسية.» هكذا اختتم يوهانس مولر كتابه الصادر عام ١٨٤٠ تحت عنوان «دليل علم وظائف الأعضاء البشرية» الذي يزيد عن ٦٠٠ صفحة.

نال كتاب مولر — الذي يُعد بمثابة جولة شاملة عبر الجوانب الحديثة وغير المؤكدة في مجال علم وظائف الأعضاء — حظًّا وافرًا من القراءة. وقد عزز نشر الكتاب (لا سيما ترجمته شبه الفورية إلى اللغة الإنجليزية تحت عنوان «عناصر علم وظائف الأعضاء») سُمعة مولر باعتباره معلمًا وعالمًا موثوقًا به.

عمل مولر أستاذًا في جامعة هومبولت في برلين منذ عام ١٨٣٣ إلى أن تُوفي بعد ذلك بنحو ٢٥ عامًا. كان لديه اهتمام واسع بعلم الأحياء، وكان يتمتع باعتقادات فكرية راسخة. وقد كان من المؤمنين بالمذهب الحيوي، أي الفكرة القائلة بأن الحياة تعتمد على قوة حيوية منظِّمة تتجاوز التفاعلات الكيميائية والفيزيائية. كانت هذه الفلسفة جلية في تناوله لعلم وظائف الأعضاء. ففي كتابه لم يزعم بأن نشاط الأعصاب ليس له طبيعة كهربية فحسب؛ بل أوضح أنه «يستحيل تفسير طبيعته»، أي إن الحقائق الفسيولوجية لا يمكنها أن تكشف عن جوهره.

لكن مولر كان مخطئًا. فعلى مدار القرن الذي يليه، اتَّضح أن الروح التي اعتُقد أنها تتدفق داخل الأعصاب لم تكن سوى الحركة البسيطة للجسيمات المشحونة. وبذلك أصبحت الكهرباء الحبر الذي كُتبت به الشفرة العصبية. وفي النهاية أصبح تفسير طبيعة عمل الجهاز العصبي أمرًا ممكنًا.

اكتشاف الطبيعة الكهربية للجهاز العصبي لم تُبطِل المبدأ الحيوي الذي أقره مولر فحسب؛ بل قدَّم فرصة. وذلك بشق طريق يصل بين دراسة الكهرباء وعلم وظائف الأعضاء اللذَين يتطوران بسرعة، وهو ما سمح بتطبيق الأدوات المستخدمة في دراسة الكهرباء على المسائل التي يتناولها علم وظائف الأعضاء. على وجه التحديد، قدمت المعادلات — التي اختُصِرت عن طريق عدد لا نهائي من التجارب لتحديد السلوكيات الأساسية للأسلاك والبطاريات والدوائر الكهربية — لغةً يمكن بها وصف الجهاز العصبي. اتضح أن هناك رموزًا مشتركة بين المجالَين، لكن العلاقة بينهما كانت أكبر بكثير من كونها علاقة رمزية كما زعم مولر. اعتمدت دراسة الجهاز العصبي اعتمادًا كبيرًا على دراسة الكهرباء. هذا التعاون، الذي نُثرت بذورُه في القرن التاسع عشر، أخرج شطأه في القرن العشرين، وأزهر في القرن الحادي والعشرين.

هب أنك ذهبت لزيارة شخص متعلِّم ينتمي للطبقة العليا في أوروبا في القرن الثامن عشر، ربما كنت تجد ضمن أرفف الأدوات العلمية والمقتنيات الأخرى قارورة لايدن. قوارير لايدن، التي سُميت على اسم المدينة الألمانية لأحد مخترعيها، هي قوارير زجاجية تشبه معظم القوارير الأخرى. إلا أنها لا تخزِّن المربَّى أو الخضراوات المخللة؛ بل تخزِّن الشحنات. وتعد هذه الأداة، التي ابتُكرت في منتصف القرن الثامن عشر، نقطةَ تحولٍ في دراسة الكهرباء. ونظرًا لأن هذه الأداة تُعد صورة حرفية لتخزين الشحنات الكهربية من البرق في زجاجة، فقد أتاحت للعلماء، وغير العلماء على حدٍّ سواء، التحكُّم في الكهرباء ونقلها لأول مرة، موزِّعةً أحيانًا صدمات كهربية قوية بما يكفي للتسبب في نزيف الأنف وفقدان الوعي.

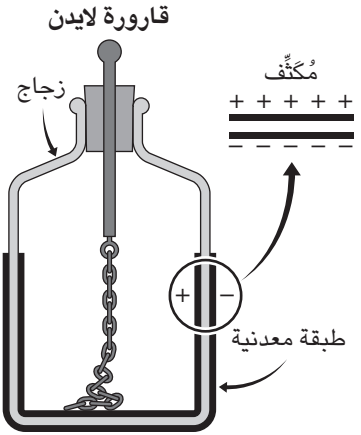
وفي حين أن قارورة لايدن قد تحتوي على مقدار كبير من الطاقة، فإن تصميمها في غاية البساطة. فالجزء السفلي داخل القارورة مغطًّى برقاقةٍ معدنية، وكذلك الجزء السفلي خارج القارورة. ينتج عن هذا طبقة من الزجاج محصورة بين طبقتَين من المعدن. تُضَخ الجُسَيمات، المشحونة داخل الرقاقة المعدنية الداخلية حتى تملأها بالكامل، عبر

سلسلة أو قضيب يتدلَّى من أعلى القارورة. تتجاذب الجسيمات ذات الشحنات المتعاكسة؛ ومن ثم فإنه إذا كانت الجسيمات التي تتحرك داخل القارورة موجبة الشحنة، على سبيل المثال، فستتراكم الجسيمات السالبة الشحنة على الجانب الخارجي من الزجاجة. إلا أن الجسيمات لا يمكنها الوصول لبعضها؛ لأن الزجاج يعزلها عن بعضها. وككلبَين متجاورَين يفصل بينهما سور، لا يسع الجسيمات إلا أن تصطفَّ على جانبَي الزجاج آملةً دون جدوى أن تقترب من بعضها.

سنُطلق اليوم على الجهاز الذي يحفظ الشحنة، مثل قارورة لايدن، اسم «المكثِّف». ينتج عن تفاوت الشحنات على جانبَي الزجاج فرقٌ في طاقة الوضع يُعرف بالجهد الكهربي. بمرور الوقت، مع إضافة مزيدٍ من الشحنات إلى القارورة يزداد الجهد الكهربي. إذا اختفى العازل الزجاجي — أو وُفِّر مسار آخر يؤدي إلى تلاقي هذه الجسيمات — فستتحول طاقة الوضع إلى طاقة حركة؛ نظرًا لأن الجسيمات ستتحرك نحو نظائرها. وكلما زاد الجهد الكهربي على جانبَي المكثِّف، أصبحت حركة الشحنات — أو التيار — أقوى. هكذا بالضبط ينتهي الأمر بصعق العديد من العلماء، إضافةً إلى الذين يُجرون التجارب من غير المتخصصين. فعن طريق التوصيل بين الجزأين الداخلي والخارجي من القارورة بأيديهم، يكونون بذلك قد فتحوا مسارًا لتدفُّق الجسيمات عبر أجسامهم مباشرة.

لويجي جلفاني هو عالم إيطالي ولد عام ١٧٣٧. ونظرًا لأنه كان شديد التديُّن على مدار حياته، فقد فكَّر في الالتحاق بالكنيسة قبل دراسة الطب في جامعة بولونيا. وهناك، لم يدرس أساليب الجراحة والتشريح فحسب؛ بل درس مجال الكهرباء الرائج آنذاك. كان المختبر الذي احتفظ به في بيته — حيث كان يعمل عن كثَب مع زوجته لوشيا ابنة أحد أساتذته — يحتوي على أدوات استكشاف لما هو بيولوجي ولما هو كهربي، تتضمن: مشارط ومجاهر، بالإضافة إلى آلاتٍ كهروستاتيكية، وبالطبع قارورات لايدن. ركز جلفاني في تجاربه الطبية على الضفادع، شأنه في ذلك شأن طلاب علم الأحياء لقرون، سواء الذين سبقوه أو الذين جاءوا من بعده. يمكن لعضلات الضفدع أن تستمر في العمل بعد وفاة الضفدع، وهي ميزة مستحبة، لا سيما عند محاولة تشريح الحيوان، وفي الوقت نفسه فَهْم الآلية التي يعمل بها جسمه.

ولولا التنوع الذي حظِي به مختبر جلفاني — وربما عدم تنظيمه — لما احتل صفحات في كتب العلوم الدراسية. كما ذكرت القصة، حرَّك أحد الأشخاص في المختبر (من الممكن أن تكون لوشيا) مشرطًا معدنيًّا حيث لامس العصب الوركي لضفدع ميت،




شكل ٢-١

في اللحظة نفسها التي انبعثت فيها شرارة عن طريق الخطأ من آلة كهربية ولامست المشرط، وهو ما جعل المشرط يحمل شحنة كهربية. انقبضت عضلات الضفدع في الحال، وهي ملاحظة قرر جلفاني أن يتقصَّى في شأنها بحماس. وفي كتابه الصادر عام ١٧٩١، وصف العديد من التحضيرات المختلفة التي قام بها من أجل إجراء تجارب المتابعة على «الكهرباء الحيوانية»، بما في ذلك مقارنة مدى كفاءة أنواع المعادن المختلفة في استثارة عمليات الانقباض، وكيفية توصيله لسلك بعصب الضفدع خلال عاصفة رعدية. شاهد رِجل الضفدع تنقبض مع كل وَمضة برقٍ.

كان هناك دائمًا تلميحات تُوضِّح أن الحياة تستفيد من الكهرباء. تنبأ ابنُ رُشد، أحد العلماء المسلمين في القرن الثاني عشر، بالعديد من الاستنتاجات العلمية، عندما لاحظ أن قدرة السمك الرَّعَّاش على تخدير الصيادين في مياهها قد تنبع من القوة نفسها التي تجذب الحديد إلى حَجَر المغناطيس. وفي السنوات السابقة لاكتشاف جلفاني كان الأطباء يستكشفون بالفعل استخدامات التيارات الكهربية في الجسم لعلاج كل شيء؛ بدءًا من الصَّمَم ووصولًا إلى الشَّلل. لكن مجموعة التجارب المتنوعة التي أجراها جلفاني جعلت دراسة الكهرباء الحيوية تتخطى التكهُّنات المحضة والتخمين. فقد جمع الأدلة ليوضح أن حركة الحيوانات تنتج عن حركة الكهرباء داخل أجسامها. وبهذا استنتج أن الكهرباء

قوة مُتأصِّلة في الحيوانات، وهي نوع من السوائل التي تتدفق عبر أجسامها بانتظام مثل الدم.

تماشيًا مع ما شهده علم الهواة من رواجٍ في ذلك الوقت، لدى سماع أخبار العمل الذي قام به جلفاني، شرع العديد من عموم الناس في تقليده. وعندما قام الأشخاص العاديون الفضوليون بتوصيل قوارير لايدن الخاصة بهم بأي ضفدع تمكَّنوا من الحصول عليه، رأوا الانقباضات والتشنُّجات نفسها التي رصدها جلفاني. كان تأثير العمل الذي أنجزه جلفاني واسع النطاق، لدرجة أنه — جنبًا إلى جنب مع فكرة حركة الكهرباء في الحيوانات — شقَّ طريقه إلى عقل الكاتبة الإنجليزية ماري شيلي وألهمها كتابة رواية «فرانكنشتاين».

ومع ذلك، كان هناك جرعة صحية من «الشك العلمي» تمثلت في أن ادعاءات جلفاني لم تَحْظَ بتأييد تام من جميع أقرانه الأكاديميين. فقد اعترف أَلِساندرو فولتا — العالم الإيطالي الذي سُميت وحدة قياس الجهد الكهربي باسمه — بأن الكهرباء قد تكون المتسببة بالفعل في عمليات الانقباض في الحيوانات. لكنه أنكر أن يكون معنى هذا أن الحيوانات تستخدم الكهرباء عادةً كي تتحرك. لم يرَ فولتا في تجارب جلفاني أي دليل على أن الحيوانات تُنتج كهرباءها الخاصة. فقد وجد في الحقيقة أن التلامس بين نوعَين مختلفَين من المعادن قد يولِّد الكثير من القوى الكهربية غير المحسوسة تقريبًا، وعليه فإن أي اختبار لوجود كهرباء حيوانية باستخدام معادن متلامسة يمكن أن تؤثر فيه كهرباء مولدة خارجيًّا. فيما يلي ما ذكره فولتا في خطاب كَتَبه عام ١٨٠٠: «وجدت نفسي مضطرًّا لمعارضة فكرة الكهرباء الحيوانية المزعومة التي ذكرها جلفاني، والإعلان أنها كهرباء خارجية المصدر تتحرك بفعل تلامس المعادن المختلفة.»[١]

لسوء حظ جلفاني، كان فولتا أصغر سنًّا وأكثر استعدادًا لمناظرةٍ علنية، ونجمُه يعلو في هذا المجال. ومن ثَم، فإنه خَصم هائل في المجال العلمي. قوة شخصية فولتا كانت تعني أُفول أفكار جلفاني لعُقود رغم صحتها في العديد من الجوانب.

صحيحٌ أن كتاب مولر قد نُشر بعد قُرابة ١٠ سنوات من وفاة فولتا، إلا أن اعتراضه على الكهرباء الحيوانية قد سار على المنوال نفسه. فهو ببساطة لم يعتقد أن الكهرباء

[١] في سياق إثبات أن تَلامُس المعادن المختلفة يولِّد كهرباء، اخترع فولتا البطارية في نهاية المطاف.

هي المادة التي ترسِل الإشارات العصبية، كما أن وزن الأدلة في ذلك الوقت لم يجعله يعدِل عن رأيه. بالإضافة إلى نزعة مولر للمذهب الحيوي، فإن عناده قد يكون نتيجة لتفضيله للملاحظة على حساب التدخل أو الوسيط. لا يهم إلى أي مدًى تزايدت أمثلة الحيوانات التي استجابت للكهرباء خارجية المصدر على مدار السنوات؛ فهي لن تعادل أبدًا الملاحظة المباشرة لحيوان يُولِّد الكهرباء بنفسه. في هذا الصدد، أوضح مولر في محاضرته الافتتاحية في جامعة بون: «الملاحظة بسيطة ولا تعرف الكَلل ومثابرة وقويمة، كما أنها ليست مشوبة بأحكام مسبقة. أما التجربة، فهي مختلَقة ولا تعرف المثابرة، كما أنها معقدة واستطرادية ومتأثرة بالأحكام المسبقة ولا يمكن الاعتماد عليها.» لكن في ذلك الوقت، كانت الملاحظة مستحيلة. فلم تكن هناك أداة قوية بما يكفي لالتقاط الإشارات الكهربية الشاحبة التي تحملها الأعصاب في حالتها الطبيعية.

لكن هذا تغيَّر عام ١٨٤٧ عندما ابتكر إيميل دوبوا ريموند، أحد طلاب مولر، جلفانومتر[٢] شديد الحساسية، وهو جهاز يقيس التيار الكهربي خلال تفاعله مع المجال المغناطيسي. كانت تجاربه محاولةً لأخذ ملاحظات عالم الفيزياء الإيطالي كارلو ماتوتشي حول العضلات كما هي وتطبيقها على الأعصاب. باستخدام الجلفانومتر، اكتشف ماتوتشي حدوث تغيير بسيط في شدة التيار الكهربي القادم من العضلات بعد إجبارها على الانقباض. إلا أن البحث عن هذه الإشارة في أحد الأعصاب كان يتطلب مجالًا مغناطيسيًّا أقوى لالتقاط التيار الكهربي الأضعف. وإضافةً إلى تصميم العَزل المناسب لمنع حدوث أي تشويش من الكهرباء خارجيةِ المصدر، تَعيَّن على دوبوا ريموند لفُّ ما يزيد عن مِيل من السلك بيده (وهو ما نتج عنه عدد لفات يعدِل ثمانية أضعاف عدد لفات ماتوتشي) للحصول على مجال مغناطيسي قوي بما يكفي لهذا الغرض. وقد نجح عمله اليدوي. مع تمكُّن الجلفانومتر الذي أعده دوبوا ريموند من قياس استجابة أحد الأعصاب، عمِل دوبوا ريموند على تحفيز العصب بالعديد من الطُّرق، بما في ذلك تحفيزه كهربيًّا، أو باستخدام المواد الكيميائية مثل الاستركنين، وراقب قراءة الجلفانومتر التي توضح كيفية استجابة العصب. في كل مرة، كان يرى إبرة الجلفانومتر ترتفع. وقد لاحظ الكهرباء وهي تؤثر على الجهاز العصبي.

[٢] سُمي بالتأكيد على اسم جلفاني.

كان دوبوا ريموند رجلًا مُحبًّا للاستعراض بجانب كونه عالمًا، وقد تحسَّر على أساليب العرض التقديمي المملة لزملائه العلماء. ولكي ينشر الثمار التي جناها من عمله، أعدَّ العديد من العروض التقديمية الجاهزة للجمهور حول الكهرباء الحيوية، بما في ذلك إعداد التجربة التي يمكنه فيها تحريك إبرة الجلفانومتر، عن طريق شدِّ عضلات ذراعه المغمورة في وعاء من الماء المالح مُوصلٍ بالجلفانومتر. كان كل هذا كفيلًا بأن تسترعي الاستنتاجات التي حصل عليها الانتباه، وأن يُنظر إلى دوبوا ريموند بإعزاز من مفكري عصره. في هذا الصدد، أوضح ما يلي: «ظل مُبسِّطو العلوم في ذهن العامة هم النصب التذكاري للتقدم البشري، بعد أن ارتفعت أمواج النسيان مبتلعةً أصحاب الأبحاث العلمية الأكثر دِقة.»

لحسن الحظ، كان بحثه دقيقًا أيضًا. لا سيما أن العمل اللاحق الذي أجراه دوبوا ريموند مع تلميذه يوليوس بيرنشتاين سيحدد مصير نظرية الكهرباء العصبية. صحيحٌ أن التجربة الأصلية لدوبوا ريموند نجحت في إظهار علامة على تغيُّر التيار الكهربي داخل عصبٍ نشِط. لكن بيرنشتاين تمكن من تعزيز قوة الإشارة وتسجيلها على مقياسٍ زمني أدق، من خلال إعداد تصميم تجريبي متقن ودقيق، وبذلك يكون أول من أجرى رصدًا حقيقيًّا للإشارة العصبية، التي كان رصدها أمرًا مستعصيًا في السابق.

خلال تجربة بيرنشتاين بدأ أولًا بعزل عصبٍ وتثبيته على جهازه. بعد ذلك، حُفِّز العصب كهربيًّا عند أحد الطرفَين، ثم بحث بيرنشتاين عن وجود أي نشاط كهربي على بعد مسافة قصيرة. من خلال التسجيل بدقةٍ تصل إلى ثُلث الواحد من ألف من الثانية، رأى كيف تغيرت شدة التيار الكهربي العصبي تغيُّرًا ملحوظًا بعد كل عملية تحفيز. بُعد الموقع الذي يُسجَّل منه عن موقع التحفيز قد ينتج عنه توقف قصير إلى أن ينتقل التيار الكهربي من العصب إلى الجلفانومتر. لكن بمجرد وصول التيار الكهربي إلى الموقع الذي يُسجل منه، كان يلاحظ دائمًا أن التيار الكهربي ينخفض بسرعة، ثم يستعيد قيمته الطبيعية ببطءٍ أكبر.

كانت النتيجة التي حصل عليها بيرنشتاين، والتي نُشرت في العدد الافتتاحي من دورية «يوروبيان جورنال أوف فِيلوسوفي» عام ١٨٦٨، أولَ تسجيل لما يُشار إليه الآن باسم «جهد الفعل». يُعرف جهد الفعل بأنه نمط مميز من التغيُّرات التي تحدث في الخواص الكهربية للخلية. للخلايا العصبية جهود فعلٍ. ولبعض الخلايا القابلة للاستثارة، كالخلايا الموجودة في العضلات أو القلب، جهود فعلٍ أيضًا.

هذا الاضطراب الكهربي ينتقل عبر غشاء الخلية مثل الموجة. بهذه الطريقة، يساعد جهدُ الفعل الخليةَ على نقل الإشارة من أحد طرفَيها إلى الطرف الآخر. في القلب، على سبيل المثال تساعد موجة جهد الفعل في تنظيم انقباض الخلية. جهود الفعل هي أيضًا الطريقة التي تتواصل بها الخلية مع الخلايا الأخرى. في الخلية العصبية، حين يصل جهد الفعل إلى النهاية العُقدية الشكل للامتداد المعروف باسم المحور، فإنه يدفع النواقل العصبية إلى الخارج. هذه المُركَّبات الكيميائية يمكنها الوصول إلى الخلايا الأخرى وتحفيز جهد الفعل فيها أيضًا. في حالة عصب الضفدع الشائع، تؤدي جهود الفعل التي تنتقل لأسفل الرِّجل إلى إطلاق نواقل عصبية إلى عضلة الرِّجل محفزةً جهود الفعل فيها. تؤدي جهود الفعل في العضلة إلى ارتعاشها.

كان العمل الذي أنجزه بيرنشتاين الكلمة الافتتاحية في حكايةٍ طويلة عن جهد الفعل. والآن أصبح جهد الفعل الأساس الذي يُبنى عليه علم الأعصاب الحديث، باعتباره الوحدة الأساسية للاتصال في الجهاز العصبي. هذه الومضات السريعة من النشاط الكهربي تصل الدماغ بالجسم، وتصل الجسم بالدماغ، كما تربط جميع الخلايا العصبية للدماغ التي تقع فيما بينهما.

بعد أن لمح دوبوا ريموند تغيُّرات في التيار الكهربي صادرةً من العصب، كتب ما يأتي: «إذا لم أكُن أخدع نفسي بدرجة كبيرة، فقد نجحت في إدراك الحلم الذي تعقَّبه علماء الفيزياء وعلم وظائف الأعضاء على مدار ١٠٠ عام، بعبارة أخرى، الطبيعة الكهربية للجهاز العصبي.» تم التعرف على طبيعة عمل الجهاز العصبي بالفعل من خلال جهد الفعل. ومع هذا، ألزم دوبوا ريموند نفسه باستخدام «الطريقة الرياضية الفيزيائية» لتفسير الجانب الحيوي، وعلى الرغم من أنه أرسى قواعد الطريقة الفيزيائية، فإنه لم يحلَّ الجزء الرياضي. مع تنامي شعور العلماء بأن العلم السليم ينطوي على التحديد أو القياس الكمِّي، كانت وظيفة وصف الخواص الفيزيائية لمبدأ عمل الجهاز العصبي لا تزال بعيدة المنال. بالفعل، كان تحديد جوهر عمل الجهاز العصبي والتعبير عنه في صورة معادلات يستغرق ١٠٠ عام أخرى.

على النقيض من تجربة يوهانس مولر، عندما نشر جورج أُوم كتابًا يتناول فيه النتائج العلمية التي توصَّل إليها فقدَ وظيفته.

وُلد أُوم عام ١٧٨٩ لصانع أقفال. درس لفترة محدودة في الجامعة الموجودة في مسقط رأسه أرلنجن في ألمانيا، ثم قضى سنوات يُدرِّس الرياضيات والفيزياء في العديد

من المدن. في آخر الأمر، بدأ يُجري تجاربه المحدودة، لا سيما حول موضوع الكهرباء، وذلك بهدف أن يصبح أستاذًا جامعيًّا. في أحد الاختبارات، قطَّع أسلاكًا بأطوال مختلفة من معادن مختلفة. ثم وصل طرفَي السلك بمصدر به فرق جهد كهربي وقاس شدة التيار المتدفق بينهما. من خلال ذلك تمكن من استنتاج علاقة رياضية بين طول السلك وشدة التيار المار فيه: كلما كان السلك أطول، انخفضت شدة التيار.

وبحلول عام ١٨٢٧، جمَّع أُوم هذه العلاقة بالإضافة إلى معادلات الكهرباء الأخرى في كتابه «دراسة الدائرة الكهربية الجلفانية رياضيًّا». بخلاف الصورة الحديثة لدراسة الكهرباء، لم تكن دراسة الكهرباء في زمن أوم نظامًا رياضيًّا بدرجة كبيرة؛ لذا لم يُحبذ أقرانه محاولته أن يجعلها كذلك. وقد وصل الأمر إلى الحد الذي عبَّر فيه أحد النُّقاد قائلًا: «من يُلقي نظرة على العالم بعين التوقير من الطبيعي أن يَحيد عن هذا الكتاب الناتج عن وهمٍ عُضال، همه الوحيد هو الانتقاص من كرامة الطبيعة.» بعد أن استقطع أوم وقتًا من عمله من أجل كتابة هذا الكتاب على أمل أن يحصل من خلاله على ترقية، انتهى به الحال بتقديم استقالته بدلًا من ذلك بعد فشل كتابه.

ومع هذا، كان أوم على صواب. فالعلاقة الأساسية التي لاحظها، والتي تنص على أن التيار الكهربي الذي يسري في سلك يساوي الجهد الكهربي عبر السلك مقسومًا على مقاومة السلك؛ تُعدُّ حجر الأساس للهندسة الكهربية التي تُدرَّس لطلاب الصف الأول في تخصص الفيزياء حول العالم. ويُعرَف هذا بقانون أوم، كما أن الوحدة القياسية للمقاومة هي «الأوم». لم يعرف أوم التأثير الكامل للعمل الذي أنجزه خلال حياته، لكنه حين بلغ الثالثة والستين من عمره عُين أخيرًا أستاذًا للفيزياء التجريبية في جامعة ميُونِخ، أي قبل وفاته بسنتَين.

المقاومة، كما يُوحي الاسم، هي مقياس للمُعاوقة. فهي تُعد وصفًا للمقدار الذي تعوق به المادة تدفقَ التيار الكهربي. معظم المواد لها قدر من المقاومة، لكن حسبما لاحظ أوم، تحدد الخواص الفيزيائية للمادة مدى مقاومتها. للأسلاك الأطول مقاومةٌ أعلى، وللأسلاك الأكثر سُمكًا مقاومةٌ أقل. وكما يؤدي تضييق الساعة الرملية بإبطاء تدفق الرمل، فإن الأسلاك التي لها مقاومة أعلى تعوق تدفق الجسيمات المشحونة.

عِلم لويس لابيك بقانون أوم. تمكَّن لابيك، الذي ولد في فرنسا عام ١٨٦٦، من إكمال الدكتوراه في مدرسة باريس الطبية بعد أول تسجيل لجهد الفعل بفترة قصيرة. فقد كتب أطروحته عن وظيفة الكبد وأَيْض الحديد. وعلى الرغم من أن دراساته كانت علمية،

تراوحت اهتماماته على نطاق أوسع بين التاريخ والسياسة والإبحار؛ حتى إنه في بعض الأحيان كان يستقل قاربه إلى المؤتمرات التي كانت تُعقد على جانبَي قناة المانش.

لم يبدأ لابيك في دراسة السيال العصبي إلا في نهاية القرن التاسع عشر. كانت هذه نقطة الانطلاق لمشروع يمتد لعقود مع تلميذته مارسيل لابيك، التي ستصبح فيما بعد زوجته وزميلته، حول مفهوم الزمن في مجال الأعصاب. واحد من الأسئلة المكررة التي طرحاها هي: كم من الزمن يستغرق تنشيط أحد الأعصاب؟[٣] وقد ترسخ في ذلك الحين أن توصيل طرفَي عصبٍ بمصدر جهد يتسبب في استجابة تُقاس: إما في صورة جهد فعلٍ يُلاحظ مباشرة في العصب، أو في صورة تشنُّج عضلي ينتج عن هذا التوصيل. اتضح أيضًا أن مقدار الجهد الموصَّل يشكِّل فرقًا؛ فإذا كان الجهد الموصل أعلى يستجيب العصب أسرع، وإذا كان الجهد الموصل أقلَّ يستجيب العصب أبطأ. ولكن، ما هي بالضبط العلاقة الرياضية بين الاستثارة التي يتعرض لها العصب والزمن المُستغرَق في الاستجابة؟

قد يبدو هذا سؤالًا بحثيًّا بسيطًا، مجرد فضول لن يُفضي إلى الكثير من النتائج، لكن ما يُهِم هو تناول لابيك له. ونظرًا لأن عالم وظائف الأعضاء الحق يتعيَّن عليه أن يكون مهندسًا، فيصمم ويصنع جميع أنواع الأجهزة الكهربية، من أجل التحفيز وتسجيل النتائج من الألياف العصبية، فقد كان لابيك على دراية بقوانين الكهرباء. فقد كانت لديه معرفةٌ بالمُكثِّفات، والمقاومة، والجهد الكهربي، وقانون أوم. هذه المعرفة هي التي مكَّنته من وضع مفهوم رياضي للأعصاب سيجيب عن سؤاله، بالإضافة إلى المزيد الذي سيقدِّمه فيما بعد.

ازداد فَهْم الأغشية التي تُحيط بالخلايا في القرون التي سبقَت العمل الذي أنجزه لابيك. وقد أصبح من الواضح أن مجموعات الجزيئات البيولوجية هذه تعمل قليلًا وكأنها حائط من الطوب؛ إذ لا تسمح بمرور الكثير من الجسيمات عبرها. بعض الجسيمات التي تمكَّنت هذه الجزيئات من عزلها تضمَّنت الأيونات، وهي عبارة عن ذراتٍ لمختلف العناصر، مثل الكلوريد والصوديوم والبوتاسيوم، تحمل شحنات موجبة أو سالبة. إذن، تمامًا كما كانت الجسيمات المشحونة تتراكم على جانبَي الزجاج في قارورة لايدن، فإن هذه الجسيمات يمكن أن تتراكم داخل الخلية وخارجها. في هذا الصدد ذكر لابيك في ورقة

[٣] التوصيل بمصدر جهد كهربي كان يُعد طريقة أسهل للتحكم في تدفق الشحنات مقارنةً بضخ التيار مباشرة.

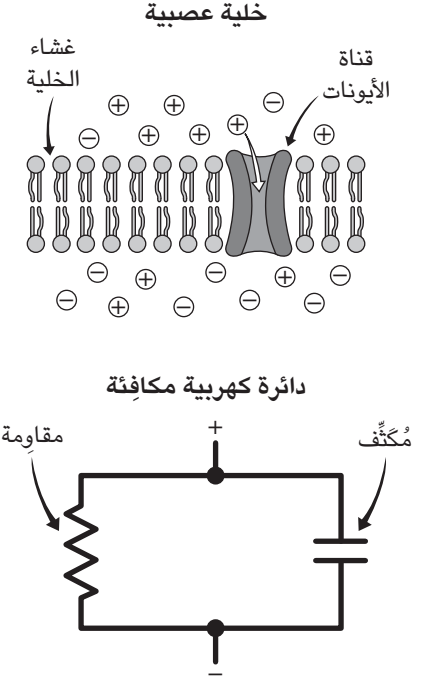
نُشِرت عام ١٩٠٧: «أفضت هذه الأفكار، عند تناولها بأبسط طريقة ممكنة، إلى معادلات استقطاب الأقطاب الكهربية للمعادن المستخدمة بالفعل.»

ومن ثَم، أصبح يصف العصب من خلال محاكاته بالدائرة الكهربية. أي إنه اعتبر أن أجزاء العصب المختلفة تتصرف مثل المكونات المختلفة للدائرة الكهربية. أول تشبيه وُضِع كان بين غشاء الخلية والمكثِّف؛ نظرًا لأن الغشاء يمكنه حفظ الشحنة بالطريقة نفسها. لكن كان واضحًا أن الأغشية ليسَت مكثفات مثالية؛ إذ إنها لا يمكنها فصل الشحنات بالكامل. بدلًا من ذلك، تبيَّن أن جزءًا من التيار يَسري من داخل الخلية لخارجها والعكس، وهو ما يسمح بتفريغ الشحنة على جانبَي الغشاء ببطء. ويمكن أن يلعب هذا الدور سلك له بعض المقاومة. لذا أضاف لابيك مقاوِمة إلى نموذج الدائرة الكهربي المحاكي للعصب على التوازي مع المكثف. بهذه الطريقة، عند ضخ تيار في الدائرة الكهربية، تنتقل بعض هذه الشحنة إلى المكثِّف ويمر البعض الآخر عبر المقاوِمة. وعليه، تصبح محاولة إحداث فرق في الشحنة بين داخل الخلية وخارجها أشبه بسَكب ماء في دلو به عيب؛ معظم الماء سيبقى في الدلو، لكنَّ بعضه سيتسرب للخارج.

هذا التشبيه بين الخلية والدائرة الكهربية مكَّن لابيك من كتابة معادلة. وصفت المعادلة كيفية تغيُّر الجهد الكهربي عبر غشاء الخلية بمرور الوقت، بناءً على مقدار الجهد الكهربي الذي تتعرَّض له الخلية، والمدة الزمنية التي تتعرض خلالها لهذا الجهد. باستخدام هذه المعادلة، تمكَّن من حساب المدة الزمنية المطلوبة لكي تستجيب الخلية العصبية لكل مقدارٍ من الجهد.

للحصول على بيانات يختبر من خلالها معادلته، لجأ لابيك إلى تجربة رِجل الضفدع القياسية؛ فعرَّض عصب الضفدع لمقادير مختلفة من الجهد الكهربي، وسجَّل الزمن الذي تستغرقه كي تستجيب. افترض لابيك أنه عندما تستجيب الخلية العصبية للضفدع، فإن هذا يعني أن جهد الغشاء قد وصل إلى عَتَبة استثارة معينة. ومن ثم، حسَب المدة الزمنية التي يحتاج أن يستغرقها نموذجه كي يصل إلى هذه العتبة لكل قدرٍ من الجهد الكهربي تتعرض له الخلية. بالمقارنة بين التنبؤات التي توصل إليها من نموذجه والنتائج التي حصل عليها من تجاربه، استطاع لابيك التوصُّل إلى نقاط التقاء جيدة. وبذلك يكون قد تمكن من التنبؤ بالمدة الزمنية التي يحتاجها مقدار مُعيَّن من الجهد الكهربي الذي تتعرض له الخلية العصبية كي تستجيب.

لم يكُن لابيك أول من دوَّن معادلة كهذه. فقد قدَّم العالم جورج فايس، وهو أحد العلماء السابقين له، تخمينًا لكيفية وصف هذه العلاقة بين الجهد الكهربي والزمن. كان




شكل ٢-٢

هذا التخمين جيدًا نسبيًّا أيضًا، ولم يكن يختلف عن تنبؤات لابيك إلا اختلافًا طفيفًا، فيما يتعلَّق بمقادير الجهد التي تتعرَّض لها الخلية لفترةٍ طويلةٍ على سبيل المثال. لكن مثلما قد يؤدِّي أصغر الأدلة في مسرح الجريمة إلى قَلْب موازين الأحداث، فإن مثل هذا الاختلاف الطفيف بين التنبُّؤات التي انطوت عليها معادلة لابيك وما جاء قبله؛ يُشير إلى اختلافٍ عميقٍ في التفكير.

بخلاف معادلة لابيك، لم تكن معادلة فايس مستوحاةً من آلية عمل الخلية، ولم يكن الهدف منها هو تفسير المعادلة باعتبار الخلية مكافئةً للدائرة الكهربية. فقد كانت وصفًا للبيانات أكثر من كونها نموذجًا لها. ففي حين أن المعادلة الوصفية أشبه صورة متحركة لحدثٍ ما — إذ تعكس المظهر الخارجي للحدث دون أي عمق — يُعد النموذج إعادة بناء للحدث. وهكذا، لا بد أن يتضمن النموذج الرياضي للسيال العصبي متغيراتٍ تمثل

الأجزاء الموجودة في العصب نفسه. ولا بد أن يكون من الممكن ربط كل متغير بكيان مادي حقيقي، وأن تعكس التفاعلات بين هذه المتغيرات ما يحدث في العالم الحقيقي أيضًا. وهذا تمامًا ما قدمه نموذج الدائرة الكهربي المحاكي للعصب للابيك: معادلة حدودها قابلة للتفسير.

رأى العلماء الذين سبقوا لابيك بالفعل وجه التشابُه بين الأدوات الكهربية المستخدمة لدراسة العصب والعصب نفسه. وقد اعتمد لابيك اعتمادًا كبيرًا على العمل الذي أنجزه فالتر نيرنست، الذي لاحظ أن قُدرة الغشاء على فصل الأيونات يمكن أن يكون الأساس الذي يعتمد عليه جهد الفعل. وأيضًا تحدث طالب آخر من طلاب دوبوا ريموند يُدعى لوديمار هيرمان عن العصب في إطار المُكَثِّفات والمقاوِمات. حتى جلفاني نفسه كانت تراوده فكرة أن العصب يعمل بطريقة مشابهة لقارورة لايدن. إلا أنه، اعتمادًا على نموذج الدائرة الكهربية الصريح المحاكي للعصب وملاءمته مع البيانات، خطا لابيك خطوة أبعد فيما يتعلق بإرساء حُجة تؤيد اعتبار العصب جهازًا كهربيًّا دقيقًا. في هذا الصدد أوضح: «التفسير الفيزيائي الذي توصَّلتُ إليه اليوم أضفى معنًى دقيقًا على العديد من الحقائق المهمة المعروفة سابقًا حول قابلية الاستثارة ... ويبدو لي أن هذا سببٌ في اعتباره خطوة نحو الواقعية.»

نظرًا لمحدودية المعدات والأجهزة، كان معظم علماء الأعصاب في زمن لابيك يُسجِّلون من الأعصاب ككل. الأعصاب هي حزم مكونة من العديد من المحاور العصبية، والمحاور العصبية هي ألياف ترسل الخلايا العصبيةُ المنفردة عبرها الإشارات للخلايا الأخرى. التسجيل من العديد من المحاور العصبية في آنٍ واحد يُسهِّل التقاط التغيُّرات الناتجة عن مرور التيار في المحاور، لكنه يجعل من الأصعب رؤية شكلٍ تفصيلي لهذه التغيرات. لكن تثبيت قطبٍ كهربيٍّ بداخل خليةٍ عصبيةٍ منفردةٍ يجعل تسجيل الجهد عبر الغشاء مباشرةً أمرًا ممكنًا. وبمجرد أن أصبحت تقنية ملاحظة الخلايا العصبية الفردية متاحةً في بدايات القرن العشرين، أصبح جهد الفعل أكثر وضوحًا.

يُعرف أحد المبادئ المميزة لجهد الفعل التي لاحظها إدجار أدريان، اختصاصي علم وظائف الأعضاء الإنجليزي، في عشرينيات القرن العشرين بمبدأ «الكل أو لا شيء».[٤] ينُصُّ

[٤] سنتناول المزيد حول أدريان وما كان يعنيه اكتشافه حول كيفية تمثيل الخلايا العصبية للمعلومات في الفصل السابع.

مبدأ «الكل أو لا شيء» على أن الخلية العصبية إما أن تُطلِق جهدَ فعلٍ أو لا تُطلق جهد فعل، ولا شيء بينهما. بعبارة أخرى، في أي وقت تحصل الخلية العصبية على مدخل كافٍ، فإن الجهد عبر غشاء الخلية يتغير كما تتغير الخلية العصبية بالطريقة نفسها تمامًا. إذن، كما أن الهدف في الهُوكي يُحتسب هدفًا بصرف النظر عن مدى صعوبة إدخال الكرة في الشبكة، فإن استثارة الخلية العصبية بقوة لا تجعل جهدَ فعلِ الخلية أكبر أو أفضل. كلُّ ما تفعله الاستثارة الأقوى هو أنها تجعل الخلية العصبية تطلق مزيدًا من جهود الفعل نفسه. ومن ثم، فإن الجهاز العصبي يهتم بالكمِّ أكثر من الكيف.

مبدأ «الكل أو لا شيء» الذي يميز طبيعة عمل الخلية العصبية يتوافق مع حدس لابيك، حول وجود عَتَبة تحفيز لجهد الفعل تستجيب عندها الخلية. فقد عِلم أن رؤية استجابة من العصب تتطلب وصول الجهد عبر الغشاء إلى قيمة محددة. لكن بعد أن يصل لهذه القيمة، تبقى الاستجابة واحدة.

وبحلول ستينيات القرن العشرين، دُمِج مبدأ «الكل أو لا شيء» مع معادلة لابيك في نموذج رياضي يُعرف باسم نموذج «التسريب – التجميع – الإطلاق» في الخلية العصبية. سُمي «التسريب»؛ لأن وجود مقاوِمة يعني أن بعض التيار سيتسرب، وسُمي «التجميع»؛ لأن المكثِّف يُجمِّع بقية التيار ويختزنه في صورة شحنات، وسُمي «الإطلاق»؛ لأنه عندما يصل الجهد الذي يمر عبر مكثِّف إلى عتبة الاستثارة، فإن الخلية العصبية «تُطلِق» فرقَ جهد. وبعد كل عملية «إطلاق للإشارات العصبية الكهربية» يعود جهد الغشاء إلى قيمته الأساسية، منتظرًا الوصول إلى العتبة مرة أخرى إذا تعرضت الخلية العصبية لمزيد من المُدخَلات.

وعلى الرغم من بساطة النموذج، يمكنه تقديم نسخةٍ مماثلةٍ للكيفية التي تُطلِق بها الخلايا العصبية إشاراتٍ عصبيةً كهربية، على سبيل المثال، إذا كان المُدخَل الذي يتعرَّض له النموذج المحاكي للخلية العصبية قويًّا ومستمرًّا، فستُطلق الخلية العصبية النموذجية جهود فعلٍ متكررةً مع وجود مُهلةٍ طفيفةٍ تفصل بين الواحد والآخر، أما إذا كانت قيمة المدخل منخفضة بما يكفي، فقد تبقى الخلية دون إطلاق جهد فعل واحد لأجَل غير مُسمًّى.

يمكن توصيل هذه الخلايا العصبية النموذجية معًا؛ بحيث يكون إطلاق جهد الفعل في إحدى الخلايا مُحفِّزًا لإطلاق جهد الفعل في خلية أخرى. هذا يزوِّد مُصمِّمي هذه النماذج بقدرة أوسع على استكشاف سلوك شبكاتٍ كاملة من الخلايا العصبية لا خلية منفردة، إضافةً إلى فهمه وعمل نُسَخ تحاكيه.

ومنذ ظهور هذه النماذج، استُخدِمت لفهم عددٍ لا يُحصى من الجوانب المتعلقة بالدماغ، بما في ذلك الأمراض. فعلى سبيل المثال، مَرضُ باركنسون هو اضطراب يؤثر على إطلاق الخلايا العصبية للإشارات العصبية الكهربية في العُقد القاعدية. تتكون العُقد القاعدية، التي تقع عميقًا في الدماغ، من مجموعة متنوعة من المناطق التي لها أسماء لاتينية توضيحية. عند تشويش المُدخَل الذي يحفِّز إحدى المناطق — أي منطقة الجسم المخطَّط — بفعل مرض باركنسون، فإن هذا يؤثر على توازن العُقد القاعدية بالكامل. ونتيجة للتغيُّرات التي تحدث في الجسم المخطط تبدأ النواة أسفل المهاد (وهي منطقة أخرى من مناطق العُقد القاعدية) في إطلاق إشارات عصبية كهربية أكثر من اللازم، وهو ما يؤدي إلى تحفيز الإطلاق في الخلايا العصبية في الكُرَة الشاحبة الخارجية أو الظهرانية (وهي منطقة أخرى من مناطق العُقد القاعدية). لكن الخلايا العصبية في هذه المنطقة تبعث بدورها إشارةً إلى منطقة النواة أسفل المهاد؛ كي تتوقَّف عن إطلاق المزيد من الإشارات العصبية الكهربية، وهو ما يؤدي بدوره إلى تثبيط الكُرة الشاحبة الخارجية نفسها. ينتج عن هذه الشبكة المعقدة من التداخلات تَذَبذُباتٌ؛ إذ تُطلِق الخلايا العصبية إشاراتٍ عصبية كهربية أكثر من اللازم، ثم تُطلق إشاراتٍ عصبية كهربية أقل، فأكثر مرةً أخرى. يتضح أن هذه الإيقاعات تتصل بمشكلات الحركة لدى مرضى باركنسون؛ كالرعشة والحركات البطيئة والتيَبُّس.

في عام ٢٠١١ صمم باحثون في جامعة فرايبُورج نموذجًا حاسوبيًّا لهذه المناطق من الدماغ، مكونًا من ٣٠٠٠ نموذج من نماذج «التسريب – التجميع – الإطلاق» التي تحاكي عمل الخلايا العصبية. في النموذج، تَسبَّب إحداث خلل في الخلايا التي تمثِّل منطقة الجسم المخطَّط في حدوث التذبذبات نفسها التي لوحِظَت في منطقة النواة أسفل المهاد لدى مرضى باركنسون. ونظرًا لأن النموذج يعرض أعراضَ المرض، فإنه يمكن الاستعانة به أيضًا لاستكشاف طرقٍ لعلاجه. على سبيل المثال، ضخ نبضات من المدخل إلى النموذج المحاكي للنواة أسفل المهاد أدى إلى كسر هذه الحلقة من التذبذبات، واستعادة النشاط الطبيعي. لكن لا بد أن تكون هذه النبضات بالمعدَّلات المناسبة، فإن كانت أبطأ من ذلك فستزداد التذبذبات سوءًا بدلًا من أن تتحسَّن. ومن المعروف عن الاستثارة العميقة للدماغ — وهي إجراء تُزرَع فيه أقطاب كهربية في منطقة النواة أسفل المهاد لدى مرضى باركنسون لتوليد نبضات كهربية — أنها تقلل من الرعشة. يعلم الأطباء الذين يستخدمون هذا العلاج أن معدل النبضات لا بد أن يكون مرتفعًا، أي نحو ١٠٠ نبضة في الثانية. وهذا يعطينا

تلميحًا حول السبب في أن معدلات الاستثارة العالية تؤدي إلى نتائج أفضل من المعدلات المنخفضة. وبهذه الطريقة، فإن تمثيل الدماغ، باعتباره دوائر كهربيةً متصلة معًا، يوضح كيف يمكن لاستخدام الكهرباء إصلاحُ عملية إطلاق الخلايا العصبية للإشارات العصبية الكهربية.

كان اهتمام لابيك مُنصبًّا على توقيت إطلاق الخلايا العصبية للإشارات العصبية الكهربية. وبتركيب المكونات الصحيحة للدائرة الكهربية معًا، تمكن من تحديد توقيت جهود الفعل تحديدًا صحيحًا، لكن تكوين هذه الدائرة الكهربية التي تُمثِّل الخلية العصبية فعلت ما هو أكثر من ذلك. فقد شكلت أساسًا متينًا تُبنى عليه شبكاتٌ هائلة مكوَّنة من آلاف من الخلايا المتصلة ببعضها. وتضطلع أجهزة الكمبيوتر حول العالم الآن بالمعالجة السريعة لمعادلات الخلايا العصبية الاصطناعية هذه، محاكيةً بذلك كيفية التجميع وإطلاق جهود الفعل في الخلايا العصبية الحقيقية في حالتَي الصحة والمرض.

في صيف عام ١٩٣٩ أعدَّ آلان هودجكين قاربَ صيد صغيرًا، وانطلق بعيدًا عن الساحل الجنوبي لإنجلترا. كان يهدف لصيد الحُبَّار، لكنه لم يجنِ على الأغلب سوى دوار البحر.

في ذلك الوقت، كان هودجكين — وهو باحث مبتدئ في جامعة كامبريدج — قد وصل لتَوِّه إلى جمعية الأحياء البحرية في بليموث، وهو على استعدادٍ لإطلاق مشروع جديد يدرس الخواص الكهربية للمحور العصبي العملاق للحبَّار. على وجه الخصوص، كان يوَدُّ معرفة كيف يتغير جهد الغشاء أثناء حدوث جهد الفعل، مُتَّخذًا شكل منحنياتٍ صاعدةٍ وهابطةٍ يُشار إليها عادة بـ «القفزات في فرق الجهد» ويقصد بها التغيرات السريعة والمفاجئة.[٥] بعد أسابيع قليلة انضم إليه مساعدٌ، قليل الخبرة مثله، وهو طالب يُدعى أندرو هكسلي. لحسن الحظ، اكتشف الرجلان في النهاية متى وأين يمكنهم إيجاد الموضوع الذي يدرسانِه في البحر.

على الرغم من أن هكسلي كان طالبًا لدى هودجكين، لم يكن الفارق بينهما يزيد عن ٤ سنوات. بدا هودجكين مثالًا للرجل الإنجليزي النبيل بحقٍّ؛ إذ كان له وجه طويل ونظرات ثاقبة، وكان شعره مفروقًا بعنايةٍ ومائلًا على أحد الجانبَين. أما هكسلي، فبدا

[٥] زيادة الجهد الكهربي، وزيادة النشاط، وجهد الفعل، كلها أسماء تُستخدم للإشارة إلى ما تُطلقه الخلية العصبية.

صبيانيًّا مستديرَ الخدَّين وكثَّ الحاجبَين. كان الرجلان يتمتعان بمهارةٍ في علم الأحياء والفيزياء، على الرغم من أنهما انضمَّا إلى هذا التعاون البحثي المشترك بعد أن كانت لهما خلفياتٌ معرفية مختلفة.

درس هودجكين علم الأحياء بشكل أساسي، لكن في الفصل الدراسي الأخير، شجعه أحد أساتذة علم الحيوان على تعلُّم الرياضيات والفيزياء بقدر استطاعته. استجاب هودجكين للتشجيع، فقضى ساعاتٍ في قراءة كتبٍ أكاديمية حول المعادلات التفاضُلية. أما هكسلي، فكان مهتمًّا لفترةٍ طويلةٍ بالميكانيكا والهندسة، لكنه تحول إلى مسارٍ أكثر صلة بعلم الأحياء، بعدما أخبره أحد أصدقائه بأن محاضرات علم وظائف الأعضاء ستتناول موضوعاتٍ أكثر حيويةً وإثارةً للجدل. وقد يكون هكسلي قد انجذب لهذه المواد تأثرًا بجَدِّه. وصف عالم الأحياء توماس هنري هكسلي — الذي أُطلق عليه الحارس الوَفِي (بولدوج) لداروين نظرًا لدفاعه المستميت عن نظرية التطور — علم وظائف الأعضاء بأنه «الهندسة الميكانيكية للآلات الحية».

تنبأ نموذج لابيك بتوقيت إطلاق الخلية العصبية لجهد الفعل، لكنه لم يفسِّر ماهيةَ جهد الفعل. في الوقت الذي قام فيه هودجكين برحلة على متن قارب، كانت النظرية الرائجة حينها، والتي تتناول ما يحدث عندما تُطلق الخلية العصبية جهدَ فعل، هي تلك التي وضعها الشخص الأصلي الذي لاحظ جهد الفعل، وهو يوليوس بيرنشتاين. وكانت تنُصُّ على أنه خلال هذا الحدث الكهربي يتحلل غشاء الخلية مؤقتًا. ومن ثم، فإنه يسمح للأيونات المختلفة بالتدفق من داخل الجدار لخارجه والعكس، وهو ما يمحو فرق الشحنة الذي يوجد في الوضع الطبيعي على جانبَي الغشاء، ويولِّد التيار الضعيف الذي لاحظه بيرنشتاين بالجلفانومتر الخاص به.

ومع ذلك، أوضحت بعض تجارب هودجكين السابقة على سرطان البحر أن هذا قد لا يكون صحيحًا تمامًا. أراد أن يتحقق أكثر من هذه التجارب باستخدام الحبَّار؛ وذلك لأن كبر حجم المحور العصبي الذي يمتد داخل غلافٍ يُيسِّر الحصول على قياساتٍ دقيقة.[٦] بتثبيت قطب كهربي في محوره العصبي، تمكن هودجكين وهكسلي من تسجيل تغيرات

[٦] «المحور العصبي الضخم للحبار» الذي كان هودجكين وهكسلي يدرسانه كان محورًا كبيرًا جدًّا (سُمكه مثل سُمك سن القلم تقريبًا) لحبارٍ متوسط الحجم نوعًا ما. لم يكن محورًا لحبار عملاق كما اعتقد الكثير من طلاب علم الأعصاب.

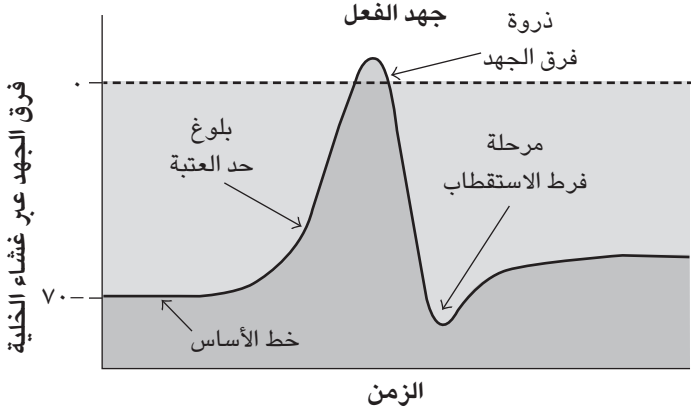
الجهد الكهربي التي حدثت أثناء جهد الفعل. ما لاحظاه هو وصول جهد الفعل للذروة (مرحلة الإزالة التامة للاستقطاب). بمعنى أن فرق الجهد لم يصل إلى صفر فحسْب، كما كان سيحدث مع مكثِّف مُفرَّغ؛ بل أصبح فرق الجهد معكوسًا بين داخل الخلية وخارجها من السالب للموجب. في الوضع الطبيعي تكون الشحنات الموجبة خارج الخلية العصبية أكثر من الشحنات الموجبة داخلها، لكن في أثناء ذروة جهد الفعل ينعكس هذا النمط، ويصبح داخلُ الخلية مشحونًا بشحناتٍ موجبة أكثر من خارجها. السماح ببساطة لمزيدٍ من الأيونات بالانتشار عبر الغشاء الخلوي لن يؤدي إلى فصل الشحنات بهذه الطريقة. ثمة شيء أكثر انتقائية يمارِس تأثيرَه.

لسوء الحظ، لم يكد هودجكين وهكسلي يتوصَّلان إلى هذا الاكتشاف حتى انقطع عملهما. فقد غزا هِتلر بُولندا. واضطر الرجلان إلى ترك المختبر والانضمام للمجهود الحربي. ومن ثم، تعيَّن تأجيل حل لُغز جهد الفعل.

عندما عاد هودجكين وهكسلي إلى بيلموث بعد مرور ثماني سنوات، كان المختبر في حاجةٍ إلى إعادة تجميع؛ فقد تعرَّض المبنى للقصف بالقنابل في الغارات الجوية، كما انتقلت المعدات إلى علماء آخرين. لكن الرَّجلَين — اللذَين اكتسبا مهاراتٍ متعلقةً بالبحث الكمي نتيجةً للمهام التي كُلِّفا بها أثناء الحرب؛ فمثلًا أجرى هكسلي تحليلًا للبيانات لصالح فرقة المدفعية في البحرية الملكية البريطانية، كما طوَّر هودجكين أنظمة رادار للقوات الجوية — كانا توَّاقَين لاستئناف العمل على آليات السيال العصبي.

على مدار سنواتٍ عديدة تالية أخذ هودجكين وهكسلي (بمساعدة الاختصاصي الزميل في علم وظائف الأعضاء بيرنارد كاتس) يعبثان بالأيونات. بإزالة نوع محدد من الأيونات من بيئة الخلية العصبية، استطاعا تحديد أنواع الجسيمات المشحونة التي يعتمد عليها كل جزءٍ من أجزاء جهد الفعل. فمثلًا، الخلية العصبية التي تُركت في وعاء يحتوي على صوديوم أقل تجاوز فيها فرق الجهد الصفر، ووصل للذروة (مرحلة الإزالة التامة للاستقطاب) مراتٍ أقل، وبإضافة مزيدٍ من البوتاسيوم في الوعاء، سيختفي فرط الاستقطاب، وهو التأثير الذي يحدث عند الطرف الآخر من جهد الفعل، عندما يصبح داخلُ الخلية سالبًا أكثر من الطبيعي. أجرى الباحثان تجاربهما باستخدام تقنيةٍ ساعدتهما مباشرة على التحكم في فرق الجهد الكهربي على جانبَي غشاء الخلية. أدى التغيير في توازن الشحنات إلى تغيراتٍ كبيرةٍ في تدفق الأيونات إلى داخل الخلية وخارجها. عند إزالة فرق الشحنة على جانبَي الغشاء تسبح أيونات الصوديوم المخزنة في المنطقة الموجودة خارج الخلية إلى

آلية إطلاق جهد الفعل في الخلايا العصبية




شكل ٢-٣

داخل الخلية، وبتَرْك الخلية على هذه الحالة لمدةٍ أطول تتدفَّق أيونات البوتاسيوم الموجودة داخل الخلية إلى خارج الخلية.

أسفرت هذه التعديلات في الأيونات عن نموذج. على وجه التحديد، كتَّف هودجكين وهكسلي معرفتهما التي اكتسباها بعَناء عن الفروق الدقيقة للأغشية العصبية في صورة دائرة كهربية مكافئة، وباستخدام هذه الدائرة توصَّلا إلى مجموعة من المعادلات تُمثِّل آلية عملها. هذه الدائرة المكافئة كانت أكثر تعقيدًا من دائرة لابيك؛ إذ كانت تحتوي على مزيد من الأجزاء المتحركة؛ لأنه لا يهدف إلى شرح متى يحدث جهد الفعل فحسب، بل يتطرق إلى تفسير شكل الحدث بالكامل. لكن الفرق الأساسي بينهما يُعزى إلى المقاوَمة.

فبالإضافة إلى المقاوِمة التي وضعها لابيك بالتوازي مع المكثِّف الممثل للغشاء، وضع هودجكين وهكسلي مقاوِمتَين إضافيَّتَين: واحدة مخصصة للتحكُّم في تدفق أيونات الصوديوم، والأخرى للتحكُّم في تدفق أيونات البوتاسيوم. عملية الفصل هذه التي تقوم بها المقاومات افترضَت وجود قنواتٍ مختلفةٍ في الغشاء الخلوي تسمح للأيونات المختلفة بالمرور بطريقةٍ انتقائية. إضافةً إلى ذلك، فإن قوة هذه المقاوِمات — أي الحد الذي تمنع به المقاوِمات تدفُّق الأيونات الخاصة بها — ليست من العوامل الثابتة في النموذج. بل تعتمد على حالة فرق الجهد على جانبَي المكثِّف. تتمكن الخلية من إنجاز هذا من خلال

فتح قنوات الأيونات الخاصة بها وإغلاقها، مع تغيُّر فرق الجهد على جانبَي الغشاء. بهذه الطريقة، يمكن اعتبار غشاء الخلية مثل حارس النادي؛ إذ يقيِّم جموع الجسيمات على جانبَيه، ويستعين بذلك لتحديد الأيوناتِ التي تدخل للخلية، والأيوناتِ التي تخرج منها.

بعد أن حدَّد هودجكين وهكسلي معادلات هذه الدائرة الكهربية، أرادا التعامل بالأرقام لمعرفة ما إذا كان فرق الجهد عبر المكثِّف في النموذج سيُحاكي القفزات في فرق الجهد التي تحدث خلال جهد الفعل. إلا أنه كانت هناك مشكلة. كانت كامبريدج موطنًا لأحد أقدم أجهزة الكمبيوتر الرقمية، وكان من شأن هذا الجهاز أن يدفع العمليات الحسابية التي يُجريها هودجكين وهكسلي قُدُمًا لو لم يكُن خارج الخدمة. لذا، اتجه هكسلي إلى برونسفيجا، وهي آلة حاسبة ضخمة من المعدن تعمل بذراع تدوير يدوي. بينما قضى أيامًا يُدخِل قيمة فرق الجهد عند نقطة زمنية محددة فقط، ليحسب ما سيكون عليه بعد مرور واحد على ١٠ آلاف جزء من الثانية، كان هكسلي يرى العمل مشوقًا بالفعل. في هذا الصدد، قال في محاضرة فوزه بجائزة نوبل: «كان هذا مثيرًا جدًّا في كثيرٍ من الأحيان … هل سيصل فرق جهد الغشاء لحد عتبة الاستثارة ويُطلق جهد الفعل، أم ستحدث تذبذبات طفيفة في فرق الجهد لا تصل إلى حد عتبة الاستثارة؟ كثيرًا ما ثبت لاحقًا أن توقعاتي كانت خاطئة، والدرس المهم الذي تعلَّمته من هذه العمليات الحسابية اليدوية هو أن حَدْس المرء ليس كافيًا تمامًا عند التعامل مع نظامٍ على هذا القدر من التعقيد.»

مع اكتمال العمليات الحسابية، أصبح لدى هودجكين وهكسلي مجموعة من جهود الفعل الاصطناعية، شكَّل سلوكها صورة مطابقة شبه مثالية لجهد الفعل في الخلية العصبية.

عند ضخ تيار كهربي في النموذج، فإنه يعرض نَظمًا معقدًا لتغيُّر فرق الجهد والمقاوَمات. في البداية، يعمل التيار المدخَل على مقاومة الحالة الطبيعية التي تكون عليها الخلية؛ وذلك بإضافة بعض الشحنات الموجبة إلى داخل الخلية السالبة الشحنة. إذا كان هذا الاضطراب الأوَّلي الذي يحدث في جهد الغشاء كبيرًا بما يكفي، أي إنه بلغ عتبة الاستثارة، فسيبدأ فتح مضخات الصوديوم وتدفق سيلٍ من أيونات الصوديوم الموجبة الشحنة إلى داخل الخلية. ينشأ عن هذا حلقة من التغذية الراجعة الإيجابية، فتدفق أيونات الصوديوم للداخل يجعل داخل الخلية موجبًا أكثر، ويؤدي التغيُّر الناتج في فرق الجهد إلى تخفيض مقاومة الصوديوم أكثر. وسرعان ما يختفي الفرق في الشحنة على جانبَي الغشاء. ويصبح داخلُ الخلية خلال فترة قصيرة موجبًا كخارجها، ثم يصبح موجبًا

أكثر، وهو ما يُعرف بمرحلة الإزالة التامة للاستقطاب. وبمجرد حدوث ذلك، تُفتح قنوات البوتاسيوم للسماح لأيونات البوتاسيوم الموجبة الشحنة بالتدفُّق إلى خارج الخلية. تعمل قنوات الصوديوم والبوتاسيوم مثل الأبواب المزدوجة؛ أحدها يسمح للأيونات بالدخول والآخر يسمح لها بالخروج، إلا أن أيونات البوتاسيوم تتحرك أسرع. خروج أيونات البوتاسيوم يعكس نمط فرق الجهد. فبعد أن يؤدِّيَ خروج البوتاسيوم إلى زيادة الشحنة السالبة داخل الخلية عن خارجها، تُغلق قنوات الصوديوم. ويُعاد فصل الشحنة على جانبَي الغشاء من جديد. وعندما يقترب فرق الجهد من قيمته الأصلية، تستمرُّ الشحنة الموجبة في التدفق إلى الخارج عبر قنوات البوتاسيوم التي لا تزال مفتوحة، ويُعرف هذا بالانخفاض عن حد العتبة (فرط الاستقطاب). في النهاية تُغلق هذه القنوات أيضًا، ويعود فرق الجهد إلى قيمته الطبيعية، وتصبح الخلية مستعدةً لإطلاق جهد الفعل من جديد.

ووَفقًا لهودجكين، أنشأ الباحثان هذا النموذج الرياضي لأنه «قد يُعتقد في البداية أن استجابة العصب للمثيرات الكهربية أشدُّ تعقيدًا وأكثر تنوُّعًا من أن تُفسر باستخدام هذه الاستنتاجات البسيطة.» لكن هذه الاستنتاجات البسيطة فَسَّرتها بالفعل. كلاعب خفة، تدمِج الخلية العصبية أجزاءً بسيطة بطرق بسيطة لتكوين مشهدٍ معقدٍ على نحوٍ مذهل. يوضح نموذج هودجكين وهكسلي أن جهد الفعل عبارةٌ عن انفجارٍ مُحكمٍ بدقة يحدث مليارات المرات في الثانية في دماغك.

نشر الباحثان العمل الذي أنجزاه — على المستويَين التجريبي والحسابي — في صورة عددٍ كبيرٍ من الأوراق البحثية في دورية «جورنال أوف فسيولوجي» عام ١٩٥٢. وبعد مرور ١١ عامًا اقتسما جائزة نوبل مع عالمٍ آخر نظير «اكتشافاتهما المتعلقة بآليات انتقال الأيونات المتضمَّنة في عمليتَي الاستثارة والتثبيط، في الجزأَين الطرفي والمركزي لغشاء الخلية العصبية.» وبهذا وضع العمل الذي أنجزه هودجكين وهكسلي حدًّا للشكوك التي كانت لا تزال تساور علماء الأحياء بشأن إمكانية تفسير السيال العصبي، فيما يتعلَّق بالأيونات والكهرباء.

«يختص جسم الخلية العصبية و«الزوائد الشجيرية» باستقبال المعلومات ومعالجتها، وتُوصَّل هذه المعلومات في صورة سيالات عصبية أطلقتها خلايا عصبية أخرى على طول محاورها العصبية». بهذه الجملة المتواضعة، افتتح جون إيكلس — عالم فسيولوجيا الأعصاب الأسترالي، وهو الفائز الثالث بجائزة نوبل مشاركةً مع هودجكين وهكسلي —

المحاضرةَ التي ألقاها عند فوزه بالجائزة. ثم أخذ يصف التعقيدات الخاصة بتدفُّقات الأيونات، والتي تحدث عندما ترسل إحدى الخلايا معلوماتٍ لأخرى.

ما لم تتطرق إليه المحاضرة هو الزوائد الشُّجَيرية. الزوائد الشجيرية هي محاليق دقيقة تمتد إلى خارج جسم الخلية العصبية. تتشعب هذه الأفرع وتتمدد وتتشعب مرة أخرى كجذور الأشجار؛ بحيث تغطي مساحة واسعة حول الخلية. تمدُّ الخلية العصبية زوائدها الشجيرية، بحيث تلتقي الزوائد الشجيرية والنهايات العصبية للخلايا المجاورة لتجميع مُدخلات منها.

كانت علاقة إيكلس بالزوائد الشجيرية معقدة. كان نوع الخلايا العصبية الذي درسه يحتوي على تفرُّعات شجيرية واضحة، وهو موجود في النخاع الشوكي للقطط. كانت التفرعات الشجيرية تمتد في كل الاتجاهات بمقدارٍ يفوق حجم جسم الخلية بعشرين مرة. إلا أن إيكلس لم يعتقد أن هذا النظام الخَلَوي المتشعب ذو صلة قوية بالموضوع. فقد كان على قناعةٍ بأن أجزاء الزوائد الشجيرية الأقرب إلى جسم الخلية قد يكون لها استخدامٌ ما؛ فالمحاور العصبية من الخلايا العصبية الأخرى تحطُّ على هذه الزوائد وتتصل بها، وبذلك تنتقل المدخلات في الحال إلى جسم الخلية؛ حيث يمكنها أن تساهم في استثارة إطلاق جهدِ فعلٍ. أما الزوائد الشجيرية الأبعد عن جسم الخلية، فقد زعم أنها أبعد من أن يكون لها دورٌ كبير؛ فإشارتها لن تصمد خلال رحلتها إلى جسم الخلية. بدلًا من ذلك، افترض أن الخلية تستخدم هذه الأذرع لامتصاص الجسيمات المشحونة، وتلفظها كي تحتفظ بتوازنها الكيميائي العام. ومن ثَم فإن إيكلس كان يرى أن الزوائد الشُّجَيرية، على أقصى تقدير، هي الفتيل الذي يحمل اللهب مسافةً قصيرةً إلى جسم الخلية، وعلى أقل تقدير، ماصَّةٌ تلتهم بعض الأيونات.

رأيُ إيكلس حول الزوائد الشُّجَيرية وضعه في خلافٍ مع زميله ويلفريد رال. حصل رال على درجة علمية في الفيزياء من جامعة ييل عام ١٩٤٣، لكن بعد أن قضى وقتًا في العمل على مشروع مانهاتن أصبح مهتمًّا بعلم الأحياء. لذا انتقل إلى نيوزيلندا للعمل مع إيكلس على تأثيرات الاستثارة العصبية عام ١٩٤٩.

ونظرًا لخلفية رال الدراسية، انتقل سريعًا إلى التحليلات الرياضية والنماذج المحاكية لفهم أنظمةٍ معقدة؛ مثل الخلية الحيَّة. وقد ألهمه وحفَّزه الجهد البحثي لكلٍّ من هودجكين وهكسلي، ذلك الجهد الذي كان قد سمع به عندما زار هودجكين جامعة شيكاغو، التي كان رال يدرس فيها للحصول على درجة الماجيستير. من منطلق هذا النموذج الرياضي،

راود رال شعورٌ بأن الزوائد الشُّجَيرية يمكنها أن تؤديَ دورًا أكبر من الدور الذي حدَّده إيكلس. بعد قضاء وقتٍ في نيوزيلندا، كرَّس رال جزءًا كبيرًا من حياته المهنية لإثبات مدى أهمية دور الزوائد الشجيرية؛ ومن ثم إثبات أهمية الدور الذي تلعبه النماذج الرياضيَّة في التنبُّؤ بالاكتشافات في علم الأحياء.

استنادًا إلى تمثيل الخلية بدائرة كهربية، مثَّل رال الحِبال الدقيقة للزوائد الشُّجَيرية بما يُشبهها تمامًا؛ أي بالكَبْلات. بدراسة الزوائد الشجيرية من منظور «نظرية الكبلات»، يُعامَل كل جزء من الزوائد الشجيرية باعتباره سلكًا ضيقًا جدًّا، يحدد سُمكه مقاومته، كما اكتشف أوم. بتركيب هذه الأجزاء وتوصيلها معًا، استكشف رال كيف يمكن للإشارة العصبية الكهربية عند الطرف الأبعد من الزائدة الشُّجَيرية، أن تشُقَّ طريقها نحو جسم الخلية، والعكس صحيح.

بَيْد أن إضافة مزيد من الأجزاء إلى هذا النموذج الرياضي كان يعني معالجة المزيد من الأرقام. ولم يكن لدى معاهد الصحة الوطنية الأمريكية (NIH) في بيثيسدا في ولاية ميريلاند — حيث كان يعمل رال — كمبيوتر رقمي مناسب لعمليات المحاكاة الأكبر التي أرادها رال. عندما أراد رال حل معادلات النموذج مع إضافة الزوائد الشجيرية، كانت مهمةُ مارجوري فايس — وهي مبرمجةٌ في معاهد الصحة الوطنية الأمريكية — توصيلَ صندوقٍ يحتوي على مجموعةٍ من البطاقات، بها تعليماتٌ لإجراء المعادلات على الكمبيوتر، إلى العاصمة واشنطن لحل المعادلات على الكمبيوتر الموجود هناك. لم يتمكَّن رال من رؤية نتائج نموذجه إلى أن عادت في اليوم التالي.

من خلال استكشافات رال الرياضية الواضحة، أظهر بوضوح أن جسم الخلية في ظل وجود الزوائد الشجيرية، يمكن أن يكون له خواصُّ كهربية مختلفة جدًّا عنه من دون زوائد شجيرية. نُشر وصفٌ مختصرٌ للعمليات الحسابية التي أجراها رال في عام ١٩٥٧، وكان ذلك الوصف بمثابة الشرارة التي أشعلت فتيل جدالٍ دام لسنواتٍ بين الرجلَين، في صورة وابلٍ من المؤلَّفات والعُروض التقديمية من الطرفَين.[٧] كان كل طرف يشير إلى

[٧] وفقًا لرال، حال إيكلس دون نشر العمل الذي أنجزه. وجاء في مخطوطة له عام ١٩٥٨ ما يلي: «استطاع أحد المحكمين إقناع المحررين برفض هذه المخطوطة. وقد أثبتَ العديدُ من الملاحظات الهامشية المدوَّنة على المخطوطة التي أُعيدت تلك الحقيقة.»

الأدلة التجريبية، وما يرتبط بها من عملياتٍ حسابية لتعضيد موقفه. لكن ببطء، مع مرور الوقت، غيَّر إيكلس من موقفه. فبحلول عام ١٩٦٦ كان قد قَبِل علنًا اعتبار الزوائد الشُّجَيرية تروسًا مناسبةً في آلية «الخلية العصبية». كان رال محقًّا.

لم تقتصر نظرية الكَبْلات على كَشْف خطأ إيكلس فحسب. بل وفَّرت لرال وسيلةً لاستكشاف العديد من الأشياء السحرية التي يمكن للزوائد الشجيرية فِعْلها باستخدام المعادلات، قبل أن تتاح الوسائل التجريبية لفعل ذلك. وكان تحديد الترتيب إحدى المهارات المهمة التي توصَّل إليها رال. فقد رأى في عمليات المحاكاة التي قام بها أن الترتيب الذي تحصُل به الزوائد الشجيرية على المدخلات له آثارٌ مهمة على استجابة الخلايا. إذا حصلت الزوائد الشجيرية الموجودة في أبعد طرف على المدخلات أولًا، ثم حصلت الأقرب فالأقرب إلى جسم الخلية على المدخلات، فقد تطلق الخلية جهدَ فِعل. لكن إذا عُكس هذا النمط فلن تُطلق الخلية جهد فعل. وذلك لأن المدخلات القادمة من طرف بعيد عن جسم الخلية تستغرق وقتًا أطول كي تصل إليه. ومن ثم قدوم المدخلات من أقصى طرف أولًا يعني أن جميع المدخلات ستصل إلى جسم الخلية في الوقت نفسه. هذا يؤدي إلى إحداث تغيير كبير في جهد الغشاء، وربما يؤدي لإطلاق جهد فعل. أما إذا حدث العكس فستصل المدخلات في أوقات مختلفة، وهذا بدوره سيُحدث اضطرابًا متوسطًا في فرق الجهد. في سباقات الركض التي يبدأ فيها العدَّاءون الركض في أزمنة ومواقع مختلفة، الطريقة الوحيدة لجعلهم يعبرون خط النهاية معًا هي جعل العدَّائين الأبعد يبدءون أولًا.

طرح رال هذا التنبؤ عام ١٩٦٤. وفي عام ٢٠١٠ ثبتت صحة هذا التنبؤ في الخلايا العصبية الحقيقية. وللتأكد من صحة فرضية رال، أخذ باحثون في جامعة كوليدج لندن عينةً من الخلايا العصبية الموجودة في أدمغة الفئران. بتثبيت هذه الخلايا العصبية في طبق، أمكن للباحثين التحكم في إطلاق النواقل العصبية في أجزاء معينة من الزائدة الشجيرية، وهي أجزاء صغيرة لا تتجاوز المسافة بين كل جزءٍ منها وآخر خمسة ميكرونات (أو بعبارة أخرى، يعدل سمكُها سُمك خلية الدم الحمراء) على حِدة وليس بالتزامن. عندما انتقل المدخل من طرف الزائدة الشجيرية إلى جذرها، أطلقت الخلية العصبية جهد فعل، وبلغ معدل الإطلاق ٨٠ في المائة من إجمالي عدد المرات. وعندما انتقل المدخل من الأماكن القريبة من جسم الخلية أولًا، استجابت الخلية نصف عدد المرات فقط.

أوضح هذا العمل أنه حتى أصغر الأجزاء الحية له غرضٌ. فحقيقة أن أجزاء الزائدة الشجيرية تعمل مثل مفاتيح البيانو — حيث يمكن عزف النوتات نفسها بطرق مختلفة

للحصول على مؤثرات مختلفة — تُزوِّد الخلايا العصبية بجِيَلٍ جديدة. على وجه التحديد، هذه الحقيقة تجعل الخلايا العصبية تتشرب مهارة تحديد التتابعات. ثمة كثيرٌ من الحالات التي يجب فيها معاملة المدخلات التي تعبُر إلى الزائدة الشجيرية من أحد الاتجاهات، بطريقةٍ مختلفةٍ عن المدخلات التي تعبر إلى الزائدة الشجيرية من الاتجاه المعاكس. على سبيل المثال، تتميَّز الخلايا العصبية في الشبكية بهذا النوع من «انتقائية الاتجاه». هذا يمكنها من تحديد اتجاه حركة الأجسام في مجال الرؤية.

في الكثير من حصص العلوم، يُعطى التلاميذ الأدوات اللازمة لتكوين دائرة كهربية كي يلهوا بها. فيمكنهم استخدام أسلاك لها مقاومات مختلفة لتوصيل المكثفات والبطاريات؛ وذلك لجَعْل مصباحٍ كهربي يضيء، أو مروحةٍ تدور. وعلى غرار طريقة فك وتركيب الدائرة الكهربية، يصمِّم علماء الأعصاب في وقتنا هذا نماذج للخلايا العصبية. وقد ساعد رال على إضافة المزيد من الأجزاء إلى المجموعة.

إذا كان النموذج القياسي للخلية العصبية عبارةً عن بيتٍ صغيرٍ مشيدٍ من لبنات الهندسة الكهربية، فإن النموذج الذي شيَّده مشروع الدماغ الأزرق عام ٢٠١٥ هو مدينةٌ كاملة. عمل ٨٢ عالمًا ينتمون إلى ١٢ مؤسسةً معًا باعتبارهم جزءًا من هذا الجهد البحثي المشترك غير المسبوق. كان هدفهم محاكاة جزءٍ من دماغ الفأر في حجم حبة رملٍ كبيرة. ومن أجل ذلك فحصوا الدراسات السابقة، وقضوا سنواتٍ في إجراء تجاربهم لجَمْع كل ما يمكنهم جمعُه من البيانات، حول الخلايا العصبية في هذه المنطقة من الدماغ. وقد تعرَّفوا على القنوات الأيونية التي تستخدمها هذه الخلايا، وطول محاورها العصبية، وأشكال زوائدها الشُّجَيرية، ومدى تراصِّ هذه الخلايا بالقرب من بعضها، ومدى تواتر اتصال هذه الخلايا ببعضها. ومن خلال هذا تمكَّنوا من التعرُّف على ٥٥ شكلًا قياسيًّا يمكن أن تتخذها الخلايا العصبية، و١١ شكلًا من أشكال الاستجابة الكهربية التي يمكن أن تصدر عنها، وعددٍ من الوسائل المختلفة التي يمكن أن تتفاعل بها.

استخدموا هذه البيانات لتصميم محاكاة، وهي محاكاةٌ كانت تتضمَّن أكثر من ٣٠ ألفًا من نماذج الخلايا العصبية التفصيلية، تُشكِّل مجتمعةً ٣٦ مليون وَصلة. تطلَّب النموذج بالكامل جهاز كمبيوتر فائقًا صُمِّم خصوصًا لحل مليارات المعادلات التي تحدِّد هذا النموذج. إلا أن كل هذا التعقيد لا يزال ينبع من الأفكار الأساسية نفسها التي جاء بها لابيك وهودجكين وهكسلي ورال. آيدان سيجيف، أحد كبار الباحثين العاملين في المشروع

لخص المنهج على النحو الآتي: «نستخدم نموذج هودجكين وهكسلي بطريقةٍ موسعة، ونصمِّم محاكاة للطريقة التي تكون بها هذه الخلايا نشطةً للحصول على آلية انتقال جهدِ الفعل — أي النشاط الكهربي — لهذه الشبكة من الخلايا العصبية، التي لا بد أنها تُحاكي الشبكة البيولوجية الحقيقية التي نحاول فَهْمها.»

كما أوضح الفريق في مؤلَّف يوثِّق هذا العمل، كان النموذج قادرًا على محاكاة العديد من خواص الشبكة البيولوجية الحقيقية. أظهرت المحاكاة تسلسلاتٍ متماثلةً من أنماط إطلاق جَهْد الفعل بمرور الوقت؛ مجموعة متنوعة من الاستجابات عَبْر مختلف أنواع الخلايا والتذبذبات. لعب هذا النموذج الواقعي دورًا أكبر من مجرد تكرار النتائج المستقاة من تجارب سابقة، فقد جعل استكشاف تجارب جديدة بسرعةٍ وسهولةٍ أمرًا ممكنًا. المحاكاةُ بالكمبيوتر للأنظمة البيولوجية جعلَت الدراسات الافتراضية لهذه المنطقة من الدماغ بسيطة، مثل كتابة أسطرٍ قصيرةٍ لكود، وهو منهجٌ يُطلق عليه علم الأعصاب «القائم على المحاكاة بالكمبيوتر».

إجراءُ عمليات محاكاةٍ كهذه لا يعطي تنبؤاتٍ دقيقة، إلا إذا كان النموذج الذي تقوم عليه المحاكاة نسخةً منطقيةً وطبق الأصل من النظام أو العملية البيولوجية. بفضل لابيك، علمنا أن استخدام معادلات الدائرة الكهربية، باعتبارها تنوب عن الخلية العصبية، هو الأساس المتين الذي تُبنى عليه نماذج الدماغ. فقد كانت مقارنته هي المنطلَق الذي بدأت منه دراسة العصب باعتباره جهازًا كهربيًّا. توسيع نطاق مقارنته من جانب عدد لا يحصى من العلماء الآخرين — العديد منهم مدرَّب في الفيزياء وعلم وظائف الأعضاء — أدى إلى توسيع قوتها التفسيرية أكثر. إذن، على عكس حدس مولر، تدب الحياة في الجهاز العصبي بفضل سريان الكهرباء كما أن دراسته قد انتعشت بفضل دراستها.

الفصل الثالث

# تعلُّم الحَوْسَبة

نموذج ماكولك-بيتس والبيرسيبترون والشبكات العصبية الاصطناعية

ظل عالم الرياضيات بجامعة كامبريدج برتراند راسل يكدح طيلة ١٠ سنوات في بداية القرن العشرين؛ من أجل تحقيق هدفٍ محوري؛ ألا وهو تحديد الجذور الفلسفية التي ينبثق منها علم الرياضيات بأكمله. أثمر هذا المشروع الطَّموح، الذي اضطلع به بالتعاون مع معلمه السابق ألفريد وايتهيد، عن كتاب «مبادئ الرياضيات» Principia Mathematica، الذي وصل إلى الناشرين متأخرًا عن موعده وبميزانية أكبر من المخطط لها. واضطر المؤلفان أنفسهما إلى الاشتراك معًا في دَفْع تكاليف النشر، ولم يحصلا على أي عوائد مادية نظير حقوق التأليف طيلة ٤٠ عامًا.

لكن ربما كانت العقبة المالية هي الأصغر بين العقبات التي اعترضت سبيل إنجاز هذا العمل. فقد تعين على راسل خوض معارك ذهنية أثناء جمع المادة العلمية. ووفقًا لسيرته الذاتية، كان يقضي نهاره يحدق في ورقة بيضاء وليله يفكر في القفز أمام قطار. وقد تزامن تأليف راسل للكتاب مع فسخ عقد زواجه وتوتُّر علاقته بوايتهيد، الذي كان، وفقًا لراسل، يخوض معاركه الذهنية والأسرية آنذاك. تطلَّب الكتاب جهدًا بدنيًّا أيضًا. كان راسل يقضي ١٢ ساعة يوميًّا على مكتبه يدوِّن العلاقات المعقَّدة بين الرموز التي يحتاج إليها؛ لتوصيل أفكاره الرياضية المعقدة، وعندما حان الوقت لتقديم النسخة المكتوبة باليد للناشر، كانت أكبر من أن يتمكن من حملها. على الرغم من كل هذا، تمكن راسل ووايتهيد أخيرًا من إكمال ونشر الكتاب الذي كانا يأملان في أنه سيحدُّ من جموح الرياضيات.

كان تصور «مبادئ الرياضيات» هو أنه يمكن اختزال جميع المبادئ الرياضية وردها إلى المنطق. بعبارة أخرى، اعتقد راسل ووايتهيد أنه يمكن دمج عدد قليل من العبارات، تُعرف باسم «التعبيرات»، بالطريقة الصحيحة للحصول منها على جميع صياغات علماء الرياضيات وادعاءاتهم واستنتاجاتهم. هذه التعبيرات غير ناتجة عن أي ملاحظات للعالم الحقيقي. بل من المفترض أن تكون عامة. على سبيل المثال، التعبير: إذا كانت س صحيحة، فهذا يقتضي صحة العبارة «س أو ص صحيحة». هذه التعبيرات مكونة من قضايا منطقية، وهي الوحدات الأساسية للمنطق التي قد تكون صحيحة أو خاطئة، وتُكتب على صورة حروف مثل س أو ص. تُدمج هذه القضايا معًا باستخدام معاملات الربط المنطقية أو البوليانية[١] مثل «و»، و«أو»، و«ليس».

في المجلد الأول من الكتاب المذكور، قدَّم راسل ووايتهيد أقل من دَستَتَين من هذه التعبيرات المجردة. ومن هذه البذور المتواضعة، انبثقت مبادئ الرياضيات على أيديهما. حتى إنهما — بعد عشرات الصفحات المملوءة بالرموز — تمكنا بنجاح من استنتاج أن ١ + ١ = ٢.

برهنة راسل ووايتهيد على أن قوانين المنطق البسيطة[٢] قادرةٌ على استيعاب علم كامل بعظمة الرياضيات؛ كانت لها تبعات فلسفية هائلة؛ لأنها قدمت دليلًا على أهمية المنطق. كما كانت تعني أن اكتشافًا توصَّل له باحثان آخران بعد نحو ٣٠ عامًا سيكون له تبعاتٌ هائلةٌ في حد ذاته. ينص هذا الاكتشاف على أن الخلايا العصبية ببساطة، وفقًا لطبيعة تشريحها ووظائفها، تُعد تطبيقًا لقوانين المنطق. أحدثَت هذه النتيجة ثورةً في دراسة الدماغ والذكاء نفسه.

عندما كان والتر بيتس، الذي يعود منشؤه لمدينة ديترويت، في الثانية عشرة من عمره دعاه راسل للانضمام إليه، ومواصلة دراسته كأحد طلاب الدراسات العليا في جامعة كامبريدج. حسبما تقول القصة، عثر الفتى الصغير على نسخةٍ من كتاب «مبادئ الرياضيات» بعد أن ركض إلى داخل مكتبةٍ للاحتماء من بعض المُتنَمِّرين. بعد قراءته للكتاب، وجد بيتس

[١] نسبة إلى عالم الرياضيات الإنجليزي جورج بول. ويُشار إلى أنه على الرغم من استخدام راسل ووايتهيد لأفكاره، فإنهما لم يستخدما كلمة «بولياني»؛ لأنها لم تكن قد نُحِتَت حتى عام ١٩١٣.

[٢] على الأقل هذا ما بدا عليه الأمر آنذاك ... سنعرف مزيدًا عن هذا لاحقًا.

ما اعتبر أنها أخطاء في العمل. لذا، أرسل ملاحظاتِه حول الموضوع إلى راسل، الذي لم يكن يعرف عمره على الأرجح؛ ومن ثَم عرض عليه المنصب. لم يقبل بيتس بالعرض. لكن بعد مرور سنواتٍ قصيرة، عندما كان راسل يزور جامعة شيكاغو، ذهب بيتس لحضور محاضراته. بعد هرب بيتس من منزل عائلته الذي تعرض فيه للإيذاء إلى شيكاغو، قرَّر ألَّا يعود. ظل في المدينة مشردًا بلا مأوًى.

لحسن الحظ، كانت جامعة شيكاغو تضم عالم منطق آخر ذا شهرة عالمية لكي ينتقده بيتس، وهو رودولف كارناب. وكتب بيتس ملاحظاتٍ مجددًا، لكنه هذه المرة حدد المشكلات الموجودة في كتاب كارناب الحديث «بِنْية اللغة المنطقية»، وأوصلها إلى مكتب كارناب في جامعة شيكاغو. لم يبقَ بيتس في مكانه فترة كافية كي يعلم بردة فعله، لكن كارناب الذي انبهر بالملاحظات، اقتفى أثر بيتس الذي أطلق عليه اسم «موزع الجرائد الذي يفهم المنطق». في هذه المناسبة، عرض الفيلسوف الذي انتقده بيتس أن يعمل بيتس معه. ومع أن بيتس لم يلتحق رسميًّا بالجامعة عُومل وكأنه طالب دراساتٍ عليا لدى كارناب، وكوَّن علاقة ودية مع مجموعة من الباحثين المهتمين بعلم الأحياء الرياضي.

اتخذ اهتمام وارن ماكولك بالفلسفة شكلًا تقليديًّا أكثر. فقد درس ماكولك، الذي ولِد في نيوجيرسي، الفلسفة (جنبًا إلى جنب مع علم النفس) في جامعة ييل، وقرأ العديد من الأعمال العظيمة. كان مفتونًا جدًّا بإيمانويل كانط وجوتفريد لايبنتس (اللذَين كانت أفكارهما مؤثرة جدًّا بالنسبة إلى راسل)، كما قرأ كتاب «مبادئ الرياضيات» في الخامسة والعشرين من عمره. على الرغم من اللحية التي تحدد وجهه الطويل، لم يكن ماكولك فيلسوفًا؛ بل كان اختصاصيًّا في علم وظائف الأعضاء. ارتاد مدرسة الطب في مانهاتن، ثم واصل ملاحظة مجموعة الطرق التي يمكن أن يَتلَف بها الدماغ، خلال تدريبٍ تلقَّاه في مجال علم الأعصاب في مستشفى بيليفو، وفي مستشفى روكلاند للطب النفسي التابع للدولة. في عام ١٩٤١، انضم لجامعة إلينوي في شيكاغو مديرًا لمختبر البحوث الأساسية في قسم الطب النفسي.

وكما يحدث في جميع القصص الأصلية العظيمة، هناك رواياتٌ متضاربةٌ حول كيفية التقاء ماكولك وبيتس. تزعُم إحدى الروايات حدوث ذلك، عندما تحدث ماكولك أمام مجموعةٍ بحثيةٍ كان بيتس من بين أعضائها. وتنصُّ روايةٌ أخرى على أن كارناب عرَّف كلًّا منهما إلى الآخر. وأخيرًا، زعم أحد المعاصرين للرَّجلَين، وهو جيروم ليتفين، أنه عرَّف كلًّا منهما إلى الآخر واجتمع ثلاثتهم على حب لايبنتز. على أي حال، بحلول عام ١٩٤٢،

استضاف ماكولك، البالغ من العمر آنذاك ٤٣ عامًا، وزوجتُه بيتسَ البالغ من العمر آنذاك ١٨ عامًا في منزلهما، وكان الرجلان يقضيان أمسياتهما في شرب الويسكي ومناقشة المنطق.

كان الجدار الذي يفصل «العقل» عن «الجسم» منيعًا بين العلماء في بدايات القرن العشرين. فكان يُنظَر إلى العقل باعتباره شيئًا داخليًّا وغير محسوس، في حين كان الجسم، بما في ذلك الدماغ، شيئًا محسوسًا. على جانبَي هذا الجدار، كان الباحثون يعملون بجدٍّ، لكن بشكلٍ منفصل، على مشكلاتهم البحثية. فعلماء الأحياء، كما رأينا في الفصل الأخير، كانوا يبذلون قُصارى جهدهم للكشف عن الآلية الفيزيائية لعمل الخلايا العصبية، وذلك باستخدام الماصَّات والأقطاب الكهربية والمواد الكيميائية؛ لتفسير الأسباب التي تؤدي لإطلاق جهد الفعل وكيفية إطلاقه. على الجانب الآخر، يحاول الأطباء النفسيون الكشف عن آلية عمل العقل، خلال جلساتٍ مطولةٍ من التحليل النفسي الفرويدي. حاول القليل من الباحثين من كِلا الطرفَين النظر إلى الجانب الآخر من الجدار. كان الطرفان يتحدثان بلُغتَين مختلفتَين، وكانا يعملان من أجل تحقيق أهدافٍ مختلفة. بالنسبة إلى معظم الممارسين، السؤال عن كيفية تكوين بنية العقل عن طريق اللبنات الأساسية العصبية لم يكن من دون إجابةٍ فحسب؛ بل إنه لم يُطرح من الأساس.

لكن ماكولك منذ وقت مبكر من وجوده في مدرسة الطب انغمس وسط حشدٍ من العلماء، الذين اهتموا بهذا السؤال ومنحوه حيزًا للتفكير فيه. في النهاية، من خلال ملاحظاته الفسيولوجية، جاء بفكرة. فقد رأى إمكانية رَبْط المفاهيم الناشئة في علم الأعصاب بمفاهيم المنطق والحوسبة التي راقَت له كثيرًا في الفلسفة. فالتفكير في الدماغ باعتباره جهازًا حاسوبيًّا يخضع لقوانين المنطق، وليس مجرد حقيبةٍ من البروتينات والمواد الكيميائية، سيفتح الباب أمام فَهْم التفكير فيما يتعلَّق بالنشاط العصبي.

ومع ذلك، لم تكن المهارة التحليلية هي الجانب الذي برع فيه ماكولك. فقد ذكر بعض معارفه أنه كان أكثر شاعرية من أن تُحجِّمه هذه التفاصيل. لذا، رغم أنه قضى سنواتٍ في العبث بهذه الأفكار في عقله أو بالحديث مع غيره (حتى أثناء تدريبه في بيليفو، اتُّهِم «بمحاولة كتابة معادلة لآلية عمل الدماغ»)، واجه ماكولك العديد من المشكلات الفنية الخاصة بكيفية تطبيق هذه الأفكار. في المقابل، كان بيتس غير منزعج من الجانب التحليلي. لذا، بمجرد أن تحدث معه عن هذا، علم بيتس بالمناهج المطلوبة لصياغة أفكار ماكولك. ولم تمضِ فترة قصيرة على لقائهما، حتى كُتبت واحدة من أكثر الأوراق البحثية حول الحوسبة تأثيرًا.

نُشرت الورقة البحثية تحت عنوان: «الحساب المنطقي للأفكار الجوهرية في النشاط العصبي» عام ١٩٤٣. كانت الورقة مكونة من ١٧ صفحة، وتحتوي على العديد من المعادلات، وثلاثة مراجع فقط (أحدها كتاب «مبادئ الرياضيات»)، وشكل واحد يتكون من بعض الدوائر العصبية التي رسمتها ابنة ماكولك.[٣]

تبدأ الورقة بمراجعة الخواص البيولوجية للخلايا العصبية التي كانت معروفة آنذاك، وهي: أن الخلية العصبية تتكون من جسم الخلية والمحور العصبي، وأن الخلية العصبية تتصل بأخرى عندما يلتقي المحور العصبي للأولى بجسم الثانية، وخلال هذا الاتصال أو الارتباط تُمِدُّ إحدى الخلايا الخلية الأخرى بمدخَلات، ويتطلب إطلاق الخلية العصبية لإشارات عصبية كهربية قدرًا معينًا من المدخلات، والخلية إما أن تُطلق إشارات عصبية كهربية أو لا تطلق على الإطلاق، ولا يوجد احتمالٌ بين هذا وذاك، كما أن المدخلات الواردة من بعض الخلايا العصبية، أي الخلايا العصبية المثبِّطة، لها القدرة على منع الخلية من إطلاق جهد فعل.

بعد ذلك، واصل ماكولك وبيتس شرح كيف أن هذه التفاصيل البيولوجية تتماشى مع المنطق البولياني. الأساس الذي بُني عليه ادعاؤهما هو أن حالة نشاط الخلية العصبية، سواء تُطلِق إشاراتٍ عصبية كهربية أو لا تُطلق، مماثلة لقيمة الحقيقة لقضية منطقية، أي كونها صحيحة أو خاطئة. على حسب وصفهما، اعتبرا «استجابة الخلية العصبية مكافئة في الواقع لقضية منطقية تطرح المثير المناسب».

بكلمة «المثير المناسب» كانا يُشيران إلى شيءٍ عن العالم. تخيَّل خليةً عصبيةً في القشرة البصرية للدماغ يُمثِّل نشاطها العبارة التالية: «المثير البصري الحالي يشبه البطة». إذا أطلقت هذه الخلية العصبية إشاراتٍ عصبيةً كهربيةً تكون هذه العبارة صحيحة، وإذا لم تطلق الخلية العصبية إشاراتٍ عصبيةً كهربيةً تكون العبارة خاطئة. تخيَّل الآن خليةً عصبية أخرى في القشرة السمعية للدماغ، تُمثِّل العبارة: «المثير السمعي الحالي يُبَطْبط مثل البطة». مرة أخرى، إذا أطلقت الخلية العصبية إشاراتٍ عصبية كهربية تكون العبارة صحيحة، وخلاف ذلك تكون العبارة خاطئة.

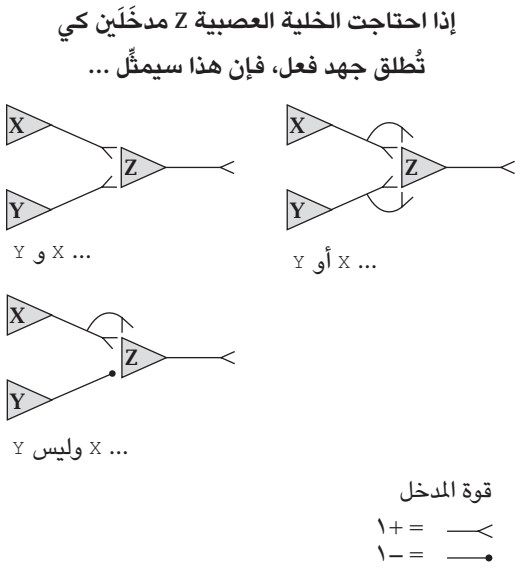
[٣] ملاحظة: استخدم علماء الأعصاب مصطلح الدوائر العصبية للإشارة إلى مجموعة من الخلايا العصبية المتصلة بطريقة محددة.

الآن، يمكننا استخدام هذه الوصلات بين الخلايا العصبية لتطبيق العمليات البوليانية. على سبيل المثال، بإعطاء خليةٍ عصبية ثالثة مدخلات من كلتا هاتَين الخليَّتَين العصبيتَين، يمكننا تطبيق قاعدة «إذا كان المثير يشبه البطة ويُبَطْبط مثل البطة، إذن فهو بطة». كل ما علينا فعله هو تصميم الخلية العصبية الثالثة، بطريقةٍ تجعلها لا تُطلق إشاراتٍ إلا إذا أطلقت الخليتان العصبيتان المُدخِلتان الإشاراتِ العصبية. وبهذه الطريقة، لا بد أن تكون عبارتا «يشبه البطة» و«يُبَطْبط مثل البطة» كلتاهما صحيحتَين؛ كي تكون النتيجة التي تمثلها الخلية العصبية الثالثة («إنها بطة») صحيحة.

يصف ذلك الدائرة العصبية البسيطة اللازمة لتطبيق العملية البوليانية «و». عرض ماكولك وبيتس في بحثهما كيفية تطبيق العديد من العمليات الأخرى. تطبيق «أو» مشابه جدًّا، إلا أن قوة الوصلات بين الخلايا العصبية لا بد أن تكون كبيرة بما يكفي؛ بحيث يكون مدخلٌ واحد كافيًا لجعل الخلية العصبية المُخرِجة للإشارة العصبية تُطلِق إشارات عصبية كهربية. في هذه الحالة، ستُطلق الخلية العصبية التي تُمثِّل عبارة «إنها بطة» إشارات عصبية كهربية، في حالة إطلاق إشاراتٍ بواسطة الخلية العصبية التي تمثِّل عبارة «يشبه البطة»، أو بواسطة الخلية العصبية التي تمثِّل عبارة «يُبَطْبط مثل البطة»، أو إطلاق إشاراتٍ بواسطة هاتَين الخليتَين كلتَيهما. علاوة على ذلك، عرض المؤلفان كيفية ربط العديد من العمليات البوليانية معًا. على سبيل المثال، لتطبيق عبارةٍ مثل X وليس Y، تتصل الخلية العصبية التي تُمثِّل X بالخلية العصبية المُخرِجة للإشارات العصبية الكهربية بقوةٍ كافيةٍ تجعلها تُطلق إشاراتٍ عصبية. أما الخلية العصبية التي تُمثِّل Y فتثبط الخلية العصبية المُخرِجة للإشارات، وهو ما يعني أنها تمنعها من الإطلاق. بهذه الطريقة، ستطلق الخلية العصبية المُخرِجة للإشارات إذا أطلقت الخلية العصبية التي تمثِّل X إشاراتٍ ولم تُطلق الخلية العصبية التي تمثِّل Y إشاراتٍ.

هذه الدوائر العصبية، التي يُفترض بها تمثيل ما يمكن للشبكات العصبية الحقيقية فعله، أصبحت تُعرف باسم الشبكات العصبية الاصطناعية.

كانت القدرة على رَصْد المنطق في تفاعلات الخلايا العصبية معًا نابعةً من عين ماكولك البصيرة. ونظرًا إلى أنه اختصاصيٌّ في علم وظائف الأعضاء، كان يعلم أن الخلايا العصبية أكثر تعقيدًا من رسومه البسيطة والمعادلات التي اقترحها. فهي تحتوي على أغشية وقنوات أيونية ومسارات متشعبة للزوائد الشجيرية. لكن النظرية لم تتطلب هذا التعقيد بالكامل. ومن ثم، فإنه، كأي رسام انطباعي يكتفي برسم الخطوط والأشكال




شكل ٣-١

الضرورية فقط، لم يُبرِز سوى عناصر النشاط العصبي الضرورية في القصة التي يريد أن يقُصها. ومن خلال ذلك، يكون قد أظهر البراعة الفنية التي تُعد جزءًا لا يتجزأ من بناء النموذج؛ فتقرير الحقائق التي يتعين علينا إبرازها يُعد عملية ذاتية خلاقة.

القصة الجذرية التي حكاها ماكولك وبيتس باستخدام نموذجهما، أن الخلايا العصبية تُجري حسابات منطقية، كانت أول محاولة لاستخدام مبادئ الحوسبة، لتحويل مُعضِلة العقل والجسد إلى اتصال العقل بالجسد. أصبحت شبكات الخلايا العصبية الآن متأثرةً بقوانين نظامٍ منطقيٍّ شكلي. ومثل سقوط سلسلة متعاقبة من قِطع الدومينو، بمجرد إدخال قيم الحقيقة إلى مجموعةٍ من الخلايا العصبية (لِنقُل عن طريق أعضاء حسية)؛ تمكنت سلسلة من التفاعلات من استنتاج قيمة الحقيقة لعباراتٍ جديدةٍ ومختلفة. كان هذا يعني أنه يمكن لمجموعة من الخلايا العصبية تنفيذ عمليات حسابية لا نهائية؛ إذ يمكنها تفسير المدخلات الحسية، والوصول إلى استنتاجات، ووضع الخطط، والاستدلال من خلال الحجج، وإجراء العمليات الحسابية، وما إلى ذلك.

بهذه الخطوة في بحث ماكولك وبيتس، أحرزا تقدمًا في دراسة التفكير البشري، وفي الوقت نفسه أسقطاه من على عرشه. فقد «العقل» مكانته باعتباره لغزًا محيرًا وسماويًّا بمجرد أن هبط من عليائه إلى أرضٍ صلبة، أي بمجرد أن اختُزلت قدراتُه العظيمة في عملية إطلاق الخلايا للإشارات العصبية. بتطويع اقتباس ذَكَره ليتفين، يمكن وصف الدماغ بأنه «آلة، صحيح أنها من لحم ودم وإعجازية، لكنها في النهاية تظل آلة». وبجرأةٍ أكبر، أشار لاحقًا مايكل أربيب، تلميذ ماكولك، إلى أن هذا العمل «قتل ثُنائية العقل والجسد».

كان معروفًا عن راسل أسفُه على التأثير الطفيف لكتاب «مبادئ الرياضيات» على علماء الرياضيات الممارسين، رغم أنه استغرق فيه ٢٠ عامًا، ورغم تأثيره على علماء المنطق والفلاسفة. فقد كان واضحًا أن تناوله الجديد لقواعد الرياضيات لم يعنِ الكثير للذين يجرون العمليات الحسابية: أي إنه لم يُغيِّر شيئًا من عملهم اليومي. الشيء نفسه يمكن أن ينطبق على أثر اكتشاف ماكولك وبيتس على علماء الأعصاب في ذلك الوقت. فعلماء الأحياء واختصاصيو علم وظائف الأعضاء وعلماء التشريح — أي العلماء الذين يتولَّوْن مهمة التحليل الفيزيائي للخلايا العصبية للحصول على تفاصيل حول آلية عملها — لم يستفيدوا كثيرًا من النظرية. ويرجع ذلك جزئيًّا إلى أن ماهية التجارب التي تترتب على هذه النظرية لم تكن واضحةً. قد يكون ذلك نابعًا من اعتماد الورقة على الصيغ العلمية المتخصصة وافتقارها إلى أسلوب الكتابة الجذاب. في مراجعةٍ كُتبت حول التوصيل العصبي بعد ذلك بثلاث سنوات، أشار الكاتب إلى أن ورقة ماكولك وبيتس البحثية «ليسَت للقارئ العادي» وأوضح أنه كي يؤتي مثل هذا العمل ثماره لا بد «أن يتعرَّف اختصاصيُّو علم وظائف الأعضاء على التقنيات الرياضية، أو أن يفسِّر علماء الرياضيات، على الأقل، النتائج التي توصلوا إليها بلُغةٍ أقل صعوبة». ربما انهار الجدار الفاصل بين العقل والجسد، لكنَّ الجدار الفاصل بين علماء الأحياء وعلماء الرياضيات لا يزال شامخًا.

كانت هناك مجموعة منفصلة من الأشخاص — مجموعة لديها المعرفة التقنية المطلوبة — الذين اهتموا بالحسابات المنطقية للخلايا العصبية. خلال حقبة ما بعد الحرب، جمعت سلسلة من الاجتماعات التي استضافتها مؤسسة مايسي الخيرية كُلًّا من علماء الأحياء وخبراء التكنولوجيا، الذين تمنى الكثير منهم استخدام النتائج البيولوجية لبناء آلات محاكية للدماغ. كان ماكولك أحد المنظمين لهذه الاجتماعات، وقد تضمَّن الزملاء الحضور نوربرت وينر — الأب الروحي لعلم السيبرانية — وجون فون نيومان مخترع

معمارية الحاسوب الحديث، الذي استوحى تصميمها مباشرة من نموذج ماكولك-بيتس المحاكي للخلايا العصبية. بعد مرور ٤٠ عامًا، أشار ليتفين إلى ما يأتي: «تجاهل العاملون في مجالَي طب الأعصاب وعلم الأحياء العصبي بالكامل كُلًّا من بنية نظرية ماكولك-بيتس ومضمونها وشكلها. في المقابل، كان الذين وجدوا في النظرية مصدر إلهام لهم هم أولئك المتحمسين لمشروع جديد، يُطلق عليه الآن الذكاء الاصطناعي.»

> أزاحت القوات البحرية الستار عن جهاز يُدعى «بيرسيبترون»، وهو النواة الأوليَّة للكمبيوتر الإلكتروني، والذي من المفترض عند اكتماله خلال نحو سنة، أن يكون أول جهاز غير حي يمتلك القدرة على «إدراك البيئة المحيطة والتعرُّف عليها وتحديدها دون تدريب أو تحكم بشري».
> أجرى الدكتور فرانك روزنبلات الباحث المتخصص في علم النفس في مختبر كورنيل المتحد لعلوم الطيران، في مدينة بافالو، نيويورك، ومصمم جهاز «بيرسيبترون» العرض التوضيحي. وقد أوضح أن هذا الجهاز سيكون أول جهاز إلكتروني يفكِّر مثل الدماغ البشري. وكما هي الحال مع البشر، سيرتكب جهاز «بيرسيبترون» الأخطاء في البداية، «لكنه سيصبح أكثر حكمة كلما اكتسب خبرة».

نُشر هذا الملخص، المأخوذ من مقالة بعنوان ««دماغ» إلكتروني يعلِّم نفسه»، في العدد الصادر بتاريخ ١٣ يوليو ١٩٥٨ من صحيفة «نيويورك تايمز»، في العمود المقابل لخطابٍ إلى المحرر بشأن النقاش الدائر حول ما إذا كان التدخين يسبب السرطان أم لا. لم يتوقف فرانك روزنبلات، المُشرف على المشروع والبالغ من العمر ٣٠ عامًا، عند حدود تدريبه في علم النفس التجريبي؛ بل تخطاها من أجل صنع كمبيوتر ينافس التكنولوجيا الأكثر تقدمًا آنذاك.

كان الكمبيوتر المشار إليه ضخمًا؛ إذ كان يفوق طولًا وعرضًا المهندسين الذين تولوا تشغيله. كان مغطًّى من الطرفَين بلوحات التحكُّم وآليات عرض النتائج. طلب روزنبلات تعيين ثلاثة «اختصاصيين» وفريق من الموظفين الفنيِّين ذوي الصلة لمدة ١٨ شهرًا لبنائه، وكانت التكلفة المقدَّرة نحو ١٠٠ ألف دولار أمريكي (نحو ٨٧٠ ألف دولار أمريكي في الوقت الحالي). كلمة «بيرسيبترون»، التي عرَّفها روزنبلات، عبارة عن مصطلح عام يُطلق على فئةٍ معينةٍ من الأجهزة يمكنها «التعرُّف على أوجه التشابه أو التطابق بين أنماط

المعلومات البصرية أو الكهربية أو السمعية». ومن ثم، فإن جهاز «بيرسيبترون»، أي الكمبيوتر الذي صُنع عام ١٩٥٨، من الناحية التقنية، عبارةٌ عن فئةٍ فرعيةٍ تُعرف باسم «البيرسيبترون الضوئي»؛ لأنه يتخذ مدخلًا له مخرجات كاميرا مثبتة على حاملٍ ثُلاثي القوائم عند أحد طرفَي الجهاز.

كان «البيرسيبترون»، كما هي الحال في النماذج المقدمة في ورقة ماكولك-بيتس البحثية، عبارة عن شبكة عصبية اصطناعية. كان نسخة مبسطة لما تقوم به الخلايا العصبية الحقيقية وكيفيةِ اتصالها معًا. لكن بدلًا من أن يظل نسقًا رياضيًّا لا يتعدى كونه معادلات مكتوبة بحبر على ورق، كان من الممكن تنفيذ «البيرسيبترون» في العالم المادي. قدمت الكاميرا للشبكة ٤٠٠ مدخل التُقطت بواسطة مستشعرات ضوئية مُرتَّبة في صورة شبكة مساحتها ٢٠ × ٢٠. بعد ذلك، جرى توصيل مخرجات هذه المستشعرات بالأسلاك توصيلًا عشوائيًّا بـ ١٠٠٠ وحدة من «وحدات التجميع» — وهي دوائر كهربية صغيرة تُجمِّع مدخلاتها وتعطي النتيجة إما «تشغيل» أو «إيقاف»، تمامًا كما هي الحال في الخلية العصبية. تصبح مخرجات وحدات التجميع هذه مدخلات لـ «وحدات الاستجابة»، التي يمكن أن تكون هي نفسها في حالة «تشغيل» أو «إيقاف». كان عدد وحدات الاستجابة مكافئًا لعدد الفئات المتنافية التي يمكن أن تنتمي إليها الصورة. إذن، إذا أرادت القوات البحرية استخدام البيرسيبترون، على سبيل المثال، لتحديد ما إذا كانت هناك طائرة نفاثة في صورة أم لا، فعندئذٍ سيكون هناك وحدتا استجابة: إحداهما خاصة بوجود طائرة، والأخرى خاصة بعدم وجود طائرة. في نهاية الجهاز المقابل للكاميرا، كانت هناك مجموعةٌ من المصابيح الكهربائية للسماح للمهندس بمعرفة وَحْدة الاستجابة التي جرى تنشيطها، أي الفئة التي ينتمي إليها المدخَل.

تنفيذ خلية عصبية اصطناعية بهذه الطريقة كان أمرًا هائلًا ومرهقًا، ومليئًا بالمفاتيح ولوحات التوصيل وأنابيب الغاز. وربما كانت الشبكة نفسها المكونة من خلايا عصبية حقيقية أصغر من حبة ملح البحر. لكن إنجاز مثل هذه الشبكة في الواقع كان أمرًا مهمًّا. فهو يعني أنه يمكن اختبار صحة النظريات التي تتناول الآلية التي تُجري بها الخلايا العصبيةُ الحساباتِ في العالم الحقيقي على بيانات حقيقية. فبينما كان عمل ماكولك-بيتس يدور حول إثبات إحدى النقاط نظريًّا، وضع البيرسيبترون هذه النقطة قيد التنفيذ.

أحد الاختلافات المهمة بين شبكة «بيرسيبترون» وشبكة ماكولك-بيتس، حسب ما قاله روزنبلات لصحيفة «نيويورك تايمز»، يتمثل في أن شبكة «بيرسيبترون» تتعلم. في

ورقة ماكولك-بيتس البحثية لم يُشِر الباحثان إلى الكيفية التي يتشكل بها الاتصال بين الخلايا العصبية. واكتفَيا بذكر أن الاتصال يُحدَّد ببساطة وفقًا للدالة المنطقية التي يتعين على الشبكة تنفيذها، ويبقى على هذا الحال. في المقابل، لكي تتعلَّم شبكة «بيرسيبترون» لا بد أن يُعدَّل الاتصال بين عناصرها.[٤] في الواقع، تستمد شبكات «بيرسيبترون» كفاءتها بالكامل من تغيير قوة الاتصال بين عناصرها، إلى أن تُصبح صحيحة تمامًا.

يُطلق على نوع التعلم الذي تنخرط فيه شبكات «بيرسيبترون» «التعلم بالإشراف». فمن خلال تقديم أزواج من المدخلات والمخرجات — لنقل مجموعة من الصور وما إذا كانت تحتوي على طائرة نفاثة أم لا — تتعلم شبكات «بيرسيبترون» كيفية اتخاذ قرار بمفردها. وهي تفعل هذا من خلال تغيير قوة الاتصالات — التي تُعرف أيضًا باسم «الأوزان» — بين وحدات التجميع والنواتج.

على وجه الخصوص، عند تزويد الشبكة بصورة فإنها تحفِّز الوحدات الموجودة في طبقة المدخلات أولًا، تليها الوحدات الموجودة في طبقة التجميع، وأخيرًا الوحدات الموجودة في طبقة النواتج موضِّحةً قرار الشبكة. إذا أخطأت الشبكة في تحديد التصنيف، فإن الأوزان تتغير وفقًا لهاتَين القاعدتَين:

(١) إذا كانت وحدة النواتج في وضع «إيقاف» في الوقت الذي ينبغي أن تكون فيه في وضع «تشغيل»؛ تُزاد قوة الاتصال بين وحدات التجميع التي تكون في وضع «تشغيل» ووحدة النواتج هذه.

(٢) أما إذا كانت وحدة المخرجات في وضع «تشغيل» في الوقت الذي ينبغي فيه أن تكون في حالة «إيقاف»، فتُضعَف قوة الاتصال بين وحدات التجميع التي تكون في وَضْع «تشغيل» ووحدات المخرجات هذه.

باتباع هاتَين القاعدتَين، ستبدأ الشبكة بربط الصور بالفئة التي تنتمي إليها ربطًا صحيحًا. إذا تمكَّنت الشبكة من تعلم هذا جيدًا، فستتوقف عن ارتكاب الأخطاء وستتوقَّف الأوزان عن التغيُّر.

[٤] يمكن الاطلاع في الفصل التالي على المزيد عن الكيفية التي يعتمد بها التعلم والذاكرة على تغير يحدث في الوصلات.

كان إجراء التعلم هذا، في العديد من النواحي، الجزء الأبرز في شبكات بيرسيبترون. فقد كان المفهومَ المفتاحي الذي يمكنه فتح جميع الأبواب. فبدلًا من الاضطرار إلى إخبار الكمبيوتر عن كيفية حل مسألة بالضبط، كل ما عليك فعله هو أن تعرض عليه أمثلة محلولة لهذه المسألة. كان لهذا القدرةُ على إحداث ثورة في إجراء العمليات الحسابية، ولم يخجل روزنبلات من التصريح بهذا. فقد أشار في تصريح لصحيفة «نيويورك تايمز» إلى أن شبكات «بيرسيبترون» ستكون «قادرة على التعرُّف على الأشخاص واستدعاء أسمائهم» و«سماع نص منطوق بلغة وترجمته على الفور لكلام منطوق أو مكتوب بلغة أخرى». وقد أضاف أيضًا أنه «سيصير ممكنًا بناء أجهزة «بيرسيبترون» يمكنها إعادة إنتاج نفسها في خط التجميع، وتكون مدركة لوجودها». أقل ما يقال عن هذا التصريح أنه كان تصريحًا جريئًا، وهذه الجرأة العلنية لم تلقَ ترحيبًا من الجميع. إلا أن فحوى الادعاء — بأن الكمبيوتر الذي يمكنه التعلُّم من شأنه أن يسرع حل أي مشكلة تقريبًا — يبدو في محله.

ومع ذلك، فإن قوة التعلم لها ثمنها. فالسماح للنظام بتقرير قوة الاتصال الخاصة به، جعل هذه الاتصالات تنفصل عن مفهوم المؤثرات المنطقية. يمكن للشبكة تعلُّم تحديد قوة الاتصال التي حددها ماكولك وبيتس باعتبارها ضرورية؛ من أجل تنفيذ العملية البوليانية «و»، والعملية البوليانية «أو» ... إلخ. إلا أنه لا يُشترط أن تفعل ذلك، وليست هناك ضرورة لفهم النظام في ضوء هذا. أيضًا، بالرغم من أن وحدات التجميع في جهاز «بيرسيبترون» مصمَّمة كي تكون في وضع: إما «تشغيل»، أو «إيقاف»، فإن قاعدة التعلم لا تشترط حدوث ذلك. في الحقيقة، مستوى نشاط هذه الخلايا العصبية الاصطناعية قد يكون أي قيمة موجبة وستُطبق القاعدة.[٥] هذا يجعل النظام أكثر مرونة، إلا أنه من دون الاستجابة الثنائية «تشغيل»-«إيقاف» يصبح من الأصعب ربط نشاط هذه الوحدات بقيم الحقيقة الثنائية للقضايا المنطقية. ومن ثم فإنه مقارنةً بسلاسة المنطق الذي تعمل وفقًا له شبكات ماكولك-بيتس، كانت شبكات «بيرسيبترون» عبارة عن فوضى ليس لها تفسير. ومع ذلك، فقد نجحت. فقد قُدمت قابلية التفسير قربانًا من أجل المهارة.

[٥] يمكن التفكير في ذلك باعتباره يمثِّل معدل إطلاق الخلية العصبية لجهود الفعل، بدلًا من تمثيل ما إذا كانت الخلية تُطلق جهد فعل أم لا. استخدام هذا النوع من الخلايا العصبية الاصطناعية لا يتطلَّب إلا تعديلًا بسيطًا في إجراء التعلُّم.

أصبح جهاز «بيرسيبترون» وإجراء التعلم الخاص به موضوعَين شائعَين للدراسة في مجال الذكاء الاصطناعي المتنامي. عند الانتقال من دراسة جهاز مادي محدد (جهاز «بيرسيبترون») إلى مفهوم رياضي مجرد (خوارزمية بيرسيبترون)، جرى التخلص من طبقات المدخلات والتجميع المنفصلة. بدلًا من ذلك، اتصلت وحدات المدخلات التي تمثِّل البيانات الواردة بوحدات الخرج، ومن خلال التعلم، تغيرت قوة الاتصالات هذه لجعل الشبكة تؤدي مهمتها بكفاءة أكبر. الكيفية التي يمكن بها لشبكة «بيرسيبترون» في هذه الصورة المبسطة أن تتعلم وما يمكنها تعلُّمه؛ أُحيطَت بالدراسة من كل زاوية. فقد استكشف الباحثون آلية عملها رياضيًّا باستخدام الورقة والقلم، وفيزيائيًّا من خلال بناء أجهزة بيرسيبترون خاصة بهم، وإلكترونيًّا — عندما أصبحت أجهزة الكمبيوتر الرقمية متاحةً أخيرًا — من خلال محاكاتها.

بعثت شبكات «بيرسيبترون» الأمل في قدرة البشر على بناء آلات تتعلم مثلنا، وبهذه الطريقة جعلت إمكانية تحقيق الذكاء الاصطناعي قريبة المنال. وفي الوقت ذاته، قدمت طريقة جديدة لفهم الذكاء البشري. فقد أوضحت أن الشبكات العصبية الاصطناعية بمقدورها إجراء عمليات حسابية، دون الامتثال لقواعد المنطق الصارمة. إذا تمكنت شبكة «بيرسيبترون» من الإدراك دون استخدام القضايا أو المؤثرات المنطقية، فإن هذا يعني أن كل خليةٍ عصبيةٍ وكل اتصالٍ في الدماغ لا يتطلَّبان قاعدةً محددةً فيما يتعلق بالمنطق البولياني. بدلًا من ذلك، من المحتمل أن الدماغ يعمل بطريقةٍ أكثر عشوائية، تكون فيها الوظيفة التي تؤدِّيها الشبكة موزَّعة على خلاياها العصبية، وتنبثق عن قوة الوصلات بين هذه الخلايا، كما هي الحال في البيرسيبترون. عُرف هذا المنهج الجديد في الدراسة باسم «الاتصالية».

كان العمل الذي قدمه ماكولك وبيتس نقطة انطلاق مهمة. فنظرًا لكونه أول عمل يعرض كيفية تفكير الشبكات المكونة من خلايا عصبية، كان مسئولًا عن اصطحاب علم الأعصاب من شواطئ علم الأحياء البحت إلى بحور الحَوسبة. هذه الحقيقة هي ما أكسب هذا العمل مكانته في التاريخ، وليس صحة ادعاءاته. ويمكن القول إن العمل السابق لما قدمه ماكولك وبيتس، أي «مبادئ الرياضيات»، لاقى مصيرًا مشابهًا. ففي عام ١٩٣١ نشر عالم الرياضيات الألماني كورت جودل ورقةً بحثيةً بعنوان «حول قضايا صورية لا يمكن البتُّ فيها من «مبادئ الرياضيات» والأنساق ذات الصلة». جعلت الورقة البحثية من كتاب «مبادئ الرياضيات» نقطة الانطلاق لتوضيح أن الهدف الأساسي الذي يسعى

إليه الكتاب — وهو تفسير جميع المبادئ الرياضية من خلال قضايا منطقيةٍ بسيطة — لا يمكن تحقيقه. في الحقيقة، لم يتمكن راسل ووايتهيد من تحقيق الهدف الذي اعتقدا أنهما حقَّقاه.[٦] أصبحت النتائج التي توصل إليها جودل يُطلق عليها «مبرهنة عدم الاكتمال» وأصبح لها تأثير ثوري على الرياضيات والفلسفة. وهو تأثير نبع جزئيًّا من محاولة راسل ووايتهيد الفاشلة.

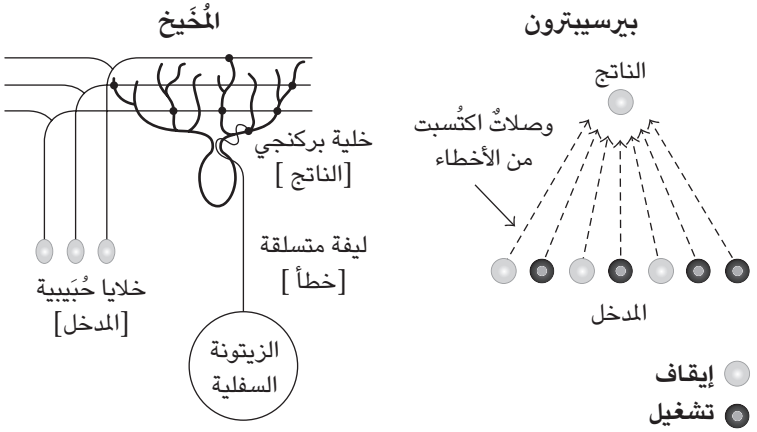
تمكن راسل وماكولك من تقبل إخفاق عمليهما بصدر رحب. على الجانب الآخر، كان بيتس أكثر هشاشة وأقل تحملًا للإخفاق. فإدراك أن الدماغ لا يمتثل لقواعد المنطق الجميلة حطَّمه.[٧] فقد قاده ذلك، جنبًا إلى جنب مع بعض المشكلات النفسية السابقة ونهاية علاقته بأحد معلميه المهمِّين، إلى تناول الكحوليات وتجربة العقاقير المخدِّرة. وأصبح شخصًا غريب الأطوار وهذيانيًّا؛ فقد أحرق أعماله وانعزل عن أصدقائه. تُوفِّي جراء تأثيرات مرض الكبد عام ١٩٦٩، وهو العام نفسه الذي تُوفِّي فيه ماكولك. كان ماكولك يناهز ٧٠ عامًا عند وفاته، وتُوفِّي بيتس عن عمر يناهز ٤٦ عامًا.

المُخَيخ عبارة عن غابة. هذا الجزء من الدماغ، المطوي بعنايةٍ بالقرب من موضع دخول الحبل الشوكي إلى الجمجمة، عبارةٌ عن جزءٍ سميكٍ يحتوي على أنواعٍ مختلفةٍ من الخلايا العصبية، أشبه بأنواعٍ مختلفةٍ من الأشجار، تعيش جميعًا في انسجامٍ عشوائي. فمثلًا خلايا بركنجي كبيرة الحجم، ويمكن تمييزها بسهولة، كما أنها شديدة التشعُّب؛ فالزوائد الشُّجَيرية تمتد لأعلى من أجسام هذه الخلايا مثل أيادٍ غريبة ممدودة بالدعاء. أما الخلايا الحُبيبية فهي متعددة وصغيرة الحجم — يكون حجمُ أجسام هذه الخلايا أقلَّ من نصف حجم أجسام خلايا بركنجي — لكنها تمتدُّ لمسافاتٍ واسعة. في البداية تنمو محاورها العصبية لأعلى بالتوازي مع الزوائد الشُّجَيْرية لخلايا بركنجي. بعد ذلك تنعطف نحو اليمين انعطافًا حادًّا كي تمرَّ مباشرة من خلال تفرُّعات خلايا بركنجي، مثل مرور

[٦] كانت الثغرات في الأساس الذي استند عليه كتاب «مبادئ الرياضيات» ملحوظةً حتى عندما نُشر. بعض القضايا المنطقية «الأساسية» التي افترضها الكتاب لم تكن في الحقيقة أساسية تمامًا، وكان من الصعب تبريرها.

[٧] نتج هذا الإدراك بطريقة مباشرة أكثر من دراسة حول دماغ الضفدع اشترك فيها بيتس. وسنستعرض المزيد حول هذه الدراسة في الفصل السادس.

خطوط الكهرباء فوق قمم الأشجار. هذا هو الموضع الذي تتصل عنده الخلايا الحُبَيبية بخلايا بركنجي؛ إذ تحصل كل خليةٍ من خلايا بركنجي على مدخلاتٍ من مئات الآلاف من الخلايا الحبيبية. الألياف المتسلقة عبارة عن محاور عصبية تتبع مسارًا أطول في طريقها إلى خلايا بركنجي. تمتدُّ هذه المحاور العصبية من خلايا موجودةٍ في منطقةٍ مختلفةٍ من الدماغ — وهي الزيتونة السفلية — حيث تقطع كل هذه المسافة منها إلى الأجزاء السفلية من أجسام خلايا بركنجي وتلتف حولها. بالالتفاف حول قاعدة الزوائد الشجيرية، كاللبلاب المتسلق، تكوِّن الألياف المتسلقة وصلات. وعلى عكس الخلايا الحبيبية، تُستهدف كل خلية من خلايا بركنجي من واحدةٍ فقط من الألياف المتسلقة. لذا تكون خلايا بركنجي محوريةً في نطاق المُخَيخ. تمر عشرات الخلايا الحُبَيبية عبرها وتتصل بها من الأعلى، كما تقترب منها مجموعةٌ صغيرة لكنها دقيقة من الألياف المتسلقة من الأسفل.




شكل ٣-٢

بطريقتها العضوية الملتوية تُظهر الدوائر العصبية في المخيخ تنظيمًا ودقة غير متوقعَين من نظام بيولوجي. ففي طريقة اتصال الخلايا العصبية هذه رأى جيمس ألبوس، أحد طلاب الدكتوراه في الهندسة الكهربية يعمل في وكالة ناسا، مبادئَ «بيرسيبترون» تلوح في الأفق.

يلعب المخيخ دورًا بالغ الأهمية في التحكم الحركي؛ إذ يساعد على الاتزان والتنسيق والأفعال المنعكسة وغيرها. ويُعد إشراط رفَّة العين واحدًا من أهم قدرات المخيخ التي حظِيَت بالدراسة على نطاقٍ واسع. وهو فعل منعكس جرى التدريب عليه ويمكن رصده في الحياة اليومية. على سبيل المثال، إذا أصرَّ أحد الوالدين أو أحد زملائك على إيقاظك في الصباح بفتح الستائر، فستُغمض عينَيك بشكلٍ غريزيٍّ استجابةً لضوء الشمس. بعد أيامٍ قليلةٍ من تكرار هذا الفعل، سيصبح مجرد صوت فتح الستائر كافيًا لجعلك تغمض عينَيك مُسبقًا.

في المختبر، دُرست هذه العملية في الفئران، واستُبدِلت أشعة الشمس المتطفلة وحل محلها نفخة صغيرة من الهواء على العين (لكنها مزعجة بما يكفي للتأكد من أن الفئران ستحاول تجنبها). بعد محاولات عديدة من تشغيل صوت (كإشارة صوتية قصيرة من نغمة نقية) تتبعه نفخةُ الهواء الصغيرة هذه، تعلم الفأر أن يغمض عينَيه مباشرة بمجرد سماع النغمة. إذا أسمعت الحيوان صوتًا جديدًا (على سبيل المثال صوت تصفيق صاخب) لم يُقترن بنفخة هواء، فلن يغمض الحيوان عينَيه. هذا يجعل من إشراط رفة العين مهمة تصنيف بسيطة، يتعيَّن على الفأر تحديد ما إذا كان الصوت الذي يسمعه مؤشرًا على تلقِّي نفخة هواء لاحقة (في هذه الحالة ستُغلَق العينان حتمًا) أو إذا كان الصوت محايدًا (في هذه الحالة من الممكن أن تبقى العينان مفتوحتَين). إذا حدث تلفٌ في المخيخ، فلن تتعلَّم الفئران هذه المهمة.

تمتلك خلايا بركنجي القدرة على إغلاق العينَين. على وجه التحديد، حدوث انخفاضٍ مؤقتٍ في معدل إطلاق الإشارات العصبية الكهربية المرتفع بطبيعته في خلايا بركنجي، يؤدي بدوره إلى إغماض العينَين، وذلك عبر وصلاتٍ تمتد من خلايا بركنجي إلى خارج هذه المنطقة. بناءً على هذا التشريح، رأى ألبوس أن خلايا بركنجي تقوم بدور عرض الناتج، بمعنى أنها توضِّح ناتج التصنيف.

تتعلم شبكة «بيرسيبترون» عبر الإشراف؛ فهي تحتاج إلى مدخلات ووسوم لهذه المدخلات كي تعلم متى أخطأت. رأى ألبوس هاتَين الوظيفتَين تتحققان من خلال نوعَين من الروابط بين خلايا بركنجي والخلايا الأخرى. تنقل الخلايا الحُبيبية إشاراتٍ حِسِّية؛ على وجه التحديد، تُطلق الخلايا الحبيبية المختلفة الإشارات العصبية الكهربية بناءً على الصوت المسموع. أما الألياف المتسلِّقة، فتخبر المخيخ عن نفخة الهواء؛ فهي تطلق إشارات عصبية كهربية عند الشعور بالانزعاج من ذلك. والأهم أن هذا يعني أن الألياف المتسلقة

تشير إلى حدوث خطأ. فهي توضِّح أن الحيوان ارتكب خطأً بعدم إغلاق عينَيه، عندما كان يتعيَّن عليه فعل هذا.

لمنع حدوث هذا الخطأ لا بد من تغيير قوة الروابط التي تصل الخلايا الحُبَيبية بخلايا بركنجي. تحديدًا، توقَّع ألبوس أنه لا بد من إضعاف اتصال أي خلايا حُبيبية كانت نشطة قبل أن يجري تنشيط الألياف المتسلقة (أي قبل الخطأ) بخلية بركنجي. بهذه الطريقة، في المرة التالية التي تطلِق فيها الخلايا الحبيبية إشارات عصبية، أي المرة التالية التي يُشغَّل فيها هذا الصوت، لن تتسبب في إطلاق إشارات عصبية كهربية في خلايا بركنجي. هذا الانخفاض المؤقت في معدل إطلاق خلايا بركنجي لإشارات عصبية كهربية سيؤدي إلى إغلاق العينين. من خلال تغيير قوى الروابط، يتعلم الحيوان من أخطائه السابقة ويتجنب إدخال نفخات الهواء في عينيه.

بهذه الطريقة، تكون خلية بركنجي أشبه برئيس يتلقى المشورة من مجموعة المستشارين تمثلهم الخلايا الحُبيبية. في البداية تستمع خلية بركنجي إليهم جميعًا. لكن إذا اتَّضح أن بعض الخلايا تعطي مشورة خاطئة؛ أي إن المُدخل الوارد منها تعقبه أخبارٌ سلبية توصلها الألياف المتسلقة، فيضعف تأثيرها على خلية بركنجي. ومن ثم، ستؤدي خلايا بركنجي دورها بطريقة أفضل في المستقبل. هذه العملية تُعد انعكاسًا مباشرًا لقاعدة تعلُّم شبكة بيرسيبترون.

عندما اقترح ألبوس هذا الربط بين شبكة «بيرسيبترون» والمخيخ عام ١٩٧١،[٨] كان تنبؤه حول ضرورة تغيُّر قوة الروابط بين الخلايا الحبيبية وخلايا بركنجي مجرد تنبؤ. لم يسبق لأي شخص ملاحظة هذا النوع من التعلم في المخيخ مباشرة. لكن بحلول منتصف ثمانينيات القرن العشرين، تزايدت الأدلة التي تدعم تنبؤ ألبوس. وأصبح واضحًا أن قوة الاتصال بين خليةٍ حبيبية وخلية بركنجي تقِل بعد ارتكاب خطأ. حتى إنه كُشف الستار عن الآليات الجزيئية لهذه العملية. أصبحنا نعلم الآن أن مدخلات الخلايا الحُبيبية تجعل أحد المستقبلات الموجودة في غشاء خلية بركنجي يستجيب، محدِّدًا بذلك مدخلات الخلايا الحبيبية التي كانت نشطة في وقت معين. إذا جاءت مدخلات أحد الألياف المتسلقة بعد

[٨] يُشار إلى هذا الربط في بعض الأحيان بنظرية التعلم الحركي لـ «مار وألبوس وإيتو»، كما أنه سُمي على اسم ديفيد مار وماساو إيتو، اللذَين قدَّما نماذج للكيفية التي يتعلم بها المخيخ.

ذلك (أثناء نفخة الهواء)، فإنها تتسبب في تدفق الكالسيوم إلى خلية بركنجي. وجود الكالسيوم يؤدي إلى إرسال إشارات لجميع الوصلات لتقليل قوتها. يتضح أن مرضى متلازمة كرُموسوم إكس الهَش (fragile × syndrome)، وهو اضطراب وراثي يؤدي إلى إعاقات ذهنية، يفتقرون إلى البروتين الذي ينظم هذا الاتصال من الخلايا الحبيبية إلى خلية بركنجي. نتيجة لذلك، تكون لديهم صعوبة في تعلم مهامَّ مثل إشراط رفة العين.

تقدِّم شبكة البيرسيبترون، بقواعدها الواضحة التي تتعلق بكيفية استمرار التعلم في شبكة عصبية، أفكارًا واضحة وقابلة للاختبار يمكن لعلماء الأعصاب البحث عنها — والتوصل إليها — في الدماغ. وبهذا، تمكنت من ربط العلوم في مختلف النطاقات. اكتسبت أصغر التفاصيل المادية — عبور أيونات الكالسيوم إلى داخل خليةٍ عصبية، على سبيل المثال — معنًى أكبر في ضوء دورها في الحوسبة.

وُضِعت نهاية سريعة لعهد شبكات بيرسيبترون عام ١٩٦٩. ولسخرية القدر أن أجلها جاء على يد كتاب يحمل الاسم نفسه.

أُلِّف كتاب «بيرسيبترون» على يد عالِمَي الرياضيات في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا: مارفن مينسكي، وسيمور بابيرت. كان الكتاب يحمل العنوان الفرعي «مدخل إلى الهندسة الحاسوبية»، وكان غلافه يحمل تصميمًا تجريديًّا بسيطًا. انجذب مينسكي وبابيرت نحو الكتابة عن موضوع شبكات بيرسيبترون بدافع التقدير لاختراع روزنبلات، والرغبة في استكشافه أكثر. في الواقع، التقى مينسكي وبابيرت في مؤتمر كانا يعرضان فيه نتائج متشابهة توصَّلا إليها، خلال محاولاتهما لاستكشاف كيفية تعلُّم شبكة بيرسيبترون.

يعود منشأ بابيرت إلى جنوب أفريقيا، وله وجنتان ممتلئتان ولحية مهذبة، ويحمل درجتَي دكتوراه في الرياضيات لا درجة واحدة. طوال حياته، كان لديه اهتمام بالتعليم، وكيف يمكن تحويله عن طريق الحوسبة. كان مينسكي يكبر بابيرت بعام واحد فقط، وكانت له ملامح أكثر حدة ويرتدي نظارة كبيرة الحجم. ارتاد مينسكي، الذي يعود منشؤه إلى نيويورك، مدرسة برونكس الثانوية للعلوم مع فرانك روزنبلات، وكان يتلقى التوجيه من ماكولك وبيتس.

اتفق مينسكي وبابيرت مع ماكولك وبيتس في رغبتهما في تنظيم عملية الفكر، وفقًا لقواعد محددة. كانا يعتقدان أن إحراز تقدم حقيقي في فهم الحوسبة ينبع من

الاشتقاقات الرياضية. كان النجاح التجريبي لشبكة بيرسيبترون برُمته — أيًّا كانت العمليات الحسابية التي يمكنها إجراؤها أو الفئات التي يمكنها تعلمها — لا يعني شيئًا دون فهم رياضي للسبب وراء عملها وآلية عملها.

في ذلك الوقت، كانت شبكة بيرسيبترون تعمل على جذب مزيد من الاهتمام — والمال — من جانب مجتمع الذكاء الاصطناعي. إلا أن تناولها لم يحظَ بالتدقيق الرياضي الذي كان مينسكي وبابيرت يتطلَّعان إليه. ومن ثم، كان الدافع الصريح وراء تأليفهما لهذا الكتاب هو جعل دراسة شبكات بيرسيبترون تتسم بدقة أعلى، ليس هذا فحسب؛ بل كان دافعهما، حسب اعتراف بابيرت، هو تقليل تبجيلها.[٩]

تشتمل صفحات كتاب «بيرسيبترون» بشكل أساسي على براهين ونظريات واشتقاقات. وكلٌّ من هذه العناصر من شأنه المساهمة في قصة عن شبكة «بيرسيبترون»؛ إما من خلال تعريف مفهوم هذه الشبكات، أو ما يمكنها فعله أو كيفية تعلُّمها. ومع ذلك، فإن الرسالة التي تلقاها الجمهور من نشر هذه الصفحات البالغ عددها نحو ٢٠٠ صفحة، والتي تُعد عبارة عن دراسة تفصيلية لجميع الجوانب المتعلقة بآلية عمل شبكة بيرسيبترون؛ كانت إلى حدٍّ كبير تتمحور حول أوجه القصور المتعلقة بشبكة بيرسيبترون. ويرجع ذلك إلى أن مينسكي وبابيرت أوضحا، بشكلٍ حاسم، استحالة إجراء شبكة بيرسيبترون ببعض العمليات الحسابية البسيطة المعينة.

لنفترض شبكة بيرسيبترون لها مدخلان، وكل مدخل يمكن أن يكون في وضع «تشغيل» أو «إيقاف». نريد الشبكة أن تخبرنا بما إذا كان المدخلان متماثلين؛ أي أن تجيب بنعم (بمعنى أن تكون وحدة المخرجات بالقيمة «تشغيل») إذا كان المدخلان في وضع «تشغيل» أو إذا كان المدخلان في وضع «إيقاف». لكن إذا كان أحد المخرجَين في وضع «تشغيل» والآخر في وضع «إيقاف»، فستكون وحدة المخرجات في وضع «إيقاف». وكفرز الجوارب من الغسيل، لا تستجيب شبكة بيرسيبترون إلا إذا رأت زوجَين متماثلَين.

للتأكد من أن وحدة النواتج أو القراءات لن تُطلِق إشارات عصبية كهربية، عندما يكون مدخل واحد فقط في وضع «تشغيل»، لا بد أن يكون وزن كل مدخل منخفضًا بما يكفي. على سبيل المثال، يمكن أن يكون كل وزن مساويًا لنصف القيمة اللازمة؛ كي

[٩] الكلمات المحددة التي استخدمها بابيرت لوصف مشاعره تجاه الهوس بشبكات «بيرسيبترون» في حينها كانت «الكراهية» و«الغضب».

يكون الناتج في وضع «تشغيل». بهذه الطريقة، عندما يكون المدخلان بالقيمة «تشغيل»، فستطلق وحدة النواتج إشارات عصبية كهربية، ولن يحدث ذلك إذا كان مدخل واحد في وضع «تشغيل». في هذا الإعداد، تستجيب وحدة النواتج بشكلٍ صحيح لثلاثٍ من أصل أربع حالات محتملة للمُدخلات. إلا أنه في الحالة التي يكون فيها المدخلان في وضع «إيقاف» سيكون الناتج في وضع «إيقاف»، وهو تصنيف غير صحيح.

كما يتضح، مهما تلاعبنا وغيَّرنا في قوة الاتصال، فليست هناك طريقة لتلبية كل احتياجات التصنيف في آنٍ واحد. لا يمكن لشبكة بيرسيبترون ببساطةٍ فعل هذا. والمشكلة هنا تتمثَّل في أن أي نموذجٍ جيد للدماغ — أو نموذج ذكاء اصطناعي واعد — لا يمكنه أن يخفق في مهمةٍ بسيطةٍ كتقرير ما إذا كان شيئان متماثلين أم لا.

كان ألبوس، الذي نشر ورقته البحثية عام ١٩٧١ يعلم أوجه قصور شبكة بيرسيبترون، كما كان على علم بأنه رغم أوجه القصور هذه، فإن شبكة بيرسيبترون لا تزال قويةً بما يكفي لتكون نموذجًا لمهمة التعلُّم الشرطي لرفَّة العين. لكن هل يمكن أن تصبح نموذجًا للدماغ البشري بالكامل، كما وعد روزنبلات؟ هذا غير ممكن.

الصورة التي رسمها مينسكي وبابيرت أجبرت الباحثين على رؤية القدرات التي تمتاز بها شبكة بيرسيبترون بوضوح. فقبل هذا الكتاب، كان بإمكان الباحثين استكشاف ما يمكن لشبكة بيرسيبترون فعله بطريقة عشوائية، على أمل أن حدود قدراتها كانت لا تزال بعيدة، هذا إن كان لقدرتها حدودٌ من الأساس. لكن ما إن اتَّضحت معالم شبكة بيرسيبترون، حتى بات من المؤكَّد وجود هذه الحدود؛ بل تبيَّن أيضًا أنها أقربُ بكثيرٍ مما كان متوقعًا. في الواقع، كل ذلك أدَّى بدوره إلى فَهْم شبكات بيرسيبترون، وهو بالضبط ما شرع مينسكي وبابيرت في فعله. لكن نهاية الجهل بشبكات بيرسيبترون أدى إلى نهاية الحماس بشأنها. في هذا الصدد، أوضح البحث ما يأتي: «مصير المرء حين يُفهم قد يكون سيئًا كالموت.»

عُرفت الفترة التي تلت نشر كتاب «شبكات بيرسيبترون» بفترة «عصور الظلام» للاتصالية. فقد تميَّزَت هذه العصور بانخفاضٍ كبيرٍ في تمويل البرامج البحثية التي بُنيت على العمل الذي أنجزه روزنبلات. فقد أُخمِد نهج الشبكات العصبية القائم على بناء نماذج للذكاء الاصطناعي. وكان لا بد من التراجع عن الآمال والوعود والدعاية الصاخبة. لقيَ روزنبلات نفسُه حتفَه في حادثٍ بالقارب بعد نشر الكتاب بعامَين، وقد ظل المجال الذي ساعد في تأسيسه في سُباتٍ عميقٍ لأكثر من ١٠ سنوات.

وكما كانت الضجة حول شبكات بيرسيبترون مفرطةً وغير مدروسة، كان رد الفعل ضدها عنيفًا أيضًا. كانت أوجه القصور في بحث مينسكي وبابيرت صحيحة؛ إذ كانت شبكات بيرسيبترون بالشكل الذي كانا يدرُسانها به غير قادرةٍ على القيام بالكثير من الأشياء. لكن لم تكن هناك ضرورةٌ لإبقائها على هذه الصورة. على سبيل المثال، يمكن حل المسألة الخاصة بتحديد ما إذا كان المدخلان متماثلَين أم لا، من خلال إضافة طبقةٍ إضافيةٍ من الخلايا العصبية بين طبقتَي المدخلات والنواتج. يمكن أن تتألَّف هذه الطبقة من خليتَين عصبيتَين؛ إحداهما لها أوزانٌ تجعل الخلية تُطلق إشارات عصبية كهربية، عندما يكون المدخلان في وضع «تشغيل»، والأخرى لها أوزان تجعل الخلية تُطلق إشارات عندما يكون المدخلان في وضع «إيقاف». وبهذا يتعيَّن على الخلية العصبية التي تعرض الناتج، والتي تحصل على مدخلاتها من هاتَين الخليتَين العصبيتَين في المنتصف، الإطلاق إذا كانت إحدى الخليتَين الوسطيتَين نشطة.

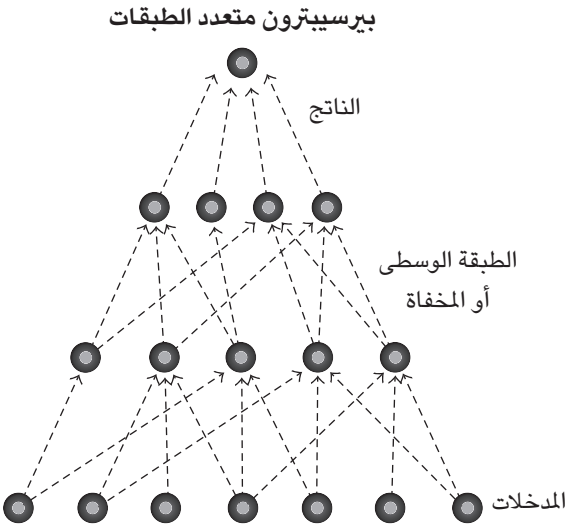
تمكَّنت «شبكات بيرسيبترون المتعددة الطبقات»، كما كان يُطلق على هذه البنى العصبية الحديثة، من إحياء الاتصالية وبعثها من جديد.[١٠] لكن قبل أن يكتمل البعث كان لا بد من حل مشكلة واحدة، وهي التعلُّم. قدمت خوارزمية شبكة بيرسيبترون الأصلية طريقة لتعيين الوصلات بين الخلايا العصبية التي تمثِّل المدخلات، والخلايا التي تمثِّل المخرجات، أي إنه جرى تصميم قاعدة التعلُّم للشبكة المكوَّنة من طبقتَين. إذا كانت هذه الشبكات العصبية الوليدة تحتوي على ثلاث أو أربع أو خمس طبقات، أو ما يزيد عن ذلك، كيف يمكن تعيين الوصلات بين هذه الطبقات؟ على الرغم من جميع الميزات التي تتسم بها قاعدة تعلُّم بيرسيبترون — بما في ذلك بساطتها، والدليل على صحتها، وحقيقة أنه استُدِلَّ عليها في مجاهل المخيخ — فإنها لم تتمكَّن من الإجابة عن هذا السؤال. فمعرفةُ أن شبكة بيرسيبترون المتعددة الطبقات يمكنها حل المسائل الأكثر تعقيدًا؛ لم تكن كافيةً لتحقيق الوعود الكبرى للاتصالية. ما كان مطلوبًا هو أن «تتعلم» حل المسائل.

[١٠] عمليًّا، لم تكن هذه الشبكات «جديدة». فقد أشار مينسكي وبابيرت في كتابِهما إلى شبكات بيرسيبترون المتعددة الطبقات. إلا أنهما تجاهلا القدرات المحتملة لهذه الأجهزة، ولسوء حظ العلم، لم يحُثَّا على إعطائها مزيدًا من الدراسة.

أعيدَ إحياء الاتصالية مرةً أخرى عام ١٩٨٦. فقد نُشرت الورقةُ البحثيةُ التي تحمل عنوان «تعلُّم التمثيلات عن طريق الانتشار العكسي للأخطاء»، والتي كتبها كلٌّ من عالِمَي الإدراك ديفيد روميلهارت ورونالد ويليامز من جامعة كاليفورنيا سان دييجو، وعالم الكمبيوتر جيفري هنتون من جامعة كارنيجي ميلون، في التاسع من أكتوبر في دورية «نيتشر». قدَّمت الورقة البحثية حلًّا للمشكلة التي واجهت هذا المجال، وهي كيفية تدريب الشبكات العصبية الاصطناعية المتعددة الطبقات. أصبحت خوارزمية التعلم الواردة في الورقة البحثية، ويُطلَق عليها «الانتشار العكسي»، تُستخدم على نطاقٍ واسعٍ في الأوساط العلمية آنذاك. واستمرَّت إلى يومنا هذا الطريقةُ السائدةُ التي تُدرَّب بها الشبكات العصبية لإنجاز مهامَّ ممتعة.

يمكن تطبيق قاعدة تعلم شبكة بيرسيبترون الأصلية؛ لأنه في حالة وجود طبقتَين فقط يكون من السهل معرفةُ كيفية إصلاح الخطأ الذي حدث. إذا كانت الخلية العصبية التي تمثِّل وَحْدة الناتج في وضع «الإيقاف» عندما يتعيَّن عليها أن تكون في وضع «التشغيل»، فلا بد أن تكون الروابط من طبقة المدخلات إلى هذه الخلية العصبيَّة أقوى، والعكس صحيح. وبهذا تكون العلاقة بين هذه الوصلات والناتج المترتب عليها واضحة. أما خوارزمية الانتشار العكسي، فتختصُّ بحلِّ مسألةٍ أصعب. في الشبكة التي تتضمَّن العديد من الطبقات بين المدخلات والنواتج، تكون العلاقات بين قوى الوصلات والنواتج غير واضحة. وبدلًا من أن يكون لدينا رئيسٌ ومستشاروه، أصبح لدينا رئيسٌ ومستشاروه وموظفو مستشاريه. مقدار ثقة المستشار في أي موظف، أي قوة الاتصال ما بين الموظف والمستشار، سيكون له تأثير في النهاية على ما يفعله الرئيس. لكن يكون من الأصعب ملاحظةُ هذا التأثير مباشرة وإصلاحه إذا شعر الرئيس بحدوث خطأ ما.

كانت هناك حاجةٌ إلى طريقةٍ صريحةٍ لحساب مدى تأثير أي اتصالٍ في الشبكة على طبقة الناتج أو المخرجات. كما اتَّضح، قدمت الرياضيات طريقة منظمة لفعل هذا. لنفترض شبكة عصبية اصطناعية تتضمَّن ثلاث طبقات: طبقة المدخلات، والطبقة الوُسطى، وطبقة النواتج. كيف تؤثر الوصلات من طبقة المدخلات إلى الطبقة الوسطى في طبقة النواتج؟ نحن نعلم أن نشاط الطبقة المتوسطة يكون نتيجةً لنشاط الخلايا العصبية في طبقة المدخلات، وأوزان اتصالات هذه الخلايا بخلايا الطبقة الوسطى. بهذه المعطيات، تكون كتابة معادلةٍ لكيفية تأثير هذه الأوزان على نشاط الطبقة الوسطى أمرًا مباشرًا. نحن نعلم أيضًا أن الخلايا العصبية في طبقة النواتج تتبع القاعدة نفسها؛ إذ




شكل ٣-٣

يُحدد نشاطها بناءً على نشاط الخلايا العصبية في الطبقة الوسطى وأوزان وصلات الخلايا العصبية في الطبقة الوسطى بخلايا طبقة النتائج. ومن ثم، يصبح من السهل التوصُّل إلى معادلةٍ تصف كيفية تأثير هذه الأوزان على طبقة النتائج. الشيء الوحيد المتبقِّي هو إيجاد طريقةٍ للربط بين هاتَين المعادلتَين. ومن ثم، سنحتاج إلى معادلة تخبرنا مباشرة بالكيفية التي تؤثِّر بها الوصلات من طبقة المدخلات إلى الطبقة الوسطى في النتائج.

عند تكوين قطار في لعبة الدومينو، لا بد أن يكون العدد الظاهر على مؤخرة قطعة دومينو مطابقًا للعدد الظاهر على بداية القطعة المجاورة؛ كي يتسنَّى الربط بينهما. الأمر نفسه ينطبق على ربط المعادلتَين معًا. العامل المشترك الذي يربط بين المعادلتَين هو «نشاط الطبقة الوُسطى»؛ فهو يحدد نشاط الخلايا في طبقة النتائج، كما أنه يتحدَّد وَفقًا لاتصال طبقة المدخلات بالطبقة الوسطى. بربط هاتَين المعادلتَين عن طريق نشاط الطبقة الوسطى، يمكن حساب تأثير اتصال الخلايا العصبية في طبقة المدخلات بالخلايا العصبية في الطبقة الوسطى على طبقة النتائج مباشرة. وهو ما يُسهِّل فَهْم كيفية تغيُّر هذه الوصلات عندما يكون الناتج خاطئًا. في التفاضل والتكامل، يُعرف هذا الربط بين

العلاقات باسم «قاعدة السلسلة»، وهذا هو الأساس الذي تعتمد عليه خوارزمية الانتشار العكسي.

اكتُشِفت قاعدة السلسلة منذ أكثر من ٢٠٠ عام على يد الفيلسوف والمثقف جوتفريد لايبنتس، الذي اعتبره ماكولك وبيتس أحد الرموز المقدسة. نظرًا لمدى جدوى القاعدة، لم يكن تطبيقها من أجل تدريب الشبكات العصبية الاصطناعية المتعددة الطبقات؛ أمرًا مثيرًا للدهشة. في الواقع، تبيَّن أن خوارزمية الانتشار العكسي ابتُكرت ثلاثَ مرات منفصلة على الأقل قبل عام ١٩٨٦. إلا أن الورقة البحثية المنشورة عام ١٩٨٦ صاحبَتْها عواملُ عديدة ضمِنت انتشار نتائج هذه الورقة على نطاق واسع. العامل الأول هو محتوى هذه الورقة نفسه. فهي لم تكتفِ بتوضيح أنه من الممكن تدريب الشبكات العصبية فحسب، بل حلَّلت آليات عمل الشبكات المدرَّبة على العديد من المهام الإدراكية، مثل فَهْم العلاقات بين الأفراد في شجرة عائلة. من عوامل النجاح الأخرى زيادة القوة الحاسوبية التي جاءت في ثمانينيات القرن العشرين؛ وقد كان هذا الأمر مهمًّا لتمكين الباحثين من تدريب الشبكات العصبية المتعددة الطبقات عمليًّا. وأخيرًا، في العام نفسه الذي نُشرت فيه الورقة البحثية نَشر أحد مؤلفيها، أي روميلهارت، كتابًا عن الاتصالية تضمَّن خوارزمية الانتشار العكسي. هذا الكتاب الذي ألفه مع أستاذ آخر في جامعة كارنيجي ميلون، وهو جيمس ماكليلاند، بيع منه نحو ٤٠ ألف نسخة بحلول منتصف تسعينيات القرن العشرين. وقد أصبح عنوان الكتاب، أي «المعالجة الموزعة المتوازية»، مقترنًا بالبرنامج البحثي المعنيِّ ببناء شبكات عصبية اصطناعية في نهاية الثمانينيات وأوائل التسعينيات من القرن العشرين.

لأسبابٍ مماثلةٍ نوعًا ما، أخذت حكاية الشبكات العصبية الاصطناعية منعطفًا أكثر دراماتيكية، بعد انقضاء عقدٍ من الألفية الجديدة تقريبًا. فقد اتحدَّت أكوام البيانات المتراكمة في عصر الإنترنت مع القوة الحاسوبية التي يتمتع بها القرن الحادي والعشرون؛ لتسريع وتيرة التقدُّم في هذا المجال. وفجأة أصبح من الممكن تدريب الشبكات التي تتضمن طبقات أكثر على مهامَّ أكثر. تعمل مثل هذه النماذج الموسعة — التي يُشار إليها باسم «الشبكات العصبية العميقة» — حاليًّا على إحداث تغييرات ملحوظة في الذكاء الاصطناعي وعلم الأعصاب على حدٍّ سواء.

تعتمد الشبكات العصبية العميقة على الفَهْم الأساسي نفسه لآلية عمل الخلايا العصبية، الذي اعتمدَت عليه شبكات ماكولك وبيتس. إلا أنها لا تستهدف محاكاة الدماغ البشري بشكلٍ مباشرٍ أو حرفي. فهي لا تحاول محاكاة تركيبه أو تشريحه، على سبيل

المثال.[١١] بل تهدف إلى محاكاة السلوك البشري وهي تتحسن في ذلك. بدأت خدمة ترجمة اللغات الشهيرة المقدمة من جوجل في استخدام شبكات عصبية عميقة عام ٢٠١٦، وقد أدى ذلك إلى تقليل أخطاء الترجمة بنسبة ٥٠ في المائة. استخدمت شركة يوتيوب أيضًا شبكات عصبية عميقة؛ لمساعدة خوارزمية التوصية على معرفة الفيديوهات التي يريد الناس مشاهدتها. وعندما يجيب «سيري»، المساعد الصوتي لشركة أبل عن أمر معين، فإنه يُعد شبكة عصبية عميقة تقوم بالاستماع والتحدث.

في المجمل، يمكن تدريب الشبكات العصبية العميقة للتعرف على عناصر في الصور، ولعب الألعاب، وفهم التفضيلات، والترجمة ما بين اللغات المختلفة، وتحويل الكلام المنطوق إلى كلمات مكتوبة، وتحويل الكلمات المكتوبة إلى كلام منطوق. وكما هي الحال في جهاز «بيرسيبترون»، تشغل أجهزة الكمبيوتر التي تعمل عليها هذه الشبكات غُرفًا بأكملها. وتقع في مراكز الخوادم حول العالم، حيث تُصدِر ضوضاء أثناء معالجة بيانات الصور والبيانات النصية والصوتية حول العالم. ربما كان روزنبلات سيسرُّه أن يرى أن بعض وعوده الكبيرة لصحيفة نيويورك تايمز تحققت بالفعل. كانت فقط تتطلب نطاقًا يعادل ما كان متاحًا لدية آنذاك ١٠٠٠ مرة تقريبًا.

كانت خوارزمية الانتشار العكسي ضروريةً لتحسين أداء الشبكات العصبية الاصطناعية لنقطة، يمكن أن تصل فيها هذه الشبكات لمستويات أداء قريبة جدًّا من المستوى البشري في بعض المهام. كقاعدة تعلم للشبكات العصبية، تؤدي هذه الخوارزمية دورها على أكمل وجه. لكن لسوء الحظ، هذا لا يعني أنها تعمل مثل الدماغ. ففي حين أنه كان يمكن ملاحظة فعالية قاعدة تعلم البيرسيبترون بين الخلايا العصبية الحقيقية، لا يمكن ملاحظة خوارزمية الانتشار العكسي. فهي مُصمَّمة لتكون أداة رياضية لجعل الشبكات العصبية الاصطناعية تعمل، لا لأن تصبح نموذجًا لكيفية تعلُّم الدماغ (وكان مبتكروها واضحين جدًّا بشأن هذه النقطة منذ البداية). السبب وراء هذا أن الخلايا العصبية الاصطناعية عادةً ما يكون لديها فكرة عن نشاط الخلايا العصبية التي تتصل بها مباشرة فقط، لكنها لا تعلم شيئًا عن نشاط الخلايا العصبية التي تتصل بها تلك

[١١] تُستثنى من ذلك الشبكات العصبية العميقة التي تُبنى لفهم الصور، والتي سنتناولها في الفصل السادس.

الخلايا العصبية وما إلى ذلك. لهذا السبب، لا توجد طريقة واضحة يمكن بها لهذه الخلايا العصبية الحقيقية تطبيق قاعدة السلسلة. لا بد أن هذه الخلايا تفعل شيئًا مختلفًا.

بالنسبة إلى بعض الباحثين — لا سيما الباحثين في مجال الذكاء الاصطناعي — لا تمثل الطبيعة الاصطناعية للانتشار العكسي مشكلة. فكان هدفهم بناء أجهزة كمبيوتر يمكنها التفكير بأي وسيلة تكون ضرورية. لكن بالنسبة إلى علماء آخرين — وتحديدًا علماء الأعصاب — يُعد إيجاد خوارزمية تعلم للدماغ أمرًا أسمى. نحن نعلم أن الدماغ بارع في تحسين أدائه؛ يمكننا ملاحظة هذا عندما نتعلم عزف آلة موسيقية أو كيفية القيادة أو قراءة لغة جديدة. والسؤال الذي يطرح نفسه: كيف يمكنه ذلك؟

ونظرًا لأن الانتشار العكسي هو خوارزمية التعلم التي نعرفها، ينطلق بعض علماء الأعصاب من هذه النقطة. فهم يبحثون عن علامات توضح أن الدماغ يقوم بأمر مماثل للانتشار العكسي، حتى وإن كان لا يقوم به بالضبط. ما حفزهم لفعل هذا هو نجاحهم في رصد آلية عمل شبكة «بيرسيبترون» في المخيخ. ففي المخيخ، كانت هناك أدلة تشريحية؛ إذ أشارت المواضع المختلفة للألياف المتسلقة والخلايا الحبيبية إلى الأدوار المختلفة لكلٍّ منها. تعرض مناطق الدماغ الأخرى أنماط الاتصال التي قد تعطي تلميحًا عن كيفية تعلمها. على سبيل المثال، في القشرة المُخِّية الجديدة بعض الخلايا العصبية لها زوائد شُجَيرية يمكنها أن تمتدَّ بعيدًا لأعلاها. تُرسل المناطق البعيدة من الدماغ مدخلاتٍ لهذه الزوائد الشُّجَيرية. هل تحمل معها معلومات عن الكيفية التي أثرت بها هذه الخلايا العصبية على الخلايا العصبية التي تليها في الشبكة العصبية للدماغ؟ هل يمكن استخدام هذه المعلومات لتغيير قوة اتصالات الشبكة. تشبَّث كلٌّ من علماء الأعصاب والباحثين في مجال الذكاء الاصطناعي بالأمل في العثور على نسخة الانتشار العكسي الخاصة بالدماغ، وعندئذٍ يمكن نسخها لتكوين خوارزميات تتعلم أفضل وأسرع من الشبكات العصبية الاصطناعية الموجودة في يومنا هذا.

الباحثون المعاصرون، في سعيهم لفهم كيفية تعلم الدماغ عن طريق الإشراف، يحذون حَذو ماكولك. فهم ينظرون إلى أكوام الحقائق التي لدينا حول بيولوجيا الدماغ، ويحاولون أن يجدوا فيها بنيةً حاسوبية. في يومنا هذا، يتم توجيههم من خلال طريقة عمل الأنظمة الاصطناعية. وغدًا، ستوجه النتائج المستخلصة من علم الأحياء بناء الذكاء الاصطناعي مرة أخرى. تبادل الأدوار هذا يحدد العلاقة التكافلية بين المجالين. يمكن للباحثين الذين يتطلعون إلى بناء شبكات عصبية اصطناعية الاستلهام من الأنماط

الموجودة في تلك الشبكات البيولوجية، وفي الوقت نفسه، يمكن لعلماء الأعصاب النظر في دراسة الذكاء الاصطناعي، لتحديد الدور الحاسوبي للتفاصيل البيولوجية. بهذه الطريقة تحافظ الشبكات العصبية الاصطناعية على ارتباط دراسة العقل بالدماغ.

الفصل الرابع

# تكوين الذكريات والاحتفاظ بها

شبكة هوبفيلد وعناصر الجذب

تكون كتلة الحديد عند درجة حرارة ٧٧٠ درجة سليزية (١٤١٨ درجة فهرنهايت) عبارة عن شبكة رمادية قوية. كل ذرةٍ من ذراتها البالغ عددها تريليونات تُعتبر لبنةً منفردةً في الجدران والأسقف اللانهائية التي يتكوَّن منها هيكلها البلوري. وهي تُعد نموذجًا في النظام والترتيب. على عكس الترتيب الهيكلي المنظم لهذه الذرات، يكون ترتيبها المغناطيسي فوضويًّا.

كل ذرة حديد تكوِّن مغناطيسًا ثنائي القطب، وهو مغناطيس مصغَّر له طرف موجب وطرف سالب. تعمل الحرارة على زعزعة استقرار هذه الذرات، إذ تقلب اتجاه قطبيها عشوائيًّا. على المستوى المصغَّر، هذا يعني وجود عدة مغانط صغيرة يؤثر كلٌّ منها بقوةٍ في اتجاهه الخاص. لكن نظرًا لأن هذه القوى تؤثر في اتجاهات متعاكسة، فإن تأثيرها الكلي يصبح مُهملًا. عند النظر إلى كتلة الحديد ككل، نجد أن كتلة هذه المغانط الصغيرة لا تحتوي على مغناطيسية على الإطلاق.

لكن مع انخفاض درجة الحرارة لأقل من ٧٧٠ درجة سليزية، يتغير شيء ما. يقل احتمال تغيُّر اتجاه الذرة الواحدة. ومع استقرار المغناطيس ثنائي القطب لهذه الذرة، تبدأ في ممارسة ضغط مستمر على الذرات المجاورة لها. هذا يوضح لهذه الذرات الاتجاه الذي يتعين عليها التوجه إليه أيضًا. تتنافس الذرات ذات الاتجاهات المختلفة على جعل الذرات المجاورة لها تأخذ اتجاهها المفضل، إلى أن تصطفَّ جميع الذرات بطريقة أو

بأخرى. مع اصطفاف هذه المغانط الصغيرة، تصبح القوة المحصلة كبيرة. وبهذا تصبح كتلة الحديد التي كانت عديمة المغناطيسية مغناطيسًا قويًّا.

كتب عالمُ الفيزياء الأمريكي فيليب واران أندرسون، الحائز على جائزة نوبل نظير عمله على هذه الظاهرة، مقالةً اشتُهِرت مؤخرًا تحمل عنوان «مزيدٌ من التعقيد يعني مزيدًا من الاختلاف»، وقد أشار أندرسون في هذه المقالة إلى أنه «يتضح أنه يجب ألَّا يُفهم سلوك المجموعات الكبيرة والمعقَّدة من الجُسَيمات الأولية، من خلال التفسير البسيط لخواص مجموعةٍ صغيرةٍ من الجسيمات». بمعنى أن العمل الجماعي للعديد من الجُسيمات الصغيرة — الذي يُنظَّم من خلال التفاعلات بين هذه الجُسيمات المتجاورة فقط — يمكن أن ينتج عنه وظيفة لا يمكن أن تنتج مباشرة عن نشاط أي من هذه الجسيمات منفردة. صاغ علماء الفيزياء هذه التفاعلات في صورة معادلات، واستخدموا هذه المعادلات بنجاحٍ لتفسير سلوك المعادن والغازات والثلج.

في أواخر سبعينيات القرن العشرين، رأى أحد زملاء أندرسون، وهو جون جيه هوبفيلد، في هذه النماذج الرياضية للمغناطيسية هيكلًا ذا صلة بتركيب الدماغ. استعان هوبفيلد بهذه الرؤية لإيجاد حلٍّ لأحد الألغاز الطويلة الأمد باستخدام الرياضيات، هذا اللغز هو كيفية تكوين الذكريات والاحتفاظ بها عن طريق الخلايا العصبية.

كان ريتشارد سيمون مخطئًا.

كتب عالم الأحياء الألماني ريتشارد سيمون، الذي كان يُجري أبحاثًا في نهاية القرن العشرين، كتابَين مطوَّلَين عن علم الذاكرة. زخر الكتابان بشروح تفصيلية للنتائج التجريبية والنظريات، والمفردات الخاصة بوصف أثر الذاكرة على «الأنسجة العُضوية». اتَّسم العمل الذي قدمه سيمون بالأمانة والوضوح وكان ينُم عن البصيرة، إلا أنه انطوى على عيب أساسي. فيما سبق اعتقد عالم الطبيعة جان باتيست لامارك (على عكس فهمنا الحالي للتطور) أن السمات التي يكتسبها الحيوان خلال فترة حياته يمكن أن تنتقل إلى نسله. وبالمثل، اقترح سيمون أن «الذكريات» التي يكتسبها الحيوان يمكن أن تنتقل إلى النسل. أي إنه اعتقد أن استجابات الكائن الحي لبيئته التي تعلَّمها ستظهر عند النسل دون تعليمها لهم. نتيجة لهذا الحدس الخاطئ، نُحيت أعمال سيمون، التي كانت قيِّمةً بعيدًا عن هذا الخطأ، شيئًا فشيئًا وطواها النسيان.

لم تكن الأفكار الخاطئة بشأن الذاكرة بالأمر الجديد. على سبيل المثال، اعتقد الفيلسوف رينيه ديكارت أن الذكريات تُنشَّط عن طريق غدة صغيرة توجِّه تدفق «الأرواح

الحيوانية». ما جعل سيمون متفردًا، على الرغم من الخلل الذي كان في عمله، والذي حكم عليه أن يُصبح في طيِّ النسيان على مدار التاريخ، هو أن أحد إسهاماته ظل مؤثرًا لفترة كانت كافية لإنتاج مجموعة كاملة من الأبحاث. يتمثل الأثر الضئيل الذي تبقَّى من جهوده في «الإنجرام (Engram)»؛ وهي كلمة ابتكرها سيمون في كتابه «الاحتفاظ بالذكريات» عام ١٩٠٤ ثم تعلمها ملايين طلاب علم النفس وعلم الأعصاب.

في هذا الوقت الذي كان سيمون يؤلف فيه، كانت الذاكرة قد خضعت لتوِّها للتدقيق العلمي، كما كانت معظم النتائج تتعلق بمهارات الحفظ، وليس العمليات والآليات البيولوجية للذاكرة. على سبيل المثال، كان الأشخاص يُدرَّبون على حفظ أزواج من الكلمات العديمة المعنى مثل («شقك» «نيقك») ثم تُختبَر قدرتهم على استرجاع الكلمة الثانية عندما تظهر لهم الأولى. سيصبح هذا النوع من الذاكرة، المعروف باسم «الذاكرة الارتباطية»، هدفًا للبحث لعقودٍ قادمة. لكن سيمون كان مهتمًّا بما هو أكثر من السلوك؛ فقد أراد معرفة أيُّ التغييرات في النُّظم الفسيولوجية للحيوان يمكنها دعم هذه الذكريات الارتباطية.

قسَّم سيمون، الذي استرشد ببياناتٍ تجريبيةٍ شحيحة، عملية تكوين ذكريات واستعادتها إلى العديد من العناصر. ونظرًا لأنه وجد الكلمات الشائعة غامضةً ومثقلةً بالمعاني ابتكر مصطلحاتٍ جديدةً لتقسيمات العمل هذه. عُرفت الكلمة التي ستصبح ذات تأثير كبير، أي الإنجرام، بأنها «التعديل المستمر الخفي على الأغلب في المادة القابلة للاستثارة الناتجة عن مثير». أو، بعبارةٍ أكثر وضوحًا: التغييرات الفيزيائية التي تحدث في الدماغ عند تكوين ذكرى. رُبِط مصطلح آخر، وهو إكفوري (ecphory) أو الاسترجاع التلقائي للذكريات، «بالتأثيرات التي توقظ أثر الذاكرة أو الإنجرام من حالة الكُمون التي يكون عليها إلى حالةٍ من النشاط الواضح». هذا الفرق بين الإنجرام والإكفوري (أو بين عمليات تكوين ذكرى وعمليات استرجاعها) كان أحد مظاهر التقدم المفاهيمي التي جاء بها سيمون. على الرغم من أن اسم سيمون ومعظم مصطلحاته قد اختفت من المؤلفات، فإن العديد من مفاهيمه كانت صحيحة، وشكَّلت الأساس الذي اعتمد عليه تصميم نماذج الذاكرة في الوقت الحالي.

في عام ١٩٥٠، نشر عالم النفس الأمريكي كارل لاشلي ورقة بحثية بعنوان «البحث عن الإنجرام» رسخت إرث الكلمة. كما ألقت بظلال قاتمة على المجال. سُميت الورقة بهذا الاسم لأن البحث هو كل ما شعر لاشلي بأنه حقَّقه خلال ٣٠ عامًا من التجارب. تضمَّنت

تجارب لاشلي تدريب الحيوانات على الربط بين أمرَين (على سبيل المثال بين الاستجابة بطريقةٍ محددةٍ عند إظهار دائرةٍ عليها علامة X) أو تعلم مهمة مثل كيفية الركض داخل متاهة محددة. بعد ذلك، كان يستأصل مناطق محددة أو مسارات عصبية من الدماغ جراحيًّا، ويلاحظ كيف يتأثر السلوك بعد الجراحة. لم يتمكن لاشلي من إيجاد أي منطقة أو نمط من الضرر يعرقل الذاكرة على نحو موثوق به. ومن ثم خلص إلى أن الذكريات تكون حتمًا موزَّعة بالتساوي في جميع أنحاء الدماغ، وليس في منطقةٍ واحدةٍ بعينها. لكن بناءً على بعض الحسابات المتعلقة بعدد الخلايا العصبية التي يمكن استخدامها لتكوين ذكرى وعدد المسارات بينها، لم يكن متأكدًا مما إذا كان هذا ممكنًا. لذا كان يُنظر إلى مقالته المميزة باعتبارها شكلًا من أشكال الاستسلام والتنازل عن أي محاولةٍ لاستخلاص استنتاجاتٍ حول موقع الذاكرة، أمام مجموعةٍ ضخمةٍ من البيانات غير المتسقة. ظلَّت الطبيعة الفيزيائية للذاكرة بالنسبة إلى لاشلي مزعجةً كما كانت دومًا.

في الوقت نفسه، كان أحد طلاب لاشلي القدامى يطوِّر نظرياتِه الخاصَّة عن التعلُّم والذاكرة.

عزم عالم النفس الكندي دونالد هيب، الذي أدى عمله المبكر معلمًا بالتدريس المدرسي إلى زيادة اهتمامه بالعقل، على جعل علم النفس علمًا بيولوجيًّا. وفي كتابه «تنظيم السلوك» الذي نُشر عام ١٩٤٩، اعتبر أن مهمة عالم النفس هي «إخضاع التفكير البشري بتقلُّباته لعملية السبب والنتيجة الآلية». وفي هذا الكتاب، أرسى العملية الآلية التي يعتقد أنها وراء تكوين الذكريات.[١] بالتغلب على محدودية البيانات الفسيولوجية المتاحة وقتذاك وتضليلها أحيانًا، توصل هيب إلى مبدأ يتعلق بالأسس المادية للتعلم من خلال الحدس بدرجةٍ كبيرة. وُصِف هذا المبدأ، المعروف باسم التعلُّم الهيبي أو الارتباطي، بإيجازٍ من خلال العبارة «الخلايا العصبية التي تُطلق إشارات عصبية معًا ترتبط معًا».

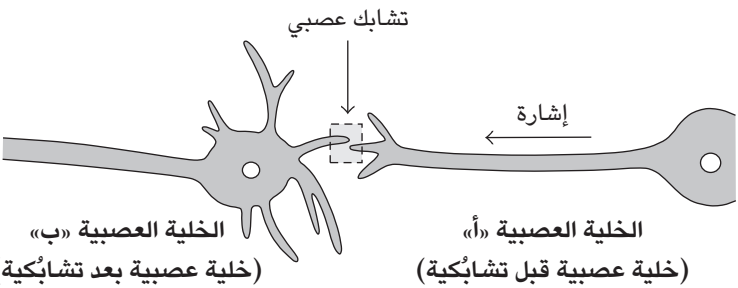
يصف التعلُّم الهيبي ما يحدث عند موضع الاتصال بين خليتَين عصبيتَين، الذي يمكن عنده لإحدى الخليتَين إرسال إشارةٍ للأخرى، ويُطلق على هذا الفراغ الصغير اسم التشابك

[١] نشر عالم فسيولوجيا الأعصاب البولندي جيرزي كونورسكي كتابًا بأفكار مشابهة تمامًا قبل هيب بسنة. في الواقع، توقع كونورسكي العديد من النتائج المهمة في علم الأعصاب وعلم النفس. إلا أن الانقسام العالمي بين الشرق والغرب آنذاك حال دون انتشار إسهاماته.

العصبي. لنفترض أن لدينا خليتَين عصبيتَين هما «أ» و«ب». يُكوِّن المحور العصبي للخلية «أ» اتصالًا تشابكيًّا مع الزوائد الشُّجَيرية أو جسم الخلية «ب» (وهو ما يجعل الخلية «أ» الخلية العصبية قبل التشابكية، والخلية «ب» الخلية العصبية بعد التشابكية). في التعلُّم الهيبي، إذا أطلقت الخلية العصبية «أ» إشارات عصبية مرارًا وتكرارًا قبل الخلية العصبية «ب»، فسيقوى الاتصال من الخلية «أ» إلى «ب». تقوية الاتصال يعني أنه في المرة القادمة التي تُطلق فيها الخلية «أ» إشارات عصبية كهربية، سيكون إطلاق الخلية «ب» للإشارات العصبية نتيجة لذلك أكثر فاعلية. بهذه الطريقة، يحدد النشاط قوة الاتصال وتُحدد قوة الاتصال النشاط.

اعتبر منهج هيب، بتركيزه على التشابك العصبي، أن تأثيرات الإنجرام قد تكون محدودة أو عامة؛ محدودة لأن الذاكرة تترك بصمة في الفجوة الصغيرة التي تلتقي عندها خلية عصبية بأخرى، وعامة لأن هذه التغييرات قد تحدث في كل التشابكات العصبية في الدماغ. كما جعل الذاكرةَ النتيجةَ الطبيعية للتجربة؛ مع لدونة التشابكات، يكون لدى أي عمليةِ تنشيطٍ للدماغ القدرةُ على ترك أثر.

وافق لاشلي، كونه عالمًا مخلصًا عازمًا على اتباع الحقائق، على أن الإنجرام يتوزع حتمًا بناءً على تجاربه الخاصة. لكنه لم يُرضِه حلُّ المسألة الذي قدمه هيب؛ إذ كان هذا الحل — على الرغم من كونه نظريةً جذابةً ومتسقة — يعتمد على التكهنات أكثر من اعتماده على الدليل المادي. وقد رفض عَرْض هيب بأن يكون مؤلفًا مشاركًا في العمل.




شكل ٤-١

على الرغم من أن أفكار هيب لم تجد دعمًا من لاشلي، منذ أن نُشر كتابه، حظِيت أفكاره بتأييدٍ من عدد لا حصر له من التجارب. أصبحت بُزَاقات البحر — وهي لا فقاريات بُنِّية لزجة بطول القدم تحتوي على ٢٠ ألف خلية عصبية فقط — من الكائنات التي حظيت بالكثير من الدراسة في هذا المجال؛ نظرًا لقدرتها على تعلُّم الربط الأساسي. لهذه البُزَاقات العديمة الصَّدَفة خيشوم على ظهرها يمكن سحبه للداخل بسرعة؛ لإبقاء هذه الرخويات آمنة إذا ما تعرضت للتهديد. في المختبر، تتسبب الصدمة الكهربية القصيرة في سحب الخيشوم للداخل. إذا سبقت هذه الصدمة الكهربية لمسة خفيفة غير مؤذية لمرات متكررة، فسيبدأ البُزَاق في سحب الخيشوم إلى الداخل استجابة للمسة فقط، وهو ما يُظهر وجود ارتباط بين اللمسة وما هو متوقع حدوثه بعد ذلك. تُعد هذه التجربة مكافئة لتعلم ربط كلمة «شقك» بكلمة «نيقك». اتساقًا مع نظرية هيب للتعلم، ثبت أن هذا الارتباط يتحقق من خلال تقوية الوصلات بين الخلايا العصبية التي تستجيب لِلَّمس، وتلك التي تؤدِّي إلى استجابة الخيشوم. يحدث التغيير في السلوك نتيجة لتغيير الوصلات.

ومن ثَم، لم يُلحَظ التعلُّم الهيبي فحسب؛ بل أمكن التحكم فيه أيضًا. في عام ١٩٩٩ أظهر باحثون من جامعة برينستون أن البروتينات المعدلة وراثيًّا الموجودة في الغشاء الخلوي، والتي تسهم في التغيُّرات التشابكية، يمكنها التحكم في قدرة الفأر على التعلم. زيادة فعالية أداء هذه المستقبلات تعزز قدرة الفئران على تذكر الأشياء التي عُرضت عليها من قبل. وعرقلة هذه البروتينات يفسد ذلك.

لقد ثبت علميًّا الآن أن التجربة تؤدي إلى تنشيط الخلايا العصبية، وأن تنشيط الخلايا العصبية يمكنه تغيير الروابط بينها. كانت هذه القصة مقبولةً باعتبارها على الأقل إجابةً جزئيةً للسؤال حول مسألة الإنجرام. إلا أن الإنجرام نفسه، حسب وصف سيمون، مجرد جزءٍ من حكاية الذاكرة. تتطلَّب الذاكرة أيضًا التذكُّر. كيف يمكن لطريقة إيداع الذكريات هذه إتاحةُ التخزين على المدى الطويل والتذكُّر؟

لم تكن مفاجأة بحقٍّ أن يصير جون جي هوبفيلد عالم فيزياء. فقد ترعرع هوبفيلد، الذي وُلد عام ١٩٣٣ لجون هوبفيلد الأب — الرجل الذي صنع لنفسه اسمًا في التحليل الطيفي فوق البنفسجي — وهيلين هوبفيلد — التي درست الإشعاع الكهرومغناطيسي الجوي — في أسرةٍ كانت الفيزياء لديها تُعد فلسفةً بقدر ما كانت تُعد علمًا. في هذا الصدد، كتب هوبفيلد في سيرته الذاتية: «كانت الفيزياء عبارة عن وجهة نظر، مفادُها أنه بالجهد

والبراعة والموارد الكافية، يمكن فهم العالم من حولنا بطريقةٍ تَنبُّئِيَّة وكَمية معقولة. كون المرء عالمَ فيزياء يعني التفاني في الوصول إلى هذا النوع من الفهم.» وكان سيصبح عالم فيزياء.[٢]

حصل هوبفيلد، الذي كان طويلًا ونحيلَ الجسد وله ابتسامة آسرة، على درجة الدكتوراه عام ١٩٥٨ من جامعة كورنيل. كما أنه حذا حذو والده بالحصول على زمالة جوجنهايم، واستخدمها للدراسة في مختبر كافيندش في كامبريدج. لكن حتى قبل هذه المرحلة، كان حماس هوبفيلد بشأن موضوع الدكتوراه الخاص به — أي فيزياء المواد المكثفة — يتلاشى. وقد كتب لاحقًا: «في عام ١٩٦٨ استنفدتُ ما لديَّ من مسائل … أفادَتْني مهاراتي في حلها على ما يبدو.»

من المعلوم أن الهيموجلوبين جُزَيءٌ له وظيفةٌ بيولوجيةٌ حاسمة؛ وهي حَمْل الأكسجين في الدم، وفي الوقت نفسه يمكن دراستُه باستخدامِ العديد من تقنيات الفيزياء التجريبية، ويُعد بمثابة البوابة التي عبر منها هوبفيلد من الفيزياء إلى علم الأحياء. بحث هوبفيلد في تركيب الهيموجلوبين لعدة سنوات في مختبرات بيل، لكنه وجد شغفه الحقيقي بعلم الأحياء، بعدما تلقَّى دعوة لسلسلة من مؤتمرات حول علم الأعصاب في بوسطن في أواخر سبعينيات القرن العشرين. وهناك التقى بمجموعة متنوعة من الأطباء الإكلينيكيين وعلماء الأعصاب، الذين اجتمعوا لمناقشة مسألة كيفية انبثاق العقل من الدماغ. افتُتِن هوبفيلد بذلك.

لكنْ نظرًا إلى أن هوبفيلد كان من ذوي التفكير الرياضي، أثار قلقه المنهج النوعي المتبع في أبحاث الدماغ. فقد كان قلِقًا من أنه على الرغم من مواهب هؤلاء الباحثين الواضحة في علم الأحياء، فإنهم «لن يتمكنوا أبدًا من حل المسألة؛ لأن الحل يمكن التعبير عنه فقط بلُغةٍ وبِنيةٍ رياضيةٍ ملائمة».[٣] كانت هذه هي اللغة التي يستخدمها علماء

---

[٢] عندما استوفى هوبفيلد استمارة الالتحاق بالجامعة موضحًا أنه ينوي دراسة «الفيزياء أو الكيمياء»، شطب مرشده الأكاديمي — وزميل والده — الخيار الأخير قائلًا: «لا أعتقد أن علينا وضع الكيمياء في الاعتبار.»

[٣] لم يكن موقف هوبفيلد فريدًا من نوعه. فقد حفلت فترة ثمانينيات القرن العشرين بالعديد من علماء الفيزياء الذين، استنادًا إلى شعورهم بالملل من مجالهم، نظروا إلى الدماغ وفكروا «يمكنني حل ذلك». وبعد نجاح هوبفيلد، زاد عددهم.

الفيزياء. ومن ثم، انصب اهتمام هوبفيلد على استخدام مجموعة مهارات عالم الفيزياء، حتى عندما شرع في دراسة الذاكرة. كان يرى أن بعض علماء الفيزياء الذين قفزوا إلى علم الأحياء في ذلك الوقت قد هاجروا إليه كليًّا، حيث اضطلعوا بالمسائل المتعلقة بهذه الأرض الجديدة ومصطلحاتها وثقافتها. لكنه أراد الاحتفاظ بقوةٍ بهُويَّته كفيزيائي.

في عام ١٩٨٢ نشر هوبفيلد ورقة بعنوان «الشبكات العصبية والأنظمة الفيزيائية ذات القدرات الحاسوبية الجماعية الناشئة»، ورد فيها الوصفُ والنتائج المتعلقة بما يُعرف الآن باسم شبكة هوبفيلد. كانت هذه أول ورقة بحثية لهوبفيلد حول الموضوع؛ أي إنه بمجرد أن غامر بدخول مجال علم الأعصاب أحدث ضجة كبيرة جدًّا.

شبكة هوبفيلد عبارة عن نموذج رياضي من خلايا عصبية يمكنها تنفيذ ما وصفه هوبفيلد بأنه «ذاكرة مُعَنوَنة بمضمونها». يشير هذا المصطلح، الذي يعود إلى علوم الكمبيوتر، إلى فكرة أنه يمكن استرجاع ذكرى كاملة من مجرد عنصر صغير من عناصرها. الشبكة التي صمَّمها هوبفيلد لهذه المهمة بسيطة التركيب. فهي مكونة من خلايا عصبية ثنائية فقط (مثل الخلايا العصبية في نموذج ماكولك-بيتس الذي تناولناه في الفصل السابق)، يمكن أن تكون في وَضْع إما «تشغيل» أو «إيقاف». ومن ثم فإن التفاعلاتِ بين هذه الخلايا العصبية هي التي تنبثق منها السلوكيات المثيرة للاهتمام لهذه الشبكة.

شبكة هوبفيلد متكررة، بمعنى أن نشاط كل خلية عصبية يُحدَّد بواسطة نشاط أيٍّ من الخلايا العصبية الأخرى في الشبكة. لذا، فإن نشاط كل خلية عصبية يلعب دور المدخل والمخرج بالنسبة إلى الخلايا العصبية المجاورة لها. على وجه التحديد، كل مدخل تستقبله الخلية العصبية من خلية عصبية أخرى يُضرب في عدد محدد، وهو الوزن الترجيحي للتشابك، أي قوة التشابك. بعد ذلك، تُجمع هذه المدخلات المرجحة وتُقارن بحد العتَبة: إذا كان المجموع أكبر من (أو يساوي) حد العتبة يكون نشاط الخلية العصبية بالقيمة ١ («تشغيل»)، وبخلاف ذلك يكون بالقيمة صفر («إيقاف»). بعد ذلك، يدخل هذا المخرج في العمليات الحسابية التي تحدث في طبقة المدخلات للخلايا العصبية الأخرى، التي تدخل مرةً أخرى في مزيدٍ من العمليات الحسابية في طبقة المدخلات، وهكذا دوالَيك.[٤]

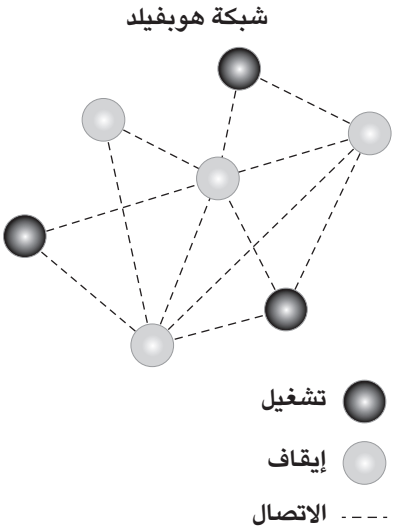
[٤] على الرغم من أن حساب نشاط الخلية العصبية الفردية، من حيث المدخلات والأوزان الترجيحية، هو نفسه الموضح فيما يتعلق بشبكة بيرسيبترون في الفصل الأخير، فإن شبكة بيرسيبترون أماميةُ التغذية

وكحال جمهورٍ محتشدٍ في ساحات الرقص الجامح، تتدافع عناصرُ النظام المتكرر، ويسحب بعضَها البعضُ؛ بحيث تُحدد حالة أي عنصر في أي لحظة محددة من خلال العناصر المحيطة بها. ومن ثم فإن الخلايا العصبية في شبكة هوبفيلد أشبه بذرات الحديد التي تؤثر باستمرار على بعضها، من خلال التفاعلات المغناطيسية. يمكن أن تكون تأثيرات هذا التفاعل المستمر لا تُحصى، ومعقدةً أيضًا. ويُعد توقُّع الأنماط التي تنتجها هذه الأجزاء المتداخلة مستحيلًا من الأساس، من دون دقَّة النموذج الرياضي. كان هوبفيلد على درايةٍ وثيقةٍ بهذه النماذج وقدرتها على توضيح كيف أن التفاعلاتِ المحدودةَ تُؤدِّي إلى ظهور السلوك الكُلِّي.

وجد هوبفيلد أنه إذا كانت الأوزان الترجيحية بين الخلايا العصبية في الشبكة صحيحة، فإن الشبكة ككل يمكنها تكوين ذاكرة ارتباطية. لفهم ذلك، علينا أولًا تحديد ما يُعتبر ذكرى في هذا النموذج التجريدي. تخيَّل أن كل خليةٍ عصبية في شبكة هوبفيلد تمثِّل شيئًا مختلفًا؛ الخلية «أ» تمثِّل كرسيًّا هزازًا، والخلية «ب» تمثِّل دراجة، والخلية «ج» تمثِّل فِيلًا، وما إلى ذلك. لتمثيل ذكرى محددة، لنقل غرفة طفولتك، لا بد أن تكون جميع الخلايا العصبية التي تمثِّل جميع الأشياء الموجودة في غرفتك — أي السرير، وألعابك، والصور على الحائط — في وضع «تشغيل»، في حين أن الخلايا العصبية التي تمثِّل الأشياء غير الموجودة في غرفتك — أي القمر، وحافلة المدينة، وسكاكين المطبخ — لا بد أن تكون في وضع «إيقاف». ومن ثم تكون الشبكة ككلٍّ في حالة التنشيط المقابلة لـ «غرفة طفولتك». كل حالة تنشيط مختلفة — لها مجموعة مختلفة من الخلايا العصبية بوضع «تشغيل» أو «إيقاف» — تمثِّل ذكرى مختلفة.

في حالة الذاكرة الارتباطية، يؤدي مدخل صغير للشبكة إلى إعادة تنشيط حالة ذاكرة كاملة. على سبيل المثال، رؤية صورة لنفسك وأنت في غرفة طفولتك قد يُنشِّط بعض الخلايا العصبية التي تُمثِّل غرفتك؛ أي الخلايا العصبية التي تمثِّل الفراش والخلايا العصبية التي تمثِّل الوسادة، وما إلى ذلك. في شبكة هوبفيلد، الوصلات بين هذه الخلايا العصبية وتلك التي تمثِّل الأجزاء الأخرى من الغرفة — الستائر، والألعاب، والمكتب —

(وليست متكررة). التكرار يعني أن الوصلات يمكن أن تُكوِّن حلقات؛ على سبيل المثال: الخلية العصبية «أ» تتصل بالخلية العصبية «ب» التي تتصل مرة أخرى بالخلية العصبية «أ».




شكل ٤-٢

يجعل هذه الخلايا العصبية الأخرى تصبح نشطةً، وهو ما يؤدي إلى إعادة تهيئة تجربة الوجود في غرفة النوم بالكامل. الوصلات ذات الأوزان السالبة (المثبِّطة) بين الخلايا العصبية التي تمثِّل الغرفة، وتلك التي تمثِّل حديقة محلية مثلًا، تضمن عدم تسلل أي عناصر أخرى إلى ذكرى الغرفة. بهذه الطريقة لن ينتهي بك الحال بتذكُّر أرجوحة بجانب خزانة ملابسك.

بينما تعمل بعض الخلايا العصبية على التحفيز وتعمل أخرى على التثبيط، فإن مثل هذه التفاعلية هي التي تبرز الذكرى بالكامل بصورة واضحة جلية. تقع مهمة التذكُّر على عاتق التشابكات العصبية. فقوة هذه الوصلات العصبية هي التي تنفِّذ مهمة استرجاع الذكريات الهائلة والدقيقة.

في لغة الفيزياء، الذكرى المسترجَعة بالكامل تُعد مثالًا على عناصر الجذب. عنصر الجذب باختصار هو نمط شائع للنشاط. فهو نمط تتحول إليه أنماط النشاط الأخرى، تمامًا كما يُسحب الماء إلى البالوعة. الذكرى عبارة عن عنصر جذب؛ لأن تنشيطَ عددٍ قليل من الخلايا العصبية التي تكوِّن الذكرى سيدفع الشبكة إلى استكمال الباقي. وبمجرد أن

تصبح الشبكة في حالة عنصر الجذب، فإنها تبقى كذلك مع بقاء خلاياها العصبية في وضع «التشغيل» أو «الإيقاف». ونظرًا لكون علماء الفيزياء مولَعين بوصف الأشياء بدلالة الطاقة، فإنهم يعتبرون الجواذب حالاتٍ «منخفضة الطاقة». تمثِّل عناصر الجذب وضعًا مُريحًا لنظام ما، وهو ما يجعلها جذابة ومستقرة.

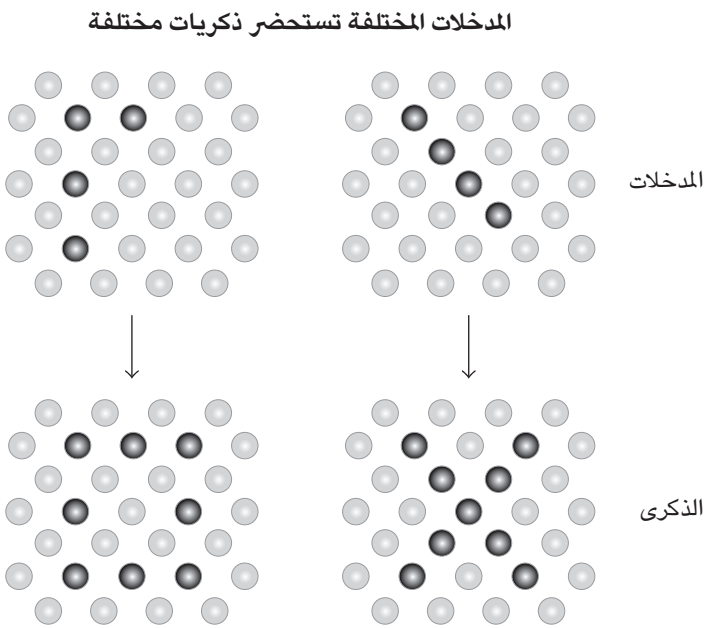
تخيل ترامبولين يقف عليها شخص. ستتدحرج كرة ثُبِّتت في مكان ما على الترامبولين نحو الشخص وتبقى هناك. ومن ثم، فإن وجود الكرة في التجويف أو الحفرة الناتجة عن وقوف الشخص يُمثِّل حالة عنصر الجذب أو الاستقرار لهذا النظام. إذا وقف شخصان لهما الحجم نفسه، أحدهما مقابل الآخر، على الترامبولين، فسيحتوي النظام على عنصرَي جذب. ستتدحرج الكرة نحو الشخص الذي كانت أقرب إليه منذ البداية، لكن كل الطرق ستظل مؤدية إلى جاذب. لن تكون أنظمة الذاكرة ذات فائدة كبيرة إذا كان بمقدورها تخزين ذكرى واحدة فقط؛ لذا من المهم أن تتمكن شبكة هوبفيلد من الاحتفاظ بالعديد من الجواذب. وكما تضطر الكرة إلى الاتجاه صوب أقرب نقطة منخفضة على الترامبولين، تنتقل حالات النشاط العصبي الأولية نحو الذكرى الأقرب والأكثر تماثُلًا. يقال إن الحالات الأولية التي تُفضي إلى ذكرى جاذبة محددة — على سبيل المثال: صورة فراش طفولتك التي تحفِّز استدعاء ذكرى الغرفة بالكامل، أو رحلة للشاطئ التي تسترجع ذكرى عطلة في الطفولة — تكون موجودة في «حوض الجذب» المفضي للذكرى الجاذبة.

قصيدة «مُتع الذاكرة» هي قصيدة كتبها صمويل روجرز عام ١٧٩٢. كتب روجرز متأملًا في الرحلة الشاملة التي يمكن للذاكرة اصطحاب العقل إليها:

> أفكارنا ساكنة داخل الدماغ في غُرَف لا حصر لها،
> كأنها حلقاتٌ مترابطة معًا بسلسلة خفية.
> إذا أيقظت واحدة فقط من سباتها، تبعتها الآلاف باستفاقة تلقائية!
> كل فكرة تطبع صورة لها! بينما تتلاشى الأخرى!

يمكن العثور على السلسلة الخفية في قصيدة روجرز في نمط الأوزان (قوة الوصلات) التي تستحضر ذكرى في شبكة هوبفيلد. يتسق نموذج الجواذب مع معظم حدسنا عن الذاكرة. فهو يتناول ضمنًا الزمن المستغرق لاستعادة الذكريات؛ إذ تحتاج الشبكة إلى زمنٍ لتنشيط الخلايا العصبية الصحيحة. يمكن أن تُزاح عناصر الجذب قليلًا في الشبكة، ما يؤدي إلى تكوين ذكريات دقيقة تقريبًا مع تغيير تفصيلة أو اثنتين. كما أنه من الممكن

دمج الذكريات المتطابقة تمامًا معًا في ذكرى واحدة. في حين أن عمليةَ تفكيكِ الذاكرة واختزالِها إلى سلسلة من الأصفار والآحاد قد تبدو انتقاصًا من ثراء معرفتنا بالذاكرة، فإن تبسيط هذه العملية التي تبدو من دون هذا التبسيط غير قابلة للوصف هو الذي يجعل فهمها أمرًا سهل المنال.




شكل ٤-٣

في شبكة هوبفيلد، يحدد مدى قوة اتصال الخلايا العصبية ببعضها أنماطُ النشاط العصبي التي تشكِّل إحدى الذكريات. ومن ثَم، فإن الإنجرام يعتمد على الأوزان، لكن كيف يحدث ذلك؟ كيف يمكن لتجربةٍ تكوينُ الأوزان الصحيحة تمامًا اللازمة لتكوين ذكرى؟ يخبرنا هيب أن الذكريات تنتج حتمًا عن تقوية الروابط بين الخلايا العصبية التي لها نشاطٌ مماثل، وفي شبكة هوبفيلد هذا ما يتم بالفعل.

تعمل شبكة هوبفيلد على تشفير مجموعة من الذكريات من خلال إجراء بسيط. لكل حالة تتضمن خليتَين عصبيتَين، كلتاهما نشطتان أو غير نشطتين، يقوى الاتصال بين هاتَين الخليتَين. بهذه الطريقة، فإن الخلايا العصبية التي تُطلق إشارات عصبية كهربية معًا تصبح متصلة معًا. في المقابل، لكل نمط يتضمن خليتَين عصبيتَين إحداهما نشطة والأخرى غير نشطة، يضعف الاتصال بينهما.[٥] بعد إجراء التعلم هذا، سيكون للخلايا العصبية التي تنشط معًا في حالة تكوين الذكريات اتصالٌ موجب قوي، في حين سيكون للخلايا العصبية التي لها أنماط نشاط معاكسة اتصال سالب قوي، وستقع الخلايا الأخرى في مكان ما بينهما. مثل هذا التباين في قُوى الاتصال يلزمُ لتكوين عناصر جذب.

عناصر الجذب ليست بالظواهر التافهة أو البسيطة. فإذا اعتبرنا أن جميع الخلايا العصبية ترسل وتستقبل مدخلات باستمرار، لِمَ نفترض أن نشاطها سيستقر عند نمط معين من النشاط العصبي يمثل حالة ذكرى معينة، فضلًا عن حالة الذكرى الصحيحة؟ للتأكُّد من أن عناصر الجذب الصحيحة ستتكوَّن في هذه الشبكات، تعيَّن على هوبفيلد أن يفترض افتراضًا غريبًا؛ وهو أن الأوزان في شبكة هوبفيلد متماثلة. وهذا يعني أن قوة الاتصال من الخلية «أ» إلى الخلية «ب» تُماثل قوة الاتصال من الخلية «ب» إلى الخلية «أ» دائمًا. قدم تطبيق هذه القاعدة ضمانةً رياضية على تكوين عناصر الجذب الصحيحة. إلا أنه ثمة مشكلة تتمثل في أن احتمالات إيجاد مجموعة كهذه من الخلايا العصبية في الدماغ أقلُّ ما تُوصف به أنها محبِطة. سيتطلَّب ذلك أن تمدَّ كل خليةٍ محورها العصبي، وتكوِّن تشابكًا عصبيًّا مع خلية أخرى، وفي المقابل تمد هذه الخلية الأخرى محورها العصبي أيضًا؛ كي يتصل بالخلية الأولى بالقوة نفسها. وعلم الأحياء ليس بهذه البساطة والسهولة.

هذا من شأنه أن يسلط الضوء على التوتر الدائم الناتج عن اتباع المنهج الرياضي في دراسة العمليات البيولوجية. إن منظور الفيزيائي، الذي يعتمد على درجة غير منطقية تقريبًا من التبسيط، يكون في خلاف دائم مع علوم الأحياء التي تعُجُّ بالتفاصيل غير المنظمة والشاقة. في هذه الحالة، تطلَّبت تفاصيل الرياضيات أوزانًا متطابقة، من أجل

[٥] الجزء الثاني — أي فكرة أن قوة الاتصال لا بد أن تقل إذا كانت الخلية العصبية قبل التشابكية عالية النشاط، في حين أن الخلية العصبية بعد التشابكية تظل ساكنة — لم يكن جزءًا من الرسم التوضيحي لهيب، لكن أمكن إثباته منذ ذلك الحين بالتجارب.

تكوين أي عبارةٍ حاسمةٍ عن الجواذب؛ ومن ثم إحراز تقدُّم في تمثيل عملية التذكر بنماذج. إلا أنه من المرجح أن يكون عالم الأحياء قد رفض هذا الافتراض برُمته.[٦]

ونظرًا لأن هوبفيلد قد وقف على مسافة واحدة من الخلاف بين علماء الرياضيات والأحياء، فقد عرف كيف يقدر وجهات نظر علماء الأعصاب. للتخفيف من مخاوفهم، أوضح في ورقته البحثية الأصلية أن الشبكات التي سمحت بأوزان غير متماثلة لا تزال قادرةً على التعلُّم، والحفاظ على عناصر الجَذْب بشكلٍ جيد نسبيًّا، على الرغم من أن هذا لا يمكن ضمانه رياضيًّا.

وبهذا، فإن شبكة هوبفيلد تقدم إثباتًا للمفهوم الذي مفادُه أن أفكار هيب عن التعلم يمكن أن تُطبق على أرض الواقع. علاوةً على ذلك، قدمت فرصة لدراسة الذاكرة دراسة رياضية لتحديد سَعة تخزين الشبكات العصبية. على سبيل المثال، إيجاد إجابة عن السؤال التالي: كم عدد الذكريات التي يمكن أن تستوعبها الشبكة؟ هذا سؤال لا يمكن طرحه إلا من خلال الاستعانة بنموذج محدد للذاكرة. في أبسط نسخة لشبكة هوبفيلد، يعتمد عدد الذكريات على عدد الخلايا العصبية في الشبكة. على سبيل المثال، الشبكة التي تحتوي على ١٠٠٠ خلية عصبية يمكنها تخزين ١٤٠ ذكرى، والتي تحتوي على ٢٠٠٠ خلية عصبية يمكنها تخزين ٢٨٠ ذكرى، والتي تحتوي على ١٠ آلاف يمكنها تخزين ١٤٠٠ وما إلى ذلك. إذا ظل عدد الذكريات أقل من ١٤ في المائة من عدد الخلايا العصبية، فستُستعاد كل ذكرى بحد أدنى من الخطأ. لكن إضافة مزيد من الذكريات سيكون أشبه بإضافة بطاقات إضافية إلى بيت مصنوع من البطاقات، وهو ما يؤدي لانهياره. عندما يتجاوز عدد الذكريات قدرة شبكة هوبفيلد على الاستيعاب، فإن الشبكة تنهار؛ أي إن المدخلات تتجه نحو عناصر جذبٍ بلا معنًى ولا يُستعاد أي ذكريات. هذه ظاهرةٌ يُطلَق عليها الاسم الدرامي المناسب «كارثة التعتيم».[٧]

لا يمكن تفادي الدقة؛ بمجرد الوصول إلى هذه القيمة المقدرة لسعة الذاكرة، من المنطقي البدء في السؤال عمَّا إذا كانت هذه القيمة تتناسب مع عدد الذكريات التي نعلم

[٦] في الواقع، عندما عرض هوبفيلد نسخة مبكرة من بحثه أمام مجموعة من علماء الأعصاب، علق أحد الحضور بالقول: «هذا كلام جميل، لكن لسوء الحظ لا يمتُّ لعلم الأعصاب بصِلة.»

[٧] ربما قابلتَ بعض الأشخاص الذين أخبروك بحكايات عن «كارثة التعتيم» حدثت لهم بعد ليلة من احتساء المشروبات الكحولية. إلا أنه لا يُعتقد أن هذا النوع من تلاشي الذكريات، الذي لوحظ في شبكة هوبفيلد، يحدث للبشر.

أنها مخزنة في الدماغ أم لا. أظهرت دراسة بارزة أجريت عام ١٩٧٣ أن الأشخاص الذين عُرض عليهم أكثر من ١٠ آلاف صورة (عُرضت كل صورة مرة واحدة ولفترة قصيرة من الوقت) كانوا قادرين تمامًا على تذكر الصور فيما بعد. تستطيع ١٠ ملايين خلية عصبية في القشرة المحيطية — منطقة في الدماغ تشترك في عملية تكوين ذاكرة بصرية — تخزين هذا العدد من الصور، لكن هذا لن يترك مساحةً كبيرةً لأي شيءٍ آخر. ومن ثم، يتضح أن هناك مشكلةً مع التعلم الهيبي.

إلا أن هذه المشكلة أصبحت أبسط، عندما أدركنا أن عملية التعرُّف مختلفةٌ عن الاستدعاء. بمعنى أنه قد يُراودنا شعور بالأُلفة لدى رؤية صورةٍ ما، دون أن نتمكَّن من إعادة تكوين هذه الصورة من البداية. تتميز شبكة هوبفيلد بقدرتها على القيام بالمهمة الأخيرة الأصعب، فهي تكمل ذكرى بالكامل من جزء منها. لكن هذا لا ينفي أن المهمة الأولى ذات أهمية هي الأخرى. بفضل العلماء الذين يعملون في جامعة بريستول، أصبح معروفًا الآن أن الشبكة التي تستخدم التعلم الهيبي يمكنها تنفيذ عملية التعرُّف. عند تقييم هذه الشبكات من حيث قدرتها على تحديد ما إذا كان المدخل جديدًا أو مألوفًا، يتضح أن لها سعة أعلى: الآن تستطيع ١٠٠٠ خلية عصبية التعرف على ما يصل إلى ٢٣ ألف صورة. كما حدد سيمون مسبقًا، يُعد هذا مثالًا على مشكلة تنشأ عن الاعتماد على لغة عامة أو شائعة لتقسيم وظائف الدماغ. ما يبدو لنا ببساطة أنه مجرد «ذاكرة» يتضح أنه يتشظَّى إلى العديد من المهارات المنفصلة، عندما يخضع للبحث والتدقيق العلمي والرياضي.

في عام ١٩٥٣، أزال الطبيب الأمريكي وليام سكوفيل منطقة الحصين من كل جانبٍ من دماغ هنري مولايسون، البالغ من العمر ٢٧ عامًا؛ إذ كان يعتقد أنه يساعد على منع نوبات الصرع لدى مولايسون. ما لم يعرفه سكوفيل هو الأثر المذهل لهذا الإجراء على علم الذاكرة. ارتاح مولايسون (الذي عُرف أكثر باسم «إتش إم» في الأوراق البحثية لإخفاء هويته، وذلك حتى وفاته عام ٢٠٠٨) بعضَ الشيء من نوبات الصرع بعد هذا الإجراء، لكنه لم تتشكل لديه أي ذاكرة واعية مرة أخرى. كان فقدان مولايسون للذاكرة الدائم اللاحق محركًا لبدء مجموعة من الأبحاث ركزَت على منطقة الحصين — وهي عبارةٌ عن بِنيةٍ منحنيةٍ بطول الإصبع تتخذ موضعًا عميقًا في الدماغ — باعتبارها محورًا في نظام تكوين الذكريات. بعيدًا عن بحث لاشلي المضطرب، يلعب هذا الموقع دورًا مميزًا في تخزين الذكريات.

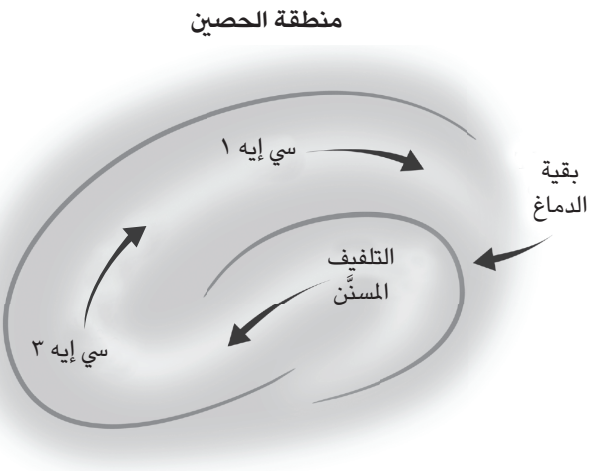
تنص النظريات الحالية حول وظيفة الحصين على الآتي: تصل المعلومات حول العالم أولًا إلى منطقة الحصين عند التلفيف المسنَّن، وهي منطقة تمتد بطول الحافة السفلية من الحصين. هُنا، التمثيل مهيأ ومُعدٌّ ليكون في صورة أكثر قابلية لتخزين الذكريات. بعد ذلك، يرسل التلفيف المسنن إشارات بهذه المعلومات إلى المنطقة التي يُفترض أن تتكوَّن الجوانب فيها، وهي منطقة تُسمى سي إيه ٣، تحتوي على وصلات مكررة واسعة النطاق، تجعلها الركيزة الأساسية للتأثيرات المشابهة لتأثيرات شبكة هوبفيلد. بعد ذلك، تُرسل هذه المنطقة المخرجات إلى منطقة أخرى تُسمَّى سي إيه ١، وهي تلعب دور محطة ترحيل؛ إذ تُرسل المعلومات التي يجري تذكرها إلى باقي أجزاء الدماغ.

الأمر المثير للاهتمام في هذه الخطوة الأخيرة، وما قد يكون أفسد نتائج لاشلي الأصلية، هو أن هذه الزوائد التي تمتد إلى مناطق مختلفة من الدماغ يُعتقد أنها تُسهِّل نسخ الذكريات. بهذه الطريقة، تُعتبر منطقة سي إيه ٣ مَخزنًا مؤقتًا أو مُستودعًا يحتفظ بالذكريات، إلى أن يتسنى نقلُها إلى مناطق الدماغ الأخرى. تؤدي هذا من خلال إعادة تنشيط الذكرى في هذه المناطق. ومن ثم، فإن منطقة الحصين تُساعد بقية أجزاء الدماغ على حفظ الأشياء، باستخدام الاستراتيجية نفسها التي تستخدمها للاستعداد للامتحان: التكرار. بإعادة تنشيط المجموعة نفسها من الخلايا العصبية بشكلٍ متكررٍ في مناطق مختلفةٍ من الدماغ، يمنح الحصين هذه الخلايا العصبية الفرصة للخضوع للتعلم الهيبي بنفسها. في النهاية، تكون الأوزان الترجيحية للوصلات بين هذه الخلايا قد تغيرت بما يكفي لتخزين الذكرى هناك بأمان.[٨] بإزالة منطقة الحصين من دماغ مولايسون لم يعُد لديه مستودع لتخزين تجاربه، كما لم يعُد لديه طريقة لاستدعاء الذكريات في دماغه.

بمعرفة موقع مستودع الذكريات هذا في الدماغ، يمكن للباحثين النظر في آلية عمله. على وجه التحديد، يمكنهم البحث عن الجوانب فيه.

في عام ٢٠٠٥ سجَّل علماء في جامعة كوليدج لندن نشاط خلايا الحصين لدى مجموعة من الفئران. اعتادت الفئران أن تُوضع في حاويات لها شكلان مختلفان: حاويات دائرية، وحاويات مربعة. أظهرت الخلايا العصبية في منطقة الحصين لهذه الفئران نمطًا مُعَينًا من النشاط عند وضعها في الحاوية الدائرية، في حين أظهرت نمطًا مختلفًا عندما وُضعت في الحاوية المربعة. يأتي اختبار تحديد الجوانب عند وَضْع الفئران في بيئةٍ جديدة

[٨] يُعتقد أن هذه العملية تحدث أثناء النوم.




شكل ٤-٤

ليست مربعة أو دائرية الشكل، بل شكل يقع ما بين الدائرة والمربع. وجد الباحثون أنه إذا كان شكل البيئة أقرب إلى المربع منه إلى الدائرة، فسيميل النشاط العصبي إلى النمط المرتبط بالبيئة المربعة، أما إذا كان شكل البيئة أقرب إلى الدائرة منه إلى المربع، فسيميل النشاط إلى النمط المرتبط بالبيئة الدائرية. بشكلٍ قاطع، لا توجد تمثيلاتٌ ذهنيةٌ مباشرة لأشكال وسَطٍ بين الدائرة والمربع، استجابة لهذه البيئات التي يقع شكلها ما بين الدائرة والمربع، فإما أن تكون جميع التمثيلات مرتبطةً بالشكل الدائري أو الشكل المربع. هذا يجعل الذكريات المتعلقة بالبيئة الدائرية أو المربعة هي الجواذب. المدخل الأول الذي لا يكون بهذا الشكل أو ذاك بالضبط غير مستقر؛ إذ يدفع لا محالة نحو أقرب ذاكرةٍ مستقرة.

سلطت شبكة هوبفيلد الضوء على نظريات هيب، وأظهرت كيف يمكن للجواذب — التي تُدرس عادة في علم الفيزياء — تفسير ألغاز الذاكرة. ومع هذا، كان هوبفيلد يعلم حدود إدخال المفاهيم الرياضية وتطبيقها على أدمغة حقيقية في المختبرات. وقد وصف نموذجه بأنه «مجرد محاكاة ساخرة لتعقيدات علم الأحياء العَصَبي». في الواقع، بالنظر إلى أن من وضع النموذج عالمُ فيزياء، فإنه يفتقر إلى ثراء علم الأحياء. إلا أنه بالإضافة

إلى كون المحاكاة قادرةً على عملياتٍ حسابيةٍ قوية، فقد قدمت العديد من التصوُّرات، تصوُّرات لا تنتهي بالتخزين البسيط والاستدعاء.

تخيَّل أنك تتناول طعام العشاء في مطبخك، عندما وصل شريكك بالسكن إلى المنزل. عندما رأيته، تذكرت أنك أنهيت كتابًا كنت قد استعرتَه منه وتريد إعادته إليه، قبل أن يذهب في رحلة اليوم التالي. لذا، توقفت عن تناول الطعام، وخرجت من المطبخ، وتوجهت إلى الردهة. صعِدت السلم وانعطفت نحو غرفتك ودخلت وفكرت: «مهلًا مهلًا، ما الذي أفعله هُنا؟»

هذا الشعور شائع جدًّا. حتى إنه أصبح له اسم محدد، وهو نسيان الغاية، أو بعبارة أخرى نسيان السبب الذي يدفعنا إلى التوجه لوجهة محددة. ويرجع هذا النسيان إلى عجزٍ في ما يُعرف باسم «الذاكرة العاملة»، أي القدرة على الاحتفاظ بفكرةٍ في العقل، عن الاحتفاظ بفكرةٍ ولو لمدة ١٠ ثوانٍ فقط يستغرقها الانتقال من غرفةٍ لأخرى. وتُعد الذاكرة العاملة عنصرًا لا غنًى عنه في جميع جوانب الإدراك؛ إذ من الصعب اتخاذ قرارٍ أو العمل على خطةٍ إذا ظللت تنسى كل ما تفكر به.

وقد استمر علماء النفس في دراسة الذاكرة العاملة لعقود. ابتُكر هذا المصطلح لأول مرة في كتاب «الخطط وبِنية السلوك» لجورج إيه ميلر وزملائه العلماء العاملين في مركز الدراسات المتقدمة في العلوم السلوكية بولاية كاليفورنيا، المنشور عام ١٩٦٠. لكن هذا المفهوم قد استُكشف قبل ذلك بكثير. فقد كتب ميلر نفسه بالفعل إحدى أوراقه البحثية الأكثر تأثيرًا حول هذا الموضوع، قبل نشر الكتاب بأربع سنوات، أي عام ١٩٥٦. وكأنَّه كان يتنبَّأ بشهرة هذه الورقة البحثية؛ فقد اختار لها عُنوانًا غير نمطي وهو «رقم سبعة السحري، بجمعٍ أو طرح اثنين». ما يُشير إليه هذا العدد السحري هو عدد العناصر التي يمكن للبشر الاحتفاظ بها في ذاكرتهم العاملة في المرة الواحدة.

للتحقق من هذ الأمر عمليًّا يمكنك القيام بالآتي: (١) اعرض على أحد الرفاق العديد من المربعات الملونة على الشاشة، (٢) اطلب منه الانتظار لبعض الوقت من بضع ثوانٍ لدقائق، (٣) اعرض عليه مجموعة ثانية من المربعات الملونة. ومهمته هي توضيح ما إذا كانت ألوان المجموعة الثانية هي نفسها ألوان المجموعة الأولى أم لا. يمكن للأشخاص أداء هذه المهمة بشكلٍ جيد إذا ظل عدد المربعات المعروض صغيرًا، كما يمكنهم أداؤها بدقَّةٍ تبلغ ١٠٠ في المائة إذا عُرض مربع واحد فقط. وكلَّما أُضيفَ مزيد من المربعات

انخفض الأداء أكثر فأكثر، إلى أن يتجاوز العدد سبعة، وعندئذٍ يصبح الأمر أقرب إلى التخمين العشوائي. أُثير النقاش حول ما إذا كان العدد سبعة يمثِّل حقًّا قيمة مميزة حين يتعلق الأمر بسعة الذاكرة العاملة أم لا؛ إذ توصلت بعض الدراسات إلى حدود أقل من العدد سبعة، في حين توصلت أخرى إلى حدود أعلى. ومع ذلك، لا ريب في أن ورقة ميلر البحثية قد أحدثت تأثيرًا، وقد سعى علماء النفس لتمييز كل جانب من جوانب الذاكرة العاملة؛ بَدءًا من الأشياء التي يمكنها الاحتفاظ بها، ووصولًا إلى المدة الزمنية التي يمكنها الاحتفاظ فيها بالأشياء.

لكن يظل السؤال مطروحًا حول كيفية أداء الدماغ لهذا فعليًّا: أين تُخزَّن الذكريات بشكل مؤقت؟ وكيف تُخزَّن؟ التجارب الموثوقة التي تعتمد على إزالة جزء من الدماغ، أو إحداث خللٍ فيه ومعرفة تأثير ذلك على السلوك، أشارت إلى قشرة الفص الجَبهي، وهو جزء كبير من الدماغ يقع خلف الجبهة مباشرة. وسواءٌ أكان من تُجرى عليهم التجربة أشخاصًا يعانون من إصابات مؤسفة، أو حيوانات أزيلت منها هذه المنطقة في المختبر؛ اتَّضح أن حدوث تلفٍ في قشرة الفص الجبهي تقلِّل من قدرة الذاكرة العاملة بدرجةٍ كبيرة. فبدونها، تستطيع الحيوانات بالكاد الاحتفاظ بفكرة لأكثر من ثانية أو ثانيتَين … فالأفكار والتجارب تنفُذ من عقولهم كما يتسرَّب الماء عند صبِّه فوق يدَين مضمومتَين.

وكمن يحفر وينقب عن كنز، بدأ علماء الأعصاب يستكشفون المناطق المسئولة عن تخزين الذكريات. بإدخال قطب كهربي داخل قشرة الفص الجبهي للقرود، تمكَّن باحثون في جامعة كاليفورنيا بلوس أنجلوس من مراقبة الخلايا العصبية الموجودة هناك. هذا ما فعله العالمان جواكين فوستر وجاريت ألكسندر، بينما كانت القرود تؤدي مهمة مشابهة لاختبار تذكُّر الألوان. تُعرف هذه الاختبارات بمهام «الاستجابة المؤجلة (أي التي تظهر بعد فترة من اختفاء مثيرها)» وذلك لأنها تتضمَّن فترة تأخيرٍ تختفي فيها المعلومات المهمة من على الشاشة؛ ومن ثم يجب الاحتفاظ بها في الذاكرة. السؤال هو: ما الذي تفعله الخلايا العصبية في قشرة الفص الجبهي أثناء هذا التأخير؟

معظم مناطق الدماغ المسئولة عن الرؤية تستجيب استجابةً نمطية لهذا النوع من المهام: بمعنى أن الخلايا العصبية تستجيب بقوة، عندما تظهر الأنماط على الشاشة في البداية، وعند ظهورها مجددًا بعد المهلة الزمنية، لكن في أثناء فترة التأخير — أي عندما لا يكون هناك أي مدخلاتٍ بصرية تدخل إلى الدماغ — تكون هذه المناطق في الغالب هادئة. عدم وجود هذه الأنماط أمام العين يعني أنها لم تعُد موجودةً بالنسبة إلى الخلايا

العصبية في هذه المناطق. إلا أن ما توصَّل إليه فوستر وألكسندر هو أن الخلايا في قشرة الفص الجبهي مختلفة. فهذه الخلايا التي استجابَت للأنماط البصرية استمرَّت في إطلاق إشاراتٍ عصبية كهربية، حتى بعد أن اختفت الأنماط، أي إنها احتفظت بنشاطها أثناء فترة التأخير. وهذا يُعد دليلًا ماديًّا على الذاكرة العاملة!

ومنذ ذلك الحين، أسفرت تجاربُ لا حصر لها عن هذه النتائج نفسها، مشيرة إلى استمرار نشاط الخلايا العصبية أثناء فترات التأخير في ظل العديد من الظروف المختلفة، في كلٍّ من قشرة الفص الجبهي وما بعدها. أشارت التجارب إلى أنه عندما تتعطل أنماط الإطلاق هذه، تحيد الذاكرة العاملة عن مسارها. في بعض التجارب على سبيل المثال، قد يؤدي تحفيز كهربي قصير خلال فترة التأخير إلى تعطيل النشاط الجاري، وهو ما يؤدي إلى تراجعٍ في الأداء في مهام الاستجابة المؤجلة.

ما الذي يميز الخلايا العصبية ويجعلها قادرةً على ذلك؟ ما الذي يجعلها تحتفظ بالمعلومات، وتستمر في إطلاق الإشارات لمدَّةٍ تتراوح من بضع ثوانٍ إلى بضع دقائق، في الوقت الذي تُخفِق فيه الخلايا العصبية الأخرى في الاحتفاظ بالمعلومات؟ لكي تكون هناك مخرجاتٌ مستمرةٌ للخلايا العصبية فإنها تحتاج إلى مدخلاتٍ مستمرة. لكن إذا حدث نشاطٌ أثناء فترة التأخير دون أن يكون هناك أي مدخل خارجي من صورة، فلا بد أن تكون الخلايا العصبية المجاورة هي مصدر المدخلات المستمرة. ومن ثم فإن النشاط الذي يحدث أثناء فترة التأخير لا يتولَّد إلا عن شبكةٍ من الخلايا العصبية التي تعمل معًا؛ فالروابط بين هذه الخلايا تتحد معًا للإبقاء على النشاط. ومن هنا عادَت فكرة الجواذب إلى الظهور مجددًا.

حتى الآن ألقينا نظرة على الجواذب في شبكات هوبفيلد، والتي أوضحت كيف يمكن لبعض المدخلات التي لها بعض الدلالات استحضارُ ذكرى. قد لا يكون واضحًا دور هذا في الذاكرة العاملة. فالذاكرة العاملة في النهاية تركز على ما يحدث بعد تحديد الهدف المراد تذكُّرُه، أو «الشرارة» المرتبطة بحدوث تغيُّر في نشاط الخلايا العصبية؛ فمثلًا بعد أن تنهض لإحضار الكتاب لرفيقك في السكن، كيف تحتفظ بهذا الهدف؟ كما يتضح، ما نحتاج إليه في هذا الموقف هو الجاذب؛ لأن الجاذب يبقى ساكنًا في مكانه.

تُحدَّد الجواذب عن طريق المشتقات. إذا علمنا المدخلاتِ التي تحصل عليها الخلية العصبية والأوزان الترجيحية التي تُضرب فيها هذه المدخلات، يمكننا كتابة معادلة — مشتَقَّة — تصف كيف يتغيَّر نشاط هذه الخلية العصبية بمرور الزمن نتيجةً لهذه

المدخلات. إذا كانت قيمة المشتقَّة تساوي صفرًا، فإن هذا يعني عدم وجود تغيُّرٍ في نشاط الخلية العصبية بمرور الزمن؛ أي إنها تستمرُّ في إطلاق الإشارات العصبية بالمعدَّل الثابت نفسه. تذكَّر أنه، نظرًا لأن هذه الخلية العصبية جزءٌ من شبكةٍ متكررة، فإنها لا تحصل على مدخلات فحسب، بل تُعد مصدرًا للمدخلات بالنسبة إلى الخلايا العصبية الأخرى. ومن ثم، فإن نشاطها يدخل في حساب مشتقَّةِ الخلية العصبية المجاورة. إذا لم يتغيَّر أيٌّ من مدخلات هذه الخلية العصبية المجاورة — أي إن مشتقات هذه المدخلات جميعًا مساويةٌ لصفر أيضًا — فستكون مشتقة هذه الخلية أيضًا تساوي صفرًا، وستستمر في إطلاق الإشارات العصبية بالمعدَّل نفسه. عندما تكون الشبكة في حالة عنصر الجذب، فإن مشتقة كل خليةٍ عصبيةٍ تساوي صفرًا.

وبهذه الطريقة، يمكن أن تبقى الذكريات التي بدأت عند نقطةٍ زمنيةٍ محددةٍ لمدةٍ أطول، إذا كانت الروابط بين الخلايا العصبية مناسبة. تحتفظ جميع الخلايا بمعدلاتٍ ثابتةٍ لإطلاق الإشارات؛ لأن جميع الخلايا حولها تفعل الشيء نفسه. تستمر الذكرى إذا ظل النشاط العصبي ثابتًا دونما أي تغيُّر.

تكمن المشكلة في أن الأشياء تتغير. فعندما تغادر المطبخ وتتجه نحو غرفتك، ستجد في طريقك جميع أنواع الأشياء — حذاءك في الردهة، والحمام الذي تريد تنظيفه، ومشهد الأمطار في النافذة — التي يمكنها إحداث تغييراتٍ في مدخلات الخلايا العصبية التي تحاول الاحتفاظ بالذكرى. ويمكن لهذه التغييرات أن تدفع الخلايا العصبية بعيدًا عن حالة عنصر الجذب الذي يمثِّله الكتاب إلى مكانٍ آخر بالكامل. كي تؤدِّي الذاكرة العاملة وظيفتها لا بد أن تكون الشبكة قادرةً على مقاومة تأثير هذه المُشَتِّتات بجدارة. الجاذب العادي يمكنه مقاومة المدخلات المشتتة إلى حدٍّ ما. تذكَّر مثال الترامبولين. إذا وقف شخصٌ على الترامبولين، بدفع الكرة دفعةً صغيرةً ستتدحرج إلى خارج البؤرة التي ترتكز فيها، ثم تعود إليها مجددًا. بحدوث اضطراب بسيط تبقى الذكرى كما هي، لكن إذا ركل الشخص الكرة ركلة قوية، فمن يعلم إلى أين ستذهب؟ الذاكرة الجيدة لا بد أن تكون قوية بما يكفي لمجابهة هذه المشتِّتات، إذن ما الذي يمكن أن يجعل الشبكة بارعةً في الاحتفاظ بالذكريات؟

تؤدي البيانات والنظرية رقصة معقَّدة، لا يتضح فيها مَن الطرف الذي يقود الرقصة ومن الطرف التابع. أحيانًا تُطوَّر النماذج الرياضية فقط كي تتناسب مع مجموعة بيانات محددة. وفي أحيان أخرى تكون تفاصيل البيانات غير متوفرة، أو يجري تجاهلُها، ويفعل

المنظِّرون ما يوحي به الاسم الذي يُطلق عليهم؛ أي يضعون نظريات حول آلية عمل نظام محدد، قبل معرفة الكيفية التي يعمل بها هذا النظام بالفعل. فيما يتعلق ببناء شبكة قوية لذكريات تُخزن بشكل مؤقت، سار العلماء في تسعينيات القرن العشرين في الاتجاه الأخير. وقد توصلوا إلى ما يُعرف باسم «الشبكة الحلقية»، وهي عبارة عن نموذج مصمَّم يدويًّا لدائرةٍ عصبيةٍ من المتوقَّع أن تكون مثاليةً في الاحتفاظ بالذكريات المؤقتة بقوة.

على عكس شبكات هوبفيلد، توصف الشبكات الحلقية بدقةٍ، حسب اسمها، بأنها شبكات تتكون من العديد من الخلايا العصبية المرتَّبة في حَلْقة، بحيث تتصل كل خلية عصبية بالخلايا العصبية القريبة منها فقط. كما هي الحال في شبكات هوبفيلد، تتضمن هذه الشبكات حالات عناصر جذب، أي أنماط من النشاط يمكنها الاحتفاظ بنفسها وتمثيل ذكريات. إلا أن حالات الجذب في النموذج الحلقي تختلف عنها في شبكة هوبفيلد. فالجواذب في شبكة هوبفيلد منفصلة. هذا يعني أن كل حالة من حالات عناصر الجذب — كالحالة الخاصة بغرفة طفولتك، أو الحالة الخاصة بإجازة طفولتك، أو تلك الخاصة بغرفتك الحالية — منعزلةٌ تمامًا عن بقية الحالات. ليست هناك طريقة سلِسة للتنقل ما بين هذه الذكريات المختلفة، فبصرف النظر عن مدى تشابه هذه الذكريات، يتعيَّن عليك ترك حالة عنصر جذب بالكامل للانتقال إلى أخرى. في المقابل، تُعد عناصر الجذب في الشبكة الحلقية متصلة. مع اتصال عناصر الجذب هذه، يصبح التنقل بين الذكريات المتشابهة سهلًا. بدلًا من التفكير في النماذج التي لها عناصر جذب متصلة باعتبارها ترامبولين يقف عليها أشخاص عند نقاط مختلفة، يمكننا التفكير فيها باعتبارها مضمار بولينج، بمجرد أن توضع الكرة في المضمار، لا يمكنها الخروج منه بسهولة، بل يمكنها التحرُّك بسلاسةٍ داخله.

تُعدُّ الشبكات التي تكُون حالات عناصر الجذب فيها متصلة، كما هي الحال في الشبكة الحلقية، مفيدة لأسباب عديدة؛ أهمها نوعية الأخطاء التي ترتكبها هذه الشبكات. من السخيف أن يُمتدح نظام ذاكرة لأخطائه — أليس من الأفضل ألَّا تكون هناك أخطاء على الإطلاق؟ — إلا أننا إذا افترضنا أنه لا يمكن أن تمتلك أي شبكة ذاكرة مثالية، فستصبح جودة الأخطاء أمرًا مهمًّا. تسمح الشبكات الحلقية بأخطاء طفيفة ومعقولة.

تذكَّر المثال المتعلق باختبار الذاكرة العاملة الذي يتعين فيه على الخاضعين للاختبار الاحتفاظ بلون الأشكال الظاهرة على الشاشة. يمكن تطبيق مثال الألوان على الشبكات الحلقية بسهولة؛ لأنك ستتذكر من درس الرسم الألوان الموجودة على عجلة الألوان. لذا

تخيَّل شبكةً من الخلايا العصبية مرتبةً في حلقة؛ بحيث تمثل كل خليةٍ عصبية لونًا مختلفًا قليلًا. في أحد جوانب الحلقة توجد الخلايا العصبية الممثلة للون الأحمر، وبجوارها توجد الخلايا العصبية الممثلة للون البرتقالي، يليها الأصفر والأخضر، هذا يوصلنا إلى الجانب المقابل للخلايا الممثلة للون الأحمر؛ حيث توجد الخلايا الممثلة للون الأزرق، تليه الخلايا الممثلة للون القِرمزي، ثم نعود مرة أخرى للخلايا الممثلة للأحمر.

في هذه المهمة، عند رؤية شكل ما، فإن هذا يكوِّن نشاطًا في الخلايا العصبية التي تمثِّل هذا اللون، في حين تظل الخلايا العصبية الأخرى ساكنة. يؤدي هذا إلى تكوين «بؤرة» من النشاط في الحلقة، ترتكز عند اللون المتذكَّر. إذا ظهرت أي مدخلات مشتِّتة أثناء محاولة الشخص الذي يخضع للاختبار الاحتفاظَ بذكرى هذا اللون — من مشاهد عشوائية أخرى في الغرفة على سبيل المثال — فقد تدفع النشاطَ أو تجذبه بعيدًا عن اللون المراد تذكره. إلا أنها ستتمكن فقط من دفعه إلى مكان قريب جدًّا على الحلقة، وهذه نقطة في غاية الأهمية. ومن ثم فإن اللون الأحمر قد يصبح برتقاليًّا مائلًا للحمرة، وقد يصبح الأخضر أزرق مائلًا للخضرة. لكن من المستبعد جدًّا أن تتحول ذكرى اللون الأحمر إلى اللون الأخضر. كما أنه من المستبعد في هذه الحالة أن تصبح الذكرى بلا لون على الإطلاق، بمعنى أنه ستكون هناك دائمًا بؤرة في الحلقة. تُعد هذه الخصائص جميعًا نتيجةً مباشرةً لطبيعة شبكة الجواذب المتصلة الشبيهة بالمضمار؛ فهي تتمتع بمقاومةٍ منخفضةٍ للانتقال ما بين الحالات القريبة، ولكن لديها مقاومة عالية للاضطرابات الأخرى.

من الميزات الأخرى للشبكة الحلقية أنه يمكن استخدامها لفعل أشياء أخرى. الآلية التي تعمل بها الذاكرة العاملة تتعارض مع الفكرة القائلة بأن دور الذاكرة ينحصر في الاحتفاظ السلبي بالمعلومات. فالاحتفاظ بالأفكار في الذاكرة العاملة يُتيح لنا دَمْج هذه الأفكار مع معلوماتٍ أخرى، والتوصُّل إلى استنتاجاتٍ جديدة. وخير مثالٍ على هذا نظامُ توجيه الرأس لدى الفئران، الذي كان بمثابة مصدر إلهامٍ لنماذج الشبكات الحلقية الأولى.

لدى الفئران (بالإضافة إلى العديد من الحيوانات الأخرى) بوصلةٌ داخلية؛ أي مجموعة من الخلايا العصبية التي تتعقب الاتجاه الذي يتوجه إليه الحيوان طوال الوقت. إذا توجَّه الحيوان إلى اتجاه جديد، يتغير نشاط هذه الخلايا لعكس هذا التغيُّر. حتى إذا ظل الفأر ثابتًا في غرفة ساكنة ومظلمة، فستستمر هذه الخلايا العصبية في إطلاق إشارات عصبية، محتفظة بالمعلومات حول اتجاهه. في عام ١٩٩٥ افترض فريقٌ من مختبر مكنوتون في جامعة أريزونا، وبشكلٍ مستقل، كيتشين يانج من جامعة كاليفورنيا، سان دييجو، أنه

يمكن وصف هذه المجموعة من الخلايا جيدًا عن طريق شبكةٍ حلقية. وبالنظر إلى كون الاتجاه من المفاهيم التي يمكن شرحها جيدًا باستخدام الشبكة الحلقية، يمكن الاستعانة ببؤرة النشاط على الحلقة لتخزين الاتجاه الذي سيسلكه الحيوان.

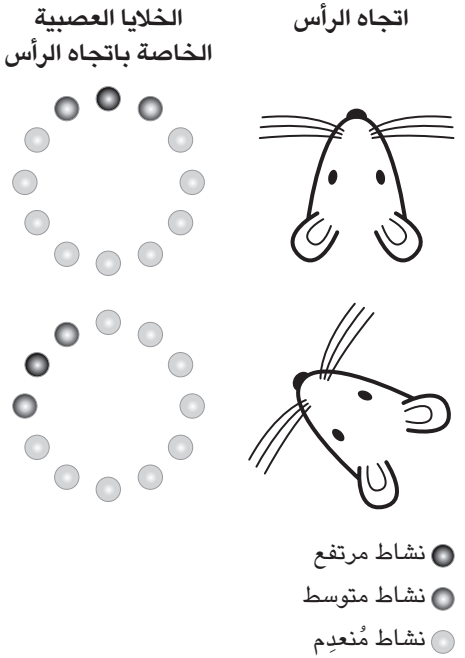
لكن الشبكة الحلقية لا تفسِّر الكيفية التي يُحتفَظ من خلالها بمعرفة اتجاه الرأس بمرور الزمن فحسب؛ بل تُعد أيضًا نموذجًا يوضح كيف يمكن أن يتغير الاتجاه المُخزَّن عندما يغير الحيوان اتجاهه. تستقبل خلايا اتجاه الرأس مدخلات من الخلايا العصبية الأخرى، مثل الخلايا العصبية التي تنتمي إلى الجهازَين البصري والدهليزي (الذي يتتبع الحركة الجسدية). إذا وُصِّلت هذه المدخلات بالشبكة الحلقية بطريقة صحيحة، فستتمكن من دفع بؤرة النشاط قُدمًا إلى مكان جديد على الحلقة. إذا وضَّح الجهاز الدهليزي أن الجسم الآن يتحرك باتجاه اليسار على سبيل المثال، فستُدفع البؤرة نحو اليسار. بهذه الطريقة لا ينتج عن الحركة على طول الحلقة أخطاء في الذاكرة، بل تعمل على تحديث الذاكرة بِناءً على المعلومات الجديدة. ومن هنا استحقَّت «الذاكرة العاملة» اسمها.

تُعد الشبكات الحلقية حلًّا رائعًا للمشكلة المعقدة المتمثلة في كيفية تكوين أنظمة ذاكرة عاملة قوية وعملية. كما أنها تُعد عناصر رياضية جميلة. فهي تعكس خاصيتَي البساطة والتماثل المطلوبتَين في الرياضيات. كما أنها مضبوطةٌ ومنظمة بدقة ومُنمَّقة.

ومن ثم، فإنها غير واقعية على الإطلاق. وذلك لأن عبارات مثل «منظم بدقة»، بالنسبة إلى عالم الأحياء، غير مستحبة. أيُّ شيء يتطلب تخطيطًا دقيقًا وظروفًا ممتازةً للعمل بشكلٍ جيد؛ لن يصمد أمام الفوضى التي يتميَّز بها تطور الدماغ والنشاط. ظهور العديد من خصائص الشبكات الحلقية المرغوب فيها يتوقف على افتراضاتٍ حول الاتصال بين الخلايا العصبية، وهي افتراضات لا تبدو واقعيةً كثيرًا. لذا على الرغم من الخصائص النظرية المستحبَّة والقدرات المفيدة، فإن فرصة رؤية شبكةٍ حلقيةٍ في الدماغ بدَت ضئيلة.

ومن ثم، كان الاكتشاف الذي أمكن التوصُّل إليه في مركز أبحاث خارج العاصمة واشنطن عام ٢٠١٥؛ الأكثر إثارة.

حَرَمُ جانيليا للأبحاث عبارة عن منشأةٍ بحثيةٍ عالمية المستوى تقع في منطقةٍ بعيدةٍ عن الأنظار في أرضٍ زراعيةٍ رعويةٍ سابقةٍ في أشبورن في ولاية فيرجينيا. عمل فيفيك جايارامان في جانيليا منذ عام ٢٠٠٦. أجرى هو وفريقه المكون من نحو نصف دستة من الأشخاص أبحاثًا على فهم التنقُّل لدى ذبابة الفاكهة الشائعة، أو دروسوفيلا ميلانوجاستر، وهو نوعٌ من ذباب الفاكهة تشيع دراسته في علم الأعصاب. حجم هذه الحشرة الذي




شكل ٤-٥

يضاهي حبة أرز يُعد نعمة ولعنة في آنٍ واحد. ففي حين أنه يصعب الحصول على الذباب الضئيل، فإنه لا يحتوي إلا على ١٣٥ ألف خلية عصبية، وهو ما يقارب ٠,٢ في المائة من عدد الخلايا العصبية التي يحتوي عليها الحيوان الذي يشيع استخدامه في المختبرات؛ الفأر. علاوة على ذلك، يُعرف الكثير حول هذه الخلايا العصبية. يمكن تصنيف الكثير من هذه الخلايا بسهولة بناءً على الجينات التي تُعبِّر عنها، كما أن أعدادها ومواقعها متماثلة جدًّا بالانتقال ما بين أفراد الذباب.

كما هي الحال في القوارض، للذباب نظام لتتبُّع اتجاه الرأس. بالنسبة إلى الذبابة، هذه الخلايا العصبية المرتبطة باتجاه الرأس تقع في منطقة يُطلَق عليها الجسم البيضاوي الشكل. يقع الجسم البيضاوي في مركز دماغ الذبابة وله شكل متفرد؛ إذ إن به ثقبًا في المنتصف، والخلايا العصبية مرتَّبة حول هذا الثقب؛ ومن ثم يكون أشبه بكعكةٍ مصنوعةٍ من الخلايا العصبية، أو بعبارةٍ أخرى: حلقة.

ومع هذا، فإن الخلايا العصبية المرتَّبة في شكلٍ حلقيٍّ لا تكوِّن حلقةً بالضرورة. لذا، ما شرع مختبر جايارمان في فعله هو دراسة ما إذا كانت مجموعة الخلايا العصبية التي تبدو كشبكة حلقية تتصرف بالفعل كشبكة حلقية أم لا. للقيام بذلك، أضافوا نوعًا خاصًّا من الصبغة إلى الخلايا العصبية في منطقة الجسم البيضاوي، هذه الصبغة تُحوِّل لون الخلايا العصبية إلى اللون الأخضر في حالة نشاطها. ثم سمحوا للذبابة بالتجوُّل في أثناء تصوير الخلايا العصبية. إذا كنتَ نظرت إلى هذه الخلايا العصبية على الشاشة بينما تتجه الذبابة نحو الأمام، كنت سترى وميضًا من اللون الأخضر الخافت في موقع واحد على الشاشة التي تكون بخلاف ذلك سوداء. إذا اختارت الذبابة أن تغير اتجاهها، فإن هذه البقعة المضيئة ستتأرجح إلى مكان جديد. بمرور الوقت، بينما تتحرك الذبابة وتتحرك معها البقعة الخضراء على الشاشة، تكوِّن النقاط التي أضاءت شكلًا حلقيًّا واضحًا يطابق الشكل الأساسي للجسم البيضاوي. في حالة إطفاء الأنوار في الحجرة بحيث لا تتمكن الذبابة من رؤية الاتجاه الذي تتوجه إليه، يظل الوميضُ الأخضر في المكان نفسه على هذه الحلقة، دليلًا على أنه احتُفظ بذكرى اتجاه التوجه.

بالإضافة إلى ملاحظة النشاط على الحلقة، غيَّر المجرِّبون التجربةَ أيضًا لفحص أوجه التطرف في سلوكها. الشبكة الحلقية الحقَّة لا تدعم سوى «بؤرة» نشاط واحدة، بمعنى لا يمكن تنشيط سوى الخلايا العصبية الموجودة في مكان واحد على الحلقة في المرة الواحدة. لذا، حفَّز العلماء الخلايا العصبية الموجودة على الجانب المقابل للخلايا العصبية النشطة بالفعل في الحلقة بشكل اصطناعي. أدى التحفيز القوي للخلايا المقابلة إلى تعطيل بؤرة النشاط الأصلية، ثم احتُفظ بالبؤرة في المكان الجديد حتى بعد توقف التحفيز. من خلال هذه التجارب، أصبح واضحًا أن الجسم البيضاوي ليس مخادعًا؛ بل مثالًا حيويًّا على نظريةٍ تخرج للحياة.

هذا الاستنتاج — أن الخلايا العصبية التي تأخذ الشكل الحلقي تتصرف كشبكة حلقية — يبدو وكأن الطبيعة توجه لنا رسالة خفية. شكَّك ويليام سكاجز ومؤلفون آخرون لإحدى الأوراق البحثية الأصلية التي تتناول الشبكة الحلقية صراحةً؛ في إمكانية هذا الاستنتاج. «لأغراضٍ توضيحية، من المفيد التفكير في الشبكة باعتبارها مجموعةً من الطبقات الدائرية، إلا أن هذا لا يعكس التنظيم التشريحي للخلايا المقابلة في الدماغ.» افترض معظم المنظِّرين الذين يعملون على نماذج الشبكات الحلقية أن هذه الشبكات تُدمَج في شبكةٍ أكثر فوضويةً من الخلايا العصبية. ولا بد أن هذا ينطبق على معظم

الأجهزة في أجسام معظم الأنواع. من المحتمل أن يكون هذا المثال الأصلي غير المعتاد قد نبع من برنامج وراثي محكوم بدقة. سيكون من الأصعب بكثير اكتشاف الشبكات الأخرى.

حتى وإن كنا لا نرى عادةً هذه السلوكيات مباشرة، يمكننا التنبؤ بالسلوكيات التي نتوقع رؤيتها إذا كان الدماغ يستخدم عناصر جذب متصلة. عام ١٩٩١ وجدت باتريشيا جولدمان راكيتش، الباحثة الرائدة في الذاكرة العاملة، أن إعاقة وظيفة أحد المعدِّلات العصبية، وهو الدوبامين، يجعل من الصعب على القرود تذكُّر موقع الأشياء. من المعروف عن الدوبامين أنه يُغيِّر تدفق الأيونات من الخلية وإليها. في عام ٢٠٠٠ أوضح باحثون من معهد سولك في ولاية كاليفورنيا أن محاكاة وجود الدوبامين، في نموذجٍ يحتوي على جواذب متصلة عزَّز من ذاكرة النموذج.[٩] فقد عمل على استقرار الخلايا العصبية التي تحمل شفرة الذكرى، وهو ما يجعل هذه الذكرى أكثر قدرة على مقاومة المدخلات العرضية. ونظرًا لأن الدوبامين مرتبط بالمكافأة،[١٠] يتنبأ هذا النموذج أيضًا بأنه في ظل الظروف التي يتوقع فيها الشخص مكافأة كبيرة تكون الذاكرة العاملة أفضل، وهذا تمامًا ما تم التوصل إليه. عندما يُوعَد الأشخاص بمزيد من المكافآت مقابل تذكُّر شيء ما، تكون ذاكرتهم العاملة أفضل. هنا، يعمل مفهوم عنصر الجذب باعتباره الخيط الذي يخيط التغيرات الكيميائية بالتغيرات المعرفية. فهو يربط الأيونات بالتجارب.

تُعد عناصر الجذب كليةَ الوجود في العالم الفيزيائي. وهي تنشأ عن التفاعلات الداخلية بين أجزاء نظام ما. سواء أكانت تلك الأجزاء عبارة عن ذرات في معدن، أو كواكب في نظام شمسي، أو حتى أشخاصًا في مجتمع ما، فسوف تنقاد إلى حالة جاذبة، وستبقى هناك، ما لم تحدث اضطرابات كبيرة. يمثل تطبيق هذه المفاهيم على الخلايا العصبية التي تكوِّن ذكرى معينة؛ همزة الوصل بين علم الأحياء وعلم النفس. من ناحية، تصل شبكات هوبفيلد تكوين الذكريات واسترجاعها بالطريقة التي تتغير بها الوصلات بين الخلايا العصبية. ومن ناحيةٍ أخرى، تكمُن بنًى مثل الشبكات الحلقية وراء كيفية الاحتفاظ بالأفكار في العقل. في إطارٍ واحدٍ بسيطٍ وضعنا أيدينا على كيفية تسجيل الذكريات والاحتفاظ بها وإعادة تنشيطها.

---

[٩] كان هذا النموذج مؤلفًا من أسلوب هودجكين وهكسلي المحاكي للخلايا العصبية المذكور في الفصل الثاني، والذي جعل دمج تأثيرات الدوبامين على تدفق الأيونات سهلًا.

[١٠] مزيدٌ من التفاصيل في الفصل الحادي عشر!

الفصل الخامس

# الاستثارة والتثبيط

## الشبكة المتوازنة والتذبذبات

داخل كل خلية عصبية تقريبًا، تحتدم المعركة. هذا العِراك — أي الصراع حول المخرجات النهائية للخلية العصبية — يحرض إحدى القُوَّتَين الأساسيتَين في الدماغ ضد الأخرى. هذه معركة التحفيز مقابل التثبيط. المدخلات المحفِّزة تشجِّع الخلية العصبية على إطلاق إشارات. في المقابل، تفعل المدخلات المثبِّطة عكس ذلك؛ فهي تدفع الخلية العصبية بعيدًا عن حد عتبة تحفيز جهد الفعل.

التوازن بين هاتَين القوتَين هو ما يحدد نشاط الدماغ. فهو يحدد أيُّ الخلايا العصبية يُطلق إشاراتٍ ومتى. وهو يحدد شكل إيقاعاتهما، وهي الإيقاعات التي تدخل في كل شيء بدءًا من النوم ووصولًا إلى الذاكرة. ولعل الأمر الأكثر إثارة للدهشة هو أن التوازن بين الاستثارة والتثبيط يمكنه، أيضًا، تفسير إحدى سمات الدماغ التي شغلت العلماء لعقود؛ وهي عدم انتظام الخلايا العصبية المعروفة أو ثبات أدائها.

جرِّب أن تراقب خلية عصبية من المفترض أنها تفعل الشيء نفسه مرارًا وتكرارًا — على سبيل المثال، خلية عصبية في الجهاز الحركي يؤدي الحركة نفسها على نحو متكرر — وستجد أن نشاطه غير منتظم على نحو مدهش. فبدلًا من أن تُطلِق نمطًا متماثلًا للقفزات في جهد الفعل كل مرة، فإنها ستُطلق إشاراتٍ أكثر في بعض المحاولات وإشاراتٍ أقل في محاولاتٍ أخرى.

عرَف العلماء هذه العادة الغريبة للخلايا العصبية مبكرًا في أيام التسجيلات العصبية. في عام ١٩٣٢ أجرى اختصاصيُّ علم وظائف الأعضاء جوزيف إرلانجر تحديثًا على المُعدات

الموجودة في مختبر سانت لويس، وهو ما أتاح له تسجيل النشاط العصبي بدرجةٍ حساسةٍ تفوق الدرجة المتاحة سابقًا بـ ٢٠ مرة. تمكَّن بالتعاون مع زميله إي إيه بلير من عزل الخلايا العصبية الفردية الموجودة في ساق الضفدع، وتسجيل كيفية استجابتها لنبضات كهربية دقيقة، على وجه الدقة ٥٨ نبضةً متطابقةً في الدقيقة.

ما أثار دهشة العالِمَين إرلانجر وبلير هو أنهما وجدا أن هذه النبضات المتطابقة لا ينتج عنها استجابات متطابقة؛ فقد تستجيب الخلية العصبية لنبضة في حين لا تظهر استجابة للنبضة التالية. لا تزال ثمة علاقة بين قوة النبضة والاستجابة: عند استخدام تيارات ضعيفة، على سبيل المثال، فإن الخلية العصبية تستجيب لنقل ١٠ في المائة من المرات، وفي حالة التيارات المتوسطة، تستجيب الخلية العصبية نصف عدد المرات، وما إلى ذلك. لكن بتجاوز هذه الاحتمالات، بدَت كيفية استجابة الخلية العصبية لأي نبضةٍ محددةٍ محضَ صدفة خالصة. وقد أوضح الباحثان في ورقةٍ بحثيةٍ عام ١٩٣٣ في «ذي أميريكان أوف فيسيولوجي» ما يلي: «لقد صدمنا الشكل المتغير [للاستجابات] التي حصلنا عليها من الأعصاب الضخمة في ظل ظروفٍ ثابتةٍ تمامًا».

كان هذا العمل واحدًا من أوائل الدراسات التي بحثت بشكل منهجي المسألةَ المتعلقة بعدم انتظام الجهاز العصبي، لكنه لم يكن الأخير. ففي عام ١٩٦٤، مثلًا، مرر عالمان أمريكيان فُرشاةً بالطريقة نفسها على بشرة أحد القرود مرارًا وتكرارًا. وقد أفادا بأن نشاط الخلايا العصبية المستجيبة لهذه الحركة ظهر في صورة «سلسلة من النبضات المتكررة بشكل غير منتظم؛ ومن ثم لم تُسفِر المعاينات البصرية عن أي نمطٍ منتظم».

في عام ١٩٨٣، أشار مجموعة من الباحثين من كامبريدج ونيويورك إلى ما يلي: «من المعروف أن قابلية تغيُّر استجابات الخلايا العصبية القشرية كبيرة.» وقد أوضحَت دراستهم للجهاز البصري لدى القطط والقرود مرة أخرى، أن الاستجابة العصبية لتكرار الصورة نفسها تؤدِّي إلى نتائج مختلفة. كانت الاستجابات لا تزال مرتبطةً بعض الشيء بالمثير؛ فقد ظلَّت الخلايا العصبية تُغيِّر مقدار إطلاقها للإشارات في المتوسط بتغيُّر الصور. لكن أي خلية عصبية على وجه التحديد ستطلق إشارات، ومتى ستطلق لأي حالة معينة، بدا أمرًا غير متوقعٍ تمامًا كحالة الطقس الأسبوع التالي. وقد استنتج الباحثون في النهاية أن «عَرْض مثيرات متطابقة مرات متتالية لا يسفر بالضرورة عن استجابات متطابقة».

في عام ١٩٩٨، ذهب اثنان من علماء الأعصاب البارزين إلى ما هو أبعد من ذلك: بربط آلية عمل الدماغ بعشوائية الاضمحلال الإشعاعي، وكتبا أن «ثمة قواسم مشتركة بين

الخلايا العصبية وطقطقة عداد جايجر، أكثر من القواسم المشتركة بينها وبين طقطقة الساعة».

وقد أسفرت عقود من الجهود البحثية وآلاف من الأوراق عن رسالةٍ مُنَمَّقةٍ حول مدى فوضوية الجهاز العصبي. يتضح أن الإشارات القادمة إلى الدماغ تؤثر على الخلايا العصبية التي تتذبذب بالفعل ما بين حالتَي النشاط وانعدام النشاط حسب أهوائها. يمكن لمدخلات هذه الخلايا العصبية التأثير في نشاط هذه الخلايا، لكنها لا تتحكم فيه بالضبط؛ فالأمر لن يخلو من عنصر المفاجأة. يُشار إلى هذه الثرثرة التي تكون على الأرجح عديمة الفائدة، وتصرف الانتباه عن الرسالة التي تحاول الخلية العصبية إرسالها باسم «التشويش».

وكما قال أينشتاين فيما يتعلق بعلم ميكانيكا الكم الحديث: «الرب لا يلعب النرد.» فلماذا يفعل الدماغ هذا إذن؟ هل هناك أي سبب وجيه يجعل التطور يُسفِر عن خلايا عصبية بها تشويش؟ ادَّعى بعض الفلاسفة أن التشويش في الدماغ يمكن أن يكون مصدرًا للإرادة الحرة؛ أي طريقة للتغلب على رؤية العقل باعتباره يخضع للقوانين الحتمية نفسها التي تخضع لها أي آلة. لكن البعض اعترض على هذا. في هذا الصدد، كتب الفيلسوف البريطاني جالين ستراوسون: «يبدو أن بعض التغيرات في طريقة المرء ... تُعزى إلى تأثير عوامل غير محددة أو عشوائية. لكن من السخف الاعتقاد بأن العوامل غير المحددة أو العشوائية، التي لا يكون المرء مسئولًا عنها [بطبيعة الحال] بأي شكل من الأشكال، لها علاقة بمسئوليته الأخلاقية الفعلية.» بعبارة أخرى، اتخاذ القرارات بناءً على رمي العملة ليس أمرًا «حُرًّا» تمامًا.

افترض العلماء أغراضًا أخرى لهذه الحالة من انعدام قابلية التنبؤ. على سبيل المثال، يمكن للعشوائية المساعدة في تعلُّم أمور جديدة. إذا سلك شخص ما نفس الطريق المؤدي للعمل كل يوم، فإن أي انعطاف عشوائي نحو اليسار مثلًا من الممكن أن يُفضي به إلى حديقة غير معروفة، أو مقهًى جديد أو حتى طريق أسرع. وبالمثل، فإن بعض الاستكشاف قد يفيد الخلايا العصبية، والتشويش يتيح لها ذلك.

بالإضافة إلى السؤال عن سبب كون الخلايا العصبية تتسم بالتشويش، انشغل علماء الأعصاب بالسؤال عن كيف ينتهي بها الحال بهذه الطريقة. المصادر المحتملة للتشويش توجد خارج الدماغ. على سبيل المثال، تحتاج المستقبلات الضوئية أن تتعرض لعدد محدد من الفوتونات قبل أن تستجيب. لكن وجود مصدر ثابت من الضوء لا يضمن أن يصِل

للعين تيارٌ ثابت من الفوتونات. بهذه الطريقة، قد لا تكون مدخلات الجهاز العصبي نفسها ثابتة.

علاوة على ذلك، فإن العديد من عناصر وظيفة الخلية العصبية تعتمد على عمليات عشوائية. على سبيل المثال، ستتغير الحالة الكهربية للخلية العصبية إذا تغير انتشار الأيونات في السائل المحيط بها. والخلايا العصبية، شأنها في ذلك شأن العديد من الخلايا الأخرى، مكوَّنةٌ من آليات جزيئية لا تؤدي وظيفتها بالضرورة وفقًا لخطة: قد لا تُنتَج البروتينات الضرورية بالسرعة الكافية، وقد تتعطل الأجزاء المتحركة، وما إلى ذلك. في حين أن هذه الإخفاقات المادية قد تساهم في صَخب العقل، فإنها لا تبدو مسئولة بالكامل عنه. في الحقيقة، عندما أُخِذت خلايا عصبية من القشرة الدماغية ووُضِعت في طبق بتري، تصرَّفَتْ على نحوٍ أكثر موثوقية على نحو ملحوظ؛ فتحفيز هذه الخلايا العصبية بالطريقة نفسها مرتَين سيؤدي إلى النتائج نفسها. ومن ثم، فإن بعض الهفوات في المكونات الخلوية، والتي يمكن أن تحدث في الطبق وفي الدماغ أيضًا، تبدو غير كافية لتفسير الضوضاء الملحوظة بشكلٍ معتاد.

ومن ثم فإن الموازين مُختلَّة؛ فالضوضاء الواردة لا تكافئ الضوضاء الناتجة. قد نشكُّ في أن هذا مجرد خطأ دخيلٍ في الحساب، فربما هناك القليل من التُّروس غير الموثوق بها في التراكيب العصبية، أو ربما تكون المدخلات من العالم أقلَّ استقرارًا مما نعتقد. ربما تصنع مثل هذه التقديرات الخاطئة الفارق لو لم تكُن هناك حقيقةٌ واحدة صغيرة، وهي أن طبيعة آلية عمل الخلايا العصبية تجعلها مُخفضاتٍ للصخب.

لفَهْم هذا، تخيل أنك وبعض أصدقائك تلعبون لعبةً يكون الهدف فيها هو معرفة إلى أي مدًى يمكنكم، بشكلٍ جماعي، ركل كرة قدم في ملعبٍ طويلٍ قبل أن ينتهي الوقت المحدد في المؤقِّت. لا يوجد بينكم أحدٌ مُدرَّب جيدًا ومن حين لآخر ترتكبون الأخطاء — أحدهم يخطئ في تمريرة، وآخر يشعر بالتعب وآخر يتعثَّر. في بعض الأحيان قد تُخطئ في تقدير المسافات، فتركض بسرعةٍ أكبر أو تمرِّر الكرة أبعد. إذا كان الوقت المخصص صغيرًا، لنَقُل ٣٠ ثانية، فسيكون لهذه الهفوات اللحظية أو نقاط القوة في الأداء تأثيرٌ كبير على المسافة التي تقطعونها. فربما تقطعون ١٥٠ مترًا في محاولة و٢٠ في الأخرى. أما إذا كان الوقت كبيرًا، لنَقُل خمس دقائق، فإن هذه التقلبات في الأداء قد يوازن بعضُها بعضًا: يمكن تعويض البداية البطيئة من خلال العَدْو السريع في النهاية، أو يمكن أن يضيع التقدم المحرز من تمريرةٍ طويلةٍ بسبب سقوط أحدهم. نتيجةً لذلك، كلما زاد

الزمن المخصص أصبحَت المسافات المقطوعة في كل محاولةٍ أكثر تشابُهًا. بعبارةٍ أخرى، يتوازن «التشويش» الخاص بمهاراتك الرياضية بمرور الوقت.

تجد الخلايا العصبية نفسها في موقف مماثل. إذا حصلت الخلية العصبية على مدخلات كافية خلال فترة زمنية محددة، فستطلق جهدَ فِعل. المدخلات التي تحصل عليها تتسم بالتشويش؛ لأنها تأتي من إطلاق الإشارات العصبية من الخلايا العصبية الأخرى. لذا، قد تتلقَّى الخلية العصبية، لِنَقُل خمسة مدخلات في لحظة معينة و١٣ مدخلًا في أخرى، وقد لا تتلقى أي مدخلات بعد ذلك. وكما هي الحال في مثال لعبة الكرة، إذا استغرقَت فترة طويلة في تلقِّي هذه المدخلات التي تتسم بالتشويش، قبل أن تقرر ما إذا كان لديها مدخلاتٌ كافية لتطلق جهدَ فِعل أم لا، فسينخفض تأثير التشويش. أما إذا سارعت في استخدام قِيَم منفردةٍ للمدخلات التي تحصل عليها في الحال، فسيشيع التشويش.

إذن كم من الوقت تحتاج الخلية العصبية لدَمج وتجميع مدخلاتها؟ نحو ٢٠ ملِّي ثانية. قد لا تبدو هذه فترة طويلة، لكنها بالنسبة إلى الخلية العصبية فترة كافية. فإطلاق جهد الفعل يستغرق حوالَي ملِّي ثانية واحدة، ومن الممكن أن تستقبل الخلية العديد من المدخلات المختلفة في المرة الواحدة. ومن ثم، لا بد أن تكون الخلايا العصبية قادرةً على حساب متوسط العديد من القيم المنفردة للمدخلات، خلال فترة زمنية محددة، قبل أن تقرِّر إطلاق جهد الفعل.

استخدم عالما الأعصاب ويليام سوفتكي وكريستوف كوخ نموذجًا رياضيًّا بسيطًا للخلية العصبية، وهو: نموذج «التسريب – التجميع – الإطلاق»، المقدم في الفصل الثاني، لاختبار ذلك فقط. في دراسة لهما، نُشرت عام ١٩٩٣، أجريا محاكاةً لخلية عصبية تتلقَّى مدخلات في أوقاتٍ غير منتظمة. إلا أن هذه الخلية العصبية نفسها ظلَّت تُنتج إشاراتِ خَرْجٍ أكثر انتظامًا من المدخلات التي حصلت عليها؛ لأنها جمَّعت الإشارات بمرور الوقت. هذا يعني أن الخلايا العصبية تتمتَّع بالقدرة على تدمير التشويش، من خلال تلقِّي مدخلاتٍ تتسم بالتشويش، وتكوين مخرجات أقل تشويشًا.

إذا لم تكُن الخلايا العصبية قادرة على التغلب على التشويش، لَما كان عدم انتظام أداء الخلايا العصبية في الدماغ على هذا القدر من الغموض. كما ذكرنا من قبل، يمكننا افتراض أن مقاديرَ صغيرة من العشوائية تدخل إلى الدماغ — إما من العالم الخارجي أو من داخل الخلية — وتنتشر في النظام عبر الروابط بين الخلايا العصبية. إذا نتج

عن المدخلات المشوَّشة مخرجاتٌ بدرجة التشويش نفسها، أو ربما بدرجةٍ أكثر تشويشًا، فستكون هذه قصة مُتَّسقة ذاتيًّا إلى حد كبير: خلايا عصبية بها تشويش تُفضي إلى خلايا عصبية بها تشويش. لكن، وفقًا لنموذج سوفتكي وكوخ، ليس هذا ما يحدث. عند مرور التشويش عبر الخلية العصبية فلا بد أنه يصبح أضعف. وعند مروره بشكلٍ مُتتالٍ خلال شبكة كاملة من الخلايا العصبية، فلا بد أن نتوقع أن يختفي تمامًا. ومع ذلك، كلما نظر علماء الأعصاب في أي مكان، وجدوه.

عند عرض المثير نفسه ٣ مرات على الخلية، تطلق الخلية العصبية إشارات خلال أوقات مختلفة جدًّا. إذا حصلت خليةٌ عصبية أخرى على مدخلات من هذه الخلية، لكنها تلقَّت هذه الإشارات خلال فترة قصيرة، فستتلقى عددًا مختلفًا من المدخلات في كل عرض. أما إذا تلقَّت المدخلات خلال فترة زمنية أطول فسيكون العدد أكثر تماثُلًا كل مرة.

شكل ٥-١

إذن، ليس الدماغ غير قابل للتوقع فحسب؛ بل يبدو وكأنه يشجع على هذه الحالة من عدم القدرة على التوقع، على نحوٍ يخالف النزعة الطبيعية للخلايا العصبية لسحق هذه الحالة. ما الذي يحافظ على بقاء العشوائية؟ هل يحتوي الدماغ على مُولِّد أعداد عشوائية؟ هل يتضمن نوعًا من النَّرد البيولوجي المَخفِيِّ؟ أم، كما افترض العلماء في تسعينيات القرن العشرين، هل تُنتج هذه الفوضى بالفعل عن نظام أكثر جوهرية، أي من التوازن بين التحفيز والتثبيط.

قام إرنِست فلوري بالعديد من الرحلات إلى أحد جزاري الأحصنة في لوس أنجلوس؛ للكشف عن مصدر التثبيط في الدماغ.

كان ذلك في منتصف خمسينيات القرن العشرين، عندما كان فلوري، عالم الأعصاب الألماني النشأة الذي هاجر إلى أمريكا الشمالية، يبحث في سؤال مع زوجته إليزابيث. في ذلك الوقت، كانت حقيقةُ أن الخلايا العصبية تتواصل من خلال إرسال مواد كيميائية — تُسَمى النواقل العصبية — فيما بينها قد رُسِّخت بشكلٍ كبير. إلا أن النواقل العصبية المعروفة آنذاك كانت مُحفِّزة — بمعنى أنها كانت مواد كيميائية تجعل الخلايا العصبية أكثر عرضةً لإطلاق إشارات. ومع هذا كان من المعروف، منذ منتصف القرن التاسع عشر، أن بعض الخلايا العصبية يمكنها بالفعل تقليل النشاط الكهربي للخلايا العصبية المستهدفة. على سبيل المثال، في عام ١٨٤٥ أظهر الأَخَوان فيبر، إرنست وإدوارد، أن تحفيز خليةٍ عصبيةٍ في الحبل الشوكي كهربيًّا يمكنه أن يُبطئ نشاط الخلايا التي تتحكَّم في دقات القلب؛ بل إنه قادرٌ على إيقافه. كان هذا يعني أن المادة الكيميائية التي تفرزها هذه الخلايا العصبية مثبِّطة، أي تجعل الخلايا أقل إطلاقًا للإشارات.

احتاج فلوري إلى عيناتٍ من أجل دراسة «عامل التثبيط»، وهو الاسم الذي أطلقه على المادة المسئولة عن التثبيط. لذا كان يصطحب سيارته الشيفرولية طراز عام ١٩٣٤ بانتظامٍ إلى جَزَّار أحصِنة ويحصل على بعض الأجزاء التي لا يُفضلها الزبون العادي كثيرًا؛ كالمخ الطازج والحبال الشوكية. بعد استخلاص مواد مختلفة من النسيج العصبي في هذه الأجزاء، فحص ما يحدث عند إضافة كلٍّ من هذه المواد إلى خلايا عصبيةٍ حيةٍ مأخوذة من أحد أفراد جراد النهر. في النهاية، حدَّد بعض المواد الكيميائية المرشحة التي هدأت من نشاط الخلايا العصبية لجرادة النهر. نجاح هذا الدمج بين نوعَين مختلفَين من الكائنات يدُل على كون لوري محظوظًا بعض الشيء. لا يمكن الافتراض دائمًا أن النواقل العصبية تعمل بالطريقة نفسها لدى مختلف الحيوانات. لكن في هذه الحالة المواد التي كانت مُثَبطة للحصان كانت مُثبطةً أيضًا لجراد النهر.

بمساعدة كيميائيين محترفين، استخدم فلوري، بعد ذلك، نسيجًا من حيوانٍ آخر — على وجه الدقة ٤٥ كيلوجرامًا (١٠٠ رطل) من دماغ بقرة — لتصفية «عامل التثبيط» من الشوائب والوصول إلى بنيته الكيميائية الأساسية. في النهاية، لم يتبقَّ له سوى ١٨ ملِّيجرامًا من حمض الجاما-أمينُوبوتيريك. كان حمض الجاما-أمينُوبوتيريك (أو الجابا GABA كما هو معروف أكثر) أول ناقل عصبي مثبِّط أمكن التعرف عليه.

تحديد ما إذا كان الناقل العصبي مُحفِّزًا أم مُثبِّطًا يعتمد على الجهة المتلقِّية، أو بشكلٍ أكثر تقنية يحدده مستقبِل الخلية العصبية المستهدَفة. عند إطلاق ناقل عصبي من إحدى الخلايا العصبية، تقطع المادة الكيميائية المسافة القصيرة عبر التشابك العصبي، بين هذه الخلية العصبية والخلية العصبية التي تستهدفها. ثم ترتبط بالمستقبِلات التي تصطَفُّ على غشاء الخلية العصبية المستهدَفة. هذه المستقبِلات أشبه بأقفالٍ من البروتين. فهي تتطلَّب المفتاح الصحيح — أي الناقل العصبي الصحيح — كي تُفتح. وبمجرَّد أن تُفتح تكون انتقائيةً بشأن المواد التي تسمح لها بالدخول. على سبيل المثال، لا يَسمح أحد أنواع المستقبلات التي يرتبط بها الجابا إلا بدخول أيونات الكلوريد إلى الخلية. لأيونات الكلوريد شحنة سالبة، والسماح بدخول المزيد منها للخلية يُصعِّب على الخلية العصبية الوصول لحد العتبة الكهربية الذي تحتاجه لإطلاق إشارات عصبية كهربية. على الجانب الآخر، تسمح المستقبِلات التي ترتبط بها النواقل العصبية المحفِّزة بدخول الأيونات الموجبة الشحنة مثل الصوديوم، وهو ما يجعل الخلية العصبية أقرب لحدِّ العتبة.

تميل الخلايا العصبية إلى إطلاق الناقل العصبي نفسه لكل الخلايا التي تستهدفها، وهو مبدأ معروف باسم قانون ديل (سُمي على اسم هِنْري هاليت ديل الذي افترض الأمر نفسه بجرأة عام ١٩٣٤، وهو الوقت الذي لم يُتعرَّف فيه إلا على ناقلَين عصبيَّين فقط). يُطلق على الخلايا العصبية التي تُطلق جابا اسم «جابية الفِعل»، على الرغم من أنها تُوصف في كثيرٍ من الأحيان بأنها «مثبِّطة»؛ نظرًا لأن جابا هو أكثر النواقل العصبية المثبِّطة انتشارًا في أدمغة الثدييات البالغة. النواقل المحفِّزة أكثر تنوعًا قليلًا، لكن الخلايا العصبية التي تُطلقها لا تزال مصنَّفة على نطاق واسع على أنها «استثارية». في منطقة القشرة الدماغية، الخلايا العصبية المثبِّطة والمحفِّزة تختلط بحُرية، مرسلةً إشارات إلى بعضها، ومستقبلة إشارات من بعضها.

في عام ١٩٩١، بعد ترسيخ العديد من هذه الحقائق حول التثبيط، استعرض فلوري دورَه السابق في اكتشاف أول — وربما أهم — ناقل عصبي مثبِّط. وأنهى استعراضه بما يأتي: «أيًّا كان ما يفعله الدماغ للعقل، يمكننا التأكد من أن جابا يلعب دورًا أساسيًّا فيه.» على الأرجح لم يكُن فلوري على علمٍ بأنه، في ذلك الوقت نفسه، كان يجري تطوير نظريةٍ جعلت التثبيط مكوِّنًا أساسيًّا من مكونات سِمة عدم قابلية التوقع التي تميز الدماغ.

بالعودة إلى التشبيه بلعبة كرة القدم المحددة بوقت، تخيَّل الآن إضافة فريق آخر. هدف هذا الفريق هو منافستكم بتحريك الكرة إلى الطرف الآخر من الملعب. وعندما تتوقف الساعة، يكون الفريق الأقرب إلى الطرف المحدد له هو الفريق الفائز. إذا كان الفريق الآخر مُشَكَّلًا أيضًا من أصدقائكم شبه الرياضيين، فسيكون للفريقَين الأداء نفسه تقريبًا. سيظلُّ التشويش في أداء فريقك مؤثرًا على النتيجة، قد يَهزم فريقك الفريق الآخر بفارق بضعة أمتارٍ في إحدى المحاولات، وقد يُهزم فريقك بالفارق نفسِه في محاولةٍ أخرى. لكن بشكل عام، تصبح اللعبة متوازنةً ومُملة.

الآن تخيل أن الفريق الآخر كان مُشكلًا من لاعبين محترفين؛ مجموعة من أقوى اللاعبين وأسرعهم. في هذه الحالة، لن يكون لديك أنت وأصدقائك فرصة، وستُهزمون كل مرة. لهذا السبب لن يزعج أحدٌ نفسه بمشاهدة منافسةٍ بين فريقٍ من لاعبي كرة قدم محترفين وفريق من المدرسة الثانوية، أو بين لاعب الجولف تايجر وُودْز ووالدِك، أو بين جودزيلا ومجرد فراشة. فنتائج مثل هذه المباريات متوقَّعة بدرجةٍ تجعلها غير مثيرة. بعبارةٍ أخرى، المعارك غير المتكافئة تخلق حالةً من الاتِّساق أو التماثل؛ بينما تكون المعارك المتكافئة أكثر إمتاعًا.

في القشرة المخية، تتصل الخلايا العصبية بآلاف الخلايا الاستثارية والمثبِّطة. نظرًا لذلك، تكون كل قوة فردية قوية، وستكون لها الغَلَبة باستمرار إذا كانت القوة الأخرى أضعف. على سبيل المثال، في غياب التثبيط، نجد أن مئات المدخلات الاستثارية التي تغزو خليةً في أي لحظةٍ من شأنها أن تجعل الخلية تُطلق إشاراتٍ باستمرارٍ دون توقُّف؛ في المقابل، التثبيط وحده سيجعل الخلية في حالة ركودٍ تام. مع وجود قوةٍ هائلة على الجانبَين، يكون النشاط الحقيقي للخلية العصبية نِتاجًا للشد والجذب بين الطرفَين العملاقَين. ما يحدث في الخلية العصبية هو في الواقع صراعٌ متوازن، وهذا النوع هو الذي ستراه في الألعاب الأوليمبية وليس في فناء المدرسة.

أخبِر عالمَ كمبيوتر بهذه الحقيقة وسيبدأ في الشعور بالقلق. والسبب في ذلك أن علماء الكمبيوتر يعلمون أن إيجاد الفرق بين أعداد كبيرة جدًّا وصاخبة قد يؤدي إلى مشكلات كبيرة. في أجهزة الكمبيوتر، لا يمكن تمثيل الأعداد إلا بمستوًى معينٍ من الدقة. وهذا يعني أنه لا بد من تقريب بعض الأعداد، وهو ما يؤدي إلى حدوث خطأ — أو صخب — في عملية الحساب. على سبيل المثال، الكمبيوتر الذي تبلغ دقته ثلاثة (أي عدد به ثلاثة أرقام) فقط قد يمثِّل العدد ١٨٢٣١ على صورة ١,٨٢ × ٣١٠؛ يضيع الباقي البالغ ٣١

في خطأ التقريب. عند طرح عددَين متساويَين تقريبًا، فإن تأثيرات خطأ التقريب هذا يمكن أن يهيمن على الإجابة. على سبيل المثال، ١٨٢٣١ ناقص ١٨١١٥ يساوي ١١٦، إلا أن الكمبيوتر سيحسب عملية الطرح هذه على صورة ١,٨٢ × ١٠^٣ ناقص ١,٨١ × ١٠^٣ وهو يساوي فقط ١٠! هذا يجعل إجابة الكمبيوتر بعيدةً بمقدار ١٠٦. وكلما كانت الأعداد أكبر أصبح الخطأ أكبر. على سبيل المثال، الكمبيوتر الذي دقته تساوي ثلاثة أرقام ويحسب ١٨٢٣١٠ ناقص ١٨١١٥٠ سينتج إجابة أقل من الإجابة الصحيحة بمقدار ١٠٦٠.

من الطبيعي ألا تشعر بالراحة إذا كان البنك الذي تتعامل معه، أو عيادة الطبيب تُجري الحسابات بهذه الطريقة. لهذا السبب، يجري تعليم المبرمجين كتابة الأكواد بطريقةٍ تجعلهم يتجنبون طرح عددَين كبيرَين جدًّا. لكن الخلايا العصبية تطرح عددَين كبيرَين جدًّا؛ وهما الاستثارة ناقص التثبيط، في كل لحظة. هل يمكن أن يكون هذا «الخطأ» حقًّا جزءًا من نظام التشغيل الخاص بالدماغ؟

كان العلماء يقلِّبون هذه الفكرة في رءوسهم بالفعل لفترة من الوقت، عندما قرر مايكل شادلين وويليام نيوسوم، عالما الأعصاب في جامعة ستانفورد، اختبار هذه الفكرة عام ١٩٩٤. على غرار الجهد البحثي الذي أسهم به سوفتكي وكوخ، صمم شالدين ونيوسوم نموذجًا رياضيًّا للخلية العصبية وغذَّياها بالمُدخَلات. إلا أنه في هذه المرة، حصلت الخلية العصبية على كلٍّ من مدخلات استثارية ومدخلات مثبِّطة متقلبة وغير متوقعة. عند وضع إحدى هاتَين القوتَين في مواجهة الأخرى، تكون الغلبة في بعض الأحيان للاستثارة وفي أحيانٍ أخرى للتثبيط. هل ستجري المعركة مثلما حدث مع العمليات الحسابية الصاخبة، وستُسفر عن خلية عصبية تُطلق إشارات عصبية بشكلٍ غير منتظم ولا متوقع؟ أم ستتمكَّن الخلية العصبية من سحق التشويش في هذه المدخلات، كما فعلت مع المدخلات الاستثارية في الجهود البحثية التي أسهم بها سوفتكي وكوخ؟ وجد شادلين ونيوسوم أنه في ظل وجود هذَين النوعَين من المدخلات — كلٌّ يأتي بالمعدل المرتفع نفسه — تكون مخرجات الخلية العصبية مشوِّشة.

في مباراة ملاكمةٍ بين اثنَين من الهواة، قد يسمح تشتُّت انتباه أحدهما للحظاتٍ للآخر بتسديد ضربةٍ صغيرةٍ له. أما في مباراةٍ بين محترفَين، قد يؤدِّي التشتُّت نفسه إلى فوز الآخر بالضربة القاضية. وبشكلٍ عام، كلما كانت القوتان المتنافستان أكبرَ كانَت نتائج هذه المنافسات أكثرَ تأرجحًا. هذه هي الطريقة التي يمكن بها للصراع الداخلي

بين الاستثارة والتثبيط في الخلية العصبية القضاءُ على قدرات الخلية العصبية العادية لسَحْق التشويش. وبالنظر إلى أن المصدرَين متكافئان تقريبًا، فإن صافي مدخلات الخلية العصبية (أي إجمالي الاستثارة ناقص إجمالي التثبيط) ليس كبيرًا جدًّا في المتوسط. لكن نظرًا لأن كلا المصدرَين قويَّان، فإن التأرجح حول هذا المتوسط يكون كبيرًا. في لحظةٍ ما، قد يتجاوز مستوى إزالة الاستقطاب في الخلية العصبية حد عتبة الإطلاق المطلوب، وبذلك تُطلق جهدَ فِعل. في اللحظة التي تليها، قد تُجبر على الركود عن طريق موجةٍ من التثبيط. هذه التأثيرات يمكنها أن تجعل الخلية العصبية تُطلق إشاراتٍ في الوقت الذي لم تكن لتطلق فيه لولا ذلك، أو تبقى ساكنةً في الوقت الذي كانَت ستطلق فيه إشارات لولا ذلك. بهذه الطريقة، يؤدِّي التوازن بين الاستثارة والتثبيط إلى فوضى في الخلية العصبية، ويساعد على تفسير التقلبات في الدماغ.

المحاكاة التي أجراها شادلين ونيوسوم قطعت شوطًا كبيرًا في المساعدة على فَهْم كيف يمكن للخلايا العصبية أن تظل على قدرٍ من التشويش. لكنها لم تتوغل بعيدًا بما يكفي. تحصل الخلايا العصبية الحقيقية على مدخلات من خلايا عصبية حقيقية أخرى. كي تكون النظريةُ القائلةُ بأن هذا التشويش ينتج عن التوازن بين الاستثارة والتنشيط؛ صحيحة، لا بد أن تكون مناسبة لشبكة كاملة من الخلايا العصبية الاستثارية والمثبِّطة. هذا يعني شبكةً تأتي فيها مدخلات كل خليةٍ من الخلايا العصبية الأخرى، كما تعود مخرجاتها إلى الخلايا العصبية الأخرى أيضًا. لكن محاكاة شادلين ونيوسوم كانَت لخليةٍ عصبيةٍ واحدةٍ تتلقَّى المدخلات التي يتحكَّم فيها صانعو النموذج. لا يمكنك أن تنظر إلى الدخل والنفقات لأسرةٍ واحدة، وتقرر بناءً على ذلك أن الاقتصاد القومي قوي. وبالمثل، محاكاة خليةٍ عصبيةٍ منفردةٍ لا يمكن أن تضمن عمل شبكةٍ من الخلايا العصبية حسب المطلوب. كما رأينا في الفصل الأخير، في نظامٍ يتكوَّن من العديد من الأجزاء المتحرِّكة لا بد أن تتحرَّك كل الأجزاء بطريقةٍ صحيحةٍ للحصول على النتيجة المطلوبة.

كي نضمن أن ينتج عن شبكة خلايا عصبيةٍ بالكامل مستويات مُنسقة من التشويش، يتطلَّب الأمر تنسيقًا: لا بد أن تحصل كل خليةٍ عصبيةٍ على مدخلاتٍ استثاريةٍ ومثبِّطةٍ من الخلايا العصبية المجاورة لها بنسبٍ متساويةٍ تقريبًا. ولا بد أن تكون الشبكة مُتَّسقةً مع نفسها؛ أي إنه يتعيَّن على كل خليةٍ عصبيةٍ إنتاج نفس القدر من التشويش الذي تحصل عليه، لا أكثر ولا أقل. هل يمكن لشبكةٍ من الخلايا الاستثارية والمثبِّطة بالفعل الاحتفاظ بنوع إطلاق الإشارات الذي يتسم بالتشويش الذي نراه في الدماغ، أم هل يتلاشى التشويش أو ينفجر في النهاية؟

فيما يتعلق بالاتساق الذاتي في الشبكات، يعرف علماء الفيزياء ما يتعين عليهم فعله. كما رأينا في الفصل السابق، تحفل الفيزياء بالعديد من المواقف التي يكون فيها الاتساق الذاتي مُهمًّا: على سبيل المثال، تتكون الغازات من أعداد كبيرة من الجُسيمات البسيطة، حيث يتأثر كل جسيم بجميع الجسيمات المحيطة به ويؤثر فيها جميعًا في المقابل. لذا، ابتُكرت آليات لجعل الرياضيات التي تعبر عن هذه التفاعلات أسهل في التعامل معها.[١]

في ثمانينيات القرن العشرين، كان عالم الفيزياء الإسرائيلي حاييم سومبولينسكي يستخدم هذه الآليات؛ لفهم الطرق التي تتصرف بها المواد في ظل درجات الحرارة المختلفة. لكنه في النهاية وجَّه اهتمامه صوب الخلايا العصبية. في عام ١٩٩٦ طبَّق سومبولينسكي وزميله كارل فان فريسفيك، عالم الفيزياء الذي تحوَّل إلى عالم أعصاب، النهجَ الفيزيائي في مسألة التوازن في الدماغ. بمحاكاة الرياضيات المستخدمة لفهم الجسيمات المتفاعلة، دوَّنا بعض المعادلات البسيطة التي تمثِّل مجموعةً كبيرةً جدًّا من الخلايا الاستثارية والمثبِّطة المتفاعلة معًا. تلقَّت هذه المجموعة أيضًا مدخلات خارجية الهدف، منها تمثيل الوصلات القادمة من مناطق أخرى في الدماغ.

من خلال معادلاتهما البسيطة، استطاع فان فريسفيك وسومبولينسكي تحديد نوعية السلوك الذي أرادا رؤيته من النموذج. على سبيل المثال، كان لا بد أن تكون الخلايا قادرة على الاحتفاظ بنشاطها، وفي الوقت نفسه لا تكون نشطة للغاية (أي ينبغي ألا تُطلِق إشارات دون توقف مثلًا). بالإضافة إلى ذلك، لا بد أن تستجيب للزيادات في المدخلات الخارجية، من خلال زيادة معدل إطلاق الإشارات. وبالطبع، كان لا بد أن تتسم الاستجابات بالتشويش.

بتضمين هذه المتطلبات، مضى فان فريسفيك وسومبولينسكي قُدمًا في المعادلات. وتوصلا إلى أنه: لتكوين شبكةٍ كاملةٍ ستستمرُّ في إطلاق الإشارات بشكلٍ غير منتظم بمعدلٍ معقول، لا بد من استيفاء بعض الشروط. على سبيل المثال، لا بد أن يكون تأثير

[١] تاريخيًّا، اندرجت مجموعة الآليات هذه تحت مُسمَّى «نظرية المجال المتسق ذاتيًّا» الأكثر وضوحًا، لكنها الآن معروفة باسم نظرية المجال الوَسطي. تكمن براعة منهج المجال الوسطي في أنه لن يتعين عليك تقديم معادلة لكل جسيم متفاعل في النظام لديك. بدلًا من ذلك، يمكنك دراسة لجسيمٍ «ممثل» لبقية الجسيمات يتلقى مُخرجاته باعتبارها مدخلات. هذا من شأنه أن يجعل دراسة الاتساق الذاتي أسهل بكثير.

الخلايا المثبِّطة على الخلايا المحفِّزة أقوى من تأثير الخلايا المحفِّزة على بعضها. التأكد من أن الخلايا المحفِّزة تتلقى تثبيطًا أكثر بقليل من التحفيز، يجعل نشاط الشبكة تحت السيطرة. من المهم أيضًا أن تكون الروابط بين الخلايا العصبية عشوائيةً ونادرة؛ لا بد أن تحصل كل خليةٍ على مدخلات، لنَقُل، من ٥ أو ١٠ في المائة فقط من الخلايا الأخرى. هذا يضمن عدم وقوع خليتَين عصبيتَين في نمط السلوك نفسه.

لم يكن من غير المنطقي بالنسبة للدماغ أن يستوفيَ أيًّا من المتطلبات التي حددها فان فريسفيك وسومبولينسكي. فعندما أجرى العالمان محاكاة لشبكة تستوفي جميع هذه المتطلبات ظهر التوازن الضروري بين الاستثارة والتثبيط، وبدا أن الخلايا العصبية المحاكِية بها التشويش نفسه الموجود في الخلايا العصبية الحقيقية. ويُشار إلى أن حَدْس شادلين ونيوسوم بشأن كيف يمكن للخلية العصبية الواحدة الاستمرار في إطلاق إشارات يتَّسم بالتشويش؛ ينطبق على شبكة من الخلايا العصبية المتفاعلة.

لم يكتفِ فان فريسفيك وسومبولينسكي بتوضيح أنه من الممكن موازنة الاستثارة والتثبيط في الشبكة؛ بل توصَّلا أيضًا إلى فائدة من ذلك، وهي أن الخلايا العصبية في الشبكة المتوازنة بإحكام تستجيب بسرعة للمدخلات. عندما تكون الشبكة موزونة، فإنها تكون أشبه بسائق يضغط بإحدى قدمَيه على البنزين، والأخرى على الفرامل بالتساوي. لكن هذا التوازن يختلُّ عندما يتغير مقدار المدخلات الخارجية. ونظرًا لأن المدخلات الخارجية محفِّزة، وتستهدف الخلايا الاستثارية في الشبكة أكثر من الخلايا المثبِّطة — تكون الزيادة في إطلاق الإشارات أشبه بثِقَل أضيف لدواسة البنزين. ومن ثم، تنطلق السيارة تقريبًا بالسرعة نفسها التي تأتي بها المدخلات. لكن بعد هذه الدفعة الأولية من الاستجابة تستعيد الشبكة توازنها مرة أخرى. انفجار الاستثارة في الخلية يجعل الخلايا العصبية المثبِّطة تُطلق إشارات أكثر — على غرار إضافة ثقل إلى الفرامل — تستقر مرة أخرى في حالة توازن، استعدادًا للاستجابة مرة أخرى. هذه القدرة على التصرف بسرعة استجابةً للمُدخلات المتغيرة قد تساعد الدماغ على مواكبة العالم المتغير بدقة.

معرفة أن الرياضيات تصل إلى حلولٍ أمرٌ يدعو للاطمئنان، إلا أن الاختبار الحقيقي للنظرية مصدره الخلايا العصبية الحقيقية. قدَّم الجهد البحثي الذي أسهم به فان فريسفيك وسومبولينسكي الكثير من التوقعات لعلماء الأعصاب كي يختبروها، وهذا بالضبط ما فعله مايكل وير وأنتوني زادور في مختبر كولد سبرينج هاربور عام ٢٠٠٣. استمدَّ الباحثان تسجيلاتهما من الخلايا العصبية الموجودة في القشرة السمعية للفئران،

وهي المسئولة عن معالجة الصوت، أثناء تشغيل أصوات مختلفة للفئران. عادةً عندما يضع علماء الأعصاب قطبًا كهربيًّا في الدماغ، فإنهم يحاولون معرفة مخرجات الخلية العصبية، أي جهود الفعل. لكنْ هذان الباحثان استخدما طريقةً أخرى لمراقبة المدخلات التي كانت الخلية العصبية تحصل عليها، وذلك لغرضٍ مُحدَّد، وهو معرفة ما إذا كانت المدخلات الاستثارية والمثبِّطة يوازن بعضُها بعضًا أم لا.

ما لاحظاه هو أنه بعد تشغيل الصوت مباشرة اجتاحت الخلية موجة قوية من الاستثارة. تبِع ذلك، بشكلٍ شبه فوري، دفقٌ مساوٍ من التثبيط، يمكننا اعتبار ذلك الفراملَ التي تلت دواسة البنزين. حتى عند استخدام الأصوات الأعلى، وهو ما نتج عنه مزيد من الاستثارة، كان مقدار التثبيط الذي تبعه مكافئًا لمقدار الاستثارة دائمًا. بدا أن التوازن يظهر في الدماغ كما ظهر في النموذج.

لاستكشاف تنبؤ آخر للنموذج، تعين على العلماء أن يكونوا أكثر إبداعًا. أوضح فان فريسفيك وسومبولينسكي أنه: لتكوين شبكة متوازنة بشكلٍ جيد، لا بد أن تعتمد قوة الوصلات بين الخلايا العصبية على إجمالي عدد الوصلات، مع زيادة عدد الوصلات، يمكن أن تكون كل وصلة أضعف. رغب كلٌّ من جيريمي بارال وأليكس راياس من جامعة نيويورك في إيجاد طريقة لتغيير عدد الوصلات في الشبكة؛ لاختبار صحة هذه الفرضية.

داخل الدماغ، يصعب التحكم في آلية نمو الخلايا العصبية. لذا، في عام ٢٠١٦ قررا جعل الخلايا تنمو في طبق بتري بدلًا من ذلك. هذا الإعداد التجريبي، في بساطته وإمكانية التحكم فيه ومرونته، يشبه تقريبًا إصدارًا حيًّا لمحاكاة كمبيوتر. للتحكم في عدد الوصلات، وضَعا ببساطةٍ كمياتٍ مختلفةً من الخلايا العصبية في الطبق؛ الأطباق التي احتوت على مزيد من الخلايا العصبية صنعت مزيدًا من الوصلات. بعد ذلك، راقبا نشاط الخلايا العصبية وتحقَّقا من قُوى الوصلات بينها؟ جميع المجموعات (التي احتوت على كلٍّ من خلايا مثبِّطة وخلايا استثارية) أطلقت إشارات بطريقة مُشوشة، تمامًا على النحو الذي ينبغي لشبكة متوازنة. لكن قُوى الوصلات اختلفت اختلافًا جذريًّا. ففي الطبق الذي كان فيه لكل خلية عصبية نحو ٥٠ وصلة فقط، كانت الوصلات أقوى بثلاث مرات من الوصلات في الطبق الذي فيه لكل خلية عصبية ٥٠٠ وصلة. في الحقيقة، بإلقاء نظرة على جميع المجموعات، متوسط قوة الوصلة تقريبًا يساوي واحدًا مقسومًا على الجذر التربيعي لعدد الوصلات؛ وهو بالضبط ما تنبَّأت به نظرية فان فريسفيك وسومبولينسكي.

وفي خِضَم السعي للحصول على مزيد من الأدلة، عُثِر على المزيد الذي يدعم الاعتقاد بأن الدماغ في حالة توازن. لكن لم تَسِر جميع التجارب على النحو الذي تنبأت به النظرية؛

فالتوازن المحكم بين الاستثارة والتثبيط لم يُلحَظ دائمًا. ثمة سبب وجيه للاعتقاد بأن بعض مناطق الدماغ التي تشترك في مهام محددة، قد تكون أكثر عُرضة لإظهار السلوك المتوازن. على سبيل المثال، يتعيَّن على القشرة السمعية في الدماغ الاستجابة للتغيُّرات السريعة في تردد الأصوات لمعالجة المعلومات الواردة. وهو ما يجعل الاستجابة السريعة للخلايا العصبية المتوازنة بشكلٍ جيد خيارًا مناسبًا. قد تجد مناطق أخرى لا تتطلب مثل هذه السرعة حلًّا مختلفًا.

تكمن روعة التوازن في أنه يُسخِّر عنصرًا مُهيمِنًا في الدماغ — وهو التثبيط — لحل لغز شائع بنفس القدر، وهو التشويش. وكل هذا يحدث دون الاعتماد على السحر؛ أي إنه لا يوجد مصدر مخفِيٌّ للعشوائية. يأتي التشويش حتى في أثناء استجابة الخلايا العصبية تمامًا كما ينبغي لها.

هذه الحقيقة المنافية للحَدْس البديهي، التي تفيد بأن السلوك المتوازن يمكن أن ينتج عنه فوضى، تُعد ضرورية. وقد لوحظت هذه الحقيقة في موضع آخر من قَبل. فقد أشار فان فريسفيك وسومبولينسكي إلى هذا التاريخ، من خلال أول كلمةٍ في عنوان ورقتهما البحثية: «الفوضى في الشبكات العصبية التي لها نشاط استثاري ومثبِّط متوازن».

لم يكن مفهوم الفوضى موجودًا في ثلاثينيات القرن العشرين؛ حين كان العلماء يدركون لأول مرة مدى تشويش الخلايا العصبية، لم تكن النظرية الرياضية التي تهدف إلى فَهْم سلوك هذه الخلايا قد اكتُشِفت بعد. وعندما حدث ذلك حدث بالصدفة على الأرجح.

تأسس قسم الأرصاد الجوية في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا عام ١٩٤١، في الوقت المناسب تمامًا لإدوارد لورنز. أبدى لورنز، المولود في عام ١٩١٧ في حيٍّ لطيفٍ بكونتيكت في جيرة مهندس ومدرس، اهتمامًا مبكرًا بالأعداد والخرائط والكواكب. قرَّر مواصلة دراسته للرياضيات بعد الحصول على شهادة جامعية فيها، لكن كما حدث مع الكثير من العلماء في زمانه، اعترضت الحربُ طريقَه. وفي عام ١٩٤٢ أُسنِدت إلى لورنز مهمة التنبؤ بالطقس لدى سلاح الجو بالجيش الأمريكي. لتعلُّم كيفية فعل ذلك، حصل على دورة مكثَّفة حول الأرصاد الجوية في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا. عندما فرغ من مهمة الجيش ظل يعمل في الأرصاد الجوية، وظل في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا في البداية بوصفه طالب دكتوراه، ثم باعتباره عالم أبحاثٍ، وأخيرًا باعتباره أستاذًا.

لو سبق لك أن حاولت التخطيط لنزهة، فأنت تعلم أن التنبؤ بالطقس بعيد كل البعد عن الكمال. حتى إن خبراء الأرصاد الجوية الأكاديميين، الذين يركزون على فيزياء

الكوكب على نطاق واسع، نادرًا ما يعتبرون التنبؤ اليومي هدفًا. لكن لورنز ظل فضوليًّا حِيال ذلك، وكذلك حيال إمكانية مساعدة التكنولوجيا الحديثة، الكمبيوتر، في هذا.

المعادلات التي تصف الطقس عديدة ومعقَّدة. المُضي في حل هذه المعادلات — لمعرفة كيف سيقودنا الطقس الحالي إلى الطقس في وقت لاحق — يُعد مهمةً هائلة وشبه مستحيلة (بمجرد الانتهاء من هذه المهمة سيكون وقت حلول الطقس الذي تتنبأ به قد مر بالفعل) لكن ربما يمكن للكمبيوتر فعل هذا أسرع بكثير.

بدءًا من عام ١٩٥٨ وضع لورنز هذا قيد الاختبار. فقد بسَّط ديناميَّات الطقس في ١٢ معادلة، واختار بعض القيم ليبدأ بها — لِنقُل رياح غربية بسرعة ١٠٠كم/ساعة — واستعان بالرياضيات في هذه العملية. طبع مخرجات النموذج على لفافات من الورق لأنها تمتد بالطول. بدت المخرجات أشبه بالطقس بما يكفي، مع وجود حركات المدِّ والجزر المألوفة، وتدفُّقات التيارات، ودرجات الحرارة. وفي أحد الأيام أراد تكرار محاكاة معينة لمعرفة كيف ستتطوَّر على مدار فترة زمنية أطول. بدلًا من بدء المحاكاة من البداية مرة أخرى، اعتقد أنه يمكنه البدء من نقطةٍ في المنتصف من خلال وَضْع القِيم في النسخة المطبوعة باعتبارها الحالاتِ الأوَّلية. التعجُّل أحيانًا يكون مدعاةً للاكتشاف.

ومع ذلك لم تكن الأعداد التي طبعها الكمبيوتر كاملة. كي تستوعب الصفحة مزيدًا من الأعداد، اقتطعت الطابعة عدد الأرقام الواقعة بعد العلامة العشرية من ستة أرقام إلى ثلاثة. لذا، فإن الأعداد التي وضعها لورنز في المحاولة الثانية من المحاكاة لم تعُد هي نفسها الأعداد التي أسفر عنها النموذج. لكن ما الذي يمكن أن يعنيه عددٌ قليلٌ من الأرقام العشرية في نموذج لطقس العالم بأسره؟ يتضح أن هذه التغييرات البسيطة قد يكون لها تأثيرٌ ملحوظ. بعد إجراء المحاكاة لفترةٍ زمنيةٍ محددة — نحو شهرَين من التغيُّرات المناخية في نطاقٍ زمني — كانت هذه الجولة الثانية للمحاكاة مختلفةً تمامًا عن الأولى. فما كان حارًّا في محاكاة كان باردًا في أخرى، وما كان سريعًا في إحداهما كان بطيئًا في الأخرى. وما كان من المفترض أن يكون تكرارًا أصبح اكتشافًا غير مسبوق.

حتى هذه اللحظة، افترض العلماء أن التغيُّرات البسيطة تنتج عنها تغيُّرات بسيطة. ينبغي ألَّا تكون لهبَّة ريح عند نقطة معينة القدرةُ على تحريك جبال فيما بعد. وفقًا لهذا الاعتقاد الراسخ، لا بد أن تكون ملاحظة لورنز نابعة من خطأ فني اقترفته أجهزة الكمبيوتر الضخمة العالية الكفاءة في ذلك الوقت.

لكن لورنز كان على استعداد لرؤية ما كان يحدث حقًّا. في هذا الصدد، أوضح عام ١٩٩١ قائلًا: «لا بد أن يبقى العالم دائمًا على اطِّلاع بتفسيرات أخرى غير تلك التي يشيع

انتشارها.» ما لاحظه لورنز هو أن السلوك الصحيح للرياضيات كان مختلفًا عن الحدس الأوَّلي للمرء. في مواقف معينة، يمكن أن تتعاظم التقلُّبات الصغيرة، وهو ما يجعل السلوك لا يمكن التنبؤ به. هذا ليس خطأً ولا سهوًا؛ بل هذه الآلية التي تعمل بها الأنظمة المعقدة. الفوضى — الاسم الذي أطلقه علماء الرياضيات[٢] على هذه الظاهرة — كانت حقيقية، وسيستفيد العلماء من محاولة فَهْمها.

العمليات الفوضوية ينتج عنها مخرجات تبدو فوضوية، لكنها في الواقع تتبع قواعد محددة جدًّا. السبب في مثل هذا الوصف يكمُن في الحقيقة المزعجة أن قدرتنا على التنبؤ بالنتائج المعتمِدة على معرفة القواعد، محدودة أكثر بكثير مما كان يُعتقد قبلًا، لا سيما إذا كانت هذه القواعد معقَّدة. أوضح جيمس كليك في كتابه «الفوضى: صُنع عِلمٍ جديد»، وهو تاريخ شامل لكيفية ظهور هذا المجال، ما يأتي: «بشكلٍ تقليدي، سيعتقد اختصاصي علم الديناميكا أن كتابة معادلات لنظام ما تعني فهم هذا النظام ... لكن نظرًا لوجود القليل من اللاخطِّية في هذه المعادلات، سيجد اختصاصي علم الديناميكا نفسه غير قادر على الإجابة عن أسهل الأسئلة العملية المتعلقة بمستقبل النظام.» هذا يُضفي حتى على أبسط الأنظمة، المكونة على سبيل المثال من كرات بلياردو متفاعلة أو بندولات متأرجحة، احتماليةَ أن ينتج عنها نتيجة غير متوقعة. وتابع قائلًا: «اكتشف هؤلاء الذين يدرسون الأنظمة الديناميكية الفوضوية، أن السلوك المضطرب للأنظمة البسيطة يعمل بوصفه عمليةً إبداعية. ويتولَّد عنه التعقيد: أنماطٌ غنية التنظيم تكون مستقرَّة في بعض الأحيان وغير مستقرةٍ في أحيانٍ أخرى، ومحدودةً في بعض الأحيان ولا نهائيةً في أحيانٍ أخرى».

كانت الفوضى تحدث في الغلاف الجوي، وإذا كان فان فريسفيك وسومبولينسكي على حق، فإنها كانت تحدث في الدماغ أيضًا. لهذا السبب، فإن تفسير السبب في أن الدماغ يستجيب للمُدخلات المكررة استجابات متنوعة ومتغيرة؛ لا يحتاج إلى أن يشمل الآليات والعمليات غير المنتظمة للخلايا الفردية في الدماغ. هذا لا يعني عدم وجود أي مصادر للتشويش في الدماغ (كقنوات الأيونات غير الموثوقة أو المستقبِلات المعطَّلة)؛ بل يعني أن عنصرًا مُعقَّدًا كالدماغ، بما يحتويه من مجموعات من الخلايا مسئولة عن الاستثارة

[٢] في الثقافة الشائعة، تُعرف هذه النظرية باسم «تأثير الفراشة»، أي الفكرة القائلة بأن أي حدث بسيط كرفَّة جناحَي فراشة يمكن أن يغير مسار التاريخ.

والتثبيط، لا يستلزم إظهار استجاباتٍ غنية وغير منتظمة. في الواقع، في محاكاة فان فريسفيك وسومبولينسكي لشبكة ما، كلُّ ما تعيَّن عليهما هو تغيير الحالة الابتدائية لخلية عصبية واحدة — من إطلاق إشاراتٍ إلى عدم إطلاق إشارات أو العكس — لتكوين نمط نشاط مختلف تمامًا في مجموعة الخلايا بالكامل.[٣] فإذا كان أي تغيير بسيط يمكن أن يُسفِر عن مثل هذا الاضطراب، فإن قدرة الدماغ على الاحتفاظ بالتشويش تبدو أقل غُموضًا.

في المراكز الطبية حول العالم يظل مَرضى الصَّرع عدة أيام — تصل إلى أسبوع — عالِقين في غُرف صغيرة. الغرف «المراقَبَة» هذه مزودة بتليفزيون — للمرضى — وكاميرات ترصد حركة المريض؛ كي يتابعه الأطباء. طوال الليل والنهار، يكون المرضى على اتصالٍ بجهاز تخطيط كهربي للدماغ (EEG) يلتقط سلوك أدمغتهم. يأمل المرضى أن تساعد المعلومات التي يجري تجميعها على علاج نوبات الصرع لديهم.

ترصد أقطاب جهاز التخطيط الكهربي للدماغ، المثبتة في فروة الرأس عن طريق لاصقات طبية وأشرطة لاصقة، النشاطَ الكهربي الذي يصدر عن الدماغ أسفل هذه الأقطاب. كل قطبٍ كهربي يُعطي قياسًا، وهو عبارة عن مزيج معقَّد من نشاط العديد من الخلايا العصبية في آنٍ واحد. وهو عبارة عن إشارة تتغير بمرور الزمن مثل مقياس الزلازل أو السيزموجراف. عندما يكون المرضى مستيقظين، تكون الإشارة عبارة عن خط متعرج: يتحرك قليلًا نحو الأعلى ويتحرك قليلًا نحو الأسفل بشكلٍ عشوائي، لكن دون إيقاعٍ قوي. أما عندما يكون المرضى نيامًا (لا سيما في حالة نوم عميق بلا أحلام) فيُظهِر جهاز التخطيط الكهربي للدماغ أمواجًا؛ حركات ضخمة نحو الأعلى تليها حركات نحو الأسفل تمتدُّ لثانية أو أكثر. عند وقوع حدثٍ مثيرٍ للاهتمام — أي نوبة صرع — تصبح الحركات أكثر وضوحًا. تَتَتبَّع الإشارة التذَبذُبات الكبيرة والسريعة لأعلى ولأسفل التي تشبه شخبطةً محمومةً لطفلٍ بقلم تلوين، من ثلاث لأربع مرات في الثانية.

[٣] مرة أخرى، ستستمر مجموعة الخلايا في إطلاق نفس مقدار جهود الفعل في المتوسط استجابةً للمدخلات المعطاة. ما يتغير هو كيفية توزيع جهود الفعل عبر الزمن والخلايا العصبية. لو لم تكن خلاياك العصبية حقًّا تتبع أي قواعد لكيفية الاستجابة للمدخلات، لما كنتَ ستتمكن من قراءة هذا الآن.

ما الذي تفعله الخلايا العصبية لتكوين هذه الإشارات القوية أثناء نوبة الصرع؟ تعمل معًا. كما هي الحال في التشكيلات العسكرية المدرَّبة جيدًا، تعمل هذه الخلايا بإيقاع مُوحَّد كما يسير الجنود؛ تُطلق إشارات عصبية في آنٍ واحد، ثم تهدأ قبل أن تُطلق إشارات مرة أخرى. النتيجة هي انفجار من النشاط متكرر ومتزامن، يجعل جهاز التخطيط الكهربي للدماغ يصدر إشارةً لأعلى ولأسفل مرارًا وتكرارًا. بهذه الطريقة تكون نوبة الصرع عكس مفهوم العشوائية؛ فهي عبارة عن نظامٍ مثالي يمكن التنبؤ به.

الخلايا العصبية التي تعمل على تكوين نوبة الصرع هي نفسها الخلايا التي تُصدِر أيضًا الموجات البطيئة في حالة النوم، والنشاط العادي الصاخب الذي تتطلَّبه عمليات الإدراك اليومية. كيف يمكن للدوائر العصبية نفسها إظهار هذه السلوكيات المختلفة؟ وكيف تتنقَّل ما بين هذه السلوكيات؟

في أواخر تسعينيات القرن العشرين، أقدم عالمُ الأعصاب الحاسوبي الفرنسي نيكولاس برونيل على فهم الطرق المختلفة التي يمكن أن تتصرف بها الدوائر العصبية.[٤] على وجه التحديد، استنادًا إلى المجهود البحثي الذي قدمه فان فريسفيك وسومبولينسكي، أراد اختصاصيُّ علم الأعصاب الحاسوبي نيكولاس برونيل دراسة الكيفية التي تتصرف بها النماذج المكوَّنة من خلايا عصبية استثارية، وخلايا عصبية مثبِّطة. وعليه، استكشف برونيل فضاء البارامترات لهذه النماذج.

البارامترات هي مقابض يمكن إدارتها في نموذج. وهي عبارةٌ عن قيمٍ تحدد خواصَّ معينة، مثل عدد الخلايا العصبية في الشبكة، أو عدد المدخلات التي تحصل عليها كل خلية. كما هي الحال في الفضاء المنتظم، يمكن استكشاف فضاء البارامترات في العديد من الاتجاهات المختلفة، لكن كل اتجاهٍ يقابل بارامترًا مختلفًا. البارامتران اللذان اختار برونيل استكشافهما هما؛ أولًا: مقدار المدخلات الخارجية التي تحصل عليها الشبكة (أي المدخلات الواردة من مناطق الدماغ الأخرى)، ثانيًا: مقدار قوة الوصلات العصبية المثبِّطة مقارنة بالوصلات الاستثارية. بتغيير كلٍّ من هذه البارامترات قليلًا والمُضي في حل المعادلات، أمكن لبرونيل فحص مدى اعتماد سلوك الشبكة على هذه القِيَم.

---

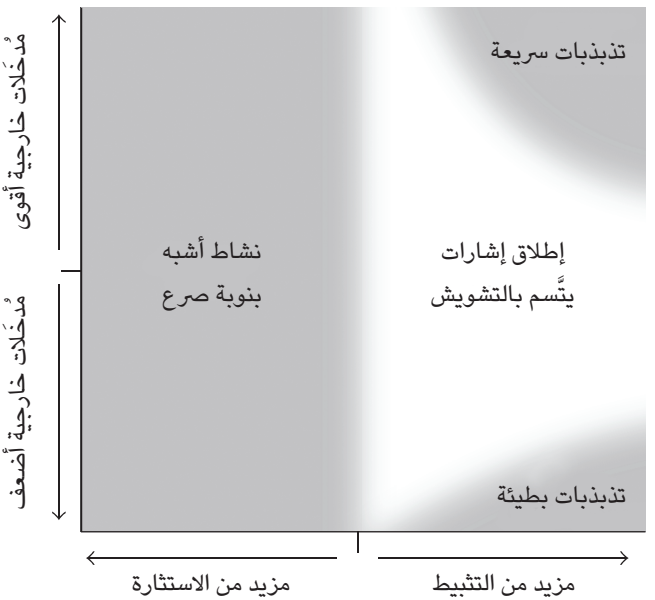
[٤] ربما ليس من الغريب في هذه المرحلة أن برونيل عمل في البداية عالمَ فيزياء. سمع عن علم الأعصاب أثناء دراسته للدكتوراه في بداية تسعينيات القرن العشرين، عندما أطلعه أحدُ البرامج الدراسية على هذا الاتجاه الجديد الخاص بتطبيق الأدوات المستخدمة في الفيزياء على الدماغ.

ينتج عن فعل هذا، باستخدام مجموعة من قِيم بارامترات مختلفة، خريطةٌ لسلوك النموذج. تقابل خطوط الطول ودوائر العرض على هذه الخريطة البارامترَين اللذَين حدَّدهما برونيل على الترتيب. بالنسبة إلى الشبكة الموجودة في منتصف الخريطة، يكون التثبيط مساويًا للاستثارة تمامًا، ويكون مدخل الشبكة متوسط القوة. بالتحرُّك إلى يسار الخريطة تصبح الاستثارة أقوى من التثبيط، وبالتحرُّك إلى اليمين يحدث العكس. بالتحرك لأعلى، تصبح مدخلات الشبكة أقوى، وبالتحرك إلى أسفل تصبح أضعف. وبهذه الطريقة، فإن الشبكة التي درسها فان فريسفيك وسومبولينسكي — والتي كانت الوصلات بين خلاياها العصبية المثبِّطة أقوى بقليلٍ من الوصلات بين الخلايا العصبية الاستثارية — تكون على يمين منتصف الخريطة.

أجرى برونيل مَسحًا لهذا التمثيل المرئي للنموذج، بحثًا عن أي تغييراتٍ في التضاريس: هل هناك مجموعاتٌ معينةٌ من البارامترات تجعل الشبكة تتصرَّف بشكلٍ مختلفٍ تمامًا؟ للعثور على معالم مذهلة، لن تضطر إلى الانتقال بعيدًا عن شبكة فان فريسفيك وسومبولينسكي الأصلية. بالعبور من المنطقة التي يكون فيها التثبيط أقوى إلى المنطقة التي تكون فيها الاستثارة أقوى، يحدث تحوُّل حاد. في الرياضيات، تُعرف هذه التحولات باسم «التشعُّبات». وكجُرف منحدر يفصل أحد السهول الخضراء عن البحر، تشير التشعبات إلى تغيُّر سريع بين منطقتَين منفصلتَين في فضاء البارامترات. في خريطة برونيل، الخط الذي تتساوى عنده الاستثارة والتثبيط يفصل الشبكات الموجودة على اليمين، التي تتضمن إطلاقًا عشوائيًّا وغيرَ منتظم للإشارات، عن الشبكات الموجودة على اليسار التي تتضمَّن إطلاقًا دقيقًا ومُتوقَّعًا للإشارات. على وجه التحديد، عندما يصبح التثبيط ضعيفًا جدًّا، تتوقف الخلايا العصبية في هذه الشبكات عن أنماط إطلاق الإشارات غير المنتظم وتبدأ في إطلاق إشاراتٍ بانسجام. يبدو النشاط المتزامن والمحكم — الذي يشمل مجموعات من الخلايا العصبية تُطلق الإشارات معًا وتتوقف معًا — أشبهَ بنوبة صرع.

عرف علماء وظائف الأعضاء لقرون أن موادَّ محددة تعمل بوصفها مسببات للتشنُّج؛ أي إنها تُحفِّز نوبات الصرع. مع زيادة فَهْم النواقل العصبية في منتصف القرن العشرين، أصبح من الواضح أن العديد من هذه العقاقير تتداخل مع التثبيط. على سبيل المثال، عُثر على البيكوكولين في النباتات في أمريكا الشمالية، واتَّضح أنه يمنع الجابا من الارتباط بالمستقبِل الخاص به. يمنع الثوجونُ، الموجود في الجرعات المنخفضة من الأفسنتين،

**الخريطة**




شكل ٥-٢

مستقبلاتِ الجابا من السماح لأيونات الكلوريد بالدخول. أيًّا كانت الآلية، في النهاية تعمل هذه العقاقير على إخلال التوازن في الدماغ، مُقلِّلة من كفاءة النواقل العصبية المثبِّطة. باستخدام رؤيته الشاملة لسلوك الدماغ، تمكَّن برونيل من ملاحظة كيف أن تغيير بارامترات الدماغ — من خلال العقاقير أو غيرها — ينقُله إلى حالاتٍ مختلفة.

الانتقال إلى الطرف الآخر من خريطة برونيل يكشف عن نمط آخر من النشاط. في هذا الحيز، يفوق التثبيط الاستثارة. إذا ظلت المدخلات الخارجية بقوة متوسطة، تظل الخلايا العصبية تتسم بالتشويش في هذه المنطقة. لكن بالتحرك لأعلى أو لأسفل، يظهر سلوكان متشابهان في جانب ومختلفان في آخر. في حالة وجود مدخلات خارجية مرتفعة أو منخفضة تُظهر الخلايا العصبية بعض الانسجام. إذا حسبتَ عدد الخلايا العصبية النشطة في أي وقتٍ محدَّد فسترصد موجاتٍ من النشاط؛ أي فترات قصيرة تتضمن معدلَ إطلاق إشاراتٍ، يفوق متوسط معدل الإطلاق متبوعًا بمعدل إطلاق أقل. لكن على عكس

الدقة العسكرية التي يتَّسم بها سلوك الخلايا العصبية في حالة نوبات الصرع، فإن الشبكات هنا أشبه بمجموعة من عازفي الآلات الإيقاعية مكوَّنة من أطفال بعمر السادسة؛ قد يكون هناك بعض التنظيم، لكن لا يعزف الجميع معًا في آنٍ واحد. في الواقع، الخلية العصبية الواحدة في كلٍّ من هذه الشبكات لا تُطلِق إشاراتٍ إلا مرةً كل ثلاث أو أربع موجات، وحتى عندئذٍ لا يكون توقيت الإطلاق مثاليًّا دائمًا. بهذه الطريقة، تكون هذه الحالات على قدرٍ من التذبذُب والتشويش معًا.

السِّمةُ التي تميِّز السلوك في الجانب العُلوي الأيمن من الخريطة عن السلوك في الجانب السفلي الأيمن؛ هي تردُّد التذبذب. عند إمداد الشبكة بمدخلات خارجية قوية يصعد معدل النشاط لأعلى ويهبط لأسفل، بسرعة ١٨٠ مرة في الثانية. تعمل المدخلات القوية على تنشيط الخلايا الاستثارية، التي بدورها تُنشِّط الخلايا المثبِّطة التي يؤدي تنشيطها إلى تعطيل الخلايا الاستثارية، بعد ذلك يُعطَّل نشاطُ الخلايا المثبِّطة نفسها ويتكرر الأمر برُمته من جديد. بتخفيض مدخلات الشبكة تصبح التذبذبات أبطأ، أي نحو ٢٠ مرة في الثانية. تحدث هذه التذبذبات البطيئة؛ نظرًا لأن المدخلات الخارجية للشبكة تكون ضعيفة جدًّا، والتثبيط يكون قويًّا جدًّا لدرجة أن الكثير من الخلايا العصبية لا تحصل على المدخلات الكافية لإطلاق إشارات. لكن الخلايا العصبية التي تُطلق إشاراتٍ تستخدم وَصلاتها لزيادة مستويات نشاط الخلايا العصبية في الشبكة مرة أخرى. ومع ذلك، إذا جرى تنشيط الكثير من الخلايا المثبِّطة هدأت الشبكة مرة أخرى.

على الرغم من التشابه السطحي بين هذه التذبذبات ونمط النشاط في حالة الصرع، فإن هذه التذبذبات الفوضوية لا تؤثر على أداء الدماغ. في الواقع، لاحظ العلماء ذبذبات في أجزاء مختلفة من الدماغ في ظل جميع الظروف المختلفة. على سبيل المثال، يمكن لمجموعة من الخلايا العصبية أن تتذبذب في القشرة البصرية بسرعة ٦٠ مرة في الثانية. قد تتذبذب منطقة الحصين (أداة معالجة الذكريات التي تناولناها في الفصل السابق) تذبذُبًا سريعًا في بعض الأحيان، وقد تتذبذب تذبذبًا بطيئًا في أحيان أخرى. تنتج البصلة الشمية، التي تُعالج فيها الروائح، موجاتٍ تتراوح ما بين مرة واحدة في الثانية — بمحاذاة الاستنشاق — إلى مئات المرات. يمكن إيجاد التذبذبات في كل مكانٍ إذا كنت مُهتمًّا باستكشاف الأمر.

يسعد علماء الرياضيات برؤية التذبذبات. وذلك نظرًا لأنه بالنسبة إلى عالم الرياضيات، يمكن التعامل مع التذبذبات. يمثِّل التعبير عن الأنظمة الفوضوية والعشوائية باستخدام المعادلات تحدِّيًا؛ أما الأنظمة الدورية المثالية فسهلة وأنيقة. على مدار آلاف

السنوات، طوَّر علماء الرياضيات أدواتٍ، لا من أجل وصف التذبذبات فحسب، بل بهدف التنبؤ بكيفية تفاعلها، ولتحديدها في الإشارات التي قد لا تبدو — للعين غير المدرَّبة — ذبذباتٍ على الإطلاق.

نانسي كوبيل هي عالمة رياضيات، أو على الأقل اعتادت أن تكون كذلك. كوالدتها وأختها، تخصصت كوبيل في الرياضيات وهي طالبة جامعية. ثم حصلت على الدكتوراه[٥] في الرياضيات من جامعة كاليفورنيا، بيركلي عام ١٩٦٧، وأصبحت أستاذة في الرياضيات في جامعة نورث إيسترن في بوسطن. لكن بعد سنوات من عبور الحدود الفاصلة بين علمَي الرياضيات والأحياء ذهابًا وإيابًا — متناولةً مسائلَ من علم الأحياء لتوليد أفكارٍ للرياضيات — بدأت تشعر بأنها أكثر استقرارًا في مجال الأحياء. وقد عبرت كوبيل عن ذلك في سيرتها الذاتية على النحو الآتي: «بدأ منظوري يتغير، ووجدت نفسي على الأقل مُهتمَّة بالظواهر الفسيولوجية، بالقدر نفسه الذي اهتممت فيه بالمسائل الرياضية التي ولَّدتها هذه الظواهر. لم أتوقف عن التفكير بطريقة رياضية، لكن اهتمامي بالمسائل كان يتضاءل إذا لم أجد لها صلة بشبكات بيولوجية محددة.» كان الكثيرُ من الشبكات البيولوجية التي أثارت اهتمامها شبكاتٍ عصبية، وخلال مسارها المهني درَسَت كل أنواع التذبذبات في الدماغ.

يشير علماء الأعصاب إلى التذبذبات العالية التردُّد باسم «موجات جاما». والسبب في هذا هو أن هانز بيرجر، مخترع جهاز التخطيط الكهربي للدماغ الأصلي، أطلق على الموجات الكبيرة البطيئة التي تَمكَّن من رؤيتها على جهازه الرديء اسم موجات «ألفا»، وأي شيء آخر «بيتا»، وقد حذا حذوه العلماء الذين جاءوا من بعده، وأعطوا الترددات التي وجدوها أحرُفًا يونانية جديدة. تكُون أشعَّةُ جاما، على الرغم من سرعتها، صغيرةً عادة، أو «منخفضة السَّعة» بلغةٍ أكثر تخصصًا. وجودُها، الذي يتم تحديدُه عن طريق

[٥] الأسباب التي دفعت كوبيل للالتحاق بالدراسات العليا كانت فريدة من نوعها بعض الشيء، وهو ما أوضحته: «حين دخلت الكلية لم أكن أفكر في الالتحاق بالدراسات العليا. لكن عندما وصلت لسنة التخرُّج لم أتزوج ولم يكن لديَّ شيءٌ محددٌ لأفعله؛ لذا بدت الدراسات العليا خيارًا جيدًا.» لكن التحيز الجنسي الذي واجهته ربما كان متوقعًا: «كان هناك اعتقادٌ غير معلن، وسائد مع ذلك، يشير إلى أن دراسة النساء للرياضيات أشبه برقص الدببة؛ ربما يمكنهن فعل ذلك لكن دون إجادة، والمحاولة نفسها أشبه بعرضٍ ممتع.»

جهاز تخطيط كهربي حديث للدماغ أو قطب كهربائي في الدماغ، مرتبطٌ بعقل متيقظ ومُنتبه.

عام ٢٠٠٥ توصَّلت كوبيل وزملاؤها إلى تفسيرٍ للطريقة التي تساعد بها ذبذباتُ جاما الدماغَ على التركيز. تنبثق نظريتهم من الفكرة القائلة بأن الخلايا العصبية التي تمثِّل المعلومات التي تنتبه إليها، لا بد أن يكون لها السبق في إطلاق الإشارات العصبية في النشاط المتذبذب. لنفترض أنك تحاول الاستماع إلى مكالمةٍ هاتفيةٍ في وسط غرفة صاخبة. في هذه الحالة، الصوت على الطرف الآخر من الخط — أي الإشارة التي تحاول الانتباه لها — يُنافس جميع الأصوات المشتِّتة للانتباه في الغرفة. في نموذج كوبيل، يُمثَّل الصوت على الطرف الآخر من الخط بمجموعة من الخلايا الاستثارية، وتمثَّل الثرثرة الموجودة في الخلفية بمجموعة أخرى. هاتان المجموعتان كلتاهما تكوِّنان وصلات مع مجموعة مشتركة من الخلايا العصبية المثبِّطة، وفي المقابل تكوِّن مجموعة الخلايا العصبية المثبِّطة وصلات عصبية مع هاتَين المجموعتَين.

من الأهمية بمكانٍ معرفة أن الخلايا العصبية التي تمثِّل «الصوت» — نظرًا لأنه محطُّ الاهتمام — تحصل على مدخلات أكثر بقليل من الخلايا العصبية التي تمثِّل الثرثرة في الخلفية. هذا معناه أن هذه الخلايا ستطلق إشاراتٍ أولًا وبقوة أكبر. إذا أطلقت هذه الخلايا العصبية الممثلة «للصوت» إشارات بشكلٍ منسجم، فسوف تتسبب في زيادة كبيرة وحادة في إطلاق الخلايا العصبية المثبِّطة للإشارات. ستعمل هذه الموجة من التثبيط على تعطيل الخلايا الممثلة للصوت على الطرف الآخر من الخط، والضوضاء في الخلفية. ولهذا السبب، لن تَسنَح للخلايا العصبية الممثلة للضوضاء الموجودة في الخلفية فرصةُ إطلاق إشارات؛ ومن ثم لن تتداخل مع صوت الطرف الآخر من الخط. يبدو الأمر وكأن الخلايا العصبية الممثِّلة للصوت تندفع عبر الباب، ثم تُغلقه في وجه الخلايا العصبية الممثِّلة للضوضاء في الخلفية. وما دامت الخلايا العصبية الممثلة للصوت تستمرُّ في الحصول على مدخلاتٍ أكثر بقليل، فستتكرَّر هذه العملية مرارًا وتكرارًا، متسببةً في حدوث تذبذب. وستضطر الخلايا العصبية الممثلة للضوضاء في الخلفية أن تظلَّ خاملةً كل مرة. ومن ثَم لا يتبقَّى إلا صوتٌ واضح للمتحدث على الطرف الآخر من الخط باعتباره الإشارة الوحيدة المتبقية.

وبعيدًا عن دور التذبذبات في الانتباه، توصَّل العلماء إلى عددٍ لا نهائي من الطرق الأخرى التي تستطيع من خلالها التذبذبات مساعدة الدماغ. هذا يتضمن الاستخدامات

في التنقُّل والذاكرة والحركة. من المفترض أيضًا أن تعمل التذبذبات على تحسين التواصل بين مناطق الدماغ، وتساعد في تنظيم الخلايا العصبية في مجموعاتٍ تعمل على حِدة. علاوة على ذلك، تكثر النظريات المتعلقة بكيفية حدوث خطأ في التذبذبات في أمراضٍ مثل الفصام، والاضطراب ثُنائي القطب، والتوحُّد.

هيمنة التذبذبات قد تجعل الأمر يبدو وكأن أهميتها تُقبل دون شك أو جدال، لكن هذا بعيد عن الصحة. على الرغم من التوصُّل إلى أدوار مختلفة للتذبذبات، لا يزال بعض العلماء يساورهم الشك بشأنها.

ينشأ جزء من القلق عن الخطوة الأولى: كيفية قياس التذبذبات. بدلًا من التسجيل من العديد من الخلايا العصبية في آنٍ واحد، استخدم العديد من الباحثين المهتمِّين بالتذبذبات قياسًا غير مباشر للتذبذبات من السائل المحيط بالخلايا العصبية. على وجه التحديد، عندما تحصل الخلايا العصبية على العديد من المدخلات يتغير تكوين الأيونات في هذا السائل، ويمكن استخدام هذا باعتباره طريقةً بديلة لقياس مستوى النشاط العصبي في مجموعةٍ من الخلايا العصبية. إلا أن العلاقة بين تدفقات الأيونات في هذا السائل ونشاط الخلايا العصبية الفعلي؛ معقدةٌ وغير مفهومةٍ بالكامل. هذا يجعل من الصعب معرفةَ ما إذا كانت التذبذبات التي يجري رصدها تحدث بالفعل أم لا.

يمكن أن يتأثر العلماء أيضًا بالأدوات المتاحة لديهم. أُتيح جهاز التخطيط الكهربي للدماغ منذ قرن من الزمان، وجعل اكتشاف التذبذبات سهلًا، حتى عند البشر؛ إذ كان يمكن إجراء التجارب بعد الظهر على مشاركين في البحث متطوِّعين (عادة ما يكونون طلابًا يدرسون بالجامعة). وكما هو مذكور، تتسم الأدوات الرياضية الخاصة بتحليل التذبذبات، بالقدر نفسه من السهولة وشيوع الاستخدام. وهذا قد يجعل العلماء أكثر مَيلًا إلى بحث هذه الموجات الدماغية، حتى في الحالات التي قد لا تقدم فيها أفضل الإجابات. هذا يذكرنا بمقولةٍ قديمةٍ تُفيد بأنه عندما تكون المطرقة أسهل أداة يتعيَّن علينا استخدامُها، فإننا نتعامل مع كل شيءٍ كما لو كان مِسمارًا.

تتمثل مشكلة أخرى في التأثير، لا سيما حين يتعلق الأمر بالتذبذبات السريعة مثل جاما. إذا تضمَّنت إحدى حالات النشاط في الدماغ موجات جاما أقوى من غيرها، فإن هذا يعني أن مزيدًا من الخلايا العصبية تُطلق إشارات معًا، باعتبارها جزءًا من موجةٍ في هذه الحالة، بدلًا من إطلاق الإشارات بشكلٍ فردي وعشوائي. لكن عندما تأتي هذه الموجات بسرعة كبيرة، فإن كون الخلية العصبية جزءًا من إحدى الموجات يجعلها تُطلق

إشاراتٍ قبل الوقت الذي كانت ستطلق فيه لولا ذلك، أو بعده ببضع ثوانٍ. هل هذا النوع من الدقة الزمنية يُهم فعلًا، أم أن كل ما يُهم هو العدد الإجمالي لجهود الفعل الناتجة؟ لم يُختبَر، بشكلٍ مباشر، الكثير من الفرضيات الأنيقة حول الكيفية التي يمكن أن تساعد بها التذبذبات — ومن الممكن أن يكون من الصعب اختبارها — لذا فإن الإجابات غير معروفة.

أوضح عالم الأعصاب كريس مور في حوار له مع موقع «ساينس ديلي» عام ٢٠١٩: «لطالما كانت موجات جاما موضوعًا كبيرًا للنقاش ... ينظر بعض علماء الأعصاب المرموقين إلى موجات جاما، باعتبارها الساعةَ السحرية الموحدة التي تعمل على التنسيق بين الإشارات بين مختلف أجزاء الدماغ. وثمة علماء أعصاب آخرون على القدر نفسه من المكانة العلمية، ينظرون إلى موجات جاما ظاهريًّا باعتبارها مثل أبخِرة عوادم المحرك؛ تظهر في أثناء تشغيل المحرك، لكنها بالطبع غير مُهمة.»

قد تنتج أبخرة العوادم عندما تتحرك السيارة، لكنها ليست العنصر الذي يحركها. وبالمثل، فإن شبكات الخلايا العصبية قد تنتج تذبذبات أثناء إجراء العمليات الحسابية، لكن يبقى أن نبحث فيما إذا كانت هذه التذبذبات هي التي تتولَّى عملية الحساب.

كما هو مُبَيَّن، يمكن أن ينشأ عن التفاعل بين الخلايا الاستثارية والخلايا المثبِّطة مجموعةٌ متنوعة من أنماط الإطلاق المختلفة. وَضْع إحدى هاتَين القوتَين في مواجهة الأخرى له مَيزات وعيوب. فهو يمنح الشبكة القدرة على الاستجابة بسرعة البرق وتوليد الإيقاعات السلسة اللازمة للنوم. وفي الوقت نفسه، فإنه، بشكلٍ خطير، يضع الدماغ على مقربة من نوبات الصرع ويكوِّن فوضى فعلية. فَهْم مثل هذا النظام المتعددِ الأوجه يمكن أن يمثِّل تحدِّيًا. ولحُسن الحظ، ساعد تعدد الطرق الرياضية — تلك التي طُوِّرت من أجل الفيزياء وعلم الأرصاد الجوية وفهم التذبذبات — على ترويض الطبيعة الجامحة لإطلاق الإشارات العصبية الكهربية.

الفصل السادس

# مراحل الرؤية

شبكات نيوكوجنيترون والشبكات العصبية الالتفافية

مشروع الرؤية الصيفي هو محاولة للاستفادة من عمالتنا الصيفية بطريقةٍ فعالة، في بناء جزءٍ مهم من النظام البصري. وقع الاختيار على هذه المهمة المحددة جزئيًّا؛ لأنه يمكن تقسيمها إلى مسائل فرعية، وهو ما سيسمح للأفراد بالعمل بشكلٍ فردي، وفي الوقت نفسه سيتيح لهم المشاركة في بناء نظام مركَّب بما يكفي، ليكون علامة مميزة في تطوُّر «التعرُّف على الأنماط».

مذكرة الرؤية رقم ١٠٠ من مجموعة
الذكاء الاصطناعي التابع لمعهد
ماساتشوستس للتكنولوجيا، عام ١٩٦٦

كان من المقدَّر أن يكون صيف عام ١٩٦٦ هو الصيف الذي تحلُّ فيه مجموعةٌ من الأساتذة في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، مشكلةَ الرؤية الاصطناعية. كانت «العمالة الصيفية»، التي خطط هؤلاء لاستخدامها بكفاءة لهذا المشروع، عبارة عن مجموعة مكوَّنة من ١٢ طالبًا جامعيًّا أو نحو ذلك. في المذكرة التي تستعرض خطة المشروع، قدَّم الأساتذة العديد من المهارات المحددة التي أرادوها في نظام الكمبيوتر الذي يطوِّره الطلاب. لا بد أن يكون قادرًا على تحديد الملمس والإضاءة في الصورة، وتحديد الأجزاء الموجودة في مقدمة الصورة، وفصلها عن الأجزاء الموجودة في الخلفية، وتحديد أي عناصر موجودة. وَصَف

أحد الأساتذة[1] الأهداف، بطريقة أكثر تلقائية، على أنها «ربط الكاميرا بالكمبيوتر، وجعل الكمبيوتر يصِف ما يراه».

لم تكتمل أهداف هذا المشروع ذلك الصيف. ولا الصيف الذي يليه. ولا بعد ذلك بعدة سنوات. بعض المشكلات الأساسية التي طُرحت في وصف المشروع الصيفي ظلت مسائل قائمة إلى يومنا هذا. لم تكن الغطرسة الظاهرة في تلك المذكرة مثيرةً للدهشة في ذلك الوقت. فكما ناقشنا في الفصل الثالث، شهدت فترة ستينيات القرن العشرين طفرة في القدرات الحاسوبية، وهي التي أدَّت بالتبعية إلى رفع سقف الآمال الساذجة، حول أَتْمَتَة حتى لأكثر المهام تعقيدًا. لو كان بإمكان أجهزة الكمبيوتر فعلُ أي شيءٍ يُطلب منها الآن، لكان الأمر سيتعلق بمعرفة ما يتعين طلبه فحسب. بتناول شيء بسيط وفوري مثل عملية الرؤية، ما مدى صعوبة فعل هذا؟

الإجابة صعبة للغاية. عملية المعالجة البصرية — من خلال دخول الضوء إلى أعيننا واستيعاب العالم الخارجي الذي يعكسه الضوء — تُعد عملية معقدة للغاية. بعض العبارات الشائعة مثل «أمام عينَيك مباشرة» أو «على مرأى الجميع» تُعد خادعة؛ إذ تزعم أن عملية الرؤية تحدث دونَ مجهود. فهي تطمس التحديات البارزة التي تقف في وجه حتى المدخلات البصرية الأساسية بالنسبة إلى الدماغ. أيُّ تصور لعملية الرؤية على أنها عملية بسيطة هو مجرد وَهْم، تكوَّن لدينا بصعوبةٍ على مدار ملايين السنين من التطور.

تُعد مسألة الرؤية مسألة مشابهة جدًّا للهندسة العكسية. في مؤخرة العين، أي الشبكية، توجد صفيحة مسطحة من الخلايا تُسمى مستقبلات ضوئية. هذه الخلايا حساسة للضوء. كل خلية توضِّح ما إذا كان هناك ضوء يضربها أم لا (وربما تشير إلى الطول الموجي) في كل لحظة من خلال إرسال إشارة في صورة نشاط كهربي. هذا النمط من النشاط المتأرجح ثنائي الأبعاد يمثِّل المعلومات الوحيدة التي يُسمَح للدماغ من خلالها بإعادة بناء العالم ثلاثي الأبعاد أمامه.

بل إن أمرًا ببساطةِ إيجاد كرسي في غرفة هو مسعًى شاقٌّ عمليًّا. يمكن أن تكون الكراسي بأشكال وألوان عديدة. ويمكنها أيضًا أن تكون في الجوار أو بعيدة، وهو ما

[1] اتَّضح أن هذا الأستاذ هو مارفن مينسكي، والأستاذ الذي كتب المذكِّرة هو سيمور بابيرت، وكلاهما من الأشخاص الأساسيين الذين ورد ذكرهم في الفصل الثالث. كما سترى بالفعل، ثمة أشخاص مشتركون وموضوعات مشتركة بين تاريخ الشبكات العصبية الاصطناعية والرؤية الاصطناعية.

يجعل انعكاسها على الشبكية أكبر أو أصغر. هل الإضاءة ساطعة في الغرفة أم معتِمة؟ ما الاتجاه الذي يأتي منه الضوء؟ هل يتجه الكرسي نحوك أم بعيدًا عنك؟ كل هذه العوامل تؤثر على الطريقة الدقيقة التي تصطدم بها فوتونات الضوء بالشبكية. لكن تريليونات من أنماط الضوء المختلفة قد تعني الشيء نفسه في النهاية، وهو أن الكرسي هناك. بطريقة ما، يجد النظام البصري طريقة للتعامل مع مسألة ربط العديد من قيم المدخلات بالمخرَج نفسه في أقل من عُشر ثانية.

في الوقت الذي كان طلاب معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا يعملون من أجل منح أجهزة الكمبيوتر هِبةَ الإبصار، كان علماء وظائف الأعضاء يستخدمون أدواتهم الخاصة لحل ألغاز عملية الإبصار. بدأ هذا بتسجيل النشاط العصبي من الشبكية، وانتقل إلى الخلايا العصبية في أنحاء الدماغ. ونظرًا إلى أن ما يُقدَّر بنحو ٣٠ في المائة من القشرة الدماغية للرئيسيات يلعب دورًا ما في المعالجة البصرية، لم تكن هذه بالمهمة الصغيرة.[٢] في منتصف القرن العشرين، كان العديد من العلماء الذين يقومون بهذه التجارب يستقرون في منطقة بوسطن (العديد منهم في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا أو شَماله مباشرة، في هارفارد) وكانوا يجمعون الكثير من البيانات التي يحتاجون إليها لفَهْمها بطريقة ما أو بأخرى.

ربما يرجع التعاون بين علماء الأعصاب وعلماء الكمبيوتر إلى التقارب المادي بينهما. وربما كان هذا اعترافًا ضمنيًّا بالتحدي الهائل الذي وضعه كل طرف لنفسه. وربما كانت المجتمعات في الأيام الأولى أصغر من أن تنعزل وتخلو إلى نفسها. أيًّا كان السبب وراء ذلك، فقد صاغ علماء الأعصاب وعلماء الكمبيوتر تاريخًا طويلًا من التعاون في محاولاتهم لفهم الأسئلة الأساسية الخاصة بالرؤية. كان لدراسة الرؤية — كيفية إيجاد أنماط في نقاط من الضوء — من الناحية البيولوجية تأثيرٌ كبيرٌ على مجال الذكاء الاصطناعي، والعكس صحيح. إلا أن هذا التناغُم لم يَسِر على وتيرةٍ واحدة؛ فعندما شرع علم الكمبيوتر في الاستعانة بطرقٍ مفيدةٍ لكنها لا تشبه الدماغ، تباعد المجالان. وعندما تعمَّق علماء الأعصاب في التفاصيل الجوهرية للخلايا؛ في المواد الكيميائية والبروتينات التي تنفِّذ الرؤية

[٢] تبدو الرئيسيات فريدة من نوعها في هذا الأمر حقًّا. فأدمغة القوارض، على سبيل المثال، تميل أكثر إلى معالجة الرائحة.

البيولوجية، اتَّسعت المسافة بينهم وبين علماء الكمبيوتر أكثر. لكن آثار التأثير المتبادل لا يمكن إنكارها، ويمكن رؤيتها بوضوحٍ في أحدث النماذج والتقنيات.

جاءت المحاولات الأولى لأتمتة عملية الرؤية قبل أجهزة الكمبيوتر الحديثة. وعلى الرغم من تنفيذ هذه الأفكار في صورة أدوات ميكانيكية، فإن بعض الأفكار التي شغَّلت هذه الآلات هيأت المجال للظهور اللاحق للرؤية الحاسوبية. تمثَّلت إحدى هذه الأفكار في «المطابقة بالقوالب».

في عشرينيات القرن العشرين، شرع الكيميائي والمهندس الروسي إيمانويل جولدبرج في حل مشكلةٍ كانت تواجه البنوك والمكاتب الأخرى، أثناء البحث في أنظمة الملفات للوثائق الخاصة بها. في ذلك الوقت، كانت المستندات مخزَّنة على ميكروفيلم — شريط فيلمي بمقاس ٣٥ ملم، يحتوي على صُوَر دقيقة لمستندات يمكن عرضها على شاشة أكبر للقراءة — ترتيب المستندات على الشريط الفيلمي لم يكُن له علاقةٌ بمحتواها؛ ومن ثَم فإن العثور على المستند المطلوب — كشيكٍ مُلغًى من عميل بنكٍ معيَّن — انطوى على الكثير من البحث غير المنظم. اتجه جولدبرج إلى شكل خام أو بدائي من «معالجة الصُّوَر» لأتمتة هذه العملية.

بموجب خطة جولدبرج، تعيَّن على الصرَّافين الذين يُدخلون شيكًا جديدًا إلى نظام تخزين الملفات تمييزُه برمزٍ محدد يشير إلى محتوياته. على سبيل المثال، ثلاث نقاط سوداء في صفٍّ كانت تعني أن اسم العميل يبدأ بحرف الألف، وثلاث نقاط على شكل مثلث كانت تعني أن الاسم يبدأ بحرف الباء، وما إلى ذلك. إذن، إذا أراد صرَّافٌ إيجاد آخر شيك سلَّمه السيد بيركشاير، على سبيل المثال، فما عليه إلا إيجاد شيك موسوم بمثلث. وبهذا كان نمط المثلث هو القالب وكان هدف جهاز جولدبرج هو مطابقته.

ماديًّا، أخذت هذه القوالب شكل بطاقات بها ثقوب. لذا، عند البحث عن مستندات السيد بيركشاير، سيأخذ الصرَّاف البطاقة التي تحتوي على ثلاثة ثقوبٍ على شكل مثلث، ويضعها بين شريط الميكروفيلم وضوء المصباح. سيُسحَب كل مستند لمطابقته بالبطاقة، لجعل الضوء يسقط على الثقوب الموجودة على البطاقة، ثم يسقط على الفيلم نفسه. تكتشف خليةٌ ضوئية مثبَّتة خلف الفيلم أيَّ ضوء يمر من خلال الثقوب، وتُرسِل إشاراتٍ إلى بقية الجهاز. بالنسبة إلى معظم المستندات سيمُر بعض الضوء؛ لأن الرموز الموجودة على الفيلم لا تتطابق مع الثقوب الموجودة على البطاقة. لكن، عندما يظهر المستند المطلوب،

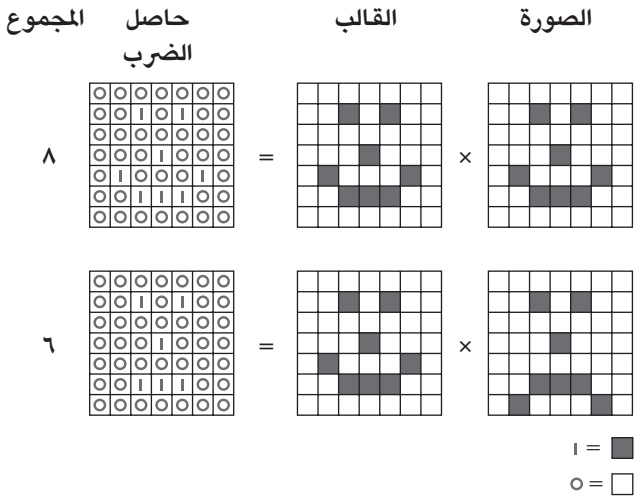
فإن الضوء الساطع فوق البطاقة سيحجبه نمط النقاط السوداء على الفيلم تمامًا. حجب النقاط السوداء الصغيرة للضوء يعني عدم سقوط أي ضوء على الخلية الضوئية، وهذا يوضح لبقية الجهاز وللصراف أنه عُثِر على المستند المطابق.

تطلَّب منهج جولدبرج أن يعرف الصرَّاف مقدمًا الرمز الذي يبحث عنه بالضبط، ويحصل على البطاقة التي تطابقُه. على الرغم من بدائية أسلوب المطابقة هذا، فإنه أصبح المنهج السائد في جانبٍ كبير من تاريخ الرؤية الاصطناعية. عندما ظهرت أجهزة الكمبيوتر في المشهد، انتقلت القوالب من الصورة المادية إلى الصورة الرقمية.

في الكمبيوتر، تُمثَّل الصورُ على هيئة شبكة من قِيَم البِكسِل. كل قيمة من قيم البكسل عبارة عن عدد يشير إلى كثافة اللون في المنطقة المربعة الصغيرة التي تمثلها القيمة في الصورة.[٣] في العالم الرقمي، القالب أيضًا عبارة عن شبكة من الأعداد تحدد النمط المطلوب. لذا فإن القالب الخاص بثلاث نقاط على شكل مثلث قد يكون شبكة مكونة في أغلبها من الأصفار، باستثناء ثلاثة بكسلات بالقيمة واحد موضوعة بدقة. استُبدل دور الضوء الساطع الذي يمر عبر البطاقة القالب في جهاز جولدبرج، وحل محله في الكمبيوتر عملية حسابية، وهي الضرب. إذا ضُربت كل قيمة من قيم البكسل في الصورة في القيمة الموجودة في الموضع نفسه في القالب، فستخبرنا النتيجة بما إذا كانت الصورة مطابِقة للقالب أم لا.

لِنقُل إننا نبحث عن وجه مبتسم في صورة باللَّونَين الأبيض والأسود (حيث تكون قيمة وحدات البكسل المقابلة للون الأسود واحدًا، وقيمة وحدات البكسل المقابلة للون الأبيض صفرًا). بإعطائنا قالبًا للوجه، يمكننا مقارنته بالصورة من خلال عملية الضرب. إذا كانت الصورة بالفعل تحتوي على الوجه الذي نبحث عنه، فإن القيم التي يتكوَّن منها القالب ستكون مشابهةً جدًّا للقيم الموجودة في الصورة. ومن ثم، ستُضرب الأصفار الموجودة في القالب في الأصفار الموجودة في الصورة، كما ستُضرب القيم المساوية للواحد في القالب في القيم المساوية للواحد في الصورة. وعند جَمْع القيم الناتجة من هذا الضرب، نحصل على عدد وحدات البكسل السوداء التي تتطابق في كلٍّ من القالب والصورة، وهي

[٣] فعليًّا تُحدَّد وحدات البكسل في الصورة الملونة، من خلال ثلاثة أعدادٍ تقابِل درجات كثافة العناصر الحمراء والخضراء والزرقاء. من أجل التبسيط، سنتحدث عن وحدات البكسل باعتبارها عددًا مفردًا، على الرغم من أن هذا لا ينطبق إلا على الصور ذات التدرُّجات الرمادية.




شكل ٦-١

ستكون في هذه الحالة كثيرة. إذا كانت الصورة المعطاة لنا لوجه عابس بدلًا من ذلك، فإن بعض وحدات البكسل الموجودة عند الفم في الصورة لن تتطابق مع القالب. في هذه الحالة، ستُضرب الأصفار في القيم المساوية للواحد في الصورة والعكس صحيح. ونظرًا لأن حاصل الضرب في مواضع وحدات البكسل هذه سيساوي صفرًا، لن يكون عدد وحدات البكسل السوداء التي تتطابق في كلٍّ من القالب والصورة كبيرًا. بهذه الطريقة، فإن عملية الجمع البسيطة لوحدات البكسل الناتجة عن الضرب تَقيس مدى تطابق الصورة والقالب.

حظِيَت هذه الطريقة باستخدام واسع النطاق في العديد من الصناعات المختلفة. استُخدِمت القوالب لمعرفة عدد الأشخاص الموجودين في حشد، من خلال التعرُّف على الوجوه في صورة. حُددت مواقع المعالم الجغرافية المعروفة في صور الأقمار الاصطناعية من خلال القوالب. يمكن تتبُّع رقم السيارة التي تمر عبر أحد التقاطعات وطرازها أيضًا. من خلال المطابَقة بالقوالب، كل ما يتعيَّن علينا فعله هو تحديد ما نريده، وستخبرنا عملية الضرب بما إذا كان هناك تطابُقٌ أم لا.

تخيَّل ملعبًا — كالذي تُشاهد فيه مباريات كرة القدم — لكن في هذا الملعب، بدلًا من وجود جماهير تصيح، تمتلئ المدرجات بشياطينَ تصيح. لكن ما يهتفون من أجله ليس لاعبين في أرضية الملعب، وإنما صورة. على وجه التحديد، كلٌّ من هذه الشياطين له حَرف مفضَّل من الحروف الأبجدية، وعندما يرى شيئًا يشبه هذا الحرف في أرضية الملعب يهتف. وكلما كان الهتاف أعلى كانت الصورة الموجودة في أرضية الملعب مشابهة للحرف المفضل للشيطان. في المقصورة العليا يوجد شيطان آخر. هذا الشيطان لا ينظر إلى الملعب ولا يهتف بنفسه، لكنه فقط يلاحظ الشياطين الأخرى في المدرَّج. دوره هو تحديد الشيطان الذي يهتف بأعلى صوت، ويقرر أنه لا بد أن الصورة الموجودة في أرضية الملعب هي الحرف المفضل لدى الشيطان.

هكذا وصف أوليفر سيلفريدج عملية المطابقة بالقالب في مؤتمر عُقد عام ١٩٥٨. كان سيلفريدج عالم رياضيات، وعالم كمبيوتر، ومديرًا مساعدًا في مختبرات لينكولن في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، وهو مركز بحثي يركز على تطبيقات الأمن القومي التكنولوجية. لم ينشر سيلفريدج الكثير من الأوراق البحثية بنفسه. كما أنه لم يستكمل قَطُّ أطروحة الدكتوراه الخاصة به (بدلًا من ذلك، انتهى به الأمر بكتابة العديد من كتب الأطفال، من المفترض أنها تحتوي على عدد أقل من الشياطين). على الرغم من قِلة إنتاجه الأكاديمي، تسللت أفكاره إلى المجتمع البحثي على نحوٍ كبير بفضل دوائر علاقاته. بعد حصول سيلفريدج على درجة البكالوريوس في الرياضيات من معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، وهو لا يزال في التاسعة عشرة من عمره، أشرف عليه في أبحاث الدكتوراه عالم الرياضيات البارز نوربرت وينر وظل على تواصُل معه. واصل سيلفريدج أيضًا الإشراف على مارفن مينسكي، الباحث البارز في مجال الذكاء الاصطناعي الذي تناولناه في الفصل الثالث. عندما كان سيلفريدج طالبَ دراسات عليا، كان صديقًا لوارن ماكولك، وعاش فترةً مع والتر بيتس (ستتذكر عالِمَي الأعصاب هذَين من الفصل الثالث أيضًا). استفاد سيلفريدج من جَعْل أفكاره تختلط بأفكار العلماء البارزين المحيطين به؛ كي تنضُج وتتطور.

لربط تشبيه سيلفريدج الفريد من نوعه بمفهوم المطابقة بالقالب، ما علينا إلا اعتبار كل شيطان يحمل شبكة من الأعداد التي تمثِّل شكل الحرف الذي يفضله. ويضرب الشبكة التي يحملها في الصورة، وتجمع حواصل الضرب (على النحو الموصوف أعلاه) ويهتف بدرجة صوت يحددها المجموع. لم يقدم سيلفريدج تفسيرًا وافيًا لسبب اختياره لهذا

الوصف الشيطاني للمعالجة البصرية. تعليقه الوحيد على ذلك جاء على النحو الآتي: «لن نعتذر بشأن الاستخدام المتكرر لمصطلحات تفيد التشخيص والتجسيد. فهذه المصطلحات تساعدنا على وصف أفكارنا».[٤]

معظم الأفكار التي وردت في العرض التقديمي لسيلفريدج كانت بالفعل حول كيف أن منهج المطابقة بالقالب كان مشُوبًا بالعيوب. فالشياطين — التي كان كلٌّ منها يتحقَّق بشكلٍ فردي مما إذا كان حرفُه المفضل يظهر في الصورة الموجودة في أرضية الملعب أم لا — لم تكن على درجةٍ كبيرةٍ من الكفاءة. أجرى كلٌّ منهم عملياتِه الحسابية المنفصلة تمامًا، إلا أنه لم يكن من الضروري أن يسير الأمر على هذا النحو. العديد من الأشكال التي قد ينظر إليها الشيطان أثناء بحثه عن الحرف المفضَّل لديه؛ قد تستخدمها شياطينُ أخرى. على سبيل المثال، الشيطان الذي يفضل حرف A وذلك الذي يفضل حرف H سيبحثان عن شكل الشرطة الأفقية. إذن، لم لا نقدِّم مجموعةً منفصلةً من الشياطين تطابق قوالبهم وصرخاتهم سماتٍ أساسيةً أكثر للصورة؛ مثل النقاط والشرطات الأفقية والخطوط الرأسية والخطوط المائلة ... إلخ. وبذلك ستستمع الشياطين التي تفضل أحرفًا محددة للشياطين في هذه المجموعة، بدلًا من النظر إلى الصور بأنفسهم، ثم تحدد مقدار الهتاف الذي ستُطلقه بناءً على ما إذا كان يُصاح بالأشكال الأساسية المكونة لحرفها المفضَّل أم لا.

من الأسفل للأعلى، حدد سيلفريدج نمطًا جديدًا للملعب يحتوي على ثلاثة أنواع من الشياطين: «الحاسوبية» (تلك التي تنظر للصورة وتهتف بالأشكال الأساسية)، و«المعرفية» (تلك التي تستمع إلى الشياطين الحاسوبية وتهتف بالأحرف)، و«صانع القرار» (وهو الشيطان الذي يستمع إلى الشياطين الإدراكية ويقرر الحرف الموجود). الاسم الذي أعطاه سيلفريدج لهذا النموذج — هذه الشياطين الهاتفة المُكدَّسة — اسم «بنديمونيوم» (عاصمة الجحيم).[٥]

بصرف النظر عن هذه التسمية الشائنة، فإن أفكار سيلفريدج البديهية حول المعالجة البصرية قدمت نظرة متعمقة. على الرغم من أن المطابقة بالقالب من الناحية المفاهيمية

[٤] ومع ذلك فإن سيلفريدج خلال رده على تعليق من أحد زملائه حول الأمر قال: «جميعنا نرتكب خطيئة آدم، ونأكل من الشجرة المحرمة، كما أن الحكايات الرمزية الخاصة بالشياطين قديمة جدًّا بالفعل.»

[٥] مشتقة من اليونانية، وتعني «كل الشياطين»، وقد قدم جون ميلتون الاسم في «الفردوس المفقود».

تُعد بسيطة، فإنها عمليًّا صعبة. يزداد عدد القوالب اللازمة مع زيادة عدد العناصر التي تريد أن تكون قادرًا على التعرف عليها. إذا وجبت مقارنة كل صورة بكل مرشح، فهذا يعني الكثير من العمليات الحسابية. علاوة على ذلك، لا بد أن تكون القوالب مطابقة تقريبًا للصورة. لكن نظرًا لأن هناك عددًا ضخمًا من أنماط الضوء التي قد يكوِّنها الجسم الواحد، وتلتقطها شبكية العين أو عدسة الكاميرا، من المستحيل تقريبًا معرفة الشكل الذي لا بد أن يبدو عليه كل بِكسِل عند وجود جسم معين. هذا يجعل تصميم القوالب عمليةً في غاية الصعوبة لأي نمط فيما عدا الأنماط الأبسط.

هذه المشكلات تجعل من طريقة المطابقة بالقالب تمثِّل تحدِّيًا لكلٍّ من الأنظمة البصرية الاصطناعية والدماغ. لكن الأفكار التي عُرضت في نموذج «بنديمونيوم» تُمثِّل منهجًا أوسع نطاقًا من حيث التوزيع، وأكثر مشاركة، والسبب في ذلك هو أن الميزات التي تحددها الشياطين الحاسوبية تشترك مع شياطين الإدراك. هذا المنهج هرمي أيضًا. أي إن نموذج «بنديمونيوم» يُقسِّم مسألة الرؤية إلى مرحلتَين؛ أولًا: النظر إلى الأشياء البسيطة، ثانيًا: النظر إلى الأشياء الأكثر تعقيدًا.

معًا، تجعل هذه الخواصُّ النظام أكثر مرونة بشكل عام. إذا كان النموذج مُعَدًّا للتعرف على النصف الأول من الأحرف الأبجدية، على سبيل المثال، فسيكون في وضع جيد يتيح التعرُّف على البقية. ويرجع ذلك إلى أن الشياطين الحاسوبية الموجودة في المستوى الأدنى ستكون بالفعل على دراية بأنواع الأشكال الأساسية التي تتكون منها الأحرف. الشيطان المعرفي الذي يبحث عن حرف جديد لن يتعيَّن عليه سوى تحديد الطريقة الصحيحة للاستماع إلى الشياطين في المستوى الأدنى. بهذه الطريقة، تعمل السمات الأساسية بوصفها مجموعةً من المفردات — أو أحجار الأساس — التي تُدمج معًا ويُعاد دمجها لاكتشاف أنماط معقدة إضافية. من دون هذه البِنية الهرمية ووجود سمات أساسية مشتركة بين الأحرف في المستوى الأدنى من النموذج، سيتعين على منهج المطابقة بالقوالب إنتاج قالب جديد لكل حرف من البداية.

طرَح تصميم «بنديمونيوم» بعض الأسئلة. على سبيل المثال، كيف يعرف كل شيطان حاسوبي الشكل الأساسي الذي سيهتف به؟ وكيف ستعرف الشياطين المعرفية لمن سيتعيَّن عليها الاستماع؟ اقترح سيلفريدج أن النظام يتعلم إجابات هذه الأسئلة من خلال المحاولة والخطأ. على سبيل المثال، إذا أسفر تعديل الكيفية التي يستمع بها الشيطان المحب للحرف A إلى الشياطين الموجودة أسفله؛ عن تمكينه من التعرُّف على الحرف A، فإنه يُبقي على هذه التغييرات، وبخلاف ذلك لا يفعل، وإنما يجرب شيئًا جديدًا. أو إذا كانت

إضافة شيطان حاسوبي ليهتف بنمط أساسي جديد تُحسِّن من أداء النظام بالكامل في التعرُّف على الأحرف، فإن هذا الشيطان الجديد يبقى، وبخلاف ذلك يُستبعد. هذه عملية شاقَّة بالفعل، كما أن نجاحها ليس مضمونًا، لكن عند نجاحها يكون لها التأثير المرغوب فيه، المتمثل في تكوين نظامٍ مخصصٍ — تلقائيًّا — لنوع العناصر التي يتعيَّن عليه التعرُّف عليها. الخطوط والعلامات التي تتكون منها الرموز في الأبجدية اليابانية، على سبيل المثال، تختلف عن تلك التي تتكون منها الأبجدية الإنجليزية. النظام الذي يتعلم سيكتشف الأنماط الأساسية المختلفة لكلٍّ منها. لن تكون هناك حاجة لمعرفة مُسبقة أو متخصصة، كل ما عليك فعله هو أن تدع النموذج يتولى المهمة.

انبهر عالم الكمبيوتر ليونارد أور بأفكار سيلفريدج وزملائه، لدرجة أنه أراد أن ينشر عملهم على نطاقٍ واسع. ففي عام ١٩٦٣ كتب في دورية «سايكولوجيكال بوليتين» لجمهور من علماء النفس حول الخطوات الواسعة التي خطاها علماء الكمبيوتر، والتقدم الذي أحرزوه بشأن نظام الرؤية في الكمبيوتر. في مقالة له بعنوان ««التعرُّف على الأنماط» أجهزة الكمبيوتر باعتبارها نماذج لتصور الأشكال»، أشار إلى أن نماذج العصر وصلت إلى مرحلةٍ يمكنها فيها اقتراح تجارب فسيولوجية ونفسية، حتى إنه حذَّر من أنه «سيكون من المؤسف ألَّا يلعب علماء النفس أي دورٍ في هذا التطور النظري لعلمهم.» هذه المقالة بمثابة دليلٍ مادي على العلاقة المتشابكة الموجودة بين المجالَين على الدوام. إلا أنه لم تكن هناك حاجةٌ دائمًا لمثل هذه المناشدات الصريحة من أجل التعاون. في بعض الأحيان كانت العلاقات الفردية كافيةً بين أشخاصٍ من المجالَين.

كان جيروم ليتفين عالمَ أعصاب وطبيبًا نفسيًّا من شيكاغو، إلينوي. كان أيضًا صديقًا لسيلفريدج؛ بحكم أنه كان يشاركه وبيتس المنزل أثناء شبابه. أراد ليتفين، الذي كان يصف نفسه بـ «القذر زائد الوزن»، أن يصبح شاعرًا، لكنه أصبح طبيبًا نزولًا عند رغبة أمه. كان أقصى عمل متمرد أقدم عليه هو ترك ممارسة الطب من حين لآخر؛ من أجل الانخراط في البحث العلمي.

في خمسينيات القرن العشرين، عزم ليتفين — الذي تأثَّر بالعمل الذي أسهم به صديقه وشريكُه في السكن — على البحث عن الخلايا العصبية التي استجابَت للسمات الأساسية — أي الأشياء التي تهتف بها الشياطين الحاسوبية. الحيوان الذي اختار دراسته هو الضفدع. تستخدم الضفادع حاسة الإبصار في الغالب لإصدار استجاباتٍ انعكاسية سريعة للفريسة أو المفترسات، ومن ثم فإن نظامها البصري بسيط نسبيًّا.

داخل الشبكية، ترسل المستقبلات الضوئية الكاشفة للضوء معلوماتها لمجموعة أخرى من الخلايا تُسمى الخلايا العقدية. كل مستقبلٍ ضوئي يتصل بالعديد من الخلايا العقدية، وكل خلية عقدية تحصل على مدخلاتٍ من العديد من المستقبلات الضوئية. لكن بشكل حاسم، كل هذه المدخلات تأتي من منطقة محدودة من الفراغ. هذا يجعل الخلية العقدية الواحدة لا تستجيب إلا للضوء الذي يدخل إلى الشبكية في موضع محدد، وكل خلية لها موضع مفضل خاص بها.

عند هذه المرحلة، لم يُفترض أن تؤدي الخلايا العقدية الكثير من العمليات الحسابية بنفسها. فقد كانت تُعتبر بمثابة مُرحِّل؛ كل ما تفعله هو إرسال المعلومات بشأن نشاط المستقبل الضوئي إلى الدماغ مثل ساعي البريد. كانت مثل هذه الصورة تتناسب مع المعالجة البصرية من منظور المطابقة بالقوالب. فإذا كان دور الدماغ هو مقارنة المعلومات البصرية الواردة من العين بمجموعة من القوالب المخزنة، فلن يرغب في أن تُشوَّه هذه المعلومات بأي طريقةٍ من جانب الخلايا العقدية. أما إذا كانت الخلايا العقدية جزءًا من تسلسل — حيث يلعب كل مستوًى دورًا صغيرًا في التعرف النهائي على العناصر المعقَّدة — فلا بد أن تكون هذه الخلايا متخصصة في تحديد الأنماط البصرية الأولية أو الأساسية. وبدلًا من ترحيل المعلومات كما هي تمامًا، يتعين عليها معالجة هذه المعلومات وإعادة تقديمها.

وجد ليتفين — من خلال تسجيل نشاط هذه الخلايا العقدية، وعرض جميع أنواع الأجسام المتحركة والأنماط على الضفدع — أن نظرية التسلسل الهرمي صحيحة. في الواقع، في ورقة بحثية نُشرت عام ١٩٥٩ تحت عنوان «ما تقوله عين الضفدع لدماغه»، وصف ليتفين والمؤلفون المشاركون في الورقة أربعة أنواع مختلفة من الخلايا العقدية، يستجيب كلٌّ منها لنمطٍ بسيط مختلف. بعضها استجاب للحركات الكبيرة السريعة، وبعضها استجاب عند تحول الضوء إلى ظلام، وبعضها استجاب للأجسام المنحنية التي لها حركة مشوشة وغير منتظمة. فئات الاستجابة هذه أثبتَت أن الخلايا العقدية مصممةٌ خصوصًا للتعرُّف على مختلف الأنماط الأساسية. لم تتَّسق هذه النتائج مع ملاحظات سيلفريدج الخاصة بكواشف السمات الأساسية فحسب؛ بل دعمت الفكرة التي تفيد بأن هذه السمات تختص بنوع محدد من العناصر التي يحتاج النظام إلى التعرُّف عليها. على سبيل المثال، الفئة الأخيرة من الخلايا استجابت بطريقةٍ أفضل، عندما تحرك جسم صغير قاتم بسرعة وعلى نحوٍ متقطع على خلفية ثابتة. بعد وصف ذلك في الورقة البحثية،

علَّق ليتفين بالآتي: «هل يمكن للمرء أن يصف بشكلٍ أفضل نظامًا لاكتشاف خطأ يمكن الوصول إليه؟»

كانت أفكار سيلفريدج تثبت أنها صحيحة. ومع النتيجة التي توصل إليها ليتفين في الضفادع، بدأ مجتمع العلماء والباحثين في تصور الجهاز البصري، باعتباره مجموعةً من الشياطين أكثر من تصوُّره على أنه مخزن من البطاقات القوالب.

بالتزامن مع عمل ليتفين تقريبًا، كان هناك طبيبان في مدرسة الطب بجامعة جونز هوبكينز في مدينة بَالْتِيمور يستكشفان نظام الرؤية لدى القطط. النظام البصري لدى القطط أقرب إلى نظامنا البصري، إذا ما قُورن بالنظام البصري للضفادع. فهو مكلَّف بمسائل صعبةٍ تتعلق بتتبُّع الفريسة والتنقُّل في البيئة؛ ومن ثم فهو أكثر تعقيدًا. وعليه، فإن عمل النظام البصري يمتد ليشمل العديد من مناطق الدماغ، والمنطقة التي ركَّز عليها الطبيبان ديفيد هوبل[٦] وتورستن فيزل هي القشرة البصرية الأولية. تُمثِّل هذه المنطقة الموجودة في مؤخرة الدماغ واحدة من المراحل المبكرة للمعالجة البصرية في الثدييات؛ فهي تتلقى المدخلات من منطقة أخرى — المهاد — وهي تحصل بدورها على المدخلات من الشبكية نفسها.

عكفت الجهود البحثية السابقة على دراسة الآلية التي تتصرف بها الخلايا العصبية في المهاد والشبكية لدى القطط. هذه الخلايا تميل للاستجابة بشكلٍ أفضل للنقاط البسيطة؛ هذه النقاط البسيطة تكون إما مساحة صغيرة من الضوء محاطة بالظلام، وإما مساحة مظلمة صغيرة محاطة بهالةٍ من الضوء. وكما هي الحال في الضفدع، تحتاج كل خليةٍ عصبيةٍ إلى أن تكون النقطة في موضع محدَّد كي تستجيب.

تمكَّن هوبل وفيزل من الحصول على أداة لإنتاج النقاط في مواضع مختلفة لاستكشاف استجابات الشبكية. إذن، هذه هي الأداة التي استخدماها، حتى وهما يدرسان مناطق الدماغ الأبعد عن الشبكية. تضمنت طريقة عرض النقاط تحريك قطعة صغيرة من الزجاج، أو لوح معدني بأشكالٍ مختلفةٍ على شاشة أمام العين. استخدم هوبل وفيزل

[٦] كان هوبل بالفعل مُهتمًّا بالرياضيات والفيزياء، وقُبِل في برنامج دكتوراه في الفيزياء بالتزامن مع قبوله في مدرسة الطب. انتظر هوبل، الذي كان ممزقًا بالفعل بين الخيارَين، لآخر يومٍ ممكن كي يحسم أمره ويتخذ القرار.

هذه الطريقة لعرض شريحةٍ من النقاط تلوَ الأخرى على الهِرِّ الذي تُجرى عليه التجربة؛ بينما كانا يقيسان نشاط الخلية العصبية في القشرة البصرية الأولية. لكن النقاط لم تؤثر على الخلية العصبية، لم تطلق الخلية العصبية أي إشاراتٍ استجابة للشرائح. بعد ذلك، لاحظ القائمان بالتجربة أمرًا غريبًا؛ في بعض الأحيان لا تستجيب الخلايا العصبية للشرائح نفسها، بل لتغييرها. في أثناء إزالة صفيحة ووضع أخرى مكانها، يتحرك ظل حافة الصفيحة المعدنية أو الزجاجية عند تحريكها ويعبر إلى شبكية القط. نتج عن ذلك تكوين خطٍّ متحركٍ حفَّز الخلية العصبية على نحوٍ موثوقٍ في القشرة البصرية الأولية. وبهذا يكون قد تحقق واحدٌ من أبرز الاكتشافات في مجال علم الأعصاب عن طريق الصدفة تقريبًا.

بعد عقود، علَّق هوبل على القدرة على الاكتشاف مصادفةً قائلًا: «في مرحلة مبكرة معينة من تاريخ العلم، كان من الممكن أن يؤدي بعض الإهمال أو عدم الدقة إلى اكتشافات ضخمة.» لكن هذه المرحلة ولَّت سريعًا. وبحلول عام ١٩٦٠، نقل هوبل وفيزل مشروعهما البحثي إلى بوسطن؛ للمساعدة في تأسيس قسم علم الأحياء العصبي في جامعة هارفارد، وانخرطا لسنواتٍ في دراسة استجابات الخلايا العصبية في النظام البصري.

رغبةً من هوبل وفيزل في الاستفاضة في مصادفتهما السعيدة، تعمَّقا في بحث آلية عمل هذه الاستجابة للخطوط المتحركة. إحدى النتائج التي توصلا إليها هي أن كل خليةٍ عصبيةٍ في القشرة البصرية الأوَّلية لها اتجاه مفضل، أو زاوية مفضلة بالإضافة إلى موضع مفضل. لن تستجيب الخلية العصبية لأي خط يظهر في الموضع المفضل لها فحسب. الخلايا العصبية التي تُفضِّل الاتجاه الأفقي تتطلب خطًّا أفقيًّا، والخلايا العصبية التي تفضِّل الاتجاه الرأسي تتطلب خطًّا رأسيًّا، والخلايا العصبية التي تفضِّل الميل بدرجة ٣٠ درجة تتطلب خطًّا مائلًا بزاوية مقدارها ٣٠ درجة، وهكذا. لاستيعاب ما يعنيه ذلك، يمكنك الإمساك بقلم بشكل أفقي أمام وجهك وتحريكه لأعلى ولأسفل. تكون بذلك قد حفَّزت مجموعة من الخلايا العصبية في القشرة البصرية الأولية. إذا أَمَلْتَ القلم بطريقة أخرى، فستحفز مجموعة أخرى (وبهذا تكون قد أجريت تحفيزًا للدماغ في المنزل ومجانيًّا!).

بإدراكهما لمسألة الاتجاه، يكون هوبل وفيزل قد اكتشفا العناصر البصرية الأساسية التي تستخدمها أدمغة القطط لتمثيل الصور. للذباب أجهزة كشف عن الحشرات، وللقطط (والثدييات الأخرى) أجهزة كشف عن الخطوط. لم يتوقفا عند ملاحظة هذه الاستجابات

فحسب؛ بل ذهبا إلى ما هو أبعد من ذلك بالسؤال عن الآلية التي تصل بها الخلايا العصبية إلى هذه الاستجابات. ورغم كل شيء، الخلايا التي تحصل منها هذه الخلايا على مدخلات — أي الخلايا الموجودة في المهاد — تستجيب للنقاط لا للخطوط. من أين يأتي هذا التفضيل للخطوط؟

كان الحل يتمثل في افتراض أن الخلايا العصبية في القشرة البصرية الأولية تحصل على مجموعة مختارة بعناية من المدخلات من المهاد. فما الخط إلا مجموعة من النقاط المرتَّبة بشكل مناسب. وعليه، لا بد أن تأتيَ مُدخلات الخلية العصبية في القشرة البصرية الأولية من مجموعة من الخلايا العصبية في المهاد، بحيث تمثِّل كل خلية نقطة في صفٍّ من النقاط. بهذه الطريقة، تُطلق الخلية العصبية الموجودة في القشرة البصرية الأولية أكبر قدرٍ من الإشارات الكهربية، عندما تتصل كل هذه النقاط بخط مستقيم. ومثلما تستمع الشياطين المعرفية لصرخات الشياطين الحاسوبية التي تبحث عن أجزاء من أحرفها المفضلة، تستمع الخلايا العصبية في القشرة البصرية الأولية إلى نشاط الخلايا العصبية الموجودة في المهاد التي تكوِّن خطها المفضل.

لاحظ هوبل وفيزل نوعًا آخر من الخلايا العصبية أيضًا؛ وهي الخلايا التي لها اتجاهات مفضلة، لكنها ليست كثيرة التدقيق بشأن الموقع. من المفترض أن تستجيب هذه الخلايا العصبية، إذا ظهر خط في أي مكان في حيز نشاط أكبر بأربع مرات من حيز نشاط الخلايا العصبية الأخرى التي سجَّلاها. كيف تصل هذه الخلايا العصبية إلى هذه الاستجابة؟ مرة أخرى، كانت الإجابة تتمثل في افتراض أن هذه الخلايا حصلت على المدخلات الصحيحة. على وجه الخصوص، الخلية العصبية «المركَّبة» — كما أطلق هوبل وفيزل على هذه الخلايا — تحتاج فقط إلى مدخلات من مجموعة من الخلايا العصبية المنتظمة (أو «البسيطة»). لا بد أن تكون لجميع الخلايا البسيطة الاتجاه المفضل نفسه، لكن يكون هناك اختلاف طفيف بين مواضعها المفضلة. وبهذا ينتقل الاتجاه المفضل إلى الخلية العصبية المركَّبة من مُدخلاتها، لكن يكون حيز نشاط هذه الخلية المركبة أكثر اتساعًا من أي حيز نشاط لأي خلية منفردة من الخلايا البسيطة. هذه المرونة المتعلقة بالموضع المفضل مهمة جدًّا. إذا أردنا معرفة ما إذا كان الحرف A يظهر أمامنا، فإن القليل من الاهتزازات في المواضع الفعلية للخطوط لن يكون مهمًّا حقًّا. الخلايا المركَّبة مصممة لتجاهل هذه الاهتزازات.

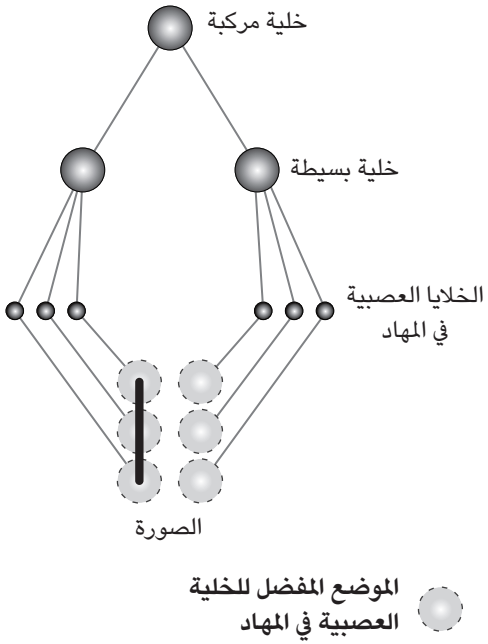
اكتشاف الخلايا المركَّبة أسهم في فهم اللغز المتعلق بكيفية إدراك العقل لمجموعة من النقاط الضوئية (مثير بصري). بالإضافة إلى مهمة تحديد السمات التي تتولاها الخلايا

البسيطة، تضاف عملية تجميع المدخلات من مجموعة من الخلايا العصبية الموجودة عبر الحيِّز إلى قائمة العمليات الحسابية التي يُجريها النظام البصري. نظير مجهودِهما البحثي لتحليل هذا النظام، حصل هوبل وفيزل على جائزة نوبل عام ١٩٨١. وضع هوبل أهدافهما بوضوح في خطاب فوزهما بالجائزة: «تمثلت فكرتنا بصفة أساسية في التأكيد على أنه كلما انتقلت المعلومات البصرية عبر مناطق مختلفة في الدماغ، أصبحت معالجة المعلومات أكثر تعقيدًا، والتأكيد على إمكانية فهم سلوك الخلية بدلالة مدخلاتها.»[٧] على الرغم من كون هذا المنهج بسيطًا، فإنه كان كافيًا للحصول على العديد من الخواص الأساسية لمسار المعالجة البصرية.

في الطرف الآخر من العالم — في هيئة الإذاعة اليابانية الواقعة في طوكيو — سمع كونيهيكو فوكوشيما عن الخواص البسيطة للنظام البصري. كان فوكوشيما مهندسًا وجزءًا من قسم البحوث التابع لهيئة الإذاعة اليابانية. ونظرًا لأن هيئة الإذاعة اليابانية كانت شركة بث (وكانت تبث إشارات مرئية ومسموعة إلى أعين وآذان الجمهور)، كانت لديها أيضًا مجموعات من علماء الأعصاب وعلماء النفس ضمن موظفيها، لدراسة كيفية استقبال الدماغ للإشارات الحسية. هذه المجموعات الثلاث — أي علماء النفس، وعلماء وظائف الأعضاء، والمهندسون — كانت تلتقي بانتظام لمشاركة الجهود البحثية الخاصة بكل مجال من المجالات الثلاثة. في أحد الأيام، قرر أحد زملاء فوكوشيما عرض العمل الذي أسهم به هوبل وفيزل.

عندما رأى فوكوشيما هذا الوصف الواضح لأدوار الخلايا العصبية في النظام البصري، شرع في تطبيق الوظائف نفسها الموجودة في النظام البصري في نموذج كمبيوتر. استخدم نموذجه صورًا لأنماط بسيطة بيضاء على خلفية سوداء باعتبارها مدخلات. للاقتراب من آلية عمل المهاد، كُوِّنَت صفيحة من الخلايا العصبية الاصطناعية تستجيب للنقاط البيضاء في الصورة. كانت هذه تُعتبر وسيلةً لتغذية الشبكة بمعلومات الصورة. ومن هنا، كان لا بد من حساب المدخلات إلى الخلايا البسيطة.

[٧] لكن هوبل وفيزل لم يذكُرا ليتفين أو عمله الرائد في دراسة الضفدع أثناء هذا الخطاب. وقد أشار سيلفريدج إلى أن هذا الإغفال أقل ما يُوصف به أنه «سلوك شائن».




شكل ٦-٢

لفعل ذلك، استخدم فوكوشيما المنهج المعياري المتمثل في عمل شبكة من الأعداد التي تمثِّل النمط المطلوب تحديده، وهو في حالة الخلية البسيطة عبارة عن خط له اتجاه محدد. بالمصطلحات الهندسية، يُطلَق على شبكة الأعداد اسم «المرشِّح». لمحاكاة التفضيلات المكانية للخلايا البسيطة، طبَّق فوكوشيما هذا المرشِّح بشكلٍ منفصل عند كل موضع في الصورة. على وجه التحديد، جرى حساب نشاط خلية بسيطة واحدة على أنه ناتجُ جمعِ نشاط المهاد في موضع واحد مضروبًا في المرشِّح. وأدى تحريك المرشِّح على الصورة بأكملها إلى تكوين مجموعة من الخلايا البسيطة لها جميعًا الاتجاهُ المفضل نفسه، لكن لها مواضع مفضلة مختلفة. تُسمَّى هذه العملية في الرياضيات «الالتفاف».

بتكوين العديد من المرشحات — كلٌّ يُمثِّل خطًّا له اتجاه مختلف — وتمرير كل مرشِّح على الصورة، كوَّن فوكوشيما مجموعة كاملة من الخلايا البسيطة، لكل خلية منها الاتجاه والموضع المفضلان، كما هي الحال في الدماغ. بالنسبة إلى الخلايا المركبة، أعطاها

ببساطة مدخلات قوية من حَفنة من الخلايا البسيطة كانت تمثِّل جميعًا الاتجاه نفسه في مواضع متقاربة. ومن ثم، ستنشط هذه الخلايا إذا ظهر الاتجاه في أيٍّ من هذه المواضع.

هذه النسخة من نموذج فوكوشيما كانت إلى حدٍّ كبير ترجمة مباشرة للنتائج الفسيولوجية، التي توصَّل بها هوبل وفيزل إلى رموزٍ حاسوبيةٍ ورياضية، وبطريقةٍ ما نجح الأمر. كان يمكن للنموذج أداء بعض المهام البصرية، مثل إيجاد الخطوط المنحنية في صورة بالأبيض والأسود، لكنه كان بعيدًا عن النظام البصري الكامل وكان فوكوشيما يعلم هذا. كما روى مؤخرًا في إحدى المقابلات، بعد أن نشر بحثه في نهاية ستينيات القرن العشرين، انتظر فوكوشيما بأناةٍ ليرى ما سيكتشفه هوبل وفيزل بعد ذلك؛ فقد كان يريد معرفة ما تفعله المراحل اللاحقة من المعالجة البصرية؛ كي يتمكن من إضافة ذلك إلى نموذجه.

إلا أن عالِمَي وظائف الأعضاء لم يقدما تلك المعلومات على الإطلاق. فبعد مجهودهما الأوَّلي لفهرسة أنواع الخلايا، استكشف هوبل وفيزل استجابات الخلايا في مناطق بصرية أخرى، لكنهما لم يتمكَّنا من تقديم وصف دقيق كما فعلا في حالة القشرة البصرية الأولية. فقد انتقلا في النهاية إلى دراسة كيف يتطور النظام البصري لدى الحيوانات الصغيرة سنًّا.

نظرًا لعدم وجود وصفة مقدمة من علم الأحياء، تعين على فوكوشيما الارتجال. تمثَّل الحل الذي ابتكره في أخذ البِنية التي كونها — أي بنية الخلايا البسيطة التي تتدفق منها المدخلات إلى الخلايا المركبة — وتكرارها. يؤدي تكديس مزيدٍ من الخلايا البسيطة والمركبة بعضها فوق بعض مرارًا وتكرارًا إلى تسلسُل هَرمي ممتد، يمكن تمرير المعلومات البصرية خلاله. هذا يعني، على وجه التحديد، أن الطبقة الثانية من الخلايا البسيطة في التسلسل تأتي بعد الطبقة الأولية من الخلايا المركبة. هذه الطبقة الثانية من الخلايا البسيطة لن تنتَبِه إلى السمات البسيطة في الصورة؛ بل إلى السمات البسيطة في نشاط الخلايا المركَّبة التي تحصل منها على المدخلات. ستستخدم هذه الخلايا المرشحات والالتفافات، لكنها لن تُطبق إلا على نشاط الخلايا العصبية الموجودة أسفلها. بعد ذلك، سترسل هذه الخلايا البسيطة مدخلات للخلايا المركبة المرتبطة بها، التي تستجيب للسمات نفسها في حيِّز أوسع، وبعد ذلك تبدأ العملية بالكامل من جديد.

تبحث الخلايا البسيطة عن أنماط؛ بينما تتساهل الخلايا المركبة في زحزحة هذه الأنماط عن مواضعها. وهكذا يصبح لدينا خلايا بسيطة، ثم مركبة، ثم بسيطة، ثم مركبة.

مرارًا وتكرارًا. يؤدي تكرار هذه الطبقات إلى خلايا تستجيب لجميع أنواع الأنماط. لكي تستجيب خلية بسيطة في الطبقة الثانية للحرف L، على سبيل المثال، كل ما تحتاج إليه فقط هو أن تحصل على مُدخلاته من خلية تستجيب للخطوط في الاتجاه الأفقي عند موضع محدَّد، وخلية تستجيب للخطوط في الاتجاه الرأسي عند موضع فوق الخط الأفقي تمامًا من ناحية اليسار. ومن ثم، يمكن للخلية الموجودة في الطبقة الثالثة الاستجابة بسهولة لمستطيل، من خلال الحصول على مدخلاتٍ من خليَّتَين تستجيبان للحرف L موضوعتَين بطريقة مناسبة. بالصعود لأعلى أكثر وأكثر في الهرم، سنجد أن الخلايا تبدأ في الاستجابة لأنماط أكبر وأكثر تعقيدًا، بما في ذلك الأشكال الكاملة، والأجسام المادية، وحتى المشاهد.

تمثلت المشكلة الوحيدة، في توسيع نطاق نتائج هوبل وفيزل بهذه الطريقة، في أن فوكوشيما لم يكُن يعلم بالفعل الآلية التي يُفترض بها أن تتصل الخلايا في الطبقات المختلفة ببعضها. كان لا بد أن تكتمل المرشحات — أي شبكات الأعداد هذه التي ستحدد كيفية استجابة الخلايا البسيطة في أي طبقة محددة. لكن كيف؟ من أجل ذلك، استلهم فوكوشيما فكرة من نموذج «بنديمونيوم» الذي قدمه سيلفريدج واتجه إلى التعلُّم.

بدلًا من استخدام طريقة المحاولة والخطأ التي اقترحها سيلفريدج، استخدم فوكوشيما طريقة تعلُّم لا تتطلَّب معرفة الإجابات الصحيحة. في هذا النمط من التعلم، يُعرَض على النموذج ببساطة مجموعة من الصور دون إخباره بما يوجد في هذه الصور. يُحسب نشاط كل هذه الخلايا العصبية الاصطناعية استجابةً لكل صورة، وتتغير الروابط بين هذه الصُّور بناءً على مدى نشاطها (قد يُذكرك هذا بطريقة التعلُّم الهيبي الذي ناقشناه في الفصل الرابع). إذا كانت الخلية العصبية نشطة جدًّا استجابة لصورة محددة على سبيل المثال، فإن الروابط بين هذه الخلية العصبية والخلايا العصبية المدخِلة التي كانت نشطة آنذاك ستقوى. نتيجة لذلك، ستستجيب تلك الخلية العصبية بشدة إلى هذه الصورة والصور المماثلة في المستقبل. هذا يجعل بعض الخلايا العصبية سريعة الاستجابة لبعض الأشكال، كما يجعل الخلايا العصبية المختلفة تتخصص في الاستجابة للأنماط المختلفة. ومن ثم، فإن الشبكة يمكنها انتقاء عدد متنوع من الأنماط في الصور المدخَلة.

في النهاية، تضمَّن نموذج فوكوشيما ثلاث طبقات من الخلايا البسيطة والمركَّبة، وجرى تدريبه باستخدام صور كُوِّنت عن طريق الكمبيوتر للأرقام من صفر إلى أربعة. أُطلق على الشبكة اسم «نيوكوجنيترون» ونُشرت النتائج في دورية «بايولوجيكال سيبرنيتيكس» عام ١٩٨٠.

في دراسة هوبل وفيزل البحثية الأصلية، أكدا على أنه ليس من المفترض التعامل مع نظام التصنيف الذي وضعاه والتسميات باعتبارهما إنجيلًا. فالدماغ معقَّد وتقسيم الخلايا العصبية إلى فئتَين فقط قد لا يستوعب بأي حال التنوُّعَ الكامل في الاستجابات والوظائف. لكنهما اختارا المتابعة بهذه الطريقة؛ لأنها طريقة تواصُل أسهل وأكثر فاعلية. ومع ذلك، وجد فوكوشيما النجاح في فعل الشيء نفسه الذي حذَّر منه هوبل وفيزل؛ فقد بسَّط التعقيد الكبير للنظام البصري في الدماغ إلى عمليتَين حسابيتَين بسيطتَين جدًّا. وقد تعامل مع هذه الأوصاف باعتبارها صحيحة، أو صحيحة بما يكفي، حتى إنه بالغ في الوصف وبالغ في تضخيمها بما يتجاوز معناها الأصلي.

يعرف جميع واضعي النظريات والمهندسين أن هذه الممارسة — أي تبسيط النُّظُم المعقدة وتفكيكها لأجزاء أبسط، كإزالة أوراق الشجرة واستخدامها لبناء بيت — تكون ضرورية لإحراز تقدم. أراد فوكوشيما بناء نظام بصري فعال في الكمبيوتر. وقدَّم هوبل وفيزل وصفًا أوليًّا للنظام البصري في الدماغ. أحيانًا يكون الوصف الأولي كافيًا.

في عام ١٩٨٧، كأي عام آخر، أرسل سُكان بافلو، نيويورك عددًا لا نهائيًّا من الفواتير وبطاقات أعياد الميلاد والخطابات عن طريق مكتب البريد المحلي. ما لم يعلمه سكان المدينة، وهم يكتبون الكود البريدي للمستلِم المكوَّن من خمسة أرقامٍ على المظروف، هو أن هذا الجزء المكتوب بخط اليد سيُخلَّد، أي سيُحوَّل إلى النظام الرقمي ويُخزَّن على أجهزة الكمبيوتر في جميع أنحاء الدولة لسنواتٍ قادمة. وسيصبح جزءًا من قاعدة بياناتٍ للباحثين، الذين يحاولون تعليم الكمبيوتر كيفيةَ قراءة الكتابة اليدوية البشرية؛ ومن ثم تحدث ثورةٌ في الرؤية الاصطناعية.

بعض الباحثين العاملين على هذا المشروع كانوا في مختبرات بيل، شركة أبحاث مملوكة لشركة الاتصالات إيه تي آند تي، التي تقع في ضواحي نيوجيرسي. من بين المجموعة التي يغلب عليها علماء الفيزياء، كان هناك عالم كمبيوتر فرنسيٌّ في الثامنة والعشرين من عمره يُدعى يان ليكون. كان ليكون قد قرأ عن فوكوشيما ونموذج «نيوكوجنيترون»، وأدرك كيف أن التكرار البسيط لهيكل هذا النموذج يمكن أن يحل الكثير من المشكلات الصعبة المتعلقة بالرؤية.

لكن ليكون أدرك أيضًا أنه لا بد من تغيير الطريقة التي يتعلم به النموذج تكوين وصلات. على وجه الخصوص، أراد العودة إلى منهج سيلفريدج، وإعطاء النموذج صُوَرًا

تقترن بالتسميات الصحيحة التي تدل على الأرقام الموجودة على الصور. لذا، عدَّل بعض التفاصيل الرياضية للنموذج بهدف جعله مناسبًا لنوعٍ مختلف من التعلُّم. في هذا النوع من التعلُّم، إذا أخطأ النظام في تصنيف صورة (على سبيل المثال أطلق على العدد اثنين ستة)، فإن جميع الوصلات في النموذج — شبكات الأرقام هذه التي تحدِّد الأنماط التي يجري البحث عنها — تُحدَّث بطريقة تجعلها أقل عُرضة لتصنيف الصورة تصنيفًا خاطئًا في المستقبل. بهذه الطريقة، يتعلم النموذج الأنماط التي تكون مهمة للتعرُّف على الأرقام. قد يبدو هذا مألوفًا؛ لأن ما استخدمه ليكون هو خوارزمية الانتشار العكسي المشار إليها في الفصل الثالث. إذا فعلت هذا مع عددٍ كافٍ من الصور، فسيصبح النموذج بالكامل جيدًا جدًّا في تصنيف الصور التي تتضمَّن أرقامًا مكتوبةً بخط اليد، حتى الصور التي لم ترَها من قبل.

كشف ليكون وزملاؤه الباحثون عن النتائج المبهرة لنموذجهم، الذي تدرب على آلاف الأرقام في بافلو عام ١٩٨٩. وبهذا خرجت «الشبكة العصبية الالتفافية» — الاسم الذي أُعطِي لهذا النمط من النماذج — إلى النور.

وكما هي الحال في مناهج المطابقة بالقالب التي سبقتها، وجدت الشبكات العصبية الالتفافية تطبيقات لها على أرض الواقع. ففي عام ١٩٩٧ شكلت هذه الشبكات جزءًا أساسيًّا من نظام البرمجيات الذي طورته شركة إيه تي آند تي لأَتْمَتة معالجة الشيكات في البنوك في أنحاء أمريكا. وبحلول عام ٢٠٠٠ كان يُعالج بهذا البرنامج، وفق التقديرات، ما بين ١٠–٢٠ في المائة من الشيكات في أمريكا. في مثالٍ رائعٍ على تحقيق العلم للناتج المرجُوِّ منه، أصبح حلمُ جولدبرج بتزويد البنوك بأنظمةٍ بصريةٍ اصطناعية حقيقةً بعد مرور ٧٠ عامًا على اختراع آلة الميكروفيلم.

تتمثل طريقة تدريب الشبكات العصبية الالتفافية في الاعتماد على قدر كبير من البيانات لتعليم الشبكة، وستعتمد كفاءة النموذج وجودته على مدى كفاءة البيانات التي نُغذِّيه بها. وكما أن اختيار النموذج الصحيح أمر مهم، فإن اختيار البيانات الصحيحة أمر لا يقل عنه أهمية. لهذا السبب، كان من الضروري جدًّا تجميع عينات حقيقية مأخوذة من الواقع لأرقام فعلية مكتوبة بخط أشخاص حقيقيين. كان بإمكان باحثي مختبر بيل أن يحذوا حذوَ فوكوشيما، ويعتمدوا على صورٍ لأرقامٍ جرى تكوينها باستخدام الحاسوب. لكن هذه الصور يمكنها بالكاد تمثيل التنوع والفوارق البسيطة التي يكتب بها الأشخاص الأرقام في عجالة. الخطابات التي جرى تمريرها عبر مكتب بريد بافلو

احتوت على نحو ١٠ آلاف مثال تقريبًا، من الخطوط اليدوية البشرية الحقيقية، وهو ما أعطى النموذج ما يحتاج إليه كي يتعلم حقًّا. بمجرد أن رأى علماء الكمبيوتر أهمية البيانات الحقيقية، اندفعوا لجمع المزيد. جُمعت مجموعة بيانات مكونة من ستة أضعاف عدد الأرقام في مجموعة بافلو — سُميت إم نيست (قاعدة بيانات المعهد الوطني للمعايير والتقنية المعدلة) — بعد مجموعة بافلو بفترة قصيرة. من المثير للدهشة أن قاعدة البيانات هذه تظل واحدةً من أكثر قواعد البيانات استخدامًا لاختبار نماذج وخوارزميات جديدة للرؤية الاصطناعية. كُتبت الأرقام لقاعدة بيانات إم نيست على يد طلاب مدرسة ماريلاند الثانوية المكلَّفين بإجراء التعداد السكاني في أمريكا.[٨] وعلى الرغم من أن القائمين بمهمة الكتابة قد أُخبِروا عن الهدف الذي ستُستخدم فيه هذه الأرقام، فمن المؤكد أنهم لم يتوقعوا أن يظل خطهم اليدوي مستخدمًا بواسطة علماء الكمبيوتر بعد نحو ٣٠ عامًا.

لم تتوقف اختبارات الشبكات العصبية الالتفافية عند الأرقام فحسب، لكن بالانتقال إلى صور أكثر تعقيدًا واجهت الشبكات مشكلة. في أوائل العقد الأول من القرن الحادي والعشرين، جرى تدريب شبكاتٍ تشبه إلى حدٍّ كبيرٍ شبكات ليكون على مجموعة بيانات مكونة من ٦٠ ألف صورة، لكن هذه المرة لكائناتٍ وأشياء. كانت الصور صغيرة وحُبَيبية — ٣٢ × ٣٢ بِكسِلًا فقط — وقد تكون لطائرات أو سيارات أو طيور أو قطط أو كلاب أو ضفادع أو أحصِنة أو سُفُن أو شاحنات. وعلى الرغم من أن هذه المهمة تبدو بسيطة بالنسبة لنا، فإن هذا يُمثِّل زيادة خطيرة في الصعوبة بالنسبة إلى الشبكات. ظهر الغموض الكامل الذي يُعد جزءًا أساسيًّا في تفسير عالم ثلاثي الأبعاد، من مدخلاتٍ ثنائية الأبعاد في المشهد عند استخدام صورٍ واقعية لكائنات وأشياء واقعية. النماذج نفسها التي يمكنها التعرُّف على الأرقام كانت تحاول جاهدةً فَهْم هذه الصور الأكثر واقعية. فشل النهج الخاص بمحاكاة طريقة معالجة الدماغ للمعلومات البصرية؛ من أجل تحقيق الرؤية الاصطناعية في المعالجة البصرية الأساسية التي يقوم بها الدماغ يوميًّا.

لكن الأمور تبدَّلت عام ٢٠١٢ عندما استخدم أليكس كريجفسكي وإيليا سوتسكيفر وجيفري هنتون من جامعة تورونتو شبكة عصبية التفافية؛ للفوز بمسابقة التعرُّف على الصور الرئيسية المعروفة باسم: تحدِّي إيمدج نت للتعرف البصري الواسع النطاق.

[٨] يمكنك تخمين من يتمتع بخط أكثر إتقانًا.

تضمَّنت المسابقة تصنيف الصور — عبارة عن صورٍ ضخمةٍ (بحجم ٢٢٤ × ٢٢٤) واقعية، التقطها أشخاصٌ حول العالم وأُخِذت من مواقع لاستضافة الصور، مثل فليكر — إلى ١٠٠٠ فئةٍ من فئات العناصر الممكنة، وتعيين تسمياتٍ توضِّح الفئة التي تنتمي إليها الصورة. في هذا الاختبار المقنع المتعلق بالمهارة البصرية، بلغت دقة الشبكة العصبية الالتفافية ٦٢ في المائة، مُتغلِّبة بذلك على خوارزمية المركز الثاني بنحو ١٠ في المائة.

كيف أدى فريق جامعة تورونتو بشكلٍ جيد؟ هل اكتشفوا عملية حسابية جديدة لازمة للرؤية؟ هل عثروا على تقنية سحرية لمساعدة النموذج على تعلُّم وصلات الشبكة بطريقة أفضل؟ في هذه الحالة، الحقيقة الفعلية أبسط بكثير. الفرق بين هذه الشبكة العصبية الالتفافية والشبكات التي سبقتها يتمثَّل بشكل أساسي في الحجم. تضمنت شبكة فريق جامعة تورونتو ما يزيد عن ٦٥٠ ألف خلية عصبية اصطناعية في المجمل، وهو ما يفوق حجم شبكة ليكون للتعرف على الأرقام بنحو ٨٠ مرة. كانت هذه الشبكة ضخمة في الواقع، لدرجة أنها تطلبت بعض المهارة الهندسية لجعل النموذج يتناسب مع سعة ذاكرة رقائق الكمبيوتر التي كانت تُستخدم لتشغيله. أصبح النموذج كبيرًا بطريقة أخرى أيضًا. كل هذه الخلايا العصبية كانت تعني الحاجة إلى مزيدٍ من البيانات، لتعديل الأوزان بين الوصلات أثناء عملية التدريب. تعلَّم النموذج من ١,٢ مليون صورة موسومة جمعتها في-في لي أستاذة علوم الكمبيوتر، كجزءٍ من قاعدة بيانات «إيمدج نت».

كان عام ٢٠١٢ نقطة تحوُّلٍ بالنسبة للشبكات العصبية الالتفافية. فلم تكن التحسينات التي أحرزها فريق جامعة تورنتو مجرَّد قفزةٍ كميةٍ فحسب — أي زيادة عدد الخلايا العصبية والصور — بل أدى التحسُّن المذهل للأداء إلى فرقٍ نوعي في المجال أيضًا. بعد أن رأى الباحثون ما يمكنهم فعله، توافدوا على دراسة الشبكات العصبية الالتفافية وتحسينها. توجَّهت جهودهم في الاتجاه نفسه، وهو جعل هذه الشبكات أكبر، ومع هذا فقد اكتشفوا تعديلاتٍ مهمةً لهيكلها وكيفية تعلُّمها أيضًا.

بحلول عام ٢٠١٥، وصلت الشبكة العصبية الالتفافية إلى مستوى الأداء المتوقَّع من الإنسان في مسابقة تصنيف الصور (هذا المستوى قد لا يكون بنسبة ١٠٠٪؛ إذ إن بعض الصور قد تكون مُحيرة). تمثِّل الشبكات العصبية الالتفافية الآن الأساس الذي يُبنى عليه أي برنامج خاص بمعالجة الصور تقريبًا: التعرُّف على الوجوه في مواقع التواصل الاجتماعي، والكشف عن وجود مشاة على الطريق في حالة السيارات ذاتية القيادة، وحتى التشخيص الذاتي للأمراض في صور الأشعة السينية. في مثال رائع على

أن العلم يُستخدم لخدمة نفسه، استخدم علماءُ الأعصاب الشبكاتِ العصبيةَ الاصطناعية، للمساعدة في الكشف التلقائي عن مكان الخلايا العصبية في صور نسيج الدماغ. أصبحت الخلايا العصبية الاصطناعية الآن تنظر إلى خلايا عصبيةٍ حقيقية.

يتَّضح أن المهندسين تصرَّفوا بذكاء، حين توجَّهوا إلى الدماغ لاستلهام كيفية بناء نظامٍ بصري. آتى اهتمامُ فوكوشيما بوظائف الخلايا العصبية — وتكثيف هذه الوظائف في صورة عمليات بسيطة — ثمارَه في المستقبل. أما حين كان يخطو خطواتِه الأولى في تطوير هذه النماذج، فلم تكن المصادر الحاسوبية والبيانات التي كان من شأنها إبراز هذه الجهود متوفرة. بعد عقود، اختار الجيل التالي من المهندسين المشروع ودفعوا به نحو خط النهاية. نتيجة لذلك، أصبح بإمكان الخلايا العصبية الالتفافية الحالية أخيرًا تنفيذُ العديد من المهام التي طُلبت منها، عن طريق مشروع معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا الصيفي عام ١٩٦٦.

كما ساعد نموذج «بنديمونيوم» الذي قدمه سيلفريدج في إلهام اختصاصيِّي علم الأعصاب المرئي، لم تكن العلاقة بين الشبكات العصبية الالتفافية والدماغ أُحادية الاتجاه. فقد حان الوقت الذي يحصد فيه علماء الأعصاب ثمار الجهد الذي بذله علماء الكمبيوتر؛ لصنع نماذج يمكنها حلُّ المسائل البصرية الحقيقية. وليس السبب في ذلك أن هذه الشبكات العصبية الالتفافية الضخمة المدرَّبة تدريبًا مكثَّفًا، تتَّسم بالمهارة في اكتشاف الأشياء في الصور فحسب؛ وإنما السبب هو أنها تتَّسم بالمهارة في توقُّع كيفية استجابة الدماغ لهذه الصور نفسها أيضًا.

تبدأ المعالجة البصرية في القشرة البصرية الأوَّلية — حيث أجرى هوبل وفيزل تسجيلاتهما — لكن هذه العملية تتضمَّن العديد من المناطق بعد ذلك. تُكوِّن القشرة البصرية الأولية وَصلاتٍ مع (أحسبك خمنت ذلك) القشرة البصرية الثانوية. وبعد القليل من عمليات ترحيل المعلومات البصرية، ينتهي الحال بالمعلومات في القشرة الصُّدغية التي تقع خلف الصُّدغ مباشرةً.

ارتبطت القشرة الصدغية بالتعرف على الأشياء لفترةٍ طويلة. فمنذ أوائل ثلاثينيات القرن العشرين، لاحظ الباحثون أن أيَّ تلَف يحدث في هذه المنطقة من الدماغ يُفضي إلى سلوكٍ غريب. فالمرضى الذين يعانون تَلفًا في القشرة الصدغية لا يُجيدون تحديد الأشياء المهمة التي يتعيَّن عليهم النظر إليها، ويمكن تشتيتُهم بسهولة. كما أنهم لا يُظهرون

استجاباتٍ عاطفيةً عاديةً للصور، فربما يمكنهم رؤية صور يجدها معظم الناس مرعبةً وبالكاد قد يرفُّ لهم جَفن. وعندما يرغبون في استكشاف الأشياء، يمكنهم فعل ذلك بوضع الأشياء في أفواههم لا بالنظر إليها.

جاء تحسُّن فهمنا لهذه المنطقة من الدماغ نتاجًا لعقود من الملاحظة الدقيقة للمرضى، أو الحيوانات التي تعاني من آفاتٍ في الدماغ، ولتسجيل نشاط الخلايا العصبية بعد ذلك. أدى ذلك إلى نتيجةٍ مفادُها أن أحد الأجزاء الفرعية في القشرة الصدغية — أي القشرة الصدغية السُّفلى— هو الموضع الرئيسي لفهم الأشياء. الأشخاص الذين يعانون من تلفٍ في منطقة القشرة الصدغية السُّفلى يتمتَّعون بسلوكٍ ورؤيةٍ طبيعيَّين، إلا أن ذلك يصاحبه المشكلة الأكثر تحديدًا المتمثِّلة في تحديد أسماء الأشياء أو التعرُّف عليها، على سبيل المثال، قد لا ينجحون في التعرُّف على وجوه الأصدقاء أو يخلطون بين الأشياء التي تبدو متشابهة.

بناءً على ذلك، تستجيب الخلايا العصبية في هذه المنطقة للأشياء. بعض الخلايا العصبية لها تفضيلات واضحة؛ فقد تستجيب إحداها في حالة وجود ساعة، وقد تستجيب أخرى في حالة وجود منزل، وأخرى في حالة وجود مَوزة، وما إلى ذلك. في المقابل، الخلايا الأخرى يمكن فهمها بصعوبة أكبر. قد تفضِّل أجزاءً من الأشياء، أو تستجيب بطريقةٍ متماثلةٍ لجسمَين لهما بعض السمات المشتركة. بعض الخلايا أيضًا تهتم بالزاوية التي يُرى منها الجسم، فربما تُطلق مزيدًا من الإشارات العصبية الكهربية إذا شوهد الجسم من ناحية اليمين؛ بينما تتغاضى بعض الخلايا وتستجيب للجسم في أي زاويةٍ تقريبًا. بعض الخلايا تهتم بحجم الجسم وموضعه، في حين لا يهتم البعض الآخر. في المجمل، تُعد منطقة القشرة الصدغية السفلية حقيبةً تحتوي على خليطٍ من الخلايا العصبية المستجيبة للأجسام. على الرغم من أنه ليس من السهل دائمًا تفسيرُ هذه الاستجابات الناتجة عن وجود أجسام، فإن مثل هذه الاستجابات تجعل منطقة القشرة الصدغية السفلية تبدو على قِمة هرم المعالجة البصرية، أي المحطة الأخيرة التي يصل إليها قطار النظام البصري السريع.

حاول اختصاصيُّو علم الأعصاب لعقودٍ فَهْم الكيفية التي طوَّرت بها منطقة القشرة الصدغية السفلية هذه الاستجابات. وكثيرًا ما ساروا على خُطى فوكوشيما، وشيَّدوا نماذج تحتوي على مجموعةٍ مُكدَّسةٍ من الخلايا البسيطة والخلايا المركَّبة؛ أملًا في أن تحاكي هذه العملياتُ الحسابية تلك العملياتِ التي تحدث في الدماغ، وتؤدي إلى نشاط الخلايا في

منطقة القشرة الصدغية السفلى، وتُتيح إمكانية التنبُّؤ بالنشاط تمامًا. نجح هذا المنهج إلى حدٍّ ما، لكن، كما هي الحال في نموذج نيوكوجنيترون، كانت النماذج صغيرةً، وتعلَّمت وصلاتُها من مجموعةٍ صغيرةٍ من الصور الصغيرة. لتحقيق تقدُّم حقيقي تعيَّن على علماء الأعصاب توسيعُ حجم نماذجهم، تمامًا كما فعل علماء الكمبيوتر.

في عام ٢٠١٤ تمكنت مجموعتان منفصلتان من العلماء — إحداهما يقودها نيكولاس كريجيسكورتي في جامعة كامبريدج، والأخرى يقودها جيمس ديكارلو في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا — من فعل هذا تمامًا. عرضوا صُورًا حقيقية متنوعة لأشياء على المشاركين في البحث (بشر وقرود)، وسجَّلوا نشاط مناطق مختلفة لأنظمتهم البصرية أثناء رؤيتهم للصور. وأيضًا عرضوا الصور نفسها على شبكةٍ عصبيةٍ التفافيةٍ ضخمةٍ مُدرَّبةٍ على تصنيف الصور الحقيقية. ما توصلت إليه المجموعتان هو أن نماذج الكمبيوتر كانت تقترب كثيرًا من الرؤية البيولوجية. أوضحت المجموعتان تحديدًا أنه إذا أردت تخمين الآلية، التي تستجيب بها الخلية العصبية في منطقة القشرة الصدغية السفلية لصورةٍ محددة، فإن أفضل رهانٍ — أفضل من أي طريقةٍ سابقةٍ جرَّبها علماء الأعصاب — تَمثَّل في النظر في الآلية التي استجابت بها الخلايا العصبية الاصطناعية في الشبكة لها. على وجه التحديد، كانت الخلايا العصبية في الطبقة الأخيرة من الشبكة، تتوقَّع نشاط الخلايا العصبية في منطقة القشرة الصدغية السفلية بشكلٍ أفضل. علاوة على ذلك، فإن الخلايا العصبية في الطبقة قبل الأخيرة تتوقَّع، بشكلٍ أفضل، نشاطَ الخلايا العصبية في المنطقة البصرية V4، وهي المنطقة التي تُعطي منطقة القشرة الصدغية السفلى المدخلات. بدا الأمر وكأن الشبكة العصبية الالتفافية تُحاكي التسلسل الهرمي البصري للدماغ.

بإظهار هذا التوافق اللافت بين النموذج والدماغ، شارك هذا البحث في ثورة في دراسة الرؤية البيولوجية. فقد أشارت إلى أن اختصاصيِّي الأعصاب يسيرون بشكلٍ عام على الطريق الصحيح، وهو الطريق الذي بدأه ليتفين وهوبل وفيزل، لكن يتعين عليهم أن يكونوا أكثر جرأة وإقدامًا. إذا كانوا يريدون نموذجًا يمكنه تفسير الكيفية التي يتسنَّى بها للحيوانات رؤية الأشياء، فلا بد أن يكون النموذج نفسه قادرًا على رؤية الأشياء.

إلا أن السَّير في هذا الطريق كان يعني التخلي عن المبادئ، التي يتشبث بها بعض واضعي النظريات، والتي تتمثل في السعي لتحقيق التنميق والبساطة والكفاءة في النماذج. ليس هناك ما هو مُنمَّق أو فعال بشأن ٦٥٠ ألف خلية عصبية، تتصل معًا كالأسلاك بأي طريقة ممكنة كي تعمل. ومقارنة ببعض المعادلات الأكثر تفضيلًا وجمالًا في العلوم،

تُعدُّ هذه الشبكات أشبه بوحوشٍ ضخمةٍ فظيعة. لكن في نهاية الأمر، هذه الشبكات تؤدي الغرض، وليس هناك ما يضمن وجود شيءٍ أكثر تنميقًا.

دفعت الجهود البحثية لسيلفريدج علماء الأحياء إلى رؤية النظام البصري باعتباره تسلسلًا هرميًّا، كما أن التجارب التي نتجت عن ذلك غُرست ببذور تصميم الشبكات العصبية الالتفافية. جرى احتضان هذه البذور في مجال علوم الكمبيوتر، وفي النهاية آتى هذا التعاون أُكُلَه على كلا الجانبَين. في العموم، الرغبة في الحصول على أنظمةٍ اصطناعيةٍ يمكنها أداء مهامَّ بصريةٍ فعليةٍ على أرض الواقع؛ دفعت دراسةَ الرؤية البيولوجية في اتجاهاتٍ كان من الممكن ألَّا تطرُقَها بمفردها. دائمًا ما استمتع المهندسون وعلماء الكمبيوتر بوجود نظامٍ بصريٍّ للدماغ يرجعون إليه، ليس كمصدرٍ للإلهام فحسب، بل لإثبات أن هذه المشكلة الصعبة قابلةٌ للحل. هذا التقدير والتأثير المتبادل يجعلان من دراسة الرؤية قصة واحدة متشابكة على نحوٍ فريد.

الفصل السابع

# فك الشفرة العصبية

نظرية المعلومات والتشفير الفعَّال

بينما يضُخ القلب الدمَ، وتؤثر الرئتان على تبادل الغازات، وفي حين يعالج الكبد المواد الكيميائية ويخزِّنها، وتصفي الكُلْيتان الفضلات من الدم؛ يعمل الجهاز العصبي على معالجة المعلومات.

ملخص جلسة عمل تابعة لبرنامج
أبحاث العلوم العصبية، عام ١٩٦٨.

كان الهدفُ من اجتماع برنامج أبحاث العلوم العصبية عام ١٩٦٨؛ مناقشةَ الكيفية التي يمكن بها للخلايا العصبية المفردة ومجموعات الخلايا العصبية معالجةُ المعلومات. لم يدفع ملخص الاجتماع، المكتوب على يد عالِمَي الأعصاب ثيودور بولوك ودونالد بيركل، باتجاه أي استنتاجات صارمة أو سريعة. لكنه وضع مجموعة واسعة من الاحتمالات لتمثيل المعلومات في الدماغ، وتحويلها ونقلها وتخزينها بطريقةٍ لخَّصت حالةَ المجال.

كما يوحي الاقتباس المأخوذ من الملخص، يبدو أن إسناد دورِ معالجة المعلومات إلى الدماغ أمر طبيعي، تمامًا كما نقول إن القلب يضخ الدم. حتى قبل أن تصبح كلمة «معلومات» جزءًا من المفردات اليومية التي نستخدمها في القرن العشرين، تحدَّث العلماء ضِمنيًّا عن المعلومات التي تنقلها الأعصاب، مستخدمين مفردات مثل «رسائل» و«إشارات». على سبيل المثال، أوضحت محاضرةٌ ألقيت عام ١٨٩٢ لموظفي إحدى

المستشفيات أن «هناك ألياڤًا توصِّل الرسائل من العديد من أجزاء الجسم إلى الدماغ»، وأن بعض هذه الألياف «تحمل أنواعًا معينة من الرسائل؛ كالأعصاب المتصلة بأعضاء الحواس الخاصة التي أطلِق عليها بوابات المعرفة». يصف أحد المؤلَّفات التي نُشرت عام ١٨٧٠ إطلاق الإشارات العصبية الكهربية في الخلايا العصبية الحركية بأنه «رسالة الإرادة للعضلة»، حتى إنه ذهب لأبعد من ذلك بمقارنة الجهاز العصبي بتقنية نقل المعلومات السائدة آنذاك: التِلغراف.

لكن دراسة آلية تمثيل الجهاز العصبي للمعلومات لم تبدأ بشكلٍ جادٍّ، إلا قبل تقرير بولوك وبيركل بنحو ٤٠ عامًا، أي مع عمل إدجار أدريان في أوائل القرن العشرين.

كان أدريان يمثِّل الصورة النمطية المثالية لرجل العلم بحق. قبل مولده في عام ١٨٨٩ عاشت عائلته في إنجلترا لمدة ٣٠٠ عام، وهو نسل تضمَّن أحد جراحي القرن السادس عشر، ورجال الدين المبجلين، وأعضاء الحكومة. حين كان طفلًا كان مُعلِّموه يُثنون على ذكائه باستمرار. بالإضافة إلى تركيزه على الطب أثناء دراسته الجامعية، أظهر براعة في الفنون، لا سيما التلوين والرسم. ونظرًا لكونه محاضرًا في كامبريدج، عمل لساعات طويلة في المختبر وفي الفصول الدراسية. خلال مسيرته المهنية، أظهر نجاحًا لا يمكن إنكاره. في سن ٤٢ فاز بجائزة نوبل، وفي عام ١٩٥٥ حصل على رتبة لورد من المِلكة إليزابيث الثانية، وأصبح يُطلق عليه اللورد أدريان.

لكن هذه الجوائز والأوسمة الرسمية كانت تُخفي وراءها رجلًا فوضويًّا لا يهدأ. كان أدريان باحثًا عن الإثارة، يحب تسلُّق الجبال وقيادة السيارات السريعة. كان يحب إجراء التجارب على نفسه، بما في ذلك إبقاء إبرة في ذراعه لساعتَين في محاولةٍ لقياس نشاط العضلات. كان معروفًا عنه لعب الألعاب المعقَّدة المفعَمة بالتفاصيل؛ مثل لعبة الغُمِّيضة مع زملائه في الصف في أودية منطقة ليك ديستريكت في إنجلترا. حين كان أُستاذًا كان مراوِغًا بالقدر نفسه. كان يتجنب المقابلات غير المُجَدوَلة بالاختباء في مختبره، وهو ما كان يُجبر الطلاب الذين لديهم استفسارات على محاولة اللَّحاق به، وهو يقود دراجته إلى البيت. كان متقلب المِزاج، وعندما كان يحتاج إلى التفكير كان يجلس في رفٍّ على خزانةٍ مظلمة. وصف زملاؤه في المختبر وعائلتُه خطواتِه بأنها سريعة ومتشنِّجة، ولا تتوقف تقريبًا. لم يكن عقله أقل من حركاته اندفاعًا وجيَشانًا. فعلى مدار مسيرته المهنية، درس العديد من المسائل المختلفة لدى العديد من الحيوانات المختلفة، كالرؤية والألم واللمس والتحكُّم في العضلات لدى الضفادع والقطط والقرود، وغيرها.

لعل عدم قدرته على البقاء ساكنًا، جسديًّا أو عقليًّا، كان مفتاح نجاحه. من خلال الدراسات العديدة التي أجراها على نشاط الخلايا العصبية المنفردة، تمكن من إيجاد مبادئ عامة ستُشَكل أساس فَهمنا للجهاز العصبي ككل. شرح أدريان في كتاب «أساسيات الإحساس» المنشور عام ١٩٢٨ الاستنتاجاتِ التي توصل إليها، والتجاربَ التي مكَّنته من الوصول إلى تلك الاستنتاجات. تخلل صفحات الكتاب حديثٌ عن «الإشارات» و«الرسائل» وحتى «المعلومات»، جميع هذه الكلمات ممزوجة بتفاصيل تشريحية حول الجهاز العصبي، والصعوبات الفنية التي كانت تحول دون تسجيل نشاطه. كان ذلك عبارةً عن مزيجٍ من التطورات التجريبية والرؤى المفاهيمية التي ستؤثر على المجال لعقودٍ لاحقة.

في الفصل الثالث، شرح أدريان تجربةً أضاف فيها ثقلًا إلى عضلة ضفدع؛ ليرى كيف ستستجيب مستقبلات «التمدد» التي تَتَتَبَّع موضع العضلة. دوَّن أدريان تسجيلاته من الأعصاب التي تحمل هذه الإشارة من المستقبلات إلى الحبل الشوكي. بعد وضع أثقال مختلفة، لخَّص أدريان النتائج التي حصل عليها على النحو الآتي: «الرسالة الحسية التي انتقلت من الجهاز العصبي المركزي عند تمدُّد العضلة ... تتكون من تعاقب نبضات من النوع نفسه. يعتمد التردد الذي تتكرر به النبضات على شدة المثير، لكن حجم النبضات لا يتنوع.» أشار أدريان إلى هذا الاستنتاج — أي حقيقة أن حجمَ جهد الفعل الذي أطلقته هذه الخلايا العصبية الحسية، وشكلَه ومدتَه لا تتغير بصرف النظر، عما إذا كان الثقل المؤثر على العضلة ثقيلًا أو خفيفًا — باسم مبدأ «الكل أو لا شيء».

تظهر من جديد أمثلة على مبدأ «الكل أو لا شيء» الذي ينطبق على طبيعة النبضات العصبية على مدار الكتاب. في الأنواع المختلفة، ينطبق الأمر نفسه على الأعصاب المختلفة التي تحمل رسائل مختلفة. لا تتغير جهود الفعل بناءً على الإشارة التي تُرسلها، لكن ترددها يمكن أن يتغير. وبذلك تكون الإشارات العصبية أشبهَ بجيش من النمل؛ قد تكون كل إشارة مفردة مماثلة للإشارات الأخرى تقريبًا؛ ومن ثم فإن تأثيرها يعتمد اعتمادًا رئيسيًّا على أعدادها مجتمعة لا على كل إشارةٍ منفردة.

إذا كانت طبيعة جهد الفعل المفرد واحدةً، بصرف النظر عن مدى قوة أو ضعف المثير الحِسِّي المتسبِّب في حدوث جهد الفعل، فإن ثمة شيئًا واحدًا مؤكدًا: حجم جهد الفعل لا يحمل معلوماتٍ عن مدى شدة المثير. بالمساهمات التي قدَّمها أدريان، اطمأن علماء وظائف الأعضاء إلى فكرة الشُّروع في البحث عن مكان وجود المعلومات بالضبط في الأعصاب، وكيفية انتقالها.

كانت هناك مشكلة واحدة فقط: ماذا تعني المعلومات بالضبط؟ الدم الذي يضخُّه القلب، والغازات التي يجري تبادلها في الرئتَين مواد فيزيائية حقيقية. وهي مواد ملحوظة وملموسة ويمكن قياسها. على الرغم من شيوع استخدام كلمة «معلومات»، فإنها بالفعل تُعد من المفاهيم الغامضة والمُحيِّرة. التعريف الدقيق للكلمة لا يتبادر إلى ذهن معظم الأشخاص بسهولة، بل لسوء الحظ تقع الكلمة ضمن فئة الأشياء التي لا يمكن التعرُّف عليها أو فَهْمها إلا عند رؤيتها. دون وجود طريقةٍ لوزن المعلومات بالطريقة نفسها التي نَزِن بها السوائل أو الغازات، هل هناك أملٌ في أن يحقِّق العلماء الفَهْم الكمي للغرض الرئيسي للدماغ؟

ومع ذلك، في الوقت الفاصل ما بين كتاب أدريان وتقرير بيركل وبولوك، عُثر على تعريف كمِّي للمعلومات. خرج هذا التعريف من رحِم التحديات العلمية التي واجهت العلماء خلال الحرب العالمية الثانية، ومضى في طريقه نحو تحويل العالم بطرق غير متوقعة. وعلى الرغم من أن هذا التعريف بدا واضحًا، فإن تطبيقه على دراسة الدماغ في بعض الأوقات كان صعبًا.

بدأ كلود شانون في مختبرات بيل بموجب عقد مقدَّم من الجيش الأمريكي. كان ذلك في عام ١٩٤١؛ حيث كانت لجنة أبحاث الدفاع الوطني ترغب في وجود علماء يعملون على تكنولوجيا لاستخدامها وقت الحرب. لكن جدية العمل لم تُخمِد طبيعة شانون المرحة. كان يستمتع بألعاب الخِفة، وفي أثناء وجوده في مختبرات بيل، عُرف عنه ممارسة ألعاب الخفة أثناء قيادته لدراجة أُحادية العجلة.

شبَّ شانون، الذي وُلد في وسط غرب الولايات المتحدة، على اتباع فضوله تجاه كل ما يتعلق بالعلوم والرياضيات والهندسة أينما يأخذه. خلال طفولته، لعب بأجزاء المذياع واستمتع بأُحجِيات الأعداد. وفي أثناء شبابه ابتكر نظرية رياضية لألعاب الخفة، وطَبَقًا طائرًا يعمل باللهب. كان يستمتع بلعب الشطرنج، وبناء آلات يمكنها لعب الشطرنج. نتيجة لكونه هاويًا للإصلاح، صنع العديد من الأجهزة والأدوات الصغيرة، بعضها أكثر إنتاجية من الأخرى. على سبيل المثال، احتفظ على مكتبه في مختبرات بيل بـ «جهاز عديم

الفائدة»، وهو عبارة عن صندوق له مفتاح، يؤدي تشغيل المفتاح إلى جَعْل اليد الميكانيكية تصل إلى المفتاح كي تغلقه من جديد.[١]

لنيل درجة الماجيستير، كتب شانون أطروحة تبلغ ٧٢ صفحة، بعنوان «التحليل الرمزي لدوائر الترحيل والتبديل» ستُحدث ثورةً في الهندسة الكهربية. ولنيل درجة الدكتوراه، حوَّل اهتمامه إلى علم الأحياء؛ إذ عمِل على أطروحة «الجبر لعلم الوراثة النظرية». إلا أن الموضوع الذي عمل عليه في مختبرات بيل هو التشفير. كانت كيفية تشفير الرسائل التي يُفترض إرسالها بَرًّا أو جوًّا أو بحرًا، من الموضوعات التي من الطبيعي أن تُثير اهتمامًا لدى الجيش. كانت مختبرات بيل مركزًا لأبحاث التشفير، حتى إنه استضاف مخترِق الشفرات سيئ السمعة «آلان تورينج»، في الوقت الذي كان شانون يعمل هناك.

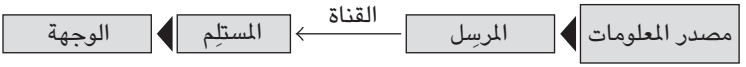
كل هذا العمل على الشفرات والرسائل هو ما دفع شانون إلى التفكير بشكل موسَّع في مفهوم الاتصال. في أثناء الحرب طرح طريقة لفهم إرسال الرسائل رياضيًّا. لكن بسبب السرية الإجبارية التي كانت تكتنف أبحاث التشفير، بقيَت أفكاره سرية. في عام ١٩٤٨ تمكن شانون أخيرًا من نشر أفكاره، وأصبحت ورقتُه البحثية «نظرية رياضية للاتصال» الوثيقةَ التأسيسية لمجال جديد هو: نظرية المعلومات.

تصف الورقة البحثية لشانون نظام اتصال عام جدًّا، يتكون من خمسة مكونات بسيطة. المكوِّن الأول هو مصدر المعلومات الذي يُنتج الرسالة التي يُفترض إرسالها. والمكوِّن الثاني هو المرسِل، وهو المسئول عن تشفير الرسالة في صورةٍ يمكن بها إرسالها عبر المكون الثالث، وهو القناة. على الطرف الآخر من القناة، يفكُّ المستلم شفرة المعلومات مرة أخرى ويعيدها إلى صورتها الطبيعية، ثم تُرسل إلى وجهتها الأخيرة.

في إطار العمل هذا، وسيطُ الرسالة ليس له صلة. قد يكون الوسيطُ أغاني تُبث عبر المذياع، أو كلمات مكتوبة على تِلغراف أو صورًا عبر الإنترنت. كما قال شانون، تُعد مكونات نموذج إرسال المعلومات «الصورة المجردة أو المبسطة للمكونات الفيزيائية التي تقابلها في عملية إرسال المعلومات.» وهذا ممكن؛ لأنه في كل هذه الحالات تظل مشكلة

[١] كان مارفن مينسكي، أحد مؤلفي كتاب «بيرسيبترون» مُشار إليه في الفصل الثالث، يعمل تحت إشراف شانون في ذلك الوقت ويُنسب إليه تصميم الآلة العديمة الفائدة. يُقال إن شانون أقنع مختبرات بيل بإنتاج العديد منها، وتقديمها هدايا للمديرين التنفيذيين في شركة إيه تي آند تي.

**نظام اتصال شانون**




شكل ٧-١

الاتصال واحدة. هذه المشكلة هي مشكلة «نقل الرسالة من مكان إلى آخر؛ بحيث تكون الرسالة المرسَلة مطابقة للرسالة الأصلية تمامًا أو تطابقها تقريبًا».

بوضع نظام الاتصال البسيط هذا في الاعتبار، كان شانون يهدف إلى إضفاء الطابع الرسمي على دراسة إرسال المعلومات. لكن، لتناول مسألة كيفية انتقال المعلومات من الناحية الرياضية، تعيَّن على شانون أولًا تعريف المعلومات رياضيًّا. بناءً على الأعمال السابقة، ناقش شانون الخواص المرغوب بها التي لا بد أن تتوافر في مقياس المعلومات. بعض هذه الخواص عملية: يجب ألا تكون هذه المعلومات سالبة، على سبيل المثال، ولا بد أن يكون من السهل التعامل مع تعريفها رياضيًّا. لكن العقبة الحقيقية تأتي من الحاجة إلى فهم المعلومات، لا سيما أنها تعتمد على الشفرة.

تخيَّل مدرسة يرتدي كل طلابها زيًّا مُوحدًا. رؤية الطلاب يظهرون بالملابس نفسها كل يوم تعطيك معلوماتٍ ضئيلةً جدًّا عن مزاجهم وشخصيتهم، وعن الطقس. في المقابل، في المدارس التي لا تفرض زيًّا موحدًا، يلعب اختيار الملابس دورًا في نَقْل كل هذه المعلومات وأكثر. على سبيل المثال، بالنسبة لشخصٍ يتساءل عن درجة الحرارة الحالية، رؤية طالبة ترتدي فستانًا صيفيًّا بدلًا من ارتداء سترة ستجيب عن تساؤله وتُرضي فضوله. بهذه الطريقة، يمكننا اعتبار الملابس شفرةً؛ فهي مجموعةٌ من الرموز قابلةٌ للإرسال تنقل معنًى.

السبب في أن الطلاب الذين يرتدون زيًّا موحدًا لا ينقلون هذه المعلومات؛ هو أن الشفرة تتطلَّب أن يكون هناك خيارات. لا بد من وجود العديد من الرموز في مفردات الشفرة (في هذه الحالة، العديد من الملابس في خزانة ملابس الطالب)، كلٌّ منها له معنًى خاص، حتى يكون لهذه الشفرة معنًى.

لكن الأمر لا يتعلَّق فحسب بعدد الرموز في الشفرة، بل بكيفية استخدامها أيضًا. لنقُل إن أحد الطلاب لديه ثوبان: بنطال من الجينز وقميص بكمَّين قصيرَين، وبدلة. إذا كان الطالب يرتدي الجينز والقميص ٩٩ في المائة من الوقت، فلن تجني الكثير من

المعلومات من اختياره للزي. حتى إنك لن تحتاج إلى رؤيته كي تتأكد مما يرتديه، فما يرتديه في الأساس عبارة عن زي موحد. لكن الواحد في المائة من الوقت الذي يظهر فيه ببدلة يخبرك بشيء مهم. فهو يخبرك أن هذا اليوم مميَّز. ما يوضحه هذا هو أنه إذا ندَر استخدام الرمز، فإن المعلومات التي يتضمنها تكون أكثر. في المقابل، لا تخبرنا الرموز الشائعة الاستخدام بالكثير من المعلومات.

أراد شانون تمثيل هذه العلاقة بين استخدام الرمز ومحتوى المعلومات الذي يحمله. ومن ثم، عرَّف محتوى المعلومات للرمز من ناحية احتمالية ظهوره. على وجه التحديد — كي يجعل كمية المعلومات تقل مع زيادة احتمالية استخدام الرمز — جعل معلومات الرمز تعتمد على الاحتمال العكسي. ونظرًا لأن معكوس العدد يكافئ ببساطة واحدًا مقسومًا على العدد، فإنه كلما زادت قيمة الاحتمالية، قلَّت قيمة «الاحتمال العكسي». بهذه الطريقة، كلَّما تكرر استخدام الرمز قلَّت المعلومات التي يحملها. وأخيرًا، لمواجهة القيود الرياضية الأخرى التي ظهرت أمامه، أخذ لوغاريتم هذه القيمة.

يُعرَّف اللوغاريتم log عن طريق أساسه. لأخذ لوغاريتم عدد للأساس ١٠، على سبيل المثال، ستسأل نفسك: «لأي أسٍّ يتعيَّن عليَّ رفع العدد ١٠ كي أحصل على هذا العدد؟» ومن ثم، فإن لوغاريتم ١٠٠ للأساس ١٠ (الذي يُكتب على الصورة $\log_{10}100$) يساوي اثنَين، لأن ١٠ أُس اثنَين (أي ١٠ × ١٠) يساوي ١٠٠. إذن، لوغاريتم ١٠٠٠ للأساس ١٠ يُساوي ٣. ولوغاريتم عدد بين ١٠٠ و١٠٠٠ للأساس ١٠ يقع بين العددَين اثنَين وثلاثة.

قرر شانون استخدام الأساس اثنين من أجل تعريفه للمعلومات. إذن لحساب المعلومات الموجودة في رمز عليك أن تسأل نفسك: «لأي أُس يتعين عليَّ رفع العدد اثنين، للحصول على الاحتمالية العكسية لظهور الرمز؟» بافتراض أن لثيابِ الطالب المتمثلة في الجينز والقميص القصير الكمَّين رمزًا يظهر باحتمالية ٠,٩٩، فإن محتوى المعلومات للرمز يساوي $\log_2(1/0.99)$، وهو ما يساوي حوالي ٠,٠١٤. في المقابل، محتوى المعلومات التي تقدمها البدلة التي تكون احتمالية ظهورها ٠,٠١ يساوي $\log_2(1/0.01)$ أو ببساطة ٦,٦٤. مرة أخرى، كلما قلت الاحتمالية زادت المعلومات.[٢]

لكن اهتمام شانون لم يقتصر على المعلومات الموجودة في الرمز الواحد؛ بل أراد دراسة محتوى معلومات الشفرة. تُعرَّف الشفرة من خلال مجموعة الرموز التي تتكوَّن

[٢] سنتعرف على المزيد حول الاحتمالات وتاريخها في الفصل العاشر.

منها، ومدى تكرار كل رمزٍ منها. ومن ثم، عرَّف شانون إجمالي المعلومات في الشفرة بأنه ناتج جمع المعلومات الموجودة في كل رموزها. من الأهمية بمكانٍ ملاحظة أن هذا المجموع يُوزَن، بمعنى أن المعلومات من كل رمز تُضرب في عدد المرات التي يُستخدَم فيها هذا الرمز.

بموجب هذا التعريف، فإن إجمالي المعلومات التي تحملها الشفرة الممثلة في ملابس الطالب يساوي ٠٫٩٩ × ٠٫٠١٤ (المعلومات التي نحصل عليها من الجينز والقميص القصير الكمَّين) + ٠٫٠١ × ٦٫٦٤ (المعلومات التي نحصل عليها من البدلة) = ٠٫٠٨١. يمكن التفكير في ذلك باعتباره متوسط كمية المعلومات التي سنتلقاها كل يوم، برؤيتنا لملابس الطالب. أما إذا اختار الطالب أن يرتديَ الجينز ٨٠ في المائة من المرات ويرتدي البدلة ٢٠ في المائة من المرات، فسيكون الرمز الخاص بهذا مختلفًا. وسيكون متوسط المعلومات أعلى: $0.80 \times \log_2 (1/0.80) + 0.20 \times \log_2 (1/0.20) = 0.72$.

أطلق شانون على متوسط معدل نقل معلومات الشفرة اسمًا. هذا الاسم هو الاعتلاج أو الإنتروبيا. السبب الرسمي الذي جعله يطلق هذا الاسم هو أن تعريفه للمعلومات يرتبط بمفهوم الإنتروبيا، أو القصور الحراري في الفيزياء؛ حيث يُعد مقياسًا للفوضى. في المقابل، كان من المعروف أيضًا عن شانون أنه ادَّعى — ربما على سبيل المزاح — أنه نُصِح بأن يُسمي مقياسه الإنتروبيا نظرًا لأنه «لا أحد يفهم الإنتروبيا»؛ ومن ثَم من المرجَّح أن يفوز شانون دائمًا في النقاشات الدائرة حول نظريته.

تمثل معادلة الإنتروبيا التي قدَّمها شانون عملية الموازنة التي تنطوي عليها محاولات زيادة كمية المعلومات التي نحصل عليها. فالرموز النادرة تحمل القدر الأكبر من المعلومات؛ ومن ثم فإنك ترغب في أكبر قدر ممكن من هذه الرموز في شفرتك الخاصة. إلا أنك كلما أكثرت من استخدام الرمز النادر أصبح أقل نُدرة. هذا الصراع يعرِّف معادلة الإنتروبيا بشكلٍ كامل، انخفاض احتمالية استخدام الرمز يجعل لوغاريتم الاحتمال العكسي يزداد، وهو ما يكون له تأثير إيجابي على المعلومات. إلا أن هذا العدد يُضرب بعد ذلك في الاحتمالية نفسها؛ هذا معناه أن تقليل احتمالية استخدام الرمز يجعل مساهمته في المعلومات تقل. إذن، للحصول على الحد الأقصى من الإنتروبيا، يتعيَّن علينا جَعْل الرموز النادرة شائعةَ الاستخدام بقدر الإمكان، بشرط ألَّا نجعلها عامةً أو عادية.

استخدام شانون للوغاريتم الأساس اثنين جعل وحدة المعلومات هي «البِت». مصطلح بِت (bit) في الإنجليزية يُعد اختصارًا لمصطلح binary digit الذي يعني نظام العدِّ الثُّنائي،

وعلى الرغم من أن ورقة شانون البحثية شهدت أول استخدام معروف للمصطلح، فإنه لم يبتكرْه (نسب شانون الفضل في ابتكار المصطلح إلى زميله في مختبرات بيل جون توكي).[٣] للبت، باعتباره وحدةَ قياس للمعلومات، تفسير مفيد وبديهي. لا سيما أن متوسط عدد وحدات البت في الرمز يساوي عدد أسئلة نعم أو لا، التي يتعيَّن عليك طرحُها لكي تحصل على كمية المعلومات تلك.

على سبيل المثال، هب أنك تحاول إيجاد الفصل الذي ولِد فيه أحدهم. قد تبدأ بطرح السؤال الآتي: «هل هو موسم انتقالي؟» إذا كانت الإجابة بنعم، فربما تسأل بعد ذلك: «هل هو الربيع؟» فإذا قيل: نعم، فستكون بذلك حصلت على الإجابة، أما إذا أُجيب بلا، فستكون حصلت على الإجابة أيضًا وهي الخريف. أما إذا كانت الإجابة عن السؤال الأول بلا، ستسلك طريقًا مختلفًا؛ إذ ستسأله عما إذا كان وُلد في الصيف مثلًا. وبصرف النظر عن إجابته، سيتطلب حصولك على الإجابة سؤالين من أسئلة نعم أو لا. تتفق معادلة الإنتروبيا لشانون مع ذلك. إذا كانت احتمالية أن يُولد الشخص في أي فصل من الفصول واحدة، فإن كل «رمز» من رموز الفصول هذه سيُستخدم ٢٥ في المائة من المرات. ومن ثم فإن المعلومات التي يحملها كل رمز تساوي $\log_2 (1/0.25)$ هذا يجعل متوسط عدد وحدات البت للرمز يساوي اثنين، وهو نفسه عدد الأسئلة.

يُعد جزءًا من تصميم نظام اتصال جيد تصميمُ شفرة تحتوي على مزيد من المعلومات لكل رمز. للحصول على أقصى حد لمتوسط المعلومات التي يقدمها رمز في شفرة، يتعين علينا الحصول على أقصى إنتروبيا للشفرة. لكن، كما نرى، ثمة توتر متأصل في تعريف الإنتروبيا. للحصول على أقصى إنتروبيا، لا بد من أن تصبح الرموز نادرةُ الاستخدام عاديةً أو شائعة. ما أفضل طريقة لتحقيق هذا المطلب الذي يبدو متناقضًا؟ تَبيَّن أن هذا السؤال المعقَّد له إجابة بسيطة. للحصول على أقصى إنتروبيا للشفرة، لا بد أن تُستخدَم رموز الشفرة بنفس المقدار بالضبط. لديك خمسة رموز؟ إذن، استخدم كل رمز خُمسَ عدد المرات. لديك مائة رمز؟ لا بد أن تساوي احتمالية كل رمز واحدًا على

[٣] لم يكن لوغاريتم الأساسِ اثنين الخيارَ الوحيد للمعلومات. قبل العمل الذي قام به شانون، طرح زميله رالف هارتلي تعريفًا للمعلومات باستخدام لوغاريتم الأساس ١٠، وهو ما كان سيجعل التعبير عن كمية المعلومات من خلال «الأرقام العشرية» أو «الديت» بدلًا من «البت».

مائة. جعل كل الرموز محتملة بنفس القدر يحقق التوازن بين الرموز النادرة والشائعة في الاتصال.

علاوة على ذلك، كلما احتوت الشفرة على رموز أكثر، كان ذلك أفضل. الشفرة التي تحتوي على رمزَين، كل منهما يُستخدَم نصف عدد المرات، له إنتروبيا يساوي بِت واحدًا لكل رمز (هذا يبدو منطقيًّا وفقًا لتعريفنا البديهي للبت؛ إذ إنه باعتبار أحد الرمزين يُمثل الإجابة بنعم والآخر يمثل الإجابة بلا، فإن كل رمز يجيب عن سؤال نعم أو لا واحد). في المقابل، الشفرة التي تحتوي على ٦٤ رمزًا — جميع الرموز مستخدمة نفس عدد المرات — لها إنتروبيا تساوي ستَّ وحدات بِت لكل رمز.

الحصول على شفرة جيدة أمر ضروري، إلا أن التشفير ليس إلا الخطوة الأولى في رحلة رسالةٍ ما. وفقًا لمفهوم شانون عن الاتصال، بعد أن تُشفَّر المعلومات يلزم إرسالها عبر قناة في الطريق إلى وجهتها. وهنا تحديدًا تلتقي الأهداف المجردة المتعلقة بعملية إرسال الرسالة، بالقيود الفيزيائية المتعلقة بالمواد.

لنفكِّرْ في التلِغراف. يرسل التلغراف الرسائل عبر نبضات قصيرة من التيار الكهربي المارِّ عبر الأسلاك. تُعرِّف أنماط النبضات، وهي عبارة عن توليفة من «النقاط» الأقصَر و«الشرطات» الأطول، الأحرفَ الأبجدية. في شفرة مورس الأمريكية، على سبيل المثال، نقطة متبوعة بشرطة تشير إلى الحرف A ونقطتان وشرطة تعني الحرف U. القيود الفيزيائية وأوجه قصور الأسلاك التي تحمل هذه الرسائل، لا سيما تلك الرسائل التي تُرسَل لمسافات طويلة أو أسفل المحيطات، تضع قيدًا على سرعة المعلومات. كان عُمال التلغراف الذين يكتبون بسرعة كبيرة معرضين لخطر إدغام النقاط والشرطات معًا، وهو ما ينتج عنه شفرة مورس غامضة وغير مفهومة ولا قيمة لها، بالنسبة إلى المتلقي. عمليًّا، يمكن لعمال التلغراف أن يرسلوا بأمانٍ نحو ١٠٠ خطاب في الدقيقة في المتوسط.

لقياس معدل المعلومات التي تُنقَل عمليًّا، دمج شانون بين معدل المعلومات التي تنقلها الشفرة في الأساس وسرعة نقل المعلومات عبر قناةٍ مادية. على سبيل المثال، الشفرة التي تقدِّم ٥ وحدات بت من المعلومات لكل رمز، وتُرسَل عبر قناة يمكنها إرسال ١٠ رموز في الدقيقة؛ سيكون لها معدل معلوماتٍ يساوي ٥٠ بت في الدقيقة. يُعرف الحد الأقصى للمعدل الذي يمكن به إرسال المعلومات عبر قناة باسم سعة القناة.

فرَض العمل الذي ألفه شانون هيكلًا واضحًا على المفهوم المعروف بغموضه. بهذه الطريقة مهَّد الطريق لزيادة تجسيد المعلومات في صورة ملموسة في العقود التالية. إلا

أن الآثار الفورية لمجهود شانون على معالجة المعلومات في العالم الواقعي كانت طفيفة. استغرق ظهور التكنولوجيا، التي جعلت نقل المعلومات وتخزينها ومعالجتها جزءًا ثابتًا من الحياة اليومية، عقدَين. كما استغرقَت معرفة المهندسين بكيفية تسخير نظرية شانون، لجعل هذه الأجهزة تعمل بكفاءة؛ وقتًا. في المقابل، جاء تأثير نظرية المعلومات على علم الأحياء أسرع بكثير.

كان أول تطبيق لنظرية المعلومات في علم الأحياء في حد ذاته نتاجًا للحرب. كان الطبيب النمساوي هنري كويسلر يعيش ويعمل في الولايات المتحدة أثناء الحرب العالمية الثانية. أفزعه تطوير القنبلة الذرية وشرع في اتخاذ إجراءات فورية استجابة لذلك. فقد ترك عيادته الخاصة ليبدأ في إجراء أبحاث حول الآثار الطبية والجينية للقنابل النووية. لكنه احتاج إلى تحديد كيفية تغيُّر المعلومات المشفَّرة لدى الكائن الحي، عند التعرض للإشعاع. «يا لها من صيغٍ مُنزَّلة من السماء، عظيم! يمكنني المتابعة الآن.» يقال إن هذا ما عبَّر به كويسلر عندما علم بنظرية شانون. كتب ورقةً بحثية عام ١٩٤٩ — أي بعد عام واحد من نشر عمل شانون — تحت عنوان «محتوى المعلومات ومعدل الأخطاء لدى الكائنات الحية». كانت هذه الورقة البحثية نقطة انطلاق لدراسة المعلومات في علم الأحياء.

وما لبث أن تبِعه عِلم الأعصاب في ذلك. في عام ١٩٥٢ نشر العالم وارن ماكولك وعالم الفيزياء دونالد ماكي ورقةً بحثيةً بعنوان «الحد الأقصى لقدرة الوصلة العصبية على نقل معلومات». في هذه الورقة البحثية توصَّل الباحثان إلى ما اعتبراه التقدير الأكثر تفاؤلًا لمقدار المعلومات، الذي يمكن أن تحمله الخلية العصبية الفردية. استخدم ماكولك وماكي متوسط الوقت الذي تستغرقه الخلية العصبية كي تُطلق جهد فعل، والحد الأدنى للوقت اللازم بين إطلاق جهد الفعل والعوامل الفسيولوجية الأخرى، لإثبات أن الحد العلوي لما يمكن للخلية العصبية الفردية حملُه من المعلومات يساوي ٢٩٠٠ بت في الثانية.

سارع ماكاي وماكولك بالتأكيد على أن هذا لا يعني أن الخلايا العصبية تُطلق بالضرورة هذا القدر من المعلومات بالفعل، إلا في ظل أفضل الظروف الممكنة. تبِع بحثَهما المزيد من الأبحاث، وكلٌّ من هذه الأبحاث يهدف إلى اكتشاف سعة التشفير الحقيقية للدماغ. كان الباحثون في هذا المجال غارقين في محاولاتهم؛ لدرجة أنه في عام ١٩٦٧ كتب عالم الأعصاب ريتشارد شتاين ورقةً بحثية، اعترف فيها بدور نظرية المعلومات في قياس كمية المعلومات التي تُنقل عبر الجهاز العصبي، لكنه أيضًا عبَّر عن أسفه بشأن التفاوتات

الهائلة التي نتجت عن تطبيقها. وبالفعل، في العمل الذي جاء بعد بحث ماكاي وماكولك، تراوحت التقديرات ما بين قيمةٍ أعلى من القيمة التي قدَّرها ماكاي وماكولك — أي ٤٠٠٠ بت لكل خلية عصبية — وقيمة أقل بكثير، تصل لثُلث بت في الثانية.

نتج هذا التفاوت جزئيًّا عن الأفكار المختلفة، حول كيفية ربط الأنماط والأجزاء المختلفة للنشاط العصبي بالمكونات البنائية في نظرية المعلومات لشانون. يتمحور السؤال الأكبر حول كيفية تحديد الرمز. ما جوانب النشاط العصبي التي تحمل معلومات بالفعل وما الجوانب الطارئة؟ ما الشفرة العصبية في الأساس؟

الاستنتاج الأصلي لأدريان — أن حجم الإشارة العصبية الكهربية الناتجة خلال جهد الفعل ليس العنصر الأهم — ظل راسخًا.[٤] لكن حتى في ظل وجود هذا القيد، كثرت الخيارات. بالبدء بالمكون الأساسي المتمثل في جهد الفعل، كان العلماء لا يزالون قادرين على ابتكار العديد من الشفرات المعقولة. بدأ ماكاي وماكولك التفكير في الشفرة العصبية باعتبارها مكونة من رمزَين: إطلاق جهد فعل، أو عدم إطلاق جهد فعل. عند أي لحظة زمنية قد ترسل الخلية العصبية أحد الرمزين. لكن بعد حساب معدل المعلومات لهذه الشفرة، أدرك ماكاي وماكولك أنه كان بمقدورهما القيام بعمل أفضل. فالتفكير في الزمن الفاصل بين جهود الفعل باعتباره الشفرة بدلًا من ذلك، أتاح للخلية العصبية إرسال مزيدٍ من المعلومات. في نظام التشفير هذا، إذا كان هناك فاصل زمني مقداره ٢٠ ملِّي ثانية بين جُهدَي فعل، فإن هذا من شأنه أن يرمز إلى شيء مختلف عن فاصل زمني مقداره ١٠ ملِّي ثوانٍ. وقد أدى هذا النظام إلى تكوين عدد أكبر من الرموز الممكنة، كما أن هذا النمط من التشفير مكَّنهما من التوصل إلى التقدير البالغ ٢٩٠٠ بت في الثانية.

في محاولة من شتاين لتبسيط اكتظاظ الشفرات وترتيبها في ذلك الوقت، ركَّز على خيار ثالثٍ للتشفير العصبي، وهو الخيار النابع من أدريان نفسه. بعدما أكَّد أدريان على أن جهود الفعل لا تتغير بتغيُّر المثير، ادَّعى الآتي: «في الواقع، الطريقة الوحيدة التي يمكن بها جعل الرسالة تتنوع من الأساس، هي التنويع في إجمالي عدد النبضات ومعدل تكرار حدوثها.» يُعرف هذا النمط من التشفير — الذي يُعتبر فيه عدد جهود الفعل التي تُطلق

[٤] إفصاح كامل؛ على الرغم من ذلك، لا يزال بعض علماء الأعصاب المعاصرين يستكشفون الفكرة القائلة بأن جهود الفعل تتغير حقًّا، بطرق معينة بِناءً على المدخلات التي تحصل عليها الخلية، وإن هذه التغيرات قد تكون جزءًا من الشفرة العصبية. فالعلم ليس جامدًا كالحجَر على الإطلاق.

خلال مدة زمنية محددة هو الرمز — باسم التشفير القائم على المعدل أو التردد. في ورقة شتاين البحثية، المنشورة عام ١٩٦٧، أيَّد وجود شفرة تقوم على المعدل، وسلَّط الضوء على فوائدها التي تشمل تسامحًا أكبر مع الخطأ.

لكن الجدل بشأن ماهية الشفرة العصبية الحقيقية لم ينتهِ مع شتاين عام ١٩٦٧. كما أنه لم ينتهِ باجتماع بولوك وبيركيل حول تشفير المعلومات في الدماغ، في العام الذي يليه. في الواقع، في تقريرهما عن الاجتماع، أرفق بولوك وبيركل مُلحقًا يستعرض عشرات من الشفرات العصبية المحتملة، وكيف يمكن تنفيذها.

في الحقيقة، لا يزال علماء الأعصاب يتصادمون ويتصارعون حول الشفرة العصبية إلى يومنا هذا. فقد استضافوا مؤتمرات تتمَحْور حول «فك الشفرة العصبية». وكتبوا أوراقًا بحثية بعناوين مثل «البحث عن الشفرة العصبية»، «هل حان وقت شفرة عصبية جديدة؟» وحتى «هل توجد شفرة عصبية؟» استمر العلماء في البحث عن دليل جيد، لتأييد فكرة أدريان الأصلية المتعلقة بالتشفير القائم على المعدل، إلا أن بعض الأدلة كانت تعارض الفكرة أيضًا. قد يبدو التعرُّف على الشفرة العصبية الآن هدفًا بعيد المنال أكثر مما كان عليه، عندما كتب ماكاي وماكولك تأمُّلاتهما الأولى بشأنه.

بشكلٍ عام، يمكن العثور على بعض الأدلة على وجود تشفير يقوم على المعدل في معظم مناطق الدماغ. فالخلايا العصبية التي ترسل معلوماتٍ من العين تُغيِّر معدل إطلاق الإشارات، بناءً على شدة الضوء. والخلايا العصبية التي تحمل شفرة الرائحة تُطلق إشاراتٍ عصبيةً كهربية، بما يتناسب مع تركيز الرائحة المفضلة لها. وكما أوضح أدريان، تُطلق المستقبلات الموجودة في العضلة والمستقبلات الموجودة في الجلد إشاراتٍ أكثر، عند التعرُّض لمزيدٍ من الضغط. لكن بعض الأدلة الأقوى المؤيدة لأنظمة التشفير الأخرى تأتي من مشكلاتٍ حسيةٍ تتطلَّب حُلولًا محدَّدة جدًّا.

عند تحديد موقع مصدر الصوت، على سبيل المثال، يكون التوقيت الدقيق مُهمًّا. نظرًا لوجود مسافة بين الأذنين، فإن الصوت القادم من الجهة اليسرى أو الجهة اليمنى سيصطدم بالأذن الموجودة في الاتجاه نفسه، قبل أن يصطدم بالأخرى. هذه الفجوة بين توقيتَي وصول الصوت لكل أذن — أحيانًا لا تتعدى بضعة أجزاء من المليون من الثانية — تُعطي تلميحًا لحساب مصدر الصوت. تُعد الزيتونة العلوية الوسطى (MSO)، وهي حزمة صغيرة من الخلايا تقع ما بين الأذنَين مباشرة، مسئولة عن تنفيذ هذه العملية الحسابية.

اقترح عالم النفس لويد جيفريس الدائرة العصبية التي يمكنها تنفيذ ذلك عام ١٩٤٨، وقد دعمها العديد من التجارب منذ ذلك الحين. يبدأ نموذج جيفريس بالمعلومات الواردة من كل أذن في صورة شفرة زمنية؛ أي إن التوقيت المحدد لإطلاق جهود الفعل أمر حاسم. في الزيتونة العلوية الوسطى، تقارِن الخلايا التي تستقبل المدخلات من كل أذن بين توقيت مدخلات كل أذن. على سبيل المثال، إحدى هذه الخلايا مصمَّمة لتحديد الأصوات التي تصل إلى الأذنَين كلتَيهما معًا. لحدوث هذا، لا بد أن تستغرق الإشارات القادمة من كل أذن نفس المقدار الزمني للوصول إلى خلية الزيتونة العلوية الوسطى. تُطلِق هذه الخلية إشارات عندما تستقبل مدخلَين في الوقت نفسه تمامًا، وهذه الاستجابة تُبين أن الصوت يصطدم بالأذنَين في الوقت نفسه.

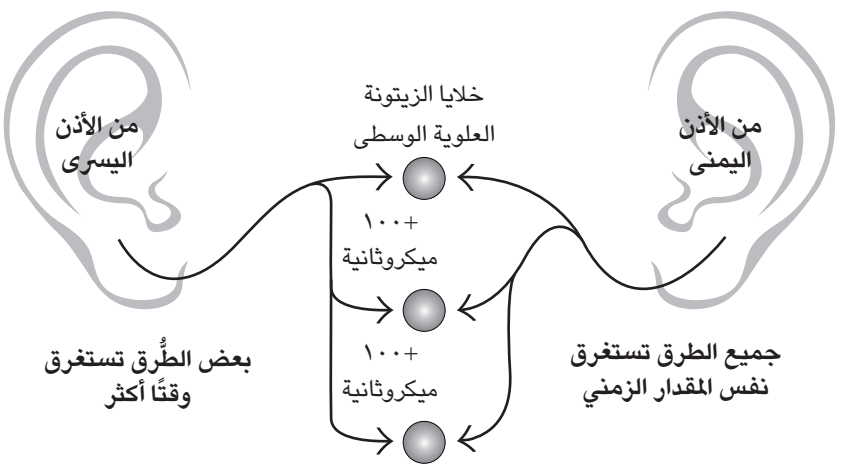
أما الخلية المجاورة لها، فتتلقَّى مُدخلات غير متماثلة قليلًا. بمعنى أنه للوصول إلى هذه الخلية، يتعيَّن على النسيج العصبي الذي يحمل المعلومات من إحدى الأذنَين؛ أن ينتقل مسافةً أبعد قليلًا من المسافة التي يقطعها العصب الذي يحمل المعلومات من الأذن الأخرى. بسبب ذلك، تتأخر إحدى الإشارات الزمنية. وتحدد المسافة الإضافية التي تقطعها الإشارة مقدارَ الزمن الإضافي الذي تستغرقه. لنقُل إن الإشارة القادمة من الأذن اليسرى تستغرق ١٠٠ ميكروثانية إضافية، لتصل إلى خلية الزيتونة العلوية الوسطى. في هذه الحالة، فإن السبيل الوحيد لأن تتلقى هذه الخلية المُدخلَين في آنٍ واحد هو أن يصطدم الصوت بالأذن اليسرى، قبل أن يصطدم بالأذن اليمنى بنحو ١٠٠ ميكروثانية. ومن ثم فإن استجابة هذه الخلية (التي لا تحدث إلا عندما تتلقَّى مُدخلَين في آنٍ واحد، كما هي الحال في الخلية الأخرى) ستوضِّح وجودَ فرقٍ مقداره ١٠٠ ميكروثانية.

بالمتابعة على هذا المنوال، ربما تستجيب الخلية التي تليها لفرقٍ مقداره ٢٠٠، وربما تستجيب الخلية التي تقع بعد ذلك لفرق مقداره ٣٠٠، وما إلى ذلك. في المجمل، تشكِّل الخلايا الموجودة في الزيتونة العلوية الوسطى خريطةً تقع فيها الخلايا التي تُظهِر فروقًا طفيفة، في توقيت وصول الصوت على أحد الطرفَين، بينما تقع الخلايا التي تُظهِر فروقًا كبيرة في توقيت وصول الصوت على الطرف الآخر. بهذه الطريقة، تحوَّلت الشفرة الزمنية إلى شفرةٍ مكانية؛ إذ يحمل موضع الخلية العصبية النشطة في هذه الخريطة معلوماتٍ حول مصدر الصوت.

فيما يتعلق بالسؤال عن سبب كون الشفرة العصبية لغزًا، فإن الإجابة الأكثر احتمالًا هي — كما هي الحال في العديد من الأسئلة المتعلقة بالدماغ — أنها معقدة. بعض الخلايا

العصبية في بعض المناطق، في ظل بعض الظروف، ربما تستخدم شفرة تعتمد على معدل إطلاق الإشارات العصبية الكهربية. قد تستخدم الخلايا العصبية الأخرى، الموجودة في أوقات ومناطق مختلفة، شفرةً تعتمد على توقيت حدوث جهود الفعل، أو الزمن الفاصل بين جهود الفعل، أو شفرة مختلفة تمامًا. نتيجة لذلك، فإن التعطُّش إلى فك الشفرة العصبية لن يُروى أبدًا. يبدو وكأن الدماغ يتحدَّث العديد من اللغات المختلفة.

لم يزود التطورُ الجهازَ العصبي بشفرة عصبية واحدة، كما أنه لم يسهِّل على العلماء استيعاب العديد من الرموز المستخدمة في الشفرات العصبية. لكن وَفقًا لعالم الأعصاب البريطاني هوراس بارلو، أضاء التطور الدرب لفهم نظام التشفير في الدماغ لحسن الحظ. عُرف بارلو بأنه واحدٌ من مؤسسي فرضية التشفير الفعَّال، وهي فرضيةٌ تُفيد بأنه أيًّا كانت الشفرة التي يستخدمها الدماغ، فإنه يعمل على تشفير المعلومات بكفاءة.




شكل ٧-٢

كان بارلو مُتدربًا لدى اللورد أدريان. وعندما كان طالبًا في كامبريدج عام ١٩٤٧ كان يعمل معه كلما تسنَّى له إيجاده. لطالما كان بارلو مُولَعًا بالفيزياء والرياضيات، إلا أنه

اختار دراسة الطب.[٥] ومع ذلك، فقد أدرك خلال دراسته أن تأثير المزيد من الموضوعات الكمِّية يمكن أن يثير تساؤلات في علم الأحياء. وقد اعتبر هذه السمة تتناقض مع توجه معلمه: «لم يكن توجه [أدريان] نظريًّا؛ فقد تمثلت طريقته في أن لدينا الوسائل اللازمة للتسجيل من الألياف العصبية، وما علينا إلا مراقبة ما يحدث.»

قدَّم بارلو، الذي افتتن سريعًا بمعادلات شانون عندما ظهرت، العديد من الإسهامات المبكرة لدراسة المعلومات في الدماغ. إلا أنه بدلًا من أن يكتفي بحساب عدد وحدات البِت في الثانية، تعمق في استخدام نظرية المعلومات. في بعض الجوانب تكون قوانين المعلومات أساسية ومقيِّدة لعلم الأحياء؛ مثل قوانين الفيزياء. من منظور بارلو، هذه المعادلات يمكنها فعل ما هو أكثر من مجرد وصف الدماغ كما هو؛ بل يمكنها «تفسير» الكيفية التي تطور بها الدماغ لما هو عليه. ولأن بارلو كان متأكدًا من أهمية ذلك بالنسبة إلى علم الأعصاب، قارَن بين محاولة دراسة الدماغ دون التركيز على معالجة المعلومات، ومحاولة دراسة فَهم الجناح دون معرفة أن الطيور تطير.

توصل بارلو إلى فرضية التشفير الفعَّال، من خلال دَمْج التأملات حول نظرية المعلومات، وملاحظاته حول علم الأحياء. إذا تطور الدماغ بطريقة تتناسب مع نظرية المعلومات — والتطور يميل إلى إيجاد حلول لا بأس بها — فمن المنطقي استنتاج أن الدماغ يجيد تشفير المعلومات. كتب بارلو في ورقة بحثية عام ١٩٦١: «الخيار الآمن هُنا هو افتراض أن الجهاز العصبي كفء.» إذا كان هذا صحيحًا، فإن أي حيرةٍ بشأن سبب استجابة الخلايا العصبية بالطريقة التي تستجيب بها؛ قد يُتغلَّب عليها من خلال افتراض أن الخلايا العصبية تعمل بكفاءة.

لكن كيف يبدو تشفير المعلومات الفعال؟ لمعرفة هذا، ركَّز بارلو على ملاحظة التكرار. في إطار عمل شانون، تشير كلمة «تكرار» إلى حجم الفجوة بين الحد الأقصى للإنتروبيا الذي يمكن أن تحتوي عليه مجموعة محددة من الرموز، والإنتروبيا التي تحتوي عليه بالفعل. على سبيل المثال، إذا كانت الشفرة تحتوي على رمزَين، واستخدمت أحدَهما ٩٠ في المائة من المرات، واستخدمت الآخر ١٠ في المائة، فلن تكون الإنتروبيا عالية بالقدر المتوقع. إرسال الرمز نفسه ٩ مرات من أصل ١٠ يُعد تكرارًا. كما رأينا فيما سبق، الشفرة التي تكون بها إنتروبيا أعلى تستخدم كل رمز من هذه الرموز ٥٠ في المائة من المرات، وتكون

[٥] يُرجع بارلو الفضل في اهتمامه بالعلوم إلى والدته نورا، حفيدة شارلز داروين.

قيمة التكرار أو الفائض بها مساوية لصفر. اعتقد بارلو أن الأدمغة الفعالة تقلل هذا التكرار بقدر الإمكان.

والسبب في هذا أن التكرار يُعد إهدارًا للموارد. كما يتضح، تتسم اللغة الإنجليزية بالتكرار بشكل لا يوصف. المثال الأوَّلي على ذلك هو حرف q الذي يليه بشكلٍ يكاد يكون دائمًا حرف u. ومن ثم فإن رؤية الحرف u بمجرد أن نرى الحرف q يضيف قدرًا ضئيلًا من المعلومات، هذا إن كان يضيف معلومات من الأساس، وبذلك فهو متكرر. التكرار في الإنجليزية يعني أنه يمكننا نظريًّا إرسال القدر نفسه من المعلومات بحروف أقل بكثير. في الواقع، في ورقة شانون البحثية الأصلية المنشورة عام ١٩٤٨، قدَّر شانون أن نسبة التكرار في اللغة الإنجليزية المكتوبة تبلغ نحو ٥٠ في المائة. ولهذا السبب، لا يزال بإمكان الناس قراءة الجُمل الإنجليزية التي أزيلت منها كل الحروف المتحركة؛ كهذه الجملة على سبيل المثال: ppl cn stll rd sntncs tht hv ll th vwls rmvd.[٦]

في الجهاز العصبي، يمكن أن يأتي التكرار في صورة خلايا عصبية متعددة تقول الشيء نفسه. تخيل وجود خلية عصبية تمثِّل الحرف q وأخرى تمثِّل الحرف u. رؤية qu سيجعل هاتَين الخليتَين كلتَيهما تُطلقان إشارات عصبية. لكن إذا ظهر هذان الحرفان معًا بشكلٍ متكرر في العالم، فسيكون من الأكفأ أن يستخدم الدماغ خليةً عصبيةً واحدةً للاستجابة لهما.

لماذا تُعد كفاءة الدماغ في التشفير أمرًا مُهمًّا؟ يتمثل أحد الأسباب في استهلاك الطاقة. ففي كل مرة تُطلق الخلية جهد فعل، يختل التوازن بين الجُسيمات المشحونة داخل الخلية وخارجها. استعادة هذا التوازن تتطلب طاقة؛ إذ يتعين على المضخات الصغيرة في الغشاء الخلوي طرد أيونات الصوديوم من الخلية، واستعادة أيونات البوتاسيوم إلى داخل الخلية مرة أخرى. تَخليقُ النواقل العصبية وإطلاقُها من الخلية مع كل جهد فعل يُطلَقُ يتطلَّبان طاقةً. في المجمل، فإنه وفقًا للتقديرات، يُخصص ما يصل إلى ثلاثة أرباع من الطاقة التي يستهلكها الدماغ، لصالح إرسال الإشارات واستقبالها. ويُعد الدماغ — الذي يستهلك

[٦] في حالة أنك لم تتمكن من قراءة الجملة: people can still read sentences that have all the vowels removed. فهي تعني «لا يزال بإمكان الناس قراءة الجُمل التي أزيلت منها كل الحروف المتحركة». وتُعد كتابة الرسائل النصية والتغريدات من الطُّرق الرائعة، لمعرفة عدد الحروف التي يمكن إزالتها من الكلمة قبل أن تُسبِّب مشكلات.

٢٠ في المائة من طاقة الجسم، في حين أنه يشكِّل اثنين بالمائة من وزن الجسم — هو أكثر عضو يستهلك طاقة كي يقوم بوظائفه. ونظرًا لهذا الاستهلاك المرتفع للطاقة، من المنطقي أن يكون الدماغ موفِّرًا في الكيفية التي يستخدم بها جهود الفعل التي يُطلقها.

لكنْ لمعرفة كيفية إرسال معلومات بكفاءة، يتعين على الدماغ معرفة نوع المعلومات التي يحتاج إلى إرسالها بشكلٍ طبيعي. على وجه الخصوص، يتعين على الدماغ تحديد متى تكون المعلومات التي يتلقاها من العالم مُكررة. وبهذا قد لا يكلف نفسه عناء إرسالها. هذا من شأنه أن يجعل الشفرة العصبية فعَّالة. هل الجهاز العصبي له القدرة على تتبُّع إحصاءات المعلومات التي يستقبلها، وربط نمط التشفير الخاص بهذه المعلومات بالعالم المحيط؟ أحد الاستنتاجات التي توصَّل إليها اللورد أدريان — وهو التكيُّف — يفيد بأن لديه القدرة على ذلك.

في تجاربه على مستقبِلات تمدد العضلات، لاحظ أدريان وجود «انخفاض تدريجي في تواتر تفريغ الشحنة في ظل وجود مثير ثابت.» على وجه التحديد، مع الإبقاء على الوزن المؤثر على العضلة كما هو، ينخفض معدل إطلاق الإشارات العصبية الكهربية إلى النصف خلال ١٠ ثوانٍ. أطلق أدريان على هذه الظاهرة «التكيُّف» وعرفها بأنها «انخفاض في الاستثارة التي يسببها المثير.» ونظرًا لأنه لاحظ هذا التأثير في العديد من تجاربه، فقد خصَّص فصلًا كاملًا لهذا الموضوع في كتابه الذي نُشِر عام ١٩٢٨.

ومنذ ذلك الحين، وُجِد التكيُّف في جميع أنحاء الجهاز العصبي. على سبيل المثال، «تأثير الشلال» هو خداع بصري تبدو فيه الأجسام الثابتة للشخص الذي يتحرك في اتجاه معين، وكأنها تتحرك في الاتجاه المعاكس. ويُسمى بذلك لأنه قد يحدث بعد التحديق في حركة الشلال المتجهة إلى الأسفل. يُعتقد أن هذا التأثير يكون نتيجة لتكيُّف الخلايا التي تمثِّل اتجاه الحركة الأصلي؛ فمع انخفاض نشاط هذه الخلايا نتيجة لتكيفها مع اتجاه الحركة الأصلي، يعتمد إدراكنا بشكلٍ أكبر على إطلاق الإشارات العصبية، بواسطة الخلايا التي تمثِّل الاتجاه المقابل.

في ورقة نُشرت لبارلو عام ١٩٧٢، تحمَّس للتكيُّف باعتباره وسيلة لزيادة الكفاءة: «إذا كانت الرسائل الحِسِّية ستُعطى أهمية تتناسب مع قيمة المعلومات التي تقدمها، فلا بد من وجود آليات لتقليل شدة الإشارات التي تمثِّل الأنماط التي تتواجد باستمرار، وهُنا يكمُن الأساس المنطقي للتأثيرات التكيفية».

بعبارة أخرى، وتحديدًا على حد تعبير نظرية المعلومات، في حالة إرسال الرمز نفسه عبر قناة مرارًا وتكرارًا، فإن وجوده لم يعد يحمل معلومات. ومن ثم، من المنطقي أن تتوقف عن إرساله. وهذا ما تفعله الخلية العصبية؛ فهي تتوقف عن إطلاق جهود فعل عندما ترى المثير نفسه مرارًا وتكرارًا.

منذ أن ادَّعى بارلو أنه يتعين على الخلايا أن تُطوِّع استجاباتها وفقًا للإشارات التي تستقبلها، طوَّر العديدُ من تقنيات تتبع كيفية قيام الخلايا العصبية بتشفير المعلومات، وهو ما أتاح المزيد من الاختبارات المباشرة والدقيقة لهذه الفرضية. في عام ٢٠٠١، على سبيل المثال، درس عالم الأعصاب الحاسوبي أدريان فيرهول، جنبًا إلى جنب مع زملاءَ من معهد الأبحاث التابع لشركة إن إي سي في برينستون في ولاية نيوجيرسي، القدرات التكيفية للخلايا العصبية البصرية لدى الذباب.

من أجل التجربة، عرض الباحثون على الذباب شريطًا يتحرك يسارًا ويمينًا على الشاشة. في البداية كانت الحركة غير متوقعة وغير منتظمة. في إحدى اللحظات كان من الممكن أن يتحرك بسرعة شديدة نحو اليسار، وفي اللحظة التي تليها كان من الممكن أن يتحرك بالسرعة نفسها نحو اليمين، أو قد يبقى في هذا الاتجاه أو قد يتباطأ تمامًا. في المجمل، يكون نطاق السرعات الممكنة كبيرًا. بعد ثوانٍ عديدة من هذه الفوضى يهدأ الشريط. وتصبح حركته مقيَّدة أكثر، فلا ينطلق بسرعة في أيٍّ من الاتجاهَين. على مدار التجربة، تأرجح الشريط ما بين فتراتٍ تكون فيها الحركة غير منتظمة، وفترات تكون فيها الحركة هادئةً لمرات عديدة.

بالنظر إلى نشاط الخلايا العصبية التي تستجيب للحركة، وجد الباحثون أن النظام البصري يكيف شفرته بسرعة مع معلومات الحركة التي يحصل عليها في الحال. على وجه التحديد، كي تكون الخلية العصبية مُشفِّرًا فعَّالًا، يتعين على الخلية العصبية أن تُطلق إشارات عصبية بأعلى معدل إطلاق، في حالة الحركة الأسرع غير المنتظمة، وتطلق إشارات بأقل معدل إطلاقٍ في حالة الحركة الأبطأ.[٧] بالتفكير في معدلات الإطلاق المختلفة، باعتبارها

[٧] من الناحية الفنية، إذا كانت الخلية العصبية لها اتجاه حركة مفضَّل، بمعنى أنها تطلق إشارات بقوةٍ أكبر في حالة الحركة ناحية اليمين على سبيل المثال، فإنها ستُطلق إشارات بأقصى معدل إطلاق في هذا الاتجاه، وأدنى معدل إطلاق في حالة السرعة العالية في الاتجاه المقابل. لكن المبدأ ظل كما هو بصرف النظر عن التبديل بين هذَين النوعَين من الحركة.

رموزًا مختلفة في الشفرة العصبية، يضمن توزيع معدلات الإطلاق بهذه الطريقة أن هذه الرموز جميعها ستُستخدم بالتساوي تقريبًا. وهذا يرفع إنتروبيا الشفرة إلى الحد الأقصى.

تكمن المشكلة في أن أسرع حركةٍ خلال الفترة الهادئة أبطأ بكثيرٍ من أسرع حركة، أثناء الحركة التي يغلب عليها عدم الانتظام. وهذا يعني أنه يتعيَّن على السرعة الواحدة أن ترتبط بمعدلَيْ إطلاقٍ مختلفَين، بناءً على السياق الذي تظهر فيه. وعلى كون ذلك غريبًا، هذا ما رآه فيرهول وزملاؤه. في أثناء الفترة الهادئة، عندما كان الشريط يتحرَّك بأقصى سرعة، كانت الخلية العصبية تُطلق ما يزيد عن ١٠٠ جهد فعل في الثانية. لكن عندما تحرك الشريط بالسرعة نفسها في أثناء الحركة غير المنتظمة، لم تُطلِق الخلية العصبية سوى ٦٠ مرة في الثانية. لكي تعود الخلية العصبية لإطلاق ١٠٠ جهد فعل في الثانية مرةً أخرى، في أثناء فترة الحركة غير المنتظمة، تعيَّن على الشريط أن يتحرَّك بسرعةٍ أكبر من هذه السرعة بمعدَّل ١٠ مرات.

علاوة على ذلك، تمكَّن الباحثون من تحديد مقدار المعلومات التي يحملها جهد الفعل قبل وبعد التبديل بين نوعَي الحركة هذَين. خلال الفترة التي شهدت حركة غير منتظمة، كان معدل المعلومات نحو ١٫٥ بت لكل جهد فعل يُطلَق. وسرعان ما انخفض معدل المعلومات إلى ٠٫٨ بت لكل جهد فعل، بعد الانتقال إلى الحركة الهادئة مباشرة؛ فنظرًا إلى كون الخلية العصبية ما زالت لم تتكيَّف بعدُ مع مجموعة الحركات التي كانت تراها، كانت أداةَ تشفيرٍ غير فعَّالة. لكن بعد التعرض للحركة الأهدأ، لكسر من الثانية فحسب، يعود مقدار وحدات البت لكل جهد فعل إلى ١٫٥. لم تكن الخلية العصبية في حاجة إلا إلى قدر ضئيل من الوقت، لملاحظة السرعات المختلفة التي تراها، وتكييف أنماط إطلاق الإشارات الخاصة بها وفقًا لها. أظهرت هذه التجربة أن التكيُّف يضمن أن جميع أنواع المعلومات شُفِّرت بشكلٍ فعَّال، وهو بالضبط ما أشارت إليه نظرية التشفير الفعال التي قدمها بارلو.

اعتَقَد علماء الأعصاب أيضًا أن الدماغ مصمم لإنتاج تشفيرات على نطاقات زمنية أطول بكثير، من النطاقات الزمنية للتجارب الحسية، التي تتراوح ما بين ثوانٍ إلى دقائق. خلال كل من عمليتَي النمو والتطور، تكون لدى الكائن الحي فرصةٌ لتجميع معلوماتٍ من البيئة المحيطة، وتطويع شفرته الطبيعية وفقًا للأشياء الأكثر أهميةً بالنسبة له. بافتراض أن منطقةً محددة من الدماغ هي الأنسب لتمثيل المعلومات ذات الصلة بأكبر قدر ممكن من الفاعلية، يحاول العلماء إجراء عملية هندسة عكسية لفهم العملية التطورية.

على سبيل المثال، تستجيب الأعصاب البالغ عددها ٣٠ ألف عصب الممتدة من الأذن، لأنواع مختلفة من الأصوات. تفضل بعض الخلايا العصبية فترات قصيرة من الأصوات العالية الحدة والضوضاء، وأخرى تفضِّل أصواتًا منخفضة الحدة. بعض الخلايا تستجيب بشكلٍ أفضل عندما يرتفع الصوت الخافت، في حين تستجيب بعض الخلايا استجابة أفضل عندما يخفُت الصوت المرتفع، وبعضها يستجيب بشكلٍ أفضل عندما ترتفع الأصوات الخافتة تدريجيًّا، ثم تخفت مرة أخرى. بشكلٍ عام، لكل ليفة عصبية نمطٌ معقَّد من النغمات ودرجات الصوت التي تثير إطلاقها للإشارات بشكل أفضل.

يعلم العلماء، في الغالب، كيف تنتهي الألياف بهذه الاستجابات. تتحرك الشعيرات المتصلة بالخلايا في الأذن الداخلية استجابةً للأصوات. تستجيب كل خلية لنغمة مختلفة بناءً على موقعها داخل غشاء صغير حلزوني الشكل. تحصل الألياف العصبية التي تمتد من الأذن، على مُدخَلات من هذه الخلايا الشعرية. كل نسيجٍ يدمج نغماتٍ بطريقته لتكوين ملف الاستجابات الفريدة والمجمعة.

إلا أن الأقل وضوحًا هو السبب في أن الألياف لها هذه الاستجابات. يمكن لنظرية المعلومات أن تساعدنا في هذه النقطة.

إذا كان الدماغ يخفِّض التكرار كما أشار بارلو، فعندئذٍ لا ينشط سوى عدد قليل من الخلايا العصبية في كل مرة. يشير علماء الأعصاب إلى هذا النوع من النشاط باسم التشفير المبعثر.[٨] في عام ٢٠٠٢ سأل عالم الأعصاب الحاسوبي مايكل لويكي، عما إذا كانت خواص الاستجابة للأعصاب السمعية ناتجةً عن قيام الدماغ بفرض شفرةٍ مبعثرة، تكون مصممةً خصوصًا للأصوات التي يحتاج الحيوان إلى معالجتها.

للإجابة عن ذلك، تعين عليه تجميع مجموعة من الأصوات الطبيعية المختلفة. صدرت مجموعة من الأصوات من قرص مدمج عليه أصوات تصدرها حيوانات الغابة المطيرة؛ مثل الخفافيش وخراف البحر وقرود القشة؛ بينما كانت مجموعة أخرى عبارة عن تجميع من ضوضاء «الخلفية» كصوت طحن أوراق الشجر وقطع الأغصان، وجاءت المجموعة الثالثة من الأصوات من قاعدة بيانات من أصوات بشرية تقرأ جُمَلًا إنجليزية.

[٨] يعتبر علماء الأعصاب «خلية الجدة» تميمةَ التشفير المبعثر. من المفترض أن تكون هذه الخلية العصبية الخيالية الخليةَ الوحيدة التي تُطلق إشارات عندما ترى جدتك (ولا تُطلق إشارات استجابة لشيءٍ آخر). ابتكر جيروم ليتفين (الفتى صاحب الضفدعة الذي تناولناه في الفصل السابق) مثل هذا المثال المتطرف على التشفير الفعَّال، كي يعرض المفهوم على طلابه بطريقة مفعمة بالحياة.

بعد ذلك استخدم لويكي خوارزمية لتحليل هذه الأصوات المعقدة، ووضعها في قاموس من أنماط الأصوات القصيرة. تَمثَّل الهدف من هذه الخوارزمية في إيجاد أفضل تقسيم للأصوات؛ أي العثور على خوارزميةٍ يمكنها إعادة إنتاج كل صوتٍ طبيعيٍّ كاملٍ باستخدام أنماطٍ قليلةٍ بقدر الإمكان. ومن ثم، كانت هذه الخوارزمية تسعى نحو شفرة مبعثرة. إذا تطور النظام السمعي في الدماغ ليقوم بتشفير الأصوات الطبيعية بطريقة مبعثرة، فإنَّ أنماط الأصوات التي تفضلها الأعصاب السمعية لا بد أن تتوافق مع الأنماط التي أنتجتها الخوارزمية.

وجد لويكي أن إنشاء قاموس من أصوات الحيوانات فقط نتج عنه أنماط من الأصوات لا تحاكي الأصوات الفعلية للحيوانات. لا سيما أن الأنماط التي تنتجها الخوارزمية كانت بسيطة جدًّا؛ إذ تُمثِّل نغمات صافيةً بدلًا من خليط مركب من النغمات والأصوات التي تميل الأعصاب السمعية للحيوانات إلى تفضيلها. إلا أن تطبيق هذه الخوارزمية على مزيج من الضوضاء الحيوانية وأصوات الخلفية؛ نتج عنه محاكاة فعلية لأصوات الحيوانات. وهذا يشير إلى أن نظام التشفير للنظام السمعي يتطابق بالفعل مع هذه الأصوات البيئية، وهو ما يسمح له بتشفير هذه الأصوات بكفاءة. علاوة على ذلك، وجد لويكي أن القاموس المكوَّن من الكلام البشري أيضًا أعاد إنتاج الملامح الصوتية المفضَّلة في علم الأحياء. اتخذ لويكي من ذلك دليلًا على النظرية القائلة بأن الكلام البشري قد تطور، لتحقيق أقصى استفادةٍ من نظام التشفير الحالي للنظام السمعي.[٩]

في عام ١٩٥٩ قدم بارلو أفكاره عن خواص معالجة المعلومات الخاصة بالدماغ، إلى مجموعةٍ من الباحثين المَعنيِّين بالحواس، المتجمِّعين في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا. عندما تُرجمت فعاليات هذا اللقاء إلى الروسية للجمهور السوفييتي، اقتُطعت مساهمة بارلو بشكل واضح. فقد اتضح أن السوفييت لديهم مشكلة مع استخدام نظرية المعلومات لفهم الدماغ. نتيجة للنظر إلى استخدام نظرية المعلومات لفهم الدماغ، بوصفه جزءًا من

[٩] إذا سألت نفسك وأنت تقرأ في الفصل الأخير عن السبب في أن هذه الخلايا العصبية في النظام البصري تحدد الخطوط، فيمكن لنظرية المعلومات الإجابة عن ذلك أيضًا. في عام ١٩٩٦ طبَّق برونو أولشوزن وديفيد فيلد طريقة مشابهة لطريقة لويكي؛ من أجل إيضاح أن الخطوط هي التي يُفترض أن تستجيب لها الخلايا العصبية، إذا كانت تشفِّر الصور بكفاءة.

«علم السيبرانية البرجوازي الزائف»، فإن ذلك يتعارض مع الفلسفة السوفييتية الرسمية التي تتعارض مع مساواة الإنسان بالآلة. وقد انتقد القادة السوفييت — والعلماء الخائفون أحيانًا تحت حكمهم — هذا الموقف علانيةً، واعتبروه إحدى التبعات الحمقاء للرأسمالية الأمريكية.

على الرغم من أن نقدَهم كان نابعًا من دوافع سياسية، لم يكن الاتحاد السوفييتي الناقد الوحيد لنظرية المعلومات في علم الأحياء. ففي عام ١٩٥٦ حذرت مقالة قصيرة بعنوان «الانقياد» من التطبيق الحماسي المفرط لنظرية المعلومات، في مجالات مثل علم النفس والدراسات اللغوية والاقتصاد والأحياء. «من النادر أن يُرفع الستار عن الكثير من أسرار الطبيعة في آنٍ واحد. سيكون من السهل جدًّا أن ينهار ازدهارنا الذي يتسم ببعض التصنُّع ما بين طرفة عين وانتباهتها، عند إدراك أن استخدام القليل من الكلمات المثيرة التي على شاكلة المعلومات والإنتروبيا والتكرار؛ لن يحل جميع مشكلاتنا.» كُتبت هذه المقالة على يد شانون بنفسه، بعد ثماني سنوات فقط من إخراجه نظرية المعلومات إلى النور.

حتى إن المخاوف التي جاءت بشأن مدى التشابه بين إطار عمل شانون والدماغ؛ كان مصدرها العلماء الذين يقومون بالتشبيه. في مقالةٍ نُشرت عام ٢٠٠٠ حذر بارلو من «أن يستخدم الدماغ المعلومات بطرق مختلفة عن الطرق الشائعة في هندسة الاتصالات.» كما أوضح بيركل وبولوك أنهما لن يلتزما كل الالتزام بتعريف شانون للمعلومات، بل سيتعاملان مع مفهوم «التشفير» في الدماغ باعتباره استعارةً قد يكون لها درجات متنوعة من الفائدة.

الحذر مطلوب. تُعد وحدة فك التشفير أحدَ عناصر نظام شانون الشائكة التي يصعب تطبيقها على الدماغ. في نظام الاتصالات البسيط يحصل المستلم على الرسالة المشفرة من خلال القناة، ثم يقوم ببساطة بعكس عملية التشفير لكي يفكَّ شفرة الرسالة. فمستلم رسالة التِلغراف على سبيل المثال يستخدم الجدول المرجعي نفسه، الذي استخدمه المُرسِل لمعرفة كيفية ترجمة النقاط والشَّرطات إلى أحرف مرة أخرى. إلا أنه من غير المرجَّح أن يكون النظام في الدماغ متماثلًا إلى هذا الحد. ويرجع ذلك إلى أن «الخلايا العصبية» هي وحدات فك الشفرة الوحيدة، وليس من السهل التنبُّؤ بما تفعله هذه الخلايا بالإشارة التي تستلمها.

لنتناول التشفير في الشبكية على سبيل المثال. عند الكشف عن فوتون من الضوء، فإن بعض الخلايا الموجودة في الشبكية (الخلايا النشطة) تشفِّر هذا من خلال زيادةٍ في

معدلات إطلاقها للإشارات، في حين تقوم المجموعة الأخرى من الخلايا الأخرى (الخلايا غير النشطة) بتشفير هذا من خلال تقليل معدلات إطلاق الإشارات فيها. إذا كان هذا التبديل المنسَّق في معدلات إطلاق الإشارات ما بين الزيادة والنقصان، هو الرمز الذي حدَّدته شبكية العين للإشارة إلى وصول الفوتون، فمن الممكن أن نفترض أن هذا هو أيضًا الرمز الذي قامَت المناطق اللاحقة في الدماغ بفك شفرته. إلا أن هذا لا ينطبق هُنا.

في عام ٢٠١٩ قام فريقٌ من الباحثين من فنلندا بالتعديل الوراثي للخلايا في شبكية عينِ فأر. على وجه التحديد، جعلوا الخلايا المنشطة أقل حساسية للفوتونات. ومن ثم، عندما يدخل فوتون إلى العين، ستظل الخلايا غير النشطة تُقلِّل من معدلات إطلاق الإشارات، في حين أن الخلايا النشطة قد تزيد معدلات إطلاقها وقد لا تزيدها. كان السؤال هو: إلى أي مجموعةٍ من الخلايا سيستمع الدماغ؟ كان من الممكن أن تكون المعلومات حول الفوتون متاحةً للاستخدام، إذا فُكَّت الشفرة المخزَّنة في الخلايا غير النشطة. إلا أنه لم يتضح أن الحيوانات تستخدمها. بتقييم قُدرة الحيوان على تحديد الإضاءات الخافتة، تبيَّن أن الدماغ كان يقرأ نشاط الخلايا النشطة فقط. لو لم ترسل هذه الخلايا ما يفيد بأنه اكتُشف فوتون، لما استجاب الحيوان. فسَّر العلماء هذا على أن الدماغ، على الأقل في هذه الحالة، لا يفكُّ شفرة جميع المعلومات المشفرة. فهو يتجاهل الإشارات التي ترسلها الخلايا غير النشطة. ومن ثم، أوضح الباحثون: «عند الوصول إلى حد حساسية الإبصار، لا تُنتج مبادئ فك الشفرة الخاصة بالدماغ الحل الأمثل الذي تنبَّأت به نظرية المعلومات.» فكَوْن العلماء بمقدورهم تحديد أنماط إطلاق الإشارات العصبية الكهربية؛ لا يعني أن هذا مُهِم بالنسبة للدماغ.

ثمة العديد من الأسباب المحتملة لذلك. أحد هذه الأسباب المهمة هو أن الدماغ عبارة عن آلة لمعالجة المعلومات. بمعنى أنه لا يسعى إلى إعادة إنتاج الرسائل المرسلة عبره فحسب؛ بل يُحوِّلها إلى فعل للحيوان. وهو يجري عمليات حسابية على المعلومات، ولا يكتفي بمجرد نقلها وحسب. وعليه، فإن التوقعات بشأن آلية عمل الدماغ وفقًا لنظام الاتصال الذي قدمه شانون تفتقر إلى هذا الهدف الحاسم. لا يشير الاستنتاج الذي يفيد بأن الدماغ لا ينقل المعلومات على النحو الأفضل بالضرورة، إلى عيبٍ في تصميمه. فقد صُمِّم لغرض آخر.

ليس من المتوقع أن تُطبق نظرية المعلومات، التي ابتُكِرت باعتبارها لغةً لأنظمة الاتصال الاصطناعية، تمامًا على الجهاز العصبي. الدماغ ليس مجرد خط تليفون. ومع

هذا، تشترك أجزاء من الدماغ في مهمة الاتصال الأساسية. ترسل الأعصاب الإشارات. وتفعل هذا من خلال نوع من الشفرات يعتمد على معدلات إطلاق الإشارات، أو أزمنة إطلاق الإشارات، أو أنماط النشاط العصبي. يُعد إلقاء نظرة على الدماغ من وجهة نظر نظرية المعلومات مسعًى معقولًا، نتج عنه العديد من الرؤى والأفكار. لكن إذا حدَّقت طويلًا، فستجد ثغراتٍ واضحةً في هذه المقارنة. هذا هو سبب التحفُّظ. وعليه فإن مقارنة نظام اتصالٍ بالدماغ تكون مفيدةً عند عدم المبالغة فيها وتحميلها أكثر مما تحتمل.

الفصل الثامن

# الحركة بأبعاد محدودة

الحركيات (الكينتيكا) وعلم الحركة المجردة (الكينماتيكا)
وتقليل الأبعاد

في منتصف تسعينيات القرن العشرين، ذهب مُحررٌ يعمل في صحيفةٍ محليةٍ في مدينة هيوستن، بولاية تكساس، إلى كلية بايلور للطب على أمل أن يتلقَّى المساعدة، فيما يتعلق بمشكلة في يده اليسرى. في الأسابيع السابقة لذلك، كانت أصابع هذه اليد ضعيفةً وكان يشعر بخدرٍ فيها. وبدا للأطباء أن الرجل، الذي كان مُدخنًا شرهًا ومُسرفًا في تناول المشروبات الكحولية، في صحةٍ جيدةٍ بخلاف ذلك. عند ملاحظة التخدر بحث الأطباء في البداية عن عصبٍ متضررٍ في مِعصَمه. وعندما لم يجدوا ذلك فحصوا الحبل الشوكي، مشتبهين في وجود آفةٍ في الأعصاب الشوكية. وعندما جاءت نتيجة ذلك الفحص سلبية، خطا الأطباء خطوةً أبعد وأجرَوا مسحًا على الدماغ. وقد أسفر المسح عن وجود ورمٍ بحجم حبةٍ كبيرةٍ من العنب، يستقر في الجانب الأيمن من السطح المتجعد لدماغ الرجل. كان الورم في المنتصف ما بين الصدغ الأيمن وأعلى رأسه، في منتصف منطقة تُعرف باسم القشرة الحركية.

تتخذ القشرة الحركية شكل شريحتَين رقيقتَين تبدآن من أعلى الرأس، وتمتدَّان لأسفل على جانبَي الرأس، هاتان الشريحتان معًا تُكوِّنان عصابة رأس حول الجزء العلوي

من الدماغ.[1] تتحكم الأجزاء المختلفة من كل شريط في أجزاء مختلفة في الجانب المقابل من الجسم. في حالة محرر الصحيفة، كان الورم في منطقة التحكم اليدوي من القشرة الحركية اليمنى. وامتدَّ قليلًا إلى القشرة الحسية، وهي عبارة عن شريط مرتَّب بشكلٍ مشابه يقع خلف القشرة الحسية مباشرة، ويتحكم في الإحساس. قدَّم موضع الورم تفسيرًا للضعف والتخدر في الجزء المقابل للمنطقة التي يوجد بها الورم، وقد خفت حِدة هاتَين المشكلتَين بعد الاستئصال الجراحي للورم.

اكتُشفت القشرة الحركية قبل ١٥٠ سنة تقريبًا، ومنذ ذلك الحين أصبحت موضعًا للعديد من المناقشات الجدلية. لا شك في حقيقة أن الدماغ يتحكم في الجسم؛ إذ أكدت البيانات المستقاةُ من الإصابات هذه الحقيقةَ، منذ عصر بناء الأهرامات في مصر القديمة. لكن كيفية قيامه بهذا تُعد مسألة أخرى.

ببعض الطرق، يُعَد الاتصال الذي يربط بين القشرة الحركية والحركة مباشرًا. وهو اتصال يسلك مسارًا معاكسًا لمسار الدراسة التي أجراها أطباء بايلور؛ تُرسِل الخلايا العصبية الموجودة في القشرة الحركية على أحد جانبَي الدماغ، المُخرَجات إلى الخلايا العصبية الموجودة في الحبل الشوكي على الجانب الآخر، وهذه الخلايا العصبية الموجودة في الحبل الشوكي تتحكَّم مباشرة في ألياف عضلية محددة. يُطلق على النقطة التي تلتقي عندها الخلية العصبية الموجودة في الحبل الشوكي بالعضلة؛ اسم وَصْلة عصبية عضلية. إذا أطلقت هذه الخلية العصبية إشاراتٍ، فإنها تُطلق الناقل العصبي الذي يُدعى أسيتيل كولين في هذه الوصلة. تستجيب الألياف العضلية للأسيتيل كولين عن طريق الانقباض وتحدث الحركة. خلال هذا المسار، يمكن للخلايا العصبية الموجودة في القشرة التحكُّمُ في العضلات مباشرة.

إلا أن هذا ليس المسار الوحيد بين القشرة الحركية والعضلة. تُعد المسارات الأخرى أكثر تعرُّجًا. على سبيل المثال، بعض الخلايا العصبية الموجودة في القشرة الحركية ترسل مُخرَجاتها إلى مناطق وسطانية؛ مثل جذع الدماغ والعُقَد القاعدية والمُخَيخ. من هذه المناطق تمضي الإشارات في طريقها نحو الحبل الشوكي. كل محطة من هذه المحطات

[1] من الناحية التقنية، هذا يصف القشرة الحركية «الأولية». تقع منطقة أخرى تُعرف باسم «القشرة الأمام حركية» أمام القشرة الحركية الأولية مباشرة. كثيرًا ما تجري دراسة هذه المناطق معًا، ولن نحاول التمييز بينهما في هذا الفصل.

تعطي فرصةً لمزيدٍ من المعالجة للإشارة، وهو ما يؤدِّي إلى حدوث تغيُّرٍ في الرسالة التي تُرسَل إلى العضلات. علاوة على ذلك، أكثر المسارات المباشرة لا تكون بسيطة بالضرورة؛ إذ يمكن للخلايا العصبية من القشرة الحركية الارتباطُ بالعديد من الخلايا العصبية المختلفة في الحبل الشوكي، التي يقوم كلٌّ منها بتنشيط وتثبيط مجموعاتٍ مختلفةٍ من العضلات. بهذه الطريقة، يوجد العديد من القنوات التي يمكن للقشرة عن طريقها التواصل مع العضلات، والعديد من الرسائل الممكنة التي يمكن إرسالها. بدلًا من التأثير المباشر، يمكن أن يكون تأثير القشرة الحركية على الجسم موزَّعًا بشكل كبير.

على رأس هذه الحيرة وعدم الوضوح، أثيرت تساؤلات حول مدى أهمية القشرة الحركية. عندما نُزعت القشرة الحركية عن باقي الدماغ، لم تبدأ الحيوانات العديد من الحركات المعقدة من تلقاء نفسها، لكن كان لا يزال بمقدورها القيام ببعض الاستجابات المعتادة التلقائية. على سبيل المثال، ستخدش القطط المنزوعة «القشرة الحركية» بمخالبها إذا قُيِّدت، كما سيظل ذَكَر الفأر قادرًا على التزاوج إذا كانت الأنثى موجودة. ومن ثم، فإن القشرة الحركية تكون غير ضرورية، بالنسبة إلى بعضٍ من أهم سلوكيات البقاء على قيد الحياة.

تلعب الحركة — بوصفها الطريقة الوحيدة التي يمكن للدماغ بها التواصل مع العالم — دورًا لا غِنى عنه في مجال علم الأعصاب. إلا أن الغرض المحدد للقشرة الحركية يُعد مثارًا للنقاش، كما أن تركيبها لا يساعدنا كثيرًا على فَهْمها. من غير هذا التقدم المحرز لفهم القشرة الحركية، تصعب معرفة دور القشرة الحركية بالضبط. لكن نظرًا لوجود العديد من الدوافع المهمة لحل لغز الحركة — كعلاج الأمراض الحركية، وصناعة روبوتات شبيهة بالبشر، وما إلى ذلك — ظل تيارٌ من العلماء يحاول حل هذا اللغز. في الأيام الأولى، اتخذت هذه المحاولات صورة جدالاتٍ مريرة حول نوع الحركة التي تُولِّدها القشرة الحركية. وتبع ذلك استخدام الأساليب الرياضية لفَهْم نشاط خلاياها العصبية. وعلى الرغم من أن بعض المناقشات الأكثر حِدة قد كُبح جماحُها وصارت تحت السيطرة، فإن دراسة القشرة الحركية — ربما أكثر من معظم مجالات علم الأعصاب — لا تزال تعاني من حالةٍ من عدم الاستقرار إلى يومنا هذا.

درس كلٌّ من جوستاف فريتش وإدوارد هيتسيج الطب في جامعة برلين، في منتصف القرن التاسع عشر، إلا أن طرقاتِهما لم تتقاطع هناك. وحسبما تفيد القصة، بعد الانتهاء

من كلية الطب كان فريتش يعمل جرَّاحًا للدماغ، باعتبار ذلك جزءًا من خدمته في الحرب الدِّنماركية البروسية، حينما أدرك أن تهيُّجاتٍ معينة في الدماغ المكشوف تؤدي إلى تقلصات عضلية في الجانب المقابل لموقع هذه التهيجات في جسم الجندي. على الجانب الآخر، أفاد هيتسيج بأنه كان يدير نشاطًا للعلاج بالصدمات الكهربية، عندما لاحظ أن تعرُّض أجزاءٍ معينةٍ من الدماغ للصدمات تُثير حركات العين. اندهش كل طبيب من ملاحظته الفضولية والاستنتاجات التي قد تترتب عليها. التقى فريتش وهيتسيج أخيرًا عندما عاد فريتش إلى برلين في أواخر ستينيات القرن التاسع عشر. قرَّر الطبيبان توحيد الجهود لاستكشاف أن القشرة يمكنها التحكُّم في الحركة، وهو ما اعتُبر فيما بعد فرضية سخيفة.

كانت الملاحظة التي تفيد بأن القشرة المخِّية يمكنها القيام بأي دور — أيًّا كان هذا الدور — تُعتبر سخيفة في ذلك الوقت. كان يُعتقَد أن القشرة المخية غلافٌ خارجي خامل، أي طبقة من النسيج العصبي تُغطي المناطق المهمة من الدماغ، حتى إن الكلمة الإنجليزية مأخوذة من كلمة لاتينية تعني لحاء الشجرة أو الطبقة الخارجية. نتجت هذه النظرة إلى القشرة الدماغية عن العديد من التجارب السابقة التي حاولت تحفيز القشرة، لكنها لم تتمكن من الحصول على أي استجابات مثيرة للاهتمام (وقد اتَّضح في وقت متأخر أن هذا كان يرجع على الأغلب إلى طُرق الاستثارة غير المناسبة؛ مثل قَرص القشرة، أو وَخْزها، أو غَمرها بالكحول). إلا أن فريتش، الرحالة المتجوِّل حول العالم الذي انخرط في العديد من المجالات،[٢] وهيتسيج، الرجل الصارم الفخور بنفسه والمهتم بمظهره وإنجازاته، كانا مدفوعَين بفضولهما وغطرستهما للتغلب على حاجز المعتقدات الراسخة.

لذا، وعلى طاولةٍ في بيت هيتسيج (لم يكن لدى المعهد الفيسيولوجي المرافق اللازمة لهذه التقنية الجديدة)، بدأ فريتش وهيتسيج الاستثارة الكهربية للقشرة الدماغية للكلاب. أعدَّا قُطبًا كهربيًّا بلاتينيًّا، ووصَّلاه ببطارية، ووضعاه على لسان الكلاب لاختبار شدة التيار الكهربي (حسبما ورد كانت شدة التيار «كافية لاستثارة شعور واضح»). بعد ذلك جعلا القطب يلمس مناطق مختلفة من مناطق الدماغ المكشوفة لفترة وجيزة جدًّا. وفي أثناء ذلك كانا يراقبان الحركات التي نتجت عن ذلك. ما استنتجاه هو أن استثارة القشرة

[٢] يشمل ذلك ما نطلِق عليه الآن «العنصرية العلمية». جمع فريتش عيناتٍ من شبكية العين والشعر في محاولةٍ يائسةٍ لتقديم تفسيراتٍ لفكرة تفوُّق العِرق الأبيض.

المخية قد تنتج عنها حركات؛ عبارة عن تشنُّجات أو تقلصات قصيرة لمجموعة صغيرة من العضلات في الجانب المقابل من الجسم. كما استنتجا أن موقع الاستثارة كان مهمًّا؛ إذ حدد الجزء الذي سيتحرك، إن وُجِد.

ربما كان الاستنتاج الأخير أكثر هرطقةً من الاكتشاف الأول. في ذلك الوقت، حتى حفنة العلماء الذين اعتقدوا أن القشرة المخية قد تلعب دورًا مفيدًا، ظلوا يفترضون أنها تعمل بوصفها كتلةً غير متمايزة، أي شبكة من الأنسجة التي ليس لها تخصُّص وظيفي. لم يكن من المفترض أن يكون لها تنظيم مرتَّب تقع به الوظائف الحركية، على شريط واحد على مقدمة الدماغ. إلا أن هذا ما اقترحته عمليات الاستثارة التي أجراها فريتش وهيتسيج. لاختبار نظريتهما بشكلٍ أكبر، بعد أن حدد فريتش وهيتسيج جزء الدماغ المسئول عن جزء محدد من الجسم، اقتطعا هذا الجزء ولاحظا الآثار السلبية لذلك على الحركة. بشكلٍ عام، لم يتسبب اقتطاع هذا الجزء في إحداث شلل كامل في الجزء المصاب من الجسم، لكنه أضعف تحكُّمه ووظيفته. ومن ثم، كانت الأدلة التي تَدعَم دور القشرة المخية في الحركة تتزايد.

تزامن الجهد البحثي لهذا الثنائي الألماني مع استنتاجات توصَّل إليها طبيب آخر، وهو جون هيولينجز جاكسون، ربطت أيضًا بين هذه المنطقة من الدماغ وبين التحكم في الحركة لدى البشر. هذه الاستنتاجات المشتركة جعلت منتصف القرن التاسع عشر نقطة تحوُّل لدور القشرة المخية في الحركة، كما جعلته نقطة تحول في علم الأعصاب بشكلٍ عام. أجبر العلماء على التعامل مع حقيقة أن القشرة المخية لا يكون لها دور فحسب؛ بل ربما تكون للأجزاء المختلفة من القشرة المخية وظائف مختلفة. مدفوعًا بهذه الأجواء الحافلة، انطلق متدربٌ لدى جاكسون يُدعى ديفيد فيرير، لدراسة القشرة المخية بالتفصيل.

في عام ١٨٧٣، مُنِح فيرير الفرصة لإجراء تجارب على الجهاز الحركي في مصحَّة ويست رايدنج للأمراض العقلية. تمكن فيرير، الذي كان يعمل في مصحة عقلية ومنشأة بحثية فيكتورية مرموقة، من تكرار التجارب التي أجراها فريتش وهيتسيج على الكلاب، وحصل على النتائج نفسها — كلٍّ من نتائج الاستثارة وإتلاف القشرة المخية. وقد أوضح أيضًا أن المبادئ نفسها تنطبق على مجموعة كاملة من الحيوانات الأخرى التي خضعت للتجربة، بما في ذلك بناتُ آوى والقطط والأرانب والفئران والأسماك والضفادع. بعد ذلك انطلق فيرير في رحلة استكشافية داخل المنطقة المسئولة عن الحركة في الدماغ لدى

القِرَدة، على أمل أن يُقدِّم خريطةً تساعد الجرَّاحين على إزالة الأورام والجلطات الدموية من أدمغة البشر.[٣]

لم يُجرِ فيريير تجاربه على عدد من الأنواع يعادل ما قد يجده المرء في حديقة الحيوان فحسب، كي يتوسع في العمل الذي قام به فريتش وهيتسيج؛ بل حدَّث طريقة الاستثارة. كانت الاستثارة الجلفانية التي استخدمها فريتش وهيتسيج شكلًا من أشكال التيار الكهربي المستمر، وهو ما يمكن أن يكون مدمِّرًا لنسيج الدماغ. ومن ثم، لا يمكن استخدام هذه الطريقة إلا لفترة وجيزة. في النهاية، اتجه فيريير إلى استثارة فاراداي، وهي عبارة عن تيار متردد يمكن استخدامه بشكلٍ متواصل ودون انقطاع. نتيجة لذلك، تمكن فيريير من توصيل القطب الكهربي بالدماغ لثوانٍ عديدة. كما تمكن من إحداث الاستثارة على مستوياتٍ أعلى من التيار الكهربي، تكون وفقًا لفيريير «كافية كي تُعطي شعورًا بالوَخز، لكن يمكن تحمله عند تثبيت الأقطاب الكهربية على طرف اللسان».

يؤدي هذا التغيُّر الكمي في بارامترات الاستثارة إلى تغيُّر نوعي في النتائج. عندما أجرى فيريير الاستثارة على فترات زمنية أطول، لم يحصل على تشنُّجاتٍ عضليةٍ لفترةٍ أطول فحسب. بل أظهرت الحيوانات حركات كاملة ومعقدة؛ وهي حركات تذكرنا بتلك التي كانت هذه الحيوانات تؤديها في حياتها العادية. على سبيل المثال، وفقًا لملاحظات دوَّنها فيريير، وجد أن استثارة جزء من دماغ أرنب تسببت في «انتصاب أذن الأرنب المقابلة لهذا الجزء فجأة، وقد تزامن هذا مع حركة مفاجئة، وكأن الأرنب على وَشْك التحرك للأمام.» في حالة القطة، كانت استثارة منطقة محددة مسئولةً عن «تراجع قدم القطة الأمامية للخلف وتقريبها من جسمها. بدت هذ الحركة، التي نُفِّذت بسرعة خاطفة، أشبه بالحركة التي تؤديها القطة عندما تركل كرة بمخلبها.» عند استثارة منطقة «تقع في النصف الخلفي من التلافيف العلوية والوسطى» للقرد، لاحظ فيريير أن «عينيه تُفتَحان عن آخرهما وتتسع حدقتاهما، كما تتجه الرأس والعينان إلى الجهة المقابلة».

---

[٣] وشأنه شأن العديد من علماء عصره، أجرى فيريير تجارب على الحيوانات مستخدمًا طرقًا لا تتوافق مع المعايير الأخلاقية في يومنا هذا. لكن بخلاف العديد من علماء عصره، وقع فيريير في مشكلة من جراء ذلك. فبعد أن أحضر حيوانًا متضررًا على المسرح لعرض النتائج التي حصل عليها عام ١٨٨١، تسبب مناهضو إجراء التجارب على الحيوانات في إلقاء القبض عليه لإجراء تجربة دون ترخيص. وقد اتضح أن شريك فيريير الذي قد حصل على ترخيص هو من أجرى الجراحة، وعليه أطلق سراح فيريير. لكن هذا كان بمثابة ضربة قوية من الحشد المدافع عن حقوق الحيوانات.

تشير الحقيقة، التي تفيد بأن مثل هذه الاستثارة غير المحددة للقشرة الحركية تستحضر حركات سلِسة ومنسَّقة، إلى طريقة فهمٍ تختلف عن فهم فريتش وهيتسيج لهذه المنطقة من الدماغ. إذا كان تحفيز القشرة الحركية يحفِّز بشكلٍ أساسي مجموعات صغيرة منعزلة من العضلات — كما اعتقد العالمان — فستكون مهمتُه بدائيةً نسبيًّا. رأى العالمان أن الأجزاء المختلفة من القشرة الحركية تعمل مثل مفاتيح البيانو؛ كل يُصدر نُوتتَه الخاصة. في المقابل، أفادت استنتاجات فيريير بأن القشرة الحركية عبارة عن مجموعة من الألحان القصيرة، فكل استثارة تنتج عنها أجزاء من الحركة يتطلب تنفيذُها تنسيقًا بين مجموعات العضلات المختلفة. هذا الجدال حول ما إذا كان عمل القشرة الحركية أشبه بنوتات منفردة أم مجموعة من الألحان، أي تشنُّجات منفردة أم حركات منسقة؛ كان بدايةً لمجموعة من المناقشات حول طبيعة القشرة الحركية.

على الرغم من حقيقة أن النتائج التي حصل عليها فيريير تُعد تكرارًا لما وصل إليه فيرتش وهيتسيج، فإن فيريير لم يكُن على توافق مع فيرتش وهيتسيج. وقد نجم ذلك عن مشاحنات حول عَزو الأفكار إلى أصحابها. شعر فيريير أن العالِمَين الألمانيين استخفَّا بمُعلمه جاكسون، بعدم استشهادهما بعمل جاكسون في أبحاثِهما. نتيجة لذلك، حاول فيريير الإفلات من الاستشهاد بفيرتش وهيتسيج في أبحاثه. وذهب إلى ما هو أبعد من ذلك بإزالة كل ما يتعلق بتجاربه على الكلاب، واكتفى بالحديث عن النتائج التي حصل عليها من القرود؛ لكي يتجنب أي رابط بينه وبين فريتش وهيتسيج.[٤]

أيًّا كان السبب في ذلك، لم يثِق فريتش وهيتسيج في بحث فيريير، الذي يعرض الأجزاء المنفردة التي تتضمنها عملية توليد الحركة الطبيعية. كما وقفا في صف الاستثارة الجلفانية المختصرة، مُدعيَيْنِ أن استثارة فيريير كانت طويلة جدًّا، وأن استنتاجاته لا يمكن الحصول عليها مرة أخرى عند تكرار التجربة. في المقابل، ظل فيريير مُصرًّا على الاعتقاد بأن تيار فاراداي هو الأفضل، وأن التحفيز الجلفاني المختصر الذي استخدمه فريتش

[٤] لكن مع مرور الوقت بدا فيريير أكثر هدوءًا. وفي كتاب له نشره، بعد معركة الاقتباس، كتب ما يأتي: «يعود الفضل في إثبات التموضع المحدد بالتجربة العملية لأول مرة إلى [هيتسيج] وزميله فريتش، وأنا نادم على المناقشات الحادة التي أثرتها فيما يتعلق بالموضوع، فقد أُسيء تفسيرُ ما كتبتُه، واعتبر الناس أنني أقصد شيئًا آخر غير ما كتبته بالفعل».

وهيتسيج «لم ينجح في استثارة مزيج محدَّدٍ من الانقباضات العضلية المنسَّقة لتنفيذ حركة أو فعل معين، هذه الانقباضات المنسقة تُعد جوهر رد الفعل ومفتاح تفسيره».

وبينما كانت المعركة مُحتَدِمة حول استثارة القشرة الحركية على نطاق محدود، كان مجال علوم الأعصاب يشهد نقاشًا آخر على نطاق أوسع. تقبَّلت المجموعة البحثية القائمة على دراسة القشرة الحركية بوضوح؛ حقيقةَ أن الوظيفة في القشرة الحركية تتحدَّد حسب الموضع، بمعنى أن المناطق المختلفة في القشرة المخية تلعب أدوارًا مختلفة. لكن في المجتمع على نطاق أوسع، كان هذا التحوُّل الجذري في فهم ذلك لا يزال يجري استيعابُه وإدراكه تدريجيًّا، وقد وضع العديد من الباحثين نصبَ أعيُنهم اختبار حدود هذه النظرية. وعليه، أصبح التقليد العصري آنذاك يتمثل في محاولة استثارة مساحات صغيرة من القشرة المخية قدرَ الإمكان، لمعرفة كيف تختَصُّ كل منطقةٍ بوظيفةٍ محددة. هذا التوجه كان يتماشى جيدًا مع نهج استخدام النبضات القصيرة، الذي اتَّبعه فريتش وهيستيج لتوليد حركات عضلية فردية. وعليه، أصبحت طريقتهما المفضلة هي الطريقة السائدة، لا لأنها الطريقة الصحيحة للإجابة عن السؤال العلمي حول دور القشرة الحركية؛ بل لأن السؤال العلمي تغيَّر. تحت تأثير الهوس بفكرة ارتباط كل وظيفة بموضع محدد، كانت حقيقة أن الحركات العضلية الصغيرة يمكن الاستدلال عليها عن طريق الاستثارة؛ أهمَّ من حقيقة ما إذا كان الدماغ يُنتج الحركة بهذه الطريقة بشكل طبيعي أم لا. ومن ثم، وُضِعت مشكلة «التشنجات مقابل الحركات المنسَّقة» جانبًا لأكثر من قرن.

في الدماغ، تُعَد الخلية العصبية أكثر جزء محدد الوظيفة. صار علماء الأعصاب قادرين على تسجيل نشاط الخلايا العصبية المنفردة، منذ أواخر عشرينيات القرن العشرين. إلا أن القيام بذلك كان يتطلَّب عادةً إعدادًا تجريبيًّا من شأنه أن يمنع دراسة السلوك المتزامن، كإزالة النسيج العصبي من الحيوانات على سبيل المثال، أو على الأقل تخديرها أثناء التسجيل. تغيَّر ذلك في أواخر خمسينيات القرن العشرين، عند تطوير أقطاب كهربية يمكن إدخالها في دماغ قرد مستيقظ ومستجيب، لمراقبة الإشارة الكهربية للخلايا العصبية الفردية. أوضح عالم الأعصاب الرائد فيرنون ماونتكاسل معلقًا على هذا التحوُّل في تاريخ علم الأعصاب بعد مرور ٥٠ عامًا؛ أن مجال الأعصاب «لم يعُد كما كان منذ ذلك الحين، كما أنه من الشائق جدًّا بالنسبة للعلماء، الذين قضوا سنوات طويلة في اللجوء لإزالة نسيج عصبي أو الاعتماد على التخدير، رؤية الدماغ ودراسته أثناء نشاطه!» ربما كان

لدراسة التحكم الحركي — في الطريقة التي تُولَّد بها الحركة والسلوك عن طريق الدماغ — النصيب الأكبر من الاستفادة بهذا التقدم التجريبي. وبالطبع، كان لعلماء الحركة السبق في الاستفادة منه.

كان إدوارد إيفارتس أحد هؤلاء الباحثين الأوائل، وهو طبيب نفسي من نيويورك. كان رجلًا كريمًا وصارمًا. وكان يأخذ عمله على محمل شخصي جدًّا، حتى إنه يلجأ إلى الاستبطان والتجارب الشخصية لمساعدته في دراسته العلمية حول النوم وممارسة التمارين الرياضية؛ وكان يتوقع الإخلاص نفسه من الآخرين. في عام ١٩٦٧، بينما كان يعمل في معاهد وطنية للصحة في بيثيسدا، ميريلاند، فرغ من مشروع فردي من ثلاثة أجزاء حول استجابات الخلايا العصبية في القشرة الحركية. ركز الجزء الأخير من دراسته على السؤال الذي سيشكل أساس علم الأعصاب الحركي لعقود تالية: ما جوانب الحركة التي تُمثِّلها الخلايا العصبية في القشرة الحركية؟

لطرح هذا السؤال، استعان إيفارتس بمهمة حركية بسيطة لا تتطلب سوى كمية ضئيلة من الحركة. على وجه التحديد، درَّب القرود على الإمساك بقضيب أُفُقي وتحريكه من اليسار إلى اليمين. أُجبرت القرود على فعل هذا باستخدام مفصل واحد فقط وهو الرسغ. هذا يعني أن الحركة كانت محكومة فقط عن طريق مجموعتَين من العضلات في الساعد، وهما: العضلات القابضة التي تحرِّك اليد نحو الجسم، والعضلات الباسطة التي تحرِّك اليد بعيدًا عن الجسم.

تمثلت إحدى الفرضيات البسيطة في أن معدلات إطلاق الإشارات العصبية في القشرة الحركية، ارتبطت ارتباطًا مباشرًا بوضع المعصم في أي لحظة معينة. لو كان الأمر كذلك، كنت سترى بعض الخلايا العصبية تُطلق إشارات بقوة عندما يكون الرسغ منقبضًا؛ بينما لن تفعل ذلك عندما يكون الرسغ منبسطًا، وخلايا عصبية أخرى ستفعل العكس.

عند دراسة الحركة، من المنطقي أن تعود إلى رياضيات الحركة الراسخة. لذا انبثقت فرضية إضافية لدراسة إيفارتس من علم الحركيات (الكينتيكا)، وهو فرع من الفيزياء يتعامل مع أسباب الحركة.[٥] لكي تتحرك اليد، تنقبض العضلات في الذراع مولِّدةً قوة. تتحول هذه القوة المتولدة عن العضلات إلى قوة زاوية، أو عزم، عندما تؤثر على مفصل

[٥] ويُشار إلى ذلك عادة باسم «الديناميكا».

الرسغ. بعد ذلك، يحدد العزم الحركة وموضع اليد. لو كانت الخلايا العصبية في القشرة الحركية تحمل شفرةً عن القوة بدلًا من الموضع، لكانت بعض الخلايا العصبية ستُطلق إشاراتٍ عصبيةً بقوة، عندما تُولِّد العضلات القابضة قوة تُحرِّك الرسغ في أحد الاتجاهات، وبعض الخلايا العصبية الأخرى ستُطلق إشاراتٍ عصبية، عندما تنتج العضلات الباسطة قوة تحرِّك الرسغ في الاتجاه الآخر.

في أبسط شكل لهذه التجربة، لا يمكن تمييز هاتَين الفرضيتَين. إذا كانت الخلية العصبية تُطلق إشارات عصبية عندما يكون الرسغ في وضع الانقباض، فهل يرجع ذلك إلى أن الرسغ في وضع الانقباض، أم بسبب القوة اللازمة لإبقائه في هذا الوضع؟ من يدري؟ إذا أراد إيفارتس الإجابة عن هذا السؤال، يتعين عليه الفصل بين جانبَي الحركة هذين. لفعل هذا، أضاف ببساطة أثقالًا موازِنة للقضيب. مثل تعديل الأثقال على جهاز حمل الأثقال في صالة الألعاب الرياضية، إضافة أثقال موازِنة للقضيب تجعل الحركات أسهل أو أصعب. يؤدي هذا إلى تغيُّر مقدار القوة اللازمة لتحريك القضيب للموضع نفسه. عندئذٍ يمكن المقارنة بين معدلات إطلاق الإشارات عندما يكون الرسغ في الموضع نفسه، لكنه يستخدم قوًى مختلفة للوصول لهذا الموضع.

عند النظر إلى الخلايا العصبية البالغ عددها ٣١ خلية عصبية في القشرة الحركية التي سجَّل منها، لاحظ إيفارتس أن ٢٦ منها لها معدلات إطلاق ترتبط بشكلٍ واضح بالقوة. بعض هذه الخلايا العصبية استجابت بقوة أثناء انقباض الرسغ، وزادت من إطلاقها للإشارات عند إضافة أثقال جعلت الانقباض أصعب (أو خفضت من إطلاقها للإشارات عند إضافة ثقل في الاتجاه المقابل، ما يجعل الانقباض أسهل). فيما فضَّلت خلايا عصبية أخرى حركات الانبساط؛ إذ أظهرت النمط نفسه لكن بطريقة معاكسة. أما الخلايا العصبية الخمس المتبقية، فكان من الصعب تفسير نشاطها، لكن أيًّا منها لم يُظهِر نشاطًا يرتبط ارتباطًا مباشرًا بموضع الرسغ. عضدت هذه النتائج من موقف الرأي القائل: إن القشرة الحركية تحمل شفرة القوة.

كان الجهد البحثي لإيفارتس بمثابة الخطوة الأولى، على طريقٍ طويلٍ من محاولات استكشاف الآليات الحركية التي تدخل ضمن عمل الجهاز الحركي. على مدار السنوات اللاحقة، سعَت مجموعات بحثية عديدة إلى إيجاد معلوماتٍ حركية في معدلات إطلاق الإشارات العصبية، بواسطة الخلايا العصبية في القشرة الحركية في أثناء قيام الحيوانات بحركات بسيطة. لا يزال إرث فكرة ارتباط الوظيفة بالموضع واضحًا في هذا المنهج؛ إذ يهدف في نهاية الأمر إلى فَهْم سلوك الخلايا العصبية الفردية، والحركاتِ العضلية الصغيرة

المنفصلة. إلا أنه جمَّع هذا الفهم تحت مظلة النظام الرياضي الأشمل، والموجود مُسبقًا، الخاص بعلم الحركة. وفقًا لهذا المنظور، يمكن العثور على العمليات الرياضية الخاصة بالقشرة الحركية، في المعادلات الموجودة في أي كتابٍ قياسيٍّ في الفيزياء.

أسَّس إيفارتس المنهج الحديث لدراسة القشرة الحركية. وقد قدَّم تجربة محكومة جيدًا لاستكشاف كيفية ارتباط نشاط الخلية العصبية المنفردة بنشاط العضلات، وأشار إلى المبادئ الرياضية التي يمكنها تقديم سياق لفهم هذه النتائج. لكن خلال عقود قليلة، سيتم إبطال الغالبية العظمى من إسهامات إيفارتس في علم الحركة، وسيشهد هذا المجال ميلاد حقبة جديدة.

> غريب أمر الجهاز الحركي! سواءٌ أكانت النتائج جيدة أو سيئة، لا توجد رؤية متماسكة للوظيفة الحركية لدى علماء أعصاب الأنظمة (أي علماء الأعصاب الذين يدرسون تركيب الأنظمة والدوائر العصبية ووظيفتها) ... لا يزال هناك الأشخاص المتعصبون لأهمية العضلة الفردية [الذين] يؤكدون أن النشاط العصبي في الأجزاء الحركية بالكامل، من المُخَيخ إلى القشرة، يُفسَّر بطريقة ما افتراضيًّا بالإشارة إلى تلك العضلة، الحقيقية أو الافتراضية. هذا لا معنى له بالطبع ... فنادرًا، إن لم يكن مستحيلًا، ما تتضمَّن الحركات الطبيعية عضلة واحدة فقط.

قال هذه الكلمات أبوستولوس جورجوبولوس، أستاذ علم الأعصاب في جامعة جونز هوبكنز الذي وُلِد في اليونان. قبل أن يذكر جورجوبولوس ذلك عام ١٩٩٨، كان بالفعل قد استمر في إحداث تغييراتٍ هائلة في مجال علم الأعصاب الحركي لأكثر من ١٥ عامًا. ثمة ثلاثة تطورات مفاهيمية ترتبط بجورجوبولوس (وذلك على الرغم من أنه لم يكن مصدرًا لأي منها بمفرده؛ فقد كانت موجودة بالفعل بشكلٍ ما في الأوساط العلمية) ومن بين هذه الإسهامات الثلاثة، ظل هناك إسهامان محوريان في دراسة القشرة الحركية حتى يومنا هذا.

يمكن توقع إسهامه الأول من اقتباسه: التركيز على الحركات الطبيعية. تدرَّب جورجوبولوس مع عالم الأعصاب الحسية فيرنون ماونتكاسل، وتأثر بشدة بطريقته في التفكير. اتخذ ماونتكاسل منهجًا شُموليًّا لدراسة الدماغ. تساءل عن كيفية تمثيل الأحاسيس الجسدية في كل خطوة؛ بدءًا من الخلايا العصبية التي تستشعر اللمس في

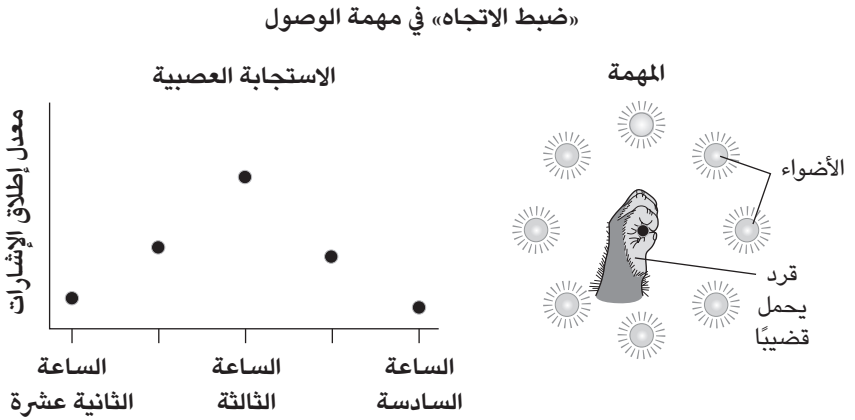
الجلد، ووصولًا إلى استخدام الوظائف الإدراكية العليا في الدماغ لهذه المعلومات الحسية. أراد جورجوبولوس دراسة التحكم الحركي باستخدام النهج الراسخ المحترَم الذي وضعه ماونتكاسل في مجال الأنظمة الحسية. وخلال سعيه نحو ذلك، كان جورجوبولوس على علم بأنه يتعين عليه التخلص من الدراسات الخاصة بالحركات المفصلية غير السلسة. لفهم كيفية تمثيل معلومات الحركة ومعالجتها بواسطة الدماغ، احتاج إلى دراسة ذلك في سياق الحركات الطبيعية بكل تعقيداتها الكاملة، التي تتضمن العديد من العضلات. من أجل ذلك، اتجه إلى واحدةٍ من أهم وأكثر الحركات الأساسية في ذخيرة الرئيسيات، وهي: الوصول أو الاستهداف.

للوصول إلى شيءٍ أمامك، تعتمد على مجموعةٍ من العضلات التي تُحيط بمرفق الذراع. ولا عجب في أن هذا يتضمن عضلات العضُد؛ مثل العضلات ثنائية الرءوس والعضلات ثلاثية الرءوس. كما يتضمن العضلة الصدرية الأمامية (مجموعة من الأنسجة العضلية تمتد من منتصف الصدر إلى الذراع)، والعضلة الدالية (قطاع يقع أمام الإبط مباشرة)، والعضلة الظهرية العريضة، التي تمتد من أسفل الظهر حتى الإبط. وبناءً على تفاصيل عملية الوصول، قد تتطلب الرسغ والأصابع أيضًا. تختلف الحركة التي تتضمن مجموعة من العضلات المنفردة اختلافًا كبيرًا عن تجارب ثَنْي المِعصَم، التي أجراها إيفارتس.

لدراسة هذه المهمة المتعددة الأوجه، درَّب جورجوبولوس القرود على تنفيذ مهمة على منضدة مضيئة صغيرة. أمسك كل قرد في يده قضيبًا، تمامًا كما تُمسك ملعقةً خشبية عند التقليب في قِدْر كبيرة. كان هذا القضيب موصَّلًا بجهاز قياس، وعند تشغيل الضوء للإشارة إلى الموضع الذي يمكن للقرود الوصول إليه، حرَّكت القرود القضيب إلى هذا الموضع. رُتبَت الأضواء في شكل دائرة، كما تُرتب الأرقام على وجه الساعة، وكان طول نصف قطر الدائرة يقارب طول بطاقة اللعب. كانت القرود تعود دائمًا إلى مركز الدائرة قبل أن تصل إلى الموضع التالي. ونظرًا لوجود ثماني بقع من الضوء تفصلها مسافات متساوية على الدائرة، حركت القرود أذرعها ثماني حركات في اتجاهات مختلفة. أصبح هذا الإعداد البسيط جزءًا من تقليد دراسة «الوصول من المركز إلى الهدف المحدد» في علم الأعصاب الحركي.

أما عن إسهامه الثاني، فقد استهدف جورجوبولوس نظرية الحركيات أو الكينتيكا التي قدمها إيفارتس، واستبدل بها منظوره الخاص حول ما تُمثِّله الخلايا العصبية في القشرة الحركية.

كان إيفارتس قد استخدم حركة الرسغ السريعة، ليلاحظ أن النشاط العصبي يُمثِّل القوة، لكن بعض العلماء وجدوا أن هذه العلاقة لم تكن موثوقة. فخلال الحركات الأكثر تعقيدًا على الأخص، يتغير مقدار القوة التي تنتجها العضلة مع تغيُّر حركة المفاصل والعضلات المحيطة بها. على سبيل المثال، تحريك الكتِف يغير آلية حركة المرفق. وهذا ما يجعل سلسلة التأثيرات، التي تبدأ بالنشاط العصبي ثم تنتقل إلى نشاط العضلات وتنتهي بتوليد قوةٍ، أقلَّ قابليةً للتفسير، ويجعل النظرية الحركية أقل تأثيرًا. كانت هناك مؤشراتٌ أيضًا على أن الكثير من الخلايا العصبية لا تهتم بالضرورة بتوليد قوةٍ في الجسم.




شكل ٨-١

لذا عكس جورجوبولوس منظوره. فبدلًا من أن يكتفي بدراسة النشاط العصبي الذي يرتبط بعضلات منفردة، اهتم بدراسة النشاط العصبي الذي يتحكم في الحركة ككل. وقد وجد في أكثر من ثُلث الخلايا العصبية في القشرة الحركية علاقةً واضحة ومباشرة جدًّا بين النشاط العصبي، والاتجاه الذي يتحرك فيه الذراع. على وجه التحديد، وجد أن هذه الخلايا العصبية لها اتجاه مفضل. وهذا يعني أنها تُطلق إشارات عصبية أكثر، عندما يصل الحيوان إلى ذلك الاتجاه، لنفترض أن هذا الاتجاه المفضل يكون عند الساعة الثالثة، وسينخفض معدل إطلاق الإشارات كلما كانت الحركة أبعد عن هذا الاتجاه (يكون

الإطلاق أقلَّ في اتجاه الساعة الثانية والرابعة، ويكون أقلَّ أيضًا في اتجاه الساعة الواحدة والخامسة، وهكذا). هذا الاستنتاج المتعلق بـ «انتقائية الاتجاه» أوضح ضِمنيًّا أن القشرة الحركية تهتم بالكينماتيكا (مواضع الحركة وأنماطها) أكثر من الكينتيكا (القُوى التي تتضمنها الحركة). بعد الجدال حول ما إذا كان عمل القشرة الحركية مجرَّد تشنجاتٍ فردية أم حركات مُنسَّقة، أصبح الجدال حول ما إذا كان دور القشرة الحركية يرتبط أكثر بالكينتيكا أم بالكينماتيكا؛ هو النقاش الكبير التالي في علم الأعصاب الحركي.

تختص الكينماتيكا بدراسة السمات الوصفية للحركة، التي تتحدد بصرف النظر عن القوى التي تولِّدها. بهذه الطريقة، توضح المتغيرات التي تتضمنها الكينماتيكا النتيجة المرجوَّة من حركة الذراع، لكنها لا توضح التعليمات الخاصة بكيفية توليد هذه الحركة. الانتقال من نموذج يفترض أن القشرة الحركية تحمل شفرة الحركة من منظور الكينتيكا (القُوى المؤثرة على الحركة) إلى نموذج يفترض أنها تحمل شفرة الحركة من منظور الكينماتيكا (الأنماط والمواضع)؛ غيَّر من طريقة توزيع العمل في الجهاز الحركي. حين يتعلق الأمر بأحد متغيرات الكينتيكا، وهو القوة، نجد أن العلاقة بين هذا المتغير والمستوى الفعلي لنشاط العضلات تتحدد من خلال عملياتٍ حسابيةٍ بسيطة؛ في المقابل، نظرًا لأن قيم الكينماتيكا لا تحدد سوى الموضع الذي لا بد أن يكون فيه الذراع في الفراغ، فإنها تُمثِّل تحديًا أكبر لبقية الجهاز الحركي. تقع مسئولية تغيير النظام الإحداثي على التراكيب التي تلي القشرة الحركية؛ أي أخذ مجموعة من المواضع التي نرغب في الانتقال إليها خارج الجسم، وترجمتها لأنماطٍ من النشاط العضلي. أصبح جورجوبولوس مُدافعًا عنيدًا لا يتوانى في الدفاع عن هذا المنظور الكينماتيكي، لوظيفة القشرة الحركية لعقود تالية.

قدم جورجوبولوس تغييرًا أخيرًا في كيفية فحص البيانات. إذا كانت الخلايا العصبية تتوافق مع اتجاه الحركة العام، فإن هذا يعني أن كل خلية عصبية لا يمكنها بمفردها التحكُّم في عضلة أو مجموعة من العضلات. إذن، لِمَ يتعيَّن علينا فحص كل خلية عصبية على حِدة؟ سيكون من المنطقي أكثر فحص نشاط جميع الخلايا العصبية، أو مجموعة الخلايا العصبية بالكامل.

وهذا ما فعله جورجوبولوس. باستخدام المعلومات التي كانت لديه حول انتقائية الاتجاه في الخلايا الفردية، حسب «مُتَّجه مجموعة الخلايا العصبية»؛ وهو بالضرورة سهم يشير إلى اتجاه الحركة الذي تُمثِّله مجموعة من الخلايا العصبية. يجري حساب المتَّجه من خلال السماح لكل خلية عصبية بالتصويت لصالح اتجاه الحركة المفضل بالنسبة لها.

إلا أن هذا النظام الديمقراطي ليس مثاليًّا، فأصوات الخلايا العصبية لا يكون لها الوزن نفسه. بل يعتمد وزن صوت الخلية العصبية على مدى نشاط هذه الخلية. وعليه، يمكن للخلايا العصبية التي يكون معدل إطلاقها للإشارات العصبية الكهربية فوق المتوسط؛ أن تجعل مُتَّجه مجموعة الخلايا العصبية منحازًا نحو اتجاهها المفضل. كما يمكن للخلايا العصبية التي يكون معدل إطلاقها للإشارات العصبية الكهربية أقل من المتوسط؛ أن تجعل متجهَ مجموعة الخلايا العصبية منحازًا في اتجاهٍ آخر غير اتجاهها المفضل. بهذه الطريقة، توضح الخلايا العصبية مجتمعة الاتجاه المفضل للحركة. وهي تفعل ذلك بطريقة أكثر دقة من الطريقة التي يمكن بها للخلية العصبية المنفردة توضيح الاتجاه المفضل.[٦] أوضح جورجوبولوس أنه بتجميع إسهام كل خلية عصبية بهذه الطريقة، يمكنه في الواقع استخلاص الاتجاه الذي كان الحيوان يحرك فيه ذراعه في أي لحظة معينة.

أثبت هذا المنهج، القائم على مستوى «مجموعةٍ من الخلايا» لتفسير البيانات، أنه قوي؛ وربما قوي جدًّا. بعد هذا الجهد البحثي، ظهرت عدة دراسات توضح معلومات أخرى يمكن استخلاصها من القشرة الحركية، إذا وضعت مجموعة الخلايا بالكامل في الاعتبار، بما في ذلك معلومات حول حركة الأصابع وسرعة الذراع والنشاط العضلي والقوة والموضع، وحتى المعلومات الحسية حول الإشارات المرئية التي توضح أين ومتى نتحرك. على الرغم من أن الاتجاه كان واحدًا من المتغيرات الأصلية التي يمكن فك شفرتها باستخدام هذا المنهج، فإنه لم يكُن المتغير الوحيد. كان اكتشاف متغيرات كنتيكية وكنماتيكية (بالإضافة إلى أنواع أخرى من المعلومات) في النشاط؛ ضربةً سُددت إلى نظرية جورجوبولوس، التي أفادت بأن القشرة الحركية تقتصر على تمثيل معلوماتٍ حول أنماط الحركة (كينماتيكا) فقط. من المفارقة أن إحدى مساهماته الخاصة — أي التركيز على مجموعة الخلايا العصبية — هي التي قوضت نظريته.

[٦] لفهم ذلك، فكِّر في الخلية العصبية المشار إليها سابقًا، التي كانت تفضل الحركة نحو الساعة الثالثة. لهذه الخلية العصبية معدل إطلاق فريد خاص بالحركة في اتجاه الساعة الثالثة، لكن معدل إطلاقها للإشارات العصبية الكهربية قد يكون واحدًا في حالة الحركة في اتجاه الساعة الثانية، والحركة في اتجاه الساعة الرابعة، وهو ما يجعل هذَين الاتجاهَين لا يمكن التمييز بينهما. لكن عند تجميع المعلومات من هذه الخلية العصبية جنبًا إلى جنب مع خلايا أخرى لها اتجاهات مفضلة مختلفة، يمكن إزالة هذا الالتباس.

انخفضت ثقتنا أكثر وأكثر في الرؤى التي تمدُّنا بها المعلومات التي نستخلصها من القشرة الحركية عن وظيفتها، من خلال استخدام المناهج الحاسوبية. تمكَّن العلماء الذين شيَّدوا نماذج للجهاز الحركي بهدف تمثيل المتغيرات الكنتيكية، من توضيح أنه يمكن الحصول على متغيرات كينماتيكية من هذه النماذج أيضًا. أحد هؤلاء العلماء، وهو إيبرهارد فيتز، ذهب إلى حد المقارنة بين البحث عن تمثيلات المتغيرات المختلفة في القشرة الحركية والعرَّافين المحظوظين: «مثل الوصول إلى التنبُّؤات من خلال الأنماط التي يراها العرافون في أوراق الشاي، يمكن استخدام هذا المنهج للوصول إلى تفسير من خلال تطبيق الأُطُر المفاهيمية على الأنماط التي لها مغزًى».

هذه الاستنتاجات كشفت عن افتراض كان كامنًا دومًا تحت السطح مباشرة، وهو أن الخلايا العصبية في القشرة الحركية لا تحمل شفرة قيمة واحدة فقط. فالخلايا العصبية في القشرة الحركية لا تحمل شفرة الحركة من منظور الكنماتيكا وحدها ولا الكنتيكا وحدها؛ بل مزيج منهما، وتشمل ما هو أكثر من ذلك. بعدة طرق، كانت هذه الحقيقة واضحة لفترة طويلة. يمكن ملاحظة هذه الحقيقة في الخلايا العصبية التي لا تُظهر استجابات مُنمَّقة، ومنظمة للقوة أو الاتجاه، أو الخلايا العصبية التي تُظهر تغيُّرات كبيرة في استجاباتها عند إجراء تغييراتٍ طفيفةٍ في التجربة، أو ببساطة في سلسلةٍ ممتدةٍ لعقود من الباحثين الذين يجدون دليلًا لصالح أحد الطرفَين (الكنماتيكا) وآخرَ لصالح الكنتيكا مرات ومرات.

وفقًا لبعض الآراء، ضل مجال الدراسة عن طريقه؛ لأنه سلك بشكلٍ أعمى الطريق الذي رسمه علماء آخرون، وهو اعتبار أن دراسة الأنظمة الحسية التي ألهمت جورجوبولوس تُعد نظامًا ضعيفًا لكيفية فهم الحركة. لم يُحَلَّ الجدل بشأن السؤال عن المتغيرات التي تحمل شفرتها القشرة الحركية، لا لأن السؤال كان صعبًا؛ بل لأن صيغة السؤال كانت خاطئة منذ البداية. لا يتعين على الجهاز الحركي تتبُّع بارامترات الحركة، كل ما عليه هو القيام بحركات.

كما تبيَّن في الفصل السابق، كونُ العلماء قادرين على ملاحظة هيكل للنشاط العصبي فقط؛ لا يعني بالضرورة أن الدماغ يستخدمه. ثمة تشبيه شائع يقارن بين القشرة الحركية ومحرك السيارة. المحرك مسئول بالطبع عن حركة السيارة. إذا أراد أحدهم قياس نشاط أجزائه المختلفة — المكبس وأحزمة المحرك، إلى آخره — فمن المحتمل أن بعض هذه القيم، في ظل بعض الظروف، ترتبط ارتباطًا وثيقًا بالقوة الناتجة عن

السيارة أو بالاتجاه الذي تتجه إليه. لكن هل يمكننا وصف وظيفة المحرك باعتبارها متأثرة بهذه المتغيرات أو انعكاسًا لها؟ أم إن تمثيل المتغيرات مجرد ممارسة مقبولة ربطها العلماء بالقشرة الحركية، وهؤلاء العلماء هم أنفسهم الذين يفهمون الحركة من خلال مفاهيم القوة والميكانيكا والفيزياء؟ كتب عالم الأعصاب الحركية جون كالاسكا عام ٢٠٠٩: «عَزْم دوران المفصل هو بارامتر ميكانيكي يُنسب إلى العالِم نيوتن، ويعرِّف قوة الدوران المطلوبة لإنتاج حركة مفصل معينة ... من المستبعد جدًّا أن تكون الخلية العصبية [في القشرة الحركية] على عِلم بالنيوتن متر، أو كيفية حساب عدد وحدات النيوتن متر اللازمة لأداء حركة معينة».

كونُ السؤال عن الشفرات التي تحملها القشرة الحركية، ليس السؤال الصحيح الذي يجب طرحه لفهم القشرة الحركية لا يعني أن الإجابة ليس لها قيمة. بالفعل، محاولة فك شفرة المعلومات التي تحملها القشرة الحركية قد تكون مفيدةً بعض الشيء، لا لمساعدتنا في فَهْم الجهاز الحركي، بل لتجاوز ذلك والذهاب إلى ما هو أبعد من ذلك تمامًا.

في غرفة صغيرة خارج بروفيدنس عاصمة ولاية رود آيلاند، عندما قرَّبت امرأة بالغة من العمر ٥٥ عامًا تُدعى كاثي هاتشينسون كوبًا من القهوة من فمها، وأخذَت رشفة، كانت أول مرة تفعل فيها ذلك منذ أكثر من ١٥ عامًا. كانت أيضًا أول مرة يحقق فيها شخص مصاب بالشلل الرباعي هذا الإنجاز. أصيبت هاتشينسون بالشلل من الرقبة لأسفل الجسم، عندما كانت في التاسعة والثلاثين من عمرها، بعد أن تعرَّضت لسكتةٍ دماغيةٍ أثناء الاعتناء بالحديقة في يوم ربيعي عام ١٩٩٦. وفقًا لحوار أجرته مع مجلة «وايرد»، سمعت عن «برين جيت» — وهي مجموعةٌ بحثيةٌ مقرها جامعة براون تستكشف استخدام واجهات تربط بين الدماغ والكمبيوتر، لتمكين المرضى من استعادة الحركة — من صديقٍ لها يعمل في المستشفى. سجلت هاتشينسون في تجربتهم الإكلينيكية.

وكجزءٍ من دراستهم البحثية، زرع علماء «برين جيت» جهازًا في دماغ كاثي — عبارة عن قطعة مربعة من المعدن أصغر من زر القميص — يتكون من ٩٦ قطبًا كهربيًّا مثبتًا في منطقة التحكم بالذراع في القشرة الحركية اليسرى. تُضخ أنشطة الخلايا العصبية المسجَّلة من خلال هذه الأقطاب الكهربية، عن طريق سلكٍ يصل ما بين رأسها ونظام حاسوبي. يتصل هذا النظام الحاسوبي بذراع روبوت مثبت على حامل إلى يمين كاثي. كان الذراع نفسه غريبًا؛ إذ كان منتفخًا وغير تقليدي وأزرق لامعًا، لكن اليد في

نهايته يمكن تمييزها بسهولة أكبر، وتحتوي على مفاصل دقيقة مفصَّلة باللون الفضي غير اللامع. عندما تحكمت كاثي فيها، كانت حركاتها غير سلسة. توقف الذراع وتحرك للخلف قبل أن يُحضر القهوة لها أخيرًا. لكنه في نهاية الأمر أنهى المهمة، واكتسبت المرأة التي فقدت القدرة على تحريك أطرافها، القدرة على تحريك هذا الذراع.

على الرغم من أن هذا التحكم يبدو سهلًا وغير مثالي، فإنه لم ينشأ ما بين طَرفة عينٍ وانتباهتها. فلكي تعرف الآلة كيفية الاستماع للقشرة الحركية لكاثي، لا بد أن تتدرَّب على ذلك. وقد حققت مجموعة «برين جيت» هذا بجَعْل كاثي تتخيل تحريك ذراعها في اتجاهات مختلفة. وعليه، فإن الأنماط في النشاط العصبي يمكن أن ترتبط بأوامر تحريك الذراع في اتجاهاتٍ مختلفة. وبهذه الطريقة، يعتمد التحكم في هذه الواجهة التي تربط بين الدماغ والكمبيوتر على وجود انتقائية الاتجاه في القشرة الحركية. بمعنى أنه إذا لم يكُن من الممكن قراءة اتجاه الحركة والنوايا الأخرى؛ كالإمساك بشيء أو تركه، من مجموعة من الخلايا العصبية الموجودة في القشرة الحركية؛ فلن تعمل الواجهة التي تربط الدماغ بالكمبيوتر.

تعتمد هذه الأجهزة أيضًا على العديد من الأدوات الرياضية الثقيلة التي تعمل في الخلفية. لمحاولة أداء حركات سلسة قدر الإمكان، استخدمت مجموعة «برين جيت» خوارزمية تدمج مدخلات من النشاط العصبي بمعلومات حول اتجاه الحركة السابقة. علاوة على ذلك، بعض الحركات الدقيقة ليد الروبوت ومِعصمه أُعدِّت برمجتها مُسبقًا في الجهاز، بحيث يمكن للمستخدم بدءُ سلسلةٍ كاملةٍ وتفصيلية من الحركات، من خلال تخيُّل أوامر بسيطة. هذا حلٌّ عملي لمدى صعوبة فَهْم أوامر الحركة التفصيلية من نشاط مجموعة من الخلايا العصبية.

في حين أن هذه الجهود المضنية لبناء أجهزة حركية يتحكم فيها الدماغ، تعطي بعضَ الأمل للمرضى، فإنها تعكس مدى ضآلة فَهْمنا للدور الذي تلعبه القشرة الحركية في الحركة السليمة.

إذا كان فك الشفرة، إذا ما قورن بالفهم، أكثر إفادة في الحصول على تطبيقات هندسية عملية، فما الذي يمكننا استخدامه لفهم القشرة الحركية؟

ظل التركيز على مجموعات الخلايا العصبية شائعًا، ولهذا سبب وجيه. لا بد أن الخلايا العصبية في القشرة الحركية تعمل معًا إلى حدٍّ ما لتوليد حركاتٍ، فالقشرة الحركية

في نهاية الأمر قد خُصِّص لها مئات الملايين من الخلايا العصبية، للتحكم في ٨٠٠ عضلة فقط من عضلات الجسم. لكن هذا يمثل تحديًا أمام العلماء: كيف يمكنهم فَهْم نشاط مئات الخلايا العصبية التي سُجِّلت بشكلٍ طبيعي خلال التجربة؟ في منهج مُتَّجه مجموعة الخلايا العصبية الذي انتهجه جورجوبولوس، تكون الأفكار حول ما تفعله الخلايا العصبية جزءًا لا يتجزأ منه: إذا كانت الخلايا العصبية تحمل شفرة الاتجاه، فإن الاتجاه هو ما سنستخلصه من النشاط العصبي. لكن مع محاولة علماء الأعصاب الحركية الانتقال من السؤال عما تحمل القشرة العصبية شفرته، إلى السؤال عما تفعله القشرة الحركية، لم تعد المناهج التي تعتمد على استخلاص معلومات محددة منطقية. تعيَّن عليهم إيجاد وسيلة جديدة للنظر إلى مجموعة الخلايا العصبية.

الفرق الجوهري بين دراسة القشرة الحركية باستخدام منهج الخلية العصبية المنفردة، في مقابل دراستها باستخدام منهج مجموعة الخلايا العصبية هو عدد الأبعاد. في حين أن الفضاء الذي نعيش فيه ثلاثي الأبعاد، فإن الكثير من الأنظمة التي يدرسها العلماء لها أبعادٌ أكثر بكثير. على سبيل المثال، نشاط مجموعةٍ مكونةٍ من ١٠٠ خلية عصبية سيكون له ١٠٠ بُعد.

يمكن أن تكون معرفة كيفية ارتباط هذا الفضاء العصبي المجرد العالي الأبعاد من الأساس، بالفضاء الواقعي الملموس؛ أمرًا صعبًا. لكن يمكننا الاعتماد على حدسنا بالفضاء المادي، من خلال اعتبار أن مجموعة الخلايا العصبية تتكوَّن من ثلاث خلايا عصبية فقط. على وجه التحديد، بالاستعاضة عن الأمتار أو الأقدام بعدد الإشارات العصبية الكهربية التي تُطلقها الخلية العصبية، يمكن وصف نشاط مجموعة من الخلايا العصبية باعتبارها موضعًا في فضاء. على سبيل المثال، عند أداء حركة، قد تُطلق أول خلية عصبية في المجموعة خمس إشاراتٍ عصبية كهربية، وتطلق الثانية ١٥ وتُطلق الثالثة تسعة. هذا يعطي إحداثياتٍ في الفضاء العصبي، بالطريقة نفسها التي تصف بها خريطة الكنز عدد الخطوات المطلوب اتخاذها نحو الأمام، ثم نحو اليمين، ومدى العُمق الذي نحفر به. سيشير نمطٌ آخر من أنماط النشاط العصبي إلى موضع آخر. بالنظر إلى النشاط العصبي للقشرة الحركية عبر مجموعةٍ متنوعة من الحركات، يمكن للعلماء السؤال عما إذا كانت المواضعُ المختلفةُ في هذا الفضاء، تقابل أنواعًا أو مكوناتٍ مختلفة للحركة.

إلا أن تخيُّل هذا النشاط يصبح أمرًا صعبًا. فنظرًا لكوننا نحن البشر نعيش في عالم ثلاثي الأبعاد، فإننا نواجه مشكلةً في التفكير فيما هو أبعد من ذلك. ما الذي كان

سيبدو عليه الفضاء العصبي، إذا أضيفت خلية عصبية رابعة إلى المجموعة؟ ماذا لو احتوى الفضاء العصبي على ١٠٠ خلية عصبية أو ١٠٠٠؟ في هذه الحالة ينهار حدسنا. يُقدِّم عالم الكمبيوتر جيفري هنتون نصيحةً بشأن هذه المشكلة: «للتعامل مع المستويات الفائقة في فضاءٍ مكوَّنٍ من ١٤ بُعدًا، تخيل فضاء ثلاثي الأبعاد وقُل لنفسك إنه «ذو ١٤ بُعدًا» بصوت مرتفع».

لحسن الحظ أن هناك حلًّا لمشكلة وجود أبعاد كثيرة، وهو تخفيض الأبعاد. تخفيض الأبعاد عبارة عن تقنية رياضية يمكن من خلالها تناول المعلومات الموجودة في فضاءٍ كثير الأبعاد، وتمثيلها باستخدام أبعادٍ أقل. يعتمد ذلك على الفرضية التي تفيد بأن بعض هذه الاتجاهات الأصلية مكرر، وهو ما يعني أن العديد من الخلايا العصبية تقول الشيء نفسه. في مجموعة أبعادها ١٠٠ بُعد، إذا تمكنت من إيجاد أنماط النشاط العصبي الأساسية لهذه المجموعة، والأنماط الأخرى التي تُعَد إعادة تدويرٍ لهذه الأنماط الأساسية، فستتمكَّن من وصف هذه المجموعة العصبية باستخدام أقل من ١٠٠ بُعد.

فكِّر في الشخصية. كم عدد الأبعاد الموجودة في شخصية الإنسان؟ تحتوي اللغة العربية على قائمة من الأوصاف المحتملة: مقبول ومرِن، ومنتقِد لذاته، وطيب ومتسامح، ومبدِع وساحر وهادئ، ومنظم وعنيف، ودقيق وجاد وذكي، وما إلى ذلك. يمكن اعتبار كل صفة من هذه الصفات بُعدًا منفصلًا؛ بحيث يوصف كل شخص وفقًا لموضعه في فضاء الشخصية العالي الأبعاد، بناءً على تقييماتهم في كلٍّ من هذه الأبعاد. لكن يتضح أن بعض السمات الشخصية ترتبط ببعضها. على سبيل المثال سمة «المهارة» يمكن أن تُعتبر أيضًا «سرعة بديهة». قد يكون من الأنسب أن نفكِّر في المهارة وسرعة البديهة باعتبارهما مقياسَين للسمة الأساسية، التي ربما نطلق عليها «الذكاء». إذا كان الأمر كذلك، فإن البُعدَين اللذَين يُمثلان المهارة وسرعة البديهة يمكن أن يحل محلَّهما البُعد الذي يمثِّل الذكاء. هذا يخفِّض الأبعاد. في حالة وجود شخص مصادفةً يتسم بالمهارة لكنه ليس سريع البديهة، أو سريع البديهة لكنه ليس ماهرًا، فإن هذا التخفيض لن يؤدي إلى التضحية بمعلومات جوهرية. فبالنسبة إلى الغالبية العظمى من الأشخاص، وصفهم بالذكاء وحده سيخبرنا عما نحتاج إلى معرفته عن هذه الجوانب من شخصيتهم.

بالفعل، يعتمد معظم اختبارات الشخصية الشائعة على فرضية أن عددًا قليلًا من السمات الأساسية كافٍ لتفسير التنوع البشري. على سبيل المثال، اختبار «مايرز بريجز» الشهير يدَّعي أن الشخصية لها أربعة أبعاد فقط: الحدس مقابل الإحساس، والشعور

مقابل التفكير، والانطواء مقابل الانبساط، والإدراك مقابل الحُكم. وُضِع نهج قائم على أسس علمية أكثر (يُعرف باسم سمات الشخصية الخمس الكبرى) يضع خمسة أبعاد للشخصية: الوفاق والعصابية والانبساط والضمير والانفتاح. يُشار إلى هذه باسم العوامل «الكامنة»؛ لأنه يمكن التفكير فيها باعتبارها السمات الأساسية التي تولِّد العديد من أنماط الشخصية المختلفة التي نراها.

التقليد التاريخي في علم الأعصاب الذي يُعنى باعتبار كل خلية عصبية ندفةَ ثلجٍ — أي إن كل خلية عصبية فريدة من نوعها وجديرة بالتحليل الفردي — يفترض أن هذه الخلايا العصبية بطريقةٍ ما الوحدةُ الأساسية للدماغ. أي إنه يفترض أن الطبيعة قد جمعت الأبعاد ذات الصلة في شكل خَلَوي مُنمَّق. لكن كما أدت أفكارنا الشائعة حول الشخصية إلى الإفراط في تمثيلها بأبعاد، ثمة العديد من الأسباب التي تجعل عددَ الأبعاد «الحقيقية» لمجموعةٍ من الخلايا العصبية، أقلَّ من عدد الخلايا العصبية الموجودة في هذه المجموعة. على سبيل المثال، التكرار يُعَد ميزة ذكية لا بد من توافرها في أي نظام بيولوجي. الخلايا العصبية تتَّسم بالتشويش ويمكنها أن تموت، وهذا يجعل النظام الذي يحتوي على خلايا عصبية مكررة أكثر قوة.[٧] علاوة على ذلك، تميل الخلايا العصبية إلى أن تكون مترابطة بشكلٍ كبير. ونظرًا لتبادل الإشارات فيما بين هذه الخلايا باستمرار، من غير المحتمل أن تتمكن أي خلية عصبية من البقاء مستقلة عن غيرها. بدلًا من ذلك، يرتبط نشاط هذه الخلايا بنفس الطريقة التي تبدأ فيها آراء الأشخاص في الدوائر الاجتماعية الواحدة بالتقارب. لهذه الأسباب، أصبحت مجموعات الخلايا العصبية جاهزةً لتطبيق تقنيات تقليل الأبعاد، التي يمكنها المساعدة في تحديد العوامل الكامنة التي تحرِّك النشاط العصبي لهذه الخلايا العصبية.

تتمثل إحدى تقنيات تقليل الأبعاد الشائعة للبيانات العصبية، في تحليل المكونات الأساسية (PCA). اختُرِعت هذه التقنية في ثلاثينيات القرن العشرين، واستخدمها علماء النفس على نطاقٍ واسعٍ لتحليل السمات والملكات العقلية. ونظرًا لمدى إفادتها في فهم مجموعات البيانات الكبيرة، تُطبق على جميع أنواع البيانات في الكثير من المجالات.

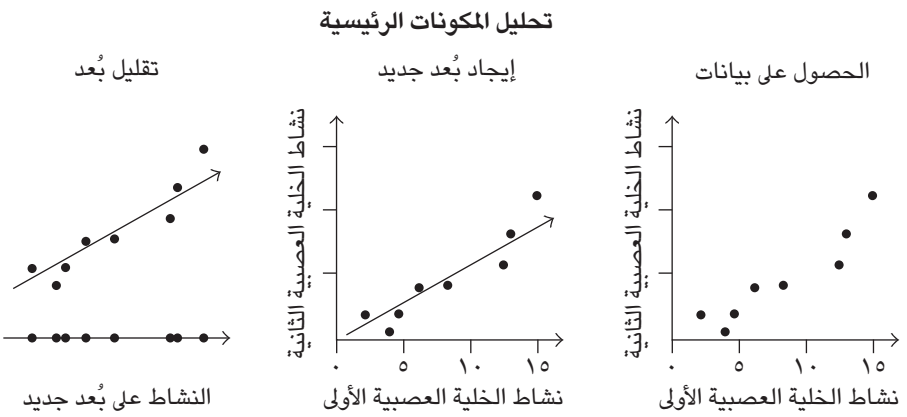
[٧] تقنيًّا، هذا يتعارض مع أفكار بارلو الخاصة بالتشفير الفعَّال والتشفير المتناثر أو المبعثر اللذَين تناولناهما في الفصل الأخير. من الناحية العملية، يتعين على الدماغ الموازنةُ بين الكفاءة في نقل المعلومات وضرورة أن يحتفظ بمرونته، وعليه لا بد أن ينطوي على شيء من التكرار.

لكن هذه التقنية تعمل من خلال التركيز على «التباين». يشير التباين إلى مدى تشتت نقاط البيانات المختلفة. على سبيل المثال، على مدار ثلاث ليالٍ، إذا نام شخص ثماني ساعات، وثماني ساعات وخمس دقائق، وسبع ساعات و٥٥ دقيقة، فسيكون نوم الشخص منخفضَ التباين. قد ينام الشخص الذي يكون نومه مرتفعَ التباين ٨ ساعات في المتوسط أيضًا، لكن هذا المتوسط قد يكون موزَّعًا بشكل متباين تمامًا على مدار الليالي الثلاث، لنقُل ست ساعات و١٠ ساعات وثماني ساعات.

الأبعاد التي تتَّسم بالتباين الشديد تُعد مهمةً؛ لأنها قد تقدِّم معلومات مفيدة. على سبيل المثال، من الأسهل معرفة الحالة الانفعالية لشخص يكون هادئًا أحيانًا ويصرخ في أحيانٍ أخرى، مقارنة بشخص لا تظهر عليه الانفعالات ويبدو دائمًا بنفس الوجه الجامد. وبالمثل، من الأسهل تصنيف الأشخاص وفقًا للسمات التي تختلف كثيرًا من شخص لآخر، مقارنة بالسمات التي تشيع بين الناس. إدراكًا لأهمية التباين، يتمثَّل الهدف الرئيسي من تقنية تحليل المكونات الأساسية في إيجاد أبعاد جديدة — وهي مزيج من الأبعاد الأصلية، بنفس الطريقة التي يكون بها الذكاء مزيجًا من المهارة وسرعة البديهة — تُمثِّل أكبر قدرٍ من التباين الملاحظ في البيانات. هذا يعني أن معرفة أين تقع نقطة بياناتٍ وفقًا لهذه الأبعاد الجديدة، ستظل تخبرنا بالكثير عنها، حتى لو كان هناك عدد أقل من هذه الأبعاد. على سبيل المثال، لنفترض أن لدينا مجموعةَ خلايا عصبية مكونة من خليتَين عصبيتَين، ونريد أن نصف نشاط هذه المجموعة برقمٍ واحد فقط.

لنقُل إننا سجلنا نشاط هاتَين الخليتَين العصبيتَين أثناء حركات مختلفة؛ لذا لدينا لكل حركة زوجان من الأعداد يمثلان عدد الإشارات العصبية الكهربية المسجل من كل خلية عصبية. إذا مثلنا هذه الأزواج بالنقاط باستخدام المحور «س» لإحدى الخليتَين، والمحور «ص» للخلية الأخرى، فقد نرى أن البيانات تقع على طول خطٍّ مستقيم لا أكثر ولا أقل. وعليه، يمكن أن يصبح هذا الخط البُعدَ الجديد لدينا. الآن، بدلًا من وصف النشاط أثناء كل حركة في صورة زوجَين من الأعداد، يمكننا وصفها في صورة عددٍ واحد يشير إلى مكان وقوع النشاط على الخط.

تقليل الأبعاد بهذه الطريقة يؤدي إلى استبعاد بعض المعلومات. فنحن لا نعلم، على سبيل المثال، مقدار بُعد النشاط عن هذا الخط إذا كنا لا نصف سوى مكان وقوعه على الخط، إلا أن المقصد من ذلك هو تحديد الخط الذي يعكس أكبر قدر من التباين، وبهذا نخسر أقل قدر من المعلومات.




شكل ٨-٢

إذا لم تقع البيانات على طول خط مستقيم، أي إذا كان نشاط الخليتين العصبيتَين غير متماثل تمامًا، فلن ينجح هذا. في هذه الحالة سنقول: إن مجموعة الخلايا العصبية ثنائية الأبعاد هذه تَستخدم بالفعل بُعدَيها بالكامل، ولا يمكن تخفيض أبعادها. لكن كما ناقشنا سابقًا، ثمة العديد من الأسباب التي تجعل النشاط العصبي متكررًا، وعليه فإن تقليل الأبعاد ممكن.

طُبقت طريقة تقليل الأبعاد بنجاح على جميع أنواع البيانات العصبية على مدار سنوات. وقد طُبقت طريقة تحليل المكونات الأساسية في وقتٍ مبكرٍ من عام ١٩٧٨، وذلك عندما استُخدِمت لتوضيح أن نشاط الخلايا العصبية الثماني المسئولة عن حمل شفرة موضع الركبة، يمكن تمثيله جيدًا باستخدام بُعدٍ واحد أو اثنين فقط. أما استخدام تحليل المكونات الأساسية في الدراسات المتعلقة بالقشرة الحركية، فلم يشهد تزايُدًا إلا في العقد السابق. ويرجع هذا إلى أن تقليل الأبعاد ساعد علماء الحركة على رؤية المعلومات التي ما كانت لتتضح لولا ذلك. فالنظر إلى التقلُّبات في نشاط ما يزيد عن ١٠٠ خلية عصبية ممثلة بخطٍّ واحد؛ يجعل أنماط نشاط هذه الخلايا العصبية واضحةً للعين المجردة. بالنظر إلى تطور نشاط مجموعة من الخلايا العصبية الممثلة في صورة شكل ثلاثي الأبعاد، يمكن للعلماء الاستعانة بحدسهم حول الفضاء لفهم ما تفعله الخلايا العصبية. وعليه، فإن رؤية هذه المسارات يمكنها أن تخلق قصصًا جديدة حول آلية عمل الجهاز الحركي.

على سبيل المثال، تساءلت دراسات أجريت في معمل كريشنا شينوي، في جامعة ستانفورد في بدايات العقد الأول من القرن الحادي والعشرين، عن كيفية استعداد القشرة الحركية للحركات. لفعل هذا، درَّب الباحثون قرودًا لتنفيذ عمليات قياسية لمد الذراع من أجل الوصول إلى شيء ما، لكنهم وضعوا مهلةً ما بين الوقت الذي حددوا فيه موضع الحركة، والوقت الذي يتعين فيه على القرد أن يبدأ بالحركة. مكنتهم هذه المهلة من التسجيل من القشرة الحركية في أثناء استعدادها للحركة.

كان الافتراض طويل الأمد يفيد بأنه خلال الاستعداد للحركات، تطلق الخلايا العصبية إشارات عصبية كهربية بنمطٍ يشبه النمط الذي تُطلق به أثناء الحركة، لكن بمعدلات إجمالية أقل. أي إنها ستقول الشيء نفسه لكن بشكلٍ أهدأ. في فضاء النشاط العصبي، هذا سيضع النشاطَ التحضيري في نفس اتجاه نشاط الحركة، إلا أنه لن يكون قريبًا منه في الموضع. لكن بعمل نسخة منخفضة الأبعاد للنشاط العصبي أثناء تخطيط الحيوان للحركة وأثناء تنفيذه لها، وجد الباحثون نتائج مختلفة. لم يكن النشاط قبل الحركة مجرد نسخة مقيدة فحسب من النشاط خلال الحركة؛ بل كان يحتل منطقة مختلفة تمامًا من فضاء النشاط.

هذا الاستنتاج، على كونه مدهشًا، يتَّسق مع النظرة الأحدث للقشرة العصبية. ركزت هذه الرؤية على حقيقة أن القشرة الحركية نظام ديناميكي، بمعنى أن الخلايا العصبية بداخلها تتفاعل بطريقة تجعلها قادرة على إنتاج أنماط معقدة من النشاط بمرور الوقت. ونظرًا لهذه التفاعلات بين الخلايا العصبية للقشرة الحركية يمكنها تلقِّي مُدخَلات قصيرة وبسيطة، وإنتاج مخرجات مفصَّلة وممتدَّة في المقابل. ما يجعل هذا مفيدًا جدًّا هو أنه يعني أن منطقة أخرى من الدماغ يمكنها أن تقرر الموضع الذي ينبغي أن ينتقل إليه الذراع، وأن ترسل هذه المعلومات إلى القشرة الحركية، وستنتج القشرة الحركية مسارًا كاملًا للنشاط العصبي اللازم، لجعل الذراع ينتقل إلى هذا الموضع.

في هذا الإطار، يمثل النشاط التحضيري «حالة أولية» لهذا النظام الديناميكي. تحدد الحالات الأولية الموضع في فضاء النشاط الذي بدأت مجموعة الخلايا عنده، لكن ما يحدد مسار المجموعة هو الاتصال بين الخلايا العصبية. بهذه الطريقة، تكون الحالات الأولية أشبه قليلًا بمداخل الزحاليق المائية أعلى المنصة: موضع المدخل له تأثير طفيف على مسار الزُّحْلوقة أو على الموضع الذي ينتهي عنده. ومن ثم، لا يوجد سبب يجعل النشاط التحضيري مشابهًا للنشاط في أثناء الحركة. كل ما يهم هو أن تصل القشرة الحركية إلى الحالة الأوَّلية، وستتولى الوصلات بين خلاياها العصبية بقيةَ الأمر.

منظور «الأنظمة الديناميكية» هذا لديه القدرة على تفسير السبب في صعوبة محاولات فهم القشرة الحركية. بالتفكير في هذه الخلايا العصبية — باعتبارها جزءًا من نظام أكبر، في هذا النظام تقود بعضُ الأجزاء حركات العضلات في اللحظة الحالية، في حين تتولى أجزاء أخرى التخطيط للخطوة التالية — يصبح من المتوقع أكثر أن تكون استجاباتها متنوعة وقابلة للتطويع. من المفارقات أن هذا المنظور الجديد أعاد المجال لجذورِه. يتوافق هذا النموذج الذي يمكن فيه أن تنتج عن المدخلات البسيطة مُخرجاتٌ مركبة جيدًا، مع استنتاجات فيرير التي تفيد بأن التحفيز يُنتج حركات طبيعية ممتدَّة. وبالفعل بُرِّئت ساحة فيرير في أوائل القرن الحادي والعشرين، حين أوضح مايكل جرازيانو الأستاذ بجامعة برينستون — باستخدام تقنيات التحفيز الحديثة — أن تحفيز القشرة الحركية لمدة نصف ثانية يستحث حركات طبيعية ومنسقة، مثل تقريب اليد من الفم أو تغيير تعبير الوجه.

من المألوف أن يعترف العلماء بالأشياء التي يفتقرون إلى معرفتها. ففي النهاية يزدهر العلم في المجالات التي نفتقر فيها إلى المعرفة، والاعتراف بالافتقار إلى المعرفة في هذه المجالات مُهم من أجل تحقيق التقدم. لكن يبدو أن الباحثين في مجال الجهاز الحركي، على وجه التحديد، قد بالغوا كثيرًا في اعترافاتهم بالافتقار إلى المعرفة. فقد شغلوا فقرات بالحديث عن «الجدل الكبير» في مجالهم، وكيف أن هناك اتفاقًا ضئيلًا على نحوٍ ملحوظ، حتى بشأن خواص الاستجابة الأساسية للقشرة الحركية. كما أنهم سارعوا بالاعتراف بأنه «ما يزال تحقيق الفهم العميق لوظيفة القشرة الحركية أمرًا صعبًا.» وأن «السؤال عن كيفية ارتباط الاستجابات العصبية في القشرة الحركية بالحركة؛ لا يزال دون إجابةٍ حاسمة.» حتى إنهم كانوا يتساءلون في لحظات يأسهم: «لماذا تصعب الإجابة عن هذا السؤال الذي يبدو بسيطًا؟»

على الرغم من أن هذه الكلمات صيغت بالطريقة الرسمية التي تتسم بها الكتابة الأكاديمية، فإن هذه الكلمات توضح اعترافًا أمينًا بالحقيقة التعِسة؛ وهي أنه على الرغم من كون القشرة الحركية من أوائل مناطق القشرة المخية التي استُكشفت، ومن أوائل المناطق التي سُجِّل فيها نشاط الخلايا العصبية المنفردة أثناء القيام بسلوك معين، فإن الغموض الذي يكتنف القشرة الحركية لا يزال راسخًا ومُتجذِّرًا. كما رأينا بالطبع، لا يُعزى ذلك إلى عدم المحاولة؛ فقد حظِي تاريخ المجال بأعمال بطولية ومناقشات قوية،

وبالطبع تحقق العديد من التطورات فيه أيضًا. لكن لم يسفر سوى عددٍ قليل من الجدالات الرئيسية عن تسوية كاملة، ربما باستثناء الجدل حول وجود القشرة الحركية ووظيفتها التي لا يمكن إنكارها.

الفصل التاسع

# من البنية إلى الوظيفة

نظرية المخططات البيانية وعلم الأعصاب الشبكي

قدَّم سانتياجو رامون إي كاخال لمعهد كاخال في مدريد مجموعةً من مقتنياته الشخصية عام ١٩٣١، أي قبل وفاته بثلاث سنوات. احتوت المجموعة على أدواتٍ علمية؛ الموازين والشرائح المجهرية، والكاميرات والخطابات، والكتب والمجاهر، والمحاليل والكواشف الكيميائية. إلا أن العناصر الأبرز بين هذه المقتنيات — تلك التي ستصبح مُقترنة باسم كاخال — كانت تتمثل في ١٩٠٧ رسمات علمية رسمها خلال مسيرته المهنية.

كانت معظم هذه الرسوم لأجزاء مختلفة من الجهاز العصبي، وقد كانت ناتجة عن عملية شاقة من صبغ الخلايا. بدأ الأمر بالتضحية بكائن حي وحِفظ أنسجته. بعد ذلك أُزيل جزء من الدماغ ونُقِع في محلول لمدة يومين، ثم جُفِّف ونُقِع في محلول آخر — كان هذا المحلول يحتوي على الفضة التي ستخترق التراكيب الخلوية — ليومَين آخرَين. في نهاية هذا، شُطِف نسيج الدماغ، وجُفِّف مرة أخرى، وقُطع إلى شرائح رقيقة بما يكفي لتناسب شريحة المجهر. نظر كاخال إلى هذه الشرائح عبر عدسة مِجهَره ورسم ما رآه. استخدم كاخال القلم الرصاص أولًا لتحديد الإطار الخارجي لكل بنية وكل تفصيلة، في الخلية العصبية على قطعةٍ من الورق المقوَّى، بما في ذلك أجسام الخلايا السَّميكة والزوائد الرقيقة التي تبرز منها. بعد ذلك، ظلَّل الخلايا باستخدام الحبر الهندي، مع استخدام الألوان المائية من حين لآخر لإضفاء نسيج وبُعد على الرسم. والنتيجة هي مجموعة من الصور الظِّلية التي لا يمكن نسيانها لأشكال سوداء صارخة تشبه العنكبوت، على خلفيات

بيج وصفراء.[1] صوَّر كاخال أكثر من ٥٠ نوعًا من الحيوانات، ونحو ٢٠ جزءًا مختلفًا من الجهاز العصبي على ألواح الورق المقوى، وقد اختلفت أشكال بِنَى الجهاز العصبي وتنظيمها في رسوم كاخال، باختلاف الحيوان والألياف العصبية الخاضعة للفحص.

تُعبِّر هذه المئات من الرسوم عن مدى افتتان كاخال ببِنية الجهاز العصبي. فقد سعى نحو فهمٍ أعمق للوحدة الأساسية للدماغ، ألا وهي الخلية العصبية. ركَّز على أشكال الخلايا العصبية وكيفية تنظيمها. كان التركيز على البنية والتكوين المادي للخلايا العصبية مدخلَ كاخال لفهم آلية عمل الدماغ. فقد كان يعتقد أن الوظيفة تكمُن في البنية.

وقد كان مُحقًّا. فقد تمكن من استنتاج حقائق مهمة حول عمليات الدماغ، بالنظر مطولًا وجديًّا في طبيعة بنية الدماغ. أحد الاستنتاجات المهمة التي توصَّل إليها كان حول كيفية تدفُّق الإشارات عبر الخلايا العصبية. من خلال ملاحظاته العديدة للخلايا العصبية المختلفة في الأعضاء الحسية المختلفة، لاحظ كاخال أن الخلايا كانت دائمًا مرتَّبة بطريقة محددة. تتجه الزوائد الشُّجيرية للخلية في الاتجاه الذي تأتي منه الإشارة. في المقابل، يتجه المحور العصبي الطويل نحو الدماغ. في النظام الشمِّي، على سبيل المثال، تقع الخلايا العصبية التي تحتوي على مستقبِلات كيميائية قادرة على التقاط جزيئات الرائحة، في الجلد المخاطي داخل الأنف. تمتد المحاور العصبية لهذه الخلايا العصبية لأعلى نحو الدماغ، وتتصل بالزوائد الشجيرية الخاصة بالخلايا الموجودة في البصلة الشمِّية. بعد ذلك، تمتدُّ المحاور العصبية لهذه الخلايا العصبية لأبعد من ذلك في مناطق أخرى من الدماغ.

هذا النمط، الذي لاحظ كاخال تكراره مرارًا وتكرارًا، أشار بقوةٍ إلى أن الإشارات تتدفَّق من الزوائد الشجيرية عبر المحور العصبي. وقد استنتج أن الزوائد الشجيرية تقوم بدور مستقبِل الإشارات للخلية؛ بينما تلعب المحاور العصبية دور مرسِل الإشارات للخلية التالية. كان كاخال واضحًا جدًّا في توضيح هذا، لدرجة أنه أضاف أسهُمًا صغيرةً لرسوماته للدوائر العصبية مثل النظام الشمي، موضِّحًا الاتجاه المفترض لتدفق المعلومات. كما نعلم الآن، كان كاخال مُحقًّا تمامًا.

[1] كانت الصور جذابة بما يكفي لتصبح القطعة المركزية في معرض فني متنقل يُسمى «الدماغ الجميل»، لا بد أن هذا المصير أسعد كاخال. قبل أن يذعن لرغبات والده في أن يصبح طبيبًا، كان يحلم بأن يكون رسامًا.

كان كاخال واحدًا من المؤسسين الأوائل لعلم الأعصاب الحديث. ومن ثم، أصبح اعتقاد كاخال بوجود علاقة بين التركيب والوظيفة، جزءًا أصيلًا من علم الأعصاب الحديث. تناثرت انعكاسات هذه الفكرة عبر تاريخ علم الأعصاب. في مقال نُشر عام ١٩٨٩، كتب بيتر جيتين أن الباحثين في ستينيات القرن العشرين تمكَّنوا، رغم البيانات المحدودة المتوفرة لديهم، من ملاحظة أن «قدرات الشبكة نشأَت عن الاتصال البَيني للعناصر البسيطة لتكوين شبكات مُعقَّدة؛ ومن ثم نشأت الوظيفة عن شكل الاتصال.» وقد تابع موضِّحًا: «كانت الدراسات التي أُجريت في سبعينيات القرن العشرين تنطلق من العديد من التوقعات؛ أولًا: معرفة طريقة الاتصال من شأنها تفسير آلية عمل الشبكات العصبية.» وقد استمر هذا الموقف. اختُتِمت مراجعةٌ كتبها الأستاذ شاو جينج وان وهنري كينيدي بهذه العبارة: «إنشاء رابطٍ وثيقٍ بين البنية والوظيفة أمرٌ ضروريٌّ لفهم النشاط العصبي المعقَّد».

توجد مستويات عديدة للبنية في الدماغ. فمثلًا يمكن لعلماء الأعصاب دراسة شكل الخلية العصبية كما فعل كاخال. أو يمكنهم دراسة كيفية اتصال الخلايا العصبية: هل تتصل الخلية العصبية «أ» بالخلية العصبية «ب»؟ أو يمكنهم توسيع نطاق الدراسة والاستفسار عن كيفية تواصل تجمعات صغيرة من الخلايا العصبية. أو يمكنهم دراسة أنماط الاتصال على مستوى الدماغ، من خلال فحص حزمٍ سميكة من المحاور العصبية التي تصل بين مناطق متباعدة من الدماغ. قد يحمل أيٌّ من هذه التراكيب ذات المستوى الأعلى في طياته أسرارًا حول الوظيفة أيضًا.

لكن للكشف عن هذه الأسرار، يحتاج علماء الأعصاب طريقة لرؤية هذه البِنَى بوضوح ودراستها. الشيء الذي كان قد يبدو من أوجه القصور في طريقة الصباغة التي استخدمها كاخال — وهو أن هذه الطريقة كانت تصبغ عددًا قليلًا من الخلايا العصبية في المرة الواحدة — كان في الواقع ميزة جعلها طريقة ثورية. لو كانت هذه الطريقة تصبغ جميع الخلايا العصبية الموجودة في المنطقة الخاضعة للملاحظة في آنٍ واحد، لكان كل شيء سيظهر باللون الأسود نتيجة لذلك، وسيكون من الصعب تمييز أي بِنًى؛ سيكون الأمر أشبه بالتركيز على الصورة الكاملة وإغفال التفاصيل الصغيرة. نظرًا لأن علماء الأعصاب توجهوا من دراسة البنية على نطاق الخلايا العصبية المنفردة إلى نطاق الاتصالات والشبكات والدوائر العصبية الأكثر تعقيدًا، فقد يكونون أكثر عُرضة لخطر الغرق في البيانات والتشتُّت بسبب التفاصيل الخاطئة.

ومع ذلك، عُثر على طريقة مطلوبة بشدة في حقل فرعي محدد من حقول الرياضيات، وهي نظرية المخططات البيانية. تُمكِّننا لغة نظرية المخططات البيانية من الحديث عن الشبكات العصبية بطريقة مبسطة ومختصرة. وفي الوقت نفسه، تكتشف أدواتها خواص البنى العصبية التي يستحيل اكتشافها تقريبًا، دون الاستعانة بهذه الأدوات. ويعتقد بعض العلماء الآن أن سمات البنية هذه يمكنها أن تُلهمنا أفكارًا جديدة حول وظيفة الجهاز العصبي. ونظرًا لافتتان علماء الأحياء بالقدرات الواعدة لنظرية المخططات البيانية، أصبحوا يطبقونها على كل شيء بدءًا من تطور الدماغ حتى الأمراض. وعلى الرغم من أن هذا المنهج الجديد لدراسة الدماغ لم تتَّضح معالمه أو يصبح مؤكدًا بعد، فإن تناوله الجديد للقضايا القديمة أثار حماس الكثيرين.

في مدينة كونيجسبيرج عاصمة بروسيا الشرقية في القرن الثامن عشر، كان هناك نهر يتفرَّع إلى فرعَين أثناء تدفُّقه عبر المدينة، وهو ما أدى إلى تكوين جزيرة صغيرة في المنتصف. كانت هناك سبعة جسور تربط بين هذه الجزيرة وأجزاء من المدينة تقع في الشمال والجنوب والشرق. في مرحلة ما، أثير تساؤل بين مواطني كونيجسبيرج: هل هناك طريقة لعبور كل جسر من هذه الجسور مرة واحدة فقط لا غير أثناء التجوال في المدينة؟ عندما وجد هذا السؤال الذي طُرح بهدف التسلية طريقَه إلى عالِم الرياضيات الشهير ليونارد أويلر، وُلِد الفرع الخاص بنظرية المخططات البيانية.

كتب أويلر، المتعدد الثقافات الذي وُلِد في سويسرا لكنه عاش في روسيا، ورقةً بحثية بعنوان: «حل مسألة تتعلق بهندسة الموضع» عام ١٧٣٦. في الورقة البحثية، أجاب عن السؤال بشكلٍ حاسم: لا يستطيع مواطن كونيجسبيرج التجوُّل في بلدته وعبور كل جسر مرة واحدة فقط. لإثبات هذا، تعيَّن عليه تقديم مخطط مبسط لخريطة المدينة يحتوي على الإطار الخارجي للمدينة بالكامل، والعمل عليه بشكلٍ منطقي. وقد أوضح، دون أن يستخدم الكلمة، كيفية تحويل البيانات إلى مخططٍ وكيفية إجراء عمليات حسابية عليه.

في سياق نظرية المخططات البيانية، لا يشير مصطلح «مخططات بيانية» إلى المخططات البيانية المعروفة كما يشير في اللغة العادية. بل يشير إلى كائن رياضي يتكون من عُقد وحوافَّ (في اللغة الحديثة). العُقَد هي الوحدات الأساسية للمخطط؛ بينما تمثِّل الحواف الاتصال بينها. في مثال كونيجسبيرج، تُمثِّل الجسور الحواف التي تربط بين الكتل الأرضية الأربع المختلفة، أي العُقد. درجة العقدة عبارة عن عدد الحواف التي تحتوي عليها العقدة، أي إن درجة كتلة اليابسة عبارةٌ عن عدد الجسور التي تصل إليها.

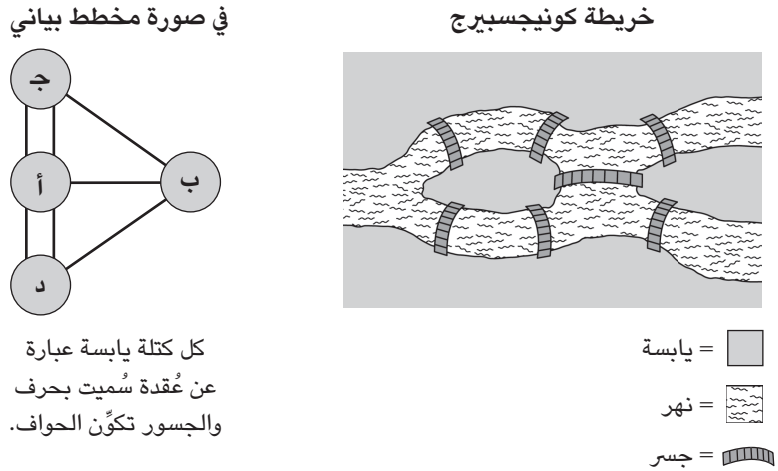
تناول أويلر مسألة عبور الجسور، من خلال ملاحظة أنه يمكن كتابة المسار المار عبر المدينة على أنه قائمة من العُقد. يمكن الإشارة إلى كل كتلة يابسة بحرفٍ، لنقل القائمة «أ ب ج د»، لتمثيل مسار يمتد من الجزيرة الواقعة في المنتصف إلى كتلة اليابسة الموجودة بالأسفل (من خلال أي جسر يصل بينهما)، ثم مسار يمتد من هذه الكتلة إلى كتلة اليابسة في الطرف الأيمن، ثم إلى كتلة اليابسة الموجودة في الأعلى. عند الانتقال من عقدةٍ لأخرى على المخطط، فستستخدم حافة واحدة للانتقال ما بين عقدتَين. ومن ثم، فإن عدد الجسور التي عبرتَها يساوي عدد الأحرف في القائمة ناقص واحد. على سبيل المثال، إذا عبرت جسرَين فسيكون لديك في القائمة ثلاث كُتَل يابسة في قائمتك.

لاحظَ أويلر بعد ذلك شيئًا مهمًّا حول عدد الجسور التي تحتوي عليها كل كتلةِ أرض. يرتبط هذا العدد بعدد المرات التي تظهر فيها كتلة اليابسة في قائمة المسارات. على سبيل المثال، كتلة اليابسة «ب» بها ثلاثة جسور، وهو ما يعني أن الحرف «ب» لا بد أن يظهر مرتَين في أي مسارٍ يعبُر كل جسرٍ مرة واحدة، أي إنه لا توجد طريقةٌ لعبور الجسور الثلاثة دون زيارة «ب» مرتَين. الأمر نفسه ينطبق على كتل اليابسة «ج» و«د»؛ لأنهما يحتويان على جسرَين أيضًا. أما كتلة اليابسة «أ»، باحتوائها على خمسة جسور، فسيَتَعيَّن عليها الظهور ثلاث مراتٍ في قائمة المسارات.

بالجمع بين ما سبق، فإن أي مسارٍ يحقق هذه الشروط سيتكون من تسعة أحرف (٢ + ٢ + ٢ + ٣). لكن القائمة المكونة من تسعة أحرف تُمثِّل مسارًا يعبر ثمانية جسور. ومن ثم، فإنه يستحيل تكوين مسار يعبُر كلًّا من الجسور السبعة مرة واحدة فقط.

باستخدام العلاقة بين درجة العقدة وعدد المرات التي يلزم فيها ظهور العقدة في المسار، استنتج أويلر مجموعة من القواعد العامة حول تحديد المسارات الممكنة. أصبح بإمكانه الآن تحديد ما إذا كان هناك مسارٌ يقطع كل جسرٍ مرة واحدة أم لا، لأي مجموعةٍ من الجسور تصل بين أي قِطع من الأراضي.

علاوة على ذلك، لا تقتصر هذه الطريقة على الحديث عن كتل اليابسة والجسور التي تصل بينها فحسب. بل يمكننا استخدام هذه الطريقة نفسها لإيجاد مسارات يتعين على جرَّافة الثلوج اتباعها للمرور على كل شارع في المدينة لتنظيفه مرة واحدة فقط، أو معرفة إذا كان من الممكن التنقُّل عبر صفحات ويكيبيديا، بالنقر على كل ارتباطٍ تشعُّبي يربط بين موقعَين مرة واحدة. مثل هذه المرونة تُعَد عاملًا من العوامل التي تكسب نظرية المخططات البيانية فاعليتها. فبتجريد أي موقف من تفاصيله المحددة، تصل النظرية إلى




شكل ٩-١

البنية المشتركة بين هذه المواقف جميعًا. هذه الطريقة المجردة غير التقليدية للنظر إلى مسألة من شأنها أن تقود المسألة نحو حلول إبداعية، تمامًا كما أدى تمثيل التجوال عبر المدينة بقائمة من الأحرف لمساعدة أويلر.

هذه الميزة جعلت نظرية المخططات البيانية تُستخدم في العديد من المجالات. في القرن التاسع عشر، كافح علماء الكيمياء للوصول إلى كيفية تمثيل بنية الذرات. وبحلول ستينيات القرن التاسع عشر، استُحدث نظام لا يزال يُستخدم حتى يومنا هذا: رُسمت الذرات في صورة أحرف والروابط بينها على صورة خطوط. في عام ١٨٧٧، رأى عالم الرياضيات جيمس جوزيف سيلفستر في هذا التمثيل البياني للجزيئات؛ أمرًا مماثلًا للعمل الذي يُجريه أحفاد أويلر في الرياضيات. نشر ورقةً بحثيةً عرض فيها بالتفصيل أوجه الشبه بينهما، واستخدم، لأول مرة، مصطلح «مُخطَّط بياني» للإشارة إلى هذا النمط. ومنذ ذلك الحين، ساعدت نظرية المخططات البيانية في حل العديد من المسائل في الكيمياء. أحد أهم التطبيقات الشائعة للنظرية هي المتشاكلات — مجموعات من الجُزيئات التي يتكون كلٌّ منها من نفس نوع الجزيئات وعددها، إلا أنها تختلف في كيفية ترتيب هذه الذرَّات. ونظرًا لأن نظرية المخططات البيانية تقدم لغةً شكلية لوصف بنية الذرات في الجزيء، فإنها تكون مناسبة تمامًا لإحصاء جميع الطرق التي يمكن بها ترتيب مجموعة محددة

من الذرات لتكوين جُزَيء. ويمكن للخوارزميات التي تفعل ذلك أن تساعد في تصميم الأدوية والمركبات المطلوبة.

كما هي الحال في أي مُركَّب كيميائي، يمكن تمثيل الدماغ تمثيلًا جيدًا في صورة مخطط بياني. في أبسط صورة للتمثيل، تكون الخلايا العصبية هي العُقد، وتكون الوصلات التي تربط بينها هي الحواف. بدلًا من ذلك، يمكن أن تُمثَّل مناطق الدماغ بالعُقد، وتُمثَّل الممرات العصبية التي تصل بين هذه المناطق بالحواف. وسواء أكُنَّا ندرس الدماغ على نطاق الخلايا العصبية البالغ الصغر، أو على نطاق مناطق الدماغ الأكبر، فإن تمثيل الدماغ باستخدام نظرية المخططات البيانية يعرِّضها لجميع أدوات التحليل التي استحدثها هذا المجال. وتُعَد هذه النظرية وسيلةً لإضفاء طابعٍ محدد ومنظم على الأسئلة الغامضة وغير المحددة، التي لطالما وَجَّهت علم الأعصاب. شرح الكيفية التي تنتج بها الوظيفة عن البنية يتطلب القدرة على وصف البنية بوضوح. وبدورها، تقدِّم نظرية المخططات البيانية اللغة اللازمة لذلك.

بالطبع، ثمة اختلافات بين كلٍّ من الدماغ والمدينة البُروسية أو المركب الكيميائي. الاتصال في الدماغ ليس ثُنائيَّ الاتجاه دائمًا كما في حالة الجسر أو الرابطة. يمكن لخلية عصبيةٍ الاتصالُ بخلية عصبية أخرى دون أن تتلقَّى إشارات من هذه الخلية العصبية. هذه الطبيعة أحادية الاتجاه للاتصال العصبي تلعب دورًا مُهمًّا في تحديد كيفية تدفق المعلومات داخل الدوائر العصبية. لم تعكس المخططات البيانية الأبسط هذه الطبيعة أُحادية الاتجاه للاتصال العصبي، لكن بحلول نهاية القرن التاسع عشر، أضيف مفهوم المخططات الموجهة إلى مجموعة الأدوات الرياضية. المخطط الموجه الحواف عبارة عن أسهُمٍ موجهة في اتجاه واحد فقط. درجة العقدة في المخطط الموجه تنقسم إلى فئتَين: الدرجة الداخلية (على سبيل المثال عدد الوصلات التي تستقبلها الخلية العصبية)، والدرجة الخارجية (على سبيل المثال عدد الوصلات التي ترسلها الخلية العصبية لخلايا عصبية أخرى). وَجدت دراسة أجريت على الخلايا العصبية في القشرة الدماغية لبعض القِردة؛ نوعَي الدرجة هذَين، ما يعني أن الخلايا العصبية تحصل على إشاراتٍ عصبية بالقدر الذي تتلقى به إشارات عصبية.

في عام ٢٠١٨، صَمَّمت عالمتا الرياضيات كاثرين موريسون وكارينا كورتو نموذجًا لدائرةٍ عصبية، تحتوي على حواف موجَّهة للإجابة عن سؤال لا يختلف كثيرًا عن مسألة جسور كونيجسبيرج. لكن بدلًا من تحديد الطرق التي يمكن من خلالها التجول في أنحاء

المدينة باستخدام مجموعة من الجسور، استكشفوا تسلسل إطلاق الإشارات العصبية الذي يمكن لدائرة عصبية أن تُنتجه. بالاستعانة بأدواتٍ من نظرية المخططات البيانية، توصلت موريسون وكورتو لكيفية النظر إلى بنية مكونة مما يصل إلى خمس خلايا عصبية نموذجية، والتنبؤ بالترتيب الذي ستطلق به هذه الخلايا العصبية الإشارات. تُعد الأنماط المرتبة من إطلاق الإشارات العصبية مهمة للعديد من وظائف الدماغ، بما في ذلك الذاكرة والتنقُّل. قد يكون هذا النموذج المكوَّن من خمس خلايا عصبية مجرد نموذج مبسَّط، إلا أنه يجسِّد المزايا المحتملة لتطبيق نظرية المخططات البيانية على دراسة الدماغ. ومع ذلك، لا بد من تبنِّي منظور أشمل عند دراسة شبكات الدماغ الحقيقية.

على مدار أشهُر قليلة في أواخر ستينيات القرن العشرين، أُعطِي سمسار أوراق مالية يعيش في منطقة شارون بولاية ماساتشوستس ١٦ مجلدًا بُنيًّا من مالك متجر ملابس محلي. وعلى الرغم من غرابة ذلك، لم يندهش السمسار من المجلدات. كانت هذه المجلدات ببساطة جزءًا من تجربة اجتماعية غير تقليدية، أجراها عالم النفس الاجتماعي ستانلي ملجرام. عن طريق هذه التجربة، أراد ملجرام اختبار مدى كِبَر أو صِغَر العالم حقًّا.

تُردَّد عبارة «العالم صغير» عادةً عندما يلتقي غريبان، ويكتشفان بالصدفة أن لهما صديقًا أو قريبًا مشتركًا. أراد ملجرام معرفة عدد المرات التي قد يحدث فيها ذلك: ما احتمالات وجود صديقٍ مشترك بين شخصَين وقع عليهما الاختيار بشكلٍ عشوائي. أو أن يكون أحد الشخصَين صديقًا لصديق الآخر. بعبارة أخرى، إذا تمكنَّا من تصوير شبكة كاملة من العلاقات البشرية — باستخدام مخطط بياني؛ حيث تُمثِّل كل عقدة شخصًا، وكل حافة تمثِّل علاقة — فكم سيكون متوسط المسافة بين الناس؟ ما عدد الحواف التي سنحتاج إلى اجتيازها لإيجاد مسار يربط بين أي عُقدتَين؟

في محاولة جريئة للإجابة عن هذا السؤال، وقع اختيار ملجرام على شخص مستهدَف (في هذه الحالة سمسار ماساتشوستس) والعديد من الأشخاص الذين سيُمثلون نقطة الانطلاق في التجربة؛ أشخاص ليس لهم صلة بالشخص المستهدف يعيشون في جانب آخرَ من البلد (في هذه الحالة، تعيش الغالبية العظمى منهم في مدينة أوماها التي تقع في ولاية نبراسكا). أُعطي الأشخاص الذين سيمثلون نقطة الانطلاق في البحث طردًا يحتوي على مجلد ومعلومات عن الشخص المستهدف. كانت التعليمات بسيطة: إذا كنت تعرف الشخص المستهدف فقدِّم إليه المجلد، وبخلاف ذلك أرسِلْه إلى صديقٍ لك تعتقد أنه يتمتَّع

بفرصة أفضل للتعرف عليه. طُلب من الشخص التالي اتباع التعليمات نفسها، على أمل أن ينتهي المجلد عند الشخص المستهدف. طُلب من المرسِلين كتابة أسمائهم في سجلٍّ أُرسِل مع الطرد، حتى يتمكن ملجرام من تتبع المسار الذي اتخذه المجلد.

بالنظر إلى إجمالي ٤٤ مجلدًا أُعيدَت إلى السمسار، وجد ملجرام أن أقصر مسارٍ تكوَّن من وسيطَين فقط وأطول مسار تضمَّن ١٠. كان متوسط عدد الأشخاص بين نقطة الانطلاق والمستهدف يساوي ٥. انتقالُ المجلد ما بين خمسة أشخاص، ليصل من نقطة الانطلاق إلى الشخص المستهدف، تضمَّن ستَّ عمليات تسليم؛ ومن ثم رُسِّخ مفهوم «ست درجاتٍ من التباعد» — الذي طرحه بالفعل بعض العلماءِ وعلماءِ الاجتماع دَقيقِي الملاحظة.[٢]

انتشر هذا المفهوم تدريجيًّا من خلال التصوُّر الجَمْعي. في يوم من الأيام، في أواخر تسعينيات القرن العشرين، سُئل طالب الدراسات العليا دنكان واتس من قِبَل والده، عما إذا كان يُدرك أن ثمة ستَّ مصافحات فقط تفصله عن مصافحات الرئيس. طرح واتس — الذي كان يعمل لدى عالم الرياضيات ستيفين ستروجتس آنذاك — الفكرة، بينما كانا يتناقشان في كيفية تواصل مجموعة من الصراصير. بعد هذه المحادثة غير المرتَّبة، تحوَّل مفهوم «العالم الصغير» من مجرد تعبير غريب إلى خاصية محددة رياضيًّا من خواص الشبكة.

في عام ١٩٩٨، نَشر واتس وستروجتس ورقة بحثية أوضحا فيها ما يحتاجه المخطَّط؛ لكي يصبح تجسيدًا لعالم صغير. كان مفهوم طول المسار القصير في المتوسط — أي فكرة أن أي عُقدتَين لا تفصلهما سوى خطوات قليلة — من العناصر الأساسية للشبكة. أحد طرق الحصول على مسارات قصيرة هي جعل المخطط يحتوي على الكثير من الوصلات، بمعنى أن تتصل كل عُقدة مباشرةً بالكثير من العقد. إلا أن هذه الحيلة تتعارض بوضوح مع ما نعرفه عن الشبكات الاجتماعية: لدى المواطن الأمريكي العادي، في بلد يبلغ تعداده ٢٠٠ مليون حينذاك، ٥٠٠ من المعارف فقط وفقًا لملجرام.

[٢] لاقت نظرية ملجرام نقدًا من الباحثين في وقت لاحق بسبب افتقارها إلى الدقة. فعلى سبيل المثال، لم يضع ملجرام في الحسبان المجلدات التي لم تصل إلى الشخص المستهدف من الأساس. نتيجة لذلك، ظل كون العدد ستة عددًا سحريًا عندما يتعلق الأمر بدرجات التباعد بين الناس؛ سؤالًا ليست له إجابة حاسمة. لحسن الحظ، توفِّر البيانات المستخلصة من مواقع التواصل الاجتماعي طرقًا جديدة للإجابة عنه.

ومن ثم، حصر واتس وستروجتس عمليات محاكاة الشبكات التي قاما بها في الشبكات التي تحتوي على وصلات متفرقة، لكنهما غيَّرا أشكال هذه الوصلات. وقد لاحظا أنه من الممكن الحصول على مسارات قصيرة داخل شبكة تحتوي على عناقيدَ كثيفة. يشير العنقود إلى مجموعة فرعية من العُقد المترابطة بشدة، كأفراد العائلة. في هذه الشبكات، معظم العُقد تُشكِّل حوافَّ مع العُقد الأخرى في عنقودها، لكن في بعض الأحيان قد تتصل هذه العُقد بعُقدٍ أخرى في عنقود بعيد. بالطريقة نفسها التي يسهِّل بها القطارُ الذي يصل بين مدينتَين التفاعُلاتِ بين مواطنيهما، فإن هذه الصلات بين العناقيد المختلفة في الشبكة تجعل قيمة متوسط طول المسار منخفضة.

وبمجرد أنْ حدَّد واتس وستروجتس هذه الخواص في نماذجهما، همَّا بالبحث عنها في بيانات فعلية، وتمكنا من إيجادها. فمثلًا وجدا أن نظام توزيع الكهرباء في الولايات المتحدة — الذي تم تحويله إلى مخطط بياني، من خلال اعتبار أي مُولِّد أو محطة فرعية عقدةً وأي خطوط نقل حوافَّ — يتضمَّن المسارات القصيرة والترابط الشديد المميزين لشبكة العالم الصغير. والأمر نفسه ينطبق على مخطط بياني لمجموعة من الممثِّلين، مع وجود حواف تصل بين أي اثنَين شاركا في بطولة فيلم معًا. المكان الأخير الذي بحثا فيه عن شبكة عالم صغير، وعثرا عليها، هو الدماغ.

على وجه التحديد، التركيب الذي حلَّله واتس وستروجتس كان للجهاز العصبي لدودةٍ صغيرة: الربداء الرشيقة «سي إيليجانس». اعتبر واتس وستروجتس أي وصلة عصبية حافةً، متجاهلَين اتجاهية الوصلات العصبية، كما اعتبرا كل خليةٍ عصبية من الخلايا البالغ عددُها ٢٨٢ في مخطط الأسلاك لهذه الدودة؛ العُقدةَ. وجدا أنه يمكن توصيل أي خليتَين عصبيتَين عن طريق مسار؛ بحيث يكون عدد الخلايا العصبية التي تفصل بينهما في هذا المسار في المتوسط هو ٢٫٦٥ فقط، كما وجدا أن الشبكة تحتوي على عناقيد أكثر بكثير مما هو متوقع، إذا كانت هذه الخلايا العصبية البالغ عددها ٢٨٢ وُصِّلت معًا بشكلٍ عشوائي.

لماذا يجب أن يتخذ الجهاز العصبي للدودة نفس شكل الشبكة الاجتماعية للبشر؟ قد يتمثَّل السبب الرئيسي في تكاليف الطاقة. الخلايا العصبية جائعة. فهي تتطلب الكثير من الطاقة كي تعمل بكفاءة، كما أن إضافة محاور عصبية أكثر أو أطول وزوائد شُجيرية لا تؤدي بدورها إلا لزيادةِ الفاتورة. ومن ثم، الدماغ الذي تتصل خلاياه ببعضها بالكامل دماغٌ باهظ التكلفة. إلا أنه إذا أصبحت الوصلات متفرقة للغاية، فإن وظيفة الدماغ

الرئيسية — أي معالجة المعلومات وتوجيهها في مسارات محددة — تنهار. ومن ثم، لا بد من إيجاد توازن بين تكلفة الوصلات العصبية والفائدة المترتبة على مشاركة المعلومات. وهو ما يفعله العالَم الصغير. في العالم الصغير، الوصلات التي تتكرر بشكلٍ أكبر هي الوصلات المنخفضة التكلفة نسبيًّا، الموجودة بين الخلايا المتجاورة في عنقودٍ واحد. أما الوصلات المكلِّفة بين الخلايا العصبية المتباعدة فنادرة، إلا أنه يوجد ما يكفي منها للحفاظ على تدفق المعلومات. يتضح لنا أن التطور قد وجد في مفهوم العالم الصغير الحل الذكي.

يُعد استنتاج واتس وستروجتس بشأن الدودة المستديرة أوَّل وصف للجهاز العصبي بلُغةِ نظرية المخططات البيانية. فقد أدى وصفه بدلالة هذه المصطلحات إلى إلقاء الضوء على بعض القيود، التي يشترك فيها الدماغ مع الشبكات الأخرى الموجودة بشكلٍ طبيعي. يمكن أن يكون الاحتفاظ بالروابط أمرًا مكلفًا، سواء أكانوا معارف أو محاور عصبية، وما دامت أوجه التشابه هذه موجودةً في الجهاز العصبي داخل الدودة المستديرة والشبكات الاجتماعية، فمِن المنطقي أن يتوقَّع المرء أن تُمِلي الشبكات الاجتماعية بِنية الأجهزة العصبية أيضًا.

لكن الحديث عن بنية الجهاز العصبي يتطلَّب أن يكون لدينا بعض المعلومات حول بنية الجهاز العصبي. يتضح أن جمع هذه المعلومات يُعد مصدر إزعاج في أحسن الأحوال، وتحديًا فنيًّا غير مسبوقٍ في أسوأ الأحوال.

«الخريطة العصبية للدماغ (الكونيكتوم)» هو مخطط بياني يصف الوصلات في الدماغ. لم يدرُس واتس وستروجتس إلا نسخةً غير مكتملةٍ من الخريطة العصبية للدماغ، ومع هذا فإن الخريطة الكاملة للدودة المستديرة تُعرَّف من خلال ٣٠٢ خلية عصبية و٧٢٨٦ وصلة عصبية بين هذه الخلايا. كانت الدودة المستديرة أول حيوان يجري توثيق الكونيكتوم الخاص به، كما يُعَد الحيوان الوحيد في الوقت الحالي.

يرجع هذا الافتقار إلى البيانات المتعلقة بالكونيكتوم بشكلٍ كبير، إلى العملية الشاقة التي تُجمع بها. يتطلب رسم مخطط كامل للوصلات العصبية في الدماغ على مستوى الخلايا العصبية؛ تثبيت الدماغ في مادة حافظة، وتقطيعه إلى شرائح أرقَّ من خصلة شعر، وتصويرها بالمجهر وتغذية الكمبيوتر بهذه الصور، الذي يعيد تكديس هذه الصور فوق بعضها لتكوينِ نموذجٍ ثُلاثي الأبعاد. بعد ذلك، يقضي العلماء عشرات الآلاف من الساعات يُحدِّقون في هذه الصور، مُتَتبعين الخلايا العصبية الفردية في الصورة تلو

الأخرى، وملاحظين نقاط اتصال هذه الخلايا معًا.[٣] عملية الكشف عن البنية الدقيقة للوصلات العصبية بهذه الطريقة؛ لا تقلُّ صعوبة عن علم الحفريات. فثمن هذا التشريح وتجميع الشرائح وتتبُّع الخلايا العصبية يجعل من غير المحتمل الحصول على الكونيكتوم إلا لأصغر الأنواع. يقوم فريق من العلماء في الوقت الحالي بتجميع الخريطة العصبية لدماغ ذبابة الفاكهة، الذي يبلغ حجمه واحدًا على مليون من حجم دماغ الإنسان، وإنتاج ملايين من الجيجابايت من البيانات في العملية. وعلى الرغم من أن أي دودتَين مستديرتَين متماثلتان بشكلٍ أو بآخر، فإن الأنواع الأكثر تعقيدًا يكون لها عادة فروق فردية أكبر، الأمر الذي يجعل كونيكتوم ذبابةٍ واحدة أو أحد الثدييات مجرد اختيار عشوائي من بين مجموعةٍ من الاختيارات المحتملة.

لحسن الحظ، هناك العديد من الطُّرق غير المباشرة التي توفِّر نسخة أوليَّة، أو غير مكتملةٍ من الخرائط العصبية للعديد من الأفراد والأنواع. يتضمَّن أحد المناهج التسجيل من الخلية العصبية، في أثناء تحفيز الخلايا العصبية الأخرى التي تحيط بها. إذا أدى تحفيز إحدى هذه الخلايا المجاورة بشكل موثوق، إلى إطلاق جهدِ الفِعل في الخلية العصبية التي يجري التسجيل منها، فمن المحتمل وجود اتصال بينهما. أحد الخيارات الأخرى هي الكواشف؛ وهي مواد كيميائية تؤدي دور الأصباغ؛ إذ تعمل على تلوين الخلية العصبية. لمعرفة من أين تأتي المدخلات أو إلى أين تذهب المخرجات، يحتاج المرء فقط إلى النظر إلى المواضع التي تظهر فيها الصبغة. لا يمكن لأيٍّ من هذه الطُّرق تكوين خريطةٍ عصبيةٍ كاملة للدماغ، إلا أن هذه الطُّرق تعمل على إعطاء لمحة سريعة عن الاتصال في منطقة محددة.

لم يُبتكَر مصطلح «الخريطة العصبية للدماغ» (الكونيكتوم) حتى عام ٢٠٠٥، على الرغم من أن الاتصال العصبي قد خضع للدراسة قبل ذلك بكثير. في ورقة بحثية حالمة، دعا عالم النفس أولاف سبورنز وزملاؤه العلماء زملاءهم إلى المساعدة في بناء كونيكتوم للدماغ البشري، ووعدوا بأن هذا «سيرفع وَعْينا بشكلٍ ملحوظٍ بشأن كيفية انبثاق حالات الدماغ الوظيفية من الركيزة المادية الأساسية.» يُعد الحصول على البيانات من البشر

[٣] ثمة محاولات ناجحة في الوقت الحالي لأَتْمَتة هذه العملية الشاقَّة. وفي الوقت نفسه، حاول العلماء الذين فقدوا الأمل في الحلول التقليدية تحويلَ هذا العمل إلى لُعبة، وحث الأشخاصِ من جميع أنحاء العالم على لعِبها. يمكن إيجادها على موقع eyewire.org.

تحديًا مُذهلًا؛ لأن معظم الطرق المستخدمة للتوغُّل داخل جسم الحيوانات غير مسموح بها لأسباب واضحة. ومع ذلك، أوجد جانب غير متوقع من جوانب بيولوجيا الدماغ بديلًا ذكيًّا.

عندما يبني الدماغ وصلات عصبية، يُعَد الحفاظُ على البيانات التي تُنقَل أمرًا رئيسيًّا. وكالماء الذي يتسرب من خُرطوم مَسامِّي، تتعرض الإشارة الكهربية التي يحملها المحور العصبي إلى خطر التلاشي. لا يمثل هذا الأمر مشكلة كبيرة في حالة المحاور العصبية القصيرة التي تصل الخلايا المتجاورة، لكن المحاور العصبية التي تحمل الإشارات من إحدى مناطق الدماغ إلى أخرى؛ تحتاج إلى الحماية. ومن ثم، تُغلف المحاور العصبية التي تمتد لمسافات طويلة بطبقات عديدة من غطاء شمعي. تحتوي هذه المادة الشمعية، التي تُسمَّى المايلين، على الكثير من جُزيئات الماء. يمكن للتصوير بالرنين المغناطيسي (نفس التقنية المستخدمة لالتقاط صور الأورام وحالات تمدد الأوعية الدموية وإصابات الرأس) تحديدُ حركة جزيئات الماء هذه، وهي المعلومات التي تُستخدَم لإعادة بناء مسارات المحاور في الدماغ. من خلال هذا، من الممكن معرفة أماكن الدماغ المتصلة ببعضها. منذ نشر الدعوة التي وجهها سبورنز، أُطلِق مشروع «الكونيكتوم البشري» لعمل خريطة للدماغ باستخدام هذه التقنية.

تحديد المحاور العصبية التي تمتد لمسافات طويلة بهذه الطريقة، لا ينتج عنه نفس نوع الكونيكتوم الذي ينتج عن طُرق تتبع الوصلات العصبية، في الخلايا العصبية المنفردة. فهي تتطلَّب أن يقوم العلماء بتقسيم الدماغ إلى مناطق عشوائية وغير محددة؛ ومن ثم فإن هذا يُعد وصفًا غير دقيق تمامًا للاتصال. بالإضافة إلى ذلك، قياس جُزيئات الماء ليس طريقة مثالية لتتبع المحاور بين هذه المناطق، وهو ما يؤدي إلى الأخطاء والالتباس. حتى إن ديفيد، أحد العلماء الرئيسيين في مشروع الكونيكتوم، حذَّر مجتمع العلوم العصبية عام ٢٠١٦ من أن هناك أوجهَ قصور تقنية رئيسية لهذا المنهج يجب ألَّا نستهين بها. على الجانب الآخر، هذه هي الطريقة الوحيدة التي يمكننا بها النظر عن كثَب إلى داخل دماغ الإنسان؛ ومن ثم فإن الرغبة في الاستمرار في استخدامها يبدو منطقيًّا. وهو ما عَبَّر عنه فان إيسن على النحو الآتي: «كن متفائلًا، لكن انتبه لتقييم الجوانب الإيجابية والسلبية».

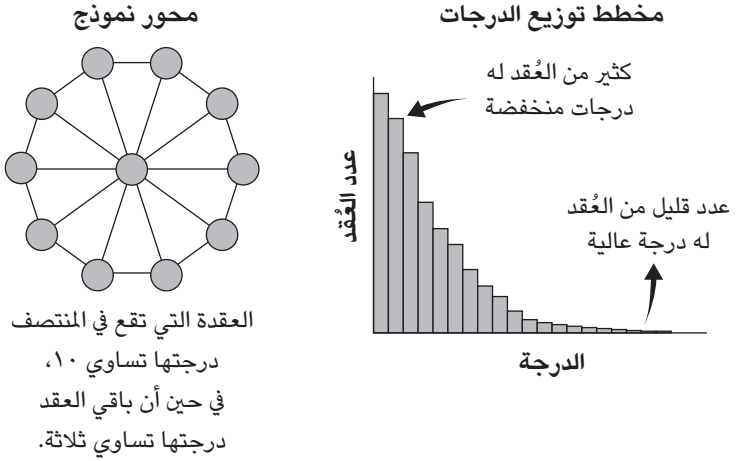
على الرغم من أوجه القصور هذه، تأثر علماء الأعصاب في بداية القرن الحادي والعشرين، بالمجهود البحثي الذي قام به واتس وستروجتس، للنظر إلى مجالهما بعدسة نظرية البيان، ووضعوا نصب أعينهم أي بيانات متاحة حول الكونيكتوم. ما رأوه عندما

حللوه كان عوالمَ صغيرة في جميع الاتجاهات. على سبيل المثال، التكوين الشبكي هو جزء قديم من الدماغ مسئول عن العديد من جوانب التحكم الجسدي. عندما جُمِّعت أجزاء خريطة للوصلات بين الخلايا المنفردة في القطط، وحُلِّلت عام ٢٠٠٦، كانت أول دائرة عصبية لحيوان فقاري تُعالج باستخدام نظرية البيان. ووُجِد أنها عالم صغير. في الدراسات المتعلقة بالوصلات بين مناطق الدماغ في كلٍّ من الفئران والقرود، كان يُعثَر دائمًا على مسارات قصيرة، والكثيرِ من العناقيد أيضًا. وأخيرًا طُبقت دراسة الوصلات العصبية في الدماغ، باستخدام شبكات العالم الصغير على البشر عام ٢٠٠٧، عندما استخدم الباحثون في سويسرا فحوصات التصوير بالرَّنين المغناطيسي، لتقسيم الدماغ إلى أَلْف منطقةٍ مختلفة، كل منطقةٍ في ارتفاع حبة البندق وعرضها، وقاسُوا الوصلات بينها.

يندُر الوصول إلى استنتاجات عامة في علم الأعصاب؛ فالمبادئ التي تحكم عمل مجموعة من الخلايا العصبية لا يُفترَض بالضرورة أن تظهر في مجموعة أخرى. ومع ذلك، نظرًا لأنه يمكن ملاحظة «شبكات العالم الصغير» عند دراسة مختلف الأنواع ومستويات التنظيم، فإنها تُعد من الخواص البارزة. وكتكرار نغمة من أغنية آسرة، تتطلب شبكات العالم الصغير مزيدًا من الاستكشاف. ملاحظة وجود عوالم صغيرة في العديد من الأماكن أثارَت الكثير من التساؤلات، حول منشأ هذه العوالم والأدوار التي تلعبها. لا تزال الإجابات عن هذه التساؤلات محلَّ استكشاف، ومع ذلك، لولا وجود لغة نظرية المخططات البيانية، لما أثيرت هذه التساؤلات من الأساس.

في ١٠ فبراير عام ٢٠١٠، أُلغيَ ٢٣ بالمائة تقريبًا من رحلات الطيران المتجهة من الولايات المتحدة. جاء هذا الاضطراب غير المسبوق؛ نتيجة لعاصفةٍ ثلجيةٍ في منطقة شمال شرقٍ أغلقت مجموعة من المطارات، بما في ذلك مطار رونالد ريجان الوطني في العاصمة واشنطن، ومطار جون إف كينيدي الدولي في نيويورك. لم يكن من الطبيعي أن ينشأ هذا التأثير الملحوظ على حركة السَّفر عن إغلاق عدد قليل من المطارات، لكن هذه لم تكن مطارات عادية، بل كانت محاور رئيسية في شبكة الطيران.

المحاور عبارة عن عُقد في مخطط بياني لها درجة عالية، أي إنها متصلة بدرجة كبيرة. تقع هذه المحاور عند ذيول مخطَّط توزيع الدرجات، وهو مخطط يعرِض لكل قيمة درجة عدد العقد في الشبكة التي لها هذه الدرجة. في المخططات البيانية، كالمخطط البياني لشبكة الطيران، أو هيكل الخوادم التي تتكون منها شبكة الإنترنت، يبدأ المخطط




شكل ٩-٢

البياني عاليًا، وهو ما يعني وجود عُقد عديدة لها عدد صغير من الوصلات، ويتلاشى مع زيادة عدد الوصلات، ما يؤدي إلى ذيل طويل يمثِّل عددًا صغيرًا من العقد التي لها درجة عالية جدًّا، مثل مطار جون إف كينيدي الدولي. تكون المحاور على درجة عالية من الاتصال، وهو ما يجعل لها دورًا مؤثرًا في الشبكة، وفي الوقت نفسه، تجعلها هذه الدرجة العالية من الاتصال مصدر تهديد للشبكة، إذا ما توقَّفت أو فشلت. وكما هي الحال عند إزالة حجَر العقد من قنطرة، فإن أي اضطراب متعمَّد يحدث في أحد محاور الشبكة يؤدي إلى انهيار الشبكة.

للدماغ محاور. لدى البشر، عُثر على هذه المحاور متناثرة في فصوص الدماغ كافة. على سبيل المثال، التلفيف الحزامي الذي ينحني حول مركز الدماغ يُمثِّل محورًا، وهو ما ينطبق أيضًا على الطلل الذي يقع فوق الجزء الخلفي من التلفيف الحزامي.[٤] في الدراسات

[٤] انتبه جيدًا: السمات المحددة التي لا بد من أن تتميز بها منطقة الدماغ كي تُعتبر محورًا؛ تُعد محلًّا للنقاش. حتى إن تطبيق التعريف نفسه على مجموعات بيانات مختلفة يمكن أن يُفضي لنتائج مختلفة. ونظرًا لأن هذا النمط من التحليل لا يزال جديدًا، ستستغرق هذه العيوب الطفيفة وقتًا كي تُعالج.

المتعلقة بالنوم والتخدير وحالات الغيبوبة، يرتبط النشاط في هذه المناطق بالوعي. يتضح أن حجم محور آخر، وهو القشرة الجبهية العليا، يرتبط بالاندفاع والاهتمام. يتسبب اقتطاع المحور الرابع، الذي يقع في القشرة الجدارية على جانب الدماغ، في جَعْل المرضى يفقدون الإحساس بالموضع والاتجاه. في المجمل، يتضح أن مجموعة المحاور تتباين في كلٍّ من الموقع والوظيفة. الخيط الذي يربط بينها، إن وُجد أي خيط، هو مدى تعقيد كلٍّ من هذه المحاور. مناطق الدماغ، مثل القشرة البصرية والقشرة السمعية والبصلة الشَّمية، أي المناطق التي لها أدوار واضحة ومحددة من أسمائها، ليست على قائمة المحاور. المناطق التي تمثِّل محاور تكون معقدة؛ إذ تتمكن من جمع المعلومات من العديد من المصادر، وتنشرها على نطاقٍ واسع. يتضح أن دورها كأداة تجميعٍ ينتج بوضوحٍ عن موضعها في بنية الشبكة.

بالإضافة إلى تجميعها للمعلومات بطرق مختلفة، قد تكون المحاور مسئولة عن ضبط ساعة الدماغ. في منطقة سي إيه ٣ (مستودع الذكريات في الحصين كما ذُكِر في الفصل الرابع)، تجتاح موجات من النشاط الكهربي، خلال مجموعةٍ من الخلايا العصبية في مراحل النمو الأولى بعد الولادة. تضمن هذه الموجات أن ينشأ نشاط هذه الخلايا العصبية وشدة الاتصال بينها بطريقة صحيحة. تُعد الخلايا العصبية في منطقة المحاور الخلايا المنسِّقةَ المحتملة لهذا النشاط المتزامن؛ إذ تبدأ عادة في إطلاق الإشارات العصبية قبل هذه الموجات؛ لذا فإن تحفيزها يمكنه تحريك مَوجةٍ. افترضت دراسات أخرى دورًا لمناطق المحاور في مزامنة النشاط في جميع أنحاء الدماغ. ونظرًا لأن المحاور لها درجة عالية، فإن الرسالة المرسَلة من أحد المحاور يُدَوِّي صداها لمسافات بعيدة، وتؤثر على نطاق واسع في الشبكة. علاوة على ذلك، تكون المحاور في الدماغ عادة متصلة معًا بقوة، وهي إحدى خواص شبكة يُشار إليها باسم «شبكة غنية بالصِّلات القوية بين المحاور». من شأن هذه الصلات بين المحاور ضمانُ أن تكون جميع المحاور نفسها متوافقة معًا، حين تُطلق إشاراتها المتزامنة.

تشير الطريقة التي تتطور بها الخلايا العصبية، التي تُمثِّل المحاور في الشبكات العصبية، إلى مكانها المميز في الدماغ. فالخلايا العصبية التي تُكوِّن الشبكة الغنية بالوصلات القوية بين المحاور في الدودة المستديرة، على سبيل المثال، تُعد ضمن أوائل الخلايا التي ظهرت مع نمو الجهاز العصبي. خلال ثماني ساعات فقط بعد تخصيب البويضة، تولد هذه الخلايا العصبية المحورية، في حين أن بقية الجهاز العصبي لن ينتهي

قبل أكثر من يوم. وبالمثل، في حالة البشر، يكون معظم الهيكل الرئيسي لمحاور الشبكات العصبية موجودًا لدى الأطفال.

إذا كانت المحاور تلعب دورًا مركزيًّا بالنسبة لوظيفة الدماغ، فما الدور الذي يمكن أن تلعبه في الاختلال الوظيفي؟ بحثَت دانييل باسيت في هذا السؤال باعتباره جزءًا من مهنتها التي لها تأثيراتٌ واسعة النطاق، والتي تقع عند نقطة تقاطع الشبكات وعلم الأعصاب.

في أوائل القرن الحادي والعشرين، عندما انتشرت الطرق المتعلقة بنظرية المخططات البيانية في مجال علم الأعصاب، كانت باسيت حينها طالبة جامعية تدرس الفيزياء. في ذلك الوقت، ربما كانت ستندهش إذا علمت أن أحد علماء الأعصاب المعروفين سيطلق عليها فيما بعد «عميدة علوم الشبكات».[٥] وعلى أي حال، فإن السعي لنيل درجة علمية في الفيزياء كان في حدِّ ذاته أمرًا يدعو إلى الدهشة، بالنظر إلى ظروف نشأتها؛ كانت باسيت واحدةً ضمن ١١ طفلًا تلقَّوا تعليمهم في المنزل، في كنف أسرة مُتديِّنة من المتوقع أن تلعب فيها النساء أدوارًا تقليدية أكثر. جاء تحوُّلها إلى علم الأعصاب أثناء تحضيرها للدكتوراه حين عملت مع إدوارد بولمور، عالم الأعصاب بجامعة كامبريدج الذي كان جزءًا من مجموعة علماء الأعصاب الأوائل، الذين حرصوا على تطبيق نظرية المخططات البيانية على الدماغ. أحد أوائل المشروعات التي عملت عليها باسيت هو معرفة كيفية تأثُّر تركيب الدماغ، باضطراب الفصام الشائع والمعوِّق.

الفصام هو مرض يتميز بالأوهام والاضطراب الفكري. بمقارنة أدمغة الأشخاص الذين يعانون من هذا المرض وأشخاص لا يعانون منه، وَجَدت باسيت العديد من الاختلافات في خواص الشبكات لهذه الأدمغة، بما في ذلك اختلافات في المحاور. فالمناطق الموجودة في القشرة الجبهية، على سبيل المثال، تُكوِّن محاور لدى الأصحاء، في حين أنها لا تفعل ذلك في حالة مرضى الفصام. يمكن ربط تَعطُّل القشرة الجبهية وقدرتها على السيطرة والتحكم في أجزاء أخرى من الدماغ؛ بالهلوسة والبارانويا التي تُثار لدى مرضى الفصام. وعلى الرغم من أن دماغ مريض الفصام لا يزال تمثيلًا لمفهوم العالَم الصغير، فإن كلًّا من متوسط طول المسار وشدة الترابط داخل كل عنقود في الشبكة أعلى منهما

[٥] خلع عالم الأعصاب البريطاني كارل فريستون هذا اللقب على باسيت في حوار له مع دورية «ساينس» عام ٢٠١٩. سنعرف المزيد حول فريستون في الفصل الثاني عشر.

لدى الأشخاص الأصحاء، ما يجعل من الأصعب، بالنسبة إلى منطقتَين متفاوتتَين، التواصل والتوافق معًا.

كَونُ هذا العمل أول دراسة تتناول هذا المرض من منظور نظرية المخططات البيانية، ساعد في أخذ إحدى الفِكَر القديمة حول «أعراض متلازمة الانفصال» وإخضاعها للدراسة الكَمية. منذ أواخر القرن التاسع عشر، افترض علماء الأعصاب أن حدوث تعطُّل في الوصلات التشريحية قد يؤدي إلى اضطرابات في التفكير. اعتقد الطبيب الألماني كارل فيرنيك، على وجه الخصوص، أن الوظائف المعرفية العليا لا تقع في أي منطقة دماغية منفردة؛ بل تنشأ من التفاعلات بينها. وفي عام ١٨٨٥ أوضح ما يلي: «أي عمليات نفسية عُليا ... تعتمد على التفاعل المتبادل لهذه العناصر النفسية الأساسية، التي تحدث بواسطة وصلاتها المتنوعة عبر الألياف الرابطة.» وافترض أن إتلاف «الألياف الرابطة» هذه، سيعوق وظائف مهمة مثل اللغة والوعي والتخطيط.

والآن، بعد أن التقت أدوات نظرية المخططات البيانية بدراسة «أعراض الانفصال»، يجري استكشاف مزيدٍ من الأمراض باستخدام المناهج الحديثة. أحد الأمثلة الشائعة هو مرض ألزهايمر. عند مقارنة الاتصال بين مناطق الدماغ المختلفة لدى كبار السن المصابين بمرض ألزهايمر، مع نظيراتها لدى كبار السن غير المصابين، وُجِد أن المصابين بمرض ألزهايمر تكون أطوال المسارات بين مناطق الدماغ لديهم أطول. قد ينتج التشويش والقصور الإدراكي لمرض ألزهايمر جزئيًّا عن انهيار الاتصال الفعال بين مناطق الدماغ المتباعدة. يمكن ملاحظة تغيُّرات مشابهة في بِنَى شبكات الدماغ بدرجةٍ أقل، فيما يتعلق بالشيخوخة الطبيعية.

منذ أن أسست باسيت مختبرها الخاص في جامعة بنسلفانيا عام ٢٠١٣، انتقلت من مجرد ملاحظة بِنية الدماغ في حالتَي الصحة والمرض إلى معرفة كيفية استغلال ذلك. قد يكون من الصعب التنبؤ بنشاط الشبكات. ربما تُخمد شائعة شاركتها مع صديق لك في الحال، أو تنتشر كالنار في الهشيم في شبكتك الاجتماعية، بِناءً على بنية هذه الشبكة وموقع صديقك فيها. وبالمثل، يصعب التنبؤ بتأثيرات تحفيز الخلايا العصبية أو تثبيطها. يجمع مختبر باسيت أدوات من مجال الهندسة بالمعرفة حول بنية شبكات الدماغ؛ للتحكُّم في النشاط العصبي بطريقةٍ أكثر سهولة. على وجه الخصوص، استُخدمت نماذج تعتمد على الخرائط العصبية للدماغ بالكامل، لأفرادٍ من أجل تحديد الموضع الذي يجب تطبيق التحفيز الدماغي عنده؛ للحصول على النتيجة المرغوبة. يتمثَّل الهدف من ذلك في استخدام هذا العلاج الفردي للسيطرة على اضطراباتٍ مثل مرض باركنسون والصرع.

الأمل في أن تصير مقاييس نظرية المخططات البيانية بمثابة مؤشرات للمرض — حتى إنه يُحتمل أن تكون مؤشرات مبكرة للمرض من شأنها أن تقود نحو رعاية وقائية — جعلها تحظى بشعبية معقولة في مجال الأبحاث الطبية. حتى هذه اللحظة، تضمنت اضطرابات الدماغ التي خضعت للدراسة عن كثَب باستخدام التحليل الشبكي؛ ألزهايمرَ والفصامَ وإصابة الدماغ الناتجة عن الصدمات، والتصلب المتعدد والصرع، والتوحد والاكتئاب ثنائي القطب. إلا أن النتائج كانت مختلطة. حسبما أُشير، لتقنية التصوير بالرنين المغناطيسي المستخدمة لجمع البيانات في المقام الأول مشكلاتُها، كما أن بعض الدراسات عثرت على مؤشرات مرضية لم تتوصل إليها دراسات أخرى. بشكل عام، مع وجود الكثير من العلماء المتحمسين للبحث عن الاختلافات بين الأدمغة المريضة والسليمة، يكون الحصول على بعض النتائج الإيجابية الكاذبة والبيانات الخاطئة أمرًا لا مفر منه. ولكن سواء عُززت النتائج أم لا، من الأسلم القول إن هذه القائمة الجديدة من الأدوات قد وصلت إلى الأوساط الإكلينيكية.

تطوُّر الدماغ أشبه بانفجار بُركاني. تنبثق الخلايا العصبية من حاضنةٍ اصطناعية تُسمى منطقة البطين بوتيرةٍ فائقة السرعة، وتتدفق لتملأ جميع جنبات الدماغ المزدهر. وبمجرد أن تنتشر الخلايا العصبية تبدأ في تكوين روابط. تُكوِّن هذه الخلايا العصبية العشوائية تشابكًا تلو الآخر مع بعضها؛ لتربط الخلايا من كل حدبٍ وصوب معًا بشكلٍ محموم. في ذروة تكوين المشابك العصبية، خلال الثُّلث الثالث والأخير من فترة الحمل، تتكون ٤٠ ألف وصلة كل ثانية. إذن التطور عبارة عن زيادة مكثفة في تكوين المشابك العصبية.

لكن بمجرد تَكَوُّن هذه الخلايا والوصلات يختفي العديد منها. للشخص الناضج خلايا عصبية أقل بكثير من الخلايا العصبية التي كانت لديه في الرحم؛ وذلك لأن قُرابة نصف الخلايا العصبية التي تكونت خلال مرحلة النمو تموت. عدد الوصلات التي تُكوِّنها الخلية العصبية تصل إلى ذروتها في نحو السنة الأولى من حياتك، وتقل بمقدار الثُّلث بعد ذلك. ومن ثم، فإن الدماغ يتكون من خلال انتشارٍ يليه انحسار، وتمدُّد يليه انكماش. خلال مرحلة النمو تجري عملية تشذيب الخلايا العصبية والمشابك بلا هوادة، فلا تُبقي إلا على المفيد منها فقط. على سبيل المثال، تتكون المشابك العصبية لنقل الإشارات بين الخلايا العصبية. فإذا لم توجد إشارات تتدفق، فلا بد للخلايا أن ترحل. من عملية

التكوين والتقليم هذه تنبثق الدوائر العصبية. الأمر أشبه بالتشجيع على نمو الشجيرات بشكل زائد عن الحد، لتشذيبها وعمل منحوتات دقيقة منها.

هذه هي الطريقة التي وجدتها البيولوجيا لبناء الدماغ. لكن إذا سألت أحد اختصاصيِّي نظرية المخططات البيانية عن كيفية تكوين شبكة، فستكون إجابتهم مناقضةً لذلك. على سبيل المثال، لن يبدأ مصمم نظام النقل العام ببناء مجموعة من محطات القطار ومواقف الحافلات، ويوصلها معًا فقط لكي يرى أيها يُستعمل. لن ترضى أي حكومة بمثل هذا الإهدار للموارد. بدلًا من ذلك، معظم المخططات البيانية تُبنى من الأسفل للأعلى. على سبيل المثال، إحدى الاستراتيجيات التي يستخدمها اختصاصيُّو نظرية المخططات البيانية؛ هي بناء مخطَّط بياني يحتوي على مسار بين أي عُقدتَين، باستخدام أقل عددٍ ممكنٍ من الحواف. هذا معناه أن بعض المسارات قد تكون طويلة بعض الشيء، لكن بملاحظة المسارات التي تُستخدَم أكثر (سواء من خلال المسافرين في القطار، أو المعلومات التي تنتقل بين الخوادم على شبكة الإنترنت)، يستطيع مصمم الشبكة تحديد الموضع الذي يكون من المفيد وضع طريق مختصر عنده. وبهذا، تصبح الشبكة أكثر كفاءة بإضافة حوافَّ موضوعة في أماكن جيدة.

أما الدماغ، فليس له مصمم. فلا يوجد مخطِّط مركزي يمكنه النظر والقول: «يبدو أن الإشارات ستتدفق بشكلٍ أفضل إذا اتصلت الخلية العصبية هناك بالخلية العصبية هنا.»[٦] ولهذا يحتاج الدماغ إلى إنتاج المزيد من الخلايا والمشابك العصبية ثم تقليم الزوائد. الطريقة الوحيدة التي يمكن بها للدماغ اتخاذ قرارات بشأن الوصلات التي لا بد أن توجد؛ هي حساب الإشارات التي تمر عبر هذه الوصلات. لدى الخلايا العصبية الفردية والتشابكات العصبية أدواتٌ جُزيئيةٌ متقَنة لقياس مقدار استخدامها، وهي تنمو أو تتقلَّص نتيجة لذلك. فإذا لم يوجد الاتصال منذ البداية، فسوف يتعذَّر قياس النشاط العصبي بين هذه الخلايا.

تبدأ عملية تشذيب الوصلات في الدماغ بقوة كبيرة؛ حيث تُقطع الوصلات على اليمين وعلى اليسار، لكن العملية تتباطأ بمرور الوقت. في عام ٢٠١٥ بحث العلماء في معهد سولك

[٦] ربما يكون هناك استثناء من هذا لدى الحيوانات البسيطة جدًّا، مثل دودة الربداء الرشيقة .C elegans؛ حيث يُعتقد أن الكثير من المعلومات حول الخلايا التي يتعين عليها الاتصال ببعضها تُحمَل شفرتها في الجينوم، وبهذا تكون «مصمَّمة» عبر دهور من الانتخاب الطبيعي.

وجامعة كارنيجي مِيلُون لِمَ قد يكون هذا النمط من التشذيب مفيدًا للدماغ. لفعل هذا، قاموا بمحاكاة الشبكات التي بدأت عملاقة، وقُلِّمَت باستخدام مبدأ «إما أن تُستخدم أو تُفقَد». جدير بالذكر أنهم غيَّروا السرعة التي يحدث بها هذا التقليم. وجدوا أن الشبكات التي حاكت عملية التشذيب في الدماغ (حيث يكون معدل التشذيب مرتفعًا في البداية، ويقل مع مرور الوقت) انتهت بطول مسار قصير، وكانت قادرة على توجيه المعلومات، حتى إذا حُذِفت بعض العُقد أو الحواف. لم تكن الكفاءة والقوة بالقدر نفسه في الشبكات التي يكون فيها معدل التشذيب ثابتًا أو يزداد بمرور الزمن. يتضح أن تناقص معدل التشذيب يُفيد في إزالة الوصلات العديمة الفائدة بسرعة، وفي الوقت نفسِه يُتيح للشبكة وقتًا كافيًا لضبط الهيكل المتبقِّي، وبالمثل قد يتميز النَّحَّات الذي ينحت قطعةً من الرُّخام بالسرعة في قَطْع الشكل الرئيسي لرجلٍ، لكنَّ نحت التفاصيل الدقيقة للجسم يكون عملية بطيئة ودقيقة. في حين أن معظم الشبكات المادية، كشبكات الطرق وخطوط الهواتف، لن تُصمم استنادًا لمبدأ التشذيب، فإن الشبكات الرقمية التي لا يتضمن إنشاء حوافها أي تكاليف — كالشبكات التي تكونت عن طريق الاتصال اللاسلكي بين الهواتف المحمولة — يمكن أن تستفيد من الخوارزميات المستوحاة من الدماغ.

يُعَد علم الأعصاب الشبكي من العلوم الناشئة، وقد أطلِق الاسم على الممارسة التي تختص باستخدام أدوات نظرية المخططات البيانية وعلم الشبكات، لمناقشة بِنى الدماغ. نشرت مجلة «نِتوُرك نيوروساينس» أول دورية أكاديمية مخصصة فقط لهذا المسعى، لأول مرة عام ٢٠١٧، تزامنَت الأدوات الجديدة الخاصة برسم الخرائط العصبية للدماغ على مستويات متعددة، مع القوة الحاسوبية لتحليل مجموعاتٍ أكبر وأكبر من البيانات. والنتيجة هي بيئة مُفعَمة بالطاقة، تشهد إجراء العديد من الدراسات المتنوعة للبنية كل يوم.

لكنَّ ثمة سببًا يدعو إلى توخي الحذر يمكن إيجاده في معدة سرطان البحر.

العُقدة الفَموية المِعدية هي دائرة عصبية مكونة من ٢٥–٣٠ خلية عصبية، تقع في أمعاء سرطانات البحر وغيرها من القشريات. تتحد هذه الخلايا العصبية معًا من خلال الوصلات العصبية لأداء وظيفة أساسية، لكنها ضرورية؛ ألا وهي إنتاج تقلصاتٍ عضلية متناغِمة توجِّه عملية الهضم. قضت إيف ماردر، الأستاذة بجامعة براندِيز، نصف قرن تدرس هذه الحفنة الضئيلة من الخلايا العصبية.

وُلِدت ماردر وترعرعت في نيويورك، إلا أن عملها جعلها تنتقل إلى ماساتشوستس ثم إلى كاليفورنيا.[٧] في حين أن أبحاثها المتعلقة بدرجة الدكتوراه في جامعة كاليفورنيا كانت تركز على علم الأعصاب، كانت تتسم بالكفاءة في مادة الرياضيات؛ ففي المدرسة الابتدائية درسَت بعنايةٍ كتبَ الرياضيات المخصصة للطلاب الذين يكبرونها بعامَين. كان لشخصيتها المتعددة الجوانب تأثيرٌ على عملها. خلال عملها، تعاونَت مع باحثين من العديد من الخلفيات، بما في ذلك لاري أبوت (ورد ذكره في الفصل الأول) الذي جاء تعاونها معه بالتزامن مع تحوله من عالم فيزياء جُسيمات إلى عالم أعصاب نظري. بدمج الدقة التجريبية مع العقلية الرياضية، بحثَت ماردر عن كثَب في وظيفة هذه الدائرة العصبية الصغيرة لسرطان البحر في الواقع العملي، ومن خلال عمليات محاكاة بالكمبيوتر.

عُرفت الخريطة العصبية للعقدة الفموية المعدية للسرطان، منذ ثمانينيات القرن العشرين. تُكوِّن هذه الخلايا العصبية البالغ عددها ٣٠ نحو ١٩٥ وصلة، وتُرسل مخرجات إلى العضلات المِعدية. خلال دراسة ماردر للدكتوراه، توصَّلت للمواد الكيميائية التي تستخدمها هذه الخلايا العصبية في التواصل. بالإضافة إلى النواقل العصبية القياسية — المواد الكيميائية التي تعبُر الشق التشابكي الصغير بين الخلية العصبية التي تُطلق هذه المواد والخلية العصبية التي تستقبلها — وجدت ماردر أيضًا مجموعة من المعدِّلات العصبية المؤثرة.

المعدِّلات العصبية عبارة عن مواد كيميائية تعبث بإعدادات الدائرة العصبية. يمكنها زيادة شدة الوصلات العصبية أو تخفيضها، وجَعْل الخلايا العصبية تُطلق إشارات أكثر أو أقل أو بأنماط مختلفة. تُحدِث المعدِّلات العصبية هذه التغييرات، من خلال الارتباط بالمستقبِلات المُدمجة في غشاء الخلية العصبية. جزء مما هو جدير بالملاحظة حول المعدِّلات العصبية هو مصدرها، وكيفية وصولها إلى الخلية العصبية. في الحالة الأكثر تطرفًا، يمكن أن يُطلَق المعدِّل العصبي من جزء مختلف من الدماغ أو الجسم، وينتقل عبر الدم إلى وجهته. في أحيانٍ أخرى، يُطلَق المعدِّل العصبي محليًّا من الخلايا العصبية المجاورة، لكن

[٧] التحقت ماردر بقسم الدراسات العليا عام ١٩٦٩، في زمن شاع فيه التحاق النساء بمثل هذه البرامج، ومع ذلك كانت العقبات لا تزال موجودة. وقد سردت في سيرتها الذاتية ما يلي: «كنت أعلم أنه من غير المحتمل أن ألتحق بقسم علم الأحياء في جامعة ستانفورد؛ وذلك لأنه أشيع أنهم يضعون حدًّا لعدد النساء اللاتي يلتحقن (٢ من ١٢)».

سواء أجاء من مصدرٍ قريبٍ أم بعيد، تكون المعدِّلات العصبية عادة منتشرةً في كل أنحاء الدائرة العصبية بشكلٍ عشوائي، فتلمس العديد من الخلايا العصبية والمشابك العصبية بشكل غير محدَّد. وفي حين أن عملية النقل العصبي أشبه بخطاب بين خليتَين عصبيتَين، فإن التعديل العصبي أشبه بمنشورٍ أُرسِل إلى المجتمع بالكامل.

في تسعينيات القرن العشرين، فحصت ماردر — جنبًا إلى جنب مع أعضاءٍ من مختبرها ومختبر مايكل نوسباوم، الأستاذ بجامعة بنسلفانيا — المعدِّلاتِ العصبية في العقدة الفموية المعوية. بشكلٍ طبيعي، تُنتِج الدائرة إيقاعًا ثابتًا؛ إذ تُطلق خلايا عصبية معينة في مجموعة الخلايا إشاراتٍ عصبية مرة لكل ثانية تقريبًا. لكن، عندما أطلقت التجارب المعدِّلات العصبية على الدائرة العصبية، تغيَّر هذا السلوك. بعض المعدِّلات العصبية جعلت الإيقاع يزداد. أطلقت الخلايا نفسها إشارات عصبية لكن بمعدل أكبر. وجعلت أخرى الإيقاع يقل، في حين أن البعض كان له تأثير جسيم، فقد أدى إلى إحداث خلل في الإيقاع، كما أدى إلى تنشيط الخلايا العصبية التي كانت بطبيعتها مثبَّطة. هذه المعدِّلات العصبية المسبِّبة لهذه التغييرات كانت جميعها تُطلَق من خلايا عصبية؛ تمد هذه الشبكة العصبية بمُدخلات بطريقة طبيعية. هذا يعني أن هذه الأنماط المختلفة من المخرجات يجري إنتاجها بشكل طبيعي طوال حياة الحيوان. في حالة الإعدادات التي يغلب عليها الطابع الاصطناعي، يمكن أن تتسبب المعدِّلات العصبية التي يضيفها القائمون على التجارب في تغييرات أكبر وأكثر تنوعًا.

جدير بالذكر أن الشبكة الأساسية لا تتغير أبدًا خلال التجارب. فلم تُضَف أي خلية عصبية أو تُحذف. ولم تُقطع أو تتطور أي وصلات. تنشأ التغيرات الملحوظة في السلوك فقط من توزيع عدد صغير من المعدِّلات العصبية فوق هيكل ثابت.

المجهود الضخم الذي يُبذل من أجل الحصول على خريطة عصبية للدماغ، يفترض مُسبقًا أن يكون لهذا مردود محدد، لكن المردود يكون أقل من المجهود إذا كانت العلاقة بين البنية والوظيفة أضعف من المتوقع منذ البداية. إذا تمكنت المعدِّلات العصبية من تحرير نشاط الخلايا العصبية في الدائرة من القيود الصارمة التي تحكم بِنيتها، فليس من الضروري أن يحدد تركيبُها وظيفتَها. ربما لم يكن هذا ليصبح مصدرَ قلقٍ لو كان التعديل العصبي ظاهرة تختص بها العقدة الفموية المعدية. لكن هذا بعيد عن الحقيقة. تُحاط الأدمغة باستمرار بوابل من الجزيئات المعدِّلة. عبر الأنواع، تُعد المعدِّلات العصبية مسئولة عن كل شيء، من النوم إلى التعلُّم إلى التخلص من الجلد القديم إلى الأكل. التعديل العصبي يُعد القاعدة وليس الاستثناء.

من خلال عمليات المحاكاة الرياضية للدوائر العصبية التي درستها ماردر، لم تستكشف ماردر كيف تنشأ السلوكيات المختلفة من البنية نفسها فحسب، ولكن أيضًا كيف يمكن للبنى المختلفة أن تنتج السلوكيات نفسها. على وجه التحديد، بنية الدوائر العصبية لأمعاء كل سرطان بحر تختلف قليلًا عن مثيلاتها لدى سرطانات البحر الأخرى؛ قد تتكون وصلات عصبية أقوى أو أضعف في حيوان مقارنة بالآخر. بمحاكاة قرابة ٢٠ مليون دائرة ممكنة، وجد مختبر ماردر أن الغالبية العظمى غير قادرة على إنتاج الإيقاعات المطلوبة، ومع ذلك فإن بعض البنى يمكنها فعل ذلك. من خلال مزيج من الجينات والتطور، يستطيع كل سرطان بحر إيجاد سبيل إلى هذه البنى الفعالة. أشارت المجهودات البحثية إلى نقطةٍ مهمة عن الأدمغة المنفردة: التنوع لا يعني دائمًا الاختلاف. ما قد يبدو انحرافًا عن البنى المعيارية قد يكون في الحقيقة صالحًا تمامًا لتحقيق النتائج نفسها. حقيقة أن هذه البنى المتنوعة تنتج الإيقاعات نفسها أضاف تعقيدًا آخر على العلاقة بين الشكل والبنية.

بقدر ما أوضحت أبحاث ماردر أوجه القصور في الاعتماد على البنية وحدها لفهم الوظيفة، أشارت إلى الحاجة إليه. بُنيت حياة ماردر العملية — وجميع أفكارها التي قدمتها — على الخريطة العصبية للدماغ. فمن دون معلومات تفصيلية عن البنية، سيكون من غير الممكن استكشاف العلاقة بين البنية والوظيفة. وقد أوضحت ماردر ما يلي عام ٢٠١٢: «البيانات التشريحية التفصيلية لا تقدَّر بثمن. لا يمكن فهم دائرة عصبية بالكامل من دون مخطط للوصلات العصبية.» ومع هذا، مضت في الإشارة إلى أن «مخطط الوصلات العصبية ليس إلا بداية ضرورية، لكنه ليس إجابةً في حد ذاته.» بمعنًى آخر، عندما يتعلق الأمر بفهم الدماغ، تكون معرفة تركيب الجهاز العصبي ضرورية تمامًا، وفي الوقت نفسه غير كافية على الإطلاق.

وعليه، قد لا يكون من الممكن تحقيق فكرة كاخال، باستنتاج وظيفة الجهاز العصبي من مجرد التأمل في بنيته. لكن اكتشاف هذا التركيب وتحديده يظلَّان شرطَين مُهمَّين لأي فهمٍ إضافي للدماغ. تزدهر الطرق المبتكرة لجمع بيانات الخريطة العصبية وتطور الأدوات لنظرية المخططات البيانية، استعدادًا لاستقبال تلك البيانات واستيعابها.

الفصل العاشر

# اتخاذ قرارات عقلانية

الاحتمال وقاعدة بايز

حين كان هيرمان فون هلمهولتز طفلًا صغيرًا في بروسيا في أوائل القرن التاسع عشر، أخذ جولة في بوتسدام، مسقط رأسه، برفقة أمه. وعند المرور على حائل يحتوي على دُمًى مصطفَّة بجوار بعضها، طلب من أمه مدَّ يدها والحصول على واحدة له. لم تستجب أمه لطلبه، لكن هذا لم يكن بدافع الإهمال أو التأديب. بل لأنه لا يمكنها الحصول على الدمى؛ لأنه لم تكن هناك أي دُمًى. ما حدث للصغير هلمهولتز هو أنه كان يتوهم؛ فالدمى التي رآها بالقرب منه لم تكن في الواقع سوى أشخاص على مسافة بعيدة، أعلى برج كنيسة المدينة. كتب هلمهولتز يقول: «لقد طُبِعَت ملابسات هذا الموقف في ذاكرتي؛ فبفضل هذا الخطأ تعلمت فَهْم قانون التقصير في المنظور أو التشوُّه المنظوري».

مضى هلمهولتز قُدمًا ليصبح طبيبًا وعالم وظائف أعضاء وفيزيائيًّا بارزًا. تمثَّل أحد أعظم إسهاماته في منظار العين، وهي أداة تُستخدَم للنظر داخل العين إلى يومنا هذا. كما عزَّز من فهم رؤية الألوان من خلال عمله على «نظرية ثلاثية الألوان» — وهي الفكرة التي تفيد بوجود ثلاثة أنواع من الخلايا في العين، يستجيب كلٌّ منها لأطوال مَوجية مختلفة من الضوء — التي استنتج من خلالها أنه لا بد أن مرضى عَمى الألوان يفتقرون إلى أحد أنواع الخلايا هذه. وبعيدًا عن العين، نشر هلمهولتز مجلدًا عن علم الصوتيات والتعرض للنغمات، وكيفية انتقال الصوت عبر الأذن، والطريقة التي تحفز بها الأعصاب. بتحويل تفكُّره اللافت ودقته إلى دراسة الأعضاء الحِسية، سلَّط هلمهولتز الضوء على الآليات الفيزيائية التي تدخل من خلالها المعلومات من العالم إلى العقل.

لكن السؤال الأعمق المتعلق بكيفية استخدام العقل لهذه المعلومات ظل يحوم في عقله. ورث هلمهولتز اهتمامًا شديدًا بالفلسفة عن والده، وقد تأثرت رؤيته الكونية، بعدة طرق، بأفكار الفيلسوف الألماني إيمانويل كانط. في فلسفة كانط، يشير مفهوم Ding an sich بالألمانية، أو «الشيء في ذاته، أو جوهر الشيء» إلى الأشياء الحقيقية في العالم — أي الأشياء التي لا يمكن إدراكها مباشرة، لكن من خلال الانطباعات التي تتركها على أعضائنا الحسية. لكن إذا كانت هناك حالتان مختلفتان في العالم — دُمية قريبة أو شخص بعيد — يمكن أن ينتج عنهما نفس نمط الضوء الساقط على العين، فكيف يقرر العقل الحالة الصحيحة التي يتعين عليه إدراكها؟ أراد هلمهولتز معرفة كيف ينشأ الإدراك عن مُدخلات غامضة أو غير مؤكدة؟

بعد تفكير عميق في هذا السؤال، استنتج هلمهولتز أنه لا بد أن تستمر كمية كبيرة من المعالجة ما بين النقطة التي يتلقَّى فيها الفرد المعلومات الحسية، والنقطة التي تصبح فيها هذه المعلومات تجربةً واعية. وقد أوضح أن ناتج هذه المعالجة «يعادل استنتاجًا، لدرجة أن المثيرات أو الأفعال التي ندركها بالحواس تمكننا من تكوين فكرة عن السبب المحتمل وراء حدوث هذا الفعل.» أصبحت الفكرة تُعرف باسم «الاستدلال اللاواعي»؛ وذلك لأن الأشياء الموجودة في العالم لا بد أن يُستدَل عليها من خلال تأثيراتها على الأعضاء الحسية. باستلهام المزيد من كانط، افترض هلمهولتز أن هذا الاستدلال يحدث من خلال تفسير المدخلات الحسية الحالية، في ضوء المعرفة الموجودة مُسبقًا عن العالم. على وجه التحديد، مثلما أن خطأه المتعلق بالدُّمى علَّمه شيئًا عن المنظور، اعتقد هلمهولتز أن خبرات الماضي يمكنها التأثير على التصوُّرات في الوقت الحالي.[1]

على الرغم من كون هلمهولتز واحدًا من أكثر علماء وظائف الأعضاء براعة في الرياضيات في كل العصور، لم يعرِّف هلمهولتز الاستدلال اللاواعي رياضيًّا مطلقًا. ظلت ملاحظاته حول الموضوع، على دقتها، كيفية وتخمينية على أغلب الظن. كما أنها قوبلت بالرفض. شعر العلماء آنذاك أن مفهوم «الاستدلال اللاواعي» متناقضٌ من حيث المصطلحات. الاستدلال، أو اتخاذ القرار، هو عمليةٌ واعيةٌ بطبيعة الحال؛ ومن ثم لا يمكنها أن تحدث بشكلٍ غير واعٍ.

[1] بهذه الطريقة انحرف هلمهولتز عن كانط، الذي اعتقد أن معظم معرفة العالم هذه فطرية وليست مكتسبة.

إلا أن هلمهولتز وجد من يدافع عنه بعد نحو ١٠٠ عام من موته؛ إذ دافع عنه علماء نفس يستخدمون مفاهيم رياضية، طوِّرت في الأساس قبل ميلاده بأكثر من ٥٠ عامًا. سيُمثِّل الاستدلال اللاواعي في النهاية الكيفية التي يدرك بها البشر ويتخذون القرار ويتصرفون، بعد وضعه في ثوب معادلات الاحتمال.

ليس من غير المألوف أن تعود أُصول موضوعات الرياضيات، حتى بعض الموضوعات الأكثر تجريدًا، إلى مِهن عملية للغاية. نشأت أدوات الهندسة عن البناء والمسح الأرضي، وقد شارك علماء الفلك القُدامى في جعل الصفر مفهومًا شائعًا، كما أن مجال الاحتمال يعود منشؤه للعبة القمار.

كان جيرولامو كاردانو طبيبًا إيطاليًّا، لكن، شأنه شأن الكثير من الرجال المثقفين في القرن السادس عشر، أراحه الانغماس في الكثير من المواد. حسب إحصائه، كتب ما يزيد عن ١٠٠ كتاب — معظم هذه الكتب ضاعت مع مرور الوقت — بعنوانَين، تعكس موضوعاتٍ متباينةً؛ مثل: «عن الكواكب السبعة»، و«عن خلود الروح»، و«عن البول». وفيما يلي ما كتبه كاردانو عن أحد كُتبه التي ظلت تحظى بأهمية وتأثير في المستقبل: «ألَّفت أيضًا كتاب «عن ألعاب الحظ»؛ ما المانع أن يكتب شخص مُقامرٌ أو لاعب نَرد وفي الوقت نفسه كاتبٌ كتابًا عن لعب القِمار؟» ونظرًا لكون كاردانو مقامرًا، بدا الكتاب كُتيبًا عن الألعاب نتج عن تجربة شخصية أكثر من كونه كتابًا تعليميًّا. ومع ذلك، كان في ذلك الوقت يُعد المعالجة الأكثر دقةً لقوانين الاحتمال المتاحة.

ركَّز كاردانو معظم أبحاثه في الرياضيات على رَمْي النرد. أقرَّ سريعًا بأن احتمال ظهور أي وجه من الأوجه الستة للنرد نظريًّا يعادل احتمال ظهور الأوجه الأخرى، لكن من الناحية العملية لن تكون النتائج متساوية دائمًا: «عند رمي النرد ست مرات، لا بد أن يظهر كل وجه من الأوجه مرة واحدة، لكن نظرًا لأن بعض الأوجه ستتكرر، فسيترتب على ذلك عدم ظهور الأوجه الأخرى.» بعد العمل على أمثلة تتعلق بما يمكن توقعُه عند رمي حجَر نردٍ أو اثنين أو ثلاثة، استنتجَ ما يأتي: «ثمة قاعدة واحدة، وهي أنه ينبغي الأخذ في الاعتبار إجمالي عدد النتائج المحتملة، وتحديد عدد مرات الرمي التي تُمثِّل عدد التجميعات المختلفة التي يمكن أن تؤدي إلى النتيجة المرجوة، ومقارنة هذا العدد بما تبقى من إجمالي النتائج المحتملة.» بعبارة أخرى، يمكن حساب احتمال حدوث نتيجة معينة، على أساس عدد النتائج التي تؤدي إلى هذه النتيجة مقسومًا على عدد النتائج المحتملة.

افترض رمْيَ حجرَي نردٍ على سبيل المثال. إذا كان رمي حجر نرد واحد له ست نتائج محتملة، فإن رمي حجرَي نرد يتضمن ٦ × ٦ = ٣٦ نتيجة محتملة. إذا قلنا إن النتيجة التي نرغب في الحصول عليها هي وجهان مجموعهما يساوي ثلاثة عند رمي حجرَي النرد، فسيكون هناك ناتجان محتملان يقودان إلى هذه النتيجة: (١) أن يُظهر النرد الأول العدد واحدًا والثاني العدد اثنين، (٢) أن يُظهر النرد الأول اثنين والثاني العدد واحدًا. ومن ثم، فإن احتمال الحصول على النتيجة المرغوبة تساوي ٢ / ٣٦ أو ١ / ١٨.

وفقًا لكاردانو: «ما القمار إلا احتيال وعدد وحظ.» لذا، بالإضافة إلى مناقشة الأعداد، حرص على تخصيص أكثر من فصلَين لموضوع الاحتيال. كان القدر الأكبر من التركيز مُنصبًّا على كيفية ملاحظة الغش: «قد يكون حجر النرد مضللًا، إما نتيجةً لصقل الحواف، أو لكون الحواف غير منتظمة (وهي حيلة يمكن ملاحظتها بسهولة).» قدَّم الكتاب أيضًا نصائح حول كيفية التعامل مع حالة الغش عند اكتشافها «عندما يساورك الشك في وجود احتيال، جازف بمبالغ صغيرة، واحرص على وجود متفرجين.» إلا أنه من الجدير بالملاحظة أن السيرة الذاتية لكاردانو قدمت رؤية مختلفة عن كيفية التصرف. ففي فصل بعنوان «المخاطر والحوادث والخيانات المستمرة»، استحضر أنه ذات مرة لاحظ أن بطاقات أحد الرجال كانت محددة بعلامات، وعندئذٍ «جرحتُ وجهه بخِنجري، لكن ليس بعمق».

الأمر المهم هو أن كاردانو أوضح أن معظم العمليات الحسابية الخاصة بالاحتمالات، تنطبق فقط إذا كانت أحجار النرد المستخدمة نزيهةً، وليس إذا كان يلعب في «منزل غشاش محترف» (كما وصف في الحادثة المذكورة أعلاه). في هذه الحالة، سيتعين على الاحتمالات أن «تُعدَّل، إما بالزيادة أو النقصان بناءً على مدى انحراف النرد عن المساواة الحقيقية».

عمل حساب لتغيُّر الاحتمالات بتغيُّر الظروف — كما في حالة وجود لاعب غشاش — سيُطلَق عليه فيما بعد اسم الاحتمال الشرطي. يمكن أن يُنظر إلى الاحتمال الشرطي باعتباره عبارة شرطية. إذا علمت أن «س» صحيحة، فما فرصة أن تكون «ص» صحيحة أيضًا؟ على سبيل المثال، بمعلومية أن حجر النرد يخلو من التلاعب، احتمال أن ينتج عن رمي حجر النرد العدد اثنان يساوي ١ / ٦. بدلًا من ذلك، سيكون الاحتمال ١ / ٣ مثلًا عند معرفة أنك تلعب مع شخصٍ محتالٍ تلاعب بحجر النرد، بحيث تزداد فرصة الحصول على اثنين. وعليه، فإن احتمال وقوع حدث يعتمد على الشروط التي يقع بموجبها الحدث.

تَمثَّل أحد الموضوعات الذي حير علماء الرياضيات لقرون بعد كاردانو في السؤال المتعلق بالاحتمال العكسي. قد يكون الاحتمال القياسي قادرًا على توضيح كيف تخلق أحجار النرد المختلفة فرصًا مختلفة، لكن الهدف من الاحتمال العكسي كان على النقيض من ذلك؛ أي عكس عملية التفكير وإيجاد السبب وراء التأثيرات.[٢] على سبيل المثال، إذا كاردانو يعلم ما إذا كان يلعب مع شخص محتال أم لا، يمكنه ملاحظة رميات حجر النرد ليحاول تحديد ما إذا كان النرد مُتحيزًا. إذا أسفر رمي حجر النرد عن العدد اثنين كثيرًا، فربما كان سيشك في أن ثمة خطأً ما (إلا أننا نأمل أن يكون هذا الشخص قد احتفظ بخنجره لنفسه).

أجرى عالم الرياضيات الفرنسي بيير سيمون لابلاس أبحاثًا على مشكلة الاحتمال العكسي، على فتراتٍ متقطعة، على مدار ٤٠ سنة من مسيرته المهنية. وقد بلغ عمله الذروة عام ١٨١٢ مع نَشْر كتاب «النظرية التحليلية للاحتمالات». أوضح لابلاس قاعدة بسيطة كانت في طريقها لأن تصبح واحدة من أهم الاستنتاجات، وأكثرها تأثيرًا في مجال الرياضيات.

تنص القاعدة على أنه إذا أردت معرفة احتمال أن يكون حجر النرد تعرضَ للتلاعب، فسيَتعيَّن عليك دمج أمرين مختلفين. الأول: هو احتمال أن تكون رميات النرد التي رأيتها ناتجة عن التلاعب بالنرد، والثاني: احتمال أن يكون حجر النرد قد جرى التلاعب به منذ البداية. بشكلٍ أكثر تقنية، يمكننا التعبير عن هذا على النحو الآتي: احتمال صحة فرضيتك («أنه جرى التلاعب بحجر النرد») بمعلومية الدليل الموجود لديك (عدد مرات الرمي التي رأيتها) يتناسب طرديًّا مع احتمال أن تجد دليلًا يؤيد صحة فرضيتك (أي احتمال ملاحظة نتائج معينة إذا جرى التلاعب بحجر النرد) مضروبًا في فرضيتك (الاحتمال الأوَّلي أن حجر النرد جرى التلاعب به قبل وجود دليل).

لنقُل إن النرد أظهر العدد «اثنين» ثلاث مرات على التوالي، وأردت أن تعرف ما إذا كان هناك تلاعب. بفرض أن حجر النرد نزيه، فإن احتمال الحصول على هذه النتائج

[٢] في هذه الحالة، لم يكن الحديث عن الاحتمال، من حيث السبب والتأثير غير شائع في ذلك الوقت. إلا أنه لن يكون من الحكمة فعل ذلك عمومًا. فاحتمال أنك تحمل مظلةً بمعلومية أن الشخص الموجود بجوارك في الشارع يحمل مظلةً؛ قد يكون عاليًا، إلا أن أحدهما ليس سببًا في الآخر.

يساوي ١/٦ × ١/٦ × ١/٦ = ١/٢١٦. تمثل هذه القيمة احتمال ظهور العدد اثنين ثلاث مرات (الدليل) بفرض أن حجر النرد نزيه. في المقابل، قد يجري التلاعُب بحجر النرد ليُظهر العدد اثنين عند رميه، لنقل ثُلث عدد المرات. بهذه الطريقة، فإن احتمال ملاحظة دليل يؤيد أن حجر النرد جرى التلاعب به يساوي ١/٣ × ١/٣ × ١/٣ = ١/٢٧. بمقارنة هذَين العددَين، يتضح أن احتمالَ ظهور العدد اثنين ثلاث مرات على التوالي عند استخدام حجر نرد تعرَّض للتلاعُب؛ أكبر بكثيرٍ منه عند استخدام حجر نرد نزيه، وهو ما يفيد بوجود غشٍّ في اللعب.

ومع ذلك، فإن هذه الأعداد غير كافية. للوصول إلى استنتاج صحيح، تخبرنا القاعدة بأنه يتعين علينا دمج ذلك مع مزيد من المعلومات. على وجه التحديد، يتعين علينا ضرب هذه الأعداد في احتمال أن يكون حجر النرد تعرَّض للتلاعب، أم لم يتعرض للتلاعب بشكل عام.

لنقُل في هذه الحالة إن شريكك هو صديقك المفضل لسنوات. لنفترض أنك ستضع احتمالًا بأن صديقك سيستخدم حجرَ نردٍ متلاعَبًا به ١ في المائة فقط. بضرب احتمال الحصول على العدد اثنين ثلاث مرات، عند استخدام حجر نرد متلاعَب به، عند استخدام احتمالٍ منخفضٍ بأن يكون حجر النرد جرى التلاعب به، نحصل على ١/٢٧ × ١/١٠٠ = ١/٢٧٠٠ أو ٠,٠٠٠٣٧. بفعل ذلك باستخدام الفرضية الأخرى — أن حجر النرد لم يتعرَّض لأي تلاعب — نحصل على ١/٢١٦ × ١/٩٩/١٠٠ = ٠,٠٠٤٥. ونظرًا لكون لعدد الثاني أكبر من الأول، فسيكون من الإنصاف استنتاج أن صديقك ليس في الواقع محتالًا.

ما يوضحه هذا المثال هو قوة الافتراض المبدئي. و«الاحتمال القبلي» هو اسم يُطلق على احتمال صحة الفرضية؛ في هذه الحالة احتمال أن صديقك تلاعب بالنرد. بتطبيق المعادلات نفسها، لكن مع افتراض أنك مع شخص غريب، يتساوى احتمال أن يغشَّ مع احتمال ألَّا يغش (أي إن احتمال الغش يساوي ٠,٥)، يكون الناتج مختلفًا: مقارنة ٠,٠١٩ مقابل ٠,٠٠٢٣ تكون مؤيدة لتعرض النرد للتلاعب. بهذه الطريقة، يمكن أن يكون الاحتمال القبلي القوي عاملًا حاسمًا.

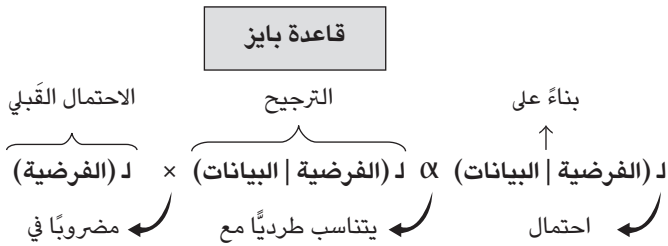
يُطلَق على المصطلح الآخر — أي الاحتمال المتعلق بملاحظة عدد مرات رمي النرد في حال ما إذا كانت الفرضية صحيحة — «الأَرجحية». يشير هذا المفهوم إلى مدى احتمال

ملاحظة ما لاحظته، إذا كانت فرضيتك عن العالم صحيحة. دوره في الاحتمال العكسي يعكس حقيقة أنه لتحديد السبب وراء أي تأثير، يجب على الشخص أولًا معرفة التأثيرات الناتجة عن كل سبب.

كلٌّ من الأرجحية والاحتمال القبلي يكون ناقصًا بمعزل عن الآخر. وهما يُمثِّلان مصدرَين مختلفين من المعرفة؛ الدليل الآني لديك مقابل الفهم الذي تراكم بمرور الزمن. عندما يتفقان تصبح النتيجة سهلة. خلافًا لذلك، سيؤثران بما يتناسب مع مدى تأكيدها. في ظل غياب المعرفة المبدئية الواضحة، يسيطر الاحتمال المرجَّح على القرارات. وعندما يكون تأثير المعرفة المبدئية كبيرًا بالكاد تصدق عينيك. في وجود معرفة قبلية قوية، لا يمكن تصديق الادعاءات الاستثنائية إلا بأدلة استثنائية.

عبارة «عندما تسمع وقع الحوافر، فكِّر في الأحصنة لا في الحمر الوحشية» هي نصيحة تُقدَّم لطلاب كلية الطب باستمرار. الهدف من هذه النصيحة هو تذكيره بأنه من بين مرضَين لهما أعراض متشابهة، لا بد أن يكون المرض الأكثر شيوعًا هو تخمينهم الأول. وهو أيضًا مثالٌ عمليٌّ ممتاز على قاعدة الاحتمال العكسي. سواء أكنت على مقربة من حصان أو حمار وحشي، فسيكون لديك نفس فرصة سماع وقع حوافر؛ لذا فمن الناحية التقنية، فإن الأرجحية متماثلة في الحالتين. ونظرًا لهذا الدليل الغامض، يقع القرار في أيدي المعرفة القبلية، وفي هذه الحالة تفيد المعرفة القبلية بأن الأحصنة أكثر شيوعًا؛ ومن ثم تكون التخمينَ الأفضل.

على مدار ٢٠٠ عام منذ نشره للكتاب، أشير لمعادلة الاحتمال العكسي التي وضعها لابلاس في كلٍّ من الأوراق البحثية، والكتب الدراسية، وعلى سبُّورات الفصول باسم «قاعدة بايز». كان توماس بايز قِسيسًا بالكنيسة المشيخية الإنجليزية في القرن الثامن عشر. ولكونه عالم رياضيات هاويًا، بحث في مسألة الاحتمال العكسي وتمكَّن من حل نسخةٍ محددة منها. إلا أن كل تفكيره وحساباته لم يُفضِ به أبدًا إلى صيغة قاعدة بايز التي نعرفها الآن. علاوة على ذلك، لم ينشر بايز نفسه عمله البحثي. في النهاية، أُرسِلت مقالة تتضمن أفكاره حول «مشكلة في مذهب الفرص» إلى الجمعية الملكية على يد أحد أصدقائه، وهو قسيس آخر يُدعى ريتشارد برايس، عام ١٧٦٣، أي بعد عامَين من وفاة بايز. بذل برايس مجهودًا كبيرًا في تحويل ملاحظات بايز إلى مقالة مناسبة؛ كتب مقدمة يثير فيها المشكلة ثم أضاف ملحقًا فنيًّا إضافيًّا (لسوء الحظ لم يحُل ذلك دون الإشارة إلى المقالة




احتمال صحة فرضية بناءً على البيانات المتوفرة يتناسب طرديًّا مع احتمال صحة البيانات بناءً على الفرضية مضروبًا في احتمال صحة الفرضية.

شكل ١٠-١

بوصفها «واحدة من أكثر الأعمال التي تصعب قراءتها في تاريخ الإحصاء»).[٣] وعلى الرغم من أن لابلاس كان حيًّا في الوقت الذي نُشرت فيه مقالة بايز، يتضح أنه لم يكن على درايةٍ به إلا بعد أن حقَّق تقدمًا كبيرًا بنفسه.

ومن ثم، يمكن القول إن القسَّ بايز لا يستحق كل هذه الإمبراطورية التي وُهِبت له بعد وفاته. وعلى أي حال، من غير الواضح أنه أرادها من الأساس. لم تلقَ قاعدة بايز استحسانًا من العلماء والفلاسفة طوال الوقت. وكما هي الحال في أبحاث هلمهولتز حول الاستدلال اللاواعي، لم تُستخدم المعادلة بشكلٍ كافٍ كما أسيء فهمها على نحو متفاوت. رجع ذلك في البداية إلى صعوبة تطبيقها. حتى إن لابلاس بنفسه تمكن من استخدام القاعدة لحل بعض المسائل المتعلقة بالقياس في الفلك، وأيضًا لتدعيم الفرضية القائلة بأن عدد المواليد الذكور أكثر من عدد المواليد الإناث في المتوسط. لكن، بناءً على المسألة المعنية، قد ينطوي تطبيق قاعدة بايز على بعض العمليات الحسابية المعقدة، وهو ما جعل منه منظورًا شاقًّا، وذلك قبل أن يلوح الكمبيوتر الحديث في الأفق لتقديم يد العون.

[٣] كان الإحصائي والمؤرخ ستيفن ستيجلر المسئول عن هذا التقييم، معروفًا أيضًا باسم «قانون ستيجلر للتسمية»، الذي يدعي بأن القانون العلمي لا يُسمى باسم صاحبه أبدًا. ويُعتقد أن عالم الاجتماع روبرت ميرتون هو من ابتكر هذا القانون.

ومع ذلك، ظهرت الصعوبة الحقيقية لقاعدة بايز فيما بعد، وأصبح لها تأثير أعمق. في حين كانت صِحة معادلة لابلاس أمرًا غير قابل للنقاش؛ فإن كيفية تطبيق هذه المعادلة شغل تفكير علماء الإحصاء وقسَّمهم لعقود. وفقًا لفيلسوف العلم دونالد جيليس: «كان الخلاف بين مؤيدي ومناهضي مفاهيم بايز أحد الخلافات الفكرية الرئيسية في القرن العشرين.» كان الافتراضُ المبدئي النقطةَ المحورية للنقد لدى المناهضين لمفاهيم بايز. أرادوا معرفة من أين تأتي هذه المعلومات؟ إنها معرفة عامة من الناحية النظرية. إلا أنها معرفة شخصية من الناحية العملية. على حد تعبير رونالد فيشر أحد عمالقة الإحصاء في القرن العشرين، الافتراضات التي ينطوي عليها اختيار الافتراض المبدئي «تعسُّفية بالكامل، ولم تُطرح أي طريقة يمكن من خلالها وضع مثل هذه الافتراضات بطريقة مُتَّسقة وفريدة من نوعها.» في حالة عدم وجود طريقة غير متحيِّزة ومُتَّسقة للوصول إلى نتيجة، لا تكون قاعدة بايز قاعدةً على الإطلاق. ونظرًا لهذا، استُبعِدت هذه الطريقة، وروِّج لها باعتبارها «ذاتية» — بطريقة أحبطت العلماء الجادِّين من استخدامها.

ومع ذلك، فإن المخاوف المرتبطة بالمفاهيم تتبدَّد عادة عند تعريضها لضوء الإثبات العملي. في الجزء الأخير من القرن العشرين، كانت قاعدة بايز تُثبت قيمتها. على سبيل المثال، بدأ الأكتواريون إدراك أن الأسعار التي يضعونها تُحسب بشكلٍ أفضل من خلال مبادئ الاحتمال العكسي. في علم الأوبئة، ساعد بايز على توضيح العلاقة بين التدخين وسرطان الرئة. وفي الحرب ضد النازيين، لجأ آلان تورينج المتخصِّص في فك الشفرات سيئ السمعة إلى مبادئ بايز، بهدف كشف الرسائل المكتوبة بجهاز التشفير «إنيجما» التي يستحيل فك شفرتها. أخذت قاعدة بايز تبرُز بوصفها أداةً لتخفيف حدة عدم اليقين أينما لاح في الأفق. من الناحية العملية، لم يُمثِّل الاحتمال السابق أو القَبلي عقبةً كبيرة. إذ يمكن بَدْؤه بتَخمينٍ مدروسٍ وتحديثه في ضوء الدليل الجديد (أو في حالة عدم وجود أي معرفة سابقة على الإطلاق، تكون فرص حدوث كل فرضية مساوية لفرص حدوث الفرضيات الأخرى). ومع النجاح المتكرر لقاعدة بايز، على الرغم من الحركة النشطة المناهضة لها، كان من المنطقي أن تكسب اللقب الذي خلعته عليها شارون ماكجرين في كتابها: «النظرية التي لن تموت».

عندما دخلت قاعدة بايز إلى علم النفس لم تلقَ ترحيبًا بقدر ما لاقت مناهضة. ولم يحمل مؤلَّف واحد بين طياته هذه النظرية. لكن مع ظهور المجال الخاص بنظرية القرار في

ستينيات القرن العشرين، بدأ العديد من مناطق البحث يوظِّف نظرية بايز ويستكشفها، إلى أن ازدهرت الفكرة التي تُفيد بأن الدماغ يعمل وفقًا لقاعدة بايز في مطلع القرن الحادي والعشرين.

بعض الأبحاث المبكرة التي أُجرِيَت بشأن تطبيق مبادئ بايز على الدماغ، انبثقت من منطلَقٍ غير متوقَّع؛ ألَا وهو الفضاء. أدركت الإدارة الوطنية للملاحة الجوية والفضاء (ناسا)، في مهمَّتها المتمثلة في إطلاق رحلات إلى الفضاء، أنه سيتعيَّن عليها القيام بما هو أكبر من مجرد تصميم بذلات للطيران ومحركات نفاثة. كما بحثت في مسألة «العوامل البشرية» المتعلقة بالطيران، مثل كيفية تفسير الطيارين لمعدات الطيران، واستشعار البيئة المحيطة بهم، والتفاعل مع الضوابط. بالبحث في هذه المسألة، كتب رينويك كاري واحدةً من أقدم الأوراق البحثية التي تُعبِّر عن الإدراك البشري، باستخدام المصطلحات المتعلقة بقاعدة بايز. على وجه التحديد، استخدم قاعدة بايز لشرح أنماطٍ متعلقةٍ بكيفية إدراك البشر للحركة. لكن نظرًا لأن القيود الأكاديمية باقيةٌ على حالها، سمع القليل من علماء النفس عنها.

قدَّم علم الاقتصاد طريقة أخرى، كي تشُقَّ قاعدة بايز طريقها لعلم الاقتصاد. لجأ علماء الاقتصاد، المتعطِّشون لوصف السلوك البشري في صورة رياضية مُحكمة، إلى قاعدة بايز في وقت مبكر من ثمانينيات القرن العشرين. في ورقة بحثية بعنوان «هل الأفراد صُناع قرار مستندين لمبادئ بايز؟» كتبها وليام فيسكوسي عام ١٩٨٥، تبين أن العاملين إما يبالغون في تقييم مخاطر بعض الوظائف المحددة، وإما يقلِّلون منها بناءً على معرفتهم السابقة بمدى خطورة الوظائف بشكلٍ عام.

لاحظ علماء النفس أيضًا دخول قاعدة بايز إلى المشهد، من خلال أحد مصادر الإلهام القديمة لديهم. كما رأينا في الفصل الثالث، تأثرت دراسة الدماغ بمجال المنطق الشكلي. بنهاية القرن العشرين، أصبحت الاحتمالات، في العديد من الجوانب، المنطق الجديد؛ فهي طريقة متطورة لفهم كيفية تفكير الإنسان. بدلًا من تقسيم القيم بشكل صارم إلى صحيحة وخاطئة كما يفعل المنطق البولياني، يتعامل الاحتمال مع نطاق واسع من القيم، بما في ذلك المنطقة الرمادية التي تقع بين النقيضين. ومن ثم فإنها تتماشى جيدًا مع حدسنا حول معتقداتنا. وهو ما عبر عنه لابلاس على النحو الآتي: «ما نظرية الاحتمال إلا حسٌّ سليم اختُزل في صورة عمليات حسابية».

الاحتمال أفضل من هذا بقليل بالطبع؛ فقد صِيغَت قواعد الاحتمال في صورة رياضية كي تكون أفضل صورة للحس السليم، كما أن قاعدة بايز على وجه التحديد أشبه بدليل استرشادي لأفضل طريقة للتفكير.

استنادًا لهذا، أدخل جون أندرسون منهجًا يستند إلى قواعد بايز إلى علم النفس، ضمن طريقةٍ أشار إليها باسم «التحليل المنطقي». كانت مجرد فكرة أتته عام ١٩٨٧، حين كان في أستراليا في إجازة تفرُّغٍ علمي من وظيفة أستاذ علم النفس وعلم الكمبيوتر، التي كان يشغلها في جامعة كارنيجي ميلون. ينبثق التحليل المنطقي، وفقًا لأندرسون، من الاعتقاد بأنه «يوجد سببٌ لما هو عليه العقل الآن». على وجه التحديد، تفترض الفكرة أن فَهْم آلية عمل الدماغ سينشأ عن فَهْم من أين تأتي هذه الآلية. فيما يتعلق ببايز، يبدأ الفهم المنطقي بحقيقة أن البشر يعيشون في عالَم فوضوي غير مؤكد. إلا أن البشر، وفقًا لأندرسون، تطوروا داخل هذا العالَم؛ بحيث يتصرَّفون بأقصى قدرٍ ممكنٍ من العقلانية. تُعَد قاعدة بايز وصفًا لكيفية التفكير بعقلانيةٍ في ظل ظروف عدم اليقين. ومن ثم، لا بد أن البشر يستخدمون قاعدة بايز. ببساطة، إذا حدث التطور، فلا بد أن نرى قاعدة بايز في الدماغ.

التفاصيل المتعلقة بكلٍّ من كيفية تطبيق القاعدة والمشكلات التي تساعد فيها؛ تعتمد على سمات أكثر تحديدًا للبيئة المحيطة. على سبيل المثال، قدَّم أندرسون نظرية تستند إلى قواعد بايز تتعلق باسترجاع الذكريات. تنص على أن إيجاد احتمال أن تكون ذكرى معينة مفيدة في موقفٍ معين يكون من خلال دَمْج النقطة الأولى بالثانية: (١) احتمالية أن تجدَ نفسك في موقفٍ محدَّدٍ إذا كانت الذكرى مفيدة، (٢) افتراض مبدئي يقضي بأن الذكريات الأحدث تكون مفيدةً على الأرجح. الهدف من اختيار المعرفة المبدئية في النقطة الثانية، يعكس بدوره حقيقة أن البشر جاءوا من عالمٍ تكون فيه المعلومات لها مدة صلاحية، وعليه فإنه من المرجح أن تكون الذكريات الأحدث لها قيمة أكبر.

جدير بالملاحظة أنه في إطار التحليل المنطقي، قد يكون المنطق بعيدًا عن المثالية. فالذاكرة، على سبيل المثال، قد تخذلنا. لكن وفقًا لوجهة نظره، إذا نسينا حقيقةً من المرحلة الابتدائية، أي منذ ٢٠ سنة أو ما يزيد على ذلك، فلن نصبح غير عقلانيين. نظرًا لأن سعة الذاكرة محدودة والعالم الذي نعيش فيه دائم التغير، من المنطقي أن نتخلى عن المعلومات القديمة القليلة الاستخدام. بهذه الطريقة، يمكن النظر إلى المعرفة السابقة في نموذج بايز بوصفها طريقًا مختصرًا مُخزَّنًا في الدماغ. والمعرفة السابقة عبارة عن حالة

تشفير المعلومات الأساسية عن العالم، التي من شأنها أن تجعل عملية اتخاذ القرار أسهل، وفي الكثير من الحالات تجعلها أكثرَ دقة. ولكن، إذا وجدنا أنفسنا في عالمٍ بعيدٍ تمامًا عن العالم الذي نمَونا وترعرعنا فيه، يمكن أن تكون معارفنا السابقة مضلِّلة. «التفكير في الأحصنة» (في المثال الذي ذُكِر آنفًا) لا تكون نصيحة جيدة إلا في مكان يحتوي على أحصنة أكثر من الحُمُر الوحشية.

في بدايات عام ١٩٩٣ التقت مجموعة من الباحثين في نُزُل «شاتم بارز إن»، في شاتم، ماساتشوستس. شملت المجموعة عالِمَي النفس ديفيد نيل (أستاذ في جامعة بنسلفانيا، وعمل منظمًا)، وويتمان ريتشاردز (أستاذ في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، كان جزءًا من أول مجموعة من طلاب الدكتوراه في قسم علم النفس هناك، في ستينيات القرن العشرين). ضم اللقاء أيضًا علماء مدرَّبين في علم وظائف الأعضاء وعلم الأعصاب؛ مثل هاينريش بولتهوف، الذي كان يبحث الجهاز البصري لذبابة الفاكهة، وكذلك مهندسون وعلماء رياضيات مثل آلان يوولي، تلميذ ستيفن هوكينج.

جاء ضمن جدول أعمال هذه المجموعة المنتقاة البحث عن نظرية رسمية جديدة للإدراك؛ نظرية مثالية يمكنها الإلمام بتعقيدات الحواس مع تقديم فرضيات جديدة قابلة للاختبار. تمثلت صعوبة المشكلة المحددة في أن الحواس يمكن أن تتأثر بأكثر من مجرد المدخلات الحِسية التي تتلقاها العين أو الأذن أو الأنف. بمعنى أن المعلومات الحسية الواردة تختلط بمجموعةٍ ثَرية من المعلومات الأساسية، قبل أن يكتمل الإدراك. وفقًا لنِيل، لم تتمكَّن أي نظريةٍ آنذاك من تحديد «كيف يمكن الاستفادة من المعرفة المبدئية لتأويل البيانات الحسية».[٤]

أثمر هذا اللقاء عن كتابٍ نُشر عام ١٩٩٦، وقد كشف عنوانه عن الحل الذي استقر عليه الحضور: «الإدراك بوصفه استدلالًا بايزيًّا». نُثرت بذور هذه الفكرة، كما رأينا، في جميع الأنحاء لفترة، لتنمو وتثمر بأشكال مختلفة في حقول مختلفة. كانت هذه فرصة لجمعها معًا. عرض الكتاب منهجًا موحدًا وواضحًا لدراسة الإدراك من منطلق الاستدلال البايزي، مرتكزًا فقط على حاسة الإبصار. وقد أثمر عن نجاح الكتاب عدد غيرُ محدود من

[٤] تضمنت بعض النظريات التي كانت موجودة في ذلك الوقت، وأخفقت في فعل هذا، نماذجَ النظام البصري التي تناولناها في الفصل السادس.

الأوراق البحثية في السنوات اللاحقة. وإذا كان بحث أندرسون حول «التحليل المنطقي» قد وضع قواعد بايز على خارطة علم النفس، فإن هذا الكتاب خصَّص لها بلدًا بالكامل.

لفهم مبادئ الإدراك البايزي، لنتناولْ مثالًا. انعكس شعاع من الضوء من زهرة وسقط على العين. الطول المَوجي لشعاع الضوء يبلغ نحو ٦٧٠ نانومترًا. تتمثل مهمة الدماغ في تحديد ماهية الشيء وجوهره، أو ما يحدث بالفعل في العالم وفقًا للطول الموجي الذي تتلقَّاه. من المنظور البايزي، يشير هذا إلى احتمال وجود زهرة معينة، علمًا بأن ثمة شعاعَ ضوءٍ يبلغ طوله الموجي ٦٧٠ نانومترًا يسقط على العين.

تخبرنا قاعدة بايز عما يتعيَّن علينا فعله. أولًا: يتعيَّن علينا إيجادُ مدى إمكانية رؤيتنا لهذا الطول الموجي في ظل ظروفٍ مختلفة. احتمال رؤية ضوءٍ طوله الموجيُّ يساوي ٦٧٠ نانومترًا، إذا كانت الزهرة زرقاء ومضاءة بضوءٍ أبيض ضئيل جدًّا (يقع الضوء الأزرق ما بين ٤٥٠ و٤٨٠ نانومترًا). احتمالُ رؤية ضوء طوله الموجي يساوي ٦٧٠ نانومترًا، إذا كانت الزهرة حمراء ومُضاءةً بضوء أبيض، مرتفعٌ بعض الشيء؛ فالطول الموجي البالغ ٦٧٠ نانومترًا يقع في منتصف الطيف الأحمر. ومع ذلك، فإن احتمالَ رؤية ضوءٍ طوله الموجي ٦٧٠ نانومترًا مُضاء بضوء أحمر؛ مرتفعٌ أيضًا. ونظرًا لأنه من المحتمل أن ينتج عن كلا السيناريوهَين ضوء طوله الموجي يساوي ٦٧٠ نانومترًا، إذا توقفنا عند هذا الحد، فقد نكون غير متأكدين تمامًا من أيهما هو التفسير الأفضل.

لكن نظرًا لالتزامنا بمبادئ بايز، نتذكر أهمية الاحتمال القَبْلي أو المُسبق. احتمال أن يُضاء العالَم بضوء أحمر ضئيل جدًّا بمعظم المقاييس. في حين أن الضوء الأبيض تشيع ملاحظته. وعليه، فإن احتمال السيناريوهات التي تفترض أن الضوء أبيض أعلاه أكبر. بضرب الاحتمال المسبق لكل سيناريو من السيناريوهات المختلفة، في احتمال رؤية ضوء طولُه الموجيُّ ٦٧٠ نانومترًا في ذلك السيناريو، نجد واحدًا فقط يحرز درجاتٍ عاليةً باستخدام هذَين الإجراءَين كلَيهما. وعليه نستنتج وجود زهرة حمراء مضاءة بضوء أبيض.

بالطبع، نحن لا نصل إلى هذا الاستنتاج بطريقة ملموسة في الواقع. فهذه العملية على حد استنتاج هلمهولتز تحدث بشكلٍ غير واعٍ. فهي تحسب الاحتمالات بعيدًا عن ناظِرينا، ولا نعلم إلا النتيجة النهائية. ومن ثم، فهي إجراء مستمر لتكوين الإدراك أشبه بخط إنتاجٍ خفي داخل العقل. في كل لحظة، تُحسب الاحتمالات وتقارَن، وكل عملية إدراك هي جزء من عملية حسابية وفقًا لقاعدة بايز.

مع المجهود الكبير الذي تبذله الدماغ خلال عملية الإدراك، لا عجب في أن تخرج الدماغ بنتائج غريبة وغير متوقعة. في عام ٢٠٠٢ صنَّف فريق من الباحثين من كلٍّ من الولايات المتحدة وإسرائيل سلسلةً بالخدع البصرية الشائعة، التي يقع الأشخاص ضحيةً لها عندما يحاولون تقدير حركة جسم. تضمَّنت حقيقة أن شكل الجسم يؤثر على الاتجاه الذي نظن أنه يتحرك فيه، لدرجة أنه قد يبدو جسمان وكأنهما جسم واحد، رغم أنهما يتحركان في اتجاهَين مختلفَين، كما تبدو الأجسام الباهتة وكأنها تتحرك ببطءٍ أكبر.

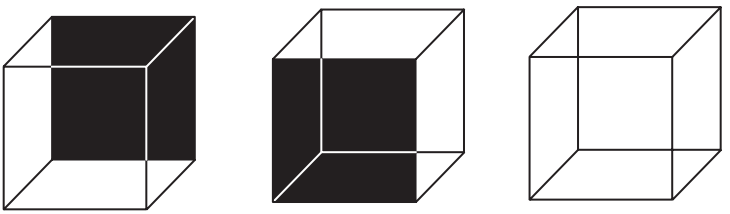
قد يبدو هذا ببساطة أشبه بقائمة إخفاقاتنا، إلا أن الباحثين وجدوا أنه يمكن تفسير كل هذه الهفوات من خلال نموذج بايزيٍّ بسيط. على وجه التحديد، هذه الأنماط تسقط من حساباتنا إذا تبنَّينا احتمالًا مُسبقًا محددًا: أن احتمال أن تكون هذه الحركة بطيئة أكبر من احتمال كونها سريعة. لنتناول الخدعة البصرية الأخيرة. عندما تتعذر رؤية جسم، يكون الدليل الذي يوفره حول حركته ضعيفًا. وفي ظل غياب الدليل، تعتمد قاعدة بايز على الاحتمال المسبق، والاحتمال المسبق يخبرنا بأن الأشياء تتحرك بسرعة. قد يشرح هذا القدر القليل من الرياضيات السبب في مَيل السائقين إلى زيادة السرعة في حالة الضباب، ففي ظل وجود معلومات شحيحة عن حركتهم، يفترض السائقون أن سرعتهم بطيئة جدًّا. جدير بالملاحظة أن منهج بايز يُعيد صياغة حِيَل العقل هذه باعتبارها من سمات الحساب المنطقي. فهو يعرض أيضًا كيف تكون بعض الأخطاء تخمينات منطقية في عالم من الشكوك.

ومع هذا، ثمة جزء آخر من عملية الإدراك. حتى الآن، افترضنا أن التصوُّر الذي نختبره لا بد أن يكون الافتراض الذي له أعلى احتمال. هذا هو الاختيار المعقول، إلا أنه مجرد اختيار، وهو ما يعني احتمالية وجود خيارات بديلة.

لنتناولْ مكعَّبَ نيكر. هذه الخدعة البصرية تقبل أكثر من تفسير: يمكننا رؤية الوجه السفلي يتجه إلى الأمام، وكأن المكعب عبارة عن صندوق يميل للأسفل قليلًا، أو يمكننا رؤية الوجه السفلي في خلفية الصورة، وهو ما يشير إلى أن الصندوق موجهٌ نحو الأعلى. من المرجح أن ينتج عن هذَين الصندوقَين كلَيهما هذا النمطُ من الخطوط؛ لذا سيتأثر القرار بشأن وضع الصندوق بشدة بالاحتمال المسبق. لنفترض أن الصناديق الموجهة إلى الأسفل أكثر شيوعًا بشكلٍ عام. بناءً على هذا الافتراض، وبعد تطبيق قاعدة بايز، فإن احتمال أن يكون الصندوق موجهًا إلى الأسفل عند رؤية هذه الخطوط يساوي ٠٫٥١، واحتمال أن يكون الصندوق موجهًا إلى أعلى يساوي ٠٫٤٩. باتباع المنهج القياسي لربط

**مكعب نيكر**

يمكن إدراك أي من اللوحَين الأسودَين
في المكعَّبين يقع في الخلفية.



شكل ١٠-٢

ذلك بالإدراك، يمكننا القول إن الاحتمال الأكبر من بين الاحتمالَين هو الفائز، في هذه الحالة نجد أن الاحتمال الأكبر هو أن يكون الصندوق موجهًا إلى الأسفل، وينتهي النقاش عندئذٍ!

على الجانب الآخر، فإن الدماغ، بدلًا من اختيار تفسير واحد والتشبث به، من الممكن أن يختار التبديل ما بين التفسيرَين. ومن ثم، قد يبدو الصندوق موجهًا إلى الأسفل في لحظة، وموجهًا إلى الأعلى في أخرى، ويظل إدراك الصندوق مُذَبذبًا ما بين هذا وذاك على نحوٍ متكرر. في هذه الحالة، لا تخبرنا الاحتمالات عن التفسير الذي يتعيَّن علينا الالتزام به، بل تخبرنا عن مقدار الوقت المخصَّص لإدراك كلٍّ منهما.

هذا التبديل هو تحديدًا ما رآه الباحثون في جامعة روتشستر (بما فيهم ديفيد نيل) في تجربة أجريت عام ٢٠١١. دمج القائمون على التجربة نمطَين بصريَّين بحيث لا يتضح ما إذا كان النمط الأول يقع فوق الثاني أم العكس، أي إنه يمكن تفسير الصورة بطريقتَين مختلفتَين. بمطالبة الأشخاص بتوضيح متى تَبدَّل إدراكهم للصورة من تفسير لآخر للمشهد، بمقدورهم تحديد مقدار الزمن الذي استغرقه الأشخاص في تفسير الصورة بكل طريقة. بافتراض أن احتمال أن يكون أحد النمطَين في الأعلى مساويًا لاحتمال كون النمط الثاني في الأعلى (أي إن الاحتمالات المسبقة متساوية)، فإن قاعدة بايز تنص على أن الأشخاص سيرَون النمط الأول يقع فوق الثاني ٥٠ في المائة من الوقت، ويرون النمط الثاني يقع فوق الأول ٥٠ في المائة من الوقت. وهذا بالضبط ما توصلوا إليه. لكن، لاختبار

قدرة قاعدة بايز على التنبُّؤ حقًّا، تعين على العلماء الابتعاد عن السيناريو الذي تتساوى فيه الاحتمالات المسبقة. في سبيل ذلك، تلاعبوا بالصورة بحيث يبدو للعيان أحدُ الأنماط في الأعلى أكثر بقليل من النمط الآخر. أدى هذا إلى تغيير الترجيح، أي احتمال رؤية هذه الصورة بطريقة معينة، بناءً على النمط الموجود بالأعلى بالفعل. وكلَّما غيَّروا الصورة بهذه الطريقة، قضى المساهمون وقتًا أطول في رؤية النمط المفضل في الأعلى، وهو ما يتفق تمامًا مع قاعدة بايز.

حسبما أوضحت هذه الدراسة، يمكن ربط الاحتمالات بالإدراك بطُرق ممتعة، ويُعرف هذا التوصيل بين العلماء باسم «وظيفة اتخاذ القرار». قاعدة بايز نفسها لم تخبرنا عن القرار الذي يتعين علينا اتخاذه؛ فهي تقدم فقط الاحتمالات. قد يُلخَّص إدراكنا في أنه التأويل الأعلى ترجيحًا وقد لا يعتمد على ذلك. قد يكون الإدراك عبارة عن عينات تؤخذ من التأويلات بمرور الوقت وفقًا لاحتمالاتها، وقد لا يكون كذلك. بشكلٍ عام، يمكن أن يكون الإدراك نتاجًا لأي تجميعات معقدة من الاحتمالات. ومن ثم، فإن ناتج قاعدة بايز يُقدِّم تجسيدًا ثريًّا للمعلومات الحسية، تجسيدًا يمكن للدماغ استخدامه بأي طريقة تبدو أكثر منطقية. بهذه الطريقة، فإن الاحتمالات عبارة عن الخيارات الممكنة.

تتمثل إحدى ميزات التفكير في العقل باعتباره يتعامل مع الاحتمالات في أنه يفتح الباب أمام التحديد الكَمي لمفهومٍ صعب المنال: الثقة. ترتبط الثقة بشكلٍ بديهي بالدليل واليقين. عند التجول في غرفة مظلمة، يكون فيها الدليل البصري ضعيفًا، نتحرك ببطء لأننا غير واثقين من أننا لن نصطدم بجدار أو طاولة. في الغرف الساطعة الإضاءة، تأثير الدليل البصري الواضح يزيل الشكوك. صاغت فرضية الثقة البايزية هذا الحدث، من خلال افتراض أن مدى ثقة الشخص في تأويله للعالَم يرتبط ارتباطًا مباشرًا باحتمال صحة هذا التأويل بمعلومية الدليل، أي ناتج قاعدة بايز. في الغرفة المظلمة التي يكون فيها الدليل محدودًا، يكون احتمال صحة أيِّ تأويلٍ للغرفة محدودًا أيضًا، وكذلك الثقة.

اختبر باحثون من المملكة المتحدة مدى مطابقة هذه الفرضية البايزية للبيانات في عام ٢٠١٥. لفعل هذا، طلبوا من الأشخاص البحث عن نمطٍ محدد في صورتَين مختلفتَين تُعرض الواحدة خلف الأخرى مباشرةً وبسرعة. بعد ذلك أوضح الأشخاص الذين أُجريَت عليهم التجربة أيُّ الصورتَين تحتوي على النمط، والأهم مدى ثقتهم في قرارهم. قُورِنت قرارات الأشخاص وثقتهم بتنبؤات نموذج بايز، كما قورنت بالتنبؤات من النموذجَين الحسابيَّين الأبسط. كان نموذج بايز الأكثر ملاءمةً للغالبية العظمى من البيانات، وهو ما يَدعم فرضية الثقة البايزية.

ذكرت دورا أنجيلاكي في حوار أُجرِيَ عام ٢٠١٤: «في المختبر، نفضِّل تبسيط مهمة فهم آلية عمل الدماغ المعقدة. يدرس علم الأعصاب عادة نظامًا حِسيًّا واحدًا في المرة الواحدة. إلا أن هذا لا يحدث في العالم الواقعي».

أنجيلاكي، التي يرجع منشؤها إلى جزيرة كريت، هي أستاذة علم الأعصاب في جامعة نيويورك. وتعزو خلفيتها المعرفية في الهندسة الكهربية إلى رغبتها في البحث عن المبادئ الأساسية لكيفية عمل الأشياء. وكجزء من مجهودها البحثي، تحاول تصحيح انحياز علم الأعصاب إلى البساطة من خلال دراسة كيفية تفاعل الحواس.

الحواس المحددة التي تسعى أنجيلاكي لدمجها هي النظام البصري والدهليزي. يُعد الجهاز الدهليزي مسئولًا عن حاسة سادسة غير شائعة، ألا وهي التوازُن. يتألف الجهاز الدهليزي، الذي يقع عميقًا في الأذن، من مجموعة من الأنابيب الصغيرة وأكياسٍ ممتلئة بالكريستالات. من خلال تناثر السوائل في الأنابيب وحركة الكريستالات، يتيح النظام فرصة قياس مَيل الرأس والتسارع مثل سائلٍ في وعاء مدرَّج. يعمل هذا النظام بالتناغُم مع النظام البصري لتوفير إحساس عام بالمكان والاتجاهات والحركة. عندما يخرج هذان النظامان عن حدود السيطرة، قد ينتاب الفرد شعورٌ غير محبب؛ كدُوارِ الحركة.

وخلال المجهود الذي بذلَتْه لفهم النظام الدهليزي، استعانت أنجيلاكي بطُرق من مصدر غير معروف: تدريب الطيَّارين. يُربط الأشخاص الذين تُجرى عليهم التجربة في كرسي مثبَّت على قاعدة متحركة أشبه بالمستخدم في الأجهزة المحاكية للطيران. يمكن أن تُعطيهم القاعدة دَفعة من السرعة في اتجاهات مختلفة. وفي الوقت نفسه، تمنحهم الشاشة الموجودة أمامهم الشعور البصري بالحركة في صورة نقاط من الضوء تتدفَّق أمامهم، وهي صورة مرئية لا تختلف عما يحدث في «الانطلاق بسرعة الضوء» في سلسلة «حرب النجوم» (ستار وارز). بينما يجعل تدريب الطيارين الحركة الجسدية متماشية مع الحركة البصرية، فإن أنجيلاكي تستخدم هذه الأعداد لمعرفة ما يفعله الدماغ عندما تتعارضان.

قدمت قاعدة بايز تخمينًا بشأن ذلك. نظرًا لأن رياضيات الاحتمالات تتعامل مع المدخلات البصرية والمدخلات الدهليزية، باعتبارهما مصدرَين منفصلين للمعلومات عن العالم الخارجي نفسه، فإنها تقدِّم وسائل بسيطة لدمجهما. وبدلًا من وجود حدٍّ واحد للاحتمال المرجَّح — كما في قاعدة بايز القياسية — يُضرب الاحتمالان المرجحان (واحد من كل حاسة) معًا. لنفترض أن مهمتك هي تحديد ما إذا كنت تتحرك بالفعل نحو اليسار أم

نحو اليمين. لحساب احتمال أنك بالفعل تتحرك جهة اليمين — بمعلومية بعض المدخلات الدهليزية والبصرية — سيُضرب الاحتمال المرجح بأنك سترى هذه المدخلات البصرية، إذا كنت تتحرَّك نحو اليمين، في الاحتمال المرجح بأنك ستستقبل هذه المدخلات الدهليزية إذا كنت تتحرك نحو اليمين. لإتمام العملية، ستُضرب هذه القيمة بعد ذلك في الافتراض المبدئي بأنك تتحرك نحو اليمين. يمكن تطبيق العملية نفسها على الحركة نحو اليسار، والمقارنة بين الاثنين.

وكما تتحول الشائعة إلى حقيقة حين تسمعها من الكثير من الأشخاص المختلفين، فإن الحصول على المعلومات نفسها من العديد من الحواس في حالة قاعدة بايز؛ يُرسِّخ الاعتقاد بصحة تلك المعلومات. عندما تتناغم حركة القاعدة المتحركة وشاشة العرض مع الحركة جهة اليمين، فإن الاحتمال المرجح المرتبط بكلٍّ من المدخلات البصرية والدهليزية يكون مرتفعًا، وكذلك سيكون حاصل ضرب الاحتمالَين المرجحَين أيضًا. وهو ما يجعلك أكثر ثقةً في أنك تتحرك نحو اليمين. أما إذا كانت حركة القاعدة والنقاط متعارضة — بمعنى أن القاعدة تتحرك نحو اليمين في حين تتحرك النقاط نحو اليسار — فإن البيانات الخاصة بالنظام الدهليزي ستظل تشير إلى أن احتمال أن الحركة تتجه نحو اليمين مرتفعٌ، أما النظام البصري فسيوضح أن احتمال أن الحركة متجهة نحو اليمين منخفض. ينتج عن ضرب القيمتَين نتيجة متوسطة ومقدارٌ معتدل من الثقة بطريقةٍ أو بأخرى.

لكن، كما في حالة الشائعات، موثوقية المصدر تعني الكثير. يمكن لأنجيلاكي خلال تجاربها تخفيض ثقة الأشخاص الخاضعين للتجربة في أحد المدخلات الحسية أو الأخرى. لجعل المدخلات البصرية أقل موثوقية، جعلَتْها ببساطة أكثرَ فوضوية. أي إنها بدلًا من أن تجعل النقاط تتحرَّك معًا لتعطيَ إحساسًا قويًّا بأنها تتحرَّك في اتجاهٍ محدَّد، سارت بعض النقاط بعشوائية. كلما زادت النقاط العشوائية، أصبحت المعلومات البصرية أقلَّ موثوقية.

بتطبيق ذلك على الاحتمالات، نرى أن قاعدة بايز تُعدِّل بشكل آلي درجة الاعتماد على المصدر وفقًا لمدى موثوقيته. إذا كانت النقاط تتحرك بشكلٍ عشوائي تمامًا، فلن تُقدِّم المدخلات البصرية أي معلومات حول اتجاه الحركة. في هذه الحالة، يكون احتمال رؤية مدخلاتٍ بصرية عند التحرُّك نحو اليمين، مساويًا لاحتمال رؤية مدخلات حِسية عند التحرك نحو اليسار. ومع تساوي الاحتمالات على الجانبَين، لن تؤثر المدخلات البصرية على القرار في أيٍّ من الحالتَين. وعليه، فإن اتخاذ القرار سيعتمد على المدخلات الدهليزية

(والافتراض المبدئي). أما إذا تحركت ٩٠ في المائة من النقاط حركة عشوائية، و١٠ في المائة أشارت إلى الحركة نحو اليمين، فإن احتمال أن تشير المدخلات البصرية إلى أن الحركة نحو اليمين أعلى بقليل من احتمال كونها نحو اليسار. في هذه الحالة، سيكون للمدخلات البصرية دور في اتخاذ القرار، لكن تأثيرها سيكون طفيفًا. ومع زيادة موثوقية المدخلات البصرية تصبح أكثر تأثيرًا على عملية اتخاذ القرار. بهذه الطريقة، فإن قاعدة بايز تعطي أهمية أكبر للمصدر وفقًا لمدى موثوقيته.

ببحث الاستنتاجات التي توصَّل إليها الأشخاص بشأن حركتهم في هذه التجارب، أوضحت أنجيلاكي ومختبرها مرة أخرى أن تصرُّفات البشر في الغالب تتوافق مع ما جاء في قواعد بايز. عندما يكون الدليل البصري ضعيفًا، فإنهم يعتمدون أكثر على الجهاز الدهليزي. ومع ذلك، ثمة نقطة علينا ملاحظتها، وهي أنه كلما اعتمد الأشخاص على المعلومات البصرية أكثر، كانت أكثر موثوقية، رغم أنهم لا يزالون لا يستخدمونها بالقدر الذي تتوقعه منهم قاعدة بايز. وهو ما يعني أن المدخلات الدهليزية يُعتمد عليها بشكلٍ زائد دائمًا، وهو تأثير رُصِد لدى القرود أيضًا. وقد يكون ذلك نتيجةً لحقيقة أن المدخلات البصرية تكون دائمًا غير واضحة: رؤية النقاط تتحرك قد يكون تأثيرًا ناتجًا عن حركتك أنت، وقد يكون ناتجًا عن حركة النقاط بالفعل. وعليه، فإن المدخلات الدهليزية تُعد بشكلٍ عام مصدرًا أكثر موثوقية؛ ومن ثم تستحق مزيدًا من الأهمية.

بمجرد أن أطلِق العنان لنَهج بايز في الإدراك، انتشر كالنار في الهشيم في جميع جوانب علم النفس. مثلما يحدث في حالة الخدع البصرية، فإن التحديق في البيانات وفحصها لفترة كافية يجعلان تركيب قاعدة بايز يتجلَّى بوضوح. نتيجة لذلك، تكثر الافتراضات المبدئية والاحتمالات المرجَّحة في سياق دراسة الدماغ.

كما رأينا بالفعل، استُحضرت قاعدة بايز لشرح إدراك الحركة، والانتقال ما بين التأويلات المختلفة للخُدع البصرية الغامضة؛ كما في حالة مكعب نيكر، والثقة، والمزج ما بين المدخلات البصرية والدهليزية. وقد طُوِّعت أيضًا لتفسير كيف نتعرض للخداع من جانب الممارسين لفن التكلُّم من البطن، وشعورنا بمرور الزمن، وقدرتنا على اكتشاف الأنماط الشاذة. حتى إنه يمكن تمديدها وتوسيعها لتشمل مهامَّ مِثل تعلُّم المهارات الحركية، وفهم اللغة وقدرتنا على التعميم. مثل هذا الإطار الموحِّد لوصف الكثير من الأنشطة العقلية يبدو نجاحًا ساحقًا. وبالفعل، يُعَد المنهج البايزيُّ، وَفقًا لفيلسوف العقل مايكل ريسكورلا، «أفضل عِلم لدينا حاليًّا للإدراك».

ومع ذلك، لا يمكن أن يُنظَر إلى جميع علماء النفس باعتبارهم من التلاميذ المخلِصين للقسِّ بايز.

بالنسبة للبعض، النظرية التي تدَّعي أنها تُفسِّر كل شيء معرضةٌ لخطر فقدان قدرتها على شرح أي شيء على الإطلاق. يتمثل الوجه الآخر لمرونة المنهج البايزي في أنه يمكن اتهامه أيضًا بأنه يتضمن الكثير من «البارامترات الحرة». البارامترات الحرة بالنموذج هي كل أجزائه المتغيرة، أي كل الخيارات التي يمكن للباحث اتخاذها عند استخدامه. كما أن وجود عدد كافٍ من الضربات من شأنه أن يجعل أسوأ لاعبي الجولف يتمكن في النهاية من وضع الكرة في الحفرة، فإن وجود بارامترات حرة كافية يجعل أي نموذج مناسبًا لأي بيانات. إذا تعارض استنتاج مِن تجربةٍ جديدة مع استنتاج قديم على سبيل المثال، فإن النموذج المفرِط في البارامترات سيتحايل ليشمل الاستنتاجين. إذا كانت مسألة جعل النموذج ملائمًا للبيانات سهلةً، بالقدر نفسه الذي يسهُل به على صراف البنك إعطاؤك الباقي، فهذا يعني أن نجاحه ليس بالأمر الباهر. فالنموذج الذي يمكنه قول أي شيء لا يمكنه أن يخطئ أبدًا. وقد ذكر عالِما النفس جيفري باورز وكولين ديفيس في نقدٍ لمنهج بايز نُشر عام ٢٠١٢: «هذه القُدرة على وصف البيانات بدقةٍ تأتي على حساب قابلية الخطأ».

يوجد بالفعل عدة طرق لدمج جوانب الإدراك في إطار قاعدة بايز. لنأخذ، على سبيل المثال، حساب الاحتمال المرجح. حساب كمية مثل «احتمال رؤية ضوء طوله الموجي ٦٧٠ نانومترًا» مع العلم بوجود زهرة حمراء؛ يتطلَّب بعض المعرفة والافتراضات حول انعكاس الضوء من المواد المختلفة وكيفية امتصاص العين له. دون الفهم الكامل للعالم المادي، سيطرح واضع النموذج لا محالة بعض افتراضاته هنا. ومن ثم سيتمكن من تعديل هذه الافتراضات وتطويعها كي تتطابق مع البيانات. المصدر الآخر للاختيار هو دالَّة القرار. كما رأينا من قبل، يمكن ربط مخرجات قاعدة بايز بالإدراك وقرار الحيوان بأي عدد من الطرق. لهذا الخيار أيضًا القدرة على جعل أي فعل يمكن تفسيره في ضوء قاعدة بايز. وعليه، توجد بالطبع افتراضات مبدئية مزعجة.

كما استوقفت هذه الاحتمالات المسبقة علماء الإحصاء في القرن العشرين، فقد ثبت أنها تمثل تحديًا لعلماء النفس في القرن الحادي والعشرين. إذا كان افتراض صحة احتمال مُسبق، لنقُل احتمال أن تكون حركة الأجسام بطيئة، يساعد على تفسير ظاهرة نفسية، فيمكن أخذ هذا باعتباره دليلًا جيدًا على أن الدماغ يستخدم هذا الاحتمال المسبق

بالفعل. لكن ماذا لو فُسرت ظاهرة مختلفة وفقًا لاحتمال مسبق مختلف، لنقُل الاحتمال القائل بأن حركة الأجسام سريعة؟ هل ينبغي لنا افتراض أن الاحتمالات المسبقة في عقولنا ثابتة بصرف النظر عن الزمن والمهمَّة؟ أم هي مرنة وسلسة؟ وكيف يمكننا معرفة ذلك؟

نتيجة لبواعث القلق هذه، عكف بعض الباحثين على دراسة خواص الاحتمالات المسبقة. عمل عالِم الإدراك الفَرنسي باسكال ماماسيان على بحث احتمال مسبق شائع، على وجه التحديد: افتراض أن الضوء يأتي من الأعلى. لأكثر من قرنَين، وجدت التجارب والأوهام أن البشر احتفظوا بهذا الاعتقاد الضمني عن مصدر الإضاءة في عقولهم، أثناء محاولتهم فَهْم الظلال في أي مشهد. يُعد هذا التخمين منطقيًّا بالنظر إلى موضع مصدر الضوء السائد لدينا، ألا وهو الشمس. في الآونة الأخيرة، راجعت التجارب هذا الاستنتاج بشكلٍ طفيف، ووجدت أن البشر يفترضون بالفعل أن الضوء يأتي من الأعلى ومن ناحية اليسار قليلًا. أجرى ماماسيان اختباراتٍ تكشف عن هذا التحيُّز في المختبر، لكنه وجد أيضًا طريقةً أكثر إبداعًا لبحثه والتحقُّق منه. بتحليل ٦٥٩ لوحةً من متحف اللوفر في باريس، وجد أنه في نطاق ٨٤ في المائة من لوحات البورتريه، و٦٧ في المائة من اللوحات التي لا تجسد أشخاصًا، اتضح أن مصدر الضوء في اللوحات يأتي من ناحية اليسار. ربما أصبح الفنانون يفضلون إعداد الإضاءة بهذه الطريقة لأنها تتماشى مع حدسنا، الأمر الذي يخلق لوحة أكثر إمتاعًا وقابلية للتفسير.

أحد الأسئلة المفتوحة بشأن الاحتمالات المسبقة يتمثل في مَنشئها. يمكن أن تكون الاحتمالات المسبقة طريقة فعالة لترسيخ حقائق حول العالم في أذهاننا، لكن هل هذه الحقائق وُهِبت لنا من الأجيال السابقة من خلال جيناتنا، أم نحن من نكتسبها ونكوِّنها في حياتنا؟ للإجابة عن هذا، عمد القائمون على دراسة أُجريت عام ١٩٧٠ إلى تربية دجاج في بيئة يكون فيها الضوء بالكامل قادمًا من الأسفل. إذا كان الافتراض المسبق أن الضوء يأتي من الأعلى يُكتسب خلال حياتهم، فهذا يعني أن الطيور لن يكون لديها هذا الافتراض. إلا أن الطريقة التي تفاعلت بها الطيور مع المثير البصري، أظهرت أنها لا تزال تعتقد أن الضوء يأتي حتمًا من الأعلى. وهو ما عضَّد من فرضية توارُث الاحتمالات المسبقة.

البشر بالطبع ليسوا كالدجاج، فتطور جهازنا العصبي قد يتيح مزيدًا من المرونة. ببحث تحيُّز أطفال من مختلف الأعمار لمفاهيم مسبقة، وجد عالم النفس جيمس ستون في عام ٢٠١٠، أن الأطفال الذين تقِل أعمارهم عن أربع سنوات أظهروا تحيُّزًا تجاه

فرضية أن الضوء يأتي من الأعلى، إلا أن هذا التحيز أضعفُ من التحيز لدى البالغين. ينمو هذا التحيز تدريجيًّا على مدار السنوات ليصل إلى نفس مستوى القوة لدى البالغين، ما يشير إلى أن الافتراض المسبق الذي يكون فطريًّا بشكلٍ جزئي يُصقَل عن طريق الخبرة. ولمزيدٍ من الدعم لهذه المرونة، أظهر فريق من المملكة المتحدة وألمانيا عام ٢٠٠٤ أن اعتقادنا الراسخ بشأن مصدر الضوء يمكن أن يضعُف. من خلال التدريب، كان المشاركون قادرين على تغيير معتقداتهم المسبقة حول مصدر الضوء بعدة درجات.

أَخْذ احتمال مسبق محدد واختباره من اتجاهات مختلفة عبر العديد من التجارب؛ يساعدان على التأكد من كونه تأثيرًا مرنًا وموثوقًا به. مع خضوع كل اعتقاد مسبق للاختبار يصبح أقل مرونة في النموذج وأكثر جمودًا.

السؤال الآخر الذي تعيَّن على المؤيدين للفرضية القائلة إن الدماغ يعالج المعلومات ويتَّخذ القرارات وفقًا لقاعدة بايز؛ التعاملُ معه، يتعلق بكيفية حدوث ذلك.

في حين أن هناك أسبابًا للاعتقاد بأن الدماغ لا بد أن يستخدم قاعدة بايز، وهناك دليل على ذلك، يظلُّ السؤال حول كيفية حدوث ذلك في الخلية العصبية منطقةً حيوية من مناطق البحث.

حين يتعلق الأمر بالافتراضات المبدئية، يبحث العلماء عن الخزانة التي تُخزن فيها الأجزاء المعرفية الأساسية هذه، وكيفية دمجها في عملية اتخاذ القرار. تُفيد إحدى الفرضيَّات بأنها لعبة أعدادٍ بسيطة. عندما تُكلَّف مجموعة من الخلايا العصبية بتمثيل شيء عن العالم، لنقُل المصدر الذي يأتي منه الصوت في البيئة، فقد يكون لكل خلية عصبية موقعٌ مفضَّل خاص بها. هذا يعني أنها تستجيب بشكلٍ أكبر عندما يأتي الصوت من هذا الموقع. إذا كان الدماغ يحدد مصدر الصوت من خلال تجميع أنشطة كل الخلايا العصبية التي تفضل الموقع نفسه، فإن المواقع التي يفضلها عدد أكبر من الخلايا العصبية يكون لها الأفضلية. إذن، إذا أفاد الافتراض المبدئي بأن الصوت من المرجح أن يأتي من مواقع مركزيةٍ أكثر من الأطراف، يمكن تحقيق ذلك ببساطة من خلال زيادة عدد الخلايا العصبية التي تفضِّل المركز. كما يتضح، اكتشف عالِما الأعصاب براين فيشر وخوسيه لويس بِينْيا هذا المخطط الدقيق في أدمغة البُوم في عام ٢٠١١. تعريف البصمة العصبية للافتراضات المبدئية بهذه الطريقة من شأنه أن يعطي رؤًى بشأن منشأ هذه الافتراضات المبدئية وآلية عملها.

يبني واضعو النظريات العديد من الفرضيات حول آلية عمل قاعدة بايز في الدماغ، ويعمل التجريبيون على اختبارها. ثمة العديد من الطرق التي يمكن للخلايا العصبية

التعاون من خلالها؛ لدمج الاحتمالات المرجحة والافتراضات المبدئية. يجب ألَّا ننظر لهذه الافتراضات المختلفة على أنها في منافسةٍ مع بعضها، وألَّا نتوقَّع أن يُتوَّج افتراضٌ واحدٌ بعينه بالفوز في النهاية. على الرغم من أنه يمكن استخدام قاعدة بايز لتفسير العديد من الجوانب المتعددة للإدراك، فإن التطبيق العملي للقاعدة قد يتخذ العديد من الأشكال والأنماط.

الفصل الحادي عشر

# كيف توجه المكافآت الأفعال

تعلم الفرق الزمني والتعلم المعزز

قضى العالم إيفان بيتروفيتش بافلوف معظم حياته المهنية يتبع شغفًا واحدًا: الهضم. بدأ عمله الأكاديمي عام ١٨٧٠ بأطروحة حول الأعصاب الموجودة في البنكرياس. وخلال عمله أستاذًا لعلم العقاقير طيلة ١٠ سنوات في سان بطرسبرج، ابتكر طُرقًا لقياس العُصارات المِعدية في الحيوانات أثناء ممارستها لأنشطتها المعتادة؛ لإظهار الكيفية التي تتغير بها إفرازات الأعضاء المختلفة استجابةً للطعام أو الجوع. وبحلول عام ١٩٠٤ حصل على جائزة نوبل «اعترافًا بمجهوده البحثي في فسيولوجيا الهضم الذي أدى إلى تغيير الجوانب الحيوية لموضوع الهضم وتوسيعها».

ومن ثم سيكون من المدهش أن يدخل بافلوف التاريخ، باعتباره أحد أكثر الشخصيات تأثيرًا في علم النفس، على الرغم من كل النجاحات التي حقَّقها في مجال الأمعاء.

كان تحول بافلوف إلى دراسة الدماغ بطريقة ما محضَ مصادَفة. في تجربة مصممة لقياس كيف يسيل لعاب الكلاب استجابة للأطعمة المختلفة، لاحظ أن لعاب الكلاب يسيل قبل أن يصل الطعام إليها، كل ما تطلَّبه الأمر صوت المساعد الذي يجلب الأطباق. لم يكن هذا بالأمر غير العادي على الإطلاق. فكثيرٌ من أعمال بافلوف نظرت إلى كيفية تأثُّر الجهاز الهضمي بالجهاز العصبي، إلا أن هذه كانت تفاعلات أكثر وضوحًا كتأثير رائحة الطعام على إفرازات المعدة؛ تفاعلات يُعتقد أنها تحدث بصورة فطرية داخل جسم الحيوان. سيلان اللعاب لدى سماع خطوات الأقدام ليست استجابة متأصلة في الجينات. لا بد أن تُكتسب بالتعلم.

كان بافلوف عالمًا صارمًا لا يرحم. عندما تسببت عمليات إطلاق النار العلنية المتعلقة بالثورة الروسية في تأخُّر أحد الزملاء عن الاجتماع، قال بافلوف ردًّا على ذلك: «ما الفرق الذي تحدثه الثورة عندما يكون لديك تجارب تجريها في المختبر!» لكن هذه الشدة قد تفسح المجال للعمل الدقيق، وعندما قرَّر متابعة إفراز اللعاب فعل ذلك بدقَّةٍ وبشكلٍ كامل.

قدَّم بافلوف للكلب إشارة محايدة، مثل دقات بندول الإيقاع أو صوت طنانٍ كهربي (وليس صوت جرس، كما كان يُعتقد، فقد اعتمد فقط على المثيرات التي يمكن التحكم فيها بدقة). وقد جعل هذه الإشارة المحايدة متبوعة بالطعام. بعد عمليات قَرْنِ الطعام بالإشارة، رصد مدى سيلان لعاب الكلاب استجابة للإشارة فقط. وفيما يلي الشرح التفصيلي المتَّسق الذي قدمه: «حين تسقط دقات بندول الإيقاع على الأذن يبدأ سيلان اللعاب بعد تسع ثوانٍ، وخلال ٤٥ ثانية، تُفرَز ١١ قطرة».

وبتنويع التفاصيل التي يتضمنها هذا الإجراء، سجَّل بافلوف العديد من ميزات عملية التعلُّم. وقد طرح أسئلة مثل: «ما عدد المرات التي اقترنت فيها الإشارة بالطعام كي يحدث التعلم الموثوق؟» (نحو ٢٠)، «هل التوقيت ما بين الإشارة والطعام يُحدِث فرقًا؟» (نعم، لا بد أن تبدأ الإشارة قبل وصول الطعام، بشرط ألَّا تبدأ قبلها بكثير.) «هل يتعيَّن على الإشارة أن تكون محايدة؟» (لا، يمكن للحيوانات أن تتعلم إسالة لعابها استجابةً للإشارات السلبية بعض الشيء، مثل استخدام مُهيِّج للجلد)، وغيرها.

هذه العملية، أي قَرْنُ المكافأة المرتقبة بشيء غير مرتبط بها مباشرة إلى أن يترابط الاثنان، تُسمَّى الإشراط الكلاسيكي أو الإشراط «البافلوفي» (ولا عجب في ذلك)، وأصبح عنصرًا أساسيًّا في أبحاث علم النفس المبكرة. وصف مراجعو كتاب بافلوف الذي نشره عام ١٩٢٧، الذي يلخص فيه منهجيته والنتائج التي حصل عليها، بأن للكتاب «أهمية حيوية لكل من يدرس العقل والدماغ» كما أنه «رائع من حيث دقة أساليبه والرؤية العلمية الثاقبة الموضحة في نتائجه ذات الطبيعة الواسعة والشاملة».

غذت أعمال بافلوف في النهاية واحدة من أكبر الحركات في عِلم القرن العشرين، ألا وهي السلوكية. وفقًا لحركة السلوكية، يجب ألا يُعرَّف علم النفس بأنه دراسة العقل، بل دراسة السلوك. ومن ثم، يفضِّل علماء السلوك وصف النشاط الخارجي الملحوظ عن أي تنظير بشأن النشاط العقلي الداخلي؛ مثل الأفكار أو المعتقدات أو المشاعر. بالنسبة إليهم، يمكن فهم سلوك البشر والحيوانات على أنه مجموعة واضحة من ردود الأفعال،

أي عمليات ربط مخرجات العالم الخارجي بالمخرجات التي تُنتِجها الحيوانات. قدمت التجارب الشرطية، كالتجارب التي أجراها بافلوف، طريقةً واضحة ودقيقة لقياس هذه المدخلات والمخرجات، هذه الطريقة استفادت منها دراسات السلوك التي كانت تجتاح المشهد آنذاك.

وعليه، فإنه بعد نشر هذا الكتاب، تحمَّس العلماء لتقليد أبحاث بافلوف وتطويرها. على سبيل المثال، سمع عالم النفس الأمريكي بي إف سكينر عن بافلوف، من خلال مراجعة كتاب كتبها كاتب الخيال العلمي الشهير إتش جي ويلز. أثارت قراءة هذا المقال اهتمام سكينر بعلم النفس ووضعته على الطريق، ليصبح عَلَمًا رائدًا من أعلام الحركة السلوكية، وليجري عددًا غير محدود من الفحوصات الدقيقة لسلوك الفئران والحمام والبشر.[1]

عندما يجمع أي مجال من مجالات العلوم بيانات كَمية كافية، فإنه يتجه إلى النَّمْذَجة الرياضية لفهم هذه البيانات. تعمل النماذج على إيجاد الأنماط المستَتِرة في أكوام من الأرقام، فهي تعمل على تجميع الاستنتاجات المتباينة معًا، وتوضح كيف نشأت هذه الاستنتاجات عن عملية موحدة. في العقود التي تلت بافلوف، كميةُ البيانات التي تمخَّضت عنها التجارب السلوكية على التعلُّم جعلتها جاهزة للنمذجة. في هذا الصدد، أوضح عالم النفس الأمريكي البارز وليام إستس، الذي بحث العمليات الحسابية الخاصة بالتعلم عام ١٩٥٠، أن البيانات الشرطية «منظمة وقابلة للتكرار بما يكفي لجعلها أساسًا تُبنى عليه تنبؤاتٌ كميةٌ دقيقةٌ حول السلوك».

وقد أيدت ورقة بحثية أخرى نُشرت في عام ١٩٥١ فكرة أنه «من بين فروع علم النفس، لا توجد سوى فروع قليلة تُضاهي مجال التعلم فيما يتعلق بتنوع البيانات المتاحة اللازمة لبناء نماذج.» ألَّف هذه الورقة البحثية التي تحمل عنوان «نموذج رياضي للتعلم البسيط» كلٌّ من روبرت بوش وفريدريك موستيلر في مختبر العلاقات الاجتماعية بجامعة هارفارد. كان بوش فيزيائيًّا تحوَّل إلى عالمِ نَفس، وموستيلر عالم إحصاء. لقد

[1] يُعرف نوع الإشراط الذي ارتبط بعمل سكينر باسم «الإشراط الاستثابي»، وهو يتضمن القيام بفعل قبل الحصول على مكافأة. الخط الفاصل بين الإشراط الاستثابي والإشراط الكلاسيكي أو البافلوفي يكون أحيانًا حادًّا وقاطعًا، وأحيانًا يكون ضبابيًّا، والمعلومات في هذا الفصل سترتبط بكليهما في بعض الأحيان.

وضعا معًا، متأثرَين بعمل إستس، صيغةً لتعلم الترابطات بين الإشارات والمكافآت، هذه الصيغة ستكون نقطة الانطلاق لسلسلة من النماذج الدقيقة على نحوٍ متزايد. على مر العقود، أصبح التعلُّم الذي تمثله هذه النماذج معروفًا باسم «التعلُّم المعزز». يُعد التعلم المعزز تفسيرًا لكيفية نشأة السلوك المعقَّد، عندما تكون المكافآت البسيطة والعقوبات البسيطة إشارات التعلم الوحيدة. وهو، في العديد من الجوانب، فنٌّ تعلُّم ما يجب فعله دون أن يُطلب ذلك.

في نموذج بوش وموستيلر، كان التركيز مُنصبًّا على مقياس محدد للعلاقة المكتسبة بين الإشارة والمكافأة: احتمال حدوث استجابة. في حالة كلاب بافلوف، هذا الاحتمال هو احتمال سيلان لعاب الكلاب استجابة للجهاز الطنَّان. استخدم بوش وموستيلر معادلة بسيطة لشرح كيفية تغيُّر الاحتمال في كل مرة تُعطى فيها المكافأة أو لا تُعطى بعد الإشارة.

لنقُل إنك بدأت بأي كلب عشوائي غير مُدرَّب (في الحقيقة أثيرت شائعة تفيد بأن بافلوف حصل على الكلاب التي أجرى عليها تجاربه من خلال سرقتها من الشارع). احتمال أن يسيل لعاب الكلب عند سماع صوت الجهاز الطنان يبدأ من الصِّفر؛ إذ لا يكون هناك في البداية سبب للشك في أن صوت الطَّنين مرتبط بالحصول على الطعام. وبعد ذلك تضغط على الجهاز الطنان ثم تعطي الكلب قطعة من اللحم. وَفقًا لنموذج بوش وموستيلر، بعد تلاقي صوت الطنين بالطعام، احتمال أن يسيل لعاب الكلب استجابة لصوت الطنين يزداد. يعتمد المقدار الدقيق الذي يزيد به الاحتمال على بارامتر يُسمَّى مُعدَّل التعلُّم. تتحكم معدلات التعلُّم في سرعة العملية ككُل. إذا كان معدل التعلم مرتفعًا، فقد تكفي عملية قرنٍ واحدة لتعضيد العلاقة بين صوت الجهاز الطنان والطعام في عقل الكلب. لكن بالمعدلات المتوسطة، تظل احتمالات إسالة اللعاب منخفضة بعد عملية القَرن الأولى، ربما تصل إلى نسبة ١٠ بالمائة وترتفع في كل مرة يتبع الجهاز الطنان الطعام.

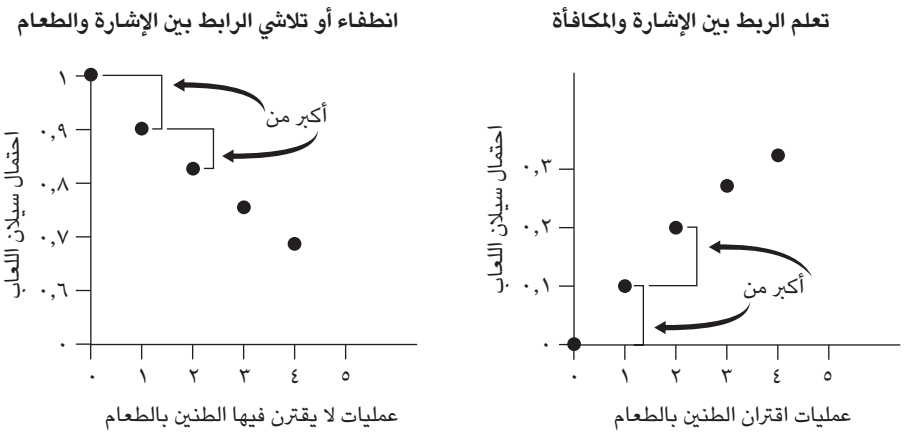
لكن أيًّا كانت قيمة معدل التعلُّم، في المرة الثانية التي يكون فيها صوت الطنين متبوعًا بالطعام، يزداد احتمال أن يسيل اللعاب، لكن ليس بمقدار الزيادة في المرة الأولى. لذا، إذا تراوح من صفر إلى ١٠ في المائة بعد أول عملية قَرن، فسيزداد بمقدار ٩ في المائة فقط، أي ستصل النسبة إلى ١٩ في المائة بعد عملية القَرن الثانية. ويزداد بنحو ٨ في المائة بعد عملية القرن الثالثة. وهذا يعكس، في نموذج بوش وموستيلر (وتجربة الكلاب)، أن التغيُّر الذي يطرأ على الاحتمال مع كل عملية قرن يعتمد على قيمة الاحتمال نفسه.

بعبارة أخرى، يعتمد التعلُّم على مقدار ما تعرفه بالفعل. يُعد هذا الأمر بديهيًّا عند النظر إليه من زاوية محددة. لا شيء يمكن تعلُّمه من رؤية الشمس تُشرق كل يوم. كلما زاد إيماننا بأن شيئًا ما سيحدث، قلَّ تأثرنا بحدوث الشيء فعليًّا. والأمر نفسه ينطبق على المكافآت المتوقعة. على سبيل المثال، نحن لا نُغيِّر رأينا في مديرنا إذا حصلنا على نفس مكافأة العطلة التي تلقيناها خلال السنوات الخمس الماضية. لا تُعدِّل الكلاب استجابتها لصوت الطنين، إلا إذا كان الطعام المقدم بعد صوت الطنين مُختلفًا عن الطعام الذي تتوقعه الكلاب. تنشأ القدرة على تغيير التوقعات فقط عند مخالفتها.

قد تكون هذه المخالفة للأفضل أو للأسوأ. بالنسبة للكلب، أول قطعة لحم بعد صوت الطنين تُمثِّل مفاجأةً رائعةً لها تأثير كبير على توقعاته. لكن بعد تكرار عمليات القَرن، تتغير التوقعات ويصبح سيلان اللعاب لدى سماع صوت الطنين أمرًا طبيعيًّا وتلقائيًّا. عند هذه النقطة، يكون الشيء الأكثر تأثيرًا هو أن يستمع الكلب إلى الجهاز الطنان دون أن يتلقَّى الطعام. سيؤدي هذا الحرمان إلى انخفاض كبير في احتمال سيلان اللعاب في المستقبل، وهو انخفاض يُعادل مقدار الزيادة الذي حدث عند أول عملية اقتران. يُطلَق على هذا الجانب العكسي للتعلُّم، القائم على المكافأة، الذي يتعلم فيه الحيوان بفصل الإشارة عن المكافأة؛ اسم «الانطفاء». مع كل مرة تُعرض فيها الإشارة من دون المكافأة المحددة، تُكسر عملية الانطفاء الرابط؛ بحيث تؤدي إلى تلاشي رد الفعل المكتسب بالكامل في النهاية. أكد بوش وموستيلر على أن نموذجهما يُمثِّل هذه العملية بدقة أيضًا.

في الوقت نفسه الذي كان بوش وموستيلر يُحوِّلان المعلومات حول سيلان اللعاب إلى معادلات، كان هناك رجل آخر على الجانب الآخر من البلاد، يبحث إمكانية تطبيق الرياضيات على بعض أصعب المشكلات في قطاعَي الأعمال والصناعة. لن يُدرك أحد الروابط العميقة والمهمة بين هذه الأبحاث لعقود قادمة.

مؤسسة راند هي مؤسسة فكرية أمريكية تأسست عام ١٩٤٨. ونظرًا لكونها فرعًا غير هادف للربح من شركة دوجلاس للسيارات، كان هدفها الرئيسي مدَّ أواصر التعاون بين العلوم والجيش، الذي تمخضت عنه الضرورة الحتمية خلال الحرب العالمية الثانية. يشير اسم المؤسسة، أي راند، اختصارًا في اللغة الإنجليزية إلى مؤسسة البحث والتطوير، وهو ما يعكس تنوع المشروعات البحثية التي تتعهد بها المؤسسة. على مر السنوات، قدَّم الموظفون إسهاماتٍ ملحوظة لمجالات ارتياد الفضاء والاقتصاد والحَوسبة، وحتى العلاقات الأجنبية.




شكل ١١-١

عمل ريتشارد بيلمان اختصاصيًّا في مجال علم الرياضيات البحثي لدى مؤسسة راند منذ عام ١٩٥٢ حتى عام ١٩٦٥. وقفت الحرب العالمية الثانية حائلًا بين بيلمان، الذي كان مفتونًا بمادة الرياضيات منذ سنوات مراهقته، وبين حلمه ليصبح عالم رياضيات. في البداية، لدعم المجهود الحربي، ترك تدريبه بعد التخرج في جامعة جونز هوبكنز، من أجل تدريس الإلكترونيات العسكرية في جامعة ويسكونسن. ثم انتقل فيما بعد إلى جامعة برينستون حيث درَّس في برنامج التدريب التخصُّصي للجيش، كما عمل على دراساته الخاصة. وقد تمكن في النهاية من إتمام رسالة الدكتوراه في جامعة برينستون، إلا أن ذلك لم يحدث إلا بعد أن جُنِّد للعمل في لوس ألاموس، باعتباره عالمَ فيزياء نظرية لمشروع مانهاتن. ومع ذلك اتضح أن هذه التداخلات لم يكن لها تأثيرٌ كبير على فُرَص نجاحه في حياته المهنية. فقد أصبح أستاذًا دائمًا في جامعة ستانفورد بعد ثلاث سنوات فقط من انتهاء الحرب، وعمره ٢٨ عامًا.

كان الانتقال من العالم الأكاديمي للالتحاق بمؤسسة راند في سن ٣٢ عامًا، حسبما وصفه بيلمان، يعني تحوُّلَه من «مفكر تقليدي إلى مفكر حديث يطبِّق نتائج البحث لمواجهة تحديات المجتمع الحالي.» في مؤسسة راند، طبَّق مهاراته الحسابية على مسائل من العالم الواقعي. شملت هذه المسائل تنظيم مواعيد المرضى لتلقي الرعاية الطبية، وتنظيم خطوط الإنتاج، ووضع استراتيجيات استثمار طويلة الأجل، أو تحديد خطة

الشراء للمتاجر الكبرى. إلا أن بيلمان لم يضطر إلى الذهاب إلى مستشفًى أو مصنع كي يساعد على حل هذه المشكلات. كل هذه المشكلات، وأكثر من ذلك، مجمَّعةٌ تحت مظلة رياضية واحدة مجردة. وبالنسبة إلى عالم الرياضيات، إمكانية حل أيٍّ من هذه المسائل تعني إمكانية حلِّها جميعًا.

يتمثل القاسم المشترك بين كل هذه المسائل في أنها جميعًا «عمليات اتخاذ قرارات متسلسلة». في عملية اتخاذ القرارات المتسلسلة، ثمة شيء يجب تحسينه بأقصى درجة: المرضى الذين يخضعون للفحص، أو السلع المنتَجة، أو المال المكتسب، أو الطلبات المشحونة. وثمة خطوات مختلفة يمكن اتخاذها لفعل ذلك. والهدف هو تحديد مجموعة الخطوات التي ينبغي اتخاذها. كيف يمكن تحقيق أقصى درجة من التحسين؟ ما أفضل طريقة لتسلُّق الجبل؟

نظرًا لعدم وجود الكثير من الأبحاث التي يمكنه الاستعانة بها في هذا المجال، اتجه بيلمان لاستراتيجية مجرَّبة وصحيحة في الرياضيات: تحويل المعارف الحدسية إلى صيغ محددة ودقيقة.[٢] الاستنتاج الرياضي الذي قادته إليه هذه الاستراتيجية يُعرف باسم معادلة بيلمان، والفكرة المباشرة التي تجسدها تتمثَّل في أن أفضل خطة عمل هي تلك التي تكون كل خطواتها أفضل ما يمكن اتخاذُه. على الرغم من أن الفكرة قد تبدو واضحة، عند التعبير عنها بلغة الرياضيات، فإنه حتى العبارات البسيطة قد يكون لها وزنها وتأثيرها.

لمعرفة كيفية استفادة بيلمان من هذه الفكرة البديهية، يتعين علينا فهم كيفية صياغته للمسألة. في البداية، شرع بيلمان في تحديد مدى جودة الخطة، من حيث مقدار المكافأة، سواء أكانت أموالًا أو أدوات أو شحنات، وما إلى ذلك. لنقُل إن لدينا خطة مكونة من خمس خطوات. المكافأة الإجمالية عبارة عن مجموع المكافآت التي تحصل عليها، عند كلٍّ من هذه الخطوات الخمس. لكن، بعد أن تأخذ الخطوة الأولى، يصبح لديك خطة مكونة من أربع خطوات. وعليه، يمكننا القول، بدلًا من ذلك، إن المكافأة الإجمالية الناتجة عن الخطة الأصلية المكوَّنة من خمس خطوات؛ تساوي المكافأة التي تحصل عليها عند

[٢] من المثير للاهتمام أن بيلمان كان على علم بالأعمال المنشورة لبوش وموستيلر، ومع ذلك فإن أبحاثه المتعلقة بهذه المسائل كانت مستقلة عن ذلك.

اتخاذ الخطوة الأولى زائد المكافأة الإجمالية للخطة المكونة من أربع خطوات. والمكافأة الإجمالية الناتجة عن الخطة المكونة من أربع خطوات تساوي المكافأة الناتجة عن اتخاذ الخطوة الأولى، زائد المكافأة الناتجة عن الخطة المكونة من ثلاث خطوات. وما إلى ذلك.

بتعريف المكافأة الخاصة بإحدى الخطط بدلالة مكافأة خطة أخرى، جعل بيلمان تعريفه عبارة عن استدعاء ذاتي. عملية الاستدعاء الذاتي هي العملية التي تنطوي على نفسها. لنُفكرْ في عملية الترتيب الأبجدي، على سبيل المثال. إذا أردت ترتيب قائمة أسماء أبجديًّا، فستبدأ بترتيب جميع الأسماء وَفقًا للحرف الذي يبدأ به الاسم. وبعد ذلك، سيتعين عليك إجراء عملية الترتيب نفسها مرة أخرى على الأسماء التي تبدأ بالحرف نفسه لترتيب هذه الأسماء وفقًا للحرف الثاني، وما إلى ذلك. وهو ما يجعل عملية الترتيب الأبجدي عملية استدعاء ذاتي.

الاستدعاء الذاتي أو التكرارية عبارة عن حيلة شائعة في الرياضيات وعلم الكمبيوتر، ويرجع ذلك جزئيًّا إلى أن تعريفات الاستدعاء الذاتي مرنة؛ إذ يمكن جعلها طويلة أو قصيرة حسب الحاجة. فمثلًا، يمكن تطبيق صيغة حساب المكافأة الإجمالية لخطةٍ مكونة من خمس خطوات، تمامًا كما يُمكن تطبيقها على خطةٍ مكونةٍ من ٥٠٠ خطوة. الاستدعاء الذاتي أيضًا من الناحية النظرية عبارة عن طريقة بسيطة لإنجاز أمرٍ من المحتمل أن يكون صعبًا. كما هي الحال في لفَّات السُّلم الحلزوني، كل خطوة في تعريف الاستدعاء الذاتي تكون مألوفة، لكنها لا تكون مطابقة للخطوات الأخرى، وكل ما علينا هو أن نتبع هذه الخطوات أو الدرجات الواحدة تلو الأخرى حتى النهاية.

يحتوي إطار بيلمان على فكرتَين إضافيتَين، ساعدتا على جَعْل استراتيجيته فعالةً وصالحة لتطبيقها على المسائل الواقعية. تتمثل الفكرة الأولى في تضمين الحقيقة التي يمكن الاعتماد عليها، والتي تفيد بأن المكافأة التي تحصل عليها في الحال قيمتُها أكبر من المكافأة التي تحصل عليها فيما بعد. فعل ذلك بإدخال «عامل الخصم أو التخفيض» إلى تعريف الاستدعاء الذاتي الذي قدمه. إذن، بينما كانت المكافأة الناتجة عن الخطة المكوَّنة من خمس خطوات في الصيغة الأولية؛ مساويةً للمكافأة الناتجة عن الخطوة الأولى زائد المكافأة الكاملة الناتجة عن الخطة المكونة من أربع خطوات، فإن المعادلة التي تتضمَّن خَصمًا تنص على أن المكافأة تساوي المكافأة الناتجة عن الخطوة الأولى زائد ربما ٨٠ بالمائة من المكافأة الناتجة عن الخطة المكونة من أربع خطوات. التخفيض هو طريقة للمقارنة بين وزن الإشباع الفوري مقابل التأجيل، الأمر أشبَه بتطبيق لمثَل «عصفور في اليد خير من ألف على الشجرة» في الرياضيات.

أما الفكرة الثانية، فكانت أكثر تجريدية وثورية. كانت انتقالًا من التركيز على المكافآت إلى التركيز على القيم.

لفهم هذا التحوُّل، دعونا نتناول مالكةَ مشروع صغير، صغير للغاية. أنجيلا هي موسيقية متجولة في محطات مترو أنفاق نيويورك. تعرف أنجيلا أن بمقدورها العزف على الكمان الكهربائي الخاص بها لمدة ٢٠ دقيقة في محطات مترو معينة، قبل أن تطاردها السلطات، وعندئذٍ لا يمكنها العودة. لكنها تحصل على عطايا مختلفة من المحطات المختلفة. يمكن أن تكون المناطق السياحية مربحة جدًّا، في حين أن محطات الركاب الخاصة بمواطني نيويورك تدرُّ عليها عطايا أقل بكثير. تغادر منزلها في شارع جرين بوينت في بروكلين، وتريد أن ينتهي بها الطريق بالقرب من المكان الذي تقطُن فيه صديقة لها في شارع بليكر. ما المسار الذي يتعين عليها أن تسلكه كي تحصل على أكبر قدر من المال إلى أن تصل إلى وجهتها؟

حتى الآن، لاحظنا أنه بعد البدء من موضع وأخذ خطوة في الخطة، وجدنا أنفسنا في ظروفٍ تشبه إلى حدٍّ كبيرٍ ظروف نقطة البدء، باستثناء أننا بدأنا من موضعٍ مختلفٍ وكانت لدينا خطةٌ مختلفة. في عملية اتخاذ القرارات المتسلسلة، تُسمى المواضع المختلفة التي يمكننا التحرك خلالها الحالات، وغالبًا ما يُشار إلى الخطوات التي تتضمنها الخطة بالأفعال. بالنسبة إلى أنجيلا، الحالات هي محطات المترو المختلفة التي يمكنها الوقوف بها. في كل مرة تقوم فيها أنجيلا بفعلٍ (على سبيل المثال، الانتقال من المحطة أ إلى المحطة ب)، تجد نفسها في حالة جديدة (المحطة ب)، هذه الحالة تمنحها مكافأة (المبلغ الذي حصلت عليه من جراء عزفها)، وتُمدها أيضًا بمجموعة جديدة من الأفعال المحتملة (المحطات الأخرى التي ستذهب إليها). بهذه الطريقة، تحدد الحالات الأفعال المتاحة (على سبيل المثال، لا يمكنك الانتقال مباشرة من شارع جرين بوينت إلى تايمز سكوير) كما تحدد الأفعال الحالات التالية.

هذا التفاعل، الذي تؤثر فيه الأفعال التي يجري القيام بها باعتبارها جزءًا من خطة على الأفعال المتاحة في المستقبل، يُعدُّ من العوامل التي تزيد من صعوبة عمليات اتخاذ القرارات المتسلسلة. ما فعله بيلمان هو أخذُه هذه المجموعة من الحالات والأفعال والمكافآت وقلبها رأسًا على عقِب. وبدلًا من التحدث عن المكافأة المتوقعة من سلسلة من الأفعال، ركز على القيمة التي تتمتع بها أي حالة مُعطاة.

في لغة الحياة اليومية، تُعد القيمة من المفاهيم المجردة الغامضة. فهي تثير أفكارًا حول المال والقيمة، لكنها أيضًا تثير أفكارًا أعمق عن المعنى والمنفعة التي يصعب تحديدها. ومع ذلك، فقد عرَّفت معادلةُ بيلمان القيمةَ على وجه الدقة. باستخدام نفس البنية التكرارية المشار إليها آنفًا، عرَّف بيلمان قيمة الحالة على أنها المكافأة التي تحصل عليها في تلك الحالة، زائد القيمة المخصومة للحالة التالية. ستلاحظ في هذا التعريف عدم وجود أي مفهوم واضحٍ لخطة، إذ تُعرَّف القيمة من خلال القيمة الأخرى فقط.

ومع ذلك، فإن هذه المعادلة تعتمد على المعرفة بالحالة التالية. دون خطة لتوضيح الفعل الذي جرى القيام به، كيف لنا أن نعرف ما ستكون عليه الحالة التالية؟ ومن هنا تجلَّى الحدس الأصلي، أي الفكرة التي تفيد بأن أفضل خطة مكونة من أفضل الأفعال. لحساب القيمة في الحالة التالية، ما عليك إلا افتراض أنه جرى القيام بأفضل فعل ممكن. وأفضل فعل ممكن هو الفعل الذي يُفضي إلى الحالة التي لها أعلى قيمة. عند الخوض في مناقشات متعلقة بالقيمة تتلاشى الخطة نفسها.

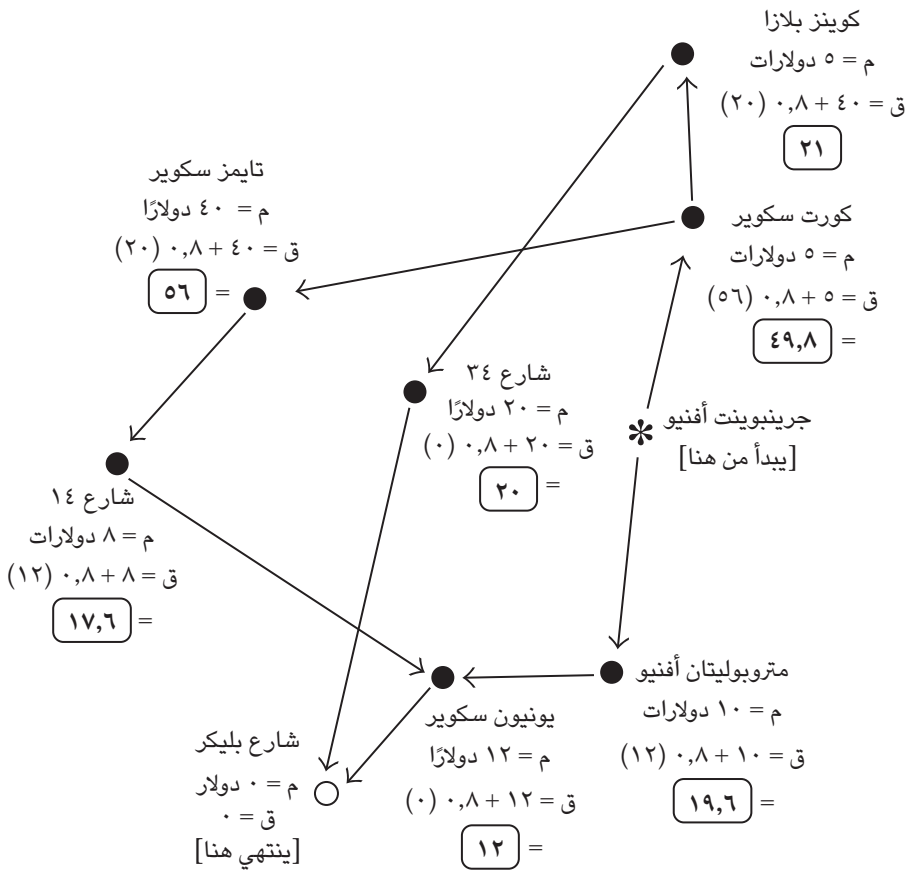
إذن، كيف يساعد ذلك أنجيلا؟ بالنظر إلى خريطة محطات المترو والتبرعات المالية التي تتوقع الحصول عليها من كل محطة، يمكننا حساب «دالَّة القيمة». دالة القيمة ببساطة هي القيمة المرتبطة بكل حالة (في هذا السيناريو، مرتبطة بكل محطة). يمكننا حساب ذلك من خلال البدء من نقطة النهاية والعودة إلى الخلف. بمجرد أن تصل أنجيلا شارع بليكر ستذهب مباشرة إلى بيت صديقتها، ولن تعزف أيَّ موسيقى في الطرق، وعليه فإن المكافأة التي ستحصل عليها عند الوصول لوجهتها الأخيرة تساوي صفرًا من الدولارات. نظرًا لعدم وجود محطات أخرى من هذه النقطة، فإن قيمة شارع بليكر تساوي صفرًا. بالرجوع إلى الخلف والنظر إلى الموقف من منظور آخر، يمكن حساب قيمة كلٍّ من يونيون سكوير وشارع ٣٤، من حيث المكافأة المتوقعة هناك وقيمة شارع بليكر. تستمر هذه العملية إلى أن تُحسب قيمة كل محطة.

مع توفر هذه القيم لدى أنجيلا، أصبح بمقدورها التخطيط لرحلتها. بالانطلاق من شارع جرين بوينت، يمكنها أن تستقل القطار المتجه إلى كورت سكوير أو شارع ميتروبوليتان. أيهما تختار؟ بالتفكير في المكافآت المحتملة من الحالتين، يتضح أن شارع متروبوليتان الخيار الأفضل؛ وذلك لأنه يوفر ١٠ دولارات في حين أن كورت سكوير لا يوفر سوى خمسة دولارات. لكن بالنظر إلى دالة القيمة، يكون كورت سكوير الخيار الصحيح. ذلك لأن دالة القيمة تهتمُّ بالحالات التي يمكنك الوصول لها في المستقبل، كما

أنه من كورت سكوير يمكن لأنجيلا الحصول على المكافأة الكبرى بالمرور على تايمز سكوير. يمكن لأنجيلا أيضًا الانتقال إلى ساحة كوين بلازا من كورت سكوير، لكن هذا ليس له صلة هنا؛ لأن دالة القيمة تفترض أن أنجيلا ذكية. فهي تفترض أنها ستنتقل من كورت سكوير إلى تايمز سكوير؛ لأن تايمز سكوير هو الخيار الأفضل. بصفة عامة، اتباع دالة القيمة سيقود أنجيلا نحو تايمز سكوير يليه شارع ٣٤، وهو ما سيقودها في النهاية إلى وجهتها في شارع بليكر. بشكل إجمالي، ستكسب ٦٥ دولارًا، وهو أقصى ما يمكن أن يقدمه أي مسار على هذه الخريطة.

كان انتقال بيلمان إلى التركيز على دالة القيمة مُهمًّا؛ لأنه أصلح عيبًا في الإطار الأصلي للمسألة. نحن نبدأ بمحاولة حساب المكافأة الإجمالية التي يمكننا الحصول عليها من خطةٍ مُعطاة. لكن عند حل عملية اتخاذ قرارات متسلسلة، لا يكون لدينا خطة. في الواقع، الخطة هي ما نحاول البحث عنه. لكن بمجرد أن نعرف دالة القيمة تكون الخطة بسيطة، وهي اتباع دالة القيمة. وكما يُترك فُتات الخبز في طريق الغابة كي يدُل على الطريق، تخبرك دالة القيمة عن المسار الذي يتعين عليك أخذه. كل ما على الشخص الذي يبحث عن أكبر مكافأة أن يطمع في أن يختار الحالة التالية التي لها أكبر قيمة. يمكن اختيار جميع الأفعال بناءً على هذه القاعدة البسيطة.

تحدث بعض الأشياء الممتعة نتيجة للخصم الذي يكون جزءًا من تعريف القيمة. على سبيل المثال، انظر إلى الخيارات المتاحة لدى أنجيلا من تايمز سكوير. يمكنها إما التوجه إلى شارع ٣٤ والحصول على ١٢ دولارًا، ثم ينتهي بها المطاف في شارع بليكر، أو يمكنها الذهاب إلى شارع ١٤ والحصول على ٨ دولارات، ثم الذهاب إلى كورت سكوير والحصول على ١٢ دولارًا، ثم ينتهي بها المطاف في شارع بليكر. وكلا المسارين سيجعلانها تكسب ٢٠ دولارًا في المجمل. لكن قيمة شارع ٣٤ تساوي ٢٠، في حين أن قيمة شارع ١٤ تساوي ١٧٫٦ (تُحسب على صورة ٨ + ٠٫٨ × ١٢)، وهو ما يوضح أن شارع ٣٤ خيار أفضل. هذا يوضح كيف يمكن أن يُفضي خصم قيمة المكافآت المستقبلية (تقليل أهميتها) إلى خطط لها خطوات أقل، فإذا كان مقدار المكافأة محدودًا، فسيكون من الأفضل أن نحصل عليها بشكل أسرع بدلًا من استغراق وقت أطول للحصول عليها. الخصم يعني أيضًا تجاهل حتى المكافآت ذات القيمة العالية إذا كانت بعيدة جدًّا. إذا كانت أنجيلا ستجني ٧٥ دولارًا من محطة قطار في نيوجيرسي، فقد لا يؤثر ذلك على اختيارها عند تركها




«م»: المال المكتسب في كل محطة.
«ق»: قيمة كل محطة.
في ظل وجود خصم مقداره ٨٠ في المائة، فإن ق = م + ٠,٨ ق (من قيمة المحطة التالية)

شكل ١١-٢

لمنزلها. فتأثير المكافأة على دالة القيمة أشبه بتموُّج نتج عن سقوط حجر في الماء. يكون تأثير المكافأة أقوى في الحالات المجاورة، لكن تضعف قوته كلما ابتعدنا.[٣]

قد يبدو هذا التعريف الفني للقيمة، القائم على عوامل الخصم والتكرارية والحالات، بعيدًا كل البُعد عن كلمة القيمة التي نستخدمها في لغتنا اليومية. إلا أن هذه الدلالات العامية للكلمة تكون حاضرةً بقُوةٍ في هذه المعادلة. لماذا نُقدِّر النقود؟ نحن لا نُقدِّرها لأن اقتناء عملاتٍ ورقيةٍ أو معدنيةٍ ينطوي على مُتعةٍ في حد ذاته، بل نقدِّرها بسبب المزايا التي يمكننا الحصول عليها في المستقبل باقتناء هذه العملات. ومن ثَم، فإن قيمة النقود تقتصر على ما يمكننا الحصول عليه فيما بعدُ مقابل هذه النقود، وما يمكننا الحصول عليه فيما بعد يدخل في تعريف بيلمان للقيمة.

الجهد البحثي الذي بذله بيلمان لتأطير عمليات اتخاذ القرارات المتسلسلة بهذه الطريقة؛ سمح له أن يصبح «المفكر العصري» الذي أراد أن يكونه عند الانتقال إلى مؤسسة راند. في السنوات التي أعقبت أبحاثه الأولى التي تصف هذا الحل، بدأ عددٌ لا نهائيٌّ من الشركات والكيانات الحكومية بتطبيقه في العالم. وبحلول سبعينيات القرن العشرين، طُبقت أفكار بيلمان على مسائل متنوعة مثل تصميم نظام الصرف الصِّحي، وتنظيم مواعيد الخطوط الجوية، وحتى إدارة الأقسام البحثية في الشركات الكبرى مثل مونسانتو. استُخدِمت هذه التقنية تحت مسمَّى «البرمجة الديناميكية»، وهي عبارةٌ لطيفة صاغها بيلمان، بهدف منع كبار المسئولين العسكريين المُعادين للرياضيات من التدخُّل أو التسبُّب في المتاعب. في هذا الصدد، أوضح بيلمان في سيرته الذاتية أن «فترة خمسينيات القرن العشرين لم تكن سنوات جيدة بالنسبة إلى الأبحاث الرياضية.» وأضاف أن «القوات الجوية التي كان يرأسها بشكلٍ أساسيٍّ آنذاك [تشارلز] ويلسون وظَّفت مؤسسة راند. عندئذٍ، شعرتُ بأنه يتعين عليَّ فعل شيءٍ لوضع درعٍ تخفي حقيقة عملي بالرياضيات داخل مؤسسة راند، عن ويلسون والقوات الجوية ... ومن ثم، اعتقدت أن مصطلح

[٣] ونظرًا لأن قوة الخصم تتحكم في الموازنة بين الاهتمام بالحاضر مقابل الاهتمام بالمستقبل، يمكن أن يكون لها تأثيراتٌ كبيرةٌ على القيمة؛ ومن ثم على الأفعال المختارة. افترض العلماء أنه يمكن فَهْم اضطرابات، مثل الإدمان ونقص الحركة وتشتت الانتباه، من خلال تخفيض المكافأة غير المناسب. سنتناول المزيد حول الإدمان فيما بعد.

البرمجة الديناميكية يُعد اسمًا جيدًا. وهو اسمٌ لا يمكن حتى لعضوٍ في الكونجرس الاعتراضُ عليه. ولهذا استخدمته ليكون مظلةً لأنشطتي».

عند تطبيق الطريقة في أيٍّ من هذه المواقف، كان يتعين على المهندسين إيجاد طريقةٍ لحساب دالة القيمة. في بعض الحالات، كما في حدث في مثال محطات مترو الأنفاق، تكون بنية المسألة بسيطة بما يكفي لتكون العملية الحسابية مباشرة. إلا أن المسائل البسيطة نادرًا ما تكون واقعية. فالعالم الواقعي عبارة عن عددٍ كبيرٍ من الحالات الممكنة، وهذه الحالات يمكن أن تتَّصل ببعضها بطرقٍ مركبة، أو حتى غير مؤكدة، ويمكنها فعل ذلك من خلال العديد من الأفعال المختلفة. بُذِلت جهودٌ عديدة في إيجاد دالة القيمة في هذه المواقف الأكثر صعوبة. ولكن حتى مع الأساليب الذكية، عادةً ما يتطلَّب تطبيق البرمجة الديناميكية قدرات حاسوبية قصوى من أجهزة الكمبيوتر المتاحة آنذاك. كان حساب دالة القيمة يمثل دائمًا عُنُقَ الزجاجة في العملية. ومن دون طريقة لإيجاد دالة القيمة، ستبقى الاحتمالات الكاملة التي يمكن أن تقدمها إسهامات بيلمان بعيدة المنال.

ثمة مفارقة في إرث بافلوف. كان تأثيره الفوري يتمثل في إطلاق مفهوم السلوكية، وهي حركة تَتَفانى بشكلٍ محموم — يضاهي التفاني في العبادات — في إغفال العقل، وتركز فقط على السلوك الذي يمكن قياسه مباشرة. إلا أن النماذج الرياضية التي تمخَّض عنها هذا الإرث وجدت نجاحها في الاتجاه الآخر، أي من خلال التعمُّق داخل العقل، وذلك لأن تجسيد التعلم المعزز في المعادلات كان يتطلب استخدام مصطلحات تمثل مفاهيمَ عقليةً خفِيَّة.

ظهر أحد الامتدادات الشائعة لنموذج بوش وموستيلر بعد ٢٠ عامًا من ظهور النموذج، أي عام ١٩٧٢، وطُوِّر على يد عالِمَي نفسٍ من جامعة ييل؛ وهما: روبرت ريسكورلا وآلان فاجنر. عمم ريسكورلا وفاجنر نموذج بوش وموستيلر ليشمل نطاقًا أوسع من إعدادات التجارب، كما جعلاه قادرًا على تجسيد العديد من النتائج. أول تغيير أجرياه هو تعديل المقياس الذي يحاول النموذج تفسيره.

كان «احتمال حدوث استجابة» لبوش وموستيلر محددًا ومحدودًا جدًّا. بدلًا من ذلك، أراد ريسكورلا وفاجنر تجسيد قيمة أكثر تجريدًا أطلقا عليها اسم «قوة الربط». قوة الربط هذه بين الإشارة والمكافأة عبارةٌ عن شيءٍ موجودٍ في عقل المشارك، وهو ما يجعلها غير قابلةٍ للقياس المباشر، إلا أن التجارب المختلفة يمكنها محاولة قياسها بطرائق

مختلفة. قد يتضمَّن ذلك قياس احتمال حدوث استجابة، مثل احتمال أن يسيل اللعاب، كما يتضمن أيضًا قياسات أخرى، مثل مقدار سيلان اللعاب، أو بعض السلوكيات، مثل النُّباح أو الحركة. بهذه الطريقة، أدخل ريسكورلا وفاجنر نموذج بوش وموستيلر في إطار عمل أوسع.

اتسع نموذج ريسكورلا وفاجنر أيضًا ليشمل سِمةً شائعة من سمات تجارب الإشراط؛ ألا وهي «الحجب». يحدث الحجب عند قَرْن إشارةٍ أوليةٍ بمكافَأة، وبعد ذلك تُعطى إشارة ثانية جنبًا إلى جنب مع الإشارة الأولى، ويتمُّ قَرن الاثنتَين بالمكافأة. لذا، على سبيل المثال، بعد أن تعلم الكلب ربط صوت الجهاز الطنَّان بالطعام، سيسلط القائم على التجربة الضوءَ في نفس وقت إصدار صوت الطنين، ثم يعطي للكلب الطعام. في نموذج بوش وموستيلر، كانت الإشارات تعامل على حِدة تمامًا. وعليه، فإنه عند إقران الضوء والطنين بالطعام لعددٍ كافٍ من المرات، لا بد أن يبدأ الكلب في ربط الضوء بالطعام في الوقت الذي يتعلَّم فيه ربطه بجهاز الطنين. بناءً على ذلك، سنتوقَّع أن تعريض الكلب للضوء فقط سيُسيل لعابه. في الواقع، ليس هذا ما حدث، فلعاب الكلاب لم يَسِل استجابةً للضوء فقط. وجود جهاز الطنين حجب إمكانية ارتباط الضوء بالطعام.

وهذا يقدِّم دليلًا آخر على أن الأخطاء تدفع عملية التعلُّم. على وجه التحديد، الأخطاء حول المكافأة المتوقعة. عندما يسمع الحيوان صوت الطنين يعلم أن الطعام قادم. إذن، عندما يصل الطعام، لا يكون هناك خطأ في توقُّع الكلب للمكافأة. وكما رأينا فيما سبق، هذا يعني أن الكلب لا يغيِّر معتقداته بشأن جهاز الطنين. وهو ما يعني أيضًا أنه لا يغيِّر معتقداتِه حول أي شيءٍ آخر. وسواء أكان هناك ضوء في نفس وقت إصدار صوت الطنين أم لا، فلن يكون لهذا صلة بالأمر. لن يكون للضوء تأثيرٌ على الجائزة المتوقعة، أو الجائزة التي حصل عليها، أو الفرق بينهما، الذي يعرِّف خطأ التنبؤ، ودونَ خطأ يبقى كل شيء ساكنًا دون تغيير. ومن ثم، يمكننا القول إن خطأ التوقع هو زيت التشحيم الذي يساعد على تدوير عجلة التعلم بسلاسة.

وبهذا، أجرى ريسكورلا وفاجنر تحديثًا على قوة الربط بين إشارةٍ ومكافأة، هذه القوة لا تعتمد على قوة ارتباط هذه الإشارة بالمكافأة فحسب؛ بل تعتمد على مجموع قوى الربط لكل الإشارات الموجودة. إذا كانت إحدى قوى الربط هذه عالية (لنقُل إذا كان جهاز الطنين موجودًا)، فإن وجود المكافأة لن يغير أيًّا منها (ارتباط المكافأة بالضوء لن يُعرف أبدًا). عملية تجميع المعلومات من إشارات مختلفة من الأمور التي يتعين على الحيوان القيام بها داخل عقله، الأمر الذي يُظهر رفضًا للمنهج السلوكي والتحول إلى العقل.

لكن اللحظة الفارقة في التعلم المعزز جاءت في فترة ثمانينيات القرن العشرين، بفضل أبحاث عالم كمبيوتر كَندي يعقصُ شعره كذيل حِصان يُدعى ريتشارد ساتون، وأندرو بارتو المشرف على رسالة الدكتوراه الخاصة به. درس ساتون كلًّا من علم النفس وعلوم الكمبيوتر، كما قضى بارتو وقتًا طويلًا يقرأ في مؤلفات علم النفس. ثبتت فاعلية هذا التعاون بين الرجلَين؛ فالأبحاث المشتركة بينهما استفادَت من المجالَين وعادت بالنفع عليهما.

أزال ساتون العنصر الملموس الأخير من النموذج؛ المكافأة نفسها. حتى ذلك الحين، تركزت لحظة التعلم حول الوقت الذي تُعطى فيه المكافأة أو تُمنع. إذا شممت رائحة دخان من شمعة مشتعلة، ثم حصلت على قطعةٍ من كعكة عيد الميلاد، فستقوى الرابطة بين الأمرَين. لكن إذا انطفأت في نهاية احتفال ديني لا ترتبط على الأغلب بالكعك؛ فمن ثم تضعف الرابطة بينهما. في كلتا الحالتين، تكون الكعكة في حد ذاتها مُتغيرًا مُهمًّا. فوجود هذا المتغير أو عدمه يُعد أمرًا أساسيًّا. أي شيء يصلح لأن يكون إشارة، لكن لا بد أن تكون المكافأة عنصرًا أساسيًّا كالطعام أو الشراب أو الجنس. لكن بمجرد أن نبدأ بربط الدخان بكعكة عيد الميلاد، قد نلاحظ بعض التنظيمات الأخرى. على سبيل المثال، عادة ما يسبق الغناء رائحة الدخان، وقد يسبق الغناء ارتداء الأشخاص لقبعات سخيفة. لا شيء من هذه الأشياء يصلح لأن يكون مكافأة في حد ذاته (لا سِيَّما الغناء، في معظم الحفلات)، لكن هذه الأشياء تُكوِّن سلسلة يرتبط كل عنصر فيها بدرجة أو بأخرى بالمكافأة الأولية. معرفة هذه المعلومات يمكن أن يكون مفيدًا: فإذا أردنا الحصول على كعك، فقد يساعدنا الانتباه إلى وجود القبعات السخيفة.

لم يكن لدى ريسكورلا وفاجنر أي طريقة لأخذ رابط بين إشارة ومكافأة من موقف وتطبيقه على موقف آخر، فبالنسبة لهما لم تكن هناك آلية لجعل الإشارة المرتبطة بمكافأة معينةٍ هي نفسها المكافأة في مواقف أخرى. لكن ساتون فعل ذلك. في خوارزمية قدمها ساتون تُعرف باسم «تعلم الفرق الزمني»، تُعدَّل توقعاتنا استجابةً لأي مخالفة تحدث لهذه التوقعات. أثناء قطع الردهة التي تفضي إلى مكتبك، على سبيل المثال، تكون توقعاتك بشأن الحصول على مكافأة منخفضةً للغاية. لكن عندما تسمع زملاءك في غرفة المؤتمرات يبدءون في ترديد المقطع الأول من أغنية عيد الميلاد، فإن هذا يخالف توقعاتك. لا بد من تعديل التوقعات؛ فأنت الآن في حالة تلُوح فيها المكافأةُ في الأفق. وهنا يحدث تعلم الفرق الزمني؛ فقد تختار دخول غرفة المؤتمرات وتكمل الأغنية وتشارك في إطفاء

الشموع وتتناول الكعك. عند قيامك بهذه الأفعال، لن يحدث مزيدٌ من المخالفات؛ ومن ثَم لن يكون هناك مزيدٌ من التعلُّم. وهكذا، فإن تلقي المكافأة في حد ذاته لا ينتج عنه أي تغيُّرات. الحالة الوحيدة التي حدث فيها التعلم كانت في الردهة، حين كنت على بُعد عدة خطوات من المكافأة.

لكن، ما الذي يُتعلَّم في هذه الحالة بالضبط؟ ما المفهوم العقلي الذي تغيَّر في الرواق؟ الأمر لا يتعلق بربط إشارة بمكافأة، بشكل مباشر على الأقل. بل يتعلق أكثر بإشارة تقودك نحو الطريق إلى المكافأة إذا اتَّبعت الخطوات الصحيحة.

قد يبدو هذا مألوفًا لأن ما يساعدك على تعلُّم الفرق الزمني هو دالةُ القيمة. في كل لحظة زمنية، وفقًا لهذا الإطار، يكون لدينا توقعات — لها علاقة بشكل أساسي بشعورنا بمدى بُعدنا عن المكافأة — تحدد قيمة الحالة التي نكون فيها. وبمرور الزمن أو القيام بأفعالٍ في العالم، قد نجد أنفسنا في حالاتٍ جديدةٍ لها قيم مرتبطة بها. إذا توقَّعنا قيمة هذه الحالات الجديدة، فسيكون كل شيءٍ على ما يُرام. أما إذا كانت قيمة الحالة الحالية مختلفةً عما توقعناه، عندما كنا في الحالة السابقة، فنكون بذلك قد ارتكبنا خطأ. والأخطاء تحث على التعلم. على وجه التحديد، إذا كانت قيمة الحالة الحالية أكبر من، أو أصغر من، توقعاتنا بشأنها عندما كُنا في الحالة السابقة، فإننا نغير قيمة الحالة السابقة. بمعنى أننا نأخذ المفاجأة التي حدثت الآن، ونستخدمها لتغيير توقعنا بشأن الماضي. وبهذه الطريقة، فإننا عندما نجد أنفسنا في هذه الحالة السابقة مرة أخرى، فسنتنبَّأ بالمستقبل بشكل أفضل.

افترض أنك تقود السيارة مُتجهًا إلى مدينة ملاهي. في هذه الحالة، تُقاس قيمة موقعك بمدى بُعدك عن الوجهة المرغوب فيها. بعد أن تغادر بيتك، تتوقَّع أنك ستصل خلال ٤٠ دقيقة. انطلقتَ بالسيارة مباشرةً لمدة خمس دقائق ووصلت إلى الطريق السريع. أصبحت تتوقع الآن أن تصل خلال ٣٥ دقيقة. بعد ١٥ دقيقة من القيادة على الطريق السريع، اتخذت مخرجًا. أصبح زمن الوصول المقدر ٢٠ دقيقةً حاليًّا. لكن بمجرد الخروج من الطريق السريع، والتوجُّه لشارعٍ جانبي اصطدمت بازدحامٍ مُروري. وأنت تجلس في السيارة التي تتحرك بالكاد، علمت أنك لن تصل إلى الملاهي قبل ٣٠ دقيقة أخرى. قفز وقت الوصول المتوقع بمقدار ١٠ دقائق، وهو خطأ فادح.

ما الذي يجب علينا تعلُّمه من هذا الخطأ؟ لو كان لديك رؤيةٌ دقيقةٌ عن العالم الواقعي، لَكنت توقعت أن تقود السيارة لمدة ٣٠ دقيقة أخرى، في اللحظة التي أخذت

فيها المخرج. إذن، يخبرك تعلم الفرق الزمني أن عليك تحديثَ قيمة الحالة المرتبطة بهذا المخرج. بمعنى أنك تستخدم المعلومات التي تلقَّيتها عند حالةٍ معينة (أزمة مرورية في الشارع الجانبي) لتحديث أفكارك حول قيمة الحالة السابقة (المخرج). وهذا قد يعني أن المرة التالية التي تقود فيها السيارة لمدينة الملاهي هذه، ستتجنب هذا المخرج وستختار مخرجًا غيره بدلًا من ذلك. ومع ذلك، لن تحتاج إلى الوصول للملاهي متأخرًا ١٠ دقائق بالفعل كي تتعلم من هذا الخطأ؛ إذ يكفي توقع حدوث ذلك من مجرد رؤية المرور.

ما أوضحته خوارزمية ساتون هو أنه من خلال الاستكشاف وحده — طريقة المحاولة والخطأ البسيطة — يمكن للبشر والحيوانات وحتى الذكاء الاصطناعي في النهاية معرفةُ دالَّة القيمة الصحيحة للحالات التي يستكشفونها. كل ما يحتاجه الأمر هو تحديث توقعاتهم عند تغيُّر التوقعات، وهو ما وصفه ساتون بأنه «تعلُّم تخمين من تخمين».

كان تعلم الفرق الزمني، الذي يُعد امتدادًا لدراسة بيلمان حول البرمجة الديناميكية، قادرًا على حل المسائل الواقعية. فقاعدة التعلُّم البسيطة التي تنطوي على تحديث المعرفة لحظةً بلحظة؛ جعلت تعلم الفرق الزمني جذابًا من منظور الحَوسبة؛ فهي لا تتطلب الكثير من الذاكرة التي كانت مطلوبة، لتخزين المجموعة الكاملة من الأفعال التي تسبق المكافأة قبل التعلُّم منها. فقد نجحت أيضًا. تجسَّدت إحدى مظاهر قوتها في «تي دي-جامون»، وهو برنامج كمبيوتر مدرَّب عن طريق تعلم الفروق الفردية للعب الطاولة. ألعاب الطاولة عبارة عن اختبارات مفيدة جدًّا للتعلم المعزز؛ لأن المكافآت تأتي غالبًا في نهاية اللعبة، في صورة مكسب أو خسارة. وعليه فإن استخدام مثل هذه الإشارة التقريبية البعيدة، لتوجيه استراتيجية اللعب منذ الحركة الأولى، يُعد تحديًا. إلا أن هذا التحدي يمكن لتعلُّم الفرق الزمني مواجهتُه. لعِبَ برنامج «تي دي-جامون»، المصمَّم عام ١٩٩٢ على يد العالم جيرالد تيزورو بشركة آي بي إم، مئات الآلاف من الألعاب ضد نفسه، إلى أن وصل في النهاية إلى مستوى لاعب متوسط دون أن يتلقى أي تعليمات من البشر. ونظرًا لأنه تعلم بمعزل عن البشر، فقد طوَّر أيضًا استراتيجيات لم يُجربها البشر (الذين تأثروا بشكلٍ عام بطريقة لعِب بعضهم، وهو ما جعلهم يلتزمون بمجموعةٍ محددةٍ من الحركات). في النهاية، أثرت الحركات غير المألوفة التي قام بها «تي دي-جامون» بالفعل على نظرية لعبة الطاولة وفَهْمها.

في عام ٢٠١٣، حظيَ تطبيق آخر من تطبيقات تعلم الفروق الزمنية باهتمام شديد. هذه المرة طُبِّق على ألعاب الفيديو. قام العلماء في شركة ديب مايند لأبحاث الذكاء

الاصطناعي بتصميم برنامج كمبيوتر، يُعلِّم نفسه لعِب العديد من ألعاب الأركيد التابعة لشركة أتاري، التي يعود تاريخها إلى سبعينيات القرن العشرين. حصل هذا اللاعب الاصطناعي على تجربة الأتاري بالكامل. المدخلات الوحيدة للخوارزمية كانت عدد وحدات البكسل على الشاشة، لم تُعطَ أي معلومات خاصة عن مسألة أن بعض وحدات البكسل قد تُمثِّل سُفُنًا فضائية، أو مضارب بينج بونج أو غواصات. تضمَّنت الأفعال التي أُتيحَ للبرنامج القيام بها الأزرار القياسية، مثل لأعلى ولأسفل ولليسار ولليمين، وA وB، وتمثَّلت مكافأة النموذج في النتيجة التي قدمتها اللعبة التي كان البرنامج يلعبها. ونظرًا لأن هذا يُثقل كاهل الخوارزمية بمهمَّة أكثر صعوبة من لعبة الطاولة، التي كانت تتضمن على الأقل مفاهيم القِطَع والمواقع بداخل النموذج، دمج الباحثون تعلُّم الفرق الزمني مع الشبكات العصبية العميقة (وهي طريقة تناولناها في الفصل الثالث).[٤] تضمنت إحدى نسخ هذه الشبكة العصبية العميقة ٢٠ ألف خلية عصبية اصطناعية، وبعد أسابيع من التعلم وصلت إلى مستوًى يضاهي الأداء البشري في ٢٩ من أصل ٤٩ لعبة أُجرِي الاختبار عليها. ونظرًا لأن خوارزمية الأتاري هذه تعلمت دون تدخل أو تفاعلٍ بشري أيضًا، فقد أفضت إلى بعض المراوغات الممتعة، بما في ذلك اكتشاف حيلةٍ ذكيةٍ لحَفر ممرٍّ عبر الجدار في لعبة «بريك أوت» التي تُكسَّر فيها الجدران.

في حين أن الألعاب كانت طريقةً براقةً وممتعةً لإظهار قوة هذا المنهج، فإن تطبيقاته لم تقف عند هذا الحد. فبعدما امتلكت شركةُ جوجل شركةَ ديب مايند عام ٢٠١٤، وضعت خوارزميات للتعلم المعزز لمهمة تخفيض استخدام الطاقة، في مراكز البيانات الضخمة الخاصة بها. نتيجة لذلك، انخفضت الطاقة المستخدمة لتبريد المراكز بمقدار ٤٠ في المائة، وهو ما أدى بدوره إلى توفير كبير في التكاليف يصل إلى مئات الملايين على مدار السنوات. بتركيز خوارزميات التعلم المعزز الأُحادي على تحقيق الهدف الموجود في متناول اليد، فإنها تجد حلولًا إبداعية وفعالة للمشكلات الصعبة. وبهذا، يمكن لهذه العقول الغريبة أن تساعد على وضع خطط لم تخطر على بال بشر أبدًا.

تمثل مسارات عملية اتخاذ القرارات المتسلسلة والإشراط البافلوفي انتصارًا للتطور العلمي المتقارب. تبدأ مسارات بيلمان وبافلوف بمشكلات منفصلة وجوهرية، وكل مشكلة

[٤] على وجه التحديد، استخدموا شبكة عصبية تلافيفية عميقة كالمستخدمة لتمثيل النظام البصري، كما رأينا في الفصل السادس.

تعُجُّ بتفاصيلها الصعبة والمعقدة. كيف يتعين على المستشفى جدوَلة مواعيد المرضين والأطباء لخدمة أكبر عدد من المرضى؟ ما الذي يجعل لعاب الكلب يسيل عندما يصطدم صوت الجهاز الطنان بأذنه؟ يبدو هذان السؤالان متباعدَين تمامًا. لكن، بالتخفُّف من التفاصيل، بحيث لا يتبقى لدينا سوى هيكل المشكلة، تتجلَّى الطبيعة المشتركة بينهما. يُعد ذلك من الأدوار التي تلعبها الرياضيات: أن تضع الأسئلة غير المتصلة في العالم الواقعي في إطار مفاهيمي واحد، حيث تتجلى أوجهُ الشبه الكامنة.

وعليه، فإن قصة التعلم المعزز تُعد قصة تفاعلٍ ناجح بين عدة تخصُّصات. فهي توضح أن كلًّا من علم النفس والهندسة وعلوم الكمبيوتر يمكنها العمل معًا لإحراز تقدم بشأن المشكلات الصعبة. كما توضح كيف يمكن استخدام الرياضيات، لفهم وتقليد قدرة الحيوانات والبشر على التعلم من الظروف المحيطة. لو انتهت القصة عند هذا الحد، لكانت ستصبح قصةً رائعة كما هي. لكنها لم تنتهِ عنده.

الأوكتوبامين هو جُزيء يوجد في الجهاز العصبي لدى الكثير من الحشرات والرخويات والديدان. وقد سُمي بهذا الاسم (المأخوذ مقطعه الأول من كلمة أخطبوط في اللغة الإنجليزية) نظرًا لاكتشافه أول مرة في الغدد اللعابية للأخطبوط عام ١٩٤٨. في دماغ النحلة، يُطلق الأوكتوبامين عند اقترابها من الرحيق. في بدايات تسعينيات القرن العشرين، كان تيري سيجنوفسكي، الأستاذ في معهد سولك في سان دييجو، كاليفورنيا، واثنان من أعضاء مختبره، وهما ريد مونتاجيو وبيتر دايان، يدرسون الأوكتوبامين. على وجه التحديد، صمموا نموذجًا — محاكاة بالكمبيوتر لسلوك النحلة — يرتكز على الخلية العصبية في دماغ النحلة التي تُطلق الأوكتوبامين. وقد اقترحوا أنه يمكن تفسير اختيارات النحلة بشأن الزهور التي تهبط عليها، باستخدام نموذج ريسكورلا وفاجنر الخاص بالتعلم، ويمكن أن تكون الدائرةُ العصبية التي تتضمن الخلية العصبية الخاصة بالأوكتوبامين الوسيلةَ التي يُطبق من خلالها النموذج. لكن بعدما حل الفريق لغز الأوكتوبامين هذا، سمعوا عن دراسة أخرى أُجرِيت على بُعد ٦ آلاف ميل، بواسطة أستاذ ألماني يُدعى ولفرام شولتز حول مادةٍ كيميائيةٍ شبيهةٍ بالأوكتوبامين تُسمَّى الدوبامين.

ربما تكون على دراية بالدوبامين. فهو يحظى بسُمعة طيبة في الثقافة العامة. أشار عددٌ لا نهائي من المقالات إليه بوصفه «المادة الكيميائية المسئولة عن إمتاع عقولنا والمرتبطة بالمكافأة»، وتحدَّث العديد من المقالات عن أن بعضَ الأنشطة اليومية، كتناول

الكَب كيك، تؤدِّي «لإفراز وفرةٍ من مادة الدوبامين المرتبطة بالمكافأة، وتصل هذه المادة إلى منطقة اتخاذ القرارات في الدماغ.» رُوِّج لهذه المادة باعتبارها جُزيءَ السعادة؛ ولا عجب في أن يُروَّج للسلع من خلال ربطها بجزيء المتعة. أطلَق نجوم موسيقى البوب اسم الدوبامين على ألبوماتهم وأغانيهم. وتدَّعي «الأنظمة الغذائية التي ترفع الدوبامين» (دون دليل) أنها توفر أطعمة تعزز من مستوى الدوبامين، وفي الوقت نفسه تحافظ على وزنك. وقد وعدت شركة دوبامين لابز الناشئة في مجال التكنولوجيا بزيادة انغماس المستخدمين في استخدام تطبيقات الهاتف، من خلال إعطائهم جرعاتٍ من هذا الناقل العصبي. وفي الوقت نفسه، اعتُبرت هذه المادة الكيميائية الشهيرة المسكينة مصدر الإدمان والتصرفات غير الملائمة بجميع أشكالهما. نشأت بعض المجموعات الإلكترونية، مثل «مشروع الدوبامين»، بهدف تقديم «حياة أفضل من خلال الوعي بالدوبامين.» كما أن بعض سكان وادي السيليكون قد عزموا على «صيام الدوبامين» كي يلتقطوا أنفاسهم من التحفيز الدائم المستمر.

في حين أن إطلاق الدوبامين يمكن أن يصاحبه مكافآت، فإن القصة لا تنتهي عند هذا الحد. فقد أظهرت دراسة شولتز، على وجه التحديد، حالة تظل فيها الخلايا العصبية المسئولة عن إطلاق الدوبامين، غير نشطةٍ في حالة الحصول على مكافأة.

على وجه التحديد، درَّب شولتز قِردةً على مد أذرعها للأمام للحصول على بعض العصير.[٥] وخلال عملية التدريب هذه، سجل نشاط مجموعة الخلايا العصبية المسئولة عن إطلاق الدوبامين المطوية في الجانب السفلي من الدماغ. لاحظ شولتز أنه في نهاية التدريب، عندما علمت القردة أنها ستحصل على العصير بمد أيديها، لم تُظهر هذه الخلايا العصبية أي رد فعل على الإطلاق، تجاه المكافأة التي حصلت عليها القردة.

حين نشر شولتز هذه النتائج، لم يكن لديه تفسير واضح لتصرُّف خلايا الدوبامين بهذه الطريقة، لكن أعضاء سيجنوفسكي فعلوا ذلك. وقد تواصلوا مع شولتز للتعاون، من أجل اختبار الفرضية القائلة بأن خلايا الدوبامين العصبية تحمل شفرةَ أخطاء التنبؤ اللازمة لحدوث تعلم الفرق الزمني. كانت هذه بدايةَ ما أطلَق عليه سيجنوفسكي: «واحدة من أكثر الفترات العلمية إثارة في حياتي».

[٥] هذا في الواقع مثالٌ على النمط الاستثابي من الإشراط المذكور آنفًا؛ وذلك لأن الحيوانات تُريد مد أذرعها كي تحصل على المكافأة.

عمل دايان ومونتاجيو على إعادة تحليل بيانات شولتز باستخدام خوارزميات أخرى. اعتمدا على أبسط تجارب شولتز المكوَّنة من ضوء مشتعل في الموضع المطلوب الوصول إليه، وإذا وصل إليه الحيوان، يحصل على مقدار من العصير. ما أرادا معرفته هو كيفية تغيُّر الخلايا العصبية المسئولة عن إنتاج الدوبامين، عندما يتعلَّم الحيوان هذا الارتباط. كما اهتمَّا بظرفٍ معينٍ بعد التعلم: ما يحدث عندما لا يحصل الحيوان على العصير بعد وصوله إلى الضوء. إذا تعلَّم الحيوان العلاقة التي تربط بين الضوء والعصير، فسيتعلَّم توقُّع هذه العلاقة، وإذا لم يأتِ العصير عقب الوصول إلى الضوء، فسيكون هذا خطأً فادحًا في التنبؤ. هل تعكس الخلايا العصبية المسئولة عن إفراز الدوبامين ذلك؟

تُطلق الخلايا العصبية المسئولة عن إفراز الدوبامين عادةً نحوَ خمس إشاراتٍ عصبيةٍ كهربيةٍ في الثانية، عندما لا يحدث أي شيء إضافي. في بداية عملية التعلُّم، أي بعدما يحصل الحيوان على جرعةٍ مفاجئةٍ من العصير بعد أن يحرِّك ذراعه مباشرة، يقفز معدل إطلاق الإشارات العصبية الكهربية إلى نحو ٢٠ إشارةً في الثانية. لم يحرك الضوء الذي يسبق الحركة أي شيء. لكن بعد عددٍ كافٍ من عمليات القرن، وبمجرد أن يبدأ الحيوان في استيعاب أن الضوء ومد الذراع والعصير جميعها مترابطة، يتغير النمط. تتوقف خلايا الدوبامين العصبية عن الاستجابة للعصير. يتماشى هذا التغيُّر مع فكرة أن هذه الخلايا تنقل معلومات حول وجود خطأ في التنبؤ؛ وذلك لأنه بمجرد أن يتمكن الحيوان من التنبؤ بالحصول على العصير بشكلٍ صحيح، لا يكون هناك مزيد من الأخطاء. وتبدأ الحيوانات في الاستجابة للضوء. لماذا؟ لأن الضوء أصبح مرتبطًا بالمكافأة، لكنها ليست لديها فكرة حاسمة عن توقيت ظهور المكافأة. وعندما تظهر المكافأة بطريقة غير متوقعة تصبح خطأً. على وجه التحديد، تصبح خطأً في القيمة المتوقعة لحالة الحيوان. (والخطأ هنا يُقصد به المفاجأة أو الفرق بين ما يتوقع الحيوان حدوثه وما يحدث بالفعل). يتوقع القرد الذي يجلس على كرسي التجارب، وهو يمارس أنشطته المعتادة، أن تكون اللحظة التالية مماثلة للحظة الحالية إلى حدٍّ ما. إلا أن اشتعال الإضاءة يُعد مخالفة لهذا التوقع. وكما هي الحال عند سماع الكلمات الأولى من أغنية عيد الميلاد في ردهة المكتب، تُعدُّ هذه مفاجأة سارَّةً، لكنها تظل مفاجأة بالرغم من ذلك.

كان الهدف من التحليل الأخير، الذي أُجري أثناء إزالة العصير بعد الوصول، هو معرفة كيفية تجسيد دماغ الحيوان للمفاجآت غير السارة. إذا كان الدوبامين ينقُل معلومات بشأن الأخطاء، فسيتعين عليه توضيح متى تكون الأمور أسوأ من المتوقع.

وهذا هو ما تفعله الخلايا العصبية بالضبط في حالة غياب العصير. ينخفض معدل إطلاق الإشارات العصبية الكهربية، في اللحظة التي يُتوَقَّع فيها تقديم العصير تمامًا. على وجه التحديد، سيرتفع معدل إطلاق الخلايا العصبية للإشارات العصبية الكهربية، من ٥ إشاراتٍ إلى ٢٠ إشارةً عصبيةً كهربية استجابةً للضوء، وبعد ذلك بمجرد أن يمد الحيوان ذراعه يعود معدل إطلاق الإشارات العصبية الكهربية إلى ٥ مرة أخرى. لكن، بعد مد الحيوان لذراعه بنحو نصف ثانية، عندما يتَّضح عدم وجود عصير، تتوقف الخلايا العصبية عن إطلاق إشارات تمامًا. حدثت مخالفة للتوقُّع، ودور الخلايا العصبية المسئولة عن إفراز الدوبامين هنا هو نقل هذه المعلومة.

أوضحت هذه الدراسة أن إطلاق خلايا الدوبامين العصبية للإشارات العصبية الكهربية، من شأنه نَقْل معلوماتٍ بشأن الأخطاء، إيجابية أو سلبية، حول القيم المتوقعة اللازمة لحدوث التعلم. ومن ثم، كانت نقطة مهمة تحوَّل فيها الدوبامين بالنسبة لنا من مجرد جُزيء للمتعة والسعادة إلى جزيء تعليمي.

لكن، إذا كان الهدف من نقل معلومات بشأن الخطأ هو التعلُّم من الخطأ، فأين يحدث هذا التعلم؟ يتضح أنه من الصعب نوعًا ما تحديد ذلك؛ نظرًا لأن هذه الخلايا العصبية التي تفرز الدوبامين تفرزه في العديد من أركان الدماغ؛ إذ إن زوائد هذه الخلايا العصبية تصل إلى أجزاءٍ مختلفةٍ من الدماغ، مثل شبكة من أنابيب التوصيل التي تصل المناطق البعيدة والقريبة. لكن الموقع الذي يبدو مُهمًّا جدًّا هو الجسم المخطط. الجسم المخطط عبارة عن مجموعة من الخلايا العصبية، التي تُمثِّل المدخلات الأولية لمجموعةٍ من مناطق الدماغ التي تدخل في توجيه الحركة والأفعال. تُسهم الخلايا العصبية في الجسم المخطط في تكوين السلوك، من خلال رَبْط المدخلات الحسية بالأفعال، أو من خلال رَبْط الأفعال بالأفعال.

وكما رأينا في الفصل الرابع، يُعد التعلم الهيبي طريقة سهلة لتخزين الروابط بين الأفكار في الوصلات العصبية. فبموجب قوانين هيب، إذا أطلَقَت خليةٌ عصبية إشاراتٍ عصبية كهربية بانتظام قبل خلية عصبية أخرى، فستقوى الوصلة من الأولى إلى الثانية. إلا أنه في حالة التعلم المعزز نحتاج إلى أكثر من مجرد معرفة أن الحدثَين وقعا خلال فتراتٍ متقاربة. نحتاج إلى معرفة كيفية ارتباط هذه الأحداث بالمكافأة. على وجه التحديد، نريد فقط تحديث قوة الربط بين الإشارة والفعل (على سبيل المثال، رؤية الضوء ومحاولة الوصول إليه) إذا تبيَّن أن هذا الاقتران مرتبطٌ بمكافأة.

وعليه، فإن الخلايا العصبية في الجسم المخطط لا تتَّبع التعلم الهيبي الأساسي. بل تتبع نمطًا معدَّلًا، يؤدي فيه إطلاق خليةٍ عصبيةٍ للإشارات العصبية الكهربية قبل أخرى، إلى تقوية الوصلة بينهما فقط إذا حدث ذلك في وجود الدوبامين. وعليه، فإن الدوبامين — الذي ينقُل إشارة الخطأ اللازمة لتحديث القيم — يكون مطلوبًا أيضًا، من أجل التغييرات اللازمة لعملية التحديث التي تقع في التشابُك العصبي. بهذه الطريقة، يمكن اعتبار الدوبامين زيتَ التشحيم الذي يساعد على انسيابية التعلم.

أدى وجود لغة تعلم الفرق الزمني اللازمة للحديث عن وظائف الدماغ، إلى تغيير الحديث عن موضوعات إكلينيكية كالإدمان. حاولت نظريةٌ وضَعها عالم الأعصاب ديفيد ريش عام ٢٠٠٤ تفسيرَ الخواص المسببة للإدمان لبعض العقاقير، مثل الأمفيتامين والكوكايين، من حيث تأثيرها على إفراز الدوبامين. وافترض أن هذه العقاقير تسبب إطلاق دوبامين ليس له علاقة بخطأ التوقع الفعلي. على وجه التحديد، بزيادة تحفيز خلايا الدوبامين العصبية، ترسل هذه العقاقير إشارةً خاطئة لبقية الدماغ بأن تجربة العقار دائمًا ما تكون أفضل من المتوقع. ومع هذا، فإن إشارة الخطأ غير الحقيقية هذه توجِّه عملية التعلم؛ فهي تدفع قيمة الحالات المرتبطة باستخدام العقار المخدِّر لأعلى أكثر فأكثر. من المؤكد أن تشويه دالة القيمة بهذه الطريقة له آثار ضارة على السلوك، مثل تلك التي نراها في الإدمان.[٦]

كان ديفيد مار عالمَ أعصاب بريطانيًّا لديه معرفة بمجال الرياضيات. نُشر كتابه «الرؤية: تجسيد البشر للمعلومات المرئية ومعالجتها» عام ١٩٨٢، أي بعد وفاته بعامَين. في الفصل الأول، عرض المكونات اللازمة التي يتطلَّبها التحليل الناجح للجهاز العصبي. وفقًا لمار، لفَهْم أي جزء من الدماغ، علينا أن نكون قادرين على تفسيره على كل مستوًى من هذه المستويات الثلاثة: الحاسوبي والخوارزمي والتنفيذي. المستوى الحاسوبي يسأل

[٦] يمكن لهذه النظرية تفسير العديد من جوانب الإدمان، إلا أن أحد توقعاتها الكبيرة باء بالفشل. إذا قادت هذه العقاقير إلى خطأ في التوقُّع دون توقف، فإن ظاهرة الحجب، التي وُصِفت فيما سبق، لن تحدث حتمًا عند استخدام العقاقير، ومع ذلك، فقد أوضحت تجربةٌ أُجريَت على الفئران أن الحجب لا يزال يحدث.

عن الهدف العام من هذا النظام، ما الذي يحاول هذا النظام فِعْله؟ ويسأل المستوى الخوارزمي عن كيف يمكنه تحقيق هذا الهدف، أو من خلال أي خطوات.

يُعد التفسير الذي يشمل كل مستويات مار حُلمًا يسعى إلى تحقيقه الكثير من علماء الأعصاب. تُعد الأنظمة التي تُنفذ التعلم المعزز حالة نادرة تقترب فيها هذه الأنظمة من تحقيق أهداف صعبة. على المستوى الحاسوبي، يكون حل التعلم المعزز بسيطًا: تعظيم المكافأة. وهذا ما اعتبره بيلمان هدفًا لعمليات اتخاذ القرارات المتسلسلة، وما يجب أن تحصل عليه بعد دالة القيمة. لكن كيف نتعلم دالة القيمة؟ هنا يأتي دور تعلم الفرق الزمني. ساعدت أبحاث بوش وموستيلر وريسكورلا وفاجنر وساتون جميعًا، على تحويل أكوام من البيانات التي حصلوا عليها من تجارب الإشراط إلى سلاسل من الرموز التي يمكن أن تصف الخوارزمية اللازمة، للقيام بجزء التعلم من التعلم المعزز. على مستوى التنفيذ، أخذت خلايا الدوبامين العصبية على عاتقها مهمة حساب خطأ التوقع، كما أن الإشارات التي ترسلها إلى مناطق الدماغ الأخرى تتحكَّم في عمليات الربط التي تكوَّنت في هذه المناطق. بهذه الطريقة، تحقق الفهم الشامل للقدرة الأساسية على التعلُّم من المكافآت، من خلال الاقتراب من الموضوع من عدة زوايا مختلفة.

الفصل الثاني عشر

# النظريات الموحدة العظمى الخاصة بالدماغ

مبدأ الطاقة الحرة ونظرية الألف دماغ ونظرية المعلومات المتكاملة

في القرن التاسع عشر، شهد مجال الفيزياء واحدًا من أكبر الأحداث الفارقة في تاريخ العلم التي زلزلت المجال. نشر جيمس كلارك ماكسويل، عالم الرياضيات الاسكتلندي، ورقته البحثية المكوَّنة من سبعة أجزاء تحت عنوان «النظرية الديناميكية للمجال الكهرومغناطيسي» عام ١٨٦٥. من خلال هذا الماراثون من المقارنات والمعادلات الثاقبة، أظهر ماكسويل علاقةً عميقةً ومهمةً بين شكلَين مهمَّين بالفعل من التفاعل المادِّي: الكهرباء والمغناطيسية. على وجه التحديد، بتعريف نظرية المجال الكهرومغناطيسي، وضع ماكسويل البِنية التحتية الرياضية اللازمة للنظر إلى معادلات الكهرباء والمغناطيسية، باعتبارهما وجهَين لعملةٍ واحدة. في هذه العملية، خلص إلى أن عنصرًا ثالثًا مهمًّا — أي الضوء — يُعد موجة في هذا المجال الكهرومغناطيسي.

درس العلماء بالفعل كُلًّا من الكهرباء والمغناطيسية والضوء لقرون قبل ماكسويل. كما أنهم اكتسبوا قدرًا معقولًا من المعلومات عن هذه العناصر، وعن كيفية تفاعلها والتحكم فيها واستخدامها. إلا أن توحيد ماكسويل لهذه القوى قدَّم شيئًا مختلفًا تمامًا؛ طريقة جديدة كليًّا لتفسير العالَم المادي. كان ذلك نقطة الانطلاق التي حفزت إطلاق سلسلةٍ من الاكتشافات في الفيزياء التأسيسية، كما أنه مهد الطريق للعديد من التقنيات الموجودة في يومنا هذا. فعلى سبيل المثال، بُنيت أبحاث أينشتاين على نظرية المجال الكهرومغناطيسي، كما أنه، حسبما ورد، نسب الفضل في نجاحه إلى «الوقوف على أكتاف ماكسويل».

لكن بعيدًا عن تأثير نظرية ماكسويل المباشر على المجال البحثي، رسَّخت النظرية في عقول علماء الفيزياء الذين جاءوا بعد ذلك فكرةَ وجود علاقات أعمق بين القوى الفيزيائية. بات التنقيب عن هذه العلاقات واستكشافها أحد الأهداف الرئيسية للفيزياء النظرية. وبحلول القرن العشرين، كانت هناك مساعٍ حثيثةٌ للبحث عما يُعرف باسم النظريات الموحدة العظمى. على رأس قائمة المهام المطلوبة، جاء إيجاد نظريةٍ موحدةٍ عظمى يمكنها توحيد الكهرومغناطيسية مع قُوَّتَين أُخرَيَين: القوة الضعيفة (التي تتحكم في الاضمحلال الإشعاعي)، والقوة القوية (التي تربط أَنْوية الذرات معًا). شهد هذا الاتجاه خطوةً كبيرةً في سبعينيات القرن العشرين، باكتشاف أن القوة الضعيفة والكهرومغناطيسية تصبحان شيئًا واحدًا في ظل درجات الحرارة المرتفعة. إلا أنه حتى بعد دمج القوى القوية والضعيفة معًا، ظلت هناك قوة كبيرة وهي الجاذبية. وعليه، ظل علماء الفيزياء يواصلون السعي نحو إيجاد نظرية موحدة عظمى شاملة.

تستفيد النظريات الموحدة العظمى من التفضيلات الجمالية التي وضعها العديد من علماء الفيزياء، والتي تتمثل في البساطة والأناقة والشمول. ويمكنها توضيح كيف يمكن أن يصبح الكل أكبر من مجموع أجزائه. قبل أن يتوصل العلماء إلى نظرية موحدة شاملة كانوا كالرجال المكفوفين الذين يحاولون التعرُّف على فيل، من خلال لمس أجزائه المختلفة في الحكاية الرمزية القديمة. يعتمد كُلٌّ من هؤلاء المكفوفين على المعلومات الطفيفة التي يحصل عليها من لمس الخرطوم أو الرجل أو الذيل. ومن خلال ذلك، توصلوا إلى حكايات منفصلة وغير كاملة حول وظيفة كل جزء. لكن بمجرد رؤية الفيل بالكامل، يُوضع كل جزء في مكانه ويُفهم في سياق الأجزاء الأخرى. لا يمكن الحصول على الحكمة العميقة التي اكتُسبت، من خلال إيجاد نظريةٍ موحدةٍ عظمى بدراسة الأجزاء بشكلٍ منفصل. ومن ثم، فإنه بقدر ما يصعب الحصول على النظريات الموحدة العظمى، فإنها تُعتبر مسعًى جديرًا بالاهتمام في أوساط الفيزيائيين. وقد أوضح عالم الفيزياء ديميتري نانوبولوس عام ١٩٧٩، أي بعد أن ساعد على استحداث عبارة النظريات الموحدة العظمى: «النظريات الموحدة العظمى تعطي تفسيرًا رشيقًا ومعقولًا لمجموعة كبيرة من الظواهر المختلفة التي تبدو للوهلة الأولى غير متصلة ببعضها. وهي جديرة بأن تؤخذ على محمل الجد».

لكن هل لا بد من أخذ النظريات الموحدة العظمى للدماغ على محمل الجد؟ الفكرة التي تفيد بأن عددًا صغيرًا من المبادئ البسيطة أو المعادلات، من شأنه فَهْم كل شيء متعلق بتركيب الدماغ ووظيفته؛ تُعد جذابة للأسباب نفسها التي جعلت النظريات الموحدة

العظمى مسعًى جديرًا بالاهتمام في الفيزياء. إلا أن معظم العلماء الذين يدرسون الدماغ يشكُّون في وجود مثل هذه المبادئ. في هذا الصدد، أوضح كُلٌّ من مايكل أندرسون وتوني كيميرو قائلَين: «ثمة العديد من الأسباب الوجيهة للاعتقاد بأنه لا يمكن أن تكون هناك نظرية موحدة عظمى لوظيفة الدماغ؛ وذلك لوجود العديد من الأسباب الوجيهة للاعتقاد بأن عضوًا معقدًا مثل الدماغ يعمل وفقًا لمبادئ متعددة.» لذا فإن وجود نظرية موحدة عظمى للدماغ يُعد أمرًا خياليًّا، على الرغم من كون الفكرة عظيمة.

في المقابل، ساعد الكثيرُ من جوانب علم الفيزياء — كالنماذج والمعادلات وطرق التفكير — التي استُعين بها في مجال علم الأعصاب في تطوير المجال بعدة طرائق. ونظرًا لكون النظريات الموحدة العظمى جوهرية بالنسبة للفيزياء الحديثة، كان من الصعب تجاهلها. يمكن أن تكون هذه النظريات جذابةً بالنسبة لهؤلاء الذين يدرُسون الدماغ، على الرغم من أنها تبدو غير محتملة، حتى إنها بالنسبة لبعض العلماء مُغرية جدًّا، لدرجة أنه لا يمكن تفويتها.

يُعد إيجاد نظرية موحدة عظمى للدماغ من المساعي التي تكون مخاطرها عالية وعوائدها كثيرة. وعليه، فإنها عملية تتطلب قيادة مميزة. معظم النظريات الموحدة العظمى للدماغ المقترحة يكون وراءها قائد بارز، ويكون عادةً العالم الذي صاغ النظرية من البداية، ويكون بمثابة ممثل لها. نجاح النظرية الموحدة العظمى يتطلب التفاني، يكون العلماء المؤيدون للنظرية على استعدادٍ للعمل على تنقيحها وتحسينها لسنواتٍ وحتى لعقود. ويبحثون أيضًا دائمًا بنشاط عن طرق جديدة لتطبيق نظريتهم على كل جانب من جوانب الدماغ يمكنهم إيجاده. التأييد مهم أيضًا؛ فحتى أعظم النظريات الموحدة العظمى لن يسعها شرح الكثير إن لم يسمع بها أحد. ومن ثم، كُتب العديد من الأوراق البحثية والمقالات والكتب، لنشر النظريات الموحدة العظمى، لا في الأوساط العلمية فقط، بل في العالم أجمع. ومن الأفضل للمتحمسين للنظريات الموحدة العظمى أن يتمتعوا بقوة التحمُّل وهدوء الأعصاب. فقد يُقابَل الترويج لهذه النظريات بالازدراء من جموع العلماء، الذين يؤدون عملًا أكثر موثوقيةً يتمثل في دراسة كل جزءٍ من الدماغ على حِدَة.

علَّق عالم الاجتماع موراي إس ديفيس على النظريات في مقالة له نُشرت عام ١٩٧١ بعنوان «هذا مثير للاهتمام!»، في هذه المقالة، أوضح ما يلي: «لطالما اعتُقِد أن واضع النظريات يُعد عظيمًا لأن نظرياته صحيحة، لكن هذا غير صحيح. يُعد واضع النظريات عظيمًا لا لأن نظرياته صحيحة؛ بل لأنها مثيرة للاهتمام ... في الواقع، العلاقة بين صِحة النظرية وتأثيرها ليست علاقة وثيقة؛ فالنظرية يمكن أن تظل مثيرة للاهتمام، حتى لو

كان هناك نزاعٌ على صِحتها، وحتى لو دُحضت!» تُعد النظريات الموحدة العظمى للدماغ مثيرة للاهتمام بصرف النظر عن مدى صِحتها.

لم يكُن عالم الأعصاب البريطاني كارل فريستون، الذي عُرفت عنه البشاشة وعذوبة اللسان بشكلٍ عام، تنطبق عليه السمات المطلوب توفُّرها في قائد الحركة العلمية الطموحة والمثيرة للجدل. ومع ذلك، كان له أتباعٌ متفانون. وفي تقليدٍ أشبه بالشعائر، كان العلماء، الذين يتراوحون ما بين كونهم طلابًا وأساتذة، بما في ذلك هؤلاء الذين لهم خلفياتٌ مختلفةٌ لا تقع ضمن نطاق الحدود التقليدية لعلم الأعصاب؛ يتجمعون بانتظام في أيام الإثنين كي يتلقى كُلٌّ منهم بعضًا من أفكاره لبضع دقائق. كانوا يذهبون إليه يلتمسون حكمته فيما يتعلق بموضوعٍ واحدٍ بشكلٍ أساسي. هذا الموضوع هو إطار عمل شامل يبني عليه فريستون فَهْمه للدماغ والسلوك، وما هو أبعد من ذلك لأكثر من ١٥ عامًا: مبدأ الطاقة الحرة.

«الطاقة الحرة» مصطلح رياضي يُعرَّف عن طريق الاختلافات بين توزيعات الاحتمالات. إلا أنه في إطار عمل فريستون يمكن اختصارُه ببساطة على النحو التالي: الطاقة الحرة هي الفرق بين تنبؤات العقل عن العالم والمعلومات الفعلية التي يتلقاها. ينص مبدأ الطاقة الحرة على أنه يمكن فهم كل شيء يفعله الدماغ باعتباره محاولة لتقليل الطاقة الحرة، بمعنى جعل تنبؤات الدماغ تتَّسق مع الواقع بقدر الإمكان.

تأثُّرًا بطريقة الفهم هذه، واصل العديد من العلماء البحث عن الموقع الذي تحدث فيه التنبؤات في الدماغ، وكيفية مطابقتها بالواقع للتحقُّق منها. يستكشف مجالٌ محدود من الأبحاث المبنية على فكرة «التشفير التنبُّئِي» الآليةَ التي يمكن بها حدوث ذلك في المعالجة الحسية على وجه التحديد.[١] في معظم نماذج التشفير التنبُّئِي، تُرسَل المعلومات بشكلٍ طبيعي من خلال نظام المعالجة الحسية. على سبيل المثال، المعلومات السمعية التي تَرِد من الأُذنَين، تُرحَّل أولًا عبر مناطق في جذع الدماغ والدماغ الأوسط، ثم تُمرَّر بالتتابع عبر العديد من المناطق في القشرة المُخِّية. سلَّم الباحثون على نطاقٍ واسع، حتى هؤلاء الذين

[١] طُوِّر مخطط التشفير التنبُّئِي بعيدًا عن تأثير فريستون والطاقة الحرة؛ فقد ظهر لأول مرةٍ في ورقةٍ بحثيةٍ لراجيش راو ودانا بالارد عام ١٩٩٩. لكن محبِّي الطاقة الحرة استكشفوها بلهفةٍ منذ ذلك الحين.

لم تكن لديهم ثقةٌ كافيةٌ في التشفير التنبُّئِي، بأهمية المسار التصاعدي أو المتجه للأمام في عملية تحويل المعلومات الحسية إلى إدراك حسي.

ما يميز التشفير التنبُّئِي هو أفكاره المتعلقة بالمسار التنازلي أو المتجه للخلف، والتي تفيد بوجود وصلات تمتد من مناطق متأخرة لمناطق متقدمة (لنقُل من المنطقة السمعية الثانية في القشرة المخية للأولى). بشكلٍ عام، افترض العلماء العديد من الأدوار لهذه الوصلات. وفقًا لفرضية التشفير التنبُّئِي، هذه الوصلات تحمل التنبؤات. على سبيل المثال، عندما تستمع إلى أغنيتك المفضلة، قد تكون لدى جهازك السمعي معرفةٌ دقيقة بشأن النُّوتات الموسيقية والكلمات التي في طريقك لسماعها. وفقًا لنموذج التشفير التنبُّئِي، تُرسَل هذه التنبؤات للوراء وتُدمج بالمعلومات المتجهة نحو الأمام، حول الأصوات التي تسمعها الأذن بالفعل. بالمقارنة بين هذَين التيارَين، يمكن للدماغ حساب التعارُض بين ما تنبأ به الدماغ والواقع. في الحقيقة، في معظم نماذج التشفير التنبُّئِية، ثمة خلايا عصبية محددة تُدعى «الخلايا العصبية الخاصة بأخطاء التنبؤ» تُكلَّف بالقيام بهذه العملية الحسابية. مهمة هذه الخلايا توضيح مدى خطأ التنبؤ الذي قام به الدماغ؛ إذا أطلقت هذه الخلايا إشارات عصبية كهربية كثيرًا، فهذا يعني أن الخطأ في التنبؤ مرتفع، أما إذا كان الإطلاق منخفضًا، فهذا يعني أن الخطأ منخفض. بهذه الطريقة، فإن نشاط هذه الخلايا العصبية يُعد تجسيدًا ماديًّا للطاقة الحرة. ووفقًا لمبدأ الطاقة الحرة، لا بد أن يسعى الدماغ لتقليل الإشارات العصبية الكهربية التي تطلقها هذه الخلايا بقدر الإمكان.

هل توجد هذه الخلايا العصبية الخاصة بأخطاء التنبؤ في المسارات الحسية؟ وهل يتعلم الدماغ تقليل إطلاق هذه الخلايا، من خلال القيام بتنبؤاتٍ أفضل عن العالم؟ ظل العلماء يبحثون عن إجاباتٍ لهذه الأسئلة لسنوات. على سبيل المثال، وجدت دراسة أجراها باحثون في جامعة جوته، فرانكفورت، أن بعض الخلايا العصبية في الجهاز السمعي تقلل إطلاقها للإشارات العصبية الكهربية، عند سماع صوتٍ متوقَّع. على وجه التحديد، درَّب الباحثون الفئران على دفع رافعةٍ تُصدر ضوضاء. عندما سمعت الفئران الصوت المتوقع بعد دفع الرافعة، أطلقت خلاياها العصبية إشارات عصبية كهربية أقل من الإشارات التي كانت ستطلقها إذا شُغِّل الصوت بشكلٍ عشوائي، أو إذا أُصدرت الرافعة صوتًا غير متوقع. هذا يشير إلى أن دماغ الفئران تتنبأ بنغمة معينة، والخلايا العصبية في جهازها السمعي تُطلق مزيدًا من الإشارات العصبية الكهربية، عند مخالفة هذا التنبؤ. لكن، بشكلٍ عامٍّ، الأدلة التي تَدعَم الترميز التنبُّئِي ليسَت مُتَّسقة. فليسَت كل الدراسات التي

تبحث عن الخلايا العصبية الخاصة بأخطاء التنبؤ تجدها، وحتى عندما تفعل، فإن هذه الخلايا العصبية لا تتصرف دائمًا تمامًا كما تتوقع فرضية التشفير التنبُّئِية.

قد يبدو أن جعل الدماغ آلةً أكثر قدرةً على التنبؤ أوضح طريقة لتقليل الطاقة الحرة، إلا أنها ليست الطريقة الوحيدة. فنظرًا لأن الطاقة الحرة تُشير إلى الفرق بين التنبؤ الذي يقوم به الدماغ، والمعرفة الحسية التي يتلقَّاها من العالم الخارجي، يُمكن التقليل من هذه الطاقة عن طريق التحكُّم في مدخلات العالم الخارجي. تخيَّلْ طائرًا اعتاد الطيرانَ حول غابة معينة، يمكنه التنبؤ بالأشجار التي تكون مناسبة لبناء العُش، كما أنه يعلم الأماكن التي يوجد بها أفضل الطعام، وما إلى ذلك. في يومٍ من الأيام، طار قليلًا بعيدًا عن نطاقه المعتاد ووجد نفسه في مدينة. نظرًا لأنه يختبر المباني الشاهقة والمرور للمرة الأولى، تكون قدرته على التنبؤ بأي شيءٍ تقريبًا منخفضة. هذا التعارض الكبير بين التنبؤ والعالم الواقعي معناه أن الطاقة الحرة مرتفعة. لتقليل الطاقة الحرة من جديد، يمكن أن يبقى الطائر في مكانه على أمل أن تتكيف أجهزته الحسية؛ لتكون قادرة على التنبؤ بملامح الحياة في المدينة. أو يمكنه ببساطة أن يعود أدراجه إلى الغابة من حيث أتى. ظهور هذا الخيار الثاني، أي اختيار الأفعال التي تنتج عنها معرفة حسية يمكن التنبؤ بها، هو ما يجعل مبدأ الطاقة الحرة نظريةً موحدةً عُظمى للدماغ مرشحة. بدلًا من مجرد شرح سمات المعالجة الحسية، يمكن أن يشملَ هذا المبدأ قراراتٍ بشأن السلوك أيضًا.

استُعين بمبدأ الطاقة الحرة بالفعل لتفسير الإدراك والفعل وكل ما بينهما.[٢] يتضمن هذا عمليات؛ مثل التعلم والنوم والانتباه والاضطرابات؛ مثل الفصام والإدمان. قيل أيضًا إن هذا المبدأ يمكنه إيجاد تفسير لتركيب الخلايا العصبية ومناطق الدماغ، بالإضافة إلى تفاصيل حول كيفية اتصالها. في الواقع، لم يَقصُر فريستون مبدأ الطاقة الحرة على الدماغ. فقد اعتبره مبدأً توجيهيًّا لكُلٍّ من علم الأحياء والتطوُّر، حتى إنه اعتبره طريقةً لفَهْم أساسيات الفيزياء.

[٢] حين امتد نطاق مبدأ الطاقة الحرة شمِل العديد من الموضوعات التي تناولناها في هذا الكتاب. فقد تطور من فكرة أن الدماغ يعمل وفقًا لنظرية بايز (الفصل العاشر)، كما أنه ثمة علاقات متبادلة بين هذا المبدأ وبين نظرية المعلومات (الفصل السابع)، واستخدم أيضًا معادلات من الآليات الإحصائية (الفصلان الرابع والخامس) كما أنه شرح عناصر المعالجة البصرية (الفصل السادس).

هذا الميل نحو محاولة تبسيط الموضوعات المعقدة لازَم فريستون طوال حياته. ففي مقالة كُتبت عن شخصه عام ٢٠١٨ تذكر فكرة كانت تُراوده أثناء المراهقة: «لا بد أن هناك طريقة تمكننا من فهم كل شيء عندما نبدأ دون أن تكون لدينا معرفة بأي شيء ... إذا أتيح لي أن أبدأ من نقطة واحدة في الكون بأسره، فهل يمكنني استخلاص أي شيءٍ آخر من ذلك؟» في عالم فريستون، يُعدُّ مبدأ الطاقة الحرة في الوقت الحالي تقريبًا العدمَ الذي يمكنه وصف كل شيء تقريبًا.

لكن خارج عالم فريستون، لا تكون إمكانات مبادئ الطاقة الحرة واضحةً دائمًا. فنظرًا للوعود الكبيرة لنظرية فريستون، حاول عددٌ غير محدودٍ من العلماء فَهْم تفاصيل النظرية بالكامل. إلا أن القليل منهم فقط هم الذين اعتبروا محاولاتهم ناجحةً بالكامل (حتى هؤلاء الذين اعتبروا أنفسهم من محبِّي المبدأ). ليس بالضرورة أن ترجع صعوبة فَهْم المبدأ إلى أن المعادلات معقدةٌ للغاية؛ فالعديد من العلماء الذين حاولوا فهمه كرَّسوا حياتهم لفهم رياضيات العقل. لكن يرجع ذلك إلى أن كيفية استقراء مبدأ الطاقة الحرة وتطبيقه على كل التفاصيل المعقدة لوظيفة الدماغ؛ تتطلب نوعًا من الحدس القوي الذي يختصُّ به فريستون. في ظل عدم وجود وسائل واضحة وموضوعية لتفسير الطاقة الحرة في أي حالة معيَّنة، يظل فريستون الوحيد القادر على فهم المبدأ والتعامل معه، ناشرًا رأيه في تطبيقاته في عدد لا نهائي من الأوراق البحثية والمقابلات واللقاءات التي كانت تُجرى أيام الإثنين.

من المحتمل أن يكون الالتباس حول مبدأ الطاقة الحرة قد نتج عن سمة من سمات المبدأ، أقرَّها فريستون عن طيب خاطر: أنه لا يمكن دحضُها. يمكن دحض معظم الفرضيات حول آلية عمل الدماغ، أي إنها تقدِّم ادعاءاتٍ يمكن إثبات خطئها من خلال التجارب. أما مبدأ الطاقة الحرة، فيُعد طريقةً للنظر للدماغ أكثر من كونه ادعاءً قويًّا أو محددًا عن آلية عمله. في هذا الصدد أوضح فريستون: «يظل مبدأ الطاقة الحرة مبدأً كما هو ... تطبيقاته العملية محدودة إلا إذا تساءلت عما إذا كانت الأجهزة القابلة للملاحظة تلتزم بهذا المبدأ.» بعبارةٍ أخرى، بدلًا من محاولة القيام بتنبؤاتٍ دقيقةٍ عن الدماغ باستخدام مبدأ الطاقة الحرة، لا بد أن يسأل العلماء عما إذا كان المبدأ يساعدهم في فَهْم الأشياء من منظورٍ جديد. هل تحاول معرفةَ آلية عمل جزء من الدماغ؟ تساءلْ عما إذا كان هذا الجزء يقلل الطاقة الحرة. إذا ساعدك ذلك على الفهم فهذا عظيم، وإذا لم يُساعِدْك فلا بأس أيضًا. بهذه الطريقة، يُفترض من مبدأ الطاقة الحرة أن يُقدم، في

أفضل الأحوال، دعامةً نضع عليها حقائقَ عن الدماغ. بالقدر الذي يربط به المبدأ العديد من الحقائق، يكون من النظريات العظمى الموحدة، إلا أنه دون القدرة على دَحْضه، تُثار الشكوك حول وضعه كنظرية.

شركة نومينتا هي شركة تكنولوجية صغيرة تقع في ريدوُود سيتي، كاليفورنيا. أُسِّست الشركة على يد جيف هوكينز، رجل الأعمال الذي أسس سابقًا شركتَين أنتجتا أسلاف الهواتف الذكية الحديثة. لكن نومينتا تُصنِّع برمجياتٍ لا أجهزة. تصمم الشركة خوارزميات لمعالجة البيانات تهدف إلى مساعدة سماسرة البورصة، وموزعي الطاقة، وشركات تكنولوجيا المعلومات، وما شابه ذلك؛ على التعرف على الأنماط في تدفقات البيانات الواردة وتتبُّعها. إلا أن هدف الشركة الرئيسي يتمثل في تطبيق طريقة الهندسة العكسية على الدماغ.

على الرغم من أن هوكينز شق طريقه لتحقيق مكانة مرموقة في مجال التكنولوجيا، فإنه كان يحمل دائمًا اهتمامًا بالدماغ. وعلى الرغم من أنه لم يحصل على شهادة في مجال علم الأعصاب، فقد أنشأ معهد ريدوود لعلم الأعصاب عام ٢٠٠٢. أصبح المعهد في النهاية جزءًا من جامعة كاليفورنيا، بيركلي، كما أن هوكينز سيمضي نحو تأسيس شركة نومينتا عام ٢٠٠٥. قام نشاط نومينتا بشكلٍ أساسي على أفكارٍ عُرضت في كتاب ألَّفه هوكينز، بالاشتراك مع ساندرا بليكسلي تحت عنوان «عن الذكاء» عام ٢٠٠٤. يُلخِّص هذا الكتاب نظرية هوكينز حول آلية عمل القشرة الجديدة — أي الطبقة الرقيقة من نسيج الدماغ التي تغطي سطح أدمغة الثدييات — لإنتاج الإحساس والإدراك والتعلم والحركة وأكثر من ذلك. وهي مجموعة الأفكار التي تندرج تحت مُسمى «نظرية الألف دماغ الخاصة بالذكاء».

تتمحور نظرية الألف دماغ حول قطعة من البنية العصبية تُدعى العمود القشري. الأعمدة القشرية عبارة عن بُقع من الخلايا، يقلُّ قُطرها عن سُمك سن القلم الرصاص ويكون طولها أربعة أضعاف السن. ويُطلق عليها هذا الاسم لأنها تشكِّل أسطواناتٍ تمتدُّ من أعلى القشرة الجديدة حتى أسفلها، كمجموعةٍ من شرائط الإسباجيتي المتوازية. بالنظر إلى طول العمود، فإنه يشبه رقائق من الرواسب، فالخلايا العصبية تنفصل إلى ست طبقاتٍ يمكن التعرُّف عليها بوضوح. تتفاعل الخلايا العصبية في الطبقات المختلفة معًا، من خلال تكوين روابط تمتدُّ لأعلى أو لأسفل. عادة، تؤدِّي جميع الخلايا العصبية

في العمود الوظيفة نفسها؛ على سبيل المثال، يمكنها جميعًا الاستجابة بالطريقة نفسها للمُدخلات الحسية. إلا أنه يتضح أن الطبقات المختلفة تخدم بعض الأغراض المختلفة؛ على سبيل المثال، بعض الطبقات تتلقى المدخلات من مناطق الدماغ الأخرى؛ بينما تُرسل طبقاتٌ أخرى المخرجات من الأعمدة القشرية.

اعتقد فيرنون ماونتكاسل، عالم الأعصاب الحسية الذي تعرَّف على هذه الأعمدة لأول مرة في منتصف القرن العشرين، أنها تُمثِّل الوحدة التشريحية الأساسية في الدماغ. على الرغم من أن اعتقاد ماونتكاسل كان يخالف العقيدة الراسخة آنذاك، فقد رأى إمكانية في فكرة وجود وحدة متكررة تغطي القشرة الجديدة بالكامل، ويمكنها معالجة مجموعةٍ كاملةٍ من المعلومات التي تتلقَّاها القشرة المخية. اتَّفق هوكينز مع ذلك. في كتابه، وصف العمل الذي قام به ماونتكاسل بأنه «أساس فَهْم علم الأعصاب» نظرًا لأنه عبارة عن «فكرة واحدة وحَّدت كل القدرات المتنوعة والمذهلة للعقل البشري».

لفهم ما يعتقد هوكينز أن وحدات المعالجة المصغرة هذه تفعله، يتعين علينا التفكير في كلٍّ من الزمان والمكان. أوضح هوكينز في حوار له عام ٢٠١٤ قائلًا: «إذا قبلت حقيقة أن الآلات الذكية ستعمل وفقًا لمبادئ القشرة الجديدة، يكون [الزمن] كل شيء.» تتغير المدخلات إلى الدماغ باستمرار، وهو ما يجعل أيَّ نموذجٍ ثابت لوظيفة الدماغ غيرَ كافٍ بشكلٍ مُؤسف. علاوةً على ذلك، تمتدُّ مخرجات الدماغ — أي سلوك الجسم — عبر المكان والزمان. وفقًا لهوكينز، تحريك الجسم بنشاط في مساحة، والحصول على تيارات ديناميكية من البيانات في المقابل يساعدان الدماغ على بناء فهم عميق للعالم.

يعلم علماء الأعصاب شيئًا يسيرًا عن كيفية حركة الحيوانات من مكان لآخر حول العالم. ترتبط هذه الكيفية ارتباطًا وثيقًا بنوع من الخلايا العصبية يُسمى «خلية الشبكة».[٣] خلايا الشبكة هي خلايا عصبية تكُون نشطةً عندما يكون الحيوان في مواقع محددة. تخيَّلْ فأرًا يركض في أنحاء حقلٍ مفتوح. إحدى خلايا الشبكة ستكون نشطة عندما يكون الفأر في منتصف الحقل تمامًا. وقد تكون الخلية نفسها نشطة إذا تحرك الفأر مسافات قليلة تعادل طول الجسم لأعلى نقطة المنتصف، ثم يتحرك مرة أخرى مسافات قصيرة تعادل طول الجسد لأعلى من ذلك. سيُلاحَظ نمط النشاط نفسه إذا انتقل

[٣] حصل كلٌّ من إدوارد موسر وماي بريت موسر وجون أوكيف على جائزة نوبل في عام ٢٠١٤؛ نظير اكتشافهم هذه الخلايا، بالإضافة إلى خلايا أخرى وثيقة الارتباط بها تُعرف باسم «خلايا المكان».

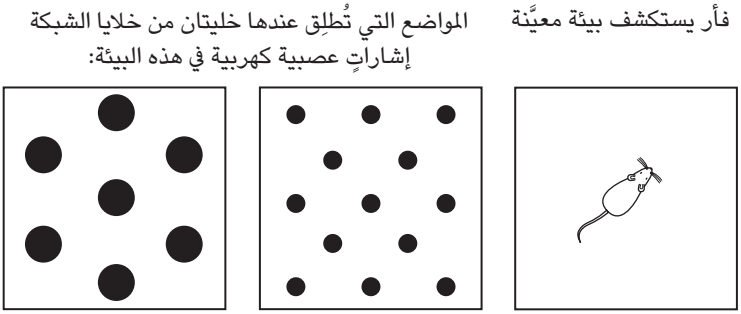
الفأر بزاوية ٦٠ درجة غرب الشمال بدلًا من ذلك. في الواقع، إذا صممت خريطة بجميع الأماكن التي تكون فيها هذه الخلية نشطة، فسينشأ عن هذا نمطٌ مُنقَّط في جميع أنحاء الحقل. هذه النقاط ستكون على مسافات متساوية عند رءوس شبكة مثلثية (ومن هُنا يأتي الاسم). تتباين خلايا الشبكة المختلفة في حجم هذه الشبكة واتجاهها، إلا أنها جميعًا تشترك في هذه السمة المشتركة.

ونظرًا لانبهار هوكينز بقدرة خلايا الشبكة، اعتبرها جزءًا لا يتجزأ من نظريته الخاصة بكيفية اكتساب القشرة الجديدة معلوماتٍ عن العالم. إلا أن ثمة مشكلة تتمثل في أن خلايا الشبكة لا توجد في القشرة الجديدة. بل توجد في جزء أقدم من الدماغ من الناحية التطورية يُعرف باسم القشرة الشمِّية الداخلية. على الرغم من قلة الأدلة التي تدعم وجود خلايا الشبكة خارج هذه المنطقة، افترض هوكينز أنها تختبئ بعيدًا في الطبقة السادسة من كل عمود من أعمدة القشرة الجديدة.

ما الذي تفعله هناك بالضبط؟ لشرح هذا، فضَّل هوكينز استخدام مثال تحريك أصابعك حول كوب من القهوة (أرجَع هوكينز جذور هذه النظرية بالفعل إلى لحظة إدراكٍ خطرت له وهو يتأمل كوبًا من القهوة، حتى إنه سيُحضر معه الكوب في المحادثات واللقاءات لتوضيح فكرته). ستحصل الأعمدة في جزء المعالجة الحسية على مدخلات من طرف الإصبع. وفقًا لنظرية هوكينز، ستتولى خلايا الشبكة الموجودة أسفل هذه الأعمدة تتبُّع موضع طرف الإصبع. بدمج المعلومات حول موضع وجود الإصبع والشكل الذي يبدو عليه الكوب، يمكن للعمود معرفة شكل الجسم الذي يتحرك حوله في المرة التالية التي نجد فيها الجسم نفسه، يمكن للعمود استخدام هذه المعرفة المخزنة للتعرف عليه.

ونظرًا لأن هذه الأعمدة القشرية تقع على امتداد القشرة الجديدة، يمكن لهذه العملية أن تحدث في أي مكان في آن واحد. على سبيل المثال، الأعمدة التي تمثِّل أجزاءً أخرى من اليد ستبني نماذجها حول كوب القهوة عند لمسه. والمناطق الواقعة في الجهاز البصري ستدمج المعلومات البصرية مع موضع العينين لتشكيل فهمها عن الكوب أيضًا. بشكلٍ إجمالي، الفَهْم المتماسك للعالم يُبنى من خلال توزيع المساهمات بهذه الطريقة، كآلافٍ من الأدمغة تعمل في انسِجام.

تُعد نظرية هوكينز دائمة التطور، ولا يزال هناك العديد من التفاصيل التي تخضع للدراسة والبحث، لكن آماله بشأنها عريضة. وفقًا لمنظوره، كما يمكن للأعمدة معرفة أشكال الأجسام الفعلية، يمكنها أيضًا معرفة أشكال الأشياء المجردة. يمكن التنقُّل في مساحة الفكر أو اللغة بنفس آليات التنقل في العالم الواقعي. إذا كان هذا صحيحًا، فإنه




شكل ١٢-١

يفسِّر كيف يمكن استخدام نمطٍ متكررٍ في القشرة الجديدة، للقيام بالعديد من الأشياء المختلفة من الرؤية إلى السمع إلى الحركة إلى الرياضيات.

إلا أن مدى تماثل هذه الأعمدة يُعد موضوعًا للنقاش. للوهلة الأولى قد تبدو القشرة الجديدة مثل الفُسَيفساء المنتظمة، لكن عند فحصها عن كثب، تظهر الاختلافات. وَجدت بعض الدراسات أن حجم الأعمدة، وعدد الخلايا العصبية التي تحتوي عليها هذه الأعمدة ونوعها، وكيفية تفاعلها معًا؛ تختلف باختلاف مناطق القشرة الجديدة. إذا كانت هذه الأعمدة غير متطابقة في التركيب بالفعل، فقد تكون مختلفة في الوظيفة أيضًا. هذا يعني أن كل منطقةٍ من مناطق الدماغ يمكن أن تكون مخصصة للقيام بنوعٍ محدَّدٍ من المهام أكثر مما تفترضه نظرية الألف دماغ. إذا كان الأمر كذلك، فقد يتلاشى الأمل في إيجاد خوارزمية موحدة للذكاء.

كما لاحظنا على مدار الكتاب، الخطوة الأولى في تصميم النماذج الرياضية الخاصة بالدماغ، تتمثَّل عادةً في استخراج مجموعةٍ من الحقائق التي تبدو متصلةً من بين أكوام البيانات المتاحة. بعد ذلك، تُبسَّط هذه الحقائق وتوضع معًا، بطريقةٍ توضِّح آلية عمل جزءٍ من الدماغ نظريًّا. بالإضافة إلى ذلك، بتحديد كيفية بناء هذه النسخة المبسطة من العمليات والأنظمة البيولوجية، قد تلوح بعض التنبؤات الجديدة والمدهشة في الأفق. وعند مقارنة نظرية الألف دماغ بهذا الإطار المفاهيمي، نجد أنها نظريةٌ كأي نظريةٍ أخرى في علم الأعصاب. خضع العديد من المفاهيم المكوِّنة للنظرية — مثل الأعمدة وخلايا الشبكة والتعرف على الجسم — للدراسة بالفعل على نطاق واسع عن طريق الأبحاث التجريبية

والحاسوبية. بهذه الطريقة، لا تُعد النظرية فريدةً من نوعها؛ فهي تخمينٌ قد يكون صحيحًا وقد يكون خطأً، أو مثل العديد من النظريات، قد يكون مزيجًا من هذا وذاك.

لعل ما يميز العمل الذي قام به هوكينز ونومينتا ببساطة هو الاعتقاد الراسخ بأن هذه النظرية مختلفة، وأن المفتاح الذي سيتمكن من فتح جميع الأبواب أمام فهم القشرة المخية بات قريب المنال لأول مرة. عندما سُئل هوكينز عام ٢٠١٩ عن مدى بُعدنا عن الفهم الكامل للقشرة الجديدة، قال: «أشعر أنني بالفعل قد قمت بقفزة كبيرة. لذا، إذا أديت وظيفتي بشكلٍ صحيح على مدار السنوات الخمس القادمة — بمعنى أن أتمكن من الترويج لهذه الأفكار، وإقناع الآخرين بصحتها، وتوضيح ضرورة انتباه المتخصصين في مجال التعلُّم الآلي لهذه الأفكار — فإن هذا معناه أن نتوقع إطارًا زمنيًّا أقل من ٢٠ سنة.» لم يكُن من المعتاد رؤية مثل هذه الثقة لدى العلماء، ونظرًا لأن هوكينز كان مدعومًا بتمويله الخاص، فإن هذه الثقة لم تحدَّ منها الضغوطُ العلمية التقليدية.

عُرف عن هوكينز ثقته بنفسه فيما يتعلق بادعاءاته حول الدماغ. إلا أن قدرته السابقة على الوفاء بوعوده بتقديم خوارزميات مستندة إلى الدماغ كانت موضعًا للشكوك. وصف جيفري هنتون، أحد الرواد في أبحاث الذكاء الاصطناعي، إسهامات هوكينز في المجال بأنها «محبِطة». وفي عام ٢٠١٥ قارن أستاذ علم النفس جاري ماركوس التقنيات التي وفرتها نومينتا بتقنيات الذكاء الاصطناعي الأخرى على النحو الآتي: «لم أجد أي حُجة قوية تثبت أن هذه التقنيات تقدم أداءً أفضل في أي جانب من جوانب التحديات.» ما فُرصة أن تُمدَّ نظرية الألف دماغ المجال بمجموعة من آليات الذكاء الشاملة بحق؟ الزمن وحده — الذي يُعد من المفاهيم المحورية في أفكار هوكينز — هو الفيصل في ذلك.

وفقًا لبعض وجهات النظر، لا يمكن لأي نظرية من نظريات الدماغ أن تكون كاملة دون تفسيرِ أكبر الألغاز الغامضة وأكثرها استمرارًا، وهو الوعي. يُعد الوعي من الموضوعات الصعبة بالنسبة للعلماء، بسبب ارتباطه العميق بالأفكار والموضوعات الفلسفية لقرون. لكن، يرى بعض الباحثين أن إيجاد تعريف علمي دقيق لا يُستخدم لتعريف الوعي فحسب، بل لقياسه في أي سياق، الهدفُ الأسمى لعملهم. كما أن تعريف الوعي هو الوعد الذي قدمته «نظرية المعلومات المتكاملة».

نظرية المعلومات المتكاملة هي محاولة لتعريف الوعي باستخدام معادلة. وُضِعت هذه النظرية في الأساس على يد عالم الأعصاب الإيطالي جوليو تونوني عام ٢٠٠٤، ثم

خضعت للتعديلات والمراجعات منه ومن غيره منذ ذلك الحين. صُممت نظرية المعلومات المتكاملة لقياس الوعي الموجود لدى أي شيء، بما في ذلك أجهزة الكمبيوتر والصخور وحتى الكائنات الفضائية. بتقديمها ادعاءً شاملًا عن ماهية الوعي، تختلف نظرية المعلومات المتكاملة عن النظريات التي تتمحور حول علم الأحياء التي وَضعها بعض علماء الأعصاب.

يمكن لنظرية المعلومات المتكاملة تحريرُ نفسها من السمات المادية المحددة للدماغ؛ لأن الإلهام في هذه النظرية نابع من مصدر مختلف تمامًا، وهو: الاستبطان. بالتأمل في التجربة الواعية الذاتية، توصل تونوني إلى سمات مهمة أساسية للوعي، هذه السمات هي المسلمات التي تُبنى عليها نظرية المعلومات المتكاملة. المسلمة الأولى هي أن الوعي موجود. تشمل المسلمات الأخرى ملاحظة أن التجربة الواعية تتكون من العديد من الأحاسيس المختلفة، وأن التجربة محددة، كما أنها تبدو لنا كُلًّا متكاملًا، كما أن كل تجربة لها سمات فريدة، لا أكثر ولا أقل.

فكَّر تونوني في أنواع أنظمةِ معالَجة المعلومات التي يمكنها أن تُفضي إلى هذه المسلمات الخاصة بالتجربة. من خلال ذلك، تمكن من ربط المسلمات بالمصطلحات الرياضية. والنتيجة النهائية هي مقياس موحدٌ لما يُطلَق عليه «المعلومات المتكاملة»، وهي قيمة رَمَز لها تونوني بالحرف اليوناني فاي. في المجمل، يشير فاي إلى مدى اختلاط المعلومات في النظام. من المفترض أن يؤدي النوع الصحيح من الاختلاط إلى ثراء التجربة وكمالها. وفقًا لنظرية المعلومات المتكاملة، كلما كانت قيمة فاي للنظام أعلى، كان النظام أكثر وعيًا.

كما يتبين، حساب فاي لنظام يتسم بقدر معقول من التعقيد يستحيل تقريبًا. بالنسبة للدماغ البشري، سيتطلب الأمر في البداية إجراء عدد لا نهائي من التجارب تقريبًا، لاستكشاف كيفية تفاعل التراكيب الفرعية في الدماغ. حتى وإن كان فعل ذلك ممكنًا، فعندئذٍ ستبدأ سلسلة طويلة وشاقَّة من العمليات الحسابية. للتغلُّب على هذه الصعوبة، ابتُكر العديد من الصيغ التي تُعطي القِيم التقريبية لفاي. من خلال ذلك، من الممكن تخمين قيم فاي في نظامٍ ما بِناءً على المعرفة. وقد استُخدم ذلك لتفسير السبب وراء أن بعض أنماط النشاط في الدماغ تؤدي إلى تجربة أكثر وعيًا من غيرها. على سبيل المثال، في أثناء النوم، تتعطل قدرة الخلايا العصبية على التواصل بكفاءة. وهذا يجعل الدماغ أقل قدرة على تجميع المعلومات، وهو ما يؤدي لقيمة فاي منخفضة. وفقًا لنظرية

تونوني، يمكن استخدام طريقةِ التفكير نفسها لتفسير حالة اللاوعي التي تلازم نوبات الصرع أيضًا.

قامت النظرية أيضًا ببعض التنبؤات التي ربما تكون مدهشة. على سبيل المثال، تكون درجة فاي لمنظم الحرارة العادي صغيرة، لكنها لا تصل إلى الصفر. هذا يفيد بأن الجهاز الذي ينظم درجة حرارة غرفتك يتمتع بمقدار من التجربة الواعية. علاوة على ذلك، يمكن أن يكون لبعض الأجهزة البسيطة جدًّا، إن صُنعت بطريقة صحيحة، قيمةٌ لفاي أعلى من قيمة فاي التقديرية للدماغ البشري. دفعت هذه النتائج المناهضة للحَدس بعض العلماء والفلاسفة للتشكيك في نظرية المعلومات المتكاملة.

استهدف نقدٌ آخرُ للنظرية مسلماتِها الأساسية. وفقًا لهذا الادعاء، المسلمات التي اختارها تونوني ليست المسلمات الوحيدة التي يمكن أن يُبنى عليها الوعي. يتضح أيضًا أن طريقته في ربط هذه المسلمات بالرياضيات ليست الطريقة الوحيدة، وليست أفضل طريقة. المشكلة هي: إذا كانت دعائم نظرية المعلومات المتكاملة تتسم بالعشوائية، فكيف يمكننا الوثوق في النتائج التي تنبثق عنها، لا سيما عندما تدهشنا؟

كشف استطلاع رأي غير رسمي أجراه العلماء عن الوعي عام ٢٠١٨ أن نظرية المعلومات المتكاملة لم تكن النظرية المفضلة بين الخبراء (جاءت في المرتبة الرابعة بعد نظريتَين أُخريَين والفئة «أخرى» الشاملة). في المقابل، وجد استطلاع الرأي نفسه أن نظرية المعلومات المتكاملة كانت تتمتع بحال أفضل بين غير الخبراء؛ فقد حصلت في الواقع على المرتبة الأولى بين غير الخبراء الذين شعروا بأن لديهم معرفة كافية للإجابة. شكَّ بعض واضعي استطلاع الرأي في أن يكون ذلك نتيجة لتأثير العلاقات العامة التابعة لنظرية المعلومات المتكاملة. ظاهريًّا، يبدو وكأن النظرية تتمتع بأساس جيد، وأحد أسباب ذلك هو أنها مدعومة بمبادئ الرياضيات الدقيقة الراسخة. كما أنها تتميز عن معظم النظريات العلمية حول الوعي بأنها ظهرت في الصحف الرائجة. يتضمن هذا كتابات كريستوف كوخ، عالم الأعصاب البارز الذي تعاون مع تونوني، وأصبح مناصرًا علنيًّا لنظرية المعلومات المتكاملة. في كتابه «الوعي: اعترافات مُختزِل رومانسي»، وصف كوخ رحلته الشخصية العلمية التي درس خلالها الوعي، بما في ذلك العمل الذي قام به مع الفائز بجائزة نوبل فرانسيس كريك، وآراءه حول نظرية المعلومات المتكاملة.[٤] قد تكون

[٤] كتب تونوني بنفسه كتابًا يهدف إلى شرح نظريته لشريحة أكبر من الجمهور. في كتابه «فاي: رحلة من الدماغ إلى الروح»، روى تونوني حكاية خيالية عن استكشاف العالم جاليليو جاليلي، أحد علماء القرن

هذه التفسيرات الموجهة للعامة فعالةً في إيصال النظرية إلى جمهور أوسع، لكنها لا تقنع بالضرورة العلماء المُلِمِّين بالأمر.

حتى العلماء الذين لا يثقون في تأثير نظرية المعلومات المتكاملة لا يزالون يُشِيدون بالمحاولة. يشتهر الوعي بأنه من المفاهيم التي يصعب استيعابها، وهو ما يجعل محاولة نظرية المعلومات المتكاملة لإخضاعه للبحث العلمي خطوة في الاتجاه الصحيح. كتب عالم الفيزياء سكوت آرونسون مُعبِّرًا عن نقده الصريح لنظرية المعلومات المتكاملة ما يأتي: «حقيقة أن نظرية المعلومات المتكاملة خاطئة — خاطئة بشكل واضح لأسباب تتعلق بجوهرها — جعلتها وكأنها ضمن أهم اثنَين في المائة من النظريات الرياضية الخاصة بالوعي التي اقتُرِحت على الإطلاق. كما يتضح لي، جميع نظريات الوعي المتنافسة تقريبًا كانت تفتقر إلى الوضوح والتحديد والدقة، لدرجة أنه لا يسعها سوى أن تكون خاطئة».

يمكن أن تكون النظريات الموحدة العُظمى أمرًا يصعب تحديده بدقَّة. فلكي تكون عظمى وموحدة، لا بد أن تُقدِّم ادعاءات بسيطة حول كائن شديد التعقيد. من المؤكد أن أيَّ ادعاء عن «الدماغ» تقريبًا له استثناءات تكمُن في مكان ما. ومن ثم، فإنَّ جَعْل النظرية الموحدة العظمى شاملة يعني أنها لن تكون قادرةً على تفسير معظم المعلومات المحددة. في الوقت نفسه، عند ربطها أكثر ببيانات محددة، تصبح غير عظمى. وسواء أكانت النظريات الموحِّدة العظمى للدماغ غير قابلة للاختبار، أو لم تخضع للاختبار، أو خضعت للاختبار وفشلت، فإنها عند محاولتها تفسيرَ ما هو أكثر من اللازم تكون معرَّضةً للفشل في تفسير أي شيءٍ على الإطلاق.

وبينما يمثل ذلك معركة شاقة بالنسبة لعلماء الأعصاب الذين يسعَون لوَضْع نظريةٍ موحدة عظمى، فإنها تمثِّل تحديًا أقل في الفيزياء. السبب في هذا الاختلاف قد يكون بسيطًا: التطور. تطورت الأجهزة العصبية على مدى دهور؛ لتناسب احتياجات مجموعةٍ من الحيوانات المحددة في مواقع محدَّدة تواجه تحدياتٍ محددة. عند دراسة نتاج الانتقاء الطبيعي هذا، لا يمكن للعلماء توقُّع البساطة. تتخذ العمليات البيولوجية المسار اللازم لتكوين كائنات حية تؤدي وظائفها بكفاءة، دون النظر إلى مدى القدرة على فَهْم أي جزءٍ

---

السابع عشر، معلومات عن الوعي من خلال التعامل مع شخصيات مستوحاة من شخصية تشارلز داروين وآلان تورينج وكريك.

منها. ومن ثم، لا عجب أن نجد أن الدماغ مجردُ خليطٍ من العناصر والآليات المختلفة. هذا كل ما يحتاجه كي يؤدي دوره. في المجمل، ليس هناك ضمان — وربما ليس هناك أسباب مقنِعة — لتوقع أنه يمكن وَصْف الدماغ باستخدام قوانين بسيطة.

اختار بعض العلماء قبول هذه الفوضى. فبدلًا من اختزال الدماغ وتبسيطه لعناصره الأساسية، بنَوا شكلًا لنموذج موحد كبير يربط كل هذه الأجزاء معًا. وبينما تكون النظريات الموحدة العظمى في بساطة شريحة لحم مطهوَّة مع قليلٍ من الملح فقط، تكون هذه النماذج أقرب إلى قدرٍ كبيرٍ من الحساء. وعلى الرغم من أن هذه النماذج ليست أنيقةً ومنمقةً مثل النظريات الموحدة العظمى، فإنها مجهزة بشكلٍ أفضل لأداء مهمتها.

تُعد المحاكاة المفصَّلة للغاية التي صممها مشروع الدماغ الأزرق، كما تناولنا في الفصل الثاني، مثالًا على هذا المنهج الأكثر شمولًا. استخلص هؤلاء الباحثون تفاصيلَ لا حصر لها عن الخلايا العصبية والتشابكات العصبية، من خلال سلسلةٍ من التجارب المضنية. بعد ذلك، جمَّعوا كل هذه البيانات معًا ووضعوها في نموذج حاسوبي واضح يُمثِّل بقعة صغيرة من الدماغ. مثل هذا المنهج يفترض أن كل تفصيلة لها قيمة ثمينة، وأن الدماغ لن يُفهَم بتجريده من هذه التفاصيل. فهو احتضان صادق لكل التفاصيل الخاصة بالجوانب الحيوية، على أمل أنه بتجميع كل شيء معًا، سينتج فهمٌ كامل لما يجعل الدماغ يعمل. إلا أن المشكلة هنا تتمثل في النطاق. النهج التصاعُدي لإعادة بناء الدماغ يدرس كل خلية عصبية على حِدة، وهو ما يعني أن بناء نموذج كامل بعيدُ المنال.

تتناول «الشبكة الموحدة لبنية المؤشر الدلالي»، المعروفة باسم SPAUN، الأشياء من اتجاه مختلف. فبدلًا من تناول كل التفاصيل الدقيقة لبيولوجيا الأعصاب، فإن «الشبكة الموحدة لبنية المؤشر الدلالي»، التي طورها فريق يعمل تحت إشراف كريس إلياسميث في جامعة ووترلو في أونتاريو، على وَشْك تكوين نموذج ناجح للدماغ. هذا يعني الحصول على المدخلات الحسية نفسها وإنتاج المخرجات الحركية نفسها. على وجه التحديد، تحصل «الشبكة الموحدة لبنية المؤشر الدلالي» على صورٍ باعتبارها مدخلات، وتستخدم ذراعًا مقلدة لكتابة المخرجات. فيما بين المدخلات والمخرجات، ثمة شبكة معقدة مكونة من ٢٫٥ مليون نموذج من الخلايا العصبية البسيطة مرتبة، بحيث تحاكي بنية الدماغ بالكامل على نطاقٍ واسع. من خلال هذه الوصلات العصبية، يمكن لـ «الشبكة الموحدة لبنية المؤشر الدلالي» تنفيذ سبع مهام إدراكية وحركية مُهمَّة؛ مثل كتابة الأرقام، وتذكر قوائم الأشياء، وإكمال الأنماط البسيطة. بهذه الطريقة، تُضحِّي «الشبكة الموحدة لبنية المؤشر الدلالي»

بالأناقة في سبيل الوظيفة. بالفعل يتكون الدماغ البشري من عشرات آلاف الأضعاف من الخلايا العصبية، ويمكنه فعل أكثر من سبع مهام. غير معروف ما إذا كانت المبادئ المتعلقة بفائدةِ «الشبكة الموحدة لبنية المؤشر الدلالي» ونطاقِها اللذين وضعاها في مكانتها الحالية؛ يمكن أن يقوداها إلى نموذج كامل للدماغ، أم يتعين إضافة مزيدٍ من تفاصيل الخلايا العصبية.

النظريات الموحدة العظمى تهدف إلى التكثيف. فهي تُبسِّط المعلومات المتعددة في شكلٍ موجز وسهل الفهم. هذا يجعل النظريات الموحدة العظمى تبدو مُرضية؛ لأنها تعطي شعورًا بأنه يمكن استيعاب آليات عمل الدماغ بالكامل. لكن نماذج مثل «الشبكة الموحدة لبنية المؤشر الدلالي» ومحاكاة مشروع الدماغ الأزرق موسَّعة. فهي تحصل على العديد من مصادر البيانات وتستخدمها لتفسير التركيب. ومن ثم، فإنها تُضَحي بقابلية التفسير في سبيل الدقة. فهي تهدف إلى تفسير كل شيء بتجميع كل شيء يمكن تفسيره.

لكن مثل جميع النماذج، هذه النماذج الأكثر اتساعًا ليست نسخة طبق الأصل من الواقع. واضعو هذه النماذج لا يزالون في حاجة إلى اختيار ما يتعين عليهم تضمينه وما لا يتعين عليهم تضمينه، وما يهدفون إلى تفسيره وما يمكنهم تجاهله. فعندما يسعون إلى وضع شيء مشابه لنظرية موحدة عظمى، فإنهم يأملون في العثور على أبسط مجموعة من المبادئ يمكن أن تشرح أكبر مجموعة من الحقائق. لكن في حالة تناول شيء في نفس مستوى تعقيد الدماغ، حتى هذه المبادئ البسيطة ستظل معقدة. تستحيل معرفة مستوى التفاصيل وحجم النطاق المطلوبَين لاستخلاص سمات الدماغ ذات الصلة. يمكن إحراز تقدم فيما يتعلق بهذه المسألة فقط من خلال بناء نماذج واختبارها.

إجمالًا، ارتبط علم الأعصاب بعلاقة مثمرة جدًّا مع العلوم ذات الطبيعة الأكثر صرامة ودقة وكمية. وقد حصل على العديد من الميزات من علوم مثل الفيزياء والرياضيات والهندسة. هذه التشبيهات والطرق والأدوات غيَّرت التفكير في كل شيء من الخلايا العصبية إلى السلوك. في المقابل، كانت دراسة الدماغ مصدر إلهام للذكاء الاصطناعي، كما كانت موضعًا لاختبار التقنيات الرياضية.

لكن علم الأعصاب مستقلٌّ عن الفيزياء. لذا لا بد أن يتجنَّب لعبَ دورِ الأخ الأصغر، فلا يحاول اتِّباع خطى المنهج الأقدم كما هي بالضبط. فالمبادئ التي تحكم علم الفيزياء والاستراتيجيات التي قادته إلى النجاح؛ لا تنجح دائمًا عند تطبيقها على علم الأحياء. ومن ثم، لا بد من توخِّي الحذر عند الاستلهام. عند بناء نماذج العقل، ينبغي ألَّا تكون

جماليات الرياضيات هي المبدأ الوحيد الذي يوجهنا. بدلًا من ذلك، لا بد أن يوازَن هذا التأثير مع الحقائق الفريدة للدماغ. عند الموازنة بشكلٍ صحيح، يمكن اختزال تعقيدات علم الأحياء والتعبير عنها بلغة الرياضيات بطريقةٍ تنتج عنها رؤًى حقيقية، ولا تكون متأثرةً بالمجالات الأخرى بشكلٍ مفرط. بهذه الطريقة، تسعى دراسة الدماغ إلى إيجاد منهجٍ خاصٍّ بها يستخدم الرياضيات لفَهْم العالم الطبيعي.

# ملحق الرياضيات

### الفصل الثاني: آلية إطلاق جهد الفعل في الخلايا العصبية

وضع لابيك معادلة لوصف كيفية تغيُّر جهد الفعل على جانبَي غشاء الخلية بمرور الوقت. تعتمد هذه المعادلة على المعادلات المستخدمة لوصف الدوائر العصبية. على وجه التحديد، يُعرف فرق الجهد، $V(t)$، وفقًا للمعادلة الخاصة بدائرةٍ بها المقاومة $(R)$ والمكثِّف $(C)$ موصلان على التوازي:

$$\tau \frac{dV}{dt} = -(V(t) - V_{\text{rest}}) + RI(t)$$

حيث $t = RC$. تُمثَّل المدخلات الخارجية للخلية (التي يكون مصدرها الشخص القائم بالتجربة أو تأثيرات خلية عصبية أخرى) بالرمز $I(t)$. ومن ثم فإن غشاء الخلية يدمج هذه المدخلات الخارجية مع بعض التسريب.

لم تتناول معادلة لابيك ما يحدث لجهد الغشاء في أثناء حدوث جهد الفعل. لكن، يمكننا إضافة قاعدة جديدة توضح متى وصل غشاء الخلية لحد العتبة، وهو ما من شأنه أن يتسبَّب في حدوث جهد فعل. على وجه التحديد، لتحويل هذه المعادلة إلى نموذج لخلية عصبية تُطلق إشارات عصبية كهربية، يعود فرق الجهد إلى حالة الراحة $(V_{\text{rest}})$ بمجرد أن يصل إلى حد عتبة الإطلاق $(V_{\text{thresh}})$.

$$V(t) = V_{\text{rest}}, \quad \text{if } V(t) = V_{\text{thresh}}$$

هذا لا يحاكي العمليات المعقدة التي ينطوي عليها جهد الفعل (وهو ما استدعى الحاجة إلى نموذج هودجكين وهكسلي)، لكنه قدَّم طريقة بسيطة لحساب عدد مرات إطلاق جهد الفعل.

## الفصل الثالث: تعلُّم الحوسبة

شبكة البيرسيبترون هي شبكة عصبية اصطناعية تتكون من طبقة واحدة يمكنها تعلُّم تنفيذ مهام التصنيف البسيطة. يحدث التعلُّم عبر التحديثات في الأوزان الترجيحية للوصلات بين الخلايا العصبية التي تتلقَّى المدخلات، والخلية العصبية التي تنتج المخرجات، والتي تُحسب بِناءً على أمثلةٍ محددةٍ للمُدخلات والمُخرجات.

تبدأ خوارزمية التعلُّم بمجموعة من الأوزان العشوائية، $w_n$، واحد لكلٍّ من المدخلات الثنائية البالغ عددها $N$، أي $x_n$. يُحسب تصنيف المخرجات، $y$، للبيرسيبترون على النحو الآتي:

$$y(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1, & \text{if } \sum_{n=1}^{N} w_n x_n + b \geq 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

حيث $b$ هو التحيز الذي يغير حد العتبة. خلال عملية التعلم، يُحدَّث كل وزن من الأوزان الترجيحية $\mathbf{w}$ وفقًا لقاعدة التعلم:

$$w_n \longleftarrow w_n + \lambda \left( y^* - y \left( \mathbf{x} \right) \right) x_n$$

حيث $y^*$ التصنيف الصحيح و$\lambda$ سرعة التعلُّم. إذا كان $x_n$ يساوي واحدًا، فإن إشارة الفرق بين التصنيف الصحيح وناتج البيرسيبترون ستُحدد مدى تحديث $w_n$. إذا كان $x_n$ أو الفرق يساوي صفرًا، فهذا يعني عدم حدوث تحديث.

## الفصل الرابع: تكوين الذكريات والاحتفاظ بها

تُمثِّل شبكة هوبفيلد الذكريات في صورة أنماط من النشاط العصبي. تتيح الوصلات بين الخلايا العصبية للشبكة تكوين ذاكرة ارتباطية، بمعنى أنه يمكن استرجاع ذكرى بالكامل من خلال تنشيط مجموعةٍ من الذكريات الفرعية.

تتكون الشبكة من $N$ من الخلايا التي تُحدد التفاعلات بينها وفقًا لمصفوفة الأوزان المتماثلة $w$. كل قيمة $(w_{nm})$ في هذه المصفوفة تحدد قوة الاتصال بين الخلية العصبية $n$ والخلية $m$. عند كل نقطة زمنية محددة، تُحدَّث حالة النشاط لكل خلية $(C_n \text{ for } n = 1 \dots N)$ وفقًا للمعادلة الآتية:

$$C_n \longleftarrow \begin{cases} 1, & \text{if } \sum_{m=1}^{N} w_{nm} C_m \geq \theta_n \\ -1, & \text{Otherwise} \end{cases}$$

حيث $\theta_n$ حد العتبة.

كل ذكرى، $\epsilon^i$، عبارة عن متجه طوله $N$ يحدد حالة النشاط لكل خلية عصبية. إذا كان النشاط الأوَّلي للشبكة عبارة عن تمثيل مشوش وغير مكتمل للذكرى، فستتطوَّر الشبكة بالتدريج لتصبح في حالة الذكرى الجاذبة (التي تُحدَّد باستخدام $\epsilon^i$)، وعندئذٍ سيتوقف نشاط الشبكة **c** عن التغيُّر.

تُحدَّد مصفوفة الأوزان عن طريق الذكريات المخزنة في الشبكة. لتخزين $K$ من الذكريات، تُحدد كل قيمة من قيم $W$ وفقًا للمعادلة الآتية:

$$w_{nm} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^{K} \epsilon_n^i \epsilon_m^i$$

ومن ثم، فإن أزواج الخلايا العصبية التي لها نشاط متماثل في العديد من الذكريات ستتمتَّع بروابط قوية موجبة، أما الخلايا العصبية التي لها أنماط متعارضة من النشاط، فسيكون بينها روابط قوية سالبة.

## الفصل الخامس: الاستثارة والتثبيط

يمكن للشبكات التي تحافظ على قدر مناسب من التوازن بين الاستثارة والتثبيط تكوينُ نشاط عصبي مشوش ثابت. يمكن تحليل هذه الشبكات باستخدام منهج المجال الوسطي، الذي يُبسِّط العمليات الرياضية للشبكة بالكامل إلى حفنة من المعادلات.

تبدأ معادلات المجال الوسطي للشبكة المتوازنة بشبكة تحتوي على $N$ من الخلايا العصبية (محفِّزة ومثبِّطة) حيث تتلقى الخلايا العصبية مُدخلات خارجية ومُدخلات متكررة. فيما يتعلق بالمدخلات المتكررة، تتلقى كل خلية عصبية $K$ من المدخلات المحفِّزة و$K$ من المدخلات المثبِّطة. يُفترض أن تكون قيمة $K$ أقل من $N$:

$$1 << K << N$$

بالنظر إلى حالة تتضمن قيمة $K$ كبيرة ومدخلات خارجية ثابتة للشبكة، يُعطى متوسط المدخلات لخلية من النوع $j$ (محفِّزة أو مثبِّطة) بالمعادلة الآتية:

$$\mu_i = \sqrt{K}\left(X_i m_X + m_E - W_{jI} m_i\right) - \theta_j$$

وتباينُ المدخلات يساوي ما يأتي:

$$\sigma_j^2 = m_E + W_{ji}^2 m_I$$

يمثل الحدَّان $X_j$ و$m_x$ قوة اتصال المدخلات الخارجية بمجموعة الخلايا $j$، ومعدل إطلاقها للإشارات العصبية الكهربية على الترتيب، و$\theta_j$ هو حد العتبة لإطلاق جهد الفعل. $W_{jI}$ هو قياس القوة الإجمالية التي تربط مجموعة الخلايا المثبِّطة بمجموعة الخلايا $j$ (القيمة المقابلة من مجموعة الخلايا المحفِّزة تُعرَّف بأنها تساوي واحدًا). تُعطى قيمة $W_{jI}$ على صورة قوة اتصال منفرد مضروبًا في $\sqrt{K}$.

$m_i$ هو متوسط نشاط مجموعة الخلايا $j$ محددًا بالنطاق من صفر إلى واحد. تُحدد هذه القيم من خلال متوسط قيمة تباين المدخلات وجذرها التربيعي، وفقًا للمعادلة الآتية:

$$m_j = H\left(\frac{-\mu_j}{\sqrt{\sigma_j^2}}\right)$$

حيث $H$ دالَّة الخطأ المكمِّلة.

للتأكد من أن المدخلات المحفِّزة أو المثبِّطة لم تطغَ على المخرجات (أي تتجاوز قُدرة الشبكة على معالجة هذه المدخلات لإنتاج مخرجات مناسبة)، لا بد أن يكون الحد الأول في معادلة $\mu_j$ من نفس رتبة حد العتبة، وهي واحد. لتحقيق هذا، لا بد أن تُساوي قوة الروابط الفردية $1/\sqrt{K}$.

## الفصل السادس: مراحل الرؤية

تعالج الشبكات العصبية الالتفافية الصور، من خلال محاكاة بعض السمات الأساسية التي تميز النظام البصري في الدماغ. وهي تتكون من العديد من العمليات الأساسية. تتمثل الخطوة الأولى في أخذ صورة $I$، وتطبيق عملية الالتفاف عليها باستخدام مرشِّح $F$. تؤخذ نتيجة هذا الالتفاف وتُطبق عليها دالة لا خطية تُطبق بشكلٍ فردي على كل عنصر على حِدة ($\phi$) للحصول على مخرجات الطبقة التي تُشبه الخلايا البسيطة:

$$A_s = \phi\,(I * F)$$

أشهر دالة غير خطية هي دالة التصحيح الإيجابي:

$$\phi\,(x) = \max\,(x, 0)$$

بافتراض أن كُلًّا من الصورة والمرشِّح مصفوفة ثنائِيَّة الأبعاد، فإن $A^s$ يكون أيضًا مصفوفة ثنائية الأبعاد. لمحاكاة استجابات الخلايا المركبة، تُطبق عملية التجميع بأخذ أعلى قيمة ثنائية الأبعاد (2D max-pooling) على النشاط الشبيه بنشاط الخلايا العصبية البسيطة. يُعرَّف كل عنصر من عناصر المصفوفة التي تُمثِّل المخرجات الشبيهة بمخرجات الخلايا البسيطة ($A^c$):

$$a^c_{ij} = \max_{pq \in Pij} a^S_{pq}$$

حيث $P_{ij}$ عبارة عن منطقة ثنائية الأبعاد مجاورة لـ $\mathbf{A}^S$ تتمحور حول الموقع $ij$. نستنتج من هذه العملية أن نشاط الخلية المعقدة ببساطة هو أعلى قيمة لنشاط مجموعة الخلايا البسيطة التي تحصل منها على مدخلات.

## الفصل السابع: فك الشفرة العصبية

عرَّف شانون المعلومات بدلالة وحدات البِت، وهي تُحسب على صورة لوغاريتم الاحتمال العكسي لرمزٍ للأساس اثنين. يمكن كتابة ذلك أيضًا على صورة سالب لوغاريتم الاحتمال للأساس اثنين كما يلي:

$$\log_2 P\left(\frac{1}{x_i}\right) = -\log_2 P\left(x_i\right)$$

إجمالي المعلومات في شفرة، وهي قيمة تعرف باسم الإنتروبيا $(H)$، يساوي دالة المعلومات في كُلٍّ من رموزه. على وجه التحديد، الإنتروبيا هو مجموع المعلومات التي يتضمنها كل رمز $(x_i)$ من رموز الشفرة $X$ مضروبًا في احتمالية استخدام هذا الرمز، أي $P\left(x_i\right)$.

$$H\left(X\right) = -\sum_i P\left(x_i\right) \log_2 P\left(x_i\right)$$

## الفصل الثامن: الحركة بأبعاد محدودة

يمكن استخدام تحليل العناصر الأساسية (PCA) لتخفيض عدد الأبعاد لمجموعة من الخلايا العصبية. تطبيق تحليل العناصر الأساسية على البيانات العصبية يبدأ بمصفوفة بيانات $X$؛ حيث يمثل كل صَفٍّ خليةً عصبية (من إجمالي عدد $N$ من الخلايا العصبية)، وكل عمود هو نشاط هذه الخلايا العصبية مطروحًا منه المتوسط على مر الزمن (بطول $L$):

$$\mathbf{X} \in \mathbb{R}^{N \times L}$$

مصفوفة التشتُّت لهذه البيانات تُعطى على الصورة:

$$K = XX^T$$

توضِّح معادلة تحليل القيم الذاتية الآتي:

$$K = Q\Lambda Q^{-1}$$

حيث يمثل كل عمود في $Q$ متجهًا خاصًّا لـ $K$ و$\Lambda$ عبارة عن مصفوفة قُطرية؛ حيث تكون المدخلات الواقعة على طول القُطر القيمَ الذاتية المقابلة للمتجهات الذاتية. تمثل المتجهات الذاتية لـ $K$ العناصر الأساسية للبيانات.

لتقليل البيانات كاملة الأبعاد إلى $D$ من الأبعاد، تُستخدم المتجهات الذاتية العُليا $D$ (حسب ترتيبها وفقًا لقيمها الذاتية) باعتبارها محاور جديدة. استخدام هذه المحاور الجديدة لفهم البيانات بشكلٍ أفضل يقدِّم مصفوفة بيانات جديدة:

$$X_{\text{reduced}} \in \mathbb{R}^{D \times L}$$

إذا كانت قيمة $D$ تساوي ثلاثة أو أقل، يمكن تصوُّر مصفوفة البيانات مخفضة الأبعاد هذه.

## الفصل التاسع: من البنية إلى الوظيفة

أفاد واتس وستروجتس أنه يمكن تجسيد العديد من مُخطَّطات العالم الواقعي في صورة شبكات العالم الصغير. تحتوي شبكات العالم الصغير في المتوسط على مسارات قصيرة (عدد الحواف الفاصلة بين أي عُقدتين) ومعامِلات تجميع عالية.

تخيَّلْ مخططًا أو بيانًا مكوَّنًا من $N$ من العُقد. إذا وصِّلت عقدة محددة $n$ بـ $k_n$ من العُقد الأخرى تُعرف باسم العُقد المجاورة، فإن مُعامل التجميع لهذه العقدة يساوي:

$$C_n = \frac{E_n}{k_n\left(k_n - 1\right)/2}$$

حيث $E_n$ هو عدد الحواف الموجودة بين العُقد المجاورة لـ $n$، والحد الموجود في المقام هو إجمالي عدد الحواف التي قد تكون موجودةً بين هذه العُقد. ومن ثَم، فإن معامل التجميع هو مقياس لمدى الترابط الداخلي فيما بين مجموعات العقد.

يُعطى معامل التجميع للشبكة بأكملها، من خلال متوسط معاملات التجميع لكل عقدة:

$$C = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} C_n$$

**الفصل العاشر: اتخاذ قرارات عقلانية**

فيما يلي الصيغة الكاملة لقاعدة بايز:

$$P(h \mid d) = \frac{P(d \mid h)\, P(h)}{P(d)}$$

حيث $h$ يمثل الفرضية و$d$ البيانات المرصودة. يُعرف الحد الموجود على الطرف الأيسر باسم التوزيع البعدي. تتناول نظرية اتخاذ القرار لبايز كيف يمكن لقاعدة بايز توجيه القرارات، من خلال توضيح الطريقة الصحيحة لرَبْط التوزيع البعدي بعملية إدراك أو اختيار أو فعل محدد.

في نظرية القرار لبايز، تشير دالة الخسارة أو التكلفة إلى عاقبة اتخاذ أنواع مختلفة من القرارات الخاطئة (على سبيل المثال، رؤية زهرة حمراء على أنها بيضاء على سبيل الخطأ، ستكون لها نتائج سلبية مختلفة عن رؤية زهرة بيضاء على أنها حمراء). في أبسط دالة خسارة، أي فرضية يقع عليها الاختيار بشكلٍ غير صحيح تخضع للعقوبة نفسها؛ بينما لا يخضع الاختيار الصحيح ($h^*$) لأي عقوبة:

$$\imath\left(\hat{h}, h^*\right) = \begin{cases} 1, & \text{if } \hat{h} \neq h^* \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

يُحسب إجمالي الخسارة المتوقعة لاختيار فرضية معينة ($h$) من خلال ضرب هذه الخسارة في الاحتمال الخاص بكل فرضية:

$$L\left(\hat{h}\right) = \sum_{h} l\left(\hat{h}, h\right) P(h \mid d)$$

وهو ما ينتج عنه:

$$L\left(\hat{h}\right) = 1 - P\left(h = \hat{h} \mid d\right)$$

ومن ثم، لتقليل هذه الخسارة، لا بد من اختيار الخيار الذي يزيد من التوزيع البعدي. بمعنى أن أفضل فرضية هي تلك التي تتضمن أعلى احتمال بعدي.

## الفصل الحادي عشر: كيف توجه المكافآت الأفعال

يصف التعلم المعزز كيف يمكن للحيوانات أو الكيانات الاصطناعية التصرف ببساطة عن طريق تلقي مكافآت. تُعد القيمة مفهومًا محوريًّا في التعلم المعزز، وهي مقياس يدمج مقدار المكافأة المستلمة في الوقت الحالي مع ما هو متوقَّع أن يأتي في المستقبل.

تُعرِّف معادلة بيلمان القيمة $(V)$ لحالة أو عدة حالات، بدلالة المكافأة المستلَمة $(R)$ إذا اتُّخذ القرار $(a)$ في هذه الحالة زائد القيمة المخصومة في الحالة التالية:

$$V(s) = \max_{a}[R(s,a) + \beta V(T(s,a))]$$

$\beta$ هُنا عبارة عن عامل الخصم، و$T$ دالة الانتقال التي تحدد الحالة التي سيكون فيها الكيان بعد اتخاذ القرار $a$ في الحالة $s$. تهدف عملية تحديد أعلى قيمة إلى التأكد من أن القرار الذي ينتج عنه أعلى قيمة هو الذي يُتَّخذ. يمكنك ملاحظة أن دالة القيمة تُعرَّف بدلالة نفسها؛ نظرًا لأن دالة القيمة نفسها تظهر في الطرف الأيمن من المعادلة.

## الفصل الثاني عشر: النظريات الموحدة العظمى الخاصة بالدماغ

قُدم مبدأ الطاقة الحرة باعتباره نظرية موحِّدة للدماغ يمكنها وصف النشاط العصبي والسلوك. يُعرَّف مبدأ الطاقة الحرة على النحو الآتي:

$$F(s,\mu) = -\log p(s) + D_{KL}[q(x \mid \mu) || p(x \mid s)]$$

حيث يشير $s$ إلى المدخلات الحسية، ويشير الرمز $\mu$ إلى حالات الدماغ الداخلية، ويشير الرمز $x$ إلى الحالات في العالم الخارجي. يُشار للحد الأول في هذا التعريف (سالب لوغاريتم احتمال $s$) أحيانًا باسم «المفاجأة»؛ لأن قيمته تكون مرتفعة عندما تكون قيمة الاحتمال المتعلق بالمدخلات الحِسية منخفضة.

يشير $D_{KL}$ إلى تباعُد كولباك-ليبلير بين توزيعين احتماليَّين، ويُعرف كما يأتي:

$$D_{KL}[q||p] = \sum_{y \in Y} q(y) \log \frac{q(y)}{p(y)}$$

ومن ثم، يقيس الحد الثاني من تعريف مبدأ الطاقة الحرة الفرق بين الاحتمالِ المتعلق بحالاتٍ في العالم الواقعي، بناءً على تنبؤات العقل الداخلية، والاحتمالِ المتعلق بحالاتٍ

في العالم الواقعي بناءً على المدخلات الحسية. يمكن التفكير في الدماغ باعتباره يحاول تقدير $p(x \mid s)$ باستخدام حالاته الداخلية $(q(x \mid \mu))$، وكلما كان التقدير أفضل، تكون الطاقة الحرة أقل.

نظرًا لأن مبدأ الطاقة الحرة ينُص على أن الدماغ يهدف إلى تقليل الطاقة الحرة، لا بد أن يُحدِّث الدماغ تنبؤاته وفقًا لما يأتي:

$$\mu = \min_{\mu} F(s, \mu)$$

بالإضافة إلى ذلك، اختيار الأفعال التي يقوم بها الحيوان سيؤثر على المدخلات الحسية التي يتلقاها:

$$s' = f(a)$$

ومن ثم، لا بد من اختيار الأفعال وفقًا لقدرتها على تقليل الطاقة الحرة:

$$a = \min_{a} F\left(s', \mu'\right)$$

# المراجع

## الفصل الأول: الأبقار الكروية


Abbott, L. F., 2008, Theoretical neuroscience rising, *Neuron* 60(3):489–95 doi:10.1016/j.neuron.2008.10.019.

Cajal, S. R. y., 2004, *Advice for a Young Investigator*, MIT Press, Massachusetts, USA.

Lazebnik, Y., 2002, Can a biologist fix a radio Or, what I learned while studying apoptosis, *Cancer Cell* 2(3):179–82 doi:10.1016/s1535-6108(02)00133-2.

Nakata, K., 2013, Spatial learning affects thread tension control in orb-web spiders, *Biology Letters* 9(4) doi:10.1098/rsbl.2013.0052.

Russell, B., 2009, *The Philosophy of Logical Atomism*, Routledge, London.


## الفصل الثاني: آلية إطلاق جهد الفعل في الخلايا العصبية


Branco, T., et al., 2010, Dendritic discrimination of temporal input sequences in cortical neurons, *Science* 329(5999):1671–75 doi:10.1126/science.1189664.

Bresadola, M., 1998, Medicine and science in the life of Luigi Galvani (1737–98), *Brain Research Bulletin* 46(5):367–80 doi:10.1016/s0361-9230(98)00023-9.

Brunel, N., & van Rossum, M. C. W., 2007, Lapicque's 1907 paper: From frogs to integrate–and–fire, *Biological Cybernetics*, 9(5):337–39 doi:10.1007/s00422–007–0190–0.

Burke, R. E., 2006, John Eccles' pioneering role in understanding central synaptic transmission, *Progress in Neurobiology* 78(3):173–88 doi:10.1016/j.pneurobio.2006.02.002.

Cajori, F., 1962, *History of Physics*, Dover Publications, New York, USA.

Finkelstein, G., 2013, *Emil Du Bois–Reymond: Neuroscience, Self, and Society in Nineteenth–Century Germany*, MIT Press, Massachusetts, USA.

Finkelstein, G., 2003, M. Du Bois–Reymond goes to Paris, *The British Journal for the History of Science* 36(3):261–300 www.jstor.org/stable/4028156. JSTOR.

Volta, A. & Banks, J., 1800, On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds, *The Philosophical Magazine* 7(28):289–311 doi:10.1080/14786440008562590.

Huxley, A. F., 1964, Excitation and conduction in nerve: quantitative analysis, *Science* 145(3637):1154–59 doi:10.1126/science.145.3637.1154.

Bynum, W. F. & Porter, R., 2006, Johannes Peter Müller, *Oxford Dictionary of Scientific Quotations*, OUP, Oxford.

Kumar, A., et al., 2011, The role of inhibition in generating and controlling parkinson's disease oscillations in the basal ganglia, *Frontiers in Systems Neuroscience* 5 doi:10.3389/fnsys.2011.00086.

Tyndall, J., 1876, Lessons in electricity IV, *Popular Science Monthly* 9, Wikisource.

Markram, H., et al., 2015, Reconstruction and simulation of neocortical microcircuitry, *Cell* 163(2):456–92 doi:10.1016/j. cell.2015.09.029.

McComas, A., 2001, *Galvani's Spark: The Story of the Nerve Impulse*, Oxford University Press, USA.

Piccolino, M., 1998, Animal electricity and the birth of electrophysiology: the legacy of Luigi Galvani, *Brain Research Bulletin* 46(5):381–407 doi:10.1016/s0361-9230(98)00026-4.

Schuetze, S. M., 1983, The discovery of the action potential, *Trends in Neurosciences* 6:164–68 doi:10.1016/0166-2236(83)90078-4.

Squire, L. R., editor, 1998, *The History of Neuroscience in Autobiography, Volume 1*, Academic Press, Cambridge, Massachusetts, USA.

Squire, L. R., editor, 2003, *The History of Neuroscience in Autobiography, Volume 4*, Academic Press, Cambridge, Massachusetts, USA.

Squire, L. R., editor, 2006, *The History of Neuroscience in Autobiography, Volume 5*, Academic Press, Cambridge, Massachusetts, USA.

## الفصل الثالث: تعلُّم الحَوْسَبة

Le, Q. V. & Schuster, M., 2016, A neural network for machine translation, at production scale, Google AI Blog, ai.googleblog.com/2016/09/a-neural-network-for-machine.html. Accessed 13 April 2020.

Albus, J. S., 1971, A theory of cerebellar function, *Mathematical Biosciences* 10(1):25–61 doi:10.1016/0025-5564(71)90051-4.

Anderson, J. A. & Rosenfeld, Edward, 2000, *Talking Nets: An Oral History of Neural Networks*, MIT Press, Massachusetts, USA.

Arbib, M. A., 2000, Warren McCulloch's search for the logic of the nervous system, *Perspectives in Biology and Medicine* 43(2):193–216 doi:10.1353/pbm.2000.0001.

Bishop, G. H., 1946, Nerve and synaptic conduction, *Annual Review of Physiology* 8:355–74 doi:10.1146/annurev.ph.08.030146.002035.

Garcia, K. S., et al., 1999, Cerebellar cortex lesions prevent acquisition of conditioned eyelid responses, *Journal of Neuroscience* 19(24):10940–47 doi:10.1523/JNEUROSCI.19-24-10940.1999.

Gefter, A., 2015, The man who tried to redeem the world with logic, *Nautilus*http://nautil.us/issue/21/information/the-man-who-tried-to-redeem-the-world-with-logic.

Hartell, N. A., 2002, Parallel fiber plasticity, *Cerebellum* 1(1):3–18 doi:10.1080/147342202753203041.

Linsky, B. & Irvine, A. D., 2019, Principia Mathematica, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, edited by Zalta, E. N., Metaphysics Research Lab, Stanford University https://plato.stanford.edu/archives/fall2019/entries/principia-mathematica/.

McCulloch, W. S., 2016, *Embodiments of Mind*, MIT Press, Massachusetts, USA.

Papert, S., 1988, One AI or many? *Daedalus* 117(1):1–14 www.jstor.org/stable/20025136. JSTOR.

Piccinini, G., 2004, The first computational theory of mind and brain: a close look at Mcculloch and Pitts's logical calculus of ideas immanent in nervous activity, *Synthese* 141(2):175–215 doi:10.1023/B:SYNT.0000043018.52445.3e.

Rosenblatt, F., 1957, *The Perceptron, a Perceiving and Recognizing Automaton Project Para*, Cornell Aeronautical Laboratory, New York, USA.

Russell, B., 2014, *The Autobiography of Bertrand Russell*, Routledge, London.

Schmidhuber, J., 2015, Who invented backpropagation? http://people.idsia.ch/~juergen/who-invented-backpropagation.html. Accessed 13 April 2020.

## الفصل الرابع: تكوين الذكريات والاحتفاظ بها

Bogacz, R., et al., 2001, A familiarity discrimination algorithm inspired by computations of the perirhinal cortex. *Emergent Neural*

*Computational Architectures Based on Neuroscience: Towards Neuroscience–Inspired Computing*, Springer–Verlag, Switzerland 428–441.

Brown, R. E. & Milner, P. M., 2003, The legacy of Donald O. Hebb: more than the Hebb synapse, *Nature Reviews Neuroscience* 4(12):1013–19 doi:10.1038/nrn1257.

Chumbley, J. R., et al., 2008, Attractor models of working memory and their modulation by reward, *Biological Cybernetics* 98(1):11–18 doi:10.1007/s00422–007–0202–0.

Cooper, S. J., 2005, Donald O. Hebb's synapse and learning rule: a history and commentary, *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 28(8):851–74 doi:10.1016/j.neubiorev.2004.09.009.

Fukuda, K., et al., 2010, Discrete capacity limits in visual working memory, *Current Opinion in Neurobiology* 20(2):177–82 doi:10.1016/j.conb.2010.03.005.

Fuster, J. M. & Alexander, G. E., 1971, Neuron activity related to short–term memory, *Science* (New York, USA) 173(3997):652–54 doi:10.1126/science.173.3997.652.

Hopfield, J. J., 2014, Whatever happened to solid state physics? *Annual Review of Condensed Matter Physics* 5(1):1–13 doi:10.1146/annurev–conmatphys–031113–133924.

Hopfield, J. J., 2018, Now what? Princeton Neuroscience Institute https://pni.princeton.edu/john–hopfield/john–j.–hopfield–now–what. Accessed 13 April 2020.

Kim, Sung Soo, et al., 2017, Ring attractor dynamics in the drosophila central brain, *Science* (New York, USA) 356(6340):849–53 doi:10.1126/science.aal4835.

Lechner, H. A., et al., 1999, 100 years of consolidation–remembering Müller and Pilzecker, *Learning & Memory* 6,(2):77–87 doi:10.1101/lm.6.2.77.

MacKay, D. J. C., 2003, *Information Theory, Inference and Learning Algorithms*, Cambridge University Press, UK.

Martin, S. J. & Morris, R. G. M., 2002, New life in an old idea: the synaptic plasticity and memory hypothesis revisited, *Hippocampus* 12(5):609–36 doi:10.1002/hipo.10107.

Pasternak, T. & Greenlee, M. W., 2005, Working memory in primate sensory systems, *Nature Reviews Neuroscience* 6(2):97–107 doi: 10.1038/nrn1603.

Zhang, K., 1996, Representation of spatial orientation by the intrinsic dynamics of the head–direction cell ensemble: a theory, *Journal of Neuroscience*. www.jneurosci.org/content/16/6/2112. Accessed 13 April 2020.

Roberts, A. C. & Glanzman, D. L., 2003, Learning in aplysia: looking at synaptic plasticity from both sides, *Trends in Neurosciences* 26(12):662–70 doi:10.1016/j.tins.2003.09.014.

Sawaguchi, T. & Goldman–Rakic, P. S., 1991, D1 dopamine receptors in prefrontal cortex: involvement in working memory, *Science* 251(4996):947–50 doi:10.1126/science.1825731.

Schacter, D. L., et al., 1978, Richard Semon's theory of memory, *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior* 17(6):721–43 doi:10.1016/S0022–5371(78)90443–7.

Skaggs, W. E., et al., 1995, A model of the neural basis of the rat's sense of direction, *Advances in Neural Information Processing Systems 7*, edited by G. Tesauro et al., MIT Press, Massachusetts, USA 173–180. http://papers.nips.cc/paper/890–a–model–of–the–neural–basis–of–the–rats–sense–of–direction.pdf.

Tang, Y. P., et al., 1999, Genetic enhancement of learning and memory in mice, *Nature* 401(6748):63–69 doi:10.1038/43432.

Wills, T. J., et al., 2005, Attractor dynamics in the hippocampal representation of the local environment, *Science* (New York, USA) 308(5723):873–76 doi:10.1126/science.1108905.

## الفصل الخامس: الاستثارة والتثبيط

Albright, T. & Squire, L., editors, 2016, *The History of Neuroscience in Autobiography*, Volume 9, Academic Press, Massachusetts, USA.

Blair, E. A. & Erlanger, J., 1933, A comparison of the characteristics of axons through their individual electrical responses, *American Journal of* 106(3):524–64 doi:10.1152/ajplegacy.1933.106.3.524.

Börgers, C., et al., 2005, Background gamma rhythmicity and attention in cortical local circuits: a computational study. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 102(19):7002–07 doi:10.1073/pnas.0502366102.

Brunel, N., 2000, Dynamics of sparsely connected networks of excitatory and inhibitory spiking neurons, *Journal of Computational Neuroscience* 8(3):183–208 doi:10.1023/A:1008925309027.

Fields, R. D., 2018, Do brain waves conduct neural activity like a symphony? *Scientific American* https://www.scientificamerican.com/article/do-brain-waves-conduct-neural-activity-like-a-symphony. Accessed 14 April 2020.

Florey, E., 1991, GABA: history and perspectives, *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology* 69(7):1049–56 doi:10.1139/y91-156.

Fye, W. Bruce, Ernst, Wilhelm, and Eduard Weber, *Clinical Cardiology* 23(9):709–10 doi:10.1002/clc.4960230915.

Mainen, Z. F. & Sejnowski, T. J., 1995, Reliability of spike timing in neocortical neurons, *Science* 268(5216):1503–06, doi:10.1126/science.7770778.

Brown University, 2019, Neuroscientists discover neuron type that acts as brain's metronome: by keeping the brain in sync, these long-hypothesized but never-found neurons help rodents to detect subtle sensations. *ScienceDaily* https://www.sciencedaily.com/releases/2019/07/190718112415.htm. Accessed 14 April 2020.

Poggio, G. F. & Viernstein, L. J., 1964, Time series analysis of impulse sequences of thalamic somatic sensory neurons, *Journal of Neurophysiology* 27(4):517–45 doi:10.1152/jn.1964.27.4.517.

Shadlen, M. N. & Newsome, W.T., 1994, Noise, neural codes and cortical organization, *Current Opinion in Neurobiology* 4(4):569–79 doi:10.1016/0959-4388(94)90059-0.

Softky, W. R. & Koch, C., 1993, The highly irregular firing of cortical cells is inconsistent with temporal integration of random EPSPs, *The Journal of Neuroscience* 13(1):334–50 doi:10.1523/JNEUROSCI.13-01-00334.1993.

Stevens, C. F. & Zador, A. M., 1998, Input synchrony and the irregular firing of cortical neurons, *Nature Neuroscience* 1(3):210–17 doi:10.1038/659.

Strawson, G., 1994, The impossibility of moral responsibility, *Philosophical Studies: An International Journal for Philosophy in the Analytic Tradition* 75(1/2):5–24 https://www.jstor.org/stable/4320507.JSTOR.

Tolhurst, D. J., et al., 1983, The statistical reliability of signals in single neurons in cat and monkey visual cortex, *Vision Research* 23(8):775–85 doi:10.1016/0042-6989(83)90200-6.

Wehr, M. & Zador, A. M., 2003, Balanced inhibition underlies tuning and sharpens spike timing in auditory cortex, *Nature* 426(6965):442–46 doi:10.1038/nature02116.

## الفصل السادس: مراحل الرؤية

Boden, M. A., 2006, *Mind as Machine: A History of Cognitive Science*, Clarendon Press, Oxford, UK.

National Physical Laboratory, 1959, Mechanisation of thought processes; proceedings of a symposium held at the National Physical Laboratory on 24th, 25th, 26th and 27th November 1958, H. M. Stationery Office, London, UK.

Buckland, M. K., 2006, *Emanuel Goldberg and His Knowledge Machine*, Greenwood Publishing Group, Connecticut, USA.

Cadieu, C. F., et al., 2014, Deep neural networks rival the representation of primate it cortex for core visual object recognition, *PLOS Computational Biology* 10(12) doi:10.1371/journal.pcbi.1003963.

Fukushima, K., 1970, A Feature extractor for curvilinear patterns: a design suggested by the mammalian visual system, *Kybernetik* 7(4):153–60 doi:10.1007/BF00571695.

Fukushima, K., 1980, Neocognitron: a self-organizing neural network model for a mechanism of pattern recognition unaffected by shift in position, *Biological Cybernetics* 36(4):193–202 doi:10.1007/BF00344251.

He, K., et al., 2015, Delving deep into rectifiers: surpassing human-level performance on ImageNet classification. ArXiv:1502.01852 [Cs] http://arxiv.org/abs/1502.01852.

Hubel, D. H. & Wiesel, T. N., 1962, Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex, *The Journal*

*of Physiology* 160(1):106–154.2 www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1359523/.

Hull, J. J., 1994, A database for handwritten text recognition research, *IEEE Computer Society*https://doi.org/10.1109/34.291440.

Husbands, P., et al., *An Interview with Oliver Selfridge*, The MIT Press, Massachusetts, USA. https://mitpress.universitypressscholarship.com/view/10.7551/mitpress/9780262083775.001.0001/upso-9780262083775-chapter-17. Accessed 14 April 2020.

Interview with Kunihiko Fukushima. 2015. CIS Oral History Project. IEEE.Tv https://ieeetv.ieee.org/video/interview-with-fukushima-2015. Accessed 14 Apr. 2020.

Khaligh-Razavi, S. M. & Kriegeskorte, N., 2014, Deep supervised, but not unsupervised, models may explain it cortical representation. *PLOS Computational Biology* 10(11):e1003915 doi: 10.1371/journal.pcbi.1003915.

Krizhevsky, A., et al., 2017, ImageNet classification with deep convolutional neural networks. Association for Computing Machinery https://doi.org/10.1145/3065386.

LeCun,Y., et al., 1989, Backpropagation applied to handwritten zip code recognition. *Neural Computation* 1(4):541–51 doi:10.1162/neco.1989.1.4.541.

Papert, S. A., 1966, The summer vision project. https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/6125.

Squire, L. R., editor, 1998, *The History of Neuroscience in Autobiography, Volume 1*, Academic Press, Massachusetts, USA.

Uhr, L., 1963, Pattern recognition computers as models for form perception. *Psychological Bulletin* 60:40–73 doi:10.1037/h0048029.

## الفصل السابع: فك الشفرة العصبية

Barlow, H., 2001, Redundancy reduction revisited, *Network* (Bristol, England) 12(3):241–53.

Barlow, H. B., 2012, Possible principles underlying the transformations of sensory messages. *Sensory Communication*, edited by Walter A. Rosenblith, The MIT Press, Massachusetts, USA. 216–34 doi:10.7551/mitpress/9780262518420.003.0013.

Barlow, H. B., 1972, Single units and sensation: a neuron doctrine for perceptual psychology? *Perception* 1(4):371–94 doi:10.1068/p010371.

Engl, E. & Attwell, D., 2015, Non-signalling energy use in the brain. *The Journal of Physiology* 593(16):3417–29 doi:10.1113/jphysiol.2014.282517.

Fairhall, A. L., et al., 2001, Efficiency and ambiguity in an adaptive neural code. *Nature* 412(6849):787–92 doi:10.1038/35090500.

Foster, M., 1870, The velocity of thought, *Nature* doi:10.1038/002002a0. Accessed 14 April 2020.

Gerovitch, S., 2004, *From Newspeak to Cyberspeak: A History of Soviet Cybernetics*, MIT Press, Massachusetts, USA.

Gross, C. G., 2002, Genealogy of the 'grandmother cell', *The Neuroscientist: A Review Journal Bringing Neurobiology, Neurology and Psychiatry* 8(5):512–18 doi:10.1177/107385802237175.

Hodgkin, A., 1979, Edgar Douglas Adrian, Baron Adrian of Cambridge, 30 November 1889–4 August 1977, *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society*, Royal Society, Great Britain. 25:1–73 doi:10.1098/rsbm.1979.0002.

Horgan, J., 2017, Profile of claude shannon, inventor of information theory. Scientific American Blog Network https://blogs.scientificamerican.com/cross-check/profile-of-claude-shannon-inventor-of-information-theory. Accessed 14 April 2020.

Husbands, P., et al., 2008, An interview with Horace Barlow. The MIT Press https://mitpress.universitypressscholarship.com/view/10.7551/mitpress/9780262083775.001.0001/upso-9780262083775-chapter-18. Accessed 14 April 2020.

Joris, P. X., et al., 1998, Coincidence detection in the auditory system: 50 years after Jeffress, *Neuron* 21(6):1235–38 doi:10.1016/s0896-6273(00)80643-1.

Lewicki, M. S., 2002, Efficient coding of natural sounds, *Nature Neuroscience* 5(4):356–63 doi:10.1038/nn831.

Perkel, D. H., 1968, Neural coding: a report based on an nrp work session organized by Theodore Holmes bullock and held on January 21–23, 1968, Neurosciences Research Program.

Smeds, L., et al., 2019, Paradoxical rules of spike train decoding revealed at the sensitivity limit of vision, *Neuron* 104(3):576–587. e11 doi:10.1016/j.neuron.2019.08.005.

Stein, R. B., 1967, The information capacity of nerve cells using a frequency code, *Biophysical Journal* 7(6):797–826 https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1368193.

*The Hospital Nursing Supplement* 1892. The Hospital 12(309):153–60 https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5281805.

Von Foerster, H., 2013, *The Beginning of Heaven and Earth Has No Name: Seven Days with Second-Order Cybernetics*, Fordham University Press, New York, USA.

## الفصل الثامن: الحركة بأبعاد محدودة

Ashe, J., 2005, What is Coded in the Primary Motor Cortex? *Motor Cortex in Voluntary Movements: A Distributed System for Distributed Functions*, CRC Press, Massachusetts, USA doi:10.1201/9780203503584.ch5.

Carr, L., 2012, The neural rhythms that move your body, *The Atlantic*, www.theatlantic.com/health/archive/2012/06/the-neural-rhythms-that-move-your-body/258094.

Churchland, M. M., et al., 2010, Cortical preparatory activity: representation of movement or first cog in a dynamical machine? 68(3):387–400 doi:10.1016/j.neuron.2010.09.015.

Clar, S. A & Cianca, J. C., 1998, Intracranial tumour masquerading as cervical radiculopathy: a case study, *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* 79(10):1301–02 doi:10.1016/S0003-9993(98)90279-9.

Evarts, E. V., 1968, Relation of pyramidal tract activity to force exerted during voluntary movement, *Journal of Neurophysiology* 31(1):14–27 doi:10.1152/jn.1968.31.1.14.

Ferrier, D., 1876, *The Functions of the Brain*, Smith, Elder & Co, London, archive.org/details/functionsofbrain1876ferr.

Fetz, E. E., 1992, Are movement parameters recognizably coded in the activity of single neurons? *Behavioral and Brain Sciences* 15(4):679–90.

Finger, S., et al., 2009, *History of Neurology*, Elsevier, Amsterdam, Netherlands.

Georgopoulos, A. P., 1998, Interview with Apostolos P. Georgopoulos, *Journal of Cognitive Neuroscience* 10(5):657–61 doi: 10.1162/089892998562951.

Kalaska, J. F., 2009, From intention to action: motor cortex and the control of reaching movements, *Advances in Experimental Medicine and Biology* 629:139–78 doi:10.1007/978-0-387-77064-2-8.

Kaufman, M. T., et al., 2014, Cortical Activity in the null space: permitting preparation without movement, *Nature Neuroscience* 17(3):440–48 doi:10.1038/nn.3643.

Rioch, D. M., 1938, Certain aspects of the behavior of decorticate cats, *Psychiatry* 1(3):339–45 doi:10.1080/00332747.1938.11022202.

Shenoy, K. V., et al., 2013, Cortical control of arm movements: a dynamical systems perspective, *Annual Review of Neuroscience* 36:337–59 doi:10.1146/annurev-neuro-062111-150509.

Squire, L. R., editor, 2009, *The History of Neuroscience in Autobiography*. Volume 6, Oxford University Press, USA.

Taylor, C. S. R. & Gross, C. G., 2003, Twitches versus movements: a story of motor cortex, *The Neuroscientist: A Review Journal Bringing Neurobiology, Neurology and Psychiatry* 9(5):332–42 doi:10.1177/1073858403257037.

Venkataramanan, M., 2015, A chip in your brain can control a robotic arm, Welcome to BrainGate, *Wired UK* www.wired.co.uk/article/braingate.

Whishaw, I. Q. & Kolb, Bryan, 1983, Can male decorticate rats copulate? *Behavioral Neuroscience* 97(2):270–79 doi:10.1037/0735-7044.97.2.270.

Wickens, A. P., 2014, *A History of the Brain: From Stone Age Surgery to Modern Neuroscience*, Psychology Press, East Sussex, UK.

## الفصل التاسع: من البنية إلى الوظيفة

Fornito, A., et al. editors, 2016, Chapter 8-Motifs, Small Worlds, and Network Economy, *Fundamentals of Brain Network Analysis*, Academic Press, London, UK., 257–301 doi:10.1016/B978-0-12-407908-3.00008-X.

Garcia-Lopez, P., et al., 2010, The histological slides and drawings of Cajal, *Frontiers in Neuroanatomy* 4 doi:10.3389/neuro.05.009.2010.

Griffa, A., et al., 2013, Structural connectomics in brain diseases, *NeuroImage* 80: 515–26 doi:10.1016/j.neuroimage.2013.04.056.

Hagmann, P., et al., 2007, Mapping human whole-brain structural networks with diffusion MRI. *PLOS ONE* 2(7):e597 doi: 10.1371/journal.pone.0000597.

Heuvel, M. P. van den, & Sporns, Olaf, 2013, Network hubs in the human brain, *Trends in Cognitive Sciences* 17(12):683–96 doi:10.1016/j.tics.2013.09.012.

Humphries, M. D., et al., 2006, The brainstem reticular formation is a small-world, not scale-free, network, *Biological Sciences* 273(1585):503–11 doi:10.1098/rspb.2005.3354.

Marder, E. & Taylor, A. L., 2011, Multiple models to capture the variability in biological neurons and networks, *Nature Neuroscience* 14(2):133–38 doi:10.1038/nn.2735.

Milgram, Stanley, 1967, The small world problem, *Psychology Today* 2:60–67.

Mohajerani, M. H. & Cherubini, E., 2006, Role of giant depolarizing potentials in shaping synaptic currents in the developing hippocampus, *Critical Reviews in Neurobiology* 18(1–2):13–23 doi:10.1615/critrevneurobiol.v18.i1-2.30.

Morrison, K. & Curto, C., 2019, Chapter 8–Predicting Neural Network Dynamics via Graphical Analysis, *Algebraic and Combinatorial Computational Biology*, edited by Robeva, Raina & Macauley, M, Academic Press, London, UK., 241–77 doi:10.1016/B978-0-12-814066-6.00008-8.

Muldoon, S. F., et al., 2016, Stimulation-based control of dynamic brain networks, *PLOS Computational Biology* 12(9):e1005076 doi:10.1371/journal.pcbi.1005076.

Navlakha, S., et al., 2018, Network design and the brain, *Trends in Cognitive Sciences*, 22:64–78 doi:10.1016/j.tics.2017.09.012.

Servick, K., 2019, This physicist is trying to make sense of the brain's tangled networks, *Science/AAAS*, www.sciencemag.org/news/2019/04/physicist-trying-make-sense-brain-s-tangled-networks.

Sporns, Olaf, Chialvo, Dante R., et al., 2004, Organization, development and function of complex brain networks, *Trends in Cognitive Sciences* 8(9):418–25 doi:10.1016/j.tics.2004.07.008.

Sporns, Olaf, Tononi, Giulio, et al., 2005, The human connectome: a structural description of the human brain, *PLOS Computational Biology* 1(4):e42 doi:10.1371/journal.pcbi.0010042.

Squire, L. R. & Albright, T. D. editors, 2008, *The History of Neuroscience in Autobiography*, Volume 9, Oxford University Press, New York, USA.

Squire, L. R. & Albright, T. D. editors, 2008, *The History of Neuroscience in Autobiography* Volume 10, Oxford University Press, New York, USA.

Tau, G. Z. & Peterson, B. S., 2010, Normal development of brain circuits, *Neuropsychopharmacology* 35(1):147–68 doi:10.1038/npp.2009.115.

Towlson, E. K., et al, 2013, The rich club of the *C. Elegans* neuronal connectome. *The Journal of Neuroscience* 33(15):6380–87 doi:10.1523/JNEUROSCI.3784-12.2013.

Watts, D. J. & Strogatz, S. H., 1998, Collective dynamics of 'small-world' networks, *Nature* 393(6684):440–42 doi:10.1038/30918.

## الفصل العاشر: اتخاذ قرارات عقلانية

Stix, G., 2014, A conversation with Dora Angelaki, *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology* 79:255–57 doi:10.1101/sqb.2014.79.02.

Adams, W. J., et al., 2004, Experience can change the 'light-from-above' prior, *Nature Neuroscience* 7(10):1057–58 doi:10.1038/nn1312.

Aitchison, L., et al., 2015, Doubly Bayesian analysis of confidence in perceptual decision-making, *PLoS Computational Biology* 11(10) doi:10.1371/journal.pcbi.1004519.

Anderson, J. R., 1991, Is human cognition adaptive? *Behavioral and Brain Sciences* 14(3):471–85 doi:10.1017/S0140525X00070801.

Bowers, J. S. & Davis, C. J., 2012, Bayesian Just-so Stories in psychology and neuroscience, *Psychological Bulletin* 138(3):389–414 doi:10.1037/a0026450.

Cardano, G., 2002, *The Book of My Life*, New York Review Books, USA.

Curry, R. E., 1972, A Bayesian model for visual space perception, *NASSP* 281:187 https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1972NASSP.281...187C/abstract.

Fetsch, C. R., et al., 2009, Dynamic reweighting of visual and vestibular cues during self-motion perception, *Journal of Neuroscience* 29(49):15601–12 doi:10.1523/JNEUROSCI.2574-09.2009.

Fisher, R. A. & Russell, E. J., 1922, On the mathematical foundations of theoretical statistics, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character 222(594–604):309–68 doi:10.1098/rsta.1922.0009.

Gillies, D. A., 1987, Was Bayes a Bayesian? *Historia Mathematica* 14(4):325–46 doi:10.1016/0315-0860(87)90065-6.

Gorroochurn, P., 2016, *Classic Topics on the History of Modern Mathematical Statistics: From Laplace to More Recent Times*, John Wiley & Sons, New Jersey, USA.

Helmholtz, H. von & Southall, J. P. C., 2005, *Treatise on Physiological Optics*, Dover Publications, New York, USA.

Jaynes, E. T., 2003, *Probability Theory: The Logic of Science: Principles and Elementary Applications Vol 1*, Edited by G. Larry Bretthorst, Cambridge University Press, New York, USA.

Koenigsberger, L., 1906, *Hermann von Helmholtz*, Clarendon Press, Oxford, UK.

Mamassian, P., 2008, Ambiguities and conventions in the perception of visual art, *Vision Research* 48(20):2143–53 doi:10.1016/j.visres.2008.06.010.

Moreno-Bote, R., et al., 2011, Bayesian sampling in visual perception, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108(30):12491–96 doi:10.1073/pnas.1101430108.

Seriès, P. & Seitz, A. R., 2013, Learning what to expect (in visual perception), *Frontiers in Human Neuroscience* 7:668 doi:10.3389/fnhum.2013.00668.

Stigler, S. M., 1982, Thomas Bayes's Bayesian inference, *Journal of the Royal Statistical Society*, Series A (General) 145(2):250–58 doi:10.2307/2981538. JSTOR.

Vilares, I. & Kording, K., 2011, Bayesian Models: the structure of the world, uncertainty, behavior, and the brain, *Annals of the New York Academy of Sciences* 1224(1):22–39 doi:10.1111/j.1749-6632.2011.05965.x.

Weiss, Y., et al., 2002, Motion illusions as optimal percepts, *Nature Neuroscience* 5(6):598–604 doi:10.1038/nn0602-858.

## الفصل الحادي عشر: كيف توجه المكافآت الأفعال

Bellman, R., 1984, *Eye of the Hurricane*, World Scientific, Singapore.

Bellman, R. E., 1954, The theory of dynamic programming www.rand.org/pubs/papers/P550.html.

Bergen, M., 2016, Google has found a business model for its most advanced artificial intelligence. *Vox* www.vox.com/2016/7/19/12231776/google-energy-deepmind-ai-data-centers.

Mnih,V., et al., 2013, Playing Atari with deep reinforcement learning. ArXiv:1312.5602 [Cs], http://arxiv.org/abs/1312.5602.

Redish, A. D., 2004, Addiction as a computational process gone awry, *Science* (New York) 306(5703):1944–47 doi:10.1126/science.1102384.

Rescorla, R. A. & Wagner, A., 1972, A theory of Pavlovian Conditioning: variations in the effectiveness of reinforcement and nonreinforcement. Class*ical Conditioning II: Current Research and Theory* 2

Schultz, W., Dayan, P., et al., 1997, A neural substrate of prediction and reward, *Science* (New York) 275(5306):1593–99 doi:10.1126/science.275.5306.1593.

Schultz, W., Apicella, P., et al., 1993, Responses of monkey dopamine neurons to reward and conditioned stimuli during successive steps of learning a delayed response task, *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience* 13(3):900–13.

Sejnowski, T. J., 2018, *The Deep Learning Revolution*, MIT Press, Massachusetts, USA.

Specter, Michael, 2014, Drool, *The New Yorker*, www.newyorker.com/magazine/2014/11/24/drool. Accessed 14 April 2020.

Story, G. W., et al., 2014, Does temporal discounting explain unhealthy behavior? a systematic review and reinforcement learning perspective, *Frontiers in Behavioral Neuroscience* 8 doi:10.3389/fnbeh.2014.00076.

Sutton, R. S., 1988, Learning to predict by the methods of temporal differences, *Machine Learning* 3(1):9–44 doi:10.1007/BF00115009.

## الفصل الثاني عشر: النظريات الموحدة العظمى الخاصة بالدماغ

Anderson, M. L. & Chemero, T., 2013, The Problem with brain guts: conflation of different senses of 'prediction' threatens metaphysical disaster, *The Behavioral and Brain Sciences* 36(3):204–05 doi:10.1017/S0140525X1200221X.

Buxhoeveden, D. P. & Casanova, Manuel F., 2002, The minicolumn hypothesis in neuroscience, *Brain* 125(5):935–51 doi:10.1093/brain/awf110.

Clark, J., 2014, Meet the man building an ai that mimics our neocortex – and could kill off neural networks, www.theregister.co.uk/2014/03/29/hawkins_ai_feature.

Eliasmith, C., et al., 2012, A large-scale model of the functioning brain, *Science* 338(6111):1202–05 doi:10.1126/science.1225266.

Fridman, L., 2019, Jeff Hawkins: Thousand Brains Theory of intelligence, https://lexfridman.com/jeff-hawkins. Accessed 14 Apr. 2020.

Friston, K., 2019, A free energy principle for a particular physics, ArXiv:1906.10184 [q-Bio] http://arxiv.org/abs/1906.10184.

Friston, K., 2010, The free-energy principle: a unified brain theory? *Nature Reviews Neuroscience* 11(2):127–38 doi:10.1038/nrn2787.

Friston, K., Fortier, M. & Friedman, D. A., 2018, Of woodlice and men: A Bayesian account of cognition, life and consciousness, An interview with Karl Friston, *ALIUS Bulletin*, 2:17–43.

Hawkins, J., et al., 2019, A Framework for intelligence and cortical function based on grid cells in the neocortex, *Frontiers in Neural Circuits* 12 doi:10.3389/fncir.2018.00121.

Heilbron, M. & Chait, M., 2018, Great expectations: is there evidence for predictive coding in auditory cortex? *Neuroscience* 389:54–73 doi:10.1016/j.neuroscience.2017.07.061.

Metz, C., 2018, Jeff Hawkins is finally ready to explain his brain research, *The New York Times*, www.nytimes.com/2018/10/14/technology/jeff-hawkins-brain-research.html.

Michel, M., et al., 2018, An informal internet survey on the current state of consciousness science, *Frontiers in Psychology* 9 doi:10.3389/fpsyg.2018.02134.

Nanopoulos, D. V., 1979, Protons are not forever, *High-Energy Physics in the Einstein Centennial Year*, edited by Arnold Perlmutter et al., Springer US., 91–114 doi:10.1007/978-1-4613-3024-0_4.

Raviv, S., 'The Genius Neuroscientist Who Might Hold the Key to True AI,' Wired, https://www.wired.com/story/karl-friston-free-energy-principle-artificial-intelligence/, Accessed 14 Apr. 2020.

Rummell, B. P., et al., 2016, Attenuation of responses to self–generated sounds in auditory cortical neurons, *Journal of Neuroscience* 36(47):12010–26 doi:10.1523/JNEUROSCI.1564–16.2016.

Simonite, T., 2015, IBM Tests mobile computing pioneer's controversial brain algorithms, *MIT Technology Review*, www.technologyreview .com/2015/04/08/11480/ibm–tests–mobile–computing–pioneers–controversial–brain–algorithms.

Tononi, G., et al., 2016, Integrated information theory: from consciousness to its physical substrate, *Nature Reviews Neuroscience* 17(7):450–61 doi:10.1038/nrn.2016.44.

هنـــداوي