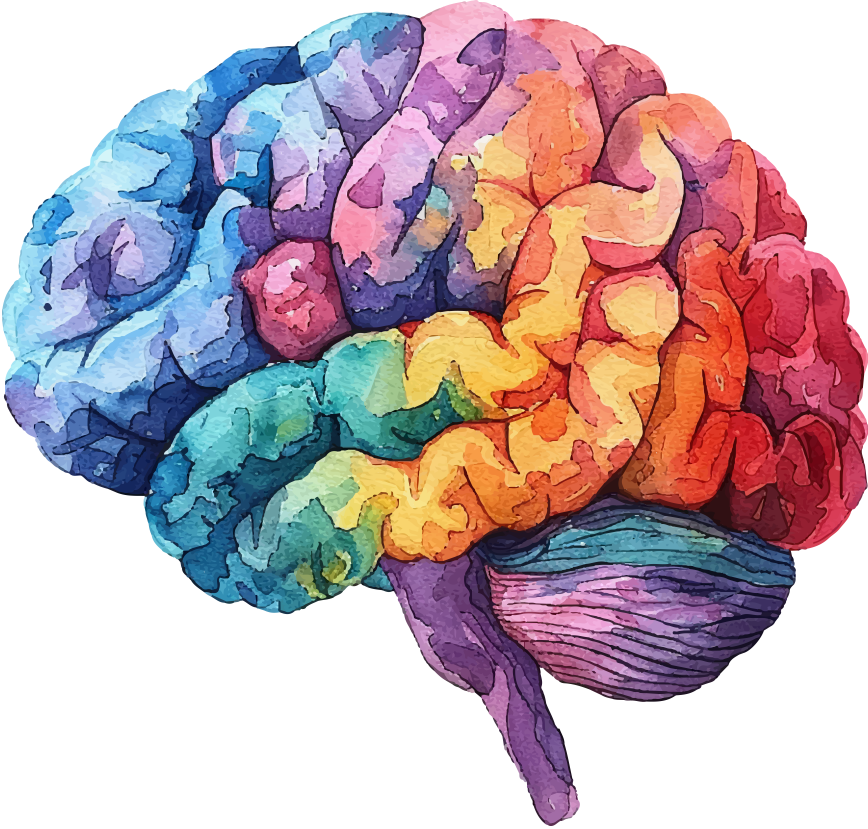


مين جونج

# الدماغ المُبتكر

الخيال والتفكير المجرد في علم الأعصاب



ترجمة سارة طه علام



# الدماغ المُبتكر

الخيال والتفكير المجرد في علم الأعصاب

تأليف

مين جونج

ترجمة

سارة طه علام

مراجعة

شيماء طه الريدي



الناشر مؤسسة هنداوي

المشهرة برقم ١٠٥٨٥٩٧٠ بتاريخ ٢٦/١/٢٠١٧

يورك هاوس، شيبث ستريت، وندسور، SL4 1DD، المملكة المتحدة

تليفون: ١٧٥٣ ٨٣٢٥٢٢ (٠) ٤٤ +

البريد الإلكتروني: hindawi@hindawi.org

الموقع الإلكتروني: <https://www.hindawi.org>

إنَّ مؤسسة هنداوي غير مسؤولة عن آراء المؤلف وأفكاره، وإنما يعبرُ الكتاب عن آراء مؤلفه.

تصميم الغلاف: ولاء الشاهد

الترقيم الدولي: ٩٧٨ ١ ٥٢٧٣ ٣٨٠٢ ٩

صدر الكتاب الأصلي باللغة الإنجليزية عام ٢٠٢٣.

صدرت هذه الترجمة عن مؤسسة هنداوي عام ٢٠٢٥.

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 جامعة كولومبيا.

# المحتويات

٧	شكر وتقدير
٩	المقدمة
١٥	<b>الجزء الأول: الحُصين والخيال</b>
١٧	١- الحُصين
٢٥	٢- الذاكرة الزائفة
٣٣	٣- خلايا المكان وإعادة العرض في الحُصين
٤٧	<b>الجزء الثاني: السيمفونية العصبية للخيال</b>
٤٩	٤- الدوائر العصبية في الحُصين
٥٩	٥- اتخاذ القرار على أساس القيمة
٧١	٦- تذكُّر مكافآت المستقبل المُجزية
٧٩	٧- تطور الخيال
٩١	<b>الجزء الثالث: الأساس العصبي للتجريد</b>
٩٣	٨- التفكير المجرد والقشرة المخية الحديثة
١٠٧	٩- القشرة الجبهية الأمامية
١١٧	١٠- الثورة البشرية والتغيرات الدماغية المرتبطة بها
١٢٩	١١- الشبكة العصبية العميقة
١٤١	<b>الجزء الرابع: ما وراء الخيال والتجريد</b>
١٤٣	١٢- مشاركة الأفكار والمعرفة من خلال اللغة
١٦٥	١٣- عن الإبداع

## الدماغ المُبتَكِر

١٧٥

١٩٥

٢٠١

٢٠٧

٢٤٧

١٤ - مستقبل الابتكار

الملحق الأول

الملحق الثاني

ملاحظات

قائمة المراجع

## شكر وتقدير

أشعر بالامتنان أن أُتيحت لي الفرصة للعمل مع العديد من زملائي من العلماء العظماء على مدار مسيرتي المهنية، وكان من بينهم المُشرف على رسالتي للدكتوراه، جاري لينش، ومشرفي في مرحلة ما بعد الدكتوراه، بروس ماكنوتون، اللذان ساهما في تشكيل رؤيتي لكيفية دعم الدماغ للوظائف العقلية العليا. أودُّ أن أشكر كل هؤلاء العلماء، وهم كُثر؛ لذا لا يسع المجال هنا لذكرهم بالاسم.

أتوجّه برسالة تقدير خاصة إلى طلابي السابقين جونج وون لي، وهيونجونج لي، وسونج هيون لي، ويونجسوك جونج، بالإضافة إلى زملائي دايلول لي، وإينا لي، وونج صن، وونريونج كيم، الذين قدموا مساهماتٍ كبيرة في الأعمال التي نوقشت في الفصلين الخامس والسادس والملاحق. وكذا أوجه شكرًا خاصًا لزميليّ كيون هو وأيونجون كيم لنصائهما ودعمهما.

أتوجه بالشكر أيضًا إلى سي- بوم بايك لتعليقاته الثاقبة المفيدة على المسوّدة الأولى للفصل الحادي عشر («الشبكة العصبية العميقة»). أود أيضًا أن أشكر مامي بويتاما لإسهامها في أعمال التحرير، وجونج وون لي لإسهامه في إعداد الأشكال، وجويونج شين لمساعدته في المراجع، وفيرنر بينجمان وكيمبرلي ويد لتقديمهما الصور الأصلية.

لقد ساعدني فريق العمل في دار جامعة كولومبيا للنشر أيما مساعدة في إنهاء هذا الكتاب. كان المشروع مدفوعًا إلى حدٍّ كبير بحماسة ميراندا مارتين، محررة المشروع. لذا أعبر عن تقديري لميراندا ولبقية فريق الإنتاج والجرافيك والتسويق في دار جامعة كولومبيا للنشر.

وأودُّ في المقام الأول أن أعرب عن عميق امتناني لوالديّ وعائلتي، إنهي، وأليس، وإيمي، على تضحياتهم ودعمهم وتشجيعهم على مدار حياتي كعالم.





وتتجاوز كتلتنا الإجمالية الآن كتلة جميع الحيوانات الفقارية البرية بكثير. والأهم من ذلك أننا الحيوانات الوحيدة التي طورت تقنيات متقدمة، وخلقت ثقافات متطورة، وأنشأت مجتمعات كبيرة، واكتسبت القدرة على التأثير على بيئتنا وتشكيلها بطرق لا يملكها أي حيوان آخر.

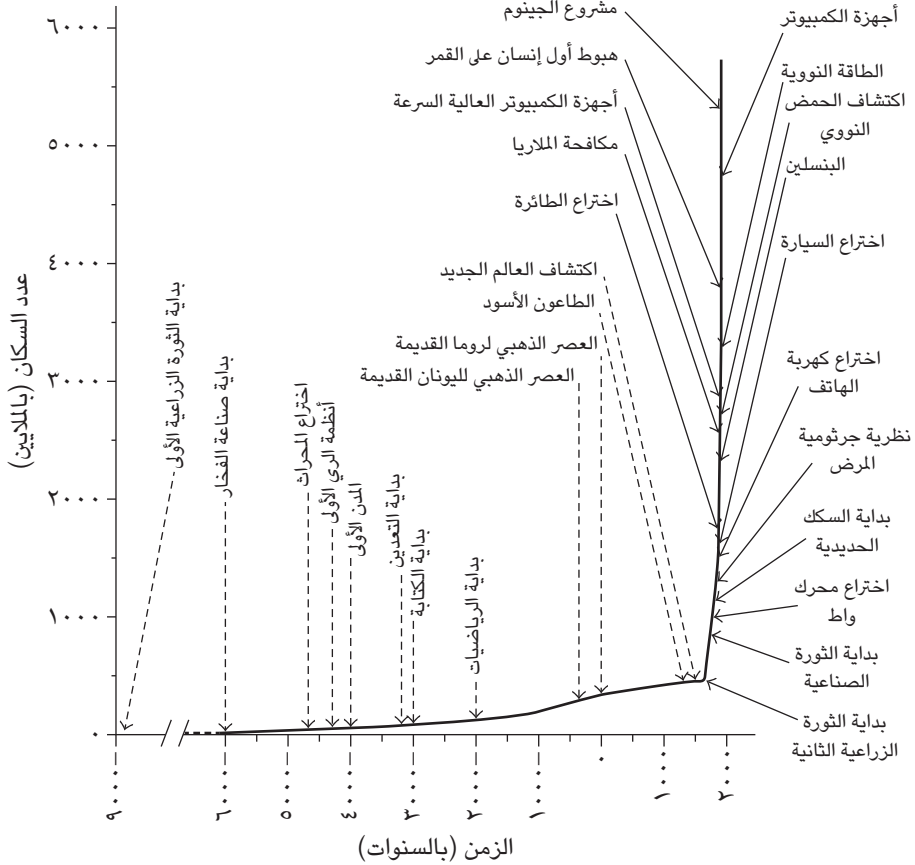
ولم يكن من الممكن تحقيق هذه الإنجازات لولا قدرتنا على الابتكار. نحن نميل إلى تجربة أشياء جديدة لتحسين مستقبلنا. وقد أتاح لنا تراكم الابتكارات الكبيرة والصغيرة عبر التاريخ في النهاية بناء حضارات على نطاق عالمي. بل إننا أنشأنا نظاماً اجتماعياً لتشجيع الابتكارات، يتمثل في قوانين براءات الاختراع. وفي هذا الصدد، يمكن اعتبار البشر حيوانات مُبتكرة أو ما يُسمى «الإنسان المُبتكر» (هومو إينوفاتيكوس).

يوضح الشكل (١) التطورات التي طرأت على التكنولوجيا جنباً إلى جنب مع نمو عدد سكان العالم منذ ظهور الزراعة. لقد نما حجم السكان نمواً مطرداً، وتسارعت التغيرات التكنولوجية بمعدل مذهل خلال القرنين الماضيين. ولا تُمثل الأحداث التكنولوجية الكبرى الموضحة إلا جزءاً بسيطاً جداً من التقدم العلمي والتكنولوجي الذي حققته البشرية خلال المائتي عام الماضية.

لماذا نحن مبتكرون إلى هذا الحد؟ ربما تختلف أدمغتنا عن أدمغة الحيوانات الأخرى. ولكن كيف؟ هذا هو موضوع هذا الكتاب. يتطلب الابتكار رؤية جديدة، ومن العوامل الضرورية للرؤى الجديدة القدرة على التخيل. نحن نبتكر تقنيات جديدة ونتوصل إلى معلومات وأفكار وفنون من خلال المزج بين القائم من هذه العناصر بالاستعانة بأساليب جديدة باستخدام خيالنا. وقد أشار ألبرت أينشتاين إلى قوة الخيال بقوله: «سيأخذك المنطق من النقطة أ إلى النقطة ب. أما الخيال فسيأخذك إلى كل مكان.» وهنا يُطرح سؤال حول ما إذا كانت القدرة على الخيال تقتصر على البشر فحسب. الإجابة عن هذا السؤال واضحة، وهي: «قطعاً لا». إن الخيال أبعد من أن يكون ملكة عقلية بشرية فريدة من نوعها. فقد قدمت دراسات علم النفس وعلم الأعصاب والسلوك الحيواني أدلة متقاربة على قدرة الحيوانات على الخيال. وكشفت أبحاث علم الأعصاب، على وجه الخصوص، في العقدين الماضيين عن وجود نشاطٍ عصبي يبدو أنه مرتبط بالخيال.

إذن ما الملكة العقلية البشرية الفريدة التي مكنتنا من الابتكار عبر تاريخ البشرية؟ الخيال يُشجّع الابتكار، ولكنه لا يضمن حدوثه. فنطاق الخيال مُقيد بالقدرة المعرفية

## المقدمة



شكل ١: النمو السكاني والأحداث التكنولوجية الكبرى. الشكل منقول بتصريح من روبرت دبليو فوجل من مقاله الصحفي «اللاحق بركب الاقتصاد»، «أمريكان إيكونوميك ريفيو» مجلد ٨٩، العدد ١ (١٩٩٩): ٢ (حقوق النشر للجمعية الاقتصادية الأمريكية).

للغرد. وبدون قدرة إدراكية عالية بما فيه الكفاية، فإن محتوى خيال الفرد سيكون أبعد ما يكون عن الابتكار. وتعد القدرة على التجريد على مستوى عالٍ، على وجه الخصوص، عنصرًا ضروريًا للابتكارات التي تنطوي على معرفة مفاهيمية كتلك الموضحة في الشكل (١). بمعنى آخر، يتمتع البشر بقدرة خاصة على الابتكار؛ لأن لديهم قدرة فريدة على التخيل بحرية باستخدام مفاهيم مجردة عالية المستوى، مثل الأعداد الخيالية، والمُنْتَجَات،

والجاذبية، والذرات، والجينات، والطفرة، والخوارزميات، والجمال، والإنسانية، والإرادة الحرة، والحرية، والعدالة الاجتماعية.

لا أزعم مطلقاً أن التفكير المجرد هو ملكة عقلية بشرية فريدة من نوعها. فمن المعروف أن الحيوانات الأخرى، لا سيما الرئيسيات، قادرة على التفكير المجرد. غير أنه لا يُوجد حيوان يُصاهي الإنسان ولو من بعيد من حيث مستوى التجريد. فالبشر لديهم قدرة فائقة على تشكيل ومعالجة المفاهيم المجردة العالية المستوى وإعمال الخيال بحرية مُستخدِمين إياها. والمثال الجوهري لهذه القدرة هو اللغة. فالبشر ينفردون بقدرة حقيقية على استخدام اللغة في ظل وجود مناطق دماغية مُخصصة مُكرّسة لمعالجة اللغة. ولم تكن الابتكارات مثل تلك الموضحة في الشكل (١) مُمكنة لولا القدرة البشرية الفريدة على التخيل باستخدام مفاهيم مجردة عالية المستوى. ومن ثم، ستكون القدرة على التخيل بحرية باستخدام مفاهيم مجردة عالية المستوى من العناصر الضرورية للابتكار، من بين مجموعة متنوعة من المَلَكات العقلية المتقدمة.

إنَّ فَهْمنا الحالي لآليات الدماغ التي تسمح بذلك محدود. غير أن لدينا مجموعة كبيرة بما يكفي من الاكتشافات من عدة تخصصات مختلفة، لا سيما علم الأعصاب، تُتيح مناقشة العمليات العصبية المحددة التي تقف وراء هذه الملكة البشرية العظيمة. كان محور التركيز التقليدي لعلم الأعصاب هو كيفية معالجة الدماغ للمعلومات الحسّية الخارجية وتخزينها والتحكم في السلوك باستخدام هذه المعلومات. في المقابل، كان الاهتمام أقلّ بالعمليات العصبية الكامنة وراء التفكير الداخلي والتفكير الذاتي المنشأ، وخاصة تلك المتعلقة بالخيال والإبداع. وهذا الاتجاه في تغَيُّر بفضل اكتشافاتٍ مثل وجود نظام عصبي ينشط على نحو خاص عندما نخرط في التفكير الداخلي، مثل أحلام اليقظة وتصور المستقبل؛ وأن هذا النظام العصبي يتفاعل ديناميكياً مع الأنظمة العصبية الأخرى أثناء التفكير الإبداعي؛ وأن الحُصين، المعروف بالفعل بأنه يساهم بدورٍ بالغ الأهمية في تشفير الذكريات الجديدة، يضطلع أيضاً بدورٍ مُهم في الخيال؛ والنشاط العصبي الذي جرى تحديده في الدراسات على الحيوانات، والذي يبدو أنه مُرتبط بتخيُّل الأحداث المستقبلية. تُتيح لنا هذه الاكتشافات الحصول على لمحة عن العمليات العصبية التي تشمل العمليات العقلية الداخلية، والخيال، والتفكير الإبداعي، والابتكار.

سوف يتوغَّل هذا الكتاب بعمق في الأبحاث الحديثة لعلم الأعصاب من خلال دراسة شتى الاكتشافات التي قدّمت رؤى مهمة حول الآليات العصبية التي تكمن وراء الخيال

والتجريد العالي المستوى. وأعتزم تناول هذه المسألة على مستوى عمل الدائرة العصبية أينما أمكن ذلك، وليس مجرد افتراض أن منطقةً ما من الدماغ أو الأنيسان يقوم بهذه المهمة. لقد مكَّنتنا الاكتشافات الرائدة في العقدَيْن الأخيرَيْن التي تركزت حول الحُصين، من تفسير عملية التخيل على مستوى الدوائر العصبية. وعلى الرغم من فهمنا الأقل للأساس العصبي للتجريد العالي المستوى، فثمة بعض القرائن تسمح لنا بتخمين عمليات الشبكة العصبية التي تدعم التجريد العالي المستوى. بالإضافة إلى ذلك، سأسلط الضوء على الأعمال ذات الصلة في علم النفس والأنثروبولوجيا والذكاء الاصطناعي. وفي وسط ذلك، سأحاول شرح ملكة فريدة يتمتع بها الإنسان العاقل، أو «الهومو سابينس»، ألا وهي القدرة على الابتكار، من حيث تنظيم الأنظمة والدوائر العصبية وعملها.

ينقسم هذا الكتاب إلى أربعة أجزاء. يُغطي الجزء الأول من الكتاب (من الفصل الأول إلى الثالث) دور الحُصين في الخيال. ويتناول الجزء الثاني (من الفصل الرابع إلى السابع) العمليات التي تحدث في الدائرة العصبية الحُصينية التي تشكل الأساس للخيال. ينتقل الجزء الثالث (من الفصل الثامن إلى الحادي عشر) إلى تناول الأساس العصبي للتجريد العالي المستوى لدى البشر. بينما يأخذنا الجزء الرابع (من الفصل الثاني عشر إلى الرابع عشر) إلى ما هو أبعد من الخيال لمساعدتنا على فهم الإبداع، وكيف يمكن للبشر استخدام القدرة على الابتكار في المستقبل.

وأودُّ أن أشير إلى أن كثيراً من الاكتشافات المهمة الوثيقة الصلة بأقسام الكتاب العديدة قد حذفت. إن هذا الكتاب يهدف إلى جمع النتائج المتباينة في علم الأعصاب والمجالات ذات الصلة لشرح الأساس العصبي للابتكار بطريقة موجزة. لذا فالأمر يُحتم التعامل مع الموضوعات والنتائج بطريقة شديدة الانتقائية. ثمة كمٌّ هائل متاح من المؤلفات العلمية، وكثير من المصادر تتجاوز إطار هذا الكتاب. لاحظ أيضاً أن أسلوب صياغة هذا الكتاب يختلف جوهرياً عن أسلوب صياغة المقالات والأبحاث العلمية. وعلى الرغم من أنني أتعلم في الأبحاث الحديثة لعلم الأعصاب، فإنني أعتزم تقديم سردٍ موجز لقارئٍ ذكي ليس لديه معرفة متخصصة بعلم الأعصاب.

أمل أن يساعدك هذا الكتاب في اكتساب فهم أفضل للعمليات العصبية التي تُشكل الأساس لأحد الجوانب الأروع والأهم من الطبيعة البشرية، ألا وهي قدرتنا على الابتكار.



الجزء الأول

# الحُصين والخيال



## الفصل الأول

# الحُصين

### من الذاكرة إلى الخيال

ما الأساس العصبي للقدرة على الخيال غير المحدود باستخدام مفاهيم مجردة عالية المستوى؟ من المثير للدهشة أن رحلة علم الأعصاب للعثور على إجابة عن هذا السؤال تبدأ بدراسة الذاكرة. إن تذكر تجارب الماضي شيء، وتخيّل الأحداث المستقبلية شيء آخر. ولذلك، قد يُفترض أن الآلية العصبية للخيال تختلف عن تلك الخاصة بالذاكرة. وفي الواقع، كان هذا هو اعتقاد علماء الأعصاب حتى عام ٢٠٠٧، عندما اكتشف العلماء تداخلًا في مناطق الدماغ المسؤولة عن الذاكرة والخيال. وعلى وجه التحديد، وُجد أن الحُصين (أو قرن آمون)، المعروف بدوره البالغ الأهمية في تشفير الذكريات الجديدة، له دور في الخيال أيضًا. وفي هذا الفصل، نتناول الاكتشافات الفارقة المتعلقة بالحُصين، بدءًا من دوره في الذاكرة (في خمسينيات القرن الماضي) وصولًا إلى دوره في الخيال (الألفية الأولى من القرن الحادي والعشرين).

### هنري موليسون: فاقد الذاكرة الذي لا يُنسى

ولد هنري موليسون — الذي ظل الناس يعرفونه بالحرفين الأولين من اسمه، «إتش إم»، حتى وفاته — في فبراير عام ١٩٢٦ في مانشستر، بولاية كونيتيكت. كان يُعاني من صرع شديد لدرجة أنه مع بلوغه سن السابعة والعشرين لم يُعد بإمكانه أن يحيا حياة طبيعية. في سبتمبر من عام ١٩٥٣، استأصل جراح الأعصاب ويليام سكوفيل أجزاءً من دماغ موليسون؛ للتخفيف من حدة الأعراض التي يُعاني منها. وجاءت الجراحة بنتائج فعالة في السيطرة على نوبات الصرع. غير أن أحد الآثار الجانبية غير المتوقعة للجراحة

حرمه من وظيفة دماغية حيوية، ألا وهي تذكُّر التجارب الجديدة. ومن المثير للدهشة أن الوظائف الأخرى، مثل الإحساس، والحركة، واللغة، والذكاء، والذكريات القصيرة المدى، وحتى الذكريات القديمة، بالكاد تأثرت سلباً. وبدا أن القدرة على تذكُّر التجارب الجديدة فقط هي التي تضررت ضرراً شديداً.

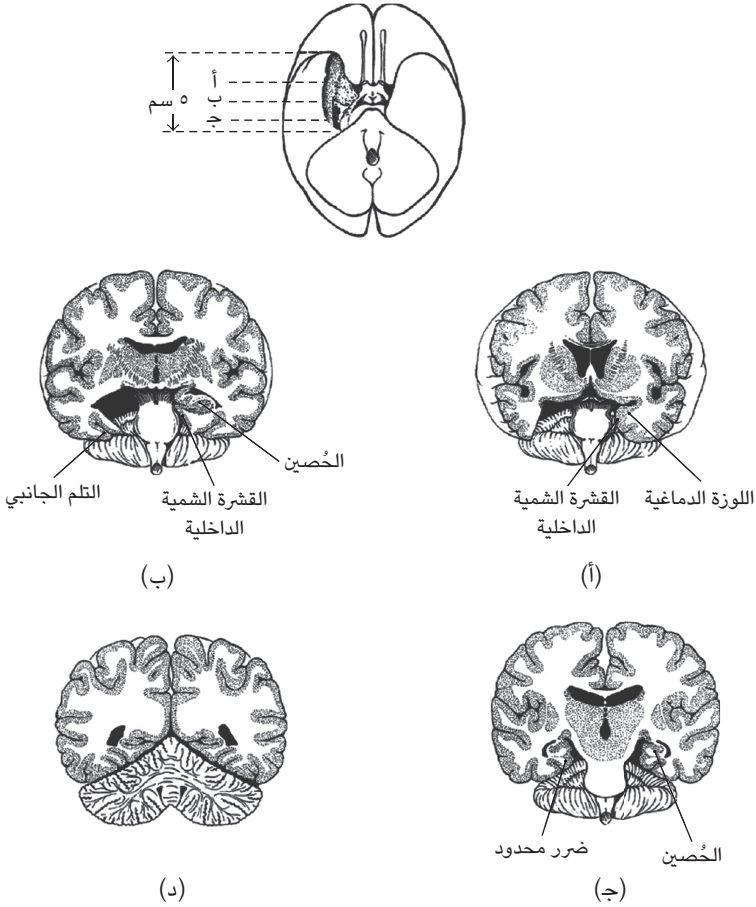
تُشير حالة موليسون إلى أن هناك نظاماً عصبياً منفصلاً مسؤولاً عن تشفير الذكريات الجديدة. قبل هذه الحالة، كان الاعتقاد السائد لدى كثير من العلماء أن الذاكرة ووظيفة ينخرط فيها الدماغ بأكمله وليست بنية دماغية محددة. لنتناول التجربة الشهيرة للعالم كارل لاشلي. فبعد تدريب الفئران على الركض في متاهة، شق لاشلي أجزاءً مختلفة من أدمغتهم لإضعاف ذاكرتهم. غير أن تجربته أخفقت في العثور على المنطقة الدماغية التي أضرَّت بذاكرة الفئران عند جرحها، وهو ما اتُّضح من تقييمه لها من خلال مراقبة سلوكهم في الركض إلى الصندوق المنشود. ولكنه بدلاً من ذلك وجد أن درجة ضعف الذاكرة ارتبطت بدرجة جروح السكين. وافترض حينذاك، بناءً على هذه الملاحظات، أن الدماغ بأكمله لديه القدرة على تخزين الذكري.<sup>1</sup>

على النقيض من هذه الفرضية، تُظهر حالة موليسون بوضوح أن ثمة منطقة دماغية منفصلة تختصُّ بالإشراف تحديداً على تشفير الذكريات الجديدة، دون التدخل في كثير من وظائف الدماغ الأخرى. بالإضافة إلى ذلك، يُشير بقاء ذكريات موليسون القديمة سليمةً دون أن تُمس إلى أن أنظمة عصبية منفصلة هي المسئولة عن تشفير الذكريات الجديدة، وتخزين الذكريات الطويلة الأمد. ففي أثناء الجراحة، أُزيلَ الفص الصدغي الأوسط، وفيه الحُصين، في كلا نصفي المخ (انظر الشكل ١-١). وتشير نتائج هذه الحالة إلى أن الفص الصدغي الأوسط هو المسئول عن تشفير الذكريات الجديدة، إلا أنه ليس موقع تخزينها النهائي. وكان لهذه الاكتشافات المذهلة بالغ الأثر في فهمنا للذاكرة والدماغ. وعلى الرغم من فقدان موليسون لذاكرته، فقد ترك إرثاً لا يُنسى في علم الأعصاب.

## توطيد الذاكرة

من النتائج الأخرى غير المتوقعة من حالة موليسون، تطوُّر حالة فقدان الذاكرة الرجعي المُتدرِّج زمنياً. فلم يفقد موليسون القدرة على تكوين ذكرياتٍ جديدة (فيما يشار إليه بـ «فقدان الذاكرة التقدمي») فحسب، بل فقد كذلك القدرة على تذكُّر بعض الذكريات لأحداثٍ مرَّ بها قبل الجراحة (فيما يعرف بـ «فقدان الذاكرة الرجعي»). كان فقدان الذاكرة

## الحُصين



شكل ١-١: رسومات توضيحية لدماع هنري موليوسون. أُزيلَ الفص الصدغي الأوسط في كلا جانبي الدماغ، ولكن تَرَكَ النصف الأيمن من الدماغ سليماً هنا لإظهار الأجزاء المتأصلة. هذا الشكل مستنسخ بتصريح من سوزان كوركين وآخرين، من مقال «جرح الفص الصدغي الأوسط لإتتش إم: نتائج من الرنين المغناطيسي»، دورية «نيوروساينس»، المجلد ١٧، العدد العاشر (مايو ١٩٩٧): ٣٩٦٥ (حقوق النشر لجمعية علم الأعصاب).

الرجعي الذي عانى منه متدرجاً زمنياً؛ أي كانت ذكرياته الحديثة أكثر عرضةً للنسيان بينما ظلت الذكريات البعيدة في مأمن. بل إنه لم يتمكن من تذكُّر معظم الأحداث التي مرَّ

بها قبل عام أو عامين من الجراحة. وهذا يشير إلى أن الفص الصدغي الأوسط ضروري ليس فقط لتشفير الذكريات الجديدة، بل لاسترجاع الأحداث التي مرَّ بها الشخص مؤخرًا أيضًا. وفقًا لـ «نظرية توطيد الأنظمة»، التي تُعدُّ حاليًا النظرية الأكثر شيوعًا حول تنظيم الذاكرة على مستوى الدماغ، تُخزَّن الذكري الجديدة بسرعةٍ في الحُصين، ثم تمر بعملية «توطيد» بحيث تُخزَّن في النهاية في مكانٍ آخر في الدماغ، مثل القشرة المخية الحديثة.<sup>2</sup>

يشير فقدان الذاكرة الرجعي المُتدرج وتوطيد الذاكرة إلى أن الطريقة التي يقوم بها البشر بتشفير وتخزين التجارب كذكرياتٍ، تختلف عن تلك التي يستخدمها الكمبيوتر الرقمي. فلماذا إذن نقوم بتخزين الذكريات بهذه الطريقة؟ لماذا لا نُرسل الذكريات ببساطة إلى موقع التخزين النهائي؟ ربما لأن وجود موقعين منفصلين لتخزين الذكريات أمرٌ مفيد، وإن كان مرهقًا. فمن ناحية، سيكون من المفيد أن نتذكر تفاصيل الأحداث التي مررنا بها لاتخاذ خيارات أفضل في الحياة اليومية. ومن ناحية أخرى، قد تنفد مساحة التخزين لدينا إذا قُمنا بتخزين معظم تجاربنا كذكرياتٍ دائمة. وإحدى طرق حل هذه المُعضلة هي وجود موقعين لتخزين الذكريات: أحدهما للتخزين المؤقت لتفاصيل الخبرات التي نمرُّ بها، والآخر للتخزين الدائم لخلاصة هذه الخبرات.

لنفترض أنك تذهب إلى العمل بالسيارة. عليك أن تتذكَّر بالضبط المكان الذي أوقفت فيه سيارتك في الصباح لتعود إليها في المساء. ولكن لن يُفيدك أن تتذكَّر مواقع إيقاف سيارتك يوميًا بدقةٍ لبقية حياتك. فتذكَّر أنك قُدت سيارتك إلى العمل، وربما أوقفت سيارتك في ساحة انتظار الشركة، سيكون أقل إهدارًا لمساحة الذاكرة حال تخزينها في هيئة ذكري طويلة الأمد. قد يُخزن الحُصين مؤقتًا ذكرياتٍ تفصيلية لخبراتٍ حديثة (ويُسمَّى هذا النوع من الذاكرة «الذاكرة العرضية»)، في حين أن القشرة المخية الحديثة تستخلص تدريجيًا حقائق عامة من مجموعات من الخبرات، وتخزنها في صورة ذكريات دائمة («الذاكرة الدالية»)<sup>3</sup>.

إن نظرية توطيد الأنظمة ليست النظرية الوحيدة الموجودة حول تنظيم الذاكرة. فوفقًا لـ «نظرية الأثر المتعدد»، يُخزَّن الحُصين الذكريات البعيدة حتى بعد التوطيد؛<sup>4</sup> فالحُصين ليس ضروريًا لاستعادة ذكريات الحقائق العامة (الذكريات الدالية)، ولكنه ضروري لاستعادة ذكريات أحداثٍ محددة (الذكريات العرضية) عاشها الفرد حتى بعد التوطيد.<sup>5</sup> وبناءً على ذلك، تُوجد نظريات مُتعددة حول كيفية تنظيم الذكريات في الدماغ، مما يُشير إلى أننا لا نفهم تمامًا بعدُ سببَ توطيد الذكريات المكتسبة في البداية بمرور

الوقت لتُصبح ذكريات دائمة، وكيفية حدوث ذلك. في الواقع، يرتبط توطيد الذاكرة ارتباطاً مباشراً بالموضوع الرئيس لهذا الكتاب، ألا وهو الخيال. فتوطيد الذاكرة في اعتقادي هو عملية لاختيار وتعزيز خيارات قيمة على نحو نشط، للرجوع إليها مستقبلاً من خلال إعادة دمج التجارب السابقة باستخدام الخيال، بدلاً من تخزين الأحداث العرضية على نحو سلبي. وفي اعتقادي أيضاً أن هذا أساس جوهرى لقدرة البشرية على الابتكار. وسأناقش هذه المسألة بمزيد من التفصيل في الفصل السادس.

من النتائج المهمة الأخرى التي تم التوصل إليها من واقع حالة هنري موليوسون وجود أشكال متعددة من الذاكرة. لم يتمكن موليوسون من تذكر الحقائق والأحداث الجديدة، لكنه استطاع أن يتعلم أداء مهام جديدة بالممارسة. وهذا يشير إلى أن تذكر الحقائق والأحداث الجديدة («الذاكرة التقريرية» أو «الصريحة») يتم بواسطة الفص الصدغي الأوسط، في حين أن تعلم مهارات جديدة، مثل ركوب الدراجة («الذاكرة الإجرائية» أو «الضمنية») يتم بواسطة بنى دماغية أخرى. وعلى الرغم من وجود مجموعة كبيرة من الدراسات حول الأشكال المتعددة للذاكرة، فإن هذا الكتاب لا يستكشف أشكال الذاكرة هذه على نطاق أكبر؛ لأنها لا تتصل مباشرة بالموضوع الأساسي الذي يطرحه.

## الحُصين والخيال

غيرت حالة موليوسون، التي نُشرت لأول مرة في عام ١٩٥٧، مسار أبحاث الذاكرة.<sup>6</sup> وبعد خمسين عاماً، وتحديداً في عام ٢٠٠٧، نُشرت نتائج جديدة غيرت مسار أبحاث الذاكرة مرةً أخرى. ففي إحدى الدراسات، أثبت ديميس هاسابيس وزملاؤه أن مرضى فقدان الذاكرة الحُصيني يُعانون من مشكلة في تشفير الذاكرة، وأيضاً في سعة الخيال.<sup>7</sup> فطلبوا من مرضى فقدان الذاكرة الحُصيني ومجموعة ضابطة طبيعية أن يتخيلوا أحداثاً ممكنة في مواقف افتراضية. كانت بعض نماذج الإشارات اللفظية لتحفيز الخيال كالآتي: «تخيل أنك مُستلق على شاطئ رملي أبيض في خليج استوائي جميل» و«تخيل أنك تقف في قاعة العرض الرئيسة لمتحفٍ يحتوي على كثيرٍ من المعروضات.»

جاءت نتائج هذه التجربة مفاجئة. فقد واجه مرضى فقدان الذاكرة الحُصيني صعوبةً في بناء تجارب مُتخيَّلة جديدة. وبطبيعة الحال، توصل أفراد المجموعة الضابطة إلى سيناريوهات خيالية متنوعة دون صعوبة كبيرة. جرَّب هذا التمرين بنفسك. ربما يمكنك بسهولة تخيل تسلسلٍ منطقي للأحداث دون بذل كثيرٍ من الجهد. غير أن المرضى

الذين يُعانون من فقدان الذاكرة الحُصيني يواجهون صعوبةً في تخيُّل أحداث منطقية بصورة واضحة. بعبارةٍ أخرى، إن الأضرار التي تلحق ببنية الدماغ، المعروفة بأنها تضطلع بدورٍ حاسم في الذاكرة، يمكن أن تؤدي أيضًا إلى إضعاف القدرة على الخيال الخصب.

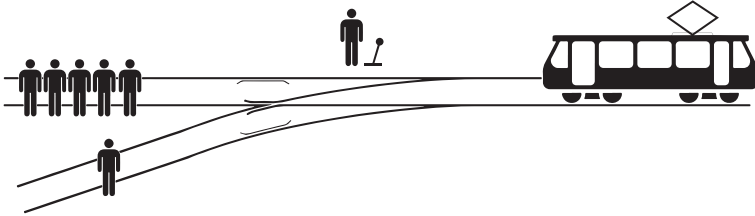
أسفرت دراستان أخريان نُشرتا في عام ٢٠٠٧ عن نفس النتيجة ولكن باستخدام نهجٍ مختلف.<sup>8</sup> فقد استخدمت الدراستان التصوير بالرنين المغناطيسي الوظيفي (fMRI)، وهي تقنية لتصوير الدماغ تُستخدَم على نطاقٍ واسع، لتبيِّن مناطق الدماغ التي تنشط أثناء التخيل لدى الأشخاص الطبيعيين. نُشِطَ الحُصين عندما كان أفراد البحث يسترجعون ذكرياتهم الذاتية، وهو أمر متوقَّع؛ إذ يلعب الحُصين دورًا بالغ الأهمية في تذكُّر التجارب الحديثة. ولكن المدهش أن الحُصين قد نشط أيضًا عندما كانوا يتصوِّرون المُستقبل. بعبارةٍ أخرى، لم ينشط الحُصين في أثناء تذكُّر الأحداث الماضية فحسب، بل في أثناء تخيُّل أحداثٍ مستقبلية أيضًا.

### شبكة الوضع الافتراضي

من أجل اكتساب فهمٍ أفضل لعملية تنشيط الحُصين أثناء التخيل في سياقٍ أوسع، ضع في اعتبارك أن بعض مناطق الدماغ تنشط على نحوٍ خاص عندما نكون في حالة استرخاء، ولا نأبه كثيرًا بالعالم الخارجي. وتُسمَّى هذه المناطق مجتمعةً «شبكة الوضع الافتراضي». كان محور التركيز التقليدي للعلماء ينصبُّ على كيفية معالجة الدماغ للمعلومات استجابةً للمُحفزات الحسِّية الخارجية، ولكن لم يُولوا إلا القليل من الاهتمام لنشاط الدماغ في حالته الخاملة. ومما يبعث على الدهشة أن العلماء قد وجدوا أن مناطق مُعينة في الدماغ تنشط أثناء الراحة عنها عند أداء مهام تتطلب الانتباه.<sup>9</sup>

جاء اكتشاف شبكة الوضع الافتراضي مصادفةً في الواقع. كانت تقنيات تصوير الدماغ قد بدأ استخدامها على نطاقٍ واسع لفحص وظائف المخ في الثمانينيات من القرن الماضي، وعادة ما كانت الدراسات المبكرة تستخدم الحالات السلبية، مثل حالة الراحة، عنصر ضبط لظروف تجارب أداء المهام. ومع تراكم البيانات التجريبية، أدرك العلماء أن هناك مناطق معينة في الدماغ تكون أنشط أثناء حالات الخمول. وجاء اختيار الاسم الذي أطلقه ماركوس رايشل وزملاؤه معًا على هذه المناطق من الدماغ؛ لأنها تمثل نشاط الدماغ الأساسي (الافتراضي).<sup>10</sup>

ماذا كان أفراد الدراسة يفعلون خلال الحالات السلبية؟ ذكر هؤلاء الأفراد أنهم كانوا يسترجعون ذكرياتهم الذاتية (على سبيل المثال، التفكير في عشاء الليلة السابقة)، أو يتصورون المستقبل (أي أحلام اليقظة) أثناء الراحة. وقد وجدت دراسات لاجحة أن شبكة الوضع الافتراضي تنشط بالتزامن مع أنشطة عقلية متنوعة، مثل التفكير في أفكار شخص آخر (فيما يُسمى «نظرية العقل»)، واتخاذ قرارات أخلاقية (على سبيل المثال، مُعضلة عربة الترام الموضحة في الشكل (١-٢))، وأداء مهام التفكير الإبداعي (على سبيل المثال، مهمة التفكير المُتباين التي يُطلب فيها من الأشخاص تقديم خياراتٍ بديلة متعددة، ردًّا على سؤال مفتوح على غرار: «ما الطرق التي يمكن بها استخدام قالب من الطوب؟»)<sup>11</sup>. تشير هذه النتائج إلى أن شبكة الوضع الافتراضي تنشط بالتزامن مع العمليات العقلية الداخلية. يبدو أن الدماغ مزوّد بشبكةٍ مرتبطة بالمهام، تنشط عندما نخرط في نشاطٍ يتطلب منا الانتباه إلى العالم الخارجي، بينما تنشط شبكة الوضع الافتراضي عندما نخرط في العمليات العقلية الداخلية.



شكل ١-٢: معضلة عربة القطار. تتجه عربة قطار مُسرعة نحو خمسة عمال لا ينتبهون إلى مجيء العربة. يمكنك إنقاذ حياتهم عن طريق سحب رافعة لتحويل العربة إلى مسارٍ جانبي. ولكن هناك عاملاً وحيداً يقف في المسار الجانبي لا ينتبه أيضاً لمجيء عربة القطار. ماذا ستفعل؟ هل ستقتل شخصاً واحداً لتُنقذ خمسة؟ نُسخ الشكل بتصريح من ماكجيدون، File:Trolley Problem.svg، ويكيبيديا كومنز، تم التحديث في ٦ مارس ٢٠١٨، [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Trolley\\_Problem.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Trolley_Problem.svg) (CC BY-SA 4.0).

كما هو موضح في بقية هذا الكتاب، غالباً ما تظهر الأفكار الإبداعية في حالات الراحة وحتى في أثناء النوم. قد يبدو الدماغ خاملاً عندما نأخذ قسطاً من الراحة. على العكس من ذلك، تكون شبكة الوضع الافتراضي نشطة أثناء وقت راحتنا، وقد تظهر أفكار إبداعية

بينما تتجول عقولنا بحرية. وسنتناول هذه المسألة عن كُتب في الفصل الثالث عشر. أما الآن، فإن ما يرتبط ارتباطاً وثيقاً ببقية هذه المناقشات هو ملاحظة أن الحصين مكون رئيس في شبكة الوضع الافتراضي.

خُلاصة القول، تؤدي الأضرار التي تلحق بالحصين إلى إضعاف قدرة الشخص على التخيل، وينشط الحصين — باعتباره جزءاً مهماً من شبكة الوضع الافتراضي — بالتزامن مع العمليات العقلية الداخلية، التي من ضمنها تصوّر المستقبل. لكن هذه النتائج ليست قاطعة. فعادةً ما يُعاني المرضى الذين يُعانون تَلَفًا في الحصين تَلَفًا في مناطق أخرى من الدماغ أيضًا. كذلك تعتمد دراسات تصوير الدماغ على القياس غير المباشر لتدفق الدم في الدماغ، بدلاً من قياس النشاط العصبي. ومع ذلك، فإن خلاصة هذه النتائج واضحة. لا يلعب الحصين دوراً في الذاكرة فحسب، بل في الخيال أيضًا. لقد وصلنا إلى نقطة تحوّل جديدة في أبحاث الذاكرة بعد خمسين عاماً من نشر حالة هنري موليسون. ولهذا السبب، وصفت دورية «ساينس» اكتشاف دور الحصين في الخيال بأنه واحد من عشرة اكتشافات كبرى في عام ٢٠٠٧.<sup>12</sup>

## الفصل الثاني

# الذاكرة الزائفة

من الواضح الآن أن البنية الدماغية نفسها، ونقصد الحُصين، تدخل في الذاكرة والخيال أيضاً. وهنا يُطرح سؤال حول ما إذا كانت وظيفة الحصين فيما يتعلق بالخيال قد تتداخل مع وظيفته في الذاكرة. ألن يكون من الصعب الحفاظ على سلامة الذاكرة إذا تأثرت بالخيال؟ ألا توجد خطورة من خلط ما تخيلناه بما اخترناه بالفعل؟ في الواقع، من المعروف في علم النفس أن الذاكرة ليست ثابتة، ولكنها تتغير بمرور الوقت، وقد نتذكر حتى أحداثاً لم تحدث قط. وتثير ظاهرة «الذاكرة الزائفة» (أي تذكر شيء مخلق جزئياً أو كلياً على الرغم من أنه يبدو حقيقياً) احتمالية أن مناطق الدماغ المرتبطة بالذاكرة والخيال قد تتفاعل على نحو وثيق بعضها مع بعض. والآن، يقدم اكتشاف أن الحصين يلعب دوراً في كلٍّ من الذاكرة والخيال، تفسيراً محتملاً للآليات العصبية الكامنة وراء الذاكرة الزائفة.

### ما أتذكره وما حدث بالفعل

نحن لا نتذكر الأحداث تماماً كما عايشناها. ففي أغلب الأحيان، يختلف تذكرنا لحدثٍ ما اختلافاً جوهرياً عن الحدث الفعلي. ويرجع السبب في ذلك إلى أن الطريقة التي يُعالج بها الدماغ المعلومات ويخزنها تختلف عن طريقة عمل الكمبيوتر. على سبيل المثال، عادة ما نستخلص الجوهر والمعنى من تجاربنا بحيث يختلط ما نستنتجُه مع ما نخبره بالفعل. فإذا سمعنا قائمةً من الكلمات المرتبطة بالنوم (على سبيل المثال، سرير، راحة، استيقاظ، وما إلى ذلك)، عادة ما نتذكر كلمة «النوم» على اعتبار أنها مُدرجة ضمن القائمة، على الرغم من عدم وجودها.<sup>1</sup> كذلك، وعلى عكس ما يحدث عند استعادة الكمبيوتر ملفاً ما، يمكن أن تتداخل بعض الذكريات مع استرجاع ذكريات أخرى.<sup>2</sup> إذا مرَّ وقت طويل على

حدث مُعين عايشته، وإذا مررت بأحداثٍ مماثلة عدة مرات منذ التجربة الأصلية، فمن المُحتمل أنك ستجد صعوبةً في تذكر الحدث الأصلي تمامًا كما حدث؛ إذ قد يختلط تذكر للحدث الأصلي بذكريات الأحداث ذات الصلة.

يميل الدماغ أيضًا إلى استيفاء المعلومات المفقودة. لنفترض أنك تعرضتَ لحدثٍ مروري. من المُحتمل أنك ستفكر في الحادث من وقتٍ لآخر لأنه حدث غير عادي. خلال هذه العملية، قد يُضيف دماغك المعلومات المفقودة. على سبيل المثال، على الرغم من أنك في البداية لا تتذكر لون ملابس السائق الآخر لأنك لم تنتبه إليه، فإن دماغك قد يملأ فراغ هذه المعلومة عندما تتذكر الحادث بعد ذلك. وسوف تترسخ المعلومات المضافة مع تكرار هذه العملية. ونتيجة لذلك، قد تتذكر بوضوح أن السائق الآخر كان يرتدي قميصًا أحمر على الرغم من أنه في الواقع كان يرتدي قميصًا برتقاليًا. لماذا اختار دماغك اللون الأحمر؟ ربما تكون قد قابلت مؤخرًا العديد من الأشخاص كانوا يرتدون قمصانًا حمراء. أو ربما شاهدتَ فيلمًا كان فيه الشرير يرتدي قميصًا أحمر وهو يقود سيارة. وكما في هذا المثال الافتراضي، فإننا نميل إلى استيفاء المعلومات المفقودة بأفضل تخميناتنا بناءً على توقعاتنا وتجاربنا السابقة، وهو ما يُفسر لماذا يمكن أن تكون شهادة شهود العيان غير موثوقة إلى حدٍ خطير.<sup>3</sup>

### قضية جورج فرانكلين

في بعض الأحيان، قد نكوّن ذكرى لحدثٍ لم يقع على الإطلاق. وهنا، سنتناول قضيتين يُشتبه أنهما تندرجان تحت بند الذاكرة الزائفة، أثارتا انتباه الرأي العام. الأولى هي قضية جورج فرانكلين، ويرجع أصلها إلى جريمة قتل في فوستر سيتي، كاليفورنيا، في عام 1969.<sup>4</sup> تعرضت طفلة تبلغ من العمر ثماني سنوات، تُدعى سوزان نيسون، للاغتصاب والقتل، وظلّت القضية دون حلّ لسنوات. وبعد عشرين عامًا، اتهمت إيلين فرانكلين، وهي صديقة لسوزان نيسون، شخصًا ما بارتكاب الجريمة. والمُدّش أن المتهم كان والدها جورج فرانكلين. شهدت إيلين في المحكمة بأنها شاهدت جورج يسحق جمجمة سوزان بصخرة ثقيلة. وقالت إن ذكرى حية للمشهد المروع، الذي ظل في طي النسيان عشرين عامًا، ومضت فجأةً في ذهنها بينما كانت تلعب مع ابنتها الصغيرة جيسكا. أثارت شهادة إيلين فرانكلين جدلاً بين الذاكرة «المكبوتة» والذاكرة «الزائفة». والذاكرة المكبوتة هو مفهوم طرحه سيجموند فرويد في الأصل كآلية دفاع نفسية ضد الأحداث

الصادمة والمؤلمة. فقد يحول العقل، عن غير وعي منه، دون الوصول إلى الذكريات المروعة التي عاشها الفرد، والتي قد يستعيدها بعد سنوات. انتشرت هذه الفكرة على نطاق واسع بين علماء علم النفس السريري والأشخاص العاديين في وقت محاكمة جورج فرانكلين. ومع عدم وجود دليل مادي سوى شهادة ابنته، أدانته هيئة المُحلفين بارتكاب جريمة قتلٍ من الدرجة الأولى، وحُكِم عليه بالسجن مدى الحياة.

وخلافًا لحكم هيئة المُحلفين، تؤيد المناقشة التالية فكرة الذاكرة الزائفة وليس الذاكرة المكبوتة. أولًا: لم تُثبِت فرضية الذاكرة المكبوتة علميًا. ثانيًا: الذكريات تتغير مع الزمن. ولذلك فإن قدرة إيلين على تذكُّر تفاصيل حدثٍ ما تمامًا مثلما حدث قبل عشرين عامًا من عدمها هو أمر محلُّ شك. ثالثًا: جميع التفاصيل التي أدلت بها عن جريمة القتل يمكن العثور عليها في مقالات الصحف. علاوة على ذلك، فإن بعض التفاصيل لم تكن صحيحةً سواء في المقالات الصحفية أو شهادة إيلين. على سبيل المثال، ذكر أحد المقالات خطأً أن الخاتم الذي كانت ترتديه سوزان في يدها اليمنى كان يحتوي على حجر (بينما الخاتم ذو حجر التوباز كان في الواقع في يدها اليسرى)، وارتكبت إيلين الخطأ نفسه في شهادتها. رابعًا: تبين لاحقًا أن إيلين قد استرجعت ذكرى الحادث من خلال التنويم المغناطيسي. ولا يُسمح بالشهادة القائمة على ذكرى مُسترجعة تحت تأثير التنويم المغناطيسي في المحكمة؛ لأن ذاكرة الشاهد يمكن أن تُفسد بالمعلومات الخاطئة. فقد تختلط المعلومات الصحيحة والخاطئة لتُشكّل معًا روايةً متماسكة أثناء التنويم المغناطيسي، مما يزيد من ثقة الشاهد بالذكري المُسترجعة. خامسًا: اتهمت إيلين والدها فيما بعد بواقعتي اغتصابٍ وقتلٍ إضافيّتين (فيرونیکا كاسيو وبولا باكستر)، لكن تحاليل الحمض النووي برّأته من التُّهم. وأدى هذا إلى التشكيك في مصداقية شهادة إيلين. وفي عام ١٩٩٦ أُطلق سراحه من السجن. وفي عام ٢٠١٨، حُكِم على رجلٍ آخر، يدعى رودني لين هالباور، بالسجن مدى الحياة لارتكابه جريمتي القتل هاتين.<sup>5</sup>

## قضية بول إنجرام

في عام ١٩٨٨، اتُّهم بول إنجرام — الذي كان آنذاك كبير نواب الشئون المدنية لمكتب قائد شرطة مقاطعة ثورستون في أولمبيا بواشنطن — من قبل ابنتيه إريكا، البالغة من العمر اثنتين وعشرين عامًا، وجولي البالغة من العمر ثمانية عشر عامًا، بالاعتداء عليهما جنسيًا لسنواتٍ عندما كانتا طفلتين. في البداية أنكر إنجرام الاتهامات الموجهة إليه، لكنه اعترف

في النهاية بأنه اعتدى على ابنتيه جنسياً خلال طقوسٍ شيطانية. وباعترافه بجُرمه، بدا أن القضية قد حُلَّت دون أي جدل.

ومع ذلك، تحولت هذه القضية التي تبدو بسيطة إلى قصة مُعقدة. فقد ضُخِّمت اتهامات إريكا تدريجياً إلى قصص مُبالغ فيها عن طقوس إيذاءٍ شملت قتل أطفال رُضع لتقديمهم قرابين، فشلت الشرطة في العثور على أدلة مادية عليها. على سبيل المثال، أصرت إريكا على أنها شاهدت خمسة وعشرين طفلاً يُضخَّى بهم أثناء الطقوس، وأنهم دُفِنوا في الفناء الخلفي لمنزل العائلة. غير أنه لم يُعثر على عظام بشرية (فقط جزء من عظمة أيل) في المنزل. في الواقع، لم تُسفر أشهر من التحقيقات الشرطية، هي الأوسع في تاريخ المقاطعة، عن أي دليلٍ مادي على الإطلاق على الطقوس أو جرائم القتل المزعومة.<sup>6</sup>

ماذا عن استرجاع بول لتلك الطقوس الشيطانية؟ تشير «تجربة صغيرة» أجراها ريتشارد أوفشي، خبير علم النفس الاجتماعي من جامعة كاليفورنيا، بمدينة بيركلي، إلى أن اعترافاته قد تكون «اعترافات كاذبة مستحثة داخلياً بالإكراه».<sup>7</sup> انضم أوفشي إلى التحقيق بوصفه خبيراً في الطوائف ومجموعات السيطرة على العقول، لكنه كان مُهتماً أيضاً باستجابات الشرطة القسرية. قدّم أوفشي ادعاءً كاذباً بأن بول أجبر ابنه وابنته على ارتكاب زنا المحارم معاً. أنكر بول في البداية هذا الاتهام، لكنه في النهاية كتب اعترافاً تفصيلياً عنه. بل إنه رفض تصديق كذب الواقعة عندما كشف أوفشي أنه اختلقها.<sup>8</sup> لا يزال من غير الواضح ما إذا كانت اعترافات بول تعكس ما حدث فعلاً، أم أنها ذكريات زائفة، أو مزيج من الاثنين معاً.<sup>9</sup> غير أن قضية بول إنجرام، إلى جانب قضية جورج فرانكلين، ساهمتا في تعزيز الوعي العام بأن المعلومات المُضلة والإيحاءات الصادرة من شخصياتٍ سلطوية، مثل علماء النفس الموثوقين أو ضباط الشرطة، قد تزرع ذكريات زائفة في نفسية الأشخاص الأكثر عرضةً للتأثر بذلك.

## تائه في مركز تجاري

تشير القضيتان السابقتان إلى أننا قد نختلق ذكريات لأحداثٍ لم تحدث في الواقع قط. وقد قدمت إليزابيث لوفتوس، أستاذة علم النفس بجامعة واشنطن، شهادة خبير حول هذا الاحتمال في محاكمة جورج فرانكلين. وعلى الرغم من شهادتها، فقد أُدين في عام ١٩٩٠. وقد أثبتت دراساتٍ حتى ذلك الحين أن الذكريات يمكن أن تتغير من خلال المعلومات

التي يتلقاها الشخص بعد وقوع حدثٍ ما (فيما يُعرف باسم «تأثير المعلومات المضللة»)، ولكنها لم تُثبت إمكانية تليفيق ذكريات كاملة.<sup>10</sup>

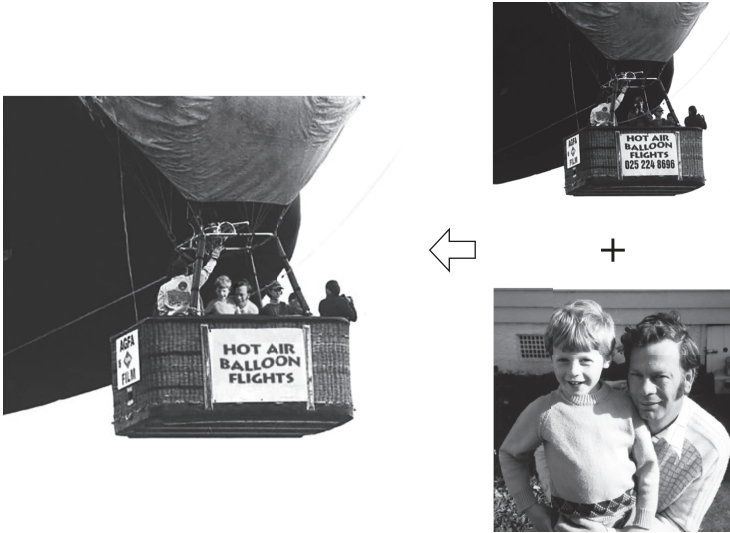
وفي سبيل إثبات إمكانية وجود ذكريات مفبركة بالكامل لحدثٍ ما، أُجرت لوفتوس بالاشتراك مع تلميذتها جاكلين بيكريل تجربة — دراسة «تائه في مركز تجاري» — ونشرت النتائج في عام ١٩٩٥.<sup>11</sup> في هذه التجربة، قُدِّمت أربع قصصٍ قصيرةٍ لأربعةٍ وعشرين شخصًا حول أحداثٍ من طفولتهم وطلب منهم تسجيل تفاصيل ذكرياتهم عن تلك الأحداث. ثم أُجريت مُقابلتان معهم، أُجريت كل منهما على مدى أسبوعٍ إلى أسبوعين. ثلاث من القصص الأربعة كانت حقيقية، لكن إحداها كانت حدثًا زائفًا عن التيه. على سبيل المثال، قُدِّم المُلخَص التالي لامرأةٍ فيتناميةٍ أمريكيةٍ تَبْلُغ من العمر عشرين عامًا: «ذهبتِ أنتِ وأمك، تيان، وتوان جميعًا إلى مركز بريمرتون كيه مارت التجاري. كنتِ في الخامسة من عمرك تقريبًا في ذلك الوقت. أعطت والدتك بعض المال لكل واحدٍ منكما مثلجات التوت. وركضتِ كي تصلي إلى الصف أولاً، وضللتِ طريقك بطريقةٍ ما في المتجر. وجدتك تيان تبكين لامرأةٍ صينيةٍ مُسنَّة. ثم ذهب ثلاثكم معًا للحصول على المثلجات.»

من ناحية، نفى معظم الأشخاص (١٨ من بين ٢٤ شخصًا، أو ٧٥ في المائة) تذكُّرهم أنهم ضلوا الطريق وتذكروا بنجاح ٤٩ حدثًا حقيقيًا من أصل ٧٢ (بمعدل نجاح ٦٨ في المائة). وكان كم التفاصيل، وتصنيف وضوحها، وتصنيف موثوقيتها أكبر بكثيرٍ أيضًا فيما يتعلق بذكريات الأحداث الحقيقية، مما يشير إلى أن ذكرياتنا عن الأحداث يمكن الاعتماد عليها إلى حد معقول.

على الجانب الآخر، قال ستة أفراد (٢٥ في المائة) إنهم تذكُّروا، كليًا أو جزئيًا، حدث ضلال الطريق في طفولتهم، مما يدل على إمكانية زرع ذكرياتٍ زائفةٍ للأحداث عن طريق المعلومات المضللة والإيحاءات. وفيما يلي مثال من إحدى المُشاركات، التي اعتقدتُ خطأً أنها ضلَّت طريقها حقًا خلال المقابلة الثانية: «أتذكر بالتّباس شديد، أعني أن الأمر مُلتبس عليّ جدًّا، السيدة وهي تساعدني، بينما تيم وأمي كانا يفعلان شيئًا آخر، لكنني لا أتذكر أنني بكيت. أعني أنني أستطيع تذكُّر أنني بكيتُ مائة مرة ... لا أتذكر سوى تفاصيل صغيرة ومتفرقة عن هذا الأمر. أتذكر أنني كنتُ مع السيدة. أتذكر الذهاب للتسوق. لا أعتقد أنني ... لا أتذكر الجزء المتعلق بالنظارة الشمسية.»

## الصورة تساوي ألف كذبة

جرى تكرار نتيجة دراسة «تائه في مركز تجاري» في دراساتٍ لاحقة. لنتناول واحدة من تلك الدراسات التي استُخدمت فيها صورةٌ بصريةٌ مُزيّفة. <sup>12</sup> عُرضَ على عشرين شخصاً لم يسبق لهم ركوب منطاد الهواء الساخن من قبلُ صورة فوتوغرافية مفبركة تُظهرهم وهم يستقلُّون منطاد الهواء الساخن (انظر الشكل ٢-١). ثم أُجريت معهم ثلاث مقابلات خلال الأيام السبعة عشر إلى الستة عشر التالية. بحلول المقابلة الثالثة، ادَّعى عشرة أشخاص (٥٠ في المائة) أنهم تذكَّروا على الأقل بعض تفاصيل رحلة المنطاد (كان من الضروري تقديم معلومات مُتسقة لا تظهر في الصورة المُزيّفة لتصنيف ما يُقال بأنه ذاكرة زائفة). وفيما يلي جزء من المقابلة الثالثة مع شخصٍ جرى تقييمه على أنه قد طور ذاكرةً زائفةً جزئية:



شكل ٢-١: صور معدلة ببرنامج فوتوشوب لاستخدامها في دراسة عن الذاكرة الزائفة (بإذن من كيمبرلي ويد).

المحاور: نفس الشيء مرّةً أخرى، أخبرني بكلِّ ما يمكنك تذكره عن الحدث الثالث دون ترك أي تفصييلة.

الشخص الخاضع للدراسة: أحاول فقط استنباط عمر أختي؛ أحاول تذكُّر الرقم الدقيق ... عندما حدث ذلك. لكنني ما زلتُ متأكدًا تمامًا من أن ذلك حدث عندما كنتُ في الصف السادس في المدرسة المحلية هناك ... مقابل ما يقارب عشرة دولارات يمكنك ركوب منطاد الهواء الساخن والارتفاع نحو ٢٠ مترًا ... كان يوم سبت وأعتقد أننا ذهبنا ... نعم ... مع والدَيْنا، وليس، ليس مع جدتي ... لستُ متأكدًا من كان هناك. وأنا متأكد تمامًا من أن أُمي كانت بالأسفل تلتقط صورة.

تؤكد هذه الدراسة الاستنتاج القائل بأننا قد نكونُ ذكريات زائفة للأحداث. لقد طور عدد أكبر من أفراد العينة البحثية ذاكرةً كاذبة في دراسة منطاد الهواء الساخن مقارنةً بدراسة مركز التسوق. وربما يكون هذا بسبب أن الأشخاص رأوا صورةً بصرية واضحة، وإن كانت مزيفة (انظر الشكل ٢-١). ألا تساوي الصورة ألف كلمة؟ لقد أطلق المؤلفون على هذه الدراسة مجازًا: «الصورة تساوي ألف كلمة».

## الذاكرة البناءة

بدأنا هذا الفصل بمسألة التفاعلات المحتملة بين الذاكرة والخيال. وبالنظر إلى أن الحُصين له دور في كلِّ من الذاكرة والخيال، أليس من الممكن إذن الخلط بين ما تخيلناه وما عايشناه بالفعل؟ الإجابة واضحة. يؤثر الخيال بالفعل على الذاكرة؛ لذلك من الممكن حتى غرس ذكريات مفبركة في ظلِّ ظروفٍ معينة. لتتظاهر بأنك أحد المشاركين في الدراسة؛ تبدو مسألة أنك قد ضللتَ طريقك في أحد مراكز التسوق أثناء طفولتك؛ لأن والدتك وأخاك قالا ذلك، حقيقية. ليس لديك ذكري واضحة لهذا الحدث، ولكن طُلب منك أن تتذكَّر وتكتب تفاصيل عرضية عنه. هنا، قد ينزلق الخيال إلى عملية التذكُّر، ليستوفي تدريجيًا التفاصيل العرضية للذكري الزائفة.

وخلافًا للمنطق السليم، قد لا تكون الذاكرة والخيال عمليتين مستقلتين؛ فمن الواضح أن ذاكرتنا تعتمد على العمليات البناءة التي أحيانًا ما تكون عرضة للخطأ والتشويه. وقد أطلق دانييل شاكتر، عالم النفس في جامعة هارفارد، على هذا الجانب من الذاكرة «الذاكرة البناءة»: «عندما نتذكَّر، نقوم بتجميع أجزاء من المعلومات المُخزَّنة تحت تأثير معرفتنا ومواقفنا ومعتقداتنا الحالية».<sup>13</sup> الخيال أيضًا هو عملية تجميع لأجزاء من معلومات مُخزَّنة. وإذا كان الأمر كذلك، فسيكون الأكَفأ للدماغ أن تكون هناك عملية بناء مشتركة بين الذاكرة والخيال معًا، بدلًا من عمليتين مُستقلَّتين. ومن هذا المنظور، لن

## الدماغ المُبتكر

يكون من المُستغرب أن نعرف أن الحُصين يلعب دورًا في كلِّ من الذاكرة والخيال. إن هذه العملية المشتركة لا تُفيد في تذكُّر حدث ما تمامًا كما وقع، إلا أنها عملية تكيفية؛ لأنها «تُتيح استخدام المعلومات السابقة بمرونة في محاكاة سيناريوهات مُستقبلية بديلة دون الانخراط في سلوكيات فعلية.»<sup>14</sup>

ما زلنا لا نملك بعد فهمًا واضحًا للعمليات العصبية الدقيقة التي تقف وراء الجانب البنيء من الذاكرة. ولكن من منظور الحُصين، قد يكون كلُّ من الذاكرة والخيال مظهرًا للعمليات العصبية الأساسية نفسها. وفي الفصول اللاحقة، سنستكشف العمليات العصبية الحُصينية الكامنة وراء الذاكرة والخيال.

## الفصل الثالث

# خلايا المكان وإعادة العرض في الحُصين

أظهرت الدراسات على البشر أن البنية الدماغية نفسها (الحُصين) تدخل في كلِّ من الذاكرة والخيال، وهو ما قد يُفسر سبب قيامنا أحياناً بتكوين ذكرياتٍ لأحداثٍ لم نُعايشها من قبل (ذكريات زائفة). وفي هذا الفصل، سنستعرض دراسات أجريت على الحيوانات، وقدمت رؤى مهمة حول العمليات العصبية الحصينية التي تقف وراء الذاكرة والخيال.

## الدراسات على البشر مقارنة بالدراسات على الحيوانات

ثمة مساران بحثيان — أحدهما يستخدم البشر، والآخر يستخدم الحيوانات، وخاصة القوارض — كانا بمنزلة القوة الدافعة لتقدُّم معرفتنا بالحُصين. تقدم الدراسات على البشر بياناتٍ ذات صلةٍ مباشرة باهتمامنا الأساسي، ألا وهو وظائف الحُصين البشري والعمليات العصبية التي تقف وراءها. غير أنه من الصعب دراسة العمليات العصبية الحصينية مباشرة لدى البشر؛ لأن الطرق الباضعة، مثل تسجيل نشاط الخلايا العصبية باستخدام إلكتروود مجهري، غير مسموح باستخدامها على البشر. ولا تُجرى دراسات تتضمن طرقاً باضعةً على المرضى من البشر إلا نادراً، وعادةً ما تتم قبل جراحات المخ؛ لتحديد مصدر نوبات الصرع.

تعتبر الدراسات على الحيوانات مفيدة في هذا الصدد؛ لأن بإمكاننا إجراء مجموعة متنوعة من التجارب التي تنطوي على أساليب باضعة، تستهدف الحُصين. على سبيل المثال، يمكننا زرع أقطاب كهربية مجهرية في حُصين حيوان يتصرف بحرية، ورصد أنشطة إطلاق جهد الفعل للخلايا العصبية الفردية في الوقت الفعلي لحدوثها. يمكننا أيضاً

التلاعب بنشاط الخلايا العصبية في الحصين، مثل إسكات مجموعة معينة من الخلايا العصبية وفحص تأثيراتها على سلوك الحيوان. توفر مثل هذه الدراسات على الحيوان معلومات قيمة لمحور اهتمامنا الأساسي — فهم الوظائف والعمليات العصبية للحصين البشري — لأن هذه البنية التطورية القديمة تتشابه بصورة ملحوظة في كثيرٍ من النواحي بين البشر والثدييات الأخرى. ولذلك، فالدراسات التي تُجرى على الحصين في كلٍّ من البشر والحيوانات يُكمل بعضها بعضًا.

لقد علمتنا الدراسات التي أُجريت على الحيوان الكثيرَ عن كيفية تخزين الحُصين للذكريات. على سبيل المثال، أدى اكتشاف التغيرات الطويلة الأمد التي تطرأ على فاعلية التشابك العصبي (أي التغيرات في قوة الاتصال بين الخلايا العصبية؛ المشابك العصبية هي الروابط بين الخلايا العصبية) إلى تقدُّم كبير في فهمنا للعمليات العصبية الكامنة وراء تخزين الذكريات في الحصين.<sup>1</sup> يُمكننا تفسير تكوُّن الذكريات في الحصين في إطار العمليات الكامنة وراءه، وذلك من خلال التغيرات التي تعتمد على النشاط في فاعلية التشابك العصبي والتي تؤدي إلى تغيير ديناميكيات الشبكة العصبية (سأشرح هذه الفكرة بالتفصيل في الفصل الرابع). لدينا أيضًا فهمٌ جيد للعمليات الجزيئية الكامنة وراء تغير فاعلية التشابك العصبي. بل إنه صار بالإمكان الآن التعبير عن بروتينات اصطناعية في خلايا عصبية مُحددة في الحُصين وتنشيطها لزرع ذكرياتٍ زائفة لدى الحيوان.<sup>2</sup> وهكذا، ومن بين جميع وظائف الدماغ العليا، تُعد الآليات العصبية للذاكرة هي أكثر الآليات المفهومة لنا، ويرجع ذلك إلى حدٍّ كبيرٍ إلى النتائج التي توصلت إليها الدراسات على الحيوانات.

ولكن ماذا عن الدراسات التي أُجريت على الحيوانات حول دور الحُصين في الخيال؟ هل يمكن دراسة هذا الموضوع باستخدام الحيوانات؟ قطعًا. فقد أسفرت الدراسات التي أُجريت على الفئران خلال العقدَيْن الماضِيَيْن عن أدلة وافرة على أن الحُصين في القوارض يدخل في تذكُّر الماضي وكذلك في تخيُّل المُستقبل. وخلصت الدراسات على البشر والحيوانات، كلٌّ على حدة، إلى أن الحصين يلعب دورًا في الخيال والذاكرة أيضًا. والأهم من ذلك أن الدراسات التي أُجريت على الحيوانات قدمت رؤى مهمة حول عمليات الدائرة العصبية التي تقوم عليها وظيفة الحُصين فيما يتعلق بالخيال، لا تستطيع الدراسات على البشر تقديمها.

## ماذا يُقصد بإعادة التشغيل العصبي؟

كيف اكتشف العلماء دور الحُصين لدى الفئران في الخيال؟ من خلال زرع أقطاب كهربية مجهرية دقيقة ورصد نشاط الخلايا العصبية الحصينية أنبأ لدى فئران تتصرّف بحرية. يقوم علماء الفسيولوجيا العصبية بزراعة أقطاب كهربية مجهرية دقيقة في منطقةٍ مُعينة من الدماغ، ورصد نشاط الخلايا العصبية في هذه المنطقة، ومن ثم محاولة فهم كيفية معالجة هذا الجزء من الدماغ للمعلومات عن طريق تحليل النشاط العصبي المرتبط بالسلوك. وباستخدام هذا النهج، وجد العلماء عمليات «إعادة تشغيل» للنشاط العصبي المُصاحب للخبرات تحدّث في الحُصين، مما أتاح لهم فهم عمليات الدائرة العصبية التي تكمن وراء الخيال في الحُصين.

تُشير إعادة التشغيل العصبي في الحُصين إلى إعادة تنشيط نفس تسلسل النشاط العصبي المرتبط بتجربة سابقة أثناء حالة الخمول. فيتكرّر (أو يُعاد تشغيل) تسلسل النشاط العصبي الذي رصد أثناء التنقّل النشط للفأر أثناء نومه أو في وقت الراحة والهدوء. وفيما تبقى من الفصل، سندرس عن كثب إعادة التشغيل العصبي في الحُصين وكيف يمكن أن يكون مرتبطاً بالخيال.

## خلايا المكان

إن السمة الأبرز للخلايا العصبية الحُصينية في القوارض التي تتحرك بحرية (مثل الجرذان والفئران) هي أنها تنشط وتُرسل إشارات عصبية عند وجود الحيوان في مكانٍ مُحدد. عادة ما تنشط الخلايا العصبية الحُصينية على نحوٍ انتقائي عندما يكون الحيوان داخل موقعٍ مُقيد في ساحة تسجيل التجربة. وقد أشار جون أوكيف — عالم الفسيولوجيا العصبية الذي أفاد بهذه النتيجة في الفئران بالاشتراك مع جوناثان دوستروفسكي في عام ١٩٧١ — إلى هذه الخلايا العصبية باسم «خلايا المكان»<sup>3</sup>. كما نشر مع لين نادل في عام ١٩٧٨ الكتاب المؤثر «الحُصين كخريطة معرفية»، الذي اعتبر أن الحُصين هو البنية الدماغية التي تُمثل تصميم الحيز الخارجي المحيط بنا.<sup>4</sup>

وقد وجدت دراسات لاحقة خلايا المكان في الحُصين البشري أيضًا.<sup>5</sup> ويُعتقد أن خلايا المكان هذه هي مظهر من مظاهر التمثيل العقلي للحيز الخارجي (أو «خريطة معرفية»). من المُحتمل أن تكون بعض خلاياك العصبية الحصينية نشطة أثناء جلوسك

على الأريكة في غرفة معيشتك. وعندما تنهض وتسير نحو المطبخ، ستنشط مجموعات مختلفة من خلايا المكان في تسلسل في مواقع مُحددة على طول مسارك إلى المطبخ. وقد حصل أوكيف على جائزة نوبل في عام ٢٠١٤ لاكتشافه خلايا المكان التي تُشكل «نظامًا لتحديد المواقع، أو نظام «جي بي إس» داخليًا في الدماغ، يُمكننا من توجيه أنفسنا في الحيز المكاني».<sup>6</sup>

### التسجيل المتوازي باستخدام الصمام الرباعي القطب

ركزت الدراسات المبكرة المتعلقة بخلايا المكان على كيفية تمثيل الحيز الخارجي في الحصين. على الرغم من أن الذاكرة العرضية تتضمن عنصرًا زمنيًا، فإن عددًا قليلًا فقط من الباحثين هم من حاولوا فهم كيفية تخزين الحصين لسلسلة متتابعة من الأحداث.<sup>7</sup> وهكذا، ركزت معظم الدراسات المبكرة على العمليات العصبية الحُصينية لتمثيل الأنماط الثابتة بدلًا من تسلسلات الأحداث. وأدى اكتشاف إعادة تشغيل النشاط العصبي في الحُصين في أوائل العقد الأول من القرن الحادي والعشرين إلى تغيير هذا الاتجاه البحثي بصورة جذرية. فقد اكتشف الفريق البحثي بقيادة مات ويلسون في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا أن النشاط المتسلسل لخلايا المكان الحُصينية أثناء التنقل النشط يتكرّر أثناء نوم الفئران. وشكّل هذا الاكتشاف اتجاهًا جديدًا في الأبحاث التي تدرس ديناميكيات عمل خلايا المكان التي تُمثل المسارات المكانية.

لقد عملنا أنا ومات معًا على مدار أربع سنوات في مختبر بروس ماكنوتون كباحثين في مرحلة ما بعد الدكتوراه في جامعة أريزونا. وقد طور مات تقنية تسجيل جديدة أتاحت فيما بعد اكتشاف عملية إعادة التشغيل في الحصين، ولحُسن الحظ شهدت عملية التطوير بأكملها بحُكم زمالتنا. في ذلك الوقت، كان علماء الفسيولوجيا العصبية يُسجلون عادةً خلية عصبية واحدة أو عددًا قليلًا من الخلايا العصبية على أقصى تقدير في المرة الواحدة. ولذلك كان من الصعب رصد أنماط النشاط المتسلسل للعديد من الخلايا العصبية، وهو أمر ضروري لدراسة ديناميكيات الشبكة العصبية آنيًا. طوّر مات تقنية جديدة، وهي نظام تسجيل متواز باستخدام الصمام الرباعي القطب الكهربائي، وهو ما أتاح إعداد تسجيلات متزامنة لنشاط ما يصل إلى مائة خلية عصبية حُصينية لدى فئران تتحرك بحرية. ويُتيح التقدم السريع في تقنيات البحث الآن تسجيلات من آلاف الخلايا العصبية في وقت واحد. ولكن في تسعينيات القرن العشرين، كان التسجيل

المُتزامن لما يصل إلى مائة خلية عصبية بمنزلة قفزة كبيرة إلى الأمام، فَتَحَت الباب أمام دراسة ديناميكيات الشبكة العصبية آنيًا. وقد واصل مات هذا المسار البحثي واكتشف وجود عمليات إعادة تشغيل في الحُصين في أوائل العقد الأول من القرن الحادي والعشرين.

### إيقاعات ثيتا، والنشاط الكبير غير المنتظم، وتموُّجات الموجات الحادة

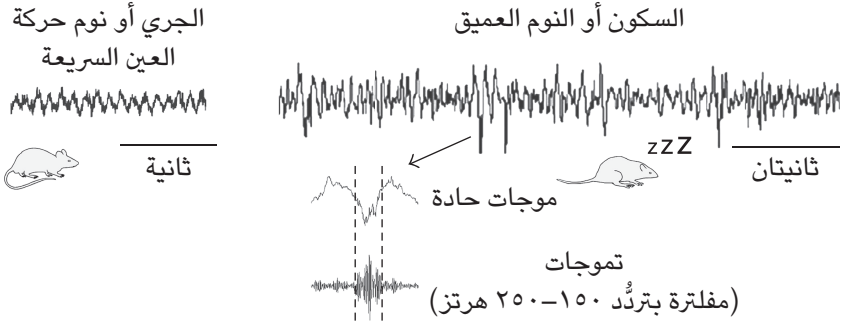
لفهم عمليات إعادة التشغيل في الحُصين على نحو أفضل، دعونا أولاً نفحص وضعين مختلفين لنشاط الحُصين. إذا زرعت قطبًا كهربائيًا مجهريًا وراقبت النشاط الكهربائي لحُصين جُرَد، فستتعرف بسهولة على وضعين مختلفين تمامًا للنشاط اعتمادًا على الحالات السلوكية التي يُظهرها الجرذ. يُظهر الحُصين نشاطًا إيقاعيًا قويًا عند نحو ٦ إلى ١٠ هرتز (إيقاعات ثيتا) عندما يكون الجرذ في حالة نشاط. في المقابل، عندما يكون الجرذ في حالة راحة، يُلاحظ نشاط إيقاعي بطيء وغير مُنتظم (نشاط كبير غير مُنتظم) إلى جانب «موجات حادة» تظهر من حينٍ إلى آخر (انظر الشكل ٣-١).<sup>8</sup>

تُمثل الموجات الحادة تفريغات متزامنة هائلة لكثيرٍ من الخلايا العصبية الحُصينية. تظهر الموجات الحادة جنبًا إلى جنبٍ مع تذبذبات سريعة تُعرف باسم «التموُّجات» (يتراوح تردُّدها من ١٤٠ إلى ٢٠٠ هرتز)؛ ومن ثم، يُشار إليها عادة باسم «تموُّجات الموجة الحادة». والجدير بالذكر أن إيقاعات ثيتا وتموجات الموجات الحادة تُرصد أيضًا في أثناء النوم. ويُعتَقَد أن مرحلة نوم ثيتا لدى الجرذان توازي مرحلة «نوم حركة العين السريعة» (REM) لدى البشر، وهي المرحلة التي تحدث فيها معظم الأحلام، ويكون نشاط الدماغ مُشابهًا لمستويات نشاطه أثناء الاستيقاظ. وقد رصدت تموُّجات الموجة الحادة في النشاط غير المنتظم الكبير أثناء مرحلة نوم الموجة البطيئة في الجرذان، والذي يُعتَقَد أنه يوازي مرحلة النوم العميق عند البشر.

### إعادة التشغيل أثناء نوم حركة العين السريعة

بحث مات أولاً فيما إذا كان التنشيط المُتسلسل لخلايا المكان أثناء التنقل النشط يتكرَّر أثناء نوم ثيتا لدى الفئران. واستند هذا إلى فكرة أن الأحلام، التي تحدث في الغالب أثناء مرحلة نوم حركة العين السريعة لدى البشر — وربما تحدث بالتبعية أثناء نوم ثيتا لدى

## الدماغ المُبتَكِر



شكل ٢-١: وضعان لنشاط الحصين. تُرصد إيقاعات ثيتا (يسارًا) أثناء الحركة النشطة ونوم حركة العين السريعة، بينما يُرصد نشاط كبير غير مُنظم (يمينًا) أثناء حالة السكون ونوم الموجة البطيئة (النوم العميق). تلاحظ تموجات الموجات الحادة عادة خلال فترة النشاط غير المُنتظم الكبير. تمثل تموجات الموجة الحادة تفريغات مُتزامنة هائلة لعدد كبير من الخلايا العصبية الحصينية. المقطع (يسارًا) مقتبس من مقال أنجيل نونيز وواشنطن بونو بعنوان: «إيقاع ثيتا الحصين: من آليات الخلايا والدوائر العصبية إلى السلوك»، دورية «فرونتيرز إن سيلولار نيوروساينس» المجلد ١٥، (٢٠٢١): (649262 (CC BY) و(يمينًا) من مقال وئام رمضان، وأوكسانا إيشينكو، وسوزان جيه سارا بعنوان: «موجة/تموجات الحصين الحادة أثناء النوم لتوطيد الذاكرة الترابطية»، دورية «بلوس وان» المجلد الرابع، العدد الثامن (أغسطس ٢٠٠٩): (e6697 (CC BY).

الجرذان — قد تُمثل عملية نقل الذكريات الحُصينية إلى أماكن أخرى في الدماغ. كما وُضِّح في الفصل الأول، فإن نظرية توطيد الذاكرة على مستوى الأنظمة العصبية تفترض أن أي ذكرى جديدة تُخزَّن بسرعة في الحُصين ثم تمر بعملية توطيد بحيث تُخزَّن في نهاية المطاف في مكان آخر في الدماغ.<sup>9</sup> بموجب هذه النظرية، كان من الطبيعي أن نشك في أن الحلم هو عملية إعادة تنشيط للذكريات المخزنة في الحُصين لتعزيز الذاكرة على مستوى الأنظمة الدماغية. وبالفعل، وجد مات وتلميذه كينواي لوي، بما يتفق مع هذه الفرضية، أن الإطلاق المتسلسل لخلايا المكان (أي إطلاق الإشارات العصبية) أثناء التنقل النشط يتكرَّر أثناء نوم ثيتا. وقد نُشر هذا الاكتشاف الرائد في عام ٢٠٠١.<sup>10</sup> إن سرعة الإطلاق المتسلسل لخلايا المكان أثناء نوم ثيتا تُماثل سرعتها أثناء التنقل النشط (وإن كانت أبطأ قليلًا في الواقع). وهذا يُشير إلى أن تطور الأحداث في الأحلام قد يكون مطابقًا لتطورها في الواقع.

## إعادة التشغيل المقترن بتموجات الموجة الحادة

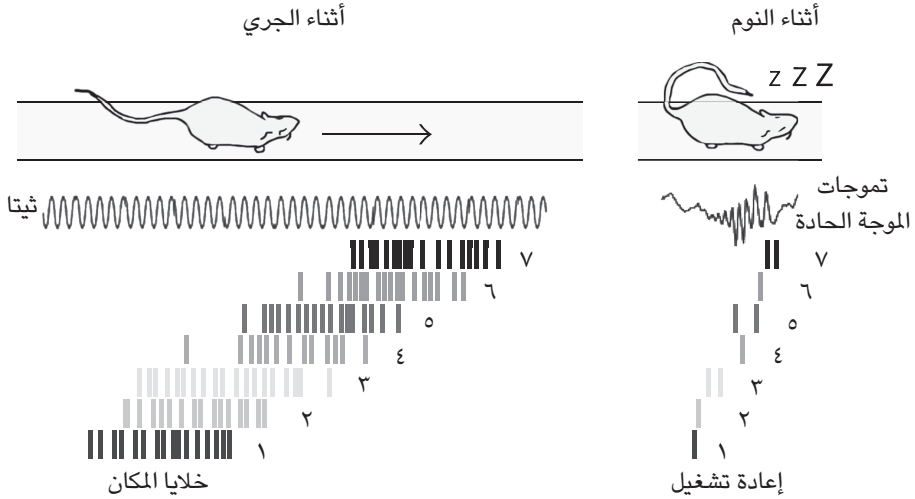
يشكل نوم حركة العين السريعة نحو ٢٥ في المائة من النوم الليلي لدى البشر. أما في الجردان، فيمثل نوم ثيتا أقل من ١٠ في المائة من إجمالي فترة النوم، والباقي معظمه عبارة عن نوم الموجة البطيئة، الذي يُرصد في أثنائه النشاط الكبير غير المنتظم والتموجات الموجية الحادة. إذن، ماذا يحدث أثناء نوم الموجة البطيئة؟ إذا كان الافتراض القائم هو أن توطيد الذاكرة يحدث أثناء نوم ثيتا، فهل لا يحدث أي توطيد أثناء نوم الموجة البطيئة؟ هل يأخذ الدماغ قسطًا من الراحة ببساطة دون معالجة المعلومات؟ ماذا يحدث أثناء تموجات الموجة الحادة عندما ينشط عدد كبير من الخلايا العصبية الحُصينية على نحو متزامن؟

قدمت دراسة متابعة لاحقة أجراها طالب آخر من طلاب مات، وهو ألبرت لي، إجابات واضحة عن هذه الأسئلة.<sup>11</sup> فقد كشف فحص دقيق للنشاط العصبي الحُصيني في أثناء تموجات الموجة الحادة أن الخلايا العصبية الحُصينية ترسل الإشارات على نحو متتابع على مقياس زمني بالملي ثانية وليس بتزامن دقيق. والأهم من ذلك أن تسلسل النبضات (أو جهود الفعل) العصبية الحُصينية أثناء تموجات الموجة الحادة ليس عشوائيًا، وإنما مرتبط بإطلاق متسلسل أثناء التنقل النشط. تميل خلايا المكان إلى الإطلاق أثناء التموجات الموجية الحادة بالتسلسل نفسه الذي اتبعته في إطلاق الإشارات أثناء التنقل النشط قبل النوم (انظر الشكل ٣-٢).<sup>12</sup> وتكون سرعة الإطلاق المتتابع أكبر بنحو خمسين مرة أثناء تموجات الموجة الحادة مقارنة بالتنقل الفعلي أثناء اليقظة، مما يُشير إلى أن تجارب التنقل السابقة يُعاد تشغيلها بطريقة مضغوطة زمنيًا أثناء تموجات الموجة الحادة. وقد مهد هذا الاكتشاف الطريق أمام الأبحاث اللاحقة على ديناميكيات عمل الدائرة العصبية الحُصينية التي تُشكل الأساس للذاكرة والتخطيط والخيال. وتبع ذلك ازدهار للدراسات الخاصة بعمليات إعادة التشغيل المرتبطة بالتموجات الموجية الحادة في حُصين الجردان. والآن، تُشير عمليات إعادة التشغيل في الحُصين عمومًا إلى حدوث إعادة تنشيط مضغوطة زمنيًا لتفريغات الخلايا العصبية الحُصينية المُتسلسلة التي تحدث مقترنة بالتموجات الموجية الحادة.

لقد ذكرت بالفعل أن الموجات الحادة تظهر أثناء مرحلة النوم البطيء وكذلك في أثناء الراحة التامة الواعية (انظر الشكل ٣-١). ماذا يحدث إذن أثناء إطلاق تموجات الموجة الحادة في حالة اليقظة؟ هل تحدث إعادة تشغيل أثناء تموجات الموجات الحادة في اليقظة أيضًا؟ أظهرت دراسات لاحقة أن إعادة التشغيل في الحُصين تحدث بالفعل

## الدماغ المُبتَكِر

ترامناً مع إطلاق التموجات الحادة في أثناء السكون وفي أثناء اليقظة أيضًا.<sup>13</sup> وبناء عليه، وبغض النظر عن الحالة (سواء النوم أو اليقظة)، يبدو أن إعادة التشغيل في الحُصين تحدث عند رصد انطلاق لتموجات الموجة الحادة.



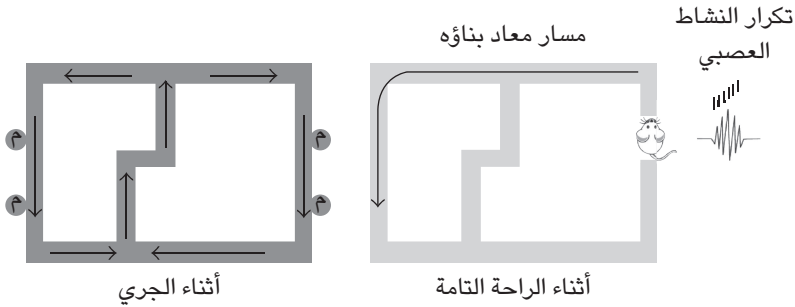
شكل ٣-٢: يُعاد الإطلاق المتسلسل لخلايا المكان الحُصينية أثناء التنقل (يسارًا) بطريقة مضغوطة زمنيًا مقترنًا بتموجات الموجة الحادة أثناء مرحلة نوم الموجة البطيئة (يمينًا). تمثل كل علامة نبضة كهربية. الشكل منقول من مقال سيلين دريو ومايكل زوجارو بعنوان: «التسلسلات الحُصينية أثناء الاستكشاف: الآليات والوظائف»، دورية «فرونترز إن سيلولار نيوروساينس» المجلد ١٣ (٢٠١٩): (CC BY) 232.

يجدُر بنا ملاحظة أن تموجات الموجة الحادة في الحُصين شائعة ومتكررة. فهي تحدث بضع مرات كل دقيقة لدى البشر وبوتيرة أكبر لدى الجرذان في أثناء النوم وأثناء الراحة.<sup>14</sup> بعبارة أخرى، من المرجح أن تكون إعادة تشغيل التجارب الماضية مستمرة أثناء الراحة أو النوم على حدٍ سواء. وبالأخذ في الاعتبار أن النشاط العصبي غالبًا ما يؤدي إلى تغيّرات في ديناميكيات الشبكة العصبية من خلال إحداث تغيّرات طويلة الأمد في فاعلية التشابك العصبي (التي يشار إليها باسم اللدونة التشابكية المُعتمدة على النشاط)، فمن المُحتمل أن يكون لإعادة التشغيل في الحُصين أثناء تموجات الموجة الحادة تأثيرات عميقة

## خلايا المكان وإعادة العرض في الحُصين

على تمثيل الذكريات المكتسبة حديثاً. وهذا يُشير إلى أن توطيد الذاكرة قد يكون مستمرًا ليس فقط في أثناء النوم، وإنما في فترات اليقظة أيضًا. كذلك يُشير حدوث إعادة التشغيل في الحُصين أثناء حالة اليقظة إلى أن عمليات إعادة التشغيل قد تخدم وظائف أخرى خلاف توطيد الذاكرة، مثل تذكُّر مسارات التنقل الماضية (استرجاع ذكرى) والتخطيط لمسارات التنقل المستقبلية (التخطيط للمستقبل).

## إعادة التشغيل والخيال



شكل ٣-٣: تكرار النشاط العصبي لمسارات غير مجربة. (يسارًا) تشير الأسهم إلى اتجاهات حركة الجرذ. تمثل الدوائر (م) المغذيات التي تقدم الطعام. (يمينًا) أعيد بناء مسار حركة الجرذ بناءً على الإطلاق المتسلسل لخلايا المكان أثناء إطلاق تموج موجي حادّ بينما كان الجرذ يجلس في حالة سكون على المتاهة. يُلاحظ أن الجرذ لم يتجول قطُّ عبر المسار المعاد بناؤه لهذا المثال. الشكل من تنفيذ المؤلف.

ركزت الدراسات المبكرة الخاصة بعمليات إعادة التشغيل في الحُصين على إعادة تنشيط تسلسلات نشاط خلايا المكان التي سبق تجربتها. غير أن ثمة دراسة نُشرت في عام ٢٠١٠ أوضحت أن الأمر لا يقتصر على هذا فحسب.<sup>15</sup> فقد درب ديفيد ريديش وزملائه في جامعة مينيسوتا جرذانًا جائعة على الجري في متاهة على شكل رقم 8 (انظر الشكل ٣-٣) للتردد على المسارات اليسرى واليمنى بالتناوب للحصول على حبات الطعام (انظر الأسهم في الشكل لمعرفة مسارات التنقل المكانية للجرذان). ثم أعادوا بناء المسارات المكانية للجرذان وفقًا للتفريغات المتسلسلة لخلايا المكان (إعادة التشغيل) أثناء انطلاق

تموجات الموجة الحادة. فوجدوا أن بعض المسارات المعاد بناؤها تطابقت مع تلك التي سلكتها الجرذان. والأهم من ذلك أنهم وجدوا كذلك أن بعضها يتوافق مع مسارات لم تختبرها الجرذان من قبل. بعبارة أخرى، تُمثل عمليات إعادة التشغيل في الحُصين أثناء تموجات الموجة الحادة مساراتٍ مكانية مُجرَّبة وغير مُجرَّبة (ولكنها مُحتملة).

كانت هذه الدراسة إثباتًا واضحًا أن عمليات إعادة التشغيل في الحُصين هي أكثر من مجرد إعادة تنشيط لتجارب الماضي. ضع هذه النتيجة في الاعتبار إلى جانب ما تناولناه في الفصل الأول بخصوص دور الحُصين في الخيال. تتوافق هذه النتيجة في الجرذان جيدًا مع النتيجة التي تمَّ التوصلُ إليها لدى البشر، من أن الحُصين يلعب دورًا مهمًا في الخيال. لقد توصل مساران بحثيان مُستقلان أحدهما يدرس البشر والآخر يدرس الفئران إلى النتيجة نفسها، ألا وهي أن الحُصين لا يلعب دورًا في الذاكرة فحسب، بل في الخيال أيضًا.

### إعادة التشغيل لدى البشر

تناولنا حتى الآن عمليات تكرار الإطلاق المتسلسل لخلايا المكان التي اكتُشفت في حُصين الجرذان. ولكن هل اكتُشفت هذه العمليات في البشر أيضًا؟ هل يدعم الحُصين عمليات تكرار التسلسلات غير المكانية؟ هل تتزامن عمليات إعادة التشغيل مع تنشيط شبكة الوضع الافتراضي؟ تقدم الدراسات الحديثة على البشر إجاباتٍ إيجابية على هذه الأسئلة. من الصعب قياس النشاط العصبي المتسلسل بمقياس المِلي ثانية (إعادة التشغيل) من مناطق الدماغ العميقة (الحُصين والبنى ذات الصلة) باستخدام أساليب غير باضعة. ومع ذلك، تمكَّن العلماء من اكتشاف البصمات العصبية الخاصة بإعادة التشغيل في الدماغ البشري من خلال التحليل الدقيق لإشارات الدماغ المقيس بأساليب غير باضعة. تشمل بعض الأساليب التي يُشاع استخدامها في هذا الصدد تخطيط كهربية الدماغ (الذي يقيس الإشارات الكهربائية الضعيفة)، والتصوير بالرنين المغناطيسي الوظيفي (الذي يقيس التغيرات البطيئة في تدفق الدم؛ انظر الفصل الأول)، وتخطيط مغناطيسية الدماغ (الذي يقيس الإشارات المغناطيسية الضعيفة الصادرة من الدماغ). ولكل تقنيةٍ منها مزاياها وعيوبها. على سبيل المثال، يتفوق تخطيط مغناطيسية الدماغ على تخطيط كهربية الدماغ في تسجيل النشاط العصبي من بنى الدماغ العميقة (مثل الفص الصدغي الأوسط) وعلى التصوير بالرنين المغناطيسي الوظيفي في الدقة الزمنية.

في دراسات حديثة باستخدام تقنية تخطيط مغناطيسية الدماغ، عُرض على الأشخاص الخاضعين للدراسة سلسلة متعاقبة من الصور البصرية. ومن خلال تحليل

الإشارات المغناطيسية الضعيفة للدماغ بعناية أثناء فترة الراحة، تمكن العلماء من إعادة بناء تسلسلات المثيرات الصحيحة بدقة زمنية بلغت ٥٠ ملي ثانية. والجدير بالذكر أن إعادة التشغيل تلك سُجِّلت بالتزامن مع حدوث تموجات موجية حادة في الفص الصدغي الأوسط.<sup>16</sup> وهذه الإعادات البشرية تحدث في قشرة الدماغ (أي مسجَّلة من القشرة الصدغية الوسطى) وليست إعادات حُصينية. ولكن إذا أخذنا في الاعتبار أنها تزامنت مع انطلاق تموجات الموجات الحادة في الفص الصدغي الأوسط وأن كلاً من إعادة التشغيل في القشرة والحُصين موجودتان لدى الجرذان، فإن هذه النتائج تشير إلى وجود آليات عصبية مشتركة لإعادة التشغيل لدى القوارض والبشر على حد سواء.<sup>17</sup>

في دراسة أخرى أجريت باستخدام التصوير بالرنين المغناطيسي الوظيفي، عُرض على أفراد الدراسة سلسلة صور لمنازل ووجوه أثناء أداء مهمة تنطوي على اتخاذ قرار. وتمكن العلماء من إعادة بناء التسلسلات الصحيحة بدقة زمنية بلغت نحو ١٠٠ ملي ثانية على أساس الإشارات الديناميكية الدموية (التغيرات في تدفق الدم) المقيسة من الحُصين أثناء الراحة الواعية.<sup>18</sup> تُظهِر هذه الدراسات مجتمعة أنه يمكن اكتشاف عمليات إعادة التشغيل في الدماغ البشري باستخدام أساليب غير باضعة. ويجدر بنا أن نشير إلى أن هذه الدراسات على البشر قاست عمليات إعادة تشغيل التسلسلات غير المكانية. ولذا، فإن عمليات إعادة التشغيل في الحُصين لدى البشر لا تقتصر على النطاق المكاني.

ومن الجدير بالملاحظة أن شبكة الوضع الافتراضي تنشط في حالة البشر مقترنة بعمليات إعادة التشغيل في القشرة وتموجات الموجة الحادة في الفص الصدغي الأوسط.<sup>19</sup> وهذا يُشير إلى أن النتيجة المستقلة اللتين توصلت إليهما الدراسات على الحيوانات والبشر، وهما إعادة التشغيل في الحُصين وتنشيط شبكة الوضع الافتراضي، قد تكونان وجهين لعملة واحدة. وهكذا فإن النتائج التي توصلت إليها الدراسات على الحيوانات والبشر حتى الآن تتوافق معاً بصورة جيدة، مما يُشير إلى أن عمليات إعادة التشغيل في الحُصين هي تجسيد للعمليات العصبية الكامنة وراء العمليات العقلية الداخلية، مثل تذكر الماضي وتخيل المستقبل، وتحدث أثناء تنشيط شبكة الوضع الافتراضي.

### تموُّج الموجة الحادة كعملية شاملة

قبل اختتام هذا الفصل، لنستعرض ما يحدث في بقية الدماغ عند ظهور تموُّج مَوْجي حادٍّ في الحُصين. للتحقق من هذه المسألة، سجل نيكوس لوجوثيتيس وزملاؤه في معهد

ماكس بلانك نشاط حُصين القرد باستخدام قطبٍ كهربى مجهري دقيق وراقبوا النشاط العام للدماغ (تدفُّقات الدم الموضوعية) باستخدام تقنية غير باضعة (التصوير بالرنين المغناطيسي الوظيفي) في نفس الوقت.<sup>20</sup> ومن المدهش أن جميع مناطق الدماغ تقريباً أظهرت تغيرات في النشاط العصبي تزامنت مع حدوث تموجٍ موجي حاد في الحُصين. فقد زاد نشاط معظم مناطق القشرة المخية، في حين انخفض نشاط معظم المناطق تحت القشرية تزامناً مع تموجات الموجات الحادة. على سبيل المثال، ينخفض نشاط المهاد، وهو بنية تحت قشرية تنقل المعلومات الحسّية الخارجية إلى القشرة المُخية، مع حدوث تموجات الموجة الحادة. علاوة على ذلك، فرغم زيادة نشاط معظم مناطق القشرة المُخية، فإن القشرة البصرية الأُولية تُقلل من نشاطها مع انطلاق تموجٍ موجي حاد، مما يُشير إلى أن الدماغ ينسحب من معالجة الإشارات الحسّية الخارجية في وقتٍ حدوث تموج الموجة الحادة.

لنضع هذا جنباً إلى جنبٍ مع النتائج التي تم التوصلُ إليها بشأن شبكة الوضع الافتراضي. عادة ما تحدث تموجات الموجة الحادة عندما تكون شبكة الوضع الافتراضي نشطة؛ أي ونحن غير مُنتبهين إلى العالم الخارجي. ففي هذا الوقت، تكون مناطق الدماغ المرتبطة بالمعالجة الحسّية (مثل القشرة البصرية الأُولية والمهاد) مُعطلة، ويحدث تبادل معلومات شامل بين الحُصين والقشرة المُخية. يبدو أن مناطق الدماغ المختلفة تؤدي وظائفها عندما نكون بحاجةٍ إلى الاستجابة للعالم الخارجي، كما يحدث أثناء مطاردة فريسة. ولكن عندما تُتاح لنا الفرصة للاسترخاء ونستطيع تحمُّل عدم الانتباه الشديد إلى العالم الخارجي، يبدو أن أدمغتنا توقف عملية معالجة الإشارات الحسّية الخارجية وتسمح بدلاً من ذلك بتبادل المعلومات الشامل بين مناطق الدماغ المختلفة. يحدث هذا عندما نخرط في العمليات العقلية الداخلية، مثل تذكُّر الماضي، وتخيُّل المستقبل، واتخاذ القرارات الأخلاقية، والتفكير في أفكار الآخرين، والتفكير التبايني.

لقد كان محور التركيز التقليدي لعلم الأعصاب هو كيفية معالجة الدماغ للمعلومات عندما يتجاوب الشخص بنشاطٍ مع العالم الخارجي. غير أن الدراسات التي أُجريت على شبكة الوضع الافتراضي وإعادة التشغيل تُشير إلى أن هذه الأساليب التقليدية لا يمكن أن تُخبرنا إلا بجزءٍ من الطريقة التي يعمل بها الدماغ. فتشير النتائج الحديثة إلى أن فهم مبادئ عمل الدماغ يتطلَّب منا فهم كيفية تزامن نشاط أجزاء مختلفة من الدماغ وكيف تتبادل هذه الأجزاء المعلومات فيما بينها أثناء حالات الراحة، وكيف تؤثر هذه الأحداث

## خلايا المكان وإعادة العرض في الحُصين

على معالجة الإشارات أثناء حالات النشاط اللاحقة. والخبر السار أن الدراسات في هذا الخصوص جارٍ العمل عليها بقوة. وقد تغير النتائج الجديدة، التي ستتوصّل إليها هذه الدراسات، الإطار المفاهيمي التقليدي لدراسة الدماغ.



الجزء الثاني

## السيمفونية العصبية للخيال



## الفصل الرابع

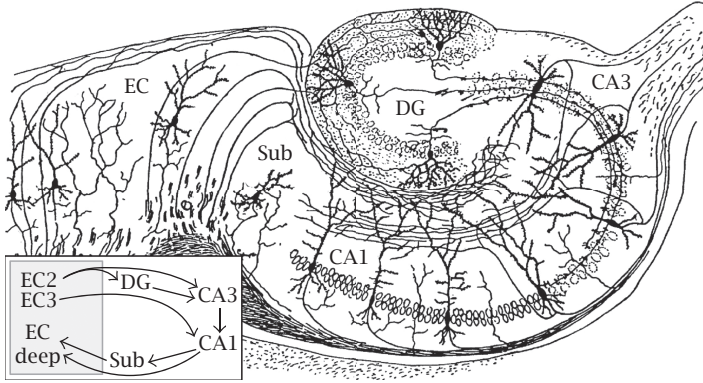
# الدوائر العصبية في الحُصين

في الفصول السابقة، تناولنا الأدوار الوظيفية للحُصين؛ أي «ما» يفعله الحُصين. وفي هذا الفصل، سنستكشف «كيف» يفعل الحُصين ما يفعله. يهتم كثير من علماء الأعصاب بفهم وظائف الدماغ من حيث عمليات الدائرة العصبية، من خلال الآليات العصبية لهذه الوظائف. لنفترض أنك تريد فهم آليات استخدام السيارة للبنزين أثناء القيادة. إحدى الطرق البسيطة لشرح ذلك هي أن قوة احتراق البنزين تسمح بقيادة السيارة. هل ستقنع بهذه الإجابة؟ ربما لا. الإجابة الأكثر إقناعًا هي أن اشتعال البنزين داخل محرك الاحتراق يُجبر المكبس على التحرك إلى أعلى وإلى أسفل، ويُترجم العمود المرفقي الحركة الخطية للمكبس إلى حركة دورانية، وتحرك قوة دوران العمود المرفقي عجلات السيارة. وعلى نحوٍ مُماثل، لا يقنع علماء الأعصاب بمجرد معرفة أن الحُصين يخدم وظائف الذاكرة والتخيل. إنهم يريدون الذهاب إلى ما هو أبعد من ذلك وفهم كيف يخدم الحُصين هذه الوظائف من حيث عمليات الدوائر العصبية التي تقف وراء ذلك.

وبفضل التطورات التكنولوجية السريعة في العقود القليلة الماضية، أصبح علماء الأعصاب الآن مُجهزين بأدوات قوية لدراسة عمليات الدوائر العصبية التي تُشكل الأساس للوظائف الإدراكية العليا بصورة مباشرة، مثل اتخاذ القرار والتخيل. ونظرًا للتقدم المُتسارع للتكنولوجيا، فإن العلماء متفائلون تفاؤلاً حذرًا بشأن مُستقبل هذا المسعى؛ ألا وهو تفسير الوظائف الإدراكية العليا من ناحية العمليات الأساسية للدوائر العصبية (المعروفة باسم علم الأعصاب المعرفي الآلي).

في هذا الفصل، سنفحص تشريح الحُصين إلى جانب نظرية كلاسيكية تتعلّق بكيفية عمل الشبكة العصبية الحُصينية، لبناء أساسٍ لاستكشاف العمليات الأساسية للدوائر العصبية التي تُشكل الأساس لوظائف الذاكرة والخيال في الحُصين.

## الدائرة الثلاثية المشبك



شكل ٤-١: رسم يدوي لسانتياجو رامون كاخال للمقطع العرضي للحُصين. ترمز DG إلى التلفيف المُسنن، وSub إلى مِرْفَد الحُصين، وEC تعني القشرة الشَّميَّة الداخلية، وهي البوابة الرئيسيَّة للحُصين. توضح الصورة الصغيرة داخل الرسم مُخطَّطًا للوصلات العصبية. تُشير كل من EC2 و EC3 و EC إلى الطبقة ٢ والطبقة ٣ والطبقات العميقة من القشرة الشَّميَّة الداخلية على التوالي. المقطع منقول من File:CajalHippocampus (modified).png، ويكيبيديا كومنز، تم التحديث في ١٩ أبريل ٢٠٠٨. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CajalHippocampus\\_\(modified\).png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CajalHippocampus_(modified).png) (CC BY)

الحُصين عبارة عن بنية على شكل قطعة سجق تقع في عمق الفص الصدغي الأوسط. يوضح الشكل (٤-١) رسمًا يدويًا للمقطع العرضي للحُصين رسمه سانتياجو رامون كاخال، وهو عالم إسباني مُتخصِّص في التشريح العصبي وحائز على جائزة نوبل (١٩٠٩). التلفيف المُسنن، وCA3، وCA1 هي المناطق الفرعية الرئيسيَّة الثلاث في الحُصين. وتُعرف الدائرة التي تحوي هذه البنى (التلفيف المُسنن، وCA3، وCA1) باسم «الدائرة الثلاثية المشبك الحُصينية». ترمز CA إلى قرن آمون، الذي سُمِّي على اسم الإله المصري آمون، الذي له رأس كبش. تمد الخلايا العصبية في التلفيف المُسنن تفرعات عصبية إلى شبكة CA3 العصبية (قرن آمون ٣)، وتمد الخلايا العصبية في CA3 بدورها تفرعات عصبية إلى CA1 (قرن آمون ١).

اعتُبرت هذه الدائرة (التلفيف المُسنن < CA3 < CA1) لوقتٍ طويل المسار العصبي الأبرز في الحُصين؛ ولذا كانت الهدف الأساسي لأبحاث تشفير الذاكرة الحُصينية

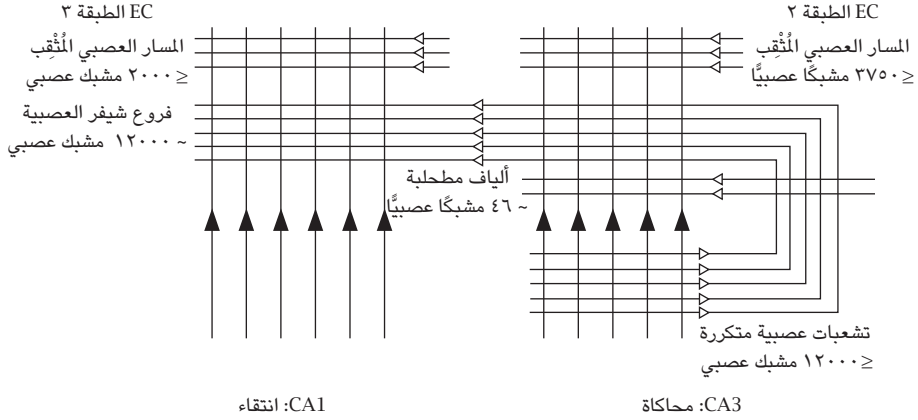
واسترجاعها. ولكن تجدر الإشارة إلى وجود مسارات اتصالٍ بديلة في الحُصين (انظر الصورة الصغيرة داخل الشكل ٣-٣). علاوة على ذلك، تُشير الدراسات الحديثة إلى CA2، وهي بنية صغيرة نسبيًا، لها وظائفها الخاصة، مثل ذاكرة التعرف الاجتماعي (تذكر الأحداث المتعلقة بأفرادٍ من نفس النوع).<sup>1</sup> غير أنه نظرًا لوجود عدد قليل نسبيًا من الدراسات حول CA2، وعدم وضوح مساهمة CA2 في وظائف الحُصين إجمالاً، فلن نتناول CA2 بالدراسة هنا. وبغرض التبسيط أيضًا، سنركز فقط على شبكتي CA3 وCA1. ولن نتطرق إلى التلفيف المُسنن؛ إذ يبدو أنهما البنيتان الأساسيتان المرتبطتان مباشرة بالخيال، وهو الموضوع الرئيس لهذا الكتاب. يمكن العثور على مناقشاتٍ موجزة حول دور التلفيف المُسنن في الفصل السادس والملحق الأول.

### شبكة CA3 العصبية

كانت شبكة CA3 لمدة طويلة محورَ الجدل النظري حول عمليات الدائرة العصبية التي تُشكل الأساس لذاكرة الحُصين. ويُعتقد أيضًا أنها البنية المركزية لوظيفة الخيال في الحُصين. لماذا؟ لأن الخلايا العصبية في شبكة CA3 قادر بعضها على تحفيز بعض. كيف؟ لا تمد الخلايا العصبية في CA3 تفرعاتها العصبية إلى مناطق أخرى، مثل CA1، فحسب، بل تمد هذه التفرعات إلى نفسها مرةً أخرى أيضًا عبر «تشعبات ثانوية عصبية متكررة» ضخمة، وهي فروع للمحور العصبي تتشعب بالقرب من جسم الخلية (انظر الشكل ٤-٢). تسمح هذه التفرعات العصبية المتكررة، التي تُوجد عادةً في القشرة المخية، بالتفاعلات الداخلية داخل مجموعةٍ من الخلايا العصبية. وتُتيح مثل هذه التفاعلات للشبكة العصبية الحفاظ على المعلومات ومعالجتها من خلال آليات داخلية في غياب المدخلات الخارجية، وهي عملية يُعتقد أنها ضرورية لدعم الوظائف الإدراكية العليا في القشرة المخية. وإلا فإن الشبكة العصبية ستصرف مثل آلة لا إرادية لا تفعل شيئاً سوى الاستجابة لوجود مدخلات خارجية، وبخلاف ذلك تكون خاملة.

من السمات المميزة لشبكة CA3 وجود عددٍ كبير بصورة غير عادية من التفرعات العصبية المتكررة التي تربط بين خلاياها العصبية. ففي المتوسط، تتلقى خلية عصبية واحدة من خلايا CA3 نحو اثني عشر ألف مدخلٍ من خلايا CA3 العصبية الأخرى في حُصين الجرد. وهذا يعادل ثلاثة أرباع إجمالي المدخلات الاستثنائية التي تتلقاها الخلية الواحدة في شبكة CA3 (انظر الشكل ٤-٢)!<sup>2</sup> والواقع أن هذا العدد الهائل من التفرعات

## الدماغ المُبتكر



شكل ٤-٢: مخطط للدوائر العصبية CA3 و CA1. تُمثل المثلثات السوداء الخلايا العصبية الاستثنائية وتُمثل المثلثات البيضاء اتجاهات الإرسال للمحاور العصبية. ترمز EC إلى القشرة الشمية الداخلية. الشكل مستنسخ من مقال مين جونج وآخرين بعنوان: «تذكر المستقبل المُجدي: نموذج محاكاة وانتقاء للحُصين»، مجلة «هيبوكامبس» المجلد ٢٨، العدد ١٢ (ديسمبر ٢٠١٨): (CC BY) 915.

المتكررة في شبكة CA3 مٌذهل حقًا. ما الذي يتبادر إلى ذهنك عندما ترى مثل هذه الروابط المتبادلة الضخمة؟ مثلما تكون قد خَمَّنت، تميل شبكة CA3 العصبية بقوة إلى الاستثارة الذاتية. فمن الآثار الجانبية لمثل هذه البنية الشبكية العصبية الميل إلى الاستثارة المُفرطة؛ أي نوبات الصرع، التي تحدُث عندما لا يجري التحكُّم في نشاط الشبكة على نحوٍ صحيح. فالصرع هو اضطراب عصبي يتَّسم بنوباتٍ متكررة. ونظرًا للروابط العصبية المتبادلة الضخمة بين خلايا CA3 العصبية، فليس من المُستغرب أن يكون صرع الفص الصدغي هو الشكل الأكثر شيوعًا للصرع البُوري. وقد عانى هنري موليسون (انظر الفصل الأول) من شكلٍ حادٍّ من صرع الفص الصدغي؛ لدرجة أنه خضع لعملية جراحية لشقِّ الفص الصدغي الأوسط.

## الذاكرة المعنونة بالمحتوى

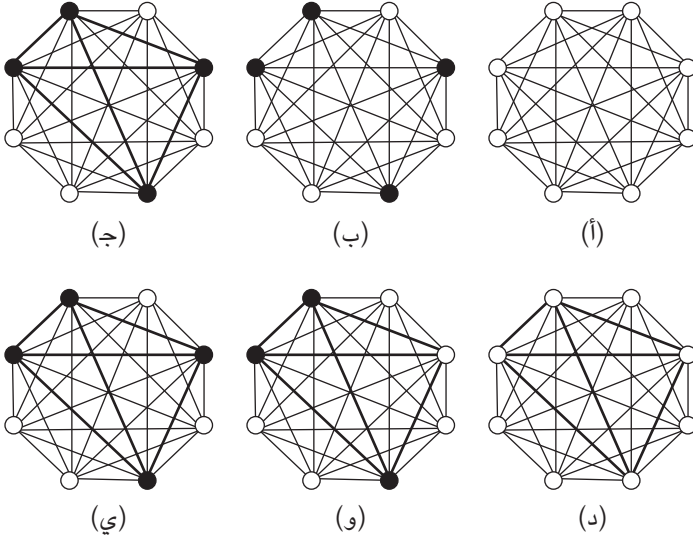
النوبات الصرعية هي نتيجة لعملياتٍ غير طبيعية في الدائرة العصبية. فما الوظيفة الفسيولوجية لشبكة CA3 العصبية؟ إن النظرية الأكثر تأثيرًا في هذه المسألة في الوقت

الحالي هي تلك التي طرحها ديفيد مار في عام ١٩٧١<sup>٣</sup>. وفقاً لهذه النظرية، تخزن شبكة CA3 العصبية الذكريات عن طريق تغيير قوة الروابط المشبكية بين خلايا CA3 العصبية (أي عن طريق تغيير الفاعلية المشبكية لتفرعات شبكة CA3 المتكررة). وبشكل أكثر تحديداً، تُعزّز الروابط المشبكية بين خلايا CA3 العصبية التي تُمثل تجربةً بعينها، ممّا يُشكل «تجمّعاً خلويّاً» وظيفياً لخلايا CA3 العصبية التي تُمثل تلك التجربة<sup>٤</sup>. إذا نُشِطَ جزء من التجمّع الخلوي الوظيفي لاحقاً، تُنشِط بقية خلايا CA3 العصبية في التجمّع الخلوي الوظيفي أيضاً (لأن روابطها معززة)؛ ومن ثم تستعيد نمط النشاط العصبي الأصلي للتجربة (استرجاع الذكرى). ويوضح شكل (٤-٣) هذه العملية بيانياً.

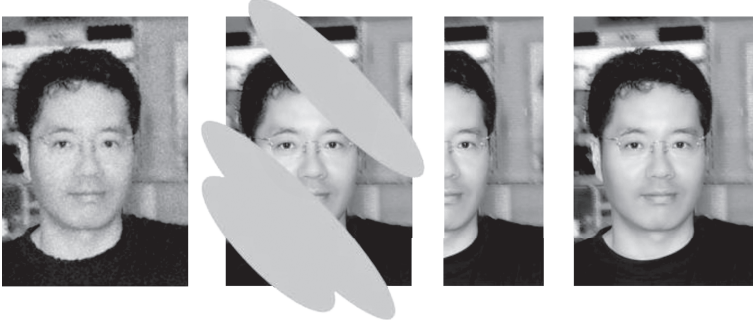
يعتقد العلماء عموماً أن أي شبكة عصبية تُخزّن المعلومات وتسترجعها بهذه الطريقة، وهي تختلف عن الطريقة التي تخزن بها أجهزة الكمبيوتر الرقمية المعلومات وتسترجعها. يُخزن الكمبيوتر الرقمي المعلومات (الذكرى) في عنوانٍ مُعين (على سبيل المثال، موقع مادي بعينه على القرص الصلب) ويسترجع المعلومات المخزنة عن طريق استخراج المعلومات من هذا العنوان. على النقيض من ذلك، تخزن الشبكة العصبية المعلومات بطريقة موزعة عن طريق تغيير قوى الربط بين الخلايا العصبية النشطة، كما هو موضح في الشكل (٤-٣). وتُسترجع المعلومات المخزنة عن طريق استعادة نمط النشاط الأصلي من خلال تنشيط جزئي، وهي العملية التي تُعرف باسم «استكمال النمط». بعبارة أخرى، يُعد التنشيط الجزئي للذكرى المخزنة ضرورياً لاسترجاع نمط النشاط العصبي الأصلي. ويُطلق على هذا النوع من الذاكرة أحياناً «الذاكرة المعنونة بالمحتوى» بمعنى أن محتوى ذاكرة معينة يُستخدم لاسترجاعها، مثل عنوان ذاكرة الكمبيوتر الرقمي.

تتبادر إلى أذهاننا ذكرى ما عندما نواجه مدخلات حسية ذات صلة بها أو أثناء التفكير في أشياء مرتبطة بهذه الذكرى. ونستعيد الذكرى بناءً على النشاط العصبي المرتبط بالذكرى المخزنة لا عن طريق استكشاف مكان معين في الدماغ (عنوان) حيث تكون الذكرى مخزنة فيه. ويوضح الشكل (٤-٤) هذه النقطة. افترض أنك شُفرت معلومات بصرية تتعلق بوجه شخص ما كذكرى. عندها يمكنك تذكّر الوجه بسهولة عندما تقدّم لك معلومات بصرية جزئية أو حتى متردية عن هذا الوجه.

## الدماغ المُبتَكِر



شكل ٤-٣: تخزين واسترجاع الذكريات في شبكة عصبية. توضح الرسوم التخطيطية كيفية تخزين الذكرى واسترجاعها من شبكة عصبية مترابطة. تمثل الدوائر غير المُظلمة والمظلمة الخلايا العصبية النشطة وغير النشطة على التوالي. وتُمثل الخطوط روابط ثنائية الاتجاه بين خليتين عصبيتين حيث يُشير سُمك الخط إلى قوة الترابط بينهما. ترتبط جميع الخلايا العصبية الثماني في كل شبكة عصبية بتفرعات عصبية متكررة. لنفترض أن الشبكة تمرُّ بحدث، سنرمز إليه بـ (س). يوضح الشكل (أ) حالة الشبكة قبل المرور بالحدث (س)، ويوضح الشكل (ب) ما يحدث أثناءه. سنفترض هنا أن التنشيط المتزامن للخلايا العصبية الأربعة (الدوائر المُظلمة) يتوافق مع إدراك الحدث (س). يوضح الشكل (ج) أن الروابط بين الخلايا العصبية ذات النشاط المتزامن تُعزَّز لتشكيل تجمع خلوي وظيفي. يحدث الشكل (د) في وقت ما بعد وقوع الحدث (س). على الرغم من أن جميع الخلايا العصبية غير نشطة، فإن قوى الربط المُعززة بين الخلايا العصبية الأربعة في التجمع الخلوي الوظيفي تظل قائمة، وهو أثر طويل الأمد للذكرى. الشكل (و) يوضح حالة الشبكة استجابةً لمُثير ذي صلة بالحدث (س). إذا لم تتعرض الشبكة للحدث (س)، ولم تحدث أي تغييرات في قوة الربط بين الخلايا، فسيُدرَك المثير بوصفه تجربة جديدة. غير أن نشاط ثلاث خلايا عصبية سيحفز نشاط الخلية العصبية المُتبقية في الشكل (ي)؛ نظرًا لأن الروابط المشبكية بين الخلايا العصبية الأربعة للتجمع الخلوي الوظيفي قد جرى تعزيزها. وبهذه الطريقة، يكتُمِل النمط الأصلي، وتُسْتَرَد الذكرى الأصلية.



شكل ٤-٤: استرجاع الذاكرة عن طريق استكمال النمط. يُمكننا استدعاء ذكرى ما عن طريق استكمال نمطٍ عصبي أصلي من مُدخَل غير مكتمل أو مُتَرَدِّد.

### الذاكرة التسلسلية

تبنى علماء لاحقون نظرية عالم الأعصاب ديفيد مار وطورهاها. كانت الفكرة الأساسية، ألا وهي أن شبكة CA3 العصبية تخزن الذكرى من خلال تعزيز قوى الربط بين خلايا CA3 العصبية التي تنشط معًا، فكرة مؤثرة للغاية على مدى السنوات الخمسين الماضية. غير أن نظرية مار تتعامل مع تخزين الأنماط الثابتة، وليس التسلسلات. عندما تناولنا عمليات إعادة التشغيل في الحُصين في الفصل الثالث، رأينا أن الحُصين لا يخزن لقطات من تجاربنا فحسب، بل يخزن أيضًا تسلسلات الأحداث التي تتكشف بمرور الوقت. بالإضافة إلى ذلك، نحن نعلم الآن أن الحُصين لا يلعب دورًا في الذاكرة فحسب، وإنما في الخيال أيضًا. أما نظرية مار، فهي محدودة في تفسير هذه الجوانب من وظائف الحُصين. أثار اكتشاف عمليات إعادة التشغيل في الحُصين اهتمامًا بالعمليات العصبية التي تكمن وراء تخزين واسترجاع تسلسلات الأحداث التي مر بها الإنسان (الذاكرة العرضية) وتوليد تسلسلات الأحداث التي لم تُعش (الخيال). مرة أخرى، تحتل شبكة CA3 العصبية مركز الصدارة في هذا المسار البحثي. فنظرًا لارتباط خلايا CA3 العصبية من خلال التفرعات العصبية المتكررة الضخمة، فإن التنشيط الجزئي لخلايا CA3 العصبية قد يُنشِط خلايا أخرى من خلايا CA3 العصبية تنشيطًا متسلسلاً. كذلك أظهرت الدراسات الفسيولوجية أن تموجات الموجة الحادة، التي ترصد خلالها معظم عمليات إعادة التشغيل في الحُصين، تبدأ في خلايا CA3 العصبية.<sup>5</sup> لذا توجد أسباب وجيهة للاعتقاد بأن شبكة

CA3 تلعب دورًا حاسمًا في تخزين واسترجاع تسلسلات الأحداث المُختبرة وفي تخيل تسلسلات الأحداث غير المُختبرة.

## شبكة CA1

تتلقى شبكة CA1، وهي المرحلة الأخيرة من الدائرة الثلاثية المشبك، تتلقى مدخلات هائلة من شبكة CA3، وترسل مخرجات إلى مناطق الحُصين المحيطة. ومن هذا المنطلق، قد نعتبر CA1 بنية استقبال للمخرجات للحُصين. فما وظيفة شبكة CA1 إذن؟ لقد طرحت نظريات كثيرة متعلقة بدورها، إلا أن الأدلة التجريبية عليها ضعيفة، ولم تلقَ أي نظرية قَبولًا واسعًا مثل نظرية مار عن شبكة CA3 العصبية. من الناحية التشريحية، تختلف شبكة CA1 عن شبكة CA3 في افتقارها إلى وجود تفرعات عصبية متكررة قوية؛<sup>6</sup> إذ توجَّهت غالبية محاور خلايا CA1 العصبية إلى خارج نطاق الحُصين. وهكذا، وعلى عكس خلايا CA3 العصبية، من المرجح أن تعالج خلايا CA العصبية المعلومات مع وجود القليل من التفاعل الاستثنائي المباشر بينها. وهذا يشير إلى أن آليات الشبكة العصبية والأدوار الوظيفية لشبكة CA1 من المرجح أن تختلف اختلافًا شاسعًا عن نظيرتها في شبكة CA3. يمكنك بناء على ذلك أن تخمن أن الخصائص العصبية الفسيولوجية، مثل إطلاق الإشارات المتعلقة بمكان محدد، قد تختلف اختلافًا كبيرًا بين CA1 و CA3. ولكن على النقيض من هذا التوقع، فشل العلماء في العثور على اختلافات فسيولوجية عصبية جوهرية بين الخلايا العصبية في شبكتي CA1 و CA3. فهناك خلايا مكان في كل من CA1 و CA3 بخصائص متشابهة إلى حد كبير. وهذا يشير إلى أن طبيعة المعلومات المعالجة، وخاصة المعلومات المكانية، تتشابه بين CA1 و CA3. فلماذا إذن تُعالج بُنيتان مختلفتان تشريحيًا معلومات متشابهة؟ ولماذا تعد شبكة CA1 ضرورية إذا كانت تعالج معلومات متشابهة؟ سنبحث هذه المسألة بالتفصيل في الفصل التالي. أما الآن، فإجابتي المختصرة على هذا السؤال هي أن شبكة CA1 ربما تختار وتعزز التسلسلات العالية القيمة التي تولدها شبكة CA3 العصبية.

قبل اختتام هذا الفصل، أود أن أعرب عن احترامي وتقديري لديفيد مار (1945-1980). لقد قدم مار إسهامات هائلة في مجال علم الأعصاب. فهو من طرح أول نموذج واقعي للشبكة العصبية للحُصين في الوقت الذي كانت فيه معرفتنا بالشبكات العصبية للحُصين محدودة. وما يثير الدهشة أكثر أن أبحاثه عن الحُصين لا تمثل إلا

جزءًا ضئيلًا من إسهاماته في علم الأعصاب. كما طرح أيضًا نظريات مؤثرة تتعلق بالقشرة المخية الحديثة والمخيخ، وهو معروف بأبحاثه على الرؤية. وفي العموم، يُعتبر مار رائدًا ومؤسسًا لعلم الأعصاب الحوسبي الحديث. أعتقد أن الباحثين الذين يدرسون الحُصين يمكنهم إظهار احترامهم له على أفضل نحو من خلال تطوير نظريته القديمة عن الحُصين. ولعل جميع العلماء، ومن بينهم مار نفسه، سيسعدون برؤية أعمال الجيل الذي يليهم تحلُّ محلَّ نظرياتهم. فهكذا يتقدم العلم.



## الفصل الخامس

# اتخاذ القرار على أساس القيمة

في هذا الفصل، سوف ندرس معالجة القيمة في الحُصين باعتبارها قطعة الأخيرة من الأحجية قبل بناء نموذج لعمليات الدوائر العصبية في الحُصين التي تُشكل الأساس للذاكرة والخيال. كيف إذن ترتبط معالجة القيمة بأدوار الحُصين في الذاكرة والخيال؟ سوف يتَّضح هذا في الفصل السادس عندما نتناول نموذج المحاكاة والاختيار للحُصين. وكإجابة موجزة مسبقاً، يقترح النموذج أن شبكة CA3 تولِّد تسلسلات نشاط متنوعة عن طريق الاستثارة الذاتية لكل من الأحداث المعيشة وغير المعيشة، وأن خلايا CA1 العصبية تنتقي تسلسلات نشاط عالية القيمة فيما بينها حتى تتمكن من اتخاذ خيارات أفضل في المستقبل. في إطار هذا النموذج، يُعتبر الحُصين بمنزلة أداة تُستخدم للتخطيط للأحداث المستقبلية لا مجرد تذكُّر ما حدث في الماضي. ويستند هذا النموذج إلى اكتشاف أن منطقة CA1 في الحُصين تُعالج إشارات القيمة وتمثلها. سنتناول هذه المسألة بالتفصيل في هذا الفصل، وبهذا، نقدم نظرةً عامةً موجزةً على التعلُّم المُعزَّز وعلم الأعصاب الخاص باتخاذ القرار.

## القيمة والمنفعة ودالة القيمة

لقد تحقق تقدُّم كبير على مدى السنوات العشرين الماضية في فهم الأساس العصبي لعملية اتخاذ القرارات القائمة على القيمة. والافتراض الرئيس في دراسة هذا الموضوع هو أن البشر والحيوانات يتَّخذون القرارات من خلال تمثيل القيم للاختيارات المُحتملة. وفي مجال علم الأعصاب الخاص باتخاذ القرار، تُشير «القيمة» إلى عائد متوقَّع على المدى البعيد. يوجد مفهوم وثيق الصُّلة في الاقتصاد وهو مفهوم «المنفعة»، الذي يُشير إلى الفائدة أو المتعة التي يمكن للمرء أن يحصل عليها من استهلاك مُنتج أو خدمة. لنفترض أنك

بحاجةٍ إلى هاتفٍ ذكي، وتُفكر في طرازين مُحدَّدين بأسعارٍ متشابهة: هاتف آي فون من إنتاج شركة آبل وهاتف سامسونج جالاكسي. سيختلف مقدار الرضا الذاتي الذي يمكن للمرء الحصول عليه من كلِّ هاتفٍ ذكي من شخصٍ لآخر. فقد يكون هاتف آي فون أكثر منفعةً بالنسبة لك من هاتف جالاكسي أو قد يكون العكس. الأرجح أنك ستشتري الهاتف ذا المنفعة الأكبر. فالاقتصاد السائد الحالي، أو الاقتصاد التقليدي المُحدث، يستند إلى افتراضٍ مفاده أن الناس (الإنسان الاقتصادي) يتَّخذون خياراتٍ لتعظيم منفعتهم. يُشار إلى فكرة القيمة في علم الأعصاب الخاص باتخاذ القرار باسم دالة القيمة في التعلُّم المُعزَّز، وهو فرع من فروع الذكاء الاصطناعي. لماذا يُعرف هذا الفرع من الذكاء الاصطناعي بـ «التعلُّم المُعزَّز»؟ يحاول علم الاقتصاد شرح القضايا والمشاكل الاقتصادية والتنبؤ بها من خلال افتراض أن المُستهلكين والشركات يحاولون تعظيم منفعتهم بناءً على معلوماتٍ كاملة وذات صلة بقراراتهم. في المقابل، يركز التعلُّم المُعزَّز على كيف يجد صانع القرار دوالاً قيمةً دقيقةً واستراتيجيةً اختيارٍ مثاليةً عند التفاعل مع بيئةٍ غير مستقرة ومتغيرة. بعبارةٍ أخرى، يهتم التعلُّم المُعزَّز بعملية «تعلُّم» تقريب دوال القيمة الحقيقية وإيجاد استراتيجية اختيارٍ مثالية لتعظيم العائدات الطويلة الأجل. وقد أُرسى التعلُّم المُعزَّز الأساس لعلم الأعصاب الحديث المعني باتخاذ القرار من خلال توفير الإطار النظري الأساسي لبحث عملية اتخاذ القرار من منظور علم الأعصاب.

## خطأ توقع المكافأة

كيف يعالج الدماغ القيمة ويمثلها؟ لم يُصبح هذا الموضوع شائعاً بين علماء الأعصاب حتى العقد الأول من القرن الحادي والعشرين. أما قبل ذلك، فكان علماء الأعصاب عادةً ما يتعاملون مع الدماغ كجهاز حاسوبي، بالتركيز على العمليات الحاسوبية الكامنة وراء المعالجة الحسّية والتحكم في السلوك. كان عدد قليل من علماء الأعصاب مُهتمين بالعملية العصبية التي تقف وراء اتخاذ القرار بناءً على القيم الذاتية التي تختلف وفقاً للذوق الشخصي، مثل الاختيار بين الكابتشينو واللاتيه. بعبارةٍ أخرى، اعتاد علماء الأعصاب الاهتمام بـ «كيفية» معالجة الدماغ للمعلومات الحسّية والتحكم في السلوك بدلاً من الاهتمام بـ «أسباب» اختيار الدماغ سلوكاً بعينه على سلوكياتٍ أخرى. وقد أدّى بحثٌ نظري حول خلايا الدوبامين العصبية، نُشر في عام ١٩٩٧، إلى تغييرٍ جذري في هذا الاتجاه.<sup>1</sup>

للحصول على فهمٍ أوضح لتأثير هذا البحث، يتعيّن علينا فهم ماهية نظرية «خطأ توقُّع المكافأة». كما ذكرنا سابقاً، يتعامل التعلُّم المُعزَّز مع عملية إيجاد دوال قيمة دقيقة أثناء التفاعل مع بيئةٍ غير مُستقرة ومتغيرة. كيف؟ الوسيلة الأبسط لذلك هي من خلال التجربة والخطأ؛ إذ تقوم بتحديث دوال قيمك الحالية (المكافآت المتوقعة) وفقاً لنتائج اختياراتك (المكافآت الفعلية). ومع تكرار هذه العملية عدة مرات، ستتقارب دوال قيمك الذاتية مع دوال القيمة الحقيقية.

لنفترض أن هناك خمسة مطاعم لتختار من بينها لتناول الغداء. ستكون دوال قيمك لهذه المطاعم (الرضا الذاتي الذي تستطيع الحصول عليه من كلِّ مطعم) مُتشابهة في البداية، لكنها ستختلف عما قريب عندما تزور كل مطعمٍ عدة مراتٍ على مدار فترة زمنية. ستزيد دالة قيمك الخاصة بمطعمٍ مُعين إذا كانت الوجبة التي يقدمها أفضل مما توقعت، وعلى العكس من ذلك، ستخفض دالة قيمك إذا كانت الوجبة أسوأ. بهذه الطريقة، ومع تكرار زيارتك لهذه المطاعم، ستُصبح دوال قيمك الخاصة بها أقرب إلى دوال القيمة الحقيقية. غير أن العالم ليس ثابتاً. ففي مثالنا، قد يُعدُّ مطعمٍ مُعين قائمةً طعامٍ جديدة أو يوظف طاهياً جديداً، مما سيجعل دالة القيمة الحالية لديك تنحرف عن دالة القيمة الحقيقية للمطعم. ومع ذلك، إذا قمتَ بتحديث دالة قيمك في كل مرةٍ تزور فيها المطعم، فستواكب دالة قيمك في النهاية التغييرات وتقترب من دالة القيمة الحقيقية الجديدة.

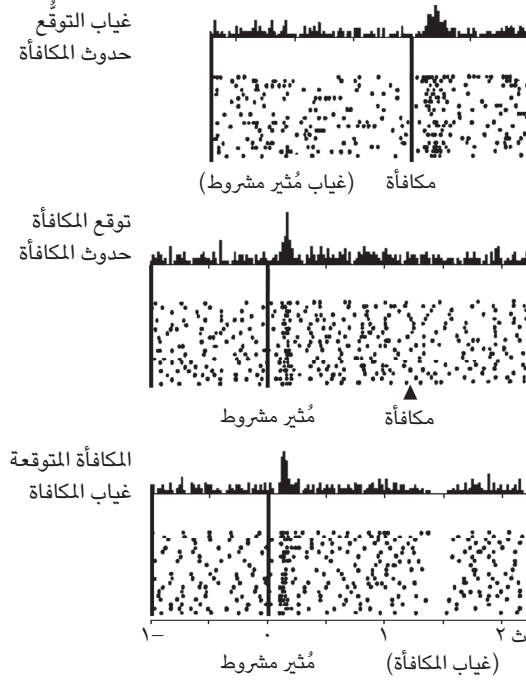
كما ترى من هذا المثال، فإن أحد العناصر الأساسية للتعلُّم المُعزَّز هو الفرق بين المكافآت الفعلية والمتوقَّعة (خطأ توقُّع المكافأة). فستزيد دالة القيمة لاختيار مُعين إذا كانت النتيجة أفضل من دالة القيمة الحالية (عندما تكون المكافأة الفعلية أفضل من المكافأة المُتوقعة، فهذا خطأ موجب في توقع المكافأة). وعلى العكس من ذلك، ستقل دالة قيمك لهذا الاختيار إذا كانت النتيجة أسوأ من دالة قيمك الحالية (عندما تكون المكافأة الفعلية أسوأ من المكافأة المُتوقعة، فهذا خطأ سالب في توقُّع المكافأة). وبطبيعة الحال، لا تعدُّل دالة القيمة إذا كانت المكافآت الفعلية والمتوقَّعة متساوية. وهكذا يمكن للتعلُّم المُعزَّز تقريب دوال القيمة الحقيقية في بيئةٍ غير مستقرة ومتغيرة.

في ورقتهم البحثية التي صدرت عام ١٩٩٧، بيّن وولفرام شولتز وبيتر دايان وريد مونتاجيو أن الخلايا العصبية الدوبامينية في الدماغ الأوسط تُقدم معلوماتٍ عن خطأ توقع المكافأة.<sup>2</sup> تلعب هذه الخلايا العصبية، التي تمتد إلى مناطق واسعة النطاق

من الدماغ، أدوارًا مهمة في الحركات الإرادية ومعالجة نظام المكافأة. يرتبط الخلل في الجهاز العصبي الدوباميني باضطرابات عصبية وعقلية مُتنوعة، مثل الفصام، ومرض باركنسون، والإدمان. وكما يمكن أن نتوقع من واقع أدوارها في معالجة نظام المكافأة والإدمان، فإن بعض الخلايا العصبية الدوبامينية في الدماغ الأوسط ترفع مستوى نشاطها استجابةً لتوصيل المكافأة والمُثيرات التي تنتبأ بالمكافأة.<sup>3</sup> وقد وسَّع الباحثون نطاق هذا الاكتشاف من خلال إظهار أن بعض الخلايا العصبية الدوبامينية في الدماغ الأوسط لا تستجيب سوى للمكافآت «غير المتوقعة». ويرتبط نشاطها بالفرق بين المكافآت الفعلية والمتوقعة، وليس بالمكافأة في حدِّ ذاتها.

يوضح الشكل (٥-١) نشاط إطلاق جهد الفعل لعَيَّنة من خلية عصبية دوبامينية تم تسجيلها من قرد. في المرحلة الأولية، قُدِّمت مكافأة (عصير) إلى القرد على نحو متقطع بحيث لا يمكن التنبؤ بوقت تقديم المكافأة. وفقًا للتقارير السابقة، رفعت هذه الخلية العصبية من نشاط إطلاق جهد الفعل الخاص بها استجابةً لتوصيل المكافأة (الصف العلوي). في المرحلة التالية، كان تقديم المكافأة يسبقه دائمًا إشارة صوتية قبل تقديمها بثانية واحدة بحيث يمكن توقع وقت توصيل المكافأة جيدًا. في هذه المرحلة، وعلى نحو مُثير للدهشة، توقفت الخلية العصبية الدوبامينية عن رفع مستوى نشاطها استجابةً لتقديم العصير (الصف الأوسط). بعبارة أخرى، لم تستجِب هذه الخلية الدوبامينية العصبية لمكافأة مُتوقعة. علاوة على ذلك، عند إلغاء تقديم العصير بعد الإشارة الصوتية (أي حذف المكافأة المتوقعة)، قللت خلية الدوبامين العصبية من معدل إطلاقها (الصف السفلي). يمكنك أن ترى بسهولة أن حجم خطأ توقُّع المكافأة يختلف في الحالات الثلاث. فكان خطأ توقُّع المكافأة موجبًا عندما قُدِّم العصير بصورة غير متوقعة (تقديم المكافأة على فتراتٍ متقطعة بدون مُثير تنبؤي؛ الصف العلوي)، وكان صفرًا عند تقديم نفس الكمية من العصير كما هو متوقع (تقديم المكافأة على فترات متقطعة بعد الإشارة الصوتية؛ الصف الأوسط)، وكان سالبًا عندما حُذِفَ تقديم العصير بصورة غير متوقعة (حذف المكافأة بعد الإشارة الصوتية؛ الصف السفلي). أظهرت هذه الدراسة والدراسات اللاحقة أن الخلايا العصبية الدوبامينية تزيد من نشاطها إذا كانت المكافأة الفعلية أكبر من المُتوقعة، وعلى العكس من ذلك، تُقلِّل نشاطها إذا كانت المكافأة الفعلية أقلَّ من المتوقعة. يبين هذا الاكتشاف بوضوح أن بعض الخلايا العصبية

الدوبامينية في الدماغ الأوسط تستجيب لخطأ توقُّع المكافأة؛ وهو مُتغير مُهم في التعلم المُعزَّز.



شكل ٥-١: نشاط لعينة من خلية عصبية دوبامينية تم تسجيلها من قرد. زادت هذه الخلية العصبية من نشاطها عندما قُدِّم العَصير في غياب مُثير مُنتبئ بالمكافأة (الصف العلوي). بعد إقران المكافأة بإشارة صوتية (مثير مشروط) وتقديم العَصير عدة مرات (كانت الإشارة الصوتية تسبق تقديم العَصير دائماً)، لم تُعد الخلية العصبية الدوبامينية تستجيب لتقديم العَصير. فكانت الخلية العصبية تستجيب للإشارة الصوتية (التي تُمثل المُثير المنتبئ بالمكافأة) بدلاً من ذلك (الصف الأوسط). إذا حُذِف تقديم العَصير بعد الإشارة الصوتية، ينخفض نشاط الخلايا العصبية الدوبامينية في الوقت المتوقَّع لتقديم العَصير (الصف السفلي). ومن ثم، يُشير نشاط هذه الخلية العصبية إلى الفرق بين المكافآت الفعلية والمتوقَّعة (أي خطأ توقُّع المكافأة). الشكل مستنسخ بتصریح من وولفرام شولتز وبيتر دايان وبي ريد مونتاجيو، من مقال «الركيزة العصبية للتوقُّع والمكافأة»، دورية «ساينس»، مجلد ٢٧٥، عدد ٥٣٠٦ (مارس ١٩٩٧): ١٥٩٤.

## التمثيل العصبي للقيمة

إن ما تم التوصل إليه، من أن خلايا الدوبامين العصبية في الدماغ الأوسط تنقل إشارات خطأ التنبؤ بالمكافأة، يُشير إلى أن الدماغ قد يُجري تمثيلاً للقيم ويحدثها وفقاً لنتائج الاختيار الفعلية. والمسألة الحرجة التالية التي سنناقشها هي ما إذا كان الدماغ يُمثل القيمة، وهو عنصر رئيس آخر من عناصر التعلّم المُعزّز. والإجابة عن هذا السؤال واضحة. فقد وجدت دراسات لاحقة إشارات مُرتبطة بالقيمة في عدة أجزاءٍ مُختلفة من الدماغ لدى الفئران والقروذ والبشر. تُغير الخلايا العصبية في هذه المناطق من الدماغ نشاطها وفقاً لنوع المكافأة وكميتها واحتماليتها.<sup>4</sup> ويوضح الملحق الثاني كيف يُحدّد العلماء الخلايا العصبية المُشفّرة للقيمة من خلال مثال مُحدد. كشفت هذه الدراسات أن مناطق واسعة النطاق من الدماغ تُجري تمثيلاً لخطأ التنبؤ بالمكافأة والقيمة، وهما عنصران أساسيان للتعلّم المُعزّز. وأظهرت أيضاً أن سلوكيات الاختيار لدى الحيوانات والبشر تكون محسوبة جيداً بواسطة خوارزميات التعلّم المُعزّز في كثير من المواقف السلوكية.

إن الفكرة الأساسية للتعلّم المُعزّز بديهية وواضحة. أنت تتخذ خيارات وفقاً لتوقعاتك وتُحدّث توقعاتك وفقاً للنتائج الفعلية. سوف تقترب توقعاتك من النتائج الفعلية مع تكرار لهذه العملية، وسوف يتحسن أدائك بالتبعية. وقد دفعت نتائج خطأ التنبؤ بالمكافأة وإشارات القيمة في الدماغ إلى مزيدٍ من الأبحاث حول الأساس العصبي لاتخاذ القرارات القائمة على القيمة. ويرتبط هذا المسار البحثي، أو علم الأعصاب المُتعلق باتخاذ القرار، ارتباطاً وثيقاً بعلم النفس والاقتصاد والذكاء الاصطناعي. ويُطلق عليه أيضاً علم الاقتصاد العصبي؛ لأنه يدرس العمليات العصبية التي تكمن وراء القرارات الاقتصادية.

## الحُصين والقيمة

طالما اعتُبر الحُصين بنيةً تمثل الإشارات الإدراكية، لا سيما الإشارات المكانية، وليس إشارات القيمة؛ فكان يُعتقد أن المعلومات المتعلقة بالقيمة تمثّل في مكانٍ آخر في الدماغ. تذكّر دور الحُصين في الذاكرة التقريرية، دون الإجرائية (انظر الفصل الأول). تذكّر أيضاً خلايا المكان ودور الحُصين في تمثيل التخطيط المكاني للبيئة الخارجية (الخريطة المعرفية؛ انظر الفصل الثالث). من المعروف بالطبع أن الخلايا العصبية في الحُصين تستجيب للمكافأة (مثل الطعام) والعقاب (مثل الصدمة الكهربائية). غير أن مفهومي

«المكافأة» و«القيمة» ليسا متطابقين، على الرغم من ارتباطهما. فالقيمة هي المنتج النهائي لتحليل التكلفة والفائدة مع مراعاة نوع المكافأة ومقدارها واحتماليتها إلى جانب تكلفة الحصول عليها. ولا تختلف القيمة عن مفهوم «العائد المتوقع» في الاقتصاد والماليات، وهو الربح الذي يتوقعه المستثمر من استثمار مالي. تتفق استجابات الحُصين للمكافأة مع تمثيل الحُصين للقيمة، ولكنها قد تُشير فقط إلى دور الحُصين في تمثيل الأحداث المعيشة (أي تذكر حدث تلقي مكافأة معينة في بيئة معينة).

ولهذه الأسباب، لم يهتم سوى قلة من العلماء بالبحث في تمثيل القيمة في الحُصين. ومع ذلك، تُشير مجموعة متزايدة من النتائج إلى أن الحُصين هو واحد من بين مناطق عديدة من الدماغ تدخل في تمثيل القيمة. حتى الآن، تعرّف الباحثون على إشارات القيمة في الحُصين لدى الجرذان والقروود والبشر.<sup>5</sup> وفيما يلي، سوف أُلخص سلسلة من النتائج التي توصلت إليها باستخدام الجرذان في مُختبري، والتي أشارت إلى تمثيل الحُصين للقيمة وإسهامه في عملية اتخاذ القرار القائمة على القيمة. ركّز مُختبري، مثل كثير من المختبرات الأخرى، على القشرة الجبهية والعقد القاعدية في الاستكشاف الأوّلي لمعالجة القيمة في الدماغ؛ لأنها أهداف لمسارات الخلايا العصبية للدوبامين وتُساهم بقوة في السلوك الموجّه نحو المكافأة. وكان أحد الاستنتاجات الواضحة لهذا المسعى هو أن معالجة القيمة وظيفية مُنتشرة في أجزاء الدماغ؛ إذ وجدنا خلايا عصبية تستجيب للقيمة في مناطق واسعة النطاق من دماغ الجرذان.<sup>6</sup>

أشارت الدراسات التي أُجريت على القروود والبشر أيضاً إلى أن مناطق واسعة النطاق من الدماغ تتدخل في معالجة القيمة.<sup>7</sup> وهذا يُشير إلى أن تمثيل القيمة وظيفية محفوظة للدماغ على مدار عملية التطور. وغالباً ما تؤدّي نفس الوظيفة بواسطة كثير من مناطق الدماغ وأحياناً في جميع أنحاء الجسم. على سبيل المثال، تُوجد ساعة بيولوجية في كل خلايا أجسامنا تقريباً، على الرغم من أن ساعة رئيسية واحدة قد تكون كافية للتحكّم في إيقاعاتنا اليومية.<sup>8</sup> إن التطور بمنزلة عملية إصلاح (تعديل وتحسين نظام موجود بالفعل)، وليس اختراع نظام جديد بالكامل من الصفر. ولذلك، فمن المُرجّح أن تكون الوظائف المدعومة احتياطياً ببنى أخرى، مُتجذرة بعمق في عملية التطور. وكقاعدة عامة، كلما كانت وظيفة مُعينة مدعومة احتياطياً ببنى أخرى، زادت احتمالية ضرورتها للبقاء والتكاثر. إن تمثيل قيم الاختيارات المُحتملة واتخاذ الخيارات المثلى بناءً عليها أمر بالغ الأهمية للبقاء والتكاثر. ولذلك قد لا يكون من المُستغرب أن نجد إشارات القيمة في سائر أجزاء الدماغ.

عندما وجدنا الخلايا العصبية المُستجيبة للقيمة في مناطق مختلفة من الدماغ، تملكنا الفضول بشأن إمكانية تمثيل القيمة في الحُصين. فنظرًا لكون الحُصين بنيةً قديمة من الناحية التطورية، ولأن اتخاذ القرارات القائمة على القيمة أمر بالغ الأهمية للبقاء، فقد اعتقدنا أن الحُصين قد يلعب دورًا أيضًا في معالجة القيمة. وقد بحث هيونجونج لي، الذي كان طالبَ دراساتٍ عليا آنذاك، في هذه المسألة عن طريق زرع أقطاب كهربائية دقيقة في حُصين جرد.

### تمثيل القيمة في شبكة CA1

بالأخذ في الاعتبار الرأي التقليدي القائل بأن الحُصين مُتخصص في تمثيل الإشارات المكانية والمعرفية، فقد اعتقدنا في البداية أن إشارات القيمة في الحُصين، إن كانت موجودة، ستكون أقوى في بني المخرجات في الحُصين وليس في الحُصين نفسه. ولذلك قررنا فحص النشاط العصبي في شبكة CA1، وهي المرحلة النهائية من الدائرة الثلاثية المشبك، ومرقد الحُصين، الذي ينقل مخرجات CA1 إلى مناطق قشرية أخرى (انظر الشكل 4-1). كان توقُّعنا الحذر هو أن إشارات القيمة سوف تُوجَد في مرقد الحُصين، وليس في شبكة CA1؛ أو إذا كانت كلتا المنطقتين تنقلان إشارات القيمة، فإن الإشارات سوف تكون أقوى في مرقد الحُصين عنها في شبكة CA1. وتبين أن هذا التوقُّع خاطئ.

درب هيونجونج الجرذان العطشى على الاختيار بين هدفين يُقدِّمان الماء كمكافأة باحتمالات مختلفة. ولم تكن احتمالات المكافأة ثابتة، ولكنها تغيَّرت على نحو غير مُتوقَّع بمرور الوقت. ومن ثمَّ، كان على الجرذان أن تُقرر أي هدف تختار في بيئة متغيرة وغير مُستقرة. ولزيادة تناول الماء في هذه الظروف لأقصى حد، كان على الجرذان أن تحسب احتمالات المكافأة للهدفين (قيم الاختيارين المُستهدفين) على أساس تاريخ الاختيارات السابقة ونتائجها وتوزيع اختياراتها على هدفين مع مراعاة قيمهما النسبية (أي احتمالات المكافأة). ويعبَّر التعلم المُعزَّز على نحو جيد عن هذه العملية. والواقع أن سلوك الاختيار لدى الجرذان في هذه المهمة كان متوقَّعًا على نحو جيد من خلال نموذج بسيط للتعلم المُعزَّز، ممَّا يُشير إلى أن الجرذان قدرت وحدثت القيم للهدفين على أساس تاريخ الاختيارات السابقة ونتائجها. وقد قدَّر هيونجونج القيم لكلِّ من الهدفين من خلال تجربة تلو الأخرى باستخدام نموذج للتعلم المُعزَّز واختبر ما إذا كانت هناك خلايا عصبية ارتبطت بنشاطها

خلال تجربة تلو الأخرى بالقيمة. انظر الملحق الثاني لشرح أكثر تفصيلاً للإجراء الخاص بالعثور على الخلايا العصبية المشفرة للقيمة.

كانت مفاجأة لنا أن وجدنا إشارات قيمة قوية في منطقة شبكة CA1، وليس في مرفد الحصين.<sup>9</sup> فقد كانت نسبة كبيرة من الخلايا العصبية في شبكة CA1، ونسبة صغيرة فقط من الخلايا العصبية في منطقة مرفد الحصين، تستجيب للقيمة (موضح في الملحق الثاني نموذج للخلايا العصبية المشفرة للقيمة في شبكة CA1). فوجئنا بذلك، ولكننا في الوقت نفسه كنا متحمسين لهذه النتيجة غير المتوقعة. فاللحظة المحيرة والمثيرة في الوقت نفسه بالنسبة للعالم تحدث عندما يكون أمام نتيجة غير متوقعة. لقد بدأت مسيرتي المهنية في علم الأعصاب في عام ١٩٨٦ طالباً للدراسات العليا في جامعة كاليفورنيا في إيرفين. وكنت قد أطلت التفكير في العمليات التي تحدث في الدوائر العصبية والتي تشكل الأساس لوظائف الحصين، ولكنني لم أستطع التوصل إلى إجابة مرضية، وخاصة فيما يتصل بدور شبكة CA1 في عمل الحصين. ولكن هذه النتيجة غير المتوقعة — أن شبكة CA1 تمثل إشارات قيمة قوية — كانت إنجازاً؛ فقد تمكنا من ابتكار نموذج جديد للحصين، أعتقد أنه يجسد جوهر عمليات الدوائر الحُصينية، استناداً إلى هذه النتيجة. وسأشرح هذا النموذج بالتفصيل في الفصل السادس.

### تمثيل القيمة في شبكة CA3

كانت صدمةً لنا حين اكتشفنا أن شبكة CA1، وليس مرفد الحصين، تمثل إشارات قيمة قوية. لماذا يُمثل الحصين إشارات القيمة، وهو المعروف بأنه معني في المقام الأول بالمعلومات المعرفية؟ كيف تتأثر عملية معالجة الإشارات المعرفية في الحصين بإشارات القيمة؟ ما دور إشارات القيمة في عمل الحصين؟ كخطوة لاستقصاء هذه الأمور، بحثنا فيما إذا كانت شبكة CA3، التي تُعد بنى المدخلات الرئيسية في شبكة CA1، تُمثل أيضاً إشارات قيمة. فبقارن سونج-هيون لي، الذي كان طالب دراسات عليا آنذاك، إشارات القيمة لشبكتي CA1 و CA3<sup>10</sup> وكانت النتيجة واضحة. كانت إشارات القيمة أضعف بكثير في CA3 مقارنة ب CA1. وفي هذه النتيجة إشارة إلى أن شبكة CA3 ليست مصدر إشارات القيمة في شبكة CA1. كما أن حقيقة أن إشارات القيمة قوية في شبكة CA1 ولكنها ضعيفة في بنى المدخلات (CA3) والمُخرجات (مرفد الحصين) الرئيسية تُشير إلى أن تمثيل القيمة قد يكون سمة خاصة لشبكة CA1 بين المناطق الفرعية الحُصينية.

## ماذا لو عَطَلت شبكة CA1؟

النتائج حتى الآن هي نتائج دراسات ارتباطية تُظهر أن أنشطة إطلاق جهد الفعل لكثير من خلايا CA1 العصبية ترتبط بقيم هدفين. وبوجه عام، تتكامل الدراسات الارتباطية والتدخلية فيما بينها. نُشِط جزءاً معيناً من الدماغ أو نُثبِطه ونفحص عواقب ذلك على السلوك في دراسة تدخلية. يُمكننا أن نستنتج ببعض الثقة أن بنية دماغية معينة تلعب دوراً أساسياً في وظيفة معينة عندما يسفر كل من النهجين الارتباطي والتدخل عن نتائج متقاربة. في حالتنا، ستكون حقيقة أن شبكة CA1 تُعالج إشارات القيمة القوية (النهج الارتباطي)، وأن تعطيل شبكة CA1 يُعطل اتخاذ القرار القائم على القيمة (النهج التدخل)، حجة قوية تُثبت مساهمة شبكة CA1 في معالجة القيمة. بالطبع، لا يُسفر النهجان الارتباطي والتدخل دائماً عن نتائج متقاربة. فعلى الرغم من العثور على إشارات عصبية قوية في بنية الدماغ ترتبط بوظيفة معينة، فإن تعطيلها قد لا يكون له عواقب سلوكية. وهذا يُعزى إلى أن وظيفة معينة قد تخدمها بنى دماغية متعددة.

واستناداً إلى هذه الخلفية، بحثنا في العواقب السلوكية المترتبة على تعطيل CA1 لدى الجرذان. تولى هذا العمل يونجسيوك جونج، الذي كان آنذاك طالب دراسات عليا. والواقع أنني كنت متردداً إلى حد ما في إجراء هذه الدراسة. فكما ذكرت في وقت سابق، توجد إشارات القيمة في مناطق واسعة النطاق من الدماغ. وعلاوة على ذلك، أشارت دراسات عديدة إلى أهمية القشرة الجبهية والعقد القاعدية في اتخاذ القرارات القائمة على القيمة. وبناءً على هذا، بدا أن الحيوانات ذات الحُصين المُعطل قد تعتمد على هذه الأنظمة العصبية في اتخاذ القرارات القائمة على القيمة. وعلاوة على ذلك، أشارت دراسات كثيرة إلى دور الحُصين في التشفير السريع للذاكرة التقريرية (انظر الفصل الأول) وليس في التعلّم التدريجي للقيمة، الذي كان يُعتقد أنه يتم بواسطة العقد القاعدية.<sup>11</sup> ولهذه الأسباب، توقعت أن تعطيل CA1 من شأنه أن يؤثر بصورة طفيفة جداً على سلوك الاختيار لدى الفئران في المهام التي تتطلب تعديلات على القيم من تجربة إلى تجربة وفقاً لنتائج التجارب. ومع ذلك، كانت هذه التجربة ضروريةً لمتابعة النتيجة التي مفادها أن CA1 تمثل إشارات قيمة قوية. وهذا النوع من الدراسات قد لا يكون طالب الدراسات العليا متحمساً له كثيراً. فمن الصعب عمومًا نشر نتيجة سلبية (أي أن تعطيل CA1 لا يؤثر على السلوك). في حالتنا، إذا لم نجد أي تأثير لتعطيل CA1 على سلوك الاختيار لدى الحيوان، فسيكون من الصعب الجزم بما إذا كان غياب تأثير التعطيل يرجع إلى

إمكانية الاستغناء عن شبكة CA1 في اتخاذ القرارات القائمة على القيمة، أم لأن CA1 لم تُعطَلُ بقدرٍ كافٍ. ولحسن الحظ، حتى مع هذا التحفُّظ، وافق يونجسيوك على إجراء هذه الدراسة دون كثير من التردد.

وتبيَّن أن توقعي كان خاطئاً مرة أخرى. فقد وجد يونجسيوك أن تعطيل شبكة CA1 يغير من سلوك الاختيار لدى الجرذان بحيث تُصبح أقل نجاحاً في الحصول على الماء.<sup>12</sup> وقد استخدم تقنية تُعرَف باسم «الوراثيات الكيميائية» لتعطيل مناطق فرعية مختلفة من الحُصين بشكلٍ انتقائي (CA1، CA2، CA3، والتلفيف المُسنن)، وفحص سلوك الاختيار لدى الجرذان.<sup>13</sup> ثم استخدم نموذج التعلُّم المُعزَّز لدراسة: أي جانبٍ من جوانب اتخاذ القرار القائم على القيمة قد تأثر. فوجد أن تعطيل CA1 يضعف تعلُّم القيمة؛ فقد تضررت عملية تحديث القيمة بناءً على نتائج الاختيار (أي تحديث القيمة بناءً على خطأ التنبؤ بالمكافأة) لدى الجرذان التي عطلت لديها شبكة CA1. في المقابل، لم يكن لتعطيل CA2، أو CA3، أو التلفيف المُسنن أي تأثير يُذكر على سلوك الاختيار لدى الجرذان. وفوجئت مرةً أخرى بهذا الاكتشاف. في تقديري، كانت فرصة الحصول على نتيجة إيجابية أقل بكثير من ٥٠ في المائة. وقد واجهنا بعض المتاعب في نشر هذا الاكتشاف في دورية أكاديمية. ربما كان هذا بسبب الرأي السائد في هذا المجال منذ فترةٍ طويلة بأن الحُصين مُهم للتشفير السريع للحقائق والأحداث، ولكن ليس لتعلُّم القيمة التدريجي.

### شبكة CA1: المتخصصة في القيمة

دعونا نلخص النتائج التي تم التوصل إليها في الفئران والجرذان. أولاً: تُمثل شبكة CA1 إشارات قيمة قوية، لكن بنى المدخلات والمخرجات الرئيسية الخاصة بها، وهي CA3، ومِرْفَد الحُصين، على الترتيب، تُمثل القيم بشكلٍ ضعيف فقط. ثانياً: يُضعف تعطيل CA1 عملية اتخاذ القرار القائمة على القيمة، لكن تعطيل التلفيف المُسنن، أو CA2، أو CA3 لم يكن له تأثير كبير على سلوك الاختيار لدى الحيوان. الرسالة المُستقاة من هذه النتائج واضحة. من المُرجَّح أن يلعب تمثيل القيمة، باعتباره سمةً فريدة من نوعها لشبكة CA1 بين المناطق الفرعية للحُصين، دوراً حاسماً في عمل شبكة CA1.

كان الاعتقاد السائد أن الحُصين يُعالج المعلومات المعرفية، وخاصة المعلومات المكانية. ومن هذا المنظور، كانت وظيفة CA1 محيرة؛ لأن أنماط إطلاق الإشارات المكانية مُتشابهة بين خلايا CA3 وCA1 العصبية. بالطبع، تُوجد اختلافات دقيقة بين خصائص خلايا CA3 وCA1 المكانية، ولكنها بوجهٍ عام متشابهة جدًّا. أما فيما يتعلق بالتمييز الوظيفي بين CA3 وCA1، فهل تُمثل كل من CA3 وCA1 معلومات مكانية (خرائط معرفية)؟ إذا كان الأمر كذلك، فلماذا نحتاج إلى كلٍّ من CA3 وCA1؟ ألا تكفي CA3 وحدها لتمثيل المعلومات المكانية الخارجية؟ تُوجد نظريات عديدة حول هذه القضية، ولكن من وجهة نظري، لا أجد أيًّا منها مقنعًا. تقدم نتائجنا منظورًا جديدًا لهذه القضية الطويلة الأمد. إن كون منطقة CA1 مُتخصِّصة في القيمة بين جميع المناطق الفرعية للحُصين يوفر خيطًا لفهم الدور الوظيفي لشبكة CA1.

تناولنا حتى الآن قِطْع الأُحجية لفهم كيفية دعم الشبكة العصبية الحُصينية للذاكرة والخيال. وفي الفصل السادس، سنُحاول جمعها معًا لنرى الأُحجية كاملة.

## الفصل السادس

# تَذَكُّرُ مَكَافَاتِ الْمُسْتَقْبَلِ الْمُجْزِيَةِ

أُجْرِي كَثِيرٌ مِنَ الدَّرَاسَاتِ الَّتِي تَسْتَهْدَفُ الحُصِينَ. فَاعتبارًا من أبريل ٢٠٢٢، صارت كلمة hippocampus (الحُصِين) في بيميد PubMed (محرك بحث للمنشورات البيولوجية والطبية) تظهر أكثر من ١٧٠ ألف منشور. وقد ساهمت هذه الدراسات بقدر كبير في فهمنا للحُصِين. فنحن نعرف الآن الكثير عن تشريحه وكيميائه الحيوية وفسولوجيته وتطوره ووظيفته وعلاقته بالأمراض العصبية والعقلية. وقد انتقيتُ في الفصول السابقة بعضًا من هذه الدراسات التي أجدها بالغة الأهمية لفهم عمليات الدائرة العصبية التي تُشكّل الأساس لوظائف الذاكرة والخيال في الحُصِين. باختصار، لا يدخل الحُصِين في تذكُّر التجارب الماضية فحسب، بل يدخل أيضًا في تخيل الأحداث المستقبلية؛ وتموجات الموجات الحادة وتكرار النشاط العصبي الحُصِيني يحدثان في الحُصِين أثناء حالتي النوم والراحة؛ تمتلك شبكة CA3، وليس CA1، تفرعات عصبية متكررة ضخمة تتيح إحداث استثارة ذاتية وإطلاقًا متسلسلاً للإشارات العصبية؛ وتُولد شبكة CA3 تموجات الموجات الحادة وتمثل شبكة CA1 إشارات القيمة. وسنتناول في هذا الفصل نموذج المحاكاة والاختيار الذي يُعد توليفةً مركبة من هذه النتائج.

## نموذج المحاكاة والاختيار

الفكرة الأساسية التي يقوم عليها هذا النموذج بسيطة: تولد شبكة CA3 تسلسلات أحداث متنوّعة بناءً على تفرعات عصبية متكررة ضخمة أثناء الراحة والنوم (المحاكاة) وتُعزز شبكة CA1 على نحو تفضيليّ التسلسلات العالية القيمة بناءً على النشاط العصبي المُعتمد على القيمة (الاختيار). بهذه الطريقة، سَتُعزِّز تسلسلات النشاط العصبي التي تُمثل

الأحداث والأفعال العالية القيمة على نحو تفضيلي بحيث يُحتمَل أن يقع عليها الاختيار في المستقبل في ظل ظروفٍ مماثلة. وسيُسمح لنا هذا باتخاذ خياراتٍ أفضل في المستقبل. طرحت، بالتعاون مع زملائي، هذا النموذج في عام ٢٠١٨.<sup>1</sup> وافترضنا من خلاله أن الحُصين يُحاكي ويُعزز الأحداث والأفعال العالية القيمة استعدادًا للمستقبل بدلاً من مجرد تذكُّر ما حدث في الماضي (طرح كثير من العلماء فكرة دور الحُصين في التخطيط للمستقبل؛ انظر ورقتنا البحثية والمراجع الواردة فيها). افترضنا أيضًا أن هذه الوظيفة التي يؤديها الحُصين تُنفَّذ في شبكة CA1-CA3. قد يبدو هذا غير فعَّال للوهلة الأولى؛ لأن الإعداد للاختيارات المثلى لا يتطلب شبكة عصبية واحدة فقط، بل شبكتين. غير أن وجود شبكتين تؤديان المحاكاة (CA3) والاختيار (CA1) على نحو مُنفصل يُتيح توليد وتقييم مجموعةٍ كبيرة من الأحداث والأفعال، ستكون مُفيدةً للتخصُّص مسبقًا لظروفٍ مستقبلية متنوعة. فإذا اعتمدنا على شبكةٍ واحدة فقط لكلٍّ من المحاكاة والاختيار، فسيفقد تنوع الأحداث أو السلوكيات المحاكاة بصورةٍ ملحوظة. لقد شرحنا في ورقتنا البحثية سبب اعتبارنا الحُصين جهازًا للمحاكاة والاختيار وكيف يُمكن تنفيذ عملية المحاكاة والاختيار في دوائر CA1-CA3 العصبية. وفيما يلي، سألخص الحجج الرئيسية التي يقوم عليها النموذج.

### شبكة CA3 كأداة محاكاة

لماذا نعتبر شبكة CA3 جهازًا لمحاكاة؟ يلعب الحُصين دورًا في الخيال (انظر الفصل الأول). كما أنه يولد تسلسلاتٍ إطلاقٍ لخلايا المكان التي تتوافق مع مساراتٍ مكانية غير مطروقة في أثناء الراحة والنوم (انظر الفصل الثالث). تُشير هذه النتائج إلى أن الحُصين يولّد تسلسلات نشاط جديدة. بعبارةٍ أخرى، يُحاكي تسلسلات أحداثٍ لم تُعش. في أي موضع من في الحُصين تتولّد التسلسلات التي تتمُّ محاكاتها؟ سيُشير أغلب العلماء إلى CA3 باعتبارها المصدر؛ لأن خلايا CA3 العصبية مُتصلة بواسطة تفرعات عصبية متكررة ضخمة (انظر الشكل ٤-٢). وعلى النقيض من ذلك، لا تحتوي CA1 إلا على تفرعات عصبية متكررة ضعيفة موجهة طولياً.<sup>2</sup> ونظرًا لأن خلايا CA1 العصبية مُترابطة بقوة، فإن تنشيط بعض خلايا CA3 العصبية من المرجح أن يُنشِط خلايا أخرى (الاستثارة الذاتية). ويتناسب انتشار هذا التنشيط المُتسلسل على نحو جيد مع الإطلاق المُتسلسل لخلايا المكان الذي يحدث تزامنًا مع تموج موجي حاد أثناء النوم والراحة

(أي عمليات إعادة التشغيل). وكما ذكرنا في الفصل الرابع، تبدأ تموجات الموجة الحادة CA3 وتنتشر إلى CA1.<sup>3</sup> وتشير هذه النتائج مجتمعةً إلى أن شبكة CA3 هي مصدر التسلسلات التي تتم محاكاتها.

كيف إذن تولد شبكة CA3 العصبية تسلسلات نشاطٍ جديدة أثناء تموجات الموجة الحادة؟ لماذا لا تُكرر ببساطة تسلسلات الإطلاق التي حدثت أثناء حالاتٍ نشطة سابقة؟ يعتقد العلماء أن شبكة CA3 تُخزّن ذكريات الأحداث المختبرة، مثل مسارات التنقل، من خلال تغيير قوى الربط بين خلايا CA3 العصبية (انظر الشكل ٤-٣). غير أن العوامل التالية من شأنها أن تعمل ضد تكرار نفس تسلسلات النشاط التي ترصد أثناء التنقل النشط تحت ظروف الراحة أو النوم. أولاً: لا يمكن الاعتماد على الاتصال المشبكي الفردي بين خلايا المخ بسبب احتمال إطلاق النواقل العصبية. فانتقال رسالة من خلية عصبية إلى أخرى مجرد احتمال فقط. ثانياً: من المُحتمل أن تختلف حالة المخ اختلافاً جذرياً بين التنقل النشط وحالات الراحة السلبية. ففي الجردان، تسود التذبذبات الإيقاعية بترددٍ نيتاً أثناء التنقل النشط، ولكن التذبذبات البطيئة والموجات الحادة هي السائدة أثناء الحالات السلبية (انظر الشكل ٣-١). ثالثاً: يكون النشاط العصبي المُثبط أقل أثناء الحالات السلبية مقارنةً بالحالات النشطة. ولذلك، يبدو أن شبكة CA3 العصبية تخضع لسيطرة أقل في الحالات السلبية. رابعاً: قد تختلف المدخلات الحسية الواردة اختلافاً كبيراً بين التنقل النشط وحالات الراحة أو النوم. أخيراً، تعتبر شبكة CA3 مترابطة فيما بينها بواسطة كثيرٍ من المشابك العصبية الضعيفة على المستوى الفردي، وليس عدد قليل من المشابك العصبية القوية. ثمة سمة غير عادية لشبكة CA3 وهي العدد الهائل من التفرعات العصبية المتكررة. كما استعرضنا في الفصل الرابع، تتلقّى كل خلية عصبية استثنائية في CA3 مدخلاتٍ مشبكية من نحو اثني عشر ألف خلية عصبية استثنائية أخرى في شبكة CA3، والتي تُشكل نحو ٧٥ في المائة من إجمالي المدخلات المشبكية التي تتلقاها (انظر الشكل ٤-٢). ولكن أظهرت الدراسات الفسيولوجية أن المشابك العصبية المنفرعة المتكررة ضعيفة على المستوى الفردي، وهو ما قد يكون غير مفيد لتوليد تسلسلات نشاط عالية الدقة.

خلاصة القول، نظراً لأن شبكة CA3 هي شبكة مُترابطة داخلياً بواسطة العديد من المشابك العصبية الضعيفة، فإن حالة الشبكة العصبية CA3 تختلف اختلافاً كبيراً بين الحالات النشطة والسلبية، وتختلف المدخلات الحسية الواردة اختلافاً هائلاً بين حالات

النشاط والنوم، ويكون التنظيم المُثبط ضعيفاً أثناء الحالات السلبية، فسيكون من الصعب تكرار نفس تسلسلات الإطلاق التي تحدث في أثناء التنقل النشط في الحالات غير النشطة. وبالتعبية، فإن عمليات التكرار التي تولدها CA3 لن تتكوّن فقط من تسلسلات مُختبرة، ولكن أيضاً من تسلسلات لم تُختبر. وفي هذا الصدد، قد تكون العشوائية عنصراً وظيفياً بالغ الأهمية في شبكة CA3. فستسمح للشبكة بتوليد مجموعة كبيرة من التسلسلات غير المُختبرة (الجديدة)، والعمل كآلة محاكاة بدلاً من آلة ذاكرة عالية الدقة.<sup>4</sup>

### شبكة CA1 كأداة اختيارٍ تعتمد على القيمة

ماذا سيحدث لعمليات تكرار النشاط العصبي التي تولّد في شبكة CA3؟ افترض بعض الباحثين أن عمليات تكرار النشاط العصبي الحُصيني سوف تُقيّم في بنى دماغية، مثل المخطط البطني والقشرة الجبهية الحجاجية، المعروفتين بأنهما تعالجان الإشارات المُرتبطة بالقيمة.<sup>5</sup> وهذا الافتراض يتماشى مع الرأي السائد منذ زمنٍ بأن الحُصين يعالج بالأساس المعلومات المكانية والمعرفية وليس المعلومات المُرتبطة بالقيمة. غير أن النتائج التي توصلنا إليها تُشير إلى أن شبكة CA1 مُتخصصة في تمثيل القيمة. والنتيجة الطبيعية المُرتتبة على النشاط العصبي القوي المُرتبط بالقيمة في شبكة CA1 هي أن الإشارات العصبية التي تنطلق من شبكة CA3 سوف تُعالج على نحوٍ مختلف في شبكة CA1 وفقاً للقيم المُرتبطة بها. بعبارةٍ أخرى، سوف تقوم CA1 بتصفية عمليات إعادة التشغيل التي تولدها شبكة CA3 وفقاً للقيم المُرتبطة بها. على سبيل المثال، قد تمرر شبكة CA1 على نحوٍ تفضيلي، عمليات إعادة التشغيل ذات القيمة العالية، مثل تلك التي تتوافق مع المسارات المكانية المؤدية إلى موقعٍ مُرتبط بمكافآت، بينما تقوم بتصفية عمليات إعادة التشغيل ذات القيمة المُخفضة، مثل تلك التي تتوافق مع المسارات المكانية المؤدية إلى موقعٍ لا يرتبط بمكافآت. بالطبع، لا يُشير مصطلحا «الاختيار» و«التصفية» هنا بأي حالٍ من الأحوال إلى عملية كل شيءٍ أو لا شيءٍ. فالاحتمال الأرجح هنا أن عمليات إعادة التشغيل في شبكة CA3 ستمرّ عبر شبكة CA1 مع زيادة القيم المُرتبطة بها. من المفترض أن شبكة CA3 تولّد عدداً ضخماً من عمليات إعادة التشغيل أثناء حالات الراحة والنوم. ونحن نفترض أن CA1 تُعالج هذه التكرارات التي تولدها CA3 بالتناسب مع القيم المُرتبطة بها بحيث تُختار التكرارات ذات القيمة العالية وتُعزّز على نحوٍ تفضيلي.

لكي نفهم بالضبط كيف تسير عملية المحاكاة والاختيار في الدائرة العصبية CA3-CA1، فنحن بحاجة إلى مقارنة كيفية تأثير تكرارات أنماط النشاط العصبي التي تولدها كل شبكة CA3 و CA1 بالقيم المرتبطة بها. لقد استكشفت دراسات قليلة هذه المسألة، ولكن النتائج حتى الآن تتسق مع نموذج المحاكاة والاختيار. على سبيل المثال، يُعاد تنشيط خلايا المكان في شبكة CA1 التي تقع مجالات إطلاقها بالقرب من موقع مكافأة، على نحو تفضيلي، أثناء تموجات الموجة الحادة مقارنةً بتلك التي تقع مجالات إطلاقها بعيداً عن موقع مكافأة.<sup>6</sup> في المقابل، لا تُظهر خلايا المكان في شبكة CA3 مثل هذا التنشيط المُعتمد على المكافأة أثناء تموجات الموجة الحادة.<sup>7</sup> وحتى الآن لم تُقارن أي دراسات أخرى بين اعتماد تكرارات أنماط النشاط العصبي في كل من CA3 و CA1 على المكافأة أو القيمة. ومع ذلك، أظهرت دراسات عديدة مراراً أن المكافأة تُسهّل تكرار أنماط النشاط العصبي في شبكة CA1 لدى الفئران.<sup>8</sup> أما لدى البشر، فَيُعزّز تخيل الأحداث المستقبلية العرضية بالمكافأة، ويُعاد تنشيط أنماط نشاط الحُصين لسياقات المكافأة العالية على نحو تفضيلي أثناء فترة الراحة التي تعقب التعلم.<sup>9</sup> وتتوافق هذه النتائج على نحو جيد مع فرضية أن CA3 تولّد إعادات تشغيل للتجارب مستقلة عن قيمها، بينما تعالج CA1 على نحو تفضيلي إعادات التشغيل العالية القيمة. والنتيجة الوظيفية لهذه العملية واضحة. سيعمل اختيار التسلسلات العالية القيمة على تعزيز التمثيلات العصبية لتلك التسلسلات، والتي يمكن أن توجّه الاختيارات المثلى في المستقبل.

## التلفيف المُسنن

لقد تناولنا المفاهيم الأساسية لنموذج المحاكاة والاختيار. يمكن العثور على المزيد عن تفاصيله، وخاصة تلك المتعلقة بالتنفيذ العصبي البيولوجي لعملية المحاكاة والاختيار، في الورقة البحثية التي نشرتها مع زملائي في عام 2018.<sup>10</sup> لقد ركّزنا على شبكتي CA3 و CA1، وأغفلنا التلفيف المُسنن، وهو مكون آخر من الدائرة الثلاثية المشبكية الحُصينية. ما الذي يفعله التلفيف المُسنن في عمل الحُصين؟ وكيف ترتبط وظيفته بعملية المحاكاة والاختيار المُفترضة لشبكة CA3-CA1؟

تعتبر نظرية «فصل الأنماط» في الوقت الحالي النظرية الأشهر في سياق دور التلفيف المُسنن. وترتبط هذه الفكرة بنظرية ديفيد مار القائلة بأن شبكة CA3 تُخزن الذاكرة الترابطية (الشكل 4-3). والفكرة الأساسية لهذه النظرية أن التلفيف المُسنن يُقسم أنماط

المدخلات المُتشابهة إلى أنماطٍ متميزة بحيث يُمكن لشبكة CA3 تخزين الكثير من الأنماط (الذكريات) بأقل قدرٍ من التدخل.<sup>11</sup> ولكن ليس واضحًا ما إذا كان من المُمكن تطبيق هذه الفكرة على ذكريات التسلسلات بدلًا من الأنماط الثابتة.

هناك أسباب أخرى تدعو إلى الشكِّ في أن فصل الأنماط هو الوظيفة الرئيسة للتلفيف المُسنن. فقد افترضتُ، بالاشتراك مع زميلي القديم جونج وون لي، أن الوظيفة الأساسية للتلفيف المُسنن هي ربط الإشارات الحسّية المتنوّعة معًا، وتشكيل «سياق مكاني» بهذا الإجراء.<sup>12</sup> ويناقش الملحق الأول أيضًا هذه المسألة بإيجاز. بعبارة مُبسطة، نحن نرى أن الدائرة الثلاثية المشبكية للحُصين تؤدي ما نُسميه «محاكاة واختيار الربط». فيسمح لنا التلفيف المُسنن بالتعرّف على موقعنا (سياقنا المكاني) من خلال ربط إشاراتٍ حسّية متنوّعة معًا، وتُجري شبكتنا CA1 و CA3 معًا عملية محاكاةٍ واختيارٍ لتعزيز التسلسلات العالية القيمة في كلِّ سياقٍ مكاني.

### الآثار المترتبة على النموذج

إن نموذج المحاكاة والاختيار نظرية تنتظر التحقق التجريبي. غير أنه يقدم تفسيرًا مترابطًا منطقيًا لنتائج لا يمكن تفسيرها بسهولةٍ من خلال النظريات التقليدية. على سبيل المثال، يُفسر النموذج لماذا يدخل الحُصين ليس فقط في الذاكرة، ولكن أيضًا في الخيال، ولماذا تكون الذاكرة عرضةً للتلفيق، ولماذا يُمثل الحُصين القيمة، ولماذا يحتاج الحُصين إلى شبكة CA1 بالإضافة إلى CA3، ولماذا تتشابه خصائص خلايا المكان عبر شبكتي CA1 و CA3، وذلك في إطار مُخطط بسيط للمحاكاة والاختيار. بالإضافة إلى ذلك، يقدم النموذج وجهات نظر جديدة بشأن العمليات العصبية التي تكمن وراء السلوك الموجّه نحو الهدف وتوطيد الذاكرة.

**أولًا:** يشرح النموذج عمليتين أساسيتين للتنقل المكاني الموجّه نحو الهدف، وهما التمثيلات المكانية وتمثيلات القيمة، باستخدام آلية عصبية واحدة. من المُفترض عمومًا أن التنقل المكاني الموجّه نحو الهدف مدعوم بالمعلومات المكانية المُتمثلة في الحُصين ومعلومات القيمة المُتمثلة في مكانٍ آخر في الدماغ. غير أن كلاً من المعلومات المكانية ومعلومات القيمة تُمثّل في الحُصين في نموذج المحاكاة والاختيار؛ ومن ثمّ، يمكن تفسير التنقل المكاني الموجّه نحو الهدف من خلال عمليةٍ بسيطةٍ للمحاكاة والاختيار داخل الحُصين. ولا

حاجة لافتراض وجود نظامين عصبيين مُنفصلين مُخصَّصين للتَّنَقُّلِ المَكَانِي ومعالجة القيمة.

**ثانيًا:** يقدم النموذج منظورًا جديدًا لتوطيد الذاكرة. لقد تناولنا قضايا ومناقشات حول توطيد الذاكرة في الفصل الأول. ولكن يظل هناك غموض حول أسباب وكيفية توطيد الذكريات التي تشكَّلت في البداية لتصبح ذكريات دائمة مع الوقت. يفترض نموذج المحاكاة والاختيار أن توطيد الذاكرة هو عملية إيجاد استراتيجيات مثالية بناءً على خبراتٍ سابقة وليس عملية تعزيز للذكريات العرضية. وهذه النظرة مختلفة جذريًا عن النظريات التقليدية لتوطيد الذاكرة.

#### «داينا»

ثمة تشابهٌ مُذهل بين توطيد الذاكرة كعملية اختيار وتعزيز للخيارات القِيَّمة للمُسْتَقْبَلِ على نحوٍ نشط، وبين إحدى خوارزميات التعلُّم الآلي المعروفة. التعلُّم المُعزَّز، كما ذكرنا في الفصل الخامس، هو فرع من فروع الذكاء الاصطناعي يهدف إلى إيجاد حُطط عملٍ مثالية في بيئةٍ مُتغيرة وغير مُستقرة. يختار الوكيل الإجراءات بناءً على دوال القيمة، ويقوم بتحديث دوال القيمة بناءً على نتائج الإجراءات المُتَّخَذة. وتسمح هذه العملية التكرارية للوكيل بتتبُّع دوال القيمة الحقيقية واتخاذ خيارات تكيُّفية.

غير أن أحد عيوب هذا النهج القائم على التجربة والخطأ هو عدم الكفاءة. إن تقريب دوال القيمة الحقيقية يتطلَّب في كثيرٍ من الأحيان عددًا هائلًا من المحاولات. وهذا يمثل مشكلة، خاصة عندما تكون هناك حاجة إلى سلسلةٍ طويلة من الإجراءات للوصول إلى الهدف النهائي. وسيكون من الصعب معرفة ما إذا كان اختيار إجراء مُعين (س) في موقف (ص) ذا قيمة عالية أو قيمة منخفضة إذا لم يُكشَف عن نتيجة اختيار هذا الإجراء في هذا الموقف إلا بعد سلسلةٍ طويلة من الإجراءات. وهذا يُفسر لماذا تُواجه خوارزميات التعلم المُعزَّز في العموم صعوبةً في إتقان لعبة الفيديو «انتقام مونتيزوما»؛ حيث يتعين على شخصية «بنما جو» أن تمر بالعديد من الخطوات قبل الوصول إلى الوجهة، أو غرفة الكنز، في هرم مونتيزوما.

أحد الحلول المقترحة للتغلُّب على هذه الصعوبة هو إجراء عمليات محاكاة أثناء حالة عدم الاتصال بالإنترنت لتكملة عملية تعلُّم القيمة عن طريق التجربة والخطأ. تخيل

مكنسة كهربائية روبوتية تحاول إتقان طريقةٍ فعالة لتنظيف غرفة مليئة بالأثاث. قد يستغرق العثور على أفضل استراتيجية لتنظيف الغرفة وقتاً طويلاً إذا كان ترتيب الأثاث مُعقداً؛ إذ سيكون هناك عدد هائل من المسارات المُحتملة لتغطية الأرضية بالكامل. إذا اعتمدت المكنسة الكهربائية الروبوتية فقط على تجارب التنظيف الفعلية، فقد يستغرق الأمر شهوراً، أو حتى سنوات، لمعرفة أفضل استراتيجية للتعامل مع الغرفة.

إحدى الطرق لحل هذه المشكلة هي تعلم دوال القيمة من خلال محاكاة المسارات المُحتملة. وهذه هي الفكرة الأساسية التي تقوم عليها خوارزمية «داينا» التي طرحها ديفيد ساتون في عام ١٩٩١.<sup>13</sup> تتعلم الخوارزمية دوال القيمة في خطوتين؛ أولاً: أثناء التفاعل مع البيئة (التعلم بالتجربة والخطأ)، ثم من خلال محاكاة الإجراءات وتقييم نتائجها (التعلم دون اتصال بالإنترنت). في مثالنا، تتعلم المكنسة الكهربائية الروبوتية دوال القيمة لمسارات مكانية مختلفة من خلال التنظيف الفعلي ثم من خلال المحاكاة دون حركة فعلية. يمكن أن يُسرّع هذا إلى حدٍ كبير معدل التعلم؛ إذ يمكن للروبوت تقييم عدد هائل من التجارب دون إجراء عملية التنظيف فعلياً.

إن التشابه بين نموذج المحاكاة والاختيار وخوارزمية داينا ملحوظ. فكلهما يزيد معدل تعلم القيمة عن طريق المحاكاة بناءً على تجارب محدودة. قد تستغرق عملية تمثيل دوال القيمة الدقيقة في بيئة غير مستقرة وقتاً طويلاً إذا اعتمدنا فقط على التعلم بالتجربة والخطأ. وبطبيعة الحال، يُمكننا في النهاية تعلم دوال القيمة الدقيقة إذا كانت البيئة مستقرة. غير أن منافسيك، مثل الحيوانات المفترسة المُحتملة، ليسوا بالطيبة الكافية لينتظروك حتى تُتملّ دوال القيمة بدقة. إنها غابة متوحّشة هناك. علاوة على ذلك، غالباً ما تتغير البيئات على نحوٍ ديناميكي. ومع التعلم البطيء، قد لا تتخذ أبداً خياراتٍ مثالية في بيئة ديناميكية؛ لأن البيئة (وبالتبعية دوال القيمة الحقيقية) قد تتغير قبل أن تتقنها. لنفترض أن الأمر يستغرق عامًا كاملاً حتى يُتقن الروبوت أفضل استراتيجية تنظيف لغرفة ما عن طريق التجربة والخطأ. لنفترض أيضاً أن سكان الغرفة وترتيب الأثاث يتغيران كل ثلاثة أشهر. إذا كان الأمر كذلك، فلن يتمكن الروبوت أبداً من تنظيف الغرفة بأكبر قدر من الكفاءة. ويمكن حلُّ هذه المشكلة باستخدام المحاكاة والاختيار لتسريع عملية التعلم.

## الفصل السابع

# تطور الخيال

يمكن تفسير الظواهر البيولوجية من خلال الأسباب المباشرة والأسباب البعيدة المتعلقة بالتطور. تتعلق التفسيرات المباشرة بالآليات البيولوجية الأساسية للظاهرة، في حين تتعلق التفسيرات البعيدة أو التطورية بالأصول التطورية والمنافع الوظيفية. على سبيل المثال، لماذا نشعر بالعطش بعد تناول الطعام المملح؟ قد تكون إحدى الإجابات المحتملة أن تناول كميات كبيرة من الملح يزيد من الضغط الأسموزي في الدم، والذي ترصده مستشعرات الضغط الأسموزي في الأوعية الدموية، التي تعمل بعد ذلك على تنشيط الدائرة العصبية التي تحفز سلوك البحث عن الماء (سبب مباشر). من الإجابات الأخرى المحتملة أن الآلية البيولوجية التي ترصد تركيز الملح المرتفع وتخفضه قد تطوّرت؛ لأنها ضرورية للبقاء (سبب بعيد). ولقد ركزت تفسيراتنا لنموذج المحاكاة والاختيار حتى الآن على السبب المباشر؛ أي الآليات العصبية للمحاكاة والاختيار. ما هو إذن التفسير التطوري البعيد لوظيفة المحاكاة والاختيار في الحُصين؟ لماذا تطوّر أداء المحاكاة والاختيار؟ في هذا الفصل، سنحاول أن نجد إجابة على هذا السؤال، من خلال مقارنة تشريح وفسولوجيا الحُصين عبر أنواع حيوانية مختلفة.

## حُصين الثدييات في مقابل حُصين الطيور

إيجازًا، تشير عمليات إعادة التشغيل في حُصين الجردان إلى أنه يحاكي مسارات مكانية متنوعة أثناء الراحة والنوم. بالإضافة إلى ذلك، يُشير النشاط المعتمد على القيمة لخلايا شبكة CA1 العصبية، إلى أن المسارات المكانية التي تولّدها شبكة CA3 يجري اختبارها في شبكة CA1 وفقًا للقيم المرتبطة بها. وتُشير هذه النتائج مجتمعةً إلى أن حُصين الجردان يؤدي عملية محاكاة واختيار لمسارات مكانية متنوعة، سواء كانت مُجرّبة أو غير مُجرّبة،

أثناء الراحة والنوم حتى يتمكّن الجرد من اختيار المسار المكاني الأمثل بين موقعين عشوائيين في المستقبل.

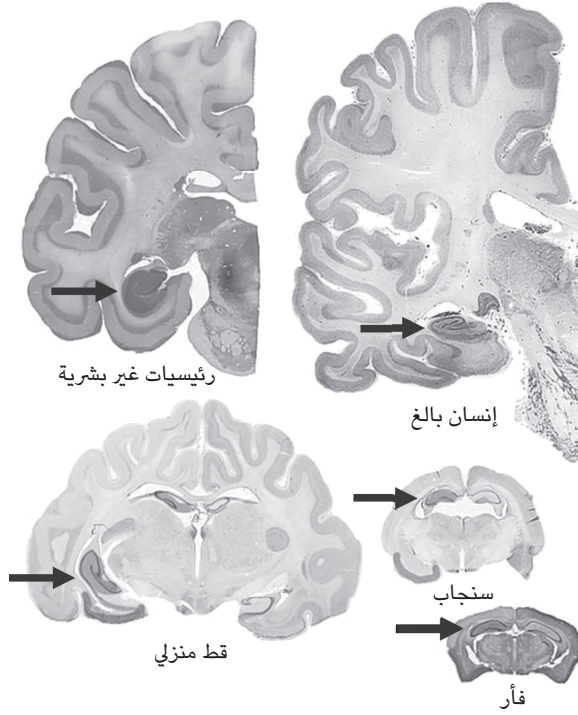
إذن ما السبب التطوّري لعملية المحاكاة والاختيار؟ كان سؤالنا الأول بخصوص هذه المسألة هو ما إذا كان الحُصين لدى الطيور يؤدي أيضاً المحاكاة والاختيار. ويرجع هذا إلى أن الطائر، الذي يستطيع الطيران، قد لا يحتاج إلى بذل جهدٍ لاستعداد لمسارات مكانية مُحتملة مسبقاً. فقد ينتقل الطائر عبر أقصر مسار من موقعه الحالي إلى وجهته.

ومن المؤسف أن الدراسات التي أجريت على حُصين الطيور قليلة مقارنةً بالدراسات العديدة على حُصين القوارض. ولعل أشهر النماذج الحيوانية للحُصين هي الفئران والجرذان. يسمح استخدام نفس النموذج الحيواني للباحثين بمقارنة النتائج من دراسات مُختلفة، مما يُتيح فهمًا أكثر اكتمالاً لظاهرة بيولوجية أو وظيفة ذات أهمية. علاوةً على ذلك، نظرًا لأن التطور في العموم هو عملية تعديل للآلية البيولوجية القائمة وليس اختراع شيءٍ جديد تمامًا من الصفر، فمن المُحتمل أن تكون النتائج المُستمدة من نوع حيواني واحد ساريةً على نوعٍ آخر. على سبيل المثال، غالبًا ما ترتبط الوظائف البيولوجية لجين معين في ذبابة الفاكهة، وهو نموذج حيواني يُستخدم على نطاقٍ واسعٍ في علم الأحياء، ارتباطاً مباشراً بالأمراض الوراثية البشرية. غير أن هناك حاجةً أيضاً إلى دراسات مقارنة؛ إذ تُتيح لنا فهم مدى عمومية آلية بيولوجية مُعينة عبر الأنواع، وكيف تختلف وفقاً للاحتياجات البيئية للأنواع.

تتشابه بنية الحُصين تشابهًا مدهشًا بين مختلف أنواع الثدييات، ومن ضمنها البشر.<sup>1</sup> وكما هو موضح من خلال المقاطع العرضية لأدمغة كثيرٍ من الأنواع الثديية (انظر الشكل ٧-١)، يتميز الحُصين في جميع الثدييات ببنَى تشريحية كبيرة متشابهة مع تلفيف مُسنن، وشبكتي CA1 و CA3 مُميزتَين بوضوح. في المقابل، وكما هو موضح من خلال المقاطع العرضية لأدمغة الفقاريات غير الثديية (الأسماك والزواحف والطيور؛ انظر الشكل ٧-٢)، لا تمتلك هذه الأنواع الحيوانية مناطق فرعية مُحددة بوضوح في الحُصين تماثل التلفيف المُسنن، وشبكتي CA3 و CA1 في حُصين الحيوان الثديي. وقد حددت الدراسات التشريحية اختلافات بارزة إضافية بين حُصين الحيوان الثديي وحُصين الطائر.<sup>2</sup>

تمتلك الثدييات والطيور، التي تنتمي إلى الفقاريات ذوات الدم الحار، ذاكرة مكانية أفضل بكثير مقارنةً بالفقاريات ذوات الدم البارد (الأسماك والبرمائيات والزواحف). قد

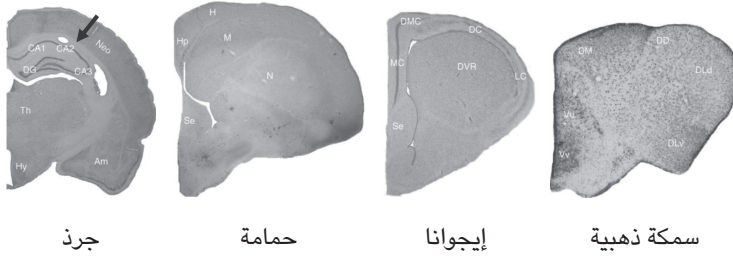
## تطور الخيال



شكل ٧-١: مقاطع عرضية لأدمغة العديد من الأنواع الثديية. تُظهر المقاطع العرضية للحُصين (المشار إليها بالأشهر) التلغيف المُسنن المميز بوضوح، وشبكتي CA3، وCA1 في جميع الأنواع. الشكل منقول من دراسة لجعفر بسمة وآخرين بعنوان: «النمو التطوري للدماغ وعلاقته بجراحة الأعصاب»، دورية «كيوريس»، مجلد ١٢، العدد ١ (يناير ٢٠٢٠): e6748 (CC BY).

يكون هذا أمرًا مثيرًا للسخرية للغاية؛ نظرًا لأن وصف شخص ما بأن له «دماغ عصفور» يعتبر إهانة. في الواقع، يتمتع كثيرٌ من أنواع الطيور التي تُخزّن الطعام بذاكرة مكانية رائعة إلى حدٍ يُثير الدهشة. فمن إجمالي نحو ١٧٠ فصيلة من الطيور، تخزن ١٢ فصيلة الطعام. على سبيل المثال، تخزن طيور كسار كلارك الطعام، مثل حبات الصنوبر، في آلاف المواقع وتستعيد معظمها في الشتاء.<sup>3</sup> ونظرًا لأن هذه المواقع تصبح مُغطاة بالثلوج في الشتاء، فيجب أن تتذكرها على خريطة مكانية لمنطقة تخزين الطعام لا أن تتذكر السّمات المحلية الفريدة لكل بقعة. وعلى الرغم من أن الحُصين مسئول عن الذاكرة المكانية في كلِّ

## الدماغ المُبتَكِر



شكل ٧-٢: مقاطع عرضية لأدمغة سمكة ذهبية، وإيجوانا، وحمّامة، وجرذ. لا يُظهِر الهيكل المقطعي المُميز للحُصين الثديي (السهم) في الأنواع غير الثديية (بإذن من فيرنر بينجمان).

من الثدييات والطيور، فإن هناك اختلافًا جذريًا في البنية التشريحية للحُصين في الثدييات والطيور. وهذا يُنبئنا بأن الطريقة التي يتعامل بها الحُصين مع المعلومات المكانية قد تختلف اختلافًا جذريًا بين المجموعتين.

### خلايا المكان في الحَمَام

زرع فريق بقيادة فيرنر بينجمان، من جامعة بولينج جرين في أوهايو، أقطابًا كهربائية دقيقة في حُصين الحمام لدراسة الإطلاق المكاني للخلايا العصبية الحُصينية في الطيور. وبسبب مشكلات فنية، سجلوا النشاط العصبي للحمام أثناء وضع السير وليس أثناء الطيران. ومع ذلك، قدمت دراساتهم بياناتٍ نادرة وقيمة حول الإطلاق المكاني للخلايا العصبية الحُصينية. هل يحتوي حُصين الحمام على خلايا مكانٍ شأنه شأن حُصين الثدييات؟ الإجابة المُختصرة هي لا.<sup>4</sup> لقد درّبوا الحمام على السير في متاهةٍ على شكل علامة الزائد للحصول على الطعام في نهاية كلِّ مسار. ومن المُثير للاهتمام أن أنماط النشاط المكاني اختلفت بين الحُصين في نصف الدماغ الأيسر ونظيره في النصف الأيمن. كان بعض الخلايا العصبية في الحُصين الأيمن ينشط على نحوٍ تفضيلي في كثير من مواقع المكافآت (المعروفة باسم «خلايا الهدف») وكان بعضها في الحُصين الأيسر ينشط على نحوٍ تفضيلي على طول المسارات التي تربط بين موقعين للمكافآت («خلايا المسار»). وهذا يشير إلى أن حُصين الحمام قد يكون معنيًا فقط بمواقع الهدف النهائية (أي مواقع المكافآت) والمسارات المباشرة بينها.

توصل هذا البحث إلى نتيجةٍ أخرى مثيرة للاهتمام؛ وهي أن أنماط إطلاق الإشارات المكانية هذه تتضاءل بقدرٍ كبيرٍ إذا كانت مكافآت الطعام مُتناثرة عشوائياً في المتاهة. على النقيض من ذلك، تُظهر الخلايا العصبية في حُصين الجرذ إطلاقاً مُحدداً بالمكان، بغضُّ النظر عما إذا كانت مكافآت الطعام متناثرة عشوائياً أو متوفرة فقط في مواقع مُحددة. وتُشير هذه النتائج أيضاً إلى الاختلاف بين الثدييات والطيور في الطريقة التي يُعالج بها الحُصين المعلومات المكانية ويمثلها.

يمكننا توليد عدد لا نهائي من المسارات المكانية، من خلال ترتيب خلايا المكان الموجودة في حُصين القوارض ترتيباً تسلسلياً. في المقابل، سيكون من الصعب إنشاء مساراتٍ مكانية، بناءً على الإطلاق المتسلسل للخلايا العصبية المكانية الموجودة في حُصين الحمام. وهذا يلقي بظلال الشك على تنفيذ عملية المحاكاة والاختيار في حُصين الحمام.

### تطوُّر عملية المحاكاة والاختيار

يوضح الشكل (٧-٣) النقطة الأساسية في فرضيتنا وهي أن وظيفة المحاكاة والاختيار في الحُصين قد تطوّرت لدى الثدييات البرية المُتنقلة؛ لأنها تحتاج إلى اختيار مساراتٍ مثالية بين موقعين عشوائيين. غير أن هذه الحاجة لا تنطبق على الطيور؛ فهي تستطيع الطيران مباشرةً إلى موقع مُستهدف. وكثيراً ما تواجه الحيوانات البرية المتنقلة عقبات، مثل الأنهار والأشجار والصخور، تسدُّ المسار المُستقيم نحو موقع مُستهدف. ولذلك تحتاج إلى تذكر المسارات التي تتلافى هذه العقبات للوصول بطريقةٍ بارعة إلى الموقع المُستهدف. غير أن معرفة جميع المسارات المثالية بين موقعين عشوائيين في كل بيئة من خلال الخبرة تتطلب الكثير من الوقت والجهد. وإحدى الطرق لحل هذه المعضلة تتمثل في تعلُّم المسارات المثالية دون تنقل فعلي؛ أي إجراء محاكاة واختيار. وهذا من شأنه أن يفسر لماذا تطورت عملية المحاكاة والاختيار في الثدييات البرية المتنقلة دون الطيور.

قد يذهب البعض إلى أن حساب المسار الأمثل حسبما تقتضي الضرورة، بدلاً من إنفاق الوقت والطاقة مقدماً لمعرفة عدد هائل من المسارات التي قد تُستخدم أو لا تُستخدم في المستقبل؛ سيكون أكثر كفاءة. غير أن مثل هذه الاستراتيجية قد تكون قاتلةً في حالات الطوارئ، على الرغم من أنها ستكون فعّالة من حيث الطاقة. على سبيل المثال، لنفترض أنك أرنب ترعى في حقلٍ بعيداً عن جُحرك. عندما تدرك أن ثعلباً يعتزم مهاجمتك، يجب أن تركض عائداً إلى جُحرك باستخدام أقصر طريقٍ متاح. قد يستغرق حساب المسار



شكل ٧-٣: التنقل الموجه نحو الهدف في الثدييات والطيور. تحتاج الثدييات البرية المتنقلة، دون الطيور، إلى تذكر المسارات المكانية. الشكل مستنسخ بتصريح من مين جونج وآخرين، «صورة الغلاف»، دورية «هيبيوكامبوس» المجلد ٢٨، العدد ١٢ (ديسمبر ٢٠١٨).

الأمثل وقتًا أطول من اللازم في ظرفٍ كهذا. وقد يُكلفك تأخير ثانية أو ثانيّتين حياتك. من شأن عملية محاكاة واختيار متقدمة أن تُحصِّرَكَ لتحديد مسارات التنقل المُثلى بين موقع انطلاق عشوائي وبين جحر. لذلك، ورغم أن الأمر قد يستنزف الوقت والطاقة، فقد يكون تمثيل مساراتٍ مثالية من موقع انطلاق عشوائي إلى بضعة مواقع مستهدفة في كل بيئة؛ مفيدًا للبقاء. علاوة على ذلك، قد تتغير البيئة تغيرًا مستمرًا. فقد يختفي العشب الوارف الكثيف الذي دائمًا ما يعوق طريقك في الشتاء، أو قد تظهر حفرة مياه عميقة على طريقك المُفضل بعد هطول أمطار غزيرة. ومن ثمَّ، سيكون من المُفيد للبقاء أن تستمر في تحديث استراتيجياتك المُثلى. وإلا، فقد لا تتمكن الأنواع التي تتنقل عبر اليابسة من البقاء على قيد الحياة على المدى الطويل.

بافتراض ذلك، ما أفضل وقت لأداء عملية المحاكاة والاختيار؟ بالطبع ليس عندما يطاردك حيوان مفترس. سيكون منطقيًا أكثر أن يتم ذلك أثناء الراحة أو النوم عندما لا تكون بحاجة إلى الانتباه إلى العالم الخارجي. ولعل هذا هو السبب في أن الحُصين، باعتباره جزءًا من شبكة الوضع الافتراضي، ينشط أثناء حالات الراحة. وبالنظر إلى أن الحُصين بنية قديمة من الناحية التطورية، وأن نشاطه يتزامن عمومًا مع نشاط بقية الدماغ أثناء تموجات الموجة الحادة، فربما كانت عملية المحاكاة والاختيار عاملًا بالغ الأهمية في تطوُّر شبكة الوضع الافتراضي. وكما استعرضنا في الفصل الأول، فإن شبكة الوضع الافتراضي تنشط بالتزامن مع أنواع مختلفة من العمليات العقلية الداخلية، مثل استرجاع ذكريات من السيرة الذاتية، وأحلام اليقظة، واتخاذ القرارات الأخلاقية، ونظرية العقل، والتفكير التبايني؛ ويُعتَقَد أن المحاكاة هي الأساس لكل هذه العمليات العقلية الداخلية.<sup>5</sup>

## الحيتان والخفافيش

بالنظر إلى ما أذهب إليه من أن وظيفة المحاكاة والاختيار في الحُصين ربما تطوّرت في الثدييات بسبب الحاجة الفريدة للتنقل لدى الثدييات البرية، فسيكون من المُثير للاهتمام فحص حُصين الثدييات التي تحلّت عن التنقل الأرضي. لقد عادت الحيوانات من الرتبة الحوتية، مثل الحيتان، إلى البحر واكتسبت الخفافيش أجنحةً تُمكنها من الطيران. قد تكون احتياجات هذه الحيوانات لتخزين عددٍ كبير من مسارات التنقل المُحتملة أقل، مقارنةً بالثدييات البرية المُتنقلة. ما مدى تطور الإطلاق في خلايا المكان العصبية الحُصينية في الحوتيات؟ على حدِّ علمي، لم يسجل أحد أي بياناتٍ بشأن ذلك. ولكن هناك دراسات تبحث في تشريح حُصين الحوت. وقد وجدت هذه الدراسات أن حجمه النسبي أصغر كثيرًا مقارنةً بالثدييات الأخرى، مما يُشير إلى حدوث ضمور في حُصين الحوت في أثناء التطور.<sup>6</sup> ومما يدعم هذا الاكتشاف احتمالية أن يكون حُصين الثدييات التي تجوب اليابسة قد تطور، للعثور على مساراتٍ مكانيةٍ مثالية بين موقعين عشوائيين يمكن استخدامها في المستقبل وتذكرها. وبالمقارنة، نجد أن الحوت نادرًا ما يواجه عقباتٍ أثناء التنقل.

على الجانب الآخر، تمتلك الخفافيش حُصينًا متطورًا إلى حدِّ كبير. علاوة على ذلك، وجدت الدراسات الفسيولوجية خلايا مكانية ثلاثية الأبعاد في حُصين الخفافيش.<sup>7</sup> وهذا لا يدعم تفسيرنا التطوري لوظيفة المحاكاة والاختيار في الحُصين. لماذا تمتلك الخفافيش خلايا مكان واضحة، على عكس الحمام، على الرغم من قدرتها على الطيران؟ قد يكون

السبب هو اختلاف نمط حياة الخفاش عن نمط حياة الحمام؛ بحيث يكون من المفيد للخفافيش معرفة مسارات التنقل المُحتملة. على سبيل المثال، غالباً ما تسكن الخفافيش أماكن مغلقة مثل الكهوف، وقد يكون الإلمام بمسارات تنقل متنوعة أمراً تكيفياً في مثل هذه البيئة. ومن المعروف أيضاً أن الخفافيش أكثر تخصصاً في المناورة من الطيران مقارنةً بالطيور. ولذلك، قد تختلف سلوكيات التنقل لدى الخفافيش اختلافاً كبيراً عن سلوكيات الطيور، مما يُشير إلى أن وظيفة المحاكاة والاختيار في حُصين الثدييات قد حُفظت في الخفافيش أثناء التطور.

ثمة احتمال آخر يتمثل في وجود انفصال بين تمثيل الخريطة المعرفية وتمثيلات المسار. لم يُرصد بعد حدوث إعادة تشغيل للمسارات المكانية في الحُصين في أثناء فترات الراحة والنوم لدى الخفاش. ولذلك، من الممكن أن يمثل حُصين الخفاش خرائط معرفية للعالم الخارجي، تتجلى من خلال خلايا مكان واضحة، لكنها لا تؤدي وظائف المحاكاة والاختيار. أخيراً، لا يمكننا استبعاد احتمال أن خلايا المكان في حُصين الخفاش تؤدي وظائف أخرى غير رسم الخريطة المعرفية أو تمثيل المسار. فعادة ما تتحوّل وظيفة قائمة إلى أخرى في أثناء التطور. على سبيل المثال، تطورت عظام السمع (العظام الصغيرة في الأذن الوسطى) لتؤدي وظيفة سمعية (تضخيم الإشارات الصوتية) من عظمة الفك الذي يؤدي وظيفة تغذية. ولا تزال الوظائف الدقيقة للخلايا المكانية الموجودة في حُصين الخفاش بحاجة إلى استجلائها.

### القرقف المُعتمد، طائر مُخزن للطعام

على النقيض من الخفافيش والحياتان، تحتاج بعض الطيور إلى ذاكرة مكانية فائقة للغاية للبقاء على قيد الحياة. فالطيور المُخزّنة للطعام، مثل كسار كلارك الذي ذكرناه في بداية الفصل، تخزن الطعام في آلاف الأماكن في الخريف وتستعيده بنجاح في الشتاء. ومن المشكلات المرتبطة باسترجاع الطعام المُخزن من مواقع متعددة تسلسل زيارة هذه المواقع. وهذه مشكلة معروفة في مجال الذكاء الاصطناعي: مشكلة البائع المتجول، حيث يزداد عدد تسلسلات الزيارات المُحتملة ازدياداً هائلاً مع زيادة عدد المواقع. لذا من المُمكن أن يكون الضغط التطوري قد نفذ آليةً عصبية لحساب تسلسلات الزيارة المثلى في الطيور المُخزّنة للطعام. وفي هذا الصدد، أظهرت دراسة أُجريت على طائر قرقف المُستنقعات، وهو نوع آخر من الطيور المُخزّنة للطعام، أنه يسترجع الطعام المُخزّن بالتسلسل الذي

حُزِّنَ به وليس عشوائياً<sup>8</sup>. ويُشير هذا الاكتشاف إلى أن طائر قرقف المُستنقعات يسترجع الطعام المُحزَّن ليس فقط بالنظر إلى المواقع المخزنة، ولكن أيضاً بالنظر إلى تسلسلات التنقل. ولكن كيف تحلُّ الطيور هذه المشكلات؟

على الرغم من أننا لا نعرف الإجابة بعد، فإن دراسة حديثة تُقدم مفتاحاً لهذه المسألة. فقد قارن فريق بقيادة ديميتري أرونوف، من جامعة كولومبيا، النشاط العصبي الحُصيني بين نوعين من الطيور: الطيور المُحزَّنة للطعام وغير المُحزَّنة للطعام. أظهرت الخلايا العصبية الحُصينية في طائر القرقف المُعند المُحزَّن للطعام نشاطاً محدداً بالمكان، يُضاهي نشاط خلايا المكان في حُصين الجرذ. في المقابل، كان نشاط الخلايا العصبية الحُصينية المُحدد بالمكان في طائر الحُسُون المُخطط، وهو طائر غير مخزن للطعام؛ أضعف كثيراً<sup>9</sup>. كذلك فشلت دراسة مُستقلة في العثور على خلايا المكان في حُصين السمان (علماً بأن السمان يستطيع الطيران على الرغم من أنه يُفضل المشي على الأرض)<sup>10</sup>. وتشير هذه النتائج إلى أن حُصين طائر القرقف ربما تطوَّر ليقوم بتمثيل دقيق لتخطيط الحيز الخارجي المُحيط به؛ لتلبية المطلب البيئي (تخزين الطعام) بطريقةٍ مُمثلة لتمثيل المكاني في حُصين الثدييات. وإذا ما وضعنا في الاعتبار أن الطيور والثدييات يفصل بينها ٣١٠ ملايين سنة من التطوُّر، وأن خلايا المكان الواضحة نادراً ما نجدُها في الطيور غير المُحزَّنة للطعام (الحمام، والعصافير، والسمان)، فمن المرجَّح أن يكون هذا مثالاً على حدوث تطور تقاربي (حيث تتطوَّر سمات متشابهة في أنواع مختلفة) وليس سمةً تطورية محفوظة بعمق. بعبارة أخرى، ربما تطوَّر حُصين القرقف لإظهار نشاطٍ مُحدد بالمكان بمعزل عن تطور حُصين الثدييات.

ومن الجدير بالذكر أنه لأول مرةٍ في الطيور، اكتشف فريق أرونوف تموجات موجية حادة في كلا النوعين (طائر الحسون المُخطط والقرقف المُعند) أثناء النوم العميق. ما وظائف تموجات الموجة الحادة في الطيور؟ هل تطلق خلايا المكان إشارات عصبية في حُصين القرقف عبر مساراتٍ مكانية في أثناء النوم مثل خلايا المكان لدى الثدييات، مما قد يساعد الطائر في استعادة الطعام المُخبأ في تسلسلات الزيارة المثلى؟ إذن كيف تطلق الخلايا العصبية في الحُصين لدى طائر الحسون المُخطط أثناء تموجات الموجة الحادة؟ ليس لدينا حالياً إجابات على هذه الأسئلة. ولا نستطيع أن نستبعد احتمال أن يكون حُصين طائر القرقف قد تطور لأداء عملية المحاكاة والاختيار في أثناء النوم، من خلال الاستفادة من تموجات الموجة الحادة الموجودة. وإذا كان الأمر كذلك، فقد يكون هذا مثالاً على التطوُّر التقاربي لعملية ذهنية معقدة للغاية.

## التطوُّر والتنوع الحيوي

تلخيصًا لما سبق، ليس من الواضح تمامًا كيف تطوَّر حُصين مجموعتين حيوانيتين متباعدتين تطوريًا، هما الطيور والثدييات، للتعامل مع المعلومات المكانية خلال التكيف مع البيئات الإيكولوجية المتنوعة. فالتطور ليس نظامًا يسير في اتجاه واحد؛ بل هو نظام يُشجع التغييرات في أي اتجاه يساعد الأنواع على تدعيم قدرتها على البقاء. فقد يفقد نوع ما وظيفة قائمة أو يكتسب وظيفة جديدة في خضم هذه العملية. وتاريخ مثل هذه العمليات المُستمرة يُمثل التنوع الحالي للحياة. فيوجد نحو خمسٍ وثلاثين شعبة في مملكة الحيوان. ونحن ننتمي إلى شعبة الحبليات، التي تتألف من ثلاث شُعب فرعية. وتُمثل الفقاريات واحدةً منها. ومن بين الشعبتين المُتبقيتين، تعتبر الحبليات أقرب إلى الفقاريات على صعيد التطوُّر السلافي. وهكذا تكون الحبليات أقرب جارٍ للفقاريات من حيث التاريخ التطوري.



شكل ٧-٤: بَخَاحَات البَحْرِ. الشكل مستنسخ من مقال نيك هوبجود، «بَخَاحَات البَحْرِ»، ويكيبيديا كومنز، تم التحديث في ٢٠ أبريل ٢٠٠٦، <https://commons.wikimedia.org/>، [w/index.php?curid=4590928](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4590928) (CC BY-SA 3.0)

يوضح الشكل (٧-٤) مثالاً لأحد أنواع شعبة الحبليات، وهي بَخَاخَات البَحْر (الزقيات البحرية). من المدهش في هذه الكائنات أنها لِاطِنَةٌ (ثابتة في مكانٍ واحد) وتبدو أقرب إلى شقائق النعمان البحرية، وهي حيوانات تقع في مرتبةٍ أدنى بكثيرٍ في شجرة تطور السلالات من الفقاريات. تظهر بَخَاخَات البحر جميع خصائص الحبليات (أي الحبل الظهرى، والحبل العصبي الظهرى، والفتحات الخيشومية، والذيل خلف الشرجي) في أثناء النمو، ولكنها تفقد هذه الخصائص والقدرة على الحركة في أثناء النمو. يوضح مثال الحبليات إلى أي مدى يمكن أن تتغير السمات البيولوجية ومدى التنوع الذي يمكن أن تبلغه في أثناء التطور. ربما تكون وظيفة المحاكاة والاختيار للمسارات المكانية المُحتملة قد فُقدت أو اكتُسبت في أثناء التطور. وحتى الآن، تقتصر دراساتنا عن التمثيل المكاني وإعادة التشغيل في الحُصين على عددٍ قليلٍ من الأنواع الحيوانية. وسوف تتضح الصورة أكثر مع توسيع نطاق أبحاثنا حول الحُصين لتشمل مزيداً من الأنواع الحيوانية.



الجزء الثالث

## الأساس العصبي للتجريد



## الفصل الثامن

# التفكير المجرد والقشرة المخية الحديثة

في الفصل السابع، تناولنا فكرة أن حُصين الثدييات قد تطوّر لمحاكاة (أي تخيّل) مسارات مكانية جديدة لتلبية المتطلبات البيئية الفريدة للتنقل البري. لا يقتصر الخيال البشري، بطبيعة الحال، على استكشاف مسارات مكانية جديدة. قد نتخيّل قصة طبيب وقع في حُب امرأتين أثناء اضطرابات الثورة الروسية، أو نتخيّل حلاً جديداً لفرضية ريمان، أو نتخيّل تعبيراتٍ فنية تُجسّد الوحدة الوجودية، أو نتخيّل أنفسنا نراقب ساعةً أثناء الانتقال بسرعة الضوء، وما إلى ذلك. ولعلّ قدرتنا غير المحدودة على التخيّل باستخدام مفاهيم شديدة التجريد هي العنصر الأهم في قدرتنا العقلية التي جعلنا مُبتكرين للغاية.

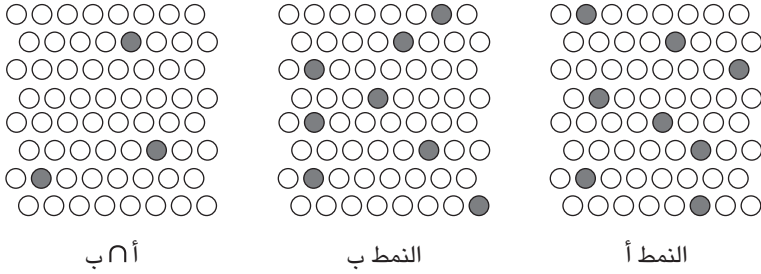
## التفكير المجرد

كيف اكتسب البشر، تحديداً الإنسان المبتكر (هومو إينوفاتيكوس)، هذه القدرة؟ لقد جادلتُ بأن الحُصين لدى الثدييات البرية المتنقلة قد تطوّر لمحاكاة مسارات تنقل متنوعة. وإذا كان الأمر كذلك، فإن الخيال في حدّ ذاته ليس ملكةً عقلية ينفرد بها البشر. كذلك إذا أخذنا في الاعتبار أن الحُصين لا يُعالج المعلومات المكانية فحسب، بل أيضاً المعلومات غير المكانية حتى في الجرذان، فإن محتوى خيال الحيوانات ربما يشمل كلا المكوّنين.<sup>1</sup> لذا من المُحتمل أن تكون القدرة على تخيل الأحداث المستقبلية، سواء المكانية أو غير المكانية، ووظيفة مشتركة بين أغلب الثدييات. وإن كان الأمر كذلك، فإن قدرتنا الفائقة على الإبداع لا يُحتمل أن يكون مرجعها قدرتنا الفريدة على تخيّل الأحداث المستقبلية. والاحتمال الأرجح أنها ترجع إلى قدرتنا الاستثنائية على التجريد العالي المستوى. بعبارة أخرى، ربما يكون تفوق الإبداع البشري هو نتاج الجمع بين التفكير المجرد العالي المستوى ووظيفة التخيّل القائمة بالفعل.

يشير التفكير المجرد إلى القدرة المعرفية على استخلاص مفاهيم أو مبادئ عامة من حالات فردية. فهو يُتيح لنا تشكيل ومعالجة مفاهيم لا ترتبط مباشرةً بأشياء أو أحداث مادية ملموسة، مثل الحب، والأعداد التخيلية، والديمقراطية، والإرادة الحرة. وهو ليس ملكة عقلية ينفرد بها البشر؛ فالتفكير المجرد مُتغلغل في المملكة الحيوانية. والطبيعة ليست عشوائية. فحيوانات كثيرة تتوصّل إلى أنماط ثابتة ودائمة في بيئتها، وتُمثلها في صورة قواعد عامة، وتتصرّف وفقاً لها من أجل تعظيم فرص البقاء والتكاثر. كما أن حيوانات كثيرة تستوعب المفاهيم المجردة مثل الأرقام، ولديها القدرة على الاستدلال الانتقالي (على سبيل المثال، إذا كان «أ» أكبر من «ب» و«ب» أكبر من «ج» فإن «أ» أكبر من «ج»)، وتُظهر سلوكيات تُوحى بالوعي الذاتي ونظرية العقل (القدرة على عزو الحالات العقلية، مثل المعتقدات والنوايا، إلى الآخرين؛ على سبيل المثال، «أنا أعرف ما تُفكر فيه»؛ انظر الفصل الأول).<sup>2</sup> كذلك وجدت دراسات عصبية فسيولوجية نشاطاً عصبياً مرتبطاً بالتصنيفات والعلاقات المعرفية المتطورة المُعقدة والقواعد السلوكية والتفاعلات الاجتماعية في الجرذان والقرود.<sup>3</sup> وسيُعرَض مثالٌ مُحدّد للتمثيل العصبي لمفهوم مجرد (الإدراك العددي) في الفصل التاسع.

إذا نظرنا في كيفية تخزين شبكة عصبية للتجارب باعتبارها ذكريات، فيمكننا الاعتراف بأن التجريد أمر لا مفرّ منه حتى في الحيوانات. ويعتقد الباحثون عموماً أن الشبكات العصبية تُخزن ذكريات مُتعددة بطريقة متداخلة وموزّعة (انظر الشكل ٨-١ وأيضاً الشكل ٤-٣). إذا تعرضت شبكة عصبية للعديد من المُثيرات المُتشابهة (مثل عدد كبير من السيارات)، فإن تلك المشابك العصبية (أي الوصلات العصبية) التي تنشط بفعل السّمات المشتركة بين هذه المُثيرات (على سبيل المثال، «كونها سيارة») سوف تُعزّز أكثر من المشابك العصبية الأخرى؛ لأنها سوف تُنشّط على نحوٍ متكرّر. بعد ذلك سوف تُنشّط الخلايا العصبية التي تحتوي على عددٍ كبير بما فيه الكفاية من المشابك المُعزّزة على نحوٍ تفضيلي بواسطة أيٍّ من هذه المُثيرات. بعبارة أخرى، سوف تستجيب بعض الخلايا العصبية لأيّ سيارة، سواء كانت مألوفة أو جديدة؛ لأنها سوف تستجيب للسّمات المشتركة للسيارات بعد التعرّض لخبرات كافية. وهذا يُمكننا من تعرّف شيء لم نره من قبل قطّ باعتباره سيارة. وكما يوضح هذا المثال، يُعتدّ أن التعميم، الذي يُعد شكلاً من أشكال التجريد، خاصية تنشأ تلقائياً للشبكة العصبية في الحيوانات والبشر.

## التفكير المجرد والقشرة المخية الحديثة



شكل ٨-١: التمثيل المُتداخِل والموزع للذكريات في مجموعة من الخلايا العصبية. ذكرى واحدة تُنشِط خلايا عصبية متعددة، وقد تشارك خلية عصبية واحدة في ذكريات متعددة.

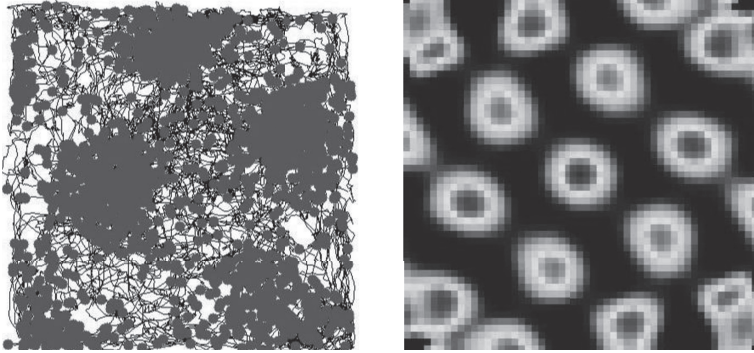
## التجريد الفطري

يشكّل مثال السيارة حالةً من حالات «التجريد التجريبي». كذلك وجدت الدراسات العصبية الفسيولوجية أدلةً على «التجريد الفطري» لدى الحيوانات. فقد زعم الفيلسوف الألماني إيمانويل كانط في القرن الثامن عشر أن البشر يُولدون بمبادئ إدراك فطرية. وهذا يتناقض مع منظور الفلسفة التجريبية، التي تعود إلى أرسطو؛ حيث تأتي المعرفة في المقام الأول من الخبرات الحسّية وليس الإدراك الفطري. وزعم كانط، في معرض مقارنته لفرضيته الفلسفية بالثورة الكوبرنيكية، أننا نفهم العالم الخارجي ليس فقط على أساس الخبرات، ولكن أيضاً على أساس «المفاهيم القبليّة»؛ أي الأشياء التي يُمكن فهمها بمعزل عن الخبرة.<sup>4</sup> وذهب إلى أن المكان والزمن هما محض «حدس» وليس من خصائص الطبيعة.<sup>5</sup> ونحن نعتبر المكان والزمن كيانين ماديين يمتدّان بشكلٍ مُوحّد ولا نهائي في إحداثيات ديكارتية؛ لأن هذه هي الطريقة التي نختبر بها الطبيعة (أي البنية الفطرية للإدراك).

بعد مرور أكثر من قرنين منذ نُشر كانط لكتابه المؤثر «نقد العقل الخالص» في عام ١٧٨١، وجد علماء الأعصاب أدلةً على حدس الإدراك المكاني لدى الجرذان. فقد وجد عالماً الأعصاب النرويجيَّان إدفارد موزر وماي بريت موزر، اللذان تقاسما جائزة نوبل مع جون أوكيف في عام ٢٠١٤، «خلايا شبكية» في القشرة الشّمّية الداخلية لدى الجرذان، التي تُعدّ البوابة الرئيسة للحُصين (إذ يتصل الحُصين ببقية القشرة المخية في الغالب عبر القشرة الشّمّية الداخلية؛ انظر الشكل ٤-١).<sup>6</sup> تُطلق خلية شبكية واحدة إشارات دورية في مواقع مُتعددة لتُشكّل نمطاً شبكياً سُداسياً من نشاط النبضات بينما يتجول الجرذ

## الدماغ المُبتكر

في كلِّ حَيِّزٍ (انظر الشكل ٨-٢). ويُشير هذا الاكتشاف إلى حدوث تمثيلٍ متري للحيز الخارجي المُحيط في القشرة الشَّميَّة الداخلية.

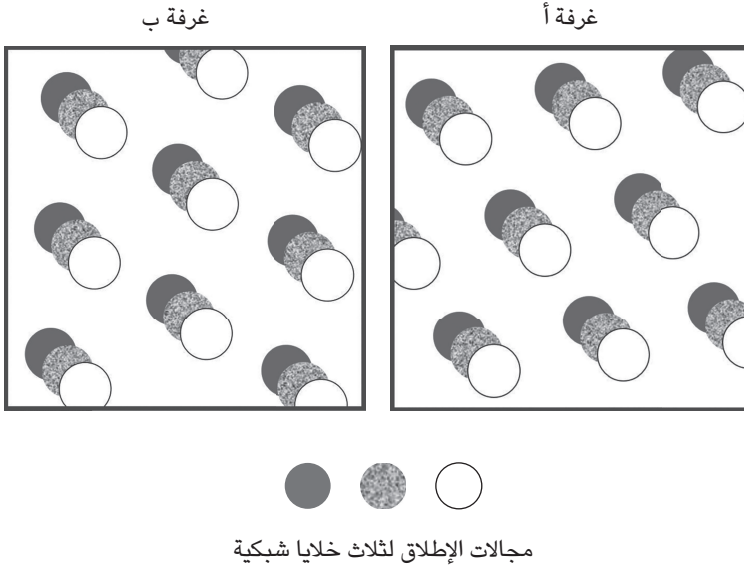


شكل ٨-٢: نشاط عينة لخلية شبكية. (يسارًا) يُشير الأثر الأسود إلى مسار حركة جرد، وتُشير الدوائر الرمادية إلى مواضع النشاط في خلية الشبكة العينية. المقطع مستنسخ من ملفٍ «صورة للخلية الشبكية، النسخة ٢» لكاردكاسل، ويكيبيديا كومنز، جرى التحديث في ١ يونيو ٢٠١٧، [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Grid\\_cell\\_imageV2.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Grid_cell_imageV2.jpg) (CC BY-SA). (يمينًا) أنشئ مخطط ارتباط ذاتي مكاني من نشاط الخلية الشبكية العينة للكشف عن نمط إطلاق سُداسي دوري. المقطع منقول من ملفٍ «صورة الارتباط الذاتي» لكاردكاسل، ويكيبيديا كومنز، جرى التحديث في ١ يونيو ٢٠١٧؛ تم الدخول على الرابط في ٢١ ديسمبر ٢٠٢٢، [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Autocorrelation\\_image.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Autocorrelation_image.jpg) (CC BY-SA).

والأمر المهم هو أن أي خلية شبكية تحافظ على نفس نمط الإطلاق الشبكي السُداسي في جميع المساحات. فإذا سجّلت نشاط خلية شبكية واحدة في غرفتين مختلفتين، فسيلَاحظ النمط نفسه في كليتهما (فيما يعرف بعمومية الإطلاق في الخلايا الشبكية). الفرق الوحيد هو اتجاه النمط العام للإطلاق في الخلايا الشبكية عبر الغرفتين (انظر الشكل ٨-٣)، مما يدلُّ على أن بنية التمثيل المكاني في القشرة الحسية الداخلية متطابقة بغض النظر عن مكان وجودك. علاوة على ذلك، إذا سجّلت خلايا شبكية متعددة في وقتٍ واحد، فستجد أن علاقاتها المكانية محفوظة عبر بيئاتٍ متعددة. بعبارة أخرى، تدور جميع أنماط الإطلاق في الخلايا الشبكية بالدرجة نفسها عندما يُنقل حيوان من بيئةٍ إلى أخرى. وتؤكد هذه الملاحظة

## التفكير المجرد والقشرة المخية الحديثة

بشكلٍ أكبر الاستنتاج القائل بأن القشرة الشمية الداخلية تُمثل جميع الأحياء الخارجية المحيطة بالبنية نفسها، وهو ما يتفق مع فكرة وجود قاعدة قبلية للإدراك المكاني.

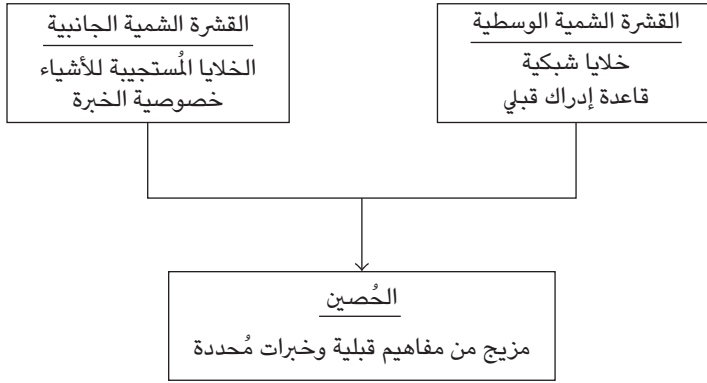


شكل ٨-٣: مخطط لأنماط الإطلاق لثلاث خلايا شبكية مُسجلة في غرفتين مختلفتين.

تتكوّن القشرة الشمية الداخلية من قسمين: أوسط وجانبي. وتوجد الخلايا الشبكية في القسم الأوسط فقط. في القسم الجانبي، تستجيب الخلايا العصبية للأشياء التي تواجهها في كل بيئة، مثل معلّم بصري، مما يُشير إلى أنها تُشفر تفاصيل البيئة.<sup>7</sup> تتجمّع المدخلات من القشرة الشمية الجانبية والأوسطى في الحُصين. وهكذا، يبدو أن الحُصين يجمع بين نوعين مختلفين من المدخلات فيما يتعلق بالإدراك المكاني؛ أحدهما يحمل تمثيلاً مترياً عاماً للحيز الخارجي المحيط (القشرة الشمية الداخلية الوسطى)، والآخر يحمل معلومات حول تفاصيل بيئة ما (القشرة الشمية الداخلية الجانبية). وهذا يُشير إلى أن الحُصين يجمع بين نوعين مختلفين من المعلومات: المعرفة البنيوية المُجرّدة والتجارب الحسية الفردية التي تُوفّرها القشرة الشمية الداخلية الوسطى والجانبية على الترتيب (انظر الشكل ٨-٤). وقد أظهرت دراسات أُجريت على البشر أن الخلايا الشبكية قد لا تُشفر المعلومات المكانية

## الدماغ المُبتكر

فحسب، وإنما أيضًا المعرفة المفاهيمية في نمط نشاطٍ يُشبه النشاط الشبكي.<sup>8</sup> وقد دفعت هذه النتائج تيموثي بيرينس وزملاءه إلى افتراض أن القسمين الأوسط والجانبى للقشرة الشمية الداخلية، على الترتيب، يحملان معرفةً بنيويةً مجردة وتجارب حسيةً فردية بما يتجاوز المجال المكاني.<sup>9</sup> وتتوازي هذه الفكرة مع فرضية كانط بأننا نفهم العالم من خلال التفاعل بين التجارب والمفاهيم القبلية المُسبقة.<sup>10</sup>



شكل ٨-٤: مُخطّط يوضح تدفق المعلومات من القشرة الشمية الداخلية إلى الحُصين.

## التفكير المجرد عند البشر

يمتلك البشر، إلى جانب حيواناتٍ أخرى أيضًا، القدرة على التفكير المجرد. وقد عرف الباحثون الكثير عن العمليات العصبية التي تدعم التجريد عند الحيوانات. غير أنه لا يُوجد حيوان آخر قادر على التفكير المجرد العالي المستوى الذي يتمتع به البشر. فقدرتنا على التجريد العالي المستوى مذهلة مقارنةً بالحيوانات الأخرى. واللغة مثال رئيسي على ذلك. فنحن نُعالج الرموز وفقًا للقواعد النحوية في استخدامنا اليومي للغة. يمكن للحيوانات الأخرى، بالطبع، التواصل فيما بينها. غير أنه ما من أي نظام تواصل حيواني يقترب بأي حالٍ من تعقيد اللغة البشرية ومرونتها. مُجمل القول أن الحيوانات قادرة على التفكير المجرد، وأغلب الظن أنها قادرة على التخيل في المجال المجرد. غير أن التفكير المجرد والخيال لديها سيكونان أكثر محدوديةً بكثيرٍ منّا.

عادة ما تتخطى عملية التفكير لدينا المجالات المادية والمجردة. لقد وُلدنا بقُدرة فطرية على التفكير المجرد؛ لذلك لا نحتاج إلى بذل جهد لفعل ذلك. ولتوضيح هذه النقطة، دعونا نتناول «خطأ التصنيف» الذي طرحه الفيلسوف الإنجليزي الشهير جيلبرت رايل.<sup>11</sup> قدم رايل الفكرة في إطار دحضه للثنائية الديكارتية، التي تزعم أن العقل والجسد كيانان مُنفصلان. فما هو خطأ التصنيف إذن؟ لنفترض أن صديقك يأخذك في جولة في أرجاء جامعته. فإريك المكتبات والكافيتريات ومساكن الطلاب والمُختبرات وقاعات المحاضرات. الآن تسأله: «ولكن أين الجامعة؟» إن الجامعة تتألف من مجموع هذه الأشياء معاً بطبيعية الحال. فالجامعة هي مجموعة من المؤسسات التي قد تكون أو لا تكون موجودة داخل مَبانيها. يوضح هذا المثال خطأً دلاليًا، حيث تُعامل أشياء تنتمي إلى فئتين وجوديتين مختلفتين (الجامعة في مقابل مبانيها) كما لو كانت تنتمي إلى الفئة نفسها. ما الخطأ في قول: «هناك ثلاثة أشياء في الحقل: بقرتان وزوج من الأبقار»؟<sup>12</sup> إنه خطأ تصنيفي بالطبع. بالمثل، فإن وضع «العقل» و«الجسد» في الفئة نفسها وافترض وجودهما ككيانين منفصلين سيكون مثالاً على وجود خطأ تصنيفي.

في اعتقادي، تكشف هذه الأمثلة عن ميلنا الفطري إلى خلط المفاهيم المادية والمجردة واعتبار الكيانات المجردة (مثل «الجامعة» و«العقل») وكأنها موجودة بوصفها كيانات مادية (مثل «المكتبة» و«الجسد»). ربما كان هذا نتيجة قُدرتنا على التفكير بسلامة باستخدام كل من المفاهيم المادية والمجردة. وقد لا تختلف التمثيلات العصبية للكيانات المادية والمجردة وفقاً للدماغ. فهذه التمثيلات، في نهاية المطاف، تُنفذ ببساطة من خلال تغيُّرات في الروابط العصبية (انظر الشكل ٤-٢) وأنماط النشاط العصبي. ومما يُعزِّز هذا المنظور ذلك الرأي القائل بأن القدرة البشرية على الابتكار هي نتاج طبيعي لإضافة القدرة على التجريد العالي المستوى، التي ينفرد بها البشر، إلى القدرة على التخيل، المشتركة بين جميع الثدييات.

### كم عدد الخلايا العصبية في القشرة المخية؟

كيف اكتسب البشر القدرة على التجريد العالي المستوى؟ من السمات المميزة للدماغ البشري حجمه. فنحن نمتلك أدمغة كبيرة مقارنة بأدمغة الحيوانات الأخرى، من ضمنها الرئيسيات غير البشرية. على سبيل المثال، يبلغ حجم دماغ الإنسان ثلاثة أضعاف حجم دماغ الشمبانزي. وكلما كان حجم الدماغ أكبر ووظَّف عددًا أكبر من الخلايا العصبية،

أتاح ذلك قوة معالجة أعلى. بعبارة أخرى، يُشكل الحجم عاملاً مهمًا في العلاقة بين الدماغ والذكاء.

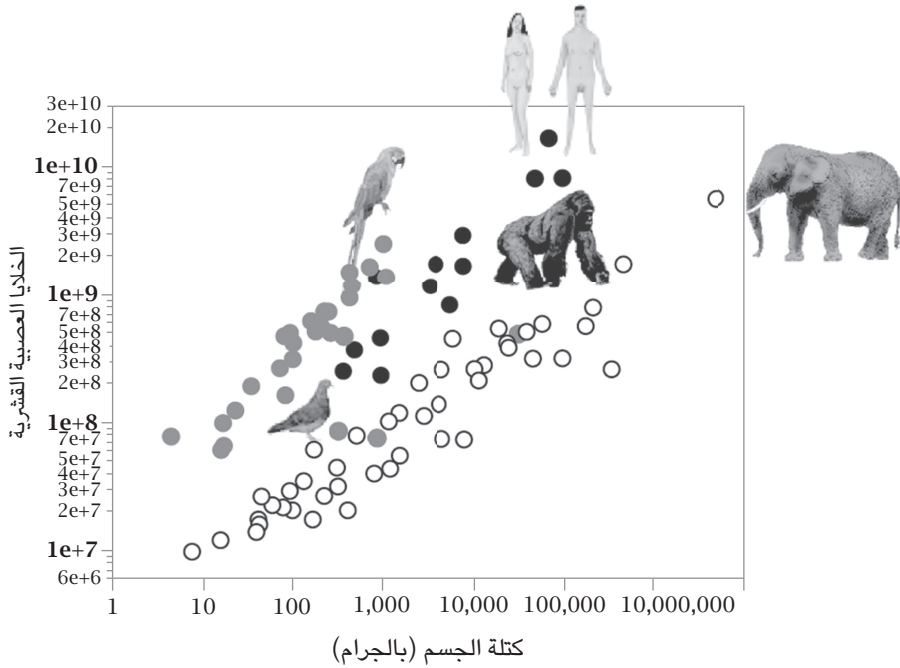
ولكن الحجم ليس كل شيء. فالأفيال والحياتان تمتلك أدمغةً أكبر وعدداً أكبر من الخلايا العصبية مقارنةً بالإنسان. ومع ذلك فإن ذكاءنا يفوق ذكاء تلك الحيوانات. كيف يمكن هذا؟ أمضت عالمة التشريح العصبي المُقارن سوزانا هيركولانو-هوزيل سنواتٍ في حصر أعداد الخلايا العصبية في مناطق مختلفة من الدماغ على مستوى مجموعةٍ كبيرة من الأنواع الحيوانية. وتُشير دراساتها إلى أن طريقة توزيع الخلايا العصبية في الدماغ تختلف إلى حدٍّ كبير بين الأنواع الحيوانية. على سبيل المثال، تمتلك الأفيال دماغاً أكبر ثلاث مراتٍ من أدمغتنا؛ ولذلك لديها عددٌ أكبر من الخلايا العصبية في الدماغ مقارنةً بنا. وفي الخيخ، الذي يلعب دورًا بالغ الأهمية في التحكُّم في الحركة والوضعية، تمتلك الأفيال عددًا أكبر بكثيرٍ من الخلايا العصبية (٢٥١ مليارًا) مقارنةً بالبشر (٦٩ مليارًا).<sup>13</sup> غير أن الصورة تتغير إذا فحصنا القشرة المخية. فالبشر لديهم نحو ثلاثة أضعاف عدد الخلايا العصبية (١٦ مليارًا) الموجودة لدى الأفيال (٥,٦ مليارات).<sup>14</sup> بل إن البشر يملكون خلايا عصبية في القشرة المخية أكثر من أي حيوانٍ آخر على هذا الكوكب. وبينما يحوي المخيخ لدى البشر نحو ٨٠ في المائة من الخلايا العصبية في الدماغ، فإنه يُشكل ١٠ في المائة فقط من كتلة الدماغ. من ناحيةٍ أخرى، تحتوي القشرة المخية على أقلّ من ٢٠ في المائة من جميع الخلايا العصبية، ومع ذلك تُشكّل نحو ٨٠ في المائة من كتلة الدماغ. ويرجع هذا إلى أن القشرة المخية تحتوي على خلايا عصبية أكبر، وروابط عصبية أكثر، وعدد أكبر من الخلايا الدبقية مقارنةً بالمخيخ.<sup>15</sup> ونتيجةً لذلك، تحتوي القشرة المخية على دوائر عصبية مُعقّدة بشكلٍ لا يُصدّق. وبالنظر إلى الدور المحوري للقشرة المُخية في دعم الوظائف المعرفية المُتقدمة، يبدو أن البشر في غاية الذكاء ومُتقدّمون معرفيًا نتيجةً لقشرتهم المخية المتطورة إلى حدٍّ كبير.

تشير دراسات هيركولانو-هوزيل إلى ميزتين ساعدتا البشر على امتلاك أكبر عددٍ من الخلايا العصبية في القشرة المخية.<sup>16</sup> الأولى أننا ننتمي إلى الرئيسيات. وكثافة تعبئة الخلايا العصبية في القشرة المخية أعلى كثيرًا لدى الرئيسيات عنها لدى الثدييات الأخرى. فالشمبانزي، الذي هو أصغر حجمًا بكثيرٍ من الفيلة، لديه نفس العدد تقريبًا من الخلايا العصبية القشرية (٦ مليارات مقارنةً بـ ٥,٦ مليارات). كما أن إنسان الغاب والغوريلا، الأصغر حجمًا بكثيرٍ من الفيلة، لديهما عدد أكبر من الخلايا العصبية القشرية (٩ مليارات). ومن ثمّ، يبدو أن الرئيسيات قد وجدت طريقة فعّالة لتعبئة عدد أكبر

## التفكير المجرد والقشرة المخية الحديثة

بكثير من الخلايا العصبية في القشرة المخية مقارنةً بالمجموعات الحيوانية الأخرى في أثناء التطور.

الميزة الثانية هي أننا نمتلك الدماغ الأكبر بين جميع الرئيسيات. وهذا الدماغ الكبير الحجم، مُقترناً بتلك الخلايا العصبية القشرية المضغوطة للغاية، يسمح لنا بامتلاك أكبر عددٍ من الخلايا العصبية في القشرة المخية (١٦ ملياً) مقارنةً بأي حيوان على وجه الأرض (انظر الشكل ٨-٥).



شكل ٨-٥: كتلة الجسم في مقابل عدد الخلايا العصبية في القشرة المخية لدى الثدييات أو الدماغ الانتهائي لدى الطيور. تختلف قاعدة التدرُّج لدالة القوة التي تربط كتلة الجسم بعدد الخلايا العصبية القشرية عبر مجموعات الحيوانات. تُشير الدوائر السوداء والمفتوحة والرمادية إلى أنواع الرئيسيات والثدييات من غير الرئيسيات والطيور على الترتيب. الشكل منقول بإذنٍ من سوزانا هيركولانو-هوزيل، من مقال بعنوان «تغيرات تاريخ الحياة تُصاحب زيادة أعداد الخلايا العصبية القشرية: إطار عمل جديد لفهم تطوُّر الدماغ البشري»، مجلة «بروجريس إن برين ريسيرش»، العدد ٢٥٠، (٢٠١٩): ١٨٣.

## توسُّع القشرة المخية الحديثة

يمكن تصنيف القشرة المخية إلى أقسامٍ تطورية مُتمايزة. وتشمل هذه الأقسام القشرة البدائية (الحُصين)، والقشرة القديمة (القشرة الشَّميَّة)، والتي تُمثِّل أقسامًا أقدم، بالإضافة إلى القشرة الحديثة، التي تُمثِّل قسمًا أحدث (تجدر الإشارة إلى أن مصطلح «القشرة المخية» يُستخدَم عادةً للإشارة إلى القشرة الحديثة، كما في الفصل الرابع). هل الحرية التي نحظى بها في التخيل باستخدام مفاهيم مجردة عالية المستوى ترجع إلى أن الحُصين (القشرة المخية البدائية) لدينا يتمتَّع بسماتٍ خاصة غائبة في الحيوانات الأخرى؟ كما بحثنا في الفصل السابع، تتشابه بنية الحُصين تشابُهًا ملحوظًا في جميع الثدييات، ومن ضمنها البشر (انظر الشكل ٧-١). كذلك، وكما ناقشنا في الفصل الأول، الضرر الذي يلحق بالحُصين لا يمسُّ معظم وظائف المخ الأخرى بخلاف الذاكرة والخيال إلى حدٍّ كبير. علاوة على ذلك، تعمل إصابات الحُصين على تغيير محتوى العقل في حالة الشرود من أفكار واضحة ومُتقطعة إلى أخرى دلالية ومجردة.<sup>17</sup> ومن ثمَّ، فمن غير المُرجَّح أن تكون طبيعة الحُصين البشري المميزة وراء القدرة البشرية الفريدة على التخيل باستخدام المفاهيم المجردة العالية المستوى.

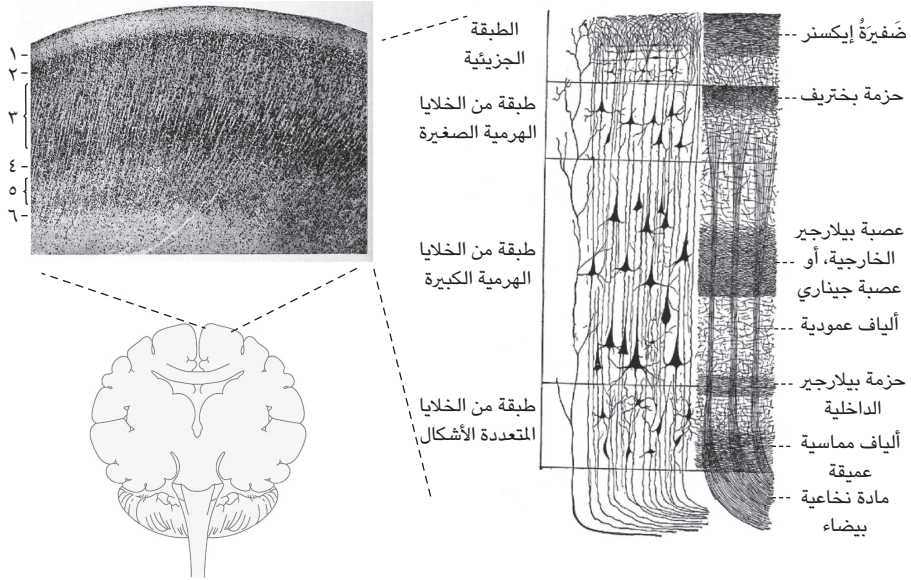
من أبرز الفروق بين أدمغة البشر وأدمغة الحيوانات الأخرى هو الحجم النسبي للقشرة المخية الحديثة. تشكل مساحة سطح الحُصين ما بين ٣٠ و ٤٠ في المائة من إجمالي مساحة سطح القشرة المخية لدى الفئران، ولكنها لا تُشكِّل سوى ١ في المائة لدى البشر. ويرجع هذا إلى أن القشرة المخية الحديثة اتَّسعت إلى حدٍّ كبير لدى الرئيسيات، وخاصةً البشر. فقد تطوَّرت الرئيسيات منذ أكثر من ٦٠ مليون سنة؛ وتطوَّرت القردة العليا من القردة الأفريقية منذ أكثر من ٣٠ مليون سنة؛ وتباعدت القردة العليا عن قردة الجبَّون منذ أكثر من ٢٠ مليون سنة؛ وانفصل البشر (أشباه البشر) وقردة الشمبانزي عن آخر أسلافهم المُشتركين منذ ٦ إلى ٨ ملايين سنة.<sup>18</sup> ولم تنمُّ أدمغة أسلافنا (أشباه البشر) كثيرًا لبضعة ملايين من السنين بعد الانفصال عن الشمبانزي. غير أن دماغ البشر اتَّسع توسُّعًا هائلًا، من نحو ٣٥٠ جرامًا إلى ١٣٠٠-١٤٠٠ جرام، خلال المليونين إلى الثلاثة ملايين سنة الماضية. وهذا يُعدُّ نموًّا سريعًا على نحوٍ غير عادي في المقياس الزمني الجيولوجي. فثلاثة ملايين سنة لا تُمثِّل إلا ٥ في المائة من تاريخ تطوُّر الرئيسيات، ولكن حجم أدمغة البشر تضاعف أربع مراتٍ خلال هذه الفترة القصيرة نسبيًّا.<sup>19</sup> ويرجع هذا النموُّ إلى حدٍّ كبير إلى توسُّع القشرة المخية الحديثة، التي تشغل نحو ٨٠ في المائة من حجم الدماغ

البشري. وكانت الثدييات الأولى تمتلك قشرةً مخيَّةً حديثةً ضئيلةً ونحو عشرين منطقة قشرية متمايضة، ولكن البشر في الوقت الحاضر لديهم نحو مائتي منطقة قشرية حديثة.<sup>20</sup> وهذا يُشير إلى أن التوسُّع السريع للقشرة المخيَّة الحديثة كان القوة الدافعة الأساسية للتخصُّص المعرفي البشري.

وعلى الرغم من أن حجم القشرة المخية الحديثة يتباين تبايناً واسعاً بين الثدييات، فإن بنية الدوائر العصبية الأساسية مُتشابهة إلى حدٍّ كبير في جميع مناطق القشرة المخية الحديثة لدى الثدييات (انظر الشكل ٨-٦). وتدعم هذه الدوائر العصبية المُشتركة الخاصة بالقشرة المخية الحديثة مجموعة كبيرة من وظائف الدماغ مثل البصر والسمع وإحساس اللمس والتحكُّم في الحركة وفهم اللغة والتفكير. وهذا يُشير إلى أن البنية المُشتركة للدوائر العصبية الخاصة بالقشرة المخية الحديثة هي وحدة معالجة فعَّالة مُتعددة الأغراض يمكن استخدامها بمرونة لمجموعة متنوِّعة من الأغراض. وفي هذا الصدد، أوضح برادلي شلاجار ودينيس أوريلي أن شريطاً من القشرة البصرية (الضرورية للرؤية) مزروغاً في القشرة الحسيَّة الجسدية (الضرورية لإحساس اللمس) في الجرذان الحديثة الولادة يتطوَّر إلى قشرة حسيَّة جسدية وظيفية.<sup>21</sup> وهكذا، يظلُّ هناك احتمال أن القشرة المخية الحديثة البشرية تتمتَّع بِسِماتٍ فريدة، مثل وجود خلايا عصبية متخصصة تساهم في قدراتنا المعرفية المتقدمة، إلا أن الاحتمال الأرجح أن يكون السبب في تطوُّر القشرة الحديثة البشرية هو تكرار الدوائر العصبية الموجودة وليس اختراع أخرى جديدة. تنظم بعض الجينات نشاط جيناتٍ غيرها. وبعضها يُنشِّط أو يوقِف نشاط جيناتٍ أخرى في أوقاتٍ مُحددة أثناء نموِّ الدماغ. ويمكن أن تؤدي الطفرات في هذه الجينات إلى تغييراتٍ جذرية في التنظيم العام للدماغ. ربما كان الضغط التطوُّري خلال الثلاثة ملايين سنة الماضية لصالح اختيار الطفرات التي وسَّعت القشرة الحديثة من خلال تعزيز تكرار الدوائر العصبية القشرية الحديثة المُشتركة.

ولكن يجب أن نضع في اعتبارنا أن كِبَر حجم الدماغ له ثمن. إنه يمنحك المزيد من قوة المعالجة، ولكنه يحتاج إلى المزيد من الطاقة لصيانتته، وهو أمر إشكالي بالنظر إلى أن الدماغ عضو مُكلف من الناحية الأيضية. ووفقاً لإحدى النظريات المؤثرة، وهي فرضية الأنسجة المُكلفة، حلَّ البشر هذه المشكلة من خلال اتباع نظامٍ غذائيٍ عالي الجودة ومن ثمَّ تقليل حجم عضوٍ آخر يحتاج إلى طاقة، وهو الأمعاء.<sup>22</sup> يتَّفَق علماء كثيرون على أن نظاماً غذائياً عالي الجودة أو زيادة كفاءة البحث عن الطعام ربما ساعدا في زيادة

## الدماغ المُبتكر



شكل ٦-٨: التنظيم سُداسي الطبقات للقشرة المخية الحديثة. المقطع العلوي الأيسر مستنسخ من كوربينيان برودمان، «ملف: التنظيم الشعاعي للطبقات التكتونية في القشرة المخية لجنين بشري عمره ثمانية أشهر (كيه برودمان، ١٩٠٩، ص ٢٤، الشكل ٣)»، jpg، ويكيبيديا كومنز، جرى التحديث في ٢٣ يناير ٢٠٢٠ [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Radial\\_organization\\_of\\_tectogenetic\\_layers\\_in\\_cerebral\\_cortex,\\_human\\_fetus\\_8\\_months\\_\(K.\\_Brodmann,\\_1909,\\_p.\\_24,\\_Fig.\\_3\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Radial_organization_of_tectogenetic_layers_in_cerebral_cortex,_human_fetus_8_months_(K._Brodmann,_1909,_p._24,_Fig._3).jpg)؛ المقطع الأيمن مستنسخ من هنري في كارتر، ملف: Gray754.png، ويكيبيديا كومنز، جرى التحديث في ٢٣ يناير ٢٠٠٧ <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gray754.png>

حجم الدماغ، ولكنهم يختلفون حول كيفية تحقُّق ذلك بالضبط. ووفقاً لإحدى الفرضيات المؤثرة، فإن استخدام النار (أي الطهي) أدَّى إلى زيادة محتوى السعرات الحرارية الموجود في الطعام.<sup>23</sup> غير أن حجم الدماغ ازداد زيادةً مُطَّردة في سلالة أشباه البشر على مدى الثلاثة ملايين سنة الماضية أو نحو ذلك، في حين أن أقدم الأدلة المُتاحة على استخدام النار تُرجع تاريخه إلى مليون سنة فقط. ومن غير الواضح أيضاً ما إذا كان الطهي يُعزِّز بقدر كبير من توافر السعرات الحرارية في اللحم.<sup>24</sup> ومن ثَمَّ، فإن القوة الدافعة الدقيقة لتوسُّع القشرة المخية الحديثة في سلالة أشباه البشر لا تزال بحاجة إلى توضيح.

## حوار الحُصين والقشرة المخية الحديثة

لا يعمل الحُصين والقشرة المخية الحديثة أحدهما بمعزل عن الآخر، بل يتفاعلان عن كثب. يُعد الحُصين من بين أرقى قشرات الارتباط، ويقع بعيدًا عن القشريتين الحسيّة والحركية الأوليين. يتفاعل الحُصين مع العالم الخارجي في المقام الأول من خلال تفاعلاته مع القشرة المخية الحديثة. ولذلك، فمحتوى الذاكرة والخيال الذي يتعامل معه الحُصين لا بد أن يتحدّد من خلال المعلومات التي توفرها القشرة المخية الحديثة. لذا من المنطقي أن يكون توسع القشرة المخية الحديثة قد أدى إلى ارتقاء القدرة المعرفية بحيث أصبح البشر قادرين على التخيل في المجالات المكانية وغير المكانية، من ضمنها تلك التي تتعامل مع المفاهيم المجردة العالية المستوى.

فيما يلي ملخص لأفكاري حول كيفية اكتساب البشر للقدرة على التخيل بحرية باستخدام المفاهيم المجردة العالية المستوى. لقد تطوّرت وظيفة التخيل في الحُصين؛ أي وظيفة المحاكاة والاختيار، لدى الثدييات البرية المتنقلة لتلبية الحاجة إلى تمثيل طرق التنقل المثلى بين نقطتين عشوائيتين في منطقة ما. بعد ذلك اتّسع محتوى الخيال من مسارات مكانية إلى وقائع عامة مع توسع القشرة المخية الحديثة. وعلى وجه الخصوص، سمح التوسع الهائل للقشرة المخية الحديثة للدماغ البشري بالتفكير والتخيل باستخدام مفاهيم مجردة عالية المستوى (التفكير الرمزي). وأدى هذا إلى ابتكارات ثقافية وتكنولوجية من ضمنها تنظيم مجتمعات كبيرة.<sup>25</sup> ومن أبرز ما يُميز تطوّر الدماغ فيما يتّصل بالتفكير المجرد قدرته اللغوية. فاللغة تسمح للبشر بالتعبير عن الأفكار المجردة مثل النظريات والمشاعر. وسرّعت اللغات المكتوبة، على وجه الخصوص، وتيرة الابتكار من خلال تسهيل تراكم المعرفة (انظر الشكل ١). ومن المحتمل أن هذه العواقب المترتبة على التفكير المجرد العالي المستوى قد تأزرت وعملت على تسريع الابتكارات التي أدّت إلى حضارات إنسانية غير مسبوقة في تاريخ الحياة على الأرض.

خلاصة القول، ربما كان الابتكار البشري نتيجة لاكتساب القدرة على التجريد العالي المستوى بسبب توسّع القشرة المخية الحديثة. وإضافة هذه القدرة إلى وظيفة الخيال الموجودة بالفعل، والتي تشترك فيها جميع الثدييات، سمحت للبشر بأن يكونوا مُبتكرين حقًا. ولكن أي جانب من جوانب التوسع القشري الحديث هو الأهم للتجريد العالي المستوى؟ سنستكشف هذه المسألة في الفصول التالية.



## الفصل التاسع

# القشرة الجبهية الأمامية

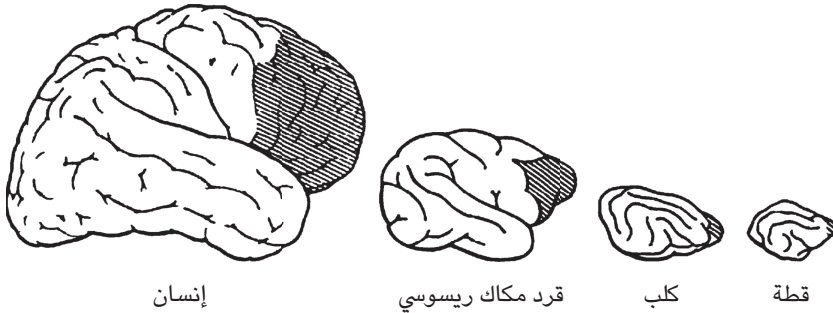
على افتراض أن قدرة الإنسان على التجريد العالي المستوى ترجع إلى توسُّع القشرة المخية الحديثة، فما هي الجوانب من القشرة المخية الحديثة البشرية التي تُعتبر جوهريةً لهذه القدرة؟ هل تتميز بأنواع خاصة من الخلايا العصبية أو دوائر عصبية خاصة؟ هل هناك منطقة مُميزة في القشرة المخية الحديثة البشرية غائبة في الحيوانات الأخرى؟ أم أن القدرة على الإبداع تنشأ من تنظيمها العام؟ ليس لدينا إجابات واضحة عن هذه الأسئلة، على الرغم من الاعتقاد السائد بأن الوظائف الدماغية العليا هي نتاج لخصائص ناشئة للدوائر العصبية وليس لخصائص الخلايا العصبية الفردية. من الأسباب الرئيسة لجهلنا بهذا الأمر هو غياب نموذج حيواني مُناسب. لقد عزَّزت الدراسات التي تستخدم الحيوانات بقدْرٍ كبير من فهمنا للأسس العصبية للذاكرة والتخيُّل. بل إن فهمنا للآليات العصبية الأساسية لمُعظم وظائف الدماغ يُعزى إلى حدٍّ كبير إلى الدراسات التي أُجريت على الحيوانات. بالطبع لا ينسحب هذا على وظائف الدماغ التي ينفرد بها البشر، مثل مهارات الإدراك المُجرد العليا. ولكننا لا نفتقر إلى الأدلة في هذا الصدد. وهنا سندرُس بعضاً من هذه الأدلة كنماذج بدلاً من استعراضها جميعاً باستفاضة. سندرُس ثلاثة أدلة: واحداً مُستمدداً من أبحاث علم الأعصاب (في هذا الفصل)، وآخر مُستمدداً من الأبحاث في علم تطور الإنسان القديم (في الفصل العاشر)، والأخير مُستمددٌ من نمذجة الشبكات العصبية (في الفصل الحادي عشر).

## الوظيفة التنفيذية

أي بنية دماغية يمكن لعلماء الأعصاب أن يقولوا إنها من المرجَّح أن تضطلع بدورٍ حاسمٍ في الإدراك المُجرد العالي المستوى لدى البشر؟ إن أغلب علماء الأعصاب سوف يتردَّدون في

## الدماغ المُبتكر

الرهان على وجود بنيةٍ دماغيةٍ واحدة. ولكن إذا ما أُجبروا على فعل ذلك، فربما يختار عدد كبير منهم القشرة الجبهية الأمامية، أو الجزء الأمامي من القشرة المخية (انظر الشكل ٩-١). تقع بجوار القشرة الجبهية الأمامية قشرتان حركيتان: القشرة الأمام حركية والقشرة الحركية الإضافية، المعروف أنهما تلعبان دورًا حاسمًا في التخطيط للحركة. وترتبط هاتان القشرتان بقوةٍ بالقشرة الحركية الأولية، التي تُشرف على التحكُّم المباشر في الحركة الإرادية. وكما قد يُخمن المرء من هذا التنظيم، فإن القشرة الجبهية الأمامية تُشكِّل بنيةً دماغيةً مهمّةً للتحكُّم في السلوك. غير أن القشرة الجبهية الأمامية لا تدخل بصورةٍ مباشرةٍ في التحكُّم في حركةٍ مُعيّنة في حدِّ ذاتها. بل تتحكَّم القشرة الجبهية الأمامية في السلوك بمرونةٍ وفقًا للأهداف الداخلية والسياقات السلوكية.



شكل ٩-١: القشرة الجبهية الأمامية موضحة بالتظليل في العديد من الفصائل الحيوانية المختلفة. الشكل مستنسخ بإذنٍ من برونو دويوك، «الطبقات التطورية للدماغ البشري»، الدماغ من الأعلى إلى الأسفل، تاريخ زيارة الرابط ١١ ديسمبر، ٢٠٢٢، [https://thebrain.mcgill.ca/flash/a/a\\_05/a\\_05\\_cr/a\\_05\\_cr\\_her/a\\_05\\_cr\\_her.html](https://thebrain.mcgill.ca/flash/a/a_05/a_05_cr/a_05_cr_her/a_05_cr_her.html)

قد تُعزز القشرة الجبهية الأمامية سلوكًا معيّنًا في ظرفٍ ما، ولكنها تُنبطه في ظرفٍ آخر. على سبيل المثال، في نيويورك، يجب أن تنظر جهة اليسار قبل عبور الشارع للتحقق من وجود مركبات عابرة. ولكن، في لندن، يجب أن تنظر جهة اليمين قبل النزول من فوق الرصيف. ولذلك، عند الوجود في لندن، يجب على سكان نيويورك كبت سلوكهم المعتاد المُتمثل في النظر إلى اليسار للتحقق من وجود سيارات قبل عبور الشارع. يوضح هذا المثال البسيط أهمية التحكُّم في السلوك المعتمد على السياق في حياتنا اليومية.

إن التحكم في السلوك بمرونة وفقاً لهدفٍ داخلي ليس بالمهمة السهلة في عالمٍ دائمٍ التغيير. فالأمر يتطلب مجموعةً متنوعةً من الوظائف حتى نتمكن من القيام بذلك. وليس من المستغرب أن الدراسات السابقة قد وجدت أن القشرة الجبهية الأمامية تؤدي مجموعةً كبيرة من الوظائف المعرفية، ومنها: الذاكرة العاملة، والتفكير المنطقي، والتخطيط، واتخاذ القرار، والتحكم في المشاعر؛ ويُعد مصطلح «الوظائف التنفيذية» وصفاً جماعياً لوظائف القشرة الجبهية الأمامية.

تعمل القشرة الجبهية الأمامية على التحكم في وظائف أخرى في الدماغ والتنسيق بينها بحيث تخدم سلوكياتنا، أو كبتها، الدور المتمثل في تحقيق أهدافنا الداخلية. ولولا القشرة الجبهية الأمامية، لاستحال أن تعمل ليل نهار لتحقيق هدفك الطويل الأجل، مثل الحصول على درجة الدكتوراه في علم الأعصاب في غضون خمس سنوات. وكما قد تكون خمنت، فإن القشرة الجبهية الأمامية مُتطورة بشكلٍ جيد في الرئيسيات، وخاصة في البشر.<sup>1</sup> ويمكن الزعم بأن القشرة الجبهية الأمامية تُميز البشر عن الحيوانات الأخرى. وعندما ننظر إلى سلوكيات الأشخاص الذين تضررت قشرتهم الجبهية الأمامية بطريقةٍ ما، يُصبح هذا واضحاً تماماً.

## فينياس جيج

كان فينياس جيج كبير العمّال في طاقم عمل يُمهد الطريق لشقّ مسار للسكة الحديدية في عام ١٨٤٨ في فيرمونت. كان في الخامسة والعشرين من عمره في ذلك الوقت. كان العمّال يُفجرون الصخور عن طريق حفر حفرة عميقة في الصخر، وإضافة مسحوق مُنفجر، ثم تعبئة مادة خاملة، مثل الرمل، في الحفرة باستخدام قضيب دك حديدي. وفي يوم ١٣ سبتمبر، انفجر المسحوق بسبب شرارة اندلعت بين قضيب الدك الحديدي والصخرة ربما لأن جيج أغفل عن غير قصدٍ إضافة الرمل. مرّ قضيب الدك الحديدي، الذي يزيد طوله عن ثلاثة أقدام ونصف القدم بقليل، عبر رأس جيج وهبط على بُعد أكثر من ثمانين قدماً. ونجا من الحادث بأعجوبة، ومما يثير الدهشة أنه تمكن من التحدّث والمشى بعد بضع دقائق. فما الآثار التي ترتبت على هذا الحادث إذن؟ لم يُواجه جيج أي مشكلةٍ في الرؤية أو السمع أو التحدّث أو الحركة. لقد أدى القضيب الحديدي إلى إتلاف المنطقة الأمامية من الدماغ، وهي القشرة الجبهية الأمامية (انظر الشكل ٩-٢)، مما يُشير إلى أن هذه المنطقة من الدماغ ليست ضروريةً لأداء وظائف الدماغ مثل دعم الحياة، أو الإحساس، أو التحكم في الحركة، أو اللغة.

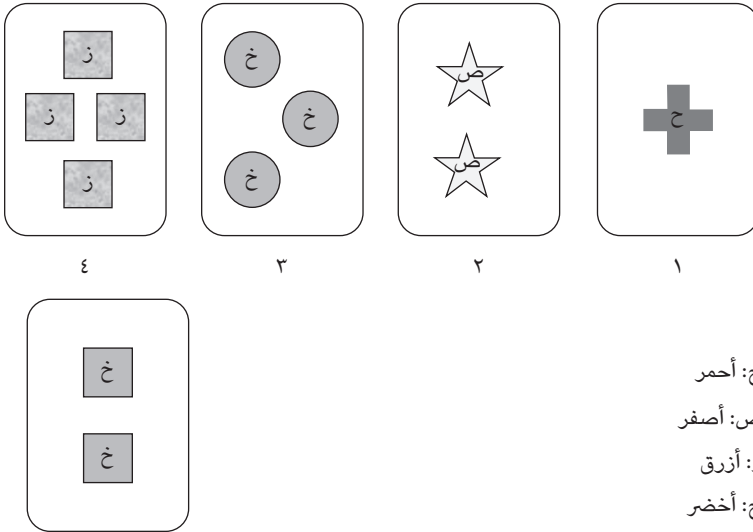


يبدو أن الاتزان أو التوازن، إذا جاز التعبير، بين قدراته الفكرية ونزعاته الحيوانية قد دُمّر. فقد أصبح مُتقلّب المزاج، وقحاً، وينغمس أحياناً في أشد أشكال البذاءة التي لم تكن من عاداته من قبل، ولا يُظهِر سوى القليل من الاحترام لزملائه، ولا يطبق القيود أو النصيحة عندما تتعارض مع رغباته، وشديد العناد في بعض الأحيان، ولكنه مُتقلب ومتردّد، ويضع كثيراً من الخطط المستقبلية للعمل، سرعان ما يتخلى عن تنفيذها بمجرد ترتيبها ... إنه طفل في قدراته العقلية ومظاهرها السلوكية، بينما يملك الرغبات والدوافع الحيوانية لرجل قوي. قبل إصابته، على الرغم من عدم ارتياده المدارس، كان يتمتع بعقل متزن، وكان من يعرفونه يرونه رجل أعمال ماهراً وذكيّاً، وفي غاية النشاط والمثابرة في تنفيذ جميع خططه الخاصة بالعمل. وفي هذا الصدد، تغبّر عقله تغبّيراً جذريّاً حاسماً للغاية لدرجة دفعت أصدقاءه ومعارفه للقول إنه «لم يعد جيح».<sup>2</sup>

## المثابرة والمرونة

لتحقيق هدفٍ طويل الأمد، يجب أن يكون المرء مثابراً ومرناً في نفس الوقت، وليس «عنيدياً ومُتقلّباً في نفس الوقت»، على حدّ وصف هارلو لجيخ. لنفترض أنك بحاجة إلى شراء بقالة لإعداد العشاء لصديق. تتمثل خُطتك في شراء شرائح لحم وثوم؛ لأن الطبق المُفضّل لصديقك هو شرائح اللحم بالثوم. تصل إلى المتجر وتجد العديد من الأطعمة اللذيذة الجاذبة — مثل الخبز والمعكرونة والأسماك والفواكه — في طريقك إلى قسم اللحوم. يجب أن تكون مثابراً وتتجاهل كل هذه المُثيرات المُشتتة للانتباه وتُحقّق هدفك الأصلي (ألا وهو الحصول على مكوّنات طبق شرائح اللحم بالثوم). لن يكون هذا صعباً على الأشخاص الطبيعيين، ولكنه سيكون صعباً على أولئك الذين يعيشون بتلفٍ في القشرة الجبهية الأمامية؛ لأن المُثيرات المتداخلة مع تركيزهم تُشتت انتباههم بسهولة. وفي هذا المثال، قد يشترون أي سلعٍ تلفت انتباههم، مثل السلمون والمعكرونة، بدلاً من شرائح اللحم والثوم. بل إن البعض منهم قد لا يتمكن حتى من الوصول إلى المتجر من الأساس. فقد يستقلّون حافلة عشوائية تصادف أن توقّفت أمامهم في طريقهم إلى المتجر. وفي هذا المثال توضيح لأهمية القشرة الجبهية الأمامية في منحنا روح المثابرة لتحقيق هدفٍ طويل الأمد.

## الدماغ المُبتَكِر



شكل ٩-٣: اختبار ويسكونسن لتصنيف البطاقات.

إن القشرة الجبهية الأمامية ليست مهمة فقط للمثابرة، وإنما للمرونة أيضًا. فإذا لم يُعد سلوك بعينه فعلاً في تحقيق هدفك الحالي، فعليك التحول إلى سلوكٍ من نوع آخر. فإذا تمسكت بسلوكٍ لم يُعد فعلاً، فسوف تُعتبر عنيداً وليس مثابراً. ويواجه الأشخاص المُصابون بتلف القشرة الجبهية الأمامية صعوبةً في تغيير سلوكهم وفقاً للتغيرات في البيئة. ويمكن اختبار ذلك باستخدام اختبار ويسكونسن لتصنيف البطاقات، وهو اختبار نفسي عصبي يُستخدم كثيراً لقياس السلوكيات النمطية المتكررة (الإصرار على السلوك الخاطيء). في هذه المهمة، يجب على الشخص تصنيف بطاقة مُثير وفقاً لقاعدة خفية تتغير بمرور الوقت. يوضح الشكل (٩-٣) نموذجاً لشاشة كمبيوتر توضح المهمة. يجب على الشخص أن يُطابق نموذج البطاقة المعروضة في الزاوية اليمنى السفلية من الشاشة (البطاقة ذات المُربعين الأخضرين) مع إحدى البطاقات الأربع الموجودة في أعلى الشاشة. من القواعد المحتملة لونها وكمية وشكل الأشكال الموجودة في البطاقة. ولا يُكشَف عن القاعدة الخفية للشخص. ولا يجري إخباره إلا بكون مطابقته صحيحة أم خاطئة. في المثال الموضح، قد تكون البطاقة الثانية (القاعدة المخفية: العدد) أو البطاقة الثالثة (القاعدة المخفية: اللون)، أو الرابعة (القاعدة المخفية: الشكل) هي البطاقة الصحيحة. يُسارع

الأشخاص الذين لا يُعانون من تَلَف في القشرة الجبهية الأمامية إلى تغيير استراتيجيتهم في المطابقة بناءً على الملاحظات (أي «خطأ» المطابقة) التي يتلقونها عندما تتغير القاعدة المختفية الحالية. ولكن بعد الحصول على هذه الملاحظات (أي عندما تتغير القاعدة المختفية)، عادة ما يتمسك الأشخاص الذين يُعانون من تَلَف في القشرة الجبهية الأمامية باستراتيجية المطابقة القديمة التي لم تُعد تفرز تطابقًا صحيحًا.

### القشرة الجبهية الأمامية والتجريد

يُعد التجريد عنصرًا أساسيًا في توجيه السلوك وفقًا لهدف داخلي بعيد المدى، وتغيير السلوك بمرونة وفقًا لقواعد مخفية، والتفكير والتخطيط، وكل هذا من وظائف القشرة الجبهية الأمامية. في الواقع، يُظهِر المرضى الذين يُعانون من تَلَف في القشرة الجبهية الأمامية قصورًا في قدرتهم على التجريد في العديد من الاختبارات السريرية.<sup>3</sup> على سبيل المثال، قد يواجه المرضى مشكلةً في فهم عبارة بمعناها المجرد عند تكليفهم بمهمة تفسير قول مأثور. فيمكن لهؤلاء المرضى تفسير القول المأثور «روما لم تُشيد بين عشية وضحاها»، بالمعنى الحرفي (على سبيل المثال، الوقت المطلوب لإتمام البنية التحتية للإمبراطورية الرومانية)، وليس بالمعنى المجرد (الوقت المطلوب لتحقيق إنجازات عظيمة).<sup>4</sup>

وتوافقًا مع هذه النتائج من الأبحاث العصبية النفسية، توصلت الدراسات الفسيولوجية التي أُجريت على القشرة الجبهية إلى وجود نشاطٍ عصبي مُرتبط بالتجريد حتى في الحيوانات. ويُشبهه علماء وظائف الأعصاب الذين يدرسون القشرة الجبهية الأمامية بالمتجر الشامل على سبيل المزاح؛ بمعنى أنك تستطيع عادة العثور على أي إشاراتٍ عصبية تبحث عنها إذا أدخلت فيها قطبًا كهربائيًا دقيقًا. ولكن لماذا؟ كما رأينا مع فينياس جيج، فالقشرة الجبهية الأمامية ليست مُتخصّصة في معالجة إشارات حسّية أو حركية محددة. بل إنها تمثل المعلومات اللازمة لإكمال مهمة معينة بنجاح. وتختلف هذه المعلومات على نطاقٍ واسع تبعًا للهدف الحالي ولا تشمل فقط إشاراتٍ حسّية حركية مُحدّدة، بل تشمل أيضًا المفاهيم المجردة، مثل قواعد المهمة، اللازمة لتحقيق الهدف. بعبارةٍ أخرى، يبدو أن القشرة الجبهية الأمامية هي وحدة تحكّم للأغراض العامة تُمثل على نحوٍ مرن وانتقائي المعلومات الأساسية للتحكّم في سلوكٍ موجّه نحو هدف مُعين. ومن ثم، فإنك إذا دَرَبت حيوانًا على أداء مهمة سلوكية مُعينة، فمن المُحتمل أن تجد إشاراتٍ عصبية مادية وأخرى مجردة ضرورية لأداء المهمة في القشرة الجبهية الأمامية.

أظهرت دراسات عديدة وجود أشكالٍ متنوعة من النشاط العصبي المرتبط بالتجريد في القشرة الجبهية الأمامية للحيوانات. وفي هذا المقام، سنتناول تمثيل الإدراك العددي في القشرة الجبهية الأمامية للقرود على سبيل المثال. العديدة، أو عدد العناصر في مجموعة ما، هي فئة مجردة مُستقلة عن الخصائص المادية للعناصر. على سبيل المثال، «الثلاثية» هي مفهوم مجرد ينطبق على أي مجموعةٍ تحتوي على ثلاثة عناصر بغض النظر عن الشكل المصوغة عليه. وقد وجدت الدراسات العصبية الفسيولوجية التي أُجريت على القرود خلايا عصبية في القشرة الجبهية الأمامية مضبوطة بصورة انتقائية على فهم عدد العناصر. في إحدى الدراسات، درّب أندرياس نيدر قرود المكاك الريسوسي على التمييز بين عدد العناصر المعروضة على نحوٍ متسلسل للحصول على مكافأة. عُرضت العناصر في شكلين مختلفين: نبضات صوتية (سمعية) أو نقاط سوداء (بصرية). وجد نيدر خلايا عصبية في القشرة الجبهية الأمامية مضبوطة على تمييز عدد العناصر بغض النظر عن شكل المثريات. تستجيب كل خلية عصبية تُشفر الأعداد استجابةً تفضيلية لرقم معين بحيث يمكن لمجموعة من الخلايا العصبية في القشرة الجبهية الأمامية أن تقدم معلومات لا لبس فيها حول عدد المثريات المتعاقبة المعروضة أمام القرود.<sup>5</sup> وفي هذه الدراسة وغيرها من الدراسات ذات الصلة بيان واضح أن القشرة الجبهية الأمامية للقرود تمثل الإدراك العددي، وهي فئة مجردة تتجاوز الخصائص المادية للعناصر.<sup>6</sup>

وقد اكتُشف وجود نشاط عصبي مرتبط بالمفاهيم المجردة، مثل قواعد المهام، وبنية المهام، والسياق السلوكي، حتى في القشرة الجبهية الأمامية لدى الجرذان والفئران.<sup>7</sup> إن القشرة الجبهية الأمامية لدى القوارض ضئيلة الحجم مقارنةً بالبشر. وليس الحجم المُطلق فحسب، وإنما أيضًا الحجم بالنسبة إلى الدماغ ككل أصغر كثيرًا لدى القوارض من الإنسان. ومع هذا، فالقوارض تظهر مستويات كبيرة من التحكم السلوكي المُتطور اللازم لتحقيق هدفٍ بعيد الأمد. على سبيل المثال، تُضعف الأضرار التي تلحق بالقشرة الجبهية الأمامية المرونة في نسخة القوارض من اختبار ويسكونسن لتصنيف البطاقات.<sup>8</sup> وتُظهر هذه الدراسات التي أُجريت على الحيوانات بوضوح أن القشرة الجبهية الأمامية لدى القوارض، التي لم تتطور كثيرًا مقارنةً بالقشرة الجبهية الأمامية لدى البشر، تدعم التحكم المرن في السلوك وتُمثل المفاهيم المجردة. وهكذا يكون من الوارد أن القشرة الجبهية الأمامية المُتطورة لدى البشر قد تُمثل مفاهيم مجردة أرقى كثيرًا من تلك الموجودة لدى الحيوانات.

أحد مجالات التحكُّم في السلوك حيث يكون التجريد العالي المستوى ضروريًا هو السلوك الاجتماعي البشري. كان سلوك جيج بعد الحادث المأساوي الذي تعرَّض له بعيدًا كل البُعد عن السلوك المتوقع من شخصٍ بالغٍ طبيعي. سيكون من الصعب للغاية على رجلٍ يوصف بأنه «طفل في قدراته العقلية» أن يتصرف على نحوٍ لائقٍ في مجتمعٍ بشريٍ مُعقد. فسلوكياتنا الاجتماعية هي نتاجٍ لاعتباراتٍ متأنيةٍ لأعرافٍ اجتماعيةٍ دقيقةٍ تتباين على نطاقٍ واسعٍ وفقًا للسياقات الاجتماعية؛ وهذا ما يجعل التفكير المجرد ضروريًا. على سبيل المثال، عادة ما نستخدم مفاهيم مجردة عالية المستوى مثل النظام العام، والوقاحة، والسمعة الاجتماعية لاتخاذ القرار بشأن ما ننتهجه من سلوكياتٍ يوميةٍ. وربما تدين القدرة البشرية على التفكير المجرد العالي المستوى بالكثير للضغوط التطورية، من بين أمورٍ أخرى، في تشكيل وتمثيل المفاهيم المجردة العالية المستوى لاكتساب تحكُّمٍ مناسبٍ في السلوك في مجتمعٍ بشريٍ مُعقد.

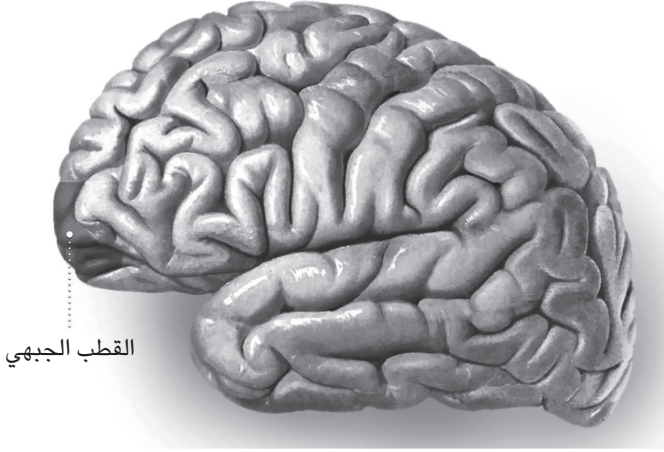
باختصار، توجد أسباب وجيهة للاشتباه في أن القشرة الجبهية الأمامية البشرية المتطورة منطقة أساسية في النظام العصبي؛ إذ تُشكل وتُمثل المفاهيم المجردة العالية المستوى. بطبيعة الحال، من المُستبعد أن يكون توسع القشرة الجبهية الأمامية مسئولًا وحده عن قُدرتنا المعززة على التفكير المجرد. فثمة تغيراتٍ أخرى في الدماغ من المُرجَّح أن تكون بالغة الأهمية في هذا الصدد. على سبيل المثال، تنشط القشرة الجدارية مع القشرة الجبهية الأمامية أثناء مهام التجريد المختلفة.<sup>9</sup> ومن ثم، فإن فهم كيفية تفاعل القشرة الجبهية الأمامية مع مناطق الدماغ الأخرى أمرٌ مهمٌ أيضًا لفهم الأساس العصبي للتجريد لدى البشر.

### القشرة الجبهية القطبية

من المسائل الأخرى المهمة تحديد أي منطقة من المناطق الفرعية بالقشرة الجبهية الأمامية تلعب الدور الأهم في التجريد. إن القشرة الجبهية الأمامية هي منطقة كبيرة تتألف من مناطق فرعية مُتعددة تؤدي وظائف مختلفة، وكيفية توزيع وظيفة التجريد عبر هذه المناطق الفرعية ليس واضحًا.

تُشير الدراسات التي تجرى بالتصوير الدماغية إلى أن الأجزاء الأمامية من القشرة الجبهية الأمامية تخدم أكثر التفكير المُجرد، بينما تخدم الأجزاء الخلفية أكثر التفكير المادي.<sup>10</sup> وإذا كان الأمر كذلك، فالدراسات المُستقبلية التي تركز على القشرة الجبهية

## الدماغ المُبتَكِر



شكل ٩-٤: القشرة الجبهية القطبية. الشكل منقول من فرانك جيلارد، «القطب الجبهي»، Radiopaedia.org. rID: 46670، تاريخ زيارة الرابط ٦ أبريل ٢٠٢٣، <https://radiopaedia.org/articles/34746> (CC-BY-NC-SA).

القطبية (انظر الشكل ٩-٤)، وهي المنطقة الأمامية القصوى من القشرة الجبهية الأمامية، قد تُقدم خيوطاً مهمّةً في سعينا إلى توضيح الأساس العصبي للابتكار البشري.

## الثورة البشرية والتغيرات الدهاغية المرتبطة بها

### الثورة البشرية

قد يساعدها النظر إلى الماضي في تخمين التغيرات الحاسمة التي طرأت على الدماغ، والتي مكّنت الإنسان العاقل من التفكير المجرد على مستوى عالٍ. وعلى وجه التحديد، قد توفر لنا مقارنة الجماعم الأحفورية بالأدلة الأثرية مؤشراً للأساس العصبي للتجريد العالي المستوى. وفي هذا الصدد، حدّدت الدراسات الأثرية مجموعةً من الابتكارات التي تميز السلوك البشري الحديث — مثل التواصل اللفظي، وتبادل السلع، وعمليات الدفن المتطورة، والتعبير الفني، والمُجتمعات المنظمة — في أوراسيا خلال العصر الحجري القديم العلوي (العصر الباليوثي)، منذ نحو أربعين إلى خمسين ألف عام. وقد عُرف هذا العصر ذات يوم باسم «الثورة البشرية»؛ بسبب الظهور المفاجئ نسبياً لمجموعة من السلوكيات البشرية الحديثة، على الرغم من أن علماء الآثار وجدوا فيما سبق شواهد متفرقة لبعض هذه الصفات.<sup>1</sup>

تشير هذه النتائج الأثرية بقوة إلى أن أسلافنا في العصر الحجري القديم العلوي في أوراسيا كانوا يتمتعون بقدرة معرفية لا تقلُّ عن قدرة البشر الحديثين. ويوضح الشكل (١٠-١) بعض لوحات العصر الحجري القديم العلوي التي اكتشفت في أوروبا. يُعد كثير من الأدوات والمنحوتات واللوحات الجدارية من هذا العصر إبداعاً فنياً حتى بالمعايير المعاصرة. فالتفكير الرمزي والمجرد من بين الوظائف المعرفية الأساسية المرتبطة بالفن. على سبيل المثال، يُعتقد أن تمثال فينوس (انظر الشكل ١٠-٢)، الذي يوجد عادةً في مواقع العصر الحجري القديم العلوي في جميع أنحاء أوراسيا، يرمز إلى الخصوبة. إن

## الدماغ المُبتكر



شكل ١٠-١: لوحات من العصر الحجري القديم العلوي (نُسخ طبق الأصل): كهف ألتاميرا (أعلى اليسار)، راميسوس: «رسومات الكهوف في كهف ألتاميرا»، موسوعة التاريخ العالمي، ٦ يناير ٢٠١٥، <http://www.worldhistory.org/image/3537/cave-painting-in-the-altamira-cave> (أعلى اليمين)، كهف لاسكو (أعلى اليمين)، بروفيسور ساكس، «رسومات الكهوف في كهف لاسكو»، موسوعة التاريخ العالمي، ٧ يناير ٢٠١٥، <http://www.worldhistory.org/image/3539/cave-painting-cave-in-lascaux/> (أسفل اليسار)، تي توماس: «رسومات الكهوف في كهف شوفيه»، موسوعة التاريخ العالمي، ١٦ يناير ٢٠١٤، <http://www.worldhistory.org/image/3539/cave-painting-cave-in-the-chauvet-cave/> (أعلى اليمين)، Patilpv25: «لوحة لوحيد القرن، كهف شوفيه (نُسخة طبق الأصل)»، موسوعة التاريخ العالمي، ١٠ فبراير ٢٠١٧، <https://www.worldhistory.org/image/6350/panel-of-the-rhinos-chauvet-cave-replica/> (CC BY-SA).

أحد الموضوعات الرائجة في الفن عبر تاريخ البشرية هو الجنس والخصوبة؛ أي فكرة الحفاظ على نوعنا. وربما يكون تمثال فينوس نسخة قديمة من دُمي الخصوبة الأفريقية الحالية، التي ترمز إلى إحدى آلهة الخصوبة.<sup>2</sup> وبصفة عامة، يحتاج الفنان إلى القدرة المعرفية لإسقاط محتواه الرمزي على صورة ذهنية مع التبديل بين وجهات نظره ووجهات



شكل ١٠-٢: تمثال فينوس ويليendorf. الشكل مستنسخ من مقال أوك بعنوان: «فينوس ويليendorf»، ويكيبيديا كومنز، جرى التحديث في ٢٩ أكتوبر ٢٠٠٦، [https://en.wikipedia.org/wiki/Venus\\_figurine/media/File:Wien\\_NHM\\_Venus\\_von\\_Willendorf.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Venus_figurine/media/File:Wien_NHM_Venus_von_Willendorf.jpg) (CC BY-SA)

نظر المتفكرين المحتملين بغرض توصيل الأفكار والمشاعر والتجارب.<sup>3</sup> ويُشير فن العصر الحجري القديم العلوي إلى قدرات أسلافنا الرائعة في التفكير الرمزي والتجريدي. يُعد دفن الحليّ دليلاً آخر على الحداثة السلوكية لأسلافنا في العصر الحجري القديم العلوي. فالقبور تُعتبر دليلاً واضحاً على وجود مُعتقداتٍ دينية، وهي سمة مميزة للسلوك البشري الحديث. ويصور الشكل (١٠-٣) عملية دفن مُتقدمة للحليّ من تلك الفترة. وعلى الرغم من أن الرأي القائل بأن المقابر لم تصبح منتشرةً ومتطورة إلا خلال العصر الحجري القديم العلوي يبدو تبسيطاً مفرطاً، فإن المقابر المعقدة والمتطورة كتلك الموضحة

في الشكل تُشير إلى أن أسلافنا من العصر الحجري القديم العلوي كانوا يفكرون فيما يحدث بعد الموت ويؤمنون بتناسُخ الأرواح مثل كثيرٍ من البشر المعاصرين.<sup>4</sup> وربما لم يتغير الوعي الروحي والتدينُّ لدى الإنسان العاقل كثيراً منذ ذلك الحين.



شكل ١٠-٣: مقبرة من العصر الحجري القديم العلوي عُثر عليها في موقع سونجير الأثري، في روسيا. الشكل مأخوذ من «المومياء ذات الشعر الأحمر»، موسوعة المومياوات، جرى التحديث في ٨ يونيو ٢٠١٣، [https://mummipedia.fandom.com/wiki/Red\\_Haired\\_Mummy](https://mummipedia.fandom.com/wiki/Red_Haired_Mummy)، (CC BY SA).

تُشير الظواهر الأثرية في العصر الحجري القديم العلوي إلى أن أسلافنا كانوا يتمتعون بقدرات معرفية متطورة، من بينها التفكير الرمزي العالي المستوى. وإذا نُقلَ طفلَ زمنياً من تلك الحقبة إلى الوقت الحاضر، لربما يكبر ليُصبح عالماً أو فناناً أو كاتباً أو سياسياً، تماماً مثل أي طفلٍ آخر في عصرنا الحالي. قارن بين الرسمين في الشكل (١٠-٤).

الرسم على اليسار هو رسم بالفحم عُثر عليه في كهف شوفيه بفرنسا، ويقدرُ عمره بنحو ثلاثين ألف عام. ويظهر في الرسم رجل برأس ثور يقبع فوق جسد امرأةٍ عارٍ يبرز فيه شكل مثلث العانة. أما الرسم الموجود على اليمين فهي لوحة لبابلو بيكاسو بعنوان المينوتور يداعب المرأة النائمة. والتشابه بين الرسمين مُذهل. فيبدو أن كليهما يمثل رغبةً راسخة في أعماق نفس الذكور («الوحش الكامن في النفس»). ولم يُكتشف كهف شوفيه



شكل ١٠-٤: الوحش الكامن في النفس. (يسارًا) رسم بالفحم عُثر عليه في كهف شوفيه، بفرنسا. المقطع مأخوذ من كلود فاليت، File:20\_TrianglePubien-AvecTêteDeBison&JambeHumaine.jpg ويكيبيديا كومنز، جرى التحديث في ٤ مارس ٢٠١٦، [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:20\\_TrianglePubienAvecT%3AAateDeBison%26JambeHumaine.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:20_TrianglePubienAvecT%3AAateDeBison%26JambeHumaine.jpg) (CC BY-SA). (يمينًا) لوحة بابلو بيكاسو المينوتور يُداعب المرأة النائمة. طباعة بالحفر الإبري، ١٩٣٣. اللوحة مستنسخة بإذن (حقوق الطبع والنشر لجمعية الفنانين في كوريا).

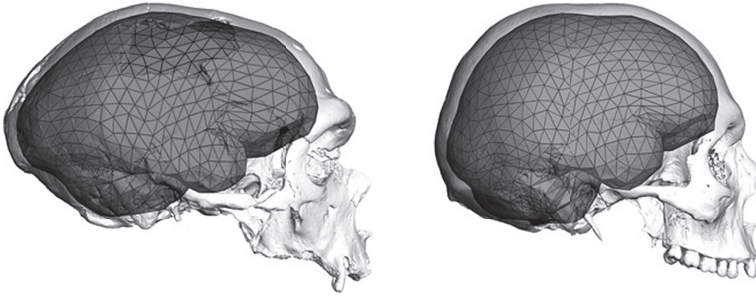
إلا بعد وفاة بيكاسو. ومن ثم، فقد صنع بيكاسو قطعته الفنية دون أن يكون على علم بوجود ذلك الرسم المُشابه. غير أن بيكاسو زار كهوف لاسكو في جنوب غرب فرنسا وشاهد لوحاتٍ جدارية مثل تلك الموضحة في الشكل (١٠-١). ويقال إن بيكاسو، الذي انبهر بهذه اللوحات، قال لمرشده: «لقد اخترعوا كل شيء»<sup>5</sup>.

## الإنسان الحديث تشریحياً

كان الاعتقاد السائد حتى أواخر ثمانينيات القرن العشرين أن الإنسان العاقل الحديث ظهر قبل أربعين إلى خمسين ألف سنة في أوراسيا (النموذج الأوروبي). وكان هذا متزامناً مع ظهور إنسان الكرومانيون (الإنسان الأوروبي الحديث الأول) واختفاء إنسان النياندرتال. كان إنسان الكرومانيون طويل القامة، وكان دماغه أكبر بنحو ثلاثين في المائة

## الدماغ المُبتكر

من دماغ الإنسان الحديث. إن جمجمة إنسان الكرومانيون والإنسان الحديث مُستديرة الشكل، بينما كانت جمجمة إنسان النياندرتال أكثر استطالة بكثير من الأمام إلى الخلف (انظر الشكل ١٠-٥). ومن غير الواضح لماذا بقي أسلافنا بينما لم يبق إنسان النياندرتال، ولكن أحد الاحتمالات أن إنسان الكرومانيون كان متفوقًا معرفيًا.<sup>6</sup> فنظرًا لأن جباههم كانت أكثر تفلطحًا، ولأن القشرة الجبهية الأمامية تُمثل منطقة دماغية بالغة الأهمية لعدد من الوظائف المعرفية المُتقدمة، كما ناقشنا في الفصل التاسع، كان من الطبيعي أن نشكّ في أن إنسان الكرومانيون كان يتمتع بقدرة معرفية مُتقدمة بسبب قشرته الجبهية الأمامية المُتطورة. وبناءً على هذه النظرية، فإن الثورة البشرية تتزامن مع توسّع القشرة الجبهية الأمامية.<sup>7</sup>



شكل ١٠-٥: الاختلافات بين جمجمة الإنسان النياندرتال والإنسان الحديث. الشكل مستنسخ من مقال سايمون نيوباور وجان-جاك هوبلين وفيليب جونز، «تطور شكل الدماغ البشري الحديث»، مجلة «ساينس أدفانسنز» المجلد ٤، العدد ١ (٢٠١٨): (CC BY-NC) eaa05961.

غير أن الاكتشافات اللاحقة تُشير إلى أن القصة ليست بهذه البساطة. فعلى سبيل المثال، كان يُعتدّ في البداية أن السجّلات الأحفورية للإنسان العاقل الحديث تشرحياً، والتي عُثِر عليها في كهوف قفزة وسخول في إسرائيل، يبلغ عمرها نحو أربعين ألف عامٍ وفقاً للنموذج الأوروبي. غير أن ثمة تقديرًا أدقّ — استند إلى طريقة انبعاث الضوء الناجم عن الحرارة (وتسمّى هذه الطريقة التأريخ بالتألق الحراري: حيث تتراكم الإلكترونات النشطة بمرور الوقت بما يتناسب مع الإشعاع الذي تلقته العينة من البيئة) في أواخر ثمانينيات القرن العشرين — أشار إلى أن السجّلات الأحفورية يبلغ عمرها نحو مائة ألف عام.<sup>8</sup> وقد دفعت الاكتشافات اللاحقة للسجّلات الأحفورية الجديدة بأصل

الإنسان العاقل الحديث تشريحياً إلى أزمنة أقدم كثيراً. فتُشير الاكتشافات الأثرية إلى أن الإنسان العاقل الحديث تشريحياً ظهر قبل مائتي ألف عام على الأقل، وأن السجلات الأحفورية للإنسان العاقل الأكثر بدائية التي عُثر عليها في أفريقيا، يعود تاريخها إلى نحو ثلاثمائة ألف عام.<sup>9</sup> وتدعم دراسات الحمض النووي أيضاً فكرة أن الإنسان الحديث تشريحياً قد ظهر في أفريقيا قبل العصر الحجري القديم العلوي بكثير.<sup>10</sup> ومن المتفق عليه في الوقت الحالي أن الإنسان العاقل الحديث تشريحياً قد ظهر في أفريقيا قبل العصر الحجري القديم العلوي بفترة طويلة وانتشر في مختلف أنحاء أوراسيا عبر آلاف السنين، ليحلَّ محلَّ البشر الأوائل الآخرين مثل إنسان النياندرتال («نظرية الخروج من أفريقيا»)<sup>11</sup>.

### أصل الحداثة السلوكية

وعلى هذا، يبدو أن هناك فارقاً زمنياً بين ظهور الإنسان الحديث تشريحياً والسلوك البشري الحديث. فما هو إذن المُحرك الأساسي للظهور المفاجئ للسلوك الحديث؟ يُرجع بعض الباحثين السبب إلى حدوث تغيير عصبي. فربما أدَّت طفرة عارضة إلى إحداث تغييرٍ عصبي غير ملحوظ، ولكنه بالغ الأهمية لتعزيز القدرة المعرفية دون حدوث تغييرٍ كبير في شكل الجمجمة.<sup>12</sup> أو ربما كانت القوة الدافعة الرئيسية لذلك التغيير هي العوامل البيئية والاجتماعية، مثل الضغوط البيئية وزيادة الكثافة السكانية، وليس تغييراً بيولوجياً.<sup>13</sup>

يُنكر بعض الباحثين مفهوم الثورة البشرية، وحُجَّتهم في ذلك أن خصائص السلوك البشري الحديث قد ظهرت على مدار فترةٍ زمنيةٍ طويلة. فيزعمون أن الابتكارات التكنولوجية والثقافية ظهرت واختفت عدة مرات في تاريخ الإنسان العاقل بسبب عوامل مثل فقدان السكان وعدم الاستقرار البيئي. وقد يُفسر هذا، إلى جانب فقدان السجلات الأثرية، لماذا لا توجد سوى أدلةٍ غير مُكتملة على وجود الحداثة السلوكية قبل العصر الحجري القديم العلوي.<sup>14</sup> سيكون من الصعب إعادة بناء الأحداث التي وقعت قبل عشرات الآلاف من السنين. لذا يجب أن ننتظر حتى يقدم علماء الآثار وعلماء أصول الإنسان القديم أدلةً مقنعة تدعم فرضية بعينها. ومع ذلك، يبدو أن أسلافنا اكتسبوا القدرة على التجريد العالي المستوى على الأقل بحلول العصر الحجري القديم العلوي.

## علم الأعصاب القديم

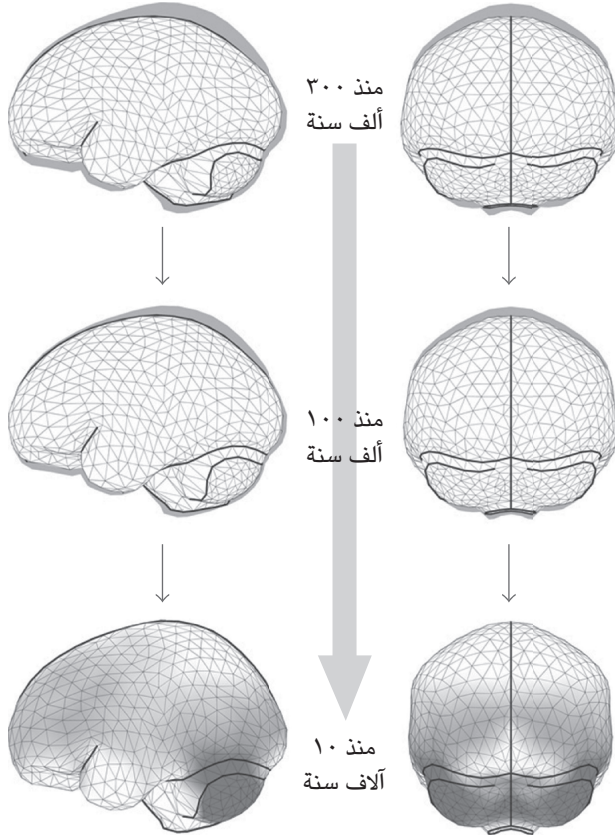
علم الأعصاب القديم هو دراسة تطوُّر الدماغ من خلال تحليل القلب الداخلي للجمجمة. سيكون من الصعب اكتشاف تغيُّر عصبي دقيق حدث أثناء التطوُّر من خلال فحص القلب الداخلي. غير أن حدوث تغيرات كبرى في بنية الدماغ من المرجَّح أن يصحبها تغييرات أخرى مُماثلة. ولذا، إذا كانت القدرة المعرفية للإنسان العاقل قد وصلت إلى مستوى الإنسان الحديث نتيجة حدوث تغيرات بنوية كبرى في الدماغ، فقد تكون أبحاث علم الأعصاب القديم قادرة على تقديم رؤى قيمة حول هذه التغيرات. وفي هذا الصدد، حددت الدراسات في علم أعصاب القديم تغيُّرات في حجم وشكل الجمجمة أثناء تطوُّر الإنسان.<sup>15</sup>

لنتأمل دراسة حديثة نشرت في عام ٢٠١٨. قام ثلاثة علماء في معهد ماكس بلانك للأنتروبولوجيا التطورية في ألمانيا، وهم سايمون نوبياور، وجان جاك هوبلين، وفيليب جانز، بتحليل دقيق لعشرين حفرة للإنسان العاقل تعود إلى ثلاث فتراتٍ مختلفة (من ٣٠٠ ألف إلى ٢٠٠ ألف سنة، ومن ١٣٠ ألفاً إلى ١٠٠ ألف سنة، ومن ١٠٠ ألف سنة إلى ٣٥ ألف سنة). ووجدوا أن شكل دماغ المجموعة الثالثة فقط، وهي الحفريات الأحدث، هو الذي يتطابق مع شكل دماغ البشر في الوقت الحاضر.<sup>16</sup> وهذا يشير إلى أن شكل دماغ الإنسان العاقل قد وصل إلى الشكل الحديث في الفترة بين ١٠٠ ألف و٣٥ ألف سنة مضت. ونظراً لأن هذه الفترة تتزامن مع ظهور السلوك البشري الحديث في السجل الأثري، فمن الممكن أن تكون هذه التغيرات العصبية قد لعبت دوراً مهماً في تطور السلوك البشري الحديث.

كيف يختلف شكل الدماغ في المجموعة الثالثة عن المجموعتين الأخرين بالضبط؟ كان حجم الدماغ متشابهاً في جميع المجموعات الثلاث، ولكن شكل الدماغ أصبح أكثر كروية (انظر الشكل ١٠-٦). وأشار المزيد من التحليل إلى بروز منطقتين من الدماغ، وهما القشرة الجدارية والمُخيخ (انظر الشكل ١٠-٧)، في أثناء عملية تحول شكل الدماغ إلى الشكل الكروي.<sup>17</sup> سنركِّز هنا على القشرة الجدارية؛ لأن توسُّع القشرة الحديثة من المرجَّح أن يكون مسئولاً عن القدرة المعرفية المتقدمة لدى البشر (انظر الفصل الثامن)، وإن كنا لا نستطيع استبعاد احتمالية أن تكون التغيُّرات التي حدثت في المُخيخ قد ساهمت إلى حدٍّ كبير في ظهور السلوك البشري الحديث.

تجدر الإشارة إلى صعوبة الحصول على صورة واضحة لشكل الدماغ من شكل القحف العصبي.<sup>18</sup> علاوة على ذلك، فالقشرة الجدارية منطقة واسعة. ومع ذلك، فقد

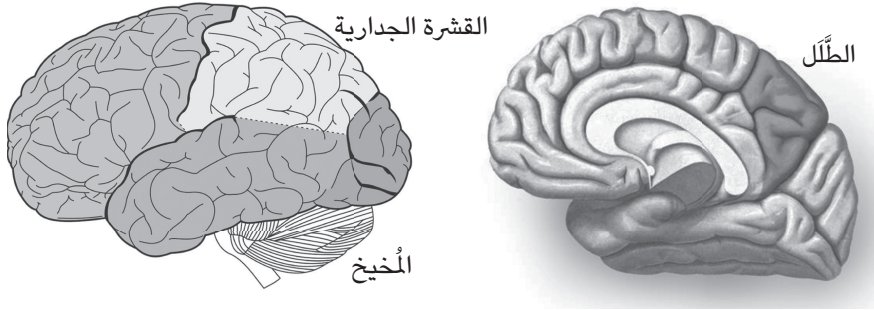
## الثورة البشرية والتغيرات الدماغية المرتبطة بها



شكل ١٠-٦: عملية تحوُّل شكل الدماغ إلى الشكل الكروي في أثناء التطور. الشكل مستنسخ من بحث نويباور، وهولين، وجانز، «تطور شكل الدماغ البشري الحديث»، (CC eaao5961 .BY-NC)

أظهرت الدراسات أن منطقةً مُعيَّنة من القشرة الجدارية، وهي الطَّلُّ (انظر الشكل ١٠-٧)، أكبر نسبياً لدى البشر مقارنة بالشمبانزي<sup>19</sup> ويرتبط حجمها أيضاً ب بروز المنطقة الجدارية لدى البشر المعاصرين.<sup>20</sup> واستناداً إلى هذه النتائج، اقترح إيميليانو برونر بالمركز الوطني لأبحاث التطور البشري في إسبانيا أن توسُّع الطَّلُّ قد يكون مرتبطاً بالتخصُّص المعرفي البشري الحديث.<sup>21</sup>

## الدماغ المُبتَكِر



شكل ١٠-٧: القشرة الجدارية والمُخيخ والَطَّل. (يسارًا) منظر جانبي للدماغ يُظهر القشرة الجدارية والمُخيخ. المقطع منقول من هنري في كارتر، File: Lobes of the brain NL.svg، ويكيبيديا كومنز، جرى التحديث في ١٥ يناير ٢٠١٠، [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lobes\\_of\\_the\\_brain\\_NL.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lobes_of_the_brain_NL.svg) (public domain). (يمينًا) منظر طولي للدماغ يُظهر الطَّل. المقطع مستنسخ من دايو جاي، وفابيو ماكوري، وسي ورسلي، «الَطَّل»، راديويبيديا، جرى التحديث في ٢ سبتمبر ٢٠٢١، 38968-rID/10.53347/doi.org، (CC BY-NC-SA).

## الَطَّل

من المؤسف أننا لا نعرف إلا القليل نسبيًا عن الطَّل. ومن النادر أن نجد مريضًا بشريًا يعاني من تلف انتقائي في الطَّل (كذلك الذي يحدث بفعل السكتة الدماغية)، كما أن الدراسات حول هذه المنطقة الغامضة من الدماغ قليلة للغاية. في بحث نُشر عام ٢٠٠٦، استعرض أندريا كافانا ومايكل تريمبل دراسات التصوير الدماغية البشري المنشورة وجمَّعًا أربع عمليات ذهنية مختلفة يبدو أن الطَّل يُسهم فيها: الخيال البصري المكاني (السلوك الموجَّه مكانيًا)، واسترجاع الذاكرة العرضية (تذكر مخزون الذاكرة الذاتية)، ومعالجة الذات (تمثيل الذات في علاقتها مع العالم الخارجي)، والوعي.<sup>22</sup> وعلى هذا فالَطَّل ينشط بالتزامن مع مجموعة متنوعة من العمليات الإدراكية، وهو أمر غير مُفاجئ بالنظر إلى كونه جزءًا من قشرة ترابطية بعيدة تمامًا عن المناطق الحسِّية والحركية الأولية ومُرتبطة على نطاق واسع بمناطق من القشرات الترابطية العليا.

كذلك اكتشفت دراسات لاحقة أن الطَّل يدخل في الأداء الفني والإبداع. على سبيل المثال، تكون كثافة المادة الرمادية في الطَّل<sup>23</sup> أعلى لدى الطلاب الذين يدرسون الفنون

مقارنةً بغيرهم من الطلاب،<sup>24</sup> وتكون الارتباطية الوظيفية (التلازم على مستوى النشاط بمرور الوقت بين منطقتين من الدماغ، فيما يُعد مؤشراً على مدى عمل منطقتين من الدماغ معاً على نحو وثيق) بين الطَّل والمهاد أقوى لدى الموسيقيين مقارنة بغير الموسيقيين.<sup>25</sup> كذلك يرتبط نشاط الطَّل بالإبداع اللفظي<sup>26</sup> والأصالة الفكرية.<sup>27</sup> وتشير هذه النتائج إلى أن توسع الطَّل ربما كان مرحلة مهمة في تطور القدرة البشرية على تكوين مفاهيم مجردة عالية المستوى.

وكاحتمالٍ بديل، قد يُسهَّل الطَّل لدى الإنسان استخدام المفاهيم المجردة العالية المستوى دون تكوينها. فالطَّل يُعد «نقطة اتصال» لشبكة الوضع الافتراضي. ويستهلك قدرًا من الطاقة (الجلوكوز) أكبر من أي منطقة قشرية أخرى أثناء فترة الراحة الواعية.<sup>28</sup> وكما تناولنا في الفصل الأول، فإن شبكة الوضع الافتراضي تنشط عندما نخرط في العمليات العقلية الداخلية (المعالجة المفاهيمية) وتُثبِّط عندما ننتبه إلى المُثيرات الخارجية (المعالجة الإدراكية). ومن الجدير بالملاحظة أيضًا أن الطَّل ينشط عبر حالات سلوكية مُتعددة. فوفقًا لدراسات التصوير الدماغية، يتألف الدماغ البشري من شبكاتٍ عصبية مُتعددة ومتداخلة ومتفاعلة يبدو أنها تؤدي وظائف مُميزة. وإحدى هذه الشبكات هي شبكة الوضع الافتراضي. وتشمل الشبكات الأخرى المرتبطة بالمهام، والتي حظيت بدراسة علمية مكثفة، الشبكة التنفيذية المركزية (أو الشبكة الجبهية الجدارية؛ ومكوناتها الرئيسية هي القشرة الجبهية الأمامية الظهرية، والقشرة الجدارية الخلفية)، التي تنشط في المواقف الصعبة إدراكياً وعاطفياً.

كان الاعتقاد السائد في البداية أن شبكة الوضع الافتراضي والشبكات المرتبطة بالمهام مُنفصلة ومتعارضة. غير أن دراسات لاحقة أظهرت أن منطقة مُعينة من الدماغ قد تنشط أثناء فترات السكون وأداء المهام على حدٍ سواء، مما يُشير إلى أن الشبكتين يمكن أن تتداخلتا. بحث كل من أماندا أوتيفسكي وديفيد سميث وسكوت هويتل النشاط الدماغية لدى نحو مائتي شخصٍ في أثناء أداء ثلاث مهامٍ اتخذوا قراراً قائمة على المكافأة، وكذلك في فترات الراحة التامة، في دراسة أُجريت عام ٢٠١٤.<sup>29</sup> وحددوا منطقةً واحدة من الدماغ أظهرت ارتباطيةً وظيفيةً مُمنهجة تعتمد على الحالة، ألا وهي: الطَّل. كان الطَّل هو المنطقة الدماغية الوحيدة التي زادت من نشاط الارتباطية الوظيفية مع الشبكة التنفيذية المركزية أثناء أداء المهمة، ومع شبكة الوضع الافتراضي أثناء الراحة. ويُشير هذا إلى أن الطَّل قد يلعب دورًا مهمًا في تنسيق النشاط بين مُختلف الشبكات واسعة النطاق. ونظرًا

لأن الإدراك الإبداعي ينطوي على تفاعلات ديناميكية بين شبكات الدماغ الواسعة النطاق، التي من بينها شبكة الوضع الافتراضي والشبكات التنفيذية المركزية،<sup>30</sup> فقد يلعب الطَّلُّ دورًا محوريًا في توليد أفكار جديدة ومبتكرة.

إن هذه النتائج العصبية العلمية مُجمعة تُثير احتمال أن الطَّلُّ البشري قد يسهل «استخدام» المفاهيم المجردة العالية المستوى أثناء التخيل من خلال تنسيق نشاط شبكات مُتعددة واسعة النطاق، والربط بين شبكات فرعية بعينها مُنبثقة من شبكة الوضع الافتراضي. وقد يعمل باعتباره قناة ربطٍ فعّالة بين نظامين دماغيين مُهمّين لتحفيز الخيال (مثل الحُصين) والتعامل مع المفاهيم المجردة العالية المستوى (مثل القشرة الجبهية الأمامية). وفي الوقت الحالي، لا تُعتبر الإسهامات المُحتملة للطَّلُّ في القدرة البشرية على الابتكار التي ناقشناها حتى الآن سوى احتمالاتٍ تخمينية. وهناك حاجة إلى مزيد من الدراسات للكشف عما إذا كان توسُّع الطَّلُّ خطوةً حاسمةً نحو «القفزة الهائلة إلى الأمام» التي حدثت في القدرة المعرفية للإنسان الحديث.<sup>31</sup>

## الشبكة العصبية العميقة

في الفصلين التاسع والعاشر، تناولنا منطقتين مختلفتين من الدماغ، هما القشرة الجبهية الأمامية والظَّلَل، اللتين ربما لعبَ توسُّعهما دورًا حاسمًا في تطور القدرة البشرية الفريدة على التجريد العالي المستوى. وفي هذا الفصل سنناقش احتمالية أنَّ هذه القدرة البشرية ترجع في المقام الأول إلى التنظيم العام للدماغ وليس إلى توسُّع منطقة بعينها من الدماغ. ولهذا، دعونا نوجِّه انتباهنا إلى الشبكات العصبية الاصطناعية. نظرًا لكونها فرعًا رئيسًا من فروع الذكاء الاصطناعي، فإنها تقوم بعمليات حسابية تستند إلى هياكل تحاكي الشبكات العصبية البيولوجية. كانت هناك أربع موجاتٍ من أبحاث الشبكات العصبية الاصطناعية على مدار التاريخ منذ أربعينيات القرن العشرين. وكانت الموجة الثالثة منها في الثمانينيات. وقد بدأت مسيرتي المهنية في مجال علم الأعصاب كطالب دراساتٍ عليا في كاليفورنيا في تلك الفترة تقريبا. وما زلتُ أتذكَّر بوضوح الإثارة التي أحدثتها في ذلك الوقت.

كان من الصعب فهم الدماغ بسبب تعقيده، ولا يزال كذلك. فالدماغ البشري يحتوي على ما يقرب من مائة مليار خلية عصبية ومائة تريليون رابطة عصبية، ويُشكل العديد من أنواع الخلايا العصبية المختلفة نظامًا معقدًا للغاية من الروابط العصبية. لذا فإن اكتشاف الطريقة التي يُعالج بها هذا النظام المُعقد المعلومات لتوجيه السلوك في عالمٍ مُتغير باستمرار يُمثل تحديًا هائلًا. يدرُس خبراء علم الأعصاب التجريبي الدماغ مباشرة، ويستخدم العديد منهم نماذج حيوانية لها أدمغة أقلَّ تعقيدًا إلى حدِّ ما. على سبيل المثال، يضع علماء الفسيولوجيا العصبية أقطابًا كهربائية دقيقة في الدماغ لرصد نشاط الخلايا العصبية الفردية أثناء انخراط الحيوان في سلوكياتٍ مُعينة، مثل تحديد الرافعة التي سيضغط عليها من الرافعتين المتاحتين. وكنهجٍ بديل لفهم الدماغ، يدرس العلماء

في مجال علم الأعصاب الحوسبي ما يمكن للشبكات العصبية الاصطناعية فعله وكيف تؤدّيه.

في ثمانينيات القرن العشرين، كان علماء الأعصاب والمهندسون على حدّ سواء يأملون أن تؤدي الشبكات العصبية الاصطناعية إلى تقدّم كبير في فهمنا للدماغ وأن تقدّم حلولاً جديدة لمشاكل الذكاء الاصطناعي الصعبة مثل تصنيف الأشياء المرئية. ولكنهم مُنوا بخيبة أملٍ مع فتور حماسة البدايات تدريجياً؛ إذ لم ترقّ الشبكات العصبية الاصطناعية إلى مستوى التوقّعات على الرغم من إسهاماتها الكبيرة. الموجة الرابعة من الشبكات العصبية الاصطناعية تُمضي قدماً الآن، ويقودها «التعلم العميق».

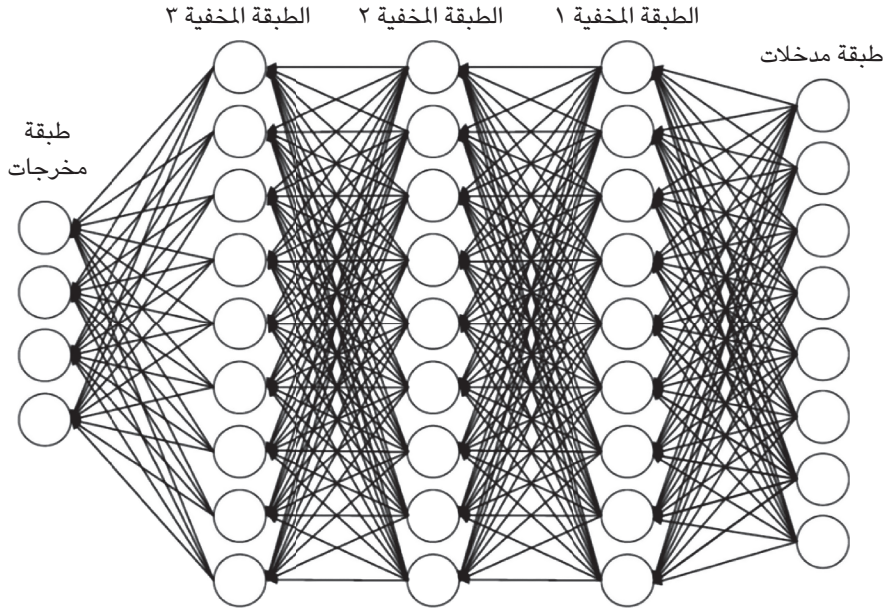
## التعلم العميق

تتكوّن الشبكات العصبية الاصطناعية من طبقاتٍ من الوحدات (أو العُقد أو الخلايا العصبية الاصطناعية) التي تتصرّف وفقاً لقواعد مُبسّطة مُستمدّة من الخلايا العصبية البيولوجية (مثل «الدمج والإطلاق»، حيث تجمع كل وحدة المدخلات النشطة وتُصدِر مخرجاتٍ عند تجاوز حدٍّ معين). تحتوي الشبكات العصبية الاصطناعية النموذجية على طبقةٍ مُدخلات وطبقةٍ مخرجات وعددٍ مُتغيّرٍ من الطبقات المخفية (انظر الشكل ١١-١). إذن، ما هو التعلّم العميق بالضبط في الشبكات العصبية؟ إنه يشير إلى التعلّم الذي يتم عن طريق شبكة عصبية اصطناعية مُتعددة الطبقات المخفية. تمكن الطبقات المخفية الشبكة العصبية من إجراء حساباتٍ معقدة وغير خطية. ويُشير عمق الشبكة إلى عدد الطبقات المخفية.

في أوائل العقد الأول من القرن الحادي والعشرين، وجد العلماء أن أداء الشبكات العصبية الاصطناعية في تطبيقاتٍ مُعينة يمكن تحسينه جذرياً، عن طريق إضافة المزيد من الطبقات المخفية (أي جعل الشبكات أعمق). بدأت الشبكات العصبية العميقة تتفوّق على طرقٍ أخرى في المعايير البارزة لتحليل الصور، وأبرزها تحديّ التعرف البصري الواسع النطاق ImageNet في عام ٢٠١٢، وكانت هذه الإنجازات الشرارة التي أشعلت «ثورة التعلّم العميق» في الذكاء الاصطناعي.<sup>1</sup> وقد أصبح التعلّم العميق الآن يُستخدم في كل مجالات أبحاث الذكاء الاصطناعي تقريباً.

كيف تعمل الطبقات المخفية إذن؟ تُتيح الطبقات المخفية المُتعددة مستوياتٍ متعددة من التجريد، وهو أمر مُفيد لاستخراج التسلسلات الهرمية للسّمات. افترض أنك تريد

## الشبكة العصبية العميقة

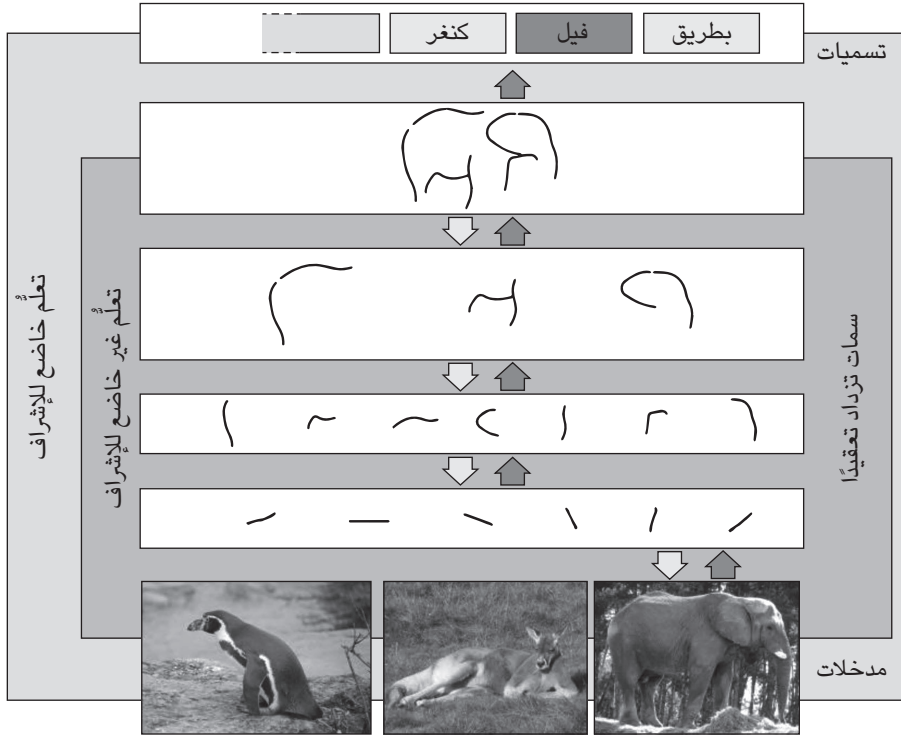


شكل ١١-١: مخطط لشبكة عصبية اصطناعية. الشكل منقول من مقال ماسيمو ميريندا وكارلو بوركارو وديميتريو إيرو بعنوان: «تعلم الآلة المتطور لأجهزة إنترنت الأشياء المدعومة بالذكاء الاصطناعي: مراجعة»، مجلة سينسورز (بازل) المجلد ٢٠، العدد ٩ (أبريل ٢٠٢٠): 2533 (CC BY).

تدريب شبكة عصبية على تعرّف فصائل الحيوانات من صورها الفوتوغرافية (انظر الشكل ١١-٢). بمجرد تدريبها عن طريق نموذج لبعض صور الحيوانات (الأفيال والفقمات ... إلخ)، يمكنك اختبارها بصور جديدة لهذه الحيوانات نفسها. يمكن تدريب شبكة عصبية سطحية (على سبيل المثال، طبقة مخفية واحدة) على أداء هذه المهمة، ولكن عدد الكواشف عن السمات المطلوبة في الطبقة المخفية ينمو بصورة كبيرة مع عدد المدخلات. ويمكن للشبكة العصبية العميقة الحد من هذه المشكلة.

في المثال الموضح في الشكل (١١-٢)، نجحت شبكة عصبية ذات تغذية أمامية مكونة من ست طبقات في تصنيف الأنواع الحيوانية من الصور الجديدة من خلال تشكيل تسلسل هرمي للسمات.<sup>2</sup> تمثل الطبقات المخفية الأولى سمات منخفضة المستوى، مثل الحواف الموضوعية، التي تُدمج تدريجياً لتمثيل سمات أكثر تجريداً في الطبقات المخفية النهائية،

## الدماغ المُبتكر



شكل ١١-٢: تعلم شبكة عصبية عميقة للتسلسل الهرمي للسمات. الشكل مستنسخ بإذن من هانس شولتس وسفين بينكي، من مقال بعنوان: «التعلم العميق: التعلم الطبقي للتسلسلات الهرمية للسمات»، مجلة «كونستليش إنتيلاجانس» الألمانية، المجلد ٢٦، العدد ٤ (٢٠١٢): ٣٥٧.

والتي تمثل في النهاية سمات عالية المستوى لنماذج أولية للأنواع الحيوانية (على سبيل المثال، «سمات الفيل»). تُعد هذه طريقة قوية وفعّالة لتنفيذ التعرف البصري للأشياء. ويجدر بنا هنا ملاحظة أنه لم تتوفر أي معلومات حول الأنواع الحيوانية للطبقات المخفية أثناء التدريب. فالشبكة العصبية تُنظم نفسها كي تُمثل السمات بصورة هرمية لتحقيق المهمة. في الواقع، استوحى هذا المسار البحثي في مجال الشبكات العصبية من النتائج التي توصل إليها علم الأعصاب البصري. تستجيب الخلايا العصبية في المراحل المبكرة من عملية المعالجة البصرية للسمات المنخفضة المستوى مثل الحواف، في حين تستجيب

الخلايا العصبية في المراحل المتقدمة من المعالجة البصرية للسّمات الأكثر تعقيدًا مثل الوجوه. وفي هذا المثال توضيح لإمكانية تنفيذ استخراج السمات العالية المستوى بسهولة في شبكة عصبية عميقة.

## التعلّم غير الخاضع للإشراف

في المثال السابق، أدّت الشبكة العصبية الاصطناعية عمليةً لتجريد نتيجة للتعلّم الخاضع للإشراف البشري. فقد عرض نوع من الحيوانات صراحةً في الصورة للشبكة العصبية الاصطناعية (وإن لم يكن للطبقات المخفية) في أثناء التدريب. وبذلك قد يُزعم أن الشبكة العصبية الاصطناعية قد أدّت عملية التجريد؛ لأنها تدرّبت على ذلك. بعبارة أخرى، لا يمكن للشبكات العصبية الاصطناعية تأدية عملية التجريد إلا عندما تُدرّب على ذلك صراحةً في مجال ضيق. على سبيل المثال، قد يكون أداء الشبكة المُدرّبة على تصنيف أنواع الحيوانات ضعيفًا في مجالاتٍ أخرى مثل تصنيف أنواع المركبات. وبناءً على ذلك، فإن فهم التجريد الناجم عن التعلّم في الشبكات العصبية الاصطناعية العميقة قد لا يوفر أي رؤى مفيدة للعمليات العصبية التي تقف وراء التجريد البشري. ولكن الأمر ليس كذلك لحسن الحظ. فيمكن تدريب الشبكات العصبية العميقة لتمثيل المفاهيم المُجرّدة باستخدام التعلّم غير الخاضع للإشراف.

في عام ٢٠١٢، قام الفريق البحثي بقيادة أندرو نج وجيف دين بتدريب شبكة عصبية مكوّنة من تسع طبقاتٍ تحتوي على ملايين الصور غير الموصوفة (أي لم تقدّم أي معلومات حول ماهية الصور). ومن المُثير للدهشة أنه بعد ثلاثة أيام من التدريب، ظهرت خلايا عصبية تستطيع تعرّف الوجوه بشكلٍ انتقائي. واستطاعت الخلية العصبية الأفضل أداءً في الشبكة تحديد وجوه من الصور الجديدة بدقّة بلغت ٨١.٧ في المائة.<sup>3</sup> وقد أظهرت هذه الدراسة والدراسات اللاحقة، على نحوٍ مقنع، أن الشبكات العصبية العميقة قادرة على تمثيل السّمات العالية المستوى (النموذج الأوّلي للوجه في المثال أعلاه) دون تعليماتٍ مُحددة بشأن السّمات محلّ الاهتمام.

## التجريد الأوّلي

أثبتت دراساتٌ أحدث، على نحوٍ أكثر إثارة للدهشة، أن الشبكات العصبية العميقة قادرة على تمثيل المفاهيم المجردة حتى من دون أي تدريب على الإطلاق، وهو ما يشير أكثر

إلى وجود شيءٍ مُمَيَّز في بنية الشبكة العصبية العميقة في تمثيل المفاهيم المجردة. وقد قام سي-بوم بايك؛ زميلي في المعهد الكوري المتقدم للعلوم والتكنولوجيا، بإنشاء شبكاتٍ عصبية عميقة مُستوحاة من بنية الدماغ البيولوجية. وفي إحدى الدراسات، وجد فريقه أن الخلايا العصبية في شبكة عصبية محاكاة مُتعددة الطبقات تُظهر استجاباتٍ خاصة بالأعداد حتى من دون أي تدريب.<sup>4</sup> بعبارةٍ أخرى، ينشأ الإدراك العددي تلقائياً من الخصائص الإحصائية التي تتسم بها الروابط الناقلة للمعلومات في الشبكة العصبية المتعددة الطبقات. وقد أظهرت هذه الخلايا العصبية المُشَفَّرة للأعداد في الشبكة العصبية المحاكاة خصائص استجابةٍ مُماثلة لتلك التي تُظهرها الخلايا العصبية المُشَفَّرة للأعداد الموجودة في الدماغ (انظر الفصل التاسع). على سبيل المثال، تقلُّ حساسيتها للتمييز بين رقمين مع زيادة حجم الأرقام (على سبيل المثال، حساسيتها للتمييز بين الرقمين ١ و ٢ تُشبه حساسيتها للتمييز بين الرقمين ١٠ و ٢٠)، وهو ما يتوافق مع قانون وير-فيشنر (شدة الإحساس تتناسب طردياً مع لوغاريتم شدة التحفيز).

في دراسةٍ أخرى، وجد الفريق خلايا عصبية انتقائية للوجوه في شبكةٍ عصبيةٍ مُتعددة الطبقات تُحاكي المسار البصري للقرود دون أي تدريب.<sup>5</sup> أظهرت هذه الخلايا العصبية الخاصة الانتقائية للوجوه العديد من خصائص الاستجابة مُشابهة لتلك الموجودة في الخلايا العصبية الانتقائية للوجوه في دماغ القرد. تكشف لنا هذه الدراسات نقطتين مهمتين. أولاً: قد تظهر خصائص انتقاء الأرقام والوجوه في شبكة عصبية دون أي تعلُّم. ثانياً: لا توجد مثل هذه الخصائص إلا في الشبكات العصبية ذات العمق الكافي (أي يوجد بها ما يكفي من الطبقات المخفية). وهكذا، قد تكون الشبكة العصبية العميقة بما فيه الكفاية، مثل دماغ الرئيسيات، قادرةً على توليد مفاهيم مجردة (مثل الإدراك العددي) دون أي خبرةٍ سابقة. بعبارةٍ أخرى، قد تكون بنية الشبكة العصبية المُتعددة الطبقات في الدماغ هي مصدر الوظائف المعرفية الفطرية مثل التجريد.

## خلايا المفاهيم

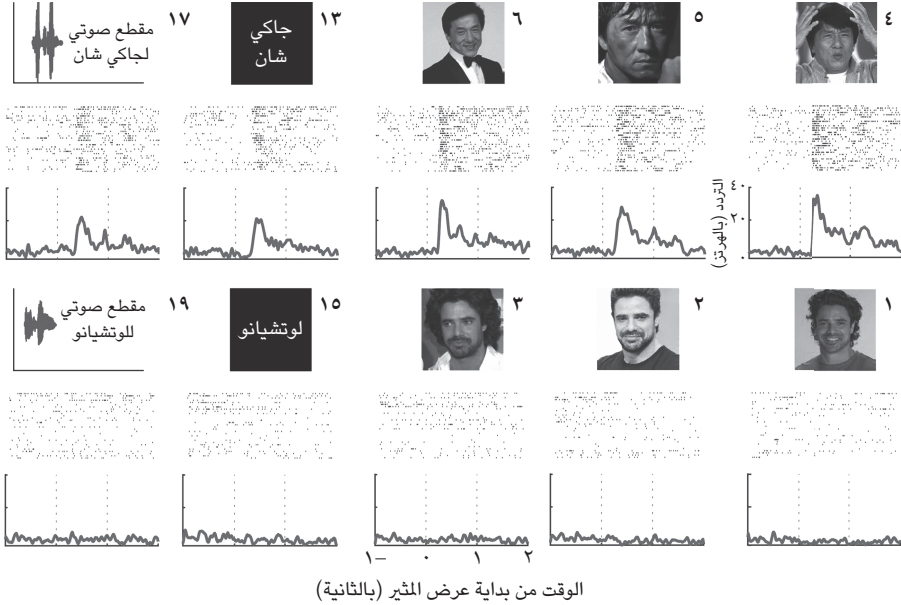
تُشير الدراسات التي تستخدم الشبكات العصبية الاصطناعية إلى أن القدرة البشرية الفائقة على التجريد العالي المستوى ربما ترجع إلى أن الدماغ البشري يحتوي على طبقات أكثر من الروابط العصبية مقارنة بالحيوانات الأخرى، وليس إلى وجود شبكةٍ عصبيةٍ مُخصَّصة للتجريد العالي المستوى. والواقع أن البنية الأساسية للدوائر العصبية في القشرة

المخية لدى جميع الثدييات مُتشابهة. ومن هذا المنظور، فقد يكمن السبب الأساسي في الوظائف المعرفية العليا للقشرة الأمامية الجبهية (انظر الفصل التاسع) في كونها القشرة الارتباطية الأرقى، وليس في وجود دوائر عصبية مُتخصّصة. وعلى وجه الخصوص، تقع القشرة الجبهية القطبية في قمة التسلسل الهرمي للروابط العصبية (انظر الشكل ٩-٤)، وربما يكون هذا هو السبب وراء تعاملها مع المفاهيم المُجرّدة الشديدة التطور لدى البشر. ولكن ماذا عن الحُصين؟ يمكن اعتباره أيضًا القشرة الارتباطية الأرقى. وعلى هذا، قد يكون البشر قادرين على التخيل بحرية باستخدام المفاهيم المجردة العالية المستوى؛ لأن هذه المفاهيم تتشكّل تلقائيًا عندما تمرّ المدخلات الحسّية عبر طبقاتٍ مُتعددة من الشبكة العصبية قبل الوصول إلى الحُصين. وتجدر الإشارة إلى أن حساب عدد الطبقات المخفية بين المُستقبلات الحسّية والحُصين ليس بالأمر البسيط مثل حساب عدد الطبقات المخفية في شبكة عصبية اصطناعية ذات تغذية أمامية؛ لأن القشرة المخية بها تفرعات عصبية متكررة قوية (أي مجموعة من الخلايا العصبية ترسل إشارات إلى نفسها) وعادة ما تكون منطقة واحدة من القشرة المخية مُتصلة بمناطق مُتعددة. كذلك، ليس لدينا إلا بيانات محدودة لإجراء مقارنةٍ منهجية كميّة لعدد الطبقات المخفية في القشرة المخية عبر الأنواع الحيوانية المختلفة. غير أن من الواضح أن الدماغ البشري يحتوي على عددٍ كبير جدًّا من المناطق القشرية الارتباطية.<sup>6</sup> على سبيل المثال، في المسار البصري البطني (المسار المُمتد من القشرة البصرية الأولية إلى الحُصين)، يكون عدد المناطق القشرية التي تتوسّط هذا المسار أكبر بكثيرٍ في البشر عنه لدى الفئران، وزبابت الشجر، والسناجب الرمادية، والقردة.<sup>7</sup>

لنتناول الدراسة التالية التي توصّلت إلى وجود نشاطٍ عصبي مرتبط بالتجريد في الحُصين البشري. كجزء من إجراءٍ لتحديد مصدر نوبات الصرع، سجّل النشاط العصبي في الحُصين والمناطق المحيطة به (الفص الصدغي الأوسط) لدى أشخاص مُصابين بالصرع. وقد أظهرت الخلايا العصبية في الفص الصدغي الأوسط لدى هؤلاء المرضى أنماطًا متنوعة من النشاط، استجابةً لمُثيرات بصرية متنوعة. ومن المُدهش أن بعض الخلايا العصبية كانت تستجيب فقط لأشخاصٍ أو أشياء مُحددة. على سبيل المثال، كانت الخلية العصبية الموضحة في الشكل (١١-٣) تستجيب لصور الممثل جاكّي شان، بينما لم تستجيب لصور أشخاص آخرين. من اللافت للنظر أن هذه الخلية العصبية لم تكن تستجيب لصور جاكّي شان فحسب، بل تستجيب أيضًا لاسمِه كتابًا ونطقًا.<sup>8</sup> وهذا يُشير

## الدماغ المُبتكر

إلى أن هذه الخلايا العصبية الانتقائية للأشخاص لا تستجيب للسمات البصرية فحسب. بل إنها تستجيب للهوية الشخصية، التي تُعد مفهوماً مجرداً. ولذلك سُميت هذه الخلايا بـ «خلايا المفاهيم».<sup>9</sup>



شكل ١١-٣: خلية عصبية في الحُصين البشري تستجيب للمُمثل جاكي شان ولكنها لا تستجيب لمُمثل آخر، هو لوتشيانو كاسترو. الصف الأوسط، يوضح مُخططاً نَقْطِيًّا لرصد تزايد النبضات (كل نقطة تُمثل نبضةً وكل صفٌ يُمثل تجربة). الصف السفلي يوضح متوسط الاستجابة. الشكل مستنسخ من مقال لهرنان جي راي وآخرين بعنوان: «تشفير الخلايا العصبية الفردية للهوية في تكوين الحُصين البشري»، مجلة «كارنت بيولوجي»، المجلد ٣٠، العدد ٦ (مارس ٢٠٢٠): 1153 (CC BY).

لم تنجح محاولات العثور على خلايا مفاهيم مُماثلة في الحيوانات. على سبيل المثال، جرى تنشيط الخلايا العصبية الحُصينية لدى القردة من خلال صور وأصوات، كل على حدة، لقردة أخرى في المستعمرة.<sup>10</sup> وهذا يُشير إلى أن الحُصين البشري قد يتعامل مع مفاهيم مجردة عالية المستوى للغاية، على الرغم من أن التفسيرات الأخرى (على سبيل

المثال، قد لا تكون القدرة على تشفير الهوية المجردة مفيدة على نحوٍ خاصٍ للقدرة التي لا تُشكل مجتمعات اجتماعية كبيرة مثل البشر) معقولة بالقدْر نفسه. ومن الجدير بالذكر أن القشرة الجبهية الأمامية والحُصين، وهما أعلى قشرتين ارتباطيتين، لهما قنوات اتصال مباشرة. يمد الحُصين تفرعات عصبية مباشرة إلى القشرة الجبهية الأمامية، وبالعكس، تمتد القشرة الجبهية الأمامية تفرعات عصبية مباشرة إلى الحُصين.<sup>11</sup> وبطبيعة الحال، يتصل كل منهما بالآخر أيضًا بصورةٍ غير مباشرة بواسطة مناطق أخرى من الدماغ، مثل الطَّل. ومن الوارد تمامًا أن يتفاعل الحُصين والقشرة الجبهية الأمامية على نحوٍ وثيق عبر هذه المسارات المباشرة وغير المباشرة، وأن تدعم مثل هذه التفاعلات بين الحُصين والقشرة الجبهية الأمامية، الخيال غير المحدود باستخدام المفاهيم المجردة عالية المستوى لدى البشر.

### الشبكات العصبية الاصطناعية العميقة

إذا كان عمق شبكة عصبية في الدماغ يُحدد مستوى التفكير المجرد، فكيف ستكون المفاهيم المجردة للشبكات العصبية الاصطناعية العميقة جدًّا؟ في الوقت الحاضر، يتجاوز عمق الشبكات العصبية الاصطناعية المائة طبقة عادة. وتعمل وحدات معالجة رسوم الجرافيك القوية، المُصمَّمة في الأصل لتلبية مُتطلبات ألعاب الكمبيوتر الحديثة، على تسهيل تنفيذ خوارزميات التعلُّم العميق جدًّا. فهل ستتمكن هذه الشبكات العصبية الاصطناعية العميقة من تكوين مفاهيم مُجردة أعلى مستوى من الأدمغة البشرية؟ هل نجح برنامج «ألفا جو»، أول برنامج كمبيوتر يهزم أحد أفضل خبراء لعبة «جو» من البشر، في تحقيق الفوز باستخدام مفاهيم مُجردة عالية المستوى تتجاوز الفهم البشري؟

افتراض البعض أن الدماغ البشري سيصل إلى أقصى قدرة معالجة له عند نحو ٣٥٠٠ سنتيمتر مكعب، وهو ما يتجاوز القدرة الحالية (١٣٥٠ سنتيمترًا مكعبًا) بنحو مرتين ونصف.<sup>12</sup> وبسبب قيود المعالجة العصبية ومعالجة الطاقة في الدماغ، فإن دماغًا بحجم أكبر سيكون أقلَّ كفاءة. فهو يتطلَّب المزيد من الطاقة والتبريد القوي، مما سيزيد من الحجم الذي تشغله الأوعية الدموية من الدماغ. علاوة على أن الخلايا العصبية لديها حدود فطرية في سرعة معالجة الإشارات، مما يُقيد كفاءة معالجة المعلومات التي يُمكن للدماغ بلوغها من خلال زيادة حجمه. وإذا كان هذا التقدير صحيحًا، فإن الدماغ البشري لديه مساحة للتطوُّر إلى شبكة عصبية أعمق. إذا وُلد شخص ما ببنية شبكية أعمق بسبب

طفرة، فكيف سيفكر؟ هل سيختلف حسُّه الفني عنّا؟ إذا تلاعبنا بالجينات بحيث يُولّد كلب بروابط شبكية عصبية عميقة كما هو الحال لدى البشر، فهل سيكون للكلب نفس القدرة على التفكير المجرد مثل البشر؟ ليس لدينا حالياً إجابات واضحة عن هذه الأسئلة. غير أن جعبتنا لا تخلو من أبحاثٍ في هذا المسار.

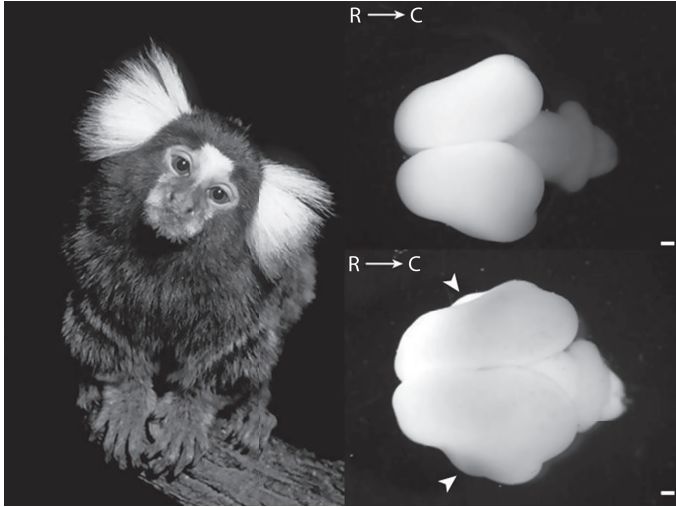
### الشبكات العصبية الحقيقية العميقة

كما شرحت في الفصل الثامن، فالدماغ البشري الحالي هو نتاج التوسُّع المفاجئ للقشرة الدماغية الحديثة في أثناء التطور. ويرجع هذا على الأرجح إلى حدوث طفراتٍ في بعض الجينات التي تتحكّم في تطوُّر القشرة المخية الحديثة. ويُعتبر جين *ARHGAP11B* أحد الجينات البالغة الأهمية لتطور القشرة البشرية الدماغية الحديثة. فهذا الجين له دور أساسي في تكاثر الخلايا الجذعية العصبية أثناء النمو المبكر. بعبارةٍ أخرى، يُعزز هذا الجين إنتاج الخلايا العصبية للقشرة الدماغية الحديثة. فماذا سيحدث إذا تم التعبير عن هذا الجين في أحد الحيوانات؟

تمكن العلماء حتى الآن من التعبير عن هذا الجين في الفئران، وابن مقرض، وقرد القشّة. وقد أدى التعبير عنه في الفئران إلى زيادة حجم القشرة المخية الحديثة، إلى جانب مرونة الذاكرة. وكان أداء الفئران التي خضعت للتعبير عن جين *ARHGAP11B* وفئران المجموعة الضابطة مُماثلاً في تذكُّر موقع ثابت للمكافأة. غير أن الفئران التي تُعبر عن جين *ARHGAP11B* تفوّقت على الفئران الضابطة عندما تغير موقع المكافأة يومياً، مما يُشير إلى مرونة سلوكية مُعززة.<sup>13</sup> ولعلنا نتذكّر من الفصل العاشر أن الأشخاص الذين يُعانون من تلف في القشرة الجبهية الأمامية يُعانون من ضعف في المرونة السلوكية.

وماذا عن قرد القشّة، وهو قرد صغير الحجم؟ هل يجعل التعبير عن جين *ARHGAP11B* هذا القرد أكثر ذكاءً؟ هل يسمح له هذا الجين بالتفكير باستخدام مفاهيم مُجردة عالية المستوى؟ كما قد تتوقَّع، لم تخلُ هذه الدراسات من المشاكل الأخلاقية. ولهذا السبب أوقف العلماء الألمان واليابانيون الذين أجرّوا هذا العمل البحثي المشروع قبل ولادة القرد التجريبي.<sup>14</sup> فقد أزالوا الأجنة الطافرة جراحياً وفحصوا أدمغتها. لذا من غير المعروف ما إذا كانت قرود القشّة هذه «ستفكر» بصورةٍ مختلفة عن القروء العادية. غير أنه وُجِدَ أن التعبير الجيني قد غيّر تطوُّر دماغ قرد القشّة. فقد تضخّمت قشرته الدماغية الحديثة وتجمّعت بصورةٍ واضحة (انظر الشكل ١١-٤).

## الشبكة العصبية العميقة



شكل ١١-٤: التعبير عن جين ARHGAP11B في دماغ قرد القشّة. (يسارًا) قرد القشّة الشائع. المقطع مستنسخ من NatureRules1 Wiki، "Common Marmoset (*Callithrix jacchus*)"، تاريخ زيارة الرابط ٢٨ أغسطس ٢٠٢٢، [https://naturerules1.fandom.com/wiki/Common\\_Marmoset](https://naturerules1.fandom.com/wiki/Common_Marmoset) (CC BY-SA). (أعلى اليمين) دماغ جنين قرد قشّة طبيعي. (أسفل اليمين) دماغ قرد يُعبّر عن جين ARHGAP11B البشري. المقطعان مستنسخان بإذن من مايكل هايد وآخرين، «جين ARHGAP11B لدى البشر يزيد من حجم وطّي القشرة المخية الحديثة للرئيسيات في جنين قرد القشّة»، دورية «ساينس»، مجلد ٣٦٩، رقم ٦٥٠٣ (يوليو ٢٠٢٠): ٥٤٧.

يحتوي الجزء العلوي من الدماغ البشري على طيّات عديدة، مما يزيد من مساحة سطح القشرة المخية الحديثة. ويبدو أن هذه طريقة للاستفادة بقشرة دماغية حديثة متضخمة داخل مساحة محدودة داخل الجمجمة. في المقابل، تتسم أدمغة قرود القشّة العادية بسطح أملس. وفي حقيقة أن أجنة قرود القشّة المعدلة جينياً لديها قشرة دماغية حديثة متضخمة مع بعض التجاعيد على سطحه، إشارة إلى أن «تفكير» هذه القرود قد يختلف إلى حدّ كبير عن تفكير قرود القشّة العادية، بشرط أن تكون قد وُلدت وظلّت على قيد الحياة حتى سنّ البلوغ. بطبيعة الحال، لا تزال أدمغة هذه القرود الطافرة بعيدة كلّ البعد عن تعقيد الدماغ البشري. وهكذا، فمن غير المرجّح أن تقترب قدرتها على التفكير المجرد من قدرة البشر. ومع ذلك، مع التحفّظ المتعلق بالقضايا الأخلاقية، قد يأتي هذا

## الدماغ المُبتكر

المسار البحثي ذات يومٍ بدماغ حيواني على نفس القدر من تعقيد الدماغ البشري، أو حتى يفوقه تعقيدًا.

خلاصة القول، إن الأساس العصبي للتفكير المجرد البشري العالي المستوى غير واضح. ولكن قد تُصبح الدراسات التي تبحث مباشرة في هذه القضايا رائجةً في المستقبل، وإن كانت قد تصحبها مخاوف تتعلّق بالاعتبارات الأخلاقية.

الجزء الرابع

## ما وراء الخيال والتجريد



## مشاركة الأفكار والمعرفة من خلال اللغة

«إذا كانت رؤيتي أبعدَ من الآخرين، فهذا لأنني أقف على أكتاف العمالقة.» كثيرًا ما تُستخدم هذه المقولة الشهيرة التي وردت في رسالة من إسحاق نيوتن إلى عالم آخر بارز ومنافس، ألا وهو روبرت هوك، للدلالة على كيفية تحقيق التقدم العلمي. نادرًا ما تنشأ الاكتشافات والاختراعات والابتكارات من فراغ. فنحن نعتمد على المعرفة التي اكتسبها أسلافنا لتحقيق التقدم الفكري.

كان جاليليو جاليلي، الذي تُوفي في العام الذي وُلد فيه نيوتن (١٦٤٢)، عملاقًا من العمالقة الذين وقف نيوتن على أكتافهم. لقد أرسى جاليليو الأساس لفهم حركة الأجسام، بما في ذلك صياغة مفهوم «القصور الذاتي» (يظلُّ الجسم في نفس حالة الحركة ما لم يتعرَّض لقوة خارجية تُغيّر من حالته)، والذي كان له تأثير قوي على نيوتن. كان يوهانس كيبلر عملاقًا آخر ممّن أنثروا في نيوتن. اكتشف كيبلر، مُستعينًا بالبيانات الفلكية التي جمعها تيخو براهي على مدار عقود، قوانين حركة الكواكب. واستنادًا لعمل كيبلر، وضع نيوتن قوانين عامة للحركة يُمكنها تفسير جميع أنواع الحركة، سواء كانت دوران الأرض حول الشمس، أو سقوط تفاحة من شجرة. قبل ميلاد نيوتن، كان لجاليليو وكيبلر رؤية أبعد من مُعاصريهما؛ لأنهما بدورهما وقفا على أكتاف نيكولاس كوبرنيكوس، الذي وضع نموذج مركزية الشمس للنظام الشمسي.

لقد بحثنا حتى الآن الآليات العصبية المسؤولة عن العمليات الفكرية للإنسان التي تُمكنه من الإبداع، مع التركيز بصفة خاصة على الخيال والتجريد. ولكننا لم نلتفت كثيرًا لملكة جوهرية أخرى للعقل البشري تُساعده على الإبداع، ألا وهي القدرة على تبادل الأفكار والمعرفة. يُشكل التواصل الاجتماعي الذي ينطوي على مفاهيم مُجردة عالية المستوى ضرورةً أساسية لتحقيق التقدم العلمي والتكنولوجي، كتلك الإنجازات الفارقة المُوضحة

في الشكل (١). من الصعب أن نتخيل حضارة إنسانية معقدة ومُتقدمة مثل حضارتنا الحالية بدون لغة. وفي هذا الصدد، يُمثل اكتساب القدرة اللغوية خطوةً مهمةً في التطور البشري، كما وصفها مارك باجيل قائلاً: «بفضل امتلاك البشر للغة، كانت لديهم شفرة عالية الدقة لنقل المعلومات التفصيلية عبر الأجيال. لقد كانت المعلومات الكامنة وراء هذه المعلومات مشفرةً تاريخياً في صورة تعليمات لفظية، ومع ظهور الكتابة أصبح حفظها ممكناً وازدادت تعقيداً. إن امتلاك القدرة اللغوية إذن، هو السبب وراء قدرة البشر على خلق تكيّفات ثقافية مُتطورة تراكمت الواحدة فوق الأخرى على مدار تاريخنا كنوع.»<sup>1</sup> سنستكشف اللغة في هذا الفصل، ذلك الشكل الفريد من أشكال التواصل البشري الذي ارتقى بالإبداع الجمعي للبشرية ككلّ إلى بُعدٍ جديد. وسوف نبحث بعض الموضوعات المُختارة المُتعلقة باللغة، من بينها أساسها العصبي، وعلاقتها بالتفكير المجرد، وأصلها.

### عالمية اللغة

اللغة هي نظام تُستخدم من خلاله الأصوات والرموز والإيماءات وفقاً لقواعد نحوية للتواصل. لم يُكتشف قط وجود أي قبيلة صامتة، مما يُشير إلى أن اللغة عالمية في جميع المُجتمعات البشرية. وعلى الرغم من وجود العديد من اللغات المُختلفة (أكثر من سبعة آلاف لغة ولهجة في جميع أنحاء العالم)، فإن جميع اللغات تُستخدم بطرق مُماثلة: لتعميق التجارب الشخصية، والتعبير عن المشاعر الدقيقة التي يصعب فهمها، وطلب المعلومات (من خلال طرح الأسئلة)، واختلاق القصص (أحياناً بغرض الخداع)، إلى جانب العديد من الجوانب الأخرى للتواصل البشري. وتتشابه عملية اكتساب اللغة أيضاً في جميع الثقافات. علاوة على ذلك، توجد فترة حرجة يتعلم خلالها الأطفال استخدام اللغة دون عناء بلا أي تدريب رسمي في حال تعرضهم لبيئة لغوية طبيعية. وفي هذا الشأن يُضيف باجيل موضحاً: «تعتمد جميع اللغات البشرية على الجمع بين الأصوات أو «الوحدات الصوتية» لتكوين الكلمات، والعديد من هذه الأصوات مشتركة عبر اللغات، ويبدو أن اللغات المختلفة تمثل العالم دليلاً بطرق مُماثلة؛ إذ تعترف جميع اللغات البشرية بالماضي والحاضر والمستقبل، وجميع اللغات البشرية تنظم الكلمات في جُمل. وجميع البشر قادرين أيضاً على أن يتعلم بعضهم لغاتٍ بعض، وأن يتحدثوا بها.»<sup>2</sup> وتشير عالمية اللغة إلى أن الدماغ البشري قد طوّر أنظمة خاصة لمعالجة اللغة.

## تفرد اللغة البشرية

غالبًا ما تُوضَع اللغة على رأس قائمة المعايير التي تُميز البشر عن الحيوانات الأخرى. فعلى الرغم من أن الحيوانات الأخرى، بخلاف البشر، يتواصل بعضها مع بعض، فثمة شكٌّ أن التواصل بين الحيوانات يُمكن اعتباره لغة. فالسّمات التي عادة ما تُنسَب للغة البشرية إما غائبة أو محدودة إلى حدٍّ كبير في نظْم التواصل لدى الحيوانات الأخرى،<sup>3</sup> وهي كما يلي:

«الانفصال»: تتكوّن اللغة البشرية من مجموعةٍ من الوحدات المنفصلة. أصغر وحدة كلامية هي الفونيم (أو صوت الكلمة). يوجد أربعة وأربعون فونيمًا مُستقلًا في اللغة الإنجليزية يُميز كلمة عن أخرى. على سبيل المثال، تشترك الكلمتان فأس وفأر في أول وحدتين صوتيتين (فونيمين)، ألا وهما الفاء والألف، ولكنهما تختلفان في الأخيرة. على مستوى آخر، تُدمج الكلمات الفردية لإنشاء عباراتٍ وجُمَل. تُوجد جُمَل مكوّنة من خمسٍ أو ست كلمات، ولكن لا تُوجد جُمَل مكوّنة من خمس كلمات ونصف. إن كلمتي فأس وفأر مختلفتان تمامًا، ولا يوجد معنى يتخلّلهما.

«القواعد النحوية»: تحكّم القواعد النحوية البنية الأساسية للغة. وتُدمج الوحدات اللغوية وفقًا لهذه القواعد للتعبير عن المعاني.

«الإنتاجية»: لا يوجد حدٌّ أقصى لطول الجملة التي يمكن إنشاؤها باستخدام الكلمات. ويتمتع البشر بالقدرة على إنتاج عددٍ لا نهائي من التعبيرات، من خلال الجمع بين مجموعة محدودة من الوحدات اللغوية.

«الإزاحة»: يُمكن للبشر التحدّث عن أشياء غير حاضرة تَوًّا (مثل الأحداث الماضية والمستقبلية) أو غير موجودة أصلًا (مثل المخلوقات الخيالية التي تعيش على المريخ).

نحن ندمج وحدات لغوية منفصلة (مثل الكلمات) وفقًا لقواعد نحوية لتوليد تعبيرات كلامية لا نهائية (مثل الجُمَل) تتضمن أشياء غير موجودة أصلًا. ويملك العديد من أنواع الحيوانات القدرة على التواصل المُعقد الذي يُظهر بعض سمات اللغة البشرية. على سبيل المثال، تصف الرقصة الاهتزازية للنحل موقع وِثراء مصدر الغذاء،<sup>4</sup> وتختلف نداءات كلاب البراري التحذيرية وفقًا لنوع المُفترس وسمات المُفترس الفردية، بما في ذلك لونه وشكله.<sup>5</sup> ولكن لا يُظهر أي نظام تواصل حيواني كل سمات اللغة البشرية. فاللغة البشرية نظام

تواصل مُعقّد ومِرِن وقوي. ويمكن أن يؤدي الاستخدام المُبتكر للكلمات وفقاً لقواعد إلى توليد تعبيراتٍ لا محدودة. لذا، لا يقترب أي نظام تواصل حيواني آخر من اللغة البشرية.

### هل يمكن تعليم الحيوانات اللغة البشرية؟

إن التواصل الطبيعي للحيوانات لا يرقى إلى مستوى اللغة البشرية، ولكن هل من الممكن تعليم الحيوانات استخدام اللغة؟ والسؤال هو ما إذا كان من الممكن تدريب الحيوانات الأخرى على دمج الرموز بطرقٍ مُبتكرة، وفقاً لنظامٍ نحوي ما للتعبير عن أشياء جديدة. وقد كانت هناك محاولات عديدة لتعليم الحيوانات (مثل الشمبانزي والدلافين) اللغة البشرية، وجاءت النتائج مُثيرة للجدل. لنتناول حالة كوكو (٤ يوليو ١٩٧١-١٩ يونيو ٢٠١٨)، وهي أنثى غوريلا تنتمي إلى سلالة غوريلا السهول الغربية، تعلمت وعاشت في بيئة لغوية (جمعت بين لغة الإشارة واللغة الإنجليزية المنطوقة) منذ كان عمرها عاماً واحداً. وقد زُعم أن كوكو كانت قادرةً على دمج المفردات في «عباراتٍ إبداعية ومُبتكرة بلغة الإشارة».<sup>6</sup>

ابتكرت كوكو العديد من الإشارات الجديدة دون تعليمات، وعدّلت الإشارات القياسية في لغة الإشارة الأمريكية لتنقل التغييرات النحوية والدلالية، واستخدمت الإشارات في الوقت نفسه، وابتكرت أسماءً مُركبة (التي قد يكون بعضها استعارات مقصودة)، وانخرطت في استخدام لغةٍ إشارية مُوجّهة ذاتياً بغرض التعبير عن نفسها وليس للإشارة إلى أشياء بعينها، واستخدمت اللغة للإشارة إلى أشياء غير موجودة في الزمان والمكان الحاضرَيْن، وللخداع والإهانة والجدال والتهديد والتعبير عن مشاعرها وأفكارها ورغباتها. وهذه النتائج ... تدعم الاستنتاج القائل بأن اكتساب اللغة واستخدامها من قبل الغوريلا يتطوّران بطريقةٍ مماثلة لطريقة الأطفال من البشر.<sup>7</sup>

فيما يلي مُحادثة بلغة الإشارة بين المُدرّبة فرانسيس باترسون (المشار إليها بـ «ف»)، وكوكو (المشار إليها بـ «ك») حول قطة كوكو الصغيرة المُفضلة، «أوول بول»، التي تُوفيت في حادث سيارة قبل بضعة أشهر:<sup>8</sup>

ف: كيف شعرتِ عندما فقدتِ بول؟

ك: أريد.

ف: كيف شعرتِ عندما فقدتها؟

ك: افتح مشكلة زيارة أسفة.

ف: هل تتذكّرين عندما ماتت بول، كيف شعرت؟

ك: أحمر أحمر سيئ أسفة كوكو- حُب جيد.

فُسّر هذا الحوار بوصفه تعبير كوكو عن مشاعر الحزن إزاء وفاة أوول بول. غير أن العلماء المُتشكّكين تُساوِروهم شكوك إزاء ما إذا كانت كوكو، وغيرها من الحيوانات التي تعلمت اللغة أيضًا، قادرة حقًا على دمج الرموز بطرق مبتكرة. لا يمكن استبعاد احتمال أن تكون هذه الحيوانات قد تعلمت التصرف بطرق مُعينة في ظلّ ظروف مُعينة (من خلال ارتباطات بسيطة بين المُثير والاستجابة) للحصول على مكافأة، دون فهم المعنى الكامن وراء أفعالها. على سبيل المثال، ربما تعلمت القيام بأفعال مُعينة استجابة لإشارات مدربها اللاواعية غير الملحوظة. وعادة ما يُطلق على هذا «تأثير هانز الذكي»:

في العقد الأول من القرن العشرين، لفت حصان يُدعى هانز أنظار العالم في برلين باعتباره أول وأشهر حيوان «ناطق» ومُفكر ... أجرى هانز عملياتٍ حسابية دقيقة، وكان ينقر بحافره ليعبّر عن الأرقام، وكان يُجيب عن الأسئلة بالطريقة نفسها، باستخدام أبجدية استبدلت فيها الأرقام بالحروف ( $A = 1$ ,  $B = 2$ ,  $C = 3$ ) على سبورة وضعت أمام عينيه. وهكذا، دمج هانز الحروف محوّلًا إيّاها إلى كلمات، والكلمات إلى جُمَل، والجُمَل إلى أفكار وخواطر ... وجد البروفيسور أوسكار بفونجست أن الحصان غير قادرٍ على الإجابة عن أي سؤالٍ إذا كان الشخص الذي يسأله لا يعرف الإجابة ... وعلاوة على ذلك، لم يستطع الحصان الإجابة عن أي سؤالٍ عند وضع حاجزٍ فاصلٍ بينه وبين مُمتحنه، بحيث لا يُمكنه رؤية وجهه ... واتضح أن الحصان كان ملاحظًا مُمتازًا وذكّيًا؛ إذ استطاع قراءة أدقّ الإشارات في وجه سيده، التي تُشير إلى أنه نقر، أو كان على وشك النقر، على الرقم أو الحرف الصحيح وسيحصل على مكافأة. ولكنه لم يكن قادرًا على الأداء في غياب مثل هذه الإشارة. بل إن بفونجست وجد نفسه عاجزًا عن التحكم في هذه الإشارات، عندما استمرّ الحصان في الإجابة بصورةٍ صحيحة عندما كان وجهه ظاهرًا للحصان.<sup>9</sup>

ثمّة مصدر قلق آخر يتمثّل في أنّ إشارات كوكو كانت لا بدّ أن تُترجم من قبل المُدرّبة. «إنّ المحادثات مع الغوريلا تُشبه المحادثات مع الأطفال الصغار، وفي كثيرٍ من

الحالات تحتاج إلى تفسيرٍ يستند إلى السياق والاستخدام السابق للإشارات المعنية. وكثيراً ما تكون التفسيرات البديلة للكلام الغوريلا مُمكنة».<sup>10</sup> فسلّسة من إشارات اليد التي ترجمتها المُدرية إلى «أنت مفتاح هناك أنا بسكويت» (والتي يُفترض أنها تعني «من فضلك استخدم مفتاحك لفتح تلك الخزانة، وأحضري لي قطعة من البسكويت لأكلها») قد تُمثل في الواقع «تلويح كوكو بإشاراتٍ عشوائية في محاولةٍ مرتبطة بموقفٍ بعينه فحسب للحصول على الطعام من مدربتها، التي كانت تتحكم في خزانة طعام مُقفلة. لم تُقل كوكو أي شيءٍ قط؛ فلم تزعم حقيقةً مُحددة، أو تعبر عن رأيٍ مُحدد، أو تطرح سؤالاً يمكن تحديده بوضوح. إن إنتاج إشاراتٍ عرضية مُرتبطة بالسياق، تكون في الغالب استجابةً لإشارات باترسون، بعد سنواتٍ من التدريب المُكثف القائم على المكافأة، ليس استخداماً للغة».<sup>11</sup>

خلاصة القول، لا يزال هناك غموض حول ما إذا كانت هناك حيواناتٌ أخرى خلاف البشر قادرة على تعلّم استخدام اللغة. ورغم أننا قد نعتزّف بإمكانية ذلك، فإن استخدامها للكلمات يَخْتلِف عن استخدام البشر البالغين لها. وفي أفضل الأحوال، لا تتجاوز القدرة اللغوية التي اكتسبها الحيوان قدرة طفلٍ في الثالثة من عمره.

## مناطق اللغة في الدماغ

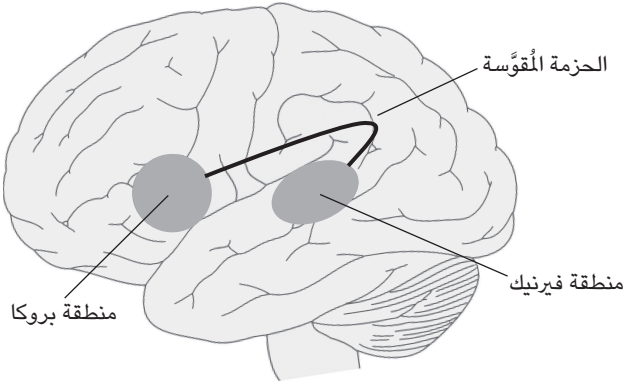
يبدو واضحاً أن النظام المُعقد والمرن للغة البشر فريد من نوعه. وبسبب الافتقار إلى نموذجٍ حيواني مشروع، فإن دراسة تفاصيل العمليات العصبية الأساسية للغة محدودة. لقد أحرزنا تقدماً هائلاً في فهم العمليات العصبية التي تُشكّل الأساس لكثيرٍ من وظائف المخ التي يشترك فيها البشر والحيوانات الأخرى. على سبيل المثال، يُمكننا تفسير عمليات التعلّم والتذكّر من حيث ديناميكيات الدوائر العصبية البديلة؛ نتيجةً لوجود وصلاتٍ عصبية مُعززة (فاعلية التشابك العصبي المُعززة، انظر الفصل الرابع). علاوة على ذلك، حدّدنا العمليات الجزيئية التي تكمن وراء تعيّر فاعلية التشابك العصبي. بل يستطيع العلماء التحكّم في خلايا عصبية مُحددة (تشغيل وإيقاف خلايا عصبية مُحددة اصطناعياً باستخدام تقنية تُسمّى علم البصريّات الوراثي) لزرع ذاكرةٍ زائفة لدى فأر.<sup>12</sup> وبالمقارنة بفهمنا للأساس العصبي للذاكرة، فإن فهمنا للأساس العصبي للغة متأخر للغاية. غير أننا حدّدنا مناطق في المخ البشري مُتخصّصة في معالجة اللغة.

كانت أول منطقة مُتخصّصة في معالجة اللغة تم تحديدها هي منطقة بروكا. في عام ١٨٦١، وصف طبيب الأعصاب الفرنسي بول بروكا حالةً لمرضى فقد القدرة على الكلام، دون أي إعاقات جسدية أو عقلية أخرى. كان اسم المريض لويس فيكتور لوبورن، لكنه كان معروفًا باسم تان لأن «تان» كان المقطع اللفظي الوحيد الذي استطاع النطق به. وقد كشف الفحص التشريحي الذي أُجري بعد الوفاة، عن وجود تَلَفٍ كبير في الجزء الأوسط السُّفلي من الفص الجبهي الأيسر (التلفيف الجبهي السفلي الأيسر)، وهي المنطقة المعروفة الآن باسم منطقة بروكا (انظر الشكل ١٢-١).<sup>13</sup> ويتَّسم الأشخاص المُصابون بتَلَفٍ في تلك المنطقة بفهم سليم نسبيًا، ولكنهم يُواجهون صعوبةً كبيرة في التحدُّث. وغالبًا ما يكون كلامهم مُختصرًا للغاية كلغة البرقيات؛ إذ يتكوَّن في الغالب من أسماء وأفعال فقط. ويُطلَق على هذا النوع من الحُبسة أو فقدان القدرة على الكلام اسم حُبسة بروكا، أو الحُبسة التعبيرية، أو الحُبسة الحركية.

بعد بضع سنوات، رصد طبيب الأعصاب الألماني كارل فيرنيك نوعًا مُختلفًا من الحُبسة. يستطيع المرضى المُصابون بهذا النوع التحدُّث بطلاقة، ولكنهم يجدون صعوبةً في الفهم. ورغم أن كلامهم سلس (أي مُتواتر وصحيح نحويًا)، فإنه بلا معنى، وغالبًا ما لا يُدركون ذلك. يبدو أن نظام إنتاج الكلام لديهم يعمل دون السيطرة الواجبة على محتوى الكلام. يتمركز التَلَف لدى هؤلاء المرضى في الجزء الخلفي من الفص الصدغي الأيسر بالقرب من القشرة السمعية الأولية، وهي المنطقة المعروفة الآن باسم منطقة فيرنيك (انظر الشكل ١٢-١).<sup>14</sup> ويُطلَق على هذا النوع من الحُبسة، حُبسة فيرنيك، أو الحُبسة الاستقبالية، أو الحُبسة الحسّية.

طرح فيرنيك نموذجًا عصبيًا مُبكرًا للغة، وقام نورمان جيشويند بتوسيع نطاقه فيما بعد. كان نموذج فيرنيك-جيشويند مؤثرًا إلى حدِّ كبير، إلا أنه يستند إلى تبسيطات مُفرطة، ويتسم بأنه معيب في كثيرٍ من النواحي.<sup>15</sup> على سبيل المثال، لا توجد فروق وظيفية واضحة ومُحددة بين حُبسة بروكا وحُبسة فيرنيك؛ إذ تنطوي معظم حالات فقدان القدرة على الكلام على عجزٍ عن الفهم وعجزٍ عن الكلام على حدِّ سواء. ويذهب البعض إلى أن «النموذج معيب على مستوى أبعاد عديدة للغاية، حتى إنه لا يمكن اعتبار الأبحاث الجديدة مجرد تحديّثات له».<sup>16</sup> علاوة على ذلك، تنطوي معالجة اللغة على مستوياتٍ متعددة من المعالجة (الصوتية والنحوية والدلالية) وعلى تفاعلات مع أنظمة عصبية متعددة (مثل أنظمة التحكم الحركي والتنفيذي ونظم التحكم في الذاكرة). ومن

## الدماغ المُبتَكِر



شكل ١٢-١: منطقتا بروكا وفيرنيك. في نموذج فيرنيك-جيشويند، تُبَاشِر هاتان المنطقتان مهامَّ إنتاج اللُّغة والفهم على التوالي، وتتبادلان المعلومات عبر الحزمة المُقوّسة، وهي حزمة المحاور العصبية الرئيسية التي تربطهما. عندما نُكرّر كلماتٍ منطوقة، تُحوّل أصوات الكلام، بعد مُعالجتها أولاً بواسطة الجهاز السمعي، إلى كلماتٍ ذات معنى في منطقة فيرنيك ثم تُرسل إشارات الكلمات إلى منطقة بروكا (عبر الحزمة المُقوّسة) حيث تُحوّل إلى إشاراتٍ حركية لتحريك العضلات لإنتاج الكلام. أما عندما نقرأ نصًّا مكتوبًا، فنُحوّل الإشارات البصرية، التي يُعالجها الجهاز البصري في البداية، إلى إشاراتٍ شبه سمعية وتُرسل إلى منطقة فيرنيك. ثم تُحوّل منطقة فيرنيك تلك الإشارات إلى كلمات ذات معنى.

ثم، فإن تأطير معالجة اللغة، باعتبارها مجرد عملية فهم وإنتاج للكلام، لن يكون مفيدًا في الكشف عن العمليات العصبية المتنوعة التي تكمن وراء اللغة. وتُركز النماذج العصبية الأدقُّ للغة الآن على المكونات الفرعية الوظيفية لمعالجة اللغة، وليس على التمييز بين فهم وإنتاج اللغة. لن نتناول هذه النماذج الجديدة هنا، ولكن المجال ينتقل «من التوصيفات العامة غير الدقيقة للُّغة والرؤى ذات الطبيعة الارتباطية إلى حدٍّ كبير، إلى التحليلات المعرفية الدقيقة التي تستهدف تحديد الآليات التفسيرية».<sup>17</sup>

## اللغة والفكر

كتب الشاعر والكاتب المسرحي الأيرلندي أوسكار وايلد ذات يوم قائلاً: «لا يوجد أسلوب تصرّف، ولا شكلٌ من أشكال العاطفة، لا نتشاركه مع الحيوانات الأدنى. باللغة وحدها

نسمو فوقهم، أو نسمو بعضنا فوق بعض؛ «باللغة، التي هي أصل الفكر، وليست نتاجاً له».<sup>18</sup>

لقد بدأت هذا الفصل بالتأكيد على دور اللغة في تبادل المعرفة وتجميعها عبر الأجيال؛ أي الجانب التواصلي للغة. ومن هذا المنطلق، يفترض اعتبار اللغة ابنة الفكر؛ أي وسيلة التعبير عن أفكارنا الداخلية. ولكن اللغة، وفقاً لولايد، لا تُعبر فقط عن أفكارنا، بل تُشكلها أيضاً، وقد شاركه في هذا الرأي العديد من المشاهير مثل لودفيج فيتجنشتاين («حدود لغتي تعني حدود عالمي»)<sup>19</sup> وبرتراند راسل («إن اللغة لا تُستخدم فقط للتعبير عن الأفكار، بل لجعل الأفكار التي لا يمكن أن توجد لولاها ممكنة»)<sup>20</sup>.

لا خلاف على أن اللغة تؤثر على الفكر. ولا شك أن استخدام اللغة له تأثيرات قوية ومحددة على الفكر. وهذا هو الغرض منها، أو على الأقل هذا هو أحد أغراض استخدامها: نقل الأفكار من عقل إلى آخر.<sup>21</sup> يسمع أغلبنا «صوتاً داخلياً» أو «كلاماً داخلياً» أثناء التفكير. ولكن هل اللغة ضرورية للفكر؟ إذا فقدنا اللغة، فهل نفقد الفكر أيضاً؟ الإجابة على هذا السؤال واضحة: «لا، ليس تماماً». تشير الدراسات العصبية إلى أن مناطق الدماغ المرتبطة باللغة تختلف عن تلك المرتبطة بوظائف إدراكية أخرى مثل الذاكرة، والتفكير، والتخطيط، واتخاذ القرار، والإدراك الاجتماعي. كما أن الأشخاص الذين يعانون من الحبسة الشاملة؛ أي فقدوا قدرتهم اللغوية بسبب تلف الدماغ، يمكنهم أداء مجموعة متنوعة من المهام التي تتطلب التفكير المجرد.<sup>22</sup> علاوة على ذلك، وكما ناقشنا في الفصل الثامن، فنحن لسنا النوع الحيواني الوحيد القادر على التفكير المجرد؛ فقرة الشمبانزي والدلافين، على سبيل المثال، تُظهر قدراتٍ رائعة في الاستدلال المجرد. من الواضح إذن أن اللغة ليست شرطاً أساسياً للفكر. فكثير من الناس يأتون بأفكارٍ إبداعية من خلال التفكير غير اللفظي. وقد زعم ألبرت أينشتاين أن تخيُّله بأنه يُطارَد شعاعاً من الضوء، كان له دور لا يُنسى في وضع نظرية النسبية الخاصة. بل إن بعض الناس يُفكرون دون وجود حديث داخلي.

وعلى الرغم من أن التفكير من دون كلماتٍ أمرٌ ممكن، فإن هذا لا يعني بالضرورة أن اللغة لا تلعب دوراً في تشكيل أفكارنا. وقد دارت مناقشات كثيرة حول ما إذا كانت اللغة تؤثر في الفكر وكيف تؤثر فيه. ويذهب البعض إلى أن الدور الأساسي للغة يقتصر على التواصل. فاللغة تمكّننا من التعبير عن الأفكار الداخلية، ولكنها ليست ضرورية للفكر المجرد نفسه. ووفقاً لـ «فرضية لغة الفكر» المؤثرة، فنحن نُفكر باستخدام لغة

ذهنية (غالبًا ما يُطلق عليها «اللغة العقلية») لها بنية لغوية. بعبارة أخرى، الأفكار هي في الواقع «جُمَل داخل الرأس».<sup>23</sup> ومن هذا المنطلق، من غير المُرجَّح أن يتجاوز تأثير اللغة على الفكر ذلك، من خلال دورها في التواصل:

اللغة تُشبه حاسَّة البصر إلى حدِّ كبير. فاللغة والبصر أداتان مُمتازتان لنقل المعلومات. والمكفوفون يُواجهون صعوبةً أكبر في تعلُّم جوانب مُعينة من الثقافة البشرية مقارنةً بالمُبصرين؛ وذلك لانقارهم إلى نفس القُدرة على الوصول إلى الكتب والرسوم البيانية والخرائط والتلفاز وما إلى ذلك. ولكن هذا لا يعني أن حاسَّة البصر تجعلك ذكيًّا، أو أن شرح كيفية تطوُّر البصر أو نموِّه يُعادل شرح تطوُّر الفكر المُجرد ونموِّه. فقد تكون فائدة اللغة مُشابهة لفائدة البصر. فهي أداة للتعبير عن الأفكار وتخزينها. فهي ليست آلية تخلق القدرة على توليد هذه الأفكار وتقديرها في المقام الأول.<sup>24</sup>

على النقيض من هذا الرأي، ينظر كثيرون إلى اللغة باعتبارها أكثر من مجرد وسيلة للتواصل الفكري. وتذهب نسخة قوية من هذا المنظور، تُعرف باسم «فرضية سابير-وورف» أو «فرضية النسبية اللغوية»، إلى أن تصوُّرنا للعالم يتحدَّد من خلال بنية لغة مُعينة نستخدمها.<sup>25</sup> وبناءً على هذه الفرضية، قد يكون لدى المُتحدثين بالصينية والإنجليزية طرقُ تفكير مختلفة. وهذه الفرضية، على الأقل في نسختها المتطرفة، لا تحظى بقبولٍ واسع. غير أن كثيرًا من الباحثين يرون أن اللغة يمكن أن تؤثر بقوة على أفكارنا، وخاصة تلك التي تنطوي على مفاهيم مجردة، بما يتجاوز دورها في التواصل.

على سبيل المثال، يرى جاي دوف أن اللغة شكل من أشكال «التعزيز العصبي»، فيقول إن «نظام اللغة المُدرِك عصبياً يُشكل عنصرًا فرعيًّا مهمًّا في نظام مفاهيمي مرِن مُتعدد الوسائط ومُتعدد المستويات. فهو ليس مجرد مصدرٍ للمعلومات عن العالم الخارجي، بل إنه أيضًا إضافة حوسبية تعمل على توسيع نطاقنا المفاهيمي».<sup>26</sup> وتؤكد آنا بورجي على دور اللغة في تمثيل المفاهيم المُجردة بقولها: «إن إمكانات اللغة تُستغلُّ إلى حدودها القصوى في تمثيل المفاهيم المُجردة؛ فالمُسمَّيات يمكن أن تُساعدنا في تجميع العناصر المُتباينة للمفاهيم المُجردة معًا، ويمكن للحديث الداخلي أن يُحسن قدرة أدمغتنا على تتبُّع المعلومات حول الحالات والعمليات الداخلية وعلى النظر داخل أنفسنا بتعمق».<sup>27</sup> وفقًا لهذا المنظور، لا تُستخدم اللغة لتبادل الأفكار فحسب، بل تلعب دورًا أيضًا في تمثيل المفاهيم المُجردة مثل «الحرية» و«النزاهة» (ولكنها تساهم على نحوٍ أقل في

تمثيل المفاهيم الملموسة مثل «الطاولة» و«القط». وفي هذا الصدد، أشار لوبيان ووينتر إلى أن اللغة تجريدية أكثر منها رمزية، على الرغم من أن الرمزية — بمعنى تشابه شكل الكلمة مع معناها (tweet وclick وbang هي أمثلة على الكلمات الرمزية) — يمكن أن تكون مفيدة للغاية في تعلم اللغة والتواصل.<sup>28</sup> ووفقاً لهما، «يتغلغل التجريد في كل ركن من أركان اللغة»، و«قد تكون اللغة نفسها أفضل مصدرٍ للمعرفة بالمعاني المجردة.»<sup>29</sup> فنحن نتعلم العديد من المفاهيم المجردة من خلال تعلم اللغة، وليس من خلال التفاعلات الفعلية مع العالم.<sup>30</sup>

إن الأشخاص الذين يعانون من الحُبسة لا يُظهرون أي قصور (أو قصور طفيف فحسب) في التفكير المجرد.<sup>31</sup> وفي هذا دحض لادعاء أن اللغة يجب اعتبارها «تعزيزاً عصبياً» يُوسّع إطار نطاقنا المفاهيمي.<sup>32</sup> غير أن الحرمان من اللغة في مرحلة الطفولة (الأطفال الصُم المولودون لآباء بحاسة سمع طبيعية غالباً ما لا يتعرّضون بصورة كافية للغة الإشارة في السنوات القليلة الأولى من حياتهم) يمكن أن يؤدي إلى «مُتلازمة الحرمان اللغوي»، التي تنطوي على عجز في مجموعة متنوعة من الوظائف المعرفية، مثل فهم السبب والنتيجة، واستنتاج نوايا الآخرين.<sup>33</sup> وقد كشفت دراسات التصوير الدماغية عن حدوث تغيرات في بنية القشرة المخية وأنماط التنشيط العصبي لدى هؤلاء الأطفال.<sup>34</sup> ومن المثير للاهتمام أن بعض الملاحظات تشير إلى عجز شامل في قدراتهم التجريدية. «الأشخاص الذين يعانون من الحرمان اللغوي لا يتفوقون في مثل هذه المهارات غير اللفظية (ولكنها مهارات مفاهيمية بلا شك) مثل لعب الشطرنج أو الرياضيات ... فقد يعانون لتسمية المشاعر الأساسية، والتعرّف على الحدود الاجتماعية التي تنطوي عليها الكلمات، مثل كلمة «حبيبة»، أو التأمل في تجاربهم الخاصة. إنهم يُعانون للتعرف على الأنماط وإطلاق التعميمات. فلا يمكنهم تطبيق الدروس المستفادة في مجالٍ بعينه بسهولة على مجالات أخرى.»<sup>35</sup>

وهكذا، وبرغم محدودية الأدلة المتاحة على ذلك، فإن اللغة قد تلعب دوراً في توسيع وتحسين التفكير المجرد أثناء الفترة الحرجة. قد تلعب اللغة دور دعائم البناء أو السقالات التي تُعد «ضرورية لإنشاء بنية معرفية، ولكن بمجرد أن يُحقق النظام مستوى من الاستقرار، حينها يمكن إزالة الدعائم اللغوية.»<sup>36</sup> قد تكون اللغة أحد العوامل الحاسمة أثناء التطور التي تمدُّ حدود الفكر لتصل به إلى عمق المجال المجرد، مما يُتيح لنا التفكير بسلسلة باستخدام المفاهيم المادية والمجردة على حدٍّ سواء، وهو ما يؤدي في

بعض الأحيان إلى خطأ في التصنيف (انظر الفصل الثامن). ومرة أخرى، الأدلة محدودة. فما تَكهَّنًا به بشأن الدور المُحتمل للغة في التجريد قد يكون صحيحًا أو غير صحيح. وما زال الحسم في هذا الأمر مُعلقًا.

## أصل اللغة

على الرغم من أن الغموض ما زال يحيط بالعلاقة بين اللغة والفكر، فلا شك أن اكتساب القدرة اللغوية كان خطوة هائلة في طريق التطور البشري. فكيف اكتسبنا هذه القدرة؟ وما أصل اللغة؟ تُعد هذه قضية بالغة الأهمية لفهم كيف أصبحنا على ما نحن عليه الآن: «الإنسان المُبتكر». ظلَّ أصل اللغة محلَّ جدلٍ لوقتٍ طويل بين علماء اللغة وعلماء الأنتروبولوجيا والفلاسفة وعلماء النفس وعلماء الأعصاب. تُوجد العديد من وجهات النظر التي يتعارض بعضها مع بعض. وهذا يُشير، للأسف، إلى أننا ما زلنا بعيدين عن فهم هذه المسألة فهمًا كاملًا.

يُشكل فهم أصل اللغة تحدّيًا صعبًا لعدة أسباب. أولاً: اللغة سمة يتفرّد بها البشر. فلا يُوجد نظام تواصل آخر لدى الحيوانات يقترب من النظام المُعقد الذي يجمع بين المرونة والقوة، الذي يستخدمه البشر للتواصل. ومن ثم، وعلى عكس العديد من الوظائف البيولوجية الأخرى، من الصعب اكتساب رؤى من خلال الأساليب المُقارنة (أي فحص ومقارنة وظائف اللغة في أنواع حيوانية متنوعة). كذلك من الصعب إجراء دراسات تعتمد على الأساليب الباضعة (مثل تسجيل النشاط العصبي باستخدام قطب كهربائي دقيق أو تعطيل منطقة موضعية في الدماغ) بسبب الافتقار إلى نموذج حيواني.

ثانيًا: نحن نفتقر إلى سجلّات أحفورية مباشرة للغة. ومن الصعب أن نربط السجلات الأثرية مباشرة بتطور اللغة. بالمثل، لا تستطيع القوالب الدماغية الداخلية أن تُخبرنا إلا بالقليل عن وظيفة اللغة. ربما كانت السجلّات الأحفورية لأعضاء الكلام، مثل المجرى الصوتي، مُرتبطة بتطور الكلام، ولكن ثمة فجوة هائلة بين القدرة على إنتاج الأصوات المنطوقة والقدرة على دمج الرموز نحوياً لتوليد تعبيرات جديدة. كانت نظرية هبوط الحنجرة شائعةً على مدى السنوات الخمسين الماضية. وتزعم هذه النظرية أن هبوط الحنجرة قد حدث لدى أسلافنا، دون الرئيسيات الأخرى، منذ نحو مائتي ألف عام، مما يسمح بإنتاج الأصوات المُتحركة المُنبأية، وتطور الكلام، وأخيرًا تطور اللغة لدى الإنسان العاقل. ولكن خلصت مراجعة شاملة حديثة إلى أن «الأدلة الآن تدحض بشكلٍ ساحقٍ

نظرية هبوط الحنجرة القديمة، التي تُرجع فكرة «فَجْرَ ظهور الكلام» إلى أكثر من ٢٠٠ ألف سنة، لتصل إلى ما يزيد على ٢٠ مليون سنة».<sup>37</sup>

ثالثًا: لا بدّ من النظر في ديناميكيات التفاعل الاجتماعي عند تفسير تطور اللغة. كثيرًا ما يكون تفسير تطوّر سمة اجتماعية، مثل الإيثار، أقل وضوحًا مقارنةً بسمة غير اجتماعية. ولعل البشر هم الحيوانات الوحيدة التي تُظهر إيثارًا «حقيقيًا». فنحن كثيرًا ما نساعد الغرباء دون أن نتوقع منهم ردّ الإحسان بمثله. بل إننا نتحمّل خسارة شخصية لمعاقبة مُنتهكي القواعد (العقاب الإيثاري). لا يمكن تفسير هذه السلوكيات البشرية بسهولة من حيث الصلاحية البيولوجية (القدرة على نقل جيناتنا إلى الجيل التالي).<sup>38</sup> بالطبع يُعزز الإيثار صلاحية البقاء لمجموعةٍ ما. ولكن داخل المجموعة، ستكون صلاحية البقاء أعلى بين الأفراد الأنانيين. ومن ثم، فليس واضحًا كيف جرى انتخاب السمات الإيثارية على السمات الأنانية عبر الأجيال. وعلى نحوٍ مُماثل، تشكل القدرة على تبادل المعلومات ميزة كبيرة للمجموعة. ولكن كيفية ظهور هذه السمة في البداية وكيفية بقائها عبر الأجيال أمور لا تزال غير واضحة. فاللغة لا قيمة لها إذا كنت الشخص الوحيد القادر على الكلام.

وفي هذا المقام، بدلًا من تقديم نظرة شاملة للنظريات المتعلقة بأصل اللغة، سوف نبحت عددًا قليلًا منها فقط على نحو انتقائي إلى الحدّ الذي يكشف عن تنوّع الآراء في هذا المجال. كان من بين النقاشات الجدلية بشأن أصل اللغة ذلك الذي دار حول ما إذا كانت اللغة قد تطوّرت فجأة أم تدريجيًا. وهنا نتذكّر النقاش الذي دار حول تطوّر الحداثة السلوكية والثورة البشرية (انظر الفصل العاشر). فقد افترض نعوم تشومسكي أن اللغة الحديثة تطوّرت فجأة نتيجةً لطفرة عرضية غير متوقّعة.

إن القدرات البشرية على التخيل الإبداعي، واللغة والرمزية عمومًا، والرياضيات، وتفسير وتسجيل الظواهر الطبيعية، والممارسات الاجتماعية المُعقدة، وما إلى ذلك، هي مجموعة من القدرات التي يبدو أنها تبلورت منذ عهدٍ قريبٍ إلى حدٍّ ما، ربما منذ ما يزيد على خمسين ألف عام ونيف، بين مجموعةٍ تكاثريةٍ صغيرةٍ ننحدر منها جميعًا؛ مجموعة قدرات تُميز البشر بوضوحٍ إلى حدٍّ ما عن الحيوانات الأخرى، بما في ذلك أشباه البشر الآخرين، إذا حكمنا من خلال الآثار التي خَلّفوها في السجل الأثري ... وكان اختراع اللغة ... هو الحدث «المفاجئ» والناشئ» الذي كان بمنزلة «الحافز المُطلق» لظهور القدرة البشرية في السجلِّ

التطوري؛ تلك «القفزة الهائلة إلى الأمام» كما أسماها جاريد دايموند، التي ترتبت على حدثٍ وراثي أعاد برمجة الدماغ، مما سمح بظهور اللغة الحديثة مصحوبة بالتركيب اللغوي الثري الذي يوفر العديد من أساليب التعبير عن الفكر، ويُعد شرطاً أساسياً للتطور الاجتماعي والتغيرات الجذرية في السلوك التي تكشف عنها السجلات الأثرية.<sup>39</sup>

أحيا اكتشاف الجين *FOXP2* (فوكس بي ٢) الأمل في أن نتمكن من التعرف على «الطفرة العرضية» التي افترضها تشومسكي. جرى التعرف على جين *FOXP2* من خلال تحليل جيني أُجري عام ٢٠٠١ لعائلة بريطانية تُعرف باسم كيه إي، كان نصف أفرادها يُعانون من قصور شديد في إنتاج الكلام.<sup>40</sup> يُعاني العديد من أفراد عائلة كيه إي المُصابين بهذا القصور من انخفاض معدل الذكاء، إلا أن بعضهم ممن يتمتعون بمعدل ذكاء طبيعي يُعانون من صعوبات لغوية، مما يُشير إلى أن مشكلة اللغة ليست بسبب قصور إدراكي عام. وقد أظهرت دراسة جينية مقارنة لاحقة أن بروتين *FOXP2* البشري يختلف عن بروتينات القردة العليا الأخرى بخصائصٍ أُمينيين فقط.<sup>41</sup> وجدت هذه الدراسة أيضاً أدلة على حدوث «المسح الاصطفائي»، وهي عملية تتزايد فيها وتيرة طفرة مفيدة نادرة سريعاً عن طريق الانتخاب الطبيعي. وتشير هذه النتائج إلى أن طفرة مفيدة في جين *FOXP2*، يُقدّر أنها قد حدثت منذ مائتي ألف عام، ربما كانت السبب وراء تطوّر اللغة الحديثة لدى البشر. ولكن على النقيض من التقرير الأول، لم تجد دراسة لاحقة أي دليل على حدوث مسح اصطفائي في جين *FOXP2*.<sup>42</sup> علاوة على ذلك، كشفت دراسة مَعنية بتسلسل الحمض النووي القديم أن النياندرتال يشترك في التغيرات التطورية في جين *FOXP2* (حمضان أُمينيين يختلفان عن القردة العليا الأخرى) مع الإنسان الحديث.<sup>43</sup> وبناءً على ذلك، لا بد أن التغيرات المُفيدة في جين *FOXP2* قد حدثت قبل انفصال أسلافنا عن النياندرتال (قبل نحو نصف مليون عام)، ولكن لا يُوجد دليل واضح على استخدام النياندرتال للغة. يؤيد البعض فرضية استخدام النياندرتال للغة، ولكن كثيرين يُشككون في هذه الاحتمالية.<sup>44</sup>

في الوقت الحالي، يبدو أن أغلب الباحثين يميلون إلى فكرة أن اللغة البشرية قد تطورت على مراحل على مدى فترة زمنية طويلة، تماماً كما حدث مع أغلب الوظائف البيولوجية، على الرغم من عدم وضوح كيفية تطوّر هذه العملية التدريجية على وجه التحديد أثناء التطوّر البشري. فيما يلي سيناريو افتراضي لخطوات تطوّر اللغة:

في مرحلة مُبكرة، كانت الأصوات تستخدم لتسمية مجموعة واسعة من الأشياء والأفعال في البيئة المحيطة، وكان الأفراد قادرين على اختراع مفردات جديدة للحدث عن أشياء جديدة. ولتحقيق حصيلة مفردات كبيرة، حدث تطور مهم، وهو القدرة على «تحويل» الإشارات إلى تسلسلات من أصواتٍ كلامية منفصلة — الحروف الساكنة والحروف المتحركة — بدلاً من النداءات غير المنظمة. وهذا يتطلب تغييراتٍ في الطريقة التي يتحكم بها الدماغ في المجرى الصوتي، وربما في الطريقة التي يُفسر بها الدماغ الإشارات السمعية ... الخطوة المنطقية التالية هي القدرة على ربط العديد من هذه «الكلمات» معاً لإنشاء رسالة من معاني أجزائها. ولكن يظلُّ هذا بعيداً عن مستوى التعقيد الذي تتسم به اللغة الحديثة. ربما اتسمت بكونها بدائية وبسيطة للغاية، ومع ذلك تظل أفضل كثيراً من التعبير عن الكلام بكلمة واحدة. الواقع أننا نجد مثل هذه «اللغة البدائية» لدى الأطفال في سنِّ الثانية، وفي المحاولات البدئية التي يبذلها الكبار عند تعلُّم لغة أجنبية، وفيما يُسمَّى بـ «اللغة الهجينة»، وهي الأنظمة التي يصوغها الكبار المُحدثون بلغاتٍ مختلفة عندما يحتاجون إلى التواصل أحدهم مع الآخر بغرض التجارة أو غير ذلك من أشكال التعاون ... ومن شأن التغيير النهائي أو سلسلة التغييرات أن تُضيف إلى «اللغة البدائية» بنية أكثر ثراءً، تشمل أدوات نحوية مثل علامات الجمع، وعلامات الأزمنة، والعبارات الموصولة، والعبارات المُتممة للمعنى («يعتقد جو أن الأرض مسطحة»)<sup>45</sup>.

هناك قضية أخرى كانت محلَّ نقاش ساخن بشأن أصل اللغة، وهي العلاقة بين اللغة والوظائف المعرفية الأخرى. فيذهب البعض إلى أن نظام اللغة البشرية هو نظام قائم بذاته ومُنفصل عن جميع المَلَكات العقلية الأخرى، في حين يزعم آخرون أن اللغة تعتمد على وظائف معرفية أخرى. ومرة أخرى، دعونا نبحث بعضاً من هذه النظريات. يُعد مايكل توماسيلو أحد الباحثين المؤيدين لفكرة أن اللغة هي مظهر من مظاهر وظائف معرفية أعم وأشمل. ويجادل بأن البشر والقرود العليا على حدِّ سواء لديهم القدرة على فهم نوايا الآخرين. غير أن البشر فقط هم من ينخرطون في أنشطة تنطوي على نوايا وانتباه «مُشتركين»، وهو ما أطلق عليه «القصدية المشتركة»: «بالإضافة إلى فهم الآخرين باعتبارهم فاعلين عقلايين قصديين، فإن البشر يمتلكون أيضاً نوعاً من القدرة الاجتماعية أكثر تحديداً، تمنحهم الدافع والمهارات المعرفية اللازمة لتشارك المشاعر

والخبرات والأفعال مع الآخرين، فيما قد نطلق عليه، بالتركيز على المرحلة النهائية من التطور، القصدية المشتركة (أو مفهوم الجماعة، «نحن»). ونظرًا لاعتبار القصدية المشتركة المهارة المعرفية الاجتماعية الأساسية للإبداع الثقافي والإدراك، فإن لها أهمية خاصة في تفسير المهارات المعرفية ذات القوة الفريدة من نوعها للإنسان العاقل.<sup>46</sup>

وفقًا لتوماسيلو، فإن البشر فقط هم من يملكون القدرة المعرفية على تمثيل هدف مشترك (على سبيل المثال، أنت وأنا نتعاون معًا لفتح صندوق)، ونية مشتركة (على سبيل المثال، أنت تمسك الصندوق بينما أقوم أنا بفتحه). تبدأ القدرة على تمثيل القصدية المشتركة في الظهور بحلول العام الأول من العمر عندما يبدأ الأطفال في استخدام الكلمات. ويذهب توماسيلو إلى أن القدرات المعرفية البشرية الفريدة، مثل استخدام اللغة ونظرية العقل، «مُشتقة» من فهم ومشاركة النوايا (القصدية المشتركة).

إن القول بأن البشر وحدهم هم من لديهم لغة أشبه بالقول بأن البشر وحدهم هم من يبنون ناطحات السحاب، في حين أن الحقيقة هي أن البشر وحدهم (من بين الرئيسيات) هم من يبنون مساكن مُستقلة وقائمة بذاتها أصلًا. إن اللغة ليست قدرة فطرية، بل هي مُشتقة. وهي تستند إلى نفس المهارات المعرفية والاجتماعية الأساسية التي تدفع الأطفال إلى الإشارة إلى الأشياء وإظهارها للآخرين على نحو واضح ومفيد، على نحو لا تفعله الرئيسيات الأخرى، مما يدفعهم إلى الانخراط في أنشطة تعاونية تعتمد على انتباه مشترك مع الآخرين من نوع يفرد به البشر أيضًا بين الرئيسيات.<sup>47</sup>

يُعد ستيفن بينكر من الباحثين المؤيدين لوجهة النظر المعاكسة، تحديدًا تلك النظرية القائلة بأن اللغة تختلف اختلافًا جوهريًا عن أنواع الإدراك الأخرى. فيذهب بينكر إلى أن اللغة تطوّرت من أجل «إيصال» عبارات مُعقدة.

ما الذي تسعى آلية اللغة إلى تحقيقه؟ يبدو أن النظام قد تم تجميعه لتشفير المعلومات الإخبارية — مَنْ فعلَ ماذا بَمَنْ، وما هو صحيح عن ماذا، وما يتعلق به من عناصر زمنية (متى)، ومكانية (أين)، وسببية (لماذا) — في إشارة يمكن نقلها من شخصٍ إلى آخر. ليس من الصعب إدراك السبب وراء قدرة نوع يتمتع ببقية خصائصنا أن يطور مثل هذه القدرة بدافع التكيف. إن البنى النحوية مناسبة تمامًا لنقل معلومات حول التكنولوجيا، مثل: أي شيئين يمكن جمعهما

معاً لإنتاج شيء ثالث؛ وحول البيئة المحلية المحيطة، مثل أماكن الأشياء؛ وحول البيئة الاجتماعية، مثل مَنْ فعلَ ماذا بَمَنْ، ومتى، وأين، ولماذا؛ وحول نوايا المرء الخاصة، مثل «إذا فعلتَ هذا، فسوف أفعلُ ذلك»، وهو ما ينقل بدقة الوعود والتهديدات التي تُعززُ أسس علاقات التبادل والهيمنة.<sup>48</sup>

يزعم بينكر أن البشر، على النقيض من الحيوانات الأخرى، قد تطوَّروا بحيث يقومون بإجراء عملية الاستدلال القائمة على السبب والنتيجة والاعتماد على المعلومات من أجل البقاء. ومن ثم، فمن المفيد لهم أن يتوصلوا إلى وسيلة «لتبادل» المعلومات. ويذهب إلى أن «ثلاث سماتٍ رئيسة لأسلوب الحياة الذي يُميز البشر — وهي المعرفة، والتواصل الاجتماعي، واللغة — تطورت معاً، وتُشكل كل منها ضغطاً انتقائياً على السمات الأخرى».<sup>49</sup>

وفقاً لمارك هاوزر، ونعوم تشومسكي، وتيكومسيه فيتش، ينبغي التمييز بين القدرة اللغوية الواسعة (FLB) والقدرة اللغوية الضيقة (FLN). لا تتضمن القدرة اللغوية الضيقة سوى الآليات الحوسبية الأساسية للتكرار (يمكن أن تحتوي عبارة على عبارة أخرى بحيث يُمكننا توليد عددٍ لا نهائي من الجُمَل بأي حجم، مثل «أتساءل عما إذا كان يعرف أنها تعتقد أننا نشتهب في أنه المجرم»)، بينما تحتوي القدرة اللغوية الواسعة على عنصرين إضافيين، هما: نظام حسي حركي، ونظام مفاهيمي قصدي. توفر كلتا القدرتين مُجمعتين «القدرة على توليد نطاقٍ لا نهائي من التعبيرات من مجموعة محدودة من العناصر» (اللانهاية المُتقطعة).<sup>50</sup>

يفترض الباحثون الثلاثة أن القدرة اللغوية بمفهومها الضيق قد تطوَّرت حديثاً، وهي قدرة فريدة من نوعها لدى البشر، وفريدة من نوعها بالنسبة إلى اللغة؛ ومن ثم «ينبغي ألا تكون هناك تشابهات وظيفية أو شكلية في الحيوانات الأخرى، ولا عمليات مُتشابهة في مجالات أخرى من مجالات الفكر البشري».<sup>51</sup> على النقيض من ذلك، فإن العديد من جوانب القدرة اللغوية الواسعة مشتركة مع الفقاريات الأخرى. ويَحْمَنون أيضاً أن القدرة اللغوية الضيقة (آلية التكرار) ربما تطورت «لحل مشاكل حوسبية أخرى، مثل التنقل، أو التمييز العددي، أو العلاقات الاجتماعية».

من الاحتمالات الواردة، والتي تتسق مع نمط التفكير الحالي في العلوم المعرفية، أن التكرار لدى الحيوانات يُمثل نظاماً معيارياً مُصمماً لأداء وظيفة مُعينة

كالتنقل على سبيل المثال) ولا يمكن لأي أنظمةٍ أخرى النفاذ إليها. وخلال التطور، ربما أصبح نظام التكرار المعياري والمحدد بنطاقٍ مُعين قابلاً للنفاذ وغير مقتصرٍ على نطاقٍ معين. وقد فتح هذا المجال أمام البشر، ربما على نحوٍ فريد، لتطبيق قوة التكرار على مشاكلٍ أخرى. وربما كان هذا التحول من نطاقٍ محددٍ إلى نطاقٍ عامٍ وشامل، موجهاً بضغوط انتقائيةٍ بعينها، انفرد بها ماضيها التطوري، أو نتيجة (نتاج ثانوي) لأنواعٍ أخرى من إعادة التنظيم العصبي.<sup>52</sup>

لقد ذكرت الطبيعة الاجتماعية للغة باعتبار أنها تُشكّل تحدياً لفهم أصلها. وتتعامل إحدى النظريات التي بحثناها، وهي نظرية القصدية المشتركة لتوماسيلو (أي مشاركة الأهداف والنوايا مع الآخرين)، مع هذه المسألة، ولكنها ليست الوحيدة. فكثير من النظريات الأخرى تركز على الطبيعة الاجتماعية للغة. لنبحث نظريةٍ أخرى، ألا وهي نظرية التطور المشترك للشعائر والكلام، التي تزعم أننا يجب أن نأخذ في الاعتبار الثقافة الرمزية البشرية بأكملها لفهم أصل اللغة. يفترض مؤيدو هذه النظرية أن اللغة لا تعمل إلا بعد إرساء مستوياتٍ عالية من الثقة في المجتمع؛ لأن الكلمات إشارات رخيصة (منخفضة التكلفة)، وبالتالي فهي غير موثوقة بطبيعتها. ويشير كريس نايت إلى أن «أي زيادة في نسبة المُستمعين الواثقين تزيد من المكافآت للكاذب، مما يزيد من تواتر الكذب. ولكن إلى أن يتمكن المستمعون من افتراض صدق المتحدث باطمئنان، سيكون موقفهم تجاه الإشارات الطوعية هو اللامبالاة. حينئذٍ، حتى الكذب سيكون مضيعة للوقت. بعبارةٍ أخرى، يوجد حدٌ للاستخدام الصادق للإشارات التقليدية، وأي استراتيجية قائمة على مثل هذه الإشارات أسفل هذا الحد تظل استراتيجية غير مستقرة. ولكي يتسنى تحقيق الاستقرار، لا بد أن تغطي الاستراتيجية الصادقة بصورةٍ قاطعة على الخداع.»<sup>53</sup> لذا، لكي يكون التواصل اللفظي ممكناً، «ما يكون على المحك ليس فقط صدق وموثوقية رسائل مُعينة، بل أيضاً المصادقية وجدارة التصديق والثقة في حد ذاتهم؛ لذا فإن أُسس الثقة ضرورية لأنظمة التواصل والمجتمع بصفةٍ عامة.»<sup>54</sup>

ويمضي نايت ليصف كيف أن هذه النظرية تُسلط الضوء على دور الدين والشعائر في إرساء الثقة الاجتماعية قائلاً: «الكلمات رخيصة وغير موثوقة. وترياقها يتمثل في طقوس دينية مُتكررة وثابتة ومُكلفة. يقبع على قمة المنظومة الإيمانية «مُسلمة مقدسة مطلقاً»؛

قاعدة إيمانية لا يمكن إنكارها. قد تكذب الكلمات البشرية، كما يزعم البعض، ولكن «الكلمة الإلهية» تنبثق من مصدرٍ أسمى. وبدون هذه الثقة العامة التي تدعمها الطقوس الدينية، سينهار الإيمان بمنظومة الرموز المترابطة بأكملها. لذا كانت الخطوة الحاسمة خلال تطور البشرية هي إرساء الشعائر القادرة على دعم مستويات الثقة اللازمة لنجاح التواصل اللغوي».<sup>55</sup>

لذا لكي يتسنى لنا فهم أصل اللغة، يتعين علينا أن نأخذ في الاعتبار سياقاً أوسع — الثقافة الرمزية البشرية ككل — تشكل اللغة أحد مكوناته الأساسية، وفقاً لهذه النظرية.

### فرضية الخلية العصبية المرآتية

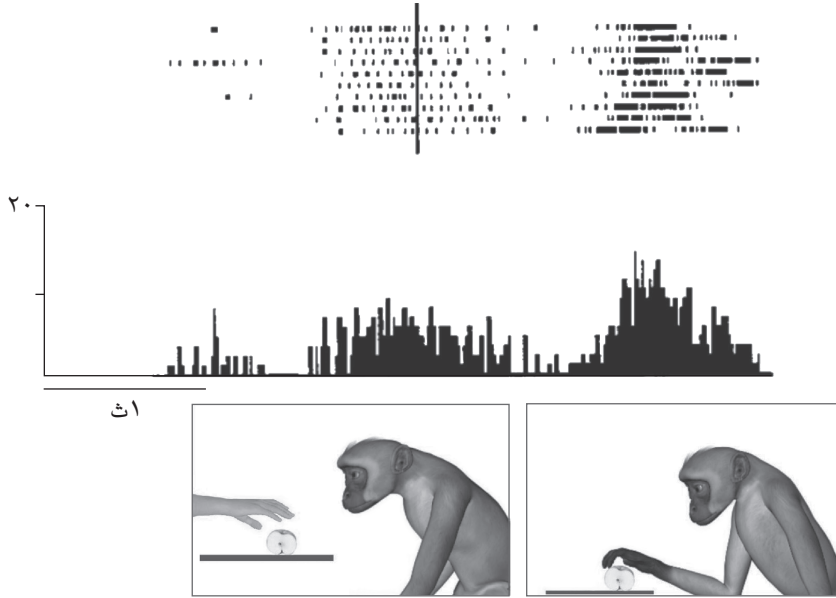
كما يُمكننا أن نرى من هذه الأمثلة، توجد وجهات نظر متباينة إلى حدٍ بعيد حول أصل اللغة، تمتد إلى تخصصاتٍ متعددة. وقبل ختام هذا الفصل، دعونا نبحث نظرياً أخرى مُستمدّة من أبحاث علم الأعصاب، ألا وهي: فرضية الخلية العصبية المرآتية.

ما هي الخلايا العصبية المرآتية؟ هي خلايا عصبية توجد في القشرة الأمام حركية للقرد وتنشط عند القيام بعملٍ ما وملاحظته. تقع القشرة الأمام حركية بين القشرة الجبهية الأمامية والقشرة الحركية الأولية. تخطط القشرة الجبهية الأمامية لسلوكٍ موجّه نحو هدف (نوقش في الفصل التاسع) وتتحكم القشرة الحركية الأولية في تقلّصات العضلات الفردية. يُعتقد أن القشرة الأمام حركية تلعب دوراً وسيطاً في اختيار خطة حركية مناسبة لتحقيق نتيجةٍ مرجوة (الإمساك بشيءٍ ما على سبيل المثال). وبصفة عامة، فإن القشرة الجبهية الأمامية والقشرة الأمام حركية والقشرة الحركية الأولية مسئولة عن استراتيجيات وتكتيكات وتنفيذ السلوك الموجّه نحو هدف، على التوالي.

في تسعينيات القرن العشرين، اكتشف جياكومو ريزولاتي وزملاؤه أن بعض الخلايا العصبية في القشرة الأمام حركية للقرد تُطلق إشارات عصبية عندما يقوم القرد بفعلٍ مُعين (مثل الإمساك بشيءٍ ما) وكذلك عندما يلاحظ نفس الفعل يقوم به آخر (انظر الشكل ١٢-٢).<sup>56</sup> وأظهرت دراسة لاحقة أن الإشارات البصرية (الرؤية) وكذا والإشارات السمعية (السمع)، فعّالة في تنشيط بعض الخلايا العصبية المرآتية (الخلايا العصبية المرآتية السمعية البصرية) في القشرة الأمام حركية للقرد.<sup>57</sup> على سبيل المثال، نشطت خلية عصبية في القشرة الأمام حركية عندما كسر القرد حبة فول سوداني (الفعل)، وعندما راقب القرد إنساناً يكسر حبة فول سوداني (الرؤية)، وعندما سمع القرد حبة

## الدماغ المُبتكر

الفول السوداني تُكسر دون أن يرى الفعل (السمع). ويُعتقد أن هذه المنطقة من القشرة الأمام حركية في دماغ القرد (المنطقة F5) تتماثل في بنيتها مع منطقة بروكا في الدماغ البشري، كما تزيد منطقة بروكا من معدل النشاط أثناء أداء وملاحظة حركة الإصبع.<sup>58</sup>



شكل ١٢-٢: خلية عصبية مرآتية سُجِّلَ نشاطها من القشرة الأمام حركية لدى قرد. رفعت هذه الخلية العصبية نشاطها استجابةً لملاحظة حركة الإمساك بشيءٍ من قِبل القائم على التجربة، وكذلك حركة الإمساك بشيءٍ من قِبل القرد نفسه. الشكل مستنسخ من مقال أنطونينو إرانتى وليوناردو فوجاسي: «التخصيص الدماغي الوظيفي لنظام الخلايا العصبية المرآتية لدى القردة والبشر»، دورية «سيمتري» مجلد ١٣، العدد ١ (٢٠٢١): (CC BY) 77.

وقد أدت هذه الملاحظات إلى فرضية مفادها أن نظام الخلايا العصبية المرآتية (أو نظام «مطابقة الملاحظة/الفعل») ربما كان الأساس لتطور اللغة.<sup>59</sup>

إن الخلايا العصبية المرآتية في القشرة الأمام حركية للقردة تزوّد جهازها الحركي بقدرة فطرية متأصلة على مقارنة الأفعال التي تولدها القردة مع تلك التي يُولدها أفراد آخرون. لذا فإن هذا الجهاز لديه القدرة على أن يكون المرسل

</

والمستقبل للرسالة في نفس الوقت... إن مشكلة تحويل البنية الدلالية للعناصر النحوية إلى جُملة (هي واحدة من احتمالات عديدة) تعبر عن هذه البنية، قد يُنظر إليها باعتبارها مُماثلة للمشكلة غير اللغوية المُتمثلة في التخطيط للترتيب الصحيح للأفعال لتحقيق هدف معقد. لنفترض أن القرد يريد الإمساك بالطعام، ولكنه يُدرك بعد ذلك أن عليه أن يفتح بابًا للحصول على الطعام. وعند التخطيط للفعل، لا بد أن يعكس ترتيب القيام به: الباب أولاً ثم الطعام. هذا أشبه بالمشكلة النحوية المُتمثلة في إنتاج جملة جيدة الصياغة، ولكن يُنظر إليها الآن باعتبارها انتقالاً من «الأفكار التي تعتمل في الرأس» إلى سلسلة من الكلمات/الأفعال تسير بالترتيب الصحيح لتحقيق هدف تواصلِي أو عملي.<sup>60</sup>

تتفق هذه النظرية مع الرأي القائل بأن أصل اللغة هو التواصل الإيمائي وليس نداءات الحيوانات.<sup>61</sup> وتجدر الإشارة إلى أن نظام الخلايا العصبية المرآتية وحدَه غير كافٍ لدعم بناء الجملة في اللغة البشرية، وخاصة التكرار الهزمي. ووفقاً لمايكل أربيب وميهائيل بوتّا، فإن ربط منطقة بروكا بنظام التخطيط في القشرة الجبهية الأمامية يُتيح لنا «تجميع بنى الفعل والمُسند إليه والبنى الهرمية الأكثر تعقيداً، مما يؤدي إلى إيجاد الكلمات وربطها ربطاً صحيحاً».<sup>62</sup>

باختصار، لا شك أن اللغة تُشكل عنصراً حاسماً في الابتكار البشري. وقد كان اكتساب القدرة اللغوية خطوةً هائلة حقاً في التطور البشري. فاللغة تسمح بتبادل الأفكار وتراكم المعرفة عبر الأجيال. وقد تلعب اللغة أيضاً دوراً في تأسيس قدرة مناسبة على التفكير المجرد أثناء التطور. ولا شك أن فهم أصل اللغة يُشكل أهمية بالغة لفهم الكيفية التي تحوّلنا بها إلى «الإنسان المبتكر». ولكن للأسف لا يزال أصل اللغة بعيداً كل البعد عن الوضوح، ويرجع هذا جزئياً إلى تفرّد اللغة البشرية. فما من وسيلة تواصل بين الحيوانات تقترب بأي حالٍ من اللغة البشرية من حيث المرونة والتعقيد والقوة. وهذا التفرّد للغة، إلى جانب قلة الأدلة الأثرية وطبيعتها الاجتماعية، يفرض تحدياتٍ أمام دراسة أصل اللغة. لدينا العديد من النظريات، ولكننا لم نتوصل بعد إلى إجماع قوي حول كيفية تطور القدرة اللغوية؛ «إن ثراء الأفكار مصحوب بفقير في الأدلة».<sup>63</sup> ومع ذلك، فإن أصل اللغة يجذب اهتمام العديد من التخصصات المعرفية. وقد حاول كثير من العلماء حل هذه المشكلة بالاستعانة بأفكار المُفكرين العظماء السابقين، وهو ما أصبح مُمكنًا بفضل اللغة.



## عن الإبداع

يشكل الخيال جانباً أساسياً من الطبيعة البشرية. فنحن نتخيل ما هو واقعي وغير واقعي عندما تتوفر لنا رفاهية تجاهل العالم الخارجي. ويُعتَقَد أن هذه عملية تكيُّفية. وقد نهبتُ في الفصلين السادس والسابع إلى أن الخيال قد يكون متجذراً في عملية الاختيار والمحاكاة أو «التعلُّم المُعزَّز غير المتصل بالإنترنت»، حيث نعمل على تعزيز الخيارات ذات القيمة العالية في ظروف متنوعة قد نواجهها في المستقبل. ومن خلال الاستكشاف الذهني للخيارات المختلفة وتقييم قيمتها المُحتملة، نصبح أكثر استعداداً لاتخاذ القرارات المثلى في مواقف الحياة الواقعية. ولعل هذا أحد أسباب انجذابنا إلى الأدب والدراما؛ فهما يوفران لنا مجالاً لممارسة خيالنا والانخراط في عملية الاختيار والمحاكاة هذه. فالخيال، على النقيض من المهارات الأخرى، قُدرة فطرية لا تحتاج إلى ممارسة أو تدريب. فهو طبيعي ولا يتطلَّب أي جهدٍ مثل التنفس.

ولكن ماذا عن الإبداع؟ هل من الممكن تعزيز الإبداع لدى الفرد؟ وإذا كان الأمر كذلك، فكيف؟ وبما أن هذا الكتاب لا يهدف إلى التوسُّع في علم الأعصاب المُتعلق بالإبداع على نحوٍ مستفيض، فإنني أقترح على القراء المُهتمين أن يبحثوا عن هذين الكتابين، الأول من تأليف أنا أبراهام، والثاني من تأليف ريكس يونج وأوشين فارتانيان.<sup>1</sup> الكتاب الأول عبارة عن مُقدمة عامة ومتوازنة للأساس العصبي للإبداع، والكتاب الثاني عبارة عن مجموعة من الكتابات لعلماء رائدين في هذا المجال. ورغم أن الإبداع ليس المحور الأساسي لهذا الكتاب، فإن الخيال والإبداع مرتبطان ارتباطاً وثيقاً لا انفصامَ له. إن الخيال لا يُفرز بالضرورة أفكاراً إبداعية. ولا يُعد الخيال ضرورياً دائماً لتوليد الأفكار الإبداعية. غير أن الأفكار الإبداعية غالباً ما تتولَّد من الخيال. لقد تناولنا العمليات العصبية المُحتملة التي تكمن وراء الخيال أثناء حالات الخمول (فترة الراحة الواعية وأثناء النوم) في الفصلين

الثالث والسادس. وفي هذا الفصل، سنحاول ربط ما بحثناه في الفصول السابقة بالإبداع. وسنبحث أيضًا المسألة العملية المتمثلة في كيف نُصبح مبدعين.

## الإبداع العفوي

يشير الإبداع إلى القدرة على إنتاج نتائج جديدة وقيمة، مثل النظريات العلمية والأعمال الفنية والتقنيات التكنولوجية والحلول لمُختلف المشاكل. يوجد عنصران مهمّان للإبداع: الأصالة (التجديد) والفاعلية (القيمة أو الملاءمة أو الصلاحية أو الأهمية). ثمة عامل ثالث هو الفجائية، التي ترتبط بمدى عدم احتمالية توليد فكرة معيّنة. فالفكرة التي تكون مبتكرةً ومفيدة، ولكنها غير مدهشة على الإطلاق قد لا تعتبر فكرة إبداعية.<sup>2</sup> فالإبداع وثيق الصلة بالخيال؛ لأن الخيال غالبًا ما يُفرز أفكارًا أصيلة. وقد أظهرت إحدى الدراسات أن تَلَف الحُصين، الذي يُضعف الخيال الخصب (انظر الفصل الأول)، يُعطل أيضًا التفكير الإبداعي.<sup>3</sup> من ناحية أخرى، لا يؤدي الخيال المفرط بالضرورة إلى مستوى عالٍ من الإبداع. هذا لأن ليس كل أنواع الخيال عالية القيمة؛ فالخيال نفسه في الواقع، ذا قيمة مُحايدة. فقد نستخدم خيالنا للتفكير في شيء عديم الفائدة تمامًا أو حتى مُعادي للمجتمع.

الإبداع ليس مَلَكَة عقلية موحدة لا تتجزأ. ولكنه «بناء مُعقد ومُتعدد الأوجه» يمكن أن يتجلى بطرق عديدة.<sup>4</sup> في الوقت الحالي، لا يوجد إجماع عام حول كيفية تقسيم الإبداع إلى أنواع فرعية. غير أن من الممكن تمييز الإبداع وفقًا لمجاله. على سبيل المثال، يختلف الإبداع الفني عن الإبداع العلمي. إن ألبرت أينشتاين وبابلو بيكاسو يُعتبران من الأشخاص الشديدي الإبداع في العلوم والفن على التوالي، ولكن ليس في المجالات الأخرى.

وهنا سوف نعتد التصنيف الذي اقترحه آرني ديتريش.<sup>5</sup> فقد ميّز بين الأنماط المتعمدة والأنماط العفوية لمعالجة المعلومات فيما يتصل بالإبداع. قد نتوصّل إلى حلّ جديد لمشكلة ما من خلال الاستدلال الموجّه. ويشار إلى هذا النوع من الإبداع بـ «الإبداع المُتعمد». ويُعتقد أن القشرة الجبهية الأمامية (انظر الفصل التاسع) تلعب دورًا حاسمًا في هذه العملية. في المقابل، فإننا كثيرًا ما نتوصل إلى أفكار إبداعية عندما نكون في حالة استرخاءٍ دون تعمد التركيز على مشكلة مُعينة أو حتى في أثناء النوم. ويُشار إلى هذا النوع من الإبداع بـ «الإبداع العفوي». ويُعتقد أنّ شبكة الوضع الافتراضي تُشكل أهمية بالغة للإبداع العفوي.

تجدر الإشارة إلى أن العمليات المتعمّدة والعفوية لا تعمل بمعزلٍ لخلق الإبداع. بل إن التفكير الإبداعي ينطوي عادةً على تفاعلٍ ديناميكي بين العمليات المحكومة والعفوية. أما في إطار ديناميكيات الدماغ، فيُعتقد أن التفكير الإبداعي ينطوي على تفاعلات ديناميكية بين شبكات عصبية متعددة واسعة النطاق (انظر الفصل العاشر). وعلى وجه التحديد، تُرصد تفاعلات ديناميكية بين شبكة الوضع الافتراضي والشبكة التنفيذية المركزية (أو الشبكة الجبهية الجدارية، التي تشمل القشرة الجبهية الأمامية) أثناء أداء مهام التفكير الإبداعي المتنوعة.<sup>6</sup> ويُعتقد أن شبكة الوضع الافتراضي مرتبطة بالتوليد العفوي للأفكار، بينما يُعتقد أن الشبكة التنفيذية المركزية تشرف على العملية التقييمية التي تقيّد الأفكار لتلبية الأهداف المرجوة من مهمّة مُحددة. وفي سبيل ربط الإبداع بالأطروحة الأساسية لهذا الكتاب — الخيال غير المُقيّد أثناء حالات الخمول — سنركز في هذا المقام فقط على الإبداع العفوي.

## الذاكرة والإبداع

دعونا نُلخص الأساس العصبي للخيال. تُنشّط شبكة الوضع الافتراضي بالتزامن مع العمليات العقلية الداخلية أثناء حالات الخمول (انظر الفصل الأول). يحدث هذا عندما يعمل الحُصين بالتزامن مع القشرة الحديثة ويُولّد تسلسلات نشاط متنوعة. وتشير الدراسات إلى أن التغيرات في الروابط العصبية تتم في الحُصين في أثناء تخزين الخبرات الجديدة في صورة ذكريات (انظر الفصل الرابع). في وقتٍ لاحق، عندما تكون لدينا رفاهية عدم الاهتمام بالعالم الخارجي، يضعف التحكم المُثبّط للحُصين، وتولد الشبكة العصبية للحُصين (خاصة شبكة CA3 العصبية) تسلسلات نشاط متنوعة. وفي أثناء هذه العملية، لا تُولد الشبكة العصبية للحُصين تسلسلات نشاط مُجرّبة فحسب، بل تولد أيضًا تسلسلات نشاطٍ غير مُجرّبة (انظر الفصل الثالث). بهذه الطريقة، تدعم الشبكة العصبية للحُصين كلاً من استرجاع الذاكرة والخيال.

ثمة نقطة مُهمة هنا، وهي أن محتوى الخيال لا يخلو من محتوى الذاكرة. فنظرًا لأن تشفير الذاكرة يُصاحب التغيرات في الروابط العصبية لتسهيل إعادة تنشيط التسلسلات المُجرّبة، فإن الشبكة العصبية الحُصينية تُولد حتمًا تسلسلات نشاط مرتبطة بالتسلسلات التي يتذكرها الشخص (أي التسلسلات المُجرّبة). بعبارة أخرى، عادة ما يُجدد الحُصين تسلسلات النشاط المُتطابقة (استرجاع الذاكرة) أو ذات الصلة (الخيال المرتبط بالأحداث

التي يتذكرها الشخص) بالتسلسلات المُجرّبة. ووفقًا لفرضية المحاكاة العرضية البنّاءة، فإننا نتخيّل أحداثًا مُستقبلية من خلال استخراج عناصر التجارب السابقة بمرونة وإعادة تجميعها (انظر الفصل الثاني).<sup>7</sup> فالخيال محدود بالذاكرة، وكذلك الإبداع.<sup>8</sup>

## التنوع

ماذا يُمكننا أن نفعل إذن لتعزيز الإبداع؟ للأسف، لا توجد حيلة سحرية. فمحتوى الخيال مُقيد بمحتوى الذاكرة، ومحتوى الذاكرة يتحدّد بتجاربنا اليومية وأنشطتنا العقلية. لذا، كلّمّا كانت أنشطتنا مرتبطة بشيء قيّم، زادت احتمالات التوصل إلى أفكارٍ إبداعية.

لنفترض أنك تعمل على إيجاد حلٍّ لمشكلة تكنولوجية صعبة على مدى سنوات عديدة. ولنفترض أيضًا أنك كنت توجّه انتباهك إلى أي شيءٍ آخر واجهته قد يكون مرتبطًا بالمشكلة. في هذه الحالة، من المُحتمل أن تتفتّق حلول إبداعية للمشكلة فجأة في ذهنك عندما تكون في حالة استرخاء. وغالبًا ما تحدث مثل «لحظات اليوريك» (لحظات الكشف المفاجيء) هذه (عندما تؤدي رؤى عظيمة إلى اكتشافٍ أو اختراع) في أوقاتٍ غير مُتوقّعة. لذا يقتضي تعزيز الإبداع العفوي الانتباه إلى الأشياء التي قد تؤدي إلى نتائج قيّمة. وهذا لا يعني ضرورة قصر نطاق اهتمامك على موضوع بعينه. بل على العكس، فانتساع الخبرة هو مفتاح الإبداع. وإذا كانت خبرتك محدودة بنطاق ضيق من الموضوعات، فإن نطاق خيالك سيكون ضيقًا أيضًا، وهو ما من شأنه أن يضرّ بالإبداع.

على سبيل القياس، لننظر إلى أنشطتنا اليومية كما لو كنّا نُعد مكونات وجبة طعام. سوف يتوافق تنوع تجاربنا مع تنوع مكوناتنا. فيمكن للطاهي أن يُعد العديد من الأطباق المختلفة بمكونات متنوعة. ولكن إذا كانت المكونات محدودة (كأن تكون خضراوات فقط)، فحتى أكثر الطهاة براعة وتفننًا قد لا يصنع إلا مجموعة محدودة من الأطباق. بالمثل، فإن الاهتمامات والتجارب المحدودة ستُضيّق حتمًا نطاق وتنوع الأفكار التي يمكن أن يولدها الخيال. وهكذا، من المُفيد للإبداع الانتباه إلى موضوعات متنوعة والتعرف عليها؛ لأن الأفكار الإبداعية غالبًا ما تتولد من خلال جمع المعرفة ووجهات النظر من تخصصات متعددة.

تؤكد العديد من المؤسّسات التعليمية على التنوع. فالتفاعل مع أشخاص من خلفيات متنوعة يساعد في توسيع أفق الفرد. والقراءة في موضوعاتٍ متنوعة تُشكل أيضًا وسيلة ممتازة لتوسيع آفاق الإنسان دون بذل الوقت والطاقة في التعلّم من التجارب الفعلية. إن

الابتكار يعني كسر الإطار القائم. ولأن من الصعب التنبؤ مسبقاً بالتجارب التي سوف تساعد في توليد أفكار إبداعية في المستقبل، فعلياً أن نولي اهتماماً للموضوعات المتنوعة (التي من المرجح أن تكون ذات قيمة) حتى يتسع نطاق الخيال.

## الانفتاح الذهني

لن يكون للفكرة الإبداعية قيمة إذا لم يُستفد منها. فستظلُّ الفكرة مجرد فكرة إذا لم يُبدل جهد لتطبيقها. في بعض الأحيان يكون من الصعب تقييم قيمة فكرة جديدة. والمضي قدماً في فكرة ما حتى مع عدم اليقين بشأن قيمتها من شأنه أن يُسهل الابتكار. وهذه المسألة لا تشكل أهمية للتوجهات الشخصية فحسب، بل أيضاً للثقافات التنظيمية والمجتمعية. فيمكن لعلماء الأنثروبولوجيا تفسير الكثير عن الإبداع والابتكار في أي مجتمع بمجرد النظر إلى ثقافته.<sup>9</sup> لنفترض أنك عندما تقترح فكرة جديدة، يكون رد رئيسك المعتاد هو: «لا تُهدر وقتك في مثل هذه الأشياء غير المفيدة. ركز على ما أمرت بفعله». إن هذه المؤسسة بعيدة كل البعد عن الإبداع. بالمثل، إذا كان المجتمع يفرض حظراً صارماً على الأفكار والتعبيرات الخارجة عن المعايير الاجتماعية، فمن المرجح أن يظل هذا المجتمع ثابتاً على حاله وبالتالي. فالإبداع الجماعي يكتسب أهمية متزايدة على حساب الإبداع الفردي مع تقدم التكنولوجيا وتزايد الحاجة إلى اتباع نهج متعددة التخصصات في حل العديد من المشكلات المعقدة.<sup>10</sup> ومن العوامل المهمة التي تعزز الإبداع الجماعي الانفتاح الذهني، الذي يُسهل تبادل الأفكار دون قيود.<sup>11</sup> إن تقدم أي مؤسسة أو مجتمع يقتضي السماح بحدوث إخفاقات وانحرافات. لا بد أن يُشجع المعلمون في المدارس الطلاب على القيام بمحاولات جديدة والتسامح مع الفشل. فالانفتاح الذهني يحتضن التنوع، والتنوع يُعزز الإبداع.

## محفزات الإبداع الثلاثة

لننتقل الآن إلى قضايا أكثر عملية تتعلق بالإبداع. فيما يتصل بالنمط المتعمد من التفكير الإبداعي، قد نعتد عدة تكتيكات عن وعي، مثل «القياس»، وإعادة تأطير المفاهيم (تغيير الإطار)، وإيجاد السؤال الصحيح، وتوسيع المنظور، والعكس، والموازنة بين الاستدلال والاستنتاج، والاستدلال الاستخلاصي، وتحليل المشكلة، وتجربة الأفكار والتلاعب

بها، واللعب، فضلاً عن مجموعةٍ من أدوات البحث الاستكشافي، مثل تحليل الوسائل والغايات، واستراتيجية تسلُّق الهضبة، والعمل على حلّ المشكلات بطريقةٍ عكسية، والتجربة والخطأ.<sup>12</sup> ولا نستطيع استخدام مثل هذه التكتيكات المُتعمَّدة لتعزيز الإبداع العفوي. ولكننا قد نُعزز الإبداع العفوي بصورةٍ غير مباشرة من خلال تعزيز نشاط شبكة الوضع الافتراضي. وقد يكون من المفيد أن تسترخي بدلاً من إرهاق عقلك عندما تواجه مشكلةً صعبة. وهذا ما يُشار إليه باسم «محفزات الإبداع الثلاثة».

وهذه المحفزات الثلاثة هي الفراش والاستحمام والحافلة. بمجرد خلوّ عقلك من الأفكار الإبداعية، فمن المفيد غالباً أن تنام (الفراش) أو تسترخي (الاستحمام) وتتخلّى عن التفكير العقلاني المُتعمَّد. كما أن السفر إلى مكان جديد (الحافلة) والتعرُّض لمثيرات جديدة من شأنه أن يُنعش عقلك ويُعزز فرص الأفكار الإبداعية. فوفقاً لدراسة حديثة، فإن المثيرات الجديدة تجعل الوصلات العصبية بين الحُصين والقشرة الجبهية الأمامية أكثر مرونة.<sup>13</sup> قد يبدو الدماغ خاملاً عندما نأخذ قسطاً من الراحة. ولكن على العكس من ذلك، قد تظهر الأفكار المُبتكرة بينما تتجول عقولنا بحرية في أثناء فترات الراحة التامة وحتى أثناء النوم (انظر الفصلين الأول والثالث). لذا عندما تفشل كل المحاولات المُتعمَّدة لحل مشكلةٍ ما، حاول أن تنتعش أو تسترخي وربما تظهر فكرة رائعة تلقائياً.

### حالة التدفُّق

حتى لو جرّبنا هذه المحفزات الثلاثة كلها، لن تظهر الأفكار الإبداعية بطريقةٍ سحرية إذا لم نكن مُستعدين. فالإبداع العفوي يُحتم علينا أن نُجهز أدمغتنا لتوليد أفكار إبداعية. على المدى البعيد، يتعين علينا أن ننتبه إلى موضوعاتٍ متنوعة وأن نُوسّع خبراتنا لتعزيز أفق خيالنا. أما على المدى القصير، فيتعيّن علينا أن نُركز على مشكلةٍ محددة لتسهيل الإبداع العفوي لحل هذه المشكلة. فبدون العمل الجاد والجهود المُسبق، لن تؤدي ممارسة المحفزات الثلاثة إلى ظهور أفكار إبداعية بطريقةٍ سحرية.

بعبارةٍ أخرى، إن الجهود الواعية والمُتعمَّدة أثناء حالات النشاط من شأنها أن تُعزز فرص توليد أفكار إبداعية أثناء حالات الخمول. فلنفترض أنك بحاجةٍ إلى حلّ مشكلةٍ مهمة (على سبيل المثال، إيجاد طريقة جديدة لإثبات نظرية رياضية أو إقناع خصمٍ سياسيٍّ بالتوافق على شيءٍ ما) في غضون أسبوع. في مثل هذه الظروف، فإن التركيز على هذه المشكلة فقط أسبوعاً كاملاً من شأنه أن يزيد من فرص إيجاد حلّ لها.

قد تمرُّ بحالة «التدفق» من خلال التركيز العميق على مشكلة معينة. فالتدفُّق هو الحالة التي يستغرق فيها الشخص تمامًا في مهمة صعبة، ولكنها قابلة للتنفيذ لدرجة أنه يفقد الوعي بكل شيء آخر. «يكون التركيز شديدًا لدرجة أنه لا يتبقى أي قدر من الانتباه للتفكير في أي شيء غير ذي صلة، أو للقلق بشأن المشاكل. فيختفي الوعي الذاتي، ويصبح الشعور بالوقت مشوشًا».<sup>14</sup> إن التناوب بين حالات التدفق والاسترخاء من شأنه أن يزيد من فرص توليد أفكارٍ إبداعية لحل المشكلة المطروحة. فمن خلال التركيز العميق على مسألة واحدة بعينها، ستتشكل شبكاتنا العصبية بحيث تُعالج المعلومات المتعلقة بالمشكلة. وهذا من شأنه أن يسمح لخيالنا أثناء حالة الخمول بأن يمتلئ بالمعلومات ذات الصلة. سيكون دماغنا أيضًا جاهزًا لالتقاط أي فكرة إبداعية محتملة عندما تظهر. ولعل أرخميدس مرَّ بعملية نفسية مماثلة عندما توصلَّ إلى طريقة لإثبات أن التاج الجديد الذي صنَّع للملك هيرو لم يكن من الذهب الخالص، قبل أن يركض عاريًا في شوارع سرقوسة وهو يصرخ «وجدتها!»

### تأمل الزَّنَّ القائم على الكوان

قد يتبنَّى المرء هذا النهج (التناوب بين حالات التدفق والاسترخاء) عندما يواجه مشكلة صعبة، سواء كانت علمية، أو فنية، أو متعلقة بالأعمال والتجارة. ويمكن استخدامه أيضًا للحصول على رؤى تؤدي إلى التنوير الروحي. ويُعد تأمل الزَّنَّ القائم على الكوان مثالًا جيدًا على ذلك. يتمثَّل هدف البوذية في التغلُّب على المُعاناة من خلال فهم آلية عمل العقل («رؤية العقل الأصلي»). إن أفكارنا ومشاعرنا لا تنشأ عشوائيًا؛ إذ تكمن وراءها ديناميكيات تحكمها قواعد («النشوء الاعتمادي»). وقد تتغلَّب على عبوديتك لأفكارك ومشاعرك من خلال إدراك الكامل لكيفية عملها.

يُسَخِّدُ تأمل الزَّنَّ القائم على الكوان، المنتشر على نطاق واسع في دول شرق آسيا (الصين وكوريا واليابان)، التأمل المركَّز لتحقيق هذا الهدف. يتأمل طالب الزن في كوان، وهو عبارة قصيرة مُتناقضة أو سؤال أو حكاية رمزية، على غرار ما يلي:

«تصفق يدان ويصدر صوت، فما صوت تصفيق اليد الواحدة؟»

«ما هو وجهك الأصلي قبل ولادة والدك؟»

سأل تلميذ معلمه: «ما هو بوذا؟»

وأجاب المُعلم قائلاً: «عصاً قذرة..»

لا تكون أسئلة الكوان منطقية أو مفهومة دائماً. فهي تهدف إلى إثارة «شك هائل». إنها تُحفزك للخروج من دائرتك الذهنية المعتادة وتوسيع نطاق تفكيرك. إنها وسيلة «لإحداث صدمة للعقل الأناني الذي تشكّل من خلال التكييف والتفكير القائم على الاعتقادات الذي تعزّز أثناء التنشئة والتعليم التقليدي».<sup>15</sup>

ثمّة ممارسة مُتطورة من الكوان (تُسمى «هوا تو» أو «رأس الكلمة») تستمر عادة من ثلاثة إلى سبعة أيام. وخلال هذه الفترة يجب أن تُكرس لها كل انتباهك ليلاً ونهاراً، كما هو موضح هنا: «يُشرق ضوء «هوا تو» على جسدي وعقلي بالكامل وكأن القمر المُكتمل الساطع يملأ السماء ليلاً. نمتزج أنا وهوا تو بحيث يختفي التمييز بيننا؛ يصبح هوا تو أنا، وأصبح أنا هوا تو ... أغوص عميقاً في هوا تو بدلاً من تحليله باعتباره شيئاً مُنفصلاً. أصل إلى قاع هوا تو بحيث لا تفصلني عنه أي مسافة، ولا تُؤتيني فكرة أو يعتريني شعور آخر غير هوا تو».<sup>16</sup>

يضاهي هذا حالة تدفّق مثالية. وربما تتناوب حالات التدفّق والاسترخاء أثناء ممارسة الكوان المُتطور بحيث يتعاضم الإبداع العفوي لتوليد رؤى جديدة تؤدي إلى التنوير الروحي.

## المثابرة

قد نتوصل إلى فكرة إبداعية تُقدّم حلاً كاملاً للمشكلة المطروحة. ولكن في أغلب الأحيان، لا تكون عملية استنباط الحلّ النهائي بهذه البساطة، لا سيما في مواجهة مشكلة معقدة. فقد نُضطر إلى التناوب بين فتراتٍ من التأمل المُركّز والاسترخاء عدة مرات قبل التوصل إلى حلّ جيد بما فيه الكفاية لمشكلة ما. وقد يتبيّن لنا أيضاً أن الفكرة الإبداعية ليست إلا حلاً جزئياً أو قد تؤدي إلى مشكلاتٍ غير مُتوقعة. حينئذٍ يكون علينا ممارسة دورة التأمل والاسترخاء المُركّزة مراراً وتكراراً للتوصل إلى حلّ مُرضٍ. لذا، غالباً ما نحتاج إلى المثابرة عندما نواجه مشكلةً صعبة. «إن المتطلّبات الحقيقية الوحيدة للإبداع هي المرونة الإدراكية والمثابرة التحفيزية. فالأشخاص الشديدي الإبداع سيواجهون المشكلة من زوايا مختلفة عديدة، ويتحمّلون العديد من البدايات الخاطئة والطرق المسدودة، قبل أن يُكملوا مسعاها في النهاية، إن نجحوا في فعل ذلك أصلاً».<sup>17</sup>

## الهواتف الذكية والإبداع

يُشكل الخيال جانباً أساسياً من الطبيعة البشرية. فنحن لا نحتاج إلى بذل جهدٍ خاص لإطلاق العنان لخيالنا عندما نسمح لأنفسنا بتجاهل العالم الخارجي. ومع ذلك، إذا تعرّضنا لفيضٍ مُستمر من المُثيرات، فقد تتضاءل فُرصنا في استخدام خيالنا على نحوٍ خطير. والعديد من المُجتمعات الحديثة غارقة في الضوضاء والمُثيرات المستمرة على مدار الساعة. ولعلّ المصدر الأهم للمُثيرات التي تجذب الانتباه بالنسبة إلى كثيرٍ منّا هو هواتفنا الذكية. لقد اعتاد الناس الانخراط في العمليات العقلية الداخلية أثناء أخذ قسطٍ من الراحة أو في الفراش قبل النوم. أما الآن، فيهِمُّون لالتقاط هواتفهم الذكية عندما يكون لديهم وقت فراغ، ويستخدمها الكثيرون حتى في السرير قبل النوم. وهذا يُعزز نشاط مناطق الدماغ المُخصصة للمعالجة الحسّية بينما يكبت نشاط شبكة الوضع الافتراضي.

كذلك يعمل الإفراط في استخدام الهواتف الذكية على كبت النشاط الدماغي المرتبط بالتأمّل. فعندما نواجه مشكلةً ما، ندمج المعلومات المتاحة بطرق مختلفة ونقيّم النتائج لإيجاد حلٍّ للمشكلة. أما في وجود الهواتف الذكية، فلا يتعيّن علينا بذل مثل هذا الجهد؛ إذ يمكننا ببساطة البحث عن الحل عبر جوجل.

إذا استمر الإفراط في استخدام الهواتف الذكية، فقد يكون له عواقب طويلة الأمد على الدماغ. وقد يمثل هذا إشكاليةً خصوصاً للمُستخدمين الصغار الذين لم يكتمل نضج أدمغتهم بعد. فبعض أجزاء الدماغ، مثل القشرة الجبهية الأمامية، تمرّ بعملية نضوجٍ حتى سنّ البلوغ. لذا ستكون العواقب الطويلة الأمد للإفراط في استخدام الهواتف الذكية على أدمغة اليافعين أكثر وضوحاً وحتمية مقارنةً بالبالغين. علاوة على ذلك، مع عدم اكتمال نضج القشرة الجبهية الأمامية، التي تلعب دوراً رئيساً في التحكم المثبّط (انظر الفصل التاسع)، سيكون من الصعب للغاية على المراهق الامتناع عن الإفراط في استخدام الهواتف الذكية. لهذه الأسباب، من المُهم فهم العواقب الطويلة الأمد للإفراط في استخدام الهواتف الذكية على دماغ اليافعين.

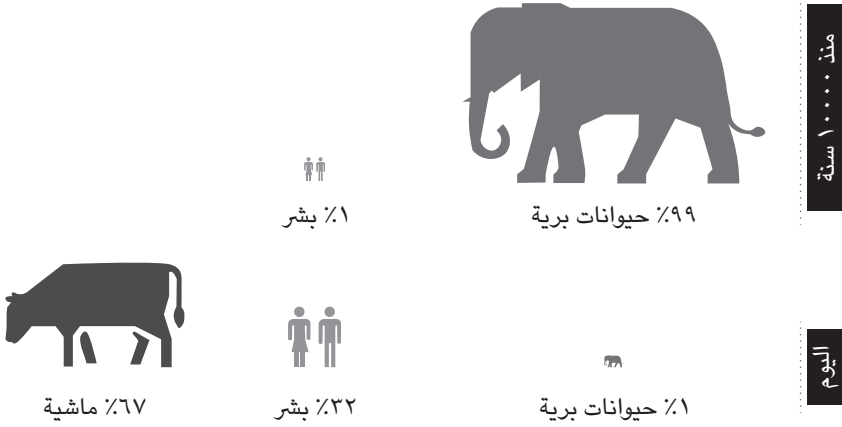
إن نتائج الدراسات حتى الآن مُثيرة للقلق. فالإفراط في استخدام الهواتف الذكية بين اليافعين يرتبط بمجموعة متنوعة من المشكلات الإدراكية والعاطفية والشخصية فضلاً عن الاضطرابات العصبية والنفسية مثل الاكتئاب واضطراب نقص الانتباه وفرط النشاط. كذلك يرتبط الإفراط في استخدامها بضعف الروابط بين الخلايا العصبية في الشبكة التنفيذية المركزية وتضائل سُمك القشرة المخية.<sup>18</sup>

## الدماغ المُبتَكِر

إيجازًا، قد تكون عواقب الإفراط في استخدام الهواتف الذكية على دماغ المراهقين خطيرة. وقد يتعيّن علينا اتخاذ إجراءات للتخفيف من حدّتها بقدر ما نسعى حاليًا لخفض معدلات التدخين وشُرب الكحوليات بين المراهقين.

## الفصل الرابع عشر

# مستقبل الابتكار



شكل ١٤-١: التغيرات في نسبة الحيوانات الفقارية البرية على مدار عشرة آلاف عام. الشكل مستنسخ بإذن من جوناثان أوسترن، «أنقذوا الأرض ... لا تُنجبوا: القصة وراء أبسط وأصعب طريقة للمساعدة في إنقاذ كوكبنا المهدد بالانقراض»، رسوم بيانية توضيحية، تاريخ زيارة الرابط ٢٢ يونيو ٢٠٢٢، <https://www.savetheearth.info/infographics.html>.

هل قدرة الإنسان على الابتكار نعمة؟ من حيث المنافسة مع الأنواع الأخرى، فهي نعمة بكل تأكيد. لقد سمحت قدرة الإنسان على الابتكار له بالسيطرة على الحيوانات الكبيرة الأخرى. ويوضح الشكل (١٤-١) توزيع كتلة الحيوانات الفقارية البرية. قبل عشرة آلاف عام، كانت الكتلة الإجمالية للبشر تُشكل ١ في المائة فقط والباقي كانت تساهم به الحيوانات البرية. أما الآن، فأصبحت الأرقام المقابلة ٣٢ في المائة و ١ في المائة على التوالي، وتتجاوز الكتلة الإجمالية للماشية (الأبقار والأغنام والخيول والدجاج، إلخ)

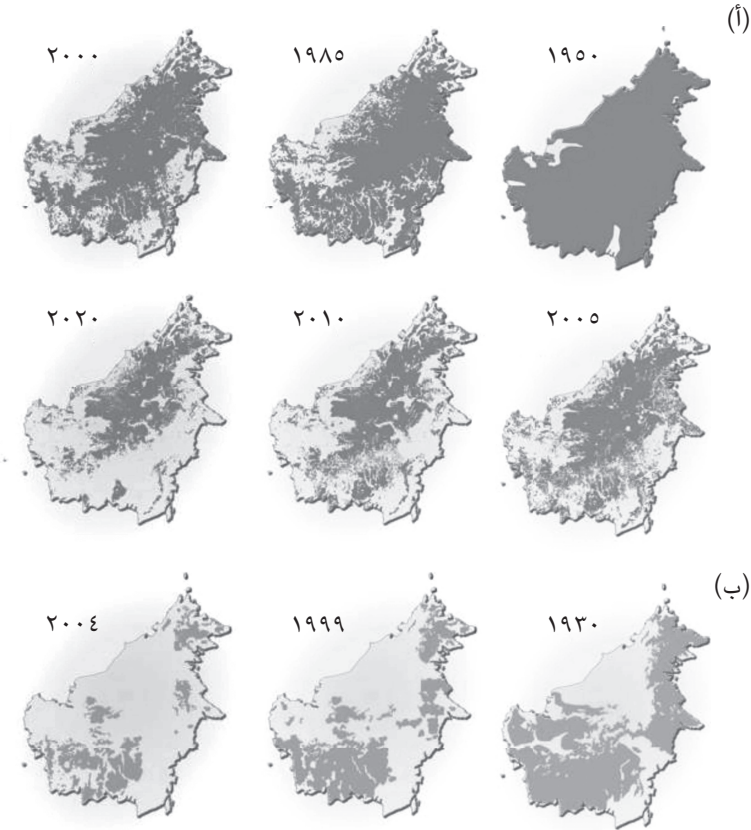


شكل ١٤-٢: صيد الجاموس في القرن التاسع عشر، عندما أتاحت البنادق للبشر الصيد الجماعي لها في أمريكا الشمالية. الشكل مستنسخ من Bison skull pile edit.jpg، ويكيبيديا كومنز، جرى التحديث في ٢٧ مايو ٢٠١١، <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=15324296>.

الكتلة الإجمالية للبشر والحيوانات البرية مُجمَعين. وهذا يوضح مدى هيمنة البشر على الحيوانات الكبيرة الأخرى.

ولكن من المؤسف أن القدرة البشرية على الابتكار قد يتبين أنها نقمة وليست نعمة على الأمد البعيد، إذا لم نتحكم فيها كما ينبغي. فالنظام البيئي يتعرض للتدمير على نطاق عالمي بسبب الأنشطة البشرية، مثل الإفراط في استغلال الموارد الطبيعية (انظر الشكل ١٤-٢)، وتدمير الموائل (انظر الشكل ١٤-٣)، وتغير المناخ بسبب الإفراط في استخدام الوقود الأحفوري. وربما يتعين علينا أن نقلق بشأن انقراضنا قريباً إذا استمر الاتجاه الحالي في الابتكار.

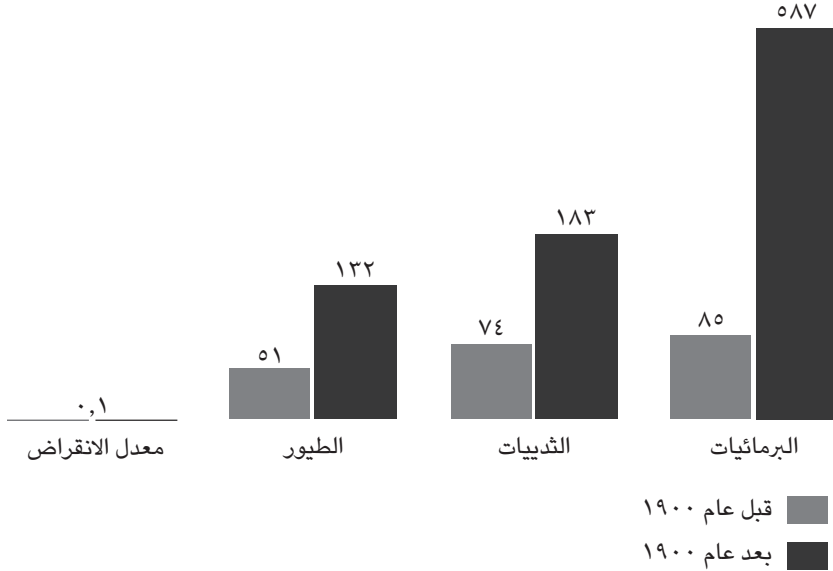
ما الذي ينتظرنا حال استمرارنا على مسار الابتكار الحالي؟ هل ينتظرنا عالم مثالي (يوتوبيا) أم بائس (ديستوبيا)؟ إن التنبؤ بالمستقبل أصعب كثيراً من النظر إلى الماضي.



شكل ١٤-٣: تدمير الموائل. (أ) التصحر في بورنيو. مقطع مستنسخ من مقال لهوجو أهلينيوس بعنوان «حجم التصحر في بورنيو ١٩٥٠-٢٠٠٥، والتوقعات حتى عام ٢٠٢٠»، قاعدة بيانات جريد أريندال، جرى التحديث عام ٢٠٠٧، <https://www.grida.no/resources/8324>، (ب) توزيع إنسان الغاب في بورنيو. المقطع مستنسخ من مقال هوجو أهلينيوس بعنوان «توزيع إنسان الغاب في بورنيو (إندونيسيا، ماليزيا)»، جرى التحديث عام ٢٠٠٦، <https://www.grida.no/resources/8326>، (بإذن من هوجو أهلينيوس).

ومع ذلك، يُمكننا أن نحاول التنبؤ بما سيحدث بعد ذلك بناءً على ما حدث في الماضي. لنستعرض وجهتي نظر مُتعارضتين، إحداهما متشائمة والأخرى متفائلة.

## الدماغ المُبتكر



شكل ١٤-٤: معدلات الانقراض الأخيرة. الشكل مأخوذ من مقال هانا ريتشي وماكس روزر بعنوان «عمليات الانقراض»، تاريخ زيارة الرابط ٢١ يونيو ٢٠٢٢، (<https://ourworldindata.org/extinctions>) (CC BY).

## المنظور المتشائم

شهد تاريخ الأرض خمس عمليات انقراض جماعية. كان آخرها منذ خمسة وستين مليون سنة. وقد انقرض العديد من الحيوانات، كان من بينها جميع الديناصورات غير الطائفة. ولحسن حظنا، اغتنمت الثدييات هذه الفرصة للازدهار، ما أدى في النهاية إلى تطور الرئيسيات بما فيها البشر. ولعلنا الآن في طريقنا إلى انقراض جماعي سادس بسبب الأنشطة البشرية. فوفقاً لدراسة أُجريت على الفقاريات، فإن معدل الانقراض خلال الخمسمائة عام الماضية أسرع بمئات إلى آلاف المرات من المعدل العادي، والذي يبلغ ٠,١ انقراض لكل مليون نوع في السنة، وهذا المعدل في تسارع منذ عام ١٩٠٠ (انظر الشكل ١٤-٤).<sup>١</sup> ووفقاً لتقرير الكوكب الحي لعام ٢٠٢٢ الصادر عن «ال الصندوق العالمي للطبيعة»، انخفضت الوفرة النسبية لأعداد الحيوانات البرية المُراقَبة بنسبة ٦٩ في المائة في جميع أنحاء العالم بين عامي ١٩٧٠ و٢٠١٨. وكان الانخفاض حاداً جداً في أعداد الأنواع

التي تعيش في المياه العذبة (٨٠ في المائة)، وعلى المستوى الإقليمي، في أمريكا اللاتينية (٩٤ في المائة).<sup>2</sup> وإذا استمرَّ الاتجاه الحالي للانقراض، فقد يشمل في النهاية الإنسان العاقل كضحية قادمة.

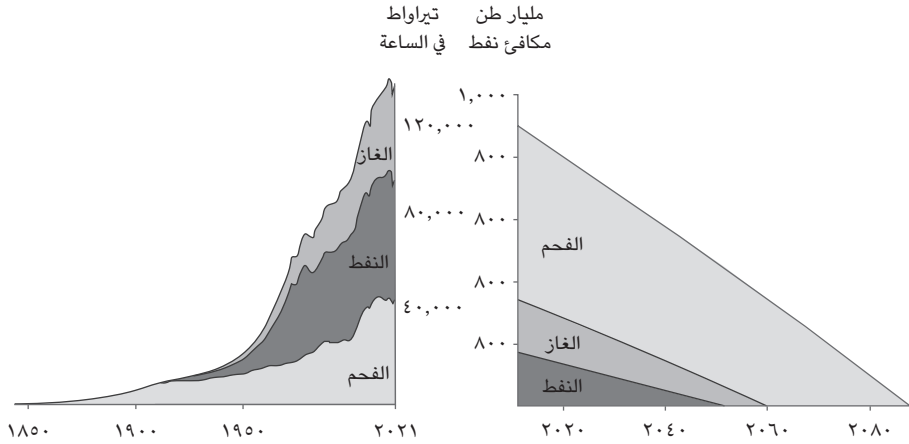
وما يُثير القلق بشكلٍ خاص هو التغير المناخي المستمر. فجميع أنواع الكائنات الحية تواجه تحدي التكيف مع بيئتها الدائمة التغير. وقد تساهم التغيرات البيئية في التنوع البيئي، من خلال إجبار الأنواع الموجودة على التطور إلى أنواع جديدة. ولكن إذا كانت التغيرات مفاجئة أو حادة بحيث لا تتمكن معظم الأنواع الحية من التكيف معها، فقد تواجه الانقراض الجماعي.

تاريخياً، تسببت الأحداث الكارثية العنيفة، مثل الانفجارات البركانية الواسعة النطاق واصطدام الكويكبات بالأرض في حدوث تغييرات جذرية في البيئة، مما أدى إلى نفوق جزء كبير من الأنواع الموجودة. جاء الانقراض الجماعي الأشد، والمعروف باسم «الموت العظيم»، قبل ٢٥١.٩ مليون سنة. فقد نفق ما يصل إلى ٩٦ في المائة من إجمالي الأنواع البحرية ونحو ٧٠ في المائة من إجمالي الأنواع البرية. يعتقد العلماء أن الانفجارات البركانية الضخمة في سيبيريا أطلقت كميات هائلة من الغازات الدفيئة في الغلاف الجوي خلال مدة قصيرة. وتسبب هذا في احتباس حراري عالمي مفاجئ وسلسلة من التأثيرات البيئية الضارة الأخرى مثل التجوية (تحلل الصخور والمعادن على سطح الأرض)، مما أدى إلى انخفاض مستوى الأكسجين في المحيط. وقد كانت هذه التغيرات البيئية أقوى من قدرة معظم الأنواع على التكيف معها.<sup>3</sup>

ولكن النبا السيئ هنا هو أن الأنشطة البشرية، وخاصة الاستخدام المكثف للوقود الأحفوري، يبدو أنها تؤدي إلى إحداث تغييرات بيئية مفاجئة وعنيفة، لا تقلُّ حدةً عن تلك التي حدثت أثناء فترات الانقراض الجماعي في الماضي. والوقود الأحفوري الذي نستخدمه حالياً هو نتاج عملية احتجاز الكربون مدة طويلة. فقد تحوّلت النباتات الميتة إلى خث بدلاً من أن تتحلل خلال العصر الكربوني (قبل نحو ٣٦٠ إلى ٣٠٠ مليون سنة)، ثم تحولت في نهاية المطاف إلى الفحم والنفط والغاز. ولكننا الآن نعكس هذه العملية في غضون بضعة مئات من السنين فقط (انظر الشكل ١٤-٥)<sup>4</sup>! إذن فمن غير المستغرب أن يؤدي الإفراط في استخدام الوقود الأحفوري إلى إحداث تغيير المناخ بمعدل أسرع وأعنف، من أن يتمكن كثير من أنواع الكائنات الحية من مواكبته.

ولكن لماذا لم تتحلل النباتات الميتة خلال العصر الكربوني؟ وفقاً للنظرية الأكثر شيوعاً، كانت هناك فجوة زمنية مدتها ستون مليون سنة بين ظهور الغابات الأولى

## الدماغ المُبتَكِر



شكل ١٤-٥: الإفراط في استخدام الوقود الأحفوري. (يسارًا) الاستهلاك العالمي للوقود الأحفوري (الغاز والنفط والفحم)، مقيسًا بالتيراواط في الساعة بين عامي ١٨٥٠ و ٢٠١٩. المقطع منقول من مجموعة أبحاث ومقالات هانا ريتشي وماكس روزر بعنوان «الطاقة»، <https://ourworldindata.org/energy> (CC BY) (يمينًا) احتمالات احتياطيات الطاقة المُستقبلية مقيسًا بمليار طنّ مكافئ نפט. نقاط النهاية المقدرة للنفط والغاز والفحم هي ٢٠٥٢ و ٢٠٦٠ و ٢٠٩٠ على التوالي.

والكائنات الحية الهاضمة للخشب (فرضية التأخر التطوري). بعبارة أخرى، لم تكن هناك كائنات حية تستطيع أن تُحلل الخشب خلال تلك الفترة.<sup>5</sup> ومن الأحداث المهمة في تاريخ تطوُّر النبات ظهور اللجنين، وهو فئة من البوليمرات العضوية المعقدة. يوفر اللجنين، إلى جانب السليلوز، الصلابة للنباتات الأرضية، مما يسمح لها بالاستطالة، ما يُفيد في تسخير المصدر الأساسي للطاقة، وهو ضوء الشمس. لم تتمكن الكائنات الحية الدقيقة القديمة من تحليل اللجنين؛ ومن ثمّ تراكمت النباتات الميتة ولم تتحلل.<sup>6</sup> كان اللجنين أشبه نوعًا ما بالبلاستيك في الوقت الحاضر. فقد استغرق تطور البكتيريا والفطريات التي تهضم اللجنين ستين مليون سنة. وربما تتطوّر في نهاية المطاف كائنات حية جديدة قادرة على تحليل البلاستيك بحيث تُحلّ أزمة البلاستيك الحالية. ربما يستغرق الأمر زمنًا طويلًا للغاية، وستؤن مليون سنة أخرى تعادل مائتي مرة الفترة الزمنية الكاملة لوجود الإنسان العاقل.

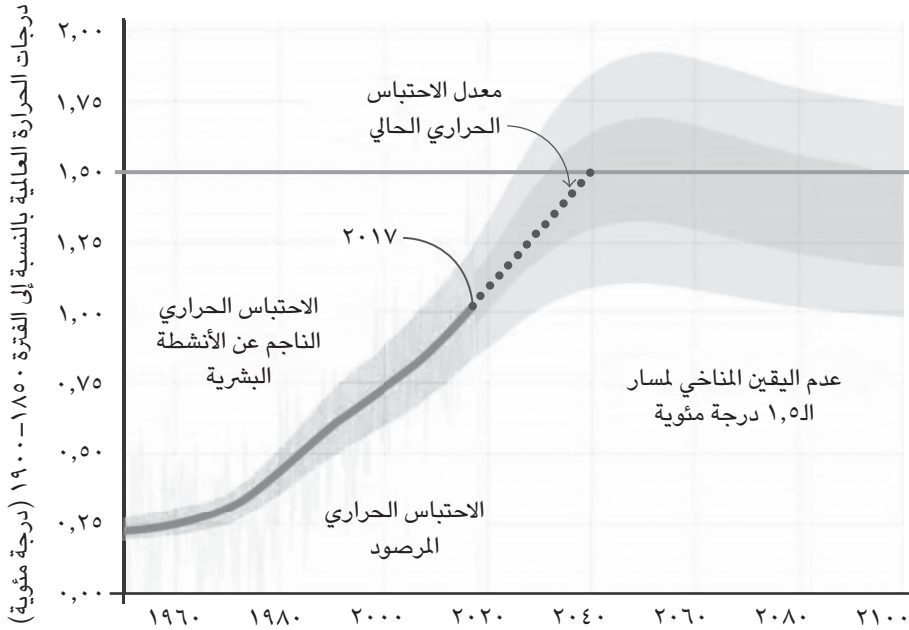
في الوقت الحالي، يُعد الاحتباس الحراري العالمي أهم عواقب الإفراط في استخدام الوقود الأحفوري. فوفقًا لتقرير التقييم السادس الصادر عن الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC)، ارتفعت درجة الحرارة العالمية بنحو درجة مئوية واحدة فوق مستويات ما قبل العصر الصناعي (بين عامي ١٨٥٠ و ١٩٠٠) بحلول عام ٢٠١٧ (انظر الشكل ١٤-٦).<sup>7</sup> وهذه الزيادة في أقل من مائة عام تعد تغييرًا سريعًا للغاية على مقياس زمني جيولوجي؛ فهي تنافس معدل الاحتباس الحراري العالمي أثناء عصر الموت العظيم. ويموت العديد من الكائنات الحية لأنها لا تستطيع مواكبة مثل هذه التغيرات البيئية السريعة. فالتطور عملية بطيئة بالنسبة لمعظم الأنواع؛ لذلك إذا استمر الاحتباس الحراري العالمي في هذا الاتجاه، فمن المرجح أن معدل الانقراض سيتسارع.

وفي سبيل تعزيز الاستجابة العالمية لتهديد تغير المناخ، تبنت ١٩٥ دولة اتفاقية باريس في ديسمبر عام ٢٠١٥، للحد من ارتفاع متوسط درجة الحرارة العالمية إلى ١,٥ درجة مئوية فوق مستويات ما قبل الصناعة. وإذا التزمت الدول المشاركة بالاتفاقيات بصدق؛ بمعنى أن تخفض الانبعاثات على الفور، وتخفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون إلى الصفر بحلول عام ٢٠٥٥، فمن المتوقع أن تصل درجة الحرارة العالمية إلى ١,٥ درجة مئوية فوق مستويات ما قبل الصناعة نحو عام ٢٠٤٠، ثم تصل إلى حالة من الاستقرار النسبي أو تتجاوز الهدف قليلاً.

لماذا ١,٥ درجة مئوية؟ لأن فرصة تجاوز «نقطة انقلاب» مناخي تزداد بصورة كبيرة مع ارتفاع درجة حرارة الأرض فوق هذا المستوى. وقد تحدث تغييرات لا رجعة فيها، وقد يتسارع الاحتباس الحراري العالمي إلى حد كبير بمجرد تجاوز نقطة التحول هذه. على سبيل المثال، يؤدي الاحتباس الحراري العالمي إلى تقليل كتلة الأنهار الجليدية، مما يقلل بدوره من انعكاس أشعة الشمس عبر الأنهار الجليدية، ما يؤدي إلى مزيد من الاحتباس الحراري العالمي. ومن الأمثلة الأخرى على ذلك، ذوبان الأراضي الرطبة في التربة الصقيعية في سيبيريا، التي تطلق غاز الميثان وتزيد من تفاقم ظاهرة الاحتباس الحراري العالمي. وبعد تجاوز نقطة التحول، قد يتفاعل الاحتباس الحراري العالمي مع عواقبه، مثل ذوبان الأنهار الجليدية (انظر الشكل ١٤-٦)، وذوبان الأراضي الرطبة في القطب الشمالي، وتدمير الغابات بسبب الجفاف والحرائق، وتباطؤ دوران المحيطات. وبمجرد بدء بعض هذه الأحداث، فقد لا يكون بالإمكان إبطال تأثير ما بدأه النشاط البشري.

ومع الأسف، ثمة مخاوف من أن الإجراءات المتخذة للوفاء بالتعهدات المقدمة بموجب اتفاق باريس غير كافية. على سبيل المثال، لم تف الدول الغنية بتعهداتها بتقديم مائة

## الدماغ المُبتَكِر



شكل ١٤-٦: ما مدى قربنا من بلوغ ١,٥ درجة مئوية؟ الشكل مستنسخ من جزء من تقرير «الاحتباس الحراري العالمي عند درجة ١,٥ مئوية» لمايلز آر ألين وآخرين بعنوان «التأثير والسياق»، تحرير «في ميسون»-ديلموت وآخرين (كامبريدج: مطبعة جامعة كامبريدج، ٢٠١٨)، صفحة ٨٢ (CC BY).

مليار دولار سنوياً للدول الأكثر فقراً لتمويل المناخ. والأسوأ من ذلك أن الولايات المتحدة، وهي من أكبر مصادر انبعاثات الغازات المسببة للاحتباس الحراري العالمي، انسحبت من اتفاق باريس في عام ٢٠٢٠ في عهد إدارة ترامب. وقد تكون معضلة تغير المناخ الحالية مثلاً كلاسيكياً على «مأساة المشاع»، التي تُشير إلى موقف يستنفد فيه مورد مُشترك من قبل الأشخاص (أو المنظمات) المعنيين بمصالحهم الذاتية، ممن لديهم القدرة على الوصول إلى هذا المورد. ومن دواعي الارتياح أن الولايات المتحدة عادت للانضمام إلى اتفاق باريس في عام ٢٠٢١ في عهد إدارة بايدن. ومع ذلك، لا يُمكننا استبعاد احتمالية تجاوز نقطة التحول، حتى لو التزمنا بصدق بالتعهدات بموجب اتفاق باريس. وإذا فشلنا في القيام بذلك، فإن تجاوز نقطة التحول سيزداد بصورة كبيرة.



شكل ١٤-٧: فيضان دون أمتار. أدت موجة حرارة حطمت الرقم القياسي إلى تسريع نوبان الأنهار الجليدية في باكستان في أبريل ٢٠٢٢، مما أدى إلى حدوث فيضان مفاجئ (يُطلق عليه فيضان البحيرة الجليدية المتفجر) أدى إلى انهيار جسر حسن آباد على طريق كاراكورام السريع. الشكل منقول من مقال وسيم إسحاق ورضا تنوير ومُدثر مختار بعنوان «تغير المناخ وأزمات المياه في باكستان: تداعيات على جودة المياه والمخاطر الصحية»، دورية «إنفيرنمينتال أند بابليك هيلث» (نوفمبر ٢٠٢٢): (CC) 5484561.

إن تغيراً بمقدار بضع درجات في درجات الحرارة العالمية قد لا يُشكل أهمية كبيرة في مقياس الزمن الجيولوجي. فقد شهدت درجة حرارة الغلاف الجوي العالمي تقلبات كبيرة منذ نشأة الحياة على الأرض. فكانت أعلى من الوقت الحاضر بنحو خمس إلى عشر درجات مئوية خلال العصر الجوراسي (قبل نحو ١٥٠ إلى ٢٠٠ مليون سنة) عندما ازدهرت الديناصورات، وكانت أكثر برودةً من الوقت الحاضر بنحو ست درجات مئوية خلال العصر الجليدي الأخير (قبل نحو عشرين ألف سنة).<sup>٨</sup> وعلى هذا فإن تغيراً بمقدار درجة أو درجتين في درجة حرارة الغلاف الجوي العالمي ليس حدثاً جليلاً بالنسبة إلى الأرض. غير أنه كان سيشكل مصدر قلق كبير لبعض الأنواع المزدهرة حالياً على هذا الكوكب، مثل الإنسان العاقل. فقد صار أكثر من ٩٩ في المائة من جميع الأنواع التي

عاشت على الإطلاق مُنقرضة الآن. لقد ظلَّت درجة حرارة الغلاف الجوي العالمي مُستقرة على مدى العشرة آلاف سنة الماضية، وخلال هذه الفترة حققت البشرية نجاحًا مذهلاً في زيادة تعدادها وتوسيع نطاق تواجدها وبناء الحضارات. ولكن إذا استمر الاتجاه الحالي للاحتباس الحراري وتجاوز نقطة التحول، فقد تُضطر البشرية عما قريب إلى مواجهة مُستقبل شديد القسوة.

## المنظور المتفائل

كانت نظرتنا للاتجاه الحالي للاحتباس الحراري العالمي حتى الآن نظرة متشائمة. ولننظر الآن إلى الجانب المشرق. أولاً: نحن مُدركون للعواقب الكارثية المحتملة للاحتباس الحراري العالمي. ثانياً: لدينا فهم علمي جيد للعوامل البشرية المُسببة للاحتباس الحراري العالمي. ثالثاً: نحن نَتَّخذ الإجراءات اللازمة للتخفيف من آثاره. من الصعب بطبيعة الحال التنبؤ بديناميكيات عمل المناخ والسيطرة عليها بسبب تعقيدها الشديد. غير أن ما يبعث على التفاؤل أن الناس يبذلون جهوداً لفهم الأحداث العالمية والتخفيف من عواقبها السلبية.

بعد أن أدرك العالم أن بعض المواد، مثل مركبات الكلوروفلوروكربون، التي كانت تُستخدم على نطاق واسع كمبرّدات، من الممكن أن تُلحق الضرر بطبقة الأوزون في طبقة الستراتوسفير، أُقرّت معاهدة دولية، ألا وهي بروتوكول مونتريال، في عام ١٩٨٧ لحماية طبقة الأوزون من خلال التخلُّص التدريجي من إنتاج المواد المُستنفدة للأوزون. ولكن ما مدى فاعلية هذه المعاهدة؟ إن التأثير المُقدَّر لبروتوكول مونتريال منذ عام ١٩٨٧ يصل إلى خفض درجة حرارة الغلاف الجوي العالمي بمقدار ٠,٥ إلى ١ درجة مئوية، بحلول عام ٢١٠٠.<sup>9</sup> وهذا نجاح هائل. وهكذا يبعث بروتوكول مونتريال رسالةً قوية ومشجعة بأننا قادرين على وقف المزيد من تغيُّر المناخ.

ثمة مصدر آخر للتفاؤل يتمثل في الوتيرة السريعة للتطوُّرات العلمية والتكنولوجية. فالتكنولوجيا تنمو بصورة أُسِّية لا خطيَّة. وقد تُوفّر لنا هذه التطورات التكنولوجية السريعة الوسائل اللازمة لمكافحة القضايا البيئية الحالية. فقد نتمكن قريباً من تطوير تقنيات أقوى كثيراً من تلك المُستخدمة الآن. وقد نتمكن من مواجهة التحديات البيئية الحالية والمستقبلية بمساعدة هذه التقنيات.

لنتأمّل الكيفية التي يتطوّر بها الذكاء الاصطناعي. في ظل المعدل الحالي للتقدُّم العلمي، قد نتمكن قريباً من فهم المبادئ العصبية الأساسية التي يقوم عليها الذكاء

البشري، ثم استخدام هذه المعرفة لتطوير ذكاء اصطناعي يتفوق على الذكاء البشري. وهذا يحدث بالفعل في بعض النواحي. فقد ناقشنا، على سبيل المثال، كيف قد يكون عمق الشبكة العصبية حاسماً في تحديد درجة التجريد التي يمكن تحقيقها (انظر الفصل الحادي عشر). والآن يستخدم التعلم العميق شبكات عصبية من أكثر من مائة طبقة، وهو ما يتجاوز كثيراً عمق الشبكة العصبية الموجودة في الدماغ البشري.

يتفوق الذكاء الاصطناعي بالفعل على البشر في كثير من المجالات. وتتمثل المرحلة الحاسمة التالية في تطوير ذكاء اصطناعي للأغراض العامة. وفي هذا الصدد، اقترح ديفيد سيلفر وزملاؤه في شركة ديب مايند، في ورقته البحثية بعنوان «المكافأة كافية»، أن المكافأة كافية لتطوير ذكاء اصطناعي للأغراض العامة.<sup>10</sup> ووفقاً لفرصيتهم، فإن معظم أشكال الذكاء، إن لم يكن كلها، ومن ضمنها الإدراك والذاكرة والتخطيط والتحكم الحركي واللغة والذكاء الاجتماعي، تنشأ نتيجة للهدف العام الأشمل المتمثل في تعظيم المكافأة. ويعزو ذلك إلى أن تعظيم المكافأة في بيئة معقدة يتطلب مجموعة متنوعة من القدرات. وبما أن التعلم المعزز يُحدد مشكلة الذكاء الساعي إلى تحقيق الأهداف في إطار منهجي، فإن وجود وكيل تعلم معزز قوي بما فيه الكفاية يتفاعل مع بيئات معقدة، سوف يطور أشكالاً مختلفة من الذكاء اللازم لتعظيم المكافأة عبر بيئات متعددة.

لقد صدم برنامج ألفا جو العالم عندما هزَم لي سيدول، وهو خبير ولاعب مُحترف في لعبة جو، في عام ٢٠١٦. وابتكرت شركة ديب مايند برامج إضافية، مثل ألفا زيرو ومو زيرو، على مدى السنوات التالية. وقد تمكن مو زيرو، وهو وكيل تعلم معزز قوي، من إتقان العديد من ألعاب الطاولة (جو، والشطرنج، وشطرنج الشوجي) فضلاً عن عددٍ من ألعاب الأتاري دون معرفة مُسبقة بها. وتمكن مو زيرو من تعلم إتقان كل هذه الألعاب بهدف واحد يتمثل في تعظيم المكافأة (على سبيل المثال، الفوز بلعبة)، على الرغم من حقيقة أن اختلاف الألعاب يقتضي أنواعاً مختلفة من المعرفة. وقد نشهد قريباً ظهور الذكاء الاصطناعي العام إذا استمرَّ هذا المسار البحثي.

تنبأ المخترع وأحد مستشر في المستقبل راي كرزويل، في معرض بيانه للطبيعة الأسية للنمو التكنولوجي («قانون العوائد المتسارعة»)، بأن «التفرد التكنولوجي» (وهي النقطة التي يصبح عندها النمو التكنولوجي خارجاً عن السيطرة ولا رجعة فيه) سوف يحدث في عام ٢٠٤٥.<sup>11</sup> وبمجرد الوصول إلى نقطة التفرد، سوف يتجاوز الذكاء الاصطناعي الذكاء البشري ويستمر في التحسُّن بمعدل متسارع مستمر دون تدخل بشري، مما يُحفز ردَّ

فعلٍ منفلاً لتحسين الذات. وفي عام ١٩٦٦، تنبأ عالم الرياضيات إيرفينج جود بحدوث «انفجار للذكاء» وظهور الذكاء الاصطناعي الفائق على النحو التالي: «لنُعرّف الآلة الفائقة الذكاء على أنها آلة يمكنها أن تتفوق على جميع الأنشطة العقلية لأي إنسان مهما بلغ ذكاؤه. ونظراً لأن تصميم الآلات هو أحد هذه الأنشطة العقلية، فإن الآلة الفائقة الذكاء يُمكنها تصميم آلات أفضل؛ وعندئذٍ سيحدث «انفجار ذكاء» لا محالة، وهو ما سيؤدي إلى تخلف ذكاء الإنسان كثيراً عن الركب. وهكذا فإن أول آلة فائقة الذكاء ستكون «آخر» اختراع يحتاج الإنسان إلى صنعه على الإطلاق، شريطة أن تكون الآلة مُطيعه بما يكفي لإخبارنا بكيفية إبقائها تحت السيطرة.»<sup>12</sup>

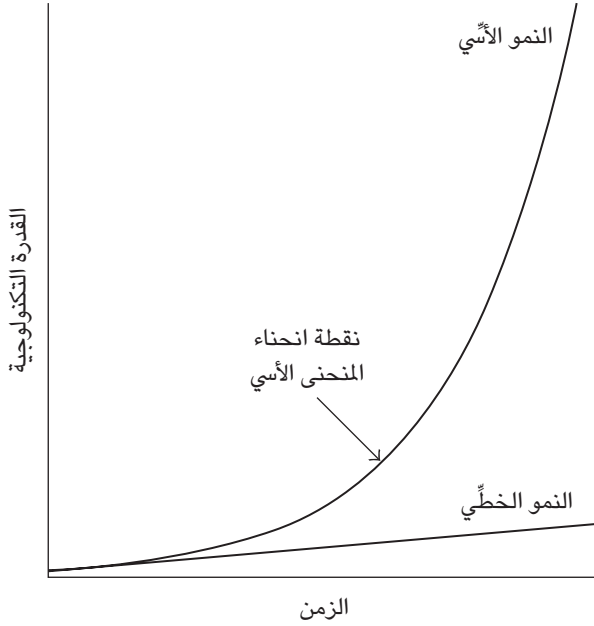
من النتائج المأمولة لهذا الانفجار في الذكاء الاصطناعي تطوير تقنيات جديدة وقوية قادرة على وقف أو حتى إبطال تأثير المشاكل البيئية الحالية. قد لا يبدو هذا معقولاً من منظور التكنولوجيا المعاصرة. ولكن بمجرد أن تصل التطورات التكنولوجية إلى نقطة التحول، فقد تتخطى سرعة التقدم حدود توقعاتنا الحالية.

هل يمكن أن تستمر وتيرة التقدم التكنولوجي في التسارع إلى ما لا نهاية؟ ألا توجد نقطة يعجز عندها البشر عن التفكير بسرعة كافية لمواكبة التقدم التكنولوجي؟ من الواضح أن هذا ما سيحدث للبشر غير المُعزّزين تكنولوجياً. ولكن ما الذي سيحققه ألف عالم، يفوق ذكاء الواحد منهم ذكاء العلماء البشريين اليوم ألف مرة، ويعمل كل منهم أسرع ألف مرة من البشر المعاصرين (لأن معالجة المعلومات في أدمغتهم غير البيولوجية أسرع)؟ ... عندما يصبح العلماء أذكى مليون مرة، ويعملون أسرع مليون مرة، فإن ساعة واحدة من العمل سيُنْتَج عنها قرن من التقدم (بالمصطلحات المعاصرة).<sup>13</sup>

تنبأ كرزويل بوقوع عددٍ من الأحداث بعد نقطة التفرد، من بينها قدرة الروبوتات النانوية على إبطال تأثير التلوث الناجم عن حِقْب التصنيع السابقة.<sup>14</sup> وأمل ألا يكون ترقب تطوير تكنولوجيا قادرة على وقف الاحتباس الحراري العالمي الحالي ضرباً من التفاؤل الساذج. إن النمو الأسي في المعرفة، والذي يشمل التقدم في العلوم والتكنولوجيا، وأيضاً في فهمنا للطبيعة البشرية والمجتمع، فضلاً عن تحسين الاستراتيجيات اللازمة لتنظيم وتعبئة الموارد الاجتماعية، قد يزودنا بأدوات فعّالة لمواجهة التحديات البيئية الحالية.

يبدو النمو الخطي والأسي متشابهين في المراحل المبكرة. ولا تظهر الاختلافات بينهما إلا عندما يصل النمو إلى حدٍّ مُعين (نقطة انحناء المنحنى الأسي، انظر الشكل ١٤-٨).

ومن هذا المنظور، يبدو أننا نعيش حالياً في عصرٍ بدأ فيه النمو الأسي للتكنولوجيا يتسارع على نحوٍ يتجاوز نقطة حرجة.



شكل ١٤-٨: دالة النمو الخطي مقابل دالة النمو الأسي.

دعوني أوضح هذه الفكرة ببعض الأمثلة المستمدة من تجاربي الشخصية. في عام ١٩٨١، عندما كنت أدرس علم الأحياء، درست الوراثة الجزيئية كجزء من المقرر الدراسي. أتذكر الرهبة التي شعرت بها عندما علمت لأول مرة بالعمليات الجزيئية التي تقوم عليها العقيدة المركزية لعلم الأحياء الجزيئي (نقل المعلومات من الـدي إن إيه إلى الـآر إن إيه الرسول إلى البروتين)، وهو مبدأ أساسي تقوم عليه كل أشكال الحياة على الأرض. لم تُذكر إمكانات تقنية استنساخ الجينات (أو الحمض النووي المؤتلف أو المعاد التركيب) إلا بإيجاز في الفصل الأخير من الكتاب الدراسي. واستنساخ الجينات هو عملية صنع نُسخٍ متعددة من جينٍ ما. باستخدام إنزيمات القطع (إنزيمات تقطع الحمض النووي عند تسلسلات نوكلوتيدية معينة)، يُقَطَّع تسلسل معين من الحمض النووي، ويجري إدخاله

في ناقل (قطعة صغيرة من الحمض النووي يُمكنها أن تتكاثر بمعزلٍ عن جينوم المضيف)، ثم إدخاله في خلية مُضيفة. وقد شكل هذا بداية الهندسة الوراثية. ومنذ ذلك الحين، تقدمت تقنيات الهندسة الوراثية بسرعة. وتُتيح تقنية كريسبر كاس (CRISPR-CAS) على وجه الخصوص، وهي تقنية جديدة نسبياً، التحرير الدقيق لتسلسلات الحمض النووي في الكائنات الحية. وتُستخدِم هذه التقنيات الهندسية الوراثية الآن بالتزامن مع تقنيات أخرى، مثل علم البيانات الضخمة والذكاء الاصطناعي، لتصميم وبناء أجزاء وأجهزة وأنظمة بيولوجية جديدة لا وجود لها في الطبيعة. فيمكن للمرء، على سبيل المثال، محاولة تصميم وخلق كائنات دقيقة جديدة تعمل على تحليل البلاستيك. وهذا مجال ناشئ يُعرَف باسم علم الأحياء التخليقي. وقد أكد العلماء في عام ١٩٤٤ أن الحمض النووي هو المادة الوراثية.<sup>15</sup> وبعد أقل من مائة عام، حدد العلماء الشفرة الوراثية (مجموعة من ثلاثة نيوكليوتيدات تُحدد حمضاً أمينياً واحداً)، والعمليات الجزيئية التي تكمن وراء العقيدة المركزية لعلم الأحياء الجزيئي، وتسلسل الجينوم البشري بأكمله، ويُمكنهم الآن تصميم وتصنيع أشكال حياة جديدة.

تشكل التطورات السريعة في تكنولوجيا الكمبيوتر مثلاً آخر. فقد درست برمجة الكمبيوتر في عام ١٩٨١. في ذلك الوقت، كان علينا أن نكتب أكواد البرمجة على ورقٍ مربع ونقدمها إلى موظف مسئول عن ثقب البطاقات المثقبة. وبعد بضعة أيام، كنا نتلقَى حزمةً سميكة من البطاقات المثقبة، ثم نحملها إلى مركز للكمبيوتر حتى يقرأها الكمبيوتر الرئيسي ويولّد المُخرجات. كان الكمبيوتر الرئيسي يقرأ البيانات من البطاقات المثقبة (بناءً على عدم وجود ثقب أو وجوده في مكانٍ معين) ويولد الناتج النهائي. وحتى البرامج القصيرة للغاية كانت تتطلّب كومةً سميكة من البطاقات المثقبة لإنجازها.

كان أول لقاء لي بالكمبيوتر الشخصي عندما ذهبتُ إلى الولايات المتحدة للالتحاق بالدراسات العليا في عام ١٩٨٦. كانت تجربة جديدة تماماً بالنسبة لي؛ إذ كانت مدخلاتي تنتج مُخرجات على شاشة الكمبيوتر على الفور. بل إنني تمكنت من كتابة وتشغيل برنامج دون استخدام البطاقات المثقبة! كان لا بد من عمل نسخة احتياطية من القرص الصلب للكمبيوتر الذي كنت أستخدمه في ذلك الوقت — والذي أعتقد أنه كان من طراز IBM XT — في أحد الأيام؛ لأنه كان شبه مُمتلئ. كان إجمالي مساحة تخزين قرص الكمبيوتر ١٠ ميجابايت. وقد استخدمت نحو عشرين قرصاً مرناً (بمساحة تخزين ٥٢٥ كيلوبايت لكل قرص) لعمل نسخة احتياطية من القرص الصلب. والآن، بعد نحو خمسة

وثلاثين عاماً، أمتلك هاتفًا ذكيًا بمساحة ٢٥٦ جيجابايت، بزيادة ٢٥٦٠٠ مرة عن مساحة ذلك الكمبيوتر الذي كنت أستخدمه في الثمانينيات. وفقًا لقانون مور، كانت سرعة وسعة أجهزة الكمبيوتر تتضاعفان كل عامين تقريبًا على مدار العقود القليلة الماضية. وهذا يعني أن أجهزة الكمبيوتر اليوم أقوى بنحو مائة مرة من تلك التي كانت موجودة قبل أربعة عشر عامًا، ونحو عشرة آلاف مرة من تلك التي كانت موجودة قبل سبعة وعشرين عامًا، ومليون مرة من تلك التي كانت موجودة قبل أربعين عامًا. ومن ثم، كان التقدم في تكنولوجيا الكمبيوتر أسيرًا بشكل واضح خلال العقود القليلة الماضية.

ثمّة مجال آخر يتقدم بسرعة وهو الذكاء الاصطناعي. فمنذ ثورة التعلم العميق، ظهر العديد من برامج الذكاء الاصطناعي القوية التي تتفوق على البشر في مجالات مختلفة. حتى في مجالات مثل الفن والموسيقى والأدب، كان يُعتقد يومًا ما أنها تتطلب قدراتٍ بشرية خاصة، أصبح لها برامج قوية للذكاء الاصطناعي متاحة الآن. يمكن لهذه البرامج إنشاء قطعٍ موسيقية أو رسومات أو مقاطع فيديو أو حتى قصائد وروايات. فيما يلي قصيدة كتبها ChatGPT بعد أن طلبتُ منه «كتابة قصيدة عن الإبداع البشري»: (write a poem on human creativity)

Creativity flows like a river wild,  
A force that cannot be tamed or reconciled.  
It bursts forth from the depths of the mind,  
A spark that sets the imagination aligned.  
It dances in the brushstrokes of a painter,  
It sings in the notes of a composer's gainer.  
It shapes the words of a poet's pen,  
And the designs of an engineer's den.  
It builds the bridges that span the divide,  
And the skyscrapers that reach for the sky.  
It brings to life stories that touch the soul,  
And the inventions that make us whole.  
Human creativity is a wonder to behold,  
A reflection of the world, both young and old.

It is the light that guides us through the dark,  
A reminder of the beauty in our hearts.

لقد نظم ChatGPT هذه القصيدة في غضون ثوانٍ. ربما يستغرق الأمر مني شهرًا أو أكثر لكتابة قصيدة بهذه الجودة.

إذا استمرت تقنيات الذكاء الاصطناعي القوية في هذا التقدم المطرد ودُمجت مع التطورات التكنولوجية في مجالات أخرى، فقد تصبح فعالة في مكافحة المشاكل البيئية التي نواجهها حاليًا. فقد تمكنت شركة ديب مايند من توفير أربعين في المائة من إجمالي تكاليف التبريد من خلال تطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي على التحكم في مراكز بيانات جوجل.<sup>16</sup> ويعد هذا تحسنًا كبيرًا؛ نظرًا لأن مراكز بيانات جوجل كانت تُدار بالفعل بطريقة متطورة للغاية قبل تطبيق الذكاء الاصطناعي الخاص بشركة ديب مايند. ويوضح هذا المثال كيف يمكن استخدام الذكاء الاصطناعي لتحسين كفاءة الطاقة وتقليل الانبعاثات.

## مفترق طرق

قد نقرب من مفترق طرق حيث تبدأ التطورات التكنولوجية في الازدهار من ناحية، ويهدد الاستغلال المفرط للموارد الطبيعية استمرار وجود جنسنا البشري من ناحية أخرى. ولعل في جائحة كوفيد-١٩ دليل على كلا الاتجاهين. لقد كان ظهور الوباء نتاجًا لانتشار فيروس سارس-كوف-٢، الذي يُعتقد أن منشأه الخفافيش قبل أن ينتشر إلى البشر. ومع استمرار الناس في غزو موائل الحياة البرية، سيزداد خطر الإصابة بالأمراض الحيوانية المنشأ (الأمراض المعدية التي تنتقل عن طريق الحيوانات إلى البشر) حتمًا. إن احتمال ظهور مرض حيواني جديد — مثل كوفيد-١٩، وهو شديد العدوى ومُमित — يظل احتمالًا قائمًا. غير أن التقدم في العلوم والتكنولوجيا وقَّرنَا لنا الوسائل اللازمة للتعامل مع كوفيد-١٩. وتمكنت بعض البلدان من إبقاء أعداد حالات الإصابات والوفيات منخفضة نسبيًا من خلال تطبيق إجراءات الإغلاق المبكر، والفحوصات الواسعة النطاق، وتتبعُ المخالطين، والعزل، والاتصالات الفعالة مع المواطنين. ولعبت تقنيات مختلفة، مثل تشخيص المرض، والإنترنت، والهواتف الذكية، دورًا في هذه العملية. والأهم من ذلك أننا تمكنا من تطوير لقاحات فعالة في أقل من عامٍ بعد تفشي جائحة كوفيد-١٩، وهو أمر غير

مسبوق في تاريخ البشرية. وقد أصبح هذا مُمكنًا بفضل المجموعة الهائلة من التطورات التكنولوجية والعلمية التي راكمتها البشرية على مدى قرونٍ في مجموعة من التخصصات، ومن ضمنها علم الأحياء والكيمياء والهندسة.

تُشير التقديرات إلى أن جنس الإنسان (الهومو) قد ظهر منذ ثلاثة ملايين سنة تقريبًا. ومنذ ذلك الحين انقرض العديد من أنواع الإنسان، ولم يبقَ على قيد الحياة حتى الآن سوى نوع واحد فقط، وهو الإنسان العاقل. أما النياندرتال وإنسان دينيسوفا فقد بقيا لما يقرب من مائتي ألف إلى ثلاثمائة ألف سنة، في حين عاش الإنسان المُنتصب (هومو إركتوس) ما يقرب من مليوني سنة.<sup>17</sup> وماذا عن الإنسان العاقل؟ عاش الإنسان العاقل ما يقرب من ثلاثمائة ألف سنة حتى الآن. فإلى متى قد نستطيع أن نبقى على قيد الحياة؟ لا نستطيع أن نتوقع مستقبلًا مشرقًا إذا استمرت التغيرات البيئية العالمية في اتجاهها الحالي. ولا نستطيع أن نستبعد احتمال انقراض الإنسان العاقل، وسائر الجنس البشري بالتبعية، في المستقبل غير البعيد. ومن ناحية أخرى، قد تُقدم لنا التطورات السريعة في مجال العلوم والتكنولوجيا سبلاً فعّالة لمحاربة عواقب التغيرات البيئية العالمية.

هل يستطيع البشر استخدام قدراتهم على الابتكار للتغلب على أزمة التغير البيئي العالمي والحفاظ على الحضارات؟ أم سيجدون أنفسهم في مواجهة الكارثة البيئية الوشيكة؟ قد تقودنا رحلتنا إلى حيث تمكّن التطورات العلمية والتكنولوجية البشر من التغلب على التحديات الحالية والمستقبلية وتجاوز القيود البيولوجية (اليوتوبيا). على العكس من ذلك، قد يقودنا مسارنا إلى عواقب مُظلمة تؤدي لانقراض جماعي جديد؛ فقد ينتهي بنا الأمر إلى مواجهة ظروف قاسية للغاية، من ضمنها ندرة الغذاء، من شأنها أن تهدم البنية التحتية للحضارات التي شيدتها البشرية عبر التاريخ (الديستوبيا). قد يشكل الباقي من القرن الحادي والعشرين مرحلة حاسمة لمستقبل البشرية.

## الخاتمة

استكشفنا في هذا الكتاب الأساس العصبي للقدره البشرية على الابتكار، مع تركيز خاص على الآليات العصبية التي تدخل في الخيال والتجريد. بدأنا رحلتنا باكتشاف أن الحُصين، وهو بنية دماغية معروفة بدورها في التعلم والذاكرة، يلعب دورًا أيضًا في الخيال (الجزء الأول). بعبارة أخرى، الذاكرة والخيال تدعمها نفس بنية الدماغ، مما قد يفسر سبب قابلية ذكرياتنا للتغيير والتشكيل ولماذا نشكل أحيانًا ذكريات كاذبة لأحداث لم تقع من الأساس.

ثم استكشفنا العمليات التي تحدث في الدوائر العصبية الحُصينية التي تشكل أساس الخيال (الجزء الثاني). إن منطقة CA3 في الحُصين، التي ترتبط خلاياها العصبية بعضها ببعض من خلال تفرعات عصبية متكررة ضخمة، ومن ثم تكون عرضة للاستثارة الذاتية، تولد تسلسلاتٍ نشاطٍ مجربة وغير مجربة (جديدة) في أثناء النوم وحالات الخمول. ترتبط خلايا CA3 بعدد هائل من المشابك العصبية الضعيفة بشكلٍ فردي، مما يجعلها مثالية لتوليد تسلسلات نشاطٍ متغيرة لا ثابتة. يبدو أن شبكة CA3 اكتسبت درجة من العشوائية أثناء التطور.

انتقلنا بعد ذلك إلى بحث نموذج المحاكاة والاختيار، الذي يفترض أن الشبكة العصبية CA3-CA1 تحاكي وتُعزِّز التمثيلات العصبية للأحداث والأفعال العالية القيمة استعدادًا للمستقبل بدلاً من مجرد تذكر ما حدث بالفعل. كما بحثنا الفرضية القائلة بأن وظيفة المحاكاة والاختيار في الحُصين قد تطورت لدى الثدييات البرية المتنقلة دون الطيور؛ بسبب ضرورة اختيار المسارات المثلى بين موقعين عشوائيين.

تشير الدراسات إلى وجود عمليات عصبية حُصينية مشابهة تدعم الذاكرة والخيال لدى البشر والثدييات الأخرى. يفترض نموذج المحاكاة والاختيار أن جميع الثدييات البرية المتنقلة لديها عمليات عصبية حُصينية مشابهة تدعم الخيال. بعبارة أخرى، يبدو أن القدرة على التخيل مشتركة بين جميع الثدييات. ما الذي يجعل البشر مبتكرين إلى هذا الحد إذن؟ لقد استكشفنا الأساس العصبي للتجريد العالي المستوى لدى البشر من منطلق افتراضٍ بأن قدرة البشر الخاصة على الابتكار نابعة من قدرتهم على التخيل بحرية باستخدام مفاهيم مجردة عالية المستوى (الجزء الثالث). وفحصنا القشرة الجبهية الأمامية والطلل كمناطق دماغية يُحتمل أن تلعب دورًا غاية في الأهمية في التجريد العالي المستوى لدى البشر. كما تناولنا احتمالية أن يُحدد عمق (عدد طبقات) الشبكة العصبية مستوى التجريد.

ما مدى معرفتنا بالأسس العصبية التي يقوم عليها الإبداع البشري؟ وهل حددنا العمليات العصبية الأساسية التي يقوم عليها الخيال والتجريد العالي المستوى؟ مع الأسف، لم نحددنا بعد. فما زلنا نخطو أولى خطواتنا نحو فهم الأساس العصبي لهذه الملكة العقلية البشرية العظيمة. علاوة على ذلك، فإن ما تناولناه في هذا الكتاب ليس سوى جزءٍ بسيطٍ من الموضوع. أولًا: فيما يتصل بالأساس العصبي للخيال، لا يعمل الحُصين بمعزل، بل يتفاعل مع عددٍ كبيرٍ من مناطق الدماغ أثناء التخيل. وفي هذا الكتاب، لم نتناول سوى العمليات العصبية الحُصينية فحسب. ثانيًا: الأساس العصبي للتجريد العالي المستوى غير

مفهوم بشكل جيد مقارنة بالأساس العصبي للخيال. ونتيجة لهذا، فإن مناقشاتنا حول هذا الموضوع (الجزء الثالث) محدودة بالضرورة. ثالثاً: كما ناقشنا في الفصل الثالث عشر، فالخيال وحده غير كافٍ للإبداع والابتكار. فثمة عملية تقييمية تُقيد الأفكار لتلبية احتياج مُعين يجب أن تتبع عملية توليد الأفكار. لقد ركزنا على النوع الأول من الإبداع (الإبداع العفوي) بينما تجاهلنا الثاني (الإبداع المتعمد). لذا، أرجو أن تنتبهوا إلى هذه القيود.

تناول الجزء الرابع بعض الموضوعات المرتبطة بموضوع الكتاب الرئيسي (الأساس الدماغي للخيال والتجريد العالي المستوى) — برغم اختلافها عنه — مثل اللغة وكيف نصبح مُبدعين. وفي الفصل الأخير، قارنا بين منظورين مختلفين بشأن عواقب الابتكار، وهي مشكلة الاستدامة وانفجار الذكاء. ومن الجدير بالذكر أننا قد أحرزنا تقدماً كبيراً في مجال الذكاء الاصطناعي على الرغم من فهمنا المحدود للأساس العصبي للابتكار البشري. فالشبكات العصبية الاصطناعية تتفوق على الدماغ البشري من حيث سرعة معالجة الإشارات العصبية (جيجاهرتز في مقابل أقل من ١٠٠ هرتز)، وعمق الشبكة (أكثر من مائة طبقة في مقابل أقل من عشرين طبقة، انظر الفصل الحادي عشر)، وسرعة التطور (إذ يستغرق الأمر أياماً أو أشهراً أو سنوات لبناء نسخة جديدة من الشبكة العصبية الاصطناعية في مقابل أجيال عديدة لحدوث التطور الطبيعي)، وانتشار التكنولوجيا (الاستنساخ الفوري للأنظمة مقابل عدم القدرة على الاستنساخ في التطور الطبيعي). وقد مكنت هذه العوامل الشبكات العصبية الاصطناعية من التفوق على الذكاء البشري في كثير من المجالات. قد نتمكن من بناء شبكات عصبية اصطناعية أقوى بكثير في المستقبل القريب مع تطوّر فهمنا للأساس العصبي للابتكار البشري وتطبيق هذه المعرفة على بناء شبكات عصبية اصطناعية من الجيل التالي. وعندئذٍ، وكما تنبأ كرزويل، قد يكون «التفرد» قريباً.<sup>18</sup>

كما أوضحنا في الفصل الرابع عشر، قد نكون على وشك الوصول إلى نقطة تحول سوف تؤدي إما إلى يوتوبيا أو ديستوبيا. إن قدرتنا على الابتكار سلاح ذو حدين. ونحن في حاجة إلى الاستفادة الكاملة من هذه القدرة لحل الأزمة الناجمة عن إساءة استخدامها بدلاً من تسهيل حدوثها. والأرجح أننا سنحتاج إلى اتباع نهج مُتعدد الأوجه. نحن في حاجة إلى تحقيق تطورات تكنولوجية قادرة على التخفيف بفاعلية من آثار تغيّر المناخ. وفي الوقت نفسه، نحن في حاجة إلى فهم أنفسنا على نحو أفضل بغرض تعزيز التعاون

## الدماغ المُبتكر

العالمي. نحن بحاجة إلى تحقيق أفضل استفادةٍ من جميع الموارد الاجتماعية المتاحة من أجل مواجهة التحديات البيئية المُستمرة.

# الملحق الأول

## التلفيف المُسنَّن

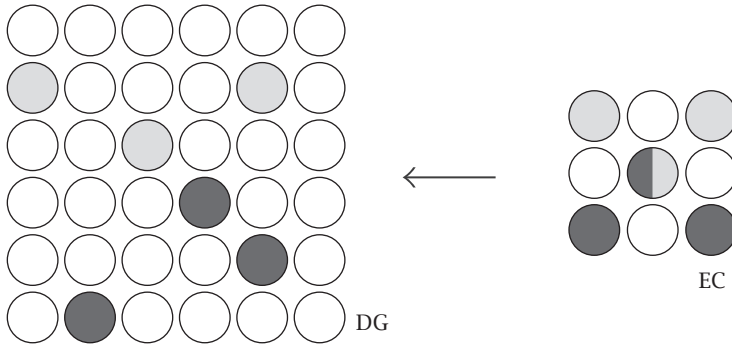
من بين مكونات الدائرة الثلاثية المشبكية الحُصينية، ركَّزنا على منطقتي CA1 و CA3. فهاتان المنطقتان يُعتَقَدُ أنهما مرتبطتان مباشرة بالموضوع الرئيسي لهذا الكتاب: الأساس العصبي للخيال. فما وظيفة التلفيف المُسنَّن إذن؟ النظرية الأكثر انتشارًا في الوقت الحالي بشأن ذلك أنه يقوم بفصل الأنماط، الأمر الذي يعزز سعة تخزين الذاكرة في شبكة CA3 العصبية. وكتفسير بديل، افترضتُ أنا وزميلي القديم جونج وون لي أن الوظيفة الأساسية للتلفيف المُسنَّن هي ربط مصادر متنوِّعة للمدخلات الحُسيَّة الواردة معًا لتحديد سياقٍ مكاني.<sup>1</sup> وسأشرح هنا بإيجاز كل نظرية وألخص الإشكاليات النظرية المرتبطة بنظرية فصل الأنماط.

## فصل الأنماط

وفقًا لهذه النظرية، فإن الوظيفة الأساسية للتلفيف المُسنَّن هي فصل أنماط الإدخال العصبي المتشابهة إلى أنماط مميزة بحيث يمكن لشبكة CA3 العصبية تخزين العديد من أنماط الإدخال بأقل قدرٍ من التداخل. تستند النظرية إلى أن التلفيف المُسنَّن يحتوي على عددٍ كبير جدًا من الخلايا العصبية. في وقتٍ سابق، افترض ديفيد مار في نظريته حول المُخَيخ أن أنماط النشاط المتداخلة للألياف المطحلبة الجسرية تتحول إلى أنماطٍ غير مُتداخلة من خلال التفرعات العصبية المُتشعِّبة المُمتدة إلى الخلايا الحُبيبية (إعادة التشفير التوسعي).<sup>2</sup> في حُصين الفئران، يحتوي التلفيف المُسنَّن على نحو مليون خلية عصبية استثنائية (خلايا حبيبية)، وهي أكثر من مجموع الخلايا العصبية الاستثنائية في شبكة

## الدماغ المُبتكر

CA1 و CA3 (الخلايا الهرمية). تتلقى الخلايا الحبيبية للتلفيف المسنن مدخلات استثنائية أساسية من نحو ٠,٢ مليون خلية في الطبقة الثانية من القشرة الشمية الداخلية.<sup>3</sup> وهكذا، وكما هو الحال في المخيخ، فإن التفرُّع العصبي المُمتد من شبكة عصبية أصغر (الطبقة الثانية من القشرة الشَّمِيَّة الداخلية) إلى شبكة أكبر (التلفيف المُسنن) قد يُقلل من تداخل أنماط النشاط العصبي في الحُصين (انظر شكل م١-١).<sup>4</sup> وبهذه الطريقة، ووفقًا لنظرية فصل الأنماط، يساعد التلفيف المُسنن شبكة CA3 على تخزين العديد من الأنماط بأقل قدرٍ من التداخل.



انظر شكل م١-١: فصل الأنماط عن طريق إعادة التشفير التوسُّعي (EC: القشرة الشمية الداخلية، و DG: التلفيف المُسنن).

## الربط

تتكون القشرة الشمية الداخلية من قسمين: أوسط وجانبي. يُعتقد أن القشرة الشمية الداخلية، حيث توجد الخلايا الشبكية (الشكل ٨-٢)، تحمل تمثيلًا مترقيًا عامًّا للمساحة، بينما يُعتقد أن القشرة الشمية الداخلية الجانبية تحمل معلوماتٍ حول تفاصيل البيئة المحيطة. وبصورة أعم، قد تحمل القشرة الشمية الداخلية الوسطى والجانبية المعرفة البنيوية المجردة والتجارب الحسِّية الفردية على التوالي (انظر الفصل الثامن). ومن الناحية التشريحية، يلتقي هذان المساران من المدخلات في التلفيف المُسنن وفي شبكة CA3، مما يُشير إلى أن التلفيف المُسنن و CA3 ربما يُسهمان بدور مُهم في ربط أنواع مختلفة من المدخلات بالحُصين (انظر الشكل ٨-٤).<sup>5</sup> أما في المجال المكاني، فيتلاقى

تمثيل مكاني عام (من القشرة الشمية الداخلية الوسطى) مع المعلومات حول تفاصيل البيئة (من القشرة الشمية الداخلية الجانبية) في التلغيف المُسنن وCA3. وهذه الإشارات، عند دمجها، ستكون كافيةً لتحديد سياقٍ مكاني لبيئةٍ مُعينة (معرفة المكان الذي يُوجد فيه الشخص).

إن الإسهامات النسبية للتلغيف المُسنن في مقابل إسهامات شبكة CA3 في ربط المدخلات الحسية الواردة غير واضحة. ومع ذلك، تشكل المدخلات الواردة من القشرة الشمية الداخلية (الوسطى والجانبية مجتمعين) نحو ثُلثي إجمالي المدخلات المشبكية الاستثنائية الواردة إلى الخلايا الحبيبية للتلغيف المُسنن، في حين تُشكل أقل من ربع المدخلات في الخلايا الهرمية لشبكة CA3 (انظر الشكل ٤-٢). وهذا التنظيم التشريحي إنما يُشير إلى أن المدخلات القشرية الشمية الداخلية تلعب دورًا مهمًا نسبيًا في عمل التلغيف المُسنن. علاوة على ذلك، يُشير عدد متزايد من الأدلة التجريبية إلى دور التلغيف المُسنن في الربط الحسي وتحديد السياق المكاني.<sup>6</sup> فتشير هذه النتائج إلى أن التلغيف المُسنن، سواء كان بمفرده أو بالاشتراك مع شبكة CA3، يدخل في الربط الحسي وتعيين السياق المكاني. والواقع أن هذه الفرضية ليست جديدة تمامًا. فقد أشار رايموند كيسنر إلى أن التلغيف المُسنن يلعب أدوارًا مُتعددة من بينها فصل الأنماط و«التشفير الرابط»، واقترح سين تشينج أن الوظيفة الأساسية للتلغيف المُسنن هي «إعادة تعيين السياق».<sup>7</sup>

### الإشكاليات النظرية في نظرية فصل الأنماط

إن فصل الأنماط لا يتعارض مع ربطها. فقد يربط التلغيف المُسنن المدخلات الحسية الواردة من القشرة الشمية الداخلية، وفي هذه العملية يفصل الأنماط المتداخلة لتعزيز «التمثيل المتناثر». ومع ذلك، هناك أسباب تدعو للشك في أن عملية فصل الأنماط قد لا تُعبّر عن جوهر مساهمة التلغيف المُسنن في عمل الحُصين. ويمكن العثور على حجج مفصلة تدحض نظرية فصل الأنماط وتؤيد الربط في ورقتنا البحثية.<sup>8</sup> أما هنا، فسنبحث بإيجاز الإشكاليات النظرية المرتبطة بنظرية فصل الأنماط فقط.

**أولاً:** من وجهة نظر تطورية، من غير المؤكد أن التلغيف المُسنن قد تطور في المقام الأول ليقوم بفصل الأنماط. فيشير العديد من الأدلة إلى أن التلغيف المُسنن تطور بصورة مستقلة في الثدييات؛ إذ لا تمتلك الطيور بنية مماثلة شكلاً لتلغيف الثدييات.<sup>9</sup> وكما تناولنا في الفصل السابع، يتمنّع بعض الطيور (التي تخزن الطعام) بذاكرة مكانية

ذات سعةٍ فائقة. فهي تخزن الطعام في آلاف المناطق المختلفة وتستعيد معظمه بنجاح بعد عدة أشهر بناءً على ذاكرتها المكانية. وهذا يعني أن هذه الطيور قد وجدت طريقة لتمثيل العديد من الذكريات مع القليل من التداخل دون وجود تلفيفٍ مُسنن. فلماذا إذن تطوّرت بنية بهذه الضخامة (التلفيف المُسنن) لدى الثدييات بينما كان هناك حل أبسط لتعزيز سعة تخزين الذاكرة؟<sup>10</sup>

**ثانيًا:** تتعلق نظرية فصل الأنماط بفصل الأنماط الثابتة، ولكن من الواضح الآن أن شبكة CA3 تُمثل الذكريات المُتسلسلة أيضًا (مثل المسارات المكانية؛ انظر الفصل الثالث). بالنسبة إلى الأنماط الثابتة، من المُرجح أن تؤدي التفرعات العصبية المُمتدة من شبكة أصغر إلى أخرى أكبر إلى تقليل التداخلات بين الأنماط من خلال إعادة التشفير التوسعي (انظر الشكل ??). غير أن تأثير إعادة التشفير التوسعي على فصل التسلسلات ليس مباشرًا؛ لأن تسلسل النشاط العصبي لا يعتمد فقط على المدخلات الواردة، ولكن أيضًا على الديناميكيات الداخلية للشبكة العصبية.

**ثالثًا:** من الصعب التوفيق بين فصل الأنماط والمرونة المشبكية (تغيّر في قوة الربط العصبي) الموجودة في التلفيف المُسنن.<sup>11</sup> تشير المرونة المشبكية في التلفيف المُسنن إلى أنها تلعب دورًا في تشفير الذكريات الجديدة. ويعتقد العلماء أن الشبكة العصبية تُخزن الذكريات بطريقة متداخلة وموزعة من خلال تغيير قوى الاتصال بين الخلايا العصبية (انظر الشكلين ٤-٣ و ٨-١). بعد ذلك، ستُعزّز تلك المشابك العصبية التي تنشط عن طريق مدخلات مُتشابهة، تعزيزًا متكررًا (هذا هو أحد الأسس العصبية لعملية التعميم، انظر الفصل الثامن). وبناءً على ذلك، ستقوم الشبكة العصبية عند التعرّض لمدخلات متشابهة بدرجة كافية باستكمال الأنماط (أي جعل المدخلات المتشابهة أكثر تشابهًا) وليس فصل الأنماط (أي جعل المدخلات المتشابهة أكثر اختلافًا). وبافتراض أن التلفيف المُسنن يُخزن الذكريات وفقًا لهذا المخطط العام، فإن المرونة المشبكية ستضّرّ بالدور المُفترض للتلفيف المُسنن في فصل أنماط الإدخال المتشابهة إلى أنماط متميزة.

إيجازًا، باستثناء فكرة إعادة التشفير التوسعي، فإن الأسس النظرية لنظرية فصل الأنماط واهية. كما فشلت الدراسات التجريبية في تقديم أدلة واضحة على فصل الأنماط. على سبيل المثال، على الرغم من أن العديد من الدراسات أظهرت أن التلاعب بالتلفيف المُسنن يضعف قدرة الحيوان على التمييز بين مُثيرين متشابهين (مثل موقعين مكانيّين

## الملحق الأول

متقاربين)، فإن مثل هذه الاختلافات السلوكية قد تنجم عن عوامل عديدة. قد يكون ضعف التمييز السلوكي ناتجًا عن ضعف فصل الأنماط؛ ولكنه قد يكون ناتجًا عن اختلافات في عمليات عصبية أخرى، مثل ضعف ربط المدخلات الحسية الواردة. يرجى الاطلاع على ورقتنا البحثية المشار إليها بالفعل في الملاحظات لمزيد من المناقشات التفصيلية حول هذه المسألة.



## الملحق الثاني

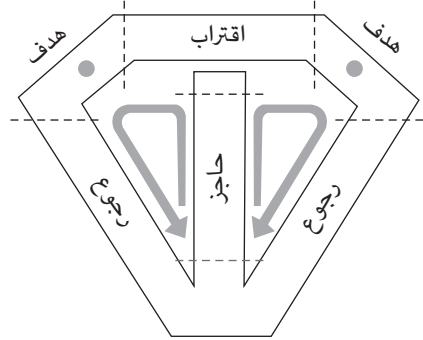
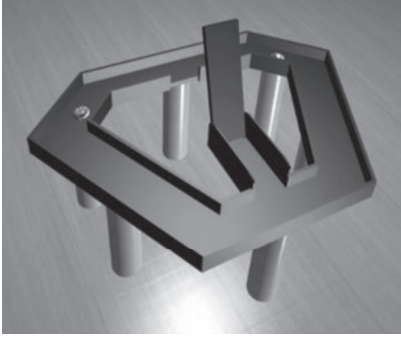
### الخلايا العصبية المشفرة للقيمة

توجد الخلايا العصبية المشفرة للقيمة في مناطق ممتدة من الدماغ. هناك أنواع مختلفة من القيمة (مثل قيمة الشيء، أو قيمة فعل معين، أو قيمة الموقف الحالي) وتقوم الخلايا العصبية المختلفة بترميزها. تُغير الخلية العصبية التي تشفر القيمة نشاطَ إطلاقِ جهد الفعل الخاص بها وفقاً للقيمة. بعبارة أخرى، يُمكننا الحصول على معلوماتٍ حول القيمة من خلال ملاحظة نشاط إطلاق جهد الفعل للخلية. تزيد بعض الخلايا العصبية التي تُشفر القيمة من معدلات إطلاقها للإشارات العصبية مع زيادة القيمة، وتقلل بعضها الآخر من نشاطها مع زيادة القيمة.<sup>1</sup> تستجيب بعض الخلايا العصبية أيضاً لنطاقٍ مُعين من القيمة.<sup>2</sup> وفي كل هذه الحالات، يوفر نشاط إطلاق جهد الفعل للخلية العصبية التي تشفر القيمة معلوماتٍ حول القيمة.

سوف أشرح هنا كيف يجد العلماء الخلايا العصبية المشفرة للقيمة من خلال مثالٍ مُحدد، وهو خلية عصبية في شبكة CAI مُسجَّلة من حُصين جردت تزيد من نشاط إطلاق جهد الفعل الخاص بها مع زيادة القيمة. درَّب فريقي جرداً عطشاناً على الحصول على الماء كمكافأة من خلال زيارة موقعين مستهدفين (الزاوية العلوية اليسرى والزاوية العلوية اليمنى في متاهة معدلة على شكل حرف T؛ انظر شكل (م ٢-١)). وفي كل محاولة، بدءاً من الحاجز المركزي داخل المتاهة، كان على الجرذ أن يزور أحد الهدفين ويعود إلى المركز باستخدام الممرِّ الجانبي (تشير الأسهم الرمادية إلى اتجاهات حركة الجرذ). وعند كل هدف تُقدِّم قطرة صغيرة من الماء على أساس احتمالي. وهكذا شرب الجرذ الماء في بعض المحاولات، ولكنه لم يستطع في تجارب أخرى. علاوة على ذلك، تغيرت احتمالات

## الدماغ المُبتَكِر

تقديم الماء عند الهدفين بمرور الوقت دون أي إشارة حسيّة. على سبيل المثال، تغيرت احتمالات تقديم الماء بالنسبة إلى الهدفين الأيسر والأيمن بشكلٍ غير مُتوقَّع من ٢١ و ٦٣ في المائة إلى ٧٢ و ١٢ في المائة.



شكل م ٢-١: متاهة معدلة على شكل حرف T. تشير الأسهم إلى اتجاهات حركة الفأر. الدائرتان الرماديتان هما موقعا تقديم الماء. المقطع الأيمن مستنسخ من مقال هيونجونج لي وآخرين، بعنوان «الارتباطات العصبية الحُصينية لقيم الأحداث المُختبرة»، دورية «نيوروساينس» مجلد ٢٢، عدد ٤٣ (أكتوبر ٢٠١٢): (CC BY-NC-SA) 15054.

تُستخدَم مهمة البحث عن الغذاء الديناميكية هذه لمحاكاة عملية اتخاذ القرار في بيئة ديناميكية وغير موثوقة، حيث يُمثل تتبع القيم الحقيقية بدقة التحديّ الأكبر. يتمثل التحديّ الذي يواجهه الجرذ في تتبُّع احتمالات تقديم المياه عند الهدفين. يمكن تحقيق ذلك من خلال تقدير الاحتمالات بناءً على تاريخ الاختيارات السابقة ونتائجها. لنفترض أن الجرذ شرب الماء في أربع من الزيارات الخمس للهدف الأيسر وزيارة واحدة فقط من الزيارات الخمس للهدف الأيمن. ربما يُقدِّر الجرذ احتمال تقديم المياه عند الهدف الأيسر (أي قيمة الهدف الأيسر) ليكون أعلى من قيمة الهدف الأيمن. ومن ثَمَّ يُمكننا التنبؤ بأن الجرذ على الأرجح سيختار الهدف الأيسر في المحاولة التالية.

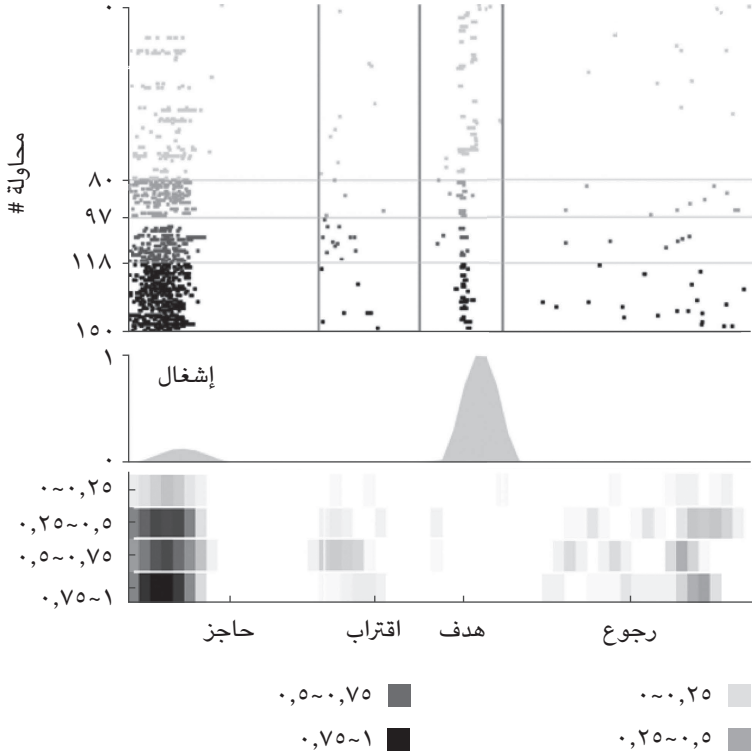
لنبحث الآن موقفاً آخر. لنفترض أن الجرذ شرب الماء في ثلاث زيارات من أصل خمس لكل هدف على مدى عشر محاولات. ولنفترض أيضاً أن تسلسل نتائج الاختيار كان 0-0-0-X-X (حيث يشير 0 و X إلى تقديم الماء وعدم تقديمه على التوالي) عند الهدف

الأيسر، و  $x-x-0-0-0$  عند الهدف الأيمن. فأى هدف ستعتبره ذا قيمة أعلى؟ ربما يكون الهدف الأيمن. والسبب في ذلك أننا نعطي ثقلًا أكبر للتجارب الحديثة مقارنة بالتجارب البعيدة عند تقييمها. وهذا منطقي؛ لأننا نعيش في عالم دائم التغير. وربما يرجع السبب في التسلسل إلى أن القيمة الحقيقية للهدف الأيمن قد زادت في حين انخفضت قيمة الهدف الأيسر. تعمل نظرية التعلم المعزز على صياغة هذه العمليات، وتقييم النتائج التي يواجهها الفرد مع إيلاء ثقل أكبر للتجارب الحديثة.

تعمل نظرية التعلم المعزز كذلك على صياغة عملية اتخاذ القرار مع الأخذ في الاعتبار المفاضلة بين الانتفاع والاستكشاف. فكيف توزع اختياراتك لتعظيم مقدار المكافأة في بيئة متغيرة وغير مستقرة؟ عليك بالطبع اختيار الهدف الذي يحمل أعلى قيمة مقدره دون الأهداف الأخرى. ولكن عليك أيضًا اختيار الأهداف الأخرى من حين لآخر؛ لأن القيم قد تتغير ديناميكيًا بمرور الوقت. فقد يصبح هدف كان منخفض القيمة سابقًا هدفًا عالي القيمة فيما بعد. كذلك قد يتبين أن هدفًا أُتيح حديثًا هو هدف ذا قيمة عالية للغاية. تسمى هذه المعضلة المعروفة في التعلم المعزز بمقايضة الانتفاع والاستكشاف. هل يجب عليك الانتفاع بالهدف ذي القيمة الأعلى أم استكشاف الخيارات المتاحة لك عن طريق اختيار هدفٍ منخفض القيمة أو هدف جديد للحصول على معلومات؟<sup>3</sup>

كما أوضحنا في الفصل الخامس، تُستخدَم نظرية التعلم المعزز على نطاق واسع لبحث الأساس العصبي لاتخاذ القرارات القائمة على القيمة. والواقع أن سلوك الاختيار لدى الجرد في هذه المهمة يمكن التنبؤ به بدقة من خلال خوارزمية تعلم معزز بسيطة. باستخدام هذه الخوارزمية (تحديدًا نموذج التعلم Q)، قدرنا قيم الأهداف اليسرى واليمنى في كل محاولة لتتراوح بين صفر وواحد (الاحتمالات المقدره لتقديم الماء).<sup>4</sup> وزرعنا أقطابًا كهربائية دقيقة في شبكة CAI وسجلنا أنشطة إطلاق جهد الفعل لخلايا عصبية فردية أثناء قيام الجرد بالمهمة (نحو ١٥٠ محاولة). المدهش أننا وجدنا نسبة كبيرة من خلايا CAI العصبية ارتبط نشاطها ارتباطًا وثيقًا بقيمة الهدف الأيسر أو الأيمن.<sup>5</sup> بعبارة أخرى، نقل العديد من خلايا CAI العصبية معلومات حول قيمة الهدف الأيسر أو الأيمن. يوضح شكل (٢م-٢) مثالاً لخلية CAI نقلت معلومات حول قيمة الهدف الأيسر. جرى تحويل المتاهة المعدلة على شكل حرف T إلى رسم بياني خطي بغرض التبسيط. يناظر الطرف الأيسر من الرسم البياني الحاجز المركزي بينما يناظر الطرف الأيمن الممرات الجانبية (دُمجت الممرات اليمنى واليسرى في الرسم البياني). يوضح الرسم

## الدماغ المُبتَكِر



شكل م ٢-٢: خلية عصبية مشفرة للقيمة في شبكة CA1. جرى تحويل المتاهة على شكل حرف T المُعدّلة الموضحة في شكل (م ٢-١) إلى رسم بياني خطي. (الجزء العلوي) نشاط إطلاق جهد الفعل أو النبضات من محاولة تلو الأخرى. يمثل كل خط محاولة واحدة، وتمثل كل نقطة نبضة عصبية. قُسمت المحاولات إلى أربع مجموعات بناءً على قيمة الهدف الأيسر المُقدرة باستخدام نموذج التعلم Q. (الجزء الأوسط) وقت إشغال الجرذ للموقع. مكث الجرذ في مواقع الهدف لفترة أطول من المواقع الأخرى. (الجزء السفلي) معدل الإطلاق المكاني للنبضات (نبضات/إشغال) في المتاهة الخطية (يُشير التظليل الداكن إلى معدلات إطلاق مكاني مرتفعة). جرى تجميع المحاولات في أربع مجموعات كما في الرسم البياني العلوي. الشكل مقتبس من مقال لهيونجونج لي وآخرين بعنوان «الارتباطات العصبية الحُصينية لقيم الأحداث المُختبرة»، دورية «نيوروساينس» مجلد ٣٢، عدد ٤٣ (أكتوبر ٢٠١٢): (CC) 15060 .BY-NC-SA

## الملحق الثاني

البياني العلوي النبضات الفردية (النقاط) لهذه الخلية العصبية. كما ترى، انطلقت معظم النبضات عندما كان الفأر في الجزء السفلي من الحاجز المركزي (الطرف الأيسر من الرسم البياني الخطي). وعلى ذلك تكون هذه الخلية خلية مكانية حُصينية نموذجية. ولكن إذا قسّمنا جميع المحاولات (التي بلغت نحو ١٥٠ إجمالاً) إلى أربع مجموعات وفقاً للقيمة المقدرة للهدف الأيسر (٠,٢٥~٠,٥, ٠,٥~٠,٥, ٠,٧٥~٠,٥, و٠,٧٥~١), يتضح أن خلية المكان هذه تصدر المزيد من النبضات مع زيادة قيمة الهدف الأيسر.

يوضح الرسم البياني السُّفلي معدل إطلاق النبضات (عدد النبضات مقسوماً على وقت الإِشغال) لهذه الخلية العصبية في المتاهة الخطية. المعدل الأعلى لإطلاق النبضات لهذه الخلية العصبية في الجزء السفلي من الممر المركزي، ويزداد مع زيادة قيمة الهدف الأيسر (يُشار إلى معدل إطلاق النبضات العالي بالتظليل الداكن). وهكذا، تكون هذه الخلية العصبية CA1 قد نقلت كلاً من المعلومات المكانية والقيمة. إذن فهي خلية مكان وكذا خلية عصبية مشفرة للقيمة. وكما هو موضح في هذا المثال، تعتبر الخلية العصبية التي يرتبط نشاطها بشكل كبير بالقيمة (وفقاً لمعيار إحصائي قياسي بالطبع) – وبالتالي تنقل معلومات القيمة – خلية عصبية مُشفرة للقيمة.



# ملاحظات

## المقدمة

(1) Smithsonian, "Numbers of Insects (Species and Individuals)," Buginfo, Information Sheet Number 18, 1996, <https://www.si.edu/spotlight/buginfo/bugnos>; Entomological Society of America, "Frequently Asked Questions on Entomology," updated July 26, 2010, <https://www.entsoc.org/resources/faq/>; Royal Entomological Society, "Facts and Figures," Understanding Insects, n.d., <https://www.royensoc.co.uk/facts-and-figures>.

(2) Nigel E. Stork, "How Many Species of Insects and Other Terrestrial Arthropods Are There on Earth?," *Annual Review of Entomology* 63 (January 2018): 32, 37.

## الفصل الأول: الحُصين

(1) Darryl Bruce, "Fifty Years Since Lashley's 'In Search of the Engram': Refutations and Conjectures," *Journal of the History of the Neurosciences* 10, no. 3 (2001): 315.

(2) Larry R. Squire and Pablo Alvarez, "Retrograde Amnesia and Memory Consolidation: A Neurobiological Perspective," *Current Opinions in Neurobiology* 5, no. 2 (April 1995): 172.

(3) James L. McClelland, Bruce L. McNaughton, and Randall C. O'Reilly, "Why There Are Complementary Learning Systems in the Hippocampus and Neocortex: Insights from the Successes and Failures of Connectionist Models of Learning and Memory," *Psychology Review* 102, no. 3 (July 1995): 424–25, 440, 447, 453.

(4) Lynn Nadel et al., "Multiple Trace Theory of Human Memory: Computational, Neuroimaging, and Neuropsychological Results," *Hippocampus* 10, no. 4 (2000): 358–65.

(5) According to this theory, seemingly preserved remote episodic memories in people with hippocampal injury may, in fact, be semantic memories.

(6) William B. Scoville and Brenda Milner, "Loss of Recent Memory After Bilateral Hippocampal Lesions," *Journal of Neurology and Neurosurgical Psychiatry* 20, no. 1 (February 1957): 16–67; Suzanne Corkin, "What's New with the Amnesic Patient H. M.?" *Nature Reviews Neuroscience* 3, no. 2 (February 2002): 15; Larry R. Squire, "The Legacy of Patient H. M. for Neuroscience," *Neuron* 61, no. 1 (January 2019): 6.

(7) Demis Hassabis et al., "Patients with Hippocampal Amnesia Cannot Imagine New Experiences," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States* 104, no. 5 (January 2007): 1726–31.

(8) Donna R. Addis, Alana T. Wong, and Daniel L. Schacter, "Remembering the Past and Imagining the Future: Common and Distinct Neural Substrates During Event Construction and Elaboration," *Neuropsychologia* 45, no. 7 (April 2007): 1363–77; Karl K. Szpunar, Jason M. Watson, and Kathleen B. McDermott, "Neural Substrates of Envisioning the Future," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States* 104, no. 2 (January 2007): 642–7.

(9) Randy L. Buckner, Jessica R. Andrews-Hanna, and Daniel L. Schacter, "The Brain's Default Network: Anatomy, Function, and Relevance to

Disease,” *Annals of the New York Academy of Science* 1124 (March 2008): 2–3.

(10) Marcus E. Raichle et al., “A Default Mode of Brain Function,” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States* 98, no. 2 (January 2001): 676, 682.

(11) Buckner, Andrews-Hanna, and Schacter, “The Brain’s Default Network,” 20–24; Reece P. Roberts and Donna R. Addis, “A Common Mode of Processing Governing Divergent Thinking and Future Imagination,” in *The Cambridge Handbook of the Neuroscience of Creativity*, ed. Rex E. Jung and Oshin Vartanian (Cambridge: Cambridge University Press, 2018), 213–15.

(12) News Staff, “Breakthrough of the Year: The Runners-Up,” *Science* 318, no. 5858 (December 2007): 1848–49a.

### الفصل الثاني: الذاكرة الزائفة

(1) Henry L. Roediger and Kathleen B. McDermott, “Creating False Memories: Remembering Words Not Presented in Lists,” *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 21, no. 4 (1995): 803–14.

(2) Michael Craig, “Memory and Forgetting,” in *Encyclopedia of Behavioral Neuroscience*, ed. Sergio Della Sala et al. (Amsterdam: Elsevier, 2021), 425–31.

(3) Sanjida O’Connell, “The Perils of Relying on Memory in Court.” *Telegraph*, December 15, 2008, <https://www.telegraph.co.uk/technology/3778272/The-perils-of-relying-on-memory-in-court.html>.

(4) Elizabeth F. Loftus and Katherine Ketcham, “Truth or Invention: Exploring the Repressed Memory Syndrome; Excerpt from ‘The Myth of Repressed Memory,’” *Cosmopolitan*, April 1995, <https://staff.washington.edu/eloftus/Articles/Cosmo.html>; Lauren Slater, *Opening*

*Skinner's Box: Great Psychological Experiments of the Twentieth Century* (New York: Norton, 2005), 181–203; Buckner F. Melton, Jr., "George Franklin Trial: 1990–91," Encyclopedia.com, accessed June 28, 2022, <https://www.encyclopedia.com/law/law-magazines/george-franklin-trial-1990-91>; Stephanie Denzel, "George Franklin," The National Registry of Exonerations, updated May 2, 2022 <https://www.law.umich.edu/special/exoneration/Pages/casedetail.aspx?caseid=3221>.

(5) "Rodney Halbower," Wikipedia, updated April 27, 2022, [https://en.wikipedia.org/wiki/Rodney\\_Halbower](https://en.wikipedia.org/wiki/Rodney_Halbower).

(6) Lawrence Wright, "Remembering Satan—Part II. What Was Going On in Thurston County?," *New Yorker*, May 16, 1993, <https://www.newyorker.com/magazine/1993/05/24/remembering-satan-part-ii>; Mark L. Howe and Lauren M. Knott, "The Fallibility of Memory in Judicial Processes: Lessons from the Past and Their Modern Consequences," *Memory* 23, no. 5 (2015): 636–47; "Thurston County Ritual Abuse Case," Wikipedia, updated December 9, 2021, [https://en.wikipedia.org/wiki/Thurston\\_County\\_ritual\\_abuse\\_case](https://en.wikipedia.org/wiki/Thurston_County_ritual_abuse_case).

(7) Richard J. Ofshe, "Inadvertent Hypnosis During Interrogation: False Confession Due to Dissociative State; Mis-identified Multiple Personality and the Satanic Cult Hypothesis," *International Journal of Clinical and Experimental Hypnosis* 40, no. 3 (1992): 152.

(8) Wright, "Remembering Satan"; Ofshe, "Inadvertent Hypnosis During Interrogation," 125–56.

(9) Karen A. Olio and William F. Cornell, "The Facade of Scientific Documentation: A Case Study of Richard Ofshe's Analysis of the Paul Ingram case," *Psychology, Public Policy, and Law* 4, no. 4 (1998): 1194–95.

(10) Elizabeth F. Loftus, "Planting Misinformation in the Human Mind: A 30-Year Investigation of the Malleability of Memory," *Learning & Memory* 12, no. 4 (2005): 361–66.

(11) Elizabeth F. Loftus and Jacqueline E. Pickrell, "The Formation of False Memories," *Psychiatric Annals* 25, no. 12 (December 1995): 720–25.

(12) Kimberley A. Wade et al., "A Picture Is Worth a Thousand Lies: Using False Photographs to Create False Childhood Memories," *Psychonomic Bulletin & Review* 9, no. 3 (September 2002): 597–603.

(13) Daniel L. Schacter, "Constructive Memory: Past and Future," *Dialogues in Clinical Neuroscience* 14, no. 1 (March 2012): 8.

(14) Schacter, "Constructive Memory," 11.

### الفصل الثالث: خلايا المكان وإعادة العرض في الحصين

(1) T. V. Bliss and A. R. Gardner-Medwin, "Long-Lasting Potentiation of Synaptic Transmission in the Dentate Area of the Unanaesthetized Rabbit Following Stimulation of the Perforant Path," *Journal of Physiology* 232, no. 2 (July 1973): 357–74; T. V. Bliss and T. Lomo, "Long-Lasting Potentiation of Synaptic Transmission in the Dentate Area of the Anaesthetized Rabbit Following Stimulation of the Perforant Path," *Journal of Physiology* 232, no. 2 (July 1973): 331–56.

(2) Steve Ramirez et al., "Creating a False Memory in the Hippocampus," *Science* 341, no. 6144 (July 2013): 387–91.

(3) John O'Keefe and Jonathan Dostrovsky, "The Hippocampus as a Spatial Map: Preliminary Evidence from Unit Activity in the Freely-Moving Rat," *Brain Research* 34, no. 1 (November 1971): 171–75.

(4) John O'Keefe and Lynn Nadel, *The Hippocampus as a Cognitive Map* (Oxford: Clarendon, 1978), 217–30.

(5) Arne D. Ekstrom et al., "Cellular Networks Underlying Human Spatial Navigation," *Nature* 425, no. 6954 (September 2003): 184–88.

(6) Nobelförsamlingen, "Press release. The 2014 Nobel Prize in Physiology or Medicine. 2014," October 6, 2014, <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/2014/press-release/>.

(7) For example, William B. Levy, “A Sequence Predicting CA3 Is a Flexible Associator That Learns and Uses Context to Solve Hippocampal-Like Tasks,” *Hippocampus* 6, no. 6 (1996): 579–90.

(8) Gyorgy Buzsaki, “Hippocampal Sharp Wave-Ripple: A Cognitive Biomarker for Episodic Memory and Planning,” *Hippocampus* 25, no. 10 (October 2015): 1073.

(9) Larry R. Squire and Pablo Alvarez, “Retrograde Amnesia and Memory Consolidation: A Neurobiological Perspective,” *Current Opinions in Neurobiology* 5, no. 2 (April 1995): 171–72.

(10) Kenway Louie and Matthew A. Wilson, “Temporally Structured Replay of Awake Hippocampal Ensemble Activity During Rapid Eye Movement Sleep,” *Neuron* 29, no. 1 (January 2001): 145–56.

(11) Albert K. Lee and Matthew A. Wilson, “Memory of Sequential Experience in the Hippocampus During Slow Wave Sleep,” *Neuron* 36, no. 6 (December 2002): 1183–94.

(12) An earlier study by Skaggs and McNaughton also showed that the temporal order of activity between two place cells during sleep reflects that during spatial exploration before sleep. William E. Skaggs and Bruce L. McNaughton, “Replay of Neuronal Firing Sequences in Rat Hippocampus During Sleep Following Spatial Experience,” *Science* 271, no. 5257 (March 1996): 1870–73.

(13) David J. Foster and Matthew A. Wilson, “Reverse Replay of Behavioural Sequences in Hippocampal Place Cells During the Awake State,” *Nature* 440, no. 7084 (March 2006): 680–83; Kamran Diba and Gyorgy Buzsaki, “Forward and Reverse Hippocampal Place-Cell Sequences During Ripples,” *Nature Neuroscience* 10, no. 10 (October 2007): 1241–42.

(14) Yvonne Y. Chen et al., “Stability of Ripple Events During Task Engagement in Human Hippocampus,” *Cell Reports* 35, no. 13 (2021): 109304;

Anli A. Liu et al., "A Consensus Statement on Detection of Hippocampal Sharp Wave Ripples and Differentiation from Other Fast Oscillations," *Nature Communications* 13 (2022): 6000.

(15) Anoopum S. Gupta et al., "Hippocampal Replay Is Not a Simple Function of Experience," *Neuron* 65, no. 5 (March 2010): 695–705.

(16) Zeb Kurth-Nelson et al., "Fast Sequences of Non-Spatial State Representations in Humans," *Neuron* 91, no. 1 (July 2016): 194–204; Yunzhe Liu et al., "Human Replay Spontaneously Reorganizes Experience," *Cell* 178, no. 3 (July 2019): 640–52.e14.

(17) Daoyun Ji and Matthew A. Wilson, "Coordinated Memory Replay in the Visual Cortex and Hippocampus During Sleep," *Nature Neuroscience* 10, no. 1 (January 2007): 100–7.

(18) Nicolas W. Schuck and Yael Niv, "Sequential Replay of Nonspatial Task States in the Human Hippocampus," *Science* 364, no. 6447 (June 2019).

(19) Cameron Higgins et al., "Replay Bursts in Humans Coincide with Activation of the Default Mode and Parietal Alpha Networks," *Neuron* 109, no. 5 (March 2021): 882–93.e7.

(20) Nikos K. Logothetis et al., "Hippocampal-Cortical Interaction During Periods of Subcortical Silence," *Nature* 491, no. 7425 (November 2012): 547–53.

## الفصل الرابع: الدوائر العصبية في الحصين

(1) Nikolaos Tzakis and Matthew R. Holahan, "Social Memory and the Role of the Hippocampal CA2 Region," *Frontiers in Behavioral Neuroscience* 13 (2019): 233; Andrew B. Lehr et al., "CA2 Beyond Social Memory: Evidence for a Fundamental Role in Hippocampal Information Processing," *Neuroscience & Biobehavioral Reviews* 126 (July 2021): 407–8.

(2) There are excitatory (or principal) neurons as well as inhibitory neurons (or local interneurons) in the brain. There are also excitatory and inhibitory connections between neurons. Here we consider only excitatory neurons and excitatory connections for the sake of simplicity. See David G. Amaral, Norio Ishizuka, and Brenda Claiborne, “Neurons, Numbers and the Hippocampal Network,” *Progress in Brain Research* 83 (1990): 7–9.

(3) David Marr, “Simple Memory: A Theory for Archicortex,” *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 262, no. 841 (July 1971): 23–81.

(4) Donald O. Hebb, *The Organization of Behavior: A Psychological Theory* (New York: Wiley, 1949), 60–66.

(5) Gyorgy Buzsaki, “Hippocampal Sharp Wave–Ripple: A Cognitive Biomarker for Episodic Memory and Planning,” *Hippocampus* 25, no. 10 (October 2015): 1075–76.

(6) CA1 is not completely without recurrent projections, but they are much weaker and directed differently compared to those of CA3. CA1 neurons project along the longitudinal axis (perpendicular to the cross-sectional plane) to connect with CA1 neurons in other cross-sections. Sunggu Yang et al., “Interlamellar CA1 Network in the Hippocampus,” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States* 111, no. 35 (September 2014): 12919–24.

## الفصل الخامس: اتخاذ القرار على أساس القيمة

(1) Wolfram Schultz, Peter Dayan, and P. Read Montague, “A Neural Substrate of Prediction and Reward,” *Science* 275, no. 5306 (March 1997): 1593–99.

(2) Schultz, Dayan, and Montague, “A Neural Substrate of Prediction and Reward,” 1593–99.

(3) Wolfram Schultz et al., “Reward-Related Activity in the Monkey Striatum and Substantia Nigra,” *Progress in Brain Research* 99 (1993): 227–35.

(4) Daeyeol Lee, Hyojung Seo, and Min W. Jung, “Neural Basis of Reinforcement Learning and Decision Making,” *Annual Review of Neuroscience* 35 (2012): 291–93; Camillo Padoa-Schioppa and Katherine E. Conen, “Orbitofrontal Cortex: A Neural Circuit for Economic Decisions,” *Neuron* 96, no. 4 (November 2017): 739–42, 745–47.

(5) Hyunjung Lee et al., “Hippocampal Neural Correlates for Values of Experienced Events,” *Journal of Neuroscience* 32, no. 43 (October 2012): 15053–65; Sung-Hyun Lee et al., “Neural Signals Related to Outcome Evaluation Are Stronger in CA1 than CA3,” *Frontiers in Neural Circuits* 11 (2017): 40; Eric B. Knudsen and Joni D. Wallis, “Hippocampal Neurons Construct a Map of an Abstract Value Space,” *Cell* 184, no. 18 (September 2021): 4640–50 e10; Saori C. Tanaka et al., “Prediction of Immediate and Future Rewards Differentially Recruits Cortico-Basal Ganglia Loops,” *Nature Neuroscience* 7, no. 8 (August 2004): 887–93; Katherine Duncan et al., “More Than the Sum of Its Parts: A Role for the Hippocampus in Configural Reinforcement Learning,” *Neuron* 98, no. 3 (May 2018): 645–57.

(6) Lee, Seo, and Jung, “Neural Basis of Reinforcement Learning and Decision Making,” 291–93; Eun J. Shin et al., “Robust and Distributed Neural Representation of Action Values,” *eLife* 10 (April 2021): e53045.

(7) Lee, Seo, and Jung, “Neural Basis of Reinforcement Learning and Decision Making,” 291–93.

(8) The suprachiasmatic nucleus of the hypothalamus controls our physiology and behavior in accordance with the twenty-four-hour cycle. It is considered the master clock for the entire body.

(9) Lee et al., “Hippocampal Neural Correlates for Values of Experienced Events,” 15053–65.

(10) Lee et al., “Neural Signals Related to Outcome Evaluation Are Stronger in CA1 than CA3,” 40.

(11) Robert J. McDonald and Norman M. White, “A Triple Dissociation of Memory Systems: Hippocampus, Amygdala, and Dorsal Striatum,” *Behavioral Neuroscience* 107, no. 1 (February 1993): 15–18; Mark G. Packard and Barbara J. Knowlton, “Learning and Memory Functions of the Basal Ganglia,” *Annual Review of Neuroscience* 25 (2002): 579–83.

(12) Yeongseok Jeong et al., “Role of the Hippocampal CA1 Region in Incremental Value Learning,” *Scientific Reports* 8, no. 1 (June 2018): 9870.

(13) This is a technique commonly used in neuroscience to activate or silence specific types of cells in the brain. Synthetic proteins are expressed in target cells in a target brain area. The activation of the synthetic proteins by a compound (usually given to an animal by systemic injection) activates or turns off synthetic protein-expressing cells selectively.

## الفصل السادس: تذكُّر مكافآت المستقبل المُجزية

(1) Min W. Jung et al., “Remembering Rewarding Futures: A Simulation–Selection Model of the Hippocampus,” *Hippocampus* 28, no. 12 (December 2018): 913–30.

(2) Sunggu Yang et al., “Interlamellar CA1 Network in the Hippocampus,” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States* 111, no. 35 (September 2014): 12919–24.

(3) Gyorgy Buzsaki, “Hippocampal Sharp Wave–Ripple: A Cognitive Biomarker for Episodic Memory and Planning,” *Hippocampus* 25, no. 10 (October 2015): 1075–76.

(4) Federico Stella et al., “Hippocampal Reactivation of Random Trajectories Resembling Brownian Diffusion,” *Neuron* 102, no. 2 (April 2019): 450–61.

(5) Matthijs van der Meer, Zeb Kurth-Nelson, and A. David Redish, "Information Processing in Decision-Making Systems," *Neuroscientist* 18, no. 4 (August 2012): 352–54; Giovanni Pezzulo et al., "Internally Generated Sequences in Learning and Executing Goal-Directed Behavior," *Trends in Cognitive Sciences* 18, no. 12 (December 2014): 652–54; Andrew M. Wikenheiser and Geoffrey Schoenbaum, "Over the River, through the Woods: Cognitive Maps in the Hippocampus and Orbitofrontal Cortex," *Nature Reviews Neuroscience* 17, no. 8 (August 2016): 521.

(6) Testing replays of spatial trajectories requires simultaneous recording of a sufficiently large number of place cells (on the order of ten). However, monitoring single place cell activity is sufficient to test reactivation during sharp-wave ripples (i.e., the degree to which a particular place cell is active together with sharp-wave ripples).

(7) Annabelle C. Singer and Loren M. Frank, "Rewarded Outcomes Enhance Reactivation of Experience in the Hippocampus," *Neuron* 64, no. 6 (December 2009): 910–21; David Dupret et al., "The Reorganization and Reactivation of Hippocampal Maps Predict Spatial Memory Performance," *Nature Neuroscience* 13, no. 8 (August 2010): 995–1002.

(8) Brad E. Pfeiffer, and David J. Foster, "Hippocampal Place-Cell Sequences Depict Future Paths to Remembered Goals." *Nature* 497, no. 7447 (May 2013): 74–79; H. Freyja Olafsdottir et al., "Hippocampal Place Cells Construct Reward Related Sequences through Unexplored Space," *eLife* 4 (June 2015): e06063; R. Ellen Ambrose, Brad E. Pfeiffer, and David J. Foster, "Reverse Replay of Hippocampal Place Cells Is Uniquely Modulated by Changing Reward," *Neuron* 91, no. 5 (September 2016): 1124–36; Baburam Bhattarai, Jong W. Lee, and Min W. Jung, "Distinct Effects of Reward and Navigation History on Hippocampal Forward and Reverse Replays," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States* 117, no. 1 (January 2020): 689–97.

(9) Lisa Bulganin and Bianca C. Wittmann, “Reward and Novelty Enhance Imagination of Future Events in a Motivational–Episodic Network,” *PLoS One* 10, no. 11 (2015): e0143477; Matthias J. Gruber et al., “Post-learning Hippocampal Dynamics Promote Preferential Retention of Rewarding Events,” *Neuron* 89, no. 5 (March 2016): 1110–20.

(10) Jung et al., “Remembering Rewarding Futures,” 913–30.

(11) Bruce L. McNaughton, “Neuronal Mechanisms for Spatial Computation and Information Storage,” in *Neural Connections, Mental Computations*, ed. Lynn Nadel et al. (Cambridge, MA: MIT Press, 1989), 305; Edmund T. Rolls, “Functions of Neuronal Networks in the Hippocampus and Cerebral Cortex in Memory,” in *Models of Brain Function*, ed. Rodney M. J. Cotterill (Cambridge: Cambridge University Press, 1989), 18–21; James J. Knierim, and Joshua Neunuebel, “Tracking the Flow of Hippocampal Computation: Pattern Separation, Pattern Completion, and Attractor Dynamics,” *Neurobiology of Learning and Memory* 129 (March 2016): 39–46.

(12) Jong W. Lee and Min W. Jung, “Separation or Binding? Role of the Dentate Gyrus in Hippocampal Mnemonic Processing,” *Neuroscience & Biobehavioral Reviews* 75 (April 2017): 183–91.

(13) Richard S. Sutton, “Dyna, an Integrated Architecture for Learning, Planning, and Reacting,” *ACM Sigart Bulletin* 2, no. 4 (1991): 160–63377; Richard S. Sutton and Andrew G. Barto, *Reinforcement Learning: An Introduction* (Cambridge, MA: MIT Press, 1998), 230–35.

## الفصل السابع: تطور الخيال

(1) Joseph R. Manns and Howard Eichenbaum, “Evolution of Declarative Memory,” *Hippocampus* 16, no. 9 (2006): 796–98.

(2) Verner P. Bingman, Cosme Salas, and Fernando Rodríguez, “Evolution of the Hippocampus,” in *Encyclopedia of Neuroscience*, ed. Marc D.

Binder, Nobutaka Hirokawa and Uwe Windhorst (Berlin: Springer, 2009), 1356–60; Christina Herold, Vincent J. Coppola, and Verner P. Bingman, “The Maturation of Research into the Avian Hippocampal Formation: Recent Discoveries from One of the Nature’s Foremost Navigators,” *Hippocampus* 25, no. 11 (November 2015): 1194–200; Georg F. Striedter, “Evolution of the Hippocampus in Reptiles and Birds,” *Journal of Comparative Neurology* 524, no. 3 (February 15 2016): 497–507.

(3) Sara J. Shettleworth, “Spatial Memory in Food-Storing Birds,” *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 329, no. 1253 (1990): 143–51.

(4) Jennifer J. Siegel, Douglas Nitz, and Verner P. Bingman, “Lateralized Functional Components of Spatial Cognition in the Avian Hippocampal Formation: Evidence from Single-Unit Recordings in Freely Moving Homing Pigeons,” *Hippocampus* 16, no. 2 (2006): 125–40; Jennifer J. Siegel, Douglas Nitz, and Verner P. Bingman, “Spatial-Specificity of Single-Units in the Hippocampal Formation of Freely Moving Homing Pigeons,” *Hippocampus* 15, no. 1 (2005): 26–40.

(5) Randy L. Buckner, Jessica R. Andrews-Hanna, and Daniel L. Schacter, “The Brain’s Default Network: Anatomy, Function, and Relevance to Disease,” *Annals of the New York Academy of Sciences* 1124 (March 2008): 20–24, 30.

(6) Nina Patzke et al., “In Contrast to Many Other Mammals, Cetaceans Have Relatively Small Hippocampi That Appear to Lack Adult Neurogenesis,” *Brain Structure and Function* 220, no. 1 (January 2015): 361–83.

(7) Maya Geva-Sagiv et al., “Spatial Cognition in Bats and Rats: From Sensory Acquisition to Multiscale Maps and Navigation,” *Nature Reviews Neuroscience* 16, no. 2 (February 2015): 96, 101–2.

(8) T. A. Stevens and J. R. Krebs, “Retrieval of Stored Seeds by Marsh Tits *Parus Palustris* in the Field,” *Ibis* 128, no. 4 (1986): 513–25.

(9) Hannah L. Payne, Galen F. Lynch, and Dmitriy Aronov, “Neural Representations of Space in the Hippocampus of a Food-Caching Bird,” *Science* 373, no. 6552 (July 2021): 343–48.

(10) Elhanan Ben-Yishay et al., “Directional Tuning in the Hippocampal Formation of Birds,” *Current Biology* 31, no. 12 (June 2021): 2592–602.e4.

### الفصل الثامن: التفكير المجرد والقشرة المخية الحديثة

(1) Howard Eichenbaum et al., “The Hippocampus, Memory, and Place Cells: Is It Spatial Memory or a Memory Space?” *Neuron* 23, no. 2 (June 1999): 213–15.

(2) Charles R. Gallistel, *The Organization of Learning* (Cambridge, MA: MIT Press, 1990), 338–40; Sara J. Shettleworth, *Cognition, Evolution, and Behavior*, 2nd ed. (Oxford: Oxford University Press, 2010), 190–208, 421–55; Christopher Krupenye and Josep Call, “Theory of Mind in Animals: Current and Future Directions,” *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science* 10, no. 6 (November 2019): e1503; Caio A. Lage, De Wet Wolmarans, and Daniel C. Mograbi, “An Evolutionary View of Self-Awareness,” *Behavioural Processes* 194 (January 2022): 104543.

(3) Carol A. Seger and Earl K. Miller, “Category Learning in the Brain,” *Annual Review of Neuroscience* 33 (2010): 205–9; Raymond P. Kesner and John C. Churchwell, “An Analysis of Rat Prefrontal Cortex in Mediating Executive Function,” *Neurobiology of Learning and Memory* 96, no. 3 (October 2011): 422–23; Sébastien Tremblay, K. M. Sharika, and Michael L. Platt, “Social Decision-Making and the Brain: A Comparative Perspective,” *Trends in Cognitive Sciences* 21, no. 4 (April 2017): 269–70; Farshad A. Mansouri, David J. Freedman, and Mark J. Buckley, “Emergence of Abstract Rules in the Primate Brain,” *Nature Reviews Neuroscience* 21, no. 11 (November

2020): 597–602; Prabaha Gangopadhyay et al., “Prefrontal–Amygdala Circuits in Social Decision–Making,” *Nature Neuroscience* 24, no. 1 (January 2023): 5–13.

(4) Immanuel Kant, *Critique of Pure Reason*, ed. Paul Guyer and Allen W. Wood (Cambridge: Cambridge University Press, 1999), 110, 127–29, 136–38.

(5) Kant, *Critique of Pure Reason*, 157–59, 178–80.

(6) Torkel Hafting et al., “Microstructure of a Spatial Map in the Entorhinal Cortex,” *Nature* 436, no. 7052 (August 2005): 801–6.

(7) Eric L. Hargreaves et al., “Major Dissociation between Medial and Lateral Entorhinal Input to Dorsal Hippocampus,” *Science* 308, no. 5729 (June 2005): 1792–94.

(8) Alexandra O. Constantinescu, Jill X. O’Reilly, and Timothy E. J. Behrens, “Organizing Conceptual Knowledge in Humans with a Gridlike Code,” *Science* 352, no. 6292 (June 2016): 1464–68; Seongmin A. Park, Douglas S. Miller, and Erie D. Boorman, “Inferences on a Multidimensional Social Hierarchy Use a Grid–Like Code,” *Nature Neuroscience* 24, no. 9 (September 2021): 1292–301.

(9) Timothy E. J. Behrens et al., “What Is a Cognitive Map? Organizing Knowledge for Flexible Behavior,” *Neuron* 100, no. 2 (October 2018): 502–4.

(10) Kant, *Critique of Pure Reason*, 127–29, 136–38.

(11) Gilbert Ryle, *The Concept of Mind* (New York: Barnes and Noble, 1949), 16.

(12) “Gilbert Ryle,” Wikipedia, updated October 28, 2021, [https://en.wikipedia.org/wiki/Gilbert\\_Ryle](https://en.wikipedia.org/wiki/Gilbert_Ryle).

(13) Note that the cerebellum is also involved in a wide range of cognitive tasks. Richard B. Ivry and Juliana V. Baldo, “Is the Cerebellum Involved in Learning and Cognition?” *Current Opinion in Neurobiology*

2, no. 2 (1992): 214; Maedbh King et al., “Functional Boundaries in the Human Cerebellum Revealed by a Multi-Domain Task Battery,” *Nature Neuroscience* 22, no. 8 (2019): 1371–78.

(14) Suzana Herculano-Houzel et al., “The Elephant Brain in Numbers,” *Frontiers in Neuroanatomy* 8 (2014): 46.

(15) David C. Van Essen, Chad J. Donahue, and Matthew F. Glasser, “Development and Evolution of Cerebral and Cerebellar Cortex,” *Brain, Behavior and Evolution* 91, no. 3 (2018): 159; Suzana Herculano-Houzel, “The Human Brain in Numbers: A Linearly Scaled-Up Primate Brain,” *Frontiers in Human Neuroscience* 3 (2009): 31.

(16) Herculano-Houzel, “The Human Brain in Numbers,” 31.

(17) Cornelia McCormick et al., “Mind-Wandering in People with Hippocampal Damage,” *Journal of Neuroscience* 38, no. 11 (March 2018): 2745–54.

(18) Jon H. Kaas, “The Origin and Evolution of Neocortex: From Early Mammals to Modern Humans,” *Progress in Brain Research* 250 (2019): 72–73.

(19) Ferris Jabr, “How Humans Evolved Supersize Brains,” *Quanta Magazine*, November 10, 2014, <https://www.quantamagazine.org/how-humans-evolved-supersize-brains-20151110/>.

(20) Kaas, “The Origin and Evolution of Neocortex,” 64.

(21) Bradley L. Schlaggar and Dennis D. O’Leary, “Potential of Visual Cortex to Develop an Array of Functional Units Unique to Somatosensory Cortex,” *Science* 252, no. 5012 (June 1991): 1556–60.

(22) Leslie C. Aiello and Peter Wheeler, “The Expensive-Tissue Hypothesis: The Brain and the Digestive System in Human and Primate Evolution,” *Current Anthropology* 36, no. 2 (1995): 201–8.

(23) Rachel N. Carmody and Richard W Wrangham, “The Energetic Significance of Cooking,” *Journal of Human Evolution* 57, no. 4 (October

2009): 380–86; Karina Fonseca–Azevedo and Suzana Herculano–Houzel, “Metabolic Constraint Imposes Tradeoff between Body Size and Number of Brain Neurons in Human Evolution,” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States* 109, no. 45 (November 2012): 18571–6.

(24) Alianda M. Cornelio et al., “Human Brain Expansion During Evolution Is Independent of Fire Control and Cooking,” *Frontiers in Neuroscience* 10 (2016): 167.

(25) Yuval Noah Harari, *Sapiens: A Brief History of Humankind*, trans. Hyun–Wook Cho (Paju, South Korea: Gimm–Young, 2015), 50–60.

### الفصل التاسع: القشرة الجبهية الأمامية

(1) Chad J. Donahue et al., “Quantitative Assessment of Prefrontal Cortex in Humans Relative to Nonhuman Primates,” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States* 115, no. 22 (May 2018): E5183–E92.

(2) John M. Harlow, “Recovery from the Passage of an Iron Bar through the Head,” *Publication of the Massachusetts Medical Society* 2, no. 3 (1868): 329–47.

(3) Tim Shallice and Lisa Cipolotti, “The Prefrontal Cortex and Neurological Impairments of Active Thought,” *Annual Review of Psychology* 69 (January 2018): 169.

(4) Patrick Murphy et al., “Impairments in Proverb Interpretation Following Focal Frontal Lobe Lesions,” *Neuropsychologia* 51, no. 11 (September 2013): 2075–86.

(5) Andreas Nieder, “Supramodal Numerosity Selectivity of Neurons in Primate Prefrontal and Posterior Parietal Cortices,” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States* 109, no. 29 (July 2012): 11860–5.

(6) Andreas Nieder, “The Neuronal Code for Number,” *Nature Reviews Neuroscience* 17, no. 6 (2016): 367–69.

(7) Numerous studies, such as the following, have found neural activity related to abstract concepts in the rodent prefrontal cortex: Erin L. Rich and Matthew Shapiro, “Rat Prefrontal Cortical Neurons Selectively Code Strategy Switches,” *Journal of Neuroscience* 29, no. 22 (June 2009): 7208–19; Gregory B. Bissonette and Matthew R. Roesch, “Neural Correlates of Rules and Conflict in Medial Prefrontal Cortex During Decision and Feedback Epochs,” *Frontiers in Behavioral Neuroscience* 9 (2015): 266; James M. Hyman et al., “Contextual Encoding by Ensembles of Medial Prefrontal Cortex Neurons,” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States* 109, no. 13 (March 2012): 5086–91; Sandra Reinert et al., “Mouse Prefrontal Cortex Represents Learned Rules for Categorization,” *Nature* 593, no. 7859 (May 2021): 411–17.

(8) David S. Tait, E. Alexander Chase, and Verity J. Brown, “Attentional Set-Shifting in Rodents: A Review of Behavioural Methods and Pharmacological Results,” *Current Pharmaceutical Design* 20, no. 31 (2014): 5046–59.

(9) Iroise Dumontheil, “Development of Abstract Thinking During Childhood and Adolescence: The Role of Rostrolateral Prefrontal Cortex,” *Developmental Cognitive Neuroscience* 10 (October 2014): 64–69.

(10) Dumontheil, “Development of Abstract Thinking During Childhood and Adolescence,” 59; David Badre, “Cognitive Control, Hierarchy, and the Rostro-Caudal Organization of the Frontal Lobes,” *Trends in Cognitive Science* 12, no. 5 (May 2008): 194–95.

## الفصل العاشر: الثورة البشرية والتغيرات الدماغية المرتبطة بها

(1) Ofer Bar-Yosef, “The Upper Paleolithic Revolution,” *Annual Review of Anthropology* 31, no. 1 (2002): 364–69; Pamela R. Willoughby, “Modern

Human Behavior,” in *Oxford Research Encyclopedia of Anthropology*, published online May 29, 2020, <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190854584.013.46>.

(2) Gillian M. Morriss-Kay, “The Evolution of Human Artistic Creativity,” *Journal of Anatomy* 216, no. 2 (February 2010): 166.

(3) Morriss-Kay, “The Evolution of Human Artistic Creativity,” 171; Dahlia W. Zaidel, “Art and Brain: The Relationship of Biology and Evolution to Art,” *Progress in Brain Research* 204 (2013): 218, 223.

(4) Julien Riel-Salvatore and Claudine Gravel-Miguel, “Upper Palaeolithic Mortuary Practices in Eurasia: A Critical Look at the Burial Record,” in *The Oxford Handbook of the Archaeology of Death and Burial*, ed. Liv N. Stutz and Sarah Tarlow (Oxford: Oxford University Press, 2013), 303, 335–36.

(5) Judith Thurman, “First Impressions: What Does the World’s Oldest Art Say about Us?” *New Yorker*, June 16, 2008.

(6) Takanori Kochiyama et al., “Reconstructing the Neanderthal Brain Using Computational Anatomy,” *Scientific Reports* 8, no. 1 (April 2018): 6296; Axel Timmermann, “Quantifying the Potential Causes of Neanderthal Extinction: Abrupt Climate Change Versus Competition and Interbreeding,” *Quaternary Science Reviews* 238 (2020): 106331.

(7) R. Gabriel Joseph, *Frontal Lobes: Neuroscience, Neuropsychology, Neuropsychiatry* (Cambridge, MA: Cosmology, 2011), 190–99.

(8) Hélène Valladas et al., “Thermoluminescence Dating of Mousterian Troto-Cro-Magnon Remains from Israel and the Origin of Modern Man,” *Nature* 331, no. 6157 (1988): 614–16.

(9) Ian McDougall, Francis H. Brown, and John G. Fleagle, “Stratigraphic Placement and Age of Modern Humans from Kibish, Ethiopia,” *Nature* 433, no. 7027 (2005): 733–36 Jean-Jacques Hublin et al., “New Fossils

from Jebel Irhoud, Morocco and the Pan-African Origin of *Homo sapiens*,” *Nature* 546, no. 7657 (June 2017): 289–92.

(10) Rebecca L. Cann, Mark Stoneking, and Allan C. Wilson, “Mitochondrial DNA and Human Evolution,” *Nature* 325, no. 6099 (1987): 31–36; Douglas C. Wallace, Michael D. Brown, and Marie T. Lott, “Mitochondrial DNA Variation in Human Evolution and Disease,” *Gene* 238, no. 1 (September 1999): 211–30; Renée Hetherington and Robert G. B. Reid, *The Climate Connection: Climate Change and Modern Human Evolution* (Cambridge: Cambridge University Press, 2010), 31–34.

(11) Genetic evidence indicates that *Homo sapiens* interbred with other early humans including Neanderthals rather than completely replacing them. Philipp Gunz et al., “Neandertal Introgression Sheds Light on Modern Human Endocranial Globularity,” *Current Biology* 29, no. 1 (January 2019): 120–27.

(12) Richard G. Klein, “Out of Africa and the Evolution of Human Behavior,” *Evolutionary Anthropology: Issues, News, and Reviews* 17, no. 6 (2008): 271.

(13) Adam Powell, Stephen Shennan, and Mark G. Thomas, “Late Pleistocene Demography and the Appearance of Modern Human Behavior,” *Science* 324, no. 5932 (June 2009): 1298–301.

(14) Stephen Davies, “Behavioral Modernity in Retrospect,” *Topoi* 40, no. 1 (2021): 228–29.

(15) Amélie Beaudet, Andrew Du, and Bernard Wood, “Evolution of the Modern Human Brain,” *Progress in Brain Research* 250 (2019): 229–41.

(16) Simon Neubauer, Jean-Jacques Hublin, and Philipp Gunz, “The Evolution of Modern Human Brain Shape,” *Science Advances* 4, no. 1 (2018): eaao5961.

(17) Neubauer, Hublin, and Gunz, “The Evolution of Modern Human Brain Shape,” eaao5961.

(18) Beaudet, Du, and Wood, "Evolution of the Modern Human Brain," 228–29; Emiliano Bruner et al., "The Brain and the Braincase: A Spatial Analysis on the Midsagittal Profile in Adult Humans," *Journal of Anatomy* 227, no. 3 (September 2015): 275.

(19) Emiliano Bruner et al., "Evidence for Expansion of the Precuneus in Human Evolution," *Brain Structure and Function* 222, no. 2 (March 2017): 1053–60.

(20) Emiliano Bruner and Sofia Pereira-Pedro, "A Metric Survey on the Sagittal and Coronal Morphology of the Precuneus in Adult Humans," *Brain Structure and Function* 225, no. 9 (December 2020): 2747–55; Emiliano Bruner et al., "Cortical Surface Area and Cortical Thickness in the Precuneus of Adult Humans," *Neuroscience* 286 (Feb 12 2015): 345–52.

(21) Emiliano Bruner, "Human Paleoneurology and the Evolution of the Parietal Cortex," *Brain, Behavior and Evolution* 91, no. 3 (2018): 143–44.

(22) Andrea E. Cavanna and Michael R. Trimble, "The Precuneus: A Review of Its Functional Anatomy and Behavioural Correlates," *Brain* 129, part 3 (March 2006): 568–78.

(23) The gray matter is made up of neuronal cell bodies, dendrites, and axons, and it is responsible for processing information. The white matter is made up of nerve fibers that are coated in a fatty substance called myelin, which allows for faster electrical transmission of signals and connects different areas of the brain to each other.

(24) Rebecca Chamberlain et al., "Drawing on the Right Side of the Brain: A Voxel-Based Morphometry Analysis of Observational Drawing," *Neuroimage* 96 (August 2014): 167–73.

(25) Shoji Tanaka and Eiji Kirino, "Reorganization of the Thalamocortical Network in Musicians," *Brain Research* 1664 (June 2017): 48–54.

(26) Qun-Lin Chen et al., "Individual Differences in Verbal Creative Thinking Are Reflected in the Precuneus," *Neuropsychologia* 75 (August 2015): 441–49.

(27) Emanuel Jauk et al., "Gray Matter Correlates of Creative Potential: A Latent Variable Voxel-Based Morphometry Study," *Neuroimage* 111 (May 2015): 312–20.

(28) Debra A. Gusnard and Marcus E. Raichle, "Searching for a Baseline: Functional Imaging and the Resting Human Brain," *Nature Reviews Neuroscience* 2, no. 10 (October 2001): 690.

(29) Amanda V. Utevsky, David V. Smith, and Scott A. Huettel, "Precuneus Is a Functional Core of the Default-Mode Network," *Journal of Neuroscience* 34, no. 3 (January 2014): 932–40.

(30) Reece P. Roberts and Donna Rose Addis, "A Common Mode of Processing Governing Divergent Thinking and Future Imagination," in *The Cambridge Handbook of the Neuroscience of Creativity*, ed. Rex E. Jung and Oshin Vartanian (Cambridge: Cambridge University Press, 2018), 213–15; Roger E. Beaty, "The Creative Brain," *Cerebrum* (January 2020): cer-02–20; Oshin Vartanian, "Neuroscience of Creativity," in *The Cambridge Handbook of Creativity*, ed. James C. Kaufman and Robert J. Sternberg (Cambridge: Cambridge University Press, 2019), 156–59.

(31) Jared Diamond, "The Great Leap Forward," in *Technology and Society: Issue for the 21st Century and Beyond*, 3rd ed., ed. Linda Hjorth, Barbara Eichler, Ahmed Khan and John Morello (Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2008), 15.

## الفصل الحادي عشر: الشبكة العصبية العميقة

(1) Yann LeCun, Yoshua Bengio, and Geoffrey Hinton, "Deep Learning," *Nature* 521, no. 7553 (May 2015): 436; Alexander S. Lundervold and

Arvid Lundervold, “An Overview of Deep Learning in Medical Imaging Focusing on MRI,” *Zeitschrift für Medizinische Physik* 29, no. 2 (May 2019): 102–3; Roger Parloff, “Why Deep Learning is Suddenly Changing Your Life,” *Fortune*, September 29, 2016, <https://fortune.com/longform/ai-artificial-intelligence-deep-machine-learning/>.

(2) Hannes Schulz and Sven Behnke, “Deep Learning: Layer-Wise Learning of Feature Hierarchies,” *Künstliche Intelligenz* 26, no. 4 (2012): 357–63.

(3) Quoc V. Le et al., “Building High-Level Features Using Large Scale Unsupervised Learning” (paper presented at the Proceedings of the 29th International Conference on Machine Learning, 2012), <https://doi.org/10.48550/arXiv.1112.6209>.

(4) Gwangsu Kim et al., “Visual Number Sense in Untrained Deep Neural Networks,” *Science Advances* 7, no. 1 (2021): eabd6127.

(5) Seungdae Baek et al., “Face Detection in Untrained Deep Neural Networks,” *Nature Communications* 12, no. 1 (Dec 16 2021): 7328.

(6) Jon H. Kaas, “The Origin and Evolution of Neocortex: From Early Mammals to Modern Humans,” *Progress in Brain Research* 250 (2019): 64.

(7) James J. DiCarlo, Davide Zoccolan, and Nicole C. Rust, “How Does the Brain Solve Visual Object Recognition?” *Neuron* 73, no. 3 (February 2012): 419–20; Jon H. Kaas and Mary K. L. Baldwin, “The Evolution of the Pulvinar Complex in Primates and Its Role in the Dorsal and Ventral Streams of Cortical Processing,” *Vision* 4, no. 1 (December 2019): 3; Sang-Han Choi et al., “Proposal for Human Visual Pathway in the Extrastriate Cortex by Fiber Tracking Method Using Diffusion-Weighted MRI,” *Neuroimage* 220 (October 2020): 117145; Joshua H. Siegle et al., “Survey of Spiking in the Mouse Visual System Reveals Functional Hierarchy,” *Nature* 592, no. 7852 (April 2021): 86–92.

(8) Hernan G. Rey et al., “Single Neuron Coding of Identity in the Human Hippocampal Formation,” *Current Biology* 30, no. 6 (March 2020): 1152–59.

(9) Rodrigo Q. Quiroga, “Concept Cells: The Building Blocks of Declarative Memory Functions,” *Nature Reviews Neuroscience* 13, no. 8 (July 2012): 587–91; Rodrigo Q. Quiroga et al., “Invariant Visual Representation by Single Neurons in the Human Brain,” *Nature* 435, no. 7045 (June 2005): 1102–7.

(10) Julia Sliwa et al., “Independent Neuronal Representation of Facial and Vocal Identity in the Monkey Hippocampus and Inferotemporal Cortex,” *Cerebral Cortex* 26, no. 3 (March 2016): 950–66.

(11) Thérèse M. Jay, Jacques Glowinski, and Anne-Marie Thierry, “Selectivity of the Hippocampal Projection to the Prelimbic Area of the Prefrontal Cortex in the Rat,” *Brain Research* 505, no. 2 (December 1989): 337–40; Priyamvada Rajasethupathy et al., “Projections from Neocortex Mediate Top-Down Control of Memory Retrieval,” *Nature* 526, no. 7575 (October 2015): 653–59; Ruchi Malik et al., “Top-Down Control of Hippocampal Signal-to-Noise by Prefrontal Long-Range Inhibition,” *Cell* 185, no. 9 (April 2022): 1602–17.

(12) Michel A. Hofman, “Evolution of the Human Brain: When Bigger Is Better,” *Frontiers in Neuroanatomy* 8 (2014): 15.

(13) Lei Xing et al., “Expression of Human-Specific *ARHGAP11B* in Mice Leads to Neocortex Expansion and Increased Memory Flexibility,” *EMBO Journal* 40, no. 13 (July 2021): e107093.

(14) Michael Heide et al., “Human-Specific *ARHGAP11B* Increases Size and Folding of Primate Neocortex in the Fetal Marmoset,” *Science* 369, no. 6503 (July 2020): 546–50.

## الفصل الثاني عشر: مشاركة الأفكار والمعرفة من خلال اللغة

(1) Mark Pagel, "Q&A: What Is Human Language, When Did It Evolve and Why Should We Care?" *BMC Biology* 15, no. 1 (July 2017): 64.

(2) Pagel, "Q&A," 64.

(3) Marc D. Hauser et al., "The Mystery of Language Evolution," *Frontiers in Psychology* (2004): 401; Willem Zuidema and Arie Verhagen, "What Are the Unique Design Features of Language? Formal Tools for Comparative Claims," *Adaptive Behavior* 18, no. 1 (2010): 49–51; Sławomir Wacewicz and Przemysław Żywicznyński, "Language Evolution: Why Hockett's Design Features Are a Non-Starter," *Biosemiotics* 8, no. 1 (2005): 30–35; Michael D. Beecher, "Why Are No Animal Communication Systems Simple Languages?" *Frontiers in Psychology* (2021): 701; R. Haven Wiley, "Design Features of Language," in *Encyclopedia of Evolutionary Psychological Science* (Berlin: Springer, 2021), 1922–28; Charles F. Hockett, "Animal 'Languages' and Human Language," *Human Biology* 31, no. 1 (1959): 32–36; Charles F. Hockett and Charles D. Hockett, "The Origin of Speech," *Scientific American* 203, no. 3 (1960): 90–92.

(4) Hiroyuki Ai et al., "Neuroethology of the Waggle Dance: How Followers Interact with the Waggle Dancer and Detect Spatial Information," *Insects* 10, no. 10 (October 2019): 336; Randolf Menzel, "The Waggle Dance as an Intended Flight: A Cognitive Perspective," *Insects* 10, no. 12 (November 2019): 424.

(5) Patricia Dennis, Stephen M. Shuster, and C. N. Slobodchikoff, "Dialects in the Alarm Calls of Black-Tailed Prairie Dogs (*Cynomys ludovicianus*): A Case of Cultural Diffusion?" *Behavioral Processes* 181 (December 2020): 104243; Con N. Slobodchikoff, Andrea Paseka, and Jennifer L. Verdolin, "Prairie Dog Alarm Calls Encode Labels about Predator Colors," *Animal Cognition* 12, no. 3 (May 2009): 435–39.

(6) Francine Patterson and Wendy Gordon, "The Case for the Personhood of Gorillas," in *The Great Ape Project*, ed. Paola Cavalieri and Peter Singer (New York: St. Martin's, 1993), 59.

(7) Francine Patterson and Wendy Gordon, "Twenty-Seven Years of Project Koko and Michael," in *All Apes Great and Small* (Berlin: Springer, 2002), 168.

(8) Patterson and Gordon, "The Case for the Personhood of Gorillas," 67.

(9) Laasya Samhita, and Hans J. Gross, "The 'Clever Hans Phenomenon' Revisited," *Communicative & Integrative Biology* 6, no. 6 (November 2013): e27122.

(10) Patterson and Gordon, "The Case for the Personhood of Gorillas," 62.

(11) Geoffrey K. Pullum, "Koko Is Dead, but the Myth of Her Linguistic Skills Lives On," *The Chronicle of Higher Education*, June 27, 2018, <https://www.chronicle.com/blogs/linguafranca/koko-is-dead-but-the-myth-of-her-linguistic-skills-lives-on>.

(12) Ramirez et al., "Creating a False Memory in the Hippocampus," *Science* 341, no. 6144 (July 2013): 387–91.

(13) Maria Konnikova, "The Man Who Couldn't Speak and How He Revolutionized Psychology," *Scientific American*, February 3, 2018, <https://blogs.scientificamerican.com/literally-psyched/the-man-who-couldnt-speak-and-how-he-revolutionized-psychology/>; Nina F. Dronkers et al., "Paul Broca's Historic Cases: High Resolution MR Imaging of the Brains of Leborgne and Lelong," *Brain* 130, no. 5 (2007): 1432–41.

(14) Mario Lanczik and G. Keil, "Carl Wernicke's Localization Theory and Its Significance for the Development of Scientific Psychiatry," *History of Psychiatry* 2, no. 6 (1991): 174–75; William F. Bynum, "Wernicke, Carl," *Encyclopedia.com*, updated May 8, 2018, <https://>

www.encyclopedia.com/people/medicine/psychology-and-psychiatry-biographies/carl-wernicke.

(15) David Poeppel et al., "Towards a New Neurobiology of Language," *Journal of Neuroscience* 32, no. 41 (October 2012): 14125–26; Peter Hagoort, "MUC (Memory, Unification, Control) and Beyond," *Frontiers in Psychology* 4 (2013): 416.

(16) Poeppel et al., "Towards a New Neurobiology of Language," 14126.

(17) Poeppel et al., "Towards a New Neurobiology of Language," 14130.

(18) Oscar Wilde, "The Critic as Artist," 1891, accessed November 11, 2022, <https://celt.ucc.ie/published/E800003-007/text001.html>, emphasis added.

(19) Ludwig Wittgenstein, *Tractatus Logico-Philosophicus*, trans. C. K. Ogden (London: Routledge, 1981), 149.

(20) Bertrand Russell, *Human Knowledge: Its Scope and Limits* (London: Routledge, 2009), 74.

(21) Lila Gleitman and Anna Papafragou, "Language and Thought," in *Cambridge Handbook of Thinking and Reasoning*, ed. Keith Holyoak and Robert G. Morrison (Cambridge: Cambridge University Press, 2005), 634.

(22) Paul Bloom, "Language and Thought: Does Grammar Makes Us Smart?" *Current Biology* 10, no. 14 (2000): R516–R17; Michael Siegal and Rosemary Varley, "Aphasia, Language, and Theory of Mind," *Social Neuroscience* 1, no. 3–4 (2006): 169–70; Rosemary Varley and Michael Siegal, "Evidence for Cognition without Grammar from Causal Reasoning and 'Theory of Mind' in an Agrammatic Aphasic Patient," *Current Biology* 10, no. 12 (2000): 723–26; Rosemary A. Varley et al., "Agrammatic but Numerate," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States* 102, no. 9 (2005): 3519–24.

(23) Michael Rescorla, “The Language of Thought Hypothesis,” *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Summer 2019 ed.), accessed November 11, 2022, <https://plato.stanford.edu/archives/sum2019/entries/language-thought/>.

(24) Paul Bloom and Frank. C. Keil, “Thinking through Language,” *Mind & Language* 16, no. 4 (2001): 364.

(25) Basel A.-S. Hussein, “The Sapir-Whorf Hypothesis Today,” *Theory and Practice in Language Studies* 2, no. 3 (March 2012): 642–45.

(26) Guy Dove, “More Than a Scaffold: Language Is a Neuroenhancement,” *Cognitive Neuropsychology* 37, no. 5–6 (2020): 288–89.

(27) Anna M. Borghi et al., “Words as Social Tools: Language, Sociality and Inner Grounding in Abstract Concepts,” *Physics of Life Reviews* 29 (2019): 142.

(28) Gary Lupyan and Bodo Winter, “Language Is More Abstract Than You Think, or, Why Aren’t Languages More Iconic?” *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 373, no. 1752 (2018): 20170137.

(29) Lupyan and Winter, “Language Is More Abstract Than You Think?” 20170137.

(30) Leonid Perlovsky, “Language and Cognition—Joint Acquisition, Dual Hierarchy, and Emotional Prosody,” *Frontiers in Behavioral Neuroscience* 7 (2013): 123.

(31) Bloom, “Language and Thought,” R516–R17; Siegal and Varley, “Aphasia, Language, and Theory of Mind,” 169–70; Varley and Siegal, “Evidence for Cognition Without Grammar,” 723–26; Varley et al., “Agrammatic but Numerate,” 3519–24; Peter Langland-Hassan et al., “Assessing Abstract Thought and Its Relation to Language with a New Nonverbal Paradigm: Evidence from Aphasia,” *Cognition* 211 (2021): 104622; Peter Langland-Hassan et al., “Metacognitive Deficits in Categorization Tasks in

a Population with Impaired Inner Speech,” *Acta Psychologica* 181 (2017): 62–74.

(32) Dove, “More Than a Scaffold,” 289–90.

(33) Neil Glickman, Charlene Crump, and Steve Hamerdinger, “Language Deprivation Is a Game Changer for the Clinical Specialty of Deaf Mental Health,” *JADARA* 54, no. 1 (2020): 62–63; Matthew L. Hall et al., “Auditory Deprivation Does Not Impair Executive Function, but Language Deprivation Might: Evidence from a Parent-Report Measure in Deaf Native Signing Children,” *The Journal of Deaf Studies and Deaf Education* 22, no. 1 (2017): 9–21; Wyatte C. Hall, Leonard L. Levin, and Melissa L. Anderson, “Language Deprivation Syndrome: A Possible Neurodevelopmental Disorder with Sociocultural Origins,” *Social Psychiatry and Psychiatric Epidemiology* 52, no. 6 (2017): 767; Sanjay Gulati, “Language Deprivation Syndrome,” in *Language Deprivation and Deaf Mental Health*, ed. Neil S. Glickman and Wyatte C. Hall (London: Routledge, (2017): 32–34.

(34) Qi Cheng et al., “Effects of Early Language Deprivation on Brain Connectivity: Language Pathways in Deaf Native and Late First-Language Learners of American Sign Language,” *Frontiers in Human Neuroscience* 13 (2019): 320; Rachel I. Mayberry et al., “Age of Acquisition Effects on the Functional Organization of Language in the Adult Brain,” *Brain and Language* 119, no. 1 (2011): 16–29.

(35) Gulati, “Language Deprivation Syndrome,” 34.

(36) Siegal and Varley, “Aphasia, Language, and Theory of Mind,” 172.

(37) Louis-Jean Boë et al., “Which Way to the Dawn of Speech? Reanalyzing Half a Century of Debates and Data in Light of Speech Science,” *Science Advances* 5, no. 12 (December 2019): eaaw3916.

(38) Samir Okasha, “Biological Altruism,” *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Summer 2020 ed.), accessed November 29, 2022, <https://plato.stanford.edu/archives/sum2020/entries/altruism-biological/>.

(39) Noam Chomsky, “Three Factors in Language Design,” *Linguistic Inquiry* 36, no. 1 (2005): 3.

(40) Cecilia S. L. Lai et al., “A Forkhead–Domain Gene Is Mutated in a Severe Speech and Language Disorder,” *Nature* 413, no. 6855 (2001): 519–23.

(41) Wolfgang Enard et al., “Molecular Evolution of *FOXP2*, a Gene Involved in Speech and Language,” *Nature* 418, no. 6900 (2002): 869–72.

(42) Elizabeth Grace Atkinson et al., “No Evidence for Recent Selection at *FOXP2* among Diverse Human Populations,” *Cell* 174, no. 6 (2018): 1424–35.e15.

(43) Johannes Krause et al., “The Derived *FOXP2* Variant of Modern Humans Was Shared with Neandertals,” *Current Biology* 17, no. 21 (2007): 1908–12.

(44) Bridget Alex, “Could Neanderthals Speak? The Ongoing Debate over Neanderthal Language,” *Discover Magazine*, November 6, 2018, <https://www.discovermagazine.com/planet-earth/could-neanderthals-speak-the-ongoing-debate-over-neanderthal-language>.

(45) Ray Jackendoff, “How Did Language Begin?” Linguistic Society of America, accessed October 20, 2022, <https://www.linguisticsociety.org/resource/faq-how-did-language-begin>.

(46) Michael Tomasello et al., “Understanding and Sharing Intentions: The Origins of Cultural Cognition,” *Behavioral and Brain Sciences* 28, no. 5 (2005): 687.

(47) Tomasello et al., “Understanding and Sharing Intentions,” 690.

(48) Steven Pinker, “Language as an Adaptation to the Cognitive Niche,” chap. 2 in *Language Evolution*, ed. Morten H. Christiansen and Simon Kirby (Oxford: Oxford University Press, 2003), 27.

(49) Pinker, “Language as an Adaptation to the Cognitive Niche,” 29.

(50) Marc D. Hauser, Noam Chomsky, and W. Tecumseh Fitch, "The Faculty of Language: What Is It, Who Has It, and How Did It Evolve?" *Science* 298, no. 5598 (2002): 1569.

(51) Hauser et al., "The Mystery of Language Evolution," 401.

(52) Hauser, Chomsky, and Fitch, "The Faculty of Language," 1569–79.

(53) Chris Knight, "Ritual/Speech Coevolution: A Solution to the Problem of Deception," chap. 5 in *Approaches to the Evolution of Language*, ed. James R. Hurford, Michael Studdert-Kennedy and Chris Knight (Cambridge: Cambridge University Press 1998), 74.

(54) Roy A. Rappaport, *Ritual and Religion in the Making of Humanity* (Cambridge: Cambridge University Press, 1999), 15.

(55) Chris Knight, "The Origins of Symbolic Culture," chap. 14 in *Homo Novus—A Human Without Illusions*, ed. Ulrich J. Frey, Charlotte Störmer and Kai P. Willführ (Berlin: Springer, 2010), 198.

(56) Giuseppe Di Pellegrino et al., "Understanding Motor Events: A Neurophysiological Study," *Experimental Brain Research* 91, no. 1 (1992): 176–80; Vittorio Gallese et al., "Action Recognition in the Premotor Cortex," *Brain* 119, no. 2 (1996): 593–609; Giacomo Rizzolatti and Laila Craighero, "The Mirror-Neuron System," *Annual Review of Neuroscience* 27 (2004): 169–92; Giacomo Rizzolatti et al., "Premotor Cortex and the Recognition of Motor Actions," *Cognitive Brain Research* 3, no. 2 (1996): 131–41.

(57) Evelyne Kohler et al., "Hearing Sounds, Understanding Actions: Action Representation in Mirror Neurons," *Science* 297, no. 5582 (2002): 846–48.

(58) Michael A. Arbib and Mihail Bota, "Language Evolution: Neural Homologies and Neuroinformatics," *Neural Networks* 16, no. 9 (2003): 1247–52; Michael A. Arbib and Mihail Bota, "Neural Homologies and the Grounding of Neurolinguistics," ed. Michael A. Arbib, *Action to Language*

via the Mirror Neuron System (Cambridge: Cambridge University Press, 2006), 152–54; Marco Iacoboni et al., “Cortical Mechanisms of Human Imitation,” *Science* 286, no. 5449 (1999): 2526–28.

(59) Michael Arbib and Giacomo Rizzolatti, “Neural Expectations: A Possible Evolutionary Path from Manual Skills to Language,” in *The Nature of Concepts: Evolution, Structure and Representation*, ed. Philip Van Loocke (London: Routledge, 1998), 140–51; Michael A. Arbib, “The Mirror System Hypothesis on the Linkage of Action and Language,” ed. Michael A. Arbib, *Action to Language via the Mirror Neuron System* (Cambridge: Cambridge University Press, 2006), 6–7; Giacomo Rizzolatti and Michael A. Arbib, “Language within our Grasp,” *Trends in Neurosciences* 21, no. 5 (1998): 188–94; Giacomo Rizzolatti and Laila Craighero, “Language and Mirror Neurons,” in *Oxford Handbook of Psycholinguistics*, ed. M. Gareth Gaskell (Oxford: Oxford University Press, 2007), 777–83.

(60) Arbib and Rizzolatti, “Neural Expectations,” 149–50.

(61) Gordon W. Hewes et al., “Primate Communication and the Gestural Origin of Language,” *Current Anthropology* 14, no. 1/2 (February–April 1973), 5–11; Michael C. Corballis, “The Gestural Origins of Language: Human Language May Have Evolved from Manual Gestures, Which Survive Today as a ‘Behavioral Fossil’ Coupled to Speech,” *American Scientist* 87, no. 2 (1999): 139–43.

(62) Arbib and Bota, “Neural Homologies and the Grounding of Neurolinguistics,” 18–19.

(63) Hauser et al., “The Mystery of Language Evolution,” 401.

### الفصل الثالث عشر: عن الإبداع

(1) See Anna Abraham, *The Neuroscience of Creativity* (Cambridge: Cambridge University Press, 2018), and Rex E. Jung and Oshin Vartanian,

eds., *The Cambridge Handbook of the Neuroscience of Creativity* (Cambridge: Cambridge University Press, 2018).

(2) Abraham, *The Neuroscience of Creativity*, 9–11; Dean Keith Simonton, “Creative Ideas and the Creative Process: Good News and Bad News for the Neuroscience of Creativity,” in *The Cambridge Handbook of the Neuroscience of Creativity*, ed. Rex E. Jung and Oshin Vartanian (Cambridge: Cambridge University Press, 2018), 9–10.

(3) Melissa C. Duff et al., “Hippocampal Amnesia Disrupts Creative Thinking,” *Hippocampus* 23, no. 12 (December 2013): 1143–49.

(4) Arne Dietrich, “Types of Creativity,” *Psychonomic Bulletin & Review* 26, no. 1 (February 2019): 1.

(5) Dietrich, “Types of Creativity,” 3.

(6) Rex E. Jung et al., “The Structure of Creative Cognition in the Human Brain,” *Frontiers in Human Neuroscience* 7 (2013): 330; Roger E. Beaty et al., “Creative Cognition and Brain Network Dynamics,” *Trends in Cognitive Science* 20, no. 2 (February 2016): 88–93; Oshin Vartanian, “Neuroscience of Creativity,” in *The Cambridge Handbook of Creativity*, ed. James C. Kaufman and Robert J. Sternberg (Cambridge: Cambridge University Press, 2019), 156–59.

(7) Daniel L. Schacter and Donna Rose Addis, “The Cognitive Neuroscience of Constructive Memory: Remembering the Past and Imagining the Future,” *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 362, no. 1481 (2017): 773–75.

(8) Marcela Ovando-Tellez et al., “Brain Connectivity-Based Prediction of Real-Life Creativity Is Mediated by Semantic Memory Structure,” *Science Advances* 8, no. 5 (February 2022): eabl4294.

(9) R. Keith Sawyer, *Explaining Creativity: The Science of Human Innovation* (New York: Oxford University Press, 2006), 153.

(10) Chunfang Zhou and Lingling Luo, "Group Creativity in Learning Context: Understanding in a Social-Cultural Framework and Methodology," *Creative Education* 3, no. 4 (2012): 392; Amanda L. Thayer, Alexandra Petruzzelli, and Caitlin E. McClurg, "Addressing the Paradox of the Team Innovation Process: A Review and Practical Considerations," *American Psychologist* 73, no. 4 (2018): 363.

(11) Rebecca Mitchell, Stephen Nicholas, and Brendan Boyle, "The Role of Openness to Cognitive Diversity and Group Processes in Knowledge Creation," *Small Group Research* 40, no. 5 (2009): 535-54; Zhou and Luo, "Group Creativity in Learning Context," 393; Paul B. Paulus, Jonali Baruah, and Jared B. Kenworthy, "Enhancing Collaborative Ideation in Organizations," *Frontiers in Psychology* 9 (2018): 2024.

(12) Simonton, "Creative Ideas and the Creative Process," 15.

(13) Alan J. Park et al., "Reset of Hippocampal-Prefrontal Circuitry Facilitates Learning," *Nature* 591, no. 7851 (March 2021): 615-19.

(14) Mihaly Csikszentmihalyi, *Flow: The Psychology of Optimal Experience* (New York: HarperCollins, 2008), 71.

(15) Lalit Kishore, "Kaon Parables for Awakening Intuitive Thinking in Zen Buddhism: An Example," Speakingtree.in, April 14, 2023, <https://www.speakingtree.in/blog/kaon-parables-for-awakening-intuitive-thinking-in-zen-buddhism-an-example>.

(16) Jogye Order Missionary Office, "What Is Koan Contemplation Zen?" *Buddhist Newspaper* 2296, January 14, 2007, <http://www.ibulgyo.com/news/articleView.html?idxno=78486>.

(17) Simonton, "Creative Ideas and the Creative Process," 16.

(18) Yehuda Wacks and Aviv M. Weinstein, "Excessive Smartphone Use Is Associated with Health Problems in Adolescents and Young Adults," *Frontiers in Psychiatry* 12 (2021): 669042.

## الفصل الرابع عشر: مستقبل الابتكار

(1) Hannah Ritchie and Max Roser, “Extinctions,” Ourworldindata.org, accessed June 21, 2022, <https://ourworldindata.org/extinctions>.

(2) “Living Planet Report 2022—Building a Nature-Positive Society,” WWF.ca, October 12, 2022, <https://wwf.ca/?s=Living+Planet+Report+2022&lang=en>.

(3) Michael Greshko and National Geographic Staff, “What Are Mass Extinctions, and What Causes Them?” *National Geographic*, September 26, 2019, <https://www.nationalgeographic.com/science/article/mass-extinction>; “The ‘Great Dying,’” Geological Society of America, May 19, 2021, [www.sciencedaily.com/releases/2021/05/210519163702.htm](http://www.sciencedaily.com/releases/2021/05/210519163702.htm).

(4) Hannah Ritchie and Max Roser, “Energy,” Ourworldindata.org, accessed June 21, 2022, <https://ourworldindata.org/energy>; Gioietta Kuo, “When Fossil Fuels Run Out, What Then?” MAHB, May 23, 2019, <https://mahb.stanford.edu/library-item/fossil-fuels-run/>.

(5) Dimitrios Floudas et al., “The Paleozoic Origin of Enzymatic Lignin Decomposition Reconstructed from 31 Fungal Genomes,” *Science* 336, no. 6089 (June 2012): 1715–19.

(6) As an alternative hypothesis, a unique combination of climate (in the tropical wetlands, the massive amount of organic matter produced was slow to decay in the acidic water) and tectonics (the organic matter deposited by crustal thickening during the formation of Pangaea was preserved) has been proposed as the major factor for coal accumulation. Matthew P. Nelsen et al., “Delayed Fungal Evolution Did Not Cause the Paleozoic Peak in Coal Production,” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States* 113, no. 9 (March 2016): 2442–47.

(7) Myles R. Allen et al., “Framing and Context,” in *Global Warming of 1.5°C.*, ed. V. Masson-Delmotte et al. (Cambridge: Cambridge University Press, 2018), 51.

(8) Bruce W. Sellwood and Paul J. Valdes, “Jurassic Climates,” *Proceedings of the Geologists’ Association* 119, no. 1 (2008): 5; Jessica E. Tierney et al., “Glacial Cooling and Climate Sensitivity Revisited,” *Nature* 584, no. 7822 (2020): 569–73.

(9) Paul J. Young et al., “The Montreal Protocol Protects the Terrestrial Carbon Sink,” *Nature* 596, no. 7872 (2021): 384–88.

(10) David Silver et al., “Reward Is Enough,” *Artificial Intelligence* 299 (2021): 103535.

(11) Ray Kurzweil, *The Singularity Is Near: When Humans Transcend Biology* (New York: Penguin, 2005), 135–36.

(12) Irving John Good, “Speculations Concerning the First Ultraintelligent Machine,” in *Advances in Computers* (Amsterdam: Elsevier, 1966), 33.

(13) Kurzweil, *The Singularity Is Near*, 24.

(14) Kurzweil, *The Singularity Is Near*, 28.

(15) Maclyn McCarty, “Discovering Genes Are Made of DNA,” *Nature* 421, no. 6921 (2003): 406.

(16) Richard Evans and Jim Gao, “DeepMind AI Reduces Google Data Centre Cooling Bill by 40 Percent,” DeepMind, July 6, 2016, <https://www.deepmind.com/blog/deepmind-ai-reduces-google-data-centre-cooling-bill-by-40>.

(17) Precise durations are unclear; the estimated durations vary across studies.

(18) Ray Kurzweil, *The Singularity Is Near: When Humans Transcend Biology* (New York: Penguin, 2005), 135–36.

## الملحق الأول

(1) Jong W. Lee and Min W. Jung, “Separation or Binding? Role of the Dentate Gyrus in Hippocampal Mnemonic Processing,” *Neuroscience & Biobehavioral Reviews* 75 (April 2017): 184–91.

(2) David Marr, "A Theory of Cerebellar Cortex," *Journal of Physiology* 202, no. 2 (June 1969): 440, 442–43; James S. Albus, "A Theory of Cerebellar Function," *Mathematical Biosciences* 10, nos. 1–2 (1971): 36–41.

(3) David G. Amaral, Norio Ishizuka, and Brenda Claiborne, "Neurons, Numbers and the Hippocampal Network," *Progress in Brain Research* 83 (1990): 3.

(4) Bruce L. McNaughton, "Neuronal Mechanisms for Spatial Computation and Information Storage," in *Neural Connections, Mental Computations*, ed. Lynn Nadel, Lynn A. Cooper, Peter W. Culicover and Robert M. Harnish (Cambridge, MA: MIT Press, 1989), 305; Edmund T. Rolls, "Functions of Neuronal Networks in the Hippocampus and Cerebral Cortex in Memory," in *Models of Brain Function*, ed. Rodney M. J. Cotterill (Cambridge: Cambridge University Press, 1989), 18–21; James J. Knierim and Joshua Neunuebel, "Tracking the Flow of Hippocampal Computation: Pattern Separation, Pattern Completion, and Attractor Dynamics," *Neurobiology of Learning and Memory* 129 (March 2016): 39–46.

(5) James J. Knierim, Inah Lee, and Eric L. Hargreaves, "Hippocampal Place Cells: Parallel Input Streams, Subregional Processing, and Implications for Episodic Memory," *Hippocampus* 16, no. 9 (2006): 760–62.

(6) Lee and Jung, "Separation or Binding?" 183–94.

(7) Raymond P. Kesner, "A Behavioral Analysis of Dentate Gyrus Function," *Progress in Brain Research* 163 (2007): 567–68; Sen Cheng, "The CRISP Theory of Hippocampal Function in Episodic Memory," *Frontiers in Neural Circuits* 7 (2013): 88.

(8) Lee and Jung, "Separation or Binding?" 183–94.

(9) Christina Herold, Vincent J. Coppola, and Verner P. Bingman, "The Maturation of Research into the Avian Hippocampal Formation: Recent Discoveries from One of the Nature's Foremost Navigators," *Hippocampus*

25, no. 11 (November 2015): 1196; Georg F. Striedter, “Evolution of the Hippocampus in Reptiles and Birds,” *Journal of Comparative Neurology* 524, no. 3 (February 2016): 505–6.

(10) Verner P. Bingman and Rubén N. Muzio, “Reflections on the Structural–Functional Evolution of the Hippocampus: What Is the Big Deal about a Dentate Gyrus?” *Brain, Behavior and Evolution* 90, no. 1 (2017): 56–59.

(11) Tim Bliss, Graham Collingridge, and Richard Morris, “Synaptic Plasticity in the Hippocampus,” in *The Hippocampus Book*, ed. Per Andersen et al. (Oxford: Oxford University Press, 2007), 344–46.

## الملحق الثاني

(1) Hyunjung Lee et al., “Hippocampal Neural Correlates for Values of Experienced Events,” *Journal of Neuroscience* 32, no. 43 (October 2012): 15062.

(2) Eric B. Knudsen and Joni D. Wallis, “Hippocampal Neurons Construct a Map of an Abstract Value Space,” *Cell* 184, no. 18 (September 2021): 4640–50.e10.

(3) In many natural settings, potential competitors must also be considered when making a choice. A high-value target would have more competitors. Hence, always choosing the high-value target is not an optimal strategy in a social competition situation. Humans and animals have a natural tendency to distribute their choices in proportion to the probability of reward, which is called probability matching. It is considered an optimal strategy in the presence of competitors because they cannot exploit your choice behavior. Charles R. Gallistel, *The Organization of Learning* (Cambridge, MA: MIT Press, 1990), 351–53.

(4) Richard S. Sutton and Andrew G. Barto, *Reinforcement Learning: An Introduction* (Cambridge, MA: MIT Press, 1998), 148–51.

(5) Lee et al., "Hippocampal Neural Correlates for Values of Experienced Events," 15053–65.



## قائمة المراجع

- Abraham, Anna. *The Neuroscience of Creativity*. Cambridge: Cambridge University Press, 2018.
- Addis, Donna R., Alana T. Wong, and Daniel L. Schacter. "Remembering the Past and Imagining the Future: Common and Distinct Neural Substrates During Event Construction and Elaboration." *Neuropsychologia* 45, no. 7 (April 2007): 1363–77.
- Ai, Hiroyuki, Ryuichi Okada, Midori Sakura, Thomas Wachtler, and Hidetoshi Ikeno. "Neuroethology of the Waggle Dance: How Followers Interact with the Waggle Dancer and Detect Spatial Information." *Insects* 10, no. 10 (October 2019): 336.
- Aiello, Leslie C., and Peter Wheeler. "The Expensive-Tissue Hypothesis: The Brain and the Digestive System in Human and Primate Evolution." *Current Anthropology* 36, no. 2 (1995): 199–221.
- Albus, James S. "A Theory of Cerebellar Function." *Mathematical Biosciences* 10, nos. 1-2 (1971): 25–61.
- Alex, Bridget. "Could Neanderthals Speak? The Ongoing Debate over Neanderthal Language." *Discover*, November 6, 2018, <https://www.discovermagazine.com/planet-earth/could-neanderthals-speak-the-ongoing-debate-over-neanderthal-language>.

- Allen, Myles R., et al. "Framing and Context." In *Global Warming of 1.5°C*, ed. V. Masson-Delmotte et al., 49–92. Cambridge: Cambridge University Press, 2018.
- Amaral, David G., Norio Ishizuka, and Brenda Claiborne. "Neurons, Numbers and the Hippocampal Network." *Progress in Brain Research* 83 (1990): 1–11.
- Ambrose, R. Ellen, Brad E. Pfeiffer, and David J. Foster. "Reverse Replay of Hippocampal Place Cells Is Uniquely Modulated by Changing Reward." *Neuron* 91, no. 5 (September 2016): 1124–36.
- Arbib, Michael A. "The Mirror System Hypothesis on the Linkage of Action and Language." In *Action to Language via the Mirror Neuron System*, ed. Michael A. Arbib, 2–48. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- Arbib, Michael A., and Mihail Bota. "Language Evolution: Neural Homologies and Neuroinformatics." *Neural Networks* 16, no. 9 (2003): 1237–60.
- Arbib, Michael A., and Mihail Bota. "Neural Homologies and the Grounding of Neurolinguistics." In *Action to Language via the Mirror Neuron System*, ed. Michael A. Arbib, 135–74. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- Arbib, Michael, and Giacomo Rizzolatti. "Neural Expectations: A Possible Evolutionary Path from Manual Skills to Language." In *The Nature of Concepts: Evolution, Structure and Representation*, ed. Philip Van Looke, 128–54. London: Routledge, 1998.
- Atkinson, Elizabeth Grace, Amanda Jane Audesse, Julia Adela Palacios, Dean Michael Bobo, Ashley Elizabeth Webb, Sohini Ramachandran, and Brenna Mariah Henn. "No Evidence for Recent Selection at *FOXP2* among Diverse Human Populations." *Cell* 174, no. 6 (2018): 1424–35.e15.

- Badre, David. "Cognitive Control, Hierarchy, and the Rostro-Caudal Organization of the Frontal Lobes." *Trends in Cognitive Science* 12, no. 5 (May 2008): 193–200.
- Baek, Seungdae, Min Song, Jaeson Jang, Gwangsu Kim, and Se-Bum Paik. "Face Detection in Untrained Deep Neural Networks." *Nature Communications* 12, no. 1 (December 2021): 7328.
- Bar-Yosef, Ofer. "The Upper Paleolithic Revolution." *Annual Review of Anthropology* 31, no. 1 (2002): 363–93.
- Beaty, Roger E., Mathias Benedek, Paul J. Silvia, and Daniel L. Schacter. "Creative Cognition and Brain Network Dynamics." *Trends in Cognitive Science* 20, no. 2 (February 2016): 87–95.
- Beaty, Roger E. "The Creative Brain." *Cerebrum* (January 2020): cer-02-20.
- Beaudet, Amélie, Andrew Du, and Bernard Wood. "Evolution of the Modern Human Brain." *Progress in Brain Research* 250 (2019): 219–50.
- Beecher, Michael D. "Why Are No Animal Communication Systems Simple Languages?" *Frontiers in Psychology* (2021): 701.
- Behrens, Timothy E. J., Timothy H. Muller, James C. R. Whittington, Shirley Mark, Alon B. Baram, Kimberly L. Stachenfeld, and Zeb Kurth-Nelson. "What Is a Cognitive Map? Organizing Knowledge for Flexible Behavior." *Neuron* 100, no. 2 (October 2018): 490–509.
- Ben-Yishay, Elhanan, Ksenia Krivoruchko, Shaked Ron, Nachum Ulanovsky, Dori Derdikman, and Yoram Gutfreund. "Directional Tuning in the Hippocampal Formation of Birds." *Current Biology* 31, no. 12 (June 2021): 2592–602.e4.
- Bhattarai, Baburam, Jong W. Lee, and Min W. Jung. "Distinct Effects of Reward and Navigation History on Hippocampal Forward and Reverse Replays." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 117, no. 1 (January 2020): 689–97.

- Bingman, Verner P., and Rubén N. Muzio. “Reflections on the Structural-Functional Evolution of the Hippocampus: What Is the Big Deal about a Dentate Gyrus?” *Brain, Behavior and Evolution* 90, no. 1 (2017): 53–61.
- Bingman, Verner P., Cosme Salas, and Fernando Rodríguez. “Evolution of the Hippocampus.” In *Encyclopaedia of Neuroscience*, ed. Marc D. Binder, Nobutaka Hirokawa, and Uwe Windhorst, 1356–60. Berlin: Springer, 2009.
- Bissonette, Gregory B., and Matthew R. Roesch. “Neural Correlates of Rules and Conflict in Medial Prefrontal Cortex During Decision and Feedback Epochs.” *Frontiers in Behavioral Neuroscience* 9 (2015): 266.
- Bliss, T. V., and A. R. Gardner-Medwin. “Long-Lasting Potentiation of Synaptic Transmission in the Dentate Area of the Unanaesthetized Rabbit Following Stimulation of the Perforant Path.” *Journal of Physiology* 232, no. 2 (July 1973): 357–74.
- Bliss, T. V., and T. Lomo. “Long-Lasting Potentiation of Synaptic Transmission in the Dentate Area of the Anaesthetized Rabbit Following Stimulation of the Perforant Path.” *Journal of Physiology* 232, no. 2 (July 1973): 331–56.
- Bliss, Tim, Graham Collingridge, and Richard Morris. “Synaptic Plasticity in the Hippocampus.” Chap. 10 in *The Hippocampus Book*, ed. Per Andersen, Richard Morris, David Amaral, Tim Bliss, and John O’Keefe, 343–474. Oxford: Oxford University Press, 2007.
- Bloom, Paul. “Language and Thought: Does Grammar Makes Us Smart?” *Current Biology* 10, no. 14 (2000): R516–R17.
- Bloom, Paul, and Frank C. Keil. “Thinking through Language.” *Mind & Language* 16, no. 4 (2001): 351–67.
- Boë, Louis-Jean, Thomas R. Sawallis, Joël Fagot, Pierre Badin, Guillaume Barbier, Guillaume Captier, Lucie Ménard, Jean-Louis Heim, and Jean-Luc Schwartz. “Which Way to the Dawn of Speech? Reanalyzing Half

- a Century of Debates and Data in Light of Speech Science.” *Science Advances* 5, no. 12 (December 2019): eaaw3916.
- Borghini, Anna M., Laura Barca, Ferdinand Binkofski, Cristiano Castelfranchi, Giovanni Pezzulo, and Luca Tummolini. “Words as Social Tools: Language, Sociality and Inner Grounding in Abstract Concepts.” *Physics of Life Reviews* 29 (2019): 120–53.
- Bruce, Darryl. “Fifty Years Since Lashley’s ‘In Search of the Engram’: Refutations and Conjectures.” *Journal of the History of the Neurosciences* 10, no. 3 (2001): 308–18.
- Bruner, Emiliano. “Human Paleoneurology and the Evolution of the Parietal Cortex.” *Brain, Behavior and Evolution* 91, no. 3 (2018): 136–47.
- Bruner, Emiliano, Hideki Amano, José M. de la Cuétara, and Naomichi Ogi-hara. “The Brain and the Braincase: A Spatial Analysis on the Midsagittal Profile in Adult Humans.” *Journal of Anatomy* 227, no. 3 (September 2015): 268–76.
- Bruner, Emiliano, and Sofia Pereira-Pedro. “A Metric Survey on the Sagittal and Coronal Morphology of the Precuneus in Adult Humans.” *Brain Structure and Function* 225, no. 9 (December 2020): 2747–55.
- Bruner, Emiliano, Todd M. Preuss, Xu Chen, and James K. Rilling. “Evidence for Expansion of the Precuneus in Human Evolution.” *Brain Structure and Function* 222, no. 2 (March 2017): 1053–60.
- Bruner, Emiliano, Francisco J. Roman, José M. de la Cuétara, Manuel Martín-Loeches, and Roberto Colom. “Cortical Surface Area and Cortical Thickness in the Precuneus of Adult Humans.” *Neuroscience* 286 (February 2015): 345–52.
- Buckner, Randy L., Jessica R. Andrews-Hanna, and Daniel L. Schacter. “The Brain’s Default Network: Anatomy, Function, and Relevance to Disease.” *Annals of the New York Academy of Sciences* 1124 (March 2008): 1–38.

- Bulganin, Lisa, and Bianca C. Wittmann. "Reward and Novelty Enhance Imagination of Future Events in a Motivational–Episodic Network." *PLoS One* 10, no. 11 (2015): e0143477.
- Buzsaki, Gyorgy. "Hippocampal Sharp Wave–Ripple: A Cognitive Biomarker for Episodic Memory and Planning." *Hippocampus* 25, no. 10 (October 2015): 1073–1188.
- Bynum, William F. "Wernicke, Carl." Encyclopedia.com. Updated May 8, 2018. <https://www.encyclopedia.com/people/medicine/psychology-and-psychiatry-biographies/carl-wernicke>.
- Cann, Rebecca L., Mark Stoneking, and Allan C. Wilson. "Mitochondrial DNA and Human Evolution." *Nature* 325, no. 6099 (1987): 31–36.
- Carmody, Rachel N., and Richard W. Wrangham. "The Energetic Significance of Cooking." *Journal of Human Evolution* 57, no. 4 (October 2009): 379–91.
- Cavanna, Andrea E., and Michael R. Trimble. "The Precuneus: A Review of Its Functional Anatomy and Behavioural Correlates." *Brain* 129, part 3 (March 2006): 564–83.
- Chamberlain, Rebecca, I. Chris McManus, Nicola Brunswick, Qona Rankin, Howard Riley, and Ryota Kanai. "Drawing on the Right Side of the Brain: A Voxel–Based Morphometry Analysis of Observational Drawing." *Neuroimage* 96 (August 2014): 167–73.
- Chen, Qun–Lin, Ting Xu, Wen–Jing Yang, Ya–Dan Li, Jiang–Zhou Sun, Kang–Cheng Wang, Roger E. Beaty et al. "Individual Differences in Verbal Creative Thinking Are Reflected in the Precuneus." *Neuropsychologia* 75 (August 2015): 441–49.
- Chen, Yvonne Y., Lyndsey Aponik–Gremillion, Eleonora Bartoli, Daniel Yoshor, Sameer A. Sheth, and Brett L. Foster. "Stability of Ripple Events During Task Engagement in Human Hippocampus." *Cell Reports* 35, no. 13 (2021): 109304.

- Cheng, Qi, Austin Roth, Eric Halgren, and Rachel I. Mayberry. "Effects of Early Language Deprivation on Brain Connectivity: Language Pathways in Deaf Native and Late First-Language Learners of American Sign Language." *Frontiers in Human Neuroscience* 13 (2019): 320.
- Cheng, Sen. "The CRISP Theory of Hippocampal Function in Episodic Memory." *Frontiers in Neural Circuits* 7 (2013): 88.
- Choi, Sang-Han, Gangwon Jeong, Young-Bo Kim, and Zang-Hee Cho. "Proposal for Human Visual Pathway in the Extrastriate Cortex by Fiber Tracking Method Using Diffusion-Weighted MRI." *Neuroimage* 220 (October 2020): 117145.
- Chomsky, Noam. "Three Factors in Language Design." *Linguistic Inquiry* 36, no. 1 (2005): 1–22.
- Constantinescu, Alexandra O., Jill X. O'Reilly, and Timothy E. J. Behrens. "Organizing Conceptual Knowledge in Humans with a Gridlike Code." *Science* 352, no. 6292 (June 2016): 1464–68.
- Corballis, Michael C. "The Gestural Origins of Language: Human Language May Have Evolved from Manual Gestures, Which Survive Today as a 'Behavioral Fossil' Coupled to Speech." *American Scientist* 87, no. 2 (1999): 138–45.
- Corkin, Suzanne. "What's New with the Amnesic Patient H. M.?" *Nature Reviews Neuroscience* 3, no. 2 (February 2002): 153–60.
- Cornelio, Alianda M., Ruben E. de Bittencourt-Navarrete, Ricardo de Bittencourt Brum, Claudio M. Queiroz, and Marcos R. Costa. "Human Brain Expansion During Evolution Is Independent of Fire Control and Cooking." *Frontiers in Neuroscience* 10 (2016): 167.
- Craig, Michael. "Memory and Forgetting." In *Encyclopedia of Behavioral Neuroscience*, ed. Sergio Della Sala, 425–31. (Amsterdam: Elsevier, 2021).

- Csikszentmihalyi, Mihaly. *Flow: The Psychology of Optimal Experience*. New York: HarperCollins, 2008.
- Davies, Stephen. “Behavioral Modernity in Retrospect.” *Topoi* 40, no. 1 (2021): 221–32.
- Dennis, Patricia, Stephen M. Shuster, and C. N. Slobodchikoff. “Dialects in the Alarm Calls of Black-Tailed Prairie Dogs (*Cynomys ludovicianus*): A Case of Cultural Diffusion?” *Behavioral Processes* 181 (December 2020): 104243.
- Denzel, Stephanie. “George Franklin.” The National Registry of Exonerations. Updated May 2, 2022. <https://www.law.umich.edu/special/exoneration/Pages/casedetail.aspx?caseid=3221>.
- Di Pellegrino, Giuseppe, Luciano Fadiga, Leonardo Fogassi, Vittorio Gallese, and Giacomo Rizzolatti. “Understanding Motor Events: A Neurophysiological Study.” *Experimental Brain Research* 91, no. 1 (1992): 176–80.
- Diamond, Jared. “The Great Leap Forward.” In *Technology and Society: Issues for the 21st Century and Beyond*, 3rd ed., ed. Linda Hjorth, Barbara Eichler, Ahmed Khan, and John Morello, 15–24. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2008.
- Diba, Kamran, and Gyorgy Buzsaki. “Forward and Reverse Hippocampal Place-Cell Sequences During Ripples.” *Nature Neuroscience* 10, no. 10 (October 2007): 1241–42.
- DiCarlo, James J., Davide Zoccolan, and Nicole C. Rust. “How Does the Brain Solve Visual Object Recognition?” *Neuron* 73, no. 3 (February 2012): 415–34.
- Dietrich, Arne. “Types of Creativity.” *Psychonomic Bulletin & Review* 26, no. 1 (February 2019): 1–12.
- Donahue, Chad J., Matthew F. Glasser, Todd M. Preuss, James K. Rilling, and David C. Van Essen. “Quantitative Assessment of Prefrontal Cortex in Humans Relative to Nonhuman Primates.” *Proceedings of the National*

- Academy of Sciences of the United States of America* 115, no. 22 (May 2018): E5183–E92.
- Dove, Guy. “More Than a Scaffold: Language Is a Neuroenhancement.” *Cognitive Neuropsychology* 37, no. 5–6 (2020): 288–311.
- Dronkers, Nina F., Odile Plaisant, Marie Therese Iba-Zizen, and Emmanuel A. Cabanis. “Paul Broca’s Historic Cases: High Resolution MR Imaging of the Brains of Leborgne and Lelong.” *Brain* 130, no. 5 (2007): 1432–41.
- Duff, Melissa C., Jake Kurczek, Rachael Rubin, Neal J. Cohen, and Daniel Tranel. “Hippocampal Amnesia Disrupts Creative Thinking.” *Hippocampus* 23, no. 12 (December 2013): 1143–9.
- Dumontheil, Iroise. “Development of Abstract Thinking During Childhood and Adolescence: The Role of Rostrolateral Prefrontal Cortex.” *Developmental Cognitive Neuroscience* 10 (October 2014): 57–76.
- Duncan, Katherine, Bradley B. Doll, Nathaniel D. Daw, and Daphna Shohamy. “More Than the Sum of Its Parts: A Role for the Hippocampus in Configural Reinforcement Learning.” *Neuron* 98, no. 3 (May 2018): 645–57.
- Dupret, David, Joseph O’Neill, Barty Pleydell-Bouverie, and Jozsef Csicsvari. “The Reorganization and Reactivation of Hippocampal Maps Predict Spatial Memory Performance.” *Nature Neuroscience* 13, no. 8 (August 2010): 995–1002.
- Eichenbaum, Howard, Paul Dudchenko, Emma Wood, Matthew Shapiro, and Heikki Tanila. “The Hippocampus, Memory, and Place Cells: Is It Spatial Memory or a Memory Space?” *Neuron* 23, no. 2 (June 1999): 209–26.
- Ekstrom, Arne D., Michael J. Kahana, Jeremy B. Caplan, Tony A. Fields, Eve A. Isham, Ehren L. Newman, and Itzhak Fried. “Cellular Networks Underlying Human Spatial Navigation.” *Nature* 425, no. 6954 (September 2003): 184–8.

- Enard, Wolfgang, Molly Przeworski, Simon E. Fisher, Cecilia S. L. Lai, Victor Wiebe, Takashi Kitano, Anthony P. Monaco, and Svante Pääbo. “Molecular Evolution of *FOXP2*, a Gene Involved in Speech and Language.” *Nature* 418, no. 6900 (2002): 869–72.
- Entomological Society of America. “Frequently Asked Questions on Entomology.” Updated July 26, 2010. <https://www.entsoc.org/resources/faq/>.
- Evans, Richard, and Jim Gao. “DeepMind AI Reduces Google Data Centre Cooling Bill by 40 Percent.” DeepMind, July 6, 2016. <https://www.deepmind.com/blog/deepmind-ai-reduces-google-data-centre-cooling-bill-by-40>.
- Floudas, Dimitrios, Manfred Binder, Robert Riley, Kerrie Barry, Robert A. Blanchette, Bernard Henrissat, Angel T. Martinez, et al. “The Paleozoic Origin of Enzymatic Lignin Decomposition Reconstructed from 31 Fungal Genomes.” *Science* 336, no. 6089 (June 2012): 1715–19.
- Fonseca-Azevedo, Karina, and Suzana Herculano-Houzel. “Metabolic Constraint Imposes Tradeoff between Body Size and Number of Brain Neurons in Human Evolution.” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109, no. 45 (November 2012): 18571–6.
- Foster, David J., and Matthew A. Wilson. “Reverse Replay of Behavioural Sequences in Hippocampal Place Cells During the Awake State.” *Nature* 440, no. 7084 (March 2006): 680–83.
- Gallese, Vittorio, Luciano Fadiga, Leonardo Fogassi, and Giacomo Rizzolatti. “Action Recognition in the Premotor Cortex.” *Brain* 119, no. 2 (1996): 593–609.
- Gallistel, Charles R. *The Organization of Learning*. Cambridge, MA: MIT Press, 1990.

- Gangopadhyay, Prabaha, Megha Chawla, Olga Dal Monte, and Steve W. C. Chang. "Prefrontal–Amygdala Circuits in Social Decision–Making." *Nature Neuroscience* 24, no. 1 (January 2023): 5–18.
- Geological Society of America. "The 'Great Dying.'" May 19, 2021. [www.sciencedaily.com/releases/2021/05/210519163702.htm](http://www.sciencedaily.com/releases/2021/05/210519163702.htm).
- Geva–Sagiv, Maya, Liora Las, Yossi Yovel, and Nachum Ulanovsky. "Spatial Cognition in Bats and Rats: From Sensory Acquisition to Multiscale Maps and Navigation." *Nature Reviews Neuroscience* 16, no. 2 (February 2015): 94–108.
- Gleitman, Lila, and Anna Papafragou. "Language and Thought." In *Cambridge Handbook of Thinking and Reasoning*, ed. Keith Holyoak and Robert G. Morrison, 633–61. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- Glickman, Neil, Charlene Crump, and Steve Hamerdinger. "Language Deprivation Is a Game Changer for the Clinical Specialty of Deaf Mental Health." *JADARA* 54, no. 1 (2020): 54–89.
- Good, Irving John. "Speculations Concerning the First Ultraintelligent Machine." In *Advances in Computers*, 31–88. Amsterdam: Elsevier, 1966.
- Greshko, Michael, and National Geographic Staff. "What Are Mass Extinctions, and What Causes Them?" *National Geographic*, September 26, 2019. <https://www.nationalgeographic.com/science/article/mass-extinction>.
- Gruber, Matthias J., Maureen Ritchey, Shao–Fang Wang, Manoj K. Doss, and Charan Ranganath. "Post–Learning Hippocampal Dynamics Promote Preferential Retention of Rewarding Events." *Neuron* 89, no. 5 (March 2016): 1110–20.
- Gulati, Sanjay. "Language Deprivation Syndrome." In *Language Deprivation and Deaf Mental Health*, ed. Neil S. Glickman and Wyatte C. Hall, 24–53. London: Routledge, 2018.

- Gunz, Philipp, Amanda K. Tilot, Katharina Wittfeld, Alexander Teumer, Chin Y. Shapland, Theo G. M. van Erp, Michael Dannemann, et al. "Neandertal Introgression Sheds Light on Modern Human Endocranial Globularity." *Current Biology* 29, no. 1 (January 2019): 120–27.
- Gupta, Anoopum S., Matthijs A. A. van der Meer, David S. Touretzky, and A. David Redish. "Hippocampal Replay Is Not a Simple Function of Experience." *Neuron* 65, no. 5 (March 2010): 695–705.
- Gusnard, Debra A., and Marcus E. Raichle. "Searching for a Baseline: Functional Imaging and the Resting Human Brain." *Nature Reviews Neuroscience* 2, no. 10 (October 2001): 685–94.
- Hafting, Torkel, Marianne Fyhn, Sturla Molden, May-Britt Moser, and Edward I. Moser. "Microstructure of a Spatial Map in the Entorhinal Cortex." *Nature* 436, no. 7052 (August 2005): 801–6.
- Hagoort, Peter. "MUC (Memory, Unification, Control) and Beyond." *Frontiers in Psychology* 4 (2013): 416.
- Hall, Matthew L., Inge-Marie Eigsti, Heather Bortfeld, and Diane Lillo-Martin. "Auditory Deprivation Does Not Impair Executive Function, but Language Deprivation Might: Evidence from a Parent-Report Measure in Deaf Native Signing Children." *The Journal of Deaf Studies and Deaf Education* 22, no. 1 (2017): 9–21.
- Hall, Wyatte C., Leonard L. Levin, and Melissa L. Anderson. "Language Deprivation Syndrome: A Possible Neurodevelopmental Disorder with Sociocultural Origins." *Social Psychiatry and Psychiatric Epidemiology* 52, no. 6 (2017): 761–76.
- Harari, Yuval Noah. *Sapiens: A Brief History of Humankind*. Trans. Hyun-Wook Cho. Paju, South Korea: Gimm-Young, 2015.
- Hargreaves, Eric L., Geeta Rao, Inah Lee, and James J. Knierim. "Major Dissociation between Medial and Lateral Entorhinal Input to Dorsal Hippocampus." *Science* 308, no. 5729 (June 2005): 1792–94.

- Harlow, John M. "Recovery from the Passage of an Iron Bar through the Head." *Publication of the Massachusetts Medical Society* 2, no. 3 (1868): 329–47.
- Hassabis, Demis, Dharshan Kumaran, Seralynne D. Vann, and Eleanor A. Maguire. "Patients with Hippocampal Amnesia Cannot Imagine New Experiences." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104, no. 5 (January 2007): 1726–31.
- Hauser, Marc D., Noam Chomsky, and W. Tecumseh Fitch. "The Faculty of Language: What Is It, Who Has It, and How Did It Evolve?" *Science* 298, no. 5598 (2002): 1569–79.
- Hauser, Marc D., Charles Yang, Robert C. Berwick, Ian Tattersall, Michael J. Ryan, Jeffrey Watumull, Noam Chomsky, and Richard C. Lewontin. "The Mystery of Language Evolution." *Frontiers in Psychology* (2014): 401.
- Hebb, Donald Olding. *The Organization of Behavior: A Psychological Theory*. New York: Wiley, 1949.
- Heide, Michael, Christiane Haffner, Ayako Murayama, Yoko Kurotaki, Haruka Shinohara, Hideyuki Okano, Erika Sasaki, and Wieland B. Huttner. "Human-Specific *ARHGAP11B* Increases Size and Folding of Primate Neocortex in the Fetal Marmoset." *Science* 369, no. 6503 (July 2020): 546–50.
- Hewes, Gordon W. "Primate Communication and the Gestural Origin of Language." *Current Anthropology* 14, no. 1/2 (February–April 1973): 5–24.
- Herculano-Houzel, Suzana. "The Human Brain in Numbers: A Linearly Scaled-Up Primate Brain." *Frontiers in Human Neuroscience* 3 (2009): 31.
- Herculano-Houzel, Suzana, Kamilla Avelino-de-Souza, Kleber Neves, Jairo Porfirio, Debora Messeder, Larissa Mattos Feijo, Jose Maldonado,

- and Paul R. Manger. “The Elephant Brain in Numbers.” *Frontiers in Neuroanatomy* 8 (2014): 46.
- Herold, Christina, Vincent J. Coppola, and Verner P. Bingman. “The Maturation of Research into the Avian Hippocampal Formation: Recent Discoveries from One of Nature’s Foremost Navigators.” *Hippocampus* 25, no. 11 (November 2015): 1193–211.
- Hetherington, Renée, and Robert G. B. Reid. *The Climate Connection: Climate Change and Modern Human Evolution*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- Higgins, Cameron, Yunzhe Liu, Diego Vidaurre, Zeb Kurth-Nelson, Ray Dolan, Timothy Behrens, and Mark Woolrich. “Replay Bursts in Humans Coincide with Activation of the Default Mode and Parietal Alpha Networks.” *Neuron* 109, no. 5 (March 2021): 882–93.e7.
- Hockett, Charles F. “Animal “Languages” and Human Language.” *Human Biology* 31, no. 1 (1959): 32–39.
- Hockett, Charles F., and Charles D. Hockett. “The Origin of Speech.” *Scientific American* 203, no. 3 (1960): 88–97.
- Hofman, Michel A. “Evolution of the Human Brain: When Bigger Is Better.” *Frontiers in Neuroanatomy* 8 (2014): 15.
- Howe, Mark L., and Lauren M. Knott. “The Fallibility of Memory in Judicial Processes: Lessons from the Past and Their Modern Consequences.” *Memory* 23, no. 5 (2015): 633–56.
- Hublin, Jean-Jacques, Abdelouahed Ben-Ncer, Shara E. Bailey, Sarah E. Freidline, Simon Neubauer, Matthew M. Skinner, Inga Bergmann, et al. “New Fossils from Jebel Irhoud, Morocco and the Pan-African Origin of *Homo sapiens*.” *Nature* 546, no. 7657 (June 2017): 289–92.
- Hussein, Basel A.-S. “The Sapir-Whorf Hypothesis Today.” *Theory and Practice in Language Studies* 2, no. 3 (March 2012): 642–46.

- Hyman, James M., Liya Ma, Emili Balaguer-Ballester, Daniel Durstewitz, and Jeremy K. Seamans. "Contextual Encoding by Ensembles of Medial Prefrontal Cortex Neurons." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109, no. 13 (March 2012): 5086–91.
- Iacoboni, Marco, Roger P. Woods, Marcel Brass, Harold Bekkering, John C. Mazziotta, and Giacomo Rizzolatti. "Cortical Mechanisms of Human Imitation." *Science* 286, no. 5449 (1999): 2526–28.
- Ivry, Richard B., and Juliana V. Baldo. "Is the Cerebellum Involved in Learning and Cognition?" *Current Opinion in Neurobiology* 2, no. 2 (1992): 212–16.
- Jabr, Ferris. "How Humans Evolved Supersize Brains." *Quanta Magazine*, November 10, 2015, <https://www.quantamagazine.org/how-humans-evolved-supersize-brains-20151110/>.
- Jackendoff, Ray. "How Did Language Begin?" Linguistic Society of America. Accessed October 20, 2022. <https://www.linguisticsociety.org/resource/faq-how-did-language-begin>.
- Jauk, Emanuel, Aljoscha C. Neubauer, Beate Dunst, Andreas Fink, and Mathias Benedek. "Gray Matter Correlates of Creative Potential: A Latent Variable Voxel-Based Morphometry Study." *Neuroimage* 111 (May 1, 2015): 312–20.
- Jay, Thérèse M., Jacques Glowinski, and Anne-Marie Thierry. "Selectivity of the Hippocampal Projection to the Prelimbic Area of the Prefrontal Cortex in the Rat." *Brain Research* 505, no. 2 (December 1989): 337–40.
- Jeong, Yeongseok, Namjung Huh, Joonyeup Lee, Injae Yun, Jong W. Lee, Inah Lee, and Min W. Jung. "Role of the Hippocampal CA1 Region in Incremental Value Learning." *Scientific Reports* 8, no. 1 (June 2018): 9870.

- Ji, Daoyun, and Matthew A. Wilson. "Coordinated Memory Replay in the Visual Cortex and Hippocampus During Sleep." *Nature Neuroscience* 10, no. 1 (January 2007): 100–7.
- Jogye Order Missionary Office. "What Is Koan Contemplation Zen?" *Buddhist Newspaper* 2296, January 2007. <http://www.ibulgyo.com/news/articleView.html?idxno=78486>.
- Joseph, R. Gabriel. *Frontal Lobes: Neuroscience, Neuropsychology, Neuropsychiatry*. Cambridge, MA: Cosmology, 2011.
- Jung, Min W., Hyunjung Lee, Yeongseok Jeong, Jong W. Lee, and Inah Lee. "Remembering Rewarding Futures: A Simulation–Selection Model of the Hippocampus." *Hippocampus* 28, no. 12 (December 2018): 913–30.
- Jung, Rex E., Brittany S. Mead, Jessica Carrasco, and Rane A. Flores. "The Structure of Creative Cognition in the Human Brain." *Frontiers in Human Neuroscience* 7 (2013): 330.
- Jung, Rex E., and Oshin Vartanian. *The Cambridge Handbook of the Neuroscience of Creativity*. Cambridge: Cambridge University Press, 2018.
- Kaas, Jon H. "The Origin and Evolution of Neocortex: From Early Mammals to Modern Humans." *Progress in Brain Research* 250 (2019): 61–81.
- Kaas, Jon H., and Mary K. L. Baldwin. "The Evolution of the Pulvinar Complex in Primates and Its Role in the Dorsal and Ventral Streams of Cortical Processing." *Vision* 4, no. 1 (December 2019): 3.
- Kant, Immanuel. *Critique of Pure Reason*. Ed. Paul Guyer and Allen W. Wood. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- Kesner, Raymond P., and John C. Churchwell. "An Analysis of Rat Prefrontal Cortex in Mediating Executive Function." *Neurobiology of Learning and Memory* 96, no. 3 (October 2011): 417–31.

- Kesner, Raymond P. "A Behavioral Analysis of Dentate Gyrus Function." *Progress in Brain Research* 163 (2007): 567–76.
- Kim, Gwangsu, Jaeson Jang, Seungdae Baek, Min Song, and Se-Bum Paik. "Visual Number Sense in Untrained Deep Neural Networks." *Science Advances* 7, no. 1 (2021): eabd6127.
- King, Maedbh, Carlos R. Hernandez-Castillo, Russell A. Poldrack, Richard B. Ivry, and Jörn Diedrichsen. "Functional Boundaries in the Human Cerebellum Revealed by a Multi-Domain Task Battery." *Nature Neuroscience* 22, no. 8 (2019): 1371–78.
- Kishore, Lalit. "Kaon Parables for Awakening Intuitive Thinking in Zen Buddhism: An Example." Speakingtree.in, April 14, 2023. <https://www.speakingtree.in/blog/kaon-parables-for-awakening-intuitive-thinking-in-zen-buddhism-an-example>.
- Klein, Richard G. "Out of Africa and the Evolution of Human Behavior." *Evolutionary Anthropology: Issues, News, and Reviews* 17, no. 6 (2008): 267–81.
- Knierim, James J., Inah Lee, and Eric L. Hargreaves. "Hippocampal Place Cells: Parallel Input Streams, Subregional Processing, and Implications for Episodic Memory." *Hippocampus* 16, no. 9 (2006): 755–64.
- Knierim, James J., and Joshua Neunuebel. "Tracking the Flow of Hippocampal Computation: Pattern Separation, Pattern Completion, and Attractor Dynamics." *Neurobiology of Learning and Memory* 129 (March 2016): 38–49.
- Knight, Chris. "The Origins of Symbolic Culture." Chap. 14 in *Homo Novus—A Human Without Illusions*, ed. Ulrich J. Frey, Charlotte Störmer, and Kai P. Willführ, 193–211. Berlin: Springer, 2010.
- \_\_\_\_\_. "Ritual/Speech Coevolution: A Solution to the Problem of Deception." Chap. 5 in *Approaches to the Evolution of Language*, ed. James R.

- Hurford, Michael Studdert-Kennedy, and Chris Knight, 68–91. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- Knudsen, Eric B., and Joni D. Wallis. “Hippocampal Neurons Construct a Map of an Abstract Value Space.” *Cell* 184, no. 18 (September 2021): 4640–50.e10.
- Kochiyama, Takanori, Naomichi Ogihara, Hiroki C. Tanabe, Osamu Kondo, Hideki Amano, Kunihiko Hasegawa, Hiromasa Suzuki, et al. “Reconstructing the Neanderthal Brain Using Computational Anatomy.” *Scientific Reports* 8, no. 1 (April 2018): 6296.
- Kohler, Evelyne, Christian Keysers, M. Alessandra Umiltà, Leonardo Fogassi, Vittorio Gallese, and Giacomo Rizzolatti. “Hearing Sounds, Understanding Actions: Action Representation in Mirror Neurons.” *Science* 297, no. 5582 (2002): 846–48.
- Konnikova, Maria. “The Man Who Couldn’t Speak and How He Revolutionized Psychology.” *Scientific American*, February 3, 2018. <https://blogs.scientificamerican.com/literally-psyched/the-man-who-couldnt-speakand-how-he-revolutionized-psychology/>.
- Krause, Johannes, Carles Lalueza-Fox, Ludovic Orlando, Wolfgang Enard, Richard E. Green, Hernán A. Burbano, Jean-Jacques Hublin, et al. “The Derived *FOXP2* Variant of Modern Humans Was Shared with Neanderthals.” *Current Biology* 17, no. 21 (2007): 1908–12.
- Krupenye, Christopher, and Josep Call. “Theory of Mind in Animals: Current and Future Directions.” *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science* 10, no. 6 (November 2019): e1503.
- Kuo, Gioietta. “When Fossil Fuels Run out, What Then?” MAHB, May 23, 2019. <https://mahb.stanford.edu/library-item/fossil-fuels-run/>.
- Kurth-Nelson, Zeb, Marcos Economides, Raymond J. Dolan, and Peter Dayan. “Fast Sequences of Non-Spatial State Representations in Humans.” *Neuron* 91, no. 1 (July 6, 2016): 194–204.

- Kurzweil, Ray. *The Singularity Is Near: When Humans Transcend Biology*. New York: Penguin, 2005.
- Lage, Caio A., De Wet Wolmarans, and Daniel C. Mograbi. "An Evolutionary View of Self-Awareness." *Behavioural Processes* 194 (January 2022): 104543.
- Lai, Cecilia S. L., Simon E. Fisher, Jane A. Hurst, Faraneh Vargha-Khadem, and Anthony P. Monaco. "A Forkhead-Domain Gene Is Mutated in a Severe Speech and Language Disorder." *Nature* 413, no. 6855 (2001): 519–23.
- Lanczik, Mario, and G. Keil. "Carl Wernicke's Localization Theory and Its Significance for the Development of Scientific Psychiatry." *History of Psychiatry* 2, no. 6 (1991): 171–80.
- Langland-Hassan, Peter, Frank R. Faries, Maxwell Gatyas, Aimee Dietz, and Michael J. Richardson. "Assessing Abstract Thought and Its Relation to Language with a New Nonverbal Paradigm: Evidence from Aphasia." *Cognition* 211 (2021): 104622.
- Langland-Hassan, Peter, Christopher Gauker, Michael J. Richardson, Aimee Dietz, and Frank R. Faries. "Metacognitive Deficits in Categorization Tasks in a Population with Impaired Inner Speech." *Acta Psychologica* 181 (2017): 62–74.
- Le, Quoc V., Marc'Aurelio Ranzato, Rajat Monga, Matthieu Devin, Kai Chen, Greg S. Corrado, Jeff Dean, and Andrew Y. Ng. "Building High-Level Features Using Large Scale Unsupervised Learning." Paper presented at the Proceedings of the 29th International Conference on Machine Learning, 2012. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1112.6209>.
- LeCun, Yann, Yoshua Bengio, and Geoffrey Hinton. "Deep Learning." *Nature* 521, no. 7553 (May 2015): 436–44.

- Lee, Albert K., and Matthew A. Wilson. “Memory of Sequential Experience in the Hippocampus During Slow Wave Sleep.” *Neuron* 36, no. 6 (December 2002): 1183–94.
- Lee, Daeyeol, Hyojung Seo, and Min W. Jung. “Neural Basis of Reinforcement Learning and Decision Making.” *Annual Review of Neuroscience* 35 (2012): 287–308.
- Lee, Hyunjung, Jeong–Wook Ghim, Hoseok Kim, Daeyeol Lee, and Min W. Jung. “Hippocampal Neural Correlates for Values of Experienced Events.” *Journal of Neuroscience* 32, no. 43 (October 2012): 15053–65.
- Lee, Jong W., and Min W. Jung. “Separation or Binding? Role of the Dentate Gyrus in Hippocampal Mnemonic Processing.” *Neuroscience & Biobehavioral Reviews* 75 (April 2017): 183–94.
- Lee, Sung–Hyun, Namjung Huh, Jong W. Lee, Jeong–Wook Ghim, Inah Lee, and Min W. Jung. “Neural Signals Related to Outcome Evaluation Are Stronger in CA1 Than CA3.” *Frontiers in Neural Circuits* 11 (2017): 40.
- Lehr, Andrew B., Arvind Kumar, Christian Tetzlaff, Torkel Hafting, Marianne Fyhn, and Tristan M. Stober. “CA2 Beyond Social Memory: Evidence for a Fundamental Role in Hippocampal Information Processing.” *Neuroscience & Biobehavioral Reviews* 126 (July 2021): 398–412.
- Levy, William B. “A Sequence Predicting CA3 Is a Flexible Associator That Learns and Uses Context to Solve Hippocampal–Like Tasks.” *Hippocampus* 6, no. 6 (1996): 579–90.
- Liu, Anli A., Simon Henin, Saman Abbaspoor, Anatol Bragin, Elizabeth A. Buffalo, Jordan S. Farrell, David J. Foster, et al. “A Consensus Statement on Detection of Hippocampal Sharp Wave Ripples and Differentiation from Other Fast Oscillations.” *Nature Communications* 13 (2022): 6000.

- Liu, Yunzhe, Raymond J. Dolan, Zeb Kurth-Nelson, and Timothy E. J. Behrens. "Human Replay Spontaneously Reorganizes Experience." *Cell* 178, no. 3 (July 2019): 640–52.e14.
- Loftus, Elizabeth F., and Katherine Ketcham. "Truth or Invention: Exploring the Repressed Memory Syndrome; Excerpt from 'The Myth of Repressed Memory.'" *Cosmopolitan*, April 1995. <https://staff.washington.edu/eloftus/Articles/Cosmo.html>.
- Loftus, Elizabeth F. "Planting Misinformation in the Human Mind: A 30-Year Investigation of the Malleability of Memory." *Learning & Memory* 12, no. 4 (2005): 361–66.
- Loftus, Elizabeth F., and Jacqueline E. Pickrell. "The Formation of False Memories." *Psychiatric Annals* 25, no. 12 (December 1995): 720–25.
- Logothetis, Nikos K., Oxana Eschenko, Yusuke Murayama, Mark Augath, Thomas Steudel, Henry C. Evrard, Michel Besserve, and Axel Oeltermann. "Hippocampal-Cortical Interaction During Periods of Subcortical Silence." *Nature* 491, no. 7425 (November 2012): 547–53.
- Louie, Kenway, and Matthew A. Wilson. "Temporally Structured Replay of Awake Hippocampal Ensemble Activity During Rapid Eye Movement Sleep." *Neuron* 29, no. 1 (January 2001): 145–56.
- Lundervold, Alexander S., and Arvid Lundervold. "An Overview of Deep Learning in Medical Imaging Focusing on MRI." *Zeitschrift für Medizinische Physik* 29, no. 2 (May 2019): 102–27.
- Lupyan, Gary, and Bodo Winter. "Language Is More Abstract Than You Think, or, Why Aren't Languages More Iconic?" *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 373, no. 1752 (2018): 20170137.
- Malik, Ruchi, Yi Li, Selin Schamiloglu, and Vikass S. Sohal. "Top-Down Control of Hippocampal Signal-to-Noise by Prefrontal Long-Range Inhibition." *Cell* 185, no. 9 (April 2022): 1602–17.

- Manns, Joseph R., and Howard Eichenbaum. "Evolution of Declarative Memory." *Hippocampus* 16, no. 9 (2006): 795–808.
- Mansouri, Farshad A., David J. Freedman, and Mark J. Buckley. "Emergence of Abstract Rules in the Primate Brain." *Nature Reviews Neuroscience* 21, no. 11 (November 2020): 595–610.
- Marr, David. "A Theory of Cerebellar Cortex." *Journal of Physiology* 202, no. 2 (June 1969): 437–70.
- \_\_\_\_\_. "Simple Memory: A Theory for Archicortex." *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 262, no. 841 (July 1971): 23–81.
- Mayberry, Rachel I., Jen-Kai Chen, Pamela Witcher, and Denise Klein. "Age of Acquisition Effects on the Functional Organization of Language in the Adult Brain." *Brain and Language* 119, no. 1 (2011): 16–29.
- McCarty, Maclyn. "Discovering Genes Are Made of DNA." *Nature* 421, no. 6921 (2003): 406.
- McClelland, James L., Bruce L. McNaughton, and Randall C. O'Reilly. "Why There Are Complementary Learning Systems in the Hippocampus and Neocortex: Insights from the Successes and Failures of Connectionist Models of Learning and Memory." *Psychology Review* 102, no. 3 (July 1995): 419–57.
- McCormick, Cornelia, Clive R. Rosenthal, Thomas D. Miller, and Eleanor A. Maguire. "Mind-Wandering in People with Hippocampal Damage." *Journal of Neuroscience* 38, no. 11 (March 2018): 2745–54.
- McDonald, Robert J., and Norman M. White. "A Triple Dissociation of Memory Systems: Hippocampus, Amygdala, and Dorsal Striatum." *Behavioral Neuroscience* 107, no. 1 (February 1993): 3–22.
- McDougall, Ian, Francis H. Brown, and John G. Fleagle. "Stratigraphic Placement and Age of Modern Humans from Kibish, Ethiopia." *Nature* 433, no. 7027 (2005): 733–36.

- McNaughton, Bruce L. "Neuronal Mechanisms for Spatial Computation and Information Storage." In *Neural Connections, Mental Computations*, ed. Lynn Nadel, Lynn A. Cooper, Peter W. Culicover, and Robert M. Harnish, 285–350. Cambridge, MA: MIT Press, 1989.
- Melton, Buckner F., Jr. "George Franklin Trial: 1990–91." Encyclopedia.com. Accessed June 28, 2022. <https://www.encyclopedia.com/law/law-magazines/george-franklin-trial-1990-91>.
- Menzel, Randolph. "The Waggle Dance as an Intended Flight: A Cognitive Perspective." *Insects* 10, no. 12 (November 2019): 424.
- Mitchell, Rebecca, Stephen Nicholas, and Brendan Boyle. "The Role of Openness to Cognitive Diversity and Group Processes in Knowledge Creation." *Small Group Research* 40, no. 5 (2009): 535–54.
- Morriss-Kay, Gillian M. "The Evolution of Human Artistic Creativity." *Journal of Anatomy* 216, no. 2 (February 2010): 158–76.
- Murphy, Patrick, Tim Shallice, Gail Robinson, Sarah E. MacPherson, Martha Turner, Katherine Woollett, Marco Bozzali, and Lisa Cipolotti. "Impairments in Proverb Interpretation Following Focal Frontal Lobe Lesions." *Neuropsychologia* 51, no. 11 (September 2013): 2075–86.
- Nadel, Lynn, Alexei Samsonovich, Lee Ryan, and Morris Moscovitch. "Multiple Trace Theory of Human Memory: Computational, Neuroimaging, and Neuropsychological Results." *Hippocampus* 10, no. 4 (2000): 352–68.
- Nelsen, Matthew P., William A. DiMichele, Shanan E. Peters, and C. Kevin Boyce. "Delayed Fungal Evolution Did Not Cause the Paleozoic Peak in Coal Production." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 113, no. 9 (March 2016): 2442–47.
- Neubauer, Simon, Jean-Jacques Hublin, and Philipp Gunz. "The Evolution of Modern Human Brain Shape." *Science Advances* 4, no. 1 (2018): eaao5961.

- News Staff. "Breakthrough of the Year: The Runners-Up." *Science* 318, no. 5858 (December 2007): 1844–49.
- Nieder, Andreas. "Supramodal Numerosity Selectivity of Neurons in Primate Prefrontal and Posterior Parietal Cortices." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109, no. 29 (July 2012): 11860–5.
- \_\_\_\_\_. "The Neuronal Code for Number." *Nature Reviews Neuroscience* 17, no. 6 (2016): 366–82.
- Nobelförsamlingen. "Press Release. The Nobel Prize in Physiology or Medicine 2014," October 6, 2014. <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/2014/press-release/>.
- O'Connell, Sanjida. "The Perils of Relying on Memory in Court." *Telegraph*, December 15, 2008. <https://www.telegraph.co.uk/technology/3778272/The-perils-of-relying-on-memory-in-court.html>.
- O'Keefe, John, and Jonathan Dostrovsky. "The Hippocampus as a Spatial Map: Preliminary Evidence from Unit Activity in the Freely-Moving Rat." *Brain Research* 34, no. 1 (November 1971): 171–5.
- O'Keefe, John, and Lynn Nadel. *The Hippocampus as a Cognitive Map*. Oxford: Clarendon, 1978.
- Ofshe, Richard J. "Inadvertent Hypnosis During Interrogation: False Confession Due to Dissociative State; Mis-identified Multiple Personality and the Satanic Cult Hypothesis." *International Journal of Clinical and Experimental Hypnosis* 40, no. 3 (1992): 125–56.
- Okasha, Samir. "Biological Altruism." *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Summer 2020 ed.), accessed November 29, 2022, <https://plato.stanford.edu/archives/sum2020/entries/altruism-biological/>.
- Olafsdottir, H. Freyja, Caswell Barry, Aman B. Saleem, Demis Hassabis, and Hugo J. Spiers. "Hippocampal Place Cells Construct Reward Related Sequences through Unexplored Space." *eLife* 4 (June 2015): e06063.

- Olio, Karen A., and William F. Cornell. "The Facade of Scientific Documentation: A Case Study of Richard Ofshe's Analysis of the Paul Ingram Case." *Psychology, Public Policy, and Law* 4, no. 4 (1998): 1182–97.
- Ovando-Tellez, Marcela, Yoed N. Kenett, Mathias Benedek, Matthieu Bernard, Joan Belo, Benoit Beranger, Theophile Bieth, and Emmanuelle Volle. "Brain Connectivity-Based Prediction of Real-Life Creativity Is Mediated by Semantic Memory Structure." *Science Advances* 8, no. 5 (February 4, 2022): eabl4294.
- Packard, Mark G., and Barbara J. Knowlton. "Learning and Memory Functions of the Basal Ganglia." *Annual Review of Neuroscience* 25 (2002): 563–93.
- Padoa-Schioppa, Camillo, and Katherine E. Conen. "Orbitofrontal Cortex: A Neural Circuit for Economic Decisions." *Neuron* 96, no. 4 (November 2017): 736–54.
- Pagel, Mark. "Q&A: What Is Human Language, When Did It Evolve and Why Should We Care?" *BMC Biology* 15, no. 1 (July 2017): 64.
- Park, Alan J., Alexander Z. Harris, Kelly M. Martyniuk, Chia-Yuan Chang, Atheir I. Abbas, Daniel C. Lowes, Christoph Kellendonk, Joseph A. Gogos, and Joshua A. Gordon. "Reset of Hippocampal-Prefrontal Circuitry Facilitates Learning." *Nature* 591, no. 7851 (March 2021): 615–19.
- Park, Seongmin A., Douglas S. Miller, and Eric D. Boorman. "Inferences on a Multidimensional Social Hierarchy Use a Grid-Like Code." *Nature Neuroscience* 24, no. 9 (September 2021): 1292–301.
- Parloff, Roger. "Why Deep Learning Is Suddenly Changing Your Life." *Fortune*, September 29, 2016. <https://fortune.com/longform/ai-artificial-intelligence-deep-machine-learning/>.

- Patterson, Francine, and Wendy Gordon. “The Case for the Personhood of Gorillas.” In *The Great Ape Project*, ed. Paola Cavalieri and Peter Singer, 58–77. New York: St. Martin’s, 1993.
- Patterson, Francine, and Wendy Gordon. “Twenty-Seven Years of Project Koko and Michael.” In *All Apes Great and Small*, 165–76. Berlin: Springer, 2002.
- Patzke, Nina, Muhammad A. Spocter, Karl A. Karlsson, Mads F. Bertelsen, Mark Haagenen, Richard Chawana, Sonja Streicher, et al. “In Contrast to Many Other Mammals, Cetaceans Have Relatively Small Hippocampi That Appear to Lack Adult Neurogenesis.” *Brain Structure and Function* 220, no. 1 (January 2015): 361–83.
- Paulus, Paul B., Jonali Baruah, and Jared B. Kenworthy. “Enhancing Collaborative Ideation in Organizations.” *Frontiers in Psychology* 9 (2018): 2024.
- Payne, Hannah L., Galen F. Lynch, and Dmitriy Aronov. “Neural Representations of Space in the Hippocampus of a Food-Caching Bird.” *Science* 373, no. 6552 (July 2021): 343–48.
- Perlovsky, Leonid. “Language and Cognition—Joint Acquisition, Dual Hierarchy, and Emotional Prosody.” *Frontiers in Behavioral Neuroscience* 7 (2013): 123.
- Pezzulo, Giovanni, Matthijs A. A. van der Meer, Carien S. Lansink, and Cyriel M. A. Pennartz. “Internally Generated Sequences in Learning and Executing Goal-Directed Behavior.” *Trends in Cognitive Sciences* 18, no. 12 (December 2014): 647–57.
- Pfeiffer, Brad E., and David J. Foster. “Hippocampal Place-Cell Sequences Depict Future Paths to Remembered Goals.” *Nature* 497, no. 7447 (May 2013): 74–79.

- Pinker, Steven. "Language as an Adaptation to the Cognitive Niche." Chap. 2 in *Language Evolution*, ed. Morten H. Christiansen and Simon Kirby, 16–37. Oxford: Oxford University Press, 2003.
- Poepfel, David, Karen Emmorey, Gregory Hickok, and Liina Pylkkanen. "Towards a New Neurobiology of Language." *Journal of Neuroscience* 32, no. 41 (October 2012): 14125–31.
- Powell, Adam, Stephen Shennan, and Mark G. Thomas. "Late Pleistocene Demography and the Appearance of Modern Human Behavior." *Science* 324, no. 5932 (June 2009): 1298–301.
- Pullum, Geoffrey K. "Koko Is Dead, but the Myth of Her Linguistic Skills Lives On." *The Chronicle of Higher Education*, June 27, 2018, <https://www.chronicle.com/blogs/linguafranca/koko-is-dead-but-the-myth-of-her-linguistic-skills-lives-on>.
- Quiroga, Rodrigo Q. "Concept Cells: The Building Blocks of Declarative Memory Functions." *Nature Reviews Neuroscience* 13, no. 8 (July 2012): 587–97.
- Quiroga, Rodrigo Q., Leila Reddy, Gabriel Kreiman, Christof Koch, and Itzhak Fried. "Invariant Visual Representation by Single Neurons in the Human Brain." *Nature* 435, no. 7045 (June 2005): 1102–7.
- Raichle, Marcus E., Ann Mary MacLeod, Abraham Z. Snyder, William J. Powers, Debra A. Gusnard, and Gordon L. Shulman. "A Default Mode of Brain Function." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 98, no. 2 (January 2001): 676–82.
- Rajasethupathy, Priyamvada, Sethuraman Sankaran, James H. Marshel, Christina K. Kim, Emily Ferenczi, Soo Y. Lee, Andre Berndt, et al. "Projections from Neocortex Mediate Top-Down Control of Memory Retrieval." *Nature* 526, no. 7575 (October 2015): 653–9.

- Ramirez, Steve, Xu Liu, Pei-Ann Lin, Junghyup Suh, Michele Pignatelli, Roger L. Redondo, Tomás J. Ryan, et al. “Creating a False Memory in the Hippocampus.” *Science* 341, no. 6144 (July 2013): 387–91.
- Rappaport, Roy A. *Ritual and Religion in the Making of Humanity*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- Reinert, Sandra, Mark Hübener, Tobias Bonhoeffer, and Pieter M. Goltstein. “Mouse Prefrontal Cortex Represents Learned Rules for Categorization.” *Nature* 593, no. 7859 (May 2021): 411–17.
- Rescorla, Michael. “The Language of Thought Hypothesis.” *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Summer 2019 Edition). Accessed November 11, 2022. <https://plato.stanford.edu/archives/sum2019/entries/language-thought/>.
- Rey, Hernan G., Belen Gori, Fernando J. Chaure, Santiago Collavini, Alejandro O. Blenkmann, Pablo Seoane, Eduardo Seoane, Silvia Kochen, and Rodrigo Q. Quiroga. “Single Neuron Coding of Identity in the Human Hippocampal Formation.” *Current Biology* 30, no. 6 (March 2020): 1152–59 e3.
- Rich, Erin L., and Matthew Shapiro. “Rat Prefrontal Cortical Neurons Selectively Code Strategy Switches.” *Journal of Neuroscience* 29, no. 22 (June 2009): 7208–19.
- Riel-Salvatore, Julien, and Claudine Gravel-Miguel. “Upper Palaeolithic Mortuary Practices in Eurasia: A Critical Look at the Burial Record.” In *The Oxford Handbook of the Archaeology of Death and Burial*, ed. Liv N. Stutz and Sarah Tarlow, 303–46. Oxford: Oxford University Press, 2013.
- Ritchie, Hannah, and Max Roser. “Energy.” Ourworldindata.org. Accessed June 21, 2022. <https://ourworldindata.org/energy>.
- \_\_\_\_\_. “Extinctions.” Ourworldindata.org. Accessed June 21, 2022. <https://ourworldindata.org/extinctions>.

- Rizzolatti, Giacomo, and Michael A. Arbib. "Language within Our Grasp." *Trends in Neurosciences* 21, no. 5 (1998): 188–94. [https://doi.org/10.1016/S0166-2236\(98\)01260-0](https://doi.org/10.1016/S0166-2236(98)01260-0).
- Rizzolatti, Giacomo, and Laila Craighero. "Language and Mirror Neurons." In *Oxford Handbook of Psycholinguistics*, ed. M. Gareth Gaskell, 771–85. Oxford: Oxford University Press, 2007.
- \_\_\_\_\_. "The Mirror-Neuron System." *Annual Review of Neuroscience* 27 (2004): 169–92. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.27.070203.144230>.
- Rizzolatti, Giacomo, Luciano Fadiga, Vittorio Gallese, and Leonardo Fogassi. "Premotor Cortex and the Recognition of Motor Actions." *Cognitive Brain Research* 3, no. 2 (1996): 131–41.
- Roberts, Reece P., and Donna Rose Addis. "A Common Mode of Processing Governing Divergent Thinking and Future Imagination." In *The Cambridge Handbook of the Neuroscience of Creativity*, ed. Rex E. Jung and Oshin Vartanian, 211–30. Cambridge: Cambridge University Press, 2018.
- Roediger, Henry L., and Kathleen B. McDermott. "Creating False Memories: Remembering Words Not Presented in Lists." *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 21, no. 4 (1995): 803–14.
- Rolls, Edmund T. "Functions of Neuronal Networks in the Hippocampus and Cerebral Cortex in Memory." In *Models of Brain Function*, ed. Rodney M. J. Cotterill, 15–33. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.
- Royal Entomological Society. "Facts and Figures." *Understanding Insects*, n.d., <https://www.royensoc.co.uk/facts-and-figures>.
- Russell, Bertrand. *Human Knowledge: Its Scope and Limits*. London: Routledge, 2009.
- Ryle, Gilbert. *The Concept of Mind*. New York: Barnes and Noble, 1949.

- Samhita, Laasya, and Hans J. Gross. “The “Clever Hans Phenomenon” Revisited.” *Communicative & Integrative Biology* 6, no. 6 (November 2013): e27122.
- Sawyer, R. Keith. *Explaining Creativity: The Science of Human Innovation*. New York: Oxford University Press, 2006.
- Schacter, Daniel L. “Constructive Memory: Past and Future.” *Dialogues in Clinical Neuroscience* 14, no. 1 (March 2012): 7–18.
- Schacter, Daniel L., and Donna Rose Addis. “The Cognitive Neuroscience of Constructive Memory: Remembering the Past and Imagining the Future.” *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 362, no. 1481 (2007): 773–86.
- Schlaggar, Bradley L., and Dennis D. O’Leary. “Potential of Visual Cortex to Develop an Array of Functional Units Unique to Somatosensory Cortex.” *Science* 252, no. 5012 (June 1991): 1556–60.
- Schuck, Nicolas W., and Yael Niv. “Sequential Replay of Nonspatial Task States in the Human Hippocampus.” *Science* 364, no. 6447 (June 2019).
- Schultz, Wolfram, Paul Apicella, Tomas Ljungberg, Ranulfo Romo, and Eugenio Scarnati. “Reward-Related Activity in the Monkey Striatum and Substantia Nigra.” *Progress in Brain Research* 99 (1993): 227–35.
- Schultz, Wolfram, Peter Dayan, and P. Read Montague. “A Neural Substrate of Prediction and Reward.” *Science* 275, no. 5306 (March 1997): 1593–99.
- Schulz, Hannes, and Sven Behnke. “Deep Learning: Layer-Wise Learning of Feature Hierarchies.” *Künstliche Intelligenz* 26, no. 4 (2012): 357–63.
- Scoville, William B., and Brenda Milner. “Loss of Recent Memory After Bilateral Hippocampal Lesions.” *Journal of Neurology and Neurosurgical Psychiatry* 20, no. 1 (February 1957): 11–21.
- Seger, Carol A., and Earl K. Miller. “Category Learning in the Brain.” *Annual Review of Neuroscience* 33 (2010): 203–19.

- Sellwood, Bruce W., and Paul J. Valdes. "Jurassic Climates." *Proceedings of the Geologists' Association* 119, no. 1 (2008): 5–17.
- Shallice, Tim, and Lisa Cipolotti. "The Prefrontal Cortex and Neurological Impairments of Active Thought." *Annual Review of Psychology* 69 (January 2018): 157–80.
- Shettleworth, Sara J. "Spatial Memory in Food-Storing Birds." *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 329, no. 1253 (1990): 143–51.
- Shettleworth, Sara J. *Cognition, Evolution, and Behavior*, 2nd ed. Oxford: Oxford University Press, 2010.
- Shin, Eun J., Yunsil Jang, Soyoun Kim, Hoseok Kim, Xinying Cai, Hyunjung Lee, Jung H. Sul, et al. "Robust and Distributed Neural Representation of Action Values." *eLife* 10 (April 2021): e53045.
- Siegal, Michael, and Rosemary Varley. "Aphasia, Language, and Theory of Mind." *Social Neuroscience* 1, no. 3–4 (2006): 167–74.
- Siegel, Jennifer J., Douglas Nitz, and Verner P. Bingman. "Spatial-Specificity of Single-Units in the Hippocampal Formation of Freely Moving Homing Pigeons." *Hippocampus* 15, no. 1 (2005): 26–40.
- \_\_\_\_\_. "Lateralized Functional Components of Spatial Cognition in the Avian Hippocampal Formation: Evidence from Single-Unit Recordings in Freely Moving Homing Pigeons." *Hippocampus* 16, no. 2 (2006): 125–40.
- Siegle, Joshua H., Xiaoxuan Jia, Séverine Durand, Sam Gale, Corbett Bennett, Nile Graddis, Gregory Heller, et al. "Survey of Spiking in the Mouse Visual System Reveals Functional Hierarchy." *Nature* 592, no. 7852 (April 2021): 86–92.
- Silver, David, Satinder Singh, Doina Precup, and Richard S. Sutton. "Reward Is Enough." *Artificial Intelligence* 299 (2021): 103535.

- Simonton, Dean Keith. "Creative Ideas and the Creative Process: Good News and Bad News for the Neuroscience of Creativity." In *The Cambridge Handbook of the Neuroscience of Creativity*, ed. Rex E. Jung and Oshin Vartanian, 9–18. Cambridge: Cambridge University Press, 2018.
- Singer, Annabelle C., and Loren M. Frank. "Rewarded Outcomes Enhance Reactivation of Experience in the Hippocampus." *Neuron* 64, no. 6 (December 2009): 910–21.
- Skaggs, William E., and Bruce L. McNaughton. "Replay of Neuronal Firing Sequences in Rat Hippocampus During Sleep Following Spatial Experience." *Science* 271, no. 5257 (March 1996): 1870–73.
- Slater, Lauren. *Opening Skinner's Box: Great Psychological Experiments of the Twentieth Century*. New York: Norton, 2005.
- Silwa, Julia, Aurélie Planté, Jean-René Duhamel, and Sylvia Wirth. "Independent Neuronal Representation of Facial and Vocal Identity in the Monkey Hippocampus and Inferotemporal Cortex." *Cereb Cortex* 26, no. 3 (March 2016): 950–66.
- Slobodchikoff, Con N., Andrea Paseka, and Jennifer L. Verdolin. "Prairie Dog Alarm Calls Encode Labels about Predator Colors." *Animal Cognition* 12, no. 3 (May 2009): 435–39.
- Smithsonian. "Numbers of Insects (Species and Individuals)." Buginfo, Information Sheet Number 18, 1996, <https://www.si.edu/spotlight/buginfo/bugnos>.
- Squire, Larry R. "The Legacy of Patient H. M. for Neuroscience." *Neuron* 61, no. 1 (January 2019): 6.
- Squire, Larry R., and Pablo Alvarez. "Retrograde Amnesia and Memory Consolidation: A Neurobiological Perspective." *Current Opinions in Neurobiology* 5, no. 2 (April 1995): 169–77.

- Stella, Federico, Peter BaracsKay, Joseph O'Neill, and Jozsef Csicsvari. "Hippocampal Reactivation of Random Trajectories Resembling Brownian Diffusion." *Neuron* 102, no. 2 (April 2019): 450–61 e7.
- Stevens, T. A., and J. R. Krebs. "Retrieval of Stored Seeds by Marsh Tits *Parus Palustris* in the Field." *Ibis* 128, no. 4 (1986): 513–25.
- Stork, Nigel E. "How Many Species of Insects and Other Terrestrial Arthropods Are There on Earth?" *Annual Review of Entomology* 63 (2018): 31–45.
- Striedter, Georg F. "Evolution of the Hippocampus in Reptiles and Birds." *Journal of Comparative Neurology* 524, no. 3 (February 2016): 496–517.
- Sutton, Richard S., and Andrew G. Barto. *Reinforcement Learning: An Introduction*. Cambridge, MA: MIT Press, 1998.
- Sutton, Richard S. "Dyna, an Integrated Architecture for Learning, Planning, and Reacting." *ACM Sigart Bulletin* 2, no. 4 (1991): 160–63.
- Szpunar, Karl K., Jason M. Watson, and Kathleen B. McDermott. "Neural Substrates of Envisioning the Future." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104, no. 2 (January 2007): 642–7.
- Tait, David S., E. Alexander Chase, and Verity J. Brown. "Attentional Set-Shifting in Rodents: A Review of Behavioural Methods and Pharmacological Results." *Current Pharmaceutical Design* 20, no. 31 (2014): 5046–59.
- Tanaka, Saori C., Kenji Doya, Go Okada, Kazutaka Ueda, Yasumasa Okamoto, and Shigeto Yamawaki. "Prediction of Immediate and Future Rewards Differentially Recruits Cortico-Basal Ganglia Loops." *Nature Neuroscience* 7, no. 8 (August 2004): 887–93.
- Tanaka, Shoji, and Eiji Kirino. "Reorganization of the Thalamocortical Network in Musicians." *Brain Research* 1664 (June 2017): 48–54.

- Thayer, Amanda L., Alexandra Petruzzelli, and Caitlin E. McClurg. "Addressing the Paradox of the Team Innovation Process: A Review and Practical Considerations." *American Psychologist* 73, no. 4 (2018): 363–375.
- Thurman, Judith. "First Impressions: What Does the World's Oldest Art Say about Us?" *New Yorker*, June 16, 2008. <https://www.newyorker.com/magazine/2008/06/23/first-impressions>.
- Tierney, Jessica E., Jiang Zhu, Jonathan King, Steven B. Malevich, Gregory J. Hakim, and Christopher J. Poulsen. "Glacial Cooling and Climate Sensitivity Revisited." *Nature* 584, no. 7822 (2020): 569–73.
- Timmermann, Axel. "Quantifying the Potential Causes of Neanderthal Extinction: Abrupt Climate Change Versus Competition and Interbreeding." *Quaternary Science Reviews* 238 (2020).
- Tomasello, Michael, Malinda Carpenter, Josep Call, Tanya Behne, and Henrike Moll. "Understanding and Sharing Intentions: The Origins of Cultural Cognition." *Behavioral and Brain Sciences* 28, no. 5 (2005): 675–91.
- Tremblay, Sébastien, K. M. Sharika, and Michael L. Platt. "Social Decision-Making and the Brain: A Comparative Perspective." *Trends in Cognitive Sciences* 21, no. 4 (April 2017): 265–76.
- Tzakis, Nikolaos, and Matthew R. Holahan. "Social Memory and the Role of the Hippocampal CA2 Region." *Frontiers in Behavioral Neuroscience* 13 (2019): 233.
- Utevsky, Amanda V., David V. Smith, and Scott A. Huettel. "Precuneus Is a Functional Core of the Default-Mode Network." *Journal of Neuroscience* 34, no. 3 (January 2014): 932–40.
- Valladas, H el ene, Jean-Louis Reyss, Jean-Louis Joron, Georges Valladas, Ofer Bar-Yosef, and Bernard Vandermeersch. "Thermoluminescence

- Dating of Mousterian Troto-Cro-Magnon Remains from Israel and the Origin of Modern Man." *Nature* 331, no. 6157 (1988): 614–16.
- Van der Meer, Matthijs, Zeb Kurth-Nelson, and A. David Redish. "Information Processing in Decision-Making Systems." *Neuroscientist* 18, no. 4 (August 2012): 342–59.
- Van Essen, David C., Chad J. Donahue, and Matthew F. Glasser. "Development and Evolution of Cerebral and Cerebellar Cortex." *Brain, Behavior and Evolution* 91, no. 3 (2018): 158–69.
- Varley, Rosemary A., Nicolai J. C. Klessinger, Charles A. J. Romanowski, and Michael Siegal. "Agrammatic but Numerate." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 102, no. 9 (2005): 3519–24.
- Varley, Rosemary, and Michael Siegal. "Evidence for Cognition without Grammar from Causal Reasoning and 'Theory of Mind' in an Agrammatic Aphasic Patient." *Current Biology* 10, no. 12 (2000): 723–26.
- Vartanian, Oshin. "Neuroscience of Creativity." In *The Cambridge Handbook of Creativity*, ed. James C. Kaufman and Robert J. Sternberg, 148–72. Cambridge: Cambridge University Press, 2019.
- Wacewicz, Sławomir, and Przemysław Żywiczyński. "Language Evolution: Why Hockett's Design Features Are a Non-Starter." *Biosemiotics* 8, no. 1 (2015): 29–46.
- Wacks, Yehuda, and Aviv M. Weinstein. "Excessive Smartphone Use Is Associated with Health Problems in Adolescents and Young Adults." *Frontiers in Psychiatry* 12 (2021): 669042.
- Wade, Kimberley A., Maryanne Garry, J. Don Read, and D. Stephen Lindsay. "A Picture Is Worth a Thousand Lies: Using False Photographs to Create False Childhood Memories." *Psychonomic Bulletin & Review* 9, no. 3 (September 2002): 597–603.

- Wallace, Douglas C., Michael D. Brown, and Marie T. Lott. "Mitochondrial DNA Variation in Human Evolution and Disease." *Gene* 238, no. 1 (September 1999): 211–30.
- Wikenheiser, Andrew M., and Geoffrey Schoenbaum. "Over the River, through the Woods: Cognitive Maps in the Hippocampus and Orbitofrontal Cortex." *Nature Reviews Neuroscience* 17, no. 8 (August 2016): 513–23.
- Wikipedia. "Gilbert Ryle." Updated October, 2021. [https://en.wikipedia.org/wiki/Gilbert\\_Ryle](https://en.wikipedia.org/wiki/Gilbert_Ryle).
- \_\_\_\_\_. "Rodney Halbower." Updated April 27, 2022. [https://en.wikipedia.org/wiki/Rodney\\_Halbower](https://en.wikipedia.org/wiki/Rodney_Halbower).
- \_\_\_\_\_. "Thurston County Ritual Abuse Case." Updated December, 2021. [https://en.wikipedia.org/wiki/Thurston\\_County\\_ritual\\_abuse\\_case](https://en.wikipedia.org/wiki/Thurston_County_ritual_abuse_case).
- Wilde, Oscar. "The Critic as Artist." Accessed November 11, 2022. <https://celt.ucc.ie/published/E800003-007/text001.html>.
- Wiley, R. Haven. "Design Features of Language." In *Encyclopedia of Evolutionary Psychological Science*, 1919–31. Berlin: Springer, 2021.
- Willoughby, Pamela R. "Modern Human Behavior." In *Oxford Research Encyclopedia of Anthropology*. Published online May 29, 2020. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190854584.013.46>.
- Wittgenstein, Ludwig. *Tractatus Logico-Philosophicus*. Trans. C. K. Ogden. London: Routledge, 1981.
- Wright, Lawrence. "Remembering Satan—Part II. What Was Going On in Thurston County?" *New Yorker*, May 16, 1993. <https://www.newyorker.com/magazine/1993/05/24/remembering-satan-part-ii>.
- WWF. "Living Planet Report 2022—Building a Nature-Positive Society." WWF.ca, October 12, 2022. <https://wwf.ca/?s=Living+Planet+Report+2022&lang=en>.

- Xing, Lei, Agnieszka Kubik-Zahorodna, Takashi Namba, Anneline Pinson, Marta Florio, Jan Prochazka, Mihail Sarov, Radislav Sedlacek, and Wieland B. Huttner. "Expression of Human-Specific *ARHGAP11B* in Mice Leads to Neocortex Expansion and Increased Memory Flexibility." *EMBO Journal* 40, no. 13 (July 2021): e107093.
- Yang, Sunggu, Sungchil Yang, Thais Moreira, Gloria Hoffman, Greg C. Carlson, Kevin J. Bender, Bradley E. Alger, and Cha-Min Tang. "Interlaminar CA1 Network in the Hippocampus." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111, no. 35 (September 2014): 12919–24.
- Young, Paul J., Anna B. Harper, Chris Huntingford, Nigel D. Paul, Olaf Morgenstern, Paul A. Newman, Luke D. Oman, Sasha Madronich, and Rolando R. Garcia. "The Montreal Protocol Protects the Terrestrial Carbon Sink." *Nature* 596, no. 7872 (2021): 384–88.
- Zaidel, Dahlia W. "Art and Brain: The Relationship of Biology and Evolution to Art." *Progress in Brain Research* 204 (2013): 217–33.
- Zhou, Chunfang, and Lingling Luo. "Group Creativity in Learning Context: Understanding in a Social-Cultural Framework and Methodology." *Creative Education* 3, no. 4 (2012): 392–99.
- Zuidema, Willem, and Arie Verhagen. "What Are the Unique Design Features of Language? Formal Tools for Comparative Claims." *Adaptive Behavior* 18, no. 1 (2010): 48–65.

