خوارزميات الحيوان

أصل الابداع المحير في الغرائز التكوينية في الحيوانات



إريك كاسل

ترجمة: ضرغام الكيار

خوارزميات الحيوان

التطور وأصل الإبداع المحير في الغرائز التكوينية في الحيوانات



اريك كاسل

ترجمة: ضرغام الگيار



كاسل، اريك - مؤلف.

خوارزميات الحيوان: التطور واصل الابداع المحير في الغرائز التكوينية في الحيوانات / تأليف اريك كاسل ؛ ترجمة ضرغام الكيار. - الطبعة الاولى. - كربلاء، العراق : العتبة الحسينية المقدسة، قسم الشؤون الدينية، 2024 / 1446 للهجرة.

349 صفحة:ايضاحيات؛ 24 سم. - (العتبة الحسينية المقدسة ؛ 1539)، (قسم الشؤون الدينية ؛).

يتضمن ارجاعات ببليوجرافية.

Animal algorithms: evolution and the mysterious origin of ingenious instincts.

1. التطور (علم الأحياء). 2. التصميم الذكي (الغائية). 3. الغرائز. أ. الكيار، ضرغام - مترجم. ب. العنوان.

QH366.2 .C384 202

تمت الفهرسة قبل النشر في شعبة نظم المعلومات التابعة لقسم الشؤون الفكرية والثقافية في العتبة الحسينية المقدسة.

التصميم والاخراج الفني: محمد صاحب المعمار



الفصل الأول: عبقرية النظام في عالم الأقزام

"لقد انغمس علماء الحيوان في إنكارٍ متشدّد للدوافع والسلوكيات الهادفة لدى الحيوان -ناهيك عن الوعي الحيواني والقدرات الفكرية المعقدة- حتى أن آليات هذه السلوكيات ظلت مستبعدة ولا تخضع حتى لصياغة الفرضيات العلمية إلى وقت قريب للغاية. وربما يمثل هذا الأمر أكبر فجوة مفاهيمية تواجه علم السلوك التطوري في الوقت الحالي[1]".

- ماري جين ويست إيبرهارد

ثمة نظام في عالم الأقزام، أنا لا أقصد هنا عالم الأقزام الذي صوره جونثان سويفت في روايته المشهورة "رحلات جليفر". لا اقصد تلك الجزيرة الخيالية التي يقطنها أناس لا تتجاوز أطوالهم ستة بوصات. بل أقصد عالم المخلوقات الصغيرة كالطيور والنحل والنمل الأبيض والفراشات. عالم يتميز بنظام عبقري من نوع خاص يمثل لغزاً حير العلماء. كيف لهذه الكائنات الصغيرة ذات الأدمغة الضئيلة أن تقوم بكل تلك المآثر العقلية الجبارة

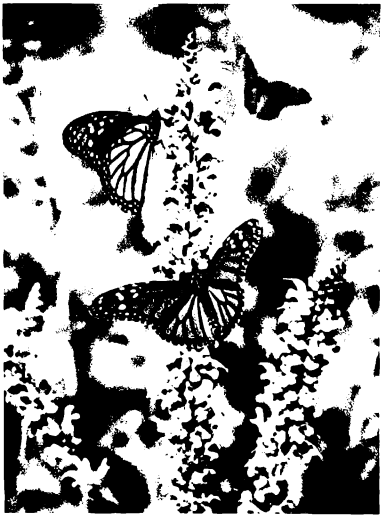
يتمتع نحل العسل بنمط حياة اجتماعي بالغ التعقيد، حيث يتوزع العمل عبر نظام طبقي متكامل. تدرك كل نحلة دورها المنوط بها وتنفذ مهامها بدقة متناهية. علاوةً على ذلك، يُعتبر نحل العسل من أمهر الكائنات في الملاحة والتواصل، وهما مهارتان أساسيتان في البحث عن الغذاء وتحديد المواقع الأمثل لبناء الخلايا. وما يثير العجب حقًا أن كل هذا يتم عبر دماغ يحوي

---

(١) ماري جين ويست-إبرهارد، "اللدونة التطورية والتطور" (أكسفورد: مطبعة جامعة أكسفورد، ٢٠٠٣)، ٣١٤.

واحدًا بالألف من واحد بالمائة فقط من الخلايا العصبية المتواجدة في دماغ الإنسان.

أما فراشات الملك فتخوض رحلة هجرة سنوية هي بمثابة ملحمة بطولية، تقطع خلالها ما بين ألفين إلى ثلاثة آلاف ميل بين كندا والمكسيك. قد يستغرق إتمام هذه الرحلة الشاقة ما يصل إلى ثلاثة أجيال كاملة من الفراشات، الأمر الذي يشير بقوة إلى أن المعرفة الدقيقة بمسار الهجرة راسخة في تكوينها البيولوجي وليست سلوكًا مكتسبًا .لكل جيل من فراشات الملك هدف محدد وواضح يسعى لإنجازه ضمن مسار الهجرة السنوي. أما عن مهاراتها في تحديد الاتجاهات، فهي تضاهي أدق أنظمة الملاحة، حيث تقضي هذه الفراشات فصل الشتاء في المكسيك على نفس الشجرة بالضبط التي سبق لأسلافها أن اتخذتها ملجأً من برد الشمال.



الشكل ١.١ فراشات الملك

يُصنع العنكبوت شبكته من الحرير، تلك المادة التي تتمتع بمجموعة استثنائية من الخصائص التي يحار العلماء في محاكاتها، أبرزها المتانة الفائقة والمرونة العالية. وما يُضاهي هذه الخصائص إثارةً للفضول هو السلوك الذي يبديه العنكبوت في نسج شبكته؛ إذ يتسم الشكل الهندسي الذي يصممه بالأناقة والدقة الوظيفية في آن واحد. وعند تعرض جزء من الشبكة للتلف، يسارع العنكبوت إلى ترميمه لاستعادة التصميم الأصلي. وفضلاً عن كونها وسيلة لاصطياد الفرائس، تعمل الشبكة على تعزيز قدرة العنكبوت على تحديد موقع تلك الفرائس بمجرد وقوعها في الأسر. وحتى في الظلمة الحالكة، بمقدور العنكبوت أن يحدد بدقة بالغة موقع الفريسة المحاصرة اعتمادًا على الاهتزازات التي تنتقل عبر خيوط الشبكة ويتم استشعارها بواسطة أرجله.

أما بعض فصائل النمل الأبيض، فإنها تبني مستعمرات هي بمثابة أعجوبة هندسية ومعمارية تثير إبهار الباحثين والفنانين معًا .يمكن أن تبلغ هذه التلال الطينية الضخمة ارتفاعات تتجاوز العشرين قدمًا، وتتضمن في تصميمها الداخلي المعقد غرفًا ملكية، وحضانات لتربية الصغار، وحدائق مخصصة لزراعة الفطريات، ومناطق لإلقاء النفايات، وآبار للمياه، وحتى أنظمة تهوية متطورة تعمل على تنظيم الحرارة والتخلص من غاز ثاني أكسيد الكربون الفائض.

تتغذى الدبابير البالغة على رحيق الأزهار كمصدر للطاقة، ولكنها تصطاد الحشرات الأخرى لتوفير وجبات غنية بالبروتين ليرقاتها. تختلف الفرائس المستهدفة باختلاف أنواع الدبابير، فقد تشمل نحل العسل أو

الخنافس أو حتى العناكب الضخمة كالرتيلاء أو حشرات الزيز. لكن الجانب الأكثر إثارة للدهشة يتمثل في قدرة الدبور على إصابة فريسته بشلل تام دون قتلها[١]. وتتطلب هذه العملية استهدافًا دقيقًا للغاية، إذ يتباين موضع العقدة العصبية التي يجب حقنها بسموم عصبية لإحداث الشلل باختلاف نوع الفريسة[٢]، فعلى سبيل المثال، يقوم الدبور المتخصص في اصطياد نحل العسل بإدخال إبرته بدقة جراحية بين صفيحتين متمايزتين في الجانب السفلي من رقبة النحلة، مما يؤدي إلى إصابتها بشلل تام مع إبقائها على قيد الحياة[٣].

لقد أكدت الأبحاث التجريبية أن قدرة الدبابير على تمييز فريستها هي قدرة غريزية فطرية، وأن سلوك اللسع، الذي لا بد من تنفيذه بدقة جراحية لضمان فعاليته، يتم التحكم فيه من خلال برنامج حركي. يتمثل هذا البرنامج في سلسلة متشابكة من الإجراءات الفرعية المنظمة في تسلسل محدد مسبقًا لأداء حركة أو مهمة بالغة الدقة .ولإدراك مدى تعقيد هذه المهمة، علينا أن نتخيل برنامج الذكاء الاصطناعي اللازم لبرمجة طائرة دقيقة متطورة بدون طيار لتقوم بإيصال جرعة محسوبة من سم عصبي إلى موضع

---

(١) فريدريك ليبرسات، "دبور يستخدم كوكتيل السم للتلاعب بسلوك فريسته من الصراصير"، مجلة علم وظائف الأعضاء المقارن أ (٢٠٠٣) ١٨٩: ٤٩٧-٥٠٨، https://doi.org/10.1007/s00359-٠٠٣-٠٤٣٢-٠.

(٢) كاتسوهيرو كونو، كوهي كازوما، وكين-إيتشي نيهي، "سموم الببتيد في سموم الدبابير الانعزالية"، توكسينز ٨، رقم ٤ (١٨ أبريل ٢٠١٦): ١١٤، https://doi.org/10.3390/toxins8040114.

(٣) جيمس إل غولد وكارول غرانت غولد، "المهندسون المعماريون من الحيوانات" (نيويورك: بيسك بوكس، ٢٠٠٧)، ١٦.

محدد للغاية في جسم نحلة العسل لإحداث الشلل، مع الحفاظ على بقائها على قيد الحياة .وفي معرض تقييمهما لتعقيد هذا السلوك لدى الدبابير وتفسير تطوره البيولوجي، خلص كل من جيري فودور وماسيمو بياتيلي بالميريني إلى أن "مثل هذا السلوك المعقد، مع اعتماده على التسلسل الدقيق وبرمجته المسبقة الصارمة، ينطوي على احتمالية هائلة للخلل في أي مرحلة من مراحله المختلفة ...لا يمكن تفسير مثل هذه الحالات من البرامج السلوكية الفطرية المعقدة عبر تحليل العوامل الفيزيوكيميائية أو الهندسية التقليدية فحسب".[١]

إن الأمثلة المذكورة أعلاه لسلوكيات فطرية أو مبرمجة لا تعدو كونها عينة محدودة من عالم الحيوان الثري .والمدهش حقًا أن سلوكيات ما نطلق عليه مجازًا "الحيوانات البدائية" قد تتسم في كثير من الأحيان بنفس مستوى التعقيد الموجود في سلوكيات الحيوانات الأكثر تقدمًا على سلم التطور، بما فيها الثدييات .في الواقع، لا توجد علاقة تناسبية قوية بين القدرات المعرفية المتطورة للحيوانات وقدرتها على إظهار سلوكيات بالغة التعقيد والتي تبدو وكأنها مبرمجة جينيًا .قد يعود السبب في ذلك إلى أن هذه السلوكيات تخضع لبرمجة دقيقة مسبقة وبالتالي فهي غريزية بطبيعتها، مما يغني الحيوانات عن الحاجة لقدرات إدراكية بارزة لأدائها .ما تتطلبه هو "الدوائر العصبية

(١) جيري فودور وماسيمو بياتيلي-بالماريني، "ما أخطأ فيه داروين" (نيويورك: فارار، ستراوس وجيرو، ٢٠١٠)، ٩١.

النوعية" المتخصصة في التحكم بالسلوك - وهي دوائر متطورة للغاية على المستوى الوظيفي، لكنها – على ما يبدو - لا تتطلب أدمغة كبيرة الحجم.

يمكن العثور على شروحات مستفيضة لهذه السلوكيات في كل مكان من برامج ناشيونال جيوغرافيك التلفزيونية إلى الكتب والمقالات العلمية. ولعل كتاب جينيفر أكرمان "عبقرية الطيور"[١] وكتاب مارتن جيورفا "الدماغ الصغير المذهل: دروس من نحلة العسل"[٢] من ابرز الأمثلة على تلك السلوكيات الفطرية المعقدة التي حيرت المجتمع العلمي وجعلته يتساءل عن اصلها، مما حدا بالبعض بوصفها بالغامضة او المجهولة. لذا تطالعنا كتب ذات عناوين تعتريها تلك الحيرة مثل كتاب "لغز الهجرة"[٣] و"كتاب بوصلة الطبيعة: سر الملاحة الحيوانية"[٤].

في كتابه "عن أصل الأنواع"، عرض عالم الطبيعة تشارلز داروين في القرن التاسع عشر نظريته الثورية للأصل المشترك عن طريق التطور التدريجي وكان يدافع عنها ويروج لها في كل مكان وزمان. لكن حتى هو اعترف في مرحلة ما من الكتاب بأن "كثير من تلك الغرائز ما يبعث على

---

(١) جينيفر أكرمان، "عبقرية الطيور" (نيويورك: بينجوين برس، ٢٠١٦).

(٢) مارتن جيورفا، "الدماغ المصغر المذهل: دروس من نحلة العسل"، عالم النحل ٨٤، رقم ١ (٢٠٠٣): ٥-١٨.

(٣) روبن بيكر، "لغز الهجرة" (نيويورك: فايكنج برس، ١٩٨١).

(٤) جيمس إل غولد وكارول غرانت غولد، "بوصلة الطبيعة: لغز الملاحة الحيوانية" (برينستون: مطبعة جامعة برينستون، ٢٠١٢).

العجب، حتى إن نشوؤها وتطورها قد يكون من الصعوبة، بحيث يدفع القارئ إلى رفض نظريتي بأكملها"[١].

ومع ذلك، فقد بقي مصراً على ان تلك الغرائز (السلوكيات الفطرية المبرمجة مسبقاً في الحيوان) كانت في الواقع من دعائم نظريته الأساسية، وان نشوؤها هو نتيجة عملية تطورية تدريجية بنفس الطريقة التي نشأت بها المجموعة الكبيرة المتنوعة من الكائنات الحية. وكتب: "لا أرى أي صعوبة في الانتخاب الطبيعي قد يحتفظ بالتحولات، التي تلحق بالغرائز ويستجمعها، ممعنًا بها في سبيل الارتقاء إلى أقصى حد مستطاع من الفائدة. ومن ثم – وكما أعتقد شخصيا – فإن أكثر الغرائز تعقيدا وإدهاشا قد بدأت في الأصل بهذه الطريقة.. وليس من المستطاع أن نستحدث غريزة من ذوات الشأن بتأثير الانتخاب الطبيعي، ما لم يتدرج وجودها في خطى عديدة من التحولات الضئيلة المفيدة ... وحكم مذهبي في الغرائز، حكمه في التحولات الجسمانية"[٢].

اللافت للنظر أن داروين حذف الجملة الأخيرة من الطبعات اللاحقة لكتابه الرائد "أصل الأنواع"، رغم أنه ظل متمسكًا بمبدأها الجوهري .يتمثل أحد الأهداف الرئيسية لهذا الكتاب في استكشاف ما إذا كان تأكيد داروين

---

(١) تشارلز داروين، "أصل الأنواع: عن طريق الانتقاء الطبيعي، أو الحفاظ على الأجناس المفضلة في الصراع من أجل الحياة" (لندن: جون موراي، ١٨٥٩)، ٢٠٧، https://archive.org/details/onoriginspeciesf00darw/page/n9/mode/2up.

(٢) داروين، "أصل الأنواع"، ٢٠٩-٢١٠. Natura non facit saltum هي عبارة لاتينية تعني "الطبيعة لا تقفز".

بشأن أصل الغرائز المعقدة يصمد أمام براهين العلم الحديث .هل تدعم الأدلة المتراكمة على مدار أكثر من ١٦٠ عامًا هذه الفرضية - بصفة عامة على الأقل؟ إذا لم يكن الأمر كذلك، فهل من تفسير أكثر إقناعًا - مستمد إما مما يعرف باسم "التوليف التطوري الموسع" أو ربما من تفسير يتجاوز هذا النموذج بالكامل؟ هذا هو السؤال المحوري الذي يطرحه هذا الكتاب، ويدور في فلكه.

تتجلّى السلوكيات المعقدة المبرمجة في شتى ممالك الحيوان، إلا أن تركيزنا في هذا المؤلف سينصب بصفة رئيسية على الحيوانات الأقل تطورًا. يرجع ذلك إلى أن الحيوانات متقدمة مثل الرئيسيات تتمتع بقدرات إدراكية بارزة، مما يؤدي لمزج ملحوظ بين السلوكيات المُبرمجة وتلك المكتسبة من خلال التعلم، وفي مثل هذه الحالات ليس من السهل دائمًا التمييز بين الاثنين. تُعد مهمة التفرقة بين السلوكيات المبرمجة والمكتسبة أكثر سهولة عندما يقتصر بحثنا على الحيوانات الأقل تطوراً، مثل النحل والفراشات.

إن تفسير الأصل التطوري لهذه السلوكيات الحيوانية المبرمجة يُجسد تحديًا هائلًا؛ ففي كثير من الحالات، تتسم هذه السلوكيات ذاتها بدرجة مذهلة من التعقيد ويُحتمل أنها مدعومة بجهاز عصبي متطور ومعقد للغاية . علاوةً على ذلك، تتميز السلوكيات الحيوانية بتنوع هائل، يمكن القول بأنه متنوعٌ بنفس تنوع الخصائص الفيزيائية الهائل الذي نلاحظه في عالم الحيوان .لا تعني هذه العوامل في مجملها أن مهمة تفسير أصولها التطورية مستحيلة، ولكنها تعني أننا بحاجة لتفسيرات علمية مدعومة بالأدلة

التجريبية تتجاوز القِصص الفضفاضة الخالية من المضمون، لنصل إلى تفسير ذي أساس متين لتطور هذه السلوكيات.

مما يزيد من صعوبة دراسة تطور السلوك الحيواني أن الأدلة المتوفرة في السجل الأحفوري شحيحة نسبيًا، فالسلوكيات لا تترك آثارًا واضحة مثل الهياكل العظمية أو الأنسجة الرخوة. ولأسباب أخرى غير معروفة بعد، لم يحظَ أصل السلوك الحيواني بالاهتمام والبحث الكافي في علم الأحياء الحديث، مقارنةً بالتركيز الكبير على دراسة وظائف الأعضاء وعلم الوراثة. وهذا أمر مؤسف حقًا، لأن سلوك الحيوان هو أحد الجوانب الأكثر إثارة للاهتمام في دراسته، ويمكن أن يوفر لنا فهمًا أعمق للعلاقات التطورية بين الأنواع المختلفة.

علاوة على ذلك، هناك سبب آخر يدعو إلى إيلاء هذا الموضوع اهتمامًا أكبر، وهو أن سلوك الحيوان يلعب دورًا حاسمًا في نظرية التطور برمتها. فقد أكد إرنست ماير، أحد أبرز علماء الأحياء التطوريين في القرن العشرين، أن التغيرات السلوكية هي العامل المحفز الرئيسي للابتكارات التطورية[١]. وذهب ماير إلى أبعد من ذلك، حيث جادل بأن التحولات السلوكية لعبت دورًا هامًا في معظم الابتكارات التطورية، ومن هنا جاءت المقولة الشهيرة

(١) إرنست ماير، "نحو فلسفة جديدة في علم الأحياء" (كامبريدج، ماساتشوستس: مطبعة جامعة هارفارد، ١٩٨٨)، ٤٠٨.

"السلوك هو جهاز تنظيم ضربات قلب التطور"، أي أن السلوك يحدد وتيرة التغير التطوري.[١]

يتضح إذًا أن هذا الموضوع بحاجة ماسة لمزيد من البحث والتقصي.

إلى جانب إجراء دراسة شاملة ومتعمقة للأنواع المختلفة من السلوكيات المبرمجة المعقدة التي نجدها في عالم الحيوان، سنقوم بتقييم دقيق وشامل للأدلة المتراكمة في ضوء مجموعة متنوعة من الفرضيات التفسيرية المتنافسة، والتي تشمل النظرية الداروينية الجديدة، وذلك بهدف تحديد أي من هذه الفرضيات يقدم التفسير الأكثر شمولية وقدرة على الإقناع فيما يتعلق بالأسباب الكامنة وراء هذه السلوكيات. وللوصول إلى هذه الغاية، سوف نعتمد على منهجية بحثية راسخة وشائعة في العلوم التاريخية تُعرف باسم "الاستدلال إلى أفضل تفسير"، والتي تستند إلى مبدأ اختيار التفسير الذي يتميز بأعلى درجات التوافق مع الأدلة الموجودة، وفي الوقت نفسه يقدم تفسيرًا متماسكًا ومنطقيًا للظواهر التي تخضع للدراسة والبحث.

من أرسطو إلى داروين

تمتد الدراسة الرسمية للحيوانات وسلوكها إلى العصور القديمة، حيث نجد جذورها في أعمال فلاسفة اليونان القدماء. في القرن الخامس قبل الميلاد، قدم الفيلسوف إيمبيدوكليس تفسيرًا لأصل الحيوانات والذي يمكن اعتباره توقعًا مبكرًا لنظرية داروين في التطور عن طريق الانتقاء الطبيعي،

(١) إرنست ماير، "ما هو التطور" (نيويورك: بيسك بوكس، ٢٠٠١)، ١٣٧.

على الرغم من أن إيمبيدوكليس لم يركز على فكرة التدرج التي أكد عليها داروين لاحقًا. وفي نفس القرن، اقترح الفلاسفة الذريون ليوكيبوس وديموقريطس مفهومًا ماديًا بحتًا للحياة والكون، يتضمن عنصرًا تطوريًا ولا يترك مجالًا يُذكر لمفاهيم الغاية أو التصميم المسبق. ولكن أرسطو (٣٨٤-٣٢٢ قبل الميلاد)، الذي يعتبر أب علم الأحياء، تبنى وجهة نظر مختلفة تمامًا.

درس أرسطو ووثق سلوك مجموعة متنوعة من الحيوانات، وقد تجلى ذلك في كتابه "حركة الحيوانات". كان أرسطو يرى أن الطبيعة لا تفعل شيئًا عبثًا، وأن لكل شيء في الطبيعة غرضًا ووظيفة محددة[١]. وقد انعكس هذا الاعتقاد في منهجه في دراسة سلوك الحيوان، حيث كان يبحث عن الأسباب والغايات وراء كل سلوك. وعلى عكس الذريين، الذين تبنوا نظرة مادية بحتة للكون، اعتمد أرسطو على التفكير الغائي لتفسير سلوك الحيوان، معتبرا أن لكل سلوك وظيفة وهدفًا محددًا.

هيمنت وجهة نظر أرسطو الغائية على الفكر الغربي لمدة تقارب ألفي عام، ويرجع ذلك جزئيًا إلى بساطتها وبداهتها، ولأنها تتوافق مع الفطرة السليمة. ولكن مع بداية العصر الحديث، بدأت هذه النظرة في فقدان بريقها وتأثيرها، حيث ظهرت نظريات وأفكار جديدة تحدت هذا الفهم التقليدي لسلوك الحيوان.

(١) أرسطو، "الأعمال الكاملة لأرسطو" (المملكة المتحدة: دلفي كلاسيكس، ٢٠١٣)، الموقع ٢٧٣٥٥، كيندل.

هيمنت فكرة ثبات الأنواع وعدم تغيرها منذ خلقها على علم الأحياء طوال القرن الثامن عشر. لكن جان باتيست لامارك (١٧٤٤-١٨٢٩) حطم هذه الفكرة الراسخة من خلال طرح نظريته الجريئة في التطور، والتي لم تقتصر على تفسير تغير الأنواع بمرور الوقت، بل سعت أيضًا إلى تفسير أصل السلوكيات الحيوانية وتطورها. وقد تجسدت هذه النظرية في كتابه "فلسفة علم الحيوان"، الذي نُشر للمرة الأولى عام ١٨٠٩، وهو العام الذي شهد مولد تشارلز داروين. مثّل هذا الكتاب أول محاولة جادة لوضع نظرية شاملة تفسر تطور جميع الكائنات الحية انطلاقًا من أسلاف بدائية بسيطة.

كان أحد العناصر الأساسية في نظرية لامارك هو أن الكائنات الحية تمتلك ميلًا فطريًا للتطور نحو زيادة التعقيد. ومع ذلك، اشتهر لامارك أكثر بالعنصر الثاني من نظريته، وهو مفهوم توارث الصفات المكتسبة. وفقًا لهذا المفهوم، تلعب البيئة دورًا حاسمًا في دفع عملية التطور. فقد أكد لامارك أن البيئة تؤثر بشكل غير مباشر على شكل وتنظيم الكائنات الحية، فالتغيرات البيئية تدفع الكائنات إلى تغيير سلوكياتها وعاداتها للتكيف مع الظروف الجديدة، وهذه التغيرات السلوكية تؤدي بدورها إلى تعديلات في شكل وبنية الكائنات بمرور الوقت[١].

وبناءً على ذلك، صاغ لامارك قانونين رئيسيين في نظريته. ينص القانون الأول على أن التغيرات التي تطرأ على الكائن الحي نتيجة استخدامه أو عدم

---

(١) جان باتيست لامارك، "الفلسفة الحيوانية: عرض يتعلق بالتاريخ الطبيعي للحيوانات" [١٩١٤] (لندن: الكتب المنسية، ٢٠١٢)، ١٠٧.

استخدامه لأعضائه تتوارث عبر الأجيال. أما القانون الثاني فينص على أن هذه التغيرات المكتسبة تصبح جزءًا من التركيب الوراثي للكائن الحي، وبالتالي تنتقل إلى نسله. وقد اعتقد لامارك أن التغيرات في العادات والسلوكيات هي المحرك الأساسي للتغيرات الجسدية التي تحدث في الكائنات الحية بمرور الزمن[١].

استشهد لامارك بعدة أمثلة على التطور الذي زعم أنه يثبت صحة نظريته حول وراثة الخصائص المكتسبة. أحد هذه الأمثلة يتعلق بطول اللسان لدى آكلات النمل، ونقار الخشب الأخضر، والطيور الطنانة[٢]، حيث افترض لامارك أن استطالة اللسان قد حدثت نتيجة لاستخدامه المتكرر في الوصول إلى مصادر الطعام. مثال آخر قدمه لامارك هو طول عنق الزرافات وأرجلها، حيث اعتقد أن سعي الزرافات للوصول إلى أوراق الأشجار العالية قد أدى إلى استطالة هذه الأعضاء عبر الأجيال[٣].

حظيت نظرية لامارك بشعبية كبيرة خلال القرن التاسع عشر. ومع ذلك، في أواخر ذلك القرن، أجرى العالم أوغست وايزمان تجربة قام فيها بقطع ذيول الفئران عبر عدة أجيال. لو كانت نظرية لامارك صحيحة، لتوقعنا

---

(١) جان باتيست لامارك، "الفلسفة الحيوانية: عرض يتعلق بالتاريخ الطبيعي للحيوانات" [١٩١٤] (لندن: الكتب المنسية، ٢٠١٢)، ١٠٧.

(٢) لامارك، "الفلسفة الحيوانية"، ١٢٠.

(٣) لامارك، "الفلسفة الحيوانية"، ١٢٢.

أن تولد الفئران في الأجيال اللاحقة بذيل أقصر. لكن هذا لم يحدث، مما أدى إلى إضعاف مصداقية نظرية لامارك.

ومع ذلك، من المهم أن نلاحظ أن فكرة لامارك بأن سلوك الحيوان يمكن أن يؤثر على تطور خصائصه الفيزيائية، أصبحت فيما بعد جزءًا أساسيًا من نظرية التطور التي اقترحها داروين.

في الواقع، كان تأثير لامارك على داروين أعمق من ذلك. يوضح مؤرخ العلوم بيتر بولر أن داروين كان ملتزمًا طوال حياته بنوع محدود من اللاماركية وما يُعرف بالوراثة المختلطة (أي اختلاط الصفات الأبوية)، وأن هذه الأفكار كانت جزءًا لا يتجزأ من نظرته للعالم[١]. وقد طبق داروين هذه الأفكار على كل من الخصائص الفيزيائية والسلوكية للكائنات الحية. مثل لامارك، اعتقد داروين أن عادات الحيوان تؤثر على فسيولوجيته، وبالتالي يمكن أن تنتقل هذه التغيرات إلى نسله. وقد قدم داروين العديد من الأمثلة لدعم وجهة نظره، مثل تدلي آذان بعض الحيوانات الأليفة[٢]، وعدم قدرة بعض الطيور على الطيران في الجزر التي تفتقر إلى الحيوانات المفترسة[٣]. ولخص داروين فكرته حول العلاقة بين الاستخدام والإهمال بالقول: "بشكل عام، يمكننا أن نستنتج أن العادة والاستخدام والإهمال قد لعبت، في بعض

(١) بيتر بولر، "التطور: تاريخ فكرة" (بيركلي: مطبعة جامعة كاليفورنيا، ١٩٨٣)، ١٦٠.

(٢) داروين، "أصل الأنواع"، ١١. يكتب داروين: "لا يمكن تسمية حيوان أليف واحد ليس له آذان متدلية في بعض البلدان؛ والرأي الذي اقترحه بعض المؤلفين، أن التدلي يرجع إلى عدم استخدام عضلات الأذن، لأن الحيوانات لا تشعر بالقلق الشديد من الخطر، يبدو محتملاً".

(٣) داروين، "أصل الأنواع"، ١٣٤.

الحالات، دورًا كبيرًا في تعديل تكوين وهيكل أعضاء مختلفة، ولكن غالباً ما كانت تأثيرات الاستخدام والإهمال مرتبطة بشكل وثيق بعملية الانتقاء الطبيعي للاختلافات الفطرية، بل وفي بعض الأحيان تجاوزها في الأهمية"[1].

في سعيه لتحديد مفهوم الغريزة وتوضيحه، قام تشارلز داروين، بتحليل السلوك الحيواني، وقد كتب في هذا الصدد أن الفعل الذي يقوم به حيوان، "بان الفعل الذي يقوم به العديد من أفراد النوع الحيواني، وبالذات الصغير منه الذي لا يتمتع بأي خبرة مكتسبة، دون معرفة الغرض من القيام به يُعتبر عادةً غريزيًا" [2].

إلا أن داروين لم يكتفِ بهذا التعريف البسيط، بل ذهب إلى أبعد من ذلك، معتبراً أن الغرائز ليست مجرد أفعال فطرية جامدة، بل هي أقرب إلى العادات المكتسبة التي تتطور وتتشكل بمرور الوقت .وقد طبّق داروين مبدأ الاستخدام والإهمال، الذي كان شائعًا في عصره، على الغرائز السلوكية. ووفقًا لهذا المبدأ، فإن الأعضاء والأجهزة التي تُستخدم بكثرة تزداد قوةً وتطورًا، بينما تلك التي تُهمل تضعف وتتدهور. وبالمثل، اعتقد داروين أن الغرائز التي تُستخدم بانتظام تتعزز وتصبح أكثر رسوخًا، بينما تلك التي تُهمل تتلاشى وتختفي تدريجيًا. فكتب: "لا أرى إشكالاً في حصول الانتقاء الطبيعي في حال حصول تراكم من التعديلات الطفيفة نتيجة ظروف الحياة المختلفة

(١) داروين، "أصل الأنواع"، ١٤٣.

(٢) داروين، "أصل الأنواع"، ٢٠٧.

التي يعيشها الحيوان، وفي بعض الحالات، قد يكون للعادة أو الاستخدام وعدم الاستخدام تأثير في ذلك"[١].

في معرض عودته إلى الحيوانات الداجنة (المنزلية)، يستشهد دارون بأمثلة لكيفية تغير السلوكيات من خلال اختيار البشر عمدًا وبشكل متكرر لسلوكيات معينة[٢]. وعلى الرغم من افتراض إمكانية توريث العادات، إلا أن داروين أقر بوجود قيود في تطبيق مبدأ التباين والانتقاء الطبيعي على بعض السلوكيات، حيث كتب قائلاً: "من الممكن أن نبين بوضوح أن الغرائز البالغة الروعة، والتي نحن على علم تام بها، وهي بالتحديد، تلك الغرائز الخاصة بنحل العسل، وبالعديد من فصائل النمل، لا يمكن أن تكون قد اكتسبت عن طريق العادة"[٣].

في إطار سعيه لفهم تطور الحياة، لاحظ تشارلز داروين الفارق الجوهري بين سلوكيات الحيوانات المعقدة وقدرات البشر الاستثنائية .وعلى عكس السلوك الغريزي للحيوانات الذي يبدو وكأنه مدمج مسبقًا، فإن معظم القدرات البشرية تُكتسب من خلال التعلم والتجارب المتراكمة .يوضح داروين هذه الفكرة في كتاباته قائلًا" :لا يقدر الإنسان، في محاولته الأولى على الإطلاق، أن يصنع فأسًا حجريًا أو قاربًا صالحًا للإبحار .يتطلب إتقان هذه المهارات ممارسة طويلة وشاقة .على النقيض من ذلك، يستطيع القندس بناء سده أو قنواته بمهارة فائقة منذ البداية، وكذلك الحال بالنسبة للطيور

---

(١) داروين، "أصل الأنواع"، ٢٤٣.

(٢) داروين، "أصل الأنواع"، ٢١٦.

(٣) داروين، "أصل الأنواع"، ٢٠٩.

التي تبني أعشاشها، والعناكب التي تنسج شبكاتها الرائعة .ففي المحاولات الأولى لهذه المخلوقات، نرى نفس المستوى من الإتقان الذي نلاحظه لديها بعد اكتساب الخبرة مع مرور الوقت"[١].

لم يكن داروين يعرف آنذاك شيئًا عن الجينات والطفرات الجينية. ولكن بعد أن بدأ العلماء في كشف أسرار علم الوراثة، تم دمج هذه الأكتشافات الجديدة في الوراثة مع الرؤية الداروينية، و في النهاية سُميت هذه التوليفة بالإصطناع الحديث، وهي التسمية التي استخدمها جوليان هكسلي- حفيد المدافع عن داروين تي إتش هكسلي - في كتابه "التطور: الاصطناع الحديث" (١٩٤٢). تم تطوير هذا الشكل المحدث من الداروينية بناءً على عمل العديد من العلماء في مختلف التخصصات، بما في ذلك عالم الحيوان إرنست ماير، وعلماء الوراثة ثيودوسيوس دوبجانسكي، ورونالد فيشر، وتوماس هانت مورغان، وجي بي إس هالدين، وعالم الحفريات جورج جايلورد سيمبسون [٢].

عادة ما يطلق على الرأي السائد الذي أنشأه هذا الأصطناع الحديث اسم الداروينية الجديدة، وجوهرها هو فكرة أن التطور يعتمد في الأساس على عاملين رئيسيين هما الطفرات الجينية العشوائية والانتقاء الطبيعي[٣]. الا ان الإصطناع ليس بهذه البساطة، حيث يقال إن التطور يحدث من خلال عدد

---

(١) تشارلز داروين، "أصل الإنسان والانتقاء بالنسبة للجنس" [١٨٧١] (أمهيرست، نيويورك: بروميثيوس بوكس، ١٩٩٨)، ٧٠.

(٢) بولر، "التطور: تاريخ فكرة"، ٣٣٧.

(٣) بولر، "التطور: تاريخ فكرة"، ٢٥١.

من الآليات المختلفة. وتشمل هذه الطفرات الجينية[١]، والتعديل الوراثي[٢]، والتكرار الجيني[٣]، والانحراف الوراثي[٤]، وانسياب الموروثات[٥]، وتأثير المؤسس[٦]، وتأثير عنق الزجاجة[٧]، وغيرها. القاسم المشترك بين كل هذه الآليات هو أنها تتمحور حول جينات فردية.

عالم الأحياء التطورية مايكل لينش يجمع هذه الآليات المختلفة في أربع قوى أساسية للتطور: الانتقاء الطبيعي، والطفرات، وإعادة التركيب الجيني، والانجراف الجيني. يكتب لينش: "بناءً على قرن من العمل المكرس لدراسة التطور، فمن المعقول أن نستنتج أن هذه الفئات الأربع الواسعة تشمل جميع القوى الأساسية للتطور".[٨] ويشرح كذلك أن التطور لا يمكن فهمه فقط من حيث الانتقاء الطبيعي والتكيف. والسبب في ذلك أن القوى الأخرى المذكورة "غير تكيفية بمعنى أنها ليست دالة لخصائص الملائمة للأفراد"[٩].

---

(١) تغيرات عشوائية في تسلسل الحمض النووي، قد تكون مفيدة أو ضارة أو محايدة. (المترجم)

(٢) تعديل متعمد للحمض النووي لكائن حي لإضافة أو تغيير أو إزالة صفات معينة. (المترجم)

(٣) زيادة عدد نسخ جين معين في الجينوم. (المترجم)

(٤) تغير عشوائي في تواتر الأليلات في مجموعة صغيرة من الكائنات الحية. (المترجم)

(٥) انتقال الأليلات من مجموعة إلى أخرى بسبب هجرة الأفراد. (المترجم)

(٦) انخفاض التنوع الجيني عندما تنشأ مجموعة جديدة من عدد قليل من الأفراد. (المترجم)

(٧) انخفاض حاد في حجم مجموعة ما، مما يؤدي إلى فقدان التنوع الجيني. (المترجم)

(٨) مايكل لينش، "ضعف الفرضيات التكيفية لأصول التعقيد العضوي"، في "في ضوء التطور"، المجلد ١، "التكيف والتصميم المعقد"، محرران. جون سي أفيس وفرانسيسكو جيه أيالا (واشنطن: ناشيونال أكاديميز برس، ٢٠٠٧)، ٨٧.

(٩) لينش، "ضعف الفرضيات التكيفية"، ٨٦.

ما ورد أعلاه يمثل مجرد ملخص بسيط لنظرية التطور الحديثة، والتي تتضمن اليوم العديد من الإضافات المبتكرة والتعديلات المقترحة .لاحقًا في هذا الكتاب، سنتناول بعض الآليات المساعدة المقترحة لتطور السلوكيات المعقدة المبرمجة .ولكن حتى اليوم، يعتبر العديد من علماء الأحياء الانتقاء الطبيعي والطفرات الجينية العشوائية بمثابة الركيزتين الأساسيتين لنظرية التطور. لذلك، سنتوقف هنا قليلاً لشرح كل من هاتين الفكرتين بمزيد من التفصيل.

يمكن تلخيص مفهوم الانتقاء الطبيعي بشكل مبسط على أنه "بقاء الأصلح" .على سبيل المثال، إذا ورث أحد النسل طفرة جينية عشوائية تجعله أسرع أو أقوى أو أكثر ذكاءً قليلاً، وإذا كان لهذه الطفرة تأثير إيجابي على فرص بقائه وتكاثره، فإن الطبيعة ستعمل على نقل هذه الطفرة إلى نسله على الأرجح - وهذا هو جوهر الانتقاء الطبيعي.

وفقًا للرؤية النيو-داروينية (او ما يعرف بالداروينية الجديدة)، أدت سلسلة طويلة من هذه الطفرات العشوائية، التي غربلتها عملية الانتقاء الطبيعي، إلى ظهور أشكال جديدة من الكائنات الحية بشكل تدريجي على مدى مئات الملايين من السنين في تاريخ التطور، بدءًا من خلية أو عدد قليل من الخلايا أحادية الخلية الأصلية .وكما رأينا سابقًا، لم يستثنِ داروين السلوكيات المعقدة المبرمجة، والتي أطلق عليها اسم الغريزة .فقد جادل هو وآخرون من بعده بأن هذه السلوكيات أيضًا يمكن تفسيرها من خلال الآلية المشتركة للتباين العشوائي - بمعنى واسع - والانتقاء الطبيعي.

صراع المناهج: علماء الحيوان مقابل علماء النفس

في مطلع القرن العشرين، لم يكن مجال دراسة سلوك الحيوان كمجال علمي مستقل، يُعرف اليوم بالإيثولوجيا (علم السلوك الحيواني)، قد تشكل بعد. وكان العلماء الذين شرعوا في دراسة سلوك الحيوان ينتمون بشكل أساسي إلى تخصصين رئيسيين: علم الحيوان وعلم النفس. ونتيجة لذلك، تم اتباع نهجين مختلفين تمامًا في دراسة سلوك الحيوان[١].

ركز علماء الحيوان، أو علماء الطبيعة كما يطلق عليهم أحيانًا (وهم في الغالب من الأوروبيين)، على إجراء ملاحظات ميدانية دقيقة للحيوانات في مواطنها الطبيعية. أما علماء النفس (معظمهم من أمريكا الشمالية)، فقد فضلوا إجراء التجارب المعملية التي تتحكم بدقة في المتغيرات التي تؤثر على سلوك الحيوانات.

افضت أبحاث علماء النفس إلى ظهور المدرسة السلوكية، وهي مدرسة فكرية في علم النفس تهتم بدراسة السلوك الظاهر للكائن الحي واستجاباته للمؤثرات الخارجية، كما هو الأمر في حالة الأعتياد[٢]. واشتهرت إحدى تجارب عالم النفس الروسي الشهير إيفان بافلوف على نطاق واسع، بظاهرة

---

(١) كما يشرح ريتشارد بوركهاردت، "بينما كان علماء السلوك مهتمين في المقام الأول بمجالات تطور السلوك وأسبابه ووظيفته، كان علماء النفس المقارن أكثر اهتمامًا بنمو السلوك". ريتشارد دبليو بوركهاردت الابن، "أنماط السلوك: كونراد لورينز، نيكو تينبرجن، وتأسيس علم السلوك" (شيكاغو: مطبعة جامعة شيكاغو، ٢٠٠٥)، ٣٨٤.

(٢) الإعتياد: حالة التأقلم التدريجي مع ظروف بيئية جديدة، أو حالة التعايش مع محفزات معينة (المترجم).

الإشراط البافلوفي[1]، نسبة اليه، والتي توضح كيفية تعلم الحيوانات ربط منبه محايد بمنبه آخر يثير استجابة طبيعية معينة.

وجه علماء الطبيعة انتقادات لاذعة لنهج علماء النفس لتركيزهم بشكل رئيسي على دراسة سلوك نوع واحد من الحيوانات، وهو الفئران البيضاء، وإهمالهم دراسة السلوكيات المعقدة التي تُلاحظ لدى الأنواع الأخرى في بيئاتها الطبيعية. بالإضافة إلى ذلك، انتقد علماء الطبيعة تركيز علماء النفس شبه الحصري على السلوك المكتسب من خلال التعلم، وتجاهلهم لدور السلوكيات الغريزية التي تلعب دورًا حيويًا في بقاء الحيوانات وتكاثرها[2].

يُعدّ كل من العالمين كونراد لورينز ونيكو تينبرجن من رواد علم السلوك الحيواني الحديث، الذي يُعرف أيضًا باسم "الإيثولوجيا .(Ethology) "يعتبر لورينز، عالم الطبيعة النمساوي الذي عاش بين عامي (١٩٠٣-١٩٨٩)، المؤسس الحقيقي لهذا العلم حيث وضع أسسه النظرية في الثلاثينيات من القرن الماضي .انصبت دراساته الرئيسة على السلوكيات الغريزية لدى الطيور، وهي تلك الأفعال الفطرية التي تولد مع الحيوان ولا تحتاج إلى تعلّم.

---

(١) الإشراط البافلوفي: لقد اعتقد بافلوف ان آلية التعلم الرئيسية لأي كائن حين هي الاقتران: التجاوز الزماني لحدوث مثيرين معاً لعدد من المرات، حيث يكتسب احدهما صفة الآخر، ويصبح قادراً على استجرار الاستجابة التي يحدثها المثير الآخر والمثير هو حدث او شيء يمكن ان نشعر به بحيث يثير لدينا ردة فعل معينة وقد يكون هذا المثير مادياً او معنوياً (المترجم).

(٢) بوركهاردت، "أنماط السلوك"، ٣٦١.

في ورقة بحثية منشورة عام ١٩٣٦، حدد لورينز ستة مبادئ أساسية لدراسة الغرائز والسلوك الحيواني بشكل عام، وهي:

استقلالية السلوك الغريزي عن الخبرة والتعلم: تظهر الأفعال الغريزية لدى الحيوان بشكل تلقائي دون الحاجة إلى خبرة سابقة أو تعلم من أفراد أكبر سنًا في نفس النوع.

التحكم الداخلي بالغرائز: قد يتحكم بعملية تنفيذ السلوك الغريزي عوامل داخلية في الحيوان نفسه، بغض النظر عن تأثيرات التعلم أو الخبرة الخارجية.

تعقيد السلوك الغريزي: لا يمكن تفسير السلوك الغريزي دائمًا بنماذج بسيطة تربط بين محفز خارجي واستجابة محددة.

ظهور الغرائز تلقائيًا: يمكن أن تحدث السلوكيات الغريزية أحيانًا حتى في غياب أي محفز خارجي واضح يثيرها.

دافع فطري لإظهار الغرائز: يميل الحيوان بطبيعته إلى القيام بأفعاله الغريزية، حتى لو واجه صعوبات في ذلك.

استخدام السلوك في دراسة التطور: يمكن استخدام أنماط السلوك الحيواني، تمامًا مثل استخدام الأعضاء التشريحية، لتحديد السلف المشترك لمختلف الأنواع وبناء شجرة تطورها (التصنيفية)[١].

في عام ١٩٥١، نشر عالم الأحياء الهولندي وعالم الطيور نيكو تينبرجن (١٩٠٧-١٩٨٨) واحدًا من الكتب الأساسية في علم السلوك الحيواني، وهو كتاب "دراسة الغريزة"[٢]. كما كتب ورقة بحثية مؤثرة حول منهجية دراسة سلوك الحيوان[٣]. حدد فيها "الأسئلة الأربعة" التي عرضها على أنها القضايا الأساسية الأربعة التي يجب على علماء السلوك الحيواني التركيز عليها:

ما الذي يحفز ظهور السلوك؟ (التسبب)

كيف يتطور السلوك خلال حياة الفرد؟ (التطور الفردي)

لماذا يقوم الحيوان بهذا السلوك؟ (القيمة البقائية)

---

(١) بوركهاردت، "أنماط السلوك"، ٢٠٢. هذا ملخص من بوركهاردت للورقة التي قدمها لورينز في ندوة في لايدن، "Uber den Begriff der Instinkhandlung." كان عنوان خطابه في الندوة "حول مفهوم الغريزة في علم نفس الحيوان". لم تكن فكرة أنماط السلوك التي يمكن استخدامها لإعادة بناء الأشجار التطورية جديدة على كونراد لورينز. لقد تم اقتراحها سابقًا من قبل الألماني أوسكار هاينروث والأمريكي تشارلز أوتيس ويتمان. انظر بوركهاردت، "أنماط السلوك"، ١٣٤.

(٢) نيكو تينبرجن، "دراسة الغريزة" (نيويورك: مطبعة جامعة أكسفورد، ١٩٧٤).

(٣) نيكو تينبرجن، "حول أهداف وطرق علم السلوك"، Zeitschrift für Tierpsychologie 20 (1963): 410-433، https://doi.org/10.1111/j.1439-0310.1963.tb01161.x. أعيد طبعها في "إرث تينبرجن: الوظيفة والآليات في علم الأحياء السلوكي"، محرران. يوهان بوليس وسيمون فيرهولست (نيويورك: مطبعة جامعة كامبريدج، ٢٠٠٩)، ١-٢٤.

كيف تطور هذا السلوك بمرور الوقت؟ (التطور)

تتناول هذه الأسئلة مواضيع كالسببية والإنماء والقيمة البقائية والتطور على التوالي. يواصل العلماء صياغة تحليل السلوك الحيواني في ضوء أسئلة تينبرجن الأربعة، وهي معقولة تمامًا إلى حد ما، ولكن لاحظ أن إطارهم هذا لا يجيب على اسئلة من قبيل: كيف ولماذا تنشأ السلوكيات (الفطرية) المبرمجة في المقام الأول. إن مجرد معرفة كيف يمكن أن يكون السلوك قابلاً للتكيف لا يكفي حتى للإجابة على سبب نشوؤها. بعد كل شيء، هناك عدد لا يحصى من السلوكيات التي يمكن أن تكون قابلة للتكيف، حتى بالنسبة لبيئة واحتياجات معينة. لماذا هذا السلوك التكيفي بالذات؟ كما أن بيان كيفية تعديل الانتقاء الطبيعي لسلوك معين مع مرور الوقت (مسألة التطور) لا يوفر سببًا كافيًا للأصل النهائي للسلوك.

شهد منتصف القرن العشرين جدلا علميا حول السلوكيات المعقدة المبرمجة، وهي الفكرة التي شكلت أساس علم السلوك الحيواني (الإيثولوجيا) الذي أسسه كل من كونراد لورينز ونيكو تينبرجن. واجهت أفكارهما حول السلوكيات الفطرية التي تولد مع الحيوان ولا تحتاج للتعلم انتقادات قوية من قبل علماء النفس السلوكيين. أكد هؤلاء العلماء على دور التعلم والخبرات المكتسبة في تشكيل سلوك الحيوان. وكانت لهذه الانتقادات تأثيرات

بعيدة المدى، إذ أدت إلى تراجع هيمنة علم السلوك الحيواني على دراسة سلوك الحيوان بحلول عام ١٩٥٠[١]، على الرغم من استمراره في إحراز نتائج مهمة.

مثل موقف علماء النفس السلوكيين تحولا جذريا في فهم سلوك الحيوان. تخلى هؤلاء العلماء عن مفهوم السلوك الفطري الصارم الذي لا يتأثر بالبيئة والخبرات، مؤكدين على دور التعلم والمرونة السلوكية.

ومع ذلك، لا يزال مفهوم السلوك الفطري يحتفظ بأهميته لدى العديد من علماء السلوك الحيواني. فالأدلة تشير إلى أن العديد من السلوكيات الحيوانية تبدو وكأنها غريزية، ولا تحتاج إلى تعلم مسبق. لكن من المهم الإشارة إلى أن التعلم، على الرغم من عدم كونه ضروريا لظهور السلوك الفطري الأساسي، يمكن أن يلعب دوراً مهماً في تحسين وتعديل هذا السلوك لاحقًا.

في نهاية المطاف، تم الاعتراف بأهمية العمل الرائد لكل من لورينز وتينبرجن، حيث تقاسموا (بالتشارك مع كارل فون فريش) جائزة نوبل في الطب أو الفيزيولوجيا عام ١٩٧٣ تقديرًا لمساهماتهم في فهم سلوك الحيوان.

تعتبر مصطلحات مثل "الغريزة" والسلوك "الفطري" مصطلحات شائعة الاستخدام عند الحديث عن السلوكيات المعقدة المبرمجة التي تقوم بها

---

(١) يلتقط باتريك بيتسون وبيتر كلوبفر التغيير الجذري، إن لم يكن جميع الفروق الدقيقة، في تعليقهما على أن "علم السلوك كهيئة متماسكة من النظرية لم يعد موجودًا في الخمسينيات". ب. ب. ج. بيتسون وبيتر إتش كلوبفر، مقدمة لـ "منظورات في علم السلوك"، المجلد ٨، "أي علم سلوك؟"، محرران. ب. ب. ج. بيتسون وبيتر إتش كلوبفر (نيويورك: بلينوم برس، ١٩٨٩)، ٧.

الحيوانات .لكن على الرغم من شيوعها، إلا أن من الضروري أن ندرك بأن فهم هذه المصطلحات يختلف بين علماء الأحياء، كما أنها محل نقاش مستمر وتطور في التعريفات.

يعود تاريخ الجدل حول السلوك الفطري إلى عدة قرون مضت .في القرن السادس عشر، حاول عالم الطبيعة الإسباني جوميز بيريرا تفسير سلوك الحيوان من خلال نظرية ميكانيكية .افترض بيريرا أن حركة الحيوان، التي أطلق عليها اسم "الحركات الحيوية"، لا تتضمن أي تفكير واعٍ[1] .ثم جاء بعده تشارلز داروين الذي قدم تعريفًا مهمًا للغريزة، كما ذكرنا سابقًا.

أما في العصر الحديث، فقد حاول علماء آخرون إعادة تعريف السلوك الفطري .عرف عالم الأحياء جون ألكوك الغريزة بأنها "سلوك يظهر بشكل كامل وفعال في المرة الأولى التي يتم تنفيذه فيها، حتى لو لم يكن لدى الحيوان أي خبرة سابقة بالإشارات التي تحفز هذا السلوك"[2].

ومن ناحية أخرى، عرّف كل من جيمس وكارول جولد السلوك الفطري بأنه سلوك يعتمد على دوائر عصبية موروثة مسؤولة عن "معالجة البيانات،

---

(١) ماوريسيو بابيني، "علم النفس المقارن: التطور وتطور السلوك" (نيويورك: سايكولوجي برس، ٢٠٠٨)، ٧. حدد بيريرا ثلاثة أنواع من الحركات التي تقوم بها الحيوانات. الأول هو الغرائز الناتجة عن التجربة الحسية، مثل نقر الكتاكيت بعد الفقس بفترة وجيزة. والثاني هو الحركات التي تحدث دون أي محفز خارجي. النوع الثالث ينطوي على التعلم من خلال التكرار، مثل ببغاء يكرر الكلام. كان يعتقد أن البشر وحدهم هم القادرون على التفكير الواعي.

(٢) جون ألكوك، "سلوك الحيوان: نهج تطوري" (ساندرلاند، ماساتشوستس: سيناور أسوشيتس، ٢٠١٣)، ٣٦٢.

واتخاذ القرارات، وتنسيق الاستجابات في غياب الخبرة السابقة"[١]. ويُعتقد أن هذه الغريزة السلوكية مشفرة في جينات الحيوان.

على الرغم من فائدتها كنقطة انطلاق، فإن تعريفات ألكوك وجولد تعتبر محدودة إلى حد ما .وذلك لأن العديد من السلوكيات المبرمجة تتضمن عنصرًا نمائيًا (أي تتطور وتتغير خلال حياة الفرد).

في بداية مسيرته البحثية، عرف كونراد لورينز نمط السلوك الغريزي بأنه "تسلسل سلوكي قائم على مسارات عصبية موروثة موجودة في الجهاز العصبي المركزي، بحيث يكون النمط ثابتًا تمامًا مثل التركيب النسيجي للجهاز العصبي أو أي خاصية تشريحية أخرى محددة" [٢]. اعتقد لورينز أن سلوك الحيوان هو مزيج من السلوكيات الفطرية والمكتسبة .أما عالم السلوك الحيواني الآخر، نيكو تينبرجن، فقد اقترح تعريفًا واسعًا يشمل الأنواع بأكملها :"كل حيوان لديه آلية سلوكية محدودة بدقة، وإن كانت معقدة للغاية، وهي ثابتة بشكل ملحوظ عبر الأنواع أو المجتمعات الحيوية"[٣].

---

(١) جيمس إل غولد وكارول غرانت غولد، "عقول الحيوانات" (نيويورك: ساينتفك أمريكان لايبراري، ١٩٩٤)، ٢٤.

(٢) كونراد لورينز، "Betrachtungen uber das Erkennen der arteigenen Triebhandlungen der Vogel"، Journal für Ornithologie 80 (1932): 50-98؛ مقتبس في بوركهاردت، "أنماط السلوك"، ١٤٦.

(٣) تينبرجن، "حول أهداف وطرق علم السلوك"، في "إرث تينبرجن"، ٥. كما أوضح تينبرجن أن هذا يتجاهل الاختلافات بسبب الاختلافات في البيئة أثناء التطور الجنيني.

وعلى الرغم من هذه التعريفات المتعددة، فإن مفهوم السلوك الفطري لم يُحسم بعد .فهناك جدل حول مدى ثبات هذه السلوكيات ومدى تأثير التعلم والبيئة عليها. إن إعادة تعريف المصطلحات والمفاهيم بشكل مستمر هو أمر ضروري لمواكبة التطورات في مجال دراسة سلوك الحيوان.

ولكن كما ذكرنا، يرفض علماء نفس سلوك الحيوان أي فكرة من هذا القبيل. على سبيل المثال، كتب أحد منتقدي مفهوم الغريزة، وهو عالم النفس مارك بلومبرج، أن "مصطلح الغريزة غالبًا ما يكون مجرد وسيلة مريحة للإشارة إلى السلوكيات المعقدة النموذجية للأنواع التي يبدو أنها تظهر بشكل غامض من العدم. لكن هذا وهم رسخه مفهوم الغريزة[١].

المشكلة التي يواجهها العديد من علماء سلوك الحيوان مع كلمة فطرية تم توضيحها من قبل عالم الأحياء باتريك باتسون حيث قام بتجميع سبعة تعريفات محتملة: "يظهر عند الولادة؛ ان يكون اختلاف سلوكي ناجم عن اختلاف جيني؛ يتكيف مع مسار التطور؛ لا يتغير طوال فترة النمو؛ ومشترك بين جميع أعضاء النوع؛ يظهر قبل أن يؤدي السلوك أي وظيفة؛ ولا يتم تعلمه".[٢]

وبسبب مشاكل التعريف، لم يعد علماء سلوك الحيوان يستخدمون مصطلح فطري اليوم. والسبب، وفقًا لعالمة النفس والباحثة في مجال الإدراك

---

(١) مارك إس بلومبرج، "الغريزة الأساسية: نشأة السلوك) "نيويورك Thunder's Mouth Press :، ٢٠٠٥)، xiv.

(٢) باتريك بيتسون، مقدمة في "تطور سلوك الحيوان: قارئ"، محرران. يوهان جيه بوليس وجيري أيه هوجان (أكسفورد: بلاكويل للنشر، ١٩٩٩)، x.

الحيواني سارة شيتلورث، "تتباين قابلية أنماط السلوك (أو القدرات المعرفية) للتعديل حسب التجربة بحيث تجعل من مصطلحات "متعلم" و"فطري" (أو "الطبع" و"التطبع") مصلحات بالية"[١].

وتفضل شيتلورث استخدام مصطلح "الاستعداد" أو "النزعة المسبقة" بدلاً عنها[٢]. وبالمثل، يقترح جيري هوجان ويوهان بولهويس أن مصطلح "السَّابِقُ للإِيْظاف" هو أفضل بديل لمصطلح "فطري"، والذي يعرّفونه بأنه "النمو دون تأثير التجربة"[٣]. والظاهر أن جميع المصطلحات التي اقترحها شيتلوورث وهوغان وبولهويس هي مصطلحات صحيحة.

يشن عالم النفس مارك بلومبيرج هجومًا على مفهوم الغريزة، معلنًا أن ارتباطه الوثيق بالنظرة الخاطئة التي ترى السلوك ناتجًا عن تصميم مُسبق وهدف محدد يُعد نقطة ضعفه الرئيسية. ليوضح وجهة نظره، يستشهد بلومبيرج بالمنظور العقلاني للغريزة الذي يعتمد على أفكار مثل الغاية والهدف والتصميم[٤]. ويضيف أن هذا الميل للتفكير في السلوك من منظور "الغائية "نابع من رغبتنا البشرية العميقة في إيجاد معنى وهدف في كل شيء يحيط بنا، بما في ذلك الطبيعة. فعندما نرى بعض سلوكيات الحيوانات تبدو

---

(١) سارة شيتلوورث، "الإدراك والتطور والسلوك" (أكسفورد: مطبعة جامعة أكسفورد، ٢٠١٠)، ١٤. تم شرح نفس النقطة في ب. بيتسون وم. ماميلي، "الفطري والمكتسب: مجموعات مفيدة أم تمييز متبق من علم الأحياء الشعبي؟"، علم النفس التنموي ٤٩ (٢٠٠٧): ٨١٨-٨٣١.

(٢) شيتلوورث، "الإدراك والتطور والسلوك"، ١٣.

(٣) جيري أيه هوجان ويوهان جيه بوليس، "تطور السلوك: الاتجاهات منذ تينبرجن"، في "إرث تينبرجن"، ١٠٤.

(٤) بلومبرج، "الغريزة الأساسية"، ١٧.

وكأنها مصممة بشكل مثالي للبقاء والتكاثر، نميل تلقائيًا إلى افتراض وجود غريزة تدفعهم للقيام بذلك. يجادل بلومبيرج بأن هذا الاستعداد الذي نتمتع به "لتفسير العالم الطبيعي بكل عجائبه من خلال عدسة التصميم قد أعاق فهمنا للتعقيد البيولوجي، بما في ذلك السلوك"[1].

ومع ذلك، من الجدير بالذكر أن نقد بلومبيرج لمفهوم الغريزة قد يقع فيه هو نفسه، حيث يمكن القول بأنه يفترض وجود "غريزة" لدى البشر تجعلهم يرون الغرض والتصميم والغريزة في سلوك الحيوان حتى وإن لم تكن موجودة. يضرب المثل بهذا التناقض بمقولة "المحاولة الجمع بين النقيضين"، فمن ناحية ينتقد بلومبيرج مفهوم الغريزة لارتباطه بالغائية، ومن ناحية أخرى، يفترض وجود غريزة لدى البشر تدفعهم لرؤية الغائية في سلوك الحيوان!

على الرغم من الإشكاليات التي تحيط بمصطلحي "الغريزة" و"السلوك الفطري"، فإنهما لا يزالان يُستخدمان على نطاق واسع، إلا أنهما يعانيان من تعدد في التفسيرات. لذلك، سأتجنب استخدام هذه المصطلحات وسأعتمد بدلاً عنها على مصطلح "السلوكيات المعقدة المبرمجة" (CPBs). يتميز هذا المصطلح بالدقة والوضوح، فهو يوضح أننا نتحدث عن سلوكيات معقدة ومميزة للأنواع، ولا يشمل السلوكيات الفطرية البسيطة مثل ردود الفعل العصبية اللاإرادية، ولا يشمل كذلك السلوكيات المعقدة المكتسبة مثل صناعة البشر للأدوات أو الكتابة. سأستخدم مصطلح "السلوكيات المعقدة

---

(١) بلومبرج، "الغريزة الأساسية"، ١٧.

المبرمجة" للإشارة إلى تلك السلوكيات المذهلة التي نلاحظها لدى الطيور والفراشة المهاجرة، والنمل الأبيض والنحل والعناكب، والتي سبق وصفها في بداية النص.

بتعريف ادق دعونا نستخدم مصطلح "السلوك المعقد المبرمج" لوصف السلوكيات التي تفي بالمعايير الخمسة التالية:

١. معقد

٢. هادف

٣. مبرمج

٤. طارئ

٥. موروث

الآن دعونا نشرح بإيجاز كل معيار من هذه المعايير الخمسة.

معقد: يشير التعقيد هنا إلى تعقيد الهندسة، ويمكن أن يشير إلى سلوك متطور، مثل ملاحة الحيوانات وتواصلها. كما يمكن أن يشير إلى تعقيد النظام المصمم الذي يشارك في إنتاج السلوك. يميز مصطلح "معقد" السلوكيات التي نتحدث عنها عن ردود الفعل الانعكاسية البسيطة.

لاحظ أن هذا التعقيد يشمل ما يعرف بالتعقيد المحدد أو الوظيفي. أي تسلسل عشوائي من الحروف معقد بطريقة ما. ومع ذلك، فإن التسلسلات الوحيدة التي تحدد شيئًا ذا مغزى، مثل الحروف في هذه الجملة، أو الترميز في برنامج معالجة النصوص الذي استخدمته لوضع هذا الكتاب، هي تسلسلات محددة. السلوكيات التي سنركز عليها في هذه الصفحات معقدة بهذا المعنى

الأغنى للتعقيد المحدد، لأنها تتحكم بها جينات متعددة (وغالبًا عدد كبير منها)، وهي شكل من أشكال المعلومات البيولوجية.

يتميز السلوك المعقد المبرمج بأنه هادف، أي أنه يسعى لتحقيق غاية أو وظيفة محددة. على سبيل المثال، يقوم العنكبوت ببناء شبكته ليس لمجرد اللهو، بل لصيد الطعام وبالتالي ضمان بقائه على قيد الحياة. مثال آخر هو ملاحة الطيور التي لا تتم بشكل عشوائي، وإنما تخدم وظائف مهمة مثل الهجرة إلى مناطق ذات ظروف مواتية أو تحديد مصادر الغذاء.

هناك اتجاه فكري في علم الأحياء المعاصر يقلل من أهمية الحديث عن الهدف أو الغائية في وصف السلوكيات، معللاً ذلك بأن الطبيعة لا تضع أهدافًا مسبقة. لكن عالم الأحياء جيه سكوت تيرنر يعارض هذا التوجه. يتساءل تيرنر: "ماذا لو كانت ظواهر مثل القصد والهدف والتصميم ليست مجرد أوهام، بل هي في الواقع سمات أساسية للحياة؟ كيف يمكننا أن نطور نظرية متماسكة للحياة تتجاهل هذه الظواهر التي نراها جلية في العديد من السلوكيات؟"[1] محقٌ تيرنر، فالغائية ضرورية لفهم السلوكيات المعقدة ولفهم الحياة بشكل عام.

عندما نصف سلوكًا بأنه "مبرمج"، فإن هذا يعني ضمنا وجود مجموعة من التعليمات التي تحدد كيفية تنفيذه. تشبه هذه التعليمات البرامج التي تعمل عليها أجهزة الكمبيوتر. في المجال العلمي، يُطلق على هذه التعليمات اسم

(١) جيه سكوت تيرنر، "الغرض والرغبة: ما الذي يجعل شيئًا ما "حيًا" ولماذا فشل الداروينية الحديثة في تفسيره" (نيويورك: هاربر وان، ٢٠١٧)، ٨.

"الخوارزمية". يعرف التعريف الرياضي للخوارزمية بأنها "إجراء رسمي لأي عملية حسابية، وهي عبارة عن مجموعة محددة من القواعد لحل مشكلة بخطوات محددة وفي وقت محدد"[١]. يعتبر مفهوم الخوارزمية حديثًا نسبيًا، حيث تم تطويره بشكل رئيسي في القرن العشرين. ويشير ديفيد بيرلينسكي في كتابه "ظهور الخوارزمية" إلى أن علماء رياضيات بارزين مثل كورت جودل وآلان تورينج وألونزو تشيرش وإميل بوست ساهموا بشكل كبير في تطوير هذا المفهوم.[٢] في البداية، كانت الخوارزمية مفهوما نظريًا يتمثل في "آلة تورينج"، وهي جهاز كمبيوتر افتراضي اخترعه آلان تورينج عام ١٩٣٦. لاحقا، تم بناء أجهزة كمبيوتر حقيقية قادرة على تنفيذ الخوارزميات من خلال البرامج المخزنة.

يُعتبر مفهوم البرامج في علم الأحياء من الدعاوى التي نادى بها عالم الأحياء ارنست مايير. وقد عرّفها بأنها "معلومات مُشفرة أو مُعدة ترتيبها مُسبقًا للتحكم بعملية (أو سلوك) ما، وتوجيهه نحو غاية محددة"[٣]. تُعد عملية صنع القرار ركيزة أساسية مشتركة في البرمجة، وعادةً ما تكون ضرورية لتحديد وقت تنفيذ السلوك. يُمكن أن يكون اتخاذ القرار بسيطًا، على مثال قرار البحث عن الطعام أو عدم البحث عنه، أو أكثر تعقيدًا، مثل تحديد مسار الهجرة والتوقيت المناسب لها. يُطبق مفهوم البرمجة أيضًا على

---

(١) روبرت كيه بارنهارت، "قاموس هاموند بارنهارت للعلوم" (مابلوود، نيوجيرسي: هاموند، ١٩٨٦)، انظر."algorithm"

(٢) ديفيد بيرلينسكي، "ظهور الخوارزمية: الفكرة التي تحكم العالم" (نيويورك: هاركورت، ٢٠٠٠).

(٣) مايير، "نحو فلسفة جديدة في علم الأحياء"، ٤٩.

العملية التي يمر بها الحيوان خلال تطوير سلوكه، بما في ذلك نمو الحيوان (التطور الجنيني) الذي يُعتبر ضروريًا لقدرة الحيوان على أداء سلوكيات معينة في نهاية المطاف.

على الرغم من تعقيد السلوك المبرمج، فإنه لا يقتصر على كونه مجرّد سلوك محدد مسبقًا يتبعه الكائن الحي بشكل آلي. بل يجب أن يكون هذا السلوك أيضًا طارئًا، أي أنه ليس بالضرورة السلوك الوحيد الذي يمكن أن يؤدي إلى نجاح وبقاء النوع الحيواني قيد الدراسة. بإمكاننا توضيح هذه الفكرة من خلال النظر إلى العديد من أشكال الاتصال المبرمجة المميزة التي نجدها في عالم الحشرات. على سبيل المثال، تعد طرق الاتصال المحددة التي تستخدمها الحشرات، مثل الإشارات البصرية والسمعية والفيرومونات، طارئة. بمعنى آخر، كان من الممكن من حيث المبدأ أن تتطور الحشرات لتستخدم إشارات مختلفة تمامًا تؤدي نفس الوظيفة الأساسية، كإيجاد الطعام أو جذب الشريك للتكاثر. ينطبق الشيء نفسه على أساليب الملاحة المختلفة التي تستخدمها الحيوانات للوصول إلى وجهاتها. كما سنرى لاحقًا، يطرح مفهوم الطارئية تحديًا جوهريًا أمام علماء الأحياء التطوريين الذين يسعون إلى شرح أصل ونشأة هذه السلوكيات المعقدة.

أخيرًا، يبرز معيار إضافي لا بد من توافره في السلوك المعقد المبرمج، ألا وهو قابلية التوريث .يكمن السبب الجوهري وراء إدراج هذا المعيار في الحاجة الملحة إلى التمييز الدقيق بين فئتين من السلوكيات :السلوكيات المعقدة المبرمجة والسلوكيات المكتسبة التي يتم اكتسابها بشكل رئيسي من

خلال عملية التعلم البيئي. إذن، لا يُصنف السلوك الذي يتطور لدى الكائن الحي حصريًا عن طريق التعلم، دون أن يكون مدعومًا بأساس وراثي قابل للانتقال عبر الأجيال، ضمن فئة السلوكيات المعقدة المبرمجة .على سبيل المثال، يُعد تعلم الطيور الصغيرة كيفية الغناء من والديها سلوكًا مكتسبًا، بينما يُعتبر بناء العش لدى الطيور نفسها سلوكًا معقدًا مبرمجًا.

بالطبع، لن يؤدي استبدال المصطلحات التقليدية مثل "الغريزة" أو "السلوك الفطري" بمصطلح "السلوك المعقد المبرمج" إلى إنهاء كافة المناظرات العلمية الدائرة حول أصل هذه السلوكيات المعقدة .لكن من شأن استخدام هذا المصطلح الجديد أن يُسهم في إزالة بعض الغموض والالتباس الذي يكتنف المصطلحات القديمة، وبالتالي قد يُتيح المجال أمام إجراء حوار علمي أكثر دقة وفعالية حول نشأة وتطور هذه السلوكيات.

هل للسلوك مورثات؟

هناك ثلاث طرق رئيسية يتم التعبير بها عن السلوكيات المعقدة والمبرمجة:

السلوك الوظيفي الكامل: يظهر السلوك بشكل كامل في المرة الأولى التي يتم تنفيذه فيها دون أي خبرة سابقة.

تطور السلوك مع النضج: يتطور السلوك مع نضج الحيوان بمرور الوقت، ويكون التطور نفسه مبرمجًا.

تطور السلوك من خلال التعلم المبرمج: يتطور السلوك من خلال التعلم المبرمج.

تؤكد شيتلورث أن معظم السلوكيات يمكن تفسيرها بآليات بسيطة: «إن مجال الإدراك المقارن كما تطور في الثلاثين او الأربعين عامًا الماضية لديه انحياز قوي للغاية لصالح الآليات «البسيطة». أي شخص يرغب في تفسير السلوك من حيث العمليات الأخرى غير التعلم الاقتراني او السلوك النموذجي للانواع وجبت عليه البينة[١].

حددت الأبحاث في علم وراثة السلوك الحيواني العديد من السلوكيات المبرمجة التي يبدو أنها تتأثر بشكل كبير بجين واحد[٢]. ومن الأمثلة على ذلك الإيقاع اليومي لذبابة الفاكهة (دروسوفيلا) المتأثر بمتغيرات الجين الدوري. واضافة لذلك عثر على ما لا يقل عن ثلاثة جينات أخرى (tim، clk، وcyc) تتحكم في الإيقاعات اليومية لذبابة الفاكهة، والتي هي في الواقع معقدة للغاية.[٣] حيث تتكون شبكة الخلايا العصبية الميقاتية (في الحيوانات، تعمل شبكات الخلايا العصبية على مدار الساعة التي تحتوي على ساعات جزيئية

---

(١) شيتلوورث، "الإدراك والتطور والسلوك"، ١٨.

(٢) "مبادئ علم الأعصاب"، محرران. إريك كاندل وجيمس شوارتز وتوماس جيسيل، الطبعة الرابعة. (نيويورك: ماكجرو هيل، ٢٠٠٠)، ٤٢.

(٣) جاي سي دنلاب، "الأسس الجزيئية للساعات البيولوجية"، Cell 96 (٢٢ يناير ١٩٩٩): ٢٧١-٢٩٠.

على تنسيق الإيقاعات اليومية في علم وظائف الأعضاء والسلوك). "من مذبذبات مستقلة متعددة، كل منها قادر على تنظيم نوبات النشاط"[١].

والمثال الثاني لجين يدعى "العلاف" يبدو أنه ينظم السلوك الغذائي المبرمج في يرقات الذباب، حيث يحتوي هذا الجين على متغيرين مختلفين يؤثران على سلوك التغذية. ينتج عن أحدهما ويدعى ("rover" وتعني الجوالة) يرقات تسافر لمسافات أطول في البحث عن الطعام، بينما ينتج عن النوع الآخر الذي يدعى ("sitter" وتعني الجليسة) يرقات تبقى في عبوات تغذية متقاربة. ومع ذلك، فإن هذا المثال أيضًا ليس بهذه البساطة، حيث أظهرت الأبحاث أن هذا التحول الجيني يتم التحكم فيه عن طريق العوامل اللاجينية[٢].

تم العثور على حالة مماثلة في سلوك "الكر او الفر" لدى الفئران الا ان السلوك في هذه الحالة يخضع لسيطرة اكثر من جين. إن تنظيم مستوى السيروتونين في نوعين من الخلايا العصبية في الدماغ يعمل كمفتاح لتحديد

(١) زي ياو وأو تي شافر، "الساعة البيولوجية لذبابة الفاكهة هي شبكة متغيرة الاقتران من وحدات ببتيدية متعددة"، Science 343، رقم ٦١٧٨ (٢٨ مارس ٢٠١٤): ١٥١٦-١٥٢٠، https://doi.org/10.1126/science.1251285.

(٢) "التبديل اللاجيني يشغل الاختلافات السلوكية الجينية"، PNAS 114، رقم ٤٧ (٢١ نوفمبر ٢٠١٧): ١٢٣٦٥-١٢٣٦٧، https://doi.org/10.1073/pnas.1717376114.

السلوك الذي يجب تنفيذه (اما الكر او الفر)، اعتمادًا على مستوى التهديد في البيئة.[١]

رغم ان هذا البحث يوضح أن بعض السلوكيات يمكن أن تتأثر بشكل كبير بجينات واحدة، إلا أن هذا لا يعني أنه حتى السلوكيات البسيطة يتم التحكم فيها حصريًا بواسطة جين واحد فقط. تعمل الأمثلة المذكورة في المقام الأول مثل المفاتيح في تشغيل السلوكيات أو إيقافها. حتى أن العديد من السلوكيات المبرمجة الأساسية تسترشد بمجموعة معقدة من الجينات بالإضافة إلى الآليات اللاجينية.

علم الوراثة اللاجينية هو جزء مما يسمى الاصطناع التطوري الموسع الذي يعتبر امتداداً للإصطناع الحديث (الداروينية الجديدة)، والذي كان يرتكز على الجينات، حيث تركز على الطفرات الجينية، وعلم الوراثة السكانية، والتحليل الإحصائي لعلم الوراثة الكمي[٢]. وقد ترك هذا النهج فجوات كبيرة. شخص العالمان ماسيمو بيجليوتشي وجيرد مولر هذه الفجوات وكتبا، "إن النظرية لم تكن قادرة على تفسير كيفية تحقيق التغير العضوي على مستوى النمط الظاهري". في المقابل، تختفي مركزية الجينات من نهج الاصطناع

---

(١) تشانغو سيو وآخرون، "التهديد الشديد يحول الخلايا العصبية للسيروتونين في الرافعة الظهرية إلى وضع تشغيل متناقض"، Science 363، رقم ٦٤٢٦ (١ فبراير ٢٠١٩): ٥٣٨-٥٤١. نوعا الخلايا العصبية هما نواة الرافعة الظهرية 5-HT (DRN) وخلايا الرافعة الظهرية لحمض جاما أمينوبوتيريك (GABA).

(٢) علم الوراثة الكمي يهتم بتقييم السمات المتغيرة التي تتأثر بجينات متعددة.

الموسع، "كان لا بد من ترك مركزية الجينات في النهج الموسع الذي يوفر عوامل تطورية متعددة الأسباب[١]".

وأيًا كان الأمر، فإن التركيز على التطور عن طريق الطفرات الجينية لم يختفي تقريبًا، ولا تزال الفكرة حية وجيدة في محاولات تفسير تطور سلوكيات معينة. لذلك، على سبيل المثال، يؤكد شون كارول وباتريس شورز كورنيلي أن "السلوك، كما السمات المظهرية الأخرى، يختلف باختلاف وظيفة الجينات والبيئة. ويحدث التباين مع مرور الوقت على جميع المستويات الديموغرافية، داخل الأفراد، وبين الأفراد، وبين المجموعات السكانية والأنواع[٢].

وهما، مثل معظم أنصار التطور المعاصرين، يفترضان أن الاختلافات التطورية الصغيرة يمكن أن تتراكم وتترجم إلى تغييرات تطورية كبيرة في السلوك. لكن هل هذا الاستقراء صحيح؟ علينا أن نكون واقعيين في بحثنا بهذا الموضوع. حيث أن معرفتنا عن أصل السلوك المعقد هي اقل بكثير مما توصلنا إليه عن أصل الخصائص الجسدية المعقدة، ورغم التقدم المذهل الذي أحرزناه في علم الوراثة قد زاد من فهمنا للعناصر الأساسية في الكائنات الحية (البروتينات، وما إلى ذلك)، إلا أننا مازلنا لا نعرف سوى القليل جدًا عن

---

(١) ماسيمو بيجليوتشي وجيرد ب. مولر، "عناصر التوليف التطوري الموسع "كامبريدج، ماساتشوستس MIT Press :، ٢٠١٠، ١٤.

(٢) سكوت ب. كارول وباتريس شاورز كورنيلي، "تطور معايير رد الفعل السلوكية كمشكلة في علم الوراثة البيئية"، في "الاختلاف الجغرافي في السلوك: وجهات نظر حول الآليات التطورية"، محرران. سوزان أيه فوستر وجون أيه إندلر (نيويورك: مطبعة جامعة أكسفورد، ١٩٩٩)، ٥٢. يواصل كارول وكورنيلي وصف كيف يمكن أن يكون للاخت

علم وراثة السلوك المعقد. ولا تزال العبارة الواردة في كتاب "البيئة السلوكية التطورية"، المطبوع عام ٢٠١٠، صحيحة حتى يومنا هذا: "ما زلنا نعرف القليل عن معدل ونوع التغير التطوري (التوازن المتقطع أو التدرج) الذي تشهده السمات السلوكية وما إذا كان يتطابق مع أنماط مماثلة في السمات المظهرية الأخرى مثل التشكل".[1] لاحظ أن هذا تعليق من علماء أحياء يكتبون من داخل النموذج التطوري للقرن الحادي والعشرين. أي أن هذا اعتراف من مؤمنين حقيقيين بالتطور.

رغم الإقرار بأننا لا نزال نجهل المعدل والنوع الذي تظهر به السلوكيات المعقدة المبرمجة (CPBs)، إلا أن هذا الإقرار يعتبر قصورًا معرفيًا كبيرا. إن لغز أصل هذه السلوكيات يتجاوز مجرد معرفة معدلات ظهورها وأنواعها، بل يتعلق بكيفية تشكل هذه السلوكيات وترسيخها ضمن الكائن الحي. لاستجلاء أبعاد هذا التعقيد، سنتفحص الآن أمثلة مذهلة على السلوكيات المعقدة المبرمجة، مثل أنظمة الملاحة والهجرة لدى الحيوانات.

(1) David F. Westneat and Charles W. Fox, eds., Evolutionary Behavioral Ecology (New York: Oxford University Press, 2010), 127.

الفصل الثاني: الملاحة والهجرة

يتألف عمل الطيار من مجموعة من التعليمات التي توجهه بدقة في كيفية التعامل مع الدفة، وتعديل الأشرعة، والاستفادة القصوى من الرياح المواتية، والمناورة ببراعة، بالإضافة إلى التعامل الأمثل مع تقلبات النسائم وتغيراتها - كل ذلك بالطريقة الصحيحة التي تضمن سلامة الرحلة ونجاحها[١].

- لوسيوس أنيوس سينيكا

هناك إنجازات مذهلة في عالم الهجرة في مملكة الحيوان، تثير الرهبة والغموض في آن واحد، لدرجة أن الباحثين لم يتمكنوا حتى الآن من كشف النقاب عن جميع أسرارها، ناهيك عن تقديم تفسير شامل لكيفية تطور تلك القدرات الفذة في المقام الأول. يبدو أن هذه القدرات الملاحية الفائقة هي جزء لا يتجزأ من تركيبة هذه الكائنات الحية - وهذا يثير الدهشة بشكل أكبر بالنظر إلى أن البشر، على ما يبدو، لا يمتلكون مثل هذه القدرات الفطرية المذهلة. وقد أظهرت العديد من الدراسات أن البشر يفتقرون إلى الإحساس الفطري بالاتجاه، مما يجعل من إنجازات الحيوانات في هذا المجال أكثر إثارة للإعجاب والبحث. تشير حقيقة أن البشر استغرقوا عصورًا طويلة لتطوير طرق دقيقة وموثوقة للإبحار عبر مسافات طويلة إلى مدى صعوبة هذا

---

(١) لوسيوس آنيوس سينيكا، "رسائل من رواقي"، ترجمة ريتشارد إم. غومير (Digireads.com Publishing، ٢٠١٧)، الموقع ١٨٠، كيندل.

التحدي، وتسلط الضوء على روعة القدرات الملاحية للحيوانات التي تفوقت على أساليب الملاحة البشرية حتى وقت قريب نسبيًا[١].

بعد أن أمضيت مسيرتي الهندسية في العمل على مختلف أنظمة الملاحة الجوية، وعندما بدأت في دراسة السلوكيات المبرمجة المعقدة، كانت المآثر المذهلة للملاحة الحيوانية هي أول ما لفت انتباهي وأثار اهتمامي. إن خبرتي في مجال تحديات تصميم أنظمة الملاحة جعلتني أشعر بفضول كبير تجاه هذه المآثر الرائعة التي تحققها الحيوانات في عالم الملاحة. وعندما تعمقت في دراسة هذا العلم، فوجئت لاكتشاف أن الملاحة الحيوانية، في كثير من الحالات، لا تزال تضاهي أو حتى تتفوق على الأنظمة التي صممها الإنسان، حتى في يومنا هذا.

خذ على سبيل المثال طيور الخرشنة القطبية، التي تقوم بأطول هجرة بين جميع الحيوانات. في فصل الربيع في نصف الكرة الشمالي، تتكاثر هذه الطيور في القطب الشمالي، على مقربة من القطب الشمالي نفسه. وبعد عدة أشهر، تنطلق في رحلة طويلة وشاقة إلى القارة القطبية الجنوبية لقضاء فصل الصيف في نصف الكرة الجنوبي. وبذلك، تكمل هذه الطيور رحلة ذهابًا وإيابًا تتراوح بين ٢٥,٠٠٠ و٣٠,٠٠٠ ميل. تشير البيانات المستمدة من عمليات التسجيل إلى أن أقدم طائر خرشنة قطبية معروف عاش لأكثر من أربعة وثلاثين عامًا، وقد يكون قد قطع مسافة هائلة تصل إلى مليون ميل خلال

---

(١) جيمس إل غولد وكارول غرانت غولد، "بوصلة الطبيعة: لغز الملاحة الحيوانية" (برينستون: مطبعة جامعة برينستون، ٢٠١٢)، ٣.

حياته[1]. ليس هذا فحسب، بل إن فراشات الملك، كما ذكرنا سابقًا، تهاجر لمسافات تصل إلى ثلاثة آلاف ميل بين كندا والمكسيك، وتستغرق هذه الرحلة عدة أجيال من الفراشات لإتمامها.

أمام هذه الحقائق المذهلة، يطرح السؤال نفسه بإلحاح: كيف تتمكن الكائنات الحية مثل الخرشنة القطبية وفراشة الملك من تحقيق مثل هذه الإنجازات الخارقة في الملاحة؟ وكيف يمكن أن تكون هذه القدرات الملاحية قد تطورت عبر عملية تطورية عمياء وتدريجية، دون توجيه أو تدخل خارجي؟ هذه الأسئلة وغيرها تفتح آفاقًا جديدة للبحث والاستكشاف في عالم الملاحة الحيوانية، وقد تحمل في طياتها إجابات قد تفيدنا في تطوير أنظمة ملاحة أكثر كفاءة ودقة في المستقبل.



الشكل ٢.١. الخرشنة القطبية

(١) بن هوار، "هجرة الحيوانات: رحلات رائعة في البرية" (بيركلي: مطبعة جامعة كاليفورنيا، ٢٠٠٩)، ١٤٣.

عند محاولة الإجابة عن هذا السؤال، يجب علينا أولاً أن ندرك أن الحيوانات، بما في ذلك البشر، تستخدم مجموعة متنوعة من التقنيات الملاحية المعقدة، وتعتمد على مصادر متعددة للحصول على معلومات حول موقعها . من بين هذه المصادر نجد المعالم البارزة والشمس والضوء المستقطب المنبعث منها، بالإضافة إلى البوصلة المغناطيسية والنجوم والمواد الكيميائية والروائح ودرجة الحرارة والجاذبية .وبشكل أعم، حدد الباحثان جيمس وكارول جولد ست استراتيجيات ملاحة متميزة يستخدمها الحيوان في رحلاته:

الحركة الضوئية (Taxis) وهي حركة توجهها إشارة خارجية، مثل الضوء (التوجه الضوئي) أو المواد الكيميائية (التوجه الكيميائي).

الملاحة بالمعالم (Landmark navigation) وتعتمد على استخدام المعالم المألوفة لتحديد الاتجاه الصحيح، وتعرف أيضًا باسم التوجيه.

التوجه بالبوصلة (Compass orientation) وهي القدرة على المحافظة على اتجاه ثابت بالنسبة لإشارة خارجية، مثل المجال المغناطيسي للأرض.

الملاحة المتجهة (Vector navigation) تتضمن اتباع سلسلة من اتجاهات البوصلة، وعادة ما تكون مستقلة عن المعالم الأرضية.

الحساب الميت (Dead reckoning) وهي عملية حساب الموقع الحالي عن طريق تقدير المسافة والاتجاه الذي تم قطعه في كل مرحلة من الرحلة، دون الاعتماد على المعالم الخارجية.

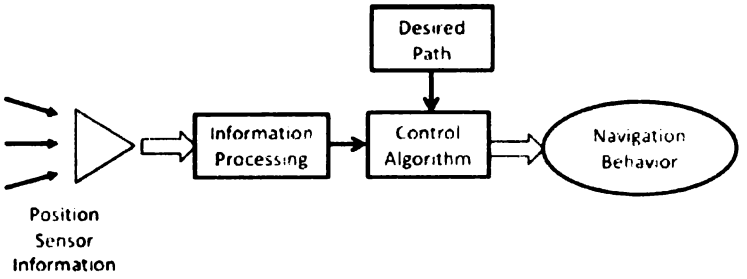
الملاحة الحقيقية (True navigation) وهي الملاحة التي تعتمد على المعرفة المسبقة بالوجهة المقصودة، وتتطلب نوعًا من الإحساس بالخريطة الذهنية.[١]

يوضح الشكل ٢.٢ نموذجًا لنظام ملاحة حيواني عام. يتكون هذا النظام من عناصر أساسية تشمل جهاز استشعار لتحديد الموقع الحالي، ووحدة لمعالجة معلومات المستشعر، ومعلومات تحدد المسار المطلوب، بالإضافة إلى خوارزمية تحكم توجه حركة الحيوان. في الأقسام التالية، سنتناول بالتفصيل بعض هذه الأنواع من الملاحة، مع أمثلة توضيحية لكيفية استخدامها من قبل حيوانات معينة في رحلاتها المذهلة.

الملاحة بالمعالم

تعتمد الملاحة بالمعالم على إشارات بصرية بارزة، وهي أبسط أنواع الملاحة التي يستخدمها الإنسان. يتم استخدامها بسهولة أكبر في الأماكن التي يمكن فيها تمييز المعالم عن بعد، وتصبح أكثر صعوبة، على سبيل المثال، في الغابات المطيرة الكثيفة حيث لا يمكن رؤية الأشياء البعيدة. ومع ذلك، هناك حالات يتم فيها استخدام الملاحة بالمعالم في البحر، حيث يستخدم قادة السفن وبعض الطيور المعالم فوق الماء، عندما يكونون قريبين بما فيه الكفاية من اليابسة للحفاظ على الاتصال البصري. كما تستخدم السفن المنارات كنقاط مرجعية رئيسية في رحلاتها.

(١) غولد وغولد، "بوصلة الطبيعة"، ١٦.



الشكل ٢.٢. نظام الملاحة الحيواني العام

تستخدم معظم الحيوانات الملاحة بالمعالم بشكل أو بآخر، حتى وإن كانت تستخدم أيضًا تقنيات ملاحية أكثر تعقيدًا. العديد من هذه الحيوانات قادرة على تكوين نوع من الخريطة المعرفية للمنطقة المحلية، استنادًا إلى المعالم التي تلاحظها بمرور الوقت. أجرى نيكو تينبرجن العديد من التجارب على النحل والدبابير لتحديد كيفية استخدامها للمعالم. تحتفظ دبابير الحفر بفرائسها في جحور، والتي تحتاج إلى أن تكون قادرة على العودة إليها بشكل موثوق. إنها تستخدم المعالم المحلية لتتبع مواقع الجحور. وجدت تجارب تينبرجن أن الدبابير لديها تفضيل قوي للعلامات ثلاثية الأبعاد ذات الألوان الداكنة.[١] أحد الأسباب التي تجعل المعالم بحاجة إلى ميزات بارزة لتحديدها الدبابير هو أن رؤيتها ضعيفة للغاية (٢٠/٢٠٠٠)[٢]. يعلق جولدز قائلاً: "ليس هناك شك في أن النحل والدبابير يولدون وهم يعرفون بالفعل شيئًا عن كيفية

---

(١) غولد وغولد، "بوصلة الطبيعة"، ١٧٤.

(٢) جيمس إل غولد وكارول غرانت غولد، "المهندسون المعماريون من الحيوانات" (نيويورك: بيسك بوكس، ٢٠٠٧)، ١٧.

اختيار واستخدام المعالم"[١]. لذلك، يولدون بنوع من المعرفة الإجرائية، والتي من المحتمل أن تكون مبرمجة. أظهرت التجارب أيضًا أن النمل يستخدم المعالم عند التنقل بين أعشاشه ومواقع التغذية[٢].

الحساب الميت (Dead Reckoning)

الحساب الميت، الذي يُعرف اختصارًا بـ "DR"، هو مصطلح مُشتق من "الحساب المستنتج" (Deduced Reckoning)، وهو أسلوب ملاحي لا يعتمد على المعالم الأرضية، بل يعتمد بدلاً من ذلك على أخذ قياسات دقيقة لحركة السفينة، بما في ذلك اتجاهها وسرعتها. ويُعتبر تحديد السرعة أمرًا بالغ الأهمية في هذا النوع من الملاحة[٣].

يتم حساب السرعة عن طريق قسمة المسافة المقطوعة على الزمن المستغرق. قد يبدو هذا الأمر بسيطاً، لكنه لم يكن كذلك في الماضي، حيث لم تكن هناك آليات دقيقة متاحة لقياس المسافة أو الوقت قبل بضع مئات من السنين. فلم تكن الساعات الدقيقة موجودة بعد. ولذلك، كان يتم تقدير السرعة عادة عن طريق إلقاء جسم من مقدمة السفينة وانتظار وصوله إلى مؤخرتها، ثم قسمة طول السفينة على الوقت الذي استغرقه الجسم لقطع هذه

---

(١) غولد وغولد، "بوصلة الطبيعة"، ١٧٦.

(٢) روديغر فيهنر وآخرون، "ملاحة النمل: طرق ذات اتجاه واحد بدلاً من الخرائط"، Current Biology 16 (١٠ يناير ٢٠٠٦): ٧٥-٧٩، https://doi.org/10.1016/j.cub.2005.11.035.

(٣) دونالد لونر، "الملاحة عبر العصور" (دوبس فيري، نيويورك: شيريدان هاوس، ٢٠٠٩)، ٢١. الملاحة بالقصور الذاتي وتكامل المسار هي إصدارات أكثر تعقيدًا من الحساب الميت.

المسافة المعروفة. وكان يتم قياس الوقت في كثير من الأحيان باستخدام الساعة الرملية.

كانت هناك طريقة أخرى لتقدير السرعة، حيث يتم استخدام حبل معقود على فترات منتظمة وإلقائه في الماء من مؤخرة السفينة. وكلما زادت سرعة السفينة، زاد ابتعاد نقطة دخول الحبل في الماء عن السفينة بسبب قوة التيار، مما يؤدي إلى سحب المزيد من الحبل وعقده فوق سطح الماء. ومن هنا جاء مصطلح "العقدة" كوحدة لقياس السرعة، حيث تعادل العقدة الواحدة ميلاً بحرياً واحداً (١٨٥٢ متراً) في الساعة. وعلى الرغم من أن هذه الطريقة لم تعد مستخدمة على نطاق واسع، إلا أن العقدة لا تزال الوحدة الأساسية لقياس السرعة في كل من الملاحة البحرية والجوية حتى يومنا هذا.

يشهد تطور تقنيات الملاحة على مر العصور على براعة الإنسان في إيجاد حلول للتحديات التي تواجهه في استكشاف العالم من حوله. ومن خلال استخدام الحساب الميت، تمكن الملاحون القدماء من تحقيق إنجازات مذهلة في الملاحة البحرية، مما مهد الطريق لتطوير تقنيات أكثر دقة وحداثة في وقتنا الحاضر.

مع ظهور الطيران في بواكير القرن العشرين، قد يتبادر إلى الذهن أن التكنولوجيا قد سهّلت عملية الملاحة بشكل كبير وفوري .ومع ذلك، لم يكن هذا هو الحال في الواقع .ففي مراحلها الأولى، كانت الملاحة الجوية بدائية للغاية لدرجة أن إحدى الطرق التي كانت تستخدم لتحديد موقع الطائرات هي رسم علامات على أسطح المباني، مثل الحظائر والمخازن، وإنشاء

أنواع أخرى من المعالم الأرضية .وكانت هذه المعالم ضرورية لتوجيه الطيارين بصرياً، وبالتالي كانت عديمة الفائدة في الظروف الجوية السيئة مثل الليل أو الضباب أو الغيوم.

ومع مرور الوقت، تم تطوير أنظمة ملاحية راديوية أرضية، مما مكّن الطائرات من التنقل بشكل جيد نسبيًا لمسافات طويلة، حتى في ظروف الضباب الكثيف وفي الليل .ومع ذلك، ظلت الرحلات الجوية عبر المحيطات تواجه تحديًا كبيرًا في الملاحة، حيث أن أنظمة الراديو الأرضية، وكذلك الرادار، لا يمكن استخدامها لمسافات تتجاوز عدة مئات من الأميال. وللتغلب على هذه المشكلة، اعتمد الطيارون على الملاحة السماوية، وهي طريقة تعتمد على النجوم والكواكب لتحديد الموقع والاتجاه .ولكن حتى هذه الطريقة كانت تعاني من قيودها، حيث كانت غير مجدية في الأيام الملبدة بالغيوم، مما يجعل الملاحة في تلك الظروف تحديًا حقيقيًا.

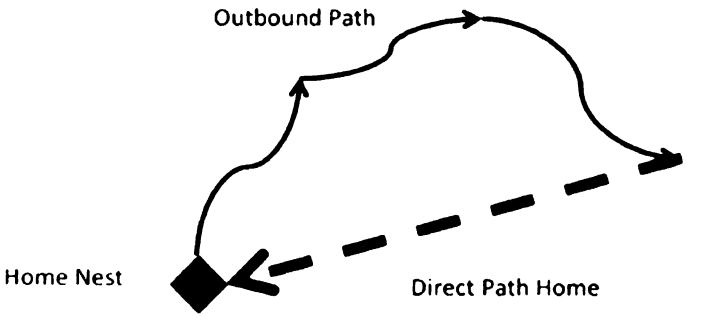


Figure 2.3. Animal Path Integration (Dead Reckoning)

الشكل ٢.٣. تكامل مسار الحيوان (الحساب الميت)

شهدت الملاحة الجوية لمسافات طويلة قفزة نوعية مع تطوير أنظمة الملاحة بالقصور الذاتي، والتي تعتمد على استخدام الجيروسكوبات ومقاييس التسارع [1]. تسمح هذه المستشعرات للنظام بحساب سرعة واتجاه الحركة بدقة .ومع ذلك، لا تزال دقة أنظمة الملاحة بالقصور الذاتي في الطائرات محدودة، حيث يتم قياسها من حيث الخطأ الذي يحدث خلال ساعة واحدة من التشغيل .وتصل نسبة الخطأ في أنظمة الطائرات عالية الجودة إلى حوالي ٠٫٥ميل لكل ساعة طيران.

ومن المثير للاهتمام أن بعض الحيوانات تستخدم شكلاً من أشكال "الحساب الميت" المعروف بتكامل المسار. في هذه الطريقة، تحافظ الحيوانات على تتبع اتجاه البوصلة والمسافة المقطوعة، مما يمكنها من تحديد موقعها واتجاهها بدقة عالية. ولكن كيف تتمكن الحيوانات من تتبع اتجاه البوصلة دون امتلاك بوصلة مادية؟ تكمن الإجابة في أن هذه الحيوانات تمتلك بوصلات داخلية متطورة تعمل بكفاءة عالية، حتى قبل أن يخترع الإنسان البوصلة التقليدية. والأكثر إثارة للدهشة هو أن هذه الحيوانات لديها القدرة الفطرية على قراءة هذه البوصلات الداخلية وتفسير بياناتها.

من خلال التتبع المستمر لمعلومات اتجاه البوصلة والمسافة المقطوعة، تستطيع هذه الحيوانات حساب مسار مباشر للعودة إلى نقطة انطلاقها، حتى لو كانت قد سلكت مسارًا متعرجًا ومعقدًا أثناء رحلتها .فهي لا تتبع ببساطة

---

(١) تقيس الجيروسكوبات السرعة الزاوية، بينما تقيس مقاييس التسارع التسارع الخطي للطائرة في ثلاثة أبعاد.

المسار الأصلي الذي سلكته للذهاب، بل تختصر الطريق وتعود مباشرة إلى نقطة البداية .ويوضح الشكل ٣ ٢. مثالًا على حركة الحيوان في مثل هذه الحالة، حيث أظهرت التجارب أن الحيوانات قادرة على اتباع المسار المباشر للعودة دون الحاجة إلى أي معالم خارجية.[١]

في سياق مناقشتهم لقدرة نحل العسل على تحقيق مثل هذه الإنجازات الملاحية المذهلة، يشير الباحثان جولدز إلى أن هذه القدرة تدل على تمكن النحل من إجراء العمليات الحسابية المثلثية اللازمة لعملية "الحساب الميت" بدقة فائقة[٢] .هذا يعني أن النحل قادر على حساب كل من الاتجاه والمسافة التي قطعها بعد رحلات طويلة ومتعرجة عبر مناطق غير مألوفة، وذلك بالاعتماد على قدراته الداخلية وتتبع حركاته بدقة.

ومع ذلك، فإن استخدام الحساب الميت في الملاحة الجوية للحيوانات يواجه تحديين رئيسيين. الأول هو تأثير الرياح على مسار الطيران، حيث أن أي رياح قوية يمكن أن تؤدي إلى أخطاء في حساب التغير في الموقع.[٣] أما التحدي الثاني فهو أن حساب السرعة الأرضية بدقة وتقدير الموقع يتطلب معرفة الارتفاع الذي يطير فيه الحيوان.

وفي محاولة لفهم كيفية تنفيذ عملية تكامل المسار لدى النحل، قام فريق من الباحثين بتطوير نموذج عصبي مقترح يوضح كيفية إجراء

---

(١) فيهنر وآخرون، "ملاحة النمل: طرق ذات اتجاه واحد بدلاً من الخرائط"، ٧٥.

(٢) غولد وغولد، "بوصلة الطبيعة"، ١٦٧.

(٣) غولد وغولد، "بوصلة الطبيعة"، ٣١.

الحسابات الرياضية اللازمة بناءً على المعلومات التي يتم جمعها من أجهزة الاستشعار الملاحية لدى النحل [١]. كما قاموا ببناء واختبار روبوت تجريبي لمحاكاة هذا النموذج، والذي يتضمن استخدام علم المثلثات وغيرها من العمليات الرياضية المعقدة [٢].

الملاحة بالبوصلة

كما يوحي اسمها، تعتمد الملاحة بالبوصلة على اتباع اتجاه محدد يشير إليه جهاز البوصلة، أو أي إشارة أخرى تدل على الاتجاه الجغرافي. وفي حال اتباع سلسلة من اتجاهات البوصلة، يُطلق على هذه العملية اسم "الملاحة المتجهة".

في حالة الملاحة البشرية، يستخدم الناس أجهزة بوصلة يدوية تستشعر المجال المغناطيسي للأرض لتحديد اتجاه الشمال. أما الحيوانات، فتستخدم مجموعة متنوعة من الإشارات لتحديد الاتجاه الجغرافي، بما في ذلك المغناطيسية الأرضية، والشمس، والنجوم، والضوء المستقطب.

البوصلة المغناطيسية

يعود الفضل في اختراع البوصلة المغناطيسية إلى الصينيين، حيث استخدموها لأول مرة في تحديد الاتجاهات حوالي عام ١٠٨٨م [٣]. وانتقلت هذه التقنية في النهاية إلى البحارة الأوروبيين، الذين اعتمدوا عليها في

---

(١) توماس ستون وآخرون، "نموذج مقيد تشريحيًا لتكامل المسار في دماغ النحل"، Current Biology 27 (٢٣ أكتوبر ٢٠١٧): ٣٠٦٩-٣٠٨٥، https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.08.052.

(٢) ستون وآخرون، "نموذج مقيد تشريحيًا"، قسم طرق المحاكاة.

(٣) لونر، "الملاحة عبر العصور"، ٢٤.

رحلاتهم البحرية. في البداية، لم يكن هناك وعي بالفرق بين الشمال الحقيقي والشمال المغناطيسي، ولكن بعد اكتشاف هذا التناقض، قام البرتغاليون بتطوير جداول تحدد الفرق بينهما بالنسبة لمواقع محددة. ومع ذلك، اكتشف العلماء في القرن السابع عشر أن موقع الأقطاب المغناطيسية يتغير باستمرار[١]، حيث يتحرك القطب المغناطيسي الشمالي بمعدل ١٠-١٥ ميلًا في السنة، مما يشكل تحديًا للملاحة الدقيقة[٢].

ومن المثير للدهشة أن العديد من الحيوانات تمتلك حاسة مغناطيسية فطرية تمكنها من استخدام المجال المغناطيسي للأرض كبوصلة داخلية لتحديد الاتجاه. تتواجد هذه الحاسة في مجموعة واسعة من الحيوانات، بما في ذلك جميع المجموعات الرئيسية من الفقاريات، وبعض الرخويات والقشريات والحشرات. وعلى الرغم من التقدم العلمي، لا يزال العلماء يبحثون عن الآليات الدقيقة التي تعمل بها هذه الحاسة المغناطيسية المذهلة.

نعلم اليوم أن الطيور تمتلك حاسة مغناطيسية متطورة تستخدمها بشكل فعال في رحلات الهجرة الطويلة [٣].وعلى الرغم من أننا لم نتمكن بعد من فهم جميع تفاصيل هذه الآلية المعقدة، إلا أنه من الواضح أن الطيور تتمتع بقدرة هندسية فائقة على تحديد موقعها واتجاهها بدقة بناءً على المجال

---

(١) لونر، "الملاحة عبر العصور"، ٢٤.

(٢) لونر، "الملاحة عبر العصور"، ٣٧. لجعل الأمر أكثر تعقيدًا، تنعكس الأقطاب الشمالية والجنوبية بشكل دوري. وقد حدث هذا خمسة وعشرين مرة في الخمسة ملايين سنة الماضية. بالإضافة إلى ذلك، أثناء التغيير، يصبح المجال المغناطيسي صفرًا. حدث الانعكاس الأخير منذ حوالي ٧٨٠،٠٠٠ سنة.

(٣) كينيث جيه لومان، "إدراك المجال المغناطيسي"، Nature 464 (٢٢ أبريل ٢٠١٠): ١١٤٠.

المغناطيسي للأرض .وتكمن أهمية هذه البوصلة المغناطيسية في أنها تعمل باستمرار، بغض النظر عن الظروف الجوية أو الرؤية، مما يجعلها أداة لا غنى عنها في رحلات الهجرة الشاقة.

وقد أثبتت الدراسات وجود هذه الحاسة المغناطيسية في مجموعة واسعة من الطيور، بما في ذلك الطيور المغردة المهاجرة والحمام الزاجل .وتشير الأبحاث إلى أن الطيور الصغيرة تعتمد بشكل أساسي على البوصلة المغناطيسية في أولى رحلات هجرتها، حيث يمكنها تحديد الاتجاه الصحيح للهجرة دون الحاجة إلى أي إشارات أخرى،[١] مما يشير إلى أن المعلومات الأساسية المتعلقة بالهجرة تكون مبرمجة مسبقًا في جيناتها.

وقد ركزت العديد من الأبحاث الأولية على تحديد طبيعة البوصلة المغناطيسية وموقعها الدقيق في جسم الطائر. وتشير بعض الدراسات التجريبية إلى وجود مستقبلات للكشف عن المجال المغناطيسي في شبكية العين والأنف والمنقار والأذن الداخلية لدى الطيور[٢]. وتعتبر مادتين أساسيتين مرشحتين للعب دور المستشعر المغناطيسي: المغنتيت والكريبتوكروم.

المغنتيت هو معدن أكسيد الحديد ذو خاصية مغناطيسية عالية (Fe3O4)، يُعرف أيضًا باسم حجر المغناطيس. تم اكتشاف المغنتيت مُدمجًا

---

(١) ولفجانج ويلتشكو وروزويثا ويلتشكو، "التوجه المغناطيسي في الطيور"، Journal of Experimental Biology 199، رقم ١ (يناير ١٩٩٦): ٣١.

(٢) ويلتشكو وويلتشكو، "التوجه المغناطيسي في الطيور"، ٣١.

في أجسام العديد من الحيوانات اللافقارية، بما في ذلك فراشات الملك وجراد البحر الشوكي والعُث والنمل الأبيض[١]. كما تم العثور على المغنتيت في العديد من الفقاريات بما في ذلك الطيور وسمك السلمون والدلافين والسلاحف البحرية وجرذان الخُلد وحتى السمند[٢]. يشير جيمس جولد إلى أن المستشعرات القائمة على المغنتيت هي المرشح الوحيد المعقول الذي يتمتع بالحساسية اللازمة لاكتشاف المجال المغناطيسي واستخلاص المعلومات ذات الصلة[٣]. ومع ذلك، لا يزال هناك جانب غير مفهوم وهو كيفية تصنيع بلورات المغنتيت أو دمجها في الكائنات الحية[٤].

المرشح الرئيسي الآخر للمستشعر المغناطيسي هو الكريبتوكروم، وهو بروتين موجود في العديد من الحيوانات والنباتات. يعمل كمستقبل ضوئي للضوء الأزرق، وفي الحيوانات التي تمتلكه، يوجد في مخاريط شبكية العين. النظرية هي أنه يمكن أن يعمل ككاشف مغناطيسي من خلال عملية معقدة حيث يتسبب الكشف عن الضوء في تكوين زوج من الإلكترونات

---

(١) روبرت سي بيason، "آليات التوجه المغناطيسي في الطيور"، Integrative Comparative Biology 45، رقم ٣ (يونيو ٢٠٠٥): ٥٦٥-٥٧٣، https://doi.org/10.1093/icb/45.3.565.

(٢) غولد وغولد، "بوصلة الطبيعة"، ١١٤.

(٣) غولد وغولد، "بوصلة الطبيعة"، ٢١٢-٢١٣.

(٤) جيمس إل غولد، "الاستقبال المغناطيسي"، Current Biology 20، رقم ١٠ (2010): R435.

التي تتأثر بعد ذلك بالمجال المغناطيسي[١]. أفضل دليل من الأبحاث الحديثة على طريقة الكشف المغناطيسي هذه هو في الطيور[٢].

تشير الأبحاث الحديثة إلى آليات محتملة لكيفية نقل معلومات الكشف المغناطيسي إلى الدماغ. في تجربة أجريت على الحمام، تم تحديد استجابة عصبية في أدمغتها، تؤكد قدرة الحمام على اكتشاف الخصائص الثلاث للمجالات المغناطيسية: الاتجاه، والشدة، والقطبية[٣]. وقد تبين أن هذه

---

(١) يظهر المغنتيت الذي تم العثور عليه في معظم الحيوانات على شكل ما يسمى بلورات المجال الواحد وهي صغيرة للغاية (حوالي ٥٠ ميكرومتر). هذه مغناطيسات دائمة تتماشى مع المجال المغناطيسي للأرض (لومان، "إدراك المجال المغناطيسي"). كانت هناك بعض التجارب المحدودة التي تشير إلى أن البشر قد يكون لديهم إحساس مغناطيسي. جاءت أقوى الأدلة من التجارب التي أجراها باحث كالتيك جو كيرشفينك والتي أسفرت عن مؤشرات إيجابية على وجود حاسة مغناطيسية. تم وصف بحث كيرشفينك في إريك هاند، "مستكشف القطب"، Science 352، رقم ٦٢٩٣ (٢٤ يونيو ٢٠١٦): ١٥٠٩-١٥١٣. إحدى الحقائق التي تدعم إمكانية الإحساس المغناطيسي البشري هي أنه تم العثور على المغنتيت في الدماغ البشري (ستيوارت أ. غيلدر وآخرون، "توزيع ناقلات البقايا المغناطيسية في الدماغ البشري"، Nature: Scientific Reports 8 (27 يوليو ٢٠١٨): ١١٣٦٣، https://doi.org/10.1038/s41598-018-29766-z). ومع ذلك، على الرغم من بعض الأدلة على أن البشر قد يمتلكون حاسة مغناطيسية، إلا أن Goulds كانا متشككين. يكتبون: "بالاشتراك مع زملائنا الرئيسيات، لا يوجد سبب وجيه للاعتقاد بأن لدينا إما إحساسًا بالخريطة أو بوصلة مغناطيسية". (غولد وغولد، "بوصلة الطبيعة"، ٢٢٤-٢٢٥).

(٢) إريك هاند، "ما هي وأين مقاييس المغناطيسية في الجسم؟"، Science 352، رقم ٦٢٩٣ (٢٤ يونيو ٢٠١٦): ١٥١٠-١١.

(٣) روزويثا ويلتشكو وولفغانغ ويلتشكو، "استشعار الاتجاهات المغناطيسية في الطيور: عمليات الأزواج الراديكالية التي تشمل كريبتوكروم"، Biosensors 4 (٢٤ يوليو ٢٠١٤): ٢٢٢.

الخلايا العصبية تستجيب لمتجه المجال المغناطيسي، الذي يشمل الشدة، والسمت (الزاوية الأفقية)، وزاوية الميل (الارتفاع)، والقطبية.

تكمن أهمية هذه النتائج في أن هذه المعلومات يمكن استخدامها لتحديد الموقع الجغرافي للحيوان. ومع ذلك، لا يزال هناك الكثير مما يجب اكتشافه حول كيفية استشعار المجالات المغناطيسية وكيفية معالجة هذه المعلومات بدقة في الدماغ.

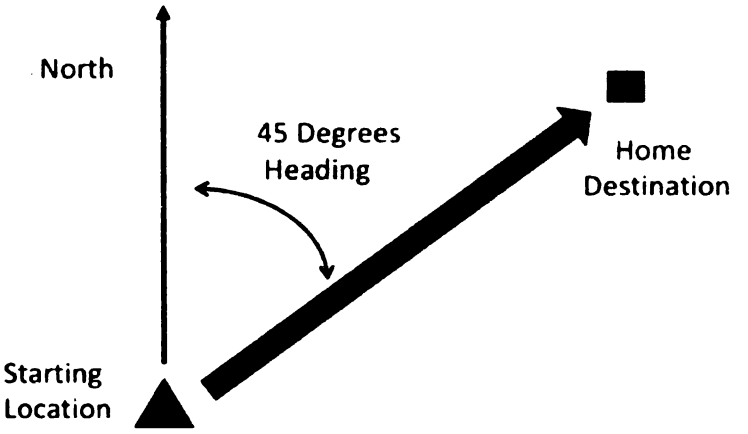
وبالرغم من ذلك، فإن هذه المعلومات وحدها لا تزال غير كافية لتحديد مسار الملاحة المطلوب. إذ يتطلب ذلك الاستعانة ببوصلة أخرى، إما بوصلة الشمس أو البوصلة المغناطيسية، كما هو موضح في الشكل ٢.٤. هذه ليست مهمة سهلة، حيث أن البوصلة بحد ذاتها تشير فقط إلى اتجاه الشمال، بينما يتطلب تحديد مسار الملاحة حساب الزاوية بين الشمال والوجهة المطلوبة. ويبدو أن هذه هي الطريقة التي تعتمدها معظم الحيوانات المهاجرة في تحديد مساراتها.

البوصلة الشمسية

تُعد بوصلة الشمس أداة ملاحية أخرى تعتمد عليها العديد من الحيوانات، إلا أنها تنطوي على آلية معقدة للغاية .يكمن هذا التعقيد في حقيقة أن الشمس تتحرك باستمرار من الشرق إلى الغرب على مدار اليوم . ولذلك، فإن استخدام الشمس لتحديد الاتجاه يتطلب معرفة دقيقة بموقعها النسبي بالنسبة للشمال الحقيقي .وهذه ليست مهمة سهلة، إذ أن موقع الشمس بالنسبة للشمال الحقيقي لا يختلف فقط على مدار اليوم، بل يتغير

أيضاً تبعاً لخط العرض وموقع الأرض في مدارها حول الشمس بسبب ميل محور الأرض.

علاوة على ذلك، يتغير توقيت شروق الشمس وأقصى ارتفاع لها في السماء يومياً بالنسبة لموقع ثابت على الأرض .الثابت الوحيد في هذه المعادلة هو أن أقصى ارتفاع للشمس يحدث في منتصف المسافة بين وقتي الشروق والغروب .هذه العوامل مجتمعة تجعل من بوصلة الشمس آلية ملاحية معقدة تتطلب من الحيوانات قدرات حسابية وذاكرة قوية لتتبع موقع الشمس المتغير وفهم علاقتها بالشمال الحقيقي.



الشكل ٤.٢. تحديد متجه مسار الملاحة

كمثال على ضرورة أخذ كل هذه العوامل بعين الاعتبار، لننظر في هجرة فراشات الملك جنوبًا. فكما يوضح جولد وجولد، يجب على هذه الفراشات أن "توجه مسارها إلى يمين الشمس في الساعة ٩ صباحًا، نحو الشمس في الظهيرة،

وإلى يسار الشمس في الساعة ٣ مساءً، وهكذا دواليك، مع المحافظة دائمًا على التوجه نحو الجنوب"[١].

نظريًا، يمكن استخدام ارتفاع الشمس لضبط الوقت، شريطة أن يكون لدى الحيوان إحساس فطري بخط العرض الذي يوجد فيه والوقت من السنة، لأن ارتفاع الشمس يختلف تبعًا لخط العرض والموسم. ومع ذلك، أظهرت التجارب أن الحيوانات لا تعتمد على ارتفاع الشمس، بل تعتمد بشكل أساسي على تحديد الزاوية بين الشمال الحقيقي واتجاه الشمس على المستوى الأفقي، وهي زاوية تُعرف باسم زاوية السمت. نظرًا لأن زاوية سمت الشمس تتغير باستمرار على مدار اليوم، فإن الحيوانات تتبعها بناءً على الوقت. وهذا يتطلب وجود ساعة بيولوجية داخلية لتتبع الوقت وحساب التعويض اللازم. الأمر الأكثر تعقيدًا هو أن معدل تغير زاوية سمت الشمس يختلف أيضًا باختلاف خط العرض والموسم. لذلك، فإن التعويض الزمني ليس ثابتًا، بل يجب تعديله باستمرار لمراعاة هذه الاختلافات. ومع ذلك، فإن الحيوانات، بما في ذلك فراشات الملك والنحل والعديد من الطيور، مجهزة لإجراء الحسابات اللازمة بدقة كافية.

يصف جولد وجولد تجربة أجريت على النحل أشارت إلى أن النحل يستخدم متوسط موضع الشمس على مدار الأربعين دقيقة السابقة، مما يحسن الدقة الإجمالية لتقدير الموضع، بدلاً من استخدام لقطة واحدة. أظهرت

---

(١) لي-كينج وو وجيه ديفيد ديكمان، "الارتباطات العصبية للحس المغناطيسي"، Science 336 (٢٥ مايو ٢٠١٢): ١٠٥٤-١٠٥٧.

التجارب أنه حتى عندما يتم حجب رؤية الشمس عن الحيوانات لساعات، فإنها لا تزال قادرة على التعويض بشكل صحيح عن تغير موضعها. أظهرت أبحاث أخرى أن النمل ونحل العسل لديهما برنامج فطري يقدر موضع الشمس على مدار اليوم. تعتمد الخوارزمية التي يستخدمها النمل والنحل على افتراض أن الشمس تحافظ على سمت ثابت في الصباح، ثم تتغير بسرعة بمقدار ١٨٠ درجة عند الظهر، ثم تظل ثابتة مرة أخرى في فترة ما بعد الظهر. ومع ذلك، هذا الافتراض ليس ثابتًا، حيث يمكن للحشرات تعلم تقدير موضع أكثر دقة للشمس بناءً على المعلومات المتوفرة في خط العرض المحلي.

تم إثبات التعويض الزمني في العديد من التجارب حيث تم تغيير مكان الحيوان بشكل مصطنع، مما أدى إلى تغيير موقع الشمس كما يراه الحيوان. استجابت الحيوانات بالتحرك في اتجاه يعتمد على المكان الذي كانت ستكون فيه الشمس قبل تغيير مكانها. توضح هذه التجارب أن الحيوانات تبني نظام الملاحة الخاص بها على خوارزمية تقدر الموقع النسبي للشمس على مدار اليوم.

بوصلة الضوء المستقطب

تتمتع بعض الكائنات الحية بقدرة مذهلة على استشعار واستغلال ظاهرة فيزيائية دقيقة للتنقل في بيئتها، ألا وهي استقطاب الضوء .فبالإضافة إلى القدرة على رؤية الشمس مباشرة، تمتلك هذه الكائنات آلية بصرية متطورة تمكنها من تحديد موقع الشمس بدقة حتى عندما تكون الرؤية المباشرة محجوبة بالسحب الكثيفة .هذه الآلية الفريدة تعتمد على قدرة استثنائية على تحليل واستيعاب الأنماط المتغيرة للضوء المستقطب في السماء.

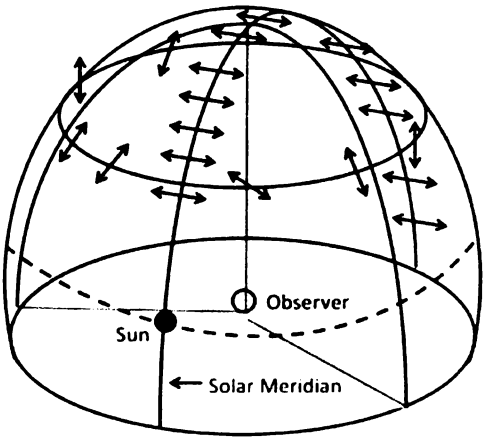
عندما ينبعث ضوء الشمس نحو الأرض، يكون غير مستقطب .يعني هذا أن موجات الضوء تنتشر في جميع الاتجاهات بشكل عشوائي وغير منظم . ومع ذلك، عندما يمر هذا الضوء عبر الغلاف الجوي، يحدث تفاعل بين جزيئات الضوء (الفوتونات) وجزيئات الغلاف الجوي، مما يؤدي إلى استقطاب جزئي للضوء .بمعنى آخر، تصبح موجات الضوء أكثر انتظامًا وتتحرك في اتجاهات محددة .يوضح الشكل ٢ ٥.كيف يتغير الضوء من حالة غير مستقطبة إلى حالة مستقطبة جزئيًا أثناء مروره عبر الغلاف الجوي.

من المدهش أن هذا الضوء المستقطب يحمل في طياته معلومات قيمة حول موقع الشمس .تتغير زاوية استقطاب الضوء بشكل تدريجي عبر السماء، وتكون دائمًا متعامدة على الخط الوهمي الذي يربط بين الشمس والراصد . هذا يعني أن الكائنات التي تستطيع تحليل أنماط الاستقطاب يمكنها تحديد موقع الشمس بدقة حتى عندما تكون الشمس نفسها غير مرئية[١].

يكمن أحد التحديات الرئيسية في استخدام الاستقطاب لتحديد الاتجاه في أن كل نقطة في السماء لا تمتلك نمط استقطاب فريد .في الواقع، يتكرر كل نمط استقطاب مرتين في كل مستوى ارتفاع في السماء .هذا يشبه وجود بوصلة بها نقطتان تشيران إلى الشمال بدلاً من واحدة .لحل هذا الغموض، تعتمد الكائنات الحية على قدرتها على رؤية أجزاء واسعة من السماء، مما يمكنها من تحليل أنماط الاستقطاب المختلفة واستخلاص موقع الشمس بدقة.

---

(١) غولد وغولد، "بوصلة الطبيعة"، ١٩.



شكل ٢.٥ استقطاب ضوء الشمس

بعض الحيوانات قادرة على استشعار اتجاه مستوى الضوء المستقطب، ومن ثم استنتاج موقع الشمس حتى في الأيام التي تكون فيها السماء ملبدة بالغيوم. ومع ذلك، فإن مجرد اكتشاف اتجاه الاستقطاب لا يحل المشكلة بشكل كامل. تتغير نواقل الاستقطاب مع حركة الشمس على مدار اليوم، مما يزيد من تعقيد خوارزمية البوصلة التي تعتمد على الاستقطاب. تواجه هذه البوصلة نفس التحدي الذي يواجه بوصلة الشمس في تعويض مسار الشمس على مدار اليوم (كما هو موضح في الخط المتقطع في الشكل ٢.٥).

أظهرت تجربة مختبرية مبتكرة أن نحل العسل يستطيع التنقل بالاعتماد فقط على اكتشاف متجه الضوء المستقطب.[١] يمتلك النحل، وكذلك النمل، هياكل متخصصة في العين والدماغ تعمل ككاشفات للاستقطاب.[٢] أوضح

(١) تالبوت ووترمان، "ملاحة الحيوانات" (نيويورك: ساينتفك أمريكان لايبراري، ١٩٨٩)، ١٠٠.

(٢) غولد وغولد، "بوصلة الطبيعة"، ٨٧-٩٠.

كارل فون فريش، مكتشف بوصلة الاستقطاب في النحل، أن النحل يحتاج فقط إلى رؤية رقعة صغيرة من السماء الصافية (حوالي عشر درجات) لتحديد الاستقطاب وتوجيه رقصاتهم بدقة (سنتحدث عن ذلك لاحقًا)[١].

لا يعد استخدام معلومات الاستقطاب لتحديد موقع الشمس أمرًا بسيطًا. يتطلب برنامج كمبيوتر قادر على إدارة هذه المهمة برمجيات متطورة وحسابات رياضية معقدة. يبدو أن النحل يمتلك آلية مشابهة. يقول جولدز، "في الواقع، أضاف النحل خدعة معالجة تمكنهم من تخمين سمت الشمس"[٢]. تتطلب هذه الخدعة هندسة معقدة قد تبدو تفوق قدرات النحل والنمل ذي الأدمغة الصغيرة. ولكن يبدو أن النحل والنمل قادران على إجراء الحسابات اللازمة، حيث ثبت أنهما يعرفان موقع الشمس حتى عندما تكون غير مرئية بشكل مباشر.

تم اكتشاف استخدام مختلف للضوء المستقطب في الطيور المهاجرة. خلصت دراسة أجريت على الطيور المغردة إلى أن بوصلتها المغناطيسية الداخلية تتم إعادة ضبطها بناءً على إشارات الضوء المستقطب عند شروق الشمس وغروبها. بشكل أدق، عندما يكون هناك تعارض بين الإشارات المغناطيسية والضوء المستقطب في أي من الوقتين، تتم إعادة معايرة البوصلة

---

(١) غولد وغولد، "بوصلة الطبيعة"، ٧٣.

(٢) روديغر فيهنر، "مجموعة أدوات الملاحة لنمل الصحراء: المعرفة الإجرائية بدلاً من المعرفة الموضعية"، Journal of the Institute of Navigation 55، رقم ٢ (صيف ٢٠٠٨): ١٠٩.

المغناطيسية. تحدث هذه العملية قبل وأثناء الهجرة، وفي كل من الطيور الصغيرة والبالغة[١].

أشارت الأبحاث الإضافية إلى أن الطيور تميل إلى تجاهل إشارات استقطاب ضوء الشمس عندما تكون الشمس قريبة من السمت (أعلى نقطة في السماء). يعود السبب في ذلك إلى أن متجه الضوء المستقطب يكون موازيًا للشرق والغرب عندما تكون الشمس في السمت، وبالتالي يكون عموديًا على اتجاه البوصلة المغناطيسية، مما يسبب ارتباكًا في النظام الملاحي للطيور[٢].

تعتبر طريقة إعادة المعايرة هذه شبه مثالية لأن أقصى استقطاب يحدث عند شروق الشمس وغروبها، ومتوسط القياسين يقلل من الخطأ. وتجاهل الإشارات عندما تكون الشمس في السمت يزيل الأخطاء أيضًا. إن استخدام شكل من أشكال الهندسة الكروية وطريقة المعايرة يدلان على التصميم الهندسي المعقد لهذا السلوك الملاحي. تتسم الهندسة الكروية بالتعقيد لأن الكرة لا تحتوي على خطوط مستقيمة، وبالتالي لا تنطبق عليها الهندسة الإقليدية القياسية. يقوم علماء الرياضيات البشر بإجراء هذه الحسابات باستخدام حساب المثلثات الكروية المعقدة. لا يزال من غير

---

(١) روديغر فيهنر، "الملاحة بالضوء المستقطب بواسطة الحشرات"، Scientific American 235، رقم ١ (يوليو ١٩٧٦): ١١٥.

(٢) ب. كرافت وآخرون، "ملاحة نحل العسل: اتباع الطرق باستخدام إشارات الضوء المستقطب"، Philosophical Transactions of the Royal Society B 366، رقم ١٥٦٥ (١٢ مارس ٢٠١١): ٧٠٣-٧٠٨. https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0203 .

المعروف كيف يقوم دماغ الحيوان الصغير بإجراء مثل هذه الحسابات المعقدة، ولكن يبدو أنها عملية برمجة فطرية.

البوصلة السماوية للملاحة الفلكية

تُعتبر الملاحة الفلكية المعتمدة على النجوم أحد أوجه الملاحة السماوية، وتستند إلى عنصرين أساسيين :الأول هو الاعتماد على النقطة القطبية، وهي النقطة الظاهرية في السماء التي تدور حولها الشمس والقمر والنجوم بالتزامن مع دوران الأرض .ويُعتبر النجم القطبي (Polaris) حاليًا الأقرب إلى النقطة القطبية، حيث يبعد عنها بمسافة ٠.٧درجة .لكن نظرًا لعدم وقوعه تمامًا على محور القطب (كما أن محور دوران الأرض يتأرجح على مدار القرون)، فإن الاعتماد عليه بشكل كامل في الملاحة الدقيقة يواجه بعض التحديات.

أما العنصر الثاني فيتمثل في استخدام الأبراج النجمية .فقد أثبتت التجارب أن الطيور قادرة على تحديد النقطة القطبية من خلال رصد الأبراج ودوران النجم القطبي حولها .يبدو أن هذه النقطة الثابتة هي المرجع الذي تعتمد عليه الطيور، وليس أي نجم محدد بالقرب منها .[1]كما أن الطيور قادرة على تحديث هذه المعلومات نظرًا لتغير مواقع الأبراج على مدار العام .

---

(١) روديغر فيهنر، "ملاحة نمل الصحراء: كيف تحل العقول المصغرة المهام المعقدة"، Journal of Comparative Physiology 189 (2003): 579-588، https://doi.org/10.1007/s00359-٠٠٣-٠٤٣١-١. تمتلك صراصير الليل والجراد هياكل وظيفية مماثلة لاستخدام متجهات الضوء المستقطب للملاحة؛ ومع ذلك، يبدو أنها تكتشف الاستقطاب من خلال طريقة مختلفة.

وتحدث ظاهرة مشابهة في نصف الكرة الجنوبي، حيث يعتمد تحديد النقطة القطبية على دوران كوكبة الصليب الجنوبي حولها بدلًا من نجم واحد.

وعلى غرار البوصلات الأخرى، يظل أصل استخدام النقاط القطبية في الملاحة الحيوانية لغزًا محيرًا .فالسلوك فطري ومعقد، ويتمتع البشر بالقدرة العقلية على دراسة هذه الظاهرة وإتقان تطبيقها في الملاحة باستخدام الرياضيات .لكن كما هو موضح، فإن أنواع الحيوانات المذكورة سابقًا لا تتعلم هذه القدرة، بل هي متأصلة فيها بالفطرة.

الإحساس بالخريطة والملاحة الحقيقية

تتمتع الحيوانات بقدرة مذهلة تُعرف بالملاحة الحقيقية. تتمثل هذه القدرة في تحديد موقعها بدقة بالنسبة إلى وجهتها المقصودة، حتى بعد نقلها إلى مكان غير مألوف تمامًا، دون الاعتماد على أي معالم محيطة مألوفة [1].تُعد هذه القدرة مثيرة للإعجاب بشكل خاص وتستحق التعمق في فهمها.

لا تقتصر قدرة الحيوانات الملاحية على مجرد استخدام البوصلة أو الاعتماد على تكامل المسار (الملاحة بالقصور الذاتي) .فهذه الأدوات، رغم أهميتها، توفر فقط توجيهات عامة على طول مسار معين أو من وإلى نقطة ثابتة .أما الملاحة الحقيقية، فتعتمد على ما يُعرف بـ "الإحساس بالخريطة"، وهو ما يمكن الحيوانات من تحديد وجهتها بدقة انطلاقًا من أي موقع، تمامًا كما نفعل نحن البشر باستخدام نظام تحديد المواقع العالمي .(GPS) والأكثر

(١) كارل فون فريش، "النحل: رؤيتهم، حواسهم الكيميائية ولغتهم" (إيثاكا: مطبعة جامعة كورنيل)، الموقع ١٠٢١، كيندل.

إثارة للدهشة هو أن المسافة التي تُنقل بها الحيوانات لا تؤثر إطلاقًا على دقتها في العودة إلى موطنها الأصلي .هذا المستوى من الدقة لا يمكن تحقيقه بمجرد استخدام البوصلة والمتجهات، حيث تتضاءل دقة هذه الأدوات مع زيادة المسافة، كما هو الحال في أنظمة الملاحة بالقصور الذاتي للطائرات.

يعتمد نوع الخرائط الذي نعرفه على نظام إحداثيات ثنائي يحدد المواقع على الأرض باستخدام خطوط الطول والعرض .وبفضل هذا النظام، يمكن تحديد المسار (الاتجاه) والمسافة بين أي نقطتين على الخريطة .وقد أصبح هذا النوع من الخرائط مألوفًا للكثيرين بفضل الانتشار الواسع لنظام تحديد المواقع العالمي .(GPS) ويعود الفضل في تحقيق هذه الطفرة في مجال الملاحة العالمية إلى تطوير القدرة على تحديد خطوط الطول والعرض والاتجاه المغناطيسي بدقة.

يعود الفضل في وضع مفهوم استخدام خطوط الطول والعرض الوهمية لتحديد المواقع على الأرض إلى إراتوستينس (٢٧٦-١٩٦ قبل الميلاد)، ولكن لم يتم تطبيق هذا المفهوم عمليًا إلا في أطلس العالم الذي وضعه بطليموس عام ١٥٠ ميلاديًا .ويُعتقد أن البحارة البرتغاليين كانوا أول من استخدم خطوط العرض في الملاحة في أوائل القرن الخامس عشر، وذلك بالاعتماد على النجم القطبي كمرجع لتحديد موقعهم [١].

شكل تحديد خط الطول تحديًا أعقد بكثير من تحديد خط العرض، حيث تطلب الأمر أكثر من مجرد مراقبة الأجرام السماوية .ففي حين يمكن

(١) غولد وغولد، "بوصلة الطبيعة"، ٩٤.

تحديد خط العرض بسهولة من خلال قياس ارتفاع الشمس أو النجم القطبي فوق الأفق، تطلب تحديد خط الطول استخدام أداة مختلفة تمامًا :ساعة دقيقة للغاية .يكمن السبب في العلاقة الوثيقة بين الوقت وخط الطول، حيث تكمل الأرض دورة كاملة حول محورها بزاوية ٣٦٠ درجة كل أربع وعشرين ساعة، ما يعني أن كل ساعة تعادل ١٥ درجة من خط الطول . وبالتالي، يمكن تحديد خط الطول من خلال مقارنة التوقيت المحلي بالتوقيت في موقع مرجعي معروف، مثل مرصد غرينتش في لندن، والذي يمثل خط الطول الرئيسي أو خط جرينتش.

ولكن تحديد التوقيت المحلي بدقة على متن السفن المتحركة في عرض البحر لم يكن بالأمر السهل .فالساعات المتاحة في ذلك الوقت، والتي كانت تعتمد على البندول، لم تكن قادرة على العمل بدقة في ظل حركة السفينة المستمرة وتقلبات الطقس .وحتى بعد تطوير ساعات أكثر دقة، ظلت هذه المشكلة قائمة، حيث أثرت الظروف البيئية القاسية في البحر على دقة هذه الساعات.

أدى عدم القدرة على تحديد خط الطول بدقة إلى عواقب وخيمة، حيث فقدت أعداد لا تحصى من السفن والبحارة حياتهم في عرض البحر بسبب صعوبة تحديد موقعهم بدقة والوصول إلى وجهاتهم المقصودة .وتعد كارثة عام

١٧٠٧، التي جنحت فيها أربع سفن حربية بريطانية وغرقت، إحدى أبرز الأمثلة على هذه الكوارث، حيث أودت بحياة حوالي ألفي بحار وجندي[١].

هذه الكوارث دفعت البحرية البريطانية إلى إعلان عن مكافأة ضخمة لمن يتمكن من تطوير ساعة بحرية دقيقة يمكن استخدامها لتحديد خط الطول على متن السفن .وقد نجح النجار الإنجليزي جون هاريسون في تحقيق هذا الإنجاز عام ١٧٥٩ بعد عقود من العمل الدؤوب والتجارب المتكررة . وتعرض ساعة هاريسون البحرية الفريدة، والتي تعد تحفة هندسية بحد ذاتها، في متحف مرصد غرينتش، شاهدة على هذا الإنجاز التاريخي.

وقد استغرقت عملية تطوير ساعة هاريسون البحرية عدة مراحل، حيث كانت النماذج الأولى كبيرة الحجم، شبيهة بفرن الميكروويف. ومع مرور الوقت، تمكن هاريسون من تقليص حجم الساعة تدريجيًا حتى وصل إلى حجم عملي يمكن استخدامه على متن السفن .وكان الهدف الذي وضعته البحرية البريطانية هو تحديد خط الطول بدقة تصل إلى نصف درجة، أي ما يعادل تقريبًا ٣٠ ميلاً بحريًا[٢]. ورغم أن هذا المستوى من الدقة قد يبدو

---

(١) راشيل موهيم، جون ب. فيليبس، وسوزان أكيسون، "إشارات الضوء المستقطب تكمن وراء معايرة البوصلة في الطيور المغردة المهاجرة"، Science 313 (١١ أغسطس ٢٠٠٦): ٨٣٧-٨٣٩.

(٢) راشيل موهيم، سيسيل سوبيرج، وأتيكوس بينزون رودريغيز، "الضوء المستقطب يعدل اتجاه البوصلة المغناطيسية المعتمدة على الضوء في الطيور"، PNAS 113، رقم ٦ (٩ فبراير ٢٠١٦): ١٦٥٤، www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1513391113. من الغريب أن هذه الدراسة نفسها حددت أن الطيور لا تستخدم الضوء المستقطب كبوصلة مستقلة للتوجيه، ولكن فقط لمعايرة البوصلة المغناطيسية.

بسيطًا اليوم، إلا أنه كان يمثل طفرة هائلة في مجال الملاحة في ذلك الوقت، حيث تجاوز بكثير دقة الطرق التي كانت متاحة سابقًا[١].

لقد أدركنا منذ فترة أن الطيور تتمتع بنوع من الحس الخرائطي المدهش. يعتبر الحمام خير مثال على ذلك، إذ يتميز بقدرته المذهلة على العودة إلى موطنه الأصلي من أي مكان. ويبدو أن هذه القدرة الفريدة لا تقتصر على الحمام فحسب، بل تمتد إلى العديد من الطيور المهاجرة لمسافات طويلة. وتدعم هذه الفكرة الأدلة القوية التي تشير إلى أن هذه الطيور تستطيع الطيران آلاف الأميال والوصول إلى وجهاتها المقصودة بدقة متناهية، مثل طائر الزقزاق ذي الذيل الشريطي وطائر الكروان ذي الفخذ الخشن، اللذين يهاجران بين ألاسكا وجزر جنوب المحيط الهادئ [٢]. ومن الدلائل الأخرى التي تشير إلى وجود حس الخريطة لدى الطيور المهاجرة لمسافات طويلة، أن هذه الطيور تسافر بشكل فردي في الليل، كل منها يتبع مساره الخاص، بدلاً من اتباع سرب أو مجموعة.

ساد الاعتقاد في السابق أن القدرة على تحديد المواقع والملاحة الدقيقة تقتصر على بعض الفقاريات فقط. إلا أن الأبحاث الحديثة كشفت النقاب عن وجود هذه الحاسة لدى مجموعة متنوعة من اللافقاريات، بما في ذلك الكركند والرخويات.

---

(١) غولد وغولد، "بوصلة الطبيعة"، ١٤٠-١٤١.

(٢) غولد وغولد، "بوصلة الطبيعة"، ١٩٤.

أكدت الدراسات التي أجريت على السلاحف البحرية الضخمة الرأس (اللجأة) وجراد البحر الشوكي أن هذه الكائنات تمتلك حاسة تحديد المواقع التي تعتمد على المجال المغناطيسي للأرض، والذي تتفاوت عناصره من منطقة إلى أخرى، بما في ذلك شدة المجال الكلية، والشدة العمودية، والشدة الأفقية[١]. وقد توصلت الأبحاث الحديثة إلى أن جراد البحر الشوكي قادر على تحديد اتجاهه نحو موطنه من مسافات تصل إلى ٣٧ كيلومتراً، كما يمكنه تحديد خط الطول وخط العرض.

تتمتع بعض الكائنات الحية بقدرةٍ استثنائية على استشعار شدة المجال المغناطيسي للأرض، بل إن بعضها الآخر قادر على تحديد زاوية ميل هذا المجال بدقةٍ متناهية. وتمثل هذه القدرة مصدرًا غنيًا بالمعلومات حول خط العرض، حيث تختلف زاوية ميل المجال المغناطيسي من نقطة إلى أخرى على سطح الأرض. ففي القطب الشمالي (٩٠ درجة)، يتجه المجال بشكلٍ رأسي نحو الأسفل، بينما يصبح أفقيًا تمامًا عند خط الاستواء (صفر درجة)، ثم يعود للاتجاه الرأسي ولكن نحو الأعلى عند القطب الجنوبي (-٩٠ درجة). وقد كشفت الأبحاث العلمية أن قدرة الطيور على استشعار المجال المغناطيسي لا تعتمد على قطبيته الشمالية-الجنوبية (كما كان يُعتقد سابقًا)، بل تعتمد بشكلٍ أساسي على زاوية ميله الرأسية[٢].

(١) لونر، "الملاحة عبر العصور"، ٣.

(٢) دافا سوبيل، "خط الطول" (نيويورك: كتب البطريق، ١٩٩٥)، ١١-١٢.

لا يطرأ على خصائص المجال المغناطيسي للأرض أي تغير منتظم مع خطوط الطول، مما يعني غياب علاقةٍ مباشرة بين المجال المُستشعر وخط الطول الفعلي. ومع ذلك، أظهرت الدراسات وجود آلية فريدة لدى سلاحف البحر ضخمة الرأس تُمكنها من استخدام المجال المغناطيسي لحساب خط الطول،[١] وهي معلومةٌ جوهرية تستخدمها هذه السلاحف للتنقل بكفاءة عبر مساراتها في شمال المحيط الأطلسي. ويفترض الباحثون أن تحديد خط الطول، وبالتالي إنشاء خريطة ثنائية الإحداثيات (خطوط الطول والعرض)، أمرٌ ممكن بفضل الطبيعة الفريدة للمناطق التي تعبرها هذه السلاحف، حيث تتميز بمجالات مغناطيسية ذات شدة وزاوية ميل محددتين، وكلاهما تستطيع سلاحف البحر ضخمة الرأس استشعارهما بدقة. وإذا ما تأكدت هذه الفرضية القائلة بقدرة بعض الحيوانات على تكوين مثل هذه الخريطة ثنائية الإحداثيات، فسيُفسر ذلك قدرتها العجيبة على تحديد مسارها بدقةٍ متناهية عبر مسافات شاسعة. ويُعلق غولدز على ذلك بقوله: "باعتبارها استراتيجيةً عالمية توفر (بشكلٍ غير مباشر) كلاً من خط العرض وخط الطول، فإن نظام تحديد المواقع المغناطيسي (GPS) يُعتبر التفسير الأمثل والأكثر إقناعًا لهذه الظاهرة الفريدة"[٢].

---

(١) سوبيل، "خط الطول"، ٥٣.

(٢) لم يتوفر نظام ملاحة عالمي يوفر أيضًا معلومات دقيقة عن الموقع إلا مع ظهور نظام تحديد المواقع العالمي .(GPS) يتم تحديد الموقع باستخدام نظام تحديد المواقع العالمي (GPS) بناءً على الوقت المقاس لإرسال الإشارات بين أقمار GPS التي تدور في مدارها والمستخدم. تبلغ دقة توقيت إشارات GPS حوالي ٢٥ نانوثانية. وهذا يتيح لنظام تحديد المواقع العالمي (GPS) تحقيق دقة موضع اسمية في حدود أمتار قليلة.

على الرغم من الأدلة على أن النمل والنحل يمكنهما تحديد الطرق المباشرة من خلال تكامل المسار، يبدو أنهما لا يمتلكان إحساسًا حقيقيًا بالخريطة [١]. تشير الأبحاث الحديثة التي أجراها جيمس تشيزمان وآخرون إلى أن النحل يمتلك شكلاً من أشكال الإحساس بالخريطة يختلف عن الخريطة الحقيقية. وعند مقارنة المسافات النسبية التي يقطعها النمل والنحل بتلك التي تقطعها الطيور وسكان المحيطات مثل السلاحف البحرية، يتضح أن الإحساس بالخريطة العالمية) أي ما يعادل نظام تحديد المواقع العالمي (GPS) ليس ضروريًا بالنسبة لهم .بدلاً من ذلك، قد يعتمد إحساسهم بالخريطة على خريطة معرفية مترية، تُعرَّف بأنها القدرة على تحديد موقع المرء في الفضاء باستخدام الاتجاهات والمسافات[٢]. وهذا يعني أن الحيوان يمكنه التنقل من النقطة أ إلى النقطة ب لأنه يمكنه تحديد الاتجاه والمسافة.

أظهرت الأبحاث أن النحل يمكنه التنقل باستخدام المعالم المحلية حتى بعد تهجيره فعليًا ووضعه في وقت محاكى من اليوم، وهو ما يعطل عادةً ملاحة البوصلة الشمسية لديه. وبالمثل، خلص الباحثان راندولف مينزل وأوي جربجرز أيضًا إلى أن نحل العسل يمتلك شكلاً من أشكال الخريطة المعرفية المكانية التي تعتمد على دمج خريطة اتجاه البوصلة والمعالم المحلية[٣].

---

(١) غولد وغولد، "بوصلة الطبيعة"، ١٨٥-١٨٧.

(٢) شون كاين وآخرون، "التوجيه والملاحة المغناطيسية في السلاحف البحرية وجراد البحر والرخويات: المفاهيم والألغاز"، Integrative and Comparative Biology 45، رقم ٣ (يونيو ٢٠٠٥): ٥٣٩.

(٣) ويلتشكو وويلتشكو، "استشعار الاتجاهات المغناطيسية في الطيور". هذا مهم لأن إحدى مشاكل البوصلة المغناطيسية هي أن المعلومات لا تمكن من التعرف الفريد على القطب الشمالي والجنوبي،

ومن المثير للاهتمام أن هذا النوع من الخرائط كان قد تم إثباته سابقًا فقط في الثدييات والطيور، والتي تمتلك قدرة إدراكية أكبر بكثير .يشير هذا إلى أن النحل يمتلك قدرات إدراكية أكثر تعقيدًا مما كان يُعتقد سابقًا، وأن إحساسه بالمكان والزمان يتجاوز مجرد الاستجابة للمنبهات البيئية المباشرة.

إن اكتشاف امتلاك بعض الحيوانات لإحساس حقيقي بالخريطة يُعتبر إنجازًا مذهلاً في حد ذاته، لكن الاستخدام المتطور للخرائط المعرفية المكانية لا يقل أهمية، بل وقد يكون أكثر إثارة للإعجاب. دعونا نبدأ بالأساسيات: مجرد معرفة موقعك الحالي ووجهتك على الخريطة لا يعني بالضرورة أنك تمتلك القدرة الفطرية على تحديد كيفية الانتقال من النقطة "أ" إلى النقطة "ب". حتى بالنسبة لمعظم البشر، فإن حساب المسار ليس بالأمر السهل أو البديهي. يتطلب الأمر أولًا تحديد زاوية المسار النسبية من "أ" إلى "ب"، ثم تحويل هذه الزاوية إلى مسار فعلي يعتمد على إشارة الملاحة (راجع الشكل ٤.٢ لمزيد من التوضيح).

يضاف إلى ذلك مستوى آخر من التعقيد الذي تتقنه بعض الكائنات التي تقوم برحلات هجرة لمسافات طويلة، وخاصة الطيور. هذا التعقيد الإضافي ينبع من حقيقة أن الأرض كروية الشكل، وبالتالي فإن المسارات المستقيمة

ولكنها تميز فقط اتجاه القطب عن اتجاه خط الاستواء. بالنسبة للطيور التي تهاجر عبر خط الاستواء، فإن هذا يمثل غموضًا يجب على الطيور حله بطريقة ما. إن استشعار زاوية الميل المغناطيسي سيمكن الطيور من الحصول على ملاحة مستمرة عند عبور خط الاستواء (ويلتشكو وويلتشكو، "التوجه المغناطيسي في الطيور"، ٣١).

(كما تبدو على الخرائط المسطحة) ليست هي الأقصر أو الأكثر كفاءة عند السفر عبر مسافات شاسعة. تُعرف أقصر الطرق بـ "طرق الدائرة العظمى"، لأنها تبدو وكأنها قوس عند رسمها على خريطة مسطحة. هذه هي المسارات التي تتبعها الطائرات الحديثة في رحلاتها الطويلة.

ولتوضيح الفرق بشكل أكبر، تخيل رحلة جوية من نيويورك إلى طوكيو. عند النظر إلى خريطة مسطحة، قد يبدو أن أقصر طريق هو الطيران في خط مستقيم باتجاه الغرب مع انحراف طفيف نحو الجنوب، حيث أن طوكيو تقع تقريبًا على نفس خط عرض نيويورك ولكنها أبعد قليلاً باتجاه الجنوب. ولكن، عند النظر إلى الكرة الأرضية، يتضح لنا أن أقصر طريق يمر بشكل ملحوظ شمالًا فوق كندا وألاسكا. هذا هو طريق الدائرة العظمى. يكمن التحدي في أن حساب هذا المسار يتطلب استخدام علم المثلثات الكروية، وهو فرع من الرياضيات يتعامل مع العلاقات بين الزوايا والأضلاع في المثلثات الكروية. بالإضافة إلى التعقيد الهندسي، يجب تعديل مسار المسافر باستمرار للبقاء على الطريق الصحيح. فقط مع ظهور أجهزة الكمبيوتر، أصبحت الطائرات والسفن قادرة على اتباع مسارات الدائرة العظمى بدقة عالية. ومع ذلك، بطريقة ما، تمتلك الطيور خوارزمية داخلية مبرمجة تمكنها من حساب هذه المسارات المعقدة.

تم طرح العديد من الفرضيات لمحاولة تفسير كيفية تمكن الطيور من اتباع طرق الدائرة العظمى[١]. وعلى الرغم من وجود طرق لتبسيط العمليات الحسابية المطلوبة، إلا أنها لا تزال خوارزميات معقدة تتطلب مزيدًا من الدراسة لفهم أصلها وكيفية تنفيذها في أدمغة الطيور. هذا يمثل تحديًا للأبحاث الحالية في مجال التطور والعلوم العصبية، ويتطلب المزيد من الجهد لفك رموز هذه الآليات المعقدة الكامنة وراء قدرات الملاحة الفائقة لدى الطيور.

الهجرة والعودة إلى الديار لمسافات طويلة: رحلة غامضة في عالم الحيوان

لا تقتصر هجرات الحيوانات على مجرد الانتقال المادي من نقطة إلى أخرى، بل هي عملية معقدة ومتعددة الأبعاد تتطلب التخطيط الدقيق والتوقيت المثالي والظروف المواتية واتباع المسار الصحيح للوصول إلى الوجهة المنشودة. إن الهجرة الناجحة تتجاوز مجرد الحركة العشوائية، بل هي سلوك غريزي مبرمج في جينات الكائنات الحية. وكما أوضح فرانسيسكو بوليدو في مجلة Bioscience، فإن الطيور المهاجرة، على سبيل المثال، تمتلك "برنامجًا فطريًا" يوجهها في كل خطوة من رحلتها، بدءًا من تحديد الوقت المناسب للمغادرة، وسرعة الطيران، والاتجاه الذي يجب اتباعه، وصولاً إلى الوقت المناسب للتوقف[٢]. علاوة على ذلك، تتمتع العديد من الطيور بقدرة فطرية

---

(١) ناثان إف بوتمان وآخرون، "إدراك خط الطول والخرائط المغناطيسية ثنائية الإحداثيات في السلاحف البحرية"، Current Biology 21 (٢٢ مارس ٢٠١١): ٤٦٣-٤٦٦، https://doi.org/10.1016/j.cub.2011.01.057.

(٢) غولد وغولد، "بوصلة الطبيعة"، ٢٢٢.

مذهلة على العودة إلى الديار، وهي القدرة على تحديد موقعها الأصلي بدقة والتنقل إليه بنجاح بعد رحلة طويلة وشاقة.

تُعد هجرات المسافات الطويلة من أبرز الأمثلة على الملاحة الحيوانية، والتي تظهر فيها قدرة الكائنات الحية على اجتياز آلاف الكيلومترات للوصول إلى وجهاتها المحددة. سواء كانت الرحلة المذهلة لطائر الخرشنة القطبية الشمالية، الذي يقطع مسافة تصل إلى ٧٠,٠٠٠ كيلومتر سنويًا بين القطبين الشمالي والجنوبي، أو الهجرات الرأسية اليومية[١] للعوالق الحيوانية في المحيط، فإن هذه الظاهرة البيولوجية المدهشة تتشارك في مجموعة من الخصائص الأساسية التي تميزها عن الحركة العشوائية أو التنقلات القصيرة[٢].

أولًا وقبل كل شيء، تتميز الهجرة بالحركة المستمرة والاتجاه الواضح نحو موطن مختلف. فالحيوانات المهاجرة لا تتوقف عند أول عقبة تواجهها، بل تستمر في التحرك بعزم وإصرار نحو وجهتها النهائية. ثانيًا، تتبع هذه الحيوانات مسارًا ثابتًا ومحددًا بدقة للوصول إلى هدفها، مما يشير إلى امتلاكها لخريطة داخلية أو بوصلة فطرية توجهها خلال رحلتها.

(١) ماثيو كوليت وتوماس إس كوليت، "ملاحة الحشرات: لا توجد خريطة في نهاية الطريق؟"، Current Biology 16، رقم ٢ (٢٤ يناير ٢٠٠٦): R48-R51، https://doi.org/10.1016/j.cub.2006.01.007.

(٢) جيمس إف تشيزمان وآخرون، "إيجاد الطريق في النحل النازح الذي تم تغيير ساعته يثبت أن النحل يستخدم خريطة معرفية"، PNAS 111، رقم ٢٤ (١٧ يونيو ٢٠١٤): ٨٩٤٩، www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1408039111.

ومن السمات اللافتة للنظر في الهجرة هي قدرة الحيوانات على تجاهل المحفزات الخارجية التي عادةً ما تتسبب في توقفها عن الحركة. فعلى سبيل المثال، يمكن للحيوانات المهاجرة أن تستمر في رحلتها لمسافات طويلة دون تناول الطعام، حتى لو تسبب ذلك في فقدان الوزن، مما يدل على أن هدف الهجرة يتصدر قائمة أولوياتها ويتفوق على الاحتياجات الجسدية الأخرى.

بالإضافة إلى ذلك، تظهر الحيوانات سلوكيات مميزة مرتبطة بالهجرة، مثل تغيير أنماط التغذية والتكاثر والتفاعل الاجتماعي. فعلى سبيل المثال، قبل بدء رحلتها، تقوم العديد من الطيور المهاجرة بتخزين كميات كبيرة من الدهون لتوفير الطاقة اللازمة للرحلة الطويلة.

تعيد الحيوانات توزيع طاقتها لدعم الرحلة القادمة، وهذا واضح بشكل خاص في الطيور التي تقوم برحلات طويلة دون توقف أو مع عدد قليل من التوقفات.

تتعلم بعض الطيور، مثل الأوز واللقالق، من الطيور الأكثر خبرة في نفس النوع. ومع ذلك، تستطيع العديد من الطيور الصغيرة الطيران على مسار الهجرة الصحيح دون الاستفادة من أي توجيه من البالغين. هناك طريقتان محتملتان لبرمجة هذه القدرة الفطرية على الهجرة:

البرمجة على الطيران في اتجاه معين: تعتمد هذه الطريقة على بوصلة داخلية توجه الطيور في اتجاه محدد.

البرمجة على الوصول إلى وجهة محددة: تمتلك الطيور في هذه الحالة معلومات داخلية عن وجهتها النهائية وتستخدمها للتنقل[١].

إن فهم كيفية برمجة هذه القدرة المذهلة على الهجرة في الطيور يمثل تحديًا كبيرًا للباحثين في مجال علم الأحياء والتطور، وقد يكشف لنا المزيد عن الأسس العصبية للسلوك المعقد وكيفية تطوره عبر الزمن.

لطالما أدرك الإنسان، عبر آلاف السنين، أن الطيور تمتلك قدرة مذهلة على التنقل عبر مسافات شاسعة. فمنذ أكثر من أربعة آلاف عام، قام المصريون بتدجين وتربية الحمام الصخري البري، وهو السلف الأول للحمام الزاجل الحديث، لاستخدامه في نقل الرسائل[٢]. يبدو أن الحمام الزاجل، مثل سائر الطيور المهاجرة، يستخدم مجموعة متنوعة من الاستراتيجيات الملاحية. عادةً ما يعتمد الحمام الصغير وعديم الخبرة على إشارة بسيطة للملاحة، ثم يتحول إلى إشارات أكثر تعقيدًا واستراتيجيات متطورة مع نضوجه واكتسابه الخبرة.

عند العودة إلى مسكنه، يعتمد الحمام الزاجل الصغير على مزيج من الحساب الميت، الذي يعتمد على حركاته بالقصور الذاتي أثناء الجزء الأول من رحلته، بالإضافة إلى بوصلة مغناطيسية داخلية. ومع زيادة خبرته ونضجه،

---

(١) راندولف مينزل وأوي جريجرز، "هيكل الذاكرة للملاحة في نحل العسل"، Journal of Comparative Physiology A 201 (2015): 559، https://doi.org/10.1007/s00359-015-0987-6.

(٢) توماس أليرستام وأندرس هيدنستروم، "تطور نظرية هجرة الطيور"، Journal of Avian Biology 29، رقم ٤ (ديسمبر ١٩٩٨): ٣٥٨، https://doi.org/10.2307/3677155.

يبدأ الحمام في استخدام الشمس كإشارة ملاحية إضافية. يطير الحمام عادةً خلال النهار، ويعتمد بشكل أساسي على بوصلة الشمس لتحديد اتجاهه. ومع ذلك، في الأيام الملبدة بالغيوم، يمكنه العودة إلى استخدام البوصلة المغناطيسية كوسيلة احتياطية[١]. وعندما يقترب الحمام من وجهته النهائية، يبدأ في الاعتماد على المعالم الأرضية المألوفة للتنقل. كما يمكنه أيضًا استخدام حاسة الشم لتحديد موقع مسكنه بدقة.

تتمثل استراتيجية الحمام في استخدام إشارة الملاحة أو الإشارات الأكثر دقة المتاحة في الظروف المحيطة به. غالبًا ما يعني هذا استخدام أكثر من طريقة في آن واحد لتحسين دقة الملاحة وتحديد الموقع[٢].

باختصار، تتحسن قدرة الحمام الزاجل على الملاحة مع زيادة خبرته، مما يشير إلى وجود عملية تعلم تمكنه من تحقيق دقة أكبر في التنقل. ومع ذلك، فإن معظم جوانب سلوكه الملاحي فطرية ومبرمجة مسبقًا، بما في ذلك عملية التعلم نفسها. على الرغم من أن الإنسان قام بتربية سلالات معينة من الحمام لتحسين قدراتها الملاحية، إلا أن العديد من الباحثين، مثل غولد وغولد، يرون أنه "لا يوجد فرق جوهري بين قدرات الخريطة والبوصلة لدى الحمام الذي يتم تربيته صناعيًا وتلك الخاصة بالطيور المهاجرة التقليدية"[٣].

---

(١) فرانسيسكو بوليدو، "علم الوراثة وتطور هجرة الطيور"، Bioscience 57، رقم ٢ (فبراير ٢٠٠٧): ١٦٧.

(٢) غولد وغولد، "بوصلة الطبيعة"، ١٠.

(٣) هيو دينجل، "الهجرة: بيولوجيا الحياة أثناء التنقل" (أكسفورد: مطبعة جامعة أكسفورد، ١٩٩٦)، ٢٣-٢٥.

ولا يقتصر الأمر على الحمام الزاجل فحسب، بل هناك العديد من الأمثلة لأنواع الطيور البرية التي تقوم برحلات مذهلة لمسافات طويلة. من بين هذه الطيور، نجد طيور مانكس القص، وهي طيور ساحلية تهاجر بين الساحل الشرقي لأمريكا الجنوبية وبعض الجزر الصغيرة بالقرب من ويلز واسكتلندا، حيث تتكاثر وتربي صغارها[١]. وتتميز هجرة طيور القص بالعديد من الجوانب اللافتة للنظر، من بينها المسافة الطويلة التي تقطعها، وحقيقة أن الطيور البالغة تبدأ رحلة العودة إلى أمريكا الجنوبية قبل أن تغادر الطيور الصغيرة، مما يعني أن الطيور الصغيرة يجب أن تقوم بالرحلة الطويلة دون أي توجيه من البالغين. يشير هذا السلوك إلى أن المعلومات اللازمة لتحديد مسار الهجرة مبرمجة مسبقًا في جينات الطيور الصغيرة، وهو أمر شائع في العديد من أنواع الطيور المهاجرة.

فبالإضافة إلى المسافة الهائلة التي تقطعها، والتي تصل إلى آلاف الأميال، فإنها تتبع مسارين مختلفين في رحلتي الذهاب والعودة. فالرحلة المتجهة شمالًا نحو مناطق التكاثر تمر عبر الجزء الغربي من المحيط الأطلسي، بينما تتخذ الرحلة المتجهة جنوبًا نحو مناطق الشتاء مسارًا مختلفًا يمر عبر ساحل أوروبا الغربية وشمال إفريقيا[٢].

---

(١) كاسبر ثوروب وآخرون، "فهم برنامج التوجيه المهاجر للطيور: توسيع الدراسات المعملية لدراسة المهاجرين الذين يطيرون بحرية في بيئة طبيعية"، Integrative and Comparative Biology 50، رقم ٣ (٢٠١٠): ٣١٦. انظر أيضًا هانز جي والراف، "النهج المفاهيمية لأنظمة الملاحة في الطيور"، في "التوجيه في الطيور"، محرر. بيتر بيرثولد (بازل: بيرخاوسر فيرلاغ، ١٩٩١)، ١٢٨-١٦٥، https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-0348-7208-9.

(٢) روزويثا ويلتشكو وولفغانغ ويلتشكو، "ملاحة الطيور: من المفاهيم التاريخية إلى المفاهيم الحديثة"، Animal Behaviour 65، رقم ٢ (فبراير ٢٠٠٣): ٢٥٧.

يشير هذا الاختلاف في المسارات إلى أن الطيور لا تعتمد على مجرد العودة على خطى رحلتها السابقة، بل تتخذ قرارات ملاحية بناءً على عوامل بيئية متغيرة، مثل توافر مصادر الغذاء والظروف الجوية. وهذا بدوره يشير إلى امتلاك هذه الطيور لنظام ملاحة متطور يتيح لها تحديد أفضل المسارات وأكثرها كفاءة في كل رحلة.

ومن أبرز ما يميز طيور القص المانكس هو أداء نظام الملاحة المذهل الذي تمتلكه. وتشير الأبحاث إلى أنها قد تمتلك إحساسًا حقيقيًا بالخريطة، استنادًا إلى نتائج تظهر أن أداءها الملاحي يتفوق بكثير على ما يمكن تحقيقه من خلال تكامل المسار البسيط.٦٧ فقد تبين أن نسبة الخطأ المسجلة لا تتجاوز ٠.٠٠٦ درجة لكل كيلومتر، ما يعادل ٥٠ مترًا فقط على مسافة ٥٠٠ كيلومتر. وهو ما يجعلها أدق بعشر مرات من نظام الملاحة بالقصور الذاتي للطائرات التجارية! ولا يزال مصدر هذا الإحساس بالخريطة لغزًا محيرًا، لكن الأبحاث نفسها تشير إلى أنه يتضمن القدرة على حساب المسافة إلى موطنها الأصلي.

في عالم الطيور، تُعد "البقويقة السلطانية المخططة الذيل" ، أو ما يُعرف بـ"Godwit"، ملحمة مذهلة من الإصرار والقدرة على التحمل .هذه الطيور الساحلية الرائعة، التي تتخذ من المناطق القطبية الشمالية موطنًا لها للتكاثر، تنطلق في رحلة هجرة طويلة وشاقة تمتد عبر آلاف الأميال.

تتميز البقويقة السلطانية المخططة الذيل بتنوعها الجغرافي، حيث يوجد أربعة أنواع فرعية منها، تختلف في مناطق هجرتها .ومن بين هذه الأنواع، تأتي دجاجة الماء الآلاسكية في مقدمة الطيور التي تقوم بأطول رحلة هجرة.

إذ تقطع هذه الطيور الصغيرة المسافة الشاسعة بين نيوزيلندا أو أستراليا في نصف الكرة الجنوبي، وبين غرب ألاسكا في نصف الكرة الشمالي.

تُعد رحلة الهجرة هذه تحديًا استثنائيًا، حيث تتم على مراحل متواصلة دون توقف. وقد تمكن العلماء من تتبع إحدى هذه الطيور الآلاسكية بواسطة جهاز تتبع بالأقمار الصناعية، حيث رصدوا رحلة طويلة بدون توقف لمسافة هائلة بلغت ٦٣٥٠ ميلاً، انطلاقًا من نيوزيلندا وصولًا إلى الصين. وبعد استراحة قصيرة لتجديد طاقتها والتغذي لمدة خمسة أسابيع، واصلت رحلتها الشاقة، وحلقت لمسافة ٤٠١٣ ميلاً إضافية حتى وصلت إلى وجهتها النهائية في شبه جزيرة ألاسكا[١].

لكن مخططة الذيل هذه لم تتوقف عند هذا الحد، بل أدهشت العالم بقدرتها على التحمل وقوة إرادتها. فقد قامت برحلة العودة إلى نيوزيلندا، قاطعة مسافة ٧١٨٩ ميلاً بدون توقف في مدة زمنية قصيرة لم تتجاوز ثمانية أيام !هذا الإنجاز المذهل يعني أن متوسط سرعة هذه البقويقة الصغيرة بلغ حوالي ٣٥ ميلاً في الساعة لمدة تقترب من مائتي ساعة متواصلة، وهو ما يعكس قدرة فائقة على التحمل وتكيف فسيولوجي استثنائي.

على الرغم من أن الهجرة بالنسبة للعديد من الطيور تمثل وسيلة للهروب من قسوة فصل الشتاء، إلا أن نمط هجرة بعض الطيور الأخرى، مثل طيور "الدريجة البنية العنق"، يظل لغزًا محيرًا للعلماء. فهذه الطيور الساحلية الصغيرة، التي لا يعدو وزنها عن ١.٥ أونصة فقط، تقوم برحلة هجرة طويلة

(١) غولد وغولد، "بوصلة الطبيعة"، ١٣٦-١٣٧.

بين القطب الشمالي والأرجنتين وتشيلي، حيث تكون الرحلة المتجهة شمالًا بدون توقف. ويؤكد بريان هارينجتون، الخبير في سلوك الطيور، أن هذه الطيور المهاجرة لمسافات طويلة تواجه العديد من التحديات، بما في ذلك اختلاف المسارات بين الشمال والجنوب، وتنوع البيئات التي تعيش فيها على مدار العام، وكذلك اختلاف أنواع الطعام الذي تعتمد عليه في غذائها.[١]

بالنسبة لبريان هارينجتون، يمثل سلوك هجرة طيور "الدريجة البنية العنق" لغزاً محيراً يحفز على البحث والتساؤل .إذ يتعجب هارينجتون من الدافع الذي يدفع هذه الطيور الصغيرة إلى اختيار الأرجنتين أو تشيلي كوجهة نهائية لرحلتها الشاقة، بدلاً من الاكتفاء بمناطق أقرب وأكثر اعتدالاً مثل تكساس أو فلوريدا أو جورجيا[٢]. من منظور بشري، يبدو هذا الاختيار غريبًا ومحفوفًا بالمخاطر، خاصة وأن هذه الطيور تواجه تحديات هائلة ووفيات متكررة خلال رحلتها الطويلة[٣].

ولكن عند النظر بتعمق في تفاصيل مسار الهجرة وتوزيع الموارد الغذائية على طوله، يبدأ هذا اللغز في الكشف عن بعض أسراره .تشير الأبحاث إلى أن نمط الهجرة الذي تتبعه هذه الطيور، والذي يشبه القفز بين

---

(١) تشارلز والكوت، "إشارات التوجيه متعدد النماذج في الحمام الزاجل"، Integrative and Comparative Biology 45 (2005): 580. كما تم تأكيد استخدام الإشارات الشمية في الطيور البحرية. أو. بادجيت وآخرون، "فقدان حاسة الشم يضعف التوجه إلى الوطن ولكن ليس سلوك البحث عن الطعام في طيور القص ذات المدى الحر"، Scientific Reports 7 (٢٩ أغسطس ٢٠١٧): ٩٦٦٨، https://doi.org/10.1038/s41598-017-09738-5.

(٢) غولد وغولد، "بوصلة الطبيعة"، ١٢١.

(٣) هوار، "هجرة الحيوانات"، ١٢٦-١٢٧.

"الحجارة المتدرجة"، يمثل استراتيجية متطورة ومدروسة بعناية .فمن خلال سلسلة من الرحلات الجوية الطويلة بدون توقف، تتمكن هذه الطيور من الوصول إلى مصادر غذائية غنية ومتجددة موسمياً، وإن كانت متفرقة في مناطق بعيدة من العالم[١].

ومن جانبه، يشير كينيث أبل، الباحث في مجال سلوك الطيور، إلى أنه على الرغم من عقود من الدراسات المكثفة التي أسفرت عن العديد من الاكتشافات المذهلة، إلا أننا ما زلنا نفتقر إلى فهم كامل وشامل لآليات الهجرة لدى الطيور. وعلى الرغم من التقدم الكبير في فهمنا لأجهزة الاستشعار الملاحية التي تستخدمها الطيور، إلا أن العديد من جوانب قدرتها على تحديد المواقع والعودة بدقة مذهلة إلى نفس الأماكن بعد قطع آلاف الأميال،[٢] لا تزال غامضة وتحتاج إلى مزيد من البحث والاستكشاف.

---

(١) روبن فريمان وآخرون، "علم أخلاقيات المعلومات التنبؤية يكشف عن السلوك المهاجر المعقد لطائر بحري يعيش في المحيطات، وهو طائر النوء مانكس"، Journal of the Royal Society Interface 10، رقم ٨٤ (٦ يوليو ٢٠١٣): ٢٠١٣٠٢٧٩، .http://dx.doi.org/10.1098/rsif.2013.0279

(٢) اوليفر بادجيت وآخرون، "طيور القص تعرف الاتجاه والمسافة إلى الوطن ولكنها تفشل في ترميز العقبات المتداخلة بعد رحلات البحث عن الطعام ذات المدى الحر"، PNAS 116، رقم ٤٣ (٢٢ أكتوبر ٢٠١٩): ٢١٦٢٩، .https://doi.org/10.1073/pnas.1903829116

الفصل الثالث: عبقرية الملاحة - ليست للطيور حصرًا

"إنّ صغرَ حجمِ أدمغة بعض الحيوانات لَيدعو إلى العجب، مثله مثل قدرةِ تلك الحيوانات على العودةِ إلى ديارها"[١].

- بيرند هاينريش

حتى الآن، ركزنا بشكل أساسي على قدرات الملاحة المذهلة التي تمتلكها الطيور، لكن الطبيعة تزخر بالكثير من الملاحين المهرة الذين يمكن العثور عليهم تحت الماء وفي عالم الحشرات. دعونا نبدأ باستعراض قدرات الملاحة لدى الكائنات الصغيرة، ثم ننتقل تدريجياً إلى الكائنات الأكبر مثل سلاحف البحر ضخمة الرأس، وأخيرًا نقارن بين أكثر الأمثلة إثارة للإعجاب للملاحة الحيوانية وأنظمة الملاحة الأكثر تقدمًا في الطائرات الحديثة. تُهاجر ما يقرب من ٣.٥ تريليون حشرة سنويًا داخل المملكة المتحدة وحدها[٢]. إن حجم ونطاق هجرة الحشرات مثير للدهشة والإعجاب. وكذلك الأمر بالنسبة لإصرارها وعزمها في قطع هذه المسافات الطويلة. كان يُعتقد في السابق أن هجرة الحشرات تتكون أساسًا من التحرك مع اتجاه الرياح، أينما هبت، لكن الأبحاث الحديثة أثبتت عكس ذلك. وجدت الدراسات التي أجريت على هجرة الحشرات في المملكة المتحدة أن اتجاه الهجرة يكون شمالًا دائمًا في فصل الربيع وجنوبًا في فصل الخريف، وغالبًا ما تطير الحشرات في اتجاه

---

(١) بيرند هاينريش، غريزة العودة إلى الوطن: المعنى والغموض في هجرة الحيوانات (بوسطن :هوتون ميفلين هاركورت، ٢٠١٤)، ٢.

(٢) قاو هو وآخرون، "التدفقات البيولوجية الموسمية الضخمة للحشرات المهاجرة عالية التحليق"، Science 354 (ديسمبر ٢٠١٦.).١٥٨٤

معاكس لاتجاه الرياح السائدة[١]. من الواضح أن هذه الحشرات الماهرة في الملاحة لديها هدف تسعى لتحقيقه، بغض النظر عن اتجاه الرياح.

ملاحة النحل يُعتبر كل من العزيمة والتصميم سمة مشتركة بين الحشرات الماهرة في الملاحة. لنأخذ نحل العسل كمثال، فهي تواجه العديد من التحديات المتعلقة بالملاحة فيما يتعلق بالبحث عن الطعام وتأسيس مستعمرات جديدة. في رحلة بحثها عن الطعام، والتي قد تمتد لمسافة تصل إلى ١٥٠ ميلاً مربعًا حول الخلية[٢]، تستخدم النحلة عدة أساليب للملاحة، بما في ذلك الاستدلال بالمعالم المرئية، واستخدام بوصلة الشمس، وبوصلة الضوء المستقطب. يتم استخدام كل طريقة حسب الظروف المحيطة. في ظل ظروف الرؤية الجيدة ووجود معالم كافية، تتنقل النحلة بشكل أساسي عن طريق الاستدلال بالمعالم المرئية، مع الاستمرار في استخدام بوصلة الشمس للحصول على المعلومات. في الأيام الملبدة بالغيوم عندما لا تكون الشمس مرئية بشكل مباشر، يمكنها استخدام بوصلة الضوء المستقطب للشمس. عندما تعثر نحلة كشفية على مصدر جيد للغذاء، فإنها تعود إلى الخلية وتنقل موقع مصدر الغذاء من خلال رقصة تُعرف باسم رقصة الاهتزاز. يصف آل غولد هذه الرقصة الفريدة بأنها "ثاني أغنى تبادل للمعلومات في عالم الحيوان"[٣]، ولا يتفوق عليها إلا اللغة البشرية. هذا بيان قوي بالنظر إلى أن

---

(١) هو وآخرون، "التدفقات البيولوجية الموسمية الضخمة"، ١٥٨٤.

(٢) يورغن تاوتز، طنين النحل: بيولوجيا الكائن الخارق)برلين Springer-Verlag :، ٢٠٠٨(، ٦٣.

(٣) جيمس إل غولد وكارول غرانت غولد، بوصلة الطبيعة: لغز الملاحة الحيوانية)برينستون :مطبعة جامعة برينستون، ٢٠١٢)، ٧٧.

هذا الاتصال يتم من خلال حشرات تمتلك ٩٥٠ ألف خلية عصبية فقط، مقارنة بالبشر الذين يمتلكون حوالي خمسة وثمانين مليار خلية عصبية. يقل حجم أدمغة نحل العسل عن ملليمتر مكعب واحد[١]. أي أن ألف دماغ منها مجتمعة لن تصل حتى إلى سنتيمتر مكعب واحد. من المثير للدهشة أن حجم أدمغة نحل العسل يعادل نصف حجم أدمغة النحل الطنان، ومع ذلك فإن نحل العسل يظهر مجموعة أكبر وأكثر تعقيدًا من السلوكيات مقارنة بالنحل الطنان[٢].

على الرغم من أن تفاصيل رقصة الاهتزاز التي يؤديها نحل العسل لم تُفهم بشكل كامل بعد، إلا أن قدرًا كبيرًا من الأبحاث، بدءًا من الدراسات الرائدة التي أجراها كارل فون فريش، قد كشف النقاب عن المنهجية الأساسية لهذه الرقصة الاستثنائية .يتطور هذا السلوك المذهل لدى نحل العسل البالغ الذي يخرج من مرحلة الشرنقة ويقضم طريقه عبر الخلية الواقية للانضمام إلى المستعمرة النابضة بالحياة .يصبح نحل العسل قادرًا على فك رموز هذه الرقصة وفهم رسائلها بعد حوالي أسبوع واحد من خروجه من الخلية .يتضمن هذا التطور تغيرات فيزيولوجية كهربائية معقدة في الخلايا العصبية في الدماغ، وهو أمر يتضح عند مقارنة النحل الباحث عن الطعام الناضج بالنحل

---

(١) ستيفاني مارس، ليزلي آش، وولفيلا غروننبرغ، "قياس التناسب الدماغي في شغالات النحل الطنان ونحل العسل"، Brain Behavior and Evolution 66، رقم 541 :(2005)، https://doi.org/10.1159/000085047.

(٢) مارس، آش، وغروننبرغ، "قياس التناسب الدماغي"، ٥٩.

حديث الولادة الذي لا يزال يتعلم أصول الحياة في المستعمرة [1]. لذلك، يبدو أن هذا السلوك الفريد هو مزيج من القدرات الفطرية الموروثة والتعلم المبرمج مسبقًا.

تتكون رقصة الاهتزاز من عدة عناصر مترابطة تنقل معلومات الملاحة بدقة عالية .العنصر الأساسي هو الاهتزاز نفسه، حيث تهز النحلة جسمها بسرعة فائقة تصل إلى حوالي خمس عشرة مرة في الثانية الواحدة .يحدث هذا الاهتزاز خلال منتصف تسلسل حركي متكرر على شكل رقم ثمانية تقوم به النحلة .يشير اتجاه النحلة أثناء جزء الاهتزاز من الرقصة، الذي يعتبر جوهر الرسالة، إلى اتجاه مصدر الغذاء الذي تم اكتشافه .الطريقة التي يتم بها ذلك ليست مباشرة، بل هي مبنية على نظام إحداثيات متطور .يتم تحديد اتجاه الحركة بالنسبة للاتجاه الرأسي على جدار قرص العسل في الخلية، والذي يعمل كمرجع ثابت .تمثل الزاوية بين اتجاه الرقصة والرأسي زاوية متجه مصدر الغذاء بالنسبة للشمس، التي تعمل كبوصلة سماوية .إذا كان اتجاه مصدر الغذاء نحو الشمس، يكون اتجاه الرقصة رأسيًا تمامًا (بغض النظر عن الاتجاه الفعلي للشمس في تلك اللحظة) .أما إذا كان الاتجاه بزاوية ٤٠ درجة في اتجاه عقارب الساعة من الشمس، فإن اتجاه الرقصة يكون بزاوية ٤٠ درجة في اتجاه عقارب الساعة (أو اليمين) من الرأسي.

---

(١) أجايراما كوماراسواي وآخرون، "التكيفات أثناء النضج في خلية عصبية نحل عسل محددة تستجيب لإشارات اهتزاز رقصة الاهتزاز"، eNeuro 6، رقم ٥(2019) ، https://doi.org/10.1523/ENEURO.0454-18.2019.

من المثير للاهتمام أن الرقصة ومعلومات المتجه المرتبطة بها تعتمد على الجاذبية الأرضية وليس على المجال المغناطيسي للأرض، كما افترض بعض العلماء سابقًا [١].ومع ذلك، فإن زاوية المتجه التي يتم توصيلها في الرقصة تكون بالنسبة للشمس .هذا يشير إلى أن نحل العسل لديه آلية متطورة للكشف عن مجال الجاذبية الأرضية، على الرغم من أن الآلية الدقيقة المسؤولة عن هذا الإدراك المذهل لم يتم تحديدها بشكل قاطع حتى الآن [٢].

يُعد سلوك رقصة الاهتزاز لدى نحل العسل ظاهرةً بيولوجيةً مذهلة، حيث يكشف النحل عن مواقع مصادر الغذاء من خلال سلسلة من الحركات الراقصة. يتحدد طول الرقصة بناءً على المسافة التي تفصل مصدر الغذاء عن الخلية، حيث يمثل كل اهتزاز (في شكل يشبه الرقم ثمانية) مسافة قياسية تتراوح بين ٥ و ٥٠ ياردة، وهذا يختلف باختلاف نوع النحل. لا يزال العلماء يبحثون عن الآلية الدقيقة التي يستخدمها النحل لتحديد المسافة، ولكن يعتقد البعض أن الأمر يعتمد على مفهوم "التدفق البصري"، وهو تحرك الأشياء في المشهد البصري للنحل أثناء الطيران[٣].

---

(١) فيرونيكا لامبينيت وآخرون، "هل يعمل المجال المغناطيسي للأرض كمرجع لمحاذاة رقصة الاهتزاز لنحل العسل؟"، PLoS ONE 9، رقم ١٢ (٢٦ ديسمبر ٢٠١٤)، https://doi.org/10.1371/journal.pone.0115665.

(٢) أندرو بي بارون وجيني أينو بلاث، "تطور الاتصال برقصة نحل العسل :منظور ميكانيكي"، Journal of Experimental Biology 220، رقم ٢٣ (ديسمبر ٢٠١٧)4344 :، https://doi.org/doi:10.1242/jeb.142778.

(٣) بارون وبلاث، "تطور الاتصال برقصة نحل العسل"، ٤٣٤٠.

بغض النظر عن الآلية، تنقل رقصة الاهتزاز معلومات أساسية حول الاتجاه والمسافة التي يحتاجها النحل الآخر للوصول إلى مصدر الغذاء. بالإضافة إلى ذلك، يتسم هذا السلوك بقدرته على التكيف مع حركة الشمس، حيث يقوم النحل بضبط زاوية الرقصة وفقًا للوقت من اليوم لضمان توجيه زملائه بدقة إلى الهدف.

يكمن تعقيد هذا السلوك في عدة جوانب. أولاً، يجب على النحل الكشاف تحديد المسافة واتجاه البوصلة بالنسبة لمصدر الغذاء، ثم ترجمة هذه المعلومات المعقدة إلى لغة الرقص التي يفهمها النحل الآخر. بعد ذلك، يتعين على النحل المستقبل فك شفرة هذه المعلومات واستخدامها للتنقل إلى مصدر الغذاء بدقة. يثير هذا تساؤلات حول كيف يمكن لأدمغة النحل الصغيرة التعامل مع كل هذه العمليات المعقدة. يشير الباحثان الأستراليان أندرو بارون وجيني بلاث إلى أنه على الرغم من التقدم الكبير في فهمنا لهذا السلوك، لا يزال هناك الكثير مما يجب اكتشافه حول الآليات العصبية البيولوجية التي تكمن وراء إنتاج وتفسير هذه الرقصات[1].

يعتقد بعض العلماء أن رقصة اهتزاز نحل العسل في المناطق المعتدلة ربما تطورت من سلوك مشابه لنحل العسل القزم (Apis andreniformis and Apis florea)، الذي يعيش في المناطق الاستوائية ويبني خلاياه في العراء. تتجه رقصة الاهتزاز الخاصة بنحل العسل القزم مباشرة نحو مصدر

(١) بارون وبلاث، "تطور الاتصال برقصة نحل العسل"، ٤٣٣٩.

الغذاء[١]. اقترح الباحث مارتن ليندلاور قبل عقود أن تطور هذه الرقصة ربما حدث بشكل تدريجي[٢]. ومع ذلك، على الرغم من أن هذه النظريات تبدو منطقية، إلا أن تعقيد سلوك رقصة الاهتزاز يجعل من الصعب تفسيرها بشكل كامل من خلال نظرية التطور الداروينية البحتة. يتطلب هذا السلوك مجموعة من المهارات والسلوكيات المعقدة والمترابطة، بما في ذلك الملاحة ومعالجة البيانات والحسابات الرياضية وحتى التواصل الرمزي. يتطلب هذا النوع من السلوك عملية هندسية متطورة ووجود خوارزميات حسابية معقدة في أدمغة النحل. من غير المعروف كيف يمكن أن تنشأ مثل هذه البرامج المعقدة من خلال عمليات تطورية عشوائية وتدريجية، سواء بمساعدة الانتقاء الطبيعي أو بدونه. علاوة على ذلك، لا يوجد حتى الآن أي تفسير مفصل أو مقنع لكيفية نشوء هذه التعقيدات في سلوك النحل وتطورها على مر الزمن.

ملاحة النمل

تُعد قدرات الملاحة الاستثنائية لدى النمل الصحراوي مثالاً رائعاً على الكفاءة التي يمكن أن تصل إليها الكائنات ذات الأدمغة الصغيرة في البيئات

---

(١) بارون وبلاث، "تطور الاتصال برقصة نحل العسل ."كما وصف كارل فون فريش سلوك نحل العسل القزم، النحل: رؤيتهم، حواسهم الكيميائية، ولغتهم (إيثاكا :مطبعة جامعة كورنيل، ٢٠١٤)، الموقع ١٢٢٤، كيندل.

(٢) مارتن ليندلاور، التواصل بين النحل الاجتماعي (كامبريدج، ماساتشوستس: مطبعة جامعة هارفارد، ١٩٦١)، مقتبس في جون ألكوك، سلوك الحيوان: نهج تطوري (ساندرلاند، ماساتشوستس : Sinauer Associates، ٢٠١٣)، ٣٤.

الصعبة[1]. ففي بحث نُشر في مجلة "Animal Behaviour"، أكد الباحثان أنطوان ويستراش وبول غراهام من جامعة ساسكس أن هذه القدرات "دليل على أن الأدمغة الصغيرة قادرة على تحقيق كفاءة لا مثيل لها في الملاحة ببيئات معقدة". هذا ينطبق بشكل خاص على النمل الصحراوي مثل نوعي "Cataglyphis bicolor" و"Cataglyphis fortis"، حيث يتجول هذا النمل الصغير الذي لا يتجاوز طوله سنتيمتراً واحداً لمسافات تصل إلى أكثر من مائة متر بعيداً عن عشه، متجاوزاً بذلك حدود رؤيته المباشرة.

وعلى الرغم من عدم اعتماده بشكل كامل على المعالم البصرية أو مسارات الرائحة، يتمكن هذا النمل من العودة إلى عشه بشكل دقيق ومباشر من أي اتجاه، حتى لو كان مساره للخارج متعرجاً ومعقداً، كما هو موضح في الشكل ٢.٣. يثير هذا التساؤل حول الآليات التي يستخدمها هذا النمل لتحقيق هذه الدقة الملاحية المذهلة، خاصة مع الأخذ في الاعتبار أن حجم دماغه لا يتجاوز ربع حجم دماغ نحل العسل الصغير.

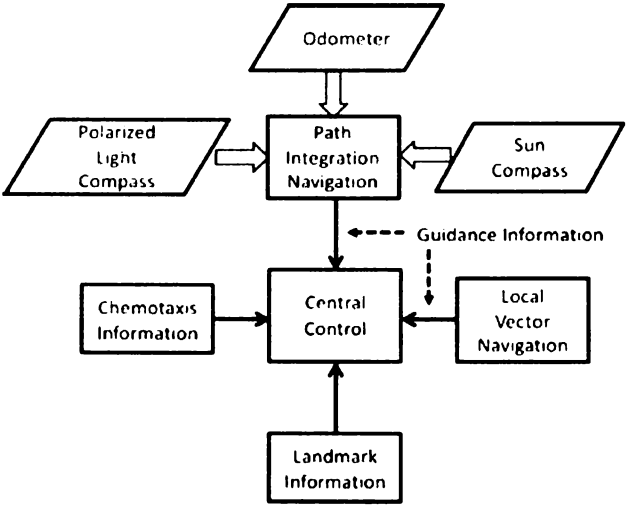
تشير الدراسات إلى أن هذا النمل يستخدم مجموعة متنوعة من الحواس والتقنيات لتحقيق هذه الملاحة الدقيقة. على سبيل المثال، يُعتقد أنه يستخدم

---

(١) أنطوان ويستراش وبول غراهام، "ماذا يمكننا أن نتعلم من دراسات الملاحة عند الحشرات"، Animal Behaviour 84، رقم ١ .20-13 :(2012) في سياق مماثل، علق داروين قائلاً" :من المؤكد أنه قد يكون هناك نشاط عقلي استثنائي مع كتلة مطلقة صغيرة للغاية من المادة العصبية :وهكذا فإن الغرائز المتنوعة بشكل رائع، والقوى العقلية، والعواطف لدى النمل مشهورة، ومع ذلك فإن عقدها الدماغية ليست كبيرة مثل ربع رأس دبوس صغير .من وجهة النظر هذه، فإن دماغ النملة هو واحد من أكثر ذرات المادة روعة في العالم، وربما أكثر من دماغ الإنسان ."تشارلز داروين، أصل الإنسان والانتقاء بالنسبة للجنس)أمهيرست، نيويورك Prometheus Books :، ١٩٩٨(، ٥٥.

استراتيجيات مثل حساب الخطوات والاعتماد على معالم سماوية مثل الشمس أو أنماط الاستقطاب في الضوء. بالإضافة إلى ذلك، تشير بعض الأبحاث إلى أنه قد يستخدم أيضاً الحقل المغناطيسي للأرض كبوصلة داخلية.

على الرغم من أن الآليات الدقيقة لا تزال قيد البحث والدراسة، إلا أن هذه القدرات الملاحية المذهلة لدى النمل الصحراوي تفتح آفاقاً جديدة لفهمنا لقدرات الملاحة لدى الكائنات الحية، وكيف يمكن للكائنات ذات الأدمغة الصغيرة أن تحقق إنجازات استثنائية في هذا المجال. إن فهم هذه الآليات يمكن أن يلهم تطوير تقنيات جديدة للملاحة الروبوتية والذكاء الاصطناعي، مما يؤكد أهمية دراسة هذه الكائنات الصغيرة وقدراتها المذهلة في فهمنا للعالم من حولنا.



الشكل ٣.١. نظام الملاحة لدى نمل الصحراء

يعتمد نمل الصحراء على ثلاث طرق مختلفة للملاحة: المعالم البصرية، والذكريات المتجهة لقطاعات المسار، وتكامل المسار[١]. بالإضافة إلى ذلك، يستخدمون الاستقبال الكيميائي في المناطق القريبة من مصدر الغذاء من خلال اكتشاف الروائح. كما يستخدمون مجموعة من مصادر معلومات الاستشعار للملاحة بتكامل المسار، بما في ذلك بوصلة شمسية وساعة بيولوجية وشكلين من عدادات المسافات[٢]. يوضح الشكل ٣.١ التكامل الوظيفي لهذه المعلومات في نظام الملاحة.

في تكامل المسار، يحافظ النمل على متجه عالمي، يشير إلى نقطة البداية أو إلى موقع تغذية تمت زيارته مسبقًا.[٣] يستخدم تكامل المسار المعلومات المقدمة من مصدرين، وهما البوصلة العصبية وعداد المسافات العصبي. يتم استخلاص معلومات البوصلة من الضوء المستقطب. كما يشير الباحثان توماس كوليت وماثيو كوليت، "يبدو أن النمل يتتبع في نفس الوقت المسافة الإجمالية التي قطعوها من نقطة البداية (أي حالة تكامل المسار العالمية)

---

(١) ماثيو كوليت وتوماس إس كوليت، "تعلم وصيانة المتجهات المحلية في ملاحة نمل الصحراء"، Journal of Experimental Biology 212، رقم ٧ (أبريل ٢٠٠٩)895 :، https://doi.org/10.1242/jeb.024521.

(٢) روديغر فيهنر وآخرون، "ملاحة النمل :طرق ذات اتجاه واحد بدلاً من الخرائط"، Current Biology 16 (10يناير ٢٠٠٦ 75 :(، https://doi.org/10.1016/j.cub.2005.11.035.

(٣) روديغر فيهنر، "أدوات الملاحة لنمل الصحراء :معرفة إجرائية بدلاً من معرفة الموقع"، Journal of the Institute of Navigation 55، رقم ٢ (صيف ٢٠٠٨)، ١٠١.

والمسافة المقطوعة على طول الجزء الحالي من مسارهم"[١]. تتطلب وظيفة تكامل المسار أيضًا تخزين معلومات البوصلة والمسافة في الذاكرة، من أجل الحساب النهائي للمسار إلى المنزل[٢].

تم تأكيد طريقة عداد المسافات لتحديد المسافة في تجربة ذكية حيث تم إطالة وتقصير أرجل النمل بشكل اصطناعي[٣]. أثبتت التجربة أن النمل يحسب بطريقة ما عدد الخطوات التي تم اتخاذها لتحديد المسافة. وقد حددت التجارب أن النمل يستخدم أيضًا شكلًا آخر من قياس المسافة يعتمد على التدفق البصري (وهي طريقة تستخدمها أيضًا النحل والدبابير). تعتمد هذه الطريقة على تتبع حركة الصورة أثناء الحركة[٤]. يشير كوليت وكوليت إلى مؤشر آخر على التكامل الوظيفي لقياس المسافة لقطاعات المسار وتكامل المسار العالمي. عندما يكون كلا النظامين نشطين، "تتحد مخرجاتهما، وإذا

(١) توماس إس كوليت وماثيو كوليت، "قياس المسافة في مقاطع الطريق وتفاعلاته مع تكامل المسار العالمي"، Journal of Comparative Physiology A 201 (2015): 617، https://doi.org/10.1007/s00359-015-1001-z.

(٢) ستانلي هاينز، أجاي نارييندرا، وألين تشيونغ، "مبادئ تكامل المسار عند الحشرات"، Current Biology 28 (10 سبتمبر ٢٠١٨.R1045:):

(٣) ماتياس فيتلنغر، روديغر فيهنر، وهارالد وولف، "عداد المسافات عند النمل :المشي على ركائز متينة وأخرى مبتورة"، Science 312، رقم ٥٧٨٢ (يونيو ٢٠٠٦)1965 :، https://doi.org/10.1126/science.1126912.

(٤) سارة إي فيفر وماتياس فيتلنغر، "يعمل قياس المسافة بالتدفق البصري بشكل مستقل عن تكامل الخطوة في النمل المحمول"،) 353 Scienceسبتمبر ٢٠١٦.1157-1155 :(

اختلفت الاتجاهات التي يصدرها النظامان، فإن اتجاه حركة الحشرة سيكون حلاً وسطًا"[١].

بغض النظر عن الآلية الملاحية التي يعتمد عليها نمل الصحراء (Cataglyphis) في أي لحظة، فإنه يحافظ دائمًا على معلومات تكامل المسار. هذا يعني أنه حتى عندما يستخدم النمل المعالم البصرية للملاحة، فإنه إذا فقد هذه المعالم، فإنه يعود فورًا إلى تكامل المسار ويستمر في مساره المقصود. يتمتع هذا النمل بالقدرة على اختيار الطريقة الأكثر دقة للملاحة بناءً على الظروف المحيطة. فعندما تكون البيئة غنية بالمعالم البصرية، فإنه يعتمد على الملاحة بالمعالم، وإلا فإنه يستخدم تكامل المسار[٢].

أظهرت الأبحاث أن نمل الصحراء قادر على تتبع المسافة المقطوعة والاتجاه حتى أثناء تحركه للخلف لسحب الطعام إلى العش[٣]. هذه القدرة على إدراك حركاته الذاتية أو محفزاته تُعرف باسم "الحس العميق" (Proprioception). يعد هذا التكيف أكثر تحديًا مما يبدو، حيث أن حركة الأرجل والمدخلات الحسية العميقة ليست مجرد انعكاس بسيط للحركة إلى

---

(١) كوليت وكوليت، "قياس المسافة في مقاطع الطريق"، ٦١٨.

(٢) رومان هوبر وماركوس كنادن، "الملاحة المتمركزة حول الذات والمتمركزة حول الأرض أثناء مسارات البحث عن الطعام الطويلة للغاية لنمل الصحراء"، Journal of Comparative Physiology A 201 (2015): 609، https://doi.org/10.1007/s00359-015-0998-3.

(٣) سارة إي فيفر وماتياس فيتلنغر، "كيف تجد طريق العودة إلى المنزل إلى الوراء؟ الملاحة أثناء العودة إلى الخلف لنمل الصحراء"Cataglyphis fortis ، Journal of Experimental Biology 219 (2016): 2119، https://doi.org/10.1242/jeb.137786.

الأمام[١]، كما يشير علماء الأعصاب سارة بفيفر وماتياس فيتلنجر. إن الملاحة الدقيقة أثناء التحرك للخلف مثيرة للإعجاب بشكل خاص لأن النمل يجب أن يتعامل مع معلومات حسية معكوسة، بما في ذلك موقع الشمس ونمط استقطاب ضوء الشمس.

ومن الدلائل الأخرى على قدراتهم الملاحية أنه إذا تم نقل النمل وإطلاقه في مكان بعيد عن مساره الأصلي، فإنه يبدأ بالبحث حول نقطة الإطلاق، ولكن عندما يجد المسار الأصلي، فإنه يعود إليه ويتبعه في الاتجاه الصحيح[٢]. يبدو أن نمل الصحراء يقوم بمعايرة مسارات تكامل المسار الخاصة به من خلال مقارنة موقعه بمعلم معروف وتعديل مساره وفقًا لذلك[٣]. وعلى الرغم من أن دقة ملاحة تكامل المسار تتدهور نظريًا بشكل خطي مع المسافة، كما هو الحال في الأنظمة بالقصور الذاتي التي يصنعها الإنسان، فإن تكامل المسار يوفر للنمل معلومات دقيقة بشكل مدهش حول موقع العش حتى بعد

---

(١) Pfeffer and Wittlinger، "كيف تجد طريق العودة إلى المنزل إلى الوراء؟"، ٢١٢٥.

(٢) Wehner، "أدوات الملاحة لنمل الصحراء"، ١٠٤.

(٣) يشير Wehner ، في تعليقه على قدرات الملاحة لنمل الصحراء، إلى أن التجارب تدعم مفهوم أن النمل "يستخدم المعالم كإشارات سياقية لاستدعاء أوامر توجيه معينة، أي لتحديد متى يفعل ماذا - أو بشكل عام، أن المعرفة المكانية للنمل منظمة بطريقة إجرائية بدلاً من تمثيلات مكانية شاملة ومتمركزة حول الأرض". Rüdiger Wehner، "ملاحة نمل الصحراء: كيف تحل العقول الصغيرة المهام المعقدة"، Journal of Comparative Physiology A 189 (٢٣ يوليو ٢٠٠٣): ٥٧٩-٥٨٨، https://doi.org/10.1007/s00359-003-0431-1. انظر أيضًا Matthew Collett و Thomas Collett و Rüdiger Wehner ، "معايرة الملاحة المتجهة في نمل الصحراء"، Current Biology 9، رقم ١٨ (١٣ سبتمبر ١٩٩٩): ١٠٣١-١٠٣٤.

رحلات البحث عن الطعام واسعة النطاق[١]. هذا دليل آخر على الهندسة المتقدمة لنظام الملاحة الخاص بهم. ومن الجدير بالذكر أن كل هذا يتم إدارته في دماغ بحجم ربع حجم دماغ نحلة العسل، وأن هذه المهارات فطرية إلى حد كبير وليست مكتسبة أو معلمة.

لا يزال كيفية ترميز وظيفة تكامل المسار في دماغ النملة لغزًا يحير العلماء. تم اقتراح نماذج مختلفة لشرح هذه الآلية[٢]، وتشير بعض الأبحاث إلى آليات عصبية محددة قد تكون متورطة. هناك أيضًا أدلة على أن نفس الآليات العصبية قد تكون مشتركة بين الحشرات الأخرى[٣]. على الرغم من أننا لا نعرف ما إذا كان أي من النماذج التفسيرية صحيحًا، فإنها مجتمعة تشير بقوة إلى أن الآلية يجب أن تكون معقدة وتتضمن خوارزميات متطورة. يثير هذا السؤال حول كيفية نشوء هذه السلوكيات المعقدة المبرمجة في النمل.

هجرة فراشة الملك يهاجر ما يقدر بـ ١٠٠-٢٠٠ مليون فراشة ملك (Danaus plexippus) سنويًا لمسافة تتراوح بين ألفين وثلاثة آلاف ميل بين الولايات المتحدة/كندا والمكسيك[٤]. على الرغم من وجود مجموعات أخرى من فراشات الملك، بما في ذلك في غرب أمريكا الشمالية وأمريكا

---

(١) Huber and Knaden، "الملاحة المتمركزة حول الذات والمتمركزة حول الأرض"، ٦٠٩.

(٢) Mandyam V. Srinivasan، "حيث تلتقي المسارات وتتقاطع: الملاحة عن طريق تكامل المسار في نمل الصحراء ونحل العسل"، Journal of Comparative Physiology A 201 (2015): 533-546. https://doi.org/10.1007/s00359-015-1000-0

(٣) Heinze و Narendra و Cheung، "مبادئ تكامل المسار عند الحشرات"، R0143.

(٤) Richard A. Holland و Martin Wikelski و David S. Wilcove، "كيف ولماذا تهاجر الحشرات"، Science 313 (أغسطس ٢٠٠٦): ٧٩٤.

الجنوبية ومنطقة البحر الكاريبي وأستراليا، إلا أن المجموعة في شرق أمريكا الشمالية هي الأكثر شهرة بسبب هجرتها المذهلة. خلال الهجرة، تضع الفراشات بيضها على نبات الصقلاب، حيث تمر بعد ذلك بمرحلة اليرقة والعذراء. الصقلاب هو النبات الوحيد الذي يوفر الغذاء لليرقات النامية. وبالتالي تعتمد الفراشات على الصقلاب خلال مسار هجرتها عبر الولايات المتحدة[١].

يستغرق الأمر عادةً ما يصل إلى ثلاثة أجيال من الفراشات لإكمال الرحلة بأكملها[٢]. هذا يعني أن معلومات الملاحة مبرمجة وراثيًا. أحد الجوانب الفريدة للهجرة في شرق أمريكا الشمالية هو أنه خلال إقامتها الصيفية في كندا، تشغل ما يقرب من ٤٠٠٠٠٠ ميل مربع، بينما خلال سباتها الشتوي في المكسيك، تشغل أقل من نصف ميل مربع. كما ذكرنا سابقًا، غالبًا ما تهاجر إلى نفس الشجرة التي غادرت منها الفراشات الأجداد في منطقة جبلية في المكسيك. هذا يعني أنه يجب أن يكون لديهم طريقة دقيقة للغاية للملاحة لتحديد موقع مثل هذا الهدف الصغير.

---

(١) "عينة عشوائية"، Science 343، رقم ٦١٧١ (٧ فبراير ٢٠١٤): ٥٨٤، https://doi.org/10.1126/science.1243689-583.6171.343.

(٢) Michelle J. Solensky، "نظرة عامة على هجرة الفراشة الملكية"، في الفراشة الملكية: علم الأحياء والحفظ، المحررون Karen S. Oberhauser و Michelle J. Solensky (إيثاكا، نيويورك: مطبعة جامعة كورنيل، ٢٠٠٤)، ٨١.

تستخدم فراشات الملك بوصلة شمسية للملاحة، وكما وُصف سابقًا، يشمل ذلك تعويضًا زمنيًا لحركة الشمس[١]. تقع الساعة البيولوجية المستخدمة في هذه العملية داخل قرون استشعار الفراشة[٢]. يتم الكشف عن موضع السمت (الزاوية الأفقية) للشمس من خلال عيون الفراشة المركبة[٣]. بدأ الباحثون للتو في فك رموز المعلومات البيولوجية المطلوبة لهذه المآثر المذهلة. تم فك شفرة جينوم فراشات الملك، بما في ذلك الجينات المتعلقة بالبيولوجيا العصبية والأنظمة الفيزيائية المستخدمة في الهجرة[٤]. كشفت مقارنات جينومات الفراشات المهاجرة مع جينومات الفراشات غير المهاجرة أن أكثر من خمسمائة جين تشارك في السلوك المهاجر[٥].

تم اقتراح نموذج عصبي لشرح كيفية عمل البوصلة الشمسية المعوضة زمنيًا من خلال دمج معلومات موضع السمت مع الساعة البيولوجية

---

(١) Sandra M. Perezو Orley R. Taylor ، "بوصلة شمسية في الفراشات الملكية"، Nature ٣٨٧(مايو ١٩٩٧): ٢٩.

(٢) Christine Merlinو Robert J. Gegear و Steven M. Reppert ، "الساعات اليومية للهوائيات تنسق اتجاه بوصلة الشمس في الفراشات الملكية المهاجرة"، Science 325 (سبتمبر ٢٠٠٩): ١٧٠٠.

(٣) يرد وصف جيد للآليات المشاركة في ملاحة الفراشة الملكية في ورقة Steven M. Reppert و Patrick A. Guerraو Christine Merlin ، "علم الأعصاب لهجرة الفراشة الملكية"، Annual Review of Entomology 61 (2016): 25-42.

(٤) Shuai Zhanوآخرون، "جينوم الفراشة الملكية يوفر رؤى حول الهجرة لمسافات طويلة"، Cell 147(نوفمبر ٢٠١١): ١١٧١-١١٨٥؛ Shuai Zhan وآخرون، "علم الوراثة لهجرة الفراشة الملكية وتلوين التحذير"، Nature 314 (أكتوبر ٢٠١٤): ٣١٧-٣٢١، https://doi.org/10.1038/nature13812.

(٥) Reppertوآخرون، "علم الأعصاب لهجرة الفراشة الملكية"، ٣٧.

الداخلية للفراشة[١]. يفسر النموذج النظري أيضًا كيف تستطيع الفراشات الحفاظ على المسار الجنوبي الغربي في الخريف، وكذلك المسار الشمالي الشرقي في هجرة العودة في الربيع. هناك حاجة إلى مزيد من البحث لتحديد ما إذا كان النموذج صحيحًا. ومع ذلك، يساعد النموذج في التأكيد على مدى تعقيد البرمجة المطلوبة لمثل هذا النظام والسلوك. يعد النموذج أيضًا مثالًا جيدًا على كيفية تطبيق الهندسة في تحليل سلوك الحيوانات المعقد المبرمج.

في الوقت نفسه، في حين أن هذه الآلية قد تفسر كيفية عمل النظام، إلا أنها لا تفسر من أين جاءت المعلومات التي تحدد المسار الذي تطير به الفراشات، أو التحكم وصنع القرار بشكل عام. لا يوجد نموذج تطوري يشرح بشكل مُرضٍ أصله. هذا بحد ذاته لا يثبت أن التطور التدريجي لم ينتج مثل هذه البرمجة، لكن عدم وجود مثل هذا النموذج يجب أن يعطي على الأقل فرصة للتأمل لمن هم منفتحو الذهن.

تتمتع فراشات الملك بمهارة ملاحية مذهلة، فهي لا تعتمد فقط على البوصلة الشمسية لتحديد الاتجاه الصحيح للهجرة، بل تمتلك أيضًا بوصلة مغناطيسية احتياطية. فعندما تكون السماء ملبدة بالغيوم ولا يمكن للفراشات رؤية الشمس، فإنها تستخدم هذه البوصلة المغناطيسية لتحديد خط العرض من خلال استشعار زاوية ميل المجال المغناطيسي للأرض[٢].

---

(١) Eli Shlizermanوآخرون، "التكامل العصبي الكامن وراء بوصلة الشمس المعوضة بالوقت في الفراشة الملكية المهاجرة"، Cell Reports 15، رقم ٤ (٢٦ أبريل ٢٠١٦): ٦٨٣-٦٩١، https://doi.org/10.1016/j.celrep.2016.03.057.

(٢) Reppertوآخرون، "علم الأعصاب لهجرة الفراشة الملكية"، ١٦.

وعلى الرغم من الجهود الكبيرة التي بذلها العلماء لفهم كيفية تطور هذه القدرة المعقدة، إلا أن أصل البرمجة التي تسمح للفراشات باستخدام البوصلة المغناطيسية لا يزال لغزًا محيرًا.

منطقياً، يمكننا النظر إلى هذه القضية على أنها شجرة قرار ذات فرعين: إما أن التفسير المرضي لكيفية تطور هذه الخوارزميات المعقدة بشكل أعمى لم يتم اكتشافه بعد، على الرغم من الجهود الحثيثة المبذولة في هذا الصدد، أو أن مثل هذه العملية التطورية غير موجودة.

كيف نتقدم في هذا المجال؟ أحد الخيارات هو تبني نهج عدم الاستسلام أو الشك أبدًا. ولكن هذا ليس النهج الذي يتبعه العلم الناجح عادةً. في حين أن هناك مكانًا للمثابرة، فإن العلم في النهاية يتعلق باتباع الأدلة، والعلوم التاريخية، بما في ذلك علم الأصول، تدور حول البحث عن أفضل تفسير بالنظر إلى الأدلة المتاحة. على سبيل المثال، إذا اقترح الجيولوجيون سلسلة من التفسيرات الطبيعية البحتة لترتيب الصخور في ستونهنج، وانهار كل تفسير لاحق تحت التدقيق، على مدى عقود من البحث والتخمين، يمكن للمرء أن يصر على أن "غياب الدليل ليس دليلًا على الغياب". أو يمكن للمرء أن ينظر إلى المحاولات الفاشلة العديدة كمؤشر محتمل على أن ستونهنج لم تتشكل بأي عملية تطورية عمياء، وأن يفتح نفسه لتفسيرات سببية أخرى محتملة.

لا يعني هذا بالضرورة أن الأمر نفسه ينطبق على مهارات الهجرة لدى فراشات الملك. النقطة المهمة هي أنه من غير المنطقي ألا نكون منفتحين على احتمال أن شيئًا آخر غير التطور الأعمى هو الذي صمم سلوكًا حيوانيًا

معقدًا ومبرمجًا، والذي يظل عصيًا على التفسير في إطار النظريات التطورية. سيتم تناول مسألة ما إذا كنا قد تعلمنا بالفعل ما يكفي عن فراشات الملك للتخلي عن التطور الأعمى كتفسير لبراعتهم في الملاحة في وقت لاحق.

خنافس الروث: ملاحون مهرة في عالم الحشرات

لا تقتصر عجائب عالم الحشرات على الفراشات المهاجرة فحسب، بل تمتد لتشمل خنافس الروث المدهشة بمهاراتها الملاحية الفريدة. تلعب هذه الخنافس دورًا حيويًا في النظام البيئي من خلال إعادة تدوير العناصر الغذائية وتحسين جودة التربة، وذلك عن طريق جمع الروث ودحرجته بعيدًا عن مصدره لتوفير غذاء ليرقاتها.

عندما تكتشف مجموعة من خنافس الروث كومة من الروث، تتنافس كل خنفساء على جمع جزء صغير منه ودحرجته بعيدًا بأسرع ما يمكن لتجنب سرقة الخنافس الأخرى لكرتها الثمينة. تتميز هذه الخنافس بقدرتها على التحرك في خط مستقيم للوصول إلى الموقع المناسب لدفن كرتها الثمينة وحماية بيضها ويرقاتها.

ومن المثير للدهشة أن خنافس الروث لا تعتمد على المعالم البصرية في هذه العملية المعقدة، بل تستخدم مجموعة متنوعة من الحواس الملاحية الأخرى، بما في ذلك حاسة استشعار الضوء المستقطب من القمر والنجوم.[1] تشبه هذه الحاسة البوصلة الشمسية التي تستخدمها بعض الحيوانات لتحديد

(١) ماري داك وآخرون ، "خنافس الروث تستخدم درب التبانة للتوجيه" ، علم الأحياء الحالي ٢٣ ، رقم ٤ (٢٠١٣): ٢٩٨ ، https://doi.org/١٠.١٠١٦/j.cub.٢٠١٢.١٢.٠٣٤.

الاتجاه، ولكنها أكثر تعقيدًا بسبب ضعف شدة ضوء النجوم مقارنة بضوء الشمس.

تستخدم الخنافس الليلية ضوء النجوم المستقطب للتنقل في الظلام، بينما تستخدم الخنافس النهارية ضوء الشمس خلال النهار والقمر في الليل[١]. تمتلك هذه الخنافس آلية خاصة في عيونها تسمح لها باكتشاف متجه استقطاب الضوء وتحويله إلى معلومات ملاحية دقيقة. وتساعدها آليات عصبية خاصة في الدماغ على التعامل مع مستويات الضوء المنخفضة في الليل ومعالجة المعلومات الملاحية بكفاءة[٢].

ملاحة وهجرة السلاحف البحرية منقار الصقر: رحلة ملحمية عبر المحيطات

تبدأ رحلة حياة سلاحف منقار الصقر (Caretta caretta) على شواطئ شرق فلوريدا، حيث تفقس من أعشاشها الرملية وتتجه غريزيًا نحو الأضواء الخافتة المنعكسة على سطح المحيط من القمر والنجوم. هذا التوجه الفطري نحو البحر هو بداية رحلة ملحمية تمتد لعقود، حيث تقضي هذه السلاحف معظم حياتها في المحيط المفتوح قبل أن تعود إلى الشاطئ الذي ولدت فيه لوضع بيضها.

---

(١) باسل الجندي وآخرون، "الترميز العصبي الكامن وراء تفضيل الإشارات للتوجيه السماوي"، PNAS 112 ، رقم ٣٦ (سبتمبر ٢٠١٥) 11395 :. https://doi.org/10.1073/pnas.1501272112.

(٢) الجندي وآخرون ، "الترميز العصبي" ، ١١٣٩٥.

بعد أن تغادر الصغار الشاطئ، تتجه شرقًا إلى المحيط الأطلسي وتصل في النهاية إلى تيار الخليج الدافئ الذي يحملها إلى بحر سارجاسو الغني بالطحالب[١]. هنا، تبدأ السلاحف رحلة دائرية طويلة حول شمال الأطلسي، مستفيدة من التيارات البحرية الدائرية المعروفة باسم "الدوامة" والتي توفر لها مصادر وفيرة من الغذاء.

لا تصل إناث السلاحف إلى مرحلة النضج الجنسي إلا بعد مرور ٢٠ إلى ٣٠ عامًا من حياتها في المحيط. عندها، تبدأ رحلة العودة المذهلة إلى الشاطئ الذي ولدت فيه لوضع بيضها. يعد هذا الإنجاز الملاحي الفذ لغزًا حير العلماء لسنوات طويلة، فكيف تستطيع هذه السلاحف أن تتذكر بدقة موقع ميلادها بعد عقود من الغياب؟

تشير الأبحاث إلى أن سلاحف منقار الصقر تستخدم المجال المغناطيسي للأرض كبوصلة وخريطة لتحديد موقعها وتوجيه مسارها[٢]. يبدو أن هذه السلاحف قادرة على استشعار خطوط العرض وخطوط الطول من خلال المجال المغناطيسي، مما يمكنها من تحديد موقعها الجغرافي بدقة[٣]. وقد أظهرت التجارب أن السلاحف الصغيرة تستجيب للحقول المغناطيسية

---

(١) الاسم مشتق من نوع من الأعشاب البحرية (Sargassum) التي تتواجد بكثرة في هذا الجزء من المحيط.

(٢) غولد وغولد ، بوصلة الطبيعة ، ٢١٧.

(٣) ناثان إف بوتمان وآخرون، "إدراك خط الطول والخرائط المغناطيسية ثنائية الإحداثيات في السلاحف البحرية"، علم الأحياء الحالي ٢١، رقم 4636 :(2011) ، https://doi.org/10.1016/j.cub.2011.01.057.

المختلفة عن طريق السباحة في اتجاهات مختلفة تساعدها على التقدم على طول مسار هجرتها الدائري[1].



الشكل ٣.٢: سلحفاة بحرية ضخمة الرأس

يوضح الشكل ٣.٢ سلحفاة بحرية ضخمة الرأس، وهي نوع معروف بقدراته الملاحية المذهلة. أجريت تجربة معملية مبتكرة في ساحة مليئة بالمياه لتحاكي إطلاق صغار السلاحف على جانبي شمال الأطلسي: بورتوريكو وجزر الرأس الأخضر. تم تكرار المعلومات المغناطيسية الخاصة بكل موقع داخل الساحة، مما جعل السلاحف تعتقد أنها في موقعها الأصلي. كان الهدف هو الوصول إلى الساحل الشرقي لفلوريدا، موطنها الأصلي.

أظهرت نتائج التجربة أن السلاحف الصغيرة، على الرغم من عدم وجود خبرة ملاحية سابقة، سبحت في الاتجاه الصحيح نحو فلوريدا في كلتا الحالتين.

---

(١) وتمان وآخرون، "إدراك خط الطول"، ٤٦٣.

يشير هذا إلى أن قدرة التنقل لديها ليست مكتسبة من التجربة، بل هي غريزة فطرية مبرمجة في جيناتها.

تثير هذه النتائج ثلاث تساؤلات أساسية:

بصمة موقع الشاطئ الأصلي: كيف تحتفظ السلاحف بذاكرة موقع ولادتها؟

الإحساس بالخريطة: كيف تستشعر السلاحف خطوط الطول والعرض من المجال المغناطيسي للأرض لتحديد موقعها وتوجيه مسارها؟

السباحة الاستراتيجية: كيف تختار السلاحف الاتجاه الأمثل للسباحة بناءً على موقعها الجغرافي لضمان وصولها إلى وجهتها بأمان؟

أرباح وخسائر الهجرة: لغز البقاء والتكاثر

تثير مسألة هجرة الحيوانات تساؤلات محيرة، خاصة عندما يتعلق الأمر بالاختلافات في سلوك الهجرة داخل نفس النوع. ففي العديد من الحالات، يهاجر جزء من أفراد النوع بينما يبقى الآخر مستقراً في مكانه. وقد أكدت الدراسات، مثل تلك التي أجراها باحثون من جامعة لوند في السويد، أن الهجرة لها أساس وراثي، مما يعني أن جميع الطيور تقريباً تحمل الجينات اللازمة

للهجرة، ولكنها لا تستخدمها بالضرورة[١]. وفي الواقع، يتراوح عدد أنواع الطيور التي تظهر هذا السلوك المختلط بين ٥٥ و٦٠ في المائة[٢].

تعد طيور المغرد الأسود وروبين أمثلة بارزة على هذا التنوع في أنماط الهجرة[٣]. ففي أوروبا، يظهر المغرد الأسود اختلافات واسعة في سلوك الهجرة، حيث توجد نسبة صغيرة من الأفراد المهاجرين داخل معظم المجموعات المستقرة، إن لم يكن جميعها. وقد دفع هذا الأمر عالم الطيور الألماني بيتر بيرثولد إلى استنتاج أن هذا التنوع قد يسرع من تطور أنماط الهجرة التكيفية لتتناسب مع الظروف البيئية المتغيرة[٤].

ولكن ما يثير الدهشة في البداية هو أن عدم الهجرة يحمل في طياته مزايا كبيرة فيما يتعلق بالبقاء والتكاثر. يشير علماء الأحياء التطورية، مثل ديريك روف ودافني فيربيرن، إلى أن الهجرة تعرض الطيور لمخاطر متعددة، مثل زيادة التعرض للافتراس وصعوبة العثور على موطن مناسب [٥]. فعلى

---

(١) ميريام ليدفوجل ، سوزان أكيسون ، وستافان بينش ، "علم الوراثة للهجرة أثناء التنقل" ، الاتجاهات في علم البيئة والتطور ٢٦ ، رقم ١١ (نوفمبر ٢٠١١).565 :

(٢) غولد وغولد ، بوصلة الطبيعة ، ٢٣٠.

(٣) هيو دينجل ، الهجرة :بيولوجيا الحياة أثناء التنقل (أكسفورد :مطبعة جامعة أكسفورد ، ١٩٩٦) ، ٣٠٤-٣٠٥.

(٤) بيتر بيرثولد ، "نظرية شاملة لتطور الطيور المهاجرة والتحكم فيها وقدرتها على التكيف" ، أوستريتش ١١٧٠-1 :(1999) ، مقتبس في فرانسيسكو بوليدو ، "علم الوراثة وتطور هجرة الطيور" ، بيوساينس ٥٧ ، رقم ٢ (فبراير ٢٠٠٧).167 :

(٥) ديريك أ .روف ودافني جيه فيربيرن، "تطور علم الوراثة والوراثة للهجرة في الحشرات"، BioScience 57 ، رقم ٢ (فبراير ٢٠٠٧).164-155 :

سبيل المثال، أظهرت دراسة أجريت على طيور روبين أن معدل بقاء الذكور المقيمين بلغ ٥٠٪، في حين انخفض إلى ١٧٪ فقط للذكور المهاجرة[١]. كما لوحظ وجود ميزة مماثلة للمقيمين في نجاح التزاوج.

إذن، كيف يمكن تفسير هذا التناقض الظاهري؟ لماذا تختار بعض الطيور الهجرة رغم المخاطر، بينما تفضل أخرى البقاء والاستفادة من المزايا التي يوفرها الاستقرار؟ يكمن الحل في فهم التوازن الدقيق بين تكاليف وفوائد الهجرة. فبالنسبة لبعض الطيور، قد تفوق فوائد الهجرة، مثل الوصول إلى مصادر غذائية وفيرة أو ظروف مناخية أفضل، تكاليفها. وعلى العكس، قد تكون تكاليف الهجرة مرتفعة جداً بالنسبة لطيور أخرى، مما يجعلها تفضل البقاء في موطنها الأصلي.

لماذا إذن تهاجر الحيوانات، على الرغم من المخاطر والتكاليف التي تنطوي عليها هذه الرحلات الطويلة؟ يجدر بنا أن نوضح أننا لا نتحدث هنا عن الحيوانات التي تواجه خطر الموت المحقق بالتجمد أو الجوع إذا لم تهاجر، فهذه حالة تنطبق على بعض الأنواع المهاجرة ولكن ليس جميعها. نحن نركز هنا على الحيوانات التي تتخذ قرار الهجرة بناءً على موازنة دقيقة بين التكاليف والفوائد المحتملة للهجرة مقابل البقاء في مكانها.

يمكن تبسيط هذه الموازنة بمقارنة خطر الموت أثناء رحلة الهجرة الطويلة مع خطر الموت جوعاً بسبب نقص الموارد الغذائية في فصل الشتاء. هناك نظرية تشير إلى أن الطيور المهيمنة، غالباً الذكور البالغة، هي التي تختار

(١) دينجل ، الهجرة :بيولوجيا الحياة أثناء التنقل ، ٣٠٥.

البقاء في مكانها، بينما تُجبر الطيور الأقل هيمنة، عادة الإناث والطيور الصغيرة، على الهجرة[١]. ومع ذلك، لا تفسر هذه النظرية لماذا لا تكتفي الطيور المهاجرة بالانتقال إلى مناطق أخرى غنية بالغذاء بدلاً من القيام برحلات هجرة طويلة ومرهقة.

تماماً مثل أهمية الحفاظ على التنوع في الخصائص الجينية الأخرى، فإن الحفاظ على التنوع في سلوك الهجرة له فوائد جمة أيضاً. أظهرت الأبحاث أن نسبة الأفراد المهاجرة ضمن مجموعة حيوانية معينة "تختلف من عام لآخر وتتأثر بالظروف البيئية الفعلية، مثل كثافة التكاثر وتوفر الغذاء"[٢]. قد يفترض البعض أنه إذا تعرضت جميع أفراد المجموعة لنفس الظروف البيئية والضغوط التطورية، فإن الانتقاء الطبيعي سيؤدي في النهاية إلى أن تصبح المجموعة إما مهاجرة بالكامل أو غير مهاجرة. لكن الواقع عادة ما يخالف هذا الافتراض.

أحد الأسباب المحتملة للحفاظ على التنوع في عادات الهجرة هو تسهيل التكيف مع تغير المناخ وما يترتب عليه من تغيرات في الموائل الطبيعية. لقد شهدنا بعض التغيرات المناخية على مدار القرن الماضي، ولكنها كانت طفيفة مقارنة بالتغيرات التي حدثت على مدى فترات زمنية أطول في الماضي. يكفي أن نعود بالذاكرة إلى العصر الجليدي الأخير، عندما كانت أجزاء كبيرة من أمريكا الشمالية وأوروبا مغطاة بالجليد. من الواضح أن هذه الفترة شهدت

---

(١) دينجل، الهجرة :بيولوجيا الحياة أثناء التنقل، ٣٢٠.

(٢) بوليدو، "علم الوراثة وتطور هجرة الطيور"، ١٦٩.

اضطرابات هائلة في موائل الحيوانات وأنماط هجرتها، سواء في بداية العصر الجليدي أو عند نهايته.

يدعم هذه النظرية دراسة أجريت على طيور الهازجة سوداء الرأس، والتي تشير إلى أن أنماط الهجرة الحالية تطورت مؤخرًا جدًا، ربما بعد العصر الجليدي. وفي بعض مجموعات طيور الهازجة سوداء الرأس، "ربما فُقدت الهجرة مرة أخرى، بعد استعمار مناطق ذات شتاء معتدل"[١]. وثّق عالم الطيور البريطاني ويليام ساذرلاند عددًا من التغيرات في أنماط هجرة الطيور.[٢] كما أظهرت التجارب أن مجموعات الطيور المهاجرة يمكن أن تصبح مقيمة بشكل أساسي والعكس صحيح في غضون بضعة أجيال[٣]. وهنا نرى مجموعات تحافظ على التنوع والمرونة في سلوكها الهجري، مع تأثير الانتقاء الطبيعي على بقاء الأصلح في سياق مناخي معين، بدلاً من أن يكون مسؤولاً عن ظهور سلوك هجري جديد بشكل أساسي.

تطور سلوكيات الملاحة والهجرة

لقد تناولنا حتى الآن، بشكل مجزأ، التحديات التي تواجه التفسيرات التطورية لأصل مختلف سلوكيات الملاحة والهجرة لدى الكائنات الحية. دعونا الآن نتراجع خطوة إلى الوراء ونلقي نظرة منهجية أكثر على هذه المسألة.

---

(١) بوليدو، "علم الوراثة وتطور هجرة الطيور"، ١٦٦.

(٢) وليام جيه ساذرلاند، "دليل على المرونة والقيود في أنظمة الهجرة"، مجلة علم الأحياء الطيور ٢٩ (1998): 441.

(٣) توماس أليرستام وأندرس هيدنستروم، "تطور نظرية هجرة الطيور"، مجلة علم الأحياء الطيور ٢٩ (1998): 360.

يوضح الشكل ٣.٣ العناصر الأساسية المشاركة في أنظمة الملاحة وسلوكيات الهجرة، بالإضافة إلى خصائصها المحددة.

من الواضح أن تكوين حيوان مهاجر ناجح يتطلب الكثير من العوامل المتضافرة. وكما يؤكد الباحث الإسباني في هجرة الحيوانات، فرانسيسكو بوليدو، فإن السلوك المهاجر في مثل هذه الكائنات هو سمة معقدة تتضمن "مستوى عالٍ من التكامل بين الصفات الفردية"[١]. تفترض النماذج الوراثية للسكان التي يقوم عليها نظرية داروين الجديدة أن جميع المعلومات التي تحدد هذه الخصائص تكمن في الجينوم. ومن المرجح أن يكون هناك عدد كبير من الجينات متورطًا في هذه العملية، كما هو الحال في فراشات الملك. يصف بوليدو هذه العملية بأنها برنامج وراثي، ففي حالة الطيور المهاجرة على سبيل المثال، تمتلك الطيور "برنامجًا فطريًا يملي عليها مدى سرعة نموها، ومتى تغادر منطقة التكاثر، ومدى سرعة الطيران وفي أي اتجاه، ومتى تتوقف عن الهجرة"[٢].

يؤكد بوليدو أن أصل السمة المهاجرة هو نفس أصل الصفات المعقدة الأخرى، حيث "كلما كان هناك انتقاء مستمر لصالح التحسين المتزامن لسمات متعددة، ستتطور الارتباطات الجينية بين هذه السمات"[٣]. ومع ذلك، لكي تتطور هذه السلوكيات من خلال آليات نظرية داروين الجديدة، يجب أن

(١) بوليدو، "علم الوراثة وتطور هجرة الطيور"، ١٧٠.

(٢) بوليدو، "علم الوراثة وتطور هجرة الطيور"، ١٦٧.

(٣) بوليدو، "علم الوراثة وتطور هجرة الطيور"، ١٧٠.

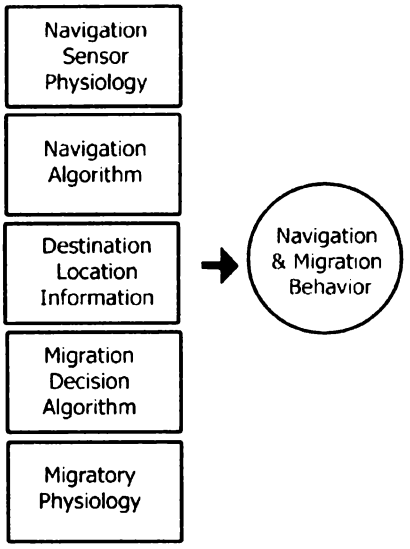
تكون قد حدثت من خلال عملية تدريجية ومتراكمة، وهذا أمر يصعب التوفيق بينه وبين طبيعة "التكامل" لهذه السمات التي أشار إليها بوليدو.

هذه المشكلات التي تواجه التطور المنسق للصفات المعقدة، التي ناقشناها للتو، وصفها باحثا التطور المشهوران غونتر واغنر وفينسينت لينش بقولهما: "لطالما كانت كيفية ظهور سمات جديدة في الكائنات الحية مشكلة رئيسية في علم الأحياء. في الواقع، غالبًا ما تركزت أقوى الانتقادات الموجهة لنظرية داروين للتطور عن طريق الانتقاء الطبيعي على تفسير كيفية ظهور أجزاء جديدة في الجسم"[1]. جزء كبير من المشكلة هو أن "النجاح الساحق لنهج علم الوراثة السكانية خلال العقود التي أعقبت التوليف الحديث أدى إلى تهميش مسألة الابتكار. كان من المجدي أكثر حساب تباين الموجود بدلاً من التفكير في أصل غير مسبوق"[2]. (هذا القصور التوضيحي هو أحد الدوافع وراء التحقيق في الآليات فوق الجينية كمصادر محتملة للصفات الجديدة. سنتحدث عن هذا لاحقًا).

تم تحميل هذا الكتاب من موقع مكتبة الرافدين للحوار الثقافي

(١) غونتر بي واغنر وفنسنت جيه لينش ، "مستجدات تطورية" ، علم الأحياء الحالي ٢٠ ، رقم ٢ (2010): R48.

(٢) جيرد ب. مولر ، "الابتكار فوق الجيني" ، في التطور: التوليف الموسع ، محرران. ماسيمو بيجليوتشي وجيرد مولر) كامبريدج ، ماساتشوستس MIT Press :، ٢٠١٠ (، ٣١٠.



الشكل ٣.٣. عناصر التحكم في الملاحة والهجرة

يصر أنصار التطور الداروينى الجديد على أن التطور عملية تدريجية بطبيعتها. منذ داروين وحتى يومنا هذا، أقر علماء التطور المنتمون إلى هذا التقليد بصعوبة حدوث قفزات تطورية مفاجئة تنطوي على طفرات جينية متعددة منسقة في وقت واحد. يعود ذلك إلى أن احتمالية حدوث مثل هذه القفزات تتناقص بشكل كبير مع كل طفرة إضافية يتم تنسيقها في آن واحد. لنأخذ مثالاً بسيطاً لتوضيح هذه الفكرة: إن احتمال الحصول على الرقم ستة عند رمي حجر النرد هو واحد من ستة. ولكن الحصول على الرقم ستة مرتين متتاليتين ليس مجرد ضعف هذا الاحتمال، بل هو ستة أضعاف أقل احتمالاً، أي فرصة واحدة من بين ٣٦ (٦ × ٦). أما الحصول على الرقم ستة ثلاث مرات متتالية، فهو فرصة واحدة من بين ٢١٦. تتناقص الاحتمالات بشكل كبير مع

كل تكرار. قد يحصل لاعب بوكر محترف على "يد السflush" في لعبة عادلة مرة واحدة في العمر (فرصة واحدة من بين ٧٢,١٩٢)، لكن من غير المعقول أن يحصل عليها ثلاث أو أربع مرات متتالية. ينطبق نفس المبدأ على الطفرات الجينية المتعددة المنسقة اللازمة لإنشاء وظيفة بيولوجية جديدة في خطوة واحدة، إلا أن الاحتمالات هنا تكون أكثر صعوبة بشكل مذهل من مثال التدفق المستقيم في البوكر. تشير الأبحاث إلى أن متوسط معدل حدوث طفرة واحدة في حقيقيات النوى (الكائنات متعددة الخلايا) هو تقريبًا واحد في المليار لكل جيل. وبالتالي، فإن احتمال حدوث طفرتين منسقتين هو واحد من كل مليار مليار (واحد يتبعه ثمانية عشر صفراً). هذا هو السبب في أن الداروينيين يؤكدون بقوة على أن التطور، لكي يعمل في إنتاج شكل ووظيفة جديدة، يجب أن يكون تدريجيًا، حيث يتراكم التغيير طفرة صغيرة واحدة في كل مرة.

أحد العوامل التي تحد من التنوعات المحتملة والانتقاء اللاحق هو الارتباط بين السمات. عندما تكون السمات مترابطة، فإن ذلك يحد بشكل كبير من عدد مجموعات التنوعات القابلة للحياة. يوضح عالم الوراثة التطوري مارك كيركباتريك من جامعة تكساس (أوستن) هذه الفكرة بقوله: "تصبح القيود أكثر احتمالية مع زيادة عدد السمات. عندما يكون عدد السمات معتدلاً إلى كبير، يكون هناك عدد أكبر بكثير من التغييرات التطورية الممنوعة مقارنة بالتغييرات المسموح بها تطوريًا... ماذا تعني هذه القيود بالنسبة للتكيف؟ إنها تحبط عملية الانتقاء من تحسين جميع السمات في وقت واحد. لا يستطيع التطور الاستجابة الفورية لضغوط الانتقاء التي

تفضل مجموعات معينة من السمات. تطور مجموعة واحدة من السمات إلى ذروة لياقتها سيؤدي إلى سحب السمات الأخرى المرتبطة بها بعيدًا عن المستوى الأمثل"[١].

هناك عدد من منتقدي مفهوم التكيف، حتى بين أولئك الذين يؤيدون الداروينية بشكل عام. على سبيل المثال، أكد عالم الوراثة ريتشارد ليوونتين، بالتعاون مع ستيفن جاي جولد، وكلاهما عالمان مرموقان من جامعة هارفارد، أن المفهوم السائد للتكيف غير صحيح، قائلين: "في كثير من الأحيان، قدم لنا برنامج التكيف علم أحياء تطوري للأجزاء والجينات، ولكن ليس للكائنات الحية. لقد افترض أن جميع التحولات يمكن أن تحدث خطوة بخطوة، واستهان بأهمية الكتل التنموية المتكاملة والقيود المنتشرة في التاريخ والهندسة المعمارية"[٢].

السؤال التالي هو كيف تحدث التغييرات الفسيولوجية والسلوكية التي تؤدي إلى التكيف. من غير المرجح للغاية أن ينتج التباين والانتقاء الطبيعي سلوكيات مبرمجة معقدة مثل الخصائص المرتبطة بالملاحة والهجرة الموضحة في الشكل ٣.٣. بافتراض أن المعلومات التي تحدد كل عنصر من هذه العناصر تكمن في الجينوم، فإن تطوير هذه السلوكيات يتطلب تغييرات جينية

---

(١) مارك كيركباتريك، "الجينات والتكيف: دليل الجيب للنظرية"، في التكيف، محرران. مايكل آر روز وجورج في لودر (سان دييغو: أكاديميك برس، ١٩٩٦)، ١٤١-١٤٢.

(٢) ستيفن جاي جولد وريتشارد ليونتين، "The Spandrels of San Marco and the Panglossian Paradigm: A Critique of the Adaptationist Program"، Proceedings of the Royal Society B 205 (21 سبتمبر ١٩٧٩): 1161. https: //doi.org/10.1098/rspb.1979.0086.

متعددة منسقة. هذا لأن نظرية داروين تفترض أن كل خطوة صغيرة يجب أن تعطي ميزة للكائن الحي؛ عندما تكون هناك حاجة إلى تغييرات متعددة قبل أن يحصل الكائن الحي على ميزة ما، يصبح التطور الدارويني غير فعال. حتى جيري كوين، وهو "ملحد جديد" بارز وعالم أحياء تطوري صريح في جامعة شيكاغو، يعترف بهذه النقطة بقوله: "لا يمكن للانتقاء الطبيعي بناء أي ميزة لا توفر فيها الخطوات الوسيطة فائدة صافية للكائن الحي"[١].

يقدم جيري فودور وماسيمو بياتيلي-بالمارينى حجة مماثلة في تقييمهما لقيود الانتقاء الطبيعي في التطور الدارويني التدريجي، حيث يكتبان: "على عكس الرأي التقليدي، يجب التأكيد على أن الانتقاء الطبيعي بين السمات المتولدة عشوائيًا لا يمكن أن يكون في حد ذاته المبدأ الأساسي للتطور. نحن نعتبر الانتقاء الطبيعي بمثابة ضبط البيانو، وليس كتأليف الألحان"[٢]. يشير هذا التشبيه إلى أن الانتقاء الطبيعي لا يمكن أن يكون مسؤولاً عن نشوء الصفات الجديدة بشكل كامل. بمعنى آخر، الانتقاء الطبيعي يمكنه تحسين أو تعديل الصفات الموجودة، ولكنه لا يستطيع خلق صفات جديدة تمامًا من العدم.

يناقش أستاذ فلسفة العلوم بجامعة كامبريدج، تيم ليفنز، التفاعل بين الجينات المختلفة وكيف يؤثر ضغط الانتقاء على تطورها، مشيرًا إلى أنه في

---

(١) جيري كوين ، "المحول العظيم" ، مراجعة لـ The Edge of Evolution ، بقلم مايكل جيه بيهي، The New Republic(١٨ يونيو ٢٠٠٧): ٣٩.

(٢) جيري فودور وماسيمو بياتيلي Palmarini-، ما أخطأ داروين) نيويورك :Farrar Straus and Giroux، ٢٠١٠، (، ٢١.

بعض الحالات، يمكن أن يكون هناك مفاضلات متضاربة بين الجينات. يقول ليفنز:

"عندما يواجه الكائن الحي هذه الأنواع من المفاضلات المتضاربة، يمكن للتفاعلات المعقدة لضغوط الانتقاء أن تمنع أي منها من إحداث أي نوع من التكيف المعقد. هذه طريقة لتوضيح المتطلبات المألوفة لتطور التكيفات المعقدة عن طريق الانتقاء، يجب أن تكون هناك سلسلة سلسة من المتغيرات، كل منها أفضل من السابق - ليس فقط من حيث كيفية أداء وظيفتها المحلية، ولكن من حيث كيفية تفاعلها مع الكائن الحي بأكمله... ما لم يتم استيفاء هذه الافتراضات، فإن الانتقاء، عن طريق تغيير ترددات السمات، يمكن أن يجعل ظهور التكيفات المعقدة ليس أكثر احتمالا، ولكن أقل احتمالا"[١].

المسألة المحورية هنا هي كيفية تطور كل هذه السمات بشكل تدريجي لإنتاج أنظمة ملاحة معقدة وسلوكيات هجرة متكاملة. في حالة الطيور، تشير بعض الأدلة إلى وجود ترابط وتشابك بين بعض السمات. ووفقًا لفرانسيسكو بوليدو، ليس من الواضح حاليًا تحديد أي جوانب من السمة المهاجرة هي متكاملة وأيها يمكن أن يتطور بشكل مستقل[٢]. إن اعتراف بوليدو بإمكانية عدم تطور بعض السمات بشكل مستقل يعتبر منعشًا، لأنه عندما يكون

---

(١) تيم ليونز ، الكائنات الحية والتحف: التصميم في الطبيعة وفي أي مكان آخر) كامبريدج ، ماساتشوستس MIT Press :، ٢٠٠٤ (، ٣٣.

(٢). بوليدو ، "علم الوراثة وعلم التخلق في هجرة الحيوانات والتوجه: الطيور والفراشات وما بعدها"، مجلة البيولوجيا التجريبية ٢٢٢ ، ملحق. ١ (٦ فبراير ٢٠١٩): ٢، .https://doi.org/10.1242/jeb.191890

المرء ملتزمًا بالتدرج الداروينى، فإن الاعتراف بهذه الاحتمالية يمكن أن يكون صعبًا. يبدو أن بوليدو قد توصل إلى هذا الاستنتاج من خلال تجاهل الصعوبات التي يطرحها هذا على التطور الداروينى. إن تأكيده على أن الانتقاء الطبيعي سيفضل تحسين السمات المعقدة المنفصلة بطريقة تدريجية ليس سوى افتراض غير مثبت. في هذه الحالة، لا يوجد دليل على أن أنظمة الملاحة الحيوانية تتطور بطريقة مرتبطة بالسلوك المهاجر. يتطلب هذا الأمر حدوث تغييرات كبيرة ومتزامنة إلى حد ما في فسيولوجيتين مستقلتين وخوارزميتين مستقلتين (أربعة من العناصر الخمسة الموضحة في الشكل ٣.٣).

إن هذه الاعتبارات مجتمعة تجعل من الآلية الداروينية الجديدة التدريجية تفسيرًا غير كافٍ لهذه السلوكيات المبرمجة المعقدة. فالتطور التدريجي لا يفسر بشكل مرض كيف يمكن أن تنشأ مثل هذه الأنظمة المعقدة والمتكاملة من سلسلة من التغييرات الصغيرة والمتراكمة. إن وجود ترابط وتشابك بين السمات المختلفة، بالإضافة إلى الحاجة إلى تغييرات متزامنة في عدة جوانب من الفسيولوجيا والسلوك، يشير إلى أن هناك آليات أخرى قد تكون لعبت دورًا في تطور هذه السلوكيات المعقدة. قد تكون هذه الآليات تتضمن عمليات غير تدريجية، مثل القفزات التطورية أو الاندماجات الوظيفية، التي تتجاوز التغييرات الصغيرة والمتراكمة التي تفترضها النظرية الداروينية الجديدة.

باختصار، إن تعقيد وتكامل سلوكيات الملاحة والهجرة يطرح تحديات كبيرة للتفسيرات الداروينية الجديدة التقليدية القائمة على التطور التدريجي.

يتطلب فهم أصل هذه السلوكيات نظرة أكثر شمولية وتفكيرًا في آليات تطورية إضافية قد تكون ساهمت في ظهور هذه السلوكيات المعقدة.

برنامج الخرائط محمّل مسبقًا

أحد أكبر الأسئلة هو ما هو مصدر المعلومات المبرمجة التي تحدد الوجهة أو المسار أثناء الهجرة. يولد صغار العديد من الحيوانات بمسار هجرة محدد مسبقًا. تندرج الأمثلة الموصوفة سابقًا لهجرة الإله ذو الذيل الشريطي والكيرلو ذي الفخذ الخشن ضمن هذه الفئة[١]. يجب أن تكون طرق الهجرة هذه مبرمجة مسبقًا بطريقة ما في المخلوقات لأن الطرق موروثة وليست مكتسبة. وهذا يعني أنه ليس فقط خوارزمية الدماغ التي تتحكم في الملاحة، ولكن أيضًا معلومات المسار الفعلية، مثلما يتطلب برنامج الخريطة على هاتفك خوارزمية والكثير من المعلومات المحددة حول المسار المحدد. يجب نقل هذه المعلومات بطريقة ما إلى الذاكرة الضمنية للحيوان[٢]. هناك بعض الأدلة على دور علم التخلق في السلوك المهاجر. كما نوقش سابقًا، تختار الحيوانات متى وأين تهاجر اعتمادًا على الظروف البيئية. وهذا يشير إلى تأثير بيئي على الآليات اللاجينية. ومن الأمثلة على ذلك هجرة فراشات الملك في أمريكا الشمالية. كتبت كريستين ميرلين وميريام ليدفوغل أن "التحول في فسيولوجيا وسلوك الهجرة وانعكاس اتجاه الطيران الذي يحدث على التوالي في الخريف والربيع استجابة للتغيرات البيئية يشير إلى وجود سيطرة فوق

---

(١) ميرلين وليدفوجل ، "علم الوراثة وعلم التخلق في هجرة الحيوانات" ، ١.

(٢) وليام دبليو كوكران ، وهينريك موريتسن ، ومارتن ويكلسكي ، "طيور الأغنية المهاجرة تعيد معايرة بوصلتها المغناطيسية يوميًا من إشارات الشفق "، Science 304 (أبريل ٢٠٠٤): ٤٠٥.

جينية."[1] أما بالنسبة للجانب الجيني من الصورة، فقد علقوا قائلين: "إن البنية الجينية والآليات الجزيئية التي تكمن وراء النمط الظاهري المهاجر، بما في ذلك اتجاه/اتجاه الطيران وتوقيت هجرتهم، لا تزال غير مفهومة بشكل جيد."[2] إذا كانت كل من الآليات الجينية واللاجينية ضرورية للتحكم في السلوك، فهذا يشير إلى أن هناك حاجة إلى تغييرات متعددة منسقة للسمة قبل أن تتمكن من منح بعض المزايا - بالضبط نوع السمة متعددة المكونات التي تتحدى التفسير الداروينى. قد يرغب المرء في اللجوء إلى بعض الأسباب الشبيهة بالقانون التي تؤدي إلى ظهور هذه القدرات، لكن تنوع السلوكيات المهاجرة داخل نفس مجموعات الحيوانات يخفف من أي تفسير من هذا القبيل.

الملاحة الحيوانية في ضوء الملاحة الجوية

كما رأينا، فإن مجموعة واسعة من أنماط الملاحة والهجرة الحيوانية تشير بقوة إلى سلوكيات مبرمجة معقدة. إن استراتيجيات الهجرة والملاحة التي تستخدمها معظم الحيوانات هي أكثر تطوراً بكثير مما كان مفترضاً في البداية عندما بدأ العلماء في دراستها. وكلما تعلم العلماء عنها، كلما بدت أكثر تعقيدًا في العديد من الحيوانات.

إحدى طرق إظهار مستوى الهندسة المتضمنة في هذه السلوكيات هي فحص أنظمة الملاحة في الطائرات الحديثة. كما هو موضح في الشكل ٣.٤،

---

(٢) غولد وغولد ، بوصلة الطبيعة ، ١٨٥-١٨٧.

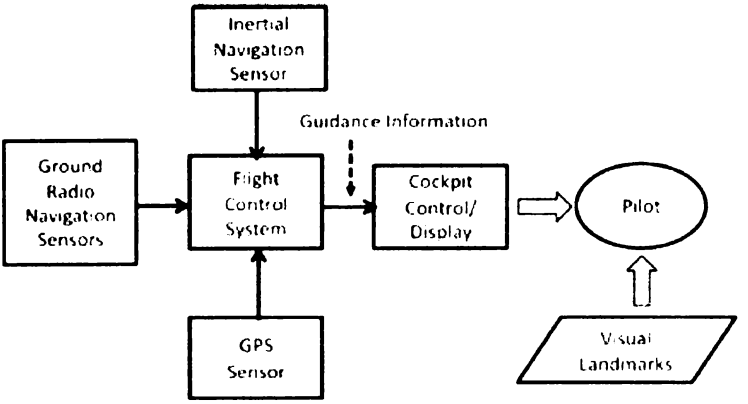
تستخدم أنظمة الملاحة في الطائرات أجهزة استشعار متعددة زائدة عن الحاجة (القصور الذاتي، ونظام تحديد المواقع العالمي (GPS)، والأنظمة الأرضية) إلى جانب المكونات الأساسية الأخرى.

إن الشكل التوضيحي ٣.٤ هو بالطبع تبسيط مفرط. بعد مشاركتي الشخصية في التصميم الهندسي للعديد من الأنظمة، بما في ذلك أنظمة الملاحة في الطائرات، يمكنني أن أشهد أن عملية هندسية منظمة أمر ضروري. يجب أن تكون العملية من أعلى إلى أسفل، حيث يجب أولاً تحديد المفهوم العام، كما هو موضح في الشكل ٣.٥.

العملية كالتالي. تتمثل الخطوة الأولى في تحديد الهدف العام، بما في ذلك الغرض من النظام. تتمثل الخطوة الثانية في تطوير مفهوم لتنفيذ النظام بما في ذلك الوظائف الأساسية. التالي هو إجراء تحليل لخيارات التصميم المحتملة. وهذا يشمل تقييم الخيارات وتقييم المقايضات، والتي تشمل بالنسبة للأنظمة التي صنعها الإنسان الأداء والتعقيد والتكلفة. بمجرد اختيار خيار التصميم، تكون الخطوة التالية هي تحديد المتطلبات المحددة. بعد ذلك، يمكن تصنيع النظام. هناك العديد من الأسباب التي تجعل هذه العملية يجب أن تكون من أعلى إلى أسفل ومنظمة. أحدها أنه نظرًا لأنه نظام معقد، فهناك الكثير من الترابط، وبالتالي يجب أن تأخذ متطلبات التصميم ذلك في الاعتبار لضمان عمل المكونات والتشغيل بشكل متماسك. إذا لم يتم دمج جميع الوظائف بشكل صحيح، فإن أداء النظام يتدهور بشكل كبير.

يتطلب التصميم الشامل لأنظمة الملاحة في الطائرات آلاف الساعات من العمل الهندسي والتطوير من قبل المهندسين. الهدف هو نظام يوفر معلومات الملاحة المثلى للطيارين عن طريق اختيار مصدر الملاحة الذي يوفر أفضل أداء لمراحل محددة من الرحلة - الإقلاع، وأثناء الرحلة، والمحيطات، ومنطقة المطار الطرفية، والاقتراب، والهبوط. تشمل الوظائف أجهزة الاستشعار المختلفة التي توفر هذه المعلومات، والتي يعد كل منها معقدًا للغاية في حد ذاته.

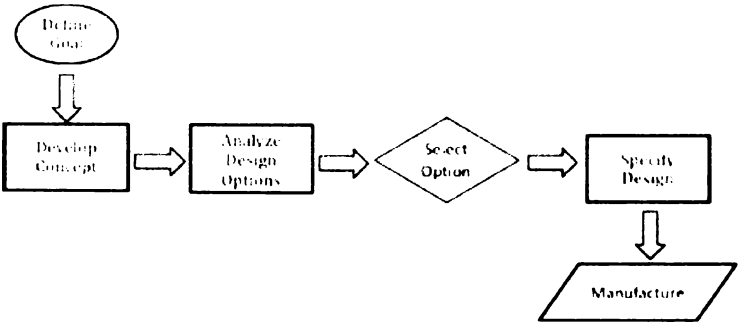
كما هو الحال مع جميع الأنظمة الحديثة، يتضمن مزيجًا من الأجهزة (أجهزة استقبال الراديو، ومعالجات الكمبيوتر، وشاشات قمرة القيادة) والبرمجيات التي تحتوي على خوارزميات الكمبيوتر لمعالجة بيانات موضع الطائرة، ومنطق اختيار الملاحة، وخريطة ومعلومات المسار، وعرض الواجهة. تتطلب جميع طرق الملاحة مزيجًا متكاملًا ومتماسكًا من العناصر المادية والخوارزميات المبرمجة وغيرها من المعلومات ذات الصلة. وينطبق الشيء نفسه على جميع الحيوانات المهاجرة.



الشكل ٣.٤. نظام الملاحة في الطائرات

بالرجوع إلى الشكل ٢.٢ المتعلق بأنظمة الملاحة الحيوانية، تذكر كيف تتفاعل كل هذه العناصر معًا. أو لنأخذ أحد الأمثلة المحددة من أعلاه، نرى ذلك في نمل الصحراء (الشكل ٣.١). على الرغم من إمكانية اعتبار المستشعرات والدماغ والخوارزمية وعلم وظائف الأعضاء بمثابة أنظمة فرعية منفصلة، إلا أنها يجب أن تعمل كنظام متكامل. تذكر أن نمل الصحراء يستخدم ثلاث طرق للملاحة. لاحظ التشابه مع أنظمة الملاحة في الطائرات في الشكل ٣.٤. إن عداد المسافات وبوصلة الضوء المستقطب في نمل الصحراء هما مصادر المعلومات لتكامل المسار، بينما تعد المعالم هي مصدر المعلومات الآخر. تستخدم وظيفة التحكم المركزية هذه المعلومات، بالإضافة إلى الإشارات المتاحة من الظروف الخارجية، لاتخاذ قرار مبرمج بشأن المصدر الذي يجب استخدامه وحساب مسار الملاحة الصحيح. كما نرى من كل هذا، فإن وظيفة التحكم عبارة عن خوارزمية معقدة.

وتزداد الأمور تعقيدًا. بالإشارة مرة أخرى إلى الشكل ٣.٣، من المحتمل أن توجد المعلومات التي تحدد هذه العناصر في أجزاء مختلفة من الجينوم. علاوة على ذلك، فإن المعلومات التي تحدد هذه العناصر ذات طبيعة مختلفة تمامًا. على سبيل المثال، الجينات التي تتحكم في علم وظائف الأعضاء لا علاقة لها بالجينات التي تحدد خوارزميات الملاحة أو الهجرة. حتى الجينات التي تحدد فسيولوجيا المستشعر (أجهزة استشعار البوصلة، وما إلى ذلك) تختلف تمامًا عن الجينات التي تحدد فسيولوجيا الهجرة (خصائص الطيران، وما إلى ذلك). ومع ذلك، يتطلب تطوير سلوكيات الملاحة والهجرة الأصل المستقل للسمات المادية والمعلومات اللازمة لخمس مجموعات منفصلة من الجينات وغيرها من المعلومات الوراثية في الجينوم. كما نوقش أعلاه، فإن احتمال الحصول على عدد قليل من التغييرات الجينية المنسقة منخفض للغاية. إن احتمال الحصول على عدد غير معروف (ولكن من المحتمل أن يكون كبيرًا) من التغييرات الجينية المنسقة في خمسة أجزاء مختلفة من الجينوم أمر غير مرجح للغاية. كما هو مطلوب تطوير سمات جديدة (وهناك العديد منها مرتبط بالملاحة والهجرة)، والتي سيتم مناقشتها في الفصل ٤.



الشكل ٣.٥. عملية الهندسة من الأعلى إلى الأسفل

لقد قمت بكتابة مسودة أولية لهذا القسم بعد وقت قصير من وقوع حادثين في الأخبار حيث هبطت طائرات تجارية في مطارات لم تكن هي الوجهة المقصودة. يعتبر هذا مثالًا على فشل الطيارين في الرجوع إلى أنظمة الملاحة البديلة الخاصة بهم، أو الفشل الفعلي للنظام نفسه. في كلتا الحالتين، توضح الحوادث مدى أهمية وجود استراتيجيات ملاحية احتياطية، ومدى صعوبة برمجة الأنظمة التي تعمل بشكل صحيح باستمرار. يعتبر وجود نظام احتياطي مفهومًا أساسيًا في الهندسة عندما تكون توفر وموثوقية النظام أمرًا بالغ الأهمية. قد لا تكون هناك إشارة معينة متاحة في أوقات معينة، وفي أوقات أخرى قد تعطي معلومات غامضة. يمكن أن يساعد وجود مصدر بديل للمعلومات أيضًا في اكتشاف الإشارات الخاطئة. نجد أن نمل الصحراء والعديد من المخلوقات المهاجرة الأخرى تتبع هذه القاعدة العامة.

أولئك الذين يمتهنون برمجة خوارزميات الكمبيوتر هم في وضع جيد بشكل خاص لتقدير مدى تعقيد الخوارزمية التي يجب أن تكون لتعمل بشكل جيد مثل خوارزمية الملاحة في نمل الصحراء. في هذه الحالة، تتكون الخوارزمية من عدة قرارات منطقية بناءً على المعلومات المكتشفة. بمجرد أن تتخذ الخوارزمية قرارًا بشأن مصدر الملاحة الذي يجب استخدامه بناءً على البيانات الواردة والظروف البيئية، يجب على وظيفة التحكم بعد ذلك حساب المسار. في بعض الحالات، يتم حساب الدورة التدريبية بناءً على الجمع بين المعلومات من طريقتين للملاحة. عندما تستخدم النملة أداة تكامل المسار، فإنها تتبع حركتها من خلال عداد المسافات والحركات الزاوية التي

تحددها البوصلة، والتي يتم تخزينها في الذاكرة. يمكنه بعد ذلك حساب المسار المباشر إلى عش المنزل. هذه عملية معقدة تتضمن حساب المثلثات.

بينما يمكننا كتابة جزء بسيط نسبيًا من شفرة الكمبيوتر للقيام بهذا الحساب، إلا أنه في حالة النمل، يجب أن تتم برمجته في دماغ النملة ودمجه مع العديد من العناصر الأساسية الأخرى لخوارزمية الملاحة. يتكون السؤال من شقين: (١) كيف يمكن برمجة حساب رياضي مثلثي في دماغ نملة من خلال عملية داروينية جديدة من الطفرة الجينية والانتقاء الطبيعي؟ ضع في اعتبارك أن البرمجة تتضمن على الأرجح دائرة عصبية، ودائرة عصبية ذات مستوى عالٍ من التطور. (٢) كيف يمكن لعملية داروينية جديدة أن تنجح في القيام بذلك مع بناء أنظمة فرعية أساسية أخرى في نفس الوقت من نظام الملاحة المتكامل الأكبر؟ يبدو أن الحساب المثلثي وحده يصعب تطويره على مراحل، ولكن بدون وجود هذه الأنظمة الفرعية الأخرى، فإن أجمل خوارزمية في العالم لحساب عملية حسابية مثلثية لا فائدة منها للنملة، وبالتالي لا تتوفر للاستيلاء عليها وحفظها عن طريق الانتقاء الطبيعي. هذا يثير مشكلة الدجاجة أم البيضة: أيهما تطور أولاً - الأنظمة الفيزيائية أم خوارزميات السلوك؟

التطور التدريجي المتسلسل، الذي يتصور حدوث تغيرات طفيفة ومتراكمة عبر الأجيال، يبدو غير منطقي. فكل سمة جديدة، بمعزل عن غيرها، ليس لها قيمة وظيفية تذكر. وعلى الجانب الآخر، افتراض تطور كل

الخصائص الفيزيائية والسلوكية في آن واحد أمر مستبعد للغاية بسبب عدم احتماليته.

دعونا نأخذ مثالًا آخر من عالم البرمجة. تشير الأبحاث إلى أن الطيور قادرة على استخدام نوع معين من المعلومات الملاحية لضبط نوع آخر. على سبيل المثال، أظهرت تجربة أجريت على طيور الشحرور من نوع (Catharus) أنها تعيد معايرة اتجاهها المغناطيسي أثناء الهجرة يوميًا وفقًا لاتجاه الشمس عند غروبها أو الشفق، بدلًا من التمسك باتجاه ثابت نحو الشمال المغناطيسي[١]. هذا التوجه، الذي يعتمد على مصادر متعددة للمعلومات الملاحية، يعتبر منطقيًا من منظور هندسي للحيوانات المهاجرة لمسافات طويلة، ويجد نظيره في أنظمة الملاحة الجوية المتكاملة حيث يتم استخدام مستشعر واحد لضبط آخر.

لنتأمل أيضًا الخوارزميات المعقدة اللازمة لحساب مسارات الهجرة، بما في ذلك الخوارزميات المستخدمة في تكامل المسار، وحساب المسارات على الدوائر الكبرى في الهجرات بعيدة المدى، وتعويض الزمن باستخدام بوصلة شمسية. تفسير نشوء هذه الخوارزميات بشكل تدريجي، واحدة تلو الأخرى، من خلال التطور الداروينى الجديد يمثل تحديًا كبيرًا، ناهيك عن تكاملها وتنفيذها المتزامن في الشبكات العصبية للدماغ.

---

(١) تتضمن الذاكرة الضمنية معلومات يمكن استرجاعها تلقائيًا. مثال على ذلك هو المعرفة الإجرائية، مثل المهارات الحركية البشرية. في الحيوانات، تتضمن الذاكرة الإجرائية الضمنية معلومات مستخدمة في السلوكيات المعقدة المبرمجة مثل التنقل وبناء العش والتواصل.

إن تفسير تطور حتى واحدة من استراتيجيات الملاحة هذه عبر العملية الداروينية الجديدة يمثل صعوبة بالغة، ناهيك عن تطور استراتيجيات متعددة ومتكاملة. هذه الصعوبة لا تنبع من نقص في التفكير العميق في هذه المسألة، بل على العكس تمامًا. فكلما تعمق فهمنا للهندسة والتحديات التي تواجهها في تصميم أنظمة وظيفية معقدة - مثل أنظمة الملاحة - كلما بدا سيناريو النشوء الدارويني الجديد أقل احتمالًا. بمعنى آخر، هذا الاستنتاج ليس مبنيًا على الجهل، بل على المعرفة الهندسية المتعمقة.

الفصل الرابع: مُجتمعات مُعَقَّدة في بَرمَجتها

"الغريزة تعرف كل شيء في المسارات الثابتة المحددة لها، ولا تعرف شيئًا خارج تلك المسارات."[1]

- جيه هنري فابر

تقدم لنا الحشرات الاجتماعية دراسة حالة مثالية عن السلوكيات المبرمجة المعقدة. لنأخذ النملة كمثال: تعيش جميع أنواع النمل (الفصيلة: فورميسيداي) في مجموعات متفاوتة الحجم بين الصغير والكبير جدًا. وكغيرها من الحشرات الاجتماعية، تظهر النملة سلوكيات معقدة متعددة مرتبطة بأنماط حياة المجموعات الاجتماعية، مثل: الزراعة، والحروب الإقليمية، وتقسيم العمل، والطبقات الاجتماعية، وبناء التوافق، وتشييد المدن، واستخدام لغة رمزية. يبدو أن جميع هذه السلوكيات الاجتماعية المعقدة مبرمجة مسبقًا، حيث يتقن النمل تلك السلوكيات فورًا تقريبًا، قبل أن تتاح له الفرصة لتعلمها.

بشكل عام، هناك العديد من الفوائد للعيش في مجموعات، بما في ذلك: الحماية من الحيوانات المفترسة، وتوفير الغذاء من خلال البحث عن الطعام والصيد، ورعاية الصغار.

تُظهر العديد من أنواع الحيوانات السلوك الاجتماعي، بدءًا من الحشرات اللافقارية وصولًا إلى الفقاريات الأكثر تطورًا مثل الرئيسيات. ولتسهيل الدراسة، قُسِّمت هذه الأنواع إلى ثلاث فئات، من الأقل تعقيدًا اجتماعيًا إلى

---

(١) ج. هنري فابر، عالم الحشرات لج. هنري فابر، ترجمة ألكسندر تيكسيرا دي ماتوس (بوسطن: بيكون برس، ١٩٩١)، ٦٥.

الأكثر تعقيدًا: • الاجتماعية البدائية • الاجتماعية الأساسية • الاجتماعية المعقدة.

يوصف مصطلح "الاجتماعية" (Eusocial) بأنه حالة تكون فيها أنثى واحدة أو طبقة معينة من الإناث هي المسؤولة عن التكاثر، بينما تتولى الإناث الأخريات مسؤولية رعاية الصغار، وجمع الطعام، وتوفير الحماية. تصف كارين كابهايم، عالمة الأحياء والباحثة في السلوك الاجتماعي للحشرات، الاجتماعية بأنها "واحدة من أكثر السلوكيات الاجتماعية تعقيدًا المعروفة لدى الحيوانات." أما إدوارد أو. ويلسون، الذي كان رائدًا في مجال علم الأحياء الاجتماعية - وهو علم يحاول الإجابة على الأسئلة حول الأسباب الجذرية للسلوكيات الاجتماعية - فيصف الحالات الأكثر تقدمًا للتنظيم الاجتماعي بأنها "كائن حي فائق." ويقوم هو وزميله، بيرت هولدوبلر، بتعريف ذلك بأنه "مستعمرة لديها العديد من سمات الكائن الحي، ولكنها تتجاوز الكائنات الحية في مستوى أعلى من التسلسل الهرمي للتنظيم البيولوجي"[١].

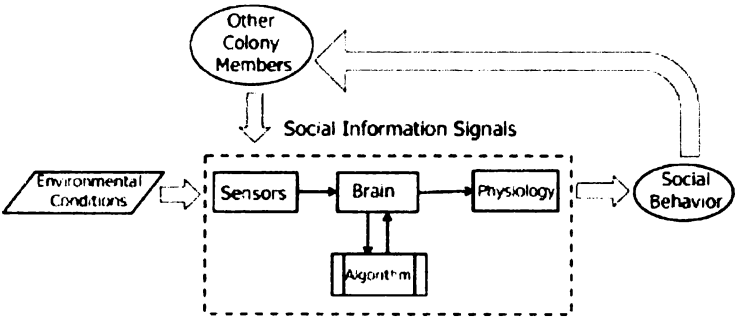
بالنظر إلى تعقيد هذه المستعمرات الاجتماعية، فمن المثير للدهشة أنها مقتصرة بشكل كامل على الحشرات ذات العقول الصغيرة. (جرذ الخلد العاري هو الحيوان الفقاري الوحيد المعروف الذي يُظهر سلوكًا اجتماعيًا).

يتم تجميع أكثر أنواع الحشرات الاجتماعية شيوعًا ضمن رتبة غشائيات الأجنحة، والتي تشمل النمل والنحل والدبابير. في حين أن جميع أنواع النمل

---

(١) بيرت هولدوبر وإي. أو. ويلسون، الكائن الحي الفائق: جمال وأناقة وغرابة مجتمعات الحشرات (نيويورك: دبليو دبليو نورتون وشركاه، ٢٠٠٩)، ٤.

اجتماعية، فإن معظم أنواع النحل ليست كذلك، ومع ذلك، هناك حوالي ألف نوع من النحل الاجتماعي، وأكثرها شهرة هو نحل العسل. بعض أنواع النحل تعتبر "اختيارية"، مما يعني أنها قادرة على التعبير عن أشكال مختلفة من التنظيم الاجتماعي. من بين الدبابير الاجتماعية (التي تنتمي في الغالب إلى عائلة فيسبيداي)، هناك مجموعات اجتماعية من دبابير الورق، والدبابير الصفراء، والدبابير. ومثل النمل، فإن جميع أنواع النمل الأبيض (تحت رتبة إيسوبترا) هي حشرات اجتماعية.



الشكل ٤.١ نظام السلوك الاجتماعي

عن المستعمرات والطبقات الاجتماعية

تتكون معظم مجتمعات الحشرات من عدة طبقات اجتماعية، حيث تؤدي مجموعات من الأفراد وظائف مختلفة. التقسيم الأساسي هو بين الأفراد الذين يتكاثرون وأولئك الذين لا يتكاثرون. عادة، تكون الملكة هي الأنثى الوحيدة التي تتكاثر. أما الأفراد غير المتكاثرين فهم في الأساس العاملات اللاتي يقمن بمعظم مهام المستعمرة. وهذا يشمل بناء العش، وجمع الطعام،

وإطعام ورعاية الحضنة، والدفاع عن العش ضد الحيوانات المفترسة والمهاجمين الآخرين.

في حالة نحل العسل، إلى جانب الملكة، الطبقتان الأخريان هما العاملات والذكور. الذكور تتزاوج مع الملكة، لكنها تقوم بعمل قليل آخر في المستعمرة. ومن المثير للاهتمام أن الذكور تموت بعد فترة وجيزة من التزاوج مع الملكة. أما العاملات فهن إناث غير قادرات على التكاثر، وبالتالي ليس لديهن "لياقة مباشرة" بمصطلحات داروين[١].

عادة ما تكون الاختلافات بين الطبقات سلوكية، ولكن في كثير من الحالات تكون أيضًا جسدية. في دبابير الورق، تكون الملكة والعاملات متشابهين جسديًا. ومن ناحية أخرى، في دبابير فيسبين تكون الملكة أكبر من العاملات. في معظم الأنواع، تكون الملكة والعاملات متطابقتين وراثيًا. وتحدد الاختلافات البيئية ما إذا كانت الأنثى ستصبح عاملة أم ملكة. تم تحديد العديد من المتغيرات التي تحدد متى تصبح الإناث ملكات. وتشمل هذه المتغيرات تغذية اليرقات، ودرجة الحرارة، وحجم البيض، وعمر الملكة الحالية، والتثبيط الذاتي للطبقة. في النمل ونحل العسل والنمل الأبيض، يمنع وجود ملكة إنتاج ملكة جديدة. وفقًا لباحثتي سلوك الحشرات آمي توث

(١) "اللياقة المباشرة" هي "مقياس للنجاح التناسلي أو الجيني للفرد بناءً على عدد النسل الذي يعيش ليتكاثر ".يتناقض هذا المفهوم مع "اللياقة غير المباشرة"، والتي تُعرف بأنها "مقياس للنجاح الجيني للفرد الإيثاري بناءً على عدد الأقارب (أو الأفراد المتشابهين وراثيًا) الذين يساعدهم الإيثاري على التكاثر والذين لم يكونوا لينجوا لولا ذلك ".تنطبق اللياقة غير المباشرة نظريًا على العاملات .جون ألكوك، سلوك الحيوان :نهج تطوري (سيناور أسوشيتس، سندرلاند، ماساتشوستس، ٢٠١٣)، ٢٣.

وساندرا ريهان، فإن الاختلافات في الطبقات هي "مثال كلاسيكي على اللدونة الظاهرية، ويعتبر تحديد الطبقة البيئية (الذي يعتمد على التعبير الجيني بدلًا من الاختلافات الوراثية القابلة للتوريث) هو القاعدة في معظم الحشرات الاجتماعية." وهذا أيضًا مثال على التحكم الجيني في النمط الظاهري والسلوك.

تتشكل المستعمرات الجديدة عندما تغادر الملكات المستقبلية والذكور مستعمرة موجودة، ويتزاوجون، ويستقرون في موقع جديد. يمكن أن تكون رحلات التشتت في بعض الأنواع مذهلة، حيث يلتقي آلاف الذكور والملكات. هناك العديد من الاختلافات في موضوع دورة الحياة الأساسية هذا، بما في ذلك وجود ملكات متعددة، أو حتى ملك في حالة مستعمرات النمل الأبيض.

تظهر دبابير جنس Polistes سلوكيات اجتماعية بسيطة نسبيًا. مستعمراتها صغيرة، وعادة ما تكون أقل من مائة فرد، ولديها أنثى واحدة أو عدد قليل من الإناث. وفي معظم الحالات يكون لديهم ملكة واحدة فقط، والتي تختلف قليلاً جسديًا عن العاملات التابعات. تحد الملكة من تكاثر الإناث التابعات من خلال العدوان الجسدي. ولا يوجد تقسيم واضح للعمل كما هو الحال في المستعمرات الأكثر تعقيدًا. وعلى الطرف الآخر من الطيف توجد نمل السائق ونمل قاطع الأوراق. كما يوضح علماء الأحياء بريان جونسون وتيموثي لينكسفير، فإن هذه النمل لديها هياكل اجتماعية معقدة تتميز "بطبقات غير مرنة تحكمها أنظمة معقدة من التواصل (علم وظائف

الأعضاء الاجتماعي) التي تسهل صنع القرار الجماعي في كل مجال من مجالات حياة المستعمرة".

تشمل السلوكيات المبرمجة المعقدة الأخرى الضرورية لعمل مستعمرات الحشرات الاجتماعية الهندسة المعمارية والاتصالات والملاحة والتزاوج والبحث عن الطعام.

هناك أربع سمات مشتركة للحيوانات داخل الأنظمة الاجتماعية: ١) إنها حساسة للغاية وتستجيب للمعلومات البيئية والاجتماعية. ٢) تنتقل هذه المعلومات داخل الحيوانات الفردية من خلال مسار حسي واحد أو أكثر. ٣) تتم معالجة الإشارات ودمجها في دوائر معينة من الدماغ. ٤) تتحكم الحالة الداخلية للحيوان في سلوكه النهائي. يوضح الشكل ٤.١ كيف تتفاعل هذه العناصر لإنتاج السلوك الاجتماعي.

يوضح الرسم التخطيطي عدد العناصر المختلفة التي تشارك في مهام السلوك الاجتماعي وتعقيد تكاملها. العناصر الحاسمة لهذه الميزات هي استقبال المعلومات بواسطة أجهزة الاستشعار ومعالجة الإشارات الاجتماعية، وكيف يتغير السلوك الناتج للأفراد في المستعمرة.

من الذي يتخذ القرارات في مستعمرات الحشرات هذه؟ لا يوجد تحكم مركزي في صنع القرار. بدلًا من ذلك، هناك شبكة موزعة بين جميع الأعضاء. في حالة نحل العسل، تقوم العاملات بمهام مختلفة، بما في ذلك تشكيل الخلية، ورعاية الحضنة، وتنظيف الخلايا، والبحث عن الطعام، والقيام برحلات توجيهية، والدوريات، وأكل حبوب اللقاح. يعتمد تحديد وقت أداء

هذه المهام على كل من الاتصال بإشارات المعلومات الاجتماعية داخل المستعمرة والإشارات البيئية. تشمل الإشارات البيئية درجة حرارة العش وشكل الخلايا ورطوبة اليرقات ودرجة الازدحام في مصدر الغذاء.

يكون السلوك الفردي فطريًا إلى حد كبير بدلًا من أن يكون مكتسبًا، وبالتالي يبدو أنه يعتمد على خوارزميات مبرمجة في الدماغ. تقوم الخوارزميات بمعالجة المعلومات من البيئة ومن أعضاء المستعمرة لاتخاذ قرار بشأن السلوك المناسب. ويمكن لسلوك كل فرد بدوره أن يؤثر على سلوك الأعضاء الآخرين في المستعمرة - الخوارزميات التي تؤثر على الخوارزميات في عملية متكررة.

تقسيم العمل

بمجرد إدراكنا أن الكثير من سلوك الحشرات الاجتماعية مبرمج، قد نستنتج بشكل متسرع أن هذه البرمجة تعني سلوكًا جامدًا ومتكررًا. ولكن هذا ليس صحيحًا تمامًا. ففي كثير من الأحيان، ينطوي سلوك كل حشرة على عملية مرنة لاتخاذ القرارات تستند إلى عوامل متعددة[1].

---

(١) هولدوبر وويلسون، الكائن الحي الفائق، ١١٧. كتب هولدوبر وويلسون: "إذا تمت مراقبتها لبضع ساعات فقط، فقد يتم تفسير مستعمرة الحشرات الاجتماعية على أنها تتكون من آلات ذاتية التشغيل مدفوعة بنفس مجموعة قواعد القرار الموحدة. ولكن هذا بعيد كل البعد عن الواقع. كل فرد في المستعمرة متميز بطريقة أو بأخرى تؤثر على سلوكه. كل واحد لديه عقل خاص به. نعني بالعقل ليس وعيًا بشريًا تأمليًا وواعيًا لذاته ومتجولًا على نطاق واسع، بل بالأحرى وعيًا إدراكيًا مبنيًا بدماغ معقد نسبيًا يمكنه تخزين المعلومات من جميع طرائقه الحسية (الذوق والشم واللمس والبصر والصوت) وكذلك بعض الذاكرة للأحداث التي مر بها في حياته القصيرة. العمل مدفوع بالأولويات التي تتأثر على

في حالات عديدة، تكون الحشرات مبرمجة لأداء مهام مختلفة، ويوجهها نظام مرن لتوزيع المهام. هذا النظام يمكن المستعمرة من الاستجابة بسرعة للتغيرات في الطلب على مهام محددة. يتغير باستمرار عدد العاملات اللاتي يقمن بمختلف مهام المستعمرة، ويعتمد هذا جزئيًا على عدد الأفراد الذين يؤدون المهام الأخرى. يشير هذا إلى أن عملية تخصيص المهام في الوقت الفعلي هي عملية أكثر تعقيدًا مما كان يُعتقد سابقًا.

يختلف أعضاء المستعمرة الفرديون في ميولهم لأداء مهام معينة. في العديد من الحشرات الاجتماعية، تتغير هذه الميول مع تقدم العمر (وهو ما يسمى تعدد المهام - Polyethism)، بينما تعتمد ميول أخرى على الحجم (تسمى اختلاف المهام - Alloethism). ليس من الصعب عادةً اكتشاف الفائدة التكيفية لمثل هذه الترتيبات. على سبيل المثال، الحشرات التي تبحث عن الطعام تواجه خطر الموت بشكل أكبر بكثير من العاملات داخل العش. وقد وجدت دراسة أجريت على مستعمرة من الدبابير (Vespa orientalis) أنه خلال الأيام الأربعة عشر الأولى من حياة الحشرة البالغة، كان معدل وفيات العاملات في الداخل ٨.٨٪، بينما كان معدل وفيات الباحثات عن الطعام ٤٢.٥٪. وعادةً ما تكون الحشرات التي تبحث عن الطعام هي الأكبر سنًا. هذا التقسيم للعمل يقلل من إجمالي عدد أيام الحياة المفقودة "في الميدان"، مما يعود بالفائدة على المستعمرة ككل.

الأقل جزئيًا بالإدراك السابق: البحث عن هذه المهمة، أو إنهاء المهمة قيد التنفيذ، أو القيام بدورية في المناطق المحيطة بحثًا عن أي شيء يحتاج إلى القيام به، أو التوقف للوقوف في حالة تأهب، أو ببساطة الراحة."

تم اقتراح العديد من النماذج لشرح آليات اختيار المهام لتقسيم العمل. لا يوجد إجماع تام حول كيفية إدارة اختيار المهام بدقة في المستعمرات الاجتماعية، ولكن بعض الأشياء واضحة. على سبيل المثال، غالبًا ما يتم فرض تقسيم العمل من خلال التسلسلات الهرمية للهيمنة. في بعض الحالات، يعتمد هذا التسلسل على العمر، كما ذكرنا سابقًا. وفي حالات أخرى، يتم تحديد الأدوار من خلال المنافسة على الحقوق الإنجابية، حيث يحتل الفرد الأكثر سيطرة مرتبة أعلى. ويتم فرز هذه التسلسلات الهرمية بسرعة، ووفقًا للباحثين جوان ستراسمان وديفيد كيلر، "يبدو أن الأفراد يتصرفون عادةً لتحقيق هدف مشترك"[1]. والنتيجة هي منظمة فعالة للغاية من شأنها أن تثير إعجاب العديد من مديري الشركات.

المعلومات الاجتماعية: التواصل

يُعد التفاعل بين أفراد المستعمرة، والذي يؤثر على سلوك الأعضاء الآخرين، جزءًا مهمًا من أنظمة السلوك الاجتماعي. في حالة مستعمرات الحشرات، يتم هذا إلى حد كبير من خلال الفيرومونات.

المصطلح العام للمادة التي تعمل كإشارة اتصال بين الكائنات الحية هو "مادة نصف كيميائية" (semiochemical). يعتمد معظم السلوك الاجتماعي للحشرات بدرجة ما على هذه المواد. حدد هولدوبلر وويلسون

(١) جوان إي ستراسمان وديفيد سي كيلر، "مجتمعات الحشرات ككائنات مقسمة: تعقيدات الغرض والغرض المتقاطع"، في ضوء التطور، المجلد. ١، التكيف والتصميم المعقد، محرران. جون سي أفيس وفرانسيسكو جيه أيالا) واشنطنNational Academies Press :، ٢٠٠٧(، ١٦٣.

اثنتي عشرة فئة وظيفية للاتصالات بين الحشرات الاجتماعية، معظمها كيميائي: الإنذار، والجذب، والتجنيد، والاستمالة، والتغذية، وتبادل السوائل والجسيمات الصلبة، والتأثير الجماعي، والتعرف على زملاء العش، وتحديد الطبقات، والسيطرة على الأفراد الآخرين المتنافسين على التكاثر، والإقليمية، والتواصل الجنسي.

يتضح مدى أهمية المواد نصف الكيميائية في الحشرات من خلال المستشعرات المتعددة المستخدمة للكشف عنها. وتشمل هذه المستشعرات قرون الاستشعار، والملامس الفكية (أجزاء الفم)، والخلايا الذوقية (الذوق) على خرطوم، والساقين، والأجنحة، والأعضاء التناسلية. تتم معالجة معظم الفيرومونات بواسطة الجهاز الشمي للحيوان المتلقي، مع نسبة صغيرة تتم معالجتها من خلال نظام التذوق. في كثير من الحالات، يتم اشتقاق الفيرومونات من مركبات لها وظائف أخرى.

يوفر النمل مثالًا جيدًا للاستخدامات المتعددة للفيرومونات في البحث عن الطعام، والتمييز بين الأقارب، والتزاوج، والسيادة الإقليمية. في بعض أنواع النمل، يتم استخدام نفس الغدة لإنتاج الفيرومونات من أجل (١) تجنيد الباحثين عن الطعام، (٢) تحديد المسارات، (٣) الإشارة للمساعدة في حمل الفريسة الكبيرة، (٤) التوجه نحو المنزل، و(٥) تحديد النطاق المنزلي. وعلق هولدوبلر وويلسون بأن النمل هو "عباقرة الحشرات في مجال الاتصال الكيميائي".

يستخدم النمل العديد من المركبات في الفيرومونات، ونادرًا ما تكون الفيرومونات مركبًا واحدًا. يفرز نمل النجار (Camponotus ligniperda) ما لا يقل عن واحد وأربعين مركبًا، والنمل الحائك (Oecophyllalonginoda) أكثر من ثلاثين مركبًا. بعض الفيرومونات عامة، حيث يستجيب لها النمل من أي نوع، في حين أن البعض الآخر خاص بنوع معين. غالبًا ما تكون إشارات الاستدلال إلى المنزل خاصة بمستعمرات فردية. يتم أيضًا استخدام مجموعة من الفيرومونات لتحديد مستعمرات محددة في بعض الأنواع. هذه تخلق "رائحة مستعمرة" فريدة من نوعها. يعلق هولدوبلر قائلاً: "لتحقيق هذه الدرجة العالية من التحديد، يجب أن تكون علامات التعرف هذه إشارات معقدة ومتعددة المكونات إلى حد ما".

"يُمكن تصوُّرُ الدوائر العصبية كبوابات منطقية رقمية من نوع "و": فإذا فُقِدَ أحدُ المُكوِّنات أو كان بنسبةٍ خاطئةٍ، لن ينتقلَ المُحفِّزُ إلى الدماغ. وبالعكس، تُصدِرُ الدائرةُ إشارةَ "توقُّف" إذا نُشِّطَتْ عصبوناتٌ حسّيةٌ شمّيةٌ حسّاسةٌ لمُكوِّن فرمونٍ من نوعٍ خاطئ. يُمثِّلُ هذا أبسطَ تطبيقٍ للإشارات الكيميائية .إلّا أنَّ النطاقَ الكاملَ للإشارات والسلوكيات المُرتبطة بها أكثرُ تعقيدًا بكثير، ممّا يُشيرُ إلى أنَّ مُعالجةَ هذه المعلومات تتطلّبُ خوارزمياتٍ مُعقّدة".

الإيثار

من العناصر الرئيسية للسلوك الاجتماعي هو السلوك الإيثاري الظاهر لأعضاء المجموعات الاجتماعية. الفرد الذي يتصرف بطريقة إيثارية سيساعد في بقاء الأفراد الآخرين، بينما يقلل من فرص بقائه هو أو نسله المحتمل. نرى هذا بين حيوانات المجموعة الاجتماعية التي لا تستطيع التكاثر وبالتالي لا يمكنها نقل جيناتها إلى النسل. ومن الأمثلة على ذلك الطبقات العقيمة العاملة والجندية لبعض المجموعات الاجتماعية. ومن الأمثلة الدراماتيكية على الإيثار سلوك النمل الأبيض الذي يضحي بنفسه في الدفاع عن عشه في صد هجوم النمل العسكري حتى عندما يكون النمل الأبيض الجندي محكومًا عليه بالموت إذا لم يتراجع. ويبدو أن هذا السلوك الإيثاري يتعارض مع النموذج الداروينى ووجهة نظر "الجين الأناني" التي يتبناها ريتشارد دوكينز وآخرون، والتي تشير إلى أن الانتقاء الطبيعي يدفع الحياة الحيوانية باستمرار نحو الأشكال الفردية التي تسعى إلى تعظيم احتمالية بقائها أو عدد نسلها. (المزيد عن هذا الموضوع لاحقًا).

مزايا الأنظمة الاجتماعية

جعلت كفاءة مستعمرات الحشرات الاجتماعية منها ناجحة للغاية. نظرًا لأدائها المتفوق في توسيع أعدادها، فإن الحشرات الاجتماعية تفوق عدد الحشرات الانفرادية مثل الصراصير والجراد والخنافس. هذا على الرغم من حقيقة أن الحشرات الاجتماعية تمثل حوالي ٢ في المائة فقط من الأنواع المعروفة من الحشرات والتي تقدر بحوالي مليون نوع. تتراوح أحجام مستعمرات الكائنات الحية الفائقة من مئات الآلاف إلى ملايين الأفراد. وقد

تم توثيق مثال على ذلك في دراسة لمنطقة في غابات الأمازون المطيرة حيث وجد أن الحشرات الاجتماعية (الدبابير والنحل والنمل والنمل الأبيض) تشكل حوالي ٨٠ في المائة من الكتلة الحيوية للحشرات هناك وأكثر من ٢٠ في المائة من الكتلة الحيوية الحيوانية. ويلاحظ ويلسون أن الحيوانات في البيئات البرية يهيمن عليها الأنواع ذات الأنظمة الاجتماعية الأكثر تعقيدًا. ومؤشر آخر على مدى نجاح الحشرات الاجتماعية هو أنه لا يوجد أي دليل على انقراض مجموعات رئيسية من الحشرات الاجتماعية.

النحل

إن درجة التنظيم الاجتماعي بين افراد النحل مذهلة. يذهب خبير النحل يورغن تاوتز إلى حد مقارنة مستعمرة النحل بكائن حي واحد. ويكتب: "إن مستعمرة نحل العسل لا تعادل الفقاريات فحسب، بل إنها في الواقع تعادل الثدييات، لأنها تمتلك العديد من خصائص الثدييات". وتشمل هذه الخصائص حماية النسل في بيئة يتم التحكم فيها بدقة، والحفاظ على درجة حرارة ثابتة، والقدرة على التعلم، وانخفاض معدل التكاثر. ويرتبط هذا الأخير بحقيقة أن هناك عددًا صغيرًا فقط من الإناث التي تستطيع التكاثر، والتي يتم إنتاجها فقط عند الحاجة. يحدث هذا عندما يقدم نحل العسل نظامًا غذائيًا خاصًا لليرقات الموجودة في خلايا الملكة في الخلية.

يرتبط تقسيم العمل في النحل إما بالعمر أو الحجم. يستخدم النحل الطنان الحجم كأساس لتقسيم العمل. وفقًا لعلماء الحشرات جاي بلوخ وكريستينا جروزينجر، فإن أكبر أعضاء هذه المستعمرات أكبر بتسع مرات من أصغرها، و"الأفراد الكبيرة هم أكثر عرضة للقيام بأنشطة البحث عن

الطعام، وقد يبدأون في البحث عن الطعام في وقت مبكر من يومهم الأول كبالغين، في حين تميل النحل الصغيرة إلى القيام بأنشطة داخل العش". وتظهر الدراسات الحديثة أن العاملات الكبيرة أكثر ملاءمة لأنشطة البحث عن الطعام لأن لديها أنظمة كشف حسية أكثر حساسية.

مع نحل العسل (وكذلك مع النمل) هناك أدلة وفيرة على البرامج التنموية الفطرية لعلم وظائف الأعضاء والسلوك المتعلقة بالعمر وفي خدمة تقسيم العمل المرتبط بالعمر. ومن الجدير بالملاحظة أيضًا حقيقة أن النحل يمكنه أداء مهام مختلفة في تقسيم العمل، بما في ذلك البحث عن الطعام (الذي يتطلب الملاحة والقدرة على حفظ العديد من الإشارات حول الزهور)، والعثور على مواقع جديدة للخلايا، وبناء الخلية، وتنظيف الخلايا وإصلاحها. نرى القدرة على التكيف في العمل، على سبيل المثال، عندما ينتقل نحل العسل الصغير إلى البحث عن الطعام إذا تمت إزالة النحل الأكبر سنًا من المستعمرة.

تشير قدرتها على أداء كل هذه المهام إلى أنه يجب أن يكون أحد الخيارين صحيحًا. أحد الخيارات هو أن الحيوان لديه القدرة الإدراكية على اتخاذ القرارات وتنفيذ المهام التي يحدد أنها مطلوبة. "إن الآثار المعرفية لنهج متعدد المواهب كبيرة"، كما يعلق جولدز. الخيار الثاني هو أن جميع المهام مبرمجة مسبقًا، جنبًا إلى جنب مع جهاز صنع القرار لتحديد المهمة المطلوبة. الخيار الأول ليس مرجحًا لأن النحل لديه أدمغة صغيرة للغاية وقدرة إدراكية محدودة. وهذا يترك الخيار الثاني كبديل حي. ومع ذلك، لا يزال هذا يترك مشكلة في إدارة سلوك الآلاف من الأفراد في المستعمرة.

لا يمتلك النحل الفردي نظرة عامة على احتياجات المستعمرة من حيث العرض والطلب على الغذاء. ومع ذلك، فمن المعروف من التجارب أن مستعمرة نحل العسل تضبط على النحو الأمثل عدد الباحثين النشطين عن الطعام، وهو ما يتحقق من خلال نوع من الآلية اللامركزية. واستنادًا إلى دراسته المكثفة لنحل العسل، يشير عالم الأحياء بجامعة كورنيل توماس سيلي إلى "أنظمة خاصة للاتصال والتحكم في التغذية المرتدة".

ينخرط نحل العسل أيضًا في العديد من السلوكيات للتحكم في البيئة في الخلية، وهو أمر بالغ الأهمية لتربية الحضنة. يتم الحفاظ على درجة الحرارة بين ٣٣.٩ درجة مئوية و ٣٥.٦ درجة مئوية، حتى في الوقت الذي يمكن أن يتراوح فيه الهواء الخارجي من -٢٨.٩ درجة مئوية إلى ٤٨.٩ درجة مئوية. يتم تحقيق ذلك من قبل النحل في المستعمرة، والذي يقوم إما برفع أو خفض عملية التمثيل الغذائي الخاصة به. يؤدي رفع التمثيل الغذائي إلى زيادة درجة حرارة أجسام النحل، وبالتالي رفع درجة الحرارة في الخلية. والعكس صحيح عند خفض التمثيل الغذائي. كما أنها تنظم مستويات ثاني أكسيد الكربون من خلال زيادة التهوية عندما ترتفع مستويات ثاني أكسيد الكربون بشكل كبير جدًا. حتى أنهم يكافحون الالتهابات الفطرية عن طريق رفع درجة الحرارة الداخلية.

دعونا نتجاوز الحديث عن فوائد العسل اللذيذة، ولنتأمل الدور الأساسي الذي يؤديه نحل العسل في الحفاظ على التوازن البيئي .فلا يقتصر أثر هذه الكائنات المُذهلة على إنتاج العسل فحسب، بل يمتدّ ليشمل دورًا حيويًا في عملية التلقيح، وهي العملية التي تُعدّ أساسيةً لِجميع النظم البيئية الأرضية تقريبًا.

يُشارك نحل العسل مع أقاربه من النحل الطنان وبعض أنواع النحل الانفرادي في هذه المهمة الضّرورية، حيثُ يقوم بنقل حبوب اللقاح بين أزهار النباتات، مُساهمًا في تكاثرها وإنتاج الثمار والبذور .ويكفي أن نُشير إلى أنّ حوالي ٤٠،٠٠٠ نوع من النباتات المُزهرة، بما فيها العديد من المحاصيل الزراعية التي نعتمد عليها في غذائنا، تعتمد بشكلٍ أساسي على نحل العسل في عملية التلقيح.

النمل

صاغ عالم الحشرات الشهير بجامعة هارفارد، ويليام مورتون ويلر، مصطلح "الكائن الخارق" في عام ١٩١١، مستوحى من دراسته للنمل. يعرّف هولدوبلر وويلسون هذا المصطلح بأنه "مستعمرة تحمل العديد من سمات الكائن الحي، لكنها تتخطى الكائنات الحية الفردية في التنظيم البيولوجي." تتميز جميع أنواع النمل بطبيعتها الاجتماعية، وتظهر مستعمراتها سلوكيات معقدة تعتمد على التعاون الجماعي.

تختلف أنواع النمل بشكل كبير في نظامها الغذائي وطرق تنظيمها الاجتماعي وتخصصاتها المتنوعة. تشمل هذه التخصصات الزراعة، والهندسة المعمارية، والبناء، والحرب، مع قيام كل نوع متخصص أيضًا بمهام أخرى

ضرورية. يعتبر هولدوبلر وويلسون مستعمرات النمل قاطع الأوراق "أسمى الكائنات الخارقة على وجه الأرض"، حيث تمتد وجباتها الغذائية من البذور والأوراق والفطريات إلى فرائس الحيوانات وحتى فضلات حشرات المن.

يعد تقسيم العمل بين طبقات العمال سمة شبه عامة في عالم النمل. تتغير أدوار النمل عادة مع تقدمها في العمر، على الرغم من إمكانية حدوث تبديل في بعض الأحيان. يعمل النمل الأصغر سنًا داخل الأعشاش في رعاية الصغار، بينما يتولى النمل الأكبر سنًا مهام البحث عن الطعام والدفاع خارج الأعشاش.

في بعض أنواع النمل (والنمل الأبيض)، تظهر طبقات فرعية بين العمال، وهو أمر غير موجود في النحل والدبابير. تحمل هذه الطبقات الفرعية اختلافات جسدية كبيرة في بعض الأنواع، مما يمكنها من القيام بمهام متخصصة للغاية. على سبيل المثال، تستخدم بعض الطبقات الفرعية رؤوسها الكبيرة لكسر البذور، بينما تحمل طبقات فرعية أخرى من النمل الجندي فكوكًا قوية على شكل سيوف لمهاجمة الأعداء، ويمتلك بعضها رؤوسًا مزودة بقرون أو أشواك. لدى النمل السلحفاة هيكل رأس مسطح يستخدمه لسد مدخل العش[١].

تتميز مجموعة أخرى من النمل، هي جنس Pheidole، بوجود طبقة فرعية من الجنود ذوي الرؤوس الكبيرة. ومع ذلك، فهم يمتلكون قدرات

---

(١) نيكولاس ديفيز وجون كريبس وستيوارت ويست، مقدمة في علم البيئة السلوكية (أكسفورد: وايلي-بلاكويل، ٢٠١٢)، ٣٦٢.

دفاعية أقل، لكنهم يتميزون بقدرات هجومية استثنائية. يفتقر هؤلاء الجنود إلى المبايض، وبالتالي لا يمكنهم التكاثر. يصفهم هولدوبلر وويلسون بأنهم طبقة "مضحى بها" نظرًا لكونهم "صغارًا وخفيفين ورخيصي التكلفة وقصيري العمر".

يوازي التنوع الجسدي للنمل تنوعًا سلوكيًا ملحوظًا. لاحظ هولدوبلر وويلسون العديد من السلوكيات في نوع واحد فقط، Pheidole dentata، بما في ذلك رعاية الملكة الأم، ورعاية البيض واليرقات، وحمل البيض واليرقات، ومساعدة البالغين على الخروج من الشرانق، وتبادل السوائل الفموية مع اليرقات، وجلب الفريسة، وحراسة مدخل العش ومخازن الطعام، والبحث عن الطعام، وحفر العش والدفاع عنه.

تعد هذه السلوكيات المعقدة وتنسيقها في مستعمرة نمل فعالة أمرًا مذهلاً بالنظر إلى الحجم الضئيل لأدمغة النمل. من الواضح أن هذه السلوكيات مبرمجة، ولكنها تتطلب أيضًا اتخاذ قرارات بشأن التوقيت والمكان والظروف الخارجية المناسبة لأدائها. كل هذه السلوكيات وقواعد القرار تشير إلى الحاجة لخوارزمية تحكم معقدة لفهم هذه العمليات.

يمكن أن تنمو مستعمرات النمل إلى أحجام مذهلة، فقد تم قياس إحدى المستعمرات في منطقة هوكايدو اليابانية على مساحة ٦٧٥ فدانًا بأكثر من ٤٥٠٠٠ عش مترابط، حيث ضمت أكثر من ٣٠٠ مليون عامل ومليون ملكة.

معظم النمل يعيش لبضعة أسابيع فقط، بينما تتمتع الملكات بعمر أطول بكثير، فعادة ما تعيش ملكات معظم الأنواع خمس سنوات على الأقل، وقد عاشت بعض الملكات في الأسر من عشرين إلى ثلاثين عامًا. تتميز ملكات النمل أيضًا بخصوبة عالية، حيث تلد ملكة نمل قاطع الأوراق ما يصل إلى ١٥٠ مليون عامل، وقد يكون لدى مستعمرة واحدة ما بين مليونين إلى ثلاثة ملايين نملة حية في وقت واحد.

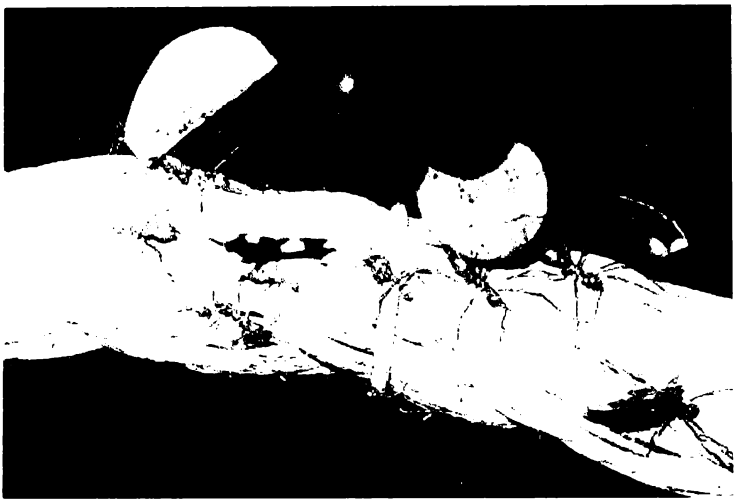
أما الذكور، فعدد قليل منهم فقط يحالفه الحظ بالتزاوج مع الملكة، ويموتون في غضون ساعات أو أيام بعد مغادرة العش.

دعونا نتعمق في أحد أكثر أنواع النمل إثارة للاهتمام، وهو نمل قاطع الأوراق (Atta). يقول الكاتبان هولدوبلر وويلسون: "إذا اجتمع علماء الطبيعة لاختيار عجائب الدنيا السبع في عالم الحيوان، فسيكونون مضطرين لتضمين الحضارات الغريبة والقوية لنمل قاطع الأوراق". تعيش مستعمرات نمل قاطع الأوراق في تعايش مع الفطريات، حيث يقومون بزراعتها للحصول على الغذاء، وتشبه هذه الزراعة الزراعة التي يمارسها البشر إلى حد كبير. على سبيل المثال، يقوم النمل بتخصيب محاصيل الفطريات الخاصة بهم كما يفعل المزارعون البشر. يستخدم النمل أيضًا فكوكه الحادة لقطع الأوراق من الأشجار لتوفير مهاد للفطريات، والمثير للإعجاب هو مهارتهم وكفاءتهم في عمليات القطع والتغطية، حيث يتخذون وضعية معينة تزيد من كفاءة القطع، ويقطعون الأوراق إلى حجم ووزن مثاليين للحصول على أقصى

استفادة من الجهد المبذول، بحيث لا تكون صغيرة جدًا فتضيع الرحلات ولا كبيرة جدًا فتستغرق وقتًا وجهدًا في حملها.

لقد لوحظ أيضًا أن النمل يعمل بشكل تعاوني لقطع الأغصان، تمامًا كما يتعاون شخصان باستخدام منشار لقطع شجرة. يقوم النمل العامل الأكبر بالقطع بينما يقوم النمل الأصغر بنقل الأوراق إلى الأعشاش في نظام يشبه خط التجميع، وهذا مشهد رائع حيث يتبع النمل مسارات محددة للعودة إلى العش لزيادة كفاءة النقل، ويحملون الأوراق بطريقة تجعلهم يبدون وكأنهم يحملون مظلات (الشكل ٤.٢).

يمكن أن تصل مسارات نمل قاطع الأوراق إلى ١٥٠ مترًا، ويتم النقل أحيانًا من خلال ما يشبه "سلسلة دلو" حيث يحمل النمل الأوراق لمسافة معينة ثم يمررها إلى نمل آخر، وتتكون هذه السلاسل من ما يصل إلى خمس مجموعات منفصلة من النمل. يعتقد البعض أن سلسلة الدلو تعمل على تسريع الاتصالات بين النمل الذي يجمع الطعام، والغرض من ذلك هو تمكينهم من الاستجابة بسرعة أكبر للتغيرات في ظروف جمع الطعام (مثل جودة المواد).



شكل ٤.٢ نمل قاطع الأوراق في خضم عملية قطع الأوراق وحملها إلى المستعمرة.

يقوم النمل أيضًا بأشياء مختلفة لإعداد الأوراق، بما في ذلك إزالة الطبقة الشمعية الخارجية وتقطيعها. الفطريات مترممة، أي أنها تقوم بتحليل المواد العضوية، بما في ذلك السليلوز، مما يحولها إلى غذاء صالح للأكل للنمل. يلاحظ أولريش مولر، عالم الأحياء في جامعة تكساس في أوستن، أنه كلما زاد تعمقه في دراسة هذه الحدائق الفطرية لنمل قاطع الأوراق، "كلما وجدت المزيد من أوجه التشابه بين الزراعة البشرية وزراعة النمل".

عادةً ما تحتوي مستعمرات نمل قاطع الأوراق على ملكة واحدة فقط، إلى جانب مئات الآلاف وحتى عدة ملايين من العمال. تشير التقديرات إلى أن مستعمرات نمل قاطع الأوراق يمكنها حصاد أكثر من ألف رطل من المواد

النباتية في السنة، أي ما يعادل مساحة تقارب خمسين ألف قدم مربع من الأوراق.

يتميز سلوكها الزراعي الفريد بقدرتها على الحفاظ على الظروف المثلى لنمو الفطريات. إنها دقيقة في اختيار أنواع الأوراق التي تعيدها إلى الفطريات، حيث تميز بينها بناءً على الظروف الفيزيائية والكيميائية للأوراق، وهذا يشمل رفض المواد النباتية التي تحتوي على مواد كيميائية ضارة بالفطريات.

بالإضافة إلى ذلك، يتميز النمل بالانتقائية في الحفاظ على نفس نوع الفطريات. يحرص نمل قاطع الأوراق بدقة على منع سلالات مختلفة من الفطريات من الاختلاط مع السلالة الأساسية لتلك المستعمرة. أظهرت إحدى الدراسات أن "نمل Acromyrmex العامل يميز بنشاط بين أجزاء الفطريات التي يعتني بها وبين الكائنات التكافلية المختلفة وراثيًا، مما يؤكد التوقعات بأن النمل لديه مصلحة قوية على المدى القصير في الحفاظ على حدائق نقية وراثيًا". قد يكون السبب الوظيفي وراء هذا السلوك هو أن وجود فطر غريب قد يقلل في كثير من الحالات الإنتاجية، مما يضر بكل من الفطريات المقيمة والنمل الذي يعتمد عليها.

هناك طرق أخرى متنوعة يحافظ بها النمل على صحة الفطريات. وتشمل هذه إنتاج هرمونات النمو وإفراز المضادات الحيوية لقمع الفطريات والكائنات الدقيقة المنافسة. يعلق هولدوبلر وويلسون على أن العلاقة التكافلية بين نمل قاطع الأوراق والفطريات "يجب أن ينظر إليها على أنها كائن

حي متكامل للغاية يتجاوز مجموع أجزائه. يتشكل تقسيم العمل لدى النمل والكثير من سلوكهم الاجتماعي من خلال تفاصيل هذه العلاقة التكافلية".

يلعب نمل قاطع الأوراق دورًا إيجابيًا هامًا في النظم البيئية، حيث ينتج كميات كبيرة من المواد العضوية في التربة. قارنت إحدى الدراسات مستوى العناصر الغذائية في فضلات الأوراق العادية مع النفايات التي ينتجها نمل قاطع الأوراق. أشارت النتائج إلى أن نفايات النمل تحتوي على ثمانية وأربعين ضعفًا من مستوى العناصر الغذائية الموجودة في فضلات الأوراق النموذجية، بما في ذلك تركيزات أكبر من مكونين شائعين في الأسمدة الكيماوية التي تباع في متاجر البستنة، وهما الكالسيوم والبوتاسيوم. تؤدي هذه الزيادة في العناصر الغذائية إلى زيادة إنتاج الجذور، مما يؤدي بدوره إلى نمو أكبر للأشجار.

النمل الأبيض

تتميز مستعمرات النمل الأبيض الاجتماعي الأكثر تطورًا (تحت رتبة Isoptera) بأنها قد تصل إلى الملايين من الأفراد. أحد العوامل التي تمكنهم من ذلك هو أن الملكة تنمو إلى حجم هائل، حيث يصل طولها إلى أربع بوصات، ولديها معدل وضع للبيض يتجاوز معدل جميع الحيوانات الأخرى. من خلال السلوك الاجتماعي لهذه الأنواع فقط يمكنهم بناء أعشاش وتلال مذهلة، والتي سأصفها في الفصل التالي.

نفكر في النمل الأبيض على أنه آفات بسبب طعمه للخشب، وهو أمر غير مرغوب فيه بشكل واضح إذا كان الخشب الذي يأكلونه هو منزلك. ومع

ذلك، فهي تؤدي دورًا بيئيًا مهمًا في العديد من المناطق، خاصة في إفريقيا جنوب الصحراء الكبرى وجنوب شرق آسيا، حيث تمثل ما يصل إلى ٧٥ في المائة من الكتلة الحيوية للحشرات في هذه المناطق الاستوائية. يتمثل دورها البيئي في أكل المواد النباتية الميتة وتحويلها إلى مواد مفيدة للحيوانات الأخرى. يمكن لعدد محدود فقط من الحيوانات الفقارية التعامل مع هذا الأمر، وخاصة الحيوانات المجترة مثل الأبقار. تشمل الحشرات الأخرى التي تؤدي هذا الدور الصراصير والجداجد والذباب والخنافس. ومع ذلك، فإن النمل الأبيض هو الحشرات الاجتماعية الوحيدة في هذه المجموعة، وإنتاجها غير عادي. يمكنهم تحليل ما يصل إلى ٩٠ بالمائة من المواد النباتية الميتة في المناطق التي تتواجد فيها بكثرة. هناك الآلاف من أنواع النمل الأبيض، وهي متنوعة للغاية لدرجة أن "هناك أجناسًا متخصصة موجودة لكل نوع من أنواع المخلفات النباتية، والخشب، والدبال، والروث، في كل مرحلة من مراحل التحلل، في كل نوع من أنواع الموائل المعتدلة وشبه الاستوائية والاستوائية".

جميع أنواع النمل الأبيض تعيش في مجتمعات منظمة، والأكثر تقدمًا لديها أنظمة طبقية متعددة. هناك أيضًا فصيلة فرعية من النمل الأبيض تزرع الفطريات بطريقة مشابهة لنمل قاطع الأوراق. هذا مثال على سلوك متقارب بين النمل والنمل الأبيض، على الرغم من أن العلاقة التكافلية مع الفطريات ليست هي نفسها في الحالتين. في هذه الفصيلة، يقوم عمال النمل الأبيض الأكبر سنًا بجمع المواد النباتية ونقلها إلى العش. يأكل العمال الأصغر سنًا المواد النباتية مع جراثيم فطريات ترميتومايسس، وهو نوع من الفطر الذي ينمو مع النمل الأبيض. يتم هضم مزيج الأبواغ النباتية هذا جزئيًا فقط،

بمساعدة بكتيريا الأمعاء، ثم يتم التبرز منه، مما يوفر طبقة جديدة من الفطريات. ثم تنمو هذه الفطريات بسرعة على نظام غذائي من مزيج الأبواغ النباتية، وبعد ذلك يستهلك النمل الأبيض الأكبر سناً الفطريات المزروعة حديثًا. في نهاية هذه العملية، يتم تقسيم جميع المواد العضوية تقريبًا.

يشير تحليل حديث للجينوم لهذه الفصيلة الفرعية من النمل الأبيض والبكتيريا التكافلية إلى أن تحويل الكتلة الحيوية في تلال النمل الأبيض يتم إنجازه بشكل أساسي من خلال التعاون بين الفطريات المستأنسة للنمل الأبيض ومجتمع بكتيري متخصص. يصف مايكل بولسن من جامعة كوبنهاغن والمؤلفون المشاركون معه بأنه شكل فريد من العلاقات القائمة على "التحول المتزامن في تاريخ الحياة ثلاثية الأطراف: الحشرات التي تصبح مزارعين، والفطريات التي تصبح محاصيل، والميكروبات المعوية التي تتبنى أدوارًا تكميلية غير معروفة إلى حد كبير".

من الناحية الداروينية، يُفترض أن هذه العلاقة قد تطورت من خلال التطور المشترك. ومع ذلك، يتطلب هذا التطور المشترك لثلاثة جينومات منفصلة تمامًا (النمل الأبيض والفطريات والبكتيريا) لتعزيز التعايش. هذه علاقة معقدة للغاية تتضمن العديد من الجينات في كل نوع. يعتبر التطور الدارويني المنسق لجميع الجينات المطلوبة في ثلاثة جينومات مستقلة سيناريو غير مرجح إلى حد كبير.

اللدونة السلوكية

اللدونة (القدرة التي تمتلكها الكائنات الحية على التغيير والتكيف) هي سمة تم اقتراحها كأحد التفسيرات المحتملة لنشوء سمات جديدة. على سبيل المثال، تقترح عالمة الأحياء النظرية وعضو الأكاديمية الوطنية الأمريكية للعلوم ماري جين ويست-إبرهارد أن اللدونة الظاهرية يمكن أن تؤثر بشكل كبير على التطور بعدة طرق. (النمط الظاهري هو الخصائص الملحوظة للكائن الحي، في حين أن النمط الجيني هو مجموعة جيناته المحددة.) وتشمل الأمثلة الواضحة للدونة الظاهرية الاختلافات في أحجام الحيوانات، والتي لا تعتمد فقط على العوامل الوراثية ولكن أيضًا على العوامل البيئية مثل النظام الغذائي وممارسة الرياضة.

يمتد مفهوم اللدونة الظاهرية إلى العادات السلوكية. فقد اقترح داروين أن الأنواع الجديدة قد تنشأ بناءً على تطوير أفرادها لعادات أو سلوكيات مختلفة، حتى في حالة تغير شكل هذه السلالة بشكل طفيف، كما هو الحال في بعض أنواع نقار الخشب[1]. في حين أن معظم أنواع نقار الخشب تبحث عن الحشرات في جذوع الأشجار، إلا أن هناك بعضها يتغذى على الفاكهة، والبعض الآخر يعيش في مناطق خالية من الأشجار.

---

(١) تشارلز داروين، أصل الأنواع: عن طريق الانتقاء الطبيعي، أو الحفاظ على الأجناس المفضلة في الكفاح من أجل الحياة (لندن: جون موراي، ١٨٥٩)، ١٨٤. يكتب داروين: "كما نرى أحيانًا أفرادًا من نوع ما يتبعون عادات مختلفة تمامًا عن تلك الخاصة بأنواعهم وأنواع أخرى من نفس الجنس، قد نتوقع، وفقًا لنظريتي، أن هؤلاء الأفراد قد أدوا أحيانًا إلى ظهور أنواع جديدة، لها عادات شاذة، وبنيتها إما معدلة بشكل طفيف أو كبير عن نوعها الأصلي ".

تصف إميلي سنيل-رود، عالمة البيئة في جامعة مينيسوتا، شكلين من أشكال اللدونة: اللدونة النمائية واللدونة التنشيطية. تحدث اللدونة النمائية "عندما يعبر النمط الجيني عن أنماط ظاهرية سلوكية مختلفة في بيئات مختلفة بسبب مسارات تنموية مختلفة تثيرها تلك البيئات". تشمل اللدونة النمائية التعلم والتغيرات الفسيولوجية، مثل التغيرات في الشبكات العصبية والأنظمة الحسية. وتعرف سنيل-رود اللدونة التنشيطية بأنها "التنشيط التفاضلي لشبكة أساسية في بيئات مختلفة بحيث يعبر الفرد عن أنماط ظاهرية متنوعة طوال حياته".

تظهر الحشرات الاجتماعية كلاً من اللدونة النمائية والتنشيطية. ويشمل ذلك استجابتها للعوامل البيئية في تطوير طبقات مختلفة، واستجابتها للظروف البيئية والعوامل الاجتماعية الأخرى في تقسيم العمل.

تتمثل فائدة اللدونة في أن معظم البيئات تميل إلى التغير بشكل كبير، وبالتالي لن يكون أي نمط سلوكي واحد هو الأمثل دائمًا. تسمح اللدونة السلوكية للكائن الحي بالتكيف بسرعة مع الظروف البيئية المتغيرة. ومع ذلك، فإن تحقيق هذه اللدونة ليس بالأمر السهل. كما يشرح علماء الأحياء فريدريك ميري وجيمس بيرنز، "تتطلب اللدونة السلوكية ذخيرة سلوكية واسعة واختيار استجابة سلوكية تكيفية، باستخدام المعلومات البيئية كدليل. أثناء التعلم، عادة ما تتم عملية الاختيار هذه من خلال التجربة والخطأ، مما يعرض الحيوان لفترة من السلوك غير الأمثل. هذا هو ما يعرف بـ "ثمن السذاجة".

السؤال المطروح هو ما إذا كان التباين واللدونة المتأصلين كافيين لشرح أصل السلوكيات المبرمجة المعقدة. تصف سنيل-رود كيف يمكن أن يكون للدونة السلوكية تكاليف كبيرة "من حيث الوقت والطاقة والتعرض" بسبب عمليات الاختيار القائمة على التجربة والخطأ. تشكل هذه القضايا مشكلة لتطور اللدونة السلوكية القابلة للتكيف في إطار النظرية الداروينية الجديدة. حيثما توجد مثل هذه اللدونة، يبدو أنها مصممة خصيصًا للتكيف مع البيئات المتغيرة، وتكون السلوكيات مبرمجة، كما هو الحال في الحشرات الاجتماعية. لا يمكن تفسير تطور مثل هذه السلوكيات من خلال التجربة والخطأ.

تعلم اللافقاريات

لا يعني أي مما سبق أن الحشرات الاجتماعية لا تتعلم. إن محور تركيز هذا الكتاب هو السلوكيات المبرمجة المعقدة، ولذلك ركز معظم النقاش على الجوانب المبرمجة أو الفطرية للسلوكيات التي يجري استكشافها. ولكن في العديد من الحالات، ينجح المخلوق من خلال مزيج من السلوك المبرمج والسلوك المتعلم. كتب رؤوفين دوكاس، المتخصص في سلوك الحيوان: "ربما يكون التعلم خاصية عالمية للحشرات التي تعتمد عليه في جميع وظائف الحياة الرئيسية".

أظهر نحل العسل قدرات تعليمية ملحوظة، على الرغم من امتلاكه أدمغة صغيرة للغاية، تتكون من ٩٥٠,٠٠٠ خلية عصبية وحجم أقل من مليمتر مكعب واحد. شريان الحياة للنحل هو الرحيق، الذي لا يمكن الحصول

عليه إلا من أنواع معينة من الأزهار. قد يبدو تحديد الأزهار الصحيحة مهمة بسيطة، لكنها ليست كذلك. فهناك تنوع كبير في الزهور من حيث حجم الرحيق وتركيزه وعمق الزهرة وحجمها وهندستها وتباعدها. يحدد توتز المعلومات التالية التي يجب أن تكون النحلة قادرة على الحصول عليها: التعرف على الأزهار على أنها زهور، والتمييز بين أنواع مختلفة من الأزهار، و"التعرف على حالة الزهرة" و"معرفة كيفية التعامل مع الزهرة بفعالية باستخدام الأرجل وأجزاء الفم"، وتحديد "الموقع الجغرافي للزهرة في المشهد" و"تحديد الإطار الزمني اليومي الذي تنتج فيه الزهور المختلفة معظم الرحيق".

تُعد حاسة الشم المتطورة والرؤية الملونة أمرين حاسمين في هذا الصدد، ولكن على الرغم من ضرورة هذه الحواس المتخصصة، فإنها ليست كافية. كيف يتنقل نحل العسل ذو الدماغ الصغير عبر كل هذه التعقيدات ليقرر أين وعلى أي الزهور التي يجب أن يبحث عنها؟ يجب تعلم الكثير من هذا، والقدرة على القيام بذلك بسرعة كبيرة تبدو مبرمجة. على سبيل المثال، يمكن للنحلة أن تتعلم رائحة معينة من خلال تجربة واحدة وتميزها لاحقًا عن الروائح الأخرى بدقة تصل إلى ٩٠ بالمائة.

يتعلم النحل خصائص الزهرة (الموقع والشكل واللون والرائحة) من خلال ربطها بالرحيق الذي تنتجه الزهرة. أظهرت التجارب أن النحل يظهر تفضيلًا واضحًا للزهور ذات التركيزات الأعلى من الرحيق. بالإضافة إلى تعلم الخصائص الفيزيائية للزهور وربطها، يمكن للنحل أيضًا تعلم الوقت الأمثل من اليوم للبحث عن الطعام في مواقع محددة. هذا ضروري لأن أنواعًا مختلفة

من الزهور تنتج الرحيق فقط خلال أوقات معينة من اليوم. يمكن للنحل تعلم هذه الأوقات وتذكر المعلومات إلى أجل غير مسمى.

أكدت الأبحاث الحديثة قدرة النحل على دمج المعلومات التي يتم تعلمها عن الأشياء من خلال حاستين مختلفتين (البصر واللمس). خلص الباحثون إلى أنه "على غرار البشر والحيوانات الأخرى ذات العقول الكبيرة، تقوم الحشرات بدمج المعلومات من حواس متعددة في تصور شامل ومتكامل للعالم من حولها، ويمكن الوصول إليه عالميًا". بالإضافة إلى كل قدرات التعلم هذه، هناك أيضًا تعلم يتضمن الملاحة، كما هو موضح سابقًا. يتعلم النحل، على سبيل المثال، ويتذكر معلومات الملاحة المرتبطة بموقع مواقع البحث عن الطعام ومواقع العش.

قارنت إحدى الدراسات الآليات العصبية المتضمنة في التعلم النقابي في ذباب الفاكهة ونحل العسل والصراصير، ووجدت أن نحل العسل والصراصير لهما آليات مماثلة، في حين أن ذباب الفاكهة له آليات مختلفة تمامًا. أحد أسباب هذا الأمر المدهش هو أن ذباب الفاكهة ونحل العسل ينتميان إلى نفس الرتبة (ذوات الجناحين)، في حين أن الصراصير تنتمي إلى رتبة مختلفة (Orthoptera). هذا يعني أن المسارات التطورية المشتركة لا تقدم تفسيرًا واضحًا؛ إنه ما يسميه علماء التطور "التقارب".

قضية مهمة في تقييم دور التعلم في سلوك الحيوان هي كيفية تقييم تكاليف وفوائد التعلم مقابل وجود سلوكيات فطرية ثابتة. للوهلة الأولى، يبدو من الواضح أن التعلم يوفر قدرة أكبر على التكيف، وبالتالي فوائد أكبر

على المدى الطويل مقارنة بالسلوك غير القابل للتغيير. ومع ذلك، هناك تكلفة كبيرة للقدرة على التعلم، ليس أقلها القدرة المعرفية اللازمة. مثال على التحديات المرتبطة بالتعلم هو مدى تعقيد المعلومات اللازمة لتسهيل التعلم. تكشف تجارب التعلم أن معظم التعلم يحدث فقط عندما تكون التأخيرات أقل من بضع ثوانٍ. على سبيل المثال، لا يمكن لذباب الفاكهة أن يتعلم ربط الرائحة بصدمة كهربائية عندما يتم فصلهما بأكثر من ستين ثانية. تعيش الحيوانات في عالم معقد حيث تكون بعض المعلومات ذات صلة وبعضها غير ذي صلة؛ لذلك يجب أن يكونوا قادرين على اختيار الإشارات البيئية، إن وجدت، التي تتنبأ بنتيجة إجراء ما. وهذا يجعل التعلم معقدًا للغاية، ويعني أن التعلم، على عكس السلوك الفطري، مكلف للغاية بسبب متطلبات تنظيم الدماغ ووظائفه.

إحدى النظريات التي تزعم أنها تفسر أصل بعض السلوكيات الجديدة هي تأثير بالدوين، الذي اقترحه في الأصل عالم النفس الأمريكي جيمس بالدوين في عام ١٨٩٥. وتحاول النظرية تفسير كيفية تسريع التعلم لتطور السلوكيات المفيدة. هناك خطوتان رئيسيتان في هذه العملية. أولاً، عندما تتمتع الحيوانات باللدونة السلوكية والقدرة على التعلم، يمكنها تطوير سلوكيات جديدة قابلة للتكيف. وعندما يحدث هذا، فإن ضغط الانتقاء سوف يفضل تطور القدرة على التعلم. وهذا يؤدي إلى انتشار السلوك المتعلم في جميع أنحاء السكان. ثانيًا، سوف يفضل الانتقاء الطبيعي الأنماط الجينية التي ترمز إلى السلوك دون الحاجة إلى التعلم. وهذا يؤدي في النهاية إلى تطور الجينات الخاصة بالسمة السلوكية في المجتمع.

على الرغم من أن النظرية جذابة، إلا أن هناك القليل جدًا من الأدلة التي تدعمها. وعلى أية حال، فمن المحتمل ألا تكون ذات صلة بتطور السلوكيات المبرمجة المعقدة التي هي موضوع هذا الكتاب، خاصة في حالة الحشرات. والسبب هو أن الظهور الأولي لسلوك جديد، وفقًا لنظرية تأثير بالدوين، يتطلب حيوانًا يتمتع بقدرة إدراكية كافية لتطويره من خلال التعلم، لأنه ليس فطريًا. وكما نوقش في مكان آخر في هذه الصفحات، تشير الأدلة إلى أن الحشرات ذات الأدمغة الصغيرة تفتقر إلى القدرة المعرفية لإتقان أنواع السلوكيات المعقدة التي تم استكشافها في هذا الكتاب دون وجود عنصر كبير من السلوك المبرمج المعقد.

يشير استعراض سريع لمجموعة السلوكيات لدى مختلف الحيوانات إلى أن قدرتها على التعلم محدودة للغاية. وعلاوة على ذلك، فإن التعلم الذي يحدث غالبًا ما يكون مرتبطًا بالسلوكيات الحيوية للحيوان ولا يتسم بالانفتاح. أظهرت دراسة أجراها ستيفانو غيرلاندا، وماغنوس إنكويست، ويوهان ليند، استنادًا إلى نمذجة تطوير التعلم، أن اتساع نطاق السلوكيات له تكلفة تتمثل في زيادة الوقت اللازم لإتقان تسلسلات السلوك الوظيفية. وقد استند هذا الاستنتاج إلى ملاحظتين أساسيتين. أولًا، تتحدد السلوكيات بشكل أساسي وراثيًا (أو ربما فوق جينيًا)، وغالبًا ما تقتصر على عدد قليل من السلوكيات. ثانيًا، غالبًا ما تجمع الحيوانات بين "السلوكيات المحددة وراثيًا في تسلسلات مكتسبة". وكما أشار المؤلفون، مع زيادة عدد الأفعال الفردية، يزداد عدد مجموعات هذه الأفعال بشكل كبير. تكمن المشكلة إذن في أن احتمالية تعلم كيفية الجمع بين تسلسل منسق لعدد من الأفعال لإنتاج

سلوك مفيد تتناقص بشكل كبير. فكر في مقدار التعلم الذي قد ينطوي عليه السلوكيات العديدة للحشرات الاجتماعية، مما يفسر سبب برمجة الكثير منه.

يمكن العثور على مزيج مثير للإعجاب من التعلم والبرمجة في الكائنات اللافقارية "البسيطة" الأخرى، مثل الديدان الخيطية (الديدان الأسطوانية)، بما في ذلك الدودة المستديرة Caenorhabditis elegans. يتكون جهازها العصبي من ٣٠٢ خلية عصبية فقط وحوالي سبعة آلاف مشبك، وهو أول حيوان يتم رسم خريطة جهازه العصبي بالكامل. كان يُعتقد في السابق أن سلوك الدودة المستديرة مبرمج بالكامل، لكن الأبحاث أظهرت خلاف ذلك. يشمل تعلمها الذاكرة قصيرة المدى والذاكرة طويلة المدى. يمكنها دمج وتذكر التجارب بناءً على المعلومات التي تم الحصول عليها من حواس مختلفة، كما هو موضح أعلاه مع النحل. ويمكنها أن تتعلم ربط الطعام بمواد مختلفة أو بدونها (مثل الملح). كما تؤكد كاثرين رانكين، عالمة النفس بجامعة كولومبيا البريطانية، حتى هذه الدودة البدائية "مصممة بشكل رائع للاستفادة من تجربتها".

كيف يمكن لنوع يحتوي دماغه على ٣٠٢ خلية عصبية فقط أن يظهر مثل هذا المزيج المثير للإعجاب من السلوكيات المكتسبة والمبرمجة؟ وفقًا لمقال عن الدودة المستديرة في مجلة "الخلية" Cell، "لا يزال الأمر غامضًا إلى حد كبير فيما يتعلق بكيفية تنظيم الجهاز العصبي وظيفيًا لتوليد السلوكيات." ما يزيد الأمر غموضًا هو أن جميع الديدان الخيطية يبدو أن لديها تصميمات جهاز عصبي متشابهة جدًا، بينما تُظهر مجموعة متنوعة من

السلوكيات. يسرد ويليام شافير، عالم الأعصاب بجامعة كامبريدج، عدة تفسيرات مقترحة، بما في ذلك التعبير عن مستقبلات أو ناقلات عصبية مختلفة، وإعادة تنظيم التوصيل المشبكي بشكل كبير، واعتماد الخلايا العصبية الفردية خصائص وظيفية متميزة في الأنواع المختلفة.

رغم أن الكثير هنا لا يزال غامضًا، يمكن استخلاص العديد من الاستنتاجات من هذه النتائج. أولًا، لا تتحدد السلوكيات فقط بالجينات أو بالهياكل العصبية في الدماغ. هناك العديد من العوامل الأخرى المحتملة التي تحدد السلوكيات المعقدة المبرمجة (CPBs). ثانيًا، حتى السلوكيات البسيطة نسبيًا يتم التحكم فيها بواسطة أنظمة عصبية معقدة، حتى في الحيوانات مثل الدودة المستديرة التي تحتوي على ٣٠٢ خلية عصبية فقط. مجتمعة، تُظهر هذه العوامل العديدة مدى تعقيد التصميم الكامن وراء السلوكيات حتى في الحيوانات التي تتميز بالبساطة التشريحية الشديدة.

التطور الداروينى والسلوك الاجتماعي

تتم السيطرة على السلوكيات المبرمجة الكاملة المتضمنة في التنظيم الاجتماعي بواسطة خوارزميات متعددة. بينما لا توجد مخطط رئيسي يحكم السلوكيات الاجتماعية، هناك مجموعة متكاملة من القواعد المرتبطة بكل سلوك. يصف هولدوبلر وويلسون الخوارزميات على أنها يتم تنفيذها من خلال مزيج من "قواعد القرار"، ويشيران إلى أن "التسلسل الكامل لنقاط القرار التي تنتج طبقة أو منتج أو استجابة سلوكية كاملة يسمى خوارزمية."

يعرفون صنفين من الخوارزميات. يعمل أحد الفئات عندما يكون عضو المستعمرة إما بيضة أو يرقة، ويحدد ما إذا كان سيصبح عاملاً أو مربيًا. في بعض الأنواع، هناك أيضًا قرار ثان يتعلق بما إذا كان الفرد سيصبح عاملاً صغيرًا أو كبيرًا. يصبح بعض العمال الرئيسيين جنودًا في جيش (أي النمل العسكري). عندما يصبح الفرد بالغًا، يتم التحكم في سلوكه بواسطة الفئة الثانية من الخوارزميات، ويقوم بأداء العمل المناسب لطبقته وعمره البالغ. تستجيب الحشرة للمحفزات التي تم برمجة أنظمتها الحسية والعصبية للاستجابة لها.

تتضمن معظم نقاط القرار اختيارات بسيطة بين سلوكين بديلين. ومع ذلك، في تعقيد إضافي، تتم برمجة الحشرات الاجتماعية أيضًا للتعلم وتعديل سلوكها مع تغير الظروف. على سبيل المثال، النملة التي تقوم بإصلاح الأضرار التي لحقت بجدار العش والتي تصادف يرقة في غير مكانها ستتحول إلى سلوك مختلف، وتلتقط اليرقة وتعيدها إلى مكانها الصحيح في غرفة الحضانة. في هذه الحالة، تتم برمجة السلوك الأخير (رعاية اليرقة) ليكون له أولوية أعلى على السلوك السابق (إصلاح الجدار). هذا قرار مبرمج.

يطرح هولدوبلر وويلسون سؤالًا مهمًا: "كيف تنشأ الكائن الحي الفائق من التشغيل المشترك لعقول صغيرة وقصيرة العمر؟" بعد كل شيء، "لا شيء في دماغ النملة العاملة يمثل مخططًا للنظام الاجتماعي. لا يوجد مشرف أو "طبقة دماغية" تحمل مثل هذه الخطة الرئيسية في رأسها." يفترض هولدوبلر وويلسون أن "الانتقاء الطبيعي على مستوى المستعمرة يخلق خوارزميات تزيد

من كفاءة النظام. تحدد الجينات الخوارزميات التي توجه أعضاء المستعمرة من خلال الفروق الدقيقة في العتبات الحسية والسياق والمرونة الفطرية بطريقة تستخلص الاستجابة المناسبة من المستعمرة ككل. إن تكامل هذه الوحدات من السلوك الفردي هو الذي يحدد مصير المستعمرات وبالتالي الجينات التي حددت بنائها."

لكن الفكرة تفتقر إلى أساس دليلي سليم. فرضيتهم الأساسية هي أنه حتى القواعد البسيطة ذات القرارات الثنائية (نعم / لا) يمكن أن تخلق مجموعة معقدة للغاية من الخوارزميات، بالنظر إلى عدد كاف من القواعد، وأن الاختلافات العشوائية يمكن أن تضيف قرارات ثنائية مواتية شيئًا فشيئًا حتى السيمفونية الكاملة للسلوكيات المبرمجة بين أعضاء المستعمرة المختلفين كانت في مكانها[1]. ولكن بينما قد تكون كل قاعدة قرار بسيطة نسبيًا، يجب دمج أي قاعدة قرار جديدة بالكامل في مجموعة القواعد والخوارزميات الكاملة والمتزايدة التعقيد.

وهناك نقطة الخلاف. كما لاحظ علماء الأحياء التطورية جوان ستراسمان وديفيد كيلر، "لا يوجد فرد يفعل أي شيء سيكون مفيدًا جدًا في

(١) يجادل هولدوبلر وويلسون بأنه "مع زيادة عدد القواعد، تزداد النتائج المحتملة بمعدل فائق الأسي. في مستعمرة حشرات، خوارزمية واحدة بثلاث نقاط قرار متتالية لها ثماني نتائج فقط. لكن سبع خوارزميات من هذا القبيل مجتمعة لديها أكثر من ٢ مليون نتيجة. من هذا الكم الهائل من النتائج المحتملة، اختار الانتقاء الطبيعي مجموعة مجهرية صغيرة من الخوارزميات ومجموعات الخوارزميات." هولدوبلر وويلسون، الكائن الحي الفائق، ٥٨.

حد ذاته؛ بدلاً من ذلك، يؤدي كل فرد دورًا في عملية لا معنى لها إلا من حيث زيادة وظيفة المستعمرة."

المشكلة هي أن عددًا كبيرًا من مجموعات القواعد تخضع للاختلاف والتحول العشوائي. في كثير من الحالات، يكون لكل تغيير في قاعدة القرار نفس الاحتمال، إن لم يكن أكثر احتمالًا، أن تكون له نتيجة غير مواتية مثل النتيجة المواتية. علاوة على ذلك، في حين أن كل قاعدة قرار قد تكون بسيطة نسبيًا، إلا أنه لا يزال يتعين دمجها بالكامل مع مجموعة القواعد والخوارزميات بأكملها. يجب تنسيقها جميعًا واستدعائها في ظل الظروف المناسبة وبالترتيب المناسب. أي مزيج عشوائي من القواعد يؤدي إلى الفوضى. وفي الواقع، إذا كانت أي اذا اخطأت أي قاعدة من هذه القواعد بشكل فادح، فقد تكون النتيجة موت المستعمرة.

أحد الألغاز المتعلقة بأصل السلوك الاجتماعي هو حقيقة أنه موجود في مجموعات قليلة فقط من الحشرات. توجد الحشرات الاجتماعية في عدة حالات بين غشائيات الأجنحة (بما في ذلك النمل والنحل والدبابير)، ومرة واحدة بين النمل الأبيض. دعمت إحدى الدراسات التطورية الفرضية القائلة بأن هذه المجموعات الثلاث تشترك في سلف مشترك.

ومع ذلك، تشير الأدلة إلى أن السلف المشترك النظري يشترك في بعض السمات مع ما يعتبر أحفاده، ولكنه لم يكن اجتماعيًا. الإجماع العام هو أن "النمل والنحل والدبابير قد طورت جميعًا سلوكًا اجتماعيًا بشكل مستقل."

هناك العديد من النظريات المتنافسة حول تطور السلوك الاجتماعي للحشرات. فيما يلي مراجعة لها.

مجموعة أدوات السلوك

يعتقد بعض الباحثين أن عملية التحول من الحشرات الانعزالية التي تعيش بمفردها إلى الحشرات الاجتماعية التي تتسم بتقسيم العمل وتكوين مجتمعات، ليست عملية معقدة كما تبدو. تُعرف هذه الفكرة باسم "فرضية المخطط الأساسي". وتشير هذه الفرضية إلى أن التغييرات البسيطة في تنظيم السلوكيات الفردية للحشرات يمكن أن تؤدي إلى ظهور مجموعة معقدة من السلوكيات الاجتماعية. كيف يحدث هذا؟ ببساطة، تفترض الفرضية أن السلوكيات المعقدة التي نراها في الحشرات الاجتماعية كانت موجودة بالفعل بشكل كامن في أسلافها غير الاجتماعية.

يوضح هولدوبلر وويلسون، وهما من أبرز مؤيدي فرضية المخطط الأساسي، أن تقسيم العمل في مجتمعات الحشرات ينشأ عن ميل طبيعي لدى الحشرات الانعزالية للانتقال من مهمة إلى أخرى بعد إتمام المهمة الأولى. في حالة الحشرات الاجتماعية، يتطور هذا السلوك بحيث تتجنب الحشرة أداء مهمة يقوم بها بالفعل فرد آخر في المستعمرة. ويضربون مثالاً بالنحل والدبابير التي تقوم بتخزين المؤن تدريجياً، حيث تكون هذه الأنواع "مهيأة" للتحول بسرعة إلى الحياة الاجتماعية بمجرد أن تصبح الظروف البيئية مواتية.

لكن تقسيم الأدوار وحده لا يكفي لضمان نجاح المستعمرة. تشمل السلوكيات اللازمة للتكاثر، ورعاية الصغار، وبناء العش، والدفاع، وجمع

الطعام. جميع هذه السلوكيات ضرورية، ولكنها ليست كافية لبقاء المستعمرة. يتطلب الأمر وجود نظام تواصل فعال يعتمد على الفيرومونات والإشارات الأخرى لتنظيم التفاعلات الاجتماعية بين أفراد المستعمرة، وربط النظام الحسي لديهم بالوحدات السلوكية المختلفة. وتدعم هذه الفكرة دراسات أظهرت أن تعريض عاملات نحل العسل للفيرومونات يؤدي إلى تغيرات في التعبير الجيني في أدمغتهن، مما يؤثر بدوره على سلوكهن.

لكن فرضية المخطط الأساسي ليست خالية من الانتقادات. يشير جونسون ولينكسفير إلى أن ذخيرة المهام في مستعمرات الحشرات الاجتماعية المتقدمة تكون ضعف تلك الموجودة لدى الحشرات الانعزالية، وأن العديد من السمات المتخصصة في الطبقات الاجتماعية ليس لها نظير في الدبابير أو النحل الانعزالي. على سبيل المثال، لا يوجد سلف واضح في النحل الانعزالي لسلوكيات رعاية الصغار المتقدمة التي يبديها نحل العسل.

لا يمكن تفسير مثل هذه السلوكيات بالرجوع إلى الأسلاف الانعزالية، لأن هذه الأسلاف لم تكن تمتلك هذه السلوكيات في الأصل. علاوة على ذلك، تلعب العمليات التنظيمية على مستوى المستعمرة دوراً حاسماً في تحديد الطبقة الاجتماعية التي تنتمي إليها اليرقة، سواء كانت ملكة أو عاملة، بناءً على عوامل بيئية واجتماعية مثل التغذية.

يصف الباحثون هذه الظاهرة بأنها "فسيولوجيا اجتماعية"، حيث يتم التحكم في التعبير الجيني المرتبط بتكوين الطبقات من خلال حلقات التغذية الراجعة الاجتماعية داخل المستعمرة. إذا حاول مبرمج كمبيوتر

تصميم برنامج يحاكي هذه الحلقات المعقدة في مجموعة من الروبوتات التفاعلية، فإنه سيحتاج إلى برمجة ذكاء اصطناعي بالغ التعقيد. فكيف تطورت هذه الآليات المعقدة في الحشرات؟ هذا هو السؤال الذي يثيره النقاد لفرضية المخطط الأساسي.

الجينات الجديدة والسلوك الاجتماعي: نظرة متعمقة

يثير أصل الأسس الجينية للسلوك الاجتماعي للحشرات تساؤلاً محورياً يتعلق بعدد الجينات الجديدة أو المعدلة اللازمة لظهور هذه السلوكيات. تشير الأبحاث إلى وجود علاقة بين السمات الجديدة وما يُعرف بـ "الجينات اليتيمة". الجين اليتيم هو جين فريد من نوعه في كائن حي معين ولا يوجد له مثيل في الأنواع الأخرى. وعلى الرغم من أن مصطلح "اليتيم" قد يوحي بوجود تاريخ تطوري مفقود، إلا أن الأدلة تشير إلى أن هذه الجينات ليس لها أسلاف واضحة.

تعتبر هذه الجينات اليتيمة من الغرائب التطورية، لكنها ليست نادرة على الإطلاق، كما يؤكد ملخص من مجلة "Trends in Genetics" حيث يذكر: "يحتوي كل جينوم حقيقي النواة على ١٠-٢٠٪ من الجينات التي لا يوجد لها أي تشابه تسلسلي كبير مع جينات الأنواع الأخرى؛ يتم تصنيفها على أنها "يتيمة" أو "جينات مقيدة تصنيفياً" (TRGs)... نشأت مثل هذه الجينات في جينومات كل مجموعة من الكائنات الحية التي تمت دراستها حتى الآن." يشير هذا الانتشار الواسع إلى أن هذه الجينات قد تكون مسؤولة عن ظهور سمات جديدة في الكائنات الحية. ويؤكد علماء الوراثة ديثارد تاوتز

وتوماسلاف دومازيت-لوسو أن "من الواضح بشكل متزايد أن هذه الجينات ساهمت بشكل كبير في تطور الكائنات الحية والابتكارات التطورية".

لكن وجود هذه الجينات اليتيمة بكثرة يمثل تحدياً لنظرية التطور الداروينية التي تقوم على فكرة النسب المشترك وعملية التنويع التدريجي. ففي النموذج الداروينيي، لا نتوقع ظهور هذا الكم الهائل من الجدة الجينية بدون وجود أقارب تطوريين واضحين. ومع ذلك، وعلى الرغم من الغموض الذي يحيط بالجينات اليتيمة، يذكر تاوتز ودومازيت-لوسو أنه حتى عام ٢٠١١، "تمت دراسة عدد قليل من الجينات اليتيمة بتفاصيل وظيفية كبيرة حتى الآن". وفي نفس الوقت تقريباً، أشارت ورقة في مجلة "Trends in Genetics" إلى أنه "من الغريب أن معظم الاهتمام في الوقت الحاضر قد تم إيلاؤه للجينات التي يتم مشاركتها والحفاظ عليها بشكل كبير طوال التطور، وليس لتلك الفريدة أو الخاصة بالنسب." يبدو الأمر كما لو أن علماء التطور يفضلون التركيز على الجزء من الصورة الذي يتناسب مع النموذج الداروينيي ويتجاهلون الأجزاء التي لا تتوافق معه.

نظراً لعدم وجود سوابق تطورية واضحة للجينات اليتيمة، يوصف أصلها أحياناً بأنه "de novo"، وهو مصطلح غامض يشير إلى ظهورها الوظيفي المفاجئ في الجينوم من الحمض النووي غير المشفر للبروتين. يشير عالم الأحياء الجزيئي الألماني هنريك كيسمان إلى أنه على الرغم من أن الاعتقاد السائد قديماً كان أن الأصل de novo للجينات المشفرة للبروتين غير مرجح، إلا أن "الأبحاث الحديثة كشفت عن عدد من الجينات المشفرة للبروتين الجديدة

التي نشأت على ما يبدو من تسلسل الحمض النووي غير المشفر (وغير المتكرر) سابقاً... لقد ثبت الآن بقوة أن الجينات الجديدة كانت بالفعل مساهمين رئيسيين في أصل المستجدات التطورية التكيفية."

من منظور التصميم الذكي، لا تبدو فكرة الأصل de novo لسمة معقدة غير معقولة، حيث يمكن للوكيل الذكي إدخال معلومات جديدة في النظام بسرعة. ولكن من الصعب تفسير هذه البيانات في إطار النموذج الدارويني الجديد، لأن العمليات غير الموجهة تجعل الأصل de novo للجينات المشفرة للبروتين احتمالاً ضعيفاً للغاية.

كما أشرنا سابقًا، يؤكد كل من هولدوبلر وويلسون، في إطار فرضيتهما حول المخطط الأساسي، على أن التغييرات الجينية الطفيفة فقط هي الكافية لكي ينتقل أي نوع إلى حالة التعايش الاجتماعي .حيث يوضحان": يبدو أنه من المبادئ الشاملة أن التحول إلى التعايش الاجتماعي يمكن أن يحدث بتبديل أليل واحد فقط أو مجموعة صغيرة من الأليلات". ومع ذلك، فإن الأبحاث الحديثة ترسم صورة أكثر تعقيدًا لهذه العلاقة.

يركز علم الجينوم، وهو مجال سريع التطور، على دراسة بنية ووظيفة الجينوم .أما علم الجينوم الاجتماعي، فهو فرع من فروع علم الجينوم يبحث في العلاقة بين الجينوم والسلوك الاجتماعي .لقد تم الآن فك شفرة الجينوم للعديد من أنواع الحيوانات، بما في ذلك العديد من الحشرات الاجتماعية، مما يتيح للباحثين تحديد أنواع التغيرات الجينية المرتبطة بالسلوك الاجتماعي .من الواضح أن العلاقة بين الجينات والسلوك الاجتماعي ليست

بسيطة، حيث تشير نتائج العديد من الدراسات إلى أن هناك تغييرات جينية كبيرة وهامة مرتبطة بتطور السلوك الاجتماعي.

في تحليلهما لفرضية المخطط الأساسي في ضوء هذه النتائج، وبالتركيز على رتبة الحشرات غشائيات الأجنحة، خلص جونسون ولينكسفير إلى أن "شبكات الاتصال التي تميز العمليات الفسيولوجية الاجتماعية ليس لها أسلاف مباشرة في غشائيات الأجنحة الانعزالية"، وأنه "يتضمن تطور التعايش الاجتماعي مزيجًا معقدًا من التغييرات في التعبير الجيني، وجينات ذات وظائف معدلة، وجينات جديدة تماماً."

كشفت دراسة قارنت الجينات بين عدة مجموعات من النحل، تتفاوت في درجات تعايشها الاجتماعي، عن وجود مجموعة مشتركة مكونة من ٢١٢ جينًا أظهرت ما وصفه الباحثون بـ "التطور المتسارع". علاوة على ذلك، تم تحديد ١٧٣ جينًا آخر أظهرت تطورًا متسارعًا ضمن المجموعات التي تتميز بدرجة عالية من التعايش الاجتماعي. يشير مصطلح "التطور المتسارع" إلى حدوث تغيرات في الجينوم تتجاوز بكثير ما هو متوقع بموجب معدلات الطفرات الطبيعية. ومع ذلك، فإن وصف التغيرات الجينية بهذه الطريقة لا يقدم تفسيرًا سببيًا، بل يطرح تساؤلاً حول ما إذا كانت أي عملية تطورية عشوائية قادرة على إحداث مثل هذه التغييرات بهذه السرعة.

في دراسة أخرى، تم تقييم التغيرات الجينية المرتبطة بالسلوك الاجتماعي من خلال فحص جينومات عشرة أنواع من النحل. شملت الدراسة نحلًا انفراديًا، ونحلًا يظهر تعايشًا اجتماعيًا بسيطًا، ونحلًا يتميز بتعايش اجتماعي

معقد. وقد توصل الباحثون إلى النتائج التالية: ١) عند فحصهم للانتقال من النحل الانفرادي إلى النحل الاجتماعي المتزايد في تعقيده، وجدوا زيادة في القدرة على تنظيم الجينات في النحل الاجتماعي، بما في ذلك "تطور سريع" للجينات المسؤولة عن تنسيق هذا التنظيم الجيني. وقد تم تحديد ١٦٢ جينًا أظهرت ما وصفه الباحثون بأنه "تطور متسارع". ٢) كان لدى النحل الذي يظهر تعايشًا اجتماعيًا معقدًا ١٠٩ جينات مخصبة بشكل كبير لوظائف مرتبطة بنقل البروتين وتكوين الخلايا العصبية. ٣) لوحظ تطور سريع في مسارات نقل الإشارة. ٤) أظهرت الدراسة أن التغيرات الجينية اختلفت بين السلالات المختلفة التي طورت التعايش الاجتماعي، مما يشير إلى عدم وجود مسار واحد للتطور، على الرغم من أن المسارات المختلفة ربما تنطوي جميعها على زيادة في تعقيد شبكات الجينات.

هناك فرضية أخرى حول تطور السلوك الاجتماعي تفترض وجود مستوى عالٍ من إعادة التركيب الجيني في الحشرات الاجتماعية. يحدث إعادة التركيب الجيني بسبب ظاهرة العبور بين الجينات على الكروموسومات، مما ينتج عنه توليفات جينية جديدة على نفس الكروموسوم. وفقًا لهذه الفرضية، ربما يكون سلوك مستعمرة التعايش الاجتماعي المعقد قد تطور بسبب زيادة معدل إعادة التركيب. ومع ذلك، وجدت دراسة قارنت بين جينومات نحل العسل الاجتماعي (Apis mellifera) ونحل قاطع أوراق البرسيم الانفرادي " (Megachile rotundata) عدم وجود دليل على أن إعادة التركيب قد أثرت على فعالية الانتقاء الطبيعي بين الجينات أثناء تطور النحل، وهو ما لا

يدعم الفرضية القائلة بأن معدلات إعادة التركيب العالية سهلت الانتقاء الإيجابي لوظائف جديدة في الحشرات الاجتماعية".

كشفت دراسة عن جينوم نحل العسل الآسيوي عالي التعايش الاجتماعي (Apis cerana) عن ٢١٨٢ جينًا فريدًا من أصل جينوم يتكون من ١٠٦٥١ جينًا - أي حوالي ٢٠٪ من إجمالي الجينوم. هذه الجينات الفريدة لا تتم مشاركتها مع الحشرات الأخرى غير الاجتماعية، كما أنها غير موجودة حتى في نحل العسل الغربي وثيق الصلة (Apis mellifera)، وهذا أمر مثير للدهشة، حيث يُعتقد أن النوعين تباعدا عن سلف مشترك منذ مليون إلى مليوني سنة فقط. بالإضافة إلى ذلك، يتمتع نحل العسل الآسيوي بعدد من السمات السلوكية المختلفة، بما في ذلك الدفاع على مستوى المجموعة، والاستمالة، والسلوكيات الصحية. هذه النتائج تشير بقوة إلى وجود عدد كبير من الجينات الجديدة أو اليتيمة المرتبطة بالسلوك الاجتماعي المعقد.

أُجريت أبحاث مماثلة على دبابير الورق التي تُظهر مستوى محدودًا من السلوك الاجتماعي، خاصة عند مقارنتها بالعديد من أنواع النمل .كشفت النتائج عن ما يقرب من ٢٥٠٠ جين مرتبط بالسلوك الاجتماعي.

بالإضافة إلى ذلك، وجدت دراسة أخرى حول التعبير عن الجينات المرتبطة بالسلوك الاجتماعي لأحد أنواع النمل ينتمي إلى جنس تِمنوثوراكس أن أكثر من خمسة آلاف جين يتم التعبير عنها بشكل مختلف، مما يعني أن كمية وتوقيت منتجات الجينات (عادة بروتينات) كانت متنوعة .

وفقًا لسيريان سومنر، عالمة الحشرات البريطانية وخبيرة علم البيئة السلوكي، تشير النتائج في هذه الدراسات الجينومية إلى أن الجينات الجديدة هي "مصدر مهم للابتكار الظاهري في جميع أنحاء المملكة الحيوانية، بما في ذلك الجينات المنحازة للطائفة في الحشرات الاجتماعية. نحن نفهم الآن أن هناك ولادة وتطور جيني كبير يحدث بين الجينات التي يتم تنظيمها في الطبقة العاملة، ولكن ليس في طبقة الملكة. يأتي الدليل على ذلك الآن من الأفرع الرئيسية الثلاثة من غشائيات الأجنحة الاجتماعية (النحل والدبابير والنمل)". مرة أخرى، هذا تأكيد على أن الجينات الجديدة هي نتيجة لعملية تطورية جديدة داروينية، ولكن يوجد دليل ضئيل أو معدوم على ذلك.

علاوة على ذلك، قارنت دراسة أخرى التغييرات الجينية في سبعة أنواع من النمل ونحل العسل والعديد من الحشرات الانفرادية. أسفرت هذه الدراسة عن العديد من النتائج المهمة. تحتوي كل سلالة من النمل على حوالي أربعة آلاف جين جديد، مقارنة بالحشرات الانفرادية. ومع ذلك، هناك ٦٤ جينًا فقط مشتركة بين جميع الأنواع السبعة من النمل، مما يقوض فكرة وجود مجموعة أدوات أساسية. ويخلص مؤلفو الدراسة إلى أن "هذه النتائج تشير إلى أن "مجموعة الأدوات الاجتماعية" الواسعة من الجينات المحفوظة الجديدة التي تشفر البروتين ليست شرطًا للحياة الاجتماعية التعاونية."

يتعلق مجال بحثي وثيق الصلة بالمناطق غير المشفرة في الجينوم[١]، التي كانت تسمى سابقاً "الحمض النووي غير المرغوب فيه" لاعتقاد الباحثين أنها

(١) يشير مصطلح "غير مشفر" إلى مناطق الجينوم التي لا تقوم بترميز البروتينات.

تفتقر إلى الوظيفة، وهو افتراض شجع عليه النموذج الدارويني الجديد .لكن دراسة حديثة لجينومات النحل أثبتت عكس ذلك. حيث خلص فريق من الباحثين إلى أن "توظيف مناطق جديدة غير مشفرة ومتراصة (NCARs) يرتبط بظهور الحياة الاجتماعية الملزمة في نحل الكوربيكولات وأضافوا : "يتم مشاركة ما مجموعه ١٤٧٦ منطقة من مناطق NCARs بشكل فريد بين هذه الأنواع وهي غنية بوظائف الجينات المرتبطة بتطور الخلايا والجهاز العصبي." يبدو أن هذه النتيجة تشير إلى أن "أصل الحياة الاجتماعية في [نحل الكوربيكولات] كان مصحوبًا بزيادة القدرة التنظيمية التي توفرها هذه المناطق."

تتماشى هذه النتائج مع تحليل جينومات الفقاريات، مما يشير إلى أن أصل الأنماط الظاهرية الجديدة يرتبط بالتغيرات في العناصر المحفوظة غير المشفرة المرتبطة بتنظيم الجينات.

وفر البحث أدلة تدعم فرضية أن أحد الأصول المحتملة للسلوك المعقد الجديد يرجع إلى التغييرات الجديدة في المناطق غير المشفرة للبروتين في الجينوم.

علم التخلّق

كما ذُكر سابقًا، ونظرًا لفشل الآلية الداروينية الجديدة في تفسير أصل السمات الجديدة وغيرها من الظواهر، تم اقتراح آليات تطورية إضافية مختلفة تحت مسمى "التوليفة التطورية الموسعة". يركز أحد هذه المقترحات على ما يُعرف باسم علم التخلّق.

في عام ١٩٤٢، قدم عالم الأحياء البريطاني الشهير سي إتش وادينجتون كلمة "علم التخلّق" للدلالة على دراسة "العمليات التي تنطوي عليها الآلية التي من خلالها تسبب جينات النمط الجيني تأثيرات ظاهرية".

يمكن أن تسبب عمليات التخلّق تغييرات في وقت أو مكان التعبير عن الجين، ولكن ليس في تسلسل الحمض النووي للجين. وهذا يمثل تحديًا لأساسيات التوليفة التطورية الحديثة لأنه يعترف بالمعلومات التي تؤثر على التشكل والوظيفة خارج تسلسل الحمض النووي. وفقًا للداروينية الجديدة، يحدث العمل التطوري الحاسم من خلال الطفرات العشوائية في الحمض النووي. ولكن إذا تأثرت جوانب مهمة من التشكل بالمعلومات البيولوجية خارج تسلسل الحمض النووي، فكيف يمكن أن تكون الطفرات الجينية لآلية الداروينية الجديدة كافية؟ كان السؤال الرئيسي لأولئك الذين ينجذبون إلى المجال الناشئ لعلم التخلّق ولكنهم ملتزمون أيضًا بنظرية التطور هو كيفية توسيع التوليفة الحديثة لتشمل رؤى من علم التخلّق.

كان علم التخلّق موضوعًا لبحوث مهمة في العديد من أنواع الحيوانات، بما في ذلك البشر. تشير نتائج العديد من الدراسات إلى أن "بعض التباين السلوكي، واللدونة الظاهرية بشكل عام، يتم توسطها بآليات التخلّق، وعمليات على المستوى الجزيئي... التي تعدل التعبير الجيني ولكنها لا تغير تسلسل الحمض النووي وقد تؤدي إلى تغيير وراثي في النمط الظاهري".

ألقت دراسة علم التخلّق أيضًا ضوءًا جديدًا على علم الأجنة. افترض العديد من علماء الأحياء أن تطور الجنين يتم التحكم فيه بالكامل بواسطة

الجينات، وهو افتراض تمليه "العقيدة المركزية لعلم الأحياء" بأن تسلسلات الحمض النووي هي المستودع الوحيد للمعلومات اللازمة لتطور الكائنات الحية. ومع ذلك، تشير الأدلة إلى أن هناك معلومات وجودية لم يتم تحديدها بواسطة الحمض النووي. في ورقة بحثية تستعرض الأدلة، خلص جوناثان ويلز إلى أن "فكرة أن تطور الجنين يتم التحكم فيه بواسطة برنامج وراثي لا تتوافق مع الأدلة البيولوجية. يتطلب تطور الجنين معلومات وجودية أكثر بكثير مما تحمله تسلسلات الحمض النووي. وبالتالي فإن الداروينية الجديدة خاطئة". استنادًا إلى الأدلة على وجود مصادر أخرى للمعلومات التي تتحكم في التطور، يلاحظ ويلز أن "نظرية تطورية كافية يجب أن تشرح كيف تتغير مصادر المعلومات المختلفة في الكائن الحي (بما في ذلك الحمض النووي وأنماط الغشاء وهيكل الهيكل الخلوي) بطريقة منسقة لإنتاج أنواع وأعضاء وخطط جسم جديدة".

هناك العديد من الأمثلة على دور علم التخلّق في تطوير السلوك الحيواني. أظهرت الأبحاث أن "التجارب المجهدة من الآباء تنتقل إلى الأجيال القادمة عن طريق التغييرات التخلّقية في الجينات المرتبطة بالإجهاد." وأظهر البحث أن هرمونات الأم يمكن أن تؤثر بشكل كبير على فراخ الطيور . حيث كان النسل من الدجاج البياض الذي تعرض للإجهاد وبالتالي أطلق المزيد من هرمونات التوتر أكثر خوفًا وأقل قدرة على المنافسة. وقد لوحظت آثار تخلّقية مماثلة في الأنواع الأخرى.

السلوكيات المعبر عنها موجودة بالفعل بشكل محتمل في النمط الظاهري، كما هو الحال في تحديد طبقات الحشرات الاجتماعية .في حالة الحشرات الاجتماعية، هناك دليل على أن عمليات التخلّق التي تنظم التعبير الجيني يمكن أن توفر الآلية الرئيسية لتنظيم الذاكرة العصبية والخصائص الأخرى للدماغ. على الرغم من هذا الدليل، خلص عالم الأحياء هوا يان والمؤلفون المشاركون معه إلى أن "الأسئلة الرئيسية التي تحرك مجالات علم التخلّق السلوكي وعلم الأحياء الاجتماعي لا تزال دون إجابة .ما هي الجوانب الرئيسية للهندسة الجينية والتخلّقية التي توجه إنتاج الطبقات المورفولوجية والسلوكية المتميزة؟ إلى أي مدى تؤدي التعديلات التخلّقية إلى اللدونة السلوكية المعتمدة على السياق الاجتماعي في الأدمغة؟"

تُظهر الدراسات المذكورة أعلاه أن آليات التخلّق تؤثر على تطور الطبقات وتعبيرات السلوك الاجتماعي للحشرات. ومع ذلك، فإن مثل هذه الآليات غير كافية لتطوير السلوكيات المعقدة للحشرات الاجتماعية في المقام الأول. خصائص الطبقات والسلوكيات المعبر عنها موجودة بالفعل بشكل محتمل في النمط الظاهري. بالإضافة إلى ذلك، في كثير من الحالات تكون آليات التخلّق نفسها معقدة للغاية. يبدو أنها أحد العوامل المتحكمة في تنفيذ السلوكيات المعقدة. لذلك، يتطلب أصلهم أيضًا تفسيرًا، ويمثل تعقيدهم تحديًا لأي سيناريو تطوري غير موجه.

السلوك الاجتماعي

الإيثار

تكمن إحدى المشكلات الأخرى المتعلقة بأصل السلوك الاجتماعي في شرح أصل الإيثار في سياق التطور الداروينى الجديد. أدرك داروين الصعوبة في شرح الأصل التطوري للسلوك الاجتماعي، وتحديداً الطبقات التي لا تتكاثر، عندما كتب عن "صعوبة خاصة واحدة، بدت لي في البداية مستعصية على الحل، وقاتلة في الواقع لنظريتي بأكملها". وأوضح ذلك على النحو التالي:

"أشير إلى الأفراد المحايدين أو الإناث العقيمة في مجتمعات الحشرات: فهذه الأفراد المحايدة غالبًا ما تختلف اختلافًا كبيرًا في الغريزة وفي البنية عن كل من الذكور والإناث الخصبة، ومع ذلك، كونها عقيمة، لا يمكنها أن تتكاثر... ولكن مع النملة العاملة لدينا حشرة تختلف اختلافًا كبيرًا عن والديها، ومع ذلك فهي عقيمة تمامًا؛ بحيث لا يمكنها أبدًا أن تنقل التعديلات المكتسبة بالتتابع في البنية أو الغريزة إلى نسلها. قد يُسأل جيدًا كيف يمكن التوفيق بين هذه الحالة ونظرية الانتقاء الطبيعي"[1]؟

في ظل النموذج الداروينى ومفهوم "الجين الأناني" الذي تبناه دوكينز وآخرون، فإن العملية الداروينية تكافئ الأفراد الذين يبقون على قيد الحياة ويتكاثرون، وليس أولئك الذين لا يستطيعون التكاثر ومساعدة الآخرين على

(١) داروين، في أصل الأنواع، ٢٣٦-٢٣٧.

القيام بذلك.[1] فلماذا إذن نجد حالات ملفتة للنظر من السلوك الإيثاري في مملكة الحيوان، كما هو الحال في الحشرات الاجتماعية؟

نظريات اللياقة الشاملة وانتقاء الأقارب هي محاولات لمواءمة مثل هذه الحالات مع النظرية التطورية الداروينية. وقد استشهد الكثيرون باللياقة الشاملة، التي طورها في الأصل المنظر التطوري ويليام هاميلتون، على أنها النظرية التي تفسر تطور السلوك الاجتماعي، ولا سيما السمات الإيثارية الشائعة في المجتمعات الاجتماعية. تهدف نظرية هاميلتون إلى تفسير سبب كون بعض العمال الاجتماعيين عقيمين ويتسمون بالإيثار. الفكرة الأساسية هي أن الحيوانات ستعمل على إفادة الأفراد المرتبطين ارتباطًا وثيقًا لأنهم يتشاركون نسبة كبيرة من جيناتهم.

في حين أن النقاش حول اللياقة الشاملة مثير للاهتمام بالتأكيد، فإن حسمه في اتجاه أو آخر لا يؤثر بشكل مباشر على أطروحة هذا الكتاب. والسبب هو أن تفسير أصل السلوكيات الاجتماعية والخوارزميات التي تتحكم فيها قد تم استبعاده من النقاش. تفترض نظرية اللياقة الشاملة وغيرها من الآليات الداروينية ببساطة وجود هذه السلوكيات والخوارزميات. إنها لا تفسر أصلها، بخلاف الاعتماد على التأكيد الداروينى القياسي لضغط الاختيار. نظرية اللياقة الشاملة والانتقاء الجماعي قادرة فقط على شرح كيفية تكيف السلوكيات والحفاظ عليها داخل مجموعة سكانية.

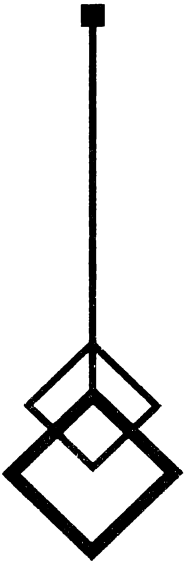
(١) ريتشارد دوكينز، الجين الأناني (أكسفورد: مطبعة جامعة أكسفورد، ١٩٨٩).

قبل أبحاث الجينوم الحديثة، كان يُفترض أن التغييرات الجينية الطفيفة نسبيًا فقط مطلوبة لتحويل الحشرات من الانفرادية إلى الاجتماعية. وقد تم دحض هذا الافتراض بشكل حاسم، بناءً على نتائج الدراسات المذكورة أعلاه. إن تطوير السلوك الاجتماعي ليس مجرد مسألة الحفاظ على مجموعة أدوات أساسية من الجينات للسلوكيات العامة وتطور عدد صغير من الجينات الجديدة. من المعروف الآن أن الانتقال إلى السلوك الاجتماعي يتطلب المئات أو الآلاف من الجينات المعدلة أو الجديدة والتعبير عنها من خلال آليات التخلّق.

تكمن إحدى المشاكل في دراسات التغيرات الجينية المرتبطة بالسلوك الاجتماعي في أنها لا تبدو مسؤولة عن أصل الخوارزميات التي تتحكم في السلوكيات على مستوى المستعمرة. أحد الأسباب المحتملة هو أن الخوارزميات لا توجد داخل الجينات المشفرة للبروتين، حيث يوجد دليل على وجود تغييرات في الحمض النووي غير المشفر للبروتين المرتبط بالسلوك الاجتماعي. هناك أيضًا بعض الأدلة على أن جوانب السلوك الاجتماعي يتم التحكم فيها عن طريق التخلّق.

بغض النظر عن الآلية الدقيقة، يمثل تعقيد الخوارزميات تحديًا كبيرًا للتفسير الداروينى، وفي الواقع لأي تفسير ملتزم بعمليات تطورية عمياء تمامًا، لأنه يجب أن تظهر العديد من الأنظمة الجديدة للتحكم السلوكي والمنطق قبل أن تتمكن هذه السلوكيات من توفير ميزة. كما أشار البحث، تم العثور على المئات أو ربما الآلاف من الجينات الجديدة أو المعدلة المرتبطة

بالسلوكيات الاجتماعية. تعد العمليات التطورية العمياء مرشحين ضعيفين للتسبب في مثل هذا العدد الكبير من الطفرات الوظيفية وترميز مثل هذه الأنظمة المعقدة. الباحثون لديهم ما يبرر أكثر من البحث عن فرضية بديلة تحدد سببًا ذا قدرة مثبتة على إحداث التأثيرات المعنية.



الفصل الخامس: فن العمارة لدى الحشرات

-"ما الذي يجعل نسيج العنكبوت هذا معجزة يا ترى؟" تساءلت السيدة أرابل. "أنا لا أرى أي شيء يدعو للدهشة، إنه مجرد نسيج عادي".
-"هل حاولتِ يوما أن تغزلي واحدا مثله؟" رد عليها الدكتور دوريان.

- **إلوين بروكس وايت، شارلوت ويب**

هناك مبانٍ أبدعتها الحيوانات، تثير الإعجاب لدى المهندسين المعماريين البشر لما تتسم به من براعة هندسية وإبداع فني. بل إن الأمر يزداد روعة حين ندرك أن هذه الهياكل من صنع حيوانات، بعضها ذو أدمغة صغيرة وذكاء محدود.

تنتشر العمارة بين مجموعة متنوعة من الكائنات في مملكة الحيوان. فالطيور والحشرات تبني أعشاشها، وكذلك الحال بالنسبة لبعض العناكب والقشريات والأسماك والزواحف والثدييات. الهدف الرئيسي من هذه الجهود المنزلية هو توفير الأمن، وخاصة فيما يتعلق بتربية النسل. كما يسهم هذا السلوك في استمرارية الأجيال وتطوير أنماط حياة أكثر تعقيداً من الناحية الاجتماعية[١].

يثير السلوك المعماري سؤالاً هاماً: هل هو فطري أم مكتسب؟ يوضح جيمس وكارول جولد أنه نظراً للتعقيد الهائل لأعشاش الطيور وسدود القندس، افترض الخبراء الأوائل أن سلوك البناء المتقن يجب أن يكون مكتسباً. لكن علماء الطبيعة اختلفوا مع هذا الرأي، حيث لاحظوا أن

---

(١) بيرند هاينريش، "غريزة العودة إلى الوطن :المعنى والغموض في هجرة الحيوانات" (بوسطن: Houghton Mifflin Harcourt، ٢٠١٤)، ١٢٥.

الأعشاش يتم بناؤها من قبل "طيور شابة تفتقر إلى الخبرة، ورأوا أنه على الرغم من بعض العيوب، إلا أن هذه الأعشاش تمتلك معظم الخصائص الموجودة في منشآت البالغين الناضجين". بعبارة أخرى، بدا أن سلوكها فطري ومبرمج إلى حد كبير.

هناك دليل آخر على الطبيعة الفطرية لبعض أشكال العمارة الحيوانية، ويتمثل في قدرة بعض الحشرات على بناء هياكل معقدة. عندما نقارن الحيوانات بناءً على قدرتها على بناء هياكل متطورة، نجد أن الحشرات الاجتماعية مثل النمل والنمل الأبيض هي الأقرب إلى المهندسين المعماريين البشر الموهوبين، حيث تتفوق بكثير على أفضل إنجازات حتى أكثر الشدييات ذكاءً بخلاف البشر. هذه الحشرات، بأدمغتها الضئيلة، ببساطة تفتقر إلى المادة الرمادية اللازمة لإتقان مثل هذه الأعاجيب المعمارية من خلال النوع من النمو الفكري والتعلم الذي يمر به البشر في طريقهم ليصبحوا مهندسين معماريين ناجحين.

حقيقة أن هذه الحشرات تتقن مهاراتها المعمارية على الفور تقريبًا بينما لا تزال صغيرة (مثلما تفعل الطيور والقنادس) تشير أيضًا بقوة إلى أننا نشهد سلوكًا معقدًا مبرمجًا، وليس مكتسباً.

خلايا النحل

أعرب داروين عن إعجابه بتصميم أقراص عسل النحل. يصف كيف قد يبدو من غير المعقول أن النحل قادر على مثل هذا الإنجاز الهندسي، ويكتب: "يجب أن يكون رجلاً فاترًا من يستطيع فحص الهيكل الرائع

لقرص العسل، المتكيف بشكل جميل للغاية مع غايته، دون إعجاب متحمس". ويتابع:

نسمع من علماء الرياضيات أن النحل قد حل عملياً مشكلة غامضة، وقد جعل خلاياه بالشكل المناسب لاحتواء أكبر قدر ممكن من العسل، بأقل استهلاك ممكن من الشمع الثمين في بنائها. لقد لوحظ أن العامل الماهر، مع الأدوات والمقاييس المناسبة، سيجد صعوبة بالغة في صنع خلايا من الشمع بالشكل الحقيقي، على الرغم من أن هذا يتم بواسطة حشد من النحل يعمل في خلية مظلمة. عند منح أي غرائز تريدها، يبدو في البداية من غير المعقول تمامًا كيف يمكنهم صنع كل الزوايا والسطوح اللازمة، أو حتى إدراك متى يتم صنعها بشكل صحيح[1].

وفقًا لسوفي كاردينال وبريان دانفورث، علماء الحشرات في جامعتي كارلتون وكورنيل على التوالي، تشير الأبحاث إلى أن أقدم شكل من غشائيات الأجنحة لم يشارك في بناء أعشاش معقدة أو سلوك اجتماعي متقدم. يفترض جولدز أن بناء الخلية المعقد والسلوك الاجتماعي قد تطور بشكل متزامن: "كانت الخطوة الأولى نحو الحياة الاجتماعية معمارية: بدأت بعض الأنواع في بناء هياكل واقية ليرقاتها مثل الجحور".

من المثير للاهتمام أن الحياة الاجتماعية في النحل يقال إنها تطورت بشكل مستقل عدة مرات، "وفي كل مرة كان لا بد من اختراع استراتيجيات

(١) تشارلز داروين، "حول أصل الأنواع :عن طريق الانتقاء الطبيعي، أو الحفاظ على الأجناس المفضلة في الصراع من أجل الحياة" (لندن :جون موراي، ١٨٥٩)، ٢٢٤.

جديدة لبناء الأعشاش المشتركة والتسلسل الهرمي الاجتماعي والتواصل". والسبب في أن بناء الأعشاش المشتركة يبدو أنه قد تم اختراعه بشكل مستقل هذه المرات العديدة هو أن هذا السلوك غير موجود في النحل غير الاجتماعي.

تعتبر خلايا نحل العسل مثيرة للإعجاب أينما وجدتها، ولكن بشكل خاص في المناخات الباردة بسبب الميزات الإضافية التي تتطلبها هذه الخلايا للسماح للنحل بالبقاء على قيد الحياة في فصل الشتاء. يصف متخصص سلوك الحشرات بيرند هاينريش الخصائص الوظيفية الأساسية للخلية في المناخات الباردة:

يجب أن يحمي موقع العش النحل من الصقيع العميق.

يجب أن تكون واسعة لاحتواء كميات كبيرة من العسل وحبوب اللقاح في الشتاء.

يجب إطعام الصغار وإبقائهم دافئين من أجل النمو. هذا يعني أنه يجب تسخين المنزل، مما يتطلب استخدامًا مستمرًا للوقود.

يجب أن تكون منازل نحل العسل كبيرة بما يكفي لاستيعاب عشرات الآلاف من النحل وتخزين ما يكفي من العسل ليدوم طوال فصل الشتاء.

نظرًا لأنها تحتوي على كميات كبيرة من العسل الغني وحضانات الحضنة التي تغري الحيوانات المفترسة، يجب أيضًا الدفاع عنها بشدة.

هذه المتطلبات الوظيفية وغيرها تفسر الكثير من تصميم خلايا نحل العسل. هناك العديد من الجوانب البارزة في هندسة العسل. يتم بناء الخلايا أفقيًا، متصلة من الخلف إلى الخلف في طبقة مزدوجة. يوفر كل نصف ثلاثي الجوانب لخلية سداسية معينة أيضًا جدرانًا لثلاث خلايا سداسية مجاورة، جانب واحد لكل منها، وهي "خدعة هيكلية اكتشفها المهندسون البشريون بعد ملايين السنين".

ستحتوي المستعمرة المتوسطة على عدة صفائح من أقراص العسل المتوازية مع حوالي خمسة آلاف خلية في كل منها. صفائح قرص العسل مصنوعة من شمع العسل، بقوة بحيث يمكن لأونصة واحدة من قرص العسل الشمعي أن تحمل حوالي رطلين من العسل وحبوب اللقاح واليرقات والشرانق. كما يقوم نحل العسل أيضًا بتصنيع وتطبيق بطانة مقاومة للماء على خلاياها. تقوم بعض الأنواع بإنشاء المادة عن طريق جمع راتنجات النبات ونسغ الأشجار، والتي يخلطونها بعد ذلك مع اللب أو الطين لإنشاء مادة تسمى الباتومين[1].

(١) غولد وغولد، "المهندسون المعماريون من الحيوانات"، ١٠٠ .بالإضافة إلى ذلك، يكتب آل غولد : "العديد من الأنواع تصنع أيضًا الشمع في غدد خاصة فريدة من نوعها بالنسبة للنحل؛ يمكن إضافة هذه المادة إلى البيتومين لتحقيق نتائج أفضل، خاصة في درجات الحرارة المرتفعة .لا يذوب شمع العسل حتى يتجاوز ١٠٠ درجة فهرنهايت، ويتم الحفاظ عليه بعناية تحت هذا المستوى عن طريق التبريد التبخيري .تستخدم أنواع أخرى الشمع كطبقة رقيقة من الورنيش المقاوم للماء حول الأنفاق والخلايا".

كان يُعتقد منذ فترة طويلة أن شمع العسل تم جمعه من الزهور، إلى جانب الرحيق وحبوب اللقاح. في النهاية تقرر أنه يتم تصنيعه من قبل النحل نفسه. هذا يجعل النحل واحدًا من الحيوانات القليلة القادرة على تصنيع مواد العش من أجسامها. كما يوضح عالم الأحياء السلوكية يورغن تاوتز، يتم بثق الشمع من "ثماني مجموعات من الغدد مرتبة في أزواج" على البطن، وبعد "بثقها على أسطح جسم النحلة، تتصلب إلى قشور صغيرة رقيقة كالورق".

كمية العمل المبذولة في بناء قرص العسل مثيرة للإعجاب. يتطلب بناء قرص عسل متوسط من الصفر الطاقة الغذائية التي يوفرها حوالي ستة عشر رطلاً من العسل من أجل إنتاج النحل المجتهد حوالي رطلين ونصف من الشمع، والذي يستخدم لبناء حوالي ١٠٠.٠٠٠ خلية. يعلق هاينريش قائلاً: "لقد كان الانتظام الدقيق لقرص العسل مصدرًا للدهشة. كان هناك جدل حول كيفية قيام النحل بإنشاء أشكال الخلايا. بعد ٣٥٠ ورقة علمية حول البحث في قرص عسل النحل ... ما زلنا لا نملك الإجابة الكاملة عن كيفية صنع النحل لقرص العسل".

إحدى الأدوات الذكية التي يستخدمها نحل العسل في بناء أعشاشه عالية الانتظام هي الاستعانة بالمجال المغناطيسي للأرض. في حين أن استخدام المجال المغناطيسي شائع في الملاحة، إلا أن تطبيقه في بناء الأعشاش يعد فريداً من نوعه. فقد اكتشف عالم السلوك الحيواني النمساوي الألماني الحائز على جائزة نوبل، كارل فون فريش، أنه في ظروف معينة، يقوم النحل بتوجيه أقراص العسل نحو الشمال المغناطيسي، مما يمكنهم من تحديد اتجاه

وإطار مرجعي مشتركين. وبدون هذا، لكان تنسيق جهود النحل الفردي أكثر صعوبة. وقد كشفت دراسات أخرى أن هذه ليست سوى واحدة من عدة وسائل يستخدمها نحل العسل للتوجيه[١].

ومن العناصر الهامة الأخرى في خلايا النحل خصائص العسل نفسه. فهو مصدر فائق التركيز للطاقة، حيث أن كثافته العالية وطبيعته الحمضية وإنزيماته المضادة للميكروبات ومحتواه المائي المنخفض نسبياً تمنع نمو العفن والبكتيريا فيه. ويرتبط هذا بسمة أخرى للعسل ضرورية لبقاء المستعمرة: وهي إمكانية تخزينه، وهو ابتكار يحمي النحل من التقلبات البيئية في توافر الرحيق.

تطور أقراص عسل النحل: تحدي معقد لنظرية التطور التدريجي

تحدث تشارلز داروين ببلاغة عن روعة بناء أقراص عسل النحل، لكنه لم يتردد في تأكيده على أن أصل هذه المهارة يمكن تفسيره في إطار نظريته في التطور. ووفقًا لداروين، فإن "أعجب الغرائز المعروفة، غريزة نحل العسل، يمكن تفسيرها من خلال الانتقاء الطبيعي الذي استغل العديد من التعديلات المتتالية الطفيفة للغرائز الأبسط؛ الانتقاء الطبيعي الذي قاد النحل تدريجيًا، وبشكل أكثر كمالاً، إلى بناء خلايا متساوية على مسافة معينة

(١) نورو أدغابا وآخرون، "تجربة حول توجيه الأقراص العسلية بواسطة نحل العسل (Hymenoptera: Apidae) في خلايا النحل التقليدية"، مجلة علم الحشرات الاقتصادية ١٠٥، رقم ٣ (يونيو ٢٠٢١): 777-٧٨٢، https://doi.org/10.1603/EC11410.

من بعضها البعض في طبقة مزدوجة، وإلى تشكيل وتجويف الشمع على طول مستويات التقاطع".

ومع ذلك، يبدو أن داروين قد أغفل حقيقة جوهرية مفادها أن بناء الأقراص يتطلب مجموعة من السلوكيات الأساسية المتناسقة والضرورية لإنتاج قرص عسل ناجح. هذه السلوكيات تشمل اختيار وإعداد تجويف الشجرة، وتشكيل الهيكل ثلاثي الأبعاد للخلية، واختيار وتركيب المواد، والحفاظ على درجة حرارة مثالية، وتنسيق أنشطة البناء بين النحل. كل هذه العناصر مترابطة وتعمل كوحدة متكاملة، مما يشير إلى أنها تمثل نظامًا سلوكيًا معقدًا لا يمكن اختزاله إلى مكوناته الأساسية. إذا فُقد عنصر أو اثنين من هذه العناصر، فستنهار مستعمرة النحل بأكملها. وحتى لو لم يكن الأمر بهذه الحتمية، فإنه قريب منها. هذا يشكل تحديًا كبيرًا لفكرة التطور التدريجي التي اقترحها داروين.

هل من الممكن أن يكون سلوك بناء الأقراص قد تطور تدريجيًا عبر الزمن؟ هذا ليس ممكنًا فحسب، بل إنه مرجح. من الواضح أن كل سلوك من هذه السلوكيات الفردية يخضع للانتقاء الطبيعي، مما قد يؤدي إلى تحسينات في بناء الأقراص، وبالتالي تمكين خلايا النحل من التكيف بشكل أفضل مع التحديات البيئية المتغيرة. ومع ذلك، هذا لا يفسر أصل السلوكيات الفردية نفسها، أو الخوارزميات التي تتحكم فيها، أو تعقيد المستعمرة الاجتماعية والتنسيق بين النحل. هذه الاعتبارات تشكل معضلة كبيرة لفكرة داروين

القائلة بأن هذه القدرات المعمارية نشأت من خلال الانتقاء الطبيعي الذي يعمل على سلسلة طويلة من التعديلات الطفيفة والعشوائية.

أعشاش الدبابير الأنبوبية: هندسة معمارية مبهرة في عالم الحشرات

تتميز الدبابير الأنبوبية، التي تستمد اسمها من شكل أعشاشها الشبيه بأنابيب الأرغن، بقدرتها على بناء مساكن فريدة من نوعها. تتألف هذه الأعشاش من سلسلة من الأنابيب المصنوعة من الطين، حيث تضع الإناث بيضها وتوفر لليرقات بيئة مثالية للنمو.

تبدأ أنثى الدبور عملية البناء بجمع الطين بواسطة فكها السفلي، ثم تشكله على هيئة كرة صغيرة. تعود بعد ذلك إلى العش، حيث تقوم بخلط الطين بلعابها، ثم تفرده على شكل شرائح رقيقة باستخدام جبهتها. يشير العالمان ستيفن وجولد إلى أن هذا السلوك البنائي "نمطي للغاية لدرجة أنه لا بد أن يعتمد على مجموعة من البرامج المنسقة". وعلى الرغم من أن "الأنابيب اللاحقة تظهر تحسنًا واضحًا عن الأنابيب السابقة"، مما يدل على وجود قدر من التعلم، إلا أن السلوك الأساسي فطري ومبرمج وراثيًا. وتشير التجارب إلى أن الدبابير لا تمتلك صورة ذهنية مسبقة عن الشكل النهائي للعش، بل تعتمد على سلسلة من البرامج الحركية المتتالية لإكمال كل خطوة من عملية البناء. اللافت للنظر أن الدبابير الأنبوبية قادرة على إنجاز هذه الأعاجيب المعمارية على الرغم من ضعف بصرها الشديد، الذي يقدر بحوالي ٢٠/٢٠٠٠.

تعتبر قدرة بناء الأعشاش ميزة تطورية هامة، حيث تسمح للأنواع بالبقاء على قيد الحياة في مجموعة متنوعة من الظروف المناخية. ويتجلى ذلك

بوضوح في الأعشاش الورقية التي تبنيها بعض أنواع الدبابير الورقية. تتميز هذه الأعشاش بتعقيدها الداخلي، حيث تتضمن طبقات ومسارات متعددة.

تستخدم الدبابير الورقية آليات مبتكرة للتحكم في المناخ داخل أعشاشها، سواء للتدفئة أو التبريد. ويتم تحقيق التدفئة من خلال تجمع مجموعة من الدبابير البالغة وتذبذب عضلات أجنحتها، مما يولد حرارة. أما التبريد، فيتم من خلال إحضار الماء إلى العش، والذي يتبخر مسببًا تأثيرًا تبريديًا. كما قد تحتوي الأعشاش الورقية على طبقة عازلة، تقوم الدبابير ببنائها من سلسلة من الكرات متحدة المركز حول المشط. وبفضل هذه الآليات، يتم الحفاظ على درجة حرارة داخل العش في حدود ثلاث درجات من ٨٦ درجة فهرنهايت (٣٠ درجة مئوية).

أعشاش النمل الحائك: إبداع معماري جماعي في عالم الحشرات

يقضي معظم أنواع النمل حياته تحت الأرض، متخذاً من الأنفاق مسكناً له. ومع ذلك، فإن عدداً قليلاً من الأنواع يعيش في الأشجار. من بين هذه الأنواع "النمل الحائك"، الذي اكتسب هذا الاسم بفضل قدرته الفريدة على بناء أعشاشه عن طريق نسج الأوراق معًا، لتشكل في النهاية كرة بحجم كرة القدم تقريباً. يمكن أن تصل مستعمرات النمل الحائك إلى تعداد ضخم يصل إلى نصف مليون نملة، موزعة على مئات الأعشاش المنتشرة عبر العديد من الأشجار.

المثير للدهشة في أعشاش النمل الحائك ليس هيكلها فحسب، بل الطريقة المذهلة التي يتم بناؤها بها. أحد الجوانب الفريدة لهذه الأعشاش هو

أن الأوراق المستخدمة في البناء تبقى متصلة بالأشجار، مما يسمح لها بمواصلة عملية التمثيل الضوئي وإنتاج الأكسجين. ولكن الجانب الأكثر إثارة للإعجاب هو العمل الجماعي المنسق الذي يقوم به مجتمع النمل لبناء هذه الأعشاش.

كما يظهر في الشكل ١٥، يقوم النمل بخياطة الأوراق معًا عن طريق ضم حوافها بدقة متناهية. إذا كانت حواف الأوراق غير مستوية، يقوم النمل بقصها لضمان محاذاتها بشكل مثالي. وفي الحالات التي تكون فيها المسافة بين الأوراق كبيرة، يشكل النمل "سلاسل حية" حيث يتعاون العديد منهم على سد الفجوة. يتم لصق حواف الأوراق معًا باستخدام الحرير الذي تنتجه يرقات النمل، وهو الحرير الذي تستخدمه عادة لبناء شرانقها الفردية. وهكذا، تقوم اليرقات بتغيير سلوكها المعتاد والتعاون مع النمل العامل في بناء العش. يمكن القول إن النمل العامل يستخدم اليرقات كـ "أدوات" خلال هذه العملية، ويتحكم فيها لإخراج الحرير بدقة على طول حواف الأوراق. بناءً على ذلك، يمكن تصنيف النمل الحائك كمستخدم للأدوات!

هناك جانب آخر مثير للاهتمام في سلوك بناء العش هذا يتعلق بالمرحلة الأولى من ربط حواف الأوراق. في البداية، يعمل النمل بشكل مستقل أو في مجموعات صغيرة، يسحب كل منهم حافة ورقة. عندما تبدأ إحدى المجموعات في إحراز تقدم، يتوقف النمل الآخر عن جهوده وينضم إلى المجموعة الأكثر نجاحًا. يعلق جولد على هذا السلوك قائلًا: "هذه الحالة من البناء التعاوني تعتمد على قدرة الحشرات المستقلة، التي لكل منها أهدافها الخاصة، على

التعرف على مشروع مكتمل جزئيًا، والتخلي عن جهودها الفردية والانضمام إلى الجهد الجماعي الأكثر تقدمًا".

يمكنك العثور على مقاطع فيديو رائعة توثق عملية بناء عش النمل الحائك على الإنترنت[1].

يتساءل العالمان بيرت هولدوبلر وإي ويلسون: "كيف يمكن أن يتطور مثل هذا السلوك المتطرف في المقام الأول؟" ويشيران إلى أنه من الواضح أن هذا السلوك قد تطور بشكل مستقل في أربع مجموعات مختلفة من النمل، حيث أن الأجناس الأربعة التي تظهر هذا السلوك متميزة عن بعضها البعض. ويضيفان: "نجد أنه من المدهش أن نسج الأعشاش الجماعي قد نشأ أربع مرات فقط تقريبًا خلال مائة مليون سنة من تطور النمل".

لكن لماذا يعتبرون ظهور هذا السلوك المتطرف في أربع مجموعات فقط أمرًا مدهشًا؟ يبدو أنهم يفترضون أن مثل هذه السمة تنشأ بسهولة، دون النظر في التعقيدات الكثيرة اللازمة لتطور مثل هذه السمة متعددة الأوجه بطريقة داروينية تدريجية. إذا أخذنا في الاعتبار كل هذه التعقيدات، يبدو من المدهش أكثر أن عملية تطورية عمياء يمكن أن تخلق مثل هذا السلوك حتى ولو مرة واحدة. وحقيقة أنه نشأ أربع مرات منفصلة تزيد من عمق هذا اللغز.

---

(١) انظر، على سبيل المثال، فيديو ممتاز عن نمل النساج على موقعAus Ants ، https://ausants.net/documentaries؛ أو فيديو Smithsonian هذا، https://www.youtube.com/watch?v=iPxxW2UhKEY.



الشكل ٥.١: بناء أعشاش النمل الحائك

يتناول هولدوبلر وويلسون في دراستهما مسألة كيفية تطور هذا السلوك المعقد لدى النمل الحائك. ويشيران إلى أنه في بعض الأنواع، يكون سلوك اليرقات أثناء بناء العش مختلفًا اختلافًا طفيفًا فقط عن سلوكها الطبيعي. وبناءً على ذلك، "من السهل تصور حدوث مثل هذا التغيير البسيط بتأثير طفرة في جين واحد يؤثر على برنامج النسج. وبالتالي، فإن بداية تطور مجموعة من النمل نحو النسج الجماعي لا تتطلب بالضرورة قفزة تطورية كبيرة أو غير محتملة".

يوضح هولدوبلر وويلسون أيضًا أن سلوك النسج يتطور بدرجات متفاوتة، حيث يكون بعضها أكثر تطورًا وتعقيدًا من البعض الآخر. ويشيرون إلى هذا الأمر كمصدر قلق محتمل لنظرية التطور، متسائلين: "لماذا تمتلك العديد من الأنواع الوسيطة ما يبدو أنه تكيف "غير كامل" أو على

الأقل أقل كفاءة من الناحية الميكانيكية؟" ثم ينتقلون إلى التكهن بالتفسيرات المحتملة لهذا التنوع استنادًا إلى مفهوم التطور الأعمى.

لكن السؤال الأكثر أهمية في سياق هذه المناقشة هو: كيف يمكن لعمليات التطور الداروينية أن تفسر أصل هذا السلوك المعقد في المقام الأول؟ من الواضح أن هذا السلوك لا يمكن أن يعزى إلى القدرات المعرفية المحدودة للنمل. إنه سلوك معقد ومبرمج وراثيًا.

تكمن إحدى المشكلات في التفسير المبسط الذي قدمه هولدوبلر وويلسون في تجاهله لاستخدام النمل العامل لليرقات في عملية بناء العش . يختلف هذا السلوك بشكل جذري عن السلوك الطبيعي لليرقات، وكما هو الحال مع جميع السلوكيات المعقدة المبرمجة وراثيًا، فإنه من غير المرجح أن يكون تحت سيطرة جين واحد. بل يجب أن تكون هناك مجموعة معقدة من الجينات المسؤولة عن هذا السلوك، مما يجعل من غير المحتمل للغاية أن يكون قد تطور من خلال الطفرات العشوائية والانتقاء الطبيعي. يعود السبب في ذلك إلى أن كلًا من الأدلة الرصدية والاستنتاجات المستمدة من تحليل الاحتمالات تشير إلى أن الطفرات العشوائية غير قادرة على توليد مجموعة من الجينات المتناسقة، سواء بوجود أو عدم وجود الانتقاء الطبيعي. ومع ذلك، يبدو أن مجموعة من الجينات هي بالضبط ما هو مطلوب لخلق ميزة وظيفية في السلوك المعماري للنمل الحائك.

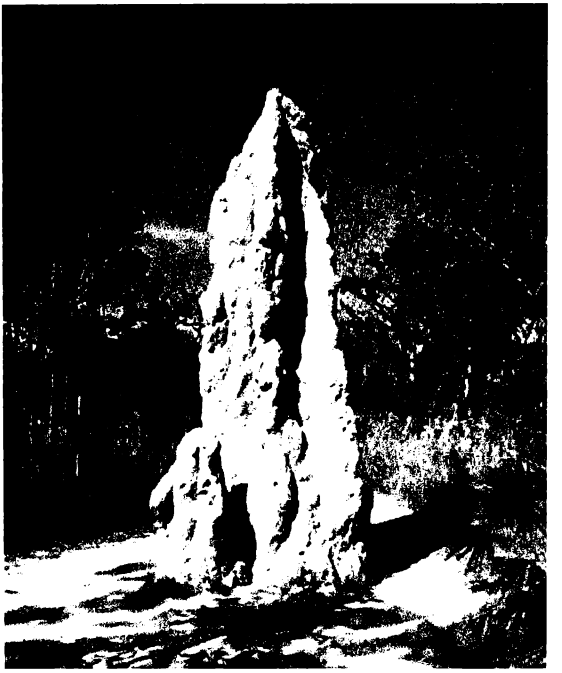
أعشاش النمل الأبيض

بعض أنواع النمل الأبيض تشكل مستعمرات هائلة تصل إلى مليون فرد، وتعتمد في غذائها على الفطريات التي تقوم بهضم السليلوز، منتجةً بذلك نواتج كيميائية ثانوية يتغذى عليها النمل الأبيض. ومثل هذه المستعمرات الضخمة تحتاج بالطبع إلى أعشاش هائلة الحجم. العديد من الأنواع تبني أعشاشها تحت الأرض، وهو أمر منطقي بالنظر إلى أن النمل الأبيض أعمى ويفضل العيش في الظلام. يتضمن العش النموذجي غرفة ملكية، وحضانات للصغار، وحدائق للفطريات، ومكبات للنفايات، وبئرًا للمياه، ونظام تهوية متطور.

بعض الأنواع الأخرى من النمل الأبيض تبني مساكنها فوق سطح الأرض على شكل تلال ضخمة قد يصل ارتفاعها إلى ثلاثة وعشرين قدمًا أو أكثر (انظر الشكل ٥،٢) يصبح هذا الإنجاز المعماري أكثر إثارة للإعجاب عندما نضع في الاعتبار أن طول النمل الأبيض لا يتجاوز ربع بوصة، مما يعني أن هذه التلال بالنسبة لهم تعادل ناطحات سحاب ارتفاعها أكثر من ستة آلاف قدم بالنسبة لنا نحن البشر!

أحد أنواع النمل الأبيض في أستراليا يبني أعشاشًا طويلة ونحيلة، تتجه جوانبها الضيقة نحو الشمال والجنوب، وجوانبها العريضة نحو الشرق والغرب. ولهذا السبب، يُطلق على هذا النوع اسم "النمل الأبيض البوصلة". هذا التصميم الذكي يقلل من ارتفاع درجة الحرارة داخل العش بسبب أشعة الشمس، حيث تكون الشمس أقل حدة عند الشروق والغروب، بينما في

منتصف النهار عندما تكون الشمس في أشدها، يكون الجانب الضيق فقط من العش هو المواجه لها.



الشكل ٥.٢. تلة النمل الأبيض الكاتدرائية الضخمة

تضم العديد من أعشاش النمل الأبيض أيضًا أنظمة تهوية، لا تعمل على التبريد فحسب، بل تزيل أيضًا ثاني أكسيد الكربون. على سبيل المثال، يقوم نوع النمل الأبيض الذي يزرع الفطريات في إفريقيا ببناء أعشاش بحيث يتم الحفاظ على درجة الحرارة الداخلية في حدود درجة واحدة تقريبًا من ٣٠ درجة مئوية، وتركيز ثاني أكسيد الكربون بين ٦٢ و ٨٢ بالمائة .قياسات مماثلة لتلال نوع آخر من النمل الأبيض الأفريقي وجدت أن تركيز ثاني أكسيد الكربون تم الحفاظ عليه بين ٤ و ٦ في المائة، ودرجات الحرارة في حدود خمس درجات

من ٣٠ درجة مئوية الاسمية. وكان هذا في بيئة حيث تختلف درجة حرارة الهواء الخارجي اليومية بمقدار ١٥ إلى ٢٠ درجة مئوية.

حددت التحليلات الهندسية مؤخرًا طرق التصميم المستخدمة لتحقيق مثل هذا الاستقرار. وجدت إحدى هذه الدراسات أن أعشاش نوع من النمل الأبيض الأفريقي (Trinervitermes germinatus) لها جدران خارجية تحتوي على مسام صغيرة وكبيرة تعزز كفاءة نظام التهوية. نفاذية الأكبر هي درجتان من حيث الحجم أكبر من المسام الأصغر. تسمح المسام الأكبر أيضًا بالتصريف الفعال للمياه بعد فترات الأمطار. والأكثر إثارة للإعجاب هو حقيقة أن النمل الأبيض يدير المسام بنشاط عن طريق فتحها أو إغلاقها استجابة لمستوى ثاني أكسيد الكربون المحيط. يبدو أن هذا سلوك آخر مبرمج.

يمكن للنمل الأبيض أيضًا تكييف بناء العش مع الظروف المحلية . على سبيل المثال، كما ذكرت مقالة عام ٢٠١٩، فإن النوع Macrotermes bellicosus يبني نوعين مختلفين من الأعشاش اعتمادًا على البيئة المحلية: "تلال رقيقة الجدران على شكل كاتدرائية في السافانا المفتوحة، ولكن تلال سميكة الجدران على شكل قبة في المناطق الحرجية" .

تصميم فريد من نوعه من قبل جنس النمل الأبيض Cubitermes الذي يعيش في الغابات المطيرة. تتضمن أعشاشها أسقفًا تشبه المظلة مع أفاريز، مما يمنع دخول الماء إلى العش.

على العكس من ذلك، في المناطق القاحلة، تخفف أعشاش النمل الأبيض من نقص الأمطار وتساعد في منع التصحر عن طريق زيادة قوة النظام البيئي. تشرح إحدى التعليقات في مجلة Science أن إحدى الطرق التي تقوم بها التلال بذلك هي من خلال إنشاء "جزر مغذية تدعم العديد من الحيوانات الأخرى إلى جانب النمل الأبيض". يتم تحقيق ذلك عن طريق تركيز المادة العضوية والنيتروجين والفوسفور في التربة.

تصميم آخر مثير للإعجاب للعش، بناه النمل الأبيض المحارب في إفريقيا، يتضمن قوسًا. يتم تحقيق هندسة أكثر روعة حيث يقومون ببناء قاعدتي القوس بشكل منفصل ثم ضمهما معًا في القمة، وهو أمر ممكن فقط إذا كان لدى العمال إحساس بالفضاء ثلاثي الأبعاد. ومرة أخرى، ضع في اعتبارك أنهم يفعلون كل هذا وهم مكفوفون.

يبرز ج .سكوت تورنر جانبًا آخر مثيرًا للإعجاب من تلال النمل الأبيض: طول عمرها. يمكن أن يستمر التل المعين لأكثر من عشر سنوات، وهي فترة أطول من عمر الملكة، بينما يعيش العمال لبضعة أشهر فقط. المعنى الضمني إذن هو أن "التل هو إرث جيل من العمال لجيل لاحق. التل هو إرث وراثي للنمل الأبيض الذي يشغله مثل خيوط الحمض النووي الموروثة من آبائهم".

شبكات العنكبوت

تعد العناكب من بين أمهر المهندسين في الطبيعة .حوالي نصف أنواع العناكب المعروفة (رتبة العناكب) تبني شبكات مصنوعة من الحرير.

تستطيع العناكب صنع أنواع مختلفة من الحرير، اعتمادًا على وظيفتها . على سبيل المثال، عنكبوت غازل الحرير الذهبي لديه سبعة أنواع من غدد الحرير، وستة مغازل. يستخدم بعضها في غزل الشبكات، بالطبع، ولكن الأنواع الأخرى تستخدم لتغليف الفريسة وتغليف البيض. يمكن أن يكون الحرير أقوى من الفولاذ بنفس السماكة، ويمكن أن يتمدد أكثر من المطاط، وهو أكثر لزوجة من معظم الأشرطة. يصف غولدز الحرير بأنه "بسهولة أكثر مواد البناء روعة على هذا الكوكب، وله مصدر واحد: المفصليات".

على الرغم من الجهد الكبير، لم ينتج البشر بعد أي شيء يعادل الحرير وظيفيًا. من خلال الهندسة الوراثية، بُذلت محاولات لتكراره دون نجاح . يتمثل التحدي الرئيسي في تكرار جزيئات البروتين المتطورة والغنية بالمعلومات الموجودة في الحرير الذي تنتجه العناكب وغيرها من المفصليات المنتجة للحرير مثل ديدان القز - وهي بروتينات تكاد تكون ضعف حجم البروتينات البشرية العادية.

البروتينات الأصغر ليس لها قوة أو مرونة حرير العنكبوت. بالنظر إلى التقنيات الوراثية والتصنيعية المتقدمة المتاحة اليوم، فمن اللافت للنظر أنه لا يزال لا يمكن تكرار حرير العنكبوت. هذا يوضح مدى تقدم التصميم الهندسي لحرير العنكبوت.

شبكات العنكبوت الدائرية هي أكثر أنواع شبكات العنكبوت شيوعًا ومعرفةً. يتكون نسيج العنكبوت النموذجي في الحديقة من ٦٥ إلى ١٩٥ قدمًا من الحرير.

تتكون الشبكات من "خيوط لاصقة" للقبض على الفريسة؛ و "أشعة" شعاعية لتثبيت الخيوط اللاصقة؛ و "خيوط جسرية" تعمل كحبال تثبيت للشبكة؛ و "خيوط إشارة" تُعلم العنكبوت من خلال الاهتزازات التي تشعر بها في أرجلها أن الفريسة قد وقعت في الشبكة؛ و "خيوط سحب" للوصول إلى الشبكة من مسكنها.

تتميز أنواع الحرير المستخدمة في الأغراض المختلفة بأنها فريدة من نوعها، حيث تتكون من مجموعات مختلفة من البروتينات. تشمل الأنواع "الحرير المرن" للمطاطية، و "الحرير السحّاب" للمرونة، و "الحرير المتين" للقوة.

يُعد بناء الشبكة نشاطًا هادفًا وموجهًا نحو هدف. يصبح هذا واضحًا بشكل خاص عند مشاهدة العملية في مقاطع الفيديو المتاحة على الإنترنت.

تختلف شبكات العنكبوت بشكل كبير، حتى بين العناكب من نفس النوع، ولا تُعد متطابقة بأي حال من الأحوال. ويرجع السبب الأكثر وضوحًا لهذه الاختلافات إلى أن كل شبكة مصممة خصيصًا لموقعها المحدد. وكما يوضح " آل جولد": "تختلف كل مجموعة من نقاط الربط الأولية؛ ويعتمد عدد الأشعة الشعاعية على الفرصة المتاحة؛ وتبدأ اللولبية اللاصقة من حيث توجد أطول أشعة شعاعية. باختصار، كل شبكة هي إنتاج مخصص".

يفترض آل جولد أن العناكب لديها نوع من القدرة على رسم الخرائط، مما يُمكنها من تطبيق مبادئ التصميم العامة في مجموعة متنوعة من الظروف. ويتضح ذلك، على سبيل المثال، من خلال قدرة العناكب على إصلاح الشبكات التالفة بنجاح.

مصدر آخر للاختلاف هو الوظيفة. عندما نفكر في شبكات العنكبوت، فإننا نميل إلى تخيل النوع الأكثر شيوعًا - الشبكات الشبيهة بالشبكة المنتشرة بين الأشجار أو عوارض السقف أو الجدران. ولكن هناك أنواع أخرى مختلفة، بما في ذلك تلك التي تعمل كأبواب فخاخ في جحور العنكبوت، والأطواق التي تمتد من الجحور، والشبكات التي تعمل كأنابيب على لحاء الأشجار والتي يمكن أن تحتوي أيضًا على أبواب مفصلية.

لقد ذكرتُ سابقًا خيوط الإشارة، والتي تُخبر العنكبوت بوجود فريسة على الشبكة، لكنها تنقل معلومات أكثر من ذلك بكثير .فالعناكب قادرة على تحديد كل من زاوية الفريسة وبعدها عن مركز الشبكة .وتتمكن من تحديد موقع الفريسة باستخدام نفس التقنية الأساسية التي نستخدمها لتحديد موقع مصدر الصوت. فنحن البشر نستخدم الفرق في شدة الصوت الذي تستقبله آذاننا لتقدير الموقع النسبي .وتفعل العناكب شيئًا مشابهًا بناءً على شدة الاهتزازات التي تستقبلها، والتي تشعر بها من خلال أرجلها الثمانية.

من الواضح أن الخوارزمية المستخدمة في معالجة المعلومات من ثمانية مستشعرات أكثر تعقيدًا بكثير من مجرد المستشعرين اللذين يمتلكهما

البشر .وهذا ليس سوى نصف القصة .فقد أثبتت التجارب أن العناكب يمكنها تخزين إحداثيات مواقع ثلاث فرائس على الأقل محاصرة في الشبكة.

لقد ثبت أن تقديم تفسيرات تطورية معقولة لأصل تصميم الحرير والويب يمثل مشكلة. تم اقتراح العديد من النظريات لأصل كليهما، ولكن لم يتم قبول أي منها بشكل عام. يعترف عالم الأحياء والمتخصص في العناكب ويليام شير بأنه "قد يكون من المستحيل تحقيق تفسير وظيفي لأصول الحرير وعادة الغزل". أحد العوامل المعقدة هو أن شبكات بعض العناكب الأكثر ارتباطًا ببعضها البعض متطابقة تقريبًا. كتب شير: "يبدو من المحتمل أن العديد من أنواع الشبكات هي نتاج تطور متقارب - أي أن نفس الشبكة قد تطورت في أنواع غير مرتبطة تكيفت مع ظروف بيئية مماثلة". ولكن كما سأجادل في الفصل ٦، هذا تفسير غير مقنع لأصل السلوكيات المعقدة المبرمجة.

يتمثل التحدي الأكثر جوهرية لأولئك الذين يسعون إلى تقديم تفسير تفصيلي ومقنع سببيًا لأصل بنية الحرير وشبكة العنكبوت في عدد الجينات المشاركة في إنتاج الحرير، والجينومات المعقدة للعناكب. بعد عقود من المحاولات الفاشلة لتقديم تفسير سببي مناسب، يمكن للمرء أن يغفر لاستنتاج أنه ليس لدينا سبب مقنع للافتراض بأن المسار التطوري التدريجي لمثل هذه الركيزة الغنية بالمعلومات موجود بالفعل. وكما سنناقش لاحقًا، هناك الآن بعض الأسباب الإيجابية للنظر في أن مثل هذه الأنظمة الغنية بالمعلومات لها مصدرها شيء آخر غير عملية مادية عمياء بحتة. هنا، يكفي

أن نقول إن السلوكيات والوظائف المرتبطة بكل من غزل الحرير والشبكة تظهر العديد من خصائص الهندسة البشرية، والهندسة عالية المستوى للغاية.

داروين في بيت الحشرات

يقر ريتشارد دوكينز، عالم الأحياء في أكسفورد والملحد المعروف بتعريفه لعلم الأحياء بأنه دراسة الأشياء في الطبيعة التي تبدو مصممة ولكنها ليست كذلك، بأن هناك شيئًا مثيرًا للاهتمام بشكل خاص حول هندسة الحيوانات، حتى وهو يتمسك بموقفه: "إن المصنوعات الحيوانية، مثل بيوت الكاديس والنمل الأبيض، وأعشاش الطيور أو أواني النحل البناء، رائعة"، كما يكتب، "لكنها حالة خاصة بين الأشياء المصممة - فضول مثير للاهتمام".

وبالمثل، يصف الزوجان غولدز بدقة عجائب هندسة الحيوانات، لكنهما يصران مع ذلك على أن هذه القدرات لا تتطلب برمجة معقدة، وبدلاً من ذلك يمكن أن تنشأ من سلوكيات بسيطة: "في النهاية، من الأفضل تفسير العديد من الأمثلة على بناء العناكب والحشرات عن طريق الاستدلال على وجود قدرة أساسية على رسم الخرائط المعرفية، إلى جانب القدرة الكافية على التعلم والتذكر، بدلاً من اللجوء إلى تفسيرات تتطلب برمجة متقنة قادرة على توقع كل طارئ يمكن تصوره". ومع ذلك، كما يعترف الزوجان غولدز، حتى أكثر هذه الفرضيتين بخلاً سيتطلب "ترقية هائلة في الوضع المعرفي الذي كان يُمنح سابقًا للمفصليات"، وهي مخلوقات ذات أدمغة بحجم رؤوس الدبابيس تقريبًا.

ومن المؤكد أن الأبحاث الحديثة قد وجدت أدلة على أن السلوكيات المعمارية الأساسية في بعض الحشرات على الأقل ذات المهارات المعمارية

بسيطة نسبيًا. ومن الأمثلة على ذلك بناء أعشاش النمل. تشير مجموعة واحدة من التجارب إلى أن تنسيق أعمال البناء في أنواع النمل نملة الحديقة السوداء يتم تحقيقه بشكل أساسي من خلال تعديل ثلاثة سلوكيات بسيطة - الحفر وتشكيل الحبيبات وإسقاط الحبيبات على التربة أو الهيكل الحالي .يتم التحكم في هذه السلوكيات من خلال التفاعلات بين الفيرومونات ونموذج يعتمد على حجم جسم النمل. من المفترض أن التعقيد الناتج عن التصميم المعماري هو "نتيجة لعملية منظمة ذاتيًا، والتي تنطوي على التنفيذ المتكرر لهذه الإجراءات البسيطة ومزيج من آليات تنظيمية بسيطة".

لا شك أن هناك جمالًا أخاذًا في هذه الظاهرة، ولكن الأمر ليس بتلك البساطة التي قد يوحي بها هذا الوصف. فمصطلح "التنظيم الذاتي"، وإن بدا جذابًا، ما هو إلا ستارٌ يُخفي فراغًا تفسيريًا عميقًا. فهو لا يُقدم أي آلية واضحة أو تفسير مُحدد، ويتجاهل تمامًا دور البرمجة المُعقدة التي تُسيّر الاستجابات السلوكية للظروف الخارجية. صحيحٌ أن السلوكيات الفردية قد تبدو بسيطة، لكنها في حقيقتها مُنظمة بدقة ضمن نظام متكامل يُفضي إلى تصميمات أعشاش بالغة التعقيد.

وإذا تخيلنا أننا كلّفنا مهندسين ومُبرمجي كمبيوتر بمهمة محاكاة هذه القدرة في روبوتات تُدار بالذكاء الاصطناعي، لسرعان ما اكتشفوا أنهم يحتاجون إلى الذهاب أبعد بكثير من تقنيات البرمجة البسيطة من أجل إنجاز هذه المهمة . وينطبق الشيء نفسه على السلوكيات المُبرمجة المُعقدة التي يبدو

أنها تقف وراء بناء الأعشاش المُذهل لدى النحل والنمل الأبيض وغيرها من الحشرات المُبدعة معماريًا.

إن الأدلة على وجود برمجة في غاية القوة، ودقة البرمجة المطلوبة لإدارة هذه الإنجازات المعمارية تُثير الدهشة والإعجاب. إننا إذن أمام ظاهرة تستحق تفسيرًا أعمق وأكثر إقناعًا من الروايات السطحية التي يُقدمها بعض أنصار التطور بكل حماس.

الفصل السادس: المزيد من الألغاز التطورية

"إن ما يكمن في قلب كل كائن حي ليس نارًا، ولا نفسًا دافئًا، ولا "شرارة حياة ."إنها معلومات، كلمات، تعليمات ... إذا كنت تريد أن تفهم الحياة، فلا تفكر في المواد الهلامية النابضة بالحياة، بل فكر في تكنولوجيا المعلومات"[1].

- ريتشارد دوكينز

لقد تطرقنا إلى العديد من التحديات التي تواجه فكرة أن السلوكيات الحيوانية المعقدة المبرمجة (أو ما يمكن أن نسميه "البرامج السلوكية المعقدة") في الحيوانات يمكن أن تكون قد تطورت بشكل أعمى. ولكن هناك تحديات أخرى لم نتطرق إليها بعد، وتحديات تم التطرق إليها والتي تستدعي تحليلاً أكثر دقة. ننتقل هنا من الفصول التي تركز على فئات معينة من السلوك المعقد المبرمج (مثل الملاحة والهجرة، والسلوك الاجتماعي، وبناء المساكن) إلى فصل يتناول سلسلة من التحديات العامة التي تواجه تطور هذه البرامج السلوكية المعقدة. أول ما ننتقل إليه تم التطرق إليه بإيجاز سابقًا - وهو ظاهرة التقارب التطوري.

شجرة متشابكة

تقدم نظرية التطور لداروين صورة لشجرة الحياة متفرعة تدريجيًا، مع تزايد الاختلافات بين الأشكال بمرور الوقت .ولكن بعد ذلك نواجه ظاهرة تسمى "التقارب التطوري".

---

(١) ريتشارد دوكينز، "صانع الساعات الأعمى" (نيويورك Norton :، ١٩٨٦)، ١١٢

التقارب التطوري يشابه إلى حد كبير مفهوم "التجانس" في علم التصنيف التفرعي، والذي يُعرّف بأنه "تشابه في الصفات الموجودة في أنواع مختلفة، ويعزى هذا التشابه إلى التطور المتقارب - وليس إلى النسب المشترك من سلف واحد".

يعرف دوغلاس فوتويما **التطور المتقارب** بأنه "تطور سمات متشابهة بشكل مستقل في سلالات تطورية مختلفة، وعادةً ما يحدث هذا التطور من سمات سابقة مختلفة أو من خلال مسارات تطورية مختلفة".

يجب التمييز بين التقارب (والتماثل الظاهري) والتنادد، الذي يُعرّف في إطار التطور الدارويني بأنه سمة أو صفة مشتركة بين الأنواع التي تشترك في سلف مشترك حديث نسبيًا. ومن الأمثلة الشائعة للتنادد الأطراف الأمامية للفقاريات، التي تتشارك في نفس التصميم الأساسي بين مختلف أنواع الفقاريات .وفي هذه الحالة، يُفترض أن التشابه ناتج عن السلف المشترك، ومعه، الجينات المشتركة ومسارات التطور المشتركة.

من ناحية أخرى، تُعتبر الحيوانات ذات الخصائص "المتقاربة" حيوانات قد طورت الخصائص المُشتركة بشكل مستقل، وليس من سلف مشترك كان لديه نفس السمة أو الصفة. ومن الأمثلة الكلاسيكية على التطور التقاربي الجرابيات الأسترالية والثدييات المشيمية في قارات نصف الكرة الشمالي. تشمل الثدييات المشيمية آكلات النمل والذئاب والقطط والخلد والفئران. أما الجرابيات الأسترالية المُقابلة فتشمل حيوانات الكنغر والولب والومبت.

ويلخص موقع PBS التعليمي بإيجاز الحكمة التقليدية بين علماء الأحياء التطورية حول هذه النقطة:

توفر الجرابيات في أستراليا والثدييات المشيمية في أمريكا الشمالية مثالاً آخر على التطور المتقارب. لقد انفصلوا عن سلف مشترك منذ أكثر من ١٠٠ مليون سنة، واستمر كل سلالة في التطور بشكل مستقل. على الرغم من هذا الفصل الزمني والجغرافي الكبير، فقد أنتجت الجرابيات في أستراليا والمشيمة في أمريكا الشمالية مجموعة متنوعة من الأنواع التي تعيش في موائل متشابهة ولها أنماط حياة متشابهة. إن أوجه التشابه فيما بينها في الشكل العام وطريقة الحركة والتغذية والبحث عن الطعام تتراكب على اختلافات جوهرية في طريقة التكاثر، وهي السمة التي تعكس بدقة علاقاتها التطورية المتميزة.[١]

يوضح الشكل ٦.١ مثالاً على سمة متقاربة .تحدث السمة المشتركة، التي يشار إليها بالمثلث، في النوعين B وF . ما يجعل السمة متقاربة هو أنها لا تحدث في أي سلف مشترك لـ B وF ، مما يعني أنها ظهرت بشكل مستقل في هذين النوعين دون وجود مسار تطوري مشترك يرجع إليهما.

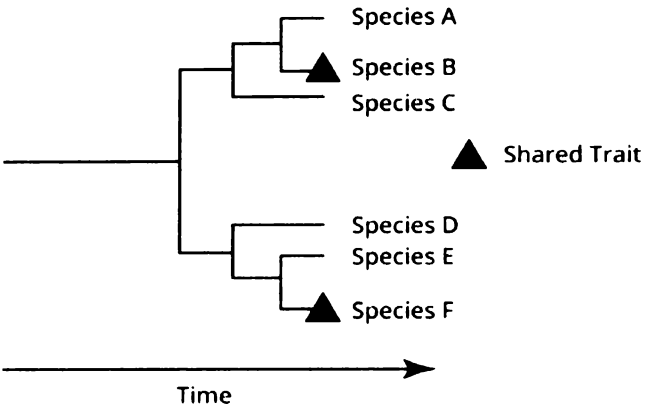
يمثل ظهور مثل هذه السمات المشتركة معضلة بالنسبة لنظرية التطور القياسية لعدة أسباب. أولاً، عندما يقوم علماء التطور ببناء أشجار النشوء

---

(١) "التقارب :الجرابيات والمشيميات"، مكتبةPBS Evolution ، مؤسسة WGBH التعليمية و Clear Blue Sky Productions، ٢٠٠١، https://www-tc.pbs.org/wgbh/evolution/library/01/4/pdf/l_014_02.pdf.

والتطور، فإنهم يفترضون أن الأنواع التي تشترك في سمات متشابهة تفعل ذلك لأنها ورثت تلك السمة من سلف مشترك. لكن التطور المتقارب يمثل حالات فشل فيها هذا الافتراض، لأنه لا يمكن تفسير السمة بالوراثة المشتركة. هذا يتحدى الافتراضات التي تستخدم لبناء الأشجار التطورية . ثانيًا، غالبًا ما يستشهد علماء الأحياء التطورية باستحالة ظهور نفس السمة في سلالات متعددة. يوضح ريتشارد دوكينز الأمر على هذا النحو: "من المستبعد للغاية أن يتم السير في نفس المسار التطوري مرتين". يعتقد المدافعون الآخرون عن التطور أن دوكينز مخطئ، وأن الطفرة العشوائية والانتقاء الطبيعي يمكن أن ينتجا نفس النتيجة (ويشرحان التقارب)، كما سنرى لاحقًا. ومع ذلك، سيتبين أيضًا أن هذه التفسيرات التطورية الأخرى غير كافية.

من الأمثلة على حالات التقارب المتعددة أربعة أنواع من الطيور التي تتغذى على الرحيق وتشترك في سمة معينة - وهي المنقار الطويل - ولكن بدون وجود سلف مشترك يمتلك تلك السمة. الأنواع الأربعة هي الطيور الطنانة (الأمريكتان)، وآكلات العسل (أستراليا)، وعصافير العسل (هاواي)، والطيور الشمسية (أفريقيا). يُعتقد أن هذه السمة المشتركة - المنقار الطويل الذي يسمح لها بالتغذية على رحيق النباتات - قد تطورت بشكل مستقل في هذه الحالات الأربع، وهذا ما يعرف بـ "التطور المتقارب".



الشكل ٦.١: السمات المتقاربة

كما يوحي المثال المذكور أعلاه، فإن مفهوم التطور التقاربي لا يقتصر على السمات الفيزيائية فحسب، بل يتعداه ليشمل السمات السلوكية المتقاربة أيضاً. في كتابه "حل الحياة :حتمية وجود البشر في كون وحيد"، يوثق عالم الأحياء التطوري في جامعة كامبريدج، سيمون كونواي موريس، العديد من حالات التقارب الظاهرة، والتي ينطوي الكثير منها على سلوكيات مشتركة . يكتب قائلًا: "هناك بالفعل أدلة على اكتساب سلوكيات معقدة بشكل متقارب"، و"إن دور التقارب في المجال السلوكي سيفضي إلى المزيد من المفاجآت".

لماذا يتكرر تعثر عملية تطورية عمياء على نفس الحلول؟

يقدم عالم الأحياء التطوري بجامعة روتجرز، جورج ماكغي، مئات الأمثلة على التقارب في كتابه المعنون بشكل مناسب "التطور التقاربي" يشرح ماكغي أنه كان يُعتقد سابقًا أن التطور التقاربي ينتج بشكل أساسي عن القيود

الوظيفية، حيث "يتبع الشكل الوظيفة". ومع ذلك، يؤكد ماكغي أن الأبحاث الحديثة أظهرت أن معظم حالات التطور التقاربي ترجع إلى القيود التنموية . يكتب قائلاً: "لقد تم إنتاج نفس الأشكال من خلال التوجيه المتكرر للتطور على طول نفس المسار التنموي. لدى الانتقاء الطبيعي مجموعة محدودة من الأشكال المحتملة للاختيار من بينها، والتطور التقاربي هو النتيجة الحتمية". وفقًا لهذا المنظور، قد تتطور الحيوانات غير ذات الصلة بطرق متشابهة للغاية، وبالنظر إلى المعرفة الهندسية الكافية حول قيود التصميم، يمكننا حتى التنبؤ في كثير من الحالات بالشكل المتقارب أو السلوك المتقارب الذي قد يظهر.

التفسيرات التفصيلية والمقنعة

لكن التحدث بشكل عام عن قيود التصميم شيء، وتقديم تفسيرات مفصلة ومقنعة لحالات التقارب المختلفة شيء آخر تمامًا. لا تزال هذه التفسيرات التفصيلية والمقنعة غير موجودة بشكل كاف في الأدبيات العلمية . لا تفسر قيود التصميم جميع حالات التقارب، وخاصة في مجال سلوك الحيوان. في كثير من الحالات، إن لم يكن معظمها، تكون السمات السلوكية عرضية وليست نتيجة لبعض القيود.

سنركز هنا على السلوكيات المتقاربة، وهي منطقة يتم تناولها بشكل أقل تكرارًا من السمات الفيزيائية المتقاربة. سنراجع بعض الأمثلة على ذلك إلى جانب بعض الحالات التي لم تتم مناقشتها سابقًا.

الملاحة

لقد تطورت العديد من القدرات الملاحية الموصوفة سابقًا بشكل مستقل في مجموعة واسعة ومتنوعة من الحيوانات. لدى العديد من أنواع الحيوانات حاسة مغناطيسية تستخدمها كبوصلة. وهي موجودة في بعض الحيوانات التي تشغل جميع المجموعات الرئيسية من الحيوانات الفقارية والرخويات والقشريات والحشرات. أو لنأخذ مثالًا آخر، تستخدم حيوانات مختلفة الشمس كبوصلة، بما في ذلك الفراشات والنمل والنحل والطيور. هذه آلية معقدة، تنطوي على خوارزمية لحساب التعويض عن حركة الشمس عبر السماء.

بعض الحيوانات قادرة أيضًا على استخدام الضوء المستقطب من الشمس كمصدر لتحديد الاتجاه. تشمل الحيوانات المعروفة بقدرتها على اكتشاف الضوء المستقطب نحل العسل والنمل والصراصير والجراد. لدى مجموعة أخرى متنوعة من الحيوانات إحساس بالخريطة يمكّنها من الملاحة الحقيقية. وهذا يشمل الطيور والسلاحف البحرية والكركند والرخويات.

إذا كانت جميع أو معظم أنواع الحيوانات تمتلك هذه الأدوات الملاحية، فيمكن للمرء ببساطة أن يعزوها إلى النسب المشترك ويفسر الكائنات الشاذة التي لا تمتلك هذه القدرة على أنها ضحية "التطور العكسي" - أي أن الحيوان فقد القدرة في مكان ما في تاريخه التطوري. ولكن بدلاً من ذلك، لدينا بعض الأنواع التي تمتلك هذه القدرات في حين أن العديد من الأنواع الأخرى في الجوار التطوري، بما في ذلك الأسلاف (المفترضة) المشتركة، تفتقر إليها على

ما يبدو، مما يجبر علماء التطور على اللجوء إلى تفسير التطور المتقارب مرارًا وتكرارًا.

الهندسة المعمارية

تشير أيضًا حالات مختلفة من تصميم العش عبر مملكة الحيوان إلى التقارب. ومن الأمثلة اللافتة للنظر بشكل خاص هو النمل الحائك والطيور التي تحيك أو تخيط الأعشاش. كلاهما يستخدم طرق نسج معقدة لتصميم أعشاشهما. هناك تقارب آخر وهو أن نسج العش يحدث في أربع مجموعات مختلفة من النمل بعيدة الصلة. يعد بناء الأعشاش ذات درجة الحرارة المنظمة سلوكًا متقاربًا آخر يحدث في خلايا النحل وأكوام النمل الأبيض وبعض أعشاش الطيور.

السلوك الاجتماعي

يُعتقد أن السلوك الاجتماعي نشأ بشكل مستقل في غشائيات الأجنحة (التي تشمل النمل والنحل والدبابير)، وكذلك في أبناء عمومتهم البعيدة، النمل الأبيض، الذين ينتمون إلى فرع تصنيفي مختلف (الفرع التصنيفي هو مجموعة تتكون من سلف مشترك إلى جانب فروعه المختلفة المنحدرة). قارن ويلسون السلوك الاجتماعي لغشائيات الأجنحة الاجتماعية بالنمل الأبيض، مشيرًا إلى العديد من الاختلافات ولكن أيضًا العديد من أوجه التشابه . من بين أوجه التشابه هياكل الطبقات الاجتماعية، واستخدام المسارات الكيميائية، وتثبيط الطبقات من خلال الفيرومونات، والاستمالة المشتركة بين الأفراد، وتعقيد بنية العش، وتقاسم الطعام والسوائل (التبادل الغذائي) .

هناك أيضًا شيوع في الآليات الخوارزمية التي تتحكم في التعبير عن السلوكيات الاجتماعية. ومن السلوكيات الشائعة الأخرى لدى النمل والنمل الأبيض الزراعة، وهي ظاهرة غير عادية للغاية في مملكة الحيوان. ومع ذلك، لا يُعتقد أن هذه السلوكيات تنبع من سلف مشترك.

التطور والتقارب

إن جميع السلوكيات المذكورة آنفًا تعزز بشكل كبير من قدرة الكائن الحي على البقاء والازدهار. ومع ذلك، فإن كون سمة ما تؤدي وظيفة مهمة لا يفسر كيف تطورت بشكل مستقل عدة مرات عبر المملكة الحيوانية. وكما يقول المثل القديم، فإن تفسير "بقاء الأصلح" يختلف عن تفسير "ظهور الأصلح". وكما أشار أحد علماء الأحياء في مجلة نيتشر Nature، "إن النظرية التطورية الحديثة جيدة بشكل ملحوظ في نمذجة بقاء الأصلح، ولكنها ليست جيدة في نمذجة ظهور الأصلح."

أكد داروين أن الانتقاء الطبيعي يفسر وجود أعضاء متشابهة لم تكن موجودة في سلف مشترك. كتب قائلًا: "كما أن رجلين قد يتوصلان بشكل مستقل إلى نفس الاختراع، كذلك يعمل الانتقاء الطبيعي لصالح كل كائن حي، مستغلًا الاختلافات المتشابهة، فيعدل أحيانًا بطريقة متشابهة جدًا جزأين في كائنين حيين، لا يرجع الكثير من تركيبهما المشترك إلى الوراثة من نفس السلف".

واتفق إرنست ماير، عالم الأحياء التطوري الكبير بجامعة هارفارد في القرن العشرين، مع داروين على أن قوة الانتقاء الطبيعي تفسر التطور

التقاربي: "يوضح التقارب بشكل جميل كيف أن الانتقاء قادر على الاستفادة من التباين الجوهري للكائنات الحية لإنتاج أنواع متكيفة مع أي نوع تقريبًا من البيئة المتخصصة". ولكن مرة أخرى، هل تفسر هذه الادعاءات حقًا كيف تنشأ هذه السمات المعقدة في المقام الأول، وبشكل متكرر؟ إذا أردنا اتباع الأدلة، يجب ألا نفترض بل نسأل عما إذا كان التطور المتكرر لنفس السمة المعقدة من المحتمل أن يحدث بالنظر إلى آلية الطفرة العشوائية والانتقاء الطبيعي.

أحد الموضوعات الرئيسية في كتاب موريس "حل الحياة" هو أن الظهور الواسع للتقارب البيولوجي هو دليل على القيود المفروضة على التطور. ويكتب قائلاً: "التقارب موجود في كل مكان، وقيود الحياة تجعل ظهور الخصائص البيولوجية المختلفة محتملًا للغاية، إن لم يكن حتميًا". ويختلف موريس بشدة مع وجهة نظر ستيفن جاي جولد بأن تاريخ التطور مليء بالأحداث العرضية، موضحًا أن كتابه يهدف إلى "دحض فكرة "هيمنة الصدفة".

وفيما يتعلق بالسلوك الاجتماعي، يعلق موريس قائلاً: "هناك بالفعل دليل على اكتساب السلوك المعقد المتقارب"، ويخلص إلى أن "الظهور المتكرر لمثل هذه المجتمعات، وعلى الأقل دليل على نزوح وانقراض النظراء الأقل نجاحًا في نهاية المطاف، يوحي بأن مثل هذا الترتيب هو أمر لا مفر منه بيولوجيًا".

ومع ذلك، تشير الأدلة إلى أنه ليس أمرًا لا مفر منه، بل إنه عرضي، لأن مجموعات قليلة فقط من الأنواع العديدة من النمل والنحل والدبابير هي اجتماعية. وفي الواقع، على عكس بعض السمات الجسدية، مثل تصميمات الأجنحة أو تصميم جسم وزعانف الأسماك، لا يوجد مبدأ أساسي من شأنه أن يجعل العديد من السمات المعقدة حتمية. وفي الواقع، وهذا يتطلب التكرار، إذا لم يكن المرء متمسكًا بنسخة مادية من التطور، فلا يوجد سبب يجعل التطور الأعمى يجعل ظهورها المتكرر والمستقل محتملًا أو متوقعًا.

تتشارك العديد من الحيوانات الطائرة في سمات مشتركة في تصميم أجنحتها، ويعود السبب التقني وراء ذلك إلى أن الأجنحة الفعالة تمتلك خصائص محددة تزيد من قوة الرفع وتقلل من قوة السحب، مما يفرض قيودًا على تصميم الأجنحة التي تحقق أداءً كافيًا للطيران. تنطبق أسباب مماثلة على التشابه في تصميم زعانف الأسماك، ولكن في معظم السلوكيات، توجد دائمًا حلول متعددة ومتميزة متاحة، حيث لا تخضع الحلول السلوكية لنفس القيود التي تخضع لها الخصائص الفيزيائية. قد يلبي أي عدد من السلوكيات حاجة أو وظيفة معينة، ومثال على ذلك الأنواع المختلفة من أجهزة الاستشعار والوظائف الملاحية في الحيوانات، بالإضافة إلى العديد من استراتيجيات الهجرة.

ينطبق الشيء نفسه على السلوكيات الاجتماعية والهندسة المعمارية وأنظمة الاتصال عبر أنواع الحشرات المختلفة. على الرغم من أنها تتشارك كثيرًا من حيث وظائف ومزايا المستعمرة، إلا أن هناك اختلافًا كبيرًا في

كيفية تنفيذ هذه الوظائف، ويتضح ذلك في الاختلافات بين مستعمرات النحل والنمل والنمل الأبيض الاجتماعية. ما يعنيه هذا، مرة أخرى، هو أن مظاهر السلوكيات المعقدة المبرمجة المحددة ليست مقيدة بشدة ولا حتمية، بل هي عرضية. وبالتالي، لا يمكن للمرء أن يستند إلى قيود التصميم بالإضافة إلى الانتقاء الطبيعي حتى يبدأ في شرح السلوكيات المبرمجة المعقدة المختلفة على نطاق واسع التي نجدها في مملكة الحيوان. بدلاً من ذلك، يجب أن نبحث في مكان آخر عن تفسير مرضٍ.

استخدم العديد من علماء الأحياء التطورية مفاهيم مستمدة من علم الأحياء التطوري التنموي ("evo-devo") لشرح التقارب في وظائف أعضاء الحيوان. قام عالما الحشرات آمي توث وجين روبنسون بتوسيع نطاق علم الأحياء التطوري التنموي لشرح التطور المتقارب للسلوك الاجتماعي، وكدليل على هذا النموذج، يستشهدان بالوجود المحتمل لمجموعات أدوات جينية مشتركة في مختلف الحشرات الاجتماعية. تشبه هذه الفرضية إلى حد كبير فرضية "الخطة الأساسية" لأصل السلوك الاجتماعي الموضحة في الفصل. كما يدعم عالم الأحياء الأوروبي رينالدو بيرتوسا وجهة نظر علم الأحياء التطوري التنموي القائلة بأن الهياكل الجينية والعصبية المشتركة تعزز تطوير سلوكيات مماثلة، ويؤكد أن هناك أدلة على الحفاظ على الدوائر العصبية عبر الأنواع المختلفة، وأن "الاختلافات الوظيفية يمكن أن تنشأ عن طريق إعادة تحديد الدوائر المشتركة".

من الممكن أن تفسر الدوائر العصبية المشتركة تقارب السلوكيات البسيطة نسبيًا عبر الأنواع، كما اقترح بيرتوسا. ومع ذلك، كما نوقش في الفصل ٤، تشير الأدلة إلى أن هناك عددًا كبيرًا من الجينات وآليات إضافية فوق الجينية تشارك في السلوك الاجتماعي، وغالبًا ما تكون هذه الجينات والآليات الأخرى فريدة من نوعها بالنسبة للأنواع الاجتماعية .تتعارض هذه الملاحظة مع فكرة مجموعة الأدوات المشتركة التي تتكون من عدد صغير من الجينات.

مشكلة أخرى في تفسير علم الأحياء التطوري التنموي هي أن العديد من السلوكيات المتقاربة، مثل الملاحة والاتصال، تنطوي على هندسة النظم المعقدة. علم الأحياء التطوري التنموي، وهو عملية عمياء، لا ينتج تصميمًا منسقًا من أعلى إلى أسفل، وبالتالي فهو مرشح ضعيف لمعالجة الجوانب العديدة التي ينطوي عليها الأمر في هندسة النظم السلوكية.

حتى عالم الأحياء التطوري المتشدد جيري كوين، من جامعة شيكاغو، يعترف بقيود الاستئناف للتطور المتقارب. نعم، هناك العديد من أوجه التقارب بين الجرابيات والثدييات المشيمية، ولكن كما يلاحظ كوين، "هناك أيضًا أنواع عديدة من الثدييات التي تطورت في أماكن أخرى ليس لها ما يعادلها بين الجرابيات. لا يوجد حيوان جرابي يقابل الخفافيش (أي حيوان جرابي طائر)، أو الزرافات والفيلة .والأكثر دلالة على ذلك أن أستراليا لم تطور أي حيوان يقابل الرئيسيات، أو أي مخلوق ذو ذكاء يشبه الرئيسيات".

هذه الأمثلة المضادة هي دليل على أن ظهور الأنواع التي تظهر خصائص مشتركة هو أمر عرضي إلى حد كبير وليس حتميًا.

التصميم والغائية في السلوك المتقارب

كل فئة من فئات السلوك المبرمج المعقد التي ناقشناها في هذا الكتاب تتضمن سلوكيات مشتركة منتشرة بين أنواع حيوانية لا تشترك في سلف مشترك أظهر هذا السلوك. تبدو هذه السلوكيات متقاربة، كما هو شائع استخدام هذا المصطلح، لكن التقارب هو مجرد كلمة تصف هذه الظاهرة، ولا يفسر أصلها. التفسيرات التطورية الرئيسية للتقارب هي قيود التصميم والضغط الانتخابي.

على سبيل المثال، يؤكد ماكغي أن "المعايير المسبقة للطبيعة هي قيود وظيفية غير واعية تفرضها قوانين الفيزياء والهندسة". بمعنى أنه بالنسبة لوظائف معينة، يُقال إن هناك نطاقًا محدودًا جدًا من التصميمات الهندسية التي يمكن أن تعمل (قيود التصميم)، ومن بين هذه التصميمات، بعضها متفوق بشكل كبير على الآخر بحيث يميل الضغط الانتخابي إلى دفع العملية التطورية نحو الخيارات المتفوقة واستبعاد الخيارات الأدنى، وإن كانت قابلة للعمل. من الواضح أن بعض الحلول المحتملة تعمل بينما البعض الآخر لا يعمل، لكن هذه الحقيقة لا تعالج بأي شكل من الأشكال مدى تعقيد الحلول القابلة للتطبيق، وما إذا كان من المحتمل أن تتطور عبر عمليات غير موجهة مثل الطفرة العشوائية والانتقاء الطبيعي. إن الاستدعاء الغامض لعوامل مثل القيود الوظيفية أو المادية لا يتناول بأي شكل من الأشكال المسارات الطفرية

المحددة التي يمكن أن ينشأ من خلالها نظام بيولوجي معقد. إن الاحتجاج بمثل هذه العوامل كتفسير هو، مرة أخرى، الخلط بين "البقاء" و"الوصول".

يكتب عالم البيئة السلوكية الفرنسي لوك آلان جيرالدو: "يمكن الاستدلال على أن الانتقاء الطبيعي يتسبب في التطور نحو تصميم محسن للأعضاء والسلوك من خلال أمثلة على التطور المتقارب". لكن يبدو أنه يدعم التطور الداروينى للسمات البيولوجية ليس لأن هذا يبدو مرجحًا بناءً على ما نعرفه عن التعقيد البيولوجي، ولكن ببساطة لأن هذه الميزات المعقدة تظهر بشكل متكرر في جميع أنحاء الطبيعة وهو ملتزم بالتفسير التطوري . التطور الأعمى هو مطرقته، لذلك يجب أن يكون التقارب مسمارًا.

لتوضيح الأمر، الحجة المقدمة عادة ليست بسيطة مثل "التطور يسبب التقارب، لأن نظرية التطور صحيحة". الحجة الفعلية تسير على النحو التالي:

أشكال معينة من السلوك قابلة للتكيف بدرجة عالية.

نظرًا لأن هذه الأشكال من السلوك قابلة للتكيف بدرجة عالية، فإن الانتقاء الطبيعي يفضلها.

هذا يخلق ضغطًا انتخابيًا لهذه السلوكيات.

لذلك، تتطور مثل هذه السلوكيات بشكل مستقل في مجموعات مختلفة من الحيوانات.

وخلاصة القول، تُواجهنا هنا مشكلتان أساسيتان. أولاً، إنّ كثرة الأمثلة التي تُناقض فكرة التقارب السلوكي تُشير إلى أنّ العَرَضِيّة، وليست الضرورة، هي السائدة في هذا السياق. بمعنى آخر، يبدو أنّ ظهور سلوكيات مُتشابهة لدى كائنات مختلفة ليس نتيجة حتمية لقوانين طبيعية مُحددة، بل هو أقرب إلى مُصادفة تفرضها ظروف بيئية أو عوامل أخرى غير مُتوقعة.

ثانيًا، وهو الأهم، أنّ الانتقاء الطبيعي لا يعمل إلا على الصفات الموجودة بالفعل. وبالتالي، فإنّ أي تغيير جيني يؤدي إلى ظهور سلوك مُعين يجب أن ينشأ أولاً بفعل تباين عشوائي، سواء كان ذلك على مستوى الطفرات الجينية أو غيرها من الآليات.

هذه النقطة الأخيرة يغفل عنها - أو يتجاهلها - دعاة التطور التقاربي في كثير من الأحيان، رغم أهميتها البالغة. فكما رأينا، تُعدّ العشوائية، حتى عند اقترانها بالانتقاء الطبيعي، آلية ضعيفة للغاية في إحداث التغييرات المُنسقة والمتعددة اللازمة لخلق أي ميزة تكيفية تُذكر، ناهيك عن تفسير ظهور سلوكيات مُعقدة ومتشابهة بشكل مُتكرر في كائنات مُختلفة.

التطور وانهيار السلوكيات المبرمجة المعقدة

دعونا نتعمق أكثر في مسألة الميزة التكيفية. يواجه مفهوم تطور السلوكيات المبرمجة المعقدة من خلال عملية تدريجية وعمياء من التجربة والخطأ تحديًا رئيسيًا متعلقًا بالطبيعة الوظيفية لهذه السلوكيات. يتطلب التطور التدريجي لسلوك جديد ومعقد مبرمج تغييرات في عناصر متعددة من النمط الظاهري تشارك في التحكم في هذه السلوكيات، على سبيل المثال :

١) علم وظائف الأعضاء، ٢) بنية الدماغ، ٣) أجهزة الاستشعار، و ٤) خوارزمية الدماغ.[١]

بما أن هذه العناصر الأربعة على الأقل تشارك في التحكم في السلوكيات المبرمجة المعقدة، فإن الاختلافات والطفرات الجينية التي تسبب تغييرًا في السلوك المبرمج يجب أن تكون متوافقة على الأقل مع هذه العناصر الأربعة، وأن تسمح بالتماسك الوظيفي. قد يؤدي التغيير الجيني في عنصر واحد غير متوافق مع عنصر آخر إلى عدم حدوث أي تغيير سلوكي، أو إلى سلوك غير متكيف. في أسوأ الحالات، قد يؤدي ذلك إلى انهيار كامل للسلوك المبرمج المعقد.

إن مشاركة أربعة عناصر ظاهرية على الأقل تعني أيضًا أن حدوث السلوك الجديد يتطلب عادة حدوث تغييرات متعددة. في حين أنه ليس من الضروري بالضرورة أن تحدث هذه التغييرات في وقت واحد، إلا أنها على الأقل تحتاج إلى الحدوث بطريقة منسقة ومتماسكة وقابلة للتكيف. هذا ضروري ليكون متسقًا مع فرضية داروين القائلة بأن كل تغيير تدريجي يجب أن يكون مفيدًا.

---

(١) يصف موريسيو بابيني أهمية هياكل الدماغ والخوارزميات: "يتشكل السلوك في النهاية من خلال القوى التطورية، ولكن يتم تحديده بشكل قريب من خلال عمل الشبكات العصبية داخل الجهاز العصبي المركزي للحيوانات .ويترتب على ذلك أن التطور السلوكي يتحقق من خلال التأثير على التطور العصبي". موريسيو ر. بابيني، "علم النفس المقارن :التطور وتنمية السلوك" نيويورك Psychology : Press، ٢٠٠٨، ١٥٩.

تكمن المشكلة في أن احتمالية حدوث تغييرات جينية منسقة متعددة منخفضة للغاية، كما هو موضح في الفصلين ٣ و ٤ فيما يتعلق بسلوكيات الهجرة والملاحة، والسلوك الاجتماعي للحشرات. تنطوي سلوكيات الملاحة والهجرة على العديد من السمات المعقدة والمتكاملة بشكل كبير. من غير المعقول من الناحية النظرية أن تتطور كل هذه السمات (مثل فسيولوجيا الملاحة، وخوارزميات الملاحة، وفسيولوجيا الهجرة، وخوارزميات الهجرة) بطريقة منسقة من خلال الطفرات العشوائية والانتقاء الطبيعي. في حالة الاتصالات الاجتماعية، لكي تكون إشارات الفيرومون فعالة، يجب أن يكون المتلقي قادرًا على اكتشاف الفيرومونات والتمييز بينها. هذه ليست مهمة سهلة عندما يستخدم الحيوان العديد من مركبات الفيرومون المختلفة كما هو الحال، على سبيل المثال، في نملة النجار. يجب أن تكون آلية الاستشعار متطورة للغاية للتمييز بين جميع مجموعات المركبات. كتب تريسترام وايت، "بشكل عام، لا تتطلب الفيرومونات التعلم: يبدو أنها "فطرية" أو "مبرمجة مسبقًا" أو "جاهزة للاستخدام"". تتمثل إحدى المشكلات الرئيسية في شرح تطور اتصالات الفيرومون في تزامن المرسل والمستقبل. يجب أن يتلقى المستقبل المعلومات من المرسل ويفك تشفيرها بنفس المعنى المقصود . في الحشرات، نادرًا ما ترتبط جينات إرسال واستقبال الفيرومونات، وغالبًا ما توجد على كروموسومات مختلفة. نظرًا لأنها مستقلة، فمن غير المرجح تنسيق التغييرات.

هل يستطيع التطور المحايد إنقاذ الوضع؟

اقترح البعض أن الطفرات المحايدة تتراكم وتؤدي في النهاية إلى سمات وظيفية جديدة مثل السلوكيات المبرمجة المعقدة. تم اقتراح النظرية المحايدة للتطور الجزيئي لأول مرة من قبل عالم الأحياء الياباني موتو كيمورا. الادعاء المركزي للنظرية هو أن الطفرات المحايدة - وهي التغييرات التي لا توفر ميزة ولا عيبًا للكائنات الحية - يمكن أن تتراكم دون أن تخضع للانتقاء الطبيعي، مما يؤدي إلى "انجراف" جيني عشوائي بمرور الوقت. كتب مايكل لينش، مؤيد النظرية، "من الصعب تفسير العديد من جوانب البنية الجينومية وبنية الجينات ومسارات التطور دون الاستعانة بالقوى غير التكيفية للانجراف الجيني والطفرة".

ومع ذلك، لا تزال النظرية مثيرة للجدل. يعلق علماء الأحياء أندرو كيرن وماثيو هان على أن البحث الجينومي منذ تقديم النظرية المحايدة قبل خمسين عامًا أظهر أن "كل سطر من الأدلة الأصلية للنظرية المحايدة تم دحضه الآن". وخلصوا إلى أن الطفرات المحايدة ليست عاملاً رئيسياً في التطور لأن الانتقاء الطبيعي كان له الدور الغالب في التباين الجيني. رد لينش ومجموعة من زملائه في مجلة التطور Evolution، مؤكدين أن الأدلة تُظهر أن:

(١) جزء كبير من جينوم الكائنات الحية التي تمت دراستها حتى الآن عرضة للطفرات المحايدة فعليًا فيما يتعلق بتأثيراتها على اللياقة البدنية، وبالتالي تتطور في ظل الانجراف الجيني.

(٢) الغالبية العظمى من الطفرات الناشئة حديثًا التي تؤثر على اللياقة البدنية (أي الطفرات غير المحايدة) ضارة، والطريقة السائدة للانتقاء الطبيعي هي التنقية في طبيعتها، وإزالة هذه الطفرات الضارة من السكان.

ما يبدو أن الجانبين يتجاهلانه في هذا الشد والجذب هو احتمال أن لا التطور المحايد ولا التطور عن طريق الانتقاء الطبيعي يمكن أن يولد هياكل جديدة بشكل أساسي وسلوكيات جديدة وظيفية. تحدث الطفرات المحايدة ويمكن أن تتراكم في الجينوم. ومع ذلك، فإن تلك المحايدة حقًا لا يتم اختيارها بشكل إيجابي، مما يعني أنه لا يوجد سبب للانتقاء الطبيعي للحفاظ على تغييرات محددة ضرورية لبعض السمات. وهكذا يلاحظ كوين أن الانجراف الجيني "عاجز عن خلق تكيفات" وأن "تأثير هذه العملية على التغيير التطوري المهم ... ربما يكون ضئيلاً، لأنه لا يملك القوة التشكيلية للانتقاء الطبيعي. يبقى الانتقاء الطبيعي هو العملية الوحيدة التي يمكن أن تنتج التكيف ". هذا يعني ضمناً أن الطفرات المحايدة لا تلعب أي دور مهم في أصل السلوكيات المبرمجة المعقدة.

إذن أين نحن الآن، فيما يتعلق بفرص التطور المحايد أو التطور عن طريق الانتقاء الطبيعي؟ لقد تركنا في مأزق. فقط أقلية صغيرة من الطفرات التي تحدث مفيدة ويمكن اختيارها. لكن تطوير السلوك المبرمج المعقد يتطلب عددًا كبيرًا من الطفرات المفيدة الفردية التي تنجو من الانتقاء. وكما رأينا أعلاه، يتفاقم التحدي بسبب حقيقة أن الطفرات المفيدة يجب، في كثير

من الحالات، أن تكون منسقة مع طفرات مفيدة أخرى لتكون مفيدة على الفور.

أيهما أتى أولاً؟

من السهل تجاهل مشكلة التنسيق، لكن إذا أردنا بناء نموذج تطوري واقعي لأصل السلوكيات المبرمجة المعقدة، يجب أن نواجه هذه المشكلة وجهاً لوجه. إذا افترضنا أن التغيرات الظاهرية المرتبطة بالسلوكيات المبرمجة المعقدة ليست متزامنة، يبرز السؤال التالي: أيهما تغير أولاً: الشكل أم الوظيفة (السلوك)؟ داروين تصارع مع هذه القضية، كاتباً:

"لقد أُثير اعتراض على الرأي السابق حول أصل الغرائز، وهو أن "التغيرات في البنية والغريزة يجب أن تكون متزامنة ومتوافقة بدقة مع بعضها البعض، لأن أي تعديل في أحدهما دون تغيير فوري مماثل في الآخر كان سيؤدي إلى نتائج كارثية"... تعتمد قوة هذا الاعتراض كليًا على افتراض أن التغييرات في الغرائز والبنية تحدث بشكل مفاجئ."

بمعنى آخر، داروين يجيب على هذا التحدي بالتأكيد على أن التغييرات في كل من السلوك والبنية كانت تدريجية. واعترف بأن تفسيره ترك الكثير من الأمور دون تفسير، لكنه قلل من أهمية هذه الفجوة: "من الصعب تحديد، وليس مهمًا بالنسبة لنا، ما إذا كانت العادات تتغير بشكل عام أولاً ثم البنية بعد ذلك، أو ما إذا كانت التعديلات الطفيفة في البنية تؤدي إلى تغير العادات؛ ربما يتغير كلاهما في كثير من الأحيان بشكل شبه متزامن."

ومع ذلك، فإن هذه المعضلة أبعد ما تكون عن كونها غير مهمة، لأن كلا السيناريوهين اللذين اقترحهما داروين غير كافيين. إذا سبق أحدهما الآخر، فإننا ببساطة نعود إلى الاعتراض الذي أثاره داروين لكنه فشل في الإجابة عليه. أما إذا تغيرت البنية والغريزة بشكل شبه متزامن - أي معًا في عملية تدريجية للغاية من التبادل التدريجي وصولاً إلى البنية/الغريزة الجديدة بشكل أساسي، فإن التحدي يكمن في التفاصيل. كيف يمكن للتطور عن طريق الانتقاء الطبيعي أن يجتاز تدريجيًا ليس فقط فجوة انتقالية واحدة شاقة بل اثنتين في نفس الوقت؟ ما هي مسارات التطور التفصيلية التي يقدمها، سواء داروين أو أي من المؤيدين الحاليين للنظرية الداروينية الجديدة، فيما يتعلق بأي سلوك مبرمج معقد في مملكة الحيوان؟ مثل هذه التفسيرات نادرة للغاية، ربما لأنه، كما أوضحنا سابقًا، فإن احتمال أن يؤدي التطور إلى إنتاج العديد من التغييرات الجينية المتعددة المنسقة هو احتمال بعيد للغاية.

كما رأينا، تعتمد العديد من السلوكيات على وجود وظائف فسيولوجية مناسبة؛ وإلا فلا يمكن تنفيذها. وعلى العكس من ذلك، يمكن أن تكون وظيفة فسيولوجية فريدة ضارة بالتكيف (على سبيل المثال، مكلفة للغاية من حيث الطاقة) إذا لم يكن السلوك المرتبط بها موجودًا. لكي يكون كل من السلوك والسمة الفسيولوجية مفيدين للتكيف، يجب أن يتواجدا في نفس الوقت. في حالة الملاحة والهجرة، سيكون من غير التكيفي للحيوان أن يكون لديه نظام ملاحة معقد ومكلف للغاية من حيث الطاقة إذا لم يهاجر

أبدًا، مما يعني أن التطور سيميل إلى الانتقاء ضده، أو في حالة هيمنة الانحراف الجيني، لن يفضله إذا بدأ في التطور عن طريق الصدفة العمياء.

هناك حجة مضادة تقول إن بعض أنواع الطيور والحشرات لا تهاجر أبدًا، ومع ذلك فإن جميعها لديها بعض القدرات للقيام بذلك. ألا يدل هذا على أن الكائنات الحية تحتفظ بسمات لا تعطي ميزة؟ يبدو صحيحًا أن جميع الطيور على ما يبدو لديها قدرات ملاحة أساسية. ومع ذلك، فإن التجمعات السكانية تغير ميلها للهجرة اعتمادًا على الظروف البيئية. لذلك، لا يزال من التكيفي الحفاظ على هذه القدرة على المدى الطويل، وهذا لا يقول شيئًا عن أصل أنظمة الملاحة هذه. هناك حالة مشابهة تتعلق بالقدرة على الطيران. إن امتلاك مجموعة من التكيفات اللازمة للطيران مكلف للغاية من حيث المقايضات، ولا يتم تعويضه إلا بالقدرة الفعلية على الطيران. ومع ذلك، هناك بعض أنواع الطيور والحشرات التي لا تطير مع الحفاظ على الأجنحة. ومع ذلك، هذه أمثلة على التطور العكسي، حيث يتم فقدان قدرة كانت تعمل في السابق.[1] مثل هذه الأمثلة لا تقدم أي مساعدة في شرح أصل السمات الجديدة والوظيفية.

تطوير خوارزميات رئيسية

المعلومات الوظيفية هي العنصر المشترك الضروري لخلق السلوكيات المبرمجة المعقدة التي تم استكشافها في هذه الصفحات. هذه المعلومات

---

(١) تمت مناقشة هذه الظاهرة من قبل مايكل بيهي في "تراجع داروين :العلم الجديد حول الحمض النووي الذي يتحدى التطور" (نيويورك HarperOne :، ٢٠١٩).

ضرورية، سواء في تحديد الخوارزميات الأساسية، أو في معالجة المعلومات الخارجية (البيانات الحسية) وتطبيقها على مختلف الوظائف.

على سبيل المثال، تتضمن الملاحة العديد من الوظائف التي تتطلب معلومات، مثل البرمجة للخوارزميات التي تعالج بيانات مستشعرات الملاحة (مثل الخوارزميات الخاصة بالبوصلة المغناطيسية، والبوصلة الشمسية، وأجهزة قياس المسافة، وتكامل المسار). في الحالات التي يتم فيها برمجة موقع وجهة الهجرة، تكون هناك حاجة لمعلومات تحدد الاتجاه والمسافة. في بعض الحالات، يبدو حتى أن هناك معلومات تحدد خريطة.

في مجال العمارة، يتطلب بناء العش معلومات تحدد المخطط المعماري. تتطلب السلوكيات المختلفة للحشرات الاجتماعية، مثل تقسيم العمل، معلومات لتحديد السياقات والإشارات التي يتم فيها تنفيذ كل سلوك. جميع العناصر المشاركة في التواصل الاجتماعي تتطلب معلومات، مثل البروتينات التي تحدد الفيرومونات، والتشفير وبروتوكولات الإشارات مثل نداءات التنبيه ورقصة نحل العسل. يتطلب التعلم المبرمج خوارزميات تتحكم في العملية، بما في ذلك تحديد المعلومات المستخدمة وكيفية تسببها في تغيير السلوك. بالإضافة إلى ذلك، يجب أن تكون الخوارزميات التي تتحكم في هذه السلوكيات مشفرة في الآليات العصبية ، كما هو موضح في الشكل ٢.٦.

ينطوي تنفيذ الخوارزميات التي تتحكم في هذه السلوكيات على عدة مستويات مختلفة. في وصف جانب وثيق الصلة بسلوك الحيوان، يصف عالم الأعصاب السلوكي جيفري آدامز وزملاؤه ثلاثة مستويات يتم فيها تنفيذ

عملية صنع القرار ويمكن تحليلها: المستوى الحسابي، والمستوى الخوارزمي، والمستوى التنفيذي[1].

في مصطلحات المؤلفين، يمكن مساواة المستوى الحسابي بأخذ مصدر المعلومات اللازمة لحل الاستراتيجية السلوكية وإدخالها في الخوارزمية. يحدد المستوى الخوارزمي الاستراتيجيات لكيفية تحقيق السلوك المطلوب. يتعلق المستوى التنفيذي بكيفية إنشاء الخوارزميات، في المقام الأول من خلال الآليات العصبية.

يلاحظ المؤلفون كذلك أن تنفيذ الخوارزميات يمكن أن يحدث من خلال وسائل مختلفة وقد يتضمن "دوائر عصبية أو وراثية، أو محولات عصبية، أو هرمونات، أو تفاعل معقد بين هذه."

يشرحون أن الدائرة الوراثية والشبكة العصبية قد تنفذان نفس الخوارزمية، على الرغم من أن التفاصيل البيولوجية تظل متميزة. وبعبارة أخرى، قد تكون هذه الخوارزميات متكافئة وظيفيًا ولكن يتم تنفيذها من خلال آليات مختلفة تمامًا.



الشكل ٦.٢: تطبيق خوارزمية سلوكية

(١) جيفري ك .آدامز وآخرون، "علم الأعصاب العصبي لاتخاذ القرار"، في "التطور وآليات صنع القرار"، محرران بيتر هامرشتاين وجيفري ر .ستيفنز (كامبريدج، ماساتشوستسMIT Press :، ٢٠١٢)، ٨٤.

في الواقع، لا يزال فهمنا محدودًا جدًا للآليات الدقيقة التي يتم من خلالها تطبيق هذه الخوارزميات. على الرغم من أن الكثيرين يعتقدون أن هذا يتم إنجازه بشكل أساسي من خلال الشبكات العصبية، إلا أن فهمنا لهذه الشبكات لا يزال ضعيفًا، باستثناء أبسط الحالات.

كان يُعتقد سابقًا أن السلوكيات الأساسية مثل التعلم الترابطي تنطوي على آليات بسيطة نسبيًا. ومن الأمثلة الممتازة على السلوك "البسيط" التعود والتحسس لدى اللافقاريات. تمت دراسة التعود على نطاق واسع في الحلزون البحري من قبل الحائز على جائزة نوبل إريك كاندل، بسبب ما كان يُعتقد أنه ينطوي على آلية عصبية بسيطة نسبيًا تتحكم في رد فعل سحب الخياشيم (GWR).

أشارت الأبحاث والنمذجة المبكرة إلى أن التعود يحدث نتيجة للتغير في الاستجابة عند نقاط الاشتباك العصبي للخلايا العصبية الحركية. ومع ذلك، كشفت الأبحاث الحديثة أن الآلية المسؤولة عن التعود وإزالة التعود ليست بهذه البساطة في الواقع. يتم تحقيق الاستجابة في الحلزون البحري من خلال شبكة تضم ما يقرب من ثلاثمائة خلية عصبية، بما في ذلك الخلايا العصبية الحسية والخلايا العصبية الحركية والخلايا العصبية البينية.

توقعت النماذج السابقة أن رد فعل سحب الخياشيم ينطوي على سلوك حركي نمطي بسيط يتوسطه دائرة عصبية محددة بسيطة نسبيًا. ومع ذلك، يلاحظ علماء الأحياء جانيت ليونارد وجون إدستروم أنه "من الواضح الآن أن رد فعل سحب الخياشيم المحدد عمليًا، وهو استجابة الخياشيم للتحفيز

اللمسي الضعيف للسفون، ليس منعكسًا نمطيًا بسيطًا ولكنه يتضمن مجموعة غير متجانسة من أنماط العمل." ويضيفون أن نتائج ثلاثين عامًا من البحث حول منعكس سحب الخياشيم والتحكم العصبي فيه دفعتهم إلى استنتاج "أن هذا النظام البسيط، مثل العديد من الأنظمة الأخرى، هو أكثر تعقيدًا وتنوعًا بكثير مما كان متوقعًا في البداية." بالنظر إلى أن مثل هذه السلوكيات البسيطة تنطوي على آليات عصبية معقدة نسبيًا، فمن الواضح أن السلوكيات المبرمجة الأكثر تعقيدًا تنطوي بشكل مماثل على آليات عصبية وآليات ذات صلة أكثر تعقيدًا.

إن تطور الخوارزميات المفيدة لحل المشكلات المنتشرة التي تواجه الحيوانات التي تظهر سلوكيات مبرمجة معقدة، وفقًا لآدامز وزملائه، "من المحتمل أن تكون نتاجًا للتطور المتقارب، في المقام الأول لأنها قوية، وتتطلب فقط مكونات بسيطة، ولا تتطلب بنية مركزية. وبالتالي من المرجح أن تتكرر مثل هذه الخوارزميات عبر الأصناف." ولكن كما رأينا، هذه السلوكيات معقدة وليست بسيطة. بالإضافة إلى ذلك، كل منها فريد من نوعه، مع الكثير مما يميزه عن السلوكيات المبرمجة المعقدة الأخرى في نفس المجموعة (على سبيل المثال، التنقل / الهجرة). لذلك، فإن الخوارزميات التي تتحكم في هذه السلوكيات ليست بسيطة ومتقاربة ولكنها متطورة وفريدة من نوعها، مع حلول متخصصة. وبالتالي، فإن التطور المتقارب هو تفسير غير كاف لمثل هذه الخوارزميات المتطورة وليس تفسيرًا وثيق الصلة بالموضوع، نظرًا لوجود تقارب أقل بكثير بين الحالات الفردية لهذه السلوكيات المعقدة مما قد يبدو للوهلة الأولى.

هناك ثلاث طرق أساسية يمكن للحيوان من خلالها الحصول على المعلومات المستخدمة في تحديد السلوك: ١) المعلومات موروثة، إما في الجينوم أو من خلال علم التخلق؛ ٢) يتم الحصول على المعلومات من التجربة؛ أو ٣) يتم الحصول على المعلومات من خلال التواصل مع الأعضاء الآخرين من النوع. تلعب جميع هذه الطرق الثلاثة أدوارًا في النطاق الكامل لسلوك الحيوان. كما رأينا، إنها ليست مجرد مسألة كيفية تضمين المعلومات داخل الجينوم أو نقلها وراثيًا. إنها أيضًا مسألة أصل المعلومات التي تبرمج التعلم. السؤال المتعلق بجميع الطرق الثلاث للحصول على المعلومات هو، ما هو المصدر النهائي للمعلومات التي تحدد الخوارزميات والآليات العصبية التي تتحكم في هذه السلوكيات؟ هذا لا يزال لغزا يحير العلماء.

التطور الداروينى والمعلومات البيولوجية

وفقًا لعالم الأحياء بجامعة براون، كينيث ميلر، وهو أحد المدافعين البارزين عن نظرية التطور، فإن المعلومات البيولوجية تتولد من "ثلاثة أشياء فقط: الانتقاء، والنسخ، والطفرة.... مصدر "المعلومات" في الواقع هو عملية الانتقاء نفسها."

وبالمثل، كتب عالم الأحياء التطوري بجامعة ستوني بروك، دوغلاس فوتويما، "إن الاتجاه الظاهري نحو الهدف يحدث بسبب تشغيل برنامج - معلومات مشفرة أو مرتبة مسبقًا، موجودة في تسلسلات الحمض النووي DNA - يتحكم في عملية ما." ويوضح كذلك أن المكونات الأساسية الثلاثة

للتطور عن طريق الانتقاء الطبيعي اللازمة لإنتاج هذه الميزات هي التباين، واللياقة التفاضلية، والتوريث[١].

ريتشارد دوكينز يستخلص الآثار الأوسع لهذا الرأي: "على الرغم من جميع المظاهر التي تشير إلى عكس ذلك، فإن صانع الساعات الوحيد في الطبيعة هو قوى الفيزياء العمياء، وإن كانت منتشرة بطريقة خاصة جدًا. صانع الساعات الحقيقي لديه بصيرة: فهو يصمم تروس ونوابض ساعته، ويخطط لترابطاتها، مع وضع غرض مستقبلي في عين عقله. الانتقاء الطبيعي، العملية العمياء واللاواعية والتلقائية التي اكتشفها داروين، والتي نعرف الآن أنها التفسير لوجود وشكل جميع أشكال الحياة التي تبدو بلا هدف، ليس لها غرض في الاعتبار. ليس لديها عقل ولا عين عقل. إنها لا تخطط للمستقبل. ليس لديها رؤية، ولا بصيرة، ولا رؤية على الإطلاق. إذا كان من الممكن القول أنها تلعب دور صانع الساعات في الطبيعة، فهي صانع الساعات الأعمى."

ينظر البعض (بمن فيهم داروين) إلى الانتقاء الطبيعي على أنه قانون طبيعي، والذي، إذا كان الأمر كذلك، سيسمح لنظرية داروين بتلبية ما يراه

---

(١) فوتويما، "التطور"، ٢٨٥ .يوضح فوتويما كذلك" :يوجد برنامج أيضًا في شريحة الكمبيوتر، ولكن في حين أن هذا البرنامج قد تم تشكيله بواسطة مصمم ذكي، فإن المعلومات في الحمض النووي قد تم تشكيلها بواسطة عملية تاريخية من الانتقاء الطبيعي .علم الأحياء الحديث ينظر إلى تطور الكائنات الحية وعلم وظائف الأعضاء وسلوكها على أنها نتائج عمليات ميكانيكية بحتة، ناتجة عن التفاعلات بين التعليمات المبرمجة والظروف أو المحفزات البيئية".

الكثيرون معيارًا لأي نظرية علمية جيدة، وهي أن تكون قائمة على قانون طبيعي[1].

يشرح مايكل روس كيف يتناسب هذا مع القاعدة الأوسع المعروفة باسم الطبيعية المنهجية: "الطبيعي المنهجي هو الشخص الذي يفترض أن العالم يعمل وفقًا لقانون غير منقطع؛ وأن البشر يمكنهم فهم العالم من حيث هذا القانون؛ وأن العلم ينطوي على مثل هذا الفهم دون أي إشارة إلى قوى خارجية أو خارقة للطبيعة مثل الله".

ومن الأمثلة على القوانين الطبيعية قانون الجاذبية، وقانون بويل (الذي يصف العلاقة بين ضغط وحجم الغاز)، ومعادلة أينشتاين التي تربط الكتلة والطاقة ($E = mc^2$)، وقوانين نيوتن للحركة. ومن الأمثلة الأخرى القانون الأول للديناميكا الحرارية، الذي يتعلق بحفظ الطاقة وينص على أن "الطاقة لا يمكن إنشاؤها أو تدميرها في نظام معزول."

إن ادعاء العديد من الداروينيين هو أن الظواهر البيولوجية، وبشكل أكثر تحديدًا الانتقاء الطبيعي، يمكن تصنيفها في نفس فئة هذه الأنواع من القوانين. ومع ذلك، فإن الأمثلة المذكورة أعلاه تستند إلى ملاحظات للانتظامات الفيزيائية المستمرة. في المقابل، وكما يوضح فيلسوف علم الأحياء إليوت سوبر، "يبدو أن العديد من القوانين العامة في علم الأحياء

---

(١) تنص نظرية قانون التغطية، التي اقترحها في الأصل كارل هيمبل، على أن "إعطاء تفسير علمي لبعض الظواهر أو الأحداث أو الحقائق هو إظهار كيف يمكن رؤيتها على أنها تتبع قانونًا (أو مجموعة من القوانين) جنبًا إلى جنب مع تحديد الشروط الأولية ".جيمس ليديمان، "فهم فلسفة العلم" (لندن:

التطوري هي حقيقة رياضية غير تجريبية." ويستشهد بمثال مبدأ هاردي-واينبرغ لتردد أليل الجينات، والذي يشار إليه أحيانًا باسم القانون. كما يشير سوبر، فإنه يعتمد ببساطة على التوزيع الرياضي للأليلات في مجموعة سكانية، بالنظر إلى افتراضات معينة. وبالمثل، فيما يتعلق بقوانين مندل للوراثة، كتب ماير، "إن ما يسمى قوانين علم الأحياء ليست القوانين العالمية للفيزياء الكلاسيكية ولكنها ببساطة تعميمات عالية المستوى." لا توجد عمليات فيزيائية حتمية تكمن وراء هذه الملاحظات. لذلك، على الرغم من الادعاء بأن التطور يمكن تفسيره من خلال القوانين الطبيعية، فإن الحقيقة هي أنه لا توجد قوانين طبيعية فعلية في علم الأحياء تعادل تلك الموجودة في الفيزياء. يعترف سوبر بأنه "إذا استخدمنا مصطلح "حشو" بشكل فضفاض بما فيه الكفاية (بحيث يشمل الحقائق الرياضية)، فإن العديد من التعميمات في النظرية التطورية هي حشو. يبدو أننا وجدنا فرقًا بين الفيزياء وعلم الأحياء. غالبًا ما تكون القوانين الفيزيائية تجريبية، لكن النماذج العامة في النظرية التطورية ليست كذلك عادةً."

دعونا الآن نضع جانباً مسألة ما إذا كانت الآلية الداروينية مؤهلة لتكون قانونًا طبيعيًا، ولنعد إلى السؤال الأكثر جوهرية: هل يمكن لها، أو لأي قانون طبيعي آخر، أن يولد المعلومات البيولوجية اللازمة لتنوع الحياة؟

يعتقد مانفريد أيغن، الباحث في أصل الحياة، أن المعلومات التي نجدها في الحمض النووي يمكن أن تنشأ من قوانين طبيعية. ويتفق أيغن على أن

مفتاح أصل التعقيد البيولوجي يكمن في المعلومات. ويشير إلى أن التحدي يتمثل في "إيجاد خوارزمية، أو قانون طبيعي، يؤدي إلى أصل المعلومات".

يصف أيغن التفسير التطوري الشائع لأصل المعلومات البيولوجية: "كيف نشأت المعلومات في المخططات الجينية، وتثبيت ترتيبات معينة من الرموز؟ سيجيب عالم الأحياء: عن طريق الانتقاء الطبيعي! وسيضيف أن تسلسلات الجينات الموجودة في الكائنات الحية، والتي تقوم بترميز الوظائف التي تتكيف بشكل مثالي مع الحياة، هي في الواقع نتاج سلسلة كاملة من التغييرات في التسلسل، استقرت واحدة تلو الأخرى عن طريق الانتقاء. مبدأ داروين يحقق ما يسميه المنظرون توليد المعلومات".

يواصل أيغن: "سيتعين أن يكون مبدأً ديناميكيًا. المعلومات تنشأ من عدم المعلومات... التطور ككل هو التوليد المستمر للمعلومات - المعلومات التي يتم تدوينها في جينات الكائنات الحية".

هذا تأكيد قوي للغاية. هل يمكن لمؤيدي هذا التأكيد تقديم أدلة تدعمه؟

يجادل عالم الرياضيات والفيلسوف ويليام ديمبسكي بأن القوانين الطبيعية المنتظمة لا يمكن أن تولد هذا النوع من المعلومات التي نجدها في الحمض النووي. ويستخدم مصطلحات أكثر تقنية لمثل هذه المعلومات، مثل "المعلومات الوظيفية" أو "المعلومات المحددة المعقدة". هذا هو نوع المعلومات الذي يفكر فيه الشخص العادي عندما يسمع مصطلح "المعلومات" - الأشياء التي نجدها في الكتب وبرامج الكمبيوتر والحمض النووي.

تتضمن قوانين الطبيعة تكرار الأنماط، لكن المعلومات التي نجدها في الكتب وبرامج الكمبيوتر والحمض النووي غير دورية وغير قابلة للضغط إلى حد كبير. لننظر في سلسلة الأحرف التالية:

abcabcabcabcabcabcabcabcabcabcabcabcabcabcabcabcabc
abcabc

يبلغ طول سلسلة الأحرف هذه أربعة وخمسين حرفًا، ولكن يمكن التعبير عنها بسهولة بشكل مضغوط، وهو "كرر abc ثمانية عشر مرة". إنه مجرد تكرار بسيط. إنه ليس معقدًا بالطريقة التي تكون بها بقية الأحرف/الكلمات في هذه الفقرة. يمكن للأنماط الشبيهة بالقانون أن تنتج أشياء مثل "تكرار abc"، ولكن وفقًا لديمبسكي، لا يمكنها إنتاج معلومات جديدة من النوع الموجود في الجمل ذات المعنى في هذا الكتاب أو الرمز الوظيفي في برنامج الكمبيوتر.

كما يشرح ستيفن ماير، "القوانين تصف اقترانات متوقعة ومنتظمة للغاية للأحداث - أنماط متكررة، ترتيب زائد عن الحاجة. إنها لا تصف نوع التعقيد اللازم لنقل المعلومات".

نحن نستخلص هذه الحقيقة من تجاربنا المشتركة ومن المنطق السليم. أيًا كان السبب وراء توليد المعلومات المعقدة المحددة، كما نجدها في البرامج الحاسوبية والحمض النووي DNA، فإنه بحاجة إلى حرية الاختيار بناءً على هدف وظيفي محدد. يجب أن يكون هذا السبب قادرًا على إنتاج نتائج محتملة وليست حتمية. يكتب ديمبسكي: "يمكن للقوانين أن تغير مكان المعلومات

أو تفقدها، كما يحدث عند ضغط البيانات. ما لا تستطيع القوانين فعله هو إنتاج الاحتمالات؛ وبدون الاحتمالات لا يمكنها توليد المعلومات."

ماذا عن العمليات العشوائية، مثل الطفرات العشوائية التي يقال إنها تعمل جنبًا إلى جنب مع الانتقاء الطبيعي في النظرية الداروينية الجديدة؟ يوضح ديمبسكي من خلال تطبيق رياضيات الاحتمالات أن العمليات العشوائية لا يمكنها توليد معلومات محددة كافية لجعل عملية التطور الأعمى قابلة للتطبيق، حتى عند اقترانها بالانتقاء الطبيعي. مليون قرد يضربون على مليون آلة كاتبة لمدة مليون مليار سنة لن يتمكنوا أبدًا من كتابة رباعية شعرية لشكسبير، ناهيك عن سونيتة أو مسرحية كاملة، ولن تخلق الطفرات العشوائية أبدًا طيات بروتينية جديدة ووظيفية بشكل جذري، ناهيك عن أعضاء وأجهزة جسمية جديدة بالكامل. الاحتمالات ضئيلة للغاية. وقد تم تأييد حجة ديمبسكي من خلال العمل المخبري على طيات البروتين الذي قام به دوغلاس أكس وآخرون[1].

---

(١) دوغلاس دي آكس، "الحساسية الوظيفية الشديدة للتغيرات المحافظة في الأحماض الأمينية على الأسطح الخارجية للإنزيم"، مجلة البيولوجيا الجزيئية، ٣٠١-٥٩٥-٥٨٥ :(2000) ؛ دوغلاس دي آكس، "تقدير انتشار تسلسلات البروتين التي تتبنى طيات إنزيم وظيفية"، مجلة البيولوجيا الجزيئية، ٣٤١ 1295-1315 :(2004)؛ دوغلاس دي آكس، "القضية ضد الأصل الدارويني لطيات البروتين"، BIO-Complexity (2010): 1-12، https://doi.org/10.5048/BIO-C.2010.1؛ دوغلاس دي آكس وآن ك .غوغر، "نموذج وإثبات مختبري على أن التحسين التطوري يعمل بشكل جيد فقط إذا سبقه الاختراع - الانتقاء نفسه ليس مبتكرًا"، BIO-Complexity (2015): 1-13، https://doi.org/10.5048/BIO-C.2015.2

وضع ديمبسكي الأساس لتحليله في دراسته التي نشرتها مطبعة جامعة كامبريدج بعنوان "الاستدلال على التصميم"، ثم تناول المشاكل الإضافية المرتبطة بالتفسيرات الداروينية لأصل المعلومات في كتب وأوراق بحثية لاحقة[1]. وكما يوحي عنوان كتابه "لا غداء مجاني"، لا يمكنك الحصول على شيء من لا شيء. يحدد ديمبسكي "المشكلة المركزية في علم الأحياء" على أنها "أصل المعلومات المعقدة المحددة.... من أين تأتي هذه المعلومات، وأين يمكن أن تنشأ؟"

تَمَّ تطوير العديد من المحاكاة الحاسوبية التي تدّعي أنها تُمثل نموذجًا للتطور الأعمى وتزعم أنها تُظهر زيادة في المعلومات. يستشهد كينيث ميلر بواحدة من هذه المحاكاة كمثال جيد على كيفية قيام التطور الجديد-الدارويني

---

(١) انظر على سبيل المثال ديمبسكي، "لا غداء مجاني"؛ وليام أ .ديمبسكي وروبرت ج .ماركس الثاني، "البحث عن بحث :قياس تكلفة المعلومات للبحث عالي المستوى"، مجلة الذكاء الحسابي المتقدم والمعلوماتية الذكية ١٤٨٦-475 :(2010) ؛ وينستون إيويرت، جورج مونتانيز، وليام أ .ديمبسكي، وروبرت ج .ماركس الثاني، "استخراج معلومات فعال لكل استعلام من"Hamming Oracle ، وقائع الاجتماع الثاني والأربعين للندوة الجنوبية الشرقية حول نظرية الأنظمة، IEEE، جامعة تكساس في تايلر (٧-٩ مارس ٢٠١٠)297-290 :؛ وينستون إيويرت، وليام أ .ديمبسكي، وروبرت ج .ماركس الثاني، "التوليف التطوري لمنطق :Nand تشريح كائن رقمي"، وقائع مؤتمر IEEE الدولي ٢٠٠٩ حول الأنظمة والإنسان وعلم التحكم الآلي، سان أنطونيو، تكساس (أكتوبر ٢٠٠٩)3053-3047 :؛ وليام أ . ديمبسكي وروبرت ج .ماركس الثاني، "مبدأ بيرنولي لعدم كفاية السبب والحفاظ على المعلومات في بحث الكمبيوتر"، وقائع مؤتمر IEEE الدولي ٢٠٠٩ حول الأنظمة والإنسان وعلم التحكم الآلي سان أنطونيو، تكساس (أكتوبر ٢٠٠٩)2652-2647 :؛ وليام أ .ديمبسكي وروبرت ج .ماركس الثاني، "الحفاظ على المعلومات في البحث :قياس تكلفة النجاح"، IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics - Part A, Systems and Humans 39، رقم ٥ (سبتمبر ٢٠٠٩) : 1051-1061.

بخلق المعلومات. ووفقًا لميلر، فإن العناصر الوحيدة اللازمة لتحقيق ذلك هي التضاعف، والطفرة، والانتقاء. الغرض من هذه البرامج هو إثبات أن عمليات التطور الداروينية كان بإمكانها بالفعل توليد المعلومات البيولوجية الأساسية للتنوع الهائل للحياة على الأرض.

يتمثل السؤال الجوهري هنا فيما إذا كانت هذه النماذج تقدم عروضًا دقيقة للتطور الأعمى والعمليات البيولوجية الحقيقية .مع أي نموذج حاسوبي يزعم أنه يمثل ظاهرة في العالم الحقيقي، هناك دائمًا تساؤل حول مدى دقته وصدقه في تمثيل الواقع. هناك مقولة شائعة بين المهندسين، "في النظرية، النظرية والواقع متماثلان. في الواقع، ليسا كذلك". يعتمد الكثير على مدى تعقيد الظاهرة الطبيعية التي يتم نمذجتها .يتم التنبؤ بالطقس باستخدام نماذج حاسوبية متطورة .في حين أن التنبؤ على المدى القصير يكون دقيقًا إلى حد ما، فإن التنبؤات على المدى الطويل تكون أقل دقة بكثير. ومن الأمثلة على ذلك هو تعقيد التنبؤ بمسارات الأعاصير.

يحلل البحث الحديث في مجال يسمى "معلوماتية التطور" تصميم وأداء نماذج التطور الحاسوبية. ووفقًا لديمبسكي وزملائه، عالما الكمبيوتر روبرت جيه ماركس الثاني ووينستون إيورت، فقد وجد التحليل أن التصميم الأساسي لنماذج التطور هو نفسه التصميم المستخدم من قبل المهندسين وعلماء الكمبيوتر، حيث "هناك دائمًا هدف غائي يحدده المبرمج الذي يتمتع بسلطة مطلقة على البرنامج، ومقياس لياقة مرتبط بهذا الهدف، ومصدر للمعلومات النشطة، وتحديثات عشوائية".

بمعنى آخر، البرامج التي تزعم أنها نموذج لعملية تطورية طبيعية عمياء وغير هادفة، بدون غاية محددة، هي في حد ذاتها هادفة وموجهة نحو هدف معين. الخوارزميات هي نتاج للذكاء الإبداعي، حيث يتم برمجتها لتحقيق نتيجة محددة مسبقًا .على النقيض من ذلك، لا يعتمد الانتقاء الطبيعي الحقيقي على خوارزمية مصممة، وكما ذكر العديد من المؤيدين للتطور الجديد-الداروينى، فإنه ليس لديه نتيجة أو هدف محدد مسبقًا.

علاوة على ذلك، تبدو نماذج التطور وكأنها تولد معلومات جديدة فقط، في حين أن المعلومات موجودة بالفعل في البرنامج بشكل ضمني في هيئة خوارزميات محددة. تبحث هذه الخوارزميات عن نتائج أو أهداف محددة . ومع ذلك، للقيام بذلك، يتطلب كل نموذج "مصادر للمعرفة لتوليد معلومات نشطة لتوجيه عملية البحث".

مشكلة أخرى تواجه مثل هذه النماذج الحاسوبية هي أنها تتضمن افتراضات غير متوافقة مع علم الأحياء. يفترض أحد هذه النماذج أنه بعد كل طفرة يتم مقارنة النتيجة بهدف معين ويتم تقييم لياقتها العامة، حيث يعني المزيد من التطابقات لياقة أعلى وبالتالي الحفاظ عليها للجولة التالية. يعلق ديمبسكي وزملاؤه على أن النتيجة "تعادل افتراض ليس فقط أن جميع المواقع الجينية يمكن أن تكون مواقع للتغيير المفيد بشكل مستقل، ولكن أيضًا أن هذه الفوائد المستقلة مضافة. كلا هذين الافتراضين لا يتوافقان مع علم الأحياء." هذه الافتراضات غير الواقعية لها تأثير في تقليل الوقت الظاهر للتطور بشكل كبير مما يؤدي إلى ظهور سمات تكيفية معقدة. في ضوء ذلك،

خلص ديمبسكي وماركس وإيورت إلى أن "التطور الدارويني غير الموجه ليس لديه الوقت ولا الموارد الحسابية لتصميم أي شيء حتى ذي تعقيد معتدل. هناك حاجة إلى معرفة خارجية."

يتوافق هذا التحليل لنماذج التطور الحاسوبية مع النتائج التي تم الحصول عليها من مراقبة التغيرات في مختلف الميكروبات بمرور الوقت، وكذلك من تجارب تعطيل الجينات على ذباب الفاكهة وأنواع أخرى. كما لاحظ علماء الأحياء توم ستراشان وأندرو ريد، "إن إجراء تغييرات عشوائية في الجين من المرجح جدًا أن يمنعه من العمل، ولكن من غير المرجح جدًا أن يمنحه وظيفة جديدة."

تم تأكيد ذلك من خلال تجربة التطور طويلة المدى الشهيرة التي أجراها عالم الأحياء الدقيقة بجامعة ولاية ميشيغان ريتشارد لينسكي على بكتيريا الإشريكية القولونية. استمرت التجربة لأكثر من ٧٠,٠٠٠ جيل من الإشريكية القولونية، وأظهرت النتائج صعوبة وعدم احتمالية حدوث طفرات عشوائية بالإضافة إلى الانتقاء الطبيعي الذي يولد أشكالًا بيولوجية جديدة. كان هناك عدد قليل من التطورات المثيرة للاهتمام بين الإشريكية القولونية، ولكن عند التحقيق، وجد أن أي تكيف مفيد تم إدارته عن طريق طفرة تكسر شيئًا ما في بكتيريا الإشريكية القولونية بدلاً من بناء أي شيء جديد - أقرب إلى جعل الباب أكثر مقاومة للسطو عن طريق تخريب القفل بحيث يعلق بشكل دائم في الوضع المغلق.

بعد مراجعة هذه التجربة بالإضافة إلى دراسات التطور في الميكروبات والفيروسات الأخرى، مثل فيروس نقص المناعة البشرية وطفيلي الملاريا، خلص عالم الأحياء مايكل بيه إلى أن "البحث الحديث يكشف أن ... ليس فقط الطفرة العشوائية والانتقاء الطبيعي غير كافيين بشكل صارخ لبناء هياكل معقدة، بل إنها تميل بقوة إلى كسرها."

أصل المعلومات التي تحدد السلوكيات المبرمجة المعقدة

يشير التحليل أعلاه إلى أن العمليات التطورية العشوائية وحدها لا تمتلك القدرة على توليد المعلومات الجينية المعقدة والضرورية للسلوكيات المبرمجة المعقدة. ولكن هذه ليست سوى جزء من التحدي الذي تواجهه نظرية التطور. كما أشرنا سابقًا، هناك أدلة تشير إلى أن المعلومات المطلوبة لبرمجة السلوكيات المعقدة لا يمكن أن تقتصر على الحمض النووي الذي يشفر البروتينات فحسب.

تتضمن السلوكيات المبرمجة المعقدة، كما نذكر، ليس فقط السلوكيات الظاهرة، ولكن أيضًا الهياكل الفيزيائية المعقدة المرتبطة بها، وليس فقط "البرمجيات" التي توجه هذه السلوكيات، ولكن أيضًا "الأجهزة الحيوية" التي تنفذها. على سبيل المثال، يجب أن توجد "البرمجيات" التي تتحكم في السلوكيات المعقدة في صورة خوارزميات يتم برمجتها في الدماغ. ومن الممكن أن توجد هذه البرمجة في الجزء غير المشفر من الجينوم، أو أن يتم التحكم فيها بطريقة أو بأخرى من خلال آليات التخلّق.

الحمض النووي غير المشفر هو ما كان يُشار إليه سابقًا باسم "الحمض النووي المهمل". كان مؤيدو التطور الداروينى الجديد يعتقدون بشكل عام أن أجزاء الجينوم التي لا تقوم بترميز البروتينات لا تحمل أي وظيفة، وأنها مجرد مخلفات عشوائية لعملية التجربة والخطأ في التطور. لكن الأبحاث التي أجريت ضمن مشروع موسوعة عناصر الحمض النووي (ENCODE) كشفت أن الكثير من الحمض النووي غير المشفر يحمل وظائف حيوية في نهاية المطاف. في حالة البشر، "حوالي ٩٩٪ من أصل ٣.٣ مليار نوكليوتيد التي تشكل الجينوم البشري لا تقوم بترميز البروتينات"، وبالتالي كان يُفترض أنها غير وظيفية. ومع ذلك، أشارت التقديرات الأولية من مشروع ENCODE إلى أن ما يصل إلى ٨٠٪ من هذا الحمض النووي يحمل وظائف بيوكيميائية. واستمرت الأدلة في التراكم لتدعم فكرة أن "المناطق غير المشفرة من الجينوم البشري تحوي مجموعة واسعة من العناصر ذات الأهمية الوظيفية، مع وظائف تنظيمية متنوعة للجينات ووظائف أخرى".

هذا يفتح الباب أمام إمكانية أن تكون بعض وظائف الحمض النووي غير المشفر مرتبطة بسلوك الحيوان. فقد وجدت دراسة نوقشت في الفصل ٤ أدلة على دور للحمض النووي غير المشفر في تطور السلوك الاجتماعي لدى النحل.

ما هو جوهر كل هذه المعلومات البيولوجية؟ يصف الفيلسوف روبرت ستالناكر من معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا أساسيات المعلومات قائلاً: "إن تعلم شيء ما واكتساب المعلومات يعني استبعاد الاحتمالات. إن فهم

المعلومات التي يتم نقلها في أي تواصل يعني معرفة الاحتمالات التي سيتم استبعادها إذا كانت هذه المعلومات صحيحة".

وبهذا الفهم، فإن المعلومات البيولوجية تحدد الخوارزميات المحددة التي تتحكم في السلوكيات المبرمجة المعقدة، بينما تستبعد في الوقت نفسه الخوارزميات البديلة. وتعتبر السلوكيات المبرمجة المعقدة، مثل خوارزميات الملاحة، معقدة ومحددة، ويتم تعريفها من خلال معلومات تستبعد العديد من البدائل الأخرى.

يمكننا مقارنة الخوارزميات التي تقوم عليها تقنيات الذكاء الاصطناعي بالخوارزميات التي تتحكم في السلوكيات المبرمجة المعقدة لدى الحيوانات. من حيث المفهوم، فإن لها وظائف وقدرات متشابهة في مجالات الإدراك والتواصل ومعالجة المعلومات والتعلم واتخاذ القرار. وتذكر أن التعريف الرياضي للخوارزمية هو "إجراء رسمي لأي عملية رياضية، وخاصة مجموعة من القواعد المحددة جيدًا لحل مشكلة ما في عدد محدود من الخطوات".

لقد جاء المفهوم أولاً، ثم تم تطوير أجهزة الكمبيوتر التي يمكنها تشغيل الخوارزميات التي يكتبها المبرمجون البشريون.

واليوم، نجد الخوارزميات مستخدمة في كل مكان حولنا. يمكن العثور على أمثلة للخوارزميات في محركات البحث على الإنترنت مثل جوجل، التي تستخدم خوارزميات متطورة للغاية للبحث في الإنترنت عن أي مصطلح يستعلم عنه المستخدمون. وتحتوي الهواتف الذكية على خوارزميات في تطبيقات مثل الملاحة عبر نظام تحديد المواقع العالمي (GPS) والتعرف على

الصوت وتطبيقات أخرى متنوعة. وتستخدم تطبيقات الملاحة خوارزميات معقدة لحساب المسار الأكثر كفاءة للوصول إلى الوجهة المطلوبة. وفي معظم الحالات، يكون هناك عدة مسارات ممكنة، وتقوم الخوارزمية بتحديد المسار الذي من المرجح أن يكون الأسرع. ومن المؤكد أن مثل هذه الخوارزميات لا تنشأ أبدًا نتيجة لعملية مادية عمياء.

وهناك مشكلة أخرى كبيرة تواجه التفسيرات الداروينية للخوارزميات التي تكمن وراء السلوك الحيواني المبرمج المعقد، وهي أن مثل هذه البرامج يجب أن تتبع عمليات منظمة للغاية لتعمل بشكل صحيح، وتتطلب تكاملًا دقيقًا بين مختلف الوظائف لتعمل بتناسق. وبالمثل، يجب أن تكون عمليات تطوير البرمجيات التي تستخدم لترميز الخوارزميات المعقدة منظمة ومتماسكة للغاية. وعندما لا تكون كذلك، تكون النتيجة عادة برنامجًا يحتوي على العديد من الأخطاء التي تعيق تنفيذه. وأي شخص سبق له أن كتب برنامجًا حاسوبيًا على دراية بهذه المشكلة.

بالإضافة إلى ذلك، من المرجح أن تكون التغييرات العشوائية على الخوارزميات المعقدة ضارة أكثر من كونها مفيدة. تخيل إجراء مثل هذه التغييرات العشوائية على برنامج كمبيوتر، على سبيل المثال برنامج ذكاء اصطناعي. من المرجح أن يؤدي ذلك إلى ضرر أو حتى فقدان كامل للوظيفة بدلاً من تحقيق أي تحسين أو حتى إضافة وظيفة جديدة. وبالمثل، فإن عملية الطفرات العشوائية تؤدي دائمًا تقريبًا إلى عدم تغيير في الوظائف (محايد) أو إلى تدهور في الجينوم والوظيفة. في حالات نادرة، هناك طفرات تدمر شيئًا ما

بطريقة تؤدي إلى ميزة بيئية صغيرة للسكان. ما لا نراه هو تغييرات عشوائية تبني أشكالًا جديدة بشكل أساسي أو سلوكيات وظيفية معقدة.

هذه القيود على التطور صحيحة بشكل خاص للخوارزميات التي تتحكم في السلوكيات المبرمجة المعقدة. بسبب تعقيد هذه الخوارزميات، فإن الطفرات العشوائية ستؤدي إلى تدهور أداء الخوارزمية في الغالبية العظمى من الحالات، تمامًا كما تفعل التغييرات العشوائية في برامج الكمبيوتر المعقدة. علاوة على ذلك، تنطبق هذه الحجة على جميع آليات التطور التي تم اقتراحها والتي تتضمن الطفرة والانتقاء الطبيعي. لا يهم ما إذا كانت التغييرات تحدث في الجينات أو الحمض النووي غير المشفر أو شبكات تنظيم الجينات أو غيرها من الآليات فوق الجينية. نفس المشكلة متأصلة في أي آلية من هذا القبيل حيث يمكن تحديد الخوارزميات للسلوكيات المبرمجة المعقدة.

السلوكيات المبرمجة المعقدة هي عرضية، مما يعني أنها ليست ضرورية أو حتمية. وبالتالي، فإن المعلومات التي تحدد هذه السلوكيات هي أيضًا عرضية. يقترح ديمبسكي مبدأ يسمى "الحفاظ على المعلومات"، والذي ينص على أن أي عملية لا يمكن أن تنتج معلومات أكثر مما تم إدخاله فيها. هذا يعادل مبدأ "الحفاظ على الطاقة" المحدد في القانون الأول للديناميكا الحرارية. إذا أخذنا برنامج كمبيوتر كمثال، فلا يمكن لأي برنامج إخراج معلومات أكثر مما تم إدخاله في البرنامج في البداية. يصر البعض على أن بعض خوارزميات الكمبيوتر يمكنها توليد معلومات أكثر مما تم إدخالها فيها. ولكن كما

يوضح ماركس وديمبسكي وإيورت بتفصيل دقيق في كتابهم "علم المعلومات التطورية"، هذا ليس هو الحال. تمامًا كما لا يمكنك الحصول على "شيء من لا شيء"، فإن المعلومات التي يتم إخراجها بواسطة خوارزمية تعكس دائمًا المعلومات المبرمجة في الخوارزمية في الأصل.

إذا كانت مثل هذه العمليات غير قادرة على إنشاء معلومات جديدة، فما هو المصدر الحقيقي للمعلومات؟ سنتناول هذا السؤال في الفصل التالي.

الفصل السابع: سلوكيات معقدة مبرمجة - تصميم ذكي

الادعاء الجوهري للتصميم الذكي هو وجود أنظمة طبيعية لا يمكن تفسيرها بشكل كافٍ بمجرد القوى الطبيعية غير الموجهة، بل تُظهر سماتٍ ننسبها في أي سياق آخر إلى الذكاء والحكمة[١].

- وليام ديمبسكي

كثيراً ما نسمع عن "المنهج العلمي"، وكأنه منهجية واحدة موحدة في جميع فروع العلم. لكن في الحقيقة، يؤكد فلاسفة العلم عمومًا أنه لا توجد منهجية واحدة متفوقة ومقبولة في جميع فروع العلم.

تُسمى الطريقة الأنسب لتقييم الفرضيات العلمية التاريخية، مثل التطور الداروينى الجديد، بـ "الاستدلال إلى أفضل تفسير"، كما هو موضح في كتاب بيتر ليبتون الذي يحمل نفس العنوان.

هناك ثلاث طرق للاستدلال: الاستنتاج، والاستقراء، والاستبعاد. يطبق الاستنتاج، أو الاستنتاج المنطقي، قواعد المنطق الرسمي. ويتم التفكير الرياضي دائمًا تقريبًا من خلال الاستنتاج المنطقي. وفيما يلي مثال بسيط على المنطق الاستنتاجي الرياضي:

أ = ب

ب = ج

إذن: أ = ج

---

(١) ويليام أ .ديمبسكي، "ثورة التصميم :الإجابة على أصعب الأسئلة حول التصميم الذكي" داونرز غروف، إلينويInterVarsity Press :، ٢٠٠٤، ٢٧.

في الاستنتاج، تكون النتيجة صحيحة بالضرورة إذا كانت المقدمات صحيحة. ففي المثال السابق، إذا كانت كل من ١) و ٢) صحيحة، فإن ٣) صحيحة بالضرورة أيضًا. إليك مثال آخر:

جميع البشر لديهم ٢٣ زوجًا من الكروموسومات.

ماري إنسانة.

إذن: ماري لديها ٢٣ زوجًا من الكروموسومات.

أما الاستدلالات الاستقرائية، فتقوم عادةً على التحليل الإحصائي، مما يزيد من احتمالية أن تكون النتيجة صحيحة، لكنه لا يضمن صحتها بشكل قاطع. إليك مثال:

٩٥ في المائة من الأطباء حاصلون على درجة البكالوريوس في علم الأحياء.

جون دو طبيب.

إذن: من المحتمل أن يكون جون دو حاصلًا على درجة البكالوريوس في علم الأحياء.

يُعرف الاستقراء بأنه "الاستدلال من الخاص إلى العام".[١]

(١) تيد هوندريتش، محرر، "دليل أكسفورد للفلسفة" (أكسفورد: مطبعة جامعة أكسفورد، ٢٠٠٥)، انظر "الاستقراء."

يرتبط المنطق الاستقرائي ارتباطًا وثيقًا بنظرية الاحتمالات، حيث يهتم بالإجابة على السؤال: "ما هو احتمال أن تكون النتيجة صحيحة، بالنظر إلى الأدلة المتوفرة"[١]؟

من الأمثلة على النظريات التي تم تطويرها من خلال عملية استقرائية: قانون نيوتن للجاذبية وقانون بويل. تم اشتقاق هذه القوانين بناءً على مراقبة البيانات التجريبية، ثم التفكير في استنباط تعميم عالمي[٢]. لكن البيانات والملاحظات عادة ما تكون محدودة. ويشير ليبتون إلى أن العلماء لا يمتلكون أبدًا جميع البيانات ذات الصلة، مما يعني أن الوصول إلى نتيجة مثبتة على وجه اليقين المطلق بناءً على الاستقراء أمر غير ممكن[٣]. يُعرف هذا باسم عدم التحديد.

هناك عامل آخر يزيد من التعقيد: في كثير من الأحيان، يوجد أكثر من فرضية واحدة لتفسير الملاحظات أو الأدلة المتاحة. وهنا يأتي دور التفكير الاستنباطي الذي يسمح لنا بالاستدلال على أفضل تفسير ممكن. عندما

---

(١) ريتشارد هـ. بوبكين وأفروم سترول، "فلسفة مبسطة" نيويورك Made Simple Books، ١٩٩٣، ٢٤٠.

(٢) يشرح جيمس ليديمان أن نتيجة تطبيق هذه العملية هي: "بمجرد أن نستنتج استقرائيًا تعميمنا وفقًا للمنهج العلمي، فإنه يفترض مكانة القانون أو النظرية ويمكننا استخدام الاستنتاج لاستنتاج عواقب القانون التي ستكون تنبؤات أو تفسيرات". ليديمان، "فهم فلسفة العلم"، ٢٩.

(٣) يكتب ليبتون كذلك: "الاستدلال الاستقرائي هو بالتالي مسألة وزن الأدلة والحكم على الاحتمالية، وليس مسألة إثبات" ليبتون، "الاستدلال إلى أفضل تفسير"، ٥.

تُطرح عدة نظريات لتفسير البيانات، يجب علينا مقارنة مدى نجاح كل نظرية في تفسير تلك الملاحظات.

يمكن العثور على أمثلة جيدة على الاستدلال إلى أفضل تفسير في التحقيقات الجنائية. حيث يدرس المحققون تفسيرات مختلفة محتملة لوفاة غير متوقعة (مثل الانتحار، أو الوفاة الطبيعية، أو القتل على يد شخص غريب، أو القتل على يد شخص يعرفه الضحية)، ثم يجمعون الأدلة، ويبحثون عما إذا كان أحد التفسيرات يقدم شرحًا أفضل لمجموعة الأدلة المتوفرة مقارنة بالتفسيرات الأخرى.

مثال آخر هو التحقيق في حوادث الطائرات. في عملي الهندسي في مجال سلامة الطيران، قمت بفحص نتائج عدد من تحقيقات حوادث الطائرات. في معظم الحوادث، لا يوجد دليل قاطع على سبب واحد؛ بل عادة ما تكون هناك عدة أسباب محتملة. يتطلب ذلك تقييم الأدلة المتعلقة بالأسباب المختلفة وتحديد أي من تلك الأسباب أو مجموعة منها يقدم أفضل تفسير للحادث. يصف ليبتون هذه العملية بأنها "الاستدلال إلى أفضل التفسيرات المحتملة المتاحة".

تم تطوير العديد من النظريات العلمية من خلال هذه العملية الاستنباطية. على سبيل المثال، افترض عالما الفلك جون كوش آدامز وأوربان لو فيرييه وجود كوكب نبتون بناءً على شذوذ في مدار أورانوس. استخدموا التفكير الاستنباطي للاستدلال على أن التأثيرات الجاذبية لكوكب آخر (اكتشف لاحقًا أنه نبتون) هي السبب وراء تلك الشذوذ.

مع التفكير الاستنباطي، لا يكفي أن تشرح النظرية العديد من الأدلة المتاحة. قد تشرح نظرية أخرى تلك الأدلة أيضًا، وقد تظهر أدلة جديدة لا تتناسب مع التفسير الرئيسي، مما يفرض إعادة التفكير. (هذا هو بالضبط ما يحدث في كل مسلسل بوليسي تقريبًا!)

يتم تطبيق التفكير الاستقرائي والاستنباطي بشكل شائع في العلوم عند الانتقال من الملاحظات إلى النظريات. في كل من الاستقراء والاستنباط، لا يمكن التوصل إلى النتيجة بيقين مطلق باستخدام المنطق الاستنتاجي البسيط.

في ختام كتابه "أصل الأنواع"، يعلق داروين قائلاً: "لا يكاد يمكن افتراض أن نظرية خاطئة ستشرح، بطريقة مرضية مثل نظرية الانتقاء الطبيعي، الفئات العديدة الكبيرة من الحقائق المحددة أعلاه". هناك ثلاث مشكلات في هذا الادعاء. أولاً، هناك العديد من الأمثلة التاريخية لنظريات كانت متسقة مع الحقائق المتاحة في وقتها ولكن تبين لاحقًا أنها خاطئة. أحد هذه الأمثلة هو مركزية الأرض، أي فكرة أن الأرض هي مركز الكون. كانت الحقائق المعروفة آنذاك متسقة بشكل عام مع هذه النظرية حتى جاءت ملاحظات كوبرنيكوس، ثم جاليليو وآخرين، إلى جانب نظرية رياضية أنيقة لحركة الكواكب قدمها يوهانس كيبلر، وقدمت هذه الاكتشافات معًا مجموعة حاسمة من الأدلة التي تشير إلى أن الشمس هي مركز النظام الشمسي. مثال آخر هو الأثير المضيء، الذي كان يُعتقد أنه الوسط الذي يسمح بانتشار الضوء عبر الفراغ. كانت هذه النظرية تعتبر تفسيرًا علميًا صحيحًا ومتسقًا

مع الملاحظات المعروفة في ذلك الوقت، حتى أثبتت التجارب لاحقًا أنها خاطئة.

METRIC	BLIND EVOLUTION	INTELLIGENT DESIGN
Microevolution	✔	✔
Similarities across taxa	✔	✔
Design flaws	✔	✔
Abrupt appearance		✔
Engineering design		✔
Genetic change		✔
Origin of information		✔
Teleology		✔
Convergence		✔
Simple explanation		✔
Predictions & Retrodictions		✔

الشكل ٧.١. مقارنة المُميِّزات لسببين مُقترحين لأصل السلوكيات المُبرمجة المُعقّدة

المشكلة الثانية في ادعاء داروين هي وجود أمثلة لنظريات متعددة تتسق مع الملاحظات، حيث يتم في النهاية تحديد إحدى هذه النظريات على أنها الأفضل.

ثالثاً، تكمن مشكلة أخرى في تعليق داروين في وجود تفسير بديل لأصل تنوع الحياة، يمكن القول إنه يفسر قدراً أكبر من الأدلة المتاحة، لكن الداروينيين يرفضون النظر فيه. هذا التفسير هو "التصميم الذكي" - أن تنوع الحياة، بما في ذلك السلوكيات المبرمجة المعقدة التي لا حصر لها والتي تمت مراجعتها في هذه الصفحات، لم يكن نتاجًا للطفرات العشوائية والانتقاء الطبيعي، أو أي عملية تطورية عمياء أخرى، بل كان نتيجة وعي وتبصر وهندسة ذكية. يعتمد مؤيدو هذه النظرية فقط على الأدلة المادية وطرق التفكير القياسية حول الأحداث الماضية (مثل: الملائمة السببية)،

لكن التطوريين الملتزمين بقاعدة تُعرف باسم "المنهج الطبيعي" يصرون على استبعاد هذا التفسير المنافس. هذه الخطوة تجعل النظرية التطورية ليست استدلالاً على أفضل تفسير، بل الأقل إثارة للإعجاب، استدلالاً على أفضل تفسير مسموح به - في هذه الحالة، أفضل تفسير مادي بحت. ولكن إذا كان العلم هو البحث عن الحقيقة حول العالم الطبيعي، فعلينا أن نكون أقل اهتمامًا بأفضل تفسير مادي وأكثر اهتمامًا بأفضل تفسير على الإطلاق - مما يعني أن التصميم الذكي يجب أن يكون جزءاً من النقاش. أي شيء أقل من ذلك هو افتراض للمطلوب.

يوضح ليبتون أن الاستدلال على أفضل تفسير يتحقق على النحو الأمثل من خلال جرد وتحليل مقارن دقيق، وتقييم العديد من العوامل التي تمثل عوامل تمييز رئيسية. وقد سعى هذا الكتاب إلى القيام بذلك بالضبط، من خلال مقارنة التطور الأعمى والتصميم الذكي كتفسيرين متنافسين لأصل السلوكيات المبرمجة المعقدة في الحيوانات. أريد هنا أن أوسع نطاق هذا الاستكشاف لفترة وجيزة للنظر في التطور الأعمى والتصميم الذكي بشكل أعم، مع الإشارة في الملاحظات النهائية إلى مصادر إضافية. من الضروري أن تكون هذه النظرة العامة موجزة في مثل هذه الجولة السريعة، ومع ذلك فهي تستحق القيام بها لإظهار أن الأدلة ضد التطور الأعمى التي تم استكشافها في الصفحات السابقة من هذا الكتاب، بعيدة كل البعد عن كونها فريدة من نوعها في السلوكيات المبرمجة المعقدة، بل هي جزء من نمط أكبر.

الشكل ٧.١. مقارنة بين عوامل التمييز لسببين مقترحين لأصل السلوكيات المبرمجة المعقدة

عادةً ما يتخصص العلماء في مجالات معينة. وقد يرى عالم أحياء متخصص في مجال فرعي معين مشاكل في نظرية التطور ضمن ذلك المجال، ولكنه يفترض أن هذه المشاكل هي استثناء وأن نظرية التطور تُفسر الأمور بشكل جيد في مجالات أخرى من علوم الحياة. لهذا السبب، من الضروري أن نأخذ خطوة إلى الوراء وننظر إلى الصورة الأكبر. إن القيام بذلك يكشف أنه في حين أن نظرية التطور تقدم تفسيرًا جيدًا لبعض جوانب تاريخ الحياة، إلا أنها تواجه مشاكل كبيرة في العديد من المجالات الأخرى. يجب أن يدفعنا هذا إلى التوقف وإعادة النظر بموضوعية في مدى قوة نظرية التصميم الذكي مقارنةً بنظرية التطور. يلخص الشكل ٧.١ هذه المقارنة. تشير علامة الصح إلى النظرية أو النظريات التي تتسق مع الملاحظات المتعلقة بالفئة المحددة. ويشرح ما تبقى من هذا الفصل أساس هذه المقارنات.

ميزات غير حاسمة

بعض عوامل التمييز لا تساعدنا كثيرًا في تحديد أيهما أفضل تفسير بين التطور الأعمى والتصميم الذكي. لقد أدرجت هذه العوامل أولاً في الجدول وسأشرح كل منها بإيجاز هنا.

أول عامل مُدرج هو التطور الدقيق (Microevolution) . إحدى المشاكل في آراء ويليام بيلي وغيره من دعاة اللاهوت الطبيعي قبل داروين هي أنهم اعتبروا خصائص الكائنات الحية ثابتة لا تتغير. أما داروين، فقد أظهر

في كتابه "أصل الأنواع" أن الأنواع ليست ثابتة، بل تتغير بمرور الوقت. أحد العناصر الرئيسية في نظرية داروين التطورية هو التكيف. قد يشمل هذا التكيف تغيرات في الصفات الجسدية، مثل تطور الدببة البنية إلى الدببة القطبية في المناطق القطبية، أو قدرة بعض سلالات البكتيريا على تطوير مقاومة للمضادات الحيوية. وقد يشمل التكيف أيضًا تغييرات في السلوك، حيث تتكيف الكائنات الحية في سلوكها مع البيئات المتغيرة. في هذا الجانب، تتفق النظرية الحديثة للتصميم الذكي مع نظرية التطور أكثر من اتفاقها مع بيلي، حيث أن قدرة النباتات والحيوانات على التكيف مع البيئات المتغيرة تعتبر متوافقة تمامًا مع فكرة التصميم. ففي النهاية، التصميم الهندسي القابل للتكيف أفضل من التصميم الجامد، عندما تكون جميع العوامل الأخرى متساوية.

بالمناسبة، هذه الحالة تُظهر كيف أن منظور علم الأحياء النظمي - الذي ينظر إلى النظام البيولوجي كأنه نظام هندسي مثالي أو قريب من المثالية لغرض دراسته وفهم آلية عمله بشكل أفضل - سيقودنا إلى توقع والبحث عن ميزات في هذا النظام تعزز قدرته على التكيف، أو كما قد نسميها في سياق هندسي بحت "المتانة". (سنتطرق أكثر إلى علم الأحياء النظمي لاحقاً). علاوة على ذلك، فإن الكثير من التغيرات التطورية الدقيقة هي في الواقع تراجعية، ومنظور التصميم لا يواجه صعوبة في استيعاب فكرة أن التصميم قد يتعرض لبعض التدهور مع مرور الوقت. كلا المنظورين يفسران تأثير الطفرات الجينية. حتى أفضل الأنظمة الهندسية تظهر عليها علامات البلى مع مرور الوقت. وهكذا، فإن كلاً من الداروينية الحديثة والتصميم الذكي يتسعان

لاستيعاب التغير التطوري الدقيق. الأمر المثير للدهشة هو قلة التطور البيولوجي التراجعي مع مرور الوقت، ويعود الفضل في ذلك جزئياً، كما نعلم الآن، إلى آليات تصحيح أخطاء الحمض النووي المتطورة على مستوى الجينات والبروتينات.

ماذا عن أوجه التشابه في السمات الوظيفية (التماثل) عبر الأصناف المختلفة، مثل تكرار بنية الأصابع الخمسة لدى حيوانات متنوعة تستخدمها في أنشطة مختلفة مثل الإمساك والتسلق والزحف والطيران؟ النظرية التطورية تقدم تفسيراً لذلك. يعزو داروين وأتباعه هذه السمات المشتركة إلى الوراثة من سلف مشترك. في الوقت نفسه، يقدم التصميم أيضاً تفسيراً سهلاً لهذه التشابهات. يشير منظرو التصميم إلى إعادة استخدام استراتيجيات التصميم الناجحة في التصميمات التي يصنعها الإنسان، مثل إعادة استخدام البكرات والعجلات والتروس في سياقات تكنولوجية مختلفة على نطاق واسع. (التقارب هو قضية ذات صلة سيتم مناقشتها لاحقاً).

من السمات الأخرى للكائنات الحية التي تفسرها النظرية التطورية هي عيوب التصميم - وأبرزها الأمراض والطفرات الضارة. ويُقال إن هذه العيوب متوقعة في عملية تطورية عمياء تعتمد على التجربة والخطأ. لكن نموذج التصميم يستوعب أيضاً وجود عيوب في التصميم. نظرية التصميم الذكي ليست نظرية عن التصميم المثالي، وكما ذكرنا سابقاً، حتى أفضل التصميمات قد تتدهور مع مرور الوقت.

لنأخذ مثالاً توضيحياً. تخيل شخصاً لم يسبق له أن رأى التكنولوجيا الحديثة، فجأة وجد نفسه على طريق معبد، وفي اللحظة التالية توقف رجل يقود سيارة فيراري مكشوفة وعرض على هذا الشخص البدائي توصيلة. بالتأكيد، لن يمنعه انبهاره من استنتاج أن السيارة هي نتاج تصميم ذكي لمجرد أن السائق أخبره بالمشاكل المختلفة التي بدأت سيارته الفيراري تعاني منها - صدأ في الهيكل، استهلاك زائد للزيت، انحراف إلى اليمين، إلخ. إن كون الفيراري نتاج ذكاء مبدع سيبقى واضحاً تماماً لهذا الراكب. وبنفس الطريقة، فإن أي دليل على عدم كمال التصميم في المحيط الحيوي لا يمكن أن ينفي في حد ذاته أي دليل على وجود بصيرة وتصميم واعٍ في علم الأحياء.

علاوة على ذلك، وكما ناقشنا سابقاً، فإن أولئك الذين يعملون ضمن نموذج التطور غالباً ما يكونون مهيئين جداً لإيجاد تصميم سيئ في علم الأحياء لدرجة أنهم يجدونه حتى حيث لا يوجد - كما هو الحال، على سبيل المثال، في حالة "الحمض النووي غير المرغوب فيه" وما يسمى "الأعضاء الأثرية" التي تبين أنها ذات وظائف حقيقية. (المزيد حول مسألة التصميم غير الكامل وعدم الكمال في الفصل ٨).

بالإضافة إلى ذلك، هناك العديد من المقارنات الأخرى التي يمكن إجراؤها بين التطور الداروينى والتصميم الذكي. وهي تشمل التغيير العام بمرور الوقت والتقدم من الأنواع الأقل تعقيدًا إلى الأنواع الأكثر تعقيدًا. لم يتم تناول هذه القضايا في الكتاب، ولكن على أي حال فهي لا توفر تمييزًا لصالح أي من النظريتين، لأن كلا النموذجين يفسران هذه الأنماط.

بعد ذلك، ننتقل إلى المميزات التي تميل لصالح تفسير واحد على الآخر. مجتمعة، هذه المميزات تقدم حجة إيجابية قوية للتصميم.

الظهور المفاجئ أحد أنماط السجل الأحفوري التي يشهد عليها علماء التطور الرئيسيون هو أن الأشكال الرئيسية الجديدة تظهر بشكل مفاجئ نسبياً. لا نجد هذا فقط في الانفجار الكامبري الشهير، حيث ظهرت جميع خطط الجسم الحيواني الرئيسية (الشعب) لأول مرة كمخلوقات بحرية منذ أكثر من نصف مليار سنة بقليل. نجد هذا النمط نفسه في العديد من النقاط الأخرى في تاريخ الحياة. يشرح غونتر بيشلي وستيفن ماير:

"مع استثناءات قليلة جداً، تدخل المجموعات الرئيسية من الكائنات الحية في السجل الأحفوري فجأة، دون وجود صلة واضحة بأسلاف مزعومة سابقة (وأبسط بشكل عام) في السجل الأحفوري. في الواقع، لطالما أقر علماء الأحياء التطورية وعلماء الأحافير البارزون بهذا النمط من الانقطاع. أشار عالم الأحياء التطورية إرنست ماير، أحد آباء التوليفة الداروينية الجديدة الحديثة، إلى أنه "أينما نظرنا إلى الكائنات الحية... فإن الانقطاعات متكررة بشكل ساحق.... الانقطاعات أكثر وضوحًا في السجل الأحفوري". [١]

لقد قام علماء التطور بمحاولات مختلفة لشرح هذا النمط بمصطلحات تطورية، لكن يبقى أن النمط يتناسب بشكل طبيعي أكثر بكثير مع إطار التصميم منه مع النموذج التطوري الملتزم بالابتكار عبر

---

(١) غونتر بيتشلي وستيفن ماير، "السجل الأحفوري والأصل المشترك العالمي"، "التطور الإلهي: نقد علمي وفلسفي ولاهوتي" (ويتون، إلينوي: كروسواي، ٢٠١٧)، ٣٣١.

سلسلة من الطفرات الصغيرة وغير الموجهة المتوقع أن تخلق شجرة متفرعة من الحياة، مما يؤدي أولاً إلى تنوع على مستوى الأنواع، وفقط بعد ذلك بكثير، إلى تباين في خطط الجسم (الشعب المتميزة). بدلاً من ذلك، يتحدث السجل الأحفوري عن ظهور مفاجئ وتباين في خطط الجسم في وقت مبكر. يتعارض هذا النمط مع التوقعات التطورية ولكنه يتناسب تمامًا مع التصميم الذكي، حيث لا يحتاج المصممون الأذكياء، وعمومًا لا يفعلون ذلك، إلى التقدم من خلال سلسلة من التغييرات العرضية الصغيرة في أعمالهم التصميمية، ويميل المصممون إلى ابتكار أشكال جديدة بشكل أساسي (الدراجة، السيارة، الطائرة) ثم يعملون على اختلافات من تلك فئات التصميم الرئيسية - الشعب التكنولوجية أولاً، إذا جاز التعبير.

كما هو الحال في حالة الظهور المفاجئ للأنواع، من المحتمل أن يكون ظهور السلوكيات المعقدة قابلة للبرمجة أيضاً مفاجئاً نسبياً. كما تم توضيحه، تتطلب السلوكيات المعقدة القابلة للبرمجة التطور المنسق للعديد من العناصر، بما في ذلك علم وظائف الأعضاء، وخوارزميات السلوك، والآليات العصبية. في حين أن بعض جوانب هذه العناصر ربما تكون قد تطورت بمرور الوقت، إلا أنها يجب أن تحدث جميعها في وقت واحد وتكون متماسكة. وهذا لا يتفق مع عملية داروينية بطيئة، طفرة عشوائية واحدة في كل مرة.

في إطار مناقشة الظهور المفاجئ للسلوكيات المعقدة المبرمجة (CPBs) -وهي الأنماط السلوكية المتطورة التي تتطلب تخطيطًا وتنسيقًا دقيقًا، مثل بناء الأعشاش المعقدة لدى الطيور، أو الرقصات التزاوجية المتقنة لدى بعض الحشرات - لقد أكدت في هذه الصفحات أن مثل هذه السلوكيات غالبًا ما تنطوي على تطوير أو تعديل في العشرات، بل وحتى المئات، من الجينات.

كما أوضحنا في الفصل الرابع، كشفت دراسة على جينوم نحل العسل الآسيوي (A. cerana) عن ٢١٨٢ جينة فريدة، من أصل جينوم يضم ١٠٥٦١ جينة[١].

وفي دراسة أخرى، تمت مقارنة التغييرات الجينية في سبعة أنواع من النمل ونحل العسل وعدد من الحشرات الانعزالية .وقد وجدت الدراسة أن كل سلالة من النمل تحتوي على حوالي أربعة آلاف جينة جديدة، بالمقارنة مع الحشرات الانعزالية[٢].

في حين أن التطور الداروينى يمكن أن يفسر التطور التدريجي على نطاق صغير (التطور الجزئي)، إلا أن الأدلة المتاحة ضعيفة للغاية فيما يتعلق

---

(١) دوري بارك وآخرون، "الكشف عن الخصائص الجديدة لنحل العسل الآسيوي، Apis cerana، عن طريق تسلسل الجينوم الكامل"، BMC Genomics 16، رقم ١ (يناير ٢٠١٥): ٥، https://doi.org/10.1186/1471-2164-16-1.

(٢) دانيال ف. سيمولا وآخرون، "جينومات الحشرات الاجتماعية تظهر تطورًا كبيرًا في تكوين الجينات وتنظيمها مع الحفاظ على السمات التنظيمية المرتبطة بالسلوك الاجتماعي"، أبحاث الجينوم ٢٣ (٢٠١٣): ١٢٣٥.

بقدرته على تفسير نشأة المئات أو حتى الآلاف من الجينات الجديدة، بالإضافة إلى ظهور السلوكيات المعقدة المبرمجة الجديدة، والخوارزميات الغنية بالمعلومات التي تبدو وكأنها تشكل الأساس لهذه السلوكيات.

غالبًا ما يلجأ أنصار التطور الداروينى إلى مفهوم "ضغط الانتقاء" لتفسير تطور السمات والسلوكيات الجديدة .ومع ذلك، كما ناقشنا بالتفصيل في الفصل السادس، فإن ضغط الانتقاء وحده لا يمكن أن يفسر أصل السمات الجديدة، بما في ذلك نشأة السلوكيات المعقدة المبرمجة الجديدة.

التفسير الأكثر إقناعًا هو أن هذه الابتكارات المذهلة في تاريخ الحياة قد نتجت عن تصميم ذكي. فالكائنات الذكية قادرة على توليد هياكل غنية بالمعلومات بسرعة نسبيًا، دون الحاجة إلى أن تمر هذه الهياكل بمرحلة التطور التدريجي والتحسن المستمر في كل خطوة من خطوات عملية الخلق.

الهندسة التصميمية

شهدت السنوات الأخيرة تطورات ملحوظة في مجال البيولوجيا النظمية المزدهر. وفقًا لعالم الفيزياء ديفيد سنوك من جامعة بيتسبرغ، فإن "النموذج الجديد" للبيولوجيا النظمية "يحلل الأنظمة الحية من حيث مفاهيم هندسة النظم مثل التصميم، ومعالجة المعلومات، والتحسين، ومفاهيم أخرى غائية بشكل صريح"[١].

---

(١) ديفيد سنوك، "بيولوجيا الأنظمة كبرنامج بحثي للتصميم الذكي"، BIO-Complexity 3 (2014): 1-11، https://doi.org/10.5048/BIO-C.2014.3.

يوثق سنوك كيف تختلف مبادئ التصميم الهندسي عن المنظور التقليدي للفيزياء، حيث يكتب: "النموذج السائد في الفيزياء هو أن القواعد البسيطة وغير الغائية ستفسر كل شيء في النهاية. حتى السلوك الناشئ في الأنظمة المعقدة يُفترض أنه نتيجة لتفاعلات بسيطة. على النقيض من ذلك، تتخذ الهندسة نهجًا من الأعلى إلى الأسفل وهو غائي بشكل صريح. يتم تحديد هدف، ثم يتم ترتيب الأجزاء لتحقيق هذا الهدف"[١].

في الهندسة، يؤدي كل نظام وظيفة محددة. وبالمثل، في علم الأحياء، يؤدي كل نظام (الجهاز الهضمي، والجهاز التنفسي، والجهاز العصبي، والجهاز الدوري، وما إلى ذلك) وظيفة محددة. لذا فإن الانتقال إلى استخدام تفكير هندسة النظم في علم الأحياء أمر بديهي إلى حد ما بالنسبة للمهندسين.

يمكن إيجاد البيولوجيا النظمية واستخدامها لطرق تحليل هندسة النظم في المحاكاة الحيوية ودراسة الاتصالات الحيوانية. المحاكاة الحيوية هي "دراسة تكوين أو بنية أو وظيفة المواد والمواد المنتجة بيولوجيًا (مثل الإنزيمات) والآليات والعمليات البيولوجية (مثل تخليق البروتين أو التمثيل الضوئي) خاصة لغرض تخليق منتجات مماثلة بواسطة آليات اصطناعية تحاكي تلك الطبيعية"[٢].

---

(١) سنوك، "بيولوجيا الأنظمة."

(٢) ميريام وبستر، انظر "المحاكاة الحيوية"، تم الوصول إليه في ٢٠ أغسطس ٢٠٢١، https://www.merriam-webster.com.

الدافع وراء هذا المجال من الدراسة هو أن الطبيعة تتضمن العديد من التصاميم التي تبدو محسّنة للغاية للوظائف المحددة. أحد الأمثلة على ذلك هو تصميم قرص العسل لخلية نحل العسل، والذي تم نسخه الآن في العديد من الهياكل التي صنعها الإنسان. مثال آخر هو الحرير، الذي يتم تقليده في مواد مثل النايلون. ومن الأمثلة الأخرى استخدام تصميم جناح الطيور لإلهام أجنحة الطائرات، وتصميم ملابس السباحة ذات السحب المنخفض للسوائل بناءً على جلد القرش. أيضًا، يتم بناء أغشية الخلايا وأوراق النبات من مواد طاردة للماء. كان هذا هو الإلهام لتطوير مواد طاردة للماء اصطناعية تستخدم على هياكل قوارب السباق ورادارات الهوائي. وكمثال أخير، كان تصميم تدفق الهواء لأعشاش النمل الأبيض الموصوف في الفصل ٥ هو الإلهام لأول هيكل بناء تبريد طبيعي بالكامل في العالم في زيمبابوي[١].

في كتابه الرائع "Noise Matters"، يطبق عالم الأحياء آر هافن وايلي من جامعة نورث كارولينا في تشابل هيل مجال هندسة نظرية الكشف عن الإشارات على الاتصالات الحيوانية. ويذكر أن هذا التطبيق "يكشف أن الفراغ في فهمنا للتواصل هو في الواقع أكبر بكثير مما هو متوقع بسذاجة. على وجه الخصوص، فإن عدد المعلمات المطلوبة لتوصيف الاتصالات أكبر مما هو مفهوم الآن"[٢]. يوضح وايلي أن معظم الاتصالات الحيوانية، في حين أنها لا

(١) جانجسون هوانج وآخرون، "المحاكاة الحيوية: التنبؤ بمستقبل العلوم والهندسة والطب"، المجلة الدولية للطب النانوي ١٠ (٢٠١٥): ٥٧٠٥.

(٢) ر. هافن وايلي، "الأصوات مهمة: تطور الاتصال" (كامبريدج، ماساتشوستس: مطبعة جامعة هارفارد، ٢٠١٥)، ١٢٨.

تحقق أداءً "مثاليًا"، إلا أنها مع ذلك محسّنة للغاية. والسبب هو أن هناك دائمًا مفاضلات هندسية يجب إجراؤها بين جميع المعلمات، بما في ذلك "الضوضاء" المرتبطة ببيانات المستشعر.

بناءً على عملي الخاص في أنظمة الاتصالات وهندسة الكشف عن الإشارات، يمكنني تأكيد هذه النتيجة. في بعض مجالات البيولوجيا النظمية، يتم استخدام أساليب النمذجة الرياضية المتطورة لتحليل كيفية تصميم الأنظمة البيولوجية للعمل. وتشمل هذه التقنيات النمذجة نظرية أنظمة التحكم، والتحسين، ونظرية المعلومات، والاستدلال الإحصائي البايزي[١]. تندرج هذه الأساليب ضمن الفئة العامة للهندسة العكسية.

الهندسة التصميمية

يقدم لنا فيلسوف البيولوجيا روبرت ريتشاردسون وصفًا لكيفية استخدام عملية "الهندسة العكسية" في بعض الأحيان لتقييم عملية تكيف الأنظمة البيولوجية، فيقول: "إذا بدأ التفكير التكيفي بتحديد "المشاكل" البيئية التي تواجه الكائن الحي، ثم شرح أو استنتج "الحل" بناءً على هذه المشكلة، فإن الهندسة العكسية تعكس هذا المسار المنطقي تمامًا. فهي تبدأ

(١) أليخاندرو ف .فيلافيردي وخوليو ر .بانجا، "الهندسة العكسية والتعريف في بيولوجيا الأنظمة : الاستراتيجيات والمنظورات والتحديات"، مجلة واجهة الجمعية الملكية ١١، رقم ٩١ (فبراير ٢٠١٤) : 20130505، https://doi.org/10.1098/rsif.2013.0505.

بـ"الحل" ثم تستنتج ما الذي يمكن أن يكون "المشكلة" البيئية التي أدت إلى هذا الحل"[١].

يوضح ريتشاردسون أن الهدف من استخدام الهندسة العكسية في مثل هذه الحالات هو استنتاج السبب التاريخي للبنية الفيزيائية، أي تحديد التحدي البيئي الذي واجهه الكائن الحي واستجاب له بالتطور والتكيف. ومع ذلك، فإن صياغة ريتشاردسون تشير ضمنيًا إلى أن الكائن الحي يطور تكيفًا من أجل "حل" "مشكلة" معينة. وقد وضع كلتا الكلمتين بين علامتي اقتباس لأنهما غير مبررتين في سياق التطور الداروينى. فكلا المصطلحين يشيران إلى وجود أهداف وغاية، وهي أمور يفتقر إليها التطور الأعمى وغير الموجه.

على الجانب الآخر، تجد مفاهيم الأهداف والغايات تطبيقًا مباشرًا في منظور التصميم الذكي. ووفقًا لهذا المنظور، تعمل الهندسة العكسية في علم الأحياء بشكل جيد لأن الأنظمة البيولوجية التي ندرسها قد تم تصميمها بالفعل بشكل ذكي. على سبيل المثال، قاد منظور التصميم الذكي الباحث ويليام ديمبسكي إلى التنبؤ بشكل صحيح بأن الكثير مما كان يُعتبر "حمض نووي لا وظيفي" من قِبل الداروينيين سيتبين أنه يمتلك وظائف حيوية، وقد أثبتت الدراسات الحديثة صحة هذا التنبؤ[٢].

---

(١) روبرت سي. ريتشاردسون، "التصميم الهندسي والتكيف"، فلسفة العلم ٧٠ (ديسمبر ٢٠٠٣): ١٢٧٧.

(٢) ويليام أ. ديمبسكي، "التصميم الذكي: الجسر بين العلم واللاهوت) "داونرز غروف، إلينوي: InterVarsity Press، ١٩٩٩(؛ "ثورة التصميم: الإجابة على أصعب الأسئلة حول التصميم الذكي")داونرز غروف، إلينويInterVarsity Press :، ٢٠٠٤(، ٣١٧.

في الختام، يمكننا القول إن البيولوجيا النظمية تدرس الأنظمة البيولوجية كما لو كانت أنظمة هندسية مثالية أو شبه مثالية، وذلك بهدف فهم هذه الأنظمة بشكل أفضل. واليوم، تمارس البيولوجيا النظمية على نطاق واسع وتعتبر نهجًا مثمرًا في أبحاث علم الأحياء. يلتزم العديد من الباحثين في هذا المجال بنظرية التطور، لكنهم أثناء ممارستهم للبيولوجيا النظمية يتبنون - ولو بشكل افتراضي - فكرة أن النظام البيولوجي قيد الدراسة هو نتاج تصميم هندسي. أما مؤيدو التصميم الذكي، فيتخذون نهجًا أكثر وضوحًا ومباشرة في عملهم في مجال البيولوجيا النظمية، مستندين إلى القول المأثور القديم: "إذا كان يمشي مثل البطة، ويصدر صوتًا مثل البطة، ويطير مثل البطة، فلابد أنه بطة".

لكن كيف تنطبق البيولوجيا النظمية على السلوكيات الحيوانية المعقدة المبرمجة؟ كمثال على ذلك، وصفنا في الفصل الثاني الأنظمة المبرمجة للملاحة الحيوانية باستخدام مصطلحات هندسية، وقمنا بتوضيحها بشكل تخطيطي موجز في الشكل ٢.٢. نجد في هذه الأنظمة الحيوانية مكونات الأجهزة، والمستشعرات، والبرامج، تمامًا كما هو الحال في العديد من الأنظمة الإلكترونية. فالدماغ وأجزاء الجسم (الأرجل والأجنحة وغيرها) تمثل الأجهزة، والحواس الخمس للحيوانات تمثل المستشعرات، والخوارزميات المشفرة في الدماغ تمثل البرامج. ومن المهم أيضًا التأكيد على العلاقة المتينة بين الشكل والسلوك؛ فالسلوك يحتاج إلى أن يتوافق مع الهياكل الفيزيائية (الشكل) لتحقيق الأداء الأمثل. ولهذا السبب، تتضمن عملية التصميم الهندسي تقييم كيفية تحسين الأجهزة لأداء وظيفة محددة مشفرة في برنامج

النظام. كل هذه المفاهيم تنطبق بشكل رائع على تحليل السلوكيات الحيوانية المعقدة المبرمجة. فكل عنصر من العناصر في الشكل ٢.٢ الذي يساهم في السلوك يؤدي وظيفة محددة. ولا يمكن أن يحدث السلوك ما لم تكن كل وظيفة موجودة وتعمل بالطريقة المصممة لها. إن تضافر هذه الوظائف معًا هو ما يحقق الهدف المنشود من السلوك (انظر الشكل ٣.٥).

هناك أيضًا دليل على وجود تصميم هندسي ذكي في الكفاءة التي يتم بها تثبيت هذه البرامج في أدمغة الحيوانات. وتعد الحشرات الاجتماعية أفضل مثال على ذلك، حيث أن لديها أدمغة صغيرة الحجم ولكنها تحتوي على برامج معقدة للغاية تحكم سلوكيات متطورة. إن التحسين المطلوب لتضمين مثل هذه الخوارزميات المعقدة في أدمغة صغيرة الحجم لا يمكن تفسيره إلا على أنه نتاج تصميم هندسي بارع.

وفي المستقبل، قد تنتقل دراسة هذه السلوكيات المعقدة المبرمجة وهندستها الأساسية إلى التركيز على المحاكاة الحيوية، بهدف تطوير شبكات عصبية اصطناعية مدمجة. وقد بدأ علماء الكمبيوتر بالفعل في استكشاف كيفية نقل أساليب تخزين المعلومات من رقائق السيليكون إلى تخزين قائم

على الكربون[١]، مستلهمين من الحمض النووي في سعيهم لتطوير أجهزة تخزين معلومات تعد بتجاوز حدود تخزين السيليكون بشكل كبير[٢].

ولكن كيف تُقيّم نظرية التطور في ضوء معيار التصميم الهندسي؟ كما رأينا سابقًا، يلجأ التطوريون إلى قوانين يُزعم أنها تفرض ظهور هذه الميزة أو تلك الميزة المصممة بذكاء. ومع ذلك، فإن التنوع الهائل في الحلول البيولوجية يناقض فكرة الحلول الحتمية التي تفرضها القوانين الطبيعية بشكل حتمي. وأخيرًا، والأهم من ذلك، أننا نفتقر إلى الخبرة الموحدة والمتكررة للعمليات التطورية العمياء التي تؤدي إلى هندسة أنظمة جديدة، في حين أننا نشهد عوامل ذكية تقوم بذلك طوال الوقت.

أصل الخوارزميات

كما تمت مناقشته في الفصل ٦، لا يمكن للعمليات التطورية العمياء أن تفسر منشأ المعلومات اللازمة لتعريف السلوكيات المعقدة المبرمجة، بما في ذلك الخوارزميات التي تحدد وتتحكم في هذه السلوكيات. لم يتم رصد أي عملية عمياء قادرة على إنتاج معلومات جديدة، معقدة، ومحددة، كما لم يتم تصميم أي نموذج حاسوبي يحاكي هذه العملية بنجاح. بدلاً من ذلك، تشير تجاربنا المتكررة والموحدة إلى أن التصميم الذكي هو مصدر المعلومات

---

(١) ويليام أ. ديمبسكي، "التصميم الذكي: الجسر بين العلم واللاهوت "(داونرز غروف، إلينوي: InterVarsity Press، ١٩٩٩)؛ "ثورة التصميم: الإجابة على أصعب الأسئلة حول التصميم الذكي" (داونرز غروف، إلينويInterVarsity Press :، ٢٠٠٤)، ٣١٧.

(٢) جورج إم. تشيرش، ويوان جاو، وسريرام كوسوري، "تخزين المعلومات الرقمية من الجيل التالي في الحمض النووي"، Science 337(سبتمبر ٢٠١٢): ١٦٢٨.

الوظيفية الجديدة، مما يوفر تفسيرًا منطقيًا لوجود مثل هذه المعلومات في الأنظمة البيولوجية بشكل عام، وللمعلومات التي تكمن وراء السلوكيات المعقدة المبرمجة بشكل خاص.

إحدى القضايا التي لم يتم تناولها في الدراسات المتعلقة بالتغيرات الجينية المرتبطة بالسلوك الاجتماعي وغيره من السلوكيات المعقدة المبرمجة هي أن هذه التغيرات لا تفسر فيما يبدو منشأ الخوارزميات التي تتحكم في هذه السلوكيات. أحد التفسيرات المحتملة هو أن الخوارزميات قد لا توجد دائمًا داخل الحمض النووي الذي يرمز للبروتينات، حيث توجد أدلة على وجود تغييرات في الحمض النووي غير المشفر مرتبطة بالسلوك الاجتماعي. وبغض النظر عن الآلية الدقيقة، يمثل تعقيد الخوارزميات تحديًا كبيرًا للتفسير الداروينى. وعلى النقيض من ذلك، تظهر الخوارزميات عددًا من الخصائص التي تتفق مع مفهوم التصميم الذكي.

الغائية

الغائية هي "مذهب أو دراسة الأغراض أو الأسباب النهائية، خاصة فيما يتعلق بأدلة التصميم أو الغرض في الطبيعة". يسمح أنصار المادية الداروينية بما يسمى الغائية "الداخلية" - أي الغائية الداخلية للكائن الحي المعني. وفقًا للفيلسوف مايكل روس، أظهر داروين "كيفية تحقيق الغرض دون اللجوء مباشرة إلى مفهوم المصمم - الانتقاء الطبيعي يحقق النتائج وفقًا لقوانين عمياء دون الإشارة المباشرة إلى وجود عقل واع. الغائية هنا داخلية". يقدم فرانسيسكو أيالا مثالًا أكثر واقعية، "أجنحة الطيور لها غائية طبيعية. إنها

تخدم غرضًا - الطيران - لكن تكوينها لا يعود إلى التصميم الواعي لأي كائن". يختصر جيري كوين الأمر بصراحة: "إن مفاهيم الغرض النهائي و الغائية (قوة خارجية توجه التطور) ليست ببساطة جزءًا من العلم".

أود أن أزعم أن هذا النفور نابع من "رهاب الغائية"، أي النفور أو عدم الرغبة في الاعتراف بوجود تصميم أو أسباب نهائية في الطبيعة، لأنها لا تتناسب مع النموذج الطبيعي[1]. بالإضافة إلى التأكيد على أن الغائية ليست لها مكان في العلم، يدعي كوين أنه "ببساطة لا يوجد دليل على التدخل المزعوم لمصمم غائي (أي خالق) في التطور".

لكن الأدلة قوية على أن السلوكيات الموصوفة هنا (مثل الملاحة والهجرة والبناء) بالإضافة إلى العديد من السلوكيات الأخرى تنطوي بالفعل على غائية، وليست فقط الغائية الداخلية كما وصفها روس. على سبيل المثال، توفر السلوكيات الاجتماعية المرتبطة بالتوسع الاجتماعي للكائنات الفائقة (Superorganisms) دليلاً على وجود غائية أعلى. جميع الوظائف التي تؤديها المجموعات الاجتماعية لها أغراض وأهداف محددة تعود بالنفع على المستعمرة ككل، بما في ذلك الحالات التي تتضاءل فيها فرص الفرد في البقاء ونقل جيناته بشكل كبير، وهو ما يتعارض مع التوقعات الداروينية.

مثل هذه الأمثلة على الغائية عالية المستوى لا تتوافق مع المادية الداروينية ولكنها تتلاءم تمامًا مع منظور التصميم الذكي. ففي النهاية،

---

(١) قاموس أكسفورد الإنجليزي، انظر "رهاب الغائية."

الكائنات الذكية هي التي يمكنها وتخطط وتسعى لتحقيق الأهداف، سواء لأنفسها أو للآخرين.

التقارب

كما رأينا في الفصل ٦، تحدث العديد من السلوكيات المعقدة المتشابهة في حيوانات بعيدة نسبيًا عن بعضها البعض من حيث النشوء والتطور. أحد الأمثلة على تقارب أنظمة الملاحة هو وجود حيوانات متنوعة ومتباعدة نسبيًا تستخدم الشمس كبوصلة، بما في ذلك الفراشات والنمل والنحل والطيور. مثال آخر: العديد من أنواع النمل والنحل والنمل الأبيض تظهر تقاربًا في السلوك الاجتماعي، بما في ذلك هياكل الطبقات وتنظيم السلوك من خلال الفيرومونات وتعقيد بنية الأعشاش. بالإضافة إلى ذلك، يُظهر النمل والنمل الأبيض أيضًا سلوكيات زراعية متشابهة.

يصف علماء التطور هذه الظواهر بأنها نتيجة "للتقارب". التقارب هو مجرد تسمية للظاهرة، ولا يقدم تفسيرًا حقيقيًا. غالبًا ما يُعزى إلى ضغوط الانتقاء الطبيعي المشتركة، ومع ذلك، فإن ضغط الانتقاء وحده لا يمكن أن يكون سببًا كافيًا. من بين المشاكل الأخرى، لكي يؤدي ضغط الانتقاء إلى ظهور سمات وسلوكيات جديدة متطابقة تقريبًا في هذه المجموعات الحيوانية المختلفة، يجب أن تكون هناك عملية حتمية تسبب التغييرات الجينية أو فوق الجينية التي تؤدي إلى السلوك. لا يوجد دليل على أن مثل هذه العملية الحتمية يمكن أن تحدث أو تحدث بالفعل، وهناك الكثير من الأدلة التي تشير إلى أنها لا تحدث.

يوفر التصميم الذكي تفسيرًا أكثر منطقية للسلوكيات المتقاربة: التصميم المشترك بواسطة كائن أو كائنات ذكية يمكنها بحرية اختيار إعادة استخدام الأفكار والتصميمات في سياقات مختلفة، تمامًا كما يعيد المهندسون استخدام العجلات والأجهزة الأخرى في آلات متنوعة، أو يعيد مبرمجو الكمبيوتر استخدام وحدات البرامج في برامج حاسوبية مختلفة.

البساطة

من بين المبادئ التي غالبًا ما يتم اللجوء إليها في التفسيرات العلمية هو مبدأ "البساطة" أو ما يعرف بـ "شفرة أوكام" (Occam's razor)؛ الذي ينص على أنه، في حال تساوي جميع العوامل الأخرى، فإن التفسير الأبسط هو الأرجح أن يكون صحيحًا.

قد يبدو أن مبدأ البساطة هذا يصب في مصلحة النظرية الداروينية. في الواقع، كانت البساطة لفترة طويلة واحدة من أهم نقاط القوة التي ساهمت في انتشار هذه النظرية وقبولها. وكما عبر داروين نفسه في الجملة الأخيرة من كتابه "أصل الأنواع": "هناك عظمة في هذه النظرة إلى الحياة، بقواها المتعددة، التي نُفخت في الأصل في أشكال قليلة أو في شكل واحد؛ وبينما استمر هذا الكوكب في الدوران وفقًا لقانون الجاذبية الثابت، من بداية بسيطة كهذه، تطورت أشكال لا حصر لها، جميلة وعجيبة للغاية".

بمعنى آخر، يُقال إن جميع أشكال الحياة ترجع إلى التباين العشوائي والانتقاء الطبيعي على مدى فترات طويلة من الزمن. يا لها من بساطة وأناقة!

تم أيضًا الاحتكام إلى مبدأ البساطة في النقاشات حول أصل السلوك الحيواني. استخدم عالم النفس سي لويد مورغان شكلاً من أشكال "شفرة أوكام" يُعرف باسم "مبدأ مورغان" (Morgan's Canon) عندما اقترح أن التفسيرات الأبسط لأصل سلوكيات حيوانية معينة هي المفضلة. وتماشيًا مع هذا المبدأ، نظر إلى الحيوانات - وخاصة الحيوانات الأقل تطورًا - على أنها مجرد آلات. ومن الأمثلة على تطبيق هذا النوع من التفسيرات ظاهرتي التعود والاشتراط الكلاسيكي (Pavlovian conditioning). كان يُنظر إلى مثل هذه السلوكيات على أنها مجرد استجابات انعكاسية بسيطة للمحفزات.

إذا كانت هذه هي نهاية القصة، لكان من المعقول القول إن مبدأ البساطة يصب في مصلحة التطور غير الموجه كتفسير لأصل السلوكيات المعقدة المبرمجة. ولكن كما رأينا، هناك جوانب أخرى للقصة لم يتم أخذها في الاعتبار. لا يمكن أن تكون البساطة دليلًا على صحة النظرية إلا إذا تم استيفاء الشرط الأساسي وهو "تساوي جميع العوامل الأخرى". عندما يتجاهل هذا الشرط، تصبح البساطة معيارًا مضللًا. وتظهر الأبحاث الموثقة في هذه الصفحات أن جميع العوامل الأخرى بعيدة كل البعد عن أن تكون متساوية. التفسيرات البسيطة لأصل السلوكيات المعقدة المبرمجة غير كافية. لقد رأينا هذا في قسم "التعلم اللافقاري" في الفصل ٤، حيث تبين أن الحشرات لا تمتلك قدرة تعلم عامة، ولكنها مصممة بدلاً من ذلك لتعلم معلومات خاصة بنمط حياتها وسلوكها. بالإضافة إلى ذلك، في الفصل ٦، رأينا كيف أن تنفيذ حتى السلوكيات البسيطة ينطوي على آليات عصبية معقدة. نحن نعلم الآن أن العديد من السلوكيات المبرمجة معقدة للغاية. هذه السلوكيات تنطوي على

آليات متطورة، بما في ذلك في بعض الحالات خوارزميات متطورة، مثل تلك الخاصة بالملاحة والسلوكيات الاجتماعية. إن تجاهل هذا التعقيد يعني تجاهل جوهر الظاهرة التي تحتاج إلى تفسير. وبعد الاعتراف بالتعقيد الوظيفي الذي يحتاج إلى شرح، فإن الخطوة التالية هي إيجاد تفسير يكون كافيًا من حيث السببية وقدرته على التفسير.

إذا كان لدينا تفسير واحد - وهو التطور غير الموجّه - يفتقر إلى القدرة المثبتة على إنتاج الخوارزميات المعقدة التي تكمن وراء السلوك المعقد المبرمج، ولدينا تفسير آخر قائم على نوع من العلل (أو الأسباب) التي أظهرت بشكل متكرر القدرة على إنتاج الخوارزميات المعقدة، فإن جميع العوامل الأخرى تصبح غير متساوية. لقد فشلت الأسباب غير العاقلة في اجتياز اختبار مهم، في حين نجحت فرضية التصميم في اجتيازه.

في ملاحظة جانبية، لقد فقدت نظرية التطور الحديثة حتى الكثير من بساطتها المزعومة، حيث قام أولئك الذين يسعون إلى إنقاذها بإضافة العديد من التعديلات والفرضيات الإضافية، في عملية تراكم لا تختلف عن المحاولات التي جرت قبل قرون لإنقاذ نموذج مركزية الأرض للنظام الشمسي عن طريق إضافة العديد من الأفلاك الدوارة (epicycles) لشرح الانحرافات في حركات الكواكب. بدأت عملية التراكم هذه مع الطبعات اللاحقة من كتاب داروين "أصل الأنواع" وتسارعت في العقود الأخيرة. وكما رأينا في الفصل ١، أدرج داروين في نظريته شكلاً من أشكال اللاماركية (Lamarckism) لشرح سلوكيات الحيوانات. لذا لم تكن النظرية في الواقع

بهذه البساطة كما هو مزعوم. وفي الآونة الأخيرة، تضحي "التركيبة التطورية الموسعة" (extended evolutionary synthesis) بالأناقة النظرية بينما لا تزال تفشل في تفسير أصل السمات الجديدة، بما في ذلك السلوكيات المعقدة المبرمجة الجديدة، وبشكل أوسع، أصل المعلومات البيولوجية الجديدة في تاريخ الحياة.

التنبؤات

يمثل هذا "المميز" في الواقع مجموعة من المميزات، ويتضمن بعض المميزات التي سبق التطرق إليها. يقود كل من التطور الأعمى والتصميم الذكي إلى توقعات محددة حول ما سيجده الباحثون في مجال البيولوجيا وفي تاريخ الحياة. والسؤال المطروح هو: أي نموذج يحقق أكبر قدر من النجاحات في هذا المجال؟ لا يزال الحكم معلقًا بشأن بعض التنبؤات، ولكن بالنسبة للبعض الآخر، فقد حُسم الأمر منذ زمن بعيد.

يركز هذا الكتاب على أصل علم الأحياء، لذا فهو لا يهتم في المقام الأول بعمل تنبؤات حول الأحداث المستقبلية، مثل موعد حدوث الكسوف الشمسي التالي. ومع ذلك، يتحدث العلماء عن نوع آخر من التنبؤات، وهو التنبؤ بما يمكن اكتشافه أو عدم اكتشافه حول سمات معينة من العالم الطبيعي (المعروف باسم "التنبؤات الرجعية" أو "الاستنتاجات الرجعية"). على سبيل المثال، توقع أصحاب نظرية التصميم الذكي أن يتم اكتشاف وظائف للكثير مما يسمى "الحمض النووي غير المرغوب فيه" أو "junk DNA"، وقد أثبتت الأبحاث صحة هذا التنبؤ. وباعتبارها نظرية في الأصول، تقدم نظرية

التصميم الذكي في علم الأحياء المزيد من هذا النوع الثاني من التنبؤات، ولكنها تقدم أيضًا بعض التنبؤات من النوع الأول. على سبيل المثال، في عام ٢٠٠٧، علق مايكل بيهي على تجربة التطور طويلة المدى التي أجراها ريتشارد لينسكي على بكتيريا الإشريكية القولونية قائلا:

"تصرفت البكتيريا المعملية بشكل مشابه جدًا لمسببات الأمراض البرية: فقد أدت مجموعة من التغييرات غير المترابطة إلى تعديل طفيف في الأنظمة الموجودة مسبقًا. لم يتم إنتاج أي شيء جديد بشكل أساسي. لا تفاعلات جديدة بين البروتينات، ولا آلات جزيئية جديدة. ومثل الثلاسيميا عند البشر، تم اكتساب بعض المزايا التطورية الكبيرة عن طريق تعطيل أو كسر بعض الأشياء ... ومع ذلك، فإن كسر بعض الجينات وتعطيل البعض الآخر لن يؤدي إلى إنتاج شيء جديد ذي قيمة تذكر. بعد فترة، بدأت التغييرات المفيدة الناتجة عن التجربة في التلاشي. إن حقيقة أن الملاريا، مع وجود فرص أكبر بمليار مرة، أعطت نمطًا مشابهًا جدًا للدراسات الأكثر تواضعًا على الإشريكية القولونية، تشير بقوة إلى أن هذا هو كل ما يمكن أن تفعله الداروينية."

بعد أربعة عشر عامًا وعشرات الآلاف من أجيال الإشريكية القولونية، يبدو تقييم بيهي دقيقًا. لقد تسببت بكتيريا الإشريكية القولونية في تعطيل بعض الأشياء التي أدت إلى اكتساب مزايا تكيفية مع بيئات محددة، ولكن لم يتطور أي شيء جديد بشكل أساسي.

أما بالنسبة لموضوع هذا الكتاب، فإن إطار عمل التصميم الذكي لأصل السلوكيات المعقدة المبرمجة يقترح بعض التنبؤات حول ما يمكن أن نكتشفه في المستقبل. أحد التنبؤات الضمنية في جميع هذه الصفحات هو أنه سيستمر تراكم الأدلة على أن السلوكيات المعقدة المبرمجة يتم التحكم فيها من خلال خوارزميات معقدة، وليس من خلال آليات "بسيطة" كما يدعي العديد من علماء التطور. بناءً على الأدلة المتراكمة، فإن هذا المميز يرجح كفة التصميم الذكي على التطور الأعمى. ما الذي يمكن أن نتوقعه في المستقبل؟ في رأيي، فإن الأدلة على وجود خوارزميات أساسية قاطعة بالفعل، ولكن هذه ليست وجهة نظر عالمية، ولا يزال أمامنا الكثير لنتعلمه حول كيفية تضافر الجينات وعناصر التحكم الجيني والمكونات فوق الجينية والشبكات العصبية لتوليد السلوكيات المعقدة المبرمجة. أتوقع أنه كلما ازدادت معرفتنا، زادت قوة الأدلة التي تدعم وجود خوارزميات أساسية.

خلاصة المميزات

يسرد الجدول ١٧.أعلاه أحد عشر "مميزًا" - وهي عبارة عن ملاحظات أو خصائص قد تدعم إما التطور الأعمى أو التصميم الذكي .الجدول ليس شاملًا، وهناك الكثير مما يمكن قوله حول كل مميز تمت مناقشته في المواد أسفل الجدول .كان الغرض من المناقشة، بالطبع، هو تقديم حجة قوية لصالح التصميم الذكي على التطور الأعمى باعتباره أفضل تفسير لأصل الكائنات الحية بشكل عام والسلوكيات المعقدة المبرمجة بشكل خاص. ولكن بشكل أكثر تواضعًا، تهدف المناقشة إلى التأكيد على أن التحديات التي تواجه النظرية

التطورية كثيرة ومتعددة؛ إنها تظهر في كل مكان. ووفقًا للتحليل المقدم أعلاه، يمكن اعتبار ثلاثة من هذه المميزات بمثابة نقاط تعادل، في حين أن ثمانية مميزات أخرى تصب في مصلحة التصميم الذكي باعتباره التفسير الأفضل.

هناك مميز واحد لم يتم تضمينه في الجدول وهو: "يتوافق مع قاعدة الطبيعة المنهجية". بالنسبة للبعض، يعد هذا المميز هو الأهم على الإطلاق، ويستخدم كأداة مفضلة لاستبعاد التصميم الذكي من النقاش العلمي. ولكن كما تمت مناقشته سابقًا، هناك منهجيات متنوعة في العلوم المختلفة، وقد تغيرت هذه المنهجيات عبر الزمن. علاوة على ذلك، فإن هذه القاعدة المنهجية بالذات ترقى إلى مستوى "مغالطة التسليم بصحة المطلوب" (begging the question) عندما يكون موضوع البحث هو السبب الحقيقي لأصل التنوع الهائل في الحياة.

نحن نسعى إلى اكتشاف السبب الحقيقي، وليس التفسير الأكثر إقناعًا الذي يتوافق مع النزعة الطبيعية. وأفضل طريقة للتحقيق في هذا السؤال هي من خلال دراسة الأدلة ومناقشتها بشكل مفتوح ودون قيود. سنتطرق إلى المزيد حول موضوع النزعة الطبيعية في الفصل الأخير، حيث سنناقش الاعتراضات المختلفة الموجهة ضد نظرية التصميم الذكي.

الفصل الثامن: الرد على الاعتراضات الشائعة على التصميم الذكي

"لا يوجد شيء جيد لا يواجه معارضة، ولا ينبغي أن يقلل من قيمته بسبب مواجهته للاعتراضات"[1].

- فينسنت دي بول

أي شخص يتابع النقاش حول التطور/التصميم لفترة من الوقت سيصادف سلسلة من الاعتراضات الجاهزة التي يحب أنصار التطور طرحها ضد نظرية التصميم الذكي.

دعونا ننظر فيها هنا في هذا الفصل الأخير ونرى كيف يكون حالها عند تطبيقها على حجتي لصالح التصميم الذكي للسلوكيات الحيوانية المعقدة المبرمجة.

الحجة الأساسية ضد التصميم الذكي هي أنه لا ينبغي اعتباره علماً بل وجهة نظر دينية. عادةً ما تستند هذه الحجة جزئيًا إلى افتراض "المنهجية الطبيعية" (methodological naturalism). يشير مصطلح "الطبيعانية" او "المذهب الطبيعي" (naturalism) بشكل عام إلى "الطبيعانية الأنطولوجية" (ontological naturalism). الطبيعانية الأنطولوجية هي "نظرية للعالم تستبعد ما هو خارق للطبيعة أو الروحي". غالبًا ما تعتبر الطبيعانية الأنطولوجية مرادفة للمادية (materialism) والمادية الفيزيائية

---

(١) فينسنت دي بول إلى كاهن البعثة فيSaintes ، ٢٨ ديسمبر ١٦٥٠، الرسالة رقم ١٣٠١، مراسلات القديس فينسنت دي بول، المؤتمرات، الوثائق، ١٥٨١-١٦٦٠، المجلد ٤، أبريل ١٦٥٠ - يوليو ١٦٥٣ [١٩٢١]، حرره وترجمه ماري بول (نيو روشيل، نيويورك: New City Press، ١٩٩٣)، ١٣٢، https://via.library.depaul.edu/vincentian_ebooks/29/

(physicalism). تم التقاط هذه النظرة للطبيعة بإيجاز في تأكيد كارل ساجان في الجزء الافتتاحي من البرنامج التلفزيوني "الكون" (Cosmos): "الكون هو كل ما هو موجود أو كان موجودًا أو سيكون موجودًا على الإطلاق".

ينبغي التمييز بين المذهب الطبيعي (او الطبيعانية) ، وإن كان وثيق الصلة به، وبين المذهب الطبيعي المنهجي (الطبيعانية المنهجية). يُشدد الطرح الأكثر صرامة في المذهب الطبيعي المنهجي على عجزنا عن تحصيل معرفة موثوقة بأي شيء لا يمكن إثباته من خلال العلوم الطبيعية. أول ما يجب ملاحظته هو أن هذا الطرح إنما هو فرضية فلسفية. في الواقع، تُعد جميع أشكال المذهب الطبيعي مواقف فلسفية في جوهرها. وكما أوضح إرنان ماكمولين، الفيلسوف الراحل من جامعة نوتردام، "لا يُمثل المذهب الطبيعي في حد ذاته ادعاءً علميًا؛ بل يستلزم برهانًا فلسفيًا لدعمه". بمعنى آخر، لا يمكن الاعتماد على العلم وحده لتبرير الطبيعانية المنهجية. وهذا يعني أن هذا الادعاء ينقض نفسه بنفسه؛ فهو لا يُجتاز معياره الخاص لما يُعتبر معرفة مشروعة. (يشبه الأمر رجلاً يُقطع الغصن الذي يجلس عليه).

وعلى نفس المنوال، يشير الفيلسوف مايكل ريا، أيضًا في نوتردام، إلى وجود تناقض في التأكيدات التي يدلي بها العديد من المؤيدين للطبيعانية. فمن ناحية، غالبًا ما تتضمن الطبيعانية الالتزام بأن يكون العلم هو الحكم النهائي في المعرفة حول العالم. ومن ناحية أخرى، يرفض المؤيدون للطبيعانية فكرة أن التطورات في العلم يمكن أن تؤدي إلى رفض الطبيعانية. ولكن

وفقًا لهذا النهج، لا يتم التعامل مع الأدلة العلمية على أنها الحكم النهائي للمعرفة حول العالم؛ بل إن القاعدة الفلسفية هي التي تحكم.

في ملاحظة جانبية، غالبًا ما ترتبط الطبيعانية بـ "الاختزالية" (reductionism)، وهي الرأي القائل بأنه من الأفضل دراسة الأنظمة البيولوجية على أدنى مستوى ممكن. عادةً ما يعني هذا تركيز البحث على الأسباب الجزيئية والكيميائية الحيوية. غالبًا ما يؤدي هذا إلى الفشل في مراقبة السلوك الكلي للحيوانات ومراعاته، بما في ذلك الجوانب الغائية (teleological) للعديد من السلوكيات الحيوانية، كما يتضح من الأمثلة العديدة في هذا الكتاب.

مراجعة الأقران والتصميم الذكي

أحد الاعتراضات الأخرى التي تُثار ضد التصميم الذكي هو أن العلماء المؤيدين له لم ينشروا أبحاثًا ذات صلة في مجلات علمية تخضع لمراجعة الأقران. هذا الادعاء غير صحيح بشكل قاطع، حيث قام معهد ديسكفري بتجميع قائمة بمثل هذه المنشورات، والتي بلغ مجموعها أكثر من ١٣٠ ورقة بحثية اعتبارًا من يوليو ٢٠١٧[١]. وقد ظهر المزيد منذ ذلك الحين. علاوة على ذلك، تجدر الإشارة إلى أنه في تاريخ العلم الحديث، تم طرح العديد من الحجج العلمية المهمة في شكل كتب مع الحد الأدنى من مراجعة الأقران، بدلاً من

(١) "قائمة ببليوغرافية ومشروحة للمنشورات التي راجعها النظراء والتي تدعم التصميم الذكي"، Discovery Institute Center for Science and Culture، يوليو ٢٠١٧، https://www.discovery.org/m/2018/12/ID-Peer-Review-July-2017.pdf.

نشرها في المجلات العلمية التي تخضع لمراجعة الأقران. ويعد كتاب تشارلز داروين "أصل الأنواع" أحد هذه الأمثلة البارزة.

المواد المقدمة في هذا الكتاب تستند إلى أدلة تجريبية، وهي نفس النوع من الأدلة المستخدمة للدفاع عن وتقييم نظرية التطور الداروينية. إن الأدلة والحجج المطروحة هنا فيما يتعلق بالسلوكيات الحيوانية المعقدة المبرمجة تتوافق مع أي تعريف للعلم لا يعتمد على مغالطات منطقية أو افتراضات مسبقة. إذا كان هناك أي شيء ينتهك الروح الحقيقية للعلم والثورة العلمية، فهو سلوك أولئك الذين يحاولون إغلاق باب البحث العلمي المفتوح من خلال التمسك الجامد بالمنهجية الطبيعية (وهي فكرة أن العلم يجب أن يقتصر على التفسيرات الطبيعية فقط). برفضهم النظر في الأدلة التي تدعم التصميم الذكي، فإنهم يضعون قيودًا تعسفية على المسارات التي يمكن أن تقودنا إليها الأدلة العلمية، مما يعيق تقدم المعرفة والفهم.

نعم، التصميم الذكي قابل للاختبار

اعتراض آخر يُثار ضد التصميم الذكي يتعلق بقابلية الاختبار. وكما جاء في وثيقة صادرة عن الأكاديميات الوطنية للعلوم (NAS):

"التصميم الذكي ليس مفهومًا علميًا لأنه لا يمكن اختباره تجريبيًا... إن حجة الخلقيين تعكس العملية العلمية. إنهم يبدأون بتفسير غير مستعدين لتغييره - وهو أن قوى خارقة للطبيعة قد شكلت الأنظمة البيولوجية أو أنظمة الأرض - ويرفضون المتطلبات الأساسية للعلم القائلة بأن الفرضيات يجب أن تقتصر على التفسيرات الطبيعية القابلة للاختبار. لا

يمكن اختبار معتقداتهم أو تعديلها أو رفضها بالوسائل العلمية، وبالتالي لا يمكن أن تكون جزءًا من عمليات العلم"[١].

هذا البيان الصادر عن الأكاديميات الوطنية للعلوم يستند أيضًا إلى مبدأ "المنهجية الطبيعية"، ولكن بما أننا ناقشنا هذا الاعتراض للتو، دعونا نضعه جانبًا هنا.

فيما يتعلق بقابلية اختبار التصميم الذكي، يجب أن نتذكر أن التصميم الذكي، مثل الداروينية الجديدة، هو نظرية تتعلق بالأصول، وبالتالي فهو يركز على أحداث ماضية فريدة وغير قابلة للتكرار. كلا النهجين يستخدمان التفكير الاستنتاجي أو الاستدلال الاستنباطي. تتضمن هذه الطريقة، المستخدمة على نطاق واسع في العلوم التاريخية، "الاستدلالات حول الأحداث أو الأسباب الماضية بناءً على الأدلة أو الحقائق الحالية"[٢].

نحن نختبر كلتا النظريتين من خلال مقارنتهما بالأدلة المتاحة، من خلال معرفة ما إذا كان أي سبب أو أسباب مقترحة لديها القدرة المثبتة على إنتاج التأثيرات المعنية (على سبيل المثال، إنتاج معلومات جديدة)، ومن خلال البحث عن أدلة إضافية يمكن أن تساعدنا على زيادة التمييز بين التفسيرات

(١) "العلم والتطور والخلقوية" (واشنطن العاصمة: الأكاديمية الوطنية للعلوم، ٢٠٠٨)، ٤٢-٤٣.

(٢) ستيفن سي. ماير، "شك داروين: الأصل المتفجر للحياة الحيوانية وقضية التصميم الذكي) "نيويورك : HarperOne، ٢٠١٣(، ٣٤٣ .لدى ماير أيضًا شرح مفصل لهذه الطريقة، والتي يصفها بأنها "استدلال استنتاجي."

وتحديد الأفضل منها. كان هذا هو محور الفصل السابق، حيث اختبرنا التطور الأعمى والتصميم الذكي في ضوء ما يقرب من اثني عشر "مميزًا".

يكتب فيلسوف العلم ستيفن ماير: "بما أن الاعتبارات التجريبية توفر أسبابًا لرفض النظريات العلمية التاريخية أو تفضيل نظرية على أخرى، فمن الواضح أن مثل هذه النظريات قابلة للاختبار. ومثل النظريات العلمية الأخرى، يقدم التصميم الذكي ادعاءات حول أسباب الأحداث الماضية، مما يجعله قابلاً للاختبار في ضوء معرفتنا بالعلاقة بين السبب والنتيجة"[1].

وبالتالي، فإن التصميم الذكي قابل للاختبار، ولكن مثل النظريات الأخرى في العلوم التاريخية، فإن الاختبارات لا تتضمن تجارب معملية تسمح لنا بمراقبة الحدث المعني بشكل مباشر. على سبيل المثال، كيف نشأت حيوانات الانفجار الكمبري؟ حتى لو كان بإمكان المرء تصميم تجربة لتطوير حيوان من النوع الكمبري في المختبر من سلف بدائي، فإننا لن نكون قد لاحظنا الحدث الكمبري المعني - أي الظهور الأصلي لحيوانات العصر الكمبري منذ أكثر من نصف مليار سنة. بدلاً من ذلك، كنا سنلاحظ شيئًا قد يجادل العلماء بأنه يوضح العملية التي أنتجت أول حيوانات العصر الكمبري.

إن السيناريو الافتراضي المذكور أعلاه هو مجرد مثال توضيحي بالطبع . لم ينجح العلماء حتى الآن في إنتاج جزيئات بيولوجية أساسية مثل الحمض النووي أو الحمض النووي الريبي في ظل ظروف طبيعية غير موجهة، أو حتى

---

(١) ستيفن سي. ماير، "صلصة للأوزة"، في "طبيعة الطبيعة"، ١٠٠.

في هندسة أبسط خلية من الصفر باستخدام الذكاء البشري. النقطة المهمة هي أن اختبار النظريات العلمية التاريخية هو بالضرورة عملية مختلفة عن نوع الاختبار الذي يتم إجراؤه، على سبيل المثال، على دواء صيدلاني جديد. في العلوم التاريخية، الاختبار الرئيسي هو ما إذا كانت النظرية تتفق مع الأدلة الحالية، بما في ذلك معرفتنا ببنية السبب والنتيجة في العالم.

يعترض دانيال دينيت على أن مؤيدي التصميم الذكي لم يتنبأوا بأي شيء "ينكره بشكل واضح النظرية السائدة"[1]. لكن كما لوحظ في الفصل السابق، قدم منظرو التصميم الذكي عددًا من التنبؤات حول ما سيتم اكتشافه، وتتناقض هذه التنبؤات بشكل متكرر مع ادعاءات الداروينية. على سبيل المثال، كان مؤيدو التصميم الذكي هم الذين قرروا أن الإشريكية القولونية في تجارب التطور طويل المدى التي أجراها لنسكي لم تطور أي شيء جديد بشكل أساسي. أوضح مايكل بيهي هذه النقطة في عام ٢٠٠٧ عندما لاحظ أن الدراسات الجارية على الإشريكية القولونية أظهرت أن التغييرات المرصودة تنطوي فقط على تغييرات طفيفة في الأنظمة الموجودة مسبقًا، وليس أي شيء جديد بشكل أساسي - "لا تفاعلات جديدة بين البروتينات، ولا آلات جزيئية جديدة. مثل الثلاسيميا في البشر، تم منح بعض المزايا التطورية الكبيرة من خلال كسر الأشياء"، ولكن"كسر بعض الجينات وإيقاف تشغيل البعض الآخر ... لن يصنع الكثير من أي شيء". وأشار بيهي كذلك إلى أن دراسات الملاريا تكشف عن نمط مماثل، ثم أكد بشكل قاطع أن كل هذا "يشير بقوة

(١) دانيال دينيت، "أرني العلم"، نيويورك تايمز، ٢٨ أغسطس ٢٠٠٥.

إلى أن هذا كل ما يمكن أن تفعله الداروينية" [١]. بمعنى آخر، هذا كل ما فعلته أو ستفعله الداروينية. وقد أثبتت السنوات العديدة اللاحقة من الأدلة التجريبية هذا الافتراض [٢]. تجربة لنسكي طويلة المدى، على سبيل المثال، لم تولد أي شيء جديد بشكل أساسي. يوجه الفيلسوف الأمريكي الراحل جيري فودور وعالم الإدراك الإيطالي ماسيمو بياتيلي - بالماريني انتقادًا ذا صلة ضد التصميم الذكي: "التصميم الذكي لا يقدم أي تنبؤات على الإطلاق، سواء كانت قابلة للاختبار أو غير ذلك؛ كل تنبؤاته لاحقة. تكمن المشكلة في أنه لا يمكن معرفة نوع العالم الذي قد يختاره المصمم الذكي مقدمًا "[٣]. لكن هذه مغالطة منطقية تعرف بأسم الجدال مع رجل القش. هناك خصائص مشتركة للأنظمة المصممة بذكاء، كما رأينا، يمكن استخدامها للتنبؤ بالنتائج المستقبلية لتلك الأنظمة. بالإضافة إلى ذلك، نظرًا لأن نظرية التصميم الذكي هي استدلال مقارن لأفضل تفسير، فإنها تقدم أيضًا تنبؤات قابلة للاختبار حول حدود التطور الأعمى. أيضًا، وكما يشير ماير، فإن النظرية التطورية "لا تقدم أي تنبؤ حول أنواع السمات أو الأنواع التي ستنتجها الطفرات العشوائية والانتقاء الطبيعي في المستقبل"[٤]. بدلاً من ذلك، فإنه

---

(١) مايكل ج .بيهي، "حافة التطور :البحث عن حدود الداروينية" (نيويورك Free Press :، ٢٠٠٧)، ١٤٢.

(٢) داستن ج .فان هوفويجن، وكارولين ج .هوفدي، وسكوت أ .مينيتش، "التطور السريع لاستخدام السترات بواسطة الإشريكية القولونية عن طريق الانتقاء المباشر يتطلب citT و"dctA ، مجلة علم البكتيريا ١٩٨، رقم ٧ (أبريل ٢٠١٦).1034-1022 :

(٣) جيري فودور وماسيمو بياتيلي بالماريني، "ما أخطأ فيه داروين) "نيويورك Farrar, Straus and Giroux، ٢٠١٠)، ٢١٣، الملاحظة ٥ للفصل ٧.

(٤) ماير، "صلصة للأوزة"، ١١١.

يقدم تفسيرات للأحداث الماضية، بما في ذلك حقيقة أن الكائنات الحية التي تعيش على الأرض قد تغيرت بمرور الوقت. علاوة على ذلك، وكما لوحظ سابقًا، نظرًا لأن النظرية التطورية يتم الاحتجاج بها لشرح كل من التصميم الأمثل (عبر الانتقاء الطبيعي) والتصميم السيئ، وكذلك التقارب والاختلاف، فإنها تتنبأ بأقل مما قد يعتقده البعض من مؤيديها. عندما تراهن على كلا وجهي كل قرعة عملة معدنية، فلن تحصل على الفضل في ظهور العملة المعدنية أو وجوهها.

يميز فيلسوف العلم بيتر ليبتون بين مفهومي "التنبؤ" و"التكيف". فالتكيف يحدث عندما "يقوم العالم ببناء نظرية لتتلاءم مع الأدلة المتاحة"[١]. أما التنبؤ الناجح، وفقًا لليبتون، فهو عندما "يتم بناء النظرية، وبمساعدة عوامل مساعدة، يتم استنتاج ادعاء قابل للملاحظة، ولكن - على عكس حالة التكيف - يحدث هذا قبل وجود أي سبب مستقل للاعتقاد بصحة الادعاء. ثم يتم التحقق من الادعاء بشكل مستقل"[٢]. يعتقد ليبتون أن النظريات الناجحة عادة ما تتضمن كلاً من التكيف والتنبؤات، لكنه يرى أن التنبؤ له قيمة أكبر من التكيف. أحد أسباب ذلك هو أن التكيف قد يعتبر تفسيرًا لاحقًا للظواهر، وهو ما يسميه ليبتون "التلفيق". أما التنبؤات فهي متفوقة لأنها عرضة للدحض. أتفق بالتأكيد مع ليبتون وآخرين على أن تقديم تنبؤات ناجحة له قيمة أكبر من مجرد تفسير الملاحظات السابقة، حتى لو كانت كلتا المهمتين مشروعتين تمامًا بالنسبة لنظرية علمية. تجدر الإشارة إلى

---

(١) بيتر ليبتون، "الاستدلال إلى أفضل تفسير" (لندن: روتليدج، ٢٠٠٤)، ١٦٤.

(٢) ليبتون، "الاستدلال إلى أفضل تفسير"، ١٦٥.

أن كلاً من التصميم الذكي والنظرية التطورية يقدمان تفسيرات مختلفة للأدلة الموجودة. على سبيل المثال، تفسر نظرية التصميم الذكي وجود معلومات وراثية معقدة في جميع أشكال الحياة. وبالمثل، يفسر العديد من الداروينيين التطور التقاربي من خلال اللجوء إلى ضغط الانتقاء الطبيعي. وهذا يعتبر تفسيرًا لاحقًا للظاهرة. في الوقت نفسه، وعلى الرغم من أن النظريات العلمية التاريخية لا تركز في المقام الأول على تقديم تنبؤات يمكن اختبارها في المختبر، إلا أنها، كما يشير ماير، "في بعض الأحيان تولد تنبؤات مميزة حول ما يجب أن نجده في العالم الطبيعي - تنبؤات تمكن العلماء من مقارنتها بالنظريات العلمية التاريخية الأخرى"[١]. القابلية للاختبار، كما يوضح، تأتي في شكل "تنبؤات حول ما من المحتمل أن نجده في الأنظمة الحية أثناء دراستنا لها"[٢]. هذا النوع من القابلية للاختبار يشمل تنبؤات حول الأدلة الإضافية التي سيتم العثور عليها في جينومات الكائنات الحية، ولكنه يمتد أيضًا إلى التنبؤات حول ما سيتم وما لن يتم العثور عليه في السجل الأحفوري. وثق ماير العديد من تنبؤات التصميم الذكي في الملحق (أ) من كتابه "التوقيع في الخلية". أحد هذه التنبؤات، التي ذكرناها سابقًا، يتعلق بوظيفة ما يسمى بـ "الحمض النووي غير المرغوب فيه" في الجينوم. كما نوقش في الفصل ٦، ادعى العديد من علماء الوراثة ومعظم مؤيدي التطور الداروينى الجديد أن معظم الحمض النووي غير المشفر، الذي يمثل حوالي ٩٩٪، ليس له وظيفة - ومن هنا جاءت تسمية "الحمض النووي غير المرغوب فيه". توقع مؤيدو التصميم

(١) ماير، "صلصة للأوزة"، ١٠٠.

(٢) ماير، "التوقيع في الخلية"، ٤٨٢.

الذكي أن الكثير من هذا الحمض النووي غير المشفر سيثبت أنه يؤدي وظيفة، وقد ثبت صحة هذا التنبؤ.

إن قبول التصميم الذكي لن يعني نهاية العلم

يُجادل البعض بأن قبول فكرة التصميم الذكي سيؤدي حتماً إلى انهيار صرح العلم كما نعرفه، والذي ترسخت أركانه على مدى قرون. يذهب كينيث ميلر إلى القول: "لا يسعى أنصار التصميم الذكي إلى شيء أقل من إحداث ثورة علمية جذرية، انتفاضة من الطراز الأول من شأنها أن تتجاوز مجرد إقصاء داروين من كتبنا ومناهجنا الدراسية. إنهم يتطلعون إلى تفكيك أربعة قرون من العلم الغربي"[١].

ويشدد ميلر على هذا الزعم قائلاً: "بالنسبة لحركة التصميم الذكي، فإن العقلانية التي انبثق منها عصر التنوير، والتي أسست للعلم بشكله الحالي، هي العدو الحقيقي. "سيتطلعون أولاً إلى إعادة تعريف العلم، ثم الإطاحة بـ "الأيديولوجيات المفلسة" للعقلانية العلمية بشكل نهائي"[٢].

لا شك أن هذه ستكون عواقب وخيمة، لو كانت صحيحة بالفعل. لكنها ليست كذلك.

---

(١) كينيث ر. ميلر، "مجرد نظرية: التطور والمعركة من أجل روح أمريكا" (نيويورك Penguin Books، ٢٠٠٨)، ١٦٨.

(٢) ميلر، "مجرد نظرية"، ١٩٢.

أولاً، يستند المدافعون عن التصميم الذكي إلى حجج عقلانية مبنية على أدلة ملموسة من العالم الطبيعي لدعم موقفهم .يتألف هذا الكتاب من سلسلة مترابطة من الحجج العقلانية لصالح التصميم الذكي، كلها تستند إلى معلومات علمية تجريبية.

ثانيًا، العديد من رواد العلم الحديث وجدوا أدلة على التصميم الذكي في العالم الطبيعي. إن مبدأ الطبيعية المنهجية لم يُدرج في صلب العلم إلا في وقت لاحق. وهنا، يعود ميلر إلى اللجوء إلى عقيدة منهجية متخفية في صورة تحقيق علمي صارم، قائم على التجربة والعقلانية المطلقة.

علاوة على ذلك، يمكن أن ينقلب تحذير ميلر المريع ضد التطور الداروينى نفسه. إذا ما وُجدت سمة أو سلوك معين في كائن حي على درجة عالية من الكفاءة والتكيف، فإن المادي الداروينى قد يعزوها بشكل تلقائي إلى الانتقاء الطبيعي. أما السؤال عن الكيفية الدقيقة التي نشأت بها هذه السمة فغالباً ما يتم تجاهله. أو عندما تظهر سمة غير مألوفة في أنواع حيوية بعيدة الصلة، فإن التطوري سيلجأ إلى التطور المتقارب كتفسير. لكن التقارب ليس إلا مصطلحاً وصفياً، وليس تفسيراً حقيقياً. وعندما يُستخدم التقارب كتفسير، فإنه غالباً ما يعني ضمنياً أنه ليست هناك حاجة لمزيد من البحث. وهذا من شأنه أن يعيق العملية العلمية، إذ أن البحث الإضافي ضروري لتحديد السبب الحقيقي وراء وجود سمات متشابهة. وفي الحالات التي يُعزى فيها وجود جينات متماثلة في أنواع بيولوجية بعيدة الصلة إلى التقارب، فإن

البحث الإضافي لا يتم متابعته، لأن التفسير يُفترض أنه ضغط الانتقاء أو غيره من آليات التطور غير الموجهة. وهذا يوقف عجلة العلم.

في المقابل، يبدي منظرو التصميم انفتاحاً على أن تكون سمة معينة في العالم الطبيعي ناتجة عن عمليات طبيعية، أو عن تصميم ذكي، أو عن مزيج من الاثنين معاً. يتمتع منظرو التصميم بحرية اتباع الدليل أينما قادهم. وكما رأينا، فإن علم الأحياء الأنظمة، الذي يتناول النظم البيولوجية على أنها أنظمة مصممة بذكاء، يثبت أنه نهج مثمر للغاية. في المحصلة، يتعارض التصميم الذكي مع الطبيعة العلمية، ولكن ليس مع العلم نفسه.

نعم، الغائية لها مكان في العلم

اعتراض آخر على التصميم الذكي هو أنه يستند إلى مفهوم "الغائية" (أي الهدف أو الغرض)، وهو مفهوم يعتبره الكثيرون في العلوم الطبيعية من المحرمات. يشرح عالم الأحياء التطورية دوغلاس فوتويما سبب رؤية العديد من علماء الأحياء للغائية على أنها خارج الحدود. يقول إن علم الأحياء يعتمد الآن على شكل حديث من الداروينية، و"بديل داروين للتصميم الذكي كان التصميم من خلال عملية الانتقاء الطبيعي العشوائية تمامًا. هذه العملية لا يمكن أن يكون لها هدف، تمامًا مثلما لا يكون للتآكل هدف تشكيل الأخاديد، لأن المستقبل لا يمكن أن يسبب أحداثًا مادية في الحاضر. وبالتالي، فإن مفاهيم الأهداف أو المقاصد ليس لها مكان في علم الأحياء، إلا في دراسات السلوك البشري".

جادل توماس هكسلي، وهو معاصر لداروين، ضد الغائية في نظرية التطور: "الغائية تعني أن أعضاء كل كائن حي مثالية ولا يمكن تحسينها؛ نظرية داروين تؤكد ببساطة أنها تعمل بشكل جيد بما يكفي لتمكين الكائن الحي من الصمود ضد المنافسين الذين واجههم، ولكنها تقر بإمكانية التحسين غير المحدود."

تظهر مقاومة الغائية أيضًا في بعض المهندسين العاملين في مجال بيولوجيا الأنظمة، كما يتضح من تعليق المهندسين الحيويين آدم أركين وجون دويل: "أحد المخاطر في استخدام لغة الهندسة لوصف الأنماط والعمليات للمنتجات الواضحة للانتقاء الطبيعي هو أن استحضار التصميم ينطوي على خطر استحضار مصمم."

يرتبط مفهوم الغائية ارتباطًا وثيقًا بمفهوم الوظيفة، الذي يمثل أيضًا مشاكل للرؤية الداروينية. يعلق عالم البيئة إينيس كوثيل قائلاً: "كان الفلاسفة محقين في الحذر من النهج الوظيفية في علم الأحياء، لأنه طرح السؤال 'ما هي وظيفة السلوك "س"؟' هو غائي: إنه يعني وجود هدف." يعبر عالم الأحياء الفرنسي لوك آلان غيرالدو عن الرأي النموذجي لدور الوظيفة والقضاء على التصميم في علم الأحياء: "الوظيفة ليست سؤالًا يتم تناوله عادة في العلم لأن الوظيفة تعني وجود تصميم، والتصميم يعني وجود مصمم."

لذا فإن الدافع وراء محاولة تجنب مناقشة الوظائف والغائية هو أن هذه المفاهيم تعني في النهاية تصميمًا ذكيًا هادفًا، ومصممًا.

يؤكد فيلسوف علم الأحياء تيم ليفينز أن العديد من علماء الأحياء قد تبنوا عن طريق الخطأ ما يسميه "نموذج القطع الأثرية للطبيعة: إنهم يتحدثون عن الكائنات الحية كما لو كانت أشياء مصممة."

إنه لا يوافق على هذا النهج، ويصر على أنه "من الخطأ الاعتقاد بأن الانتقاء الطبيعي هو تشبيه جيد لنوايا المصمم." يجادل ليفينز بأن التطبيق المعتاد للوظائف في سياق القطع الأثرية المصممة من قبل وكلاء أذكياء لا ينطبق على الكائنات الحية لأن الانتقاء الطبيعي يوفر تفسيرًا طبيعيًا كافيًا.

إن نفور بعض علماء الأحياء وفلاسفة العلم من استخدام مصطلح "الوظيفة" أمر مثير للفضول، حيث توجد استخدامات للمصطلح لا تعني بالضرورة الغائية. على سبيل المثال، في الفيزياء، ضغط الهواء هو دالة في درجة الحرارة. أو في علم الأحياء، درجة حرارة الجسم الداخلية للحيوانات ذوات الدم البارد هي دالة في درجة حرارة الهواء الخارجي. وفي الحيوانات ذوات الدم الحار، الحفاظ على درجة حرارة ثابتة للجسم (التوازن) هو وظيفة النظام الحراري. يتم تحقيق هذا الأخير من خلال آليات مختلفة مثل التعرق والارتعاش وتمدد أو تضيق الأوعية الدموية. يمثل هذا المثال مشكلة للتطورين، لأن النظام الحراري يصرخ عملياً بالغائية. ومع ذلك، بالمعنى المحايد لمصطلح الوظيفة، من الواضح أن درجة حرارة الجسم المنظمة بالتساوي هي وظيفة النظام الحراري. فلماذا لا نستخدم المصطلح بحرية حتى لو كان المرء تطورياً ملتزماً بتطهير الغائية من العلوم البيولوجية؟ قد تكون الإجابة أكثر من مجرد سؤال لعلم النفس. يتذكر المرء السطر الشهير من

مسرحية هاملت لشكسبير: "أعتقد أن السيدة تحتج أكثر من اللازم". بعبارة أخرى، تحتج السيدة على براءتها بشكل هوسي لدرجة أنها ربما تكون مذنبة. وبنفس الطريقة، لا يسعني إلا أن أتساءل عما إذا كان بعض التطورين، في محاولتهم القضاء على أي استخدام لمصطلح الوظيفة في علم الأحياء، يبدون وعيًا شائكًا بمدى قوة انطباع التصميم بالنسبة للعجائب الهندسية مثل النظام الحراري.

ليس كل علماء الأحياء منزعجين للغاية. أظهر الفصل ٧ كيف أن الوظائف هي الآن موضوع النقاش الشائع في بيولوجيا الأنظمة. الادعاء بأن المصطلح لا ينطبق في علم الأحياء هو إنكار للواضح. وتغيير التعريف في علم الأحياء، بحيث لا يمكن أن يكون إلا نتيجة الانتقاء الطبيعي، هو حجة دائرية.

بينما يعاني بعض التطورين من حساسية تجاه الوظيفة في علم الأحياء، إلا أنهم يهربون فعلاً من الغائية الصريحة. يؤكد عالم النفس هاين ريس أن الغائية ليس لها مكان في تحليل سلوك الحيوان، حيث كتب: "يرفض محللو السلوك الغائية بمعناها الكلاسيكي؛ في تحليل السلوك، لا يمكن أن تكون أغراض السلوك جزءًا من تفسير السلوك لأنه سواء كانت عقلية أم أحداثًا خاصة، فهي نفسها بحاجة إلى تفسير".

وبعبارة أخرى، يجب اختزال الحالات العقلية التي تبدو هادفة للمخلوقات إلى شيء أكثر أساسية وخالٍ من الغائية. ما لا يتم أخذه في الاعتبار في هذا الخط من التفكير هو احتمال أن يكون لسلوكيات

الحيوانات أغراض وأهداف ليست بالضرورة واضحة أو مفهومة بوعي في ذهن الحيوان. يمكن أن ينشأ الغرض أو الهدف خارج الحيوان ويتم تجسيده في الحيوان من خلال برمجة معقدة.

يُقدم شرح لسلوك الحيوان حيث يتم استبعاد الغائية في المثال التالي: إذا نقر حمامة على بقعة حمراء محددة للحصول على الطعام، فعادة ما نقول: "تنقر الحمامة على البقعة الحمراء للحصول على الطعام." ومع ذلك، يبدو هذا الكلام غائياً وغير مناسب في إطار المادية الداروينية. تتم إعادة صياغة هذا الكلام إلى شكل غير غائي يعتمد على الانتقاء الطبيعي على النحو التالي: "تنقر الحمامة على البقعة الحمراء لأنه في تاريخ هذه الحمامة، أدت حالات من هذا النوع من الاستجابة إلى الحصول على الطعام"[1]. لذلك، مرة أخرى، كما هو الحال مع الوظيفة، لا يسمح النموذج الدارويني بأي دور للغائية في علم الأحياء.

علقت عالمة الأحياء النظرية الشهيرة ماري جين ويست إيبرهارد على نتائج وجهة النظر هذه، حيث كتبت: "لقد انخرط علماء الحيوان في إنكار شديد للتحفيز والسلوك الموجه نحو الهدف، ناهيك عن وعي الحيوان والقدرات الفكرية المعقدة، لدرجة أنه حتى وقت قريب لم تكن الآليات

---

(١) ريس، "الغائية والغائية الجديدة في تحليل السلوك". ويوضح ريس لماذا "الاختيار من خلال العواقب وبعض المبادئ الأخرى في تحليل السلوك هي غائية فقط بمعنى غريب من الغائية، وعندما تسمى هذه المبادئ غائية، قد يسيء القراء والمستمعون فهمها تمامًا"، ٨٩.

الخاصة بها موضع بحث واسع أو حتى افتراض."[1] لا يمكنني أن أتفق أكثر من ذلك.

في الإنصاف، يعترف بعض علماء الأحياء التطوريين بصراحة بواقع الغائية في سلوك الحيوان. علق عالم الأحياء التطوري المؤثر إرنست ماير قائلاً: "إن السلوك الموجه نحو الهدف (بالمعنى الأوسع لهذه الكلمة) منتشر على نطاق واسع للغاية في العالم العضوي؛ على سبيل المثال، فإن معظم الأنشطة المتعلقة بالهجرة، والحصول على الغذاء، والمغازلة، وعلم التطور الجنيني، وجميع مراحل التكاثر تتميز بهذا التوجه نحو الهدف. ربما يكون حدوث العمليات الموجهة نحو الهدف هو السمة الأكثر تميزًا لعالم الكائنات الحية"[2].

في الواقع، تتضمن جميع فئات سلوك الحيوان تقريبًا أهدافًا، وبالتالي فهي غائية. البحث عن الطعام له هدف إيجاد الطعام. سلوك التزاوج وتربية النسل لهما هدف إكثار النوع. السلوك الهجري له هدف السفر إلى وجهة محددة. أنظمة الملاحة لها غرض تمكين الهجرات الدقيقة. سلوكيات التواصل التي تقوم بها الحشرات الاجتماعية لها هدف تنسيق أعمال المستعمرة، بما في ذلك بناء العش وصيانته. من الواضح أن الغائية موجودة على مستوى سلوك الكائن الحي، والشكاوى حول السماح لمنظري التصميم بها على مستوى التفسير

(١) ماري جين ويست إيبرهارد، "اللدونة التنموية والتطور" (أكسفورد :مطبعة جامعة أكسفورد، ٢٠٠٣)، ٣١٤.

(٢) إرنست ماير، "نحو فلسفة جديدة في علم الأحياء :ملاحظات أحد علماء التطور" (كامبريدج : مطبعة جامعة هارفارد، ١٩٨٨)، ٤٥.

النهائي تنبع من نفس المصدر الذي يدعو إلى إزالة اللغة الغائية من علم الأحياء على جميع المستويات - وهو التزام فلسفي بالاختزال والمادية.

في مواجهة فكرة ثبات الأنواع

في بعض الأحيان، يجادل مؤيدو نظرية التطور الداروينية بأن نظرية التصميم الذكي خاطئة. حجتهم هي أنه لو كانت نظرية التصميم الذكي صحيحة، لكان كل كائن حي مصممًا بشكل مثالي (من قبل إله كلي القدرة والحكمة) ليعمل بكفاءة ١٠٠٪ في بيئته. هذا الاعتراض، الذي يحمل في طياته أبعادًا لاهوتية، يفترض ضمنيًا أن جميع الكائنات الحية قد خُلقت في لحظة واحدة ولم تُصمم لتكون قادرة على التكيف مع البيئات المتغيرة[١].

هذا الاعتراض يكون ساريًا عند تطبيقه على الخلقيين الذين اعتقدوا أن الله خلق جميع الكائنات الحية في حالة مثالية وأن الأنواع ثابتة لا تتغير. دافع عن هذا الرأي وليام بيلي وآخرون، لكن داروين نجح في دحضه في كتابه "أصل الأنواع". وفي السياق نفسه، يجادل كينيث ميلر، وهو أحد المدافعين المعاصرين عن داروين، في كتابه "مجرد نظرية" الذي صدر عام ٢٠٠٨، قائلًا:

---

(١) مثال على ذلك هو التالي" :وهكذا ركزت حجة التصميم الانتباه على تكيف البنية مع الوظيفة . الله ليس حكيمًا فحسب، بل إنه أيضًا خير لأنه يعطي كل نوع ما يحتاجه بالضبط ليعيش في المكان الذي خلقه فيه .تفترض الحجة وجود خلق ثابت، حيث تظل الأنواع وبيئاتها كما كانت عند إنشائها لأول مرة .غالبًا ما قيل إن داروين سيقلب حجة التصميم رأسًا على عقب من خلال إظهار أن التكيف هو عملية يتم من خلالها تعديل الأنواع لتتناسب مع البيئات المتغيرة ."بيتر بولر وإيوان ريس موروس، "صنع العلم الحديث" (شيكاغو :مطبعة جامعة شيكاغو، ٢٠٠٥)، ١٣٢.

"ماذا يقول لنا واقع التاريخ الطبيعي فيما يتعلق بمفهوم التصميم؟ أولاً، يخبرنا أن التفاصيل المحددة للكائنات الحية اليوم لم تكن نتاجًا مباشرًا لعملية تصميم مفاجئة في الماضي البعيد والغامض. لو كانت كذلك، لما كانت الحياة تدور حول التغيير؛ بل كانت ستدور حول الثبات والجمود. ثانيًا، يخبرنا أن القدرة على التكيف مع التغيير، بل وحتى توليده، هي واحدة من أبرز سمات الكائنات الحية. ومن المفارقات أن تصميم الحياة يشمل القدرة على تغيير تصميمها الخاص"[١].

هناك على الأقل إشكاليتان في هذا الطرح. أولاً، الثبات هو سمة سائدة في تاريخ الحياة، وهي نقطة أقر بها العديد من علماء التطور البارزين، بما في ذلك عالم الحفريات الشهير من جامعة هارفارد، ستيفن جاي جولد[٢].

ثانيًا، يقدم ميلر حجة "رجل القش" إذا كان يقصد تطبيقها على النظرية الحديثة للتصميم الذكي. فمنظرو التصميم الذكي يقرون بكل سرور بأن الأنواع تختلف ضمن نطاق معين وغالبًا ما تستجيب للتغيرات البيئية. بل إن أحد خطوط التفكير في التصميم الذكي يستند إلى مبادئ الهندسة ليجادل بأن قدرة الأشكال البيولوجية على التكيف هي دليل على شكل متطور من التصميم، وبالتالي فهي دليل إضافي على أن هذه الأنظمة ليست مجرد نتاج تصميم ذكي، بل تصميم ذكي للغاية. من المؤكد أن النهج المتبع في هذا الكتاب لا يفترض أن

---

(١) ميلر، "مجرد نظرية"، ١٢٤.

(٢) تؤكد العديد من أعمال غولد على أن السجل الأحفوري يشهد بقوة على أن الركود هو القاعدة في تاريخ الحياة .للحصول على مثال واحد، انظر "هيكل النظرية التطورية" (كامبريدج Belknap Press : of Harvard University Press، ٢٠٠٢)، حيث يناقش الركود في نقاط عديدة في النص.

الأنواع ثابتة. كما نوقش في الفصل ٣، تظهر العديد من أنواع الحيوانات مرونة في سلوكها، مما يعزز فكرة قدرتها على التكيف والتغير.

التصميم غير الأمثل: اعتراض ونقض

في إطار الاعتراضات المشحونة لاهوتيًا على نظرية التصميم الذكي، يبرز نقادها حالات التصميم غير الأمثل في علم الأحياء كدليل على أن هذه الأنظمة ليست نتاج تصميم ذكي بل هي وليدة عملية التطور الأعمى القائمة على التجربة والخطأ. يصف إرنست ماير هذا الاعتراض كجزء من دافع داروين لتقديم مفهوم التكيف كبديل "للتصميم الخارق للطبيعة". فالتصميم، كما تصوره اللاهوتيون الطبيعيون، يجب أن يكون مثاليًا؛ لأنه من غير المتصور أن يخلق الله شيئًا أقل من الكمال.

لكن هذا النقص المفترض في التصميم يتماشى، حسب وجهة النظر هذه، مع منطق التطور الداروينى. يجادل دانيال دينيت بأن التطور الداروينى، على عكس العامل الذكي كالمهندس، يفتقر إلى القدرة على التنبؤ بالمستقبل. وبالتالي، فإن "الآثار الجانبية غير المتوقعة أو غير المتنبأ بها لا تمثل عائقًا له؛ فهو يسير عبر عملية إنتاجية وفيرة تتضمن إنشاء أعداد هائلة من التصاميم غير المعزولة نسبيًا، والتي يكون معظمها معيبًا بشكل ميؤوس منه بسبب تأثيرات جانبية مدمرة للذات، ولكن القليل منها، بمحض الصدفة العمياء، ينجو من هذا المصير المخزي". ويذهب فرانسيسكو أيالا إلى أبعد من ذلك في طرحه، حيث يرى أن "تصميم الكائنات الحية ليس ذكيًا، بل إنه في الواقع يتعارض تمامًا مع التصميم الذي نتوقعه من مصمم ذكي أو حتى مهندس

بشري، فهو مليء بالاختلالات الوظيفية والنفايات والقسوة لدرجة لا تبرر إسناده إلى أي كائن يتمتع بذكاء وحكمة وإحسان متفوقين".

إلا أن حجة التصميم غير الأمثل هذه تعاني من خلل منطقي. أولاً، وكما أشرنا سابقًا، يمكن أن يظهر الكائن المصمم دليلاً واضحًا على التصميم حتى في وجود بعض العيوب. فشيء ما يمكن أن يكون أقل من الأمثل هندسيًا، ومع ذلك يحمل بصمة واضحة تدل على أنه من صنع كائن واعٍ. ثانيًا، من المسلم به الآن على نطاق واسع أن العالم البيولوجي يعج بالهياكل والآليات والأنظمة التي تتجاوز بكثير أحدث تقنياتنا. علاوة على ذلك، فقد تبين أن العديد من الأشياء التي كانت تعتبر ذات يوم غير مثالية لها في الواقع أسباب وجيهة لما كان يبدو غير مثالي، مثلما هو الحال في "الأسلاك الخلفية" للعين الفقارية.

علاوة على ذلك، فإن عملية تصميم أي كائن أو هيكل تنطوي على مقايضات بين عدة سمات. وفي حالة الهياكل البيولوجية، تشمل هذه السمات الكفاءة الوظيفية واستهلاك الطاقة والتعقيد والمرونة. في كثير من الأحيان، تتعارض هذه السمات، بحيث يؤدي تحسين إحداها إلى جعل الأخرى أقل من مثالية. من شبه المستحيل تحسين هيكل واحد لجميع السمات في آن واحد. ولذلك، فإن التصميم الأمثل في كثير من الحالات يمثل حلاً وسطًا بين السمات المتنافسة. هذا مبدأ أساسي في الهندسة يعرف باسم "التحسين المقيد". لا يوجد شيء اسمه "تصميم مثالي" في الهندسة إذا كان المقصود بالكمال هو نتيجة خالية تمامًا من قيود المقايضة.

ينطبق المبدأ ذاته على سلوك الحيوان، فلا يوجد سلوك خالٍ من المقايضة. وكما أوضحنا في الفصل السابع في معرض مناقشة التواصل بين الحيوانات، هناك دائمًا "ضوضاء" تصاحب عملية نقل واستقبال المعلومات. هذه الضوضاء تعقد عملية تحديد المعنى الدقيق للمعلومات. وينطبق هذا على المعلومات المتاحة للحيوان في جميع عمليات صنع القرار. بسبب وجود هذه الضوضاء، من المرجح ألا يكون القرار هو الأمثل. ومع ذلك، كما رأينا في العديد من المجالات، فإن الحيوانات قادرة بشكل روتيني على اتخاذ قرارات شبه مثالية، كما هو الحال في السلوكيات الاجتماعية للحشرات. وينطبق الشيء نفسه على الهندسة المعمارية، حيث يكون تصميم العديد من الأعشاش شبه مثالي. ومثال آخر على ذلك هو أنظمة الملاحة لدى العديد من الحيوانات، والتي صُممت بحيث تحقق الحيوانات أداءً ملاحيًا شبه مثالي، بالنظر إلى دقة المعلومات الحسية المتاحة.

اشكالية سلوك الحيوان "الشرير"

استخدم داروين وعلماء التطور الآخرون ما يُعرف بـ "معضلة الشر" كحجة لدعم نظرية التطور غير الموجه ومعارضة فكرة أن الله خلق تنوع الحياة. فهم يرون أن إلهاً خيّراً ما كان ليخلق غلافنا الحيوي المليء بالقسوة والألم والموت. وقد عبّر داروين عن ذلك في رسالة إلى آسا جراي قائلاً:

"يبدو لي أن هناك الكثير من البؤس في العالم. لا أستطيع أن أقنع نفسي بأن إلهاً خيّراً وقديراً كان ليخلق عمداً الدبابير الطفيلية بقصد صريح بأن تتغذى داخل أجسام اليرقات الحية، أو أن يسمح لقطة باللعب بفئران... أنا

أميل إلى النظر إلى كل شيء على أنه ناتج عن قوانين مصممة، مع ترك التفاصيل، سواء كانت جيدة أو سيئة، لما يمكن أن نسميه الصدفة."

وفي رسالة أخرى، كتب داروين: "يا له من كتاب يمكن أن يكتبه قسيس الشيطان عن أعمال الطبيعة الخرقاء والمُسرفة والمتعثرة والمنحطة والقاسية بشكل فظيع".

وبالمثل، يصف ريتشارد دوكينز حجم معاناة الحيوانات في العالم الطبيعي قائلاً: "إن إجمالي كمية المعاناة في السنة في العالم الطبيعي تتجاوز كل تأمل لائق. خلال الدقيقة التي استغرقتها لكتابة هذه الجملة، آلاف الحيوانات تؤكل حية؛ البعض الآخر يركض لإنقاذ حياته، وهو يئن من الخوف؛ البعض الآخر يُلتهم ببطء من الداخل بواسطة طفيليات خادشة؛ الآلاف من جميع الأنواع يموتون من الجوع والعطش والأمراض". يجادل دوكينز بأن ما يمثل مشكلة للإيمان بالله يختفي في ظل المادية الداروينية، لأنه في الرؤية الأخيرة، لا يوجد خالق وفئات الخير والشر هي مجرد وهم.

من جانبه، يقارن فيلسوف العلوم واللا أدري مايكل روس بين ما نلاحظه في العالم الطبيعي ونوع الخلق الذي يعتقد أن إلهاً صالحاً كان ليصممه: "بعد داروين، نرى أن العالم ببساطة ليس كما هو لو كان خالق محب وكلي القدرة قد صنعه. لا شيء من هذا القبيل يمكن أن يحدث، في ظل وجود إله محب. ولكن هذا بالضبط ما يمكن توقعه من قانون أعمى لا غرض له".

الأمثلة على السلوك الحيواني المثير للقلق الأخلاقي وفيرة. فمعظم إناث الثدييات ستهاجم وأحيانًا تقتل الصغار الذين ليسوا صغارها. يمكن تفسير هذا السلوك من منظور التكيف بأنه يحمي الإناث من إهدار الرعاية على الصغار غير المرتبطين بها ويزيل المنافسة على الموارد الشحيحة التي تريدها لصغارها. إذا كن يهتمن بصغار ليسوا صغارهن، فسيؤدي ذلك إلى إضاعة الوقت والموارد من رعاية نسلهن. كما أن ذكور الأسود تقتل أحيانًا الأشبال الموجودة بالفعل عندما تستولي على مجموعات الإناث. هذا السلوك منطقي من منظور الجينات الأنانية، حيث يعمل على تعظيم نسل الذكر، جزئيًا لأنه يقلل الوقت اللازم للأنثى للدخول في فترة الشبق مرة أخرى وتكون قادرة على إنجاب أشبال من الأب الجديد. لذلك، يبدو أن التطور الجديد الدارويني، مع تركيزه على الانتقاء الطبيعي، يفضل هذه الأنواع من السلوكيات.

في بعض الحالات، ينخرط الآباء في أكل لحوم نسلهم، وهو أمر شائع إلى حد ما في الأسماك. أظهرت الأبحاث أن هذا قد يكون سلوكًا تكيفياً، من خلال توفير مصدر إضافي للغذاء للنسل المتبقي، أو من خلال القضاء على الحضنة بالكامل وتمكين فرصة أكبر للنجاح في الحضنة التالية.

وبالتالي، فإن هذه الأمثلة وغيرها الكثير من السلوكيات الحيوانية "الشريرة" تثير تساؤلات أخلاقية عميقة حول وجود إله خيّر، وتدعم وجهة نظر التطوريين الذين يرون أن العالم الطبيعي نتاج قوانين طبيعية عمياء لا غاية لها ولا تفسير لها سوى البقاء والتكاثر.

ظاهرة أخرى شائعة هي قتل الأخوة، حيث يقتل أحد الأبناء أخًا آخر. وهي ظاهرة شائعة نسبياً في الطيور، ولكنها تحدث أيضاً في بعض الحشرات والبرمائيات. الفرق المهم بين الطيور والحشرات والبرمائيات هو أن الحشرات والبرمائيات عادة ما تستهلك الضحية كغذاء[١]. هناك نوعان من قتل الأخوة - الإلزامي والاختياري. في قتل الأخوة الإلزامي، يفقس بيضتان ويقتل أحد الأبناء الآخر. نرى هذا مع طيور الأطيش المقنع. يولد فرخان بفارق عدة أيام. عادة ما يكون المولود أولاً أقوى ويقتل المولود الثاني، بإجباره على الخروج من العش[٢]. يعتمد قتل الأخوة الاختياري على الظروف البيئية، وعادة ما يكون ذلك على توافر الغذاء للكتاكيت. تظهر فراخ الأطيش أزرق القدمين هذا السلوك. من وجهة نظر الأخ الذي نجا، فإنه يمنحه ميزة المزيد من الموارد دون وجود أخ منافس.

وقد تم تقديم تفسيرات تكيفية مختلفة معقولة لقتل الأخوة[٣]. التفسيرات مختلفة إلى حد ما في النوعين. يمكن النظر إلى السلوك على أنه شكل من أشكال إدارة المخاطر. على الرغم من أنه لا يرتبط دائمًا بموارد الغذاء، إلا أنه يحدث عادةً عندما يكون الطعام المقدم للكتاكيت محدودًا، بحيث يؤدي الاحتفاظ بكليهما إلى المخاطرة بفقدانهما كليهما. عندما يكون الغذاء أكثر وفرة، فإن الاحتفاظ بكلا الكتكوتين لا يحسن فقط

---

(١) دوغلاس دبليو .موك، وهيو دروموند، وكريستوفر إتش .ستينسون، "قتل الأشقاء بين الطيور"، في "استكشاف سلوك الحيوان"، محرران بول دبليو .شيرمان وجون ألكوك(Sunderland MA: ، Sinauer Associates، ٢٠١٠)، ٢٣٢-٢٤٣.

(٢) موك، ودروموند، وستينسون، "قتل الأشقاء بين الطيور"، ٢٣٥.

(٣) موك، ودروموند، وستينسون، "قتل الأشقاء بين الطيور"، ٢٣٩-٢٤٠.

من فرص الحصول على المزيد من النسل، ولكنه يوفر أيضًا تأمينًا في حالة وفاة أحدهما.

من المعروف أيضًا أن الرئيسيات تمارس قتل الأطفال. في حالة قرود اللانغور الهانومان في الهند، يقتل الذكور البالغون الرضع الصغار من الإناث داخل مجموعتهم الاجتماعية[١]. تشير الأبحاث إلى أن السلوك يميل إلى الحدوث عندما تنتقل الذكور إلى مجموعة جديدة، يليها طرد الذكر البالغ الذي أنجب صغار اللانغور. من خلال القيام بذلك، ستصبح الإناث متاحة للحمل مرة أخرى، ويفترض أن يكون ذلك من قبل الذكر الغازي. وبالتالي فإن السلوك يفيد الذكر من خلال تمكينه من إنتاج المزيد من النسل. وقد تم العثور على سلوك مماثل في الأسود والخيول والقوارض والخفافيش[٢].

سلوك حيواني آخر سيعتبره الكثيرون منّا مزعجًا من الناحية الأخلاقية: من المرجح أن تتخلى الدببة البنية عن نسل واحد أكثر من التوائم[٣]. يمكن تفسير ذلك على أنه سلوكيات تكيفية لأنه يمكن لأم الدب بعد ذلك بدء دورة إنجابية أخرى، مما يزيد من احتمالية إنتاج ذرية متعددة على قيد الحياة.

تصف جوان ستراسمان وديفيد كيلر مثالاً آخر على السلوك الحيواني "الشرير": "عندما يحين وقت انقسام مستعمرات نحل العسل، يتم تربية العديد من ملكات الأخوات غير الشقيقات بطعام خاص في خلايا كبيرة

---

(١) جون ألكوك، "سلوك الحيوان :نهج تطوريSunderland "، MA: Sinauer Associates، ٢٠١٣، ٩.

(٢) ألكوك، "سلوك الحيوان"، ١٠.

(٣) تريلشميش، "الرعاية الأبوية :التكيف مع الصراع والتعاون"، ٢٧٩.

الحجم. تغادر الملكة القديمة مع الكثير من القوى العاملة لبدء مستعمرة جديدة. بعد ذلك، تبحث أولى الملكات الجديدة التي تظهر كشخص بالغ عن جميع خلايا الملكات الأخرى وتستخدم إبرتها لقتل منافساتها الشقيقات"[١].

هذه الأمثلة تشكل تحدياً لأولئك الذين يعتقدون أن مثل هذه المخلوقات هي من صنع مصمم خيّر. في مراجعته النقدية لكتاب فيليب جونسون "داروين في المحاكمة"، كتب ديفيد هال: "مهما كانت طبيعة الإله التي توحي بها النظرية التطورية وبيانات التاريخ الطبيعي، فهو ليس الإله البروتستانتي الذي لا يضيع ولا يريد. كما أنه ليس إلهاً محباً يهتم بمخلوقاته. إنه ليس حتى الإله الرهيب الذي تم تصويره في سفر أيوب. إله جزر غالاباغوس مهمل، مبذر، غير مبال، يكاد يكون شيطانياً. إنه بالتأكيد ليس ذلك النوع من الإله الذي يميل أي شخص للصلاة إليه". وهكذا ينضم هال إلى دوكينز ودينيت وآخرين في استخدام "السلوك الشرير" الواضح في تقديم حجة ليس فقط للتطور غير الموجه ولكن للإلحاد أيضًا.

يرد كورنيليوس هنتر على هذه الحجج. في كتابه "إله داروين"، يصف كيف استخدم داروين وآخرون حجة السلوك الحيواني "الشرير" لدعم التطور الأعمى. يصف هنتر هذه الحجة بأنها لاهوتية و "ميتافيزيقية لأنها تتطلب فرضيات معينة حول طبيعة الله. وهنا تكشف المفارقة العظيمة عن نفسها:

---

(١) جوان إي. ستراسمان وديفيد سي. كيلر، "المجتمعات الحشرية ككائنات مقسمة: تعقيدات الغرض والغرض المتقاطع"، في "في ضوء التطور"، محرران جون سي. أفيس وفرانسيسكو ج. أيالا، المجلد ١، "التكيف والتصميم المعقد) "واشنطنNational Academies Press :، ٢٠٠٧(، ١٥٩.

التطور، النظرية التي جعلت الله غير ضروري، تدعمها هي نفسها حجج تحتوي على فرضيات حول طبيعة الله". وكما يوضح هنتر، فإن حجة داروين تبعد الله عن الشر الطبيعي في العالم، ونظريته في التطور هي "إلى حد كبير حل لمشكلة الشر الطبيعي".

ومع ذلك، فإن الحل الدارويني يأتي بتكلفة. يكتب هنتر: "إن فصل الله عن الخليقة وشرورها يعني أن الله لا يمكن أن يكون له تأثير مباشر أو سيطرة على العالم". عندما يتم أخذ هذا الحل الدارويني إلى استنتاجه المنطقي، تختفي مشكلة الشر تمامًا لأنه لا يوجد إله، ولا شيء في الأساس سوى المادة والطاقة. تختفي مشكلة الشر لأن الشر نفسه، إلى جانب الخير، يختفي ككيان حقيقي. لم يتبق سوى مظهر الخير ومظهر الشر، اللذان يأخذان مكانهما جنبًا إلى جنب مع مظهر التصميم في علم الأحياء في رؤية المادية للواقع كبيت مرح من الأوهام الكئيبة.

لقد كانت مشكلة الألم والشر العامة في العالم موضوعًا للكثير من التأمل. لا يبدو أن هناك إجابة مرضية تمامًا في هذا الوقت دون اللجوء إلى أفكار لاهوتية معينة[1]. ومع ذلك، لا ينبغي أن يكون هذا مفاجئًا، لأن هذا

(١) نظرًا لأن الاعتراض ذو طبيعة لاهوتية، فسيكون من غير المنطقي الاعتراض على إجابة تستند إلى الموارد اللاهوتية. أحد التفسيرات اللاهوتية المحتملة يقدمه اللاهوت المسيحي وفكرة "السقوط" ودخول الخطيئة إلى العالم. في هذا اللاهوت، ظهور الخطيئة يؤدي إلى الموت والمرض وغيرها من العلل. لدى مايكل ج. موراي نقاش ممتاز حول هذا في "الطبيعة الحمراء في الأسنان والمخلب" (أكسفورد: مطبعة جامعة أكسفورد، ٢٠١١).

الاعتراض على التصميم هو في حد ذاته لاهوتي. لا ينبغي للناقد للتصميم أن يوجه اعتراضًا لاهوتيًا ثم يشكو عندما يتم تقديم رد لاهوتي.

إن المعالجة الموسعة لقضية معاناة الحيوانات ستتجاوز نطاق هذا الكتاب. يكفي أن نقول، لا ينبغي أن ننسى أن التحدي الأكبر لأي نظرية للتطور الأعمى ليس هو شرح الخلل والتصميم السيئ ولكن شرح أصل الشكل البيولوجي الوظيفي المتطور والآلات والسلوك. في هذا، كما جادلت أنا وآخرون، فشلت النظرية التطورية، حيث لم تقدم سوى سلسلة من الخدع والقصص التوضيحية والملاحظات الواعدة بدلاً من الأدلة المقنعة على الكفاية السببية.

كملحوظة أخيرة، فإن مشكلة السلوك الشرير تقدم تباينًا جديرًا بالملاحظة مع مشكلة تفسير السلوك الإيثاري. كما نوقش في الفصل ٣، فإن بعض السلوكيات الاجتماعية الإيثارية تمثل تحديًا للتطور الجديد الدارويني لأنه بناءً على مبدأ "الجين الأناني"، لا ينبغي للحيوانات أن تضحي عمدًا بحياتها أو قدرتها على التكاثر لصالح أفراد آخرين من مستعمرتها الذين لا يشاركونها بالضرورة جيناتها. على العكس من ذلك، فإن السلوك الإيثاري يتوافق مع التصميم الذكي، لأنه يمكن للوكيل الذكي تصميم السلوكيات التي تخدم بشكل أفضل الأهداف العامة طويلة المدى للمجموعة الاجتماعية. يصبح السؤال إذن، أي منظور يفسر بشكل أفضل كلاً من التصميمات الوظيفية المتطورة والخلل أو التدهور؛ كلا من السلوك الأناني والسلوك الإيثاري؛ وكلا من حقيقة كون الكون محكومًا بقوانين غير مبالية بالإضافة إلى الإحساس

القوي بأن الخير والشر حقيقيان وليس مجرد وهم؟ أي نموذج غني بما يكفي لاستيعاب كل هذا[1]؟

من صمم المصمم؟

يطرح ريتشارد دوكينز اعتراضًا آخر على التصميم الذكي. إليك كيف يلخصه في كتابه "وهم الإله":

كان أحد أعظم التحديات التي واجهت العقل البشري على مر القرون هو تفسير كيفية ظهور التصميم المعقد وغير المحتمل في الكون.

الإغراء الطبيعي هو أن نعزو مظهر التصميم هذا إلى التصميم الفعلي نفسه....

هذا الإغراء خاطئ، لأن فرضية المصمم تثير على الفور مشكلة أكبر وهي من صمم المصمم.

ويتفق دينيت معه، حيث يتساءل: "إذا كان الله قد خلق وصمم كل هذه الأشياء الرائعة، فمن خلق الله؟ سوبرغود؟ ومن خلق سوبرغود؟ أم أن الله خلق نفسه؟ قد نسأل بدلاً من ذلك عما إذا كان هذا الاحتضان الأعمى للغز

(١) هامش المترجم: وقد أجاب الكثير من علماء الشيعة الأمامية عن إشكالية الشر. ومن ابرزهم كتاب **عدل الله** - للشيخ محمد رضا المظفر الـذي يتناول مفهوم العدل الإلهي بالتفصيل، موضحًا كيف يتفق وجود الشر مع الحكمة والعدل الإلهيين. يناقش الكتاب أسباب الشرور وأهدافها في ضوء العقيدة الإسلامية.

هو أي تحسن على مجرد إنكار المبدأ القائل بأن الذكاء (أو التصميم) يجب أن ينبع من الذكاء".

تجدر الإشارة إلى أن هذه الحجة فلسفية وليست علمية. علاوة على ذلك، هناك مشاكل كبيرة بها، بغض النظر عن كيفية تصنيف المرء للحجة. إحدى المشاكل هي أن نظرية التصميم الذكي لا تفترض أن "الذكاء... يجب أن ينبع من الذكاء". هذا توصيف خاطئ. كنظرية أصول، يهتم التصميم الذكي فقط بالأشياء التي نشأت. إنه لا ينطبق على أي شيء كان موجودًا دائمًا؛ وأقل بكثير على شيء، بحكم التعريف، موجود بالضرورة من كل الأزل. يُفهم إله التوحيد على أنه مثل هذا الكائن. لذا بالنسبة للمؤمن الذي يعتقد أن الله هو مصدر التصميم الذكي الواضح في العالم الطبيعي، فإن الإجابة على "من صمم المصمم" بسيطة: لا أحد. المصمم أزلي الوجود.

يشرح الفيلسوف ويليام لين كريج مشكلة أخرى تتعلق باعتراض من صمم المصمم: "من أجل التعرف على تفسير على أنه الأفضل، لا يحتاج المرء إلى أن يكون قادرًا على شرح التفسير. في الواقع، إن المطالبة بذلك من شأنه أن يؤدي إلى ارتداد لانهائي من التفسيرات، بحيث لا يمكن تفسير أي شيء على الإطلاق وسيتم تدمير العلم! لذا في الحالة المطروحة، من أجل إدراك أن التصميم الذكي هو أفضل تفسير لظهور التصميم في الكون، لا يحتاج المرء إلى أن يكون قادرًا على شرح المصمم". يقدم كتاب "من صمم المصمم؟" لمايكل أوجروس عرضًا فلسفيًا مفصلاً لسبب عدم الحاجة إلى مزيد من التفسير للذكاء المصمم.

"ليس إله الثغرات" أو حجة قائمة على الجهل: الرد على الانتقادات الموجهة للتصميم الذكي

قد يدعي البعض أن الحجة المقدمة هنا لصالح التصميم الذكي ليست سوى حجة "إله الثغرات". وفقًا لهذه الحجة، إذا عجز العلم عن تفسير كيفية نشوء ظاهرة بيولوجية معينة، فيجب أن يكون الله، أو على الأقل كيان ذكي ما، هو المسؤول عن ذلك. لو كانت هذه هي بنية حجة التصميم الذكي المعاصرة، لكان ذلك بالفعل مغالطة منطقية. لكن هذه ليست في الحقيقة بنية الحجة المطروحة.

حجة إيجابية وليست سلبية: الحجة ليست مبنية ببساطة على عدم وجود دليل على التفسير الدارويني. بل هي حجة إيجابية تقدم أدلة تدعم فكرة التصميم الذكي. وقد تم تلخيص هذه الأدلة الإيجابية في الفصل السابع من الكتاب.

الرد على "حجة الجهل": الشكل الأكثر عمومية لاتهام "إله الثغرات" هو ما يعرف باسم "الحجة من الجهل". وفقًا لهذه المغالطة المنطقية، إذا كانت النظرية "أ" غير صحيحة، فإن النظرية "ب" يجب أن تكون صحيحة. ولكن مجرد إثبات أن إحدى النظريات حول ظاهرة ما خاطئة، فهذا لا يعني أن النظرية البديلة المقترحة صحيحة بالضرورة.

ينتقد البعض التصميم الذكي بأنه يدعي أن خاصية بيولوجية معينة لا يمكن أن تكون نتيجة للتطور الدارويني الجديد؛ لذلك، يجب أن يكون

التصميم الذكي هو التفسير الوحيد - وهي حجة مغلوطة قائمة على الجهل. ولكن مرة أخرى، هذا يسيء توصيف قضية التصميم الذكي.

الحجة لأفضل تفسير: صحيح أن جزءًا من حجة التصميم المعاصرة في علم الأحياء هو أن التطور الجديد الداروينى لا يمكن أن ينتج خاصية بيولوجية معينة، مثل السوط البكتيري أو بنية الحمض النووي وترميزه. ومع ذلك، فإن حجة التصميم تقدم أيضًا أدلة ضد سيناريوهات التطور غير الموجه الأخرى، وتقدم أدلة إيجابية على التصميم الذكي. يستخدم منظرو التصميم المعاصرون أسلوب التفكير الاستنتاجي الشائع في العلوم التاريخية، والذي يعتمد على تقديم "الحجة لأفضل تفسير".

تشمل هذه الحجة كلاً من:

الحجج السلبية: التي تدحض التفسيرات المنافسة.

الأدلة الإيجابية: التي تدعم التصميم الذكي، بما في ذلك أدلة على الغائية في السلوكيات الحيوانية المعقدة المبرمجة، وأدلة على التصميم الهندسي للعديد من الأنظمة البيولوجية المعقدة.

وهكذا، فإن الحجة لا تقوم على الجهل، بل على المعرفة ببنية السبب والنتيجة في العالم.

أفكار ختامية

لا يقدم هذا الكتاب شرحًا شاملاً لأصل السلوكيات الحيوانية المعقدة المبرمجة. بل يجادل بأن التصميم الذكي هو أفضل تفسير لهذه السلوكيات، حيث إنه يفترض وجود سبب قادر على إنتاج الخوارزميات والمعلومات المعقدة اللازمة لهذه السلوكيات، في حين أن التطور غير الموجه يفتقر إلى هذه القدرة.

بدلاً من الإجابة على جميع الأسئلة، تفتح فرضية التصميم الباب أمام المزيد من البحث العلمي، حيث يتعين علينا اكتشاف المزيد عن الآليات المحددة التي من خلالها قام الذكاء المصمم بإنشاء هذه السلوكيات المعقدة. لا يزال هناك الكثير مما يتعين اكتشافه باستخدام نهج بيولوجيا الأنظمة، أي النظر إلى هذه الأنظمة كأنها نتاج هندسة متقنة، ثم استخدام الهندسة العكسية لفهم كيفية عملها بشكل أفضل. وهذا يشمل اكتشاف المزيد عن الشكل المحدد الذي تتخذه البرمجة والتشفير في أدمغة الحيوانات، والذي لا يزال لغزًا إلى حد كبير.

وهكذا، فإن استدلال التصميم ليس نهاية العلم، بل هو بداية لاستكشاف أعمق وأوسع لعالم الأحياء.

الفهرس

الفصل الأول: عبقرية النظام في عالم الأقزام ٥
صراع المناهج: علماء الحيوان مقابل علماء النفس..... ٢٦
هل للسلوك مورثات؟ ٤١
الفصل الثاني: الملاحة والهجرة..... ٤٧
الملاحة بالمعالم ٥٣
الحساب الميت (Dead Reckoning) ٥٥
الملاحة بالبوصلة ٦٠
البوصلة المغناطيسية ٦٠
البوصلة الشمسية ٦٥
بوصلة الضوء المستقطب ٦٨
البوصلة السماوية للملاحة الفلكية..... ٧٣
الإحساس بالخريطة والملاحة الحقيقية ٧٤
الفصل الثالث: عبقرية الملاحة - ليست للطيور حصرًا ٩٥
ملاحة النمل..... ١٠٣
تطور سلوكيات الملاحة والهجرة..... ١٢٣
برنامج الخرائط محمّل مسبقًا..... ١٣٢
الفصل الرابع مُجتمعات مُعَقَّدة في بَرمَجتها ١٤٣
المعلومات الاجتماعية: التواصل ١٥٣
الإيثار ١٥٦
مزايا الأنظمة الاجتماعية..... ١٥٦
النحل..... ١٥٧
النمل ١٦٠

النمل الأبيض ١٦٧
اللدونة السلوكية..... ١٧٠
تعلم اللافقاريات..... ١٧٢
التطور الدارويني والسلوك الاجتماعي..... ١٧٨
مجموعة أدوات السلوك ١٨٢
علم التخلّق ١٩١
السلوك الاجتماعي ١٩٥
الإيثار ١٩٥
الفصل الخامس: فن العمارة لدى الحشرات..... ١٩٩
خلايا النحل..... ٢٠٢
أعشاش النمل الأبيض ٢١٥
شبكات العنكبوت ٢١٨
داروين في بيت الحشرات..... ٢٢٣
الفصل السادس: المزيد من الألغاز التطورية ٢٢٧
شجرة متشابكة..... ٢٢٩
التفسيرات التفصيلية والمقنعة ٢٣٤
الملاحة ٢٣٥
الهندسة المعمارية..... ٢٣٦
السلوك الاجتماعي ٢٣٦
التطور والتقارب..... ٢٣٧
التصميم والغائية في السلوك المتقارب ٢٤٢
التطور وانهيار السلوكيات المبرمجة المعقدة ٢٤٤
التطور الدارويني والمعلومات البيولوجية ٢٥٦
أصل المعلومات التي تحدد السلوكيات المبرمجة المعقدة..... ٢٦٧

الفصل السابع: سلوكيات معقدة مبرمجة - تصميم ذكي..... ٢٧٣
ميزات غير حاسمة..... ٢٨٢
التغيرات الجينية المرتبطة بالسلوكيات المعقدة المبرمجة..... ٢٨٨
الهندسة التصميمية..... ٢٨٩
الهندسة التصميمية..... ٢٩٢
أصل الخوارزميات..... ٢٩٦
الغائية..... ٢٩٧
التقارب..... ٢٩٩
البساطة..... ٣٠٠
التنبؤات..... ٣٠٣
خلاصة المميزات..... ٣٠٥
الفصل الثامن: الرد على الاعتراضات الشائعة على التصميم الذكي..... ٣٠٧
مراجعة الأقران والتصميم الذكي..... ٣١١
نعم، التصميم الذكي قابل للاختبار..... ٣١٢
إن قبول التصميم الذكي لن يعني نهاية العلم..... ٣١٩
في مواجهة فكرة ثبات الأنواع..... ٣٢٧
التصميم غير الأمثل: اعتراض ونقض..... ٣٢٩
اشكالية سلوك الحيوان "الشرير"..... ٣٣١
من صمم المصمم؟..... ٣٣٩
أفكار ختامية..... ٣٤٣
الفهرس..... ٣٤٥