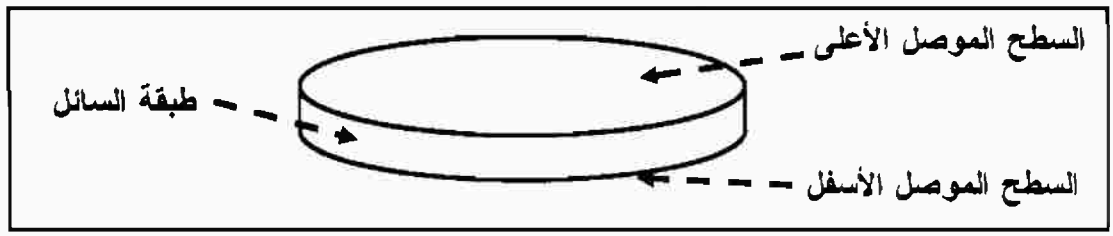
الفصل الثانى

تحدى القوانين

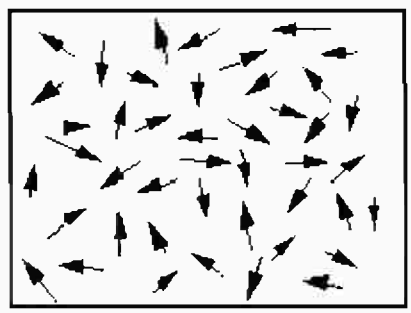
لفائف بينارد Bénard Rolls

فى عام ١٩٠٠ كان عالم الفيزياء الفرنسى هنرى بينارد (١٨٧٤-١٩٣٩) يجرى تجربة بسيطة لدراسة التوصيل الحرارى خلال الموائع. ويوضح الشكل (٢-١) مكونات هذه التجربة التى تتكون من طبقة رقيقة من سائل محصورة بين سطحين كبيرين من مادة موصلة للحرارة.



الشكل (٢-١): مكونات تجربة بينارد

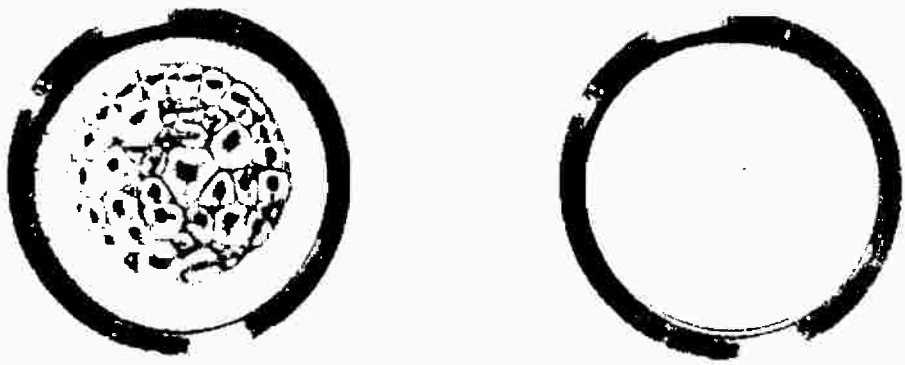
وبالطبع عند تساوى درجة حرارة هذه المكونات، السطحين الموصلين والسائل المحصور بينهما، فإن المنظومة تكون فى وضع الاتزان التى يكون من أوضح ملامحها عدم وجود حركة للكتل المكونة للسائل. وعلى الرغم من ذلك فإن جزيئات السائل تتحرك عشوائيا فى جميع الاتجاهات كما هو موضح بالشكل (٢-٢).



الشكل (٢-٢): الحركة العشوائية لجزيئات السائل

وتبدأ التجربة بتسخين السطح الأسفل الذى تنتقل الحرارة منه إلى جزيئات طبقة السائل الملاصقة له فتزيد طاقة حركتها (طاقتها الحرارية) وتبدأ فى الحركة بسرعة أكبر من سرعة بقية الجزيئات. وتنتقل الطاقة الحرارية لهذه الجزيئات عبر تصادمها مع جزيئات الطبقة التى تعلوها فى وضع شبيه بتصادم عربة سرعتها ١٠٠ كم/ساعة مع عربة سرعتها ٢٠ كم/ساعة على سبيل المثال. وتتكرر هذه العملية بين الجزيئات المكونة لطبقة من طبقات السائل مع جزيئات الطبقة التى تعلوها، وهكذا إلى أن تصل إلى طبقة الجزيئات الملاصقة للسطح الأعلى. وتسمى هذه العملية بالـ "**التوصيل الحرارى**". وفى هذه العملية لاتنتقل الحرارة عبر حركة كتل السائل بل من خلال انتقال الطاقة الحرارية لجزيئات طبقة السائل الساخنة إلى جزيئات طبقاته الباردة. وإلا هنا لاشىء جديد أو ملفت للانتباه.

وعندما تتجاوز درجة حرارة السطح الأسفل حدًا معيناً (درجة الحرارة الحرجة) تبدأ الأمور فى التغير. فعندما ننظر إلى السائل عبر السطح الموصل الأعلى نلاحظ بدء ظهور أشكال هندسية مسدسة الشكل تعرف بـ "**خلايا بينارد**" Bénard Cells كما هو موضح بالشكل (٢-٣). ويشير ظهور هذه الخلايا، التى لاتتجاوز أبعادها المليميتر، إلى بدء آلية جديدة لانتقال الحرارة من السطح الساخن إلى السطح البارد وهى عملية "**الحمل الحرارى**". وهى الآلية التى تقوم على صعود كتل السائل الساخنة إلى أعلى وهبوط كتله الباردة إلى أسفل. والأمر المثير هنا أن حركة هذه الكتل تنتظم فى أشكال هندسية. أى أن الحركة العشوائية لجزيئات السائل، قبل درجة الحرارة الحرجة، قد حلت محلها حركة منتظمة لكتل السائل.

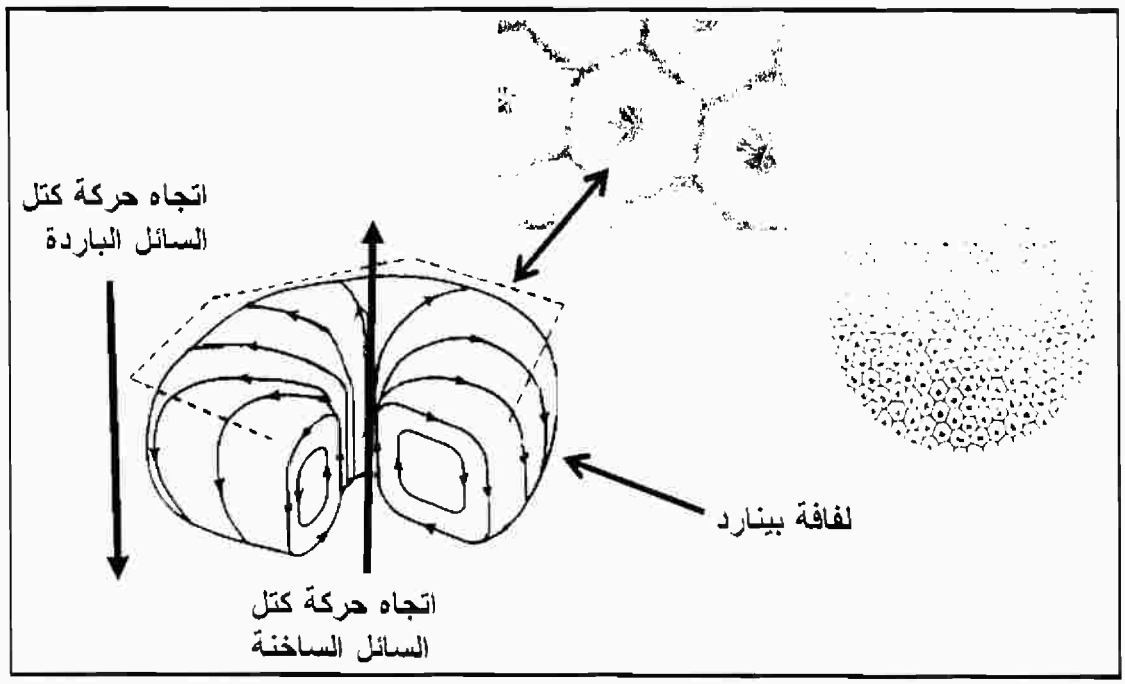


[أ] شكل سطح السائل أثناء عملية "التوصيل الحرارى" والتى تتميز بكونها متجانسة ومتماثلة

[ب] شكل سطح السائل أثناء عملية "الحمل الحرارى" والتى تتميز بظهور "خلايا بينارد"

الشكل (٢-٣): صورتان لتجربة بينارد:[أ] قبل تخطى درجة الحرارة الحرجة، [ب] بعد تخطى درجة الحرارة الحرجة [١]

ويوضح الشكل (٢-٤) نظرة عن قرب لـ "**لفائف بينارد**".



الشكل (٢-٤): لفائف بينارد

حكاية الفطـــر اللـــزج Slime Mold

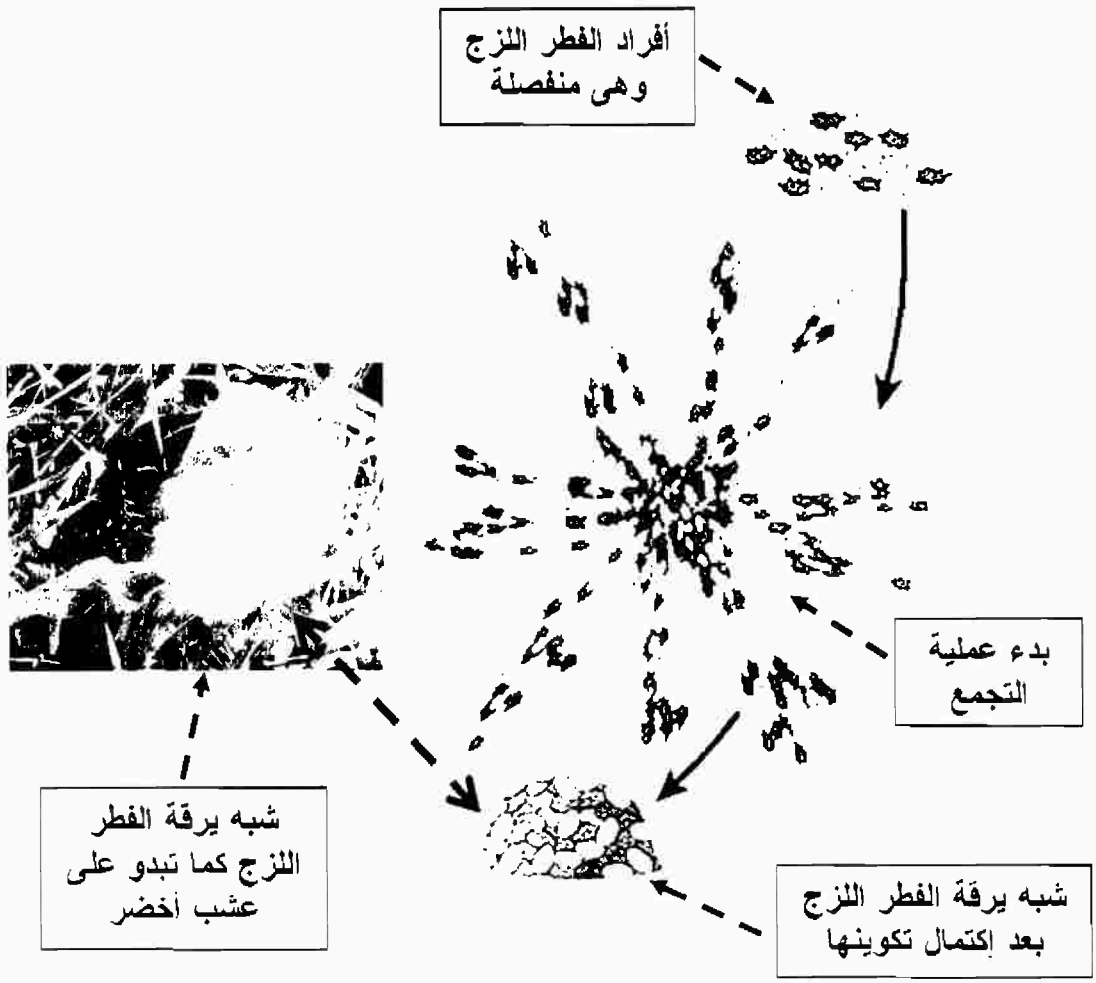
الفطر اللزج* هو اسم الشهرة لكائن حى وحيد الخلية من فصيلة الأميبا طعامه المفضل هو البكتريا التى يعشق التهامها أينما وجدها. أما سبب اهتمام العلمـــاء الخاص به فهو مايبديه من سلوك غير مألوف. فعندما يتوفر الطعام (البكتريـــا) فى بيئته، التى يتجول فيها منفردا بشكل عشوائى، نراه يمـــارس دورة حياتـــه المعتادة التى تتكون من الخطوات التالية:

- امتصاص للطعام.
- إفراز للمخلفات.
- تكرار للخطوات السابقة.

ويبدأ سلوكه غير المألوف عندما يستشعر الكائن المنفرد نقصا فى الطعام المتاح، ساعتها نراه يسعى للالتصاق بأفراد جنسه ليشكلوا سويا تكوينا متعدد الخلايـــا يعرف علميا بالـــ "سودو بلاسموديوم" Pseudo Plasmodium، أو بـــــ "شـــبيه اليرقة" [انظر الشكل (٢-٥)]. ويتمتع هذا التكوين بقدرات لاتتوفر لدى مكوناته المنفردة، فهو على سبيل المثال قادر على الحركة من مكان لآخر استجابة لأى تغير يستشعره فى مستوى الإضاءة أو فى درجات الحرارة وذلـك لمـــسافات كبيرة لايقدر عليها الكائن المنفرد. أما الأكثر إثارة فهو تمتع هذا التكوين بقدر من الذكاء البدائى الذى لايتوفر لدى مكوناته المنفردة. ففى سنة ٢٠٠٠ نـــشر العالم اليابانى ناكاجاكى ومن معه Nakagaki et al ورقة علميـــة فـــى دوريـــة "نيتشر" Nature الشهيرة [٢] يلخص فيها تجربة تظهر السلوك الذكى لشبه يرقة الفطر اللزج. وفى البداية بنى ناكاجاكى ومن معه "متاهة" من الطرق المتشابكة ووضع فيها شبه يرقة الفطر اللزج [انظر الشكل (٢-٦)]. ولقد لاحظ ناكاجاكى ومن معه أن شبه يرقة الفطر اللزج قد تمدد جسدها وتفرع ليملأ كافة طـــرق المتاهة. وفى الخطوة الثانية تم وضع قطعتين من الطعام المناسب فى مكـــانين مختلفين فى المتاهة. وبمجرد أن استشعرت يرقة الفطر اللزج بوجود الطعـــام حتى بدأت فى تقليص جسدها و"لم" أطرافه من طرق المتاهة التى لاتوصل إلى

* اسمه العلمى هو ديكتيوستليدس dictyostelids

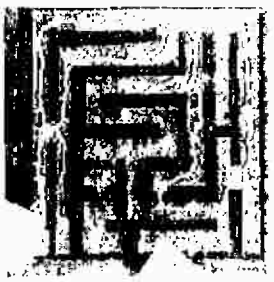
الطعام مباشرة. أى أن هذا لكائن أبدى سلوكا ذكيا باكتشاف واتباع أقصر الطرق فى سعيه للحصول على طعام.



الشكل (٢-٥): عملية تكوين شبه يرقة الفطر اللزج

وتوقف العلماء حيرى أمام هذا السلوك غير المألوف لكائن وحيد الخلية وتداعت أمامهم الأسئلة التى تنتظر الإجابة. فعلى سبيل المثال "كيف تنتظم هذه الكائنات فى كيان أكبر منها؟". وكان الرد المباشر، المرتكز على مبدأ "**لابد من وجود صانع للنظام**" أو ثنائية "**النظام، صانع النظام**"، إن بعضا من كائنات الفطر اللزج لابد وأن تتمتع بصفات "**قيادية**" تتيح لها الإشراف وتوجيه عملية تنظيم هذه الكائنات البسيطة فى كيان أكبر منها يتمتع بقدرات لاتتوفر لهذه الكائنات

كل على حدة. وبالفعل نجح العالم الأمريكى شافر Shafer من جامعة هارفارد سنة ١٩٦٢ فى وضع نظرية تفسر كيفية تواصل العناصر القيادية لكائنات الفطر اللزج مع بقية أفراد شعبها ...!. وبينت هذه النظرية أن هذا التواصل يتم عن طريق إفراز مادة معينة (إنزيم إيه إم بى الدائرى Cyclic AMP) التى تستشعرها كائنات الفطر اللزج وتستجيب لها [٣]. وبالطبع يتطلب إثبات هذه النظرية والتحقق من صحتها اكتشاف طريقة لتمييز هذه العناصر القيادية والتعرف على صفاتها الخارقة. ولقد أخفقت جهود العلماء فى اكتشاف هذه العناصر المراوغة فكل أفراد الفطر اللزج متشابهه لافرق بينها. وهكذا ظل السؤال "كيف تنتظم هذه الكائنات فى كيان أكبر منها؟" بدون إجابة.

		
فى البداية تمدد جسد شبه يرقة الفطر اللزج وتفرع ليملأ طرق المتاهة.	بعد مرور ٤ ساعات من وضع الطعام تبدأ شبه يرقة الفطر اللزج فى سحب فروع جسده من طرق المتاهة التى لاتؤدى مباشرة إلى الطعام.	بعد مرور ٨ ساعات من وضع الطعام تملأ فروع جسد يرقة الفطر اللزج أقصر طرق المتاهة المؤدية للطعام.

الشكل (٢-٦): تجربة العالم اليابانى ناكاجاكى ومن معه [٢]

ويأتى الفرج على أيدى عالمة الفيزياء النظرية إفيلين فوكس كللر Evelyn Fox Keller وعالم الرياضيات لى سيجل Lee Segel. ففى سنة ١٩٦٩ ينشر العالمان ورقة قصيرة تفندا فيها فرض شافر الرئيسى والقاضى بضرورة وجود عناصر قيادية [٤]. فطبقا لنظريتهما لاتوجد حاجة إلى عناصر قيادية تشرف على عملية تكوين "شبه اليرقة" وأن أفراد الفطر اللزج قادرون بذواتهم فقط على تكوينها

وبدون أى إشراف [٥]. والسر فى ذلك اتباع أفراد الفطر اللزج لقاعدتين بسيطتين هما:

١. عندما تكتشف مشكلة ما فى البيئة، كنقص الطعام أو الجفاف، إفرز إنزيم " إيه إم بى الدائرى"
٢. إذا اكتشفت إنزيم " إيه إم بى الدائرى" فى البيئة
   - إفرز أنت أيضا إنزيم " إيه إم بى الدائرى"
   - توجه نحو مصدر هذا الإنزيم

أمة بلا زعيم

اذهب إلى النملة أيها الكسلان تأمل طرقها وكن حكيما
التى ليس لها قائد أو عريف أو متسلط
وتعد فى الصيف طعامها وتجمع فى الحصاد أكلها

(سفر الأمثال ٦:٦، ٧:٦، ٨:٦)

﴿حَتَّى إِذَا أَتَوْا عَلَى وَادِي النَّمْلِ قَالَتْ نَمْلَةٌ يَا أَيُّهَا النَّمْلُ ادْخُلُوا مَسَاكِنَكُمْ لَا يَحْطِمَنَّكُمْ سُلَيْمَانُ وَجُنُودُهُ وَهُمْ لَا يَشْعُرُونَ﴾

(سورة النمل : ١٨)

النمل ... هذا المخلوق الذى يشكل حوالى ٢٠% من الكائنات الحية على كوكب الأرض (طبقا لموسوعة **ويكيبيديا**) ... وتبلغ أنواعه ما يقرب من ١١،٩٤٨[٦] والذى لفتت خصائصه الفريدة أنظار الإنسان فجاء ذكره فى كتبه المقدسة. فـ "أمة النمل" هى أمة تؤمن بالتخصص الدقيق وتمارس العمل الجماعى بانضباط غير مسبوق، هذا بالإضافة مهارتها المشهودة فى عمارة الأوطان. ويخيل لمراقب هذه الأمة فى حياتها اليومية أنه يشهد تجسيدا نموذجيا لما يجب أن تكون عليه دولة شمولية يحكمها ديكتاتور بيد من حديد.

تنتظم أمة النمل فى ثلاث طوائف رئيسية هى: "**الملكات**" و"**الذكور**" و"**الشغالة**". وفى الغالب تضم الطائفة الأولى ملكة واحدة. وفى حقيقة الأمر تعتبر ملكة

النمل أقل شأنا من ملكة إنجلترا، حيث إنها "لاتملك ولاتحكم" ووظيفتها الوحيدة فى الحياة هى "الخلفة"، أى أنها ليست إلا "ماكينة لوضع البيض". إنها "أم" أمة النمل بكافة طوائفها. وحتى تقوم برسالتها خير قيام تقوم بعض بناتها من طائفة "الشغالة" بتنظيفها وتغذيتها على مدار الساعة. أما ثانى طوائف أمة النمل فهى طائفة "**الذكور**". وهى طائفة قليلة العدد تنحصر مهمة أفرادها فى تلقيح الملكة. ومأأن يتم الفرد منها مهمته لايبقى أمامه من خيار إلا الموت. أما الطائفة الأهم من طوائف أمة النمل فهى طائفة "**الشغالة**". وتتكون هذه الطائفة من إناث النمل العقيمة عديمة الأجنحة، وتتعدد مسئوليات هذه الطائفة مابين إنشاء وصيانة الوطن (العش)، وجمع وتخزين الغذاء، والعناية بالصغار والكبار غير القادرين. وترتبط طبيعة المهمة التى تقوم بها الشغالة بعمرها: ففى بداية حياتها تقوم بخدمة الملكة ورعاية الصغار، وعندما تنضج تساهم فى أعمال حفر وصيانة العش، أما عندما يتقدم بها العمر تقوم بمهام جمع الطعام خارج العش. ومن بين أفراد هذه الطافة يتم انتقاء الإناث كبيرة الحجم لضمهم لفئة "**الجنود**" المسئولة عن الدفاع عن الوطن والقيام بالغزوات واسترقاق المهزومين.

أما مهارة النمل كأمة بناءة فتتضح من أسلوبها الذى تتبعه فى عمارة أعشاشها. فهى فى العادة تحفر أعشاشها تحت الأرض إلى أعماق قد تبلغ فى بعض الأحيان العشرة أمتار. وتتكون هذه الأعشاش من حجرات عرضية تربطها قنوات طولية كما هو موضح فى الشكل (٢-٧). وتستخدم هذه الحجرات استخدامات متعددة، فالبعض منها يخصص للسكنى والبعض الآخر لتخزين الطعام. ولاتنسى أمة النمل موتاها فتخصص لهم مقبرة تكون فى العادة قريبة من السطح. ونظرا لأهمية النظافة فى حياة الأمم تخصص غرفة أخرى قريبة من السطح لإلقاء النفايات. هذا ويراعى مهندسو إنشاءات أمة النمل أن تكون هناك مسافة كافية بين "المقبرة" و"المزبلة" [٣].

الشكل (٢-٧): مجسم لأحد أعشاش النمل [٧]

ومن المثير للاهتمام الأسلوب الذى تتبعه أمة النمل فى توزيع مواطنيها وتسكينهم. فيخصص للملكة أكثر حجرات العش عمقا وانعزالا حتى تتفرغ لمهمتها الجليلة المتمحورة حول زيادة عدد أفراد الأمة. وتحتل صغار الشغالات الحجرات الأكثر عمقا بينما تخصص الحجرات القريبة من سطح الأرض للشغالات اللواتى يتولين مهام جمع الغذاء ومهام الدفاع عن العش [٧].

كان هذا عرضا سريعا ومقتضبا لأحوال أمة النمل إلا أنه يكفى لأن يثير فى الذهن سؤال عن السر وراء قدرة هذه الأمة على تنظيم شئون حياتها بكفاءة عالية وتنسيق مشهود. وهو السؤال الذى حير العلماء وأفنوا فى المحاولة للإجابة عليه الوقت والأموال. وأول ما ورد فى خواطرهم هو أن هذا التنظيم المحكم لابد وأن يكون وراءه "**سلطة مركزية**" و"**هرمية إدارية**" تفرض القوانين وتجبر أفراد هذه الأمة على احترامها. وكان فى ذهنهم نموذج الجيش بما

يتضمنه من "قيادة عليا" و"تسلسل للرتب" و"نظام محكم للسيطرة والاتصالات". باختصار كان أملهم فى الإجابة على السؤال هو نموذج "**السيطرة من أعلى لأسفل**" Top-Down Control، إلا أن نتائج مراقبتهم الدقيقة لسلوك النمل جاءت مخيبة لآمالهم؛ فملكة النمل، على سبيل المثال، لاحول ولاقوة لها ولاسيطرة لها على أحد. والأكثر من ذلك اكتشف العلماء أن أغلب ماينجزه أفراد أمة النمل من أعمال لايتطلب وجود اتصال مباشر بينهم ولكنه يرتبط بشواهد متعلقة بطبيعة المهمة المراد إنجازها. فعلى سبيل المثال يتسبب انهيار ممر فى العش فى لفت انتباه الشغالات المارات بالقرب منه فيبدؤوا القيام بعملية الإصلاح. وتقدم الإستراتيجية التى يتبعها النمل فى جمع الطعام مثالا لـ "**تنسيق السلوك الذى لايعتمد على وجود سلطة مركزية**". ففى البداية تبدأ الشغالات من جامعات الطعام فى التجول "**العشوائى**" خارج العش بحثا عن مصادر الغذاء، وتفرز كل شغالة أثناء هذا التجول العشوائى مادة ذات رائحة مميزة تعرف بالـ "فيرومون" **Pheromone** تمكن بقية الشغالات من تتبع أثرها، وبمجرد أن تعثر واحدة من الشغالات على مصدر غذاء تبدأ فى العودة إلى العش. وفى طريق عودتها تفرز فرمون ذا درجة تركيز أعلى يمكن بقية الشغالات من تمييز المسار المؤدى لمصدر الغذاء، وتبدأ الشغالات المسئولات عن جمع الطعام من تتبع هذا المسار وإفراز فرمونها الخاص عليه فتزيد درجة تحديده فيستقطب مزيدا من الشغالات.

ميلاد علم جديد

عرضنا فى الأقسام السابقة لثلاثة منظومات تتباين مكوناتها تباينا كبيرا. فمكونات المنظومة الأولى هى جزيئات سائل ما، بينما تتكون المنظومة الثانية من كائنات وحيدة الخلية (أفراد الفطر اللزج)، وأخيرا يشكل النمل مكونات المنظومة الثالثة. وعلى الرغم من اختلاف مكونات هذه المنظومات إلا أن السمة المشتركة بينها هى قدرتها على "**تخليق النظام**" بداخلها سواء كان هذا النظام على هيئة "**بنية**"، مثل لفائف بينارد أو شبه يرقة الفطر اللزج، أو على هيئة "**سلوك متناسق**"، مثل تحور جسم شبه يرقة الفطر اللزج أثناء بحثها عن الطعام أو بناء النمل لعشه. والأهم من ذلك هو أن عملية "تخليق النظام" هذه لاتتم بتوجيه خارجى ولاتخضع أثناء إتمامها إلى "قيادة مركزية" حتى لو كانت

من داخل المنظومة. كما تتميز هذه المنظومات بظهور مايعرف بالـ "**الخصائص المستجدة**" Emergent Properties، وهى الخصائص التى تتمتع بها المنظومة ككل واحد (كتلة السائل، شبه يرقة الفطر اللزج، أمة النمل) ولاتتمتع بها مكوناتها كل على حدة. أو بعبارة أخرى "**الكل أكبر من مجرد مجموع لمكوناته**"؛ فالمعادلات والنماذج الرياضية التى تصف سلوك المكونات، جزيئات السائل على سبيل المثال، غير قادرة على وصف وتفسير سلوك الكل، لفائف بينارد على سبيل المثال.

إن هذا السلوك غير المألوف لهذه المنظومات يتحدى النظرة العلمية التقليدية القائمة على مفهوم "**الاختزالية**" Redutionism. وهو المفهوم الذى يستند إلى القاعدة الثانية من المنهج الديكارتى لـ "**الممارسة الصحيحة للتعقل**" Properly conducting one's reason التى تنص على أنه " ***يمكن تبسيط دراسة أى مشكلة أو ظاهرة بـ "تفكيكها" إلى أجزاء منفصلة، أو مكونات، يسهل دراسة كل منها على حدة***". وترتكز صحة هذه القاعدة ومن ثم صلاحية تطبيقها على الفرضين التاليين:

- لن تؤدى تجزئة الكل إلى أجزاء إلى تشويه الظاهرة موضوع الدراسة أو التأثير على سلوكها.
- لاتختلف خصائص مكونات الظاهرة ووسلوكياتها المشتقة من دراستها ككيانات مستقلة عن خصائصها وسلوكياتها باعتبارها أجزاء لكل واحد.

لذا كانت الحاجة لنظرة علمية جديدة موضوعها الرئيسى هو الإجابة على السؤال التالى: كيف يتولد الانتظام ذاتيا فى المنظومات الحية وغير الحية؟. بها النظرة التى تهتم بدراسة "**المنظومات ذاتية التنظيم (م ذ ت)**" Self-Organizing Systems (SOS) والتى عرضنا لأمثلة لها فى الأقسام السابقة.