الفصل الثالث

علم الانتظام الذاتى

"فى البدء كان "نون"
وجوداً وحيدا فى الكون
وكان "نون" محيطا أزليا ... مظلما
ومن "نون" خرج إله الشمس "رع آتوم"
الكامل ... المتكامل
خرج بقدرته الذاتية دون معين
لأنه كان
هو كل شىء فى الوجود"

رع آتوم

(مقتطفات من قصة الخلق طبقا لميثولوجيا "منف")

الانتظام الذاتى

لم يكن كهنة منف وهم يسطرون، منذ أكثر ٥٠٠٠ سنة، قصة الخلق يعلمون أن "نون"، طبقا لعلماء النصف الثانى من القرن العشرين، هو "**منظومة ذاتية التنظيم**" قادرة على فعل "**الانتظام الذاتى**". ويعرف هؤلاء العلماء "**الانتظام الذاتى**" **Self-organization** بأنها

"العملية التى تزيد بواسطتها أى منظومة من درجة انتظامها وذلك بدون تدخل أى كيان من خارجه".

وتشمل كلمة الانتظام هنا كلا من ظهور علاقات ترتيب جديدة (بنى Structures) بين مكونات المنظومة أو تغيرات مستجدة فى سلوكها [٨]. أو بعبارة أخرى هى عملية ديناميكية و تكيفية تمكن المنظومة من إنشاء بنى جديدة بداخلها ومن الحفاظ على بناها القائمة وذلك بدون أى تدخل خارجى [٩]. وكعادتهم لايكتفى العلماء، خاصة إن كان موضوعهم لايزال طور الطفولة، بتعريف واحد بل تراهم يصوغون أكثر من تعريف يصف كل منها موضوعهم من زوايا جديدة. فعلى سبيل المثال يلقى التعريف التالى أضواء على طبيعة المنظومات ذاتية التنظيم:

"الانتظام الذاتى هو عملية البزوغ التلقائى لبنى جديدة ولأنماط سلوكية غير مسبوقة وذلك فى **المنظومات المنفتحة** التى **يبعد وضعها كثيرا عن وضع الاتزان** والتى تترابط مكوناتها عبر علاقات **غير خطية**" [10].

ويحتوى هذا التعريف على ثلاثة مفاهيم جديدة هى "**المنظومات المنفتحة**"، "**الاتزان**" و"**اللاخطية**". وهى المفاهيم التى سنتعرض لكل منها ونشرح ماتعنيه.

المنظومات المنغلقة والمنفتحة Closed and Open Systems

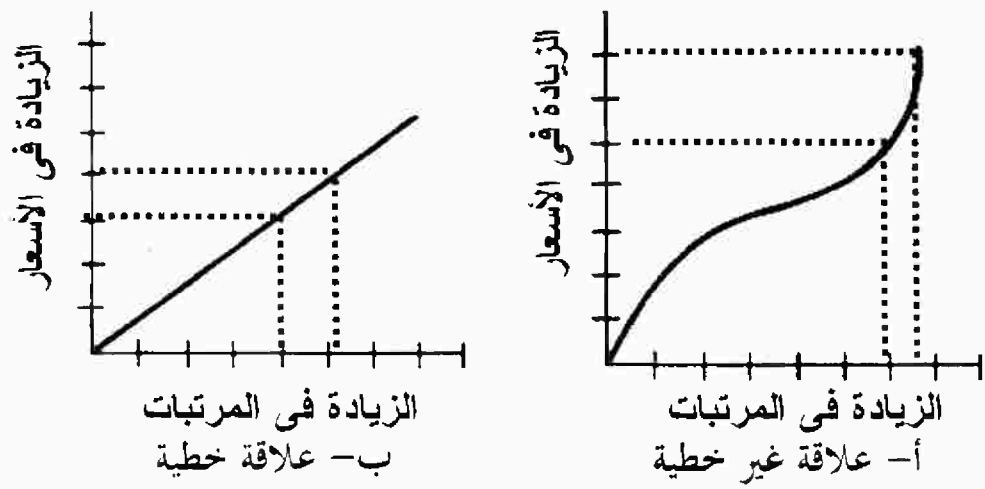
"**المنظومات المنغلقة**" هى تلك المنظومات المعزولة تماما عن البيئة التى توجد فيها فلا يحدث بينها أى تبادل للطاقة أو للمعلومات. و طبقا لقوانين الفيزياء (القانون الثانى من قوانين الديناميكا الحرارية) فإن مصير تلك المنظومات هو الانحلال نتيجة لزيادة الفوضى بداخلها ومن ثم تحلل بنيتها. و عكس تلك المنظومات نجد "**المنظومات المنفتحة**" تتبادل الطاقة والمعلومات مع بيئتها. وتتمتع هذه المنظومات بخصائص عديدة مثل خاصية الـ "**هوميوستاسيز**" Homeostasis التى تعنى قدرتها على الحفاظ على وضعها فى إطار الحدود المسموح بها كما هو حال جسم الإنسان الذى يحافظ على حرارته ثابتة لا تتغير إلا فى حدود ضيقة. كما تتمتع المنظومات المنفتحة بخاصية "**التناهى**" Equifinality التى تعنى مقدرتها على بلوغ نفس النتيجة عبر بنى وعمليات مختلفة.

الاتزان Equilibrium

يقال عن منظومة ما أنها فى وضع الاتزان عندما تتوقف أحوالها عن التغير. وفى العادة توصف حالة أى منظومة بواسطة مايعرف بـ "**متغيرات الحالة**" State Variables. فعلى سبيل المثال توصف "حالة" فنجان الشاى بواسطة درجة حرارته. وإذا نسيت شرب فنجان الشاى الذى أعددته لإفطارك فإن درجة حرارته تقل تدريجيا إلى أن تتساوى مع درجة حرارة الغرفة وتثبت عنها. عندها يمكن القول أن فنجان الشاى بلغ وضع الاتزان. أى وضع الاتزان هو الوضع الذى تكف عنده قيم متغيرات الحالة للمنظومة عن التغير. وطبقا للقانون الثانى للديناميكا الحرارية فإن إنتروبيا المنظومة (درجة اللانظام والعشوائية) تبلغ أعلى قيمها عند وضع الاتزان. أما المنظومات التى يبتعد وضعها كثيرا عن وضع الاتزان Far From Equilibrium فهى تلك التى تتغير قيم متغيرات حالتها بسرعة وبطريقة حادة و"على أهون سبب".

اللاخطية Nonlinearity

قد لايعلم الكثيرون أنهم عندما يرددون عبارتهم الاستنكارية "إن الزيادة فى المرتبات لاتتناسب مع الزيادة فى الأسعار" إنما يتحدثون عن "**علاقة لاخطية**" بين المرتبات والأسعار. فالارتفاع الطفيف فى المرتبات يعقبه ارتفاع مهول فى أسعار السلع والخدمات. وعلى العكس من ذلك إن تناسب الارتفاع فى المرتبات مع الإرتفاع فى الأسعار تصبح العلاقة بينهما "**علاقة خطية**" (انظر الشكل ٣-١). وفى الحقيقة أن أغلب العلاقات التى تحكم الواقع هى علاقات لاخطية.



الشكل (٣-١): توضيح لمفهوم العلاقات اللاخطية

أما إذا كنت من هواة الرياضيات فإن الدالة الخطية $f(x)$ ، التى تمثل العلاقات الخطية، هى الدالة التى تتمتع بالصفات التالية:

١. **الجمعية** Additivity **(قاعدة التراكب** Principle of Superposition)، أى أن

$$f(x+y) = f(x) + f(y)$$

٢. **التجانسية** Homogeneity، أى أن $f(\alpha x) = \alpha\, f(x)$

ويطلق على المنظومات التى ترتبط مكوناتها سويا بعلاقات لاخطية اسم "**المنظومات اللاخطية**" Nonlinear Systems. وعلى عكس "**المنظومات الخطية**" Linear Systems، التى ترتبط مكوناتها سويا بعلاقات خطية، فإن سلوك المنظومات اللاخطية لايمكن التعبير عنه بدلالة مجموع سلوك مكوناتها، أى أنها لاتخضع لقاعدة التراكب.

تاريخ الفكرة

بهرت ظاهرة "**انبثاق النظام من الفوضى**" الإنسان وشغلت تفكيره بدءا من كهنة منف فى مصرنا القديمة وحتى علماء وفلاسفة القرن الواحد والعشرين. ولقد أطلق الإغريق على الكون لفظة "**كوزموس**" κόσμος التى تعنى الترتيب والانتظام ومنها اشتقت كلمة Cosmos فى اللغات الأوربية الحديثة. أما نقيضها فهو الـ "**كيوس**" Χάος التى تعنى الفوضى وغيبة الترتيب والانتظام.

ولقد تصور فلاسفة الإغريق، ومن قبلهم كهنة منف، أنه فى البدء كانت الفوضى ومن هذه الفوضى انبثق الترتيب والانتظام (كوزموس). وفسر فلاسفة الإغريق، من مدرسة "الذريين" [1] بدءا من ديموقريتس (٤٦٠-٣٧٠ ق.م) Democritus وانتهاء بـ إبيكورس (٣٤٢-٢٧٠ ق.م) Epicurus، انبثاق الانتظام من الفوضى بأنه نتيجة لتصادم الذرات المكونة للعالم بالصدفة المحضة.

[1] هى المدرسة الفلسفية الإغريقية التى كانت تتصور أن العالم يتكون من أجزاء صغيرة غير قابلة للتقسيم هى "الذرات".

أما فى العصر الحديث فإن فضل استحداث مفهوم "**المنظومات ذاتية التنظيم**" يعود إلى عالم النفس البريطانى ويليم روس آشبى W. Ross Ashby. ويعتبر هذا العالم من الآباء المؤسسين لعلم "السيبرنيطيقا" ولـ "نظرية المنظومات العامة". ففى سنة ١٩٤٧ نشر ورقة علمية بعنوان "أسس المنظومات ذاتية التنظيم الديناميكية" Principles of the Self-Organizing Dynamic System وذلك فى الدورية العلمية Journal of General Psychology [١١]. وفى عام ١٩٦٢ اقترح آشبى تفسيران لمفهوم "الانتظام الذاتى". الأول هو قيام المنظومة بـ "تربيط" مكوناتها المستقلة وغير المترابطة لتشكل كيان متسق يعكس "توافقها" Interdependence وسلوكها المتناسق. أما الثانى فيضيف للتفسير الأول قدرة المنظومة على التعلم ومن ثم مواءمة البنى الجديدة التى تستحدثها المنظومة مع متطلبات الحفاظ على بقائها [١٢].

آشبى (1903 – 1972)

أما عالم الفيزياء النمساوى هاينز فون فورستر Heinz von Foerster فكان أول من قدم صياغة كمية لظاهرة الانتظام الذاتى تتيح لنا قياس درجة الانتظام فى منظومة بعينها [١٣]. وقد أدت صياغته إلى اشتقاق مبدأ "**ظهور الترتيب من الضوضاء** (أو الفوضى)" Order from Noise والذى مؤداه أن زيادة الضوضاء (أو الفوضى) فى منظومة ما تساعدها على زيادة ترتيبها.

فورستر (1911 – 2002)

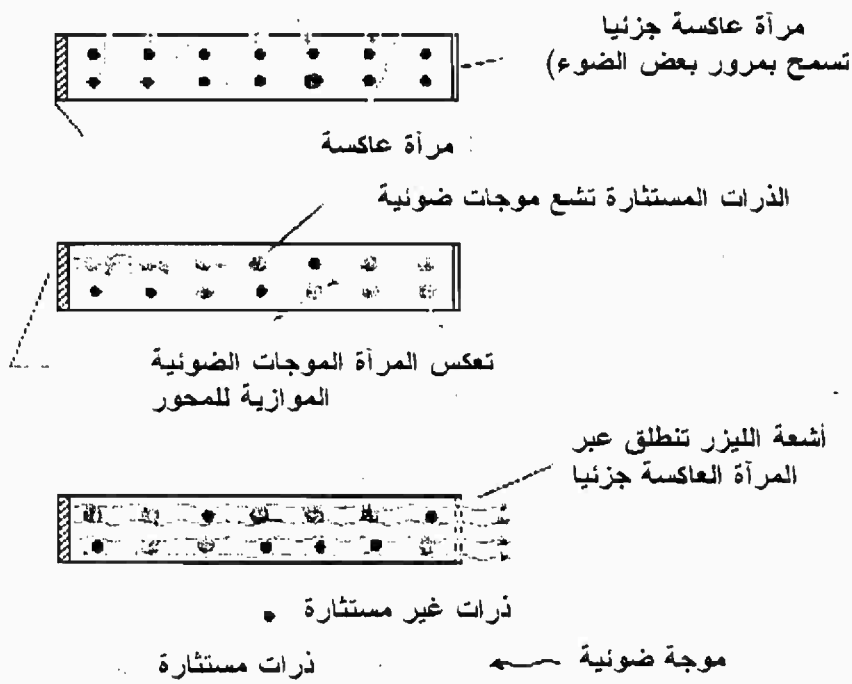
بريجوجن (1917 – 2003)

لقد "***طور نظريات من شأنها تقليل الهوة بين مجالات البحث العلمى فى العلوم البيولوجية والاجتماعية***". وردت هذه الكلمات فى تقرير لجنة جائزة نوبل عن أعمال عالم الكيمياء الطبيعية إليا بريجوجن Ilya Prigogine الذى مُنح جائزة نوبل فى الكيمياء سنة ١٩٧٧ عن "**نظرية البنى المبددة**" Theory of Dissipative Structures. وكان موضوع بحوث هذا العالم هو دراسة ديناميكا التفاعلات الكيمائية، وكان السؤال المحورى لبحوثه هو: "كيف يؤدى تبديد (امتصاص) الطاقة فى المنظومات الكيمائية إلى توليد انتظام يتبدى فى المكان والزمان؟". وكانت إجابته هى "**الترتيب عبر التقلب**" Order through Fluctuation. وطبقا لنظريته توجد "تقلبات" فى أحوال أى منظومة، مثل تقلبات الأسعار صعودا أو هبوطا فى منظومة السوق، أو فى أحوال البيئة الموجودة فيها، مثل تقلبات تكاليف شحن البضائع. وفى الظروف العادية وعندما يكون مدى هذه التقلبات صغيرا تتمكن المنظومة من إخمادها والحفاظ على وضعها الحالى، أما إذا كانت المنظومة فى وضع بعد عن حالة الاتزان فإن بعضا من هذه التقلبات تتضخم لتمهد بذلك الطريق للمنظومة لتنتقل إلى أوضاع أكثر ترتيبا.

هاكن (1927 -)

وفى نفس الوقت كان الفيزيائى الألمانى هرمان هاكن Hermann Haken يطور نظريته المتعلقة بأشعة الليزر كـ "منظومة ذاتية التنظيم". وطبقا لهذه النظرية فإنه عندما يتم تعريض المادة الفعالة لمصدر طاقة خارجى فإن ذراتها تستثار وتبدأ فى التخلص من الطاقة الزائدة عبر إشعاعها للضوء (أو الفوتونات Photons). وفى الأحوال العادية لايوجد أى ارتباط بين إشعاع هذه الذرات المستثارة. فكل منها يشع طاقته الزائدة فى توقيت واتجاه مختلف عن الآخر.

وينتج عن هذا الإشعاع غير المتزامن أشعة الضوء العادية. أما إذا وضعت المادة الفعالة بين مرآتين واحدة عاكسة تماما للضوء والأخرى عاكسة بطريقة جزئية، أى تسمح بمرور بعض الضوء، فإن إشعاع الذرات المستثارة يبدأ فى التزامن والتناسق ليؤدى فى النهاية إلى ظهور أشعة الليزر (أنظر الشكل ٣-٢). أى أن انبعاث أشعة الليزر ليس إلا علامة على الـ "**سينرجى**" Synergy (السلوك الجمعى والتعاونى) بين الذرات المستثارة للمادة الفعالة. ولقد اقترح هكان نظاماً علمياً جديداً أطلق عليه اسم "**السينرجيات**" Synergetics لدراسة الظواهر والمنظومات التى تبدى مكوناتها سلوكا جمعيا وتعاونيا.

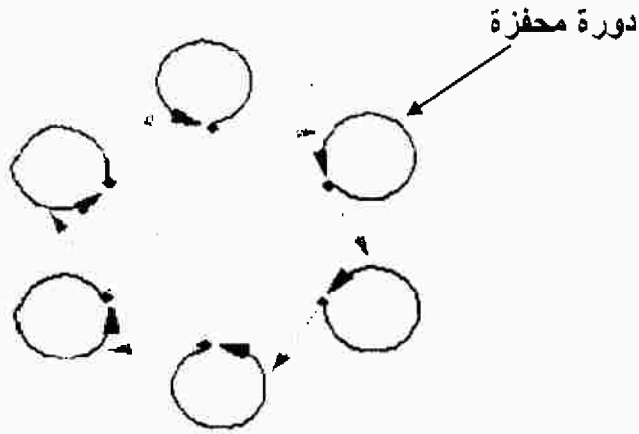


الشكل (٣-٢): النظرية السينرجية لأشعة الليزر

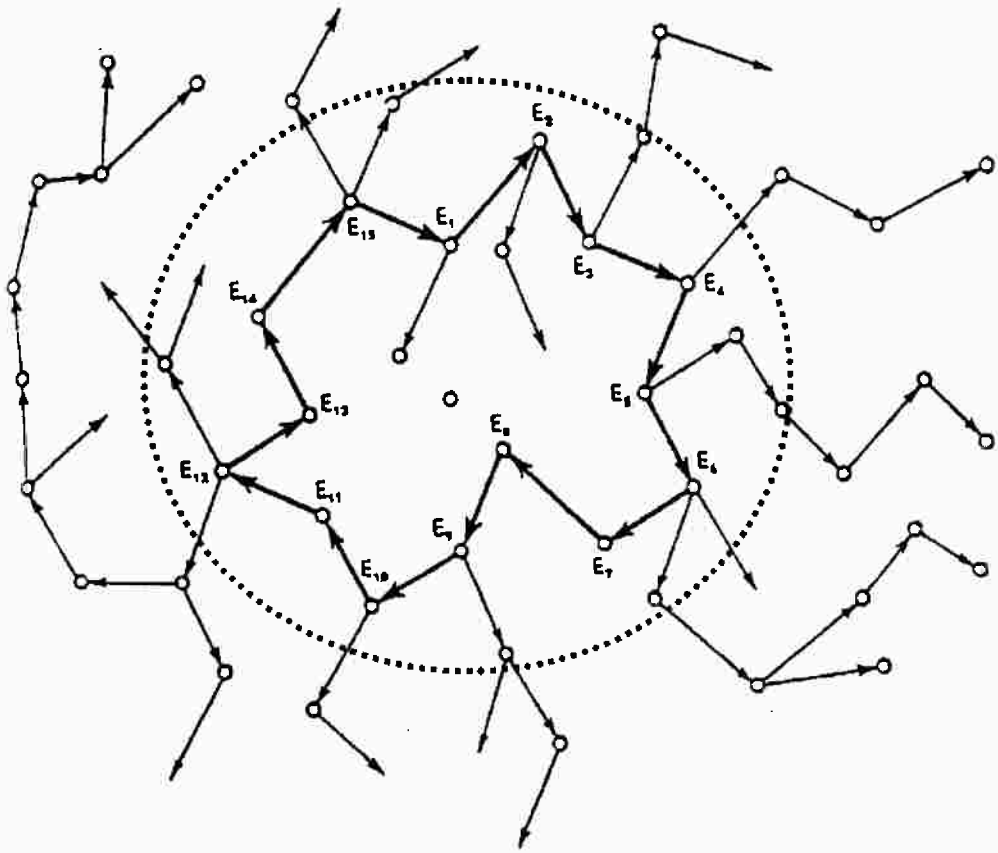
الـ "**مُحَفِـز**" Catalyst هى لفظة يطلقها علماء الكيمياء على أى مادة تؤثر على عملية التفاعل الكيميائى، فتساعد على بدئها أو تزيد أو تقلل من سرعتها، ولكنها فى النهاية لاتتأثر بهذا التفاعل. وتعتبر الإنزيمات من أشهر وأهم المواد المحفزة للدور الهام التى تلعبه فى كافة عمليات التمثيل الغذائى التى تقوم بها الخلايا الحية. وفى العادة يطلق على التفاعلات الكيميائية التى تتطلب وجود محفز اسم "**الدورات المُحَفِـزَة**" Catalytic Cycle. وتعود أهمية هذا النوع من التفاعلات الكيميائية إلى أن دراستها تساعدنا على فهم أسرار ظاهرة الحياة.

أيجن (1927 -)

ولقد كانت دراسة "الدورات المحفزة" هى الموضوع الأساسى لبحوث عالم الفيزياء الألمانى مانفريد أيجن Manfred Eigen وذلك فى ستينات القرن العشرين. وأسفرت النتائج التى توصل إليها إلى حصوله على جائزة نوبل فى الكيمياء سنة ١٩٦٧. ولقد اكتشف أيجن أن "الدورة المحفزة" المنفردة البعيدة عن وضع الاتزان تسهم فى إعادة إنتاج دورة محفزة جديدة والتى تسهم بدورها هى الأخرى فى إعادة إنتاج دورة محفزة جديدة وهكذا (انظر الشكل ٣-٣). وتمضى العملية قدما وتتلاحم كل هذه الدورات لتشكل كيانا واحدا على هيئة دائرة مغلقة أطلق عليها أيجن اسم "**الحلقة العظمى**" Hypercycle، أو حلقة الحلقات (أنظر الشكل ٣-٤). وتتمتع هذه "الحلقات العظمى" بخاصية الثبات والدوام Stability. إلا أن الأمر الأكثر إثارة هو قدرتها على "**استنساخ نفسها**" وعلى زيادة قدر الانتظام بداخلها، أى أنها تتمتع ببعض خصائص الكائن الحى. لذا اعتبر أيجن "الحلقات العظمى" كمرحلة وسيطة من مراحل تطور الجزيئات العملاقة من حالة "اللاحياة" إلى حالة "الحياة". ولقد أطلق أيجن على هذه الظاهرة اسم "**الانتظام الذاتى الجزيئى**" Molecular Self-Organization. وفى السنوات الأخيرة شكلت دراسة الانتظام الذاتى الجزيئى الأساس العلمى لتكنولوجيات جديدة مثل "**الحاسب الجزيئى**" Molecular Computer، الذى يستخدم الجزيئات العملاقة بدلا من الدوائر الكهربية فى إجراء الحسابات، ومثل "**النانو تكنولوجى**" Nanotechnology التى تهتم بأساليب بناء آلات يقارب حجمها حجم الجزيئات.



الشكل (٣-٣): عملية الإنتاج المتتالى للدورات المحفزة



الشكل (٣-٤): مثال لـ "حلقة عظمى" يشترك ١٥ إنزيم فى تحفيز دوراتها المنفردة [١٤]

كان هذا تقديماً خاطفا للآباء المؤسسين ولأعمالهم التى شكلت الأساس لنظرية علمية جديدة وأحدثت "**ثقلة بارادايمية**" Paradigm[1] Shift نعيش ونرى آثارها فى أيامنا هذه. نظرة تتجاوز طبيعة مكونات المنظومات قيد البحث لتبحث عن العام والمشترك بين ظواهر الواقع طبيعية كانت أو إنسانية، مخلوقة كانت أو مصنوعة. نظرة تتبنى "**رؤية عملياتية**" Process View للمنظومات فتهتم بأحوالها وهى فى حالة الغليان والفوران والتغير والتبدل، أى بأحوالها وهى "**بعيدة عن وضع الاتزان**". نظرة تأخذ فى اعتبارها خاصية "**اللاخطية**" Nonlinear التى تميز العلاقات بين مكونات هذه المنظومات فتسفر عن تنوع وثراء فى السلوك. نظرة تقدر الدور الهام الذى تلعبه "**الفوضى**" Chaos فى إنتاج "**الانتظام**".

إنها نظرة "**مابعد الحداثة فى العلم**" التى تشكل الإطار الجامع للعديد من النظم العلمية المستحدثة مثل "**نظرية الفوضى**" Chaos Theory و"**نظرية التعقد**" Complexity Theory ونظرية "**المنظومات المعقدة المتكيفة**" Complex Adaptive Systems.

أسرار الانتظام الذاتى

يقوم مفهوم "**الانتظام الذاتى**" على ثلاثة ملامح رئيسية تتمتع بها المنظومات ذاتية التنظيم وتأخذها فى الاعتبار النظريات المفسرة لسلوكها، "**نظرية البنى المبددة**" لبريجوجن، "**نظرية الليزر السينرجية**" لهاكن، "**نظرية الحلقة العظمة**" لأيجن.

- قدرة هذه المنظومات على توليد الانتظام بداخلها بدون أى تدخل من خارجها سواء كان هذا الانتظام على هيئة "**بنى جديدة**" أو على هيئة "**سلوك غير مسبوق**".
- "**انفتاح**" هذه المنظومات على بيئتها و"**بعد وضعها بعدا كبيرا عن وضع الاتزان**".
- ترابط مكونات هذه المنظومات عبر "**علاقات غير خطية**".

[1] الـ "باراديم" Paradigm أو "النموذج الاسترشادى" هو مجموع التوجهات الفكرية العامة التي تحكم رؤى الإنسان للواقع وتوجه أنشطته البحثية والعلمية ومنهجيات القيام بهذه الأنشطة.

آليات الانتظام الذاتى Mechanisms of Self-organization

هناك العديد من الشروط ، التى يتعين تحققها، والآليات التى يتعين تواجدها، فى المنظومات ذاتية التنظيم. ومن أهم هذه الشروط والآليات مايلى [١٥، ١٦]:

- **الانفتاح الثرموديناميكى والبعد عن وضع الاتزان**
- **كثرة المكونات وتموضع التفاعلات**
- **اللاخطية**
- **التشعب وكسر التماثل**

الانفتاح الثرموديناميكى والبعد عن وضع الاتزان

يعنى وصف منظومة، أيا كانت طبيعة مكوناتها، بـ "**الانفتاح**" أنها تسمح بتبادل المادة والطاقة والمعلومات مع البيئة الموجودة فيها. فالعائلة، ولتكن عائلة الأستاذ س، هى بالضرورة منظومة منفتحة تتبادل المادة (شراء الطعام من السوق، إهداء الجيران صنية كحك العيد)، والطاقة (طبعا منزل العائلة مزود بالطاقة الكهربية ولامانع من مد خط إضافى لتغذية غرفة فوق السطوح)، والمعلومات (شكرا لأجهزة التليفزيون والراديو والتليفونات أرضية كانت أو محمولة التى تذخر بها شقة الأستاذ س). أما إذا أخذنا المعنى الضيق لخاصية الإنفتاح، أو الانفتاح الثرموديناميكى Thermodynamically Open، سنجد أنها تقتصر على تبادل المادة والطاقة فقط.

وتعود أهمية تمتع "المنظومات ذاتية التنظيم" بخاصية "الانفتاح الثرموديناميكى" إلى حاجة هذه المنظوات إلى مزيد من الطاقة تستخدمه فى تخليق الانتظام بداخلها. ومصير المنظومات "المنغلقة"، كما يخبرنا القانون الثانى للثرموديناميكا، هو الاستقرار فى حالة من الجمود والتحجر (أو وضع الاتزان). فمصيرالمنظومات المنغلقة هو مصير المنظومات التى "تأكل نفسها" فتتحول طاقتها الداخلية القابلة للاستخدام إلى طاقة غير قابلة للاستخدام ويزيد قدر الفوضى (الإنتروبيا) بداخلها وينتهى بها الحال إلى خمود مميت حيث تبلغ الإنتروبيا قيمتها العظمى. ويعرف هذا الوضع بوضع "الاتزان الثرموديناميكى" أو "الموت الحرارى".

وكلما ازداد بعد المنظومات المنفتحة عن وضع الاتزان الثرموديناميكى كلما ازدادت شراهتها لإستيراد الطاقة من بيئتها واستخدامها فى تخليق الانتظام، أو

بعبارة أخرى "**تصدير الإنتروبيا** (الفوضى)" إلى بيئتها. وتستخدم عبارة "**تصدير الإنتروبيا**" هذه للدلالة على المنظومة وهى تعمل زيادة الانتظام بداخلها لاتخرق القانون الثانى للثرموديناميكا.

وطبقا لـــ "**نظريـــة البنـــى المبـــددة**" Theory of Dissipative Structures لبريجوجن فإن قدر إنتروبيا المنظومات المنفتحة إما يظل ثابتا أو يميـــل إلـــى النقصان فى حالة تخليقها للانتظام وذلك عكس المنظومات المنغلقـــة. ويمكـــن توضيح هذا الأمر بطريقة كمية على الوجه التالى [١٧-١٩]:

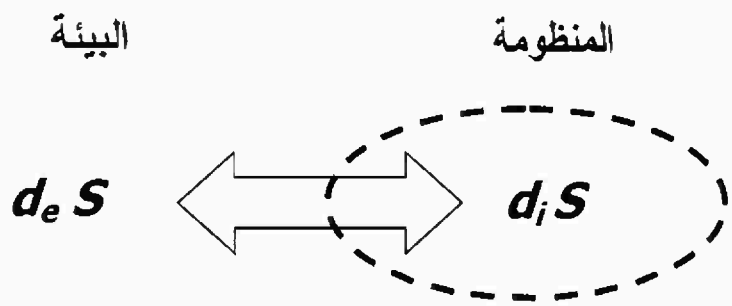
طبقا للقانون الثانى للديناميكا الحرارية فإن التغيـــر فـــى إنتروبيـــا المنظومـــة المنفتحة خلال فترة زمنية معينة dS هو حاصل جمع

- الإنتروبيا الناتجة من عمليات المنظومة الداخلية، أو الإنتروبيا الداخلية d_iS، مع ملاحظة أنها دائما موجبة $(d_iS > 0)$.
- الإنتروبيا المتدفقة عبر حدود المنظومة نتيجة انفتاحهـــا علـــى بيئتهـــا، أو الإنتروبيا الخارجية d_eS، مع ملاحظة أنها قد تكون سالبة أو موجبة.

أى أن

$$dS = d_eS + d_iS$$

ويتضح من هذه المعادلة أنه إذا كانت الإنتروبيا الخارجية سالبة $(d_eS < 0)$ ومساوية للإنتروبيا الداخلية فإن التغير فى إنتروبيا المنظومة يساوى صفرا ($dS = 0$)، أى أن انتظام المنظومة لايحدث فيه أى تغيير. أما فى حالة زيادة قيمة الإنتروبيا الخارجية السالبة عن قيمة الإنتروبيا الداخلية تصبح قيمة التغير فى إنتروبيا المنظومة سالبة $(dS < 0)$ وهو الأمر الذى يعنى زيادة الانتظام بداخلها (انظر الشكل ٣-٥).

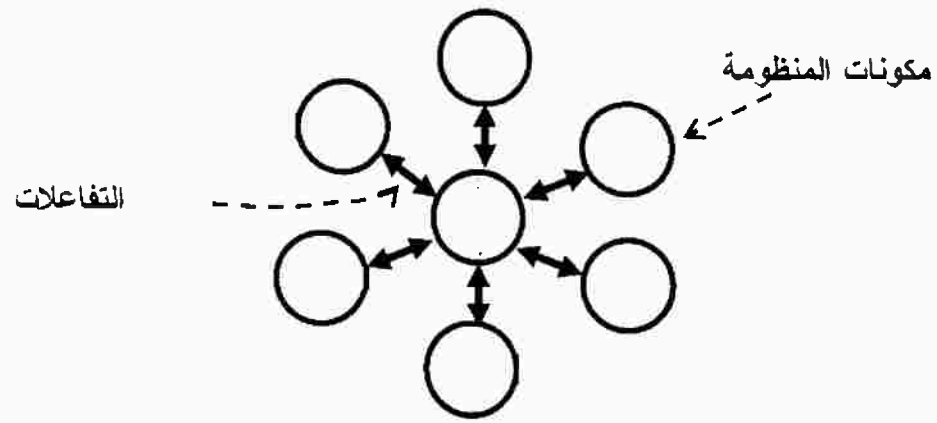


الشكل (٣-٥): إنتاج وتبديد الإنتروبيا فى المنظومات المنفتحة

كثرة المكونات وتموضع التفاعلات Many Parts with Local Interaction

ترتكز قدرة "**المنظومات ذاتية التنظيم**" على تخليق الانتظام بداخلها على أمرين:

- **كثرة المكونات:** فمكونات المنظومة هى المادة التى تتمكن المنظومة بواسطتها من تجسيد الانتظام وإظهاره للعيان سواء على هيئة بنى جديدة ("**انتظام فى الفضاء**") أو سلوك مستحدث ("**انتظام فى الزمان**"). وفى العادة تحتوى المنظومات ذاتية التنظيم على أعداد هائلة من المكونات قد تصل إلى عدة ترليونات[1].
- **تموضع التفاعلات:** ويعنى هذا الأمر أن مكونات المنظومة لاتتفاعل إلا مع المكونات التى تجاورها مباشرة فى الموضع. بعبارة أخرى تتبع المكونات فى تفاعلها مبدأ "الجار أولى بالشفعة" (انظر الشكل ٣-٦). أى أن لكل مكون حرية اختيار المكونات التى يرغب فى التفاعل معها **انطلاقا من مضعه وموضعه فقط. والنتيجة الطبيعية لتموضع التفاعلات هى غيبة** اى "**سيطرة مركزية**" على مكونات المنظومات ذاتية لتنظيم لأن السيطرة، فى هذه الحالة، هى "**سيطرة موزّعة**" Distributed Control تتقاسمها هذه المكونات.

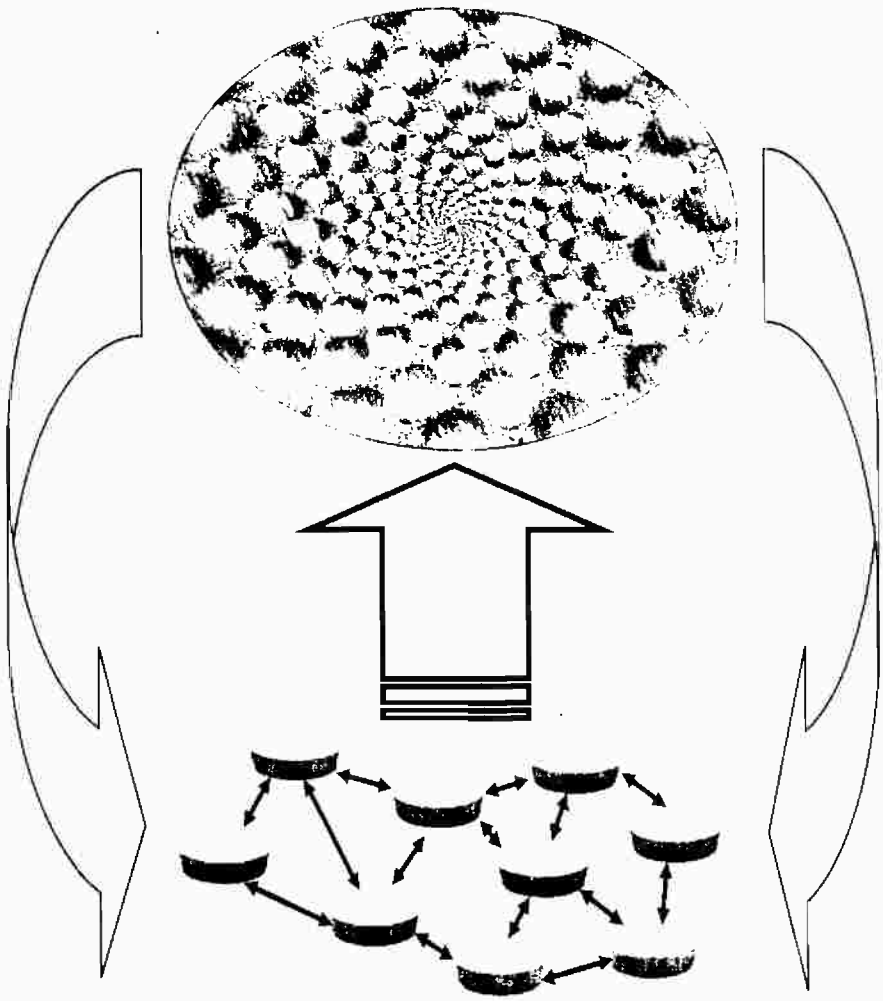


الشكل (٣-٦): تموضع تفاعلات مكونات المنظومات ذاتية التنظيم

[1] الترليون يساوى مليون مليون

وتؤدى هذه التفاعلات المتواضعة مجتمعة إلى "**بزوغ**" Emergence الانتظام أيا كانت طبيعته "بنى جديدة" أو "سلوك مستحدث". ويطلق اسم "**الخصائص المستجدة**" Emergent Properties على كافة أشكال الانتظام التى تبديه المنظومات ذاتية التنظيم. وهى الخصائص التى تتمتع بها المنظومة ككل واحد وتختلف تماما عن خصائص مكوناتها المنفردة. أى أن الخصائص المستجدة ليست إلا تعبيرا عن قاعدة "**علم المنظومات**" الشهيرة: "**الكل أكبر من مجرد حاصل جمع مكوناته**". هذا ويوضح الشكل (٣-٧) مخططا مبسطاً لعملية البزوغ.

الصفات المستجدة للمنظومة ككل كما تتبدى على هيئة ترتيب شامل



مكونات المنظومة وتفاعلاتها المتوضعة

الشكل (٣-٧): عملية بزوغ الصفات المستجدة

اللاخطية Nonlinearity

"الشيء يعرف بنقيضه" ستكون هذه العبارة هي مدخلنا لفهم مايعنيه مفهوم "**اللاخطية**" Nonlinearity. فمفهوم "**الخطية**" Linearity هو مفهوم مألوف لدينا حتى وإن لم نعى أبعاده صراحة. ووصف علاقة ما بأنها "**خطية**" يعنى تمتعها بأربعة خصائص هى:

١. **التناسبية** Proportionality

٢. **الجمعية** Additivity

٣. **التكرارية** Replication

٤. **وضوح السبب والنتيجة** Demonstrable Cause and Effect

والخاصية الأولى، "**التناسبية**"، يعنى "**تناسب النتيجة مع السبب**". فعلى سبيل المثال إن كان ثمن علبة التونة هو جنيه واحد فإن عدد علب التونة التى يمكنك شراؤها (النتيجة) يتناسب مع عدد الجنيهات الموجودة معك (السبب). أى أن العلاقة بين عدد علب التونة وعدد الجنيهات التى فى حوزتك هى علاقة خطية. أما إذا كان السوبرماركت يروج لنوع جديد من التونة ويشجع زبائنه على شراؤها عبر إعلانه "اشترى علبتان تونة من الصنف الفلانى تحصل على الثالثة مجانا"، فى هذه الحالة تتحول العلاقة بين عدد علب التونة وعدد الجنيهات إلى علاقة "**لاخطية**". أما "**الجمعية**" فتعنى أن "**الكل يساوى مجموع أجزائه**"، فحاصل جمع ١+١ لابد أن يساوى ٢. وهذه الخاصية ليست إلا أحد طرق التعبير عن مبدأ "**الاختزالية**" الذى عرضنا له فى الفصل السابق والقاضى بأن خصائص أى منظومة ككل ليست إلا محصلة لخصائص مكوناتها المنفردة. فعلى سبيل المثال يمكن تفسير ذكاء إنسان ما بدراسة الخصائص الكيميائية لمكونات مخه. و"**التكرارية**" تعنى أن نتيجة أى فعل يمكن "إعادة إنتاجها" مرارا وتكرارا طالما ظلت الشروط المواكبة للفعل ثابتة. أى أن هذه الخاصية ليست إلا الصياغة الرياضية للقول السائد أنه "لاجديد تحت الشمس". وأخيرا خاصية "**وضوح السبب والنتيجة**" التى تعنى أن قدرة الإنسان على تحديد "أسباب" مايشاهده من ظواهر بدقة عالية ومن ثم قدرته على التنبؤ بسلوكها فى المستقبل.

أى أن وصف أى شيء بأنه "**لاخطى**"، علاقة كان أو منظومة، يعنى غيبة التناسب بين الأسباب والنتائج فتغير طفيف فى قدر سبب ما قد تنشأ عنه نتائج غير مأخوذة فى الحسبان. ويعنى أيضا أن خصائص المنظومة ككل، كمية وكيفية، هى بالضرورة خصائص مستجدة لاتتمتع بها مكوناته المنفردة. وسلوك "الكائنات غير الخطية" يصعب تكراره أو إعادة إنتاجه فعالمها هو عالم دائم التجدد لامكان فيه للتكرار، لذا يصبح من الصعب من التنبؤ بأحوالها.

ولعل السر فى "**لاخطية**" المنظومات ذاتية التنظيم يكمن فى كلمة واحدة هى "**الرجيع**"* Feedback. ويذكر لنا المعجم الوسيط عن كلمة الرجيع أنها تعنى "**كل مرود من قول أو فعل**". وتعود نشأة هذا المفهوم إلى علم "**السيبرنيطيقيات**" Cybernetics الذى يعرف موضوعها آشبى، أحد آبائها المؤسسين، فيقول عنه "دراسة كل أشكال السلوك المنضبط أو المحدد أو القابل للتكرار" [٢٠]. وتمضى السيبرنيطيقات قدما فى إضفاء المزيد من الدلالات على كلمة "الرجيع" بتأكيدها أن هذا المردود ليس مردودا خاملا من أقوال وأفعال بل هو مردود نشط وفعال يؤدى إلى تغيير السلوك وتصحيح المسار. أى أن الرجيع، فى حقيقة أمره، هو استخدام نتيجة عمل ما فى تعديل أسلوب إنجازه، أى أنه ببساطة "**عود على بدء**" ... من النهاية الى البداية.

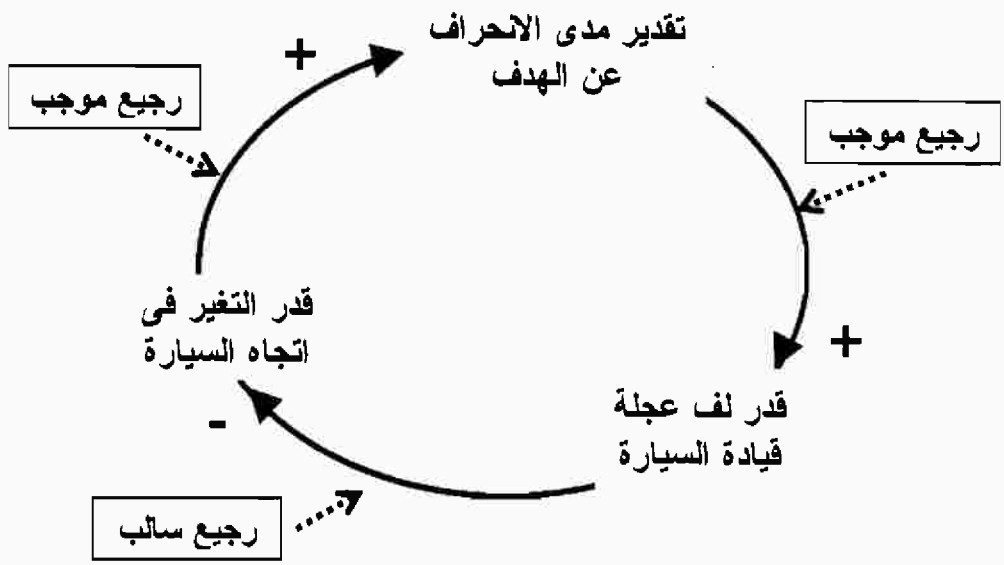
ولتوضيح مفهوم الرجيع سنأخذ منظومة "**السيارة + السائق**" كمثال. فلنفترض أنك تقود سيارتك متجها نحو الإسكندرية عبر طريق القاهرة-الإسكندرية الصحراوى، ونظرا لحالة السيارة غير المضمونة قررت السير فى الحارة اليمنى للطريق لاتحيد عنها قيد أنملة، لذا إن لاحظت انحرافها نحو الحارة اليسرى يكون رد فعلك الطبيعى هو لف عجلة القيادة نحو اليمين، أما إن لاحظت انحرافها نحو اليمين يكون رد فعلك الطبيعى هو لف عجلة القيادة

* فضلنا استخدام كلمة "رجيع" كترجمة لكلمة Feedback على الترجمة الشائعة "التغذية العكسية أو المرتدة" لتشابه دلالتها اللغوية مع نظيرتها الإنجليزية فضلا على أنها كلمة واحدة.

لليسار. ونتيجة ردود أفعالك هذه هى الحفاظ على حركة سيارتك على خط مستقيم فى حارة الطريق اليسرى. كما أن قدر "لفك" لعجلة القيادة يكون متناسبا مع قدر انحراف اتجاه حركة سيارتك عن الخط المستقيم.

والآن وقبل المضى فى تحليل هذا المثال من منظور مفهوم الرجيع؛ علينا توضيح أنواعه المختلفة، فـ "السيبرنيطيقيون" يصنفون الرجيع إلى صنفين: صنف سالب وصنف موجب. ويشبه عمل "**الرجيع السالب**" Negative Feedback عمل الضمير ....! ؟ ... فهو يكبح الجماح ويقوّم الاعوجاج ويمنع الغواية. فردود أفعالك الساعية لإعادة مسار السيارة إلى الخط المستقيم بلف عجلة القيادة يمينا أو يسارا تنتمى إلى الصنف الأول ... "**الرجيع السالب**". أى أن "**الرجيع السالب**" هو الرجيع الذى يستخدم نتائج فعل المنظومة فى الحفاظ على حالة "**استقرارها**" Stability بحيث لاتتعدى الحدود أو الخطوط المقررة سلفا.

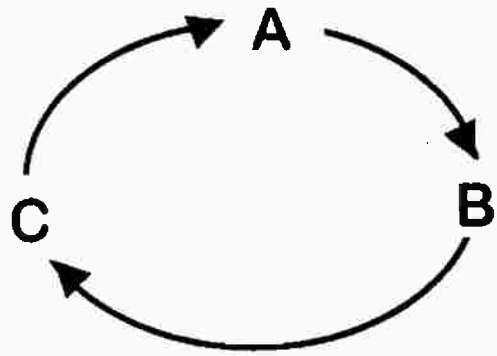
أما "**الرجيع الموجب**" Positive Feedback فمثله مثل الوسواس الخناس يثير الفتن ويهيج الهدوء وينفخ فيما كاد يخمد من رماد ...!؟ ... ولكنه، والحق يقال ليس دائما بهذا السوء .. فـ "**السلطنة**" مثلا ليست إلا واحدة من آثار الرجيع الموجب الحسنة ...؟ .... فنجد المطربة وهى تبدأ وصلتها الغنائية بـ "ليالى" تهز قفلاتها مشاعر جمهور السميعة فيطلق آهات الطرب والاستحسان ويطلب المزيد. وهنا تنتشى صاحبتنا فينطلق صوتها مدا وترجيعا إلى أعلى درجات السلم الموسيقى فيزداد حماس الجمهور فيملأ فضاء القاعة تهليلا ويستعيد ـ ـ "تتجلى" مطربتنا ويصول صوتها ويجول عبر المقامات. وتمضى الدورة حتى توقفها محدودية الوقت وقدرة الإنسان. أى أن "**الرجيع الموجب**" هو الرجيع الذى يضخم من نتائج فعل المنظومة. فعلى سبيل المثال تعتبر العلاقة بين مدى انحراف السيارة عن الخط المستقيم وقدر "لفك" لعجلة القيادة مثالا للرجيع الموجب. فكلما زاد انحراف السيارة كلما ازداد قدر اللف اللازم لتعديل المسار. ويوضح الشكل (٣-٨) دورة الرجيع لمنظومة "السيارة + السائق".



الشكل (٣-٨): دورة الرجيع لمنظومة "السيارة + السائق"

وتعتبر دورة الرجيع هذه مثالا لـ "**السببية الدائرية**" Circular Causality لدورة الرجيع. ودورة الرجيع هى ترتيب دائرى من المكونات المترابطة التى ينتشر مايحدث لأحد مكوناتها إلى بقية المكونات ليعود مرة أخرى إلى المكون الأول. ويوضح الشكل (٣-٩) هذا المفهوم، فأى تغير فى المكون C ينتشر إلى المكون A ليحدث به تغييرا. وينتشر التغير الحادث فى A إلى المكون B ليتغير بدوره ويؤثر على المكون C وتبدأ الدورة من جديد. ويعود الفضل فى اكتشاف الصياغة الدقيقة لمفهوم دورة الرجيع إلى مؤسس علم "**السيبرنيطيقيات**" عالم الرياضيات الأمريكى نوربرت فينر Norbert Wiener [٢١].

فينر (1894 – 1964)



الشكل (٣-٩): "السببية الدائرية" لدورة الرجيع

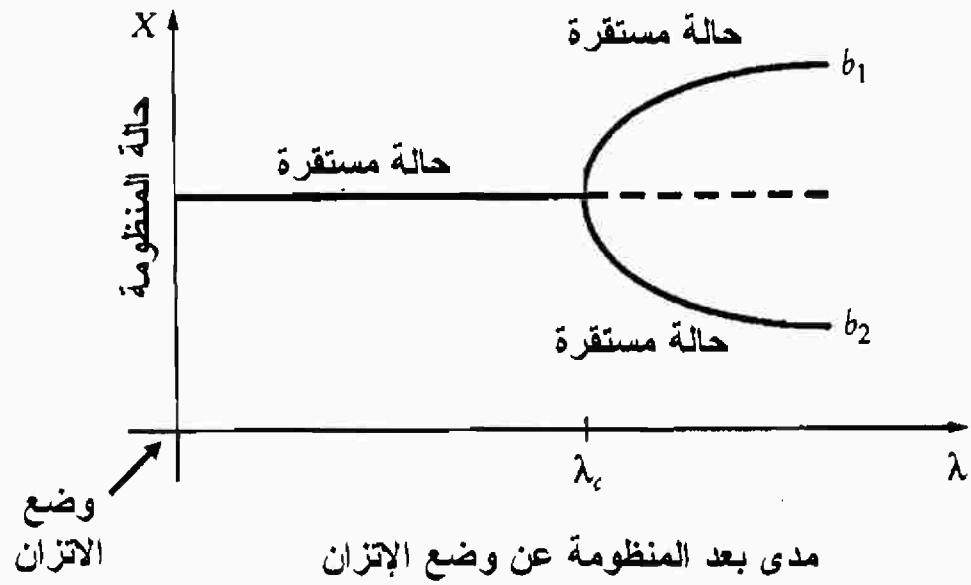
ويكمن سر "**لاخطية**" المنظومات ذاتية التنظيم فى خاصية "**السببية الدائرية**" التى تحكم العلاقات بين مكوناتها.

التشعب وكسر التماثل Bifurcations and Symmetry Breaking

والآن حان الأوان لتتبع أحوال المنظومة ذاتية الانتظام ومتابعة سلوكها انطلاقا من وضع الاتزان وإنتهاء بوضعها البعيد عن وضع الاتزان. وكما ذكرنا فى الأقسام السابقة فإن المنظومة فى وضع الاتزان تكف عن التغير والتبدل وتثبت قيم "**متغيرات أحوالها**" وتبلغ "**إنتروبيتها**" أعلى حدودها. وتتمتع المنظومة المتزنة بـ "**استقرار**" Stability ملحوظ إذ تفشل أى "**تقلبات**" Fluctuations بداخلها أو فى بيئتها فى زحزحتها عن وضع الاتزان. والمنظومة فى وضع الاتزان هى منظومة بدون تاريخ ولاذاكرة لها إذ إنها بمجرد بلوغها هذا الوضع تنسى تماما كافة أوضاعها وأحوالها السابقة التى أوصلتها إلى ماهى عليه [١٩، ٢٢]. أى أن مقولة "كل الطرق تؤدى إلى روما" تنطبق تماما على وضع الاتزان فكل الطرق تؤدى إليه، فهكذا تحدث القانون الثانى للديناميكا الحرارية.

إلا أن دفع المنظومة بعيدا عن وضع الاتزان يوصلها إلى وضع جديد تصبح فيه حالتها "**على الشعرة**" فقد يدفعها "**تقلب**" هين إلى إظهار سلوك عشوائى لاضابط له، أو على العكس تماما قد يدفعها إلى إظهار سلوك متناسق يعكس قدرا أعلى من الانتظام. لذا يطلق العلماء على هذا الوضع الذى يتميز بالـ "**لا استقرار**" Instability وبكثرة "**التقلبات**" اسم "**حد الكيوس (الفوضى)**" Edge of Chaos. وتنفتح أمام المنظومة، وهى على هذه الحالة، مسارات جديدة تأخذها لأوضاع جديدة أكثر استقرارا وانتظاما من أوضاعها السابقة. وتعرف النقطة التى يتعين على المنظومة عندها اختيار المسار الذى ستتبعه والوضع الجديد الذى ستتبناه اسم نقطة "**التشعب**" Bifurcation. وعلى الرغم من أن حلول المعادلات الرياضية، التى تصف الأحوال المتغيرة للمنظومة، تمكنا من تحديد نقاط التشعب إلا أنها تعجز عن التنبؤ بالمسار الذى سوف تتبعه المنظومة.

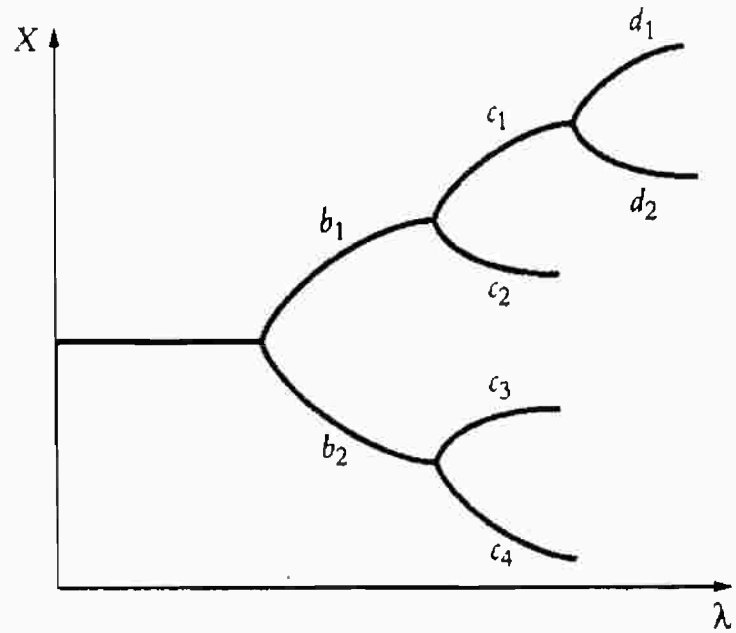
ويوضح الشكل (٣-١٠) مخططا مبسطا لرحلة المنظومة من وضع الاتزان إلى منطقة "حد الكيوس". ويمثل المحور الرأسى وصفا لحالة المنظومة (**X**) بينما يمثل المحور الأفقى المتغير الذى تحدد قيمه مدى بعد المنظومة عن وضع الاتزان (λ). وتتوقف طبيعة هذا المتغير على طبيعة مكونات المنظومة قيد الدراسة فهو قد يكون درجة الحرارة أو درجة تركيز مادة التفاعل أو معدل النمو السكانى. ويحدث التشعب فى حالة المنظومة عندما تبلغ قيمة المتغير قيمتها الحرجة (λ_c)، أى عندما $\lambda=\lambda_c$. ومابين وضع الاتزان ونقطة التشعب (λ_c) تكون حالة المنظومة "مستقرة" لاتتأثر بأى تقلبات تحدث بداخلها أو فى البيئة الموجودة فيها. وما أن تبلغ λ قيمتها الحرجة حتى تدخل المنظومة إلى منطقة "حد الكيوس" وتتحول حالة الاستقرار هذه إلى حالة غير مستقرة. وينفتح أمام المنظومة وهى فى حالة اللاستقرار هذه مساران يؤدى أى منهما إلى حالة مستقرة جديدة إما b_1 أو b_2.



الشكل (٣-١٠): رحلة المنظومة من وضع الاتزان إلى منطقة "حد الكيوس" [٢٢]

والتشعب هذا هو مصدر "**كسر التماثل**" Symmetry Breaking في حالة المنظومة. فقبل وقوعه تتمتع المنظومة بتجانس داخلى إذ ينعدم التمايز بين أجزائها. أما بعد وقوعه ينكسر هذا التماثل إما فضائيا أو زمانيا. و"**كسر التماثل الفضائى**" يعنى ظهور إعادة ترتيب مكونات المنظومة لتأخذ هيئة جديدة تتوقف على موضعها فى المنظومة. أما "**كسر التماثل الزمنى**" فيعنى ظهور سلوك متناسق ومتكرر تبديه المظومة عبر فترات زمنية متساوية.

ويؤدى دفع المنظومة قدما عبر المسار الجديد الذى اختارته بنفسها إلى نشوء نقاط تشعب جديدة تقوده إلى المزيد من المسارات والأوضاع المستقرة كما هو موضح فى الشكل (٣-١١). والأمر المثير هنا ظهور مفهوم التاريخ فى حياة المنظومة. فالمنظومة فى وضع الاستقرار الذى يمثله المسار d_2 لابد أن تتذكر "**تاريخ أحوالها**" التى أوصلتها إلى حالتها الراهنة، وهو الذى يتمثل فى المسارين b_1, c_1.



الشكل (٣-١١): التشعبات المتتالية [٢٢]

المنظومات ذاتية التنظيم: نظرة بانورامية

تتمتع منظومات الانتظام الذاتى بالعديد من الخصائص التى من أبرزها:

١. "الاستقلالية" Autonomy

لايخضع سلوك هذه المنظومات لأى تأثيرات أو توجيهات خارجية، فكل مايحدث بداخلها نابع فقط من الظروف المحلية لمكوناتها. أوبعبارة أخرى إنه "**الانغلاق التنظيمى**" Organizational Closure [٢٣]، أى غيبة أى كيان خارجى حاكم لسلوكها.

٢. الانفتاح

على الرغم من انغلاق المنظومات ذاتية التنظيم "تنظيميا" إلا أنها منفتحة على بيئتها تتبادل معها المادة والطاقة فيما يعرف بالـ "**الانفتاح البنيوى أو العملياتى**" Structural/Operational Openess [٢٣]. وانفتاحها هذا هو سر تجددها وقدرتها على استخلاص النظام من الفوضى؛ فهى تمتص الطاقة من بيئتها بشراهة لـ "تبددها" فى تخليق الانتظام بداخلها وتلفظ مايزيد عن حاجتها

إلى بيئتها على هيئة فوضى. أى أنها تزيد من انتظامها الداخلى على حساب بيئتها [١٩].

٣. اللامركزية

لاتعرف هذه المنظومات "الهياكل الإدارية" أو الهرميات التنظيمية" التى يقتصر فيها صنع القرار على أهل القمة، أو السلطة المركزية الحاكمة، فكل مكون من مكوناتها قادر على اتخاذ القرارات الملائمة لظروفه المحلية وقادر على تنفيذها. أى أنها فى سلوكها الكلى تتبع قاعدة "**تموضع القرار والفعل**"، فلا توجد سلطة مركزية حاكمة تقرر لمكوناتها مايجب عليه فعله. ويؤدى "**توزع**" القرار والفعل هذا إلى تمتع المنظومات ذاتية التنظيم بخاصية "**الرجوعية**" Resilience، أى قدرة المنظومة على استعادة حيويتها ونشاطها واستئناف سلوكها المعتاد حتى وإن دمر أى جزء منها هذا بالإضافة إلى قدرتها على صيانة نفسها Self-maintenance.

٤. الصيرورة

أحد الشروط الضرورية واللازمة لعلمية الانتظام الذاتى هو وجود المنظومة فى وضع بعيد عن وضع الاتزان الثرموديناميكى الذى تبلغ عنده درجة "**لاانتظام**" Randomness بداخلها أعلى قيمها. ووضع الاتزان هذا هو الوضع الذى تكف فيه المنظومة عن التغير والتبدل وتتميز حالتها بالثبات والجمود. وتتميز حالة المنظومات البعيدة عن وضع الاتزان بالتغير والتبدل المستمرين وبمرورها بأوضاع غير مستقرة Instable وبحساسيتها الفائقة لأى تقلبات Fluctuations قد تحدث فى قيم متغيرات حالتها. وتبلغ المنظومة، وهى على هذه الحالة، أوضاع اتزان جديدة تختلف عن وضع الاتزان الثرموديناميكى التقليدى بكونها أكثر انتظاما (أنظر الشكلين ٣-١٠، ١١). وتعرف هذه الأوضاع بالـ "**جواذب**" Attractors.

٥. الصفات المستجدة Emergent Properties

تتمتع المنظومات ذاتية التنظيم ككل واحد بصفات لاتتمتع بها مكوناتها المنفردة.