الفصل الثاني

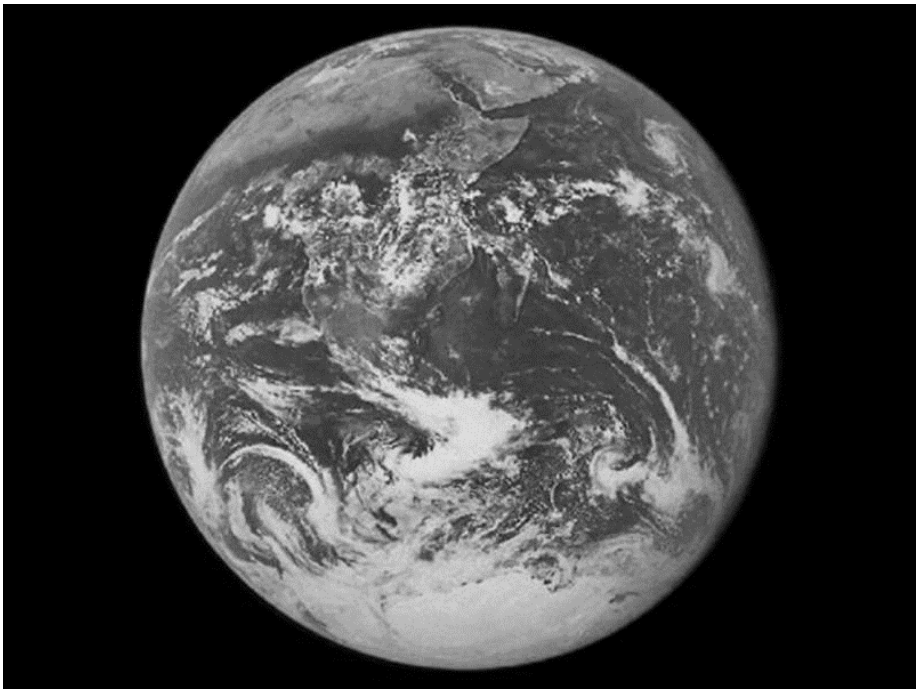
السائل الحيوي

نعرض في هذا الفصل؛ لأدلة أنَّ الماء يبدي بمختلف صفاته تناسبًا مع نمط الحياة المعتمد على الكربون الموجود على الأرض. فكل خصيصة من خصائص الماء الكيميائية والفيزيائية تَظْهرُ ملائِمةً بطريقة مثلى ليس فقط للحياة المجهرية، بل أيضًا للكائنات الحية الكبيرة ذات الدم الحار كالثدييات، بالإضافة لدوره في إيجاد واستمرار البيئة المستقرة كيميائيًا وفيزيائيًا على سطح الأرض؛ وسندرس في هذا الفصل أيضًا خصائص الماء الحرارية، والتوتر السطحي، وقدرته على حل عدد واسع من المواد المختلفة، ولزوجته المنخفضة التي تسمح بدخول وخروج الجزئيات الصغيرة من وإلى الخلايا بالانتشار البسيط، والتي تتيح عمل جهاز الدوران.

لو لم تكن خواص الماء تقريبًا بهذه الدقة؛ لكان وجود الحياة المعتمدة على الكربون مستحيلًا، بل إن لزوجة الثلج أيضًا ملائمة لدعم الحياة، فلو كانت لزوجته أكبر فلربما احتُبس ماء الأرض كله في صفائح ثلجية كبيرة غير متحركة في القطبين، ولو أنَّ خواص الماء الحرارية اختلفت قليلًا؛ لتعذر الحفاظ على حرارة أجسام الكائنات ذوات الدم الحار.

لا يوجد أي سائل آخر في الوجود له صفات قريبة من صفات الماء، تجعله صالحًا كوسط مثالي لحياة معتمدة على الكربون. وحقيقة الأمر أنَّ خصائص الماء بمفردها تقدم دليلًا، ربما يعادل ما قدَّمه علماء الفيزياء والكونيات لدعم الفرضية القائلة بأنَّ قوانين الطبيعة قد أُحكمت بشكلٍ خاص يناسب الحياة المعتمدة على الكربون.

منظر للأرض من الفضاء



"أليست كل مادة النباتات هي مجرد ماء مع بعض التعديلات؟ أليست بالتالي كل الحيوانات كذلك أيضًا، فهي التي تتغذى كلها إما بأكل النباتات أو بافتراس غيرها –ممن يأكل النبات–؟ أليست الشمس تبخِّر كمية هائلة من الماء فتملأ الأبخرة والغيوم الجو لتسقي النباتات ببلسم الندى... قد لا تُصدق لأول وهلة أنَّ الدم كله يدور حقًا في أجسامنا في برهة قصيرة لا تعدو دقائق، لكني أعتقد أن ما يثير الدهشة أكثر أن نعلم الفترات السريعة والقصيرة لدورة الماء الكبرى، فهو الدم الحيوي لكوكب الأرض الذي يكوّن ويغذي كل الأشياء".

ريتشارد بنتلي (مجابهة الإلحاد بمنشأ وإطار العالم) ١٦٩٢م.

Richard Bently, "A confrontation of Atheism from the Origin and Frame of the World" 1692

رغم شدة ألفتنا بالماء، لكن دهشتنا من طبيعته المذهلة لا تتوقف، فالماء بطوره السائل يتجمع على سطح الأرض في مسطحات تتراوح في حجمها من المحيطات العظيمة إلى البحيرات الصغيرة إلى البرك البالغة في الصغر. أما حركته، فقد ينهمر بغزارة هابطًا في شلال ضخم، أو يسير هادئًا مشية الراشدين في نهر يتعرج عبر أحد السهول، وتدفع الريح الماء على سطح التجمعات الواسعة منه، فتثير الأمواج الكبيرة والصغيرة، وتشكل قطيرات الماء نسيج الغيوم، وتتساقط القطرات الأكبر بقليل من الغيوم مطرًا على الأرض. أما في طوره الصلب فيسقط ثلجًا، يغطي الأرض بالبياض، ويشكل صفائح الجليد العملاقة في المناطق القطبية، ويشكل أنهار الجليد في وديان الجبال كما يصنع النماذج المتجلدة خلف زجاج نوافذ الشتاء. أما في خطوط العرض البعيدة عن الاستواء، فيشكل الماء المشهد الكلي، حيث نرى الغطاءين الثلجيين على حافتي القارتين القطبيتين، وتطوف جبال الجليد في بحر كئيب مائج وبارد كالثلج، وتحمل الريح الرذاذ من أعالي الأمواج، فيتجمد لتوه بحرارة دون الصفر ويتحول إلى حبيبات ثلج، تنتشر كالشظايا على رفوف الثلج القريبة. أما أصوات الماء فليست أقل تنوعًا، فهنالك إيقاع الأمواج المتلاطمة، وهدير الشلال الذي يصم الآذان، وخرير الجداول في الجبال، وقرع مطر الصيف الناعم، وجلجلة اصطدام حبات البرد بسطح معدني، وأصوات السحق تحت أقدام نهر جليدي، وهزيم الرعد المرافق لانهيار ثلجي.

ورغم تفرد الماء بهذه المظاهر المتنوعة الفريدة حقًا، لكننا سنرى أنها لا تقارب في روعتها وغرابتها الطرق المتعددة التي يتكيف بها الماء لدرجة مثالية وفريدة، أثناء قيامه بدوره البيولوجي كوسط أو قالب للحياة فوق هذه الأرض.

لطالما كان للماء أهمية خاصة، فقد ثبت لدى البشر ضرورته لقيام الحياة منذ أقدم العصور، وقد استثمرت كثير من الحضارات هذا الأمر، وجعلت للماء خصائص سحرية تهب الحياة. ومن المناسب هنا أن نذكر أن طالس Thalus –أول فلاسفة الأغريق– قد ارتأى أن يبني علمه على فرضية أن الماء مصدر كل شيء، ووصفه بنتلي بأنه "شريان حياة الأرض".[١]

يوفر الماء الوسط السائل، الذي تجري ضمنه كل الأنشطة الكيماوية والفيزيائية الحيوية، التي يعتمد وجود الحياة عليها، وبغيره يستحيل وجود الحياة التي نراها على الأرض. ولو شبّهنا الأنشطة الحيوية للخلايا بحركات أحجار الشطرنج، فإن الماء يمثِّلُ الرقعة، وطالما أن من المستحيل لعب الشطرنج بغير رقعة، فمن غير الممكن أن توجد الحياة بغير ماء، فالماء يشكل معظم كتلة أغلب الكائنات، حيث تتركب غالبيتها من نسبة أكبر من ٥٠% من الماء، أما الإنسان فيشكل الماء أكثر من ٧٠% من وزنه.

ضرورة وجود السائل

لم يكن تأسيس الحياة في الوسط السائل مجرد صدفة، إذ من الصعب تصور وجود أي نوع من النظام الكيميائي المعقد القادر على تركيب ونسخ ذاته، والتعامل مع الذرات والجزيئات المكونة له، وتحصيل المغذيات والمكونات الحيوية من بيئته –أي يكون نظامًا يبدي الخصائص التي نصف بها الحياة– إلا في وسط سائل.

وكما أشار أ. إ. نيدهام في كتابه (فرادة المواد البيولوجية The Uniqueness of Biological Materials) بوجوب استبعاد الطورين الأخرين من المادة: الطور الصلب، والطور الغازي، لأسباب وجيهة جدًا. ففي حالة الطور

الصلب، سواءً البلوري منه –ثُبتت ذراته في مصفوفة كريستالية منتظمة– أم الزجاجي –الذي حشرت الذرات فيه بشكل غير منتظم–، تتصل الذرات بجاراتها بمتانة، مما يقلل من المساحة المتاحة لحدوث العمليات الحركية الجزيئية الضرورية لحدوث الحياة. بالمقابل نجد أن الغازات تتألف من ذرات حرة الحركة، وهي لا تصلح كمرشَّح لتكوين الوسط الكيميائي للحياة لشدة تطايرها وعدم استقرارها.[٢] نعلم جميعًا أن الغيوم هي كتل سديمية من قطيرات صغيرة سائلة، أو بمصطلح علمي أدق، هي مبعثرات غرويدية من نمط سائل في غاز، وهي استثناءٌ عزيز من القاعدة القائلة بأن النظم المبعثرة في الغاز شيء نادر. على كل الأحوال فإن سرعة تلاشي نماذج الغيوم بيانيًّا يوضح عدم ملاءمة الغاز ليكون وسطًا يدعم أنظمة مبعثرة فيه ومستقرة.

ولو أن قوانين الفيزياء حَصَرت المادة في طورين (صلب وغازي)، وألغت الطور السائل، فمن المؤكد تقريبًا غياب الحياة، وهي التي عرفناها سابقًا بأنها: نظام كيماوي معقد، قادر على تركيب ونسخ ذاته، والتعامل مع أجزائه، وجلب المغذيات والمكونات الحيوية من بيئته. من الملاحظات المثيرة ما كتبه جون فون نيومان John Von Neumann –أحد مؤسسي عصر الحاسوب– في كتابه (نظرية الإنسان الآلي ذاتي التكاثر Theory of Self Reproducing Automata)، حيث تصور آلة ميكانيكية ذاتية التضاعف طافيةً على سطح بحيرة لا نهائية مغطاة بكل المكونات الأساسية المطلوبة لعملية إعادة نسخ الذات، أي أن هذه الآلة الخيالية (عاشت) في وسط سائل.[٣]

ولأن نتيجة المناقشة حول مثالية ملاءمة الماء لدوره البيولوجي تظهر بشكل تراكمي، وتحتاج لتأمل متأن نسبيًّا لكل تكيفي منفرد للماء، فمن المهم ألا نختصر

الحديث عن أي تكيف ولو كان معروفًا للجميع، هكذا نعرض الأدلة شاملة قدر المستطاع وببعض التفصيل.

خصائص الماء الحرارية الفريدة

من المثير للفضول أنه وحتى فترة متأخرة من نهايات القرن الثامن عشر، بعد أن اكتشف أنطوان لافوازيه التركيب الكيماوي للماء وأثبت أنه مركب من ذرتي هيدروجين مرتبطتين بذرة أوكسجين واحدة، لم نكن ندرك آنذاك الخصائص الكيماوية والفيزيائية النوعية للماء بشكلٍ يكفي للنظر في مسألة تكيف الماء نوعيًّا مع الحياة. وتظهر ضحالة معرفتنا عن خصائص الماء في فترة ١٨٠٠ من هذه الفقرة من كتاب بيلي (الأدلة evidences)، حيث أقرَّ بالتالي: "أما بخصوص العناصر... تلك الأشياء المنتظمة، والتي نعترف بجهلنا بما يخص انتظامها"، ويتابع فكرته بنقل اقتباس من كاتب سابق له لاحظ ما يلي: "نعلم أن الماء يغلي ويتجمد ويتبخر، لكننا نجهل ماهية ذلك الماء". وكما يذكر بيلي، حتى بعد اكتشاف لافوازيه: "رغم ما بدا أنه اكتشاف لأجزاء الماء بشكل ما، فإني أعتقد أننا لن نستطيع الاستفادة من الماء مؤخرًا بعد هذا الاكتشاف بأكثر مما نستفيد منه قبله".[٤]

جاءت أول ملاحظة مهمة عن ملاءمة الماء من قِبَل ويليام ويويل William Whewell –عميد كلية ترينيتي بكمبردج– بعد ثلاثين عامًا من نشر كتاب الأدلة لبيلي، حيث تطرق للموضوع في أطروحات Bridgewater بعنوان (الفلك والفيزياء العامة مقارنةً باللاهوت الطبيعي) والمنشور في عام ١٨٣٢[٥]، حيث ساعدت الزيادة السريعة في المعرفة العلمية خلال الأعوام الثلاثين على طرح ويويل لأول نظرة منهجية عن ملاءمة الماء للحياة.

ورغم أن عرضه لخصائص الماء غير واضح، ولم يكن كافيًا مقارنةً بالمنظور المعاصر، واقتصارِ بحثه على الخصائص الحرارية للماء وتناسبه الظاهر مع جودة المناخ، إلا أنه يمثل أول نظرة منهجية عن ملاءمة الماء للحياة، وكان تقدمًا كبيرًا عن كتاب (الأدلة) لبيلي؛ حيث يقول في بداية ذكره لخصائص الماء الحرارية: "يتمدد الماء بالحرارة ويتقلص بالبرودة، لكن إن استمر هذا التقلص حتى الوصول إلى درجة التجمد، فإن الأقسام السفلية من الماء ستتجمد أولًا، وبمجرد أن تتجمد لأول مرة سيكون من الصعب جدًا على أي حرارة تطبق على السطح أن تذيبها، وهذه هي الحالة نفسها حين يكون هناك وعاء يحوي ثلجًا في أسفله والماء في أعلاه، وقد جعل رامفورد Rumford السائل العلوي يغلي، وبقيت الكتلة متجمدة في الأسفل".

ولو عمل قانون الماء الحراري بهذا الشكل، لأصبح غير مناسبٍ لبحيراتنا وبحارنا على الإطلاق؛ إذ ستحوي جميعها حينها مهادًا من الثلج يزداد في كل مرة حتى تتجمد بالكلية، ولن نجد تجمعات مائية إلا تلك البرك الصغيرة الطافية على سطح هذه المخازن الثلجية بعد أن تذيب منها شمس الصيف، ثم تعود لتتجمد بسرعة مع أول ليلة باردة. ترى كيف تمَّ تجنب هذا الأمر المعضل؟

يتمُّ تجنب تجمد التجمعات المائية بالكلية بتعديل القانون الحراري للماء عندما تقترب درجة الحرارة من هذا الحد، حيث يتقلص الماء بانخفاض درجة الحرارة حتى يقارب درجة التجمد، لكن بعدها يتمدد حتى يصل مرحلة التحول إلى ثلج، هكذا يكون الماء بدرجة حرارة ٤مْ قد تجمع في القاع وفوقه الماء الأبرد منه، ومع الاقتراب من نقطة التجمد، يرتفع الماء الأبرد إلى السطح، حيث يتحول هناك إلى جليد، وهذا مجرد جزء من القصة. من الأمور الغريبة الأخرى في قوانين تنظيم

فعل البرودة بالماء، أن عملية التجمد بذاتها مفاجئة، ويصحبها تمدد ملحوظ –بالتالي سيطفو الثلج فوق الماء–.[٦]

نتيجة لهاتين الصفتين الشاذتين للماء لا نجد الماء محبوسًا في مهادات واسعة من الجليد في قاع التجمعات المائية، وندرك اليوم أن الماء يتفرد بهاتين الصفتين الخاصتين، وقد كنا نجهل هذه الحقيقة عام ١٨٣٢ كما يقرُّ ويويل: "لا نعلم إلى أي درجة تتصل قوانين التمدد هذه مع –أو تعتمد على– خصائص أعمق وأعم لهذا السائل أو كل السوائل".[٧] من الملاحظ أننا نجد صفتين مختلفتين تعملان معًا على تكيف الماء؛ ليناسب هدف حفظ التجمعات المائية سائلة على سطح الكوكب.

أتت واحدة من أهم التبصرات المثيرة التي جاء بها ويويل في فقرة أشار فيها إلى أن بعض خصائص الماء الحرارية التي تعطيه ملاءمته المميزة –كانخفاض كثافته تحت درجة ٤مْ، وأن الثلج أقل كثافة من الماء– تَظهر كمخالفة مفتعلة لما يبدو أنه قانون طبيعي: "يَنتُج التدرج المستمر لعملية التجمد والذوبان، والتبخر والتكاثف، بوسيلةٍ معينةٍ، على حد ما يمكننا اكتشافه. وتبدو حالة تجمد الماء من أعلاه، أو طوفان الثلج، مخالفةً للقانون الطبيعي، تمامًا كما هو تغيير معدل هذه التحولات: أي أن القاعدة البسيطة التي تخص تأثيرات تغير درجة الحرارة تبدو كقانون لأول وهلة، ونعتبرها لبساطتها واضحة للغاية، سواء لهذه الحالة أم لغيرها من الحالات، لكننا نتفاجأ بتعديل هذا القانون في نقاط حرجة معينة؛ لينتج هذه التأثيرات النافعة".[٨]

يلخص ويويل استدلاله بنتيجة مفادها أن الخصائص الحرارية المختلفة للماء تشمل تمدده الشاذ دون درجة ٤مْ وتمدده عند درجة التجمد؛ ويساهم كلاهما بملاءمة الماء الرائعة للحفاظ عليه بحالته السائلة، وتظهران كصفتين مستقلتين متعاضدتين. يتابع ويويل بأننا ندرك أن هاتين الصفتين ربما تكونان مختلفتين. وفي قسم مهم من أطروحته يستنتج ويويل أنه حيثما نرى عددًا من الظواهر الطبيعية التي لها الحرية في أن تختلف عما هي عليه، ثم تظهر لنا مرتبة بعناية لمنفعة الأشياء، فإن هذا يدل على وجود التصميم. وبهذه الكلمات التي تنطلق من علم اللاهوت الطبيعي التقليدي يطرح ويويل أمامنا منطق حجته: "ربما يتفق كل الفلاسفة الطبيعيين على وجوب وجود عدد كبير من الأشياء التي لا يكون بينها أي اعتماد متبادل... قوانين مختلفة عن بعضها، بخار يتمدد بسرعات مختلفة في الجو، وماء يتمدد عند التجمد، بينما الزئبق يتقلص... يختلف انتقال الحرارة تمامًا بين المواد الصلبة والمواد السائلة، ولكل واحدة من المواد الخمسين الموجودة في العالم – في وقت تأليف هذا الكلام– خصائص كثيرة، هي بمجموعها مختلفة عن خصائص أي مادة أخرى.

فيبدو أن هناك عددًا من الأشياء التي كان بإمكانها أن تكون على غير ما هي عليه... مواد ربما توجد على أي شكلٍ، لكنها توجد بالضبط بهذا الشكل الذي نعرفه، وبالوضع الذي يجب أن تكون فيه، لتضمن منفعة الأشياء الأخرى... وعُدلت القوانين لتلائم بمجموعها الطريقة الوحيدة التي يصلح أن يستمر عليها العالم".[٩]

بعد ويويل، جاء أهم تناولٍ لمسألة الملاءمة الفريدة للماء من قبل لورنس هندرسن أستاذ الكيمياء الحيوية في جامعة هارفارد، وذلك في كتابه (ملاءمة

الطبيعة The fitness of the environment) الصادر عام ١٩١٣ [١٠]، ولعل طرحه كان الأكثر قيمة حتى الوقت الراهن. يتذكر طلاب الكيمياء الحيوية والطب هندرسن من معادلة (هندرسن–هاسلباخ)، ويجب اعتبار كتاب (ملاءمة الطبيعة) من أهم الكتب وأكثرها تأثيرًا في العلوم البيولوجية في العقود الأولى من القرن العشرين، وهو ما صرَّح به جوزيف نيدهام في كتاب (البيولوجي الشكاك Sceptical Biologist) الصادر عام ١٩٢٩، حيث وصفه نيدهام بأنه "وبلا شك، المساهمة الأهم في فلسفة البيولوجيا"[١١] في الربع الأول من القرن العشرين، وقد أكَّد هذه الرؤية مرة أخرى هارولد موروفيتز –أستاذ الفيزياء الحيوية في جامعة ييل– في كتابه (السعادة الكونية والألم المحلي cosmic Joy and Local Pain) الصادر عام ١٩٨٧.[١٢]

يختلف كتاب (ملاءمة الطبيعة) عن كتاب ويويل (الفلك والفيزياء العامة) في منحيين مهمين، المنحى الكمي ومنحى المقارنة، كما أن كتاب هندرسن يزيد على كتاب ويويل بإيراد سلسلة أطول من التكيفات. وبسبب الفهم الجزئي المتوفر لطبيعة الحياة كيميائيّا، فقد تمكن هندرسن من إثبات أن الماء لا يلائم الحفاظ على استقرار الجو الأرضي بشكلٍ أمثل فقط، بل إنه يلائم أيضًا وظيفة أخرى بكونه الوسط الأساسي للمادة الحية.

يدرس كتاب (ملاءمة الطبيعة) التلاؤم المميز بين الحياة والماء، وبين الحياة والمكونات الكيميائية الأخرى الهامة للكائنات الحية، بما فيها ثنائي أوكسيد الكربون، وحمض الكربونيك، ومركبات الكربون عمومًا. ومنذ طُبع كتاب هندرسن ١٩١٣ إلى الآن، وبالأخص في السنوات الأربعين الأخيرة، تراكمت لدينا كمية واسعة جدًا من المعارف الجديدة في الكيمياء والبيولوجيا الجزيئية، ولم تؤكد هذه

المعرفة بالكلية موقف هندرسن فقط، بل امتد تأثيرها إلى درجة لم يكن قد تخيلها عام ١٩١٣.

لم يكن هدف هندرسن مجرد تقديم برهان يثبت وجود التصميم في الوجود –رغم إمكانية استخدام استدلالاته لهذا الغرض–، لكن هدفه كان مجرد الاستدلال على مركزية الحياة في نظام الموجودات، وهو أمر لا يمكن تجاهله رغم غموضه، فأثبت أن المكونات الرئيسية للحياة، بما فيها الماء وثنائي أوكسيد الكربون والبيكربونات، تبدي جميعها ملاءمة تبادلية فريدة، ويتعذر وجودها تقريبًا في أي مجموعة أخرى من المواد الكيميائية. أي رمى ليثبت أنه: "وفقًا للصفات الأساسية، فإن البيئة –أي مختلف العمليات الكيميائية والفيزيوكيميائية التي تشكل الكائنات الحية والصفات الكيميائية والفيزيائية للغلاف المائي– هي أكثر ملاءمة ممكنة لإقامة الحياة على الأرض".

ويتابع مقرًّا: "ليست هذه فرضية مبتكرة، بل لها تاريخ طويل مسبق بشكلها الأولي، وكانت مذهبًا مألوفًا في القرن التاسع عشر، لكنها تقدم نفسها بِحُلّةٍ جديدة نتيجة لتطور علم الكيمياء الفيزيائية".[١٣]

وألمح هندرسن أثناء عرض أدلة ملاءمة الماء الفريدة للحياة إلى الخصائص الحرارية التالية:

١– الحقائق الشاذة –التي أشير لها سابقًا– عن تقلص الماء أثناء تبرده حتى قبيل التجمد بقليل، ثم تمدده حتى يتحول إلى ثلج، وتمدده عند التجمد أيضًا، وهذه صفات فريدة عمليا.

٢- عند ذوبان الثلج أو تبخر الماء تمتص البيئة الحرارة، لتتحرر عند حدوث العملية المعاكسة، وتسمى هذه الظاهرة بالحرارة الكامنة. مجددًا نرى أن الحرارة الكامنة لتجمد الماء هي الأعلى مقارنة بالسوائل المعروفة، ففي مجال الحرارة الطبيعية لا نجد لغير الأمونيا حرارة تجمد كامنة أعلى، أما الحرارة الكامنة لتبخر الماء فهي الأعلى مقارنة بجميع السوائل المعروفة في مجال درجات الحرارة الاعتيادية.[١٤]

٣- أن السعة الحرارية أو الحرارة النوعية للماء، التي تعرّف بأنها كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة الماء درجة مئوية واحدة، هي الأعلى مقارنة بمعظم السوائل الأخرى.

٤- أن الناقلية الحرارية للماء -قدرته على نقل الحرارة- أكبر بأربعة أضعاف من أي سائل شائع آخر.[١٥]

٥- للثلج والجليد ناقلية حرارية منخفضة.

لولا الصفتان المذكورتان في البند الأول، لتجمد معظم الماء الذي على الأرض بشكل دائم في مهادات واسعة من الجليد في قاع المحيطات، ولتجمدت البحيرات بكليتها من القاع إلى السطح في كل شتاء في خطوط العرض الأعلى. ودون هاتين الصفتين المذكورتين في البند الثاني سيتعرض مناخ الأرض لتغيرات أسرع في درجات الحرارة، وتختفي وتظهر البحيرات الصغيرة والأنهار باستمرار. ودون ما ذكر في البند الثالث سيزداد الفرق بين الشتاء والصيف، وتكون نماذج الجو أقل استقرارًا[١٦]، وستقل قدرة تيارات المحيط الكبيرة -كتيار الخليج الذي ينقل الأن كميات هائلة من حرارة المناطق المدارية إلى القطبين- على تعديل الفروق الحرارية بين خطوط العرض الدنيا والعليا. ودون ما ذكرناه في البند الثاني -

الحرارة الكامنة– سيعسر على الحيوانات ذوات الدم الحار التخلص من الحرارة الزائدة من أجسامها، وهذا ما صدم هندرسن بشكلٍ خاص، فهو تكيف مهم مرتبط بتأثير الحرارة الكامنة على التبريد في حالة الحيوانات ذوات الدم الحار، وكما أشار هندرسن: " تكون الحرارة في الإنسان الذي يشبه الحيوان... أهم منتج للإطراح، ويجب إزالة الفائض منها بشكل مستمر وبكميات كبيرة، ولا يمكن لهذا العمل أن يتم إلا عبر ثلاث طرق مهمة: التوصيل الحراري والإشعاع والتبخر".[١٧] لكن عند درجة حرارة الجسم، كما يتابع هندرسن: "لا يمكن فقد غير القليل من الحرارة بوسيلتي التوصيل المباشر والإشعاع، لهذا يبقى التبريد بالتبخر هو الوسيلة الوحيدة الفعالة لخفض درجة الحرارة". فيستنتج بالخلاصة "أن لهذه الخاصية أهمية ثلاثية؛ فهي تعمل أولًا بقوة على تعديل وتلطيف درجة حرارة الأرض، وتمكّن ثانيًا من التنظيم فائق الفعالية لدرجة حرارة الكائن الحي، ولمناسبتها ثالثًا لدورة الجو. وتشكل كل هذه التأثيرات حدودًا حقيقية، إذ لا يمكن لأي مادة أخرى أن تقارن بالماء بهذا الخصوص".[١٨] بالمقابل نجد أن انخفاض درجة الحرارة يؤدي للتكاثف، والذي يطلق الحرارة، مما يعاكس سرعة انخفاض الحرارة. أضف لذلك ما أشار إليه هندرسن من وجود منحى أخر لملاءمة حرارة التبخر الكامنة –أي ارتفاع نسبة التبخر بارتفاع درجة الحرارة–، وهذا يعني زيادة التأثير المبرد للتبخير، فنجد أن تأثير التبريد بالتبخير يزداد بازدياد الحاجة إلى هذه الخاصية. ودون البند الرابع ستجد الخلايا صعوبة في توزيع الحرارة بالتساوي في أرجائها، لعجزها عن استعمال تيارات الحمل الحراري.[١٩] كذلك دون البند الخامس لن تبقى الحماية العازلة التي يوفرها الثلج والجليد، وهي أساسية لبقاء العديد من أنواع الحياة في خطوط العرض العالية، وبهذا سيبرد الماء أسرع من ذي قبل، ويزيد احتمال تجمد البحيرات الصغيرة بشكلٍ كامل.

هكذا، وكما يستدل هندرسن، ثبت أن الأمر يتجاوز مجرد صفة أو اثنتين إلى معظم صفات الماء، بل إن كل خصائص الماء الحرارية متكيفة تبادليًّا للحفاظ على أكثر من مجرد التوازن الحراري للقشرة الأرضية، بل للحفاظ على أشكال الحياة الكبروية من التغيرات المفاجئة في درجة الحرارة. حتى إن الناقلية الحرارية الضعيفة للجليد تشكل صفة تكيفية لحماية الحياة من الصقيع، وحماية الماء تحت الجليد من التبريد المفرط. وتتعاظم دهشتنا لهذا التناسق البالغ والاقتصاد البديع في أسلوب تآزر مختلف خصائص الماء الحرارية التكيفية معًا، لتحقيق غايات متعددة تصون الحياة، إذ نجد على سبيل المثال أن المحافظة على التجمعات الكبرى من الماء السائل على سطح الأرض تتحقق كليًّا عبر خصائص الماء الحرارية نفسها بالاشتراك مع الخصائص الحرارية للجليد –الشكل الصلب منه–، ولهذه المنظومة من التكيفات أهمية عظيمة؛ لأن الماء السائل تتجاوز ضرورته أنواع الحياة الأرضية، وكونه مجرد وسط تجري فيه تفاعلات كيمياء الحياة، إلى ضرورته للحياة المائية التي لا يمكن أن توجد دونه، بالتالي لن تتطور الأشكال المعقدة من الحياة على الأغلب. كما أن المحافظة على وجود التجمعات الكبيرة من الماء السائل في المحيطات يحقق استقرار درجة الحرارة على مستوى العالم، ويضمن استقرار المناخ، ويعتمد على هذا الأمر وجود الأشكال الكبرى من الحياة المعقدة، والتي تستخدم نفس الخصائص الحرارية –وبشكل مذهل– لتدفع عن نفسها خطر تغير درجات الحرارة، الذي هو نتيجة حتمية لعمليات الاستقلاب في هذه الكائنات. هكذا نجد أن سلسلةً عميقة ومتشابكة من الخصائص الحرارية المتكيفة تعمل لتحقيق غايات رائعة، تجعل من الماء نعمة تهب سر الحياة للأرض وسكانها.

إن تناسق هذا التصميم واقتصاده يثبتان نفسيهما دون الحاجة لبرهان، فيظهر الماء باعتبار خصائصه الحرارية متكيفا بشكل فريد –بل ومثالي في كثير من الأحيان– مع الحياة على الأرض. ويعد الماء من جهة صفاته الحرارية المرشح الوحيد المثالي للعب دوره الحيوي.

التوتر السطحي

بالطبع ليست الخصائص الحرارية للماء، هي الصفات الفيزيائية الوحيدة التي تجعل من هذا السائل المميز متفوقًا في ملاءمته لدوره البيولوجي، فهنالك توتره السطحي المرتفع جدًا، ولهذا تأثيرات بيولوجية كثيرة[٢٠]، فالتوتر السطحي المرتفع للماء يجذب الماء صُعُدًا في التربة، ليصير في متناول جذور النباتات، ويساعد على ارتفاعه في الجذور ومنها إلى الأغصان في الأشجار الطويلة، وربما سيتعذر فيزيولوجيًّا وجود نباتات أرضية كبيرة لو كان توتر الماء السطحي مماثلًا لمعظم السوائل الأخرى. وقد عقّب مؤخرًا (أ. إ. نيدهام) على استخدام التوتر السطحي المرتفع للماء بقوله: "للماء توتر سطحي مرتفع فريد من نوعه، ولا يفوقه فيه إلا بضعة مواد كالسيلينيوم السائل الذي يوجد في درجات حرارة أعلى بكثير، لذا فإن الماء مثالي لتشكيل الأجسام الحية المنفصلة ذات الأغشية المحددة المستقرة. تكون السطوح بين الماء والهواء أقل أهمية مقارنة بتلك التي قد تكون بين الدهون والماء والتي لها قيمة أعلى. ومن التأثيرات البيولوجية المفيدة الأخرى للتوتر المرتفع أن تميل المواد التي تخفض التوتر –المواد الفعالة على السطح– إلى التراكم عند السطح، ولتأخذ اتجاها معينا هناك، وتملك معظم المركبات الكربونية ذات الأهمية البيولوجية هذه الخاصية، فتتراكم معززة تركيزها، ومشكلة الأغشية الخلوية المنظمة".[٢١]

للتوتر السطحي المرتفع جداً للماء تأثير ملحوظ؛ حيث يجذب الماء إلى داخل شقوق الصخور وصدوعها، مما يعزز عملية التجوية وغسل المواد الكيماوية عن الصخور، وعند تجمد الماء تتحطم الصخور كذلك، مما يساعد في عملية التجوية وتشكل التربة الجديدة.[٢٢] هكذا نشهد هنا حالة أخرى تبدي فيها إحدى خصائص الماء الفيزيائية تكيّفًا لدور يعمل لتمهيد البيئة الأرضية لاحتواء الحياة، وتتكيف في الوقت نفسه مع عدد من الوظائف البيولوجية النوعية.

المُحل الكيميائي الأسطوري

لم تكن لتنفعَ كلُ الخصائص الفيزيائية المتنوعة للماء التي تضمن هذه الملاءمة البيولوجية الفريدة لو لم تكن خصائصه الكيماوية على نفس القدر من الملاءمة للحياة، إذ لن يمتلك الماء أي دور بيولوجي لو لم يكن مُحِلًا ممتازًا؛ فمن المفترض أن تكون قدرة أي سائل على حل عدد كبير من المواد الكيماوية المختلفة معيارًا واجبًا لأي سائل يُوظَّف كوسط لأي نوع من أنواع الحياة (كيماويًّا) إن كانت تشبه الحياة التي نعرفها، ولو من بعيد.

ثبت أن الماء ملائم للحياة كمُحِل مثالي، بل إنه يشبه كثيرًا المحل الأسطوري الذي تخيله الكيميائيون القدماء[٢٣]، وهذه الخاصة ذات أهمية دقيقة جدًا تتعلق بدور الماء البيولوجي. وقد عقب مؤخرًا فِليكس فرانكس Felix Franksعلى فعل الماء كمُحل بقوله:

"تشمل الخصائص المميزة الأخرى فعلَ المحلِّ الشامل، الذي يتمتع به الماء السائل، مما يجعل من تنقيته الصارمة أمرًا صعبًا للغاية، إذ أن كل المواد الكيميائية المعروفة تقريبًا تنحل في الماء بدرجة ما، وقد يكون الانحلال قليلًا أحيانًا، لكنه قابل للكشف دوما".[٢٤]

للماء أهمية جيولوجية لقوته كمحل شامل أيضًا، نظرًا لأن توزع المعادن الحيوية عبر الغلاف المائي سيكون غير متوازن بالمطلق في حال كانت مقدرة الحل للماء أضعف مما هي عليه.[٢٥]

ومما يوضح قدرة الماء على حل مختلف المواد الكيميائية، وتوزيعها في مختلف أرجاء الغلاف المائي على الأرض، هي تلك الكميات الهائلة من المواد المنحلة في الأنهار التي تصب في البحار، ففي عام واحد قُدرت هذه المواد بخمسة بلايين طن، وأورد هندرسن قائمة من ثلاثة وثلاثين عنصرًا مختلفًا يمكن أن نجدها في مياه البحر، ومن الممكن وجود عدد أكبر من المواد بكميات زهيدة. وأوضح هندرسن قدرة الماء على حل المواد في الأنظمة الحيوية بذكره لأكثر من خمسين مركبًا مختلفًا، يمكن كشفها في بول الإنسان.[٢٦] وفي أيامنا هذه يمكن ذكر عدة مئات من المواد المنحلة في البول.

وكما هو متوقع من هذا المحل الشامل –أي الماء– فإنه مادة متفاعلة بشكلٍ ملفت للنظر؛ فهو يعمل كوسيط في كل التفاعلات المعروفة تقريبًا[٢٧]، ورغم شدة تفاعله، إلا أنه أقل تفاعلًا بكثير من العديد من السوائل الأخرى، فالكثير من الأحماض والقلويات المعروفة أشد من الماء تفاعلًا، وتقدر على حل المواد التي يعسر حلها فيه في ثوانٍ معدودة، لكن هذه المحلات ستتفاعل مع المواد المنحلة فيها وتكون النتيجة تلف المُحل واستهلاك المواد المنحلة.[٢٨]

لو كان الماء سائلًا شديد التفاعل كحمض الكبريت مثلًا، فلن يقدر على أداء دوره البيولوجي، كما سيعجز عن أداء هذا الدور لو كان سائلًا خاملًا بالكلية –كالأرغون السائل–، ويظهر لنا أن تفاعلية الماء الكيميائية ملائمة لدوريه البيولوجي والجيولوجي بشكل أمثل، تمامًا كبقية خواصه الأخرى.

ومن الجدير أن نلاحظ إغفال هندرسن في هذا السياق –من مناقشته لملاءمة الماء– ذكرَ عيبين: العيب الأول، هو عدم انحلال كثير من المواد الهيدروكربونية ذات السلاسل الطويلة في الماء عمليًّا، مثل الليبيدات. والثاني، ضرورة حدوث كثير من تفاعلات التصنيع في الكيمياء العضوية في بيئة خالية من الماء. نعلم حاليًا، كما سنرى مصداق ذلك في الفصول القادمة، أن العيب الظاهري الأول –عدم انحلال الهيدروكربونات– يؤدي في الحقيقة دورًا حيويًّا لتصميم النظام الخلوي، في حين أن العيب الثاني –شرط غياب الماء في بعض تفاعلات التصنيع العضوية– هي خاصة ظرفية، ونجد حلها في العضوية عبر إجراء كثير من التفاعلات التركيبية في حجرات خاصة خالية من الماء في مركز الجزيئات البروتينية.

اللزوجة والانتشار

اللزوجة إحدى الخصائص الفيزيائية للماء التي لم يناقشها هندرسن في كتابة (الملاءمة). تختلف السوائل كثيرًا في لزوجتها، فنجد أن لزوجة القطران والغليسيرول وزيت الزيتون وحمض الكبريت مقارنة بالماء هي بالترتيب ١٠ بليون مرة، ألف مرة، حوالي مائة مرة، ٢٥ مرة. ويعد الماء سائلًا منخفض اللزوجة مقارنة بالكثير من السوائل، ومع أنه يقارب الحد الأدنى من لزوجة أي مائع معروف، إلا أن بالإمكان أن نجد بعض السوائل ذات لزوجة أقل منه؛ فلزوجة الإيتر أقل من الماء بأربع مرات، ولزوجة الهيدروجين السائل أقل بمائة مرة. وعلى كل الأحوال فيمكن أن نضع قاعدة تقول بأن الغازات فقط تملك لزوجة أقل بشكل ملحوظ من الماء.[٢٩]

لو كانت لزوجة الماء أقل لكانت مناسبته للكائنات الحية أقل، ولكانت بنى الأنظمة الحية معرضةً للحركات العنيفة أكثر بتأثير قوى القص، لو كانت لزوجة الماء أقل لتساوي لزوجة الهيدروجين السائل، وقوى القص هي التي تظهر في بنية معينة عندما تطبق عليها قوة تهدف لتغيير شكلها. وقياسًا على هذا فإن بنية مكونة من القار ذي اللزوجة العالية ستميل إلى مقاومة قوى القص أكثر من البنى، التي تعتمد دبس السكر.

هكذا ستتعرض الهياكل الحساسة للتمزق بسهولة لو كانت لزوجة الماء أقل بكثير مما نعرفه بسبب تأثير قوى القص، ولن يتمكن الماء من دعم أي بنى ميكروسكوبية معقدة ودائمة، وعلى الأرجح، لن تستمر الهيكل الجزيئي الحساس في الخلية.

بمقابل ما ذُكر، لو كانت لزوجة الماء أعلى بكثير مما هي عليه في الواقع، فلن توجد أسماك أو أي كائنات شبيهة بها تصلح لنسميها سمكة. ولنتخيل الصعوبة البالغة عند محاولة السباحة أو الإبحار في الدبس مثلًا. كما ستعجز أي كائنات دقيقة أو خلايا عن الحركة أيضًا؛ فالحركة المضبوطة بدقة للجزيئات الكبروية الكبيرة ستكون مستحيلة، وبالأخص البنى كالميتوكوندريات والعضيات الصغيرة، وسيستحيل حدوث عمليات معينة –كالانقسام الخلوي–، ونتيجة لهذه اللزوجة ستقف عمليًّا كل أنشطة الخلية، أي من المستحيل وجود حياة خلوية من أي نوعٍ يشبه –ولو من بعيد– ما نعرفه عن الخلايا، كما أن زيادة اللزوجة ولو قليلًا ستجعل من المستحيل نماء الكائنات الراقية، التي تعتمد بشكل دقيق على قدرة الخلايا على الحركة والزحف من مكان لآخر خلال مرحلة تنشؤ الجنين.

للزوجة تأثير مهم جدًا على عملية الانتشار الحيوي Diffusion، والتي لها تأثير هائل في وجود حياة خلوية كنمط حياتنا، بل من الصعب تخيل وجود كيفية مغايرة للانتشار تحافظ مثله على تدفق المادة للداخل والخارج بأي نظام كيميائي متخيل يستنسخ نفسه ذاتيّا، ويعيش في وسط سائل.

إن سرعات الانتشار في الماء عالية جدًا للمسافات القصيرة؛ فالأوكسجين مثلًا ينتشر عبر خلية جسمية متوسطة خلال جزء من مائة جزء من الثانية تقريبا[٣٠]، وتُفسِّر السرعة العالية جدًا لانتشار الجزيئات الصغيرة في الماء عبر المسافات القصيرة استغناءَ البكتيريا ووحيدات الخلية –وحتى الكائنات الصغيرة جداً متعددة الخلايا– عن الجهاز الدوراني لجلب المغذيات وطرح الفضلات؛ لأنها تقوم بذلك ببساطة عبر الانتشار.

إن سرعة الانتشار لجزيء ما في سائل ما تتناسب عكسيًّا مع لزوجته، فإن ارتفعت اللزوجة قلت سرعة الانتشار. على سبيل المثال، لو كانت لزوجة الماء أكبر بعشر مرات، لنقصت سرعات الانتشار عشر مرات، وسيصعب بالتالي جدًا حصول المتعضيات على مغذياتها الحيوية للحفاظ على أنشطتها الاستقلابية عبر أسلوب الانتشار، وهذا عائدٌ إلى أن حجم الكرة هو مكعب قطرها، ولتحافظ الخلايا على نفس الدرجة من النشاط الاستقلابي فعليها أن تكون أصغر بألف مرة، وهذا لا يسمح بوجود غير الخلايا الميكروبية الأبسط. ولو كانت سرعات الانتشار أقل بمائة مرة، فعلى الخلايا أن تكون أصغر بمليون مرة لتحافظ على أنشطتها الاستقلابية، وهذا حجم يكافئ حجم كرة تحوي بضع جزيئات بروتينية.

كما أن اللزوجة المنخفضة للماء ملائمة للحياة من وجهة أخرى، هي أن سرعة انتشار الجزيئات المختلفة تتباين قليلًا من جزيء إلى آخر في سائل منخفض اللزوجة.[٣١] وأظهر قياس سرعات الانتشار الفعلية لأنواع من المركبات المختلفة في الماء تناسبَ سرعة الانتشار عكسيًّا مع الجذر التكعيبي للوزن الجزيئي، وهذا قانون مهم ومذهل، وربما له أهمية حساسة. كما يشرح (هربرت ستيرن Herbert Stern) و(د. ل. ناني D. L. Nanney) في كتابهما (بيولوجيا الخلايا Biology of cells) فإن هذا يعني أن سرعة الانتشار متساوية تقريبًا لمعظم الجزيئات[٣٢]، حتى في حالة جزيء كالبروتين الذي يزيد وزنه الجزيئي ألف مرة عن الغلوكوز، نجد أن سرعة انتشاره هي أقل بعشر مرات فقط. أما بالنسبة لمجال الأوزان الجزيئية للغالبية العظمى من المستقلبات الرئيسية التي تستعملها الخلية، كالسكاكر والحموض الأمينية، فإن الفوارق أقل من عشر أضعاف، وبالتالي يكون اختلاف سرعة الانتشار الناتج ضئيلًا جدًا.

وليؤدي الانتشار في الماء دوره البيولوجي، يجب أن تكون سرعة الانتشار واحدة تقريبًا لمعظم المستقلبات الرئيسية المستخدمة خلويًّا، إضافة لكونه ذا سرعة عالية جدًا خلال المسافات القصيرة، وكلاهما محقق في انتشار المستقلبات الصغيرة في الماء.

هناك خاصة مهمة لانتشار الجزيئات في أي سائل بغض النظر عن درجة لزوجته، ويشمل ذلك الماء، هي أن الانتشار سريع جدًا ضمن المسافات القصيرة، لكنه بطيء جدًا في المسافات البعيدة، ويزداد زمن الانتشار في الواقع بالتناسب مع مربع المسافة، هكذا فإن زادت المسافة ١٠ مرات سيزداد الوقت اللازم للانتشار مائة مرة. وقد قدّر الفيزيولوجي نوت شميدت نيلسن Knut Schmidt- Nielsin

أنه في حالة الأوكسجين وانتشاره في النسج، فإنه يعبر ميكرونًا واحدًا –جزء من ألف جزء من الميلي متر– في جزء من عشرة آلاف جزء من الثانية، وميليمترا واحدًا في مائة ثانية، وعشرة ميليمترات في ثلاث ساعات، ومترًا في ثلاث سنوات.[٣٣]

اللزوجة وجهاز الدوران

نتيجة لاطّراد تناقص كفاءة الانتشار كآلية نقل في المسافات الأكبر من جزء من المليمتر، سيعجز أي كائن نشيط استقلابيًّا بسماكة تتجاوز بضعة ميلي مترات من أخذ وطرح مستقلباته باستخدام هذه الآلية. ولتكون هذه الكائنات قادرة على الحياة، يجب أن تملك طريقة إضافية لإدخال وطرح المستقلبات عبرها، وعلى أرض الواقع نجد أن هذه الطريقة هي نوع من أجهزة الدوران أو التسريب[٣٤]، فنجد في الثدييات بلايين الشعيرات الدموية الدقيقة، التي تخترق أنسجة الجسم وتنقل المغذيات الضرورية –بما فيها الأوكسجين والغلوكوز– إلى مجال يكون الانتشار فيه فعالًا بالنسبة لكل الخلايا، والتي تتم فيها الأنشطة الاستقلابية. وبسبب عدم فعالية الانتشار خلال المسافات الكبيرة، لن تقدر خلايا الثدييات على العيش إلا في جوار يقدر بحوالي ٥٠ ميكرونًا من شعيرة دموية، ويوجد في العضلات النشيطة لخنزير غينيا حوالي ٣٠٠٠ شعيرة دموية مفتوحة لكل ملمتر مربع من العضلة، وهذا الرقم ضخم، حيث تحتل هذه الشعيرات حوالي ١٥% من حجم العضلة، وتعادل كميتها وجود ١٠ آلاف أنبوب دقيق متواز يمر في رأس قلم رصاص.[٣٥]

لكنّ هذا الجهاز الشعري لن يعمل إلا إذا اتصف السائل المدفوع عبر أنابيبه باللزوجة المنخفضة جدًا، وضرورة اللزوجة المنخفضة للسائل تأتي من ظاهرة أن التدفق يتناسب عكسيًّا معها، فمضاعفة اللزوجة مرتين تسبب انخفاض التدفق إلى النصف، ومما سبق نرى بسهولة أنه لو كانت لزوجة الماء أكبر بعدة مرات فقط،

فإن هذا سيفرض وجود ضغط هائل لدفع الدم عبر سرير الشعيرات الدموية، وغالبًا لن يكون أي نوع من أجهزة الدوران قادرًا على العمل. ويمكن للمرء أن يقدر حجم المشكلة بشكلٍ مباشر بمحاولة ضخ الدبس عبر أنبوب زجاجي ضيق.

توجد علاقة مدهشة أيضًا بين قطر الأنابيب وبين مقاومة تدفق السائل، وتفرض هذه العلاقة قيودًا هائلة على تصميم أي جهاز دوراني، إذ أن مقاومة التدفق تتناسب عكسًا مع الأس (القوة) الرابع لقطر الأنبوب؛ أي أن خفض قطر الأنبوب إلى النصف سيؤدي لزيادة مقاومة تدفق السائل بمقدار ستة عشر ضعفا.

ولن يكون بالإمكان خفض الحجم الذي تشغله الأوعية الدموية كثيرًا لو تمَّ خفض لزوجة الماء برتبة (أسية) واحدة. ولنحقق ذات السرعة من جريان الدم عبر وعاء شعري له نصف حجم الأوعية المعهودة في جسد الثدييات وبالضغط الدموي نفسه، سنضطر إما إلى خفض لزوجة الماء ستة عشر ضعفًا، أو لرفع الضغط الدموي ستة عشر ضعفًا. والحقيقة أننا لا نعرف أي سائل يملك مثل هذه اللزوجة المنخفضة في درجة حرارة الجسم، كما أن هذا التعديل –جعل الأوعية الشعرية أقل حجمًا بمقدار النصف– سيرافقه مشكلات عصية على الحل في الهندسة البيولوجية لإعادة تصميم جهاز المضخة العضلي (القلب)، ليتمكن من توليد ضغط تسريب أعلى بست عشرة مرة. فأصغر الأوعية الشعرية يصل قطرها إلى (٣–٥) ميكرون، وباعتبار لزوجة الماء، والقوانين التي تحكم تدفق السوائل عبر الأنابيب الشعرية، وقيود تصميم أجهزة الضخ العضلية، فإن هذا الرقم (٣–٥) ميكرون يعتبر ثابتةً فيزيائية، ولا توجد وسيلة يمكن خفضه عبرها.

من حسن الحظ أن الأوعية الشعرية قادرة على العمل في هذا الحجم الضئيل؛ لأن الانتشار في السائل لا يكون فعالًا إلا عبر المسافات الصغيرة جدًا،

ولا يمكن للكائنات العليا أن تكون إلا بوجود عدد هائل من الأوعية الشعرية تمر عبر أنسجتها. لو افترضنا أن لزوجة الماء كانت أعلى بقليل، وكان أصغر وعاء شعري بقطر ١٠ ميكرون بدل ٣، فإن الواجب هنا أن تحتل الأوعية الشعرية عمليًّا كل النسيج العضلي، حتى يكون التزويد بالأوكسجين والغلوكوز فعالًا، ومن هذا يتضح أن تصميم أشكال حياة كبروية سيكون مستحيلًا في هذه الظروف، أو مقيدًا بشدة.

يتحمل القطر الصغير للوعاء الشعري مسؤولية أخرى تخص وظيفته الرئيسية كحامل للمغذيات إلى النسج، وهي تعود إلى أن توتر جدار الأنبوب يساوي جداء الضغط مع قطر الأنبوب[٣٦]، أي أنه في ضغط ما سيزداد توتر الجدار مع زيادة قطر الأنبوب، وقد أشار شميدت نيلسن إلى ضرورة أن تكون الشرايين الكبيرة أثخن من الشرايين الصغيرة، في حين يكفي للأوعية الشعرية –بسبب قطرها الصغير– جدارٌ مكونٌ من طبقة مفردة من الخلايا. هكذا نجد أن صغر الوعاء الشعري يستتبع شيئًا مهمًا، وهو أن تكون جدرانه رقيقة بما يكفي للسماح بالتبادل السريع وانتشار المواد بين الدم والأنسجة.[٣٧]

نرى أن لزوجة الماء يجب أن تكون قريبة جدًا من اللزوجة التي نعرفها ليكون الماء وسطًا مناسبًا للحياة، فهي عالية بما يكفي لتوفير وقاء يحمي من تأثير قوى القص على البنى الخلوية الهشة، وهي في نفس الوقت منخفضة بما يكفي لتحقق نسب الانتشار السريعة لدرجة السماح بتبادل المواد بين الخلية وبيئتها. أما في حالة الكائنات العليا، فهي منخفضة بما يكفي لتسمح بالضخ إلى النسج عبر جهاز الأوعية الشعرية صغيرة الحجم بقطر (٣–٥) ميكرون، التي يكفي صغرها لتصل إلى مدى مسافة الانتشار لكل خلايا النسج في الجسم، ولا تحتل في نفس الوقت

نسبة كبيرة من حجم هذه النسج. ولو كانت اللزوجة أكبر فإن الانتشار سيكون بطيئاً بشكل معيق، حتى إن أمكن حينها وجود الأنظمة الخلوية البسيطة جدًا، فإن وجود الكائنات الكبيرة والمعقدة والنشيطة استقلابيًّا سيكون مستحيلًا. ولا توجد أي تغييرات مقبولة –كزيادة عدد الأوعية الشعرية أو قطرها، أو زيادة سرعة التدفق، أو تخفيض متوسط حجم الخلية... إلخ– يمكن هندستها لجعل حياة الثدييات ممكنة.

سوائل غير نيوتنية

هنالك منحى مهم وأخير في ظاهرة اللزوجة، يتصل بخصائص لزوجة السوائل غير المتجانسة، وله أهمية تخص وظيفة وتصميم الجهاز الدوراني، إذ تملك السوائل المتجانسة العادية لزوجة ثابتة، ويتناسب تدفقها مع الضغط المطبق. لكن كما يشير ماركوس راينر Marcus Reiner في مقال (تدفق المادة The Flow of Matter) في مجلة Scientific American بأن إجبار سائل غير متجانس "يحوي معلقًا من جزيئات كالدم" على التدفق عبر أنبوب سيجعله يتصرف بشكل غريب، فعند مضاعفة الضغط ربما تزداد سرعة التدفق ثلاث مرات، وتسمى السوائل التي تتصرف هكذا بالسوائل غير النيوتنية.[٣٨]

ليس هذا المنحى –الشاذ ظاهريًّا– للزوجة مسألة تافهة، بل هو خاصية تكيفية أساسية للدم، فعند الحاجة لزيادة التروية الدموية لنسيج ما عدة مرات، فإن كل زيادة في الضغط ستخفض اللزوجة بشكلٍ مناسب، ذلك لأن الدم سائل غير متجانس يتألف من كريات الدم الحمراء معلقةً في سائل مائي. ويسهل هذا كثيرًا من زيادة تروية العضو في حالة زيادة النشاط الاستقلابي. من هنا نرى تعذر زيادة تروية عضلات الثدييات عشرين ضعفًا أثناء الجهد إلا بامتلاك الدم خاصية السائل غير النيوتني.

مما يلفت النظر بشكل خاص في هذا التكيف هو مسألة خزن الهيموغلوبين –الجزيئات الحاملة للأوكسجين– في كريات الدم الحمراء بدل كونه حرا محلولًا في البلازما، ويعد هذا بمفرده تكيفًا لاعتبارات مستقلة عن جريان السائل أو لزوجته. تشمل هذه الاعتبارات وضع ارتباط الأوكسجين بالهيموغلوبين وانفصالهما تحت عدة ضوابط استقلابية معقدة، والتي تقي الجسم –بالاشتراك مع أمور أخرى– من تغيرات درجة الحموضة، والمساعدة في نقل ثنائي أوكسيد الكربون إلى الرئتين. ولو كانت الجزيئات الحاملة للأوكسجين حرة في المحلول لاستحال وجود الكثير من هذه التكيفات المرافقة للأكسجة العكوسة للهيموغلوبين بكل حال. وبنفس الوقت سنفقد الميزة الإيجابية للانخفاض غير النظامي في اللزوجة عند تعرض معلق جزيئات للضغط.

لزوجة الجليد

اللافت للنظر أن لزوجة الجليد –الشكل الصلب من الماء– متكيفة أيضًا للحياة على الأرض، وكما تختلف لزوجة السوائل كثيرًا، فإن لزوجة المواد الصلبة تختلف بعدة مراتب أُسّيّة. فالزفت هو أقل المواد الصلبة لزوجة –حوالي ترليون (10^{12}) ضعف لزوجة الماء السائل–، في حين أن للجليد –صلب بلوري– لزوجة أكبر بـ(10^{16}) من الماء، أما لزوجات الصخور التي تشكل القشرة الأرضية فتتراوح ما بين 10^{25} إلى 10^{28}. لذا فإن مدى لزوجات المواد الصلبة هو (10^{16}).[39] ولو فرضنا أن لزوجة الجليد كانت أقل بعدة أضعاف من هذه القيمة، فسيكون نشاط الأنهار الجليدية أقل فعالية في تفتيت الجبال وتحرير المعادن الحيوية إلى الغلاف المائي، ولو عادلت لزوجة الجليد لزوجة الزفت لكانت الأنهار الجليدية

قليلة العمق حتى عدة أقدام فقط، ولانساب بأناقة من على أطراف الجبال، غير مؤثر كثيرًا أثناء انحداره على معظم الصخور القاسية، التي تشكل القشرة الأرضية.

من حسن الطالع أن لزوجة الجليد لا تزيد عن هذا الحد من جهة أخرى، إذ لو كانت لزوجته قريبة من لزوجة الغرانيت، لكانت النتيجة حبس كل الماء الأرضي في القطبين وعلى رؤوس الجبال العالية فقط، ولغدت الأرض في مناطق خطوط العرض البعيدة مغطاة بصحائف جليدية صلبة بصلابة الغرانيت، ولكانت الأرض عقيمة عندها، ولفقدت كل ماء سائل ولم تكن الحياة لتوجد. إن حوالي ١٠% من ماء الأرض في الوقت الحالي مخزن كجليد في أغطية الجليد في القارة القطبية الجنوبية وفي (غرينلاند)، وعلى افتراض أن لزوجة الجليد كانت أكبر بـ١٠٠ مرة فقط، فسنحصل على كمية ماء سائل قليلة جدًا ومناخ متقلب بشكل سريع من الحار المحرق إلى البارد الزمهرير، وفي مثل هذا يعلو الشك إمكانية نشوء حياة أرضية غنية بتنوعها كالتي نشاهدها. تبدو القيمة الحالية للزوجة الجليد تكيفًا جديدًا، يضمن إمكانية وجود المسطحات المائية الكبيرة على وجه الأرض كما نراها الآن.

كثافة الماء

خلافًا للزوجة التي تتراوح قيمها في المواد المختلفة ضمن مجال يمتد على عدة مراتب أسية، نجد أن كثافة مواد الأرض أقل تباينًا عن بعضها، فالقطران يملك كثافة مساوية لكثافة الماء، في الوقت الذي تكون لزوجته أكبر بملايين المرات، فكثافة الماء تعادل ١ غ\سم^{٣}، أما كثافة الهواء تحت الضغط الجوي النظامي فتعادل تقريبًا جزءًا من ألف جزء من كثافة الماء، ونجد أن للقطران والغليسرول

كثافة تعادل تقريبًا تلك التي للماء، وكثافة النفط تقريبًا ٠,٦٥، وكثافة كثير من المركبات الهيدروكربونية تتراوح بين ٠,٧ و٠,٩ غ\سم^{٣}. باستثناء الليبيدات والدهون، نجد أن كثيرًا من المركبات العضوية المكونة للبنية الأساسية للخلية تقارب في كثافتها الماء، ويوجد مواد أخرى معروفة جيدًا تملك كثافة أعلى من الماء، منها المعادن الشائعة والتي تتراوح كثافاتها بين ثلاثة إلى سبعة أضعاف كثافة الماء، أما أثقل معدنين (الزئبق والذهب) فقيمة كثافتيهما (١٣,٦ و١٩) على الترتيب.[٤٠]

من الواضح أن كثافة الماء ستكون المحدد الرئيسي لوزن الكائنات الحية، نظرًا لأنه يشكل معظم كتلتها. ولننظر إلى أثر كثافة الماء على الكائنات البرية الكبيرة، التي تعيش على كوكب بحجم الأرض، فلو كانت كثافة الماء أكبر عدة مرات فسيكون الحجم الذي يمكن أن تصل إليه تلك الحيوانات جزءًا مما هي عليه الآن فقط، أما بالنسبة لوجود كائن بشري منتصب مشابه للإنسان العاقل ويمشي على رجلين فلن يكون ممكنًا؛ لأن وزن الجسم قد يمنع من رفعه عن الأرض والمحافظة عليه منتصبًا، ولن يتمكن من تحريك الأطراف إلا إذا زادت نسبة العضلات فيها زيادة كبيرة، لكن ليس بالإمكان فعل ذلك لأسباب سنناقشها في الفصل الحادي عشر، لأن القوة العضلية العظمى التي يمكن زيادتها في وحدة الحجم محدودة، فلو كانت أطرافه أثقل بأربعة أضعاف وزنها الحالي، فستحتاج لعضلات أكبر بأربعة أضعاف لتوفر المستوى نفسه من الحركة.

هناك –نظريًّا– مجموعة واحدة من التكيفات التي قد يطرأ عليها تحسن إن كانت كثافة الماء أقل –أي حين تصبح الكائنات أخف بالنسبة لوحدة الحجم منها–، وهي التكيفات المتعلقة بالطيران، لكن بالمقابل ستكون نتائج نقص كثافة

الماء عن ١ غ\سم٣ بالنسبة للحياة المائية شديدة الأثر، ففي هذا العالم الذي نتخيله –عند ثبات الأمور الأخرى مساويةً لما نعرفه– نجد أن أشكال الحياة المعتمدة على الكربون –والتي تتألف من نسبة ٣٠% من مواد غير مائية، مركبات كربونية عضوية بشكل رئيسي– ستميل للغرق كبالونات من الرصاص إلى قاع المحيطات، بالمقابل، لو افترضنا أن الماء كان أثقل قليلًا فقط، فسنجد أن الحياة المائية المعتمدة على الكربون محصورة في أشكالها الطافية على السطح فقط. ونشك في مثل هذه الحالة ببقاء الكثير من الأشكال الحية، وبالأخص الكائنات الدقيقة، نظرًا لكثافة الإشعاع فوق البنفسجي الذي ستتعرض له إن اضطرت للتقيد الدائم بسماكة عدة ملمترات من سطح ماء البحر.

الاكتشافات الحديثة

اكتُشف خلال العقود القليلة الماضية المزيد من خصائص الماء، التي تؤكد مجددًا ملاءمته المدهشة للحياة. ويعبر موروفتز عن ذلك بقوله:

"شهدنا في السنوات القليلة الماضية تطورًا في دراسة خاصية فهمناها حديثًا للماء، هي (الناقلية البروتونية proton conductance)، والظاهر أن هذه خاصة يتفرد بها الماء تقريبًا، وهي عنصر رئيسي في نقل الطاقة البيولوجية، لا يوجد أدنى شك في أهميتها منذ نشأة الحياة، وكلما ازدادت معرفتنا بها، ازداد إعجاب أناس منا بملاءمة الطبيعة بهذا الأسلوب عالي الدقة... وقد تركز الاهتمام بشدة على موضوع هذه الناقلية في الكيمياء الحيوية لدورها في التركيب الضوئي والفسفرة التأكسدية".[٤١]

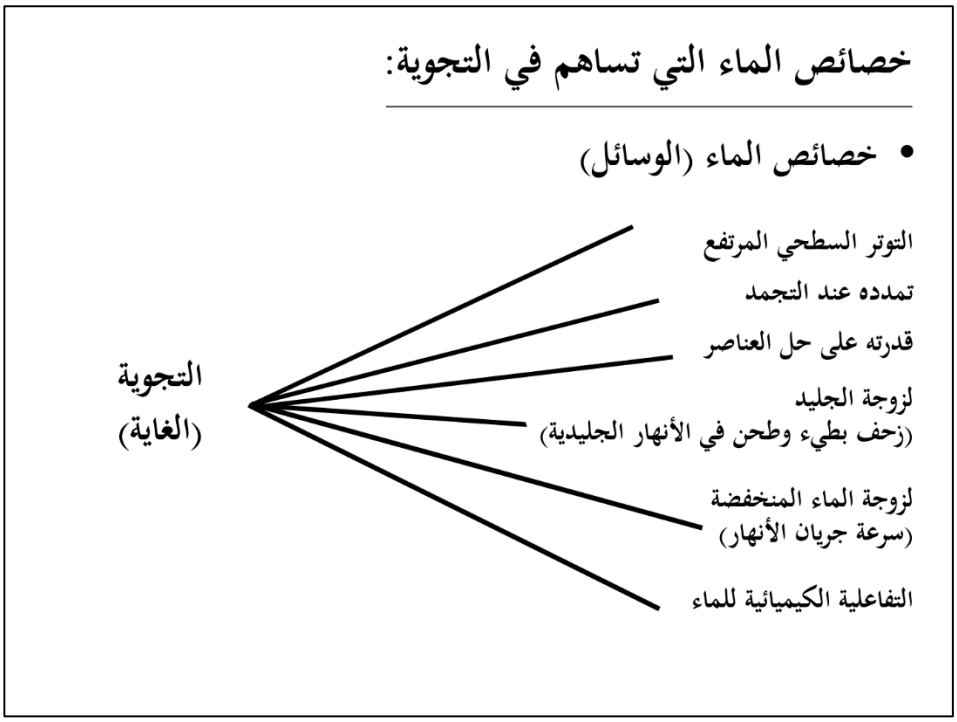
ويشرح موروفيتز بأن كلتا هاتين العمليتين المهمتين تستعملان الناقلية البروتونية والأيونات المميَّهة، وكلتيهما من الصفات الرئيسية للماء: "هكذا نرى مرة أخرى تجلي ملاءمة الماء في دقائق التفاصيل، في طريقة توافق الخصائص الجزيئية للماء مع الآليات الجزيئية للطاقة الحيوية، وهي خاصية لم يكن هندرسن ليحلم بها في وقته، وقد ثبت أنها جزء مهم من ملاءمة البيئة للحياة".[٤٢]

موافقات تتلو موافقات

ليست هذه المراجعة المختصرة لبعض خصائص الماء شاملة على الإطلاق، فهناك في الواقع عددٌ من الطرق الأخرى التي تظهر فيها ملاءمة خصائص الماء تبادليًّا مع العديد من العمليات البيولوجية، وسيكون من المناسب طرحها في سياق كلامنا عن ملاءمة مكونات أخرى للحياة في الفصول القادمة. والمثير للانتباه في الخصائص الفيزيائية المختلفة للماء والمذكورة آنفًا، هو ليس مجرد ملاءمتها بنفسها لدرجة عالية، بل الطريقة المذهلة التي نجدها في أحيان كثيرة من اجتماع تكيف عدة خصائص مستقلة لتتعاون في أداء غاية بيولوجية واحدة.

انظر مثلًا في ظاهرة تجوية الصخور، والنتيجة التي نحصل عليها من توزع المعادن المهمة حيويا، والتي تعتمد عليها الحياة، عبر الأنهار، إلى المحيطات، لتتوزع في النهاية في الغلاف المائي كله. إن التوتر السطحي المرتفع للماء هو ما يؤدي لسحبه إلى داخل الشقوق الصخرية الصغيرة، أما تمدده الكبير عند التجمد خلافًا لطبيعة السوائل فيقوم بشق الصخرة وينشئ شقوقًا دقيقة أخرى لعملية حت تالية، كما يزيد من المساحة المعرضة لتأثير الماء بالحل وتحرير العناصر. بالإضافة لكل هذا، يوفر الجليد اللزوجة والقوة المناسبتين لتشكيل الأنهار القاسية، التي

تطحن وتفتت الصخور إلى أحجام أصغر في دورات متعاقبة من التجمد والذوبان؛ لتصير كالطمي الجليدي. تساهم لزوجة الماء المنخفضة في توفير جريان سريع للأنهار والجداول من الجبال، فتحمل بسرعة عالية الأجزاء الصغيرة جدًا من الصخور والطمي الجليدي، وتساهم بتعميق عملية التجوية وتحطيم الجبال، أما تفاعلية الماء الكيميائية وقدرته العالية على حل العناصر، فتساهم أيضًا بعملية التجوية وتحمل المعادن والعناصر من الصخور وتوزعها بالنهاية عبر كامل الكتلة المائية الأرضية.

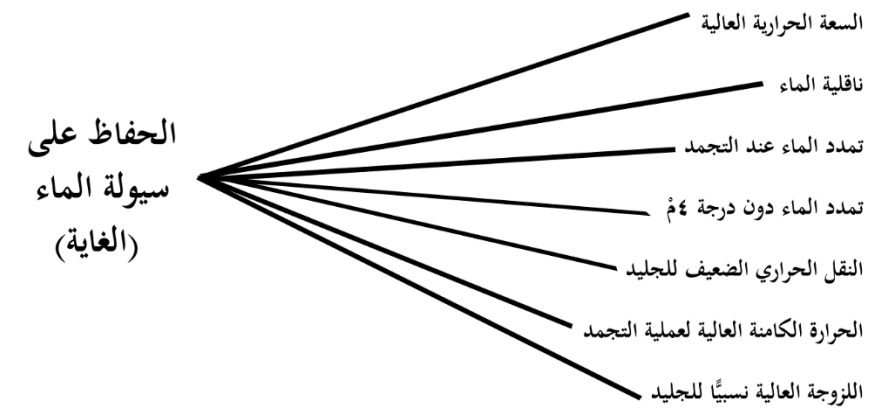


لنتأمل كيفية تعاون مختلف خصائص الماء الحرارية لغاية المحافظة على التجمعات المائية الكبيرة على سطح الأرض:

أولًا، تؤخر السعة الحرارية العالية للماء من سرعة تبرده، وعندما يتجاوز درجة ٤مْ في الانخفاض، يرتفع الماء الأبرد إلى السطح مشكلًا غطاءً عازلًا هناك يؤخر من فقد الحرارة. بعد ذلك، وبتجمد الطبقة السطحية، تتحرر كمية معتبرة من الحرارة بسبب القيمة المرتفعة للحرارة الكامنة لعملية التجمد، مؤخرةً بذلك انخفاض حرارة الماء. وبعد تشكل الجليد، يبقى على السطح بسبب قلة كثافته مقارنة بالماء السائل، فيمنع متابعة تبريد الماء تحته بسبب ناقليته الضعيفة للحرارة، وكل تجمد تالٍ لتشكل هذه الطبقة سيتم من أسفلها في سطح التلاقي بين الماء والجليد، هكذا تتحرر الحرارة الكامنة وتحتبس تحت الجليد نظرًا لناقليته الضعيفة، بالتالي يتم تدفئة الماء أسفله وتأخير عملية التبريد، بحيث نجد في المحصلة – بغض النظر عن برودة الهواء فوق الجليد– أن سمك طبقة الجليد لن يزيد عن بضعة أمتار فحسب. لو فرضنا في بعض الحالات تشكل كميات كبيرة من الجليد، فستنتقل هذه الكميات بسبب لزوجة الجليد المنخفضة نسبيّا إلى أسفل الوادي أو خارجه باتجاه درجات الحرارة الأعلى، أو باتجاه البحر حيث تذوب وتتحول لماء سائل من جديد.

خصائص الماء التي تميل مجتمعة للحفاظ على حالته السائلة:

- **خصائص الماء (الوسائل)**



التبريد

كمثال أخير، دعونا ننظر في الأسلوب الذي تتآزر به كل من (السعة الحرارية العالية، والحرارة الكامنة العالية للتبخر، والناقلية الحرارية، واللزوجة المنخفضة) لتخدم غاية محددة، هي تنظيم حرارة كائن كبير الحجم كالإنسان.

نستهلك الطاقة في كل الأنشطة، بما في ذلك عمل الآلات، وهذا سيؤدي بالضرورة لإنتاج الحرارة، وإن إنسانًا يركض مسافة ١٠ أميال خلال ساعة سوف ينتج كمية كبيرة من الحرارة، لكننا في نهاية الشوط لا نجد حرارة جسمه قد ازدادت إلا بضع درجات، وقد ألفنا هذه الحقيقة لدرجة أنه لم يخطر في بالنا أن نتساءل عن وجود شيء ما غير معتاد في هذا الأمر، لكن الواقع أنها ظاهرة مدهشة.

بحسابٍ مجمل؛ لو ركض رجل زنته ١٠٠ كغ لمسافة ١٠ أميال خلال ساعة واحدة، فسيبذل عملًا قدره حوالي ١٠٠٠ كيلو كالوري من الحرارة، ولو افترضنا جدلًا أن الجسم احتفظ بهذه الكمية من الحرارة خلال الركض، فسوف ترتفع درجة حرارته بمقدار ١٠مْ، وهذا مقدار قاتل دون شك. لو غيرنا الفرض واعتبرنا جسم الإنسان مكونًا إما من (الحديد، أو الملح، أو الرصاص، أو الكحول) بدلًا من الماء فسترتفع حرارته بمقدار (١٠٠مْ، أو ٥٠مْ، أو ٣٠٠مْ، أو ٢٠مْ) على الترتيب، وسبب ضآلة مقدار ارتفاع درجة حرارة الجسم –أي حوالي ١٠مْ فقط– يعود إلى أن السعة الحرارية للماء أكبر من السعة الحرارية لمعظم المواد الأخرى، بل هي أكبر من السعة الحرارية لكل سائل نعرفه باستثناء النشادر (الأمونيا)، وذلك في مجال درجات الحرارة الشائعة التي نلحظها على سطح الأرض.

هنالك أيضًا ميزة فريدة أخرى للماء في عملية تنظيم الحرارة، فكما رأينا مسبقًا، إن الحرارة الكامنة لعملية تبخر الماء هي الأعلى مقارنةً بأي سائل آخر ضمن مجال درجات الحرارة الطبيعي، بالتالي نجد أن الماء، بالإضافة لوقايته الجسم من ارتفاع درجة الحرارة بسبب سعته الحرارية العالية جدًا، يقوم بتأثير مبرّد عند التبخر من الجلد، مضعفًا من شدة الارتفاع في حرارته، فتبخر لتر واحد من عرق إنسان يبلغ ١٠٠ كغ يصرف ٦٠٠ كيلو كالوري من حرارة الجسم، أي يخفض من درجة حرارة الجسم بمقدار ٦مْ. ولو فرضنا وجود (الكحول أو الأمونيا) بدل الماء، فإن مقدار التبريد سيكون (٢,٢مْ، أو ٣,٦مْ) فقط على الترتيب. بل إن الأمر أبعد من هذا، فعند درجة حرارة الجسم لا يكفي الإشعاع ولا التوصيل (النقل) المباشر لتخليص الجسم من حرارته، أي أن التبريد بأكمله يقع على عاتق التبخر.

ولا تكتمل قصة التبريد عند هذا الحد، فلها تتمة. إن هاتين الخاصتين الحراريتين الفريدتين تقريبًا للماء لا تكفيان وحدهما للمحافظة على استقرار درجة الحرارة، ولابد من نقل الحرارة المتولدة في مركز الجسم إلى سطحه، وهذا لا يكون إلا بإحدى طريقتين: التوصيل الحراري Conduction أو الحمل الحراري Convection.

إن تباين الناقلية الحرارية بين المواد الشائعة كبير، فالفضة والنحاس على سبيل المثال من أكفأ النواقل، ولهما ناقلية حرارية أكبر بعشرة آلاف مرة من بعض النواقل الحرارية الرديئة مثل هلامة السيليكون –سيليكاجل– والخشب، وأكبر ببضعة آلاف من المرات من ناقلية الماء. إن السوائل نواقل حرارية غير جيدة مقارنة بالمعادن، لكننا نجد الماء هنا أيضًا يمتاز عن جميع السوائل بناقليته الأعلى بعدة مرات من أغلبية السوائل ضمن مجال درجات الحرارة العادية.[٤٣]

ورغم هذه الناقلية الحرارية العالية للماء مقارنة بمعظم السوائل الأخرى، فهي لا تكفي لنقل الحرارة من مركز الحيوان إلى محيطه بسرعة للتخلص من الحرارة الناشئة عن الاستقلاب، ولا يمكن هذا إلا إن ساعد النقلَ آليةُ الحمل الحراري. ويوجد في الواقع آلية لحمل الحرارة، وهي الجهاز الدوراني الذي ينقل حوالي ٦ لترات من الدم عبر جسم الإنسان البالغ المتوسط، وتمر هذه الكمية عبر كل عضو معتمدةً على الأوعية الشعرية في كل الأوقات حاملة معها كل حرارة تولدت من مركز الجسم إلى محيطه. لكن، وكما ذكرنا سابقًا، يعتمد الجهاز الدوراني على خاصية فيزيائية أخرى مهمة للماء، وهي لزوجته المنخفضة جدًا، وبقيمتها هذه بالضبط.

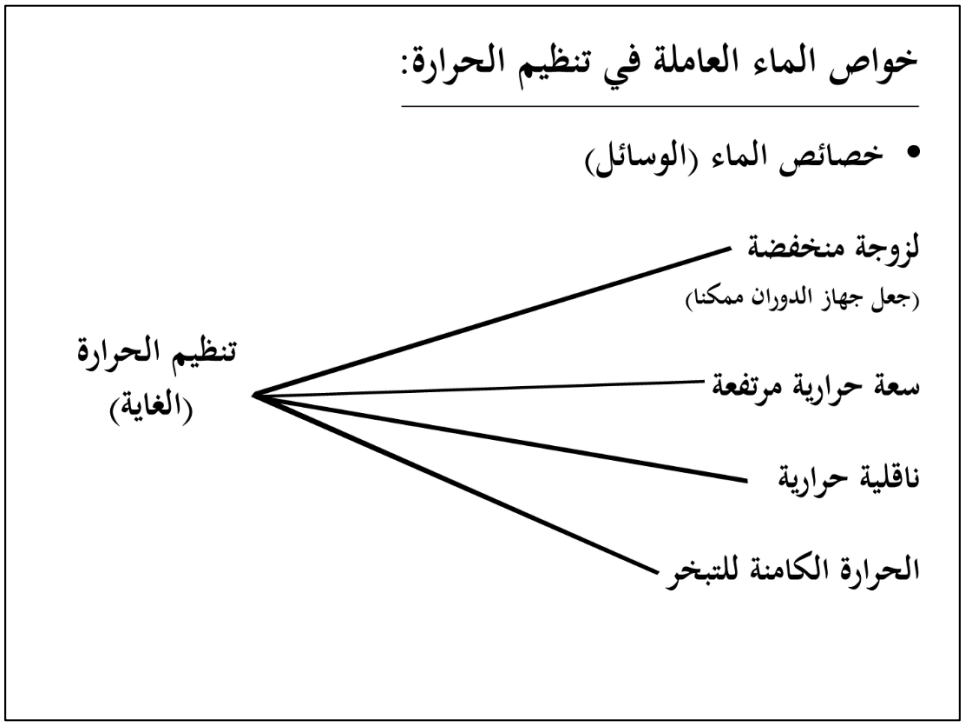
لو افترضنا أن ناقلية الماء الحرارية كانت أقل بعدة مرات لتساوي ناقلية القطن الماص أو الخشب، فستكون ناقلية جهاز الدوران بالتأكيد أخفض من القدْر اللازم لنقل الحرارة إلى سطح الجسم وتخليصه منها، وبالأخص ستظهر مشاكل غير قابلة للحل في حالات الجهد الشديد، وسنجد الجسم قد توقف كمحرك سيارة ارتفعت حرارته. من جهة أخرى، لنفترض أن ناقلية الماء الحرارية أعلى مما هي عليه في الواقع لتساوي ناقلية معدن النحاس مثلًا، في هذه الحالة الافتراضية ستعتدل درجة حرارة الكائنات الحية بسرعة شديدة مع درجة حرارة بيئتها المحيطة، وهذا سيجعل تحقيق تنظيم درجة الحرارة صعبًا للغاية، إذ ستنقل التغيرات في درجة حرارة البيئة عبر جسم الكائن بسرعة، مما سيؤدي لتأرجح مستمر في درجة الحرارة، ويستحيل مع هذا الوضع وجود حيوانات صغيرة الحجم باردة الدم، بل إن الكائنات الكبيرة ستعاني صعوبة في شرب كميات كبيرة من الماء البارد. هكذا نستنتج وجوب امتلاك الماء ناقلية حرارية قريبة من القيمة التي نعرفها له ليكون ملائمًا للحياة الكبروية.

نرى إذًا أن الارتفاع المتواضع للغاية في درجة حرارة الجسم بعد التمرين القاسي ليس بظاهرة عادية، بل ثبت أنه معتمد على ملاءمة فريدة للماء تجعله يقي من التغيرات في درجة الحرارة، وتعتمد هذه الملاءمة على أربع خصائص فيزيائية مختلفة للماء، تبدو كلها توافقات تلاؤمية تبادلية مشتركة، وتكون بمجموعها مناسبة مثالية للدور البيولوجي للماء.

لا يوجد أي سائل معروف آخر يمكنه ولو من بعيد أن يقترب من ملاءمة الماء في تنظيم درجة حرارة شكلٍ حياتيٍ بريٍ معتمد على الكربون في مجال درجات حرارة طبيعية (من ٠ إلى ٥٠مْ). أضف إلى ذلك أننا عندما نجد بعض

السوائل الأخرى كالنشادر (الأمونيا) والصوديوم السائل، التي تبدي بعض خصائص الماء والحرارة، فإن أيًا من هذه السوائل لا يملك بالضبط المجموعة نفسها من الخصائص التكيفية التبادلية. ففي درجات حرارة معينة على سبيل المثال يبدي الصوديوم السائل حرارة كامنة للتبخر أكبر من تلك التي يملكها الماء، لكن الناقلية الحرارية ستكون أكبر من ناقلية الماء بأضعاف كثيرة جدًا، أي أعلى من القدر الذي يسمح لكائن تخيلي أن يحافظ على درجة حرارته في هذا الوسط بوجود تحديات البيئة.

تشمل عملية فقد الحرارة الزائدة، في مثال رياضي المارثون الذي ذكرناه، التكيفات التالية:

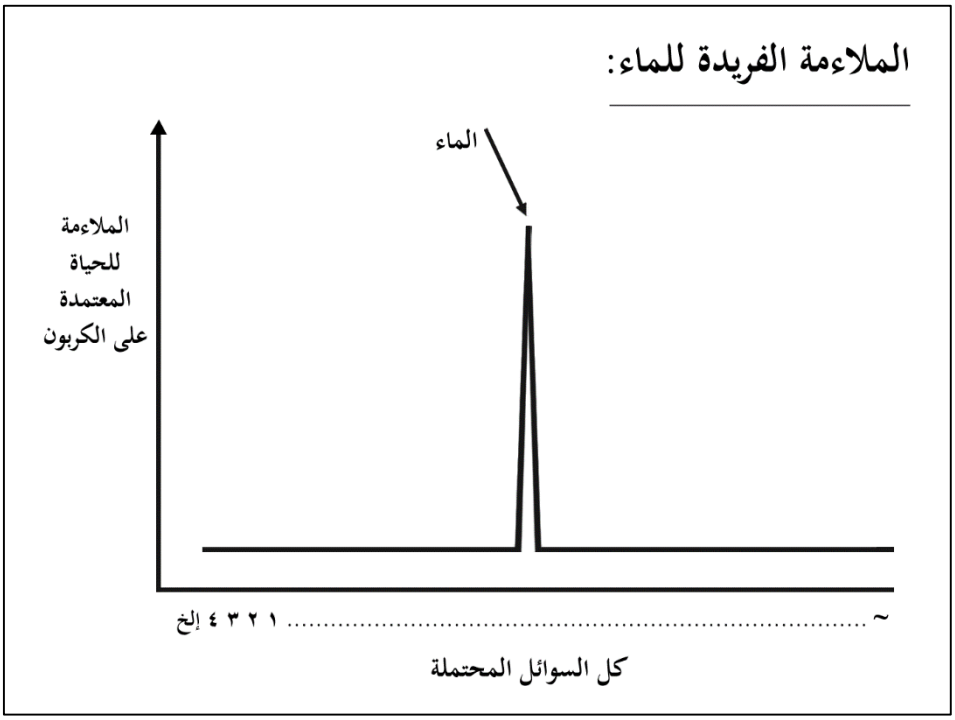


الخلاصة

يشير الدليل الذي سردناه في هذا الفصل إلى تكيف الماء الفريد والمثالي ليكون الوسط السائل للحياة على الأرض، وليس بمجرد بضعة خواص منه فقط، بل بكل خاصية مفردة من خصائصه الفيزيائية والكيميائية المعروفة.

ومن الممكن توضيح ملاءمة الماء الفريدة والمثالية بشكل خط بياني نرسم فيه محورًا للسوائل، وآخر لإمكانية الانتفاع بهذه السوائل لدعم حياة معتمدة على الكربون كما تراه في الشكل أدناه.

وكما استنتج هندرسن: "لو بقي عند أحد شك، فليبحث عن أي مادة أخرى يمكنها أن تسد مسدّ الماء ولو جزئيًّا، كوسط للكائنات الحية البسيطة، أو كوسط داخلي لكل الكائنات الحية، أو لتأدية أي من الوظائف الفيزيولوجية التي لا تحصى عدًّا من التي يقوم بها الماء".[٤٤]



لا يوجد في الواقع أي سائل آخر البتة يمكن ترشيحه لمنافسة الماء في عمله ولو من بعيد، كوسيط لحياة أساسها الكربون. ولو لم يكن الماء موجودًا لوجب اختراعه قبلها. وبغياب السلسلة الطويلة من التصادفات الحيوية في مواصفات الماء الفيزيائية والكيميائية لن يكون ممكنًا وجود حياة معتمدة على الكربون بأي شكل يمكن مقارنته ولو من بعيد بتلك الحياة الموجودة على الأرض، ولن نكون نحن –أشكال الحياة الذكية المعتمدة على الكربون– موجودين بالتأكيد لنتساءل عن خصائص السائل الحيوي هذا التي تجعل من كل شيء حي، ولو وجدت حياة مشابهة لحياتنا في أي مكان على أرض أخرى من هذا الكون، فسيكون هناك ماء حتمًا، وستوجد بحار وأنهار وغيوم ومطر، وستوجد عواصف وشلالات وجبال جليدية، وسيتكسر الموج على شواطئ ذلك العالم البعيد.

مع هذه الخصائص الكثيرة المتكيفة تباديًّا لهذا السائل الأكثر تميزًا من بين كل السوائل، نجد –صراحة– كتلة من الأدلة غير العادية من النوع الذي نتوقع وجوده لفرضية تقول: إن قوانين الطبيعة ملائمة بشكل فريد لنمطنا من الحياة المعتمدة على الكربون، كما هي على الأرض.