محاضرات الهيدرولوجية

للمرحلة الثانية/قسم الجغرافيا/ كلية التربية للعلوم الانسانية/ جامعة البصرة

وهي جزء من كتاب جغرافية الموارد المائية

تأليف

أ.د. صفاء عبد الأمير رشم الأسدي

﴿ وجعلنا من الماء كل شيء حي ﴾

المقدمة

تعد الموارد المائية من أهم الموارد الطبيعية بوصفها الدعامة الرئيسة لأنواع الحياة جميعها في الكرة الأرضية ونشوء المراكز الاستيطانية ونموها وازدهارها، كما تعتمد جميع الخطط التنموية على حجم المياه ونوعيتها. وقد ازدادت أهمية الموارد المائية في ظل التغيرات المناخية وما رافقها من ازدياد مساحة امتداد المناطق الجافة واتساع رقعة التصحر ولاسيما في الأقاليم المناخية الجافة وشبه الجافة، مما دفع المختصين في مجال المياه لتكثيف الجهود في الدراسة والبحث والتأليف لغرض تقييم الواقع الهيدرولوجي وإسناد التخطيط لاستثمار المياه وعمليات التكيف والحد من المخاطر الهيدرولوجية ولاسيما حالات الجفاف والفيضانات والتلوث، فضلاً عن زيادة التوعية لأهمية الموارد المائية وخطورتها عند أبناء المجتمع مما يسهم في شراكتهم في عملية تنمية الموارد المائية والحد من عمليات تبديد المياه وتلوثها.

الفصل الأول

الخصائص العامة للموارد المائية

مفهوم الموارد المائية: *Define of water Resources*

تقدر المساحة الإجمالية للكرة الأرضية بحدود 510 مليون كم^2، تشغل اليابسة مساحة تقدر بحدود 148 مليون كم^2 لتمثل حوالي 29% من المساحة الإجمالية للكرة الأرضية في حين تتسع مساحة المسطحات المائية إلى حوالي 362 مليون كم^2 لتمثل حوالي 71% من المساحة الإجمالية للكرة الأرضية. لذلك لابد أن يكون لهذه المساحة الواسعة للمياه على سطح الأرض من تأثيرات كبيرة على المجال الحيوي للكرة الأرضية (الغلاف الصخري والغلاف الجوي والغلاف الحيوي) مما يتطلب من علم الجغرافيا أن يعطي اهتماماً كبيراً لدراسة المياه (الغلاف المائي).

إن الموارد المائية (*Water Resources*) أو الهيدرولوجية (*Hydrology*) تدخل ضمن فروع الجغرافيا الطبيعية ويقصد بها العلم الذي يعنى بدراسة المياه في الكرة الأرضية وأنواعها وخصائصها وتوزيعها الجغرافي والتأثير المتبادل بين المياه ومكونات البيئة للمجال الحيوي في الكرة الأرضية.

يتكون مصطلح *Hydrology* من مقطعين الأول هو *Hydro* وأصله من الكلمة اليونانية *Hudor* ومعناها المياه والمقطع الثاني هو *Logy* وأصله من الكلمة اليونانية *Logia* ومعناها علم أو دراسة. إن الهيدرولوجية المعاصرة لا تشتمل بالضرورة على دراسة جميع الخصائص المتعلقة بالمياه وإنما تهتم بشكل رئيس بدراسة المكونات الرئيسة للدورة الهيدرولوجية (*Hydrological Cycle*) ذات الارتباط المباشر بالأرض والعمل على استكشاف (*Explore*) التباينات المكانية للمياه وبيان العوامل المؤثرة فيها. ولا يقتصر دور الهيدرولوجية على الاستثمار الأمثل للمياه وتجهيز المياه لسد الاحتياجات المائية للاستخدامات البشرية المختلفة فحسب بل تمتد إلى المساهمة في الحد من الآثار السلبية للتباينات المائية، وما يمكن أن تسببه من أخطار طبيعية (*Natural Hazards*) كالفيضانات المدمرة، والجفاف (*Drought*).

إن الهيدرولوجية تدرس من علوم عدة؛ الهندسية؛ والجيولوجية؛ والزراعية؛ وعلوم التربة؛ فضلاً عن الجغرافية؛ غير أن أكثر العلوم تخصصاً بالهيدرولوجية هي الهندسة والجيولوجيا والجغرافيا وهناك مساحات واسعة من التداخل بينها في هذا المجال ويصعب الفصل بين الهيدرولوجية الهندسية والجيولوجيا غير أنهما يميلان أكثر إلى الجانب التطبيقي (*Application*) والحسابات الرقمية (*Numerate*)، في حين تميل الهيدرولوجية في الدراسة الجغرافية إلى الجانب الوصفي (*Descriptive*) من خلال توضيح الدور الذي تؤديه أشكال الأرض (*Land Forms*) في تحديد أشكال المسطحات المائية وتباينها المكاني وتوضيح

أصل العمليات التي قادت إلى حركة المياه حول الأرض في الدورة الهيدرولوجية والسعي لفهم الاتصال المكاني بين تلك العمليات[1].

أهمية الموارد المائية: *Importance of Water Resources*

إن الخصائص المميزة التي تتمتع بها المياه جعلتها من أهم الموارد الطبيعية على سطح الأرض. إذ تشتمل المياه المتواجدة ضمن مدى المناخ الأرضي على حالات المادة الثلاثة (الصلبة والسائلة والغازية)، مما جعل المياه العامل المسيطر في ديمومة ملائمة المناخ الأرضي للعيش من خلال امتصاص الطاقة وتحويلها بين الحالات الثلاثة ونقلها حول العالم (إعادة توزيعها)، إذ تنقل الطاقة من المناطق الاستوائية إلى الأقطاب. كما أن اللزوجة (*Viscosity*) المنخفضة للمياه جعلت منها وسيلة معتمدة للنقل والملاحة المائية (*Navigation*) سواء عبر المحيطات أو داخل القنوات والأنهار، وإن هذه الخصائص الفيزيائية للمياه هي أساس بقاء الإنسان على كوكب الأرض. أما خصائص المياه الكيميائية فهي مهمة أيضاً إذ تعد المياه من أفضل المذيبات الطبيعية (*Solvent Naturally*) المتواجدة على الأرض مما جعل المياه المادة الرئيسة المستخدمة في الغسل والنظافة والتخلص من التلوث، كما أن خصائص الذوبان للمياه تعد من العوامل الأساس في عملية امتصاص (*Uptake*) المغذيات من التربة إلى النبات وعملية انتقال المغذيات إلى داخل أنسجة النبات، كما أن قدرة المياه على إذابة الغازات سمحت للأحياء النباتية والحيوانية في العيش داخل الكتل المائية كالأنهار والبحيرات والمحيطات. أن أهمية المياه في حياة الكائنات الحية (*Organisms*) جعلتها مسئولة بشكل رئيس على التوزيع المكاني للأنظمة البيئية المختلفة (*Earth's Varied Ecosystems*) من حيوانات ونباتات وبكتريا، إذ تختلف الكائنات الحية في طبيعة علاقاتها بالمياه فعلى سبيل المثال بعض البذور (*Seeds*) في المناخ الجاف (*Arid Climate*) تبقى في سبات (*Dormant*) لسنوات عديدة وهي تنتظر تساقط الأمطار لتعيد نشاطها في النمو والازدهار، وعلى النقيض من ذلك فإن أشجار البلوط (*Oak*) في المناخ المعتدل (*Temperate Climate*) تعمل على تزويد الغلاف الجوي بالمياه بمقدار 15.14 م^3/سنة من خلال عملية النتح[2].

لقد تجاوزت أهمية المياه للكائنات الحية حدود المساهمة في خلق العديد من البيئات الملائمة لحياة الأجناس المتباينة كافة من الكائنات الحية، إذ دخلت المياه في تكوين الأجساد والخلايا الحية وتتباين نسبة المياه ما بين 65- 95% من الحجم الإجمالي لأجساد الكائنات الحية[3].

تدخل المياه في الاستخدامات البشرية كافة كالشرب والأغراض المنزلية والري الزراعي وإرواء الحيوانات وفي المشاريع الصناعية والسياحية. إذ يقدر المعدل العالمي للاحتياجات المائية (*Water Requirements*) للفرد الواحد بحدود 100 متر مكعب في السنة (جدول 1). وتتباين الاحتياجات المائية الزراعية بسبب تباين الظروف المناخية ونوع المحصول وخصائص التربة، إذ يتباين معدل الاحتياجات المائية اللازمة لري هكتار واحد من الأراضي الزراعية بين 1500- 4500 متر مكعب في السنة الواحدة. ويتباين المعدل السنوي للاحتياجات المائية للحيوانات بين 10- 500 متر مكعب في السنة الواحد.

ولابد من التأكيد في هذا الصدد أن أغلب المشاريع السكنية والزراعية تعتمد الخزانات والبحيرات (*Reservoirs and Ponds*) لتلبية الاحتياجات المائية، ويتباين مقدار المياه المفقودة من تلك الخزانات بفعل النضح (*Seepage*) والتبخر بين 40- 70% من حجم المياه المخزونة[4] بسبب تباين نوع التربة والظروف المناخية ومواسم السنة مما يزيد من حجم الاحتياجات المائية للاستخدامات المختلفة بمقدار فواقد التبخر والنضح من المياه المخزونة والتي يقدر معدلها العام بحدود 50% من الحجم الإجمالي للمياه في الخزانات. ولتقدير الحجم الإجمالي للاحتياجات المائية ينبغي احتساب حجم المياه المفقودة من الخزانات المائية التي تجهز المياه للاستخدامات المختلفة.

مثال:

نفترض أن منطقة سكنية تضم 50 ألف شخص، احسب الحجم الإجمالي للاحتياجات المائية السنوية إذا علمت أن المعدل السنوي للاحتياجات المائية للشخص الواحد يقدر بحدود 100 م^3/سنة وأن معدل فواقد المياه من الخزانات يمثل بحدود 50% من حجم المياه المخزونة؟

الحل:

حجم الاحتياجات المائية للسكان = معدل استهلال الفرد الواحد × عدد السكان.

= 100 م^3 × 50,000 = 5 مليون م^3

جدول 1 الاحتياجات المائية للاستخدامات المختلفة.

نوع الاستخدام	حجم الاحتياجات السنوية
المنزلية والشرب	100 م^3/شخص
الري الزراعي	1500- 4500 م^3/هكتار
الماشية	300- 500 م^3
الغنم والماعز	20 م^3
الدواجن	10 م^3

الحجم الإجمالي للاحتياجات المائية للسكان = نسبة فواقد المياه (50%) × احتياجات السكان

$= \frac{100}{50} \times 5{,}000{,}000$ م^3 $= 2 \times 5{,}000{,}000$ م^3

$= 10$ مليون م^3.

إن خصائص المياه وأهميتها البالغة في حياة الإنسان جعلتها تؤدي دور كبير في العديد من الأديان السماوية مما يجعل للمياه دوراً في التأثير على السلوك البشري. إذ تعطي العديد من الأديان للمياه دوراً مهماً في النصوص والطقوس الدينية، فالمسلمون يعتقدون أن المياه من أفضل المطهرات التي يجب الاغتسال بها قبل أداء أغلب طقوس العبادة، كما يعتقد النصارى أن المياه من أقوى المطهرات والعطاءات الإلهية وأن المياه حية في الأنهار.

أشكال المياه وحالاتها وتوزيعها الجغرافي:

Water Forms and Cases and Its Distribution

تتباين المياه في الكرة الأرضية في شكل تواجدها وطبيعة حالتها ونوعيتها ومساحتها وتوزيعها الجغرافي على سطح الأرض، وفيما يأتي بيان لتلك الخصائص:

1- أشكال المياه: *Water Forms*

إن المياه المتواجدة ضمن المجال الحيوي للأرض تتخذ ثمانية أشكال رئيسة وهي المحيطات والجليد والمياه الجوفية والبحيرات وماء التربة وبخار الماء والأنهار فضلاً عن المياه التي تحويها أجساد الكائنات الحية، وتقدر الكمية الإجمالية لحجم المياه في الكرة الأرضية بحدود 1.4 مليار كم^3 (جدول 2) لتشكل الغلاف المائي (*Hydrosphere*) للكرة الأرضية وهو واحد من الأغلفة الأربعة للبيئة الطبيعية. تسيطر مياه البحار والمحيطات على أشكال المياه الأخرى جميعها، إذ تبلغ كميتها بحدود 1.35 مليار كم^3 لتمثل 96.56% من الكمية الإجمالية لمياه الكرة الأرضية، في حين يمثل حجم المياه في الكائنات الحية أدنى أشكال المياه وبمقدار 0.001 مليون كم^3 ليمثل 0.00007 % من

جدول 2 أشكال المياه وكميتها المخمنة ومساحاتها على الكرة الأرضية.

أشكال المياه	كمية المياه (مليون كم^3)	المساحة (مليون كم^2)	النسبة من المياه	النسبة من المساحة
البحار والمحيطات	1349.9	362	96.56	70.98
الجليد والثلوج	24.36	16.3	1.74	3.2
المياه الجوفية	23.40	134.8	1.67	26.43
البحيرات	0.231	4.7	0.017	0.92
ماء التربة	0.017	82	0.0012	16.08
بخار الماء	0.013	510	0.0009	100
الأنهار	0.002	5.56	0.0001	1.09
الكائنات الحية	0.001	510	0.00007	100
المجموع	1397.924	510	100	100

الكمية الإجمالية للمياه في الكرة الأرضية. على الرغم من تعدد أشكال المياه في الكرة الأرضية غير أن أكثر أشكال المياه أهمية كموارد طبيعية ثلاثة؛ وهي المياه السطحية (البحيرات والأنهار) والمياه الجوفية والمحيطات وذلك بسبب كثرة استخدامها وارتباط حياة الإنسان بها وكذلك لسعة انتشارها واحتوائها على العديد من الموارد الطبيعية فضلاً عن آثارها البيئية الواسعة، لذلك غالباً ما تشتمل الدراسات الهيدرولوجية على تلك الموارد المائية الثلاثة فقط.

2- مساحة المياه: *Area of Water*

تتباين أشكال المياه المختلفة في المساحة التي تشغلها ضمن المجال الحيوي للكرة الأرضية بشكل لا يتناسب مع حجم المياه ولا يتعارض مع امتداد المساحة لكل شكل من أشكال المياه. فعلى الرغم من ضآلة حجم المياه المتمثلة في بخار الماء والكائنات الحية إلا أنهما يتواجدان تقريباً في جميع المساحة التي تشغلها الكرة الأرضية والبالغة 510 مليون كم^2 إذ يمثل كل منهما 100% من المساحة الإجمالية للكرة الأرضية (جدول 2)، بسبب إحاطة الغلاف الجوي بالكرة الأرضية إحاطة شاملة، أما الكائنات الحية فهي تتواجد في جميع أجزاء الغلاف الصخري والغلاف المائي.

في حين تضيق المساحة التي تشغلها مياه البحار والمحيطات إلى حوالي 362 مليون كم^2 لتمثل حوالي 71% من المساحة الإجمالية للكرة الأرضية على الرغم من ضخامة حجم المياه في البحار والمحيطات، ويرجع السبب في ذلك إلى اتصال المياه البحرية فيما بينها لتشكل كتلة مائية واحدة وانتفاء تناثر أجزائها كما في بخار الماء والكائنات الحية، إن مياه البحار والمحيطات وعلى الرغم من التضييق النسبي لامتداد مساحتها مقارنة ببخار الماء والكائنات الحية إلا أنها تعد أكبر مظهر جيومورفولوجي في الطبيعة. وتمثل المياه في الأنهار أدنى أشكال المياه في امتداد المساحة وبمقدار 5.56 مليون كم^2 ليمثل 1.09% من المساحة الإجمالية للكرة الأرضية.

3- حالات المياه: *Water States*

تتمثل مياه الكرة الأرضية في ثلاث حالات فيزيائية وهي كل من الحالة الصلبة (*Solid*) التي تمثلها الكتل الجليدية في العروض العليا والثلوج في القمم الجبلية المرتفعة، كما تتمثل المياه في الحالة السائلة (*Liquid*) والتي يمتثل معظمها في مياه المحيطات والبحيرات والأنهار والمياه الجوفية ورطوبة التربة، وكذلك تتمثل المياه في الحالة الغازية (*Gas*) والتي يمثلها بخار الماء في الغلاف

الجوي القريب من سطح الأرض. إن الحالة السائلة للمياه تسيطر على حالات المياه الأخرى، إذ يقدر حجم المياه في الحالة السائلة بحدود 1.37 مليار كم^3 لتمثل بحدود 98.26% من الكمية الإجمالية لمياه الكرة الأرضية (جدول 3)، وينخفض حجم المياه في الحالة الصلبة إلى حوالي 24.36 مليون كم^3 ليمثل 1.74% من الكمية الإجمالية لمياه الكرة الأرضية، في حين يمثل حجم المياه في الحالة الغازية أدنى حالات المياه وبمقدار 0.013 مليون كم^3 ليمثل حوالي 0.0009% من الكمية الإجمالية لمياه الكرة الأرضية. إن المياه السائلة تتجمد (*Freezing*) وتتحول إلى الحالة الصلبة لتشكل الجليد والثلوج عندما تنخفض درجة حرارة المياه إلى ما دون درجة الصفر المئوي فإن ارتفعت درجات الحرارة فوق درجة الصفر المئوي تبدأ الكتل الجليدية بالتكسر والذوبان (*Malting*)، وعندما ترتفع درجات الحرارة إلى 100 درجة مئوية تبدأ عملية الغليان (*Boiling*) لتتحول المياه إلى الحالة الغازية بفعل نشاط عمليات التبخر (*Evaporation*)، ولذلك فإن المياه يمكنها أن تحافظ على حالتها السائلة

جدول 3 حالات المياه في الكرة الأرضية.

حالات المياه		كمية المياه (مليون كم^3)	النسبة من الكمية الإجمالية للمياه
السائلة	البحار والمحيطات	1349.9	96.56
	المياه الجوفية	23.40	1.67
	البحيرات	0.231	0.017
	ماء التربة	0.017	0.0012
	الأنهار	0.002	0.0001
	الكائنات الحية	0.001	0.00007
	المجموع	1373.551	98.256
الصلبة	الجليد والثلوج	24.36	1.74
الغازية	بخار الماء	0.013	0.0009
المجموع		1397.924	100

عندما تتباين درجة حرارتها بين أكثر من 0 درجة مئوية إلى أقل من 100 درجة مئوية.

إن عملية تحول الماء من الحالة الصلبة (الثلج) في درجة حرارة الصفر المئوي إلى الحالة السائلة من خلال عمليات التدفئة (*Warming*) والذوبان تتطلب كمية من الحرارة مقدارها 80 سعرة/غم، وبما أن عملية التجمد عكس عملية الذوبان لذلك فإن عملية تحول الماء من الحالة السائلة في درجة حرارة الصفر المئوي إلى الحالة الصلبة من خلال عملية التبريد (*Cooling*) تطلق كمية من الحرارة مقدارها 80 سعرة/غم (شكل 1). كما أن عملية تحول الماء من الحالة السائلة في درجة حرارة 100 مئوية إلى الحالة الغازية من خلال عمليات التدفئة (*Warming*) والتبخر تتطلب كمية من الحرارة مقدارها 540 سعرة/غم، وبما أن عملية التكاثف (*Condensing*) عكس عملية التبخر لذلك فإن عملية تحول الماء من الحالة الغازية إلى الحالة السائلة من خلال عملية التبريد (*Cooling*) تطلق كمية من الحرارة مقدارها 540 سعرة/غم.

4- نوعية المياه: *Water Quality*

تتحدد نوعية المياه بشكل رئيس بدرجة تركيز الأملاح الذائبة، إذ تتباين ملوحة المياه بشكل كبير بين أشكال المياه المختلفة، كما تتباين الملوحة ضمن الشكل الواحد للمياه. إن المياه المالحة تسود مياه الكرة الأرضية إذ يقدر الحجم الإجمالي للمياه المالحة بحدود 1.36 مليار كم^3 ليمثل حوالي 97.5% من الكمية الإجمالية لمياه الكرة الأرضية (جدول 4)، وتمثل المياه المالحة مجمل مياه البحار والمحيطات و55% من حجم المياه الجوفية وحوالي 45.5% من حجم مياه البحيرات.

جدول 4 نوعية المياه في الكرة الأرضية.

نوعية المياه	إشكال المياه	كمية المياه مليون كم^3	النسبة من إجمالي المياه	النسبة من المياه العذبة
مالحة	البحار والمحيطات	1349.9	96.56	0.0
	المياه الجوفي	12.87	0.92	0.0
	البحيرات المالحة	0.105	0.008	0.0
	المجموع	1362.875	97.5	0.0
عذبة	الجليد والثلوج	24.36	1.74	69.50
	مياه جوفية	10.53	0.75	30.04
	البحيرات	0.126	0.009	0.36
	ماء التربة	0.017	0.0012	0.05
	بخار الماء	0.013	0.0009	0.04
	الأنهار	0.002	0.0001	0.006
	المجموع	35.048	2.5	100

أما حجم المياه العذبة في الكرة الأرضية فينخفض إلى حوالي 35 مليون كم^3 ليمثل حوالي 2.5% من الكمية الإجمالية لمياه الكرة الأرضية، وتمثل المياه العذبة مجمل الكتل الجليدية والثلوج وحوالي 45% من حجم المياه الجوفية وحوالي 54.5% من حجم مياه البحيرات فضلاً عن ماء التربة وبخار الماء ومياه الأنهار. إن حجم المياه العذبة تتباين بين أشكال المياه المختلفة إذ يرتفع الحجم في الجليد والثلوج إلى 24.36 مليون كم^3 ليمثل 69.50% من الحجم الإجمالي للمياه العذبة، في حين ينخفض حجم المياه العذبة إلى 2 ألف كم^3 في الأنهار ليمثل 0.006% من الحجم الإجمالي للمياه العذبة في الكرة الأرضية.

إن المياه العذبة المتواجدة في الكتل الجليدية ورطوبة التربة وبخار الماء التي يقدر حجمها بحدود 24.39 مليون كم^3 لتمثل حوالي 69.59% من الحجم الإجمالي للمياه العذبة تعد مياه غير متاحة للاستخدام (*Unavailable For Use*)، وعليه يقدر الحجم الواقعي للمياه العذبة المتاحة للاستخدام بحدود 10.658 مليون كم^3 لتمثل حوالي 0.76% من الحجم الإجمالي للمياه في الكرة الأرضية.

5- توزيع المياه على سطح الأرض:

Distributions of Water on The Land

تشتمل الكرة الأرضية من الناحية الجيومورفولوجية على ثلاثة أنواع رئيسة من المسطحات المائية تغطي سطح الأرض وتتمثل في المحيطات والبحيرات والأنهار والتي تقدر مساحتها الإجمالية بحدود 372.26 مليون كم^2 لتمثل حوالي 73% من المساحة الإجمالية للكرة الأرضية. غير أن المسلم به من الناحية الجغرافية أن تحسب مساحة المياه التي تشغلها البحيرات والأنهار ضمن الجزء اليابس من الكرة الأرضية لتقتصر مساحة المسطحات المائية في الكرة الأرضية على مياه المحيطات فقط. إن احتساب البحيرات ضمن المساحة اليابسة على الرغم من امتداد بعضها لمساحات واسعة وذات أعماق كبيرة ربما ترجع أسبابه إلى إحاطة البحيرات جميعها بسطح الأرض من الجهات كلها ولا يوجد اتصال للبحيرات مع بعضها لتشكل كتلة مائية متماسكة، فهي عبارة عن مسطحات مائية صغيرة نسبياً متناثرة في الجزء اليابس من الكرة الأرضية، كما أنها معرضة للجفاف وسريعة الاضمحلال والاندثار. أما أسباب احتساب الأنهار ضمن المساحة اليابسة فربما ترجع إلى قلة اتساع المجاري النهرية وضحالة أعماقها ولا يوجد اتصال للأنهار مع بعضها إذ أن لكل نهر منبعاً ومجرى ومصباً محدداً تفصله مساحات واسعة من اليابسة عن سائر الأنهار.

على الرغم من انتفاء احتساب مساحات البحيرات والأنهار ضمن المساحات المائية فإن الكرة الأرضية تمتاز بسعة مساحة المياه إذ تشغل المياه في البحار والمحيطات مساحة مقدارها حوالي 362 مليون كم^2 لتمثل حوالي 71% من المساحة الإجمالية للكرة الأرضية في حين تضيق مساحة اليابسة إلى حوالي 148 مليون كم^2 لتمثل حوالي 29% من المساحة الإجمالية للكرة الأرضية. فضلاً عن ضخامة مساحة المياه على سطح الأرض فإن توزيعها المكاني لم يكن متساوياً بين نصفي الكرة الأرضية، إذ يتمثل بحدود 70% من الكتل الأرضية اليابسة (القارات) في النصف الشمالي من الكرة الأرضية (*Northern Hemisphere*) وتتركز اليابسة بشكل أساس ضمن العروض الوسطى، في حين تتقلص مساحة الأراضي اليابسة في النصف الجنوبي من الكرة الأرضية (*Southern Hemisphere*) لتتمثل بحدود 30% من الكتل الأرضية اليابسة وتتركز اليابسة بشكل أساس ضمن العروض المدارية والقطبية (شكل 2). إن مساحة المياه تتسع في النصف الجنوبي من الكرة الأرضية لتمثل بحدود 58.17% من المساحة الإجمالية للمياه في الكرة الأرضية، وتمثل بحدود 82.6% من مساحة هذا النصف وتضيق مساحة اليابسة لتمثل حوالي 17.4%

من مساحة النصف الجنوبي (جدول 5)، ولذلك يطلق على هذا النصف من الكرة الأرضية بالنصف المائي. أما في النصف الشمالي للكرة الأرضية فإن مساحة المياه تتقلص لتمثل بحدود 41.83% من المساحة الإجمالية للمياه في الكرة الأرضية، وتمثل بحدود 59.4% من مساحة هذا النصف ولذلك تتسع مساحة الكتل اليابسة لتمثل حوالي 40.6% من مساحة النصف الشمالي.

أصل المياه: *Source Water*

تمتاز الكرة الأرضية عن سائر كواكب المجموعة الشمسية بوفرة المياه، إذ تقدر الكمية الإجمالية للمياه بحدود 1.4 مليار كم^3 وتتسع المساحة التي تشغلها بحدود 362 مليون كم^2 لتشكل حوالي 71% من إجمالي مساحة الكرة الأرضية، في حين ينعدم أو يندر وجود المياه في سائر الكواكب إذ توجد بعض الثلوج في كوكب المريخ والزهرة. إن ضخامة المياه في الكرة الأرضية وانتشارها الواسع يستوجب البحث عن المصادر التي أدت إلى نشأت الغلاف المائي (*Hydrosphere*) على سطح الأرض.

إن المجال الحيوي للكرة الأرضية يضم حالياً أربعة أغلفة هي الغلاف البيولوجي (*Biosphere*) والغلاف الجوي (*Atmosphere*) والغلاف الصخري (*Lithosphere*) الذي يتمثل في طبقة القشرة الأرضية (*Crust*) والجزء الأعلى من طبقة الوشاح (*Mantle*) فضلاً عن اشتمال المجال الحيوي على الغلاف المائي. ويمكن احتمال تلك الأغلفة الثلاثة الأولى أن تكون مصدراً للمياه في الكرة الأرضية وتشكيل الغلاف المائي، ولذلك ستحصل مناقشة هذه الأغلفة لغرض التوصل إلى معرفة المصدر الأساس لنشأة المياه على سطح الأرض.

جدول 5 نسب مساحة المياه واليابسة وتوزيعها بين نصفي الكرة الأرضية.

الموقع	نسبة اليابسة من إجمالي اليابسة	نسبة المياه من إجمالي المياه
النصف الجنوبي للأرض	30	58.17
النصف الشمالي للأرض	70	41.83
المجموع	100	100

الموقع	نسبة اليابسة من	نسبة المياه من	المجموع

	الكرة الأرضية	الكرة الأرضية	
النصف الجنوبي للأرض	8.7	41.3	%50
النصف الشمالي للأرض	20.3	29.7	%50
المجموع	29	71	%100
الموقع	نسبة اليابسة من نصف الأرض	نسبة المياه من نصف الأرض	المجموع
النصف الجنوبي للأرض	17.4	82.6	%100
النصف الشمالي للأرض	40.6	59.4	%100
المعدل	29	71	%100

إن مكونات الغلاف البيولوجي جميعها من إنسان وحيوان ونبات تحوي أجسادها نسباً عالية من المياه وبمقدار يتباين ما بين 65- 95% من الحجم الإجمالي للأجساد ويمكن أن تكون مصدراً للمياه على سطح الأرض ولاسيما بعد موتها وتفسخ أجسادها. غير أن الحجم الإجمالي للمياه في الغلاف البيولوجي تقدر بحدود 0.001 مليون كم^3 وهي كمية ضئيلة جداً إذ تمثل بحدود 0.00007% من حجم الغلاف المائي البالغ بحدود 1.4 مليار كم^3، بل إن الغلاف البيولوجي لم يكن موجوداً في الأصل قبل تكون الغلاف المائي بسبب اقتران الحياة بالوجود المائي، ولذلك ينتفي احتمال أن يكون الغلاف البيولوجي مصدراً لنشأة المياه على سطح الأرض.

أما الغلاف الجوي فيمكن أن يكون مصدراً لمياه سطح الأرض من خلال عمليات التساقط الجوي والمتمثلة بالأمطار والثلوج بشكل أساس. أن نطاق الغلاف الجوي المحيط بالكرة الأرضية له طاقة استيعابية من المياه يمكن أن تعمل طبقة مائية على سطح الأرض سمكها لا يزيد على 5 سم[5]، وذلك بعد أن تصل رطوبة الغلاف الجوي إلى درجة الإشباع التام (نسبة الرطوبة الجوية 100%) وأن هذه الرطوبة جميعها تسقط على سطح الأرض. كما تشير البيانات المناخية الحالية إلى أن الكمية الإجمالية للتساقط الجوي تقدر بحدود 0.5 مليون كم^3 ويمكنها أن تغطي سطح الكرة الأرضية بطبقة مائية معدل عمقها بحدود متر واحد وذلك في حالة انتفاء تعرض تلك المتساقطات الجوية إلى عمليات التبخر السطحي والتسرب الأرضي. ومع ذلك فإن هذه الكمية قليلة مقارنة بمعدل أعماق المياه في المحيطات البالغ بحدود 3729 متراً، كما أن هذه الكمية من المياه المحتمل وجودها في الغلاف الجوي وتساقطها على سطح الأرض هي في الأصل جزء من المياه السطحية للكرة الأرضية وقد تعرضت لعمليات التبخر والتكاثف ومن ثم التساقط على سطح الأرض على شكل أمطار وثلوج، بل إن الأدلة العلمية تشير إلى أن الغلاف الجوي لم يكن موجوداً حينما تكونت الكرة الأرضية. وعليه فلا يمكن احتمال أن يكون الغلاف الجوي المصدر الأساس لتشكيل الغلاف المائي.

أما فيما يتعلق بالغلاف الصخري فإن إجمالي مساحة سطح الأرض تقدر بحدود 510 مليون كم^2، يشغل الجزء اليابس من سطح الأرض مساحة تقدر بحدود 148 مليون كم^2، ويتباين سمك القشرة الأرضية (*Thickness*) بين 0- 65 كم وبمعدل 40 كم فيكون حجم الكتلة اليابسة بحدود 6 مليار كم^3. في حين تشغل مياه المحيطات مساحة من سطح الأرض تقدر بحدود 362 مليون كم^2، ويتباين سمك القشرة الأرضية ما بين 0- 10 كم وبمعدل 7 كم[6] وبذلك يكون حجم الكتلة الأرضية التي تغطيها المياه البحرية بحدود 2 مليار كم^3. ولذلك فإن الحجم الإجمالي لكتلة القشرة الأرضية يبلغ بحدود 8 مليار كم^3. إن المياه المتواجدة في صخور القشرة الأرضية تمثل نسبة تتباين مابين 0.1- 0.5 % من الحجم الإجمالي لكتلة القشرة الأرضية[7]، وعليه فإن حجم المياه في القشرة الأرضية والتي يمكن أن تخرج إلى السطح مع ثوران البراكين لا تزيد على 0.4 مليار كم^3 في أحسن الحالات،

وهي كمية ضئيلة جداً إذ تمثل أقل من 0.03% من إجمالي حجم المياه في الكرة الأرضية والبالغ بحدود 1.4 مليار كم^3.

من خلال هذا العرض والتحليل المنطقي المدعوم بالأدلة العلمية يتبين أن الأغلفة المتواجدة جميعها في المجال الحيوي للكرة الأرضية ليس فيها القدرة الكاملة على إنتاج هذه الكمية الهائلة من المياه المتواجدة حالياً في الكرة الأرضية، مما دفع المختصين للبحث عن مصادر أخرى تكون أكثر منطقية في تفسير عمليات إنتاج المياه وتشكيل الغلاف المائي، ومن هنا ظهرت نظريات جديدة عالجت موضوع أصل المياه في الكرة الأرضية ومن أهمها نظرية إزالة الغازات المتشربة (*Out Gassing Theory*).

تشير نظرية إزالة الغازات إلى أن إزالة أو تطاير الغازات المتشربة مع مكونات باطن الأرض إلى القشرة الأرضية والسطح هي المصدر الأساس للمياه على سطح الأرض، إذ تتكون هذه الغازات المتطايرة من 70% بخار الماء و15% ثاني أوكسيد الكاربون و5% نيتروجين و5% أوكسيد الكبريت والنسبة المتبقية تشتمل على الكلور والهيدروجين والاركون[8]. على الرغم من أن الكثير من الماء المنبثق من باطن الأرض يتبخر ويكون جزءاً من الرطوبة الجوية أو يتغلغل في داخل الشقوق والتصدعات الموجودة في الصخور بحيث لم يبق منه إلا الجزء القليل على السطح، غير أن معدل السرعة الحالية لإزالة أو تطاير الغازات المتشربة مع مكونات باطن الأرض كافية لوجود المياه على سطح الأرض بهذا الحجم البالغ بحدود 1.4 مليار كم^3 ولاسيما إن فترة إزالة تلك الغازات مستمرة منذ نشأة الأرض والتي تقدر بحدود 4.5- 4.6 مليار سنة ماضية.

لقد تباينت كمية المياه المندفعة من باطن الأرض خلال الأزمنة الجيولوجية الأربعة للأرض إذ يعد منتصف الزمن الجيولوجي الثالث أكثر الفترات التي تطايرت فيها الأبخرة والغازات من باطن الأرض بسبب حدوث أعظم الحركات الأرضية الالتوائية والانكسارية وفيها حدثت أعظم ثوران للبراكين[9]. وعلى وفق نظرية إزالة الغازات المتشربة فإن حجم المياه في الكرة الأرضية غير ثابت مع الزمن وإنما يتجه نحو الزيادة، واستناداً إلى الحجم الحالي للمياه فإن حجم الزيادة السنوية للمياه يقدر بحدود 0.3 مليون كم^3. وهناك أدلة حالية تثبت صحة تلك النظرية وهي انبثاق الماء من ينابيع الكبريت الحارة والحمم البركانية.

أما أسباب انعدام أو ندرة المياه في الكواكب الأخر فترجع إلى صغر مساحتها مقارنة بمساحة الأرض مما يقلل من درجة الحرارة والضغط في باطنها وهذا يؤدي إلى بطء سرعة إزالة الغازات وتكوين المياه. وعليه فإن التاريخ الجيولوجي هو السبب في انعدام أو ندرة وجود المياه على سطح الكواكب الأخرى، وإن اكتشاف البراكين ووجود الثلج على أقطاب المريخ دليل آخر على صحة هذه النظرية.

الـفـصـل الـثـانـي

الدورة الهيدرولوجية

مفهوم الدورة الهيدرولوجية: *Define of Hydrological Cycle*

إن المياه المتواجدة في الكرة الأرضية تتبادل بين أشكال تواجدها إذ تتنقل بين البحار أو المحيطات وبين الرطوبة الجوية وبين البحيرات أو الأنهار وبين الكائنات الحية وبين رطوبة التربة والمياه الجوفية، كما تتبادل المياه بين حالاتها المختلفة إذ تتحول المياه بين حالات المادة الثلاثة (السائلة والصلبة والغازية). ولذلك فإن مياه الكرة الأرضية تمتزج فيما بينها بصورة مستمرة من دون أن يحدث تغير في الكمية الإجمالية للمياه. إن هذا التبادل المستمر لأشكال المياه وحالاتها يسمى بالدورة الهيدرولوجية أو دورة المياه في الطبيعة (شكل 3). إن الحركة الثابتة للمياه في الطبيعة تبدأ من المحيطات لترتفع إلى الغلاف الجوي ومن ثم تنزل إلى سطح الأرض بعد ذلك تجري المياه تجاه المناطق المنخفضة لترجع إلى المحيطات، ويقدر معدل الحدود العمودية لحركة تبادل المياه في الكرة الأرضية (طبقة الدورة الهيدرولوجية) بحدود 13 كم إذ يتباين معدل سمك الطبقة في الغلاف الجوي ما بين 8 كم في العروض العليا وبين 16 كم في العروض الاستوائية وبمعدل عام مقداره بحدود 12

كم[1]، في حين ينخفض معدل سمك طبقة الدورة الهيدرولوجية إلى حوالي 1 كم في الغلاف الصخري.

تستمد الدورة الهيدرولوجية طاقتها الحركية من الشمس والجاذبية الأرضية (*Gravitation*) ويأخذ الغلاف الجوي دوراً مهماً في عملية الربط بين المياه الموجودة في المحيطات والقارات، إذ يعمل الإشعاع الشمسي (*Solar Radiation*) على رفع درجات الحرارة مما يؤدي إلى تبخر المياه من المسطحات المائية ورطوبة التربة والنبات ويتجمع بخار الماء المتصاعد على شكل غيوم (*Clouds*) في طبقة التروبوسفير (*Troposphere*) من الغلاف الجوي من خلال عملية التكاثف، وتعمل الرياح على تحريك بخار الماء والغيوم من المحيطات إلى القارات، ويعمل التساقط الجوي على إيصالها إلى سطح الأرض. إن المياه المتساقطة على سطح الأرض يتبخر جزءاً منها ويرجع إلى الغلاف الجوي ليضاف إلى رطوبة الهواء، كما يتسرب جزء من المياه المتساقطة إلى القشرة الأرضية ليغذي رطوبة التربة والمياه الجوفية، في حين يجري الجزء الأكبر من المياه المتساقطة على سطح الأرض ليشكل البحيرات والأنهار والتي تصب المياه في نهاية المطاف في المحيطات. إن المياه الجوفية يمكن أن تظهر على سطح الأرض من خلال الينابيع والعيون أو عن طريق الخاصية الشعرية وامتصاص النباتات أو بعمليات الضخ البشري. كما يمكن أن تصب المياه الجوفية في البحيرات والأنهار عندما يكون مستواها أعلى من مستوى قاع البحيرات والأنهار.

مكونات الدورة الهيدرولوجية:

Components of Hydrological Cycle

إن مياه الكرة الأرضية تتبدل في الأشكال والحالات ضمن طبقة الدورة الهيدرولوجية بشكل مستمر لتخلق حالة من التوازن المائي على سطح الأرض. وهناك أربع عمليات رئيسة تعمل على التبدل المستمر لأشكال المياه وحالاتها وهي التساقط الجوي والتبخر السطحي والتسرب الداخلي والجريان السطحي. لذلك تشتمل الدورة الهيدرولوجية على أربعة مكونات رئيسة فضلاً على الموازنة المائية لعمليات الدورة الهيدرولوجية، وفيما يأتي بيان لتلك المكونات الخمسة:

أولاً: التساقط الجوي: *Precipitation*

يمكن تعريف التساقط الجوي بأنه قطرات مائية سائلة أو متجمدة أو بلورات ثلجية تسقط من الغيوم المتواجدة في الغلاف الجوي ضمن طبقة التروبوسفير وتصل إلى سطح الأرض. وأغلب عمليات التساقط الجوي تحدث على شكل مطر (*Rain*) وثلج (*Snow*)، غير أنها تشتمل على العديد من الأشكال أيضاً والتي من أبرزها الرذاذ (*Drizzle*) والبرد (*Hail*) وتقطير الضباب (*Fog Drip*).

يعد التساقط الجوي جزءاً من مياه الغلاف الجوي، وذلك لكونه يتكون في الأساس من تكاثف بخار الماء، إذ تتواجد أغلب مياه الغلاف الجوي على شكل بخار ماء (*Exists as Vapour*)، وفي بعض المواقع المحلية المحددة قد يتحول البخار إلى الحالة السائلة ويتمثل في الأمطار والغيوم المائية والرذاذ، كما يمكن أن يتحول بخار الماء إلى الحالة الصلبة ويتمثل في الثلوج والغيوم الثلجية والبرد.

على الرغم من كون التساقط الجوي يدخل ضمن تخصص علم الأرصاد الجوي (*Meteorology*) وعلم المناخ (*Climatology*) إلا أنه يعد أساساً في الدراسات الهيدرولوجية، بسبب كون التساقط الجوي يعد من المكونات الرئيسة للدورة الهيدرولوجية إذ تتوقف هيدرولوجية أي منطقة بصورة رئيسة على كمية التساقط الجوي، وهو المقدمة التي يمكن من خلالها توضيح العديد

من العمليات الجوية، كما يعد المصدر الرئيس للمياه العذبة جميعها على سطح الأرض، وكذلك يسبب التساقط الجوي الجريان السطحي والمحدد الأساس لمواسم الفيضان والجفاف.

ومن الجدير ذكره في هذا الصدد إن التمييز بين التساقط الثلجي والتساقط المطري يعد من المبادئ الأساس في الهيدرولوجية، إذ يبقى الثلج في الغالب مدة طويلة من الزمن على سطح الأرض قبل أن يدخل ضمن مكونات الدورة الهيدرولوجية خلال ذوبانه في فصل الربيع (*Spring Melting*)، في حين يدخل المطر فور تساقطه على السطح ضمن مكونات الدورة الهيدرولوجية.

طرق تشكيل الغيوم: *Methods of Clouds Formation*

إن الغيمة هي مصدر التساقط الجوي وتتشكل الغيمة بفعل عملية تكاثف (*Condensation*) رطوبة الهواء بسبب التبريد الذاتي (*Adiabatic*) لبخار الماء (*Water Vapour*) الذي يحدث بعد ارتفاع الكتل الهوائية الدافئة، هناك العديد من الطرق التي تسبب ارتفاع الكتل الهوائية مما يؤدي إلى تشكيل الغيوم، ومن أبرزها ما يأتي:

1- التسخين الأرضي: *Convection*

إن التسخين الشديد لسطح الأرض بفعل الارتفاع الكبير لدرجات الحرارة يؤدي إلى تمدد الهواء الملامس وانخفاض وزنه فيرتفع إلى الأعلى على شكل تيارات صاعدة. إن ارتفاع الهواء الرطب يؤدي إلى تبريد بخار الماء وتكاثفه على شكل غيوم.

2- الارتفاع الإعصاري أو الجبهوي: *Cyclonic or Fronts Ascent*

إن الالتقاء أو التداخل بين كتلتين هوائيتين مختلفتين بالخصائص الحرارية لا يؤدي إلى تجانس خصائصهما وإنما ترتفع الكتلة الهوائية الدافئة فوق الكتلة الباردة وأن الخط أو نقطة التماس بينهما تسمى بالجبهة، فإذا كانت الكتلة الدافئة رطبة فإن ارتفاعها يؤدي إلى تبريد بخار الماء وتكاثفه مما يعمل على تشكيل غيوم.

3- الارتفاع التضاريسي أو الجبلي:

Orographic (Mountain) Ascent

إن اعتراض سير الكتل الهوائية بحاجز مرتفع كالجبال يؤدي إلى ارتفاع الهواء وذلك في حالة استمرار عملية التصادم بين الكتل الهوائية والحواجز، وإن عملية ارتفاع الهواء الرطب يؤدي إلى تبريد بخار الماء وتكاثفه على شكل غيوم.

4- ارتفاع الهواء المضطرب: *Turbulent Ascent*

إن انتقال الكتل الهوائية من المسطحات المائية في البحار والمحيطات إلى سطح الأرض يؤدي إلى اضطراب الهواء بفعل زيادة ارتفاع سطح الأرض وخشونته وزيادة الاحتكاك مما يؤدي إلى ارتفاع الهواء وتبريد بخار الماء وتكاثفه مما يعمل على تشكيل غيوم.

محددات عملية التساقط: *Conditions of Precipitation*

إن عملية تكاثف بخار الماء وتشكيل الغيوم لا يعني بالضرورة حدوث عمليات التساقط الجوي ففي الكثير من الحالات توجد في الغلاف الجوي العديد من الغيوم من دون حدوث تساقط للقطرات المائية، ولذلك فهناك العديد من المحددات أو الظروف التي يجب توافرها لحدوث عملية التساقط الجوي والتي من أبرزها ما يأتي:

1- من الشروط الأساس لعمليات تكاثف بخار الماء وتشكيل الغيوم هو توافر بخار الماء في الهواء لدرجة التشبع، ويمكن للهواء أن يصل إلى درجة التشبع عندما تتباين الرطوبة النسبية بين 71-100%.

2- لا يمكن أن تحدث عملية تكاثف بخار الماء المتواجد في الهواء من دون انخفاض درجة حرارة الهواء المشبع بالبخار إلى ما دون نقطة الندى (*Dew Point*).

3- وجود نويات للتكاثف (*Hygroscopic*) عالقة في الهواء وهي عبارة عن جسيمات صغيرة تجذب حولها بخار الماء لتشكل قطرات مائية أو بلورات ثلجية وتشمل نويات التكاثف على جزيئات الغبار والدخان والأملاح البحرية.

4- تنامي القطرات المائية وتزايد أحجامها بفعل الاندماج والتلاصق فيما بينها مما يؤدي إلى ازدياد وزنها إلى الدرجة التي يصعب على الهواء حملها فتعمل الجاذبية الأرضية على إسقاطها إلى سطح الأرض.

التوزيع الجغرافي للتساقط الجوي: *Precipitation Distribution*

يقدر المعدل العام لحجم التساقط الجوي على الكرة الأرضية بحدود 982 ملم/سنة، ولذلك تقدر الكمية الإجمالية للتساقط الجوي على الكرة الأرضية بحدود 0.5 مليون كم^3/سنة (جدول 12). إن المتساقطات الجوية تتوزع بصورة غير متساوية بين اليابس والمياه، إذ تستحوذ المحيطات على الكمية الأكبر من التساقط الجوي وبمقدار حوالي 370.72 ألف كم^3 لتمثل 75.65% من الحجم الإجمالي للتساقط الجوي على الكرة الأرضية وذلك بسبب ارتفاع معدل حجم التساقط الجوي بحدود 1024 ملم/سنة، في حين ينخفض حجم التساقط الجوي على سطح القارات بمقدار 119.32 ألف كم^3 ليمثل حوالي 24.35% من الحجم الإجمالي للتساقط الجوي بسبب انخفاض معدل حجم التساقط الجوي إلى حوالي 879 ملم/سنة.

جدول 12 الحجم التخميني للمياه في عناصر الدورة الهيدرولوجية.

العناصر	الموقع	معدل المياه (ملم/سنة)*	حجم المياه (ألف كم^3)	نسبة المياه من الحجم الإجمالي
التساقط	المحيطات	1024	370.72	75.65
	القارات	879	119.32	24.35
	المعدل	982	490.04	100
التبخر	المحيطات	1128	408.488	83.36
	القارات	601	81.554	16.64

	المعدل	975	490.04	100
الجريان السطحي	المحيطات		0.0	0.0
	القارات	255.14	37.77	100
	المجموع	255.14	37.77	100

* يمثل المعدل الموزون وليس الوسط الحسابي.

على الرغم من تقدير المعدل العام للتساقط الجوي بحدود 982 ملم/سنة، غير أن معدلات التساقط الجوي تتباين بشكل كبير بين المناطق المختلفة لسطح الأرض. إذ يرتفع المعدل في بعض المناطق ليصل إلى حوالي 10000 ملم/سنة، في حين ينخفض المعدل في مناطق أخرى حتى يصل إلى حوالي 2 ملم/سنة[2].

إن أسباب التساقط الجوي وأشكاله وكمياته تتباين على سطح الأرض بشكل عام على وفق التوزيع التقريبي الأتي[3] و[4] :

1- المنطقة الاستوائية: تمتد بين دائرتي عرض 0- 10 درجة، وتعد الحركة التصاعدية للتيارات الهوائية (التسخين الأرضي) السبب الرئيس للتساقط الجوي والذي يكون على شكل أمطار، إن هذه المنطقة تمتاز بأمطار دائمة غزيرة على مدار السنة إذ تتباين معدلاتها بين 1000- 2500 ملم/سنة.

2 – منطقة العروض المدارية: تمتد بشكل رئيس بين دائرتي عرض 20- 30 درجة، ويحدث التساقط الجوي الذي يكون على شكل أمطار في الغالب خلال فصل الشتاء بسبب الرياح التجارية (تساقط جبهوي)، وتتباين معدلات الأمطار المتساقطة بين 50- 250 ملم/سنة.

3- منطقة العروض المعتدلة: تمتد بشكل رئيس بين دائرتي عرض 40- 60 درجة، ويحدث التساقط طول العام مع تركز في فصل الشتاء بسبب المنخفضات الجوية (تساقط جبهوي) وتتباين أشكال التساقط في هذه المنطقة بين الأمطار والثلوج مع سيطرة لتساقط الأمطار، وتتباين معدلات التساقط بين 1000- 1500 ملم/سنة.

6- منطقة العروض القطبية: تمتد بشكل رئيس بين دائرتي عرض 60- 90 درجة، ويحدث التساقط الجوي الذي يكون على شكل ثلوج طول العام ويرجع سبب التساقط إلى الأعاصير (تساقط جبهوي) وتتباين معدلات التساقط بين 20- 300 ملم/سنة.

العوامل المؤثرة في التباين المكاني للتساقط:

Factors Effecting precipitation

تشهد كمية التساقط الجوي تبايناً مكانياً بين دوائر العرض المختلفة، كما تتباين موقعياً ضمن الدائرة العرضية الواحدة، ويرجع ذلك إلى جملة من العوامل والتي من أبرزها ما يأتي:

1- الموقع من اليابس والماء: *Location From Land and Water*

إن المصدر الأساس للتساقط الجوي هو بخار الماء، وتعد البحار والمحيطات المصدر الأساس للتبخر السطحي. ولذلك تزداد كمية التساقط على البحار والمحيطات والمناطق الساحلية وتنخفض كمية التساقط في المناطق القارية الداخلية لبعدها عن تأثير المسطحات المائية وانخفاض بخار الماء،

إذ يعد انخفاض الرطوبة النسبية في الصحاري المدارية خلال الصيف من الأسباب الرئيسة لانتفاء تشكيل الغيوم وتساقط الأمطار على الرغم من وجود تيارات هوائية صاعدة.

2- مستوى سطح الأرض: *surface Elevation*

إن ارتفاع سطح الأرض يعمل على رفع الرياح المتعامدة مع اتجاه المرتفعات مما يسهم في زيادة عمليات تكاثف بخار الماء وتشكيل الغيوم والتساقط الجوي، في حين تعمل المرتفعات على الحد من التساقط الجوي في المناطق الواقعة باتجاه معاكس لحركة الرياح واتجاهها والتي تسمى بمناطق ظل المطر (*Rain Shadow*) مما يسهم في زيادة الجفاف وتشكيل الصحاري.

3- انطقه الضغط الجوي: *Atmosphere Pressure*

لمقدار الضغط الجوي المسلط على المنطقة علاقة بكمية التساقط الجوي، وذلك لدوره في تحديد اتجاه حركة التيارات الهوائية (صاعدة أو هابطة). إن سيادة الضغط الواطئ (*Low Pressure*) في المناطق الاستوائية والمعتدلة يعمل على تزايد نشاط التيارات الهوائية الصاعدة وجذب الأعاصير والمنخفضات الجوية مما يسهم في زيادة عمليات تكاثف بخار الماء وتشكيل الغيوم والتساقط الجوي. في حين تسهم التيارات الهوائية الهابطة في المناطق المدارية والقطبية في الحد من تكاثف بخار الماء وتشكيل الغيوم بفعل سيادة الضغط المرتفع (*High Pressure*) مما يخفض من كمية التساقط الجوي.

قياس التساقط الجوي (الأمطار): *Measurement of Rainfall*

إن الأمطار المتساقطة على سطح الأرض تتباين مكانياً وزمنياً من حيث الكمية والشدة، ويعبر عن كمية الأمطار بعمق ماء المطر (*Rainfall Depth*) المتراكم على مساحة محددة من سطح الأرض وخلال مدة زمنية محددة كاليوم أو الأسبوع أو الشهر أو السنة، وتقاس كمية الأمطار عادة بوحدة الملي متر (ملم/سنة). أما الشدة المطرية (*Intensity of Rainfall*) فيعبر عنها بمعدل عمق ماء المطر المتراكم على مساحة محددة من سطح الأرض خلال مدة العاصفة المطرية (*Duration of Rain Storm*)، وتقاس الشدة المطرية عادة بوحدة الملي متر/الساعة.

تقاس الأمطار المتساقطة على سطح الأرض بأجهزة خاصة تسمى بمقاييس المطر (*Rain Gauges*) والتي يمكن تقسيمها إلى صنفين رئيسين هما:

1- مقاييس المطر غير المسجلة: *Non-recording Rain Gauges*

يضم هذا الصنف أنواع متعددة من المقاييس غير أن أهمها وأكثرها شيوعاً واستخداماً في المحطات المناخية هو جهاز سايمون لقياس المطر (*Symon's rain gauge*) (شكل 4) ، ولهذا الجهاز القدرة على قياس كمية الأمطار المتساقطة على سطح الأرض من خلال تحديد عمق المطر المتجمع في اسطوانة الجهاز. إن المياه المتجمعة في الأجهزة غير المسجلة في الغالب تكون أدنى من القيمة الفعلية لعمق ماء المطر ويرجع السبب في ذلك بشكل رئيس إلى عمليات التبخر السطحي وترطيب أسطح جدران الجهاز مما يعمل على انخفاض عمق المياه المتجمع في الجهاز.

2- مقاييس المطر المسجلة: *Recording Rain Gauges*

أ- مقياس المطر العائم: *Float Rain Gauge*
ب- الوعاء الموزون: *Weighting Bucket Rain Gauge*
ج- الدلو القلاب: *Tipping Bucket Rain Gauge*
د- الرادار: *Radar*

احتساب المعدل المطري: *Calculation of Mean Rainfall*

إن مقاييس المطر المعتمدة في المحطات المناخية لا تعكس معدل كمية الأمطار المتساقطة على المساحة الإجمالية للحوض المائي، بل تعطي نتائج موقعية محددة لكمية الأمطار تمثل مساحة أجهزة القياس والمنطقة المحيطة بمحطات القياس، وهناك ثلاث طرق يمكن من خلالها احتساب المعدل المطري للحوض المائي وهي ما يأتي[6]:

1- الوسط الحسابي: *Arithmetic Mean*

يعد الوسط الحسابي من أبسط الطرق المعتمدة في احتساب المعدل المطري للأحواض المائية، غير أن دقة نتائجه تتوقف على درجة انتظام التوزيع المساحي للمحطات المناخية في الأحواض المائية، ويمكن احتساب المعدل المطري بطريقة الوسط الحسابي بواسطة المعادلة الآتية:

$$\overline{R} = \frac{\sum r}{N}$$

إذ أن:
$\bar{R}$ = المعدل المطري.
$\sum r$ = مجموع الأمطار المسجلة في المحطات جميعها.
N = عدد المحطات.

year.

2- معدل ثايسن: *Thiessen Mean*

تتمثل طريقة ثايسن باحتساب الوزن المساحي لكل محطة مناخية ويتم ذلك من خلال تأشير مواقع المحطات في الحوض المائي على خريطة، ومن ثم تربط المحطات بخطوط مستقيمة ويقام على منتصف الخطوط أعمدة مما يؤدي إلى تشكيل مضلعات مختلفة المساحة (شكل 5)، ويمثل كل مضلع المساحة التي تغطيها قياسات المحطة. بعد تحديد مساحة المحطات على الخريطة يكون احتساب المعدل المطري بطريقة ثايسن من خلال الإجراءات الآتية:
أ- تحديد كمية الأمطار المتساقطة (r) على مساحة كل محطة (a)، من خلال نتائج قراءات مقاييس المطر.
ب- استخراج النسبة المئوية لمساحة كل محطة (a) من المساحة الإجمالية للحوض (A)، من خلال تقسيم مساحة كل محطة على المساحة الإجمالية للحوض ($\frac{a}{A}$).
ج- ضرب النسبة المئوية لمساحة كل محطة في كمية الأمطار المتساقطة عليها ($r \times \frac{a}{A}$).
د- تجمع نتائج الضرب.

3- معدل خطوط المطر المتساوية: *Isohyetal Mean*

تتمثل طريقة خطوط المطر المتساوية أو الايزوهيت بتأشير مواقع المحطات المناخية في الحوض المائي على خريطة، ومن ثم يكون الربط بين النقاط المتقاربة في كمية الأمطار بخطوط مما يؤدي إلى تشكيل ما يشبه الخطوط الكنتورية لتباين مناسيب سطح الأرض (شكل 6)، بعد تحديد خطوط المطر المتساوية على الخريطة يتم احتساب المعدل المطري بطريقة الايزوهيت من خلال الإجراءات الآتية:

أ- تحديد المساحة المحصورة بين كل خطين متجاورين (a).

ب- استخراج معدل كمية الأمطار المتساقطة (r) في كل مساحة محصورة بين خطين (a)، من خلال تقسيم مجموع الأمطار في المحطات المتواجدة بين كل خطين على عدد المحطات ($\frac{\sum r}{N}$).

ج- تضرب قيم معدل كمية الأمطار المتساقطة في المساحة المتساقطة عليها ($r \times a$).

د- تجمع قيم نتائج الضرب ($\sum a \times r$) وتقسم على إجمالي مساحة الحوض (A).

وبهذا يتمثل المعدل المطري على وفق طريقة الايزوهيت بعد تحديد المساحة ومعدل كمية الأمطار بين كل خطين متجاورين بالمعادلة الآتية:

$$\overline{R} = \frac{\sum ar}{A}$$

ثانياً: التبخر- النتح: *Evapotranspiration*

التبخر (*Evaporation*) هو عملية تحول المياه الموجودة في المسطحات المائية والترب من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية وانطلاقها إلى الجو. ويحدث التبخر حينما يتصل هواء غير مشبع بسطح رطب من خلال عملية الانتشار (*Diffusion*) ويتمثل السطح الرطب في المسطحات المائية جميعها والأراضي الرطبة وحتى قطرات المطر (*Rain Drops*) المتساقطة من الغيوم.

إن المياه المتواجدة ضمن الغلاف الجوي في الحالة الغازية تسمى ببخار الماء (*Water Vapour*) أو رطوبة الهواء (*Humidity of the Air*). يعد بخار الماء من أهم الغازات المكونة للهواء على الرغم من انخفاض نسبة البخار بمقدار يتراوح ما بين 0- 4% من إجمالي الغازات المكونة للهواء[7]، إلا أنه يعد من أهم الغازات المكونة للهواء وذلك بسبب تأثيره المباشر في عمليات التكاثف والتساقط الجوي والدور الذي يحتله في تحديد درجة حرارة الهواء، مما يؤثر على الأنشطة البشرية المختلفة.

أما النتح أو التعرق (*Transpiration*) فهو عملية انتقال المياه من المسامات المتواجدة في سطح أوراق النباتات الحية وأجسادها إلى الجو بعد تحولها من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية (بخار الماء)، إذ تتحرك من النباتات الطبيعية والمحاصيل الزراعية المختلفة كميات كبيرة من بخار الماء إلى الجو تمثل بحدود 95% من الكمية الإجمالية للمياه الممتصة من الجذور النباتية[8].

إن عملية انتقال ماء التربة إلى السطح غالباً ما تكون بطيئة الحركة وعليه فإن سطح التربة يجف بسرعة مما يعمل على الحد من كمية التبخر السطحي، وفي المناطق الرطبة (*Humid Regions*) غالباً ما تكون نسبة التبخر من سطح الأرض قليلة لكون السطح مغطى بالنباتات الطبيعية في أغلب أيام السنة، ولذلك تعد عملية النتح المحدد الرئيس للحجم الإجمالي لتبخر المياه من الجزء اليابس من سطح الأرض.

تعمل عملية النتح أو تعرق النباتات على سحب المياه المخزونة في مسامات التربة العميقة من خلال دور الأنسجة النباتية في نقل المياه من الشعيرات الجذرية المتصلة بماء التربة إلى الأوراق، مما يجعل عملية النتح في الجزء اليابس من سطح الأرض أكثر قوة وأثر وأهمية من التبخر الذي ينتهي بجفاف سطح التربة.

إن عملية الفصل والتمييز بين عملية التبخر من سطح التربة وعملية النتح من النباتات المتواجدة في التربة معقدة ويصعب إجراؤها، ولذلك يفضل الجمع بين العمليتين لتسمى بعملية التبخر- النتح (*Evapotranspiration*). وفي هذا الصدد لابد من التأكيد على ضرورة التمييز بين مصطلح التبخر- النتح الكامن (*Potential Evapotranspiration*) الذي يشير إلى كمية المياه المتبخرة من مساحة محددة من سطح الأرض التي تغطيها النباتات الخضراء ولا تعاني تربتها من العجز المائي على مدار السنة، ومصطلح التبخر- النتح الحقيقي (*Actual Evapotranspiration*) الذي يشير إلى الكمية الفعلية للمياه المتبخرة من مساحة محددة من سطح الأرض بغض النظر عن كثافة النباتات الخضراء ومقدار رطبة التربة.

يعد التبخر- النتح الكامن مفهوم مناخي نظري إذ يندر وجود مساحة على سطح الأرض ذات نباتات خضراء وتربة رطبة على مدار السنة، إذ تتباين قابلية التربة على تغذية السطح والنباتات الطبيعية بالرطوبة بين مواسم وأشهر السنة المختلفة فقد يكون سطح التربة جافاً وخالياً من النبات الطبيعي خلال موسم الصيف مما يعمل على انخفاض كمية التبخر- النتح الحقيقي ويجعل عملية تقديره صعبة جداً. وعليه فإن أغلب طرق تقدير التبخر- النتح تفترض وجود نباتات خضراء وتربة رطبة على مدار السنة، مما يجعل التقديرات تكشف القيم الكامنة للتبخر- النتح وليست القيم الحقيقية.

التوزيع الجغرافي للتبخر السطحي: *Evaporation Distribution*

يقدر المعدل العام لحجم التبخر السطحي في الكرة الأرضية بحدود 975 ملم/سنة، ولذلك تقدر الكمية الإجمالية للتبخر السطحي بحدود 0.5 مليون كم^3/سنة (جدول 12). إن حجم التبخر السطحي غير متساوي بين اليابس والمياه، إذ يرتفع حجم التبخر في المحيطات إلى حوالي 408.488 ألف كم^3 ليمثل 83.36% من الحجم الإجمالي للتبخر السطحي في الكرة الأرضية وذلك بسبب ارتفاع معدل التبخر في المحيطات إلى 1128 ملم/سنة، في حين ينخفض حجم التبخر السطحي في القارات إلى 81.558 ألف كم^3 ليمثل حوالي 16.64% من الحجم الإجمالي للتبخر السطحي في الكرة الأرضية بسبب انخفاض معدل التبخر إلى حوالي 601 ملم/سنة. إن السبب الرئيس في الارتفاع الكبير لنسبة التبخر من المحيطات مقارنة بالقارات يرجع إلى سعة مساحة المحيطات وبمقدار 362 مليون كم^2 واستمرار عمليات التبخر على مدار السنة، أما الجزء اليابس من سطح الأرض فعلى الرغم من كون التبخر يحدث بشكل مستمر من البحيرات والمستنقعات ومجاري الأنهار إلا أن تلك المسطحات المائية لا تشغل سوى مساحة صغيرة من سطح الأرض، لذلك فإن أغلب التبخر يحدث من أسطح النباتات والتربة الرطبة، وهي محدودة في كمية المياه المتبخرة.

على الرغم من تقدير المعدلات العامة للتبخر السطحي بين المحيطات والقارات بين 1128 و601 ملم/سنة على التوالي، غير أن قيم التبخر تتباين بشكل كبير بين المناطق المختلفة لسطح الأرض. إذ تتباين المعدلات في الأقاليم الرطبة الدافئة بين 600 ملم/سنة من المسطحات المائية وبين 450 ملم/سنة من سطح الأرض. في حين تتباين معدلات التبخر في الأقاليم الجافة بين 2000 ملم/سنة من المسطحات المائية وبين 100 ملم/سنة[9] من سطح الأرض. إن التباين الكبير لقيم التبخر في الأقاليم الجافة بين المسطحات المائية وسطح الأرض يرجع إلى ندرة التساقط الجوي وجفاف سطح التربة وندرة النباتات الخضراء مما يؤدي إلى انخفاض حجم التبخر من الأراضي اليابسة، في

حين يزداد التبخر من المسطحات المائية بشكل مستمر لذلك يزداد الفرق في معدلات التبخر بين اليابسة والمسطحات المائية.

العوامل المؤثرة في عملية التبخر والنتح:

Factors Effecting Evapotranspiration

إن تباين قيم التبخر والنتح تكون تبعاً لطبيعة السطح وظروفه (ارض، مياه، نبات)، وهناك جملة من العوامل التي تسهم في تباين قيم التبخر أو النتح ضمن السطح الواحد.

1- العوامل المؤثرة في التبخر من المسطحات المائية:

Factors Effecting Evaporation from Water Mass

أ- الإشعاع الشمسي: *Solar Radiation*

تعد الطاقة الشمسية المصدر الرئيس للطاقة اللازمة لتبخر المياه، إذ تعمل المياه على تحويل الإشعاع الشمسي من طاقة ضوئية إلى طاقة حرارية مما يسهم في زيادة عمليات تحول المياه إلى حالة غازية وانتقالها إلى الغلاف الجوي. ولذلك تحدث عملية التبخر في الغالب خلال ساعات النهار الممتدة من 6 صباحاً إلى 6 مساءً لتمثل نسبة معدلها بحدود 80% من الكمية الإجمالية للتبخر اليومي. يعتمد مدى تأثير الإشعاع الشمسي في عملية التبخر بشكل أساس على درجة الزاوية التي يشكلها الإشعاع الشمسي مع سطح الأرض وبشكل ثانوي على عدد ساعات السطوع الشمسي، إذ تزداد عملية التبخر في المناطق المدارية ولاسيما خلال موسم الصيف بسبب الإشعاع الشمسي العمودي وطول النهار بمقدار 14 ساعة، في حين ينخفض التبخر في المناطق المعتدلة والقطبية بسبب انحراف زاوية الإشعاع الشمسي على الرغم من ازدياد طول النهار ليصل إلى 24 ساعة في الدائرة القطبية، ويضعف نشاط التبخر خلال موسم الشتاء.

ب- درجة الحرارة: *Temperature*

تؤثر درجة حرارة المياه في سرعة تحول حالة المياه وانتقال جزيئاتها إلى الغلاف الجوي، إذ يستلزم تحويل 1 غرام من المياه من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية بحدود 580 سعره حرارية، ولذلك تعمل زيادة درجة حرارة المياه على زيادة سرعة عملية التبخر.

ج- ضغط بخار الماء: *Vapour Pressure*

يتحدد حجم التبخر بمقدار الفرق بين ضغط بخار الماء في الطبقات العليا للمسطحات المائية وبين ضغط البخار في الطبقات الدنيا للغلاف الجوي، إذ ينخفض مقدار ضغط البخار في الهواء مقارنة بالمياه في أغلب الأحيان مما يسمح لعمليات انتقال جزيئات الماء من المسطحات المائية إلى الغلاف الجوي بعد تحولها إلى الحالة الغازية. وقد يكون ضغط البخار متوازناً بين الماء والهواء عندما تصل رطوبة الهواء إلى درجة التشبع إذ يرتفع مقدار ضغط البخار في الهواء إلى أقصى درجة ممكنة لتقترب من درجة ضغط البخار في الماء مما يحد من تبخر المياه، ويمكن اعتبار مقدار الرطوبة النسبية مؤشراً قوياً لتحدد مقدار العجز في بخار الماء بين الماء والهواء.

د- الرياح: *Wind*

تؤثر خصائص الرياح على عملية التبخر من جانبين رئيسين هما السرعة والجفاف، إذ تزداد معدلات التبخر بزيادة سرعة الرياح ودرجة جفافها من خلال الدور الذي تقوم به في عمليات إزاحة الهواء الرطب الملامس للمسطحات المائية واستبداله بخصائص الرياح الجافة مما يؤدي إلى زيادة الفرق في مقدار ضغط البخار بين الماء والهواء فتنشط عمليات التبخر.

ه- التخزين الحراري: *Heat Storage*

تتباين المسطحات المائية بالمساحة والأعماق مما يؤدي إلى تباين مخزونها الحراري، ولذلك تمتلك المسطحات المائية الضخمة مخزوناً حرارياً كبيراً مقارنة بالمسطحات المائية الصغيرة مما يؤثر على معدلات التبخر السطحي. إذ تستوعب المسطحات المائية الكبيرة طاقة حرارية كبيرة خلال موسم الصيف وساعات النهار، من هنا فهي تتطلب عمليات تحول جزيئات المياه إلى الحالة الغازية وانتقالها إلى الغلاف الجوي سعرات حرارية كبيرة جداً مما يؤدي إلى الانخفاض النسبي لمعدلات التبخر السطحي مقارنة بمعدلات التبخر من المسطحات المائية الصغيرة.

و- نوعية المياه: *Water Quality*

يتأثر مقدار ضغط بخار الماء بنوعية المياه إذ ينخفض ضغط البخار في المياه المالحة بمقدار 2% مقارنة بالمياه العذبة، ولذلك ينخفض معدل التبخر السطحي من البحيرات المالحة بمقدار يتباين بين 2- 3% مقارنة بمعدل التبخر من البحيرات العذبة[10]. كما أن عكورة المياه (*Turbidity*) تسهم في الحد من نفاذ الإشعاع الشمسي في أعماق الطبقات المائية مما يقلل من عمليات تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة حرارية ويسهم في انخفاض معدلات التبخر السطحي مقارنة بالمياه الشفافة (*Transparency*).

2- العوامل المؤثرة في التبخر من التربة:

Factors Effecting Evaporation From Soil

أ- رطوبة التربة: *Soil Moisture*

إن عمليات التبخر من التربة تتمثل بتبخر المياه المتواجدة في الفراغات بين الذرات الصلبة (المسامية) والتي تسمى برطوبة التربة. وعليه فعمليات التبخر من التربة تتحدد بشكل رئيس بمقدار رطوبتها، إذ تكون معدلات التبخر من التربة مساوية لمعدلات التبخر من المسطحات المائية عندما تكون التربة مشبعة بالمياه، في حين تتوقف عمليات التبخر في الترب الجافة.

ب- عمق المياه الجوفية: *Table Water*

عندما يقترب مستوى المياه الجوفية من سطح الأرض فإن معدلات التبخر من التربة تكون مساوية لمعدلات التبخر من المسطحات المائية وذلك لتشبع التربة بالمياه بشكل مستمر وإمكانية التربة على سحب الرطوبة من المياه الجوفية حينما يعاني سطحها من العجز المائي، في حين يتوقف إمداد سطح التربة بالرطوبة من المياه الجوفية حينما يزداد عمقها عن 1 متر تقريباً.

ج- نسيج التربة: *Soil Texture*

إن حجم ذرات التربة تؤثر في مقدار رطوبة التربة وسحب المياه الجوفية، إذ يمتاز نسيج التربة الناعم بنفاذية رديئة مما يسمح بتجمع المياه على سطح التربة ويزيد من قابليتها على الاحتفاظ بالماء وينشط الخاصية الشعرية وسحب المياه الجوفية، في حين ينخفض مدى تأثير الخاصية الشعرية إلى 85 سم في الترب المزيجية والى 70 سم في الترب الرملية الناعمة والى 35 سم في الترب الرملية الخشنة.

د- الغطاء النباتي: *Vegetation*

إن ازدياد كثافة الغطاء النباتي يعمل على انخفاض معدلات التبخر من رطوبة التربة، وذلك لكون الغطاء النباتي يشكل ما يشبه المظلة مما يحد من مقدار الإشعاع الشمسي الواصل للسطح ويسهم في انخفاض درجة حرارة التربة خلال موسم الصيف وساعات النهار، كما يسهم الغطاء النباتي في الحد من سرعة الرياح ويزيد من الرطوبة الجوية بفعل عمليات النتح. وبذلك ينخفض معدل التبخر في الترب التي تشغلها الغابات بمقدار 70% من معدلات التبخر في المناطق المكشوفة.

3- العوامل المؤثرة في عملية النتح:

Factors Effecting Transpiration

إن عملية النتح تتأثر بالعوامل المناخية المؤثرة نفسها في عملية التبخر كالإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة والرطوبة الجوية والرياح، غير أن مقدار النتح يتباين ضمن الموقع الواحد بسبب تباين الخصائص النباتية. إذ تزداد معدلات النتح من النباتات بزيادة مساحة الأوراق وأعداد المسامات وأحجامها، كما أن لشبكة الجذور النباتية علاقة بمعدل النتح إذ يزداد النتح من النباتات ذات الجذور الكثيفة والعميقة وذلك لقابليتها العالية على امتصاص كميات كبيرة من المياه.

قياس التبخر السطحي: *Measurement of Evaporation*

إن القياس أو التقدير الدقيق لحجم التبخر السطحي يعد من العمليات الصعبة جداً ويرجع السبب في ذلك إلى تشعب عمليات التبخر من أسطح المياه والترب والنباتات وكذلك لتعدد العوامل المؤثرة وتداخلها في سرعة التبخر. وبصورة عامة يمكن تقدير التبخر السطحي بطرق مباشرة وطرق غير مباشرة، وفيما يأتي توضيح لتلك الطرق:

1- الطرق المباشرة لقياس التبخر:

Direct Methods of Measurement of Evaporation

تتمثل هذه الطرق جميعها بأجهزة خاصة تسمى بمقاييس التبخر (*Evaporimeter*)، ومن أشهر الأجهزة المعتمدة في محطات الأنواء الجوية لقياس حجم التبخر من المسطحات المائية هي أحواض التبخر (*Evaporation Pans*)، أما حجم التبخر من رطوبة التربة فيمكن قياسه بجهاز خاص يسمى ليسميتر (*Lysimeter*) (شكل 7).

2- الطرق غير المباشرة لتقدير التبخر- النتح:

Not Direct Methods of Estimation of Evapotranspirtion

تتمثل هذه الطرق بالمعادلات التجريبية (*Equation*) أو الصيغ الرياضية (*Formulae*) والتي تتخذ من البيانات المناخية أساساً لتخمين أو تقدير حجم التبخر أو النتح.

إن الصيغة التي وضعها العالم جون دالتون (*John Dalton*) في عام 1802 والتي تعرف بقانون دالتون للتبخر (*Dalton's Law of Evaporation*) تعد القاعدة الأساس لصياغة العديد من المعادلات التي عالجت موضوع التبخر. وهناك العديد من المعادلات المعتمدة في تقدير حجم التبخر-النتح غير أن أهم معادلات التبخر وأشهرها اثنتان هما:

أ- معادلة ماير (*Meyer's Equation*) في عام 1915 لتقدير حجم التبخر من المسطحات المائية، وتتمثل معادلة ماير بالصيغة الآتية[11]:

$$E = C\ (1+ V/16)\ (e_s - e_a)$$

إذ أن:

E = حجم التبخر (ملم/يوم).

C = معامل يتباين بين 0.36 في المسطحات المائية الكبيرة والعميقة، وبين 0.50 في المسطحات المائية الصغيرة والضحلة.

V = معدل سرعة الرياح (كم/ساعة).

e_s = الضغط البخاري المشبع لسطح المياه (ملم/زئبق).

e_a = الضغط البخاري الحقيقي للهواء (ملم/زئبق).

ب- معادلة ثورنثويت (*Thornthwaite's Equation*) في عام 1964 لتقدير حجم التبخر- النتح ، وتتمثل معادلة ثورنثويت بالصيغة الآتية[12]:

$$PE_X = 16\left(\frac{10\,t}{J}\right)^a$$

$$J = \sum j$$

$$j = \left(\frac{t}{5}\right)^{1.514}$$

$$a = (6.75^{-6})J^3 - (7.1^{-5})J^2 + (0.179)J + 0.492$$

إذ أن:

PE_X = حجم التبخر/ النتح المحتمل (ملم/شهر)(مدة الشهر 30 يوماً ومدة الإشعاع الشمسي 12 ساعة).

t = المعدل الشهري لدرجة حرارة الهواء (درجة مئوية).

J = دليل الحرارة السنوي ويتكون من مجموع 12 شهراً.

إن معادلة ثورنثويت على وفق تلك الصيغة يمكنها تخمين حجم التبخر/النتح المحتمل لكل شهر مع افتراض معدل عدد أيام الشهر 30 يوماً، ومعدل عدد ساعات الإشعاع الشمسي 12 ساعة. ولغرض احتساب حجم التبخر/ النتح الحقيقي يمكن اعتماد المعادلة الآتية:

$$PE = PE_X \frac{DT}{365}$$

إذ أن:
PE = حجم التبخر/النتح الحقيقي (ملم/شهر).
D = عدد أيام الشهر.
T = معدل عدد ساعات الإشعاع الشمسي في اليوم (ساعة/يوم).

لقد قام العالم سيرى (*Serra*) باختبار معادلة ثورنثويت واقترح حسابات مبسطة لاستخراج قيم (j) و(a) من خلال المعادلتين الآتيتين:

$$J = 0.09\ t^{3/2}$$
$$a = 0.016\ J + 0.5$$

ثالثاً: التسرب: *Infiltration*

يقصد بالتسرب أو الارتشاح عملية توغل (*Penetration*) المياه من سطح الأرض إلى داخل التربة، إذ تتحرك المياه عمودياً في داخل القشرة الأرضية من خلال المسامات الموجودة بين ذرات الترب والصخور استجابة للجاذبية الأرضية التي تعمل على سحب المياه إلى الأسفل. يحدث التسرب بعدما يبتل سطح التربة بالمياه بصورة كاملة فتتحرك المياه الفائضة إلى طبقات التربة السفلى، إذ تتكون التربة الناضجة من طبقات عدة أسفنجية ذات قابلية عالية على استيعاب كميات كبيرة من المياه عبر المسامات التي تشكل ممرات مائية داخل التربة. إن معدلات تسرب المياه داخل التربة ليست ثابتة مع الزمن، إذ تبدأ عملية التسرب بشكل سريع وتنخفض السرعة مع الزمن ثم تتوقف عمليات التسرب عندما تتشبع طبقات التربة بالمياه وتتصل بالمياه الجوفية، ويطلق على أقصى معدل لنفاذ المياه وتوغلها في داخل التربة بمصطلح سعة التسرب (*Infiltration Capacity*). يقاس عمق تسرب المياه عادة بالسنتمتر خلال فترة زمنية محددة، وغالباً ما تكون عملية التسرب ذات سرعة بطيئة جداً غير أنها تعد المصدر الأساس لتغذية المياه الجوفية.

تدخل عملية التسرب ضمن مكونات الدورة الهيدرولوجية لكونها تعمل على رفع مستوى المياه الجوفية مما يؤثر في درجة الانحدار الهيدروليكي وحركة المياه الجوفية وعندما يكون مستوى المياه الجوفية أعلى من مستوى قاع المسطحات المائية في الأنهار والبحيرات والبحار فإنها تعمل على تغذيتها بالمياه جراء تدفق المياه الجوفية إليها. كما تعمل عمليات التسرب على رفع مستوى المياه الجوفية إلى مستوى سطح الأرض أو قريب منه مما يعرض المياه الجوفية إلى عمليات لتبخر السطحي. وكذلك قد يعمل التسرب على ارتفاع مستوى المياه الجوفية فوق مستوى سطح الأرض مما يؤدي إلى تدفق المياه الجوفية فوق سطح الأرض عن طريق الينابيع والعيون.

العوامل المؤثرة في التسرب: *Factors Effecting Infiltration*

هناك مجموعة من العوامل المتداخلة فيما بينها التي تؤثر على عملية التسرب من حيث حجم المياه المتسربة والفترة الزمنية التي تستغرقها عمليات التسرب المتواصلة ومدى المسافة التي تصلها المياه المتسربة في داخل أعماق التربة، ومن أبرز هذه العوامل ما يأتي:

1- خصائص التربة: *Soil Characteristics*

تتأثر عملية التسرب ويتحدد حجم المياه المتسربة بخصائص التربة، إذ يتحدد عدد المسامات وحجم الفراغات بشكل كبير بنسيج التربة (*Texture*) مما يؤثر على حجم المياه المتسربة في وحدة المساحة، إذ يزداد حجم المسامات والنفاذية والقدرة على تسرب المياه مع ازدياد خشونة حبيبات التربة (*Coarse Particles*). ولذلك تزداد عمليات التسرب في الترب الرملية بسبب نسيجها الخشن في حين تنخفض عمليات التسرب في الترب الطينية بسبب النسيج الناعم الذي يعمل على تفوق قوة التلاصق بين الجزيئات المائية (*Molecules*) وجزيئات التربة (*Particles*) على قوة الجاذبية الأرضية لسحب المياه إلى الأسفل. كما تتحدد عمليات التسرب بعمق التربة من خلال دوره في تحديد القدرة الإجمالية للتربة على استيعاب المياه وحدود درجة الإشباع، إذ تزداد قابلية التربة العميقة على استيعاب كميات كبيرة من المياه مقارنة بالترب الضحلة. إن زيادة المواد العضوية في التربة تعمل على انسداد المسامات مما يحد من نفاذية التربة وتسرب المياه في داخلها، كما أن زيادة تركيز عنصر الصوديوم (*Na*) في تركيب التربة يعمل على تنافر جزيئات التربة وتفتتها مما يزيد ويرفع من نسبة الذرات الناعمة ويقلل من حجم المسامات فتنخفض عمليات التسرب، في حين تعمل زيادة تركيز الكالسيوم (*Ca*) على زيادة عمليات تلبد (*Flocculation*) وتلاصق جزيئات التربة على شكل مجموعات مما يزيد من خشونة النسيج فتزداد عمليات التسرب.

2- رطوبة التربة: *Soil Moisture*

إن عملية تسرب المياه في داخل التربة تحدث عندما تفوق المياه حدود ترطيب الطبقة السطحية للتربة، إذ تتحرك المياه نحو الأسفل لترطيب الطبقات السفلى للتربة. وتتحدد الحركة العمودية لعمليات تسرب المياه في طبقات التربة بحدود مستوى المياه الجوفية، وعندما يتجاوز مستوى ترطيب التربة حدود الإشباع التام في جميع طبقات قطاع التربة (*Soil Profile*) تتوقف عمليات التسرب بسبب امتلاء مسامات التربة جميعها بالمياه.

3- انحدار السطح: *Land Slope*

يتناسب حجم المياه المتسربة عكسياً مع درجة انحدار سطح الأرض، وذلك لدور الانحدار في خلق حالة من التوازن بين الجاذبية العمودي للمياه والجاذبية الأفقية، كما يؤثر الانحدار في سرعة التيار المائي إذ تزداد سرعة المياه الجارية مع ازدياد درجة الانحدار، مما يقلل من فرص تسرب المياه السطحية إلى داخل التربة. ولذلك تنخفض عمليات التسرب في المنحدرات وتزداد في المناطق المستوية.

4- نوعية المياه: *Water Quality*

تؤثر نوعية المياه في عمليات التسرب من خلال تأثيرها على نسيج التربة وتركيبها مما يؤثر على مسامات التربة ونفاذيتها. إذ تعمل زيادة عكورة المياه (*Turbidity*) على انخفاض عمليات التسرب بسبب الدور الذي تقوم به الحمولة الذائبة (*Dissolved Load*) والرواسب العالقة (*Suspend Sediments*) في انسداد مسامات التربة. كما أن ارتفاع تركيز الأملاح الذائبة في المياه ولاسيما عنصر الصوديوم يعمل على تفتيت جزيئات التربة مما يسهم في انخفاض حجم المسامات ومن ثم ينخفض حجم المياه المتسربة إلى داخل التربة.

5- كثافة الغطاء النباتي: *Vegetation*

تعمل النباتات على اعتراض المياه الجارية على سطح الأرض مما يؤدي إلى انخفاض سرعة التيار المائي وازدياد عمليات التسرب. إذ يمكن أن يعمل الغطاء النباتي الكثيف على زيادة حجم المياه المتسربة في داخل التربة بمقدار عشرة أضعاف مقارنة بحجم المياه المتسربة في مناطق مكشوفة على الرغم من تشابه خصائص الترب وطبيعة السطح ونوعية المياه.

رابعاً: الجريان السطحي: *Surface Runoff*

يقصد بالجريان السطحي عملية تحرك وانتقال مياه الأمطار المتساقطة أو الثلوج الذائبة على شكل طبقات فوق سطح الأرض في قنوات صغيرة نسبياً (الجداول والأنهار) وتنحدر على وفق انحدار السطح استجابة لتأثير الجاذبية الأرضية.

إن الجريان السطحي يمثل النتيجة النهائية لعمليات التبادل المائي بين مكونات الدورة الهيدرولوجية من تساقط وتبخر وتسرب، إذ توجد علاقة معقدة للتبادل المائي بين عمليات التساقط الجوي وعمليات التبخر السطحي والتسرب الداخلي، فعندما يفوق حجم المياه المتساقطة حجم المياه المتبخرة تحدث عملية التسرب الداخلي، وكذلك هي الحال عندما يفوق حجم التساقط الجوي حجم المياه المتسربة تحدث عملية التبخر السطحي. ويمثل الجريان السطحي الزيادة المائية لحجم التساقط الجوي على فواقد التبخر والتسرب. إن حجم مياه الجريان السطحي يقاس من خلال تحديد حجم المياه الجارية في الوحدة الزمنية وغالباً ما تستخدم وحدة القياس (م^3/ثانية) لتمثل (كم^3/سنة) ويقدر الحجم الإجمالي لمياه الجريان السطحي في قارات العالم جميعها بحدود 37.77 ألف كم^3/ سنة (جدول 12).

طرق جريان المياه: *Methods of Runoff*

تحدث عمليات جريان مياه التساقط الجوي في القنوات والمجاري النهرية بأربع طرق رئيسة هي ما يأتي:

1- تساقط قطرات المطر وبلورات الثلج مباشرة على القنوات والمجاري النهرية، وعلى الرغم من محدودية سعة الأنهار مقارنة بالمساحة الإجمالية للأحواض المائية إلا أن التساقط المباشر للأمطار يسهم في زيادة حجم الجريان المائي في القنوات والمجاري النهرية.

2- يحدث الجريان المائي عندما يفوق حجم مياه الأمطار المتساقطة أو الثلوج الذائبة حدود تشبع التربة، ويحدث ذلك عادة عندما تزداد مدة التساقط المطري. كما يحدث الجريان المائي عندما تزداد الشدة الطرية على معدلات التسرب في طبقات التربة، وربما تكون مياه الأمطار المتساقطة والثلوج الذائبة ذات انحدار هيدروليكي كبير بفعل غزارة المياه أو بفعل شدة انحدار السطح مما يعمل على زيادة سرعة تيار المياه الجارية بمقدار يفوق سرعة عمليات التسرب مما يؤدي إلى جريان المياه على سطح الأرض قبل أن تبلغ رطوبة التربة حدود التشبع، ويحدث ذلك عادة في الحالات التي تكون فيها الأمطار المتساقطة ذات شدة عالية. يسمى جريان المياه في تلك الطرق بالجريان السطحي (*Overland or Surface Runoff*).

3- قد يحدث جريان للمياه تحت سطح الأرض ليسمى بالجريان الداخلي (*Interflow*) أو الجريان التحت سطحي (*Subsurface Runoff*). يحدث ذلك عندما تكون معدلات التسرب في الطبقات السفلى للتربة (*Subsoil*) أقل من معدلات التسرب في الطبقات العليا (*Topsoil*)، وبعد تشبع الطبقة العليا بالمياه تبدأ حركة للمياه ضمن نطاق التربة (الطبقة غير المشبعة) وقد تصل إلى القنوات والمجاري النهرية.

4- كما يمكن أن يحدث جريان للمياه عندما تقل الشدة المطرية عن معدلات التسرب في التربة لذلك تتسرب مياه الأمطار إلى داخل طبقات التربة، وبعد تشبعها بالمياه تعمل الزيادة المطرية على تغذية المياه الجوفية وارتفاع مناسيبها، بعد ذلك تبدأ حركة للمياه ضمن نطاق المياه الجوفية (الطبقة المشبعة) لتصل إلى القنوات والمجاري النهرية. يسمى هذا النوع من الجريان المائي بالجريان القاعدي أو الأساس (*Base Flow*).

إن المياه في الجريان السطحي والجريان الداخلي (فضلاً على التساقط المباشر للأمطار على المجاري النهرية) يتدفق إلى القنوات والمجاري النهرية بسرعة تفوق سرعة تدفق الجريان القاعدي لذلك يطلق عليه بالجريان المباشر (*Direct Runoff*) أو جريان العاصفة (*Storm Flow*) في حين يسمى الجريان القاعدي بالجريان الطويل الأجل (*Prolonged*).

خصائص الجريان السطحي: *Characteristics of Runoff*

إن المعدلات اليومية والشهرية والفصلية والسنوية لحجم مياه الجريان السطحي ومناسيب المياه في الغالب تظهر تباينات كبيرة جراء تباين مصادر التغذية المائية وحجمها، وتكتسب عمليات تحديد معدلات حجم مياه الجريان السطحي أهمية كبيرة في الدراسات الهيدرولوجية لكونها تحدد أوقات الفيضان والجفاف مما يمكن المختصين من خزن مياه الفيضان واستثمارها في أوقات الجفاف والحد من الآثار البيئية السلبية لتباين حجم المياه. إن عملية تحديد التباين في حجم مياه الجريان السطحي تحصل من خلال رسم مخطط لمعدلات التدفق المائي، ويعرف هذا المخطط باسم الهيدروغراف (*Hydrograph*) وهو عبارة عن منحنى (*Curve*) يظهر التباين في حجم مياه الجريان السطحي ومناسيبها خلال مدة زمنية محددة (شكل 8). ويمكن تقسيم الجريان السطحي على وفق تباين مصادر التغذية المائية وحجم المياه وسرعة التيار المائي ومدة الجريان إلى صنفين رئيسين هما ما يأتي:

1- جريان العاصفة: *Storm Flow*

يقصد بجريان العاصفة تدفق المياه على سطح الأرض مباشرة بعد تساقط الأمطار وذوبان الثلوج. ويمتاز جريان العاصفة بضخامة حجم المياه وسرعة التيار العالية وتباين حجم المياه ومناسيبها ومدة التدفق المحدودة، إذ تتدفق المياه بشكل مفاجئ بعد تساقط الأمطار وذوبان الثلوج مما يولد تياراً مائياً كبيراً يجري بسرعة عالية ثم ينخفض حجم تدفق المياه وقد ينتهي بعد توقف عمليات التساقط والذوبان. ولذلك يعتمد حجم مياه جريان العاصفة ومدته على حجم مياه الأمطار المتساقطة والثلوج الذائبة ومدة التساقط والذوبان.

2- الجريان القاعدي: *Base Flow*

يقصد بالجريان القاعدي تدفق المياه الجوفية في المجاري المائية المتواجدة على سطح الأرض. ويمتاز الجريان القاعدي ببطء سرعة التيار والثبات النسبي لحجم المياه المتدفقة واستمرار مدة التدفق على طول السنة المائية تقريباً. يعتمد حجم مياه الجريان القاعدي على درجة الانحدار الهيدروليكي للمياه الجوفية وحجم المياه في الخزين الجوفي وسرعة حركة المياه الجوفية والتي تتأثر بشكل كبير بحجم التساقط الجوي ونظامه.

العوامل المؤثرة في الجريان السطحي:

Factors Effecting Runoff

1- كمية التساقط الجوي ونظامه: *Rainfall*

يعد التساقط الجوي بأشكاله كلها المصدر الرئيس للجريان السطحي ولذلك تزداد المياه الجارية وتغذية المجاري المائية بزيادة كمية الأمطار المتساقطة، وتمثل مياه الجريان السطحي نسبة تتباين بين 50- 95% من حجم التساقط الجوي على الأحواض المائية. كما أن لنظام التساقط الجوي وشكله علاقة بحجم مياه الجريان السطحي فقد يكون التساقط على شكل أمطار غزيرة تسبب الفيضانات وقد تكون الأمطار موسمية أو دائمية مما يؤثر على مدة التغذية المائية والجريان السطحي أو يكون التساقط الجوي على شكل ثلوج تذوب تدريجياً أو فجائياً مما يؤدي إلى حدوث اتزان في الجريان المائي أو جرياناً سريعاً يسبب الفيضانات.

2- التبخر السطحي: *Evaporation*

إن مقدار تغذية الأمطار المتساقطة للمجاري المائية يتأثر بشكل كبير بعمليات التبخر السطحي التي تؤدي إلى انخفاض القيمة الفعلية للأمطار، فلا يمكن أن يحدث الجريان السطحي والتغذية المائية إذا كانت كمية التبخر السطحي تفوق كمية الأمطار المتساقطة، ولذلك فغالباً ما تستمر مدة الجريان السطحي في الأقاليم الرطبة طول العام بسبب زيادة كمية الأمطار المتساقطة على كمية التبخر السطحي في مواسم السنة جميعها، في حين تقتصر مدة الجريان على أوقات تساقط الأمطار في الأقاليم الجافة بسبب زيادة كمية المجموع السنوي للتبخر السطحي على المجموع السنوي للأمطار المتساقطة.

3- نفاذية التربة: *Soil Permeability*

لنفاذية التربة علاقة عكسية بحجم مياه الجريان السطحي مما يؤثر على مقدار التغذية المائية للمجاري المائية، وذلك بسبب تأثير النفاذية على عمليات التسرب المائي. ولذلك يقل الجريان السطحي في الترب الرملية والحصوية بسبب النفاذية العالية مما يزيد من كميات المياه المفقودة بعمليات التسرب في حين يزيد الجريان السطحي في المناطق ذات الترب الطينية بسبب النفاذية المنخفضة وانخفاض كميات المفقودة بعمليات التسرب.

4- النبات الطبيعي: *Vegetation*

تتمثل علاقة النبات الطبيعي بمياه الجريان السطحي بجانبين متناقضين إذ يعمل النبات على اعتراض المياه السطحية الجارية مما يقلل من سرعة التيارات المائية ويزيد من كمية المياه المتسربة إلى داخل القشرة الأرضية مما يسهم في انخفاض حجم مياه الجريان السطحي ويقلل من حجم تغذيتها المائية، وبالمقابل يعمل النبات الطبيعي كمظلات تحمي المياه السطحية من الأشعة الشمسية المباشرة مما يسهم في انخفاض كمية المياه المتبخرة. يتحدد مدى تأثير النبات الطبيعي في المياه السطحية بنوع النباتات وكثافتها إذ ينخفض التأثير عند الانتقال من الأشجار في الغابات إلى حشائش السفانا ثم الأستبس في حين يتلاشى التأثير أو يكون ضئيلاً جداً في النباتات الصغيرة المتفرقة كما في المناطق الصحراوية.

5- حوض التصريف: *Drainage Basin*

إن مساحة الحوض تحدد كمية الجريان السطحي والتغذية المائية فالأحواض الكبيرة تستوعب كميات كبيرة من الأمطار المتساقطة لذلك يزداد حجم مياه الجريان السطحي مقارنة بالأحواض الصغيرة. كما يؤثر شكل الحوض في سرعة وصل المياه السطحية الجارية إلى منطقة المصب فالشكل الدائري يساعد على تجمع مياه الأمطار وصرفها في أوقات متقاربة في حين يكون تصريف المياه متعاقباً في الشكل المستطيل ولذلك يكون تركيز مياه الأنهار في الأحواض الدائرية الشكل كبير مقارنة بالأحواض الطولية.

6- الأنشطة البشرية: *Human Activities*

للإنسان تأثير كبير على مياه الجريان السطحي من خلال استخدامها في الأنشطة المختلفة (الزراعية والصناعية والمنزلية والشرب) مما يؤثر على كمية المياه ونوعيتها، كما يعمل الإنسان على حجز المياه وتنظيم عمليات جريانها في المجاري المائية من خلال إنشاء السدود والخزانات.

تقدير حجم الجريان السطحي: *Measurements of Runoff*

هناك العديد من الطرق التي يمكن من خلالها تقدير أو تخمين معدل أو حجم الجريان السطحي في الأحواض المائية، غير أن أبسط الطرق المعتمدة في تخمين الجريان السطحي اثنتان وكلتاهما تعتمدان العناصر المناخية ولاسيما الأمطار والحرارة وهما ما يأتي:

1- يمكن تخمين حجم الجريان السطحي بدلالة حجم الأمطار المتساقطة على الحوض المائي من خلال العلاقة الآتية:

$$\mathbf{R = KP}$$

إذ أن:
R = معدل حجم الجريان (ملم/م^2).
K = معامل يتباين بين 0.5 – 0.95 ومعدله (0.725).
P = حجم التساقط الجوي (ملم/سنة).

ولاستخراج الحجم الإجمالي للجريان السطحي في عموم الحوض يمكن اعتماد العلاقة الآتية:

$$\mathbf{Q = R \times A \times 1000}$$

إذ أن:
Q = أجمالي حجم الجريان السطحي (كم^3/سنة).
R = معدل حجم الجريان (ملم/م^2).
A = مساحة الحوض (كم^2).

2- يمكن تخمين حجم الجريان السطحي بدلالة متغيرين هما حجم الأمطار المتساقطة على الحوض المائي ومعدل درجة الحرارة من خلال العلاقة الآتية:

$$\mathbf{R = P - \frac{T}{3.74}}$$

إذ أن:

R = معدل حجم الجريان (ملم/م^2).
P = حجم التساقط الجوي (ملم/سنة).
T = معدل درجة الحرارة (درجة مئوية).

خامساً: الموازنة المائية: *Water Budget*

يقصد بالموازنة المائية عملية احتساب مقدار التغير في المخزون المائي لمنطقة محددة المساحة على سطح الأرض من خلال المقارنة بين حجم المياه الداخلة للمنطقة (*Input*) والخارجة منها (*Output*)، بعد تجزئة مكونات الدورة الهيدرولوجية واحتساب حجم المياه في المكونات جميعها. يفترض أن يتساوى حجم المياه الداخلة مع حجم المياه الخارجة في الأنظمة الهيدرولوجية المغلقة كالنظام الهيدرولوجي للكرة الأرضية والأنظمة الهيدرولوجية لكل قارة فضلاً عن النظام الهيدرولوجي لإجمالي المحيطات في العالم.

إن الموازنة المائية يمكن أن تتضمن مكونات الدورة الهيدرولوجية كلها وتشتمل الأقاليم الطبيعية جميعها في الكرة الأرضية (القارات والمحيطات) لتسمى بالموازنة المائية العالمية (*Global Water Budget*). ويمكن اقتصار الموازنة المائية على أحد الأقاليم الجغرافية (*Geographical Rejoins*) الطبيعية والبشرية كالقارات والمحيطات والدول والمحافظات والمقاطعات. كما يمكن تطبيق الموازنة المائية على الأحواض النهرية والخزانات الجوفية، وكذلك يمكن اقتصار الموازنة المائية على بعض مكونات الدورة الهيدرولوجية كالموازنة المائية المناخية (*Budget of Climatic Water*) التي تقتصر على عنصري التساقط الجوي والتبخر السطحي، فضلاً عن إمكانية تطبيق فكرة الموازنة المائية لتحديد الفرق بين حجم المياه المتاحة (*Water Availability*) في الأقاليم الجغرافية وبين حجم الاحتياجات المائية للاستخدامات البشرية المختلفة (الزراعية والصناعية والمنزلية والشرب).

أما الفترة الزمنية للموازنة المائية فيمكن تطبيقها على مدة زمنية قصيرة جداً كاليوم والشهر والموسم والسنة، ويمكن أن تمثل الموازنة المائية فترات زمنية طويلة تمتد إلى عشرات السنين من خلال اعتماد المعدلات العامة لعناصر الدورة الهيدرولوجية.

تكتسب الموازنة المائية أهمية كبيرة في الدراسات الهيدرولوجية وذلك لكونها تقدم البيانات اللازمة لمشاريع إدارة الموارد المائية وصيانتها من حالات الفيضان والتلوث، كما تحدد الموازنة المائية حجم المياه المتاحة للاستهلاك البشري ويعتمد عليها في مشاريع تجهيز المياه وإمدادها للسكان.

إن عملية تطبيق الموازنة المائية صعبة ومعقدة وذلك بسبب ارتباطها بمكونات الدورة الهيدرولوجية جميعها إذ تتكون عناصر الموازنة المائية من عمليات التساقط الجوي والتسرب الداخلي والتبخر والجريان السطحي والتي غالباً ما يصعب قياس حجم المياه في جميع عناصرها بشكل دقيق. غير أن معرفة حجم التساقط الجوي على مساحة محددة من سطح الأرض وحساب حجم التبخر السطحي والتسرب الداخلي وتخمين التغير في المخزون المائي فمن المحتمل حساب حجم الجريان السطحي المتوقع لتكتمل عملية احتساب الموازنة المائية.

معادلة الموازنة المائية: *The Water Budget Equation*

إن عملية تطبيق الموازنة المائية في الأقاليم الجغرافية تحصل من خلال تطبيق المعادلات الرياضية، ويختلف عدد عناصر أو أطراف تلك المعادلات على وفق نوع الموازنة المائية المراد تطبيقها، غير أن المعادلة العامة للموازنة المائية تشتمل على العناصر الآتية:

$$\mathbf{P \pm E \pm \Delta S \pm Q = 0}$$

إذ أن
P = حجم التساقط الجوي.
E = حجم التبخر السطحي.
ΔS = حجم التغير في المخزون المائي.
Q = حجم الجريان السطحي.

إن التساقط الجوي (P) يعد نقطة الشروع في تطبيق الموازنة المائية في أغلب الدراسات الهيدرولوجية، وذلك لكون التساقط الجوي يمثل المصدر الرئيس لحجم المياه الداخلة (*Input*) إلى الأحواض المائية، ويمثل التبخر السطحي (E) أبرز مكونات المياه الخارجة (*Output*) من الحوض المائي وذلك بسبب ضخامة مياه التبخر السطحي. إن مقدار الفرق بين حجم التساقط الجوي وحجم التبخر السطحي يحدد حجم التغير في المخزون المائي (ΔS) والذي يمثل حجم المياه المخزونة في الكتل الجليدية والثلوج وكذلك يمثل حجم المياه المتسربة لتغذية المياه الجوفية. إن زيادة التساقط الجوي على حجم التبخر السطحي في الحوض المائي يعمل على زيادة المخزون المائي مما يؤدي إلى جريان المياه الفائضة من التساقط الجوي على سطح الحوض المائي ليتشكل الجريان السطحي (Q) إذ يتمثل الجريان السطحي بحسب المعادلة الآتية:

$$\mathbf{Q = P - (E + \Delta S)}$$

1- الموازنة المائية في القارات:

Water Budget In The Continents

تتضمن الموازنة المائية في القارات ثلاثة عناصر رئيسة وهي كل من التساقط الجوي والتبخر السطحي والجريان السطحي، إذ يمثل التساقط الجوي حجم المياه الداخلة للقارات في حين يمثل التبخر السطحي والجريان السطحي حجم المياه الخارجة من القارات.

يتباين معدل حجم التساقط الجوي على سطح القارات بين 1648 ملم/سنة في قارة أمريكا الجنوبية لتمثل أعلى معدلات التساقط الجوي في قارات العالم، في حين ينخفض المعدل إلى 670 ملم/سنة في قارة أمريكا الشمالية ليمثل أدنى معدلات التساقط الجوي في قارات العالم (جدول 13).

يعد التساقط الجوي المصدر الأساس لدخول المياه في القارات غير أن حجم مياه التساقط الجوي يعتمد على معدلات التساقط الجوي ومساحة القارة، ولذلك يتباين حجم المياه الداخلة إلى القارات إذ يرتفع الحجم إلى حوالي 31.65 ألف كم^3/سنة في قارة آسيا وينخفض حجم مياه التساقط الجوي إلى حوالي 6.4 ألف كم^3/سنة في قارة استراليا.

أما التبخر السطحي فقد تباينت معدلاته في القارات بين 1065 ملم/سنة في قارة أمريكا الجنوبية ليمثل أعلى معدلات التبخر السطحي في قارات العالم، في حين ينخفض المعدل إلى 415 ملم/سنة في قارة أوربا ليمثل أدنى معدلات التبخر السطحي في قارات العالم (جدول 13). يعد التبخر السطحي

من المصادر الرئيسة لمخرجات المياه من القارات من خلال دوره في تناقص حجم مياه التساقط الجوي، ويتباين حجم فواقد التبخر السطحي في القارات بين حوالي20.187 ألف كم^3/سنة في قارة آسيا ليمثل أكثر قارات العالم في فواقد التبخر السطحي، في حين ينخفض حجم المياه المتبخرة في قارة أوربا إلى حوالي 4 ألف كم^3/سنة ليمثل أدنى قارات العالم في فواقد التبخر.

إن نتيجة الموازنة المائية المناخية (P - E) إيجابية في قارات العالم المختلفة كلها، إذ يتباين حجم الزيادة المطرية على فواقد التبخر السطحي بين حوالي+11.5 ألف كم^3/سنة في قارة آسيا لتمثل أكثر قارات العالم في الزيادة

جدول 13 الموازنة المائية في القارات.

القارات	المساحة مليون كم^2	معدل التساقط ملم/سنة	حجم التساقط ألف كم^3	معدل التبخر ملم/سنة	حجم التبخر ألف كم^3	الموازنة المائية المناخية ألف كم^3
آسيا	43.6	726	31.654	463	20.187	+11.467
أفريقيا	30.3	686	20.786	547	16.574	+4.212
أمريكا ش	35.5	670	23.785	483	17.147	+6.638
أمريكا ج	17.9	1648	29.499	1065	19.064	+10.435
أوربا	9.8	734	7.193	415	4.067	+3.126
استراليا	8.7	736	6.403	519	4.515	+1.888
المجموع	135.8	*879	119.32	*601	81.554	+37.77

المصادر:

Subramanya, K. 2004. Engineering Hydrology, Second Edition, New Delhi, 392 P.

* يمثل المعدل الموزون وليس الوسط الحسابي.

المطرية، في حين ينخفض حجم الزيادة المطرية إلى حوالي 1.9 ألف كم^3/سنة في قارة استراليا لتمثل أدنى قارات العالم في الزيادة المطرية (جدول 13). إن النتيجة الايجابية للموازنة المائية المناخية في القارات (الزيادة المطرية) تمثل الجريان السطحي الذي يقدر حجمه الإجمالي بحدود 37.77 ألف كم^3/سنة، إذ يتوزع التساقط الجوي في القارات بشكل رئيس بين التبخر والجريان السطحي، ولذلك تتمثل الموازنة المائية للتساقط الجوي والتبخر السطحي والجريان السطحي في القارات بالمعادلات الآتية:

P = E + Q ---------- (1)

E = P – Q ---------- (2)

Q = P – E ---------- (3)

إن الجريان السطحي يمثل الطرف الثالث في معادلة الموازنة المائية للقارات كما يمثل العنصر الثاني لمخرجات المياه من القارات، إذ يعمل الجريان السطحي على نقل المياه التي أنتجتها الزيادة المطرية من سطح القارات إلى البحار والمحيطات، مما يؤدي إلى تساوي حجم المياه الداخلة في القارات بفعل التساقط الجوي مع حجم المياه الخارجة من القارات بفعل التبخر السطحي والجريان السطحي. ولذلك تتمثل الموازنة المائية في القارات من خلال المعادلة الآتية:

$$\mathbf{P \pm E \pm Q = 0}$$

2- الموازنة المائية في المحيطات:

Water Budget In The Oceans

إن الموازنة المائية في المحيطات تتضمن ثلاثة عناصر رئيسة أيضاً وهي كل من التساقط الجوي والتبخر السطحي والجريان السطحي غير أن المدخلات المائية (*Water Input*) تتمثل في حجم التساقط الجوي (P) وحجم المياه في مصبات الجريان السطحي (Q)، في حين تتمثل المخرجات المائية في حجم التبخر السطحي (E) فقط.

إن معدلات التساقط الجوي في المحيطات مرتفعة وذات تباينات كبيرة مقارنة بمعدلات التساقط الجوي في القارات، إذ تتباين المعدلات بين 1210 ملم/سنة في المحيط الهادئ لتمثل أعلى معدلات التساقط الجوي في محيطات العالم، في حين ينخفض المعدل إلى 240 ملم/سنة في المحيط المتجمد الشمالي ليمثل أدنى معدلات التساقط الجوي في المحيطات (جدول 14). مما انعكس على حجم المدخلات المائية للتساقط الجوي في المحيطات، إذ يرتفع في المحيط الهادئ إلى حوالي 219.37 ألف كم^3/سنة وينخفض حجم مياه التساقط الجوي إلى حوالي 2.95 ألف كم^3/سنة في المحيط المتجمد الشمالي.

أما معدلات التبخر السطحي في المحيطات فهي مرتفعة جداً وذات تباينات كبيرة جداً مقارنة بمعدلات التبخر السطحي في القارات، إذ يرتفع المعدل إلى 1380 ملم/سنة في المحيط الهندي ليمثل أعلى معدلات التبخر السطحي في المحيطات، وينخفض المعدل إلى 120 ملم/سنة في المحيط المتجمد الشمالي ليمثل أدنى معدلات التبخر السطحي في محيطات العالم (جدول 14). يعد التبخر السطحي المصدر الرئيس لمخرجات المياه من المحيطات، ويتباين حجم المياه المتبخرة من المحيطات بين حوالي 206.68 ألف كم^3/سنة في المحيط الهادئ ليمثل أكثر محيطات العالم في فواقد التبخر السطحي، في حين ينخفض حجم التبخر إلى حوالي 1.47 ألف كم^3/سنة في المحيط المتجمد الشمالي ليمثل أدنى المحيطات في فواقد التبخر.

إن نتيجة الموازنة المائية المناخية (P - E) في المحيطات تكون إيجابية في المحيط الهادئ وبمقدار +12.691 ألف كم^3/سنة وإيجابية في المحيط المتجمد الشمالي أيضاً وبمقدار + 1.476 ألف كم^3/سنة، في حين تكون نتيجة الموازنة

جدول 14 الموازنة المائية في المحيطات.

المحيطات	المساحة مليون كم^2	معدل التساقط ملم/سنة	حجم التساقط ألف كم^3	معدل التبخر ملم/سنة	حجم التبخر ألف كم^3	الموازنة المائية المناخية ألف كم^3
الهادي	181.3	1210	219.373	1140	206.682	+12.691

الأطلسي	94.3	780	73.554	1040	98.072	24.518-
الهندي	74.1	1010	74.841	1380	102.258	27.417-
المتجمد	12.3	240	2.952	120	1.476	1.476+
المجموع	362	*1024	370.720	*1128	408.488	37.77-

المصادر:

Subramanya, K. 2004. Engineering hydrology, Second Edition, New Delhi, 392 P.

* يمثل المعدل الموزون وليس الوسط الحسابي.

المائية المناخية سلبية في المحيط الأطلسي وبمقدار- 24.518 ألف كم^3/سنة وسلبية في المحيط الهندي أيضاً وبمقدار -27.417 ألف كم^3/سنة. ولذلك تكون النتيجة الإجمالية للموازنة المائية المناخية في المحيطات هي سلبية وبمقدار -37.77 ألف كم^3/سنة.

تمثل مصبات الجريان السطحي الطرف الثالث في معادلة الموازنة المائية في المحيطات كما تمثل العنصر الثاني لمدخلات المياه، ويقدر حجم مصبات الجريان السطحي في المحيطات بحدود 37.77 ألف كم^3/سنة. إن الموازنة المائية للتساقط الجوي والتبخر السطحي والجريان السطحي في المحيطات تتمثل في المعادلة الآتية:

$$\mathbf{P + Q = E}$$

إن حجم التبخر السطحي الذي يمثل حجم المياه الخارجة من المحيطات تساوي حجم المياه الداخلة فيها والمتمثل بحجم التساقط الجوي ومصبات مياه الجريان السطحي. وعليه فإن الموازنة المائية في المحيطات تتمثل في المعادلة الآتية:

$$\mathbf{P \pm E \pm Q = 0}$$

3- الموازنة المائية في الكرة الأرضية:

Water Budget In The Earth

تتمثل الموازنة في الكرة الأرضية بالموازنة المائية المناخية فقط وذلك لاقتصار المدخلات المائية على عنصر التساقط الجوي (P) فقط، في حين تقتصر المخرجات المائية على التبخر السطحي (E) فقط. يقدر الحجم الإجمالي للتساقط الجوي في الكرة الأرضية بحدود 490.04 ألف كم^3/سنة، وكذلك هي الحال في التبخر السطحي إذ يقدر حجمه الإجمالي في الكرة الأرضية بحدود 490.04 ألف كم^3/سنة (جدول 15). مما يعني تساوي قيم التساقط الجوي مع التبخر السطحي. ولذلك تتمثل الموازنة المائية في الكرة الأرضية بالمعادلات الآتية:

$$\mathbf{P - E = 0 \text{ ------- } (1)}$$

$$\mathbf{P = E \text{ -------- } (2)}$$

جدول 15 الموازنة المائية في الكرة الأرضية.

الموقع	حجم التساقط ألف كم^3	حجم التبخر ألف كم^3	الموازنة المائية المناخية
القارات	119.32	81.554	+37.77
المحيطات	370.72	408.488	-37.77
المجموع	490.04	490.04	00.00

التغير المناخي والدورة الهيدرولوجية:

Climate Change and Water Budget

إن المناخ الأرضي يتعرض للتغير والتبدل بصورة مستمرة مما يعمل على تغير حجم المياه في مكونات الدورة الهيدرولوجية ويؤثر في النتيجة النهائية للموازنة المائية في القارات والمحيطات. إذ يفترض في الموازنة المائية ثبات حجم المياه في أشكالها المختلفة جميعها غير أن التبدل المناخي يعمل على تبدل المياه بين أشكلها المختلفة، مما يؤثر على طبيعة الموازنة المائية في القارات وكذلك هي الحال في المحيطات.

إن تغير المناخ الأرضي نحو الخصائص المناخية الدافئة يعمل على زيادة معدلات التساقط الجوي والتبخر السطحي وانخفاض حجم المخزون المائي في القارات والمتمثل في الكتل الجليدية بسبب ارتفاع درجات الحرارة التي تعمل على زيادة شدة ذوبان الجليد وانخفاض حجم التساقط الثلجي لحساب التساقط المطري. إن ازدياد ذوبان الكتل الجليدية يسهم في زيادة حجم الجريان السطحي ورطوبة التربة والمياه الجوفية في القارات وزيادة حجم بخار الماء في الغلاف الجوي وزيادة حجم المياه في المحيطات واتساع مساحتها. لذلك تكون نتيجة الموازنة المائية في المناخ الدافئ سلبية في القارات ويرجع سبب ذلك بشكل رئيس إلى انخفاض حجم المياه المخزونة في الكتل الجليدية وزيادة حجم الجريان السطحي الذي يعمل على نقل المياه من القارات إلى المحيطات، وتتمثل الموازنة المائية في القارات بالمعادلة الآتية:

$$P \pm E \pm \Delta S \pm Q = (-)$$

في حين تكون نتيجة الموازنة المائية في المناخ الدافئ إيجابية في المحيطات بسبب زيادة حجم مصبات الجريان السطحي، وتتمثل الموازنة المائية في القارات بالمعادلة الآتية:

$$P \pm E \pm Q = (+)$$

في حين يعمل تغير المناخ الأرضي نحو خصائص المناخ البارد على انخفاض معدلات التساقط الجوي والتبخر السطحي وازدياد حجم المخزون المائي في القارات من خلال زيادة حجم الكتل الجليدية بسبب انخفاض درجات الحرارة وزيادة حجم التساقط الثلجي على حساب التساقط المطري. مما يسهم في انخفاض حجم الجريان السطحي ورطوبة التربة والمياه الجوفية في القارات وانخفاض

حجم بخار الماء في الغلاف الجوي وانخفاض حجم المياه في المحيطات وتقلص مساحتها. لذلك تكون نتيجة الموازنة المائية في المناخ البارد ايجابية في القارات وتتمثل بالمعادلة الآتية:

$$\mathbf{P \pm E \pm \Delta S \pm Q = (+)}$$

في حين تكون نتيجة الموازنة المائية في المناخ البارد سلبية في المحيطات وتتمثل بالمعادلة الآتية:

$$\mathbf{P \pm E \pm Q = (-)}$$

أما الموازنة المائية في إجمالي الكرة الأرضية فتكون دائماً في حالة التوازن بين حجم المدخلات المائية والمتمثلة بالتساقط الجوي وحجم المخرجات المائية والمتمثلة بالتبخر السطحي إذ تتمثل الموازنة المائية للكرة الأرضية في خصائص المناخ الدافئة والباردة بالمعادلات الآتية:

$$\mathbf{P - E = 0 \text{ ------- } (1)}$$

$$\mathbf{P = E \text{ -------- } (2)}$$

تغير المناخ الأرضي: *Change of Earth's Calamite*

إن المعدلات العامة للعناصر المناخية السائدة حالياً في الكرة الأرضية تمثل خصائص المناخ الدافئ، غير أن المعدلات العامة للعناصر المناخية الحالية غير ثابتة وإنما تتغير مع الزمن بشكل غير خطي تجاه الزيادة في الدفء. إذ ارتفعت درجات الحرارة فوق القارات بمعدل يقدر بحدود 0.74 درجة مئوية وفوق المحيطات بمعدل يقدر بحدود 0.6 درجة مئوية خلال القرن العشرين، مما يؤثر على الأنظمة البيئية (*Ecosystems*) جميعها في الكرة الأرضية ومنها الأنظمة الهيدرولوجية وحجم المياه في مكونات الدورة الهيدرولوجية، إذ أدى الارتفاع في معدلات درجات الحرارة إلى تناقص الغطاء الجليدي بمقدار 5% خلال القرن العشرين، كما أن ارتفاع درجات الحرارة يؤثر في حجم الجريان السطحي إذ ارتفعت المعدلات السنوية لجريان المياه في الأنهار بمقدار 10- 40% في العروض العليا والأقاليم الرطبة، في حين انخفضت معدلات الجريان بين 10- 30% في العروض المدارية والأقاليم الجافة[13]، وإجمالاً يزداد حجم الجريان السطحي بمقدار 4% عندما ترتفع درجة الحرارة بمقدار 1 درجة مئوية[14]، مما ينعكس على حجم المياه المنصرفة للمحيطات إذ ارتفع منسوب المحيطات بمعدل 0.5 متر خلال القرن العشرين مما يؤدي إلى توسع مساحة المحيطات على حساب المناطق الساحلية من القارات. إن ارتفاع درجات الحرارة في الكرة الأرضية واتساع مساحة المحيطات والجريان السطحي يسهم بلا ريب في زيادة معدلات التبخر السطحي مما يؤدي إلى زيادة معدلات التساقط الجوي ولاسيما التساقط المطري وكذلك يسهم في ازدياد حجم بخار الماء في الغلاف الجوي، كما إن ازدياد حجم الجريان السطحي ومعدلات التساقط الجوي يسهم في زيادة رطوبة التربة وتغذية المياه الجوفية.