

الأمطار والسيول والسدود



عبد الله بن محمد العمري

قسم الجيولوجيا والجيوفيزياء - كلية العلوم - جامعة الملك سعود

١٤٤٤ هـ - ٢٠٢٣ م



www.alamrigeo.com





ح عبد الله بن محمد العمري، ١٤٤٣هـ

فهرسة مكتبة الملك فهد الوطنية أثناء النشر

العمري ، عبدالله بن محمد سعيد

الأمطار والسيول والسدود. / عبدالله بن محمد سعيد العمري - ط ١ -

الرياض، ١٤٤٣هـ

١٩٨ ص ، ٢١،٥ X ٢٨

ردمك: ٤-١٩٨١-٠٤-٦٠٣-٩٧٨

١ - السيول - السعودية ٢ - السدود أ. العنوان ب. الموسوعة

١٤٤٣ / ١٢٠٩٠

ديوي ٥٢٦,٩٨٢٣

رقم الإيداع ١٤٤٣ / ١٢٠٩٠

ردمك: ٤-١٩٨١-٠٤-٦٠٣-٩٧٨

حقوق طبع الموسوعة محفوظة للمؤلف

مع عدم السماح ببيعها .. ويمكن إعادة طباعتها وتوزيعها مجاناً بدون أي تعديل في الاسم أو المحتوى

تطلب النسخة الورقية المجانية من المؤلف على العنوان التالي:

قسم الجيولوجيا والجيوفيزياء - جامعة الملك سعود ص.ب 2455 الرياض 11451

الإصدار الإلكتروني من خلال الموقع

www.alamrigeo.com

للاستفسارات والملاحظات الاتصال على:

جوال +966505481215 هاتف +966 11 4676198

البريد الإلكتروني E.mail : alamri.geo@gmail.com



الطبعة الأولى

١٤٤٤هـ / ٢٠٢٣م



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

﴿ وَفِي الْأَرْضِ آيَاتٌ لِلْمُوقِنِينَ ﴾

[سورة الذاريات : آية 20]

﴿ And on the Earth are Signs for
Those Whose Faith is Certain ﴾



موسوعة الأمطار والسيول والسدود





مَهَيِّدٌ

الحمد والشكر لله الذي ساعدني في إنجاز هذا الجهد المتواضع المرتبط بتأليف الموسوعة العلمية العربية. تهدف الموسوعة العلمية الشاملة في علوم الأرض والبيئة والطاقة إلى تزويد وخدمة الباحثين وطلاب المدارس والجامعات وفئات المجتمع نظراً لمعاناة المهتمين من مشاكل ندرة المراجع العربية في هذا المجال. تشتمل الموسوعة المجانية والتي تعتبر الأضخم عالمياً على 30 كتاب علمي ثقافي موثق ومدعم بالصور والأشكال التوضيحية المبسطة في 6000 صفحة تقريباً تغطي خمسة أجزاء رئيسية:

الجزء الأول مكون من ستة كتب يناقش عمر الأرض وشكلها وحركاتها وتركيبها الداخلي وثرواتها المعدنية والتعدينية والجاذبية الأرضية وعلاقتها بالمد والجزر:

تقدير عمر الأرض

التركيب الداخلي للأرض

شكل الأرض وحركاتها

المعادن والتعدين

الجاذبية الأرضية وتطبيقاتها

المد والجزر

الجزء الثاني من الموسوعة يشتمل على ستة كتب تربط علاقة الأرض بالنظام الشمسي وبالأخص القمر والأغلفة الجوية والمائية والحيوية المحيطة بالأرض. وكذلك دور الزلازل والتفجيرات والبراكين والتسونامي في التأثير على بنية الأرض وكيفية تقليل مخاطرها:

موجات التسونامي

البراكين وسبل مجابته

الزلازل والتفجيرات

جيولوجية القمر

تقييم مخاطر الزلازل

الأغلفة المحيطة بالأرض





الجزء الثالث يتألف من ستة كتب يربط كل ما يتعلق بالمشاكل والكوارث البيئية والطبيعية وحلولها والتغيرات المناخية وأهمية التشجير ومعالجة الاحتباس الحراري:

- | | |
|-----------------------------------|-------------------------------------|
| الانزلاقات والإنهيارات والفيضانات | المشاكل البيئية وحلولها |
| الأمطار والسيول والسدود | التغيرات المناخية والاحتباس الحراري |
| التصحّر والجفاف | التشجير: التحديات والحلول |

الجزء الرابع يتكون من ستة كتب يناقش ارتباط علوم الأرض بالعلوم الأخرى نووياً وطبيياً، وكذلك دور الطاقة المستدامة النظيفة اقتصادياً وبيئياً:

- | | |
|-------------------------------------------|-------------------------|
| الجيوفيزياء النووية | مستقبل الطاقة في عالمنا |
| الجيولوجيا الطبية | الطاقة الحرارية الأرضية |
| دليل كتابة الرسائل الجامعية والنشر العلمي | هل إنتهى عصر النفط؟ |

أما **الجزء الخامس** يتألف من ستة كتب متخصصة في العلوم الجيولوجية مكونة من 2020 سؤال وجواب لمساعدة طلاب الجامعات والباحثين وتهيئتهم للاختبارات الشاملة والتأهيلية للدراسات العليا ومزاولة المهنة:

321 سؤال وجواب في تطور الأرض	
358 سؤال وجواب في علم الصخور والجيوكيمياء والاستشعار عن بُعد والـ GIS	
358 سؤال وجواب في الثروات الطبيعية	
380 سؤال وجواب في المخاطر الجيولوجية	
303 سؤال وجواب في علم الزلازل والزلازل الهندسية	
300 سؤال وجواب في الجيوفيزياء التطبيقية	

المؤلف



مقدمة

سبحان من جعل من الماء كل شيء حيّ، فما أن تُذكر كلمة الحياة إلا ويقابلها على الفور كلمة (ماء). ولعل كثيراً من الناس لا يعلم أن جوهر رحلات الاستكشاف الفضائية هي عملية البحث عن الماء أولاً وأخيراً، فإذا وُجد الماء فإن أية مشكلة أخرى قابلة للحل.

حتى على الأرض ما كانت الحضارات لتتسأ أو تتشكل في بلاد الرافدين أو وادي النيل لولا توفر الماء، حتى قيل إن مصر هبة النيل. وفي المقابل انهارت الحضارات عندما قلّت مصادر المياه. وقد تنشب صراعات وحروب بين الناس من أجل الاستيلاء على مصادر المياه.

لا يقتصر دور المياه على سدّ حاجة الكائنات الحية للشراب أو الطعام، وإنما تؤدي المياه دوراً هائلاً وكبيراً في تشكيل تضاريس الأرض. فالمثلج المتجمدة تشق مجاري الوديان وتقطع الجبال، ويمكن لمياه الأنهار أن تحمل بقايا الصخور وتسوقها لأماكن بعيدة، وتصدم مياه البحار والمحيطات صخور الشواطئ وتحطمها، والمطر يهطل على اليابسة ويجرف التربة إلى الأنهار.

إذاً المياه قوّة هائلة وفاعلة في كل مكونات كوكب الأرض الحية وغير الحية. ومع أننا نعيش على كوكب نسبة المياه عليه 97%، إلا أن ما يصلح منه للشرب





أو الزراعة أو الصناعة هو فقط 3%، وقد تضاعفت احتياجات البشرية للمياه العذبة في عام 2000 عما كانت عليه في ثمانينيات القرن العشرين، ومع ذلك هناك كمية ما تكفي البشرية جمعاء.

سنناول في كتابنا هذا الحديث عن **ثلاثة موضوعات** هي: الأمطار وكيفية تشكلها، وعملية الاستمطار الصناعي والتقنيات المتعلقة به والتجارب الناجحة في البلدان التي قامت بتجربته، ثم ننتقل إلى السيول التي تنتج عن الهطولات المطرية الغزيرة وكيفية التحكم بها، وأخيراً سنتكلم عن السدود وتاريخها وأنواعها ودورها الكبير في التحكم بالأنهار.





كيف تتشكل الأمطار الطبيعية؟

المطر **Rain** هو المياه التي تتساقط على السطح من الغلاف الجوي في شكل سائل، سواء أكان يسقط على شكل مطر، أم رذاذ، أم ضباب، أم ثلج، أم صقيع، أم مطر متجمد، أم برد، يجري قياسه كمكافئ للماء السائل.

طبعاً تختلف أنواع وكميات **هطول الأمطار** في أجزاء مختلفة من العالم اختلافاً كبيراً، من الأماكن التي لم تشهد مطلقاً أي هطول يمكن قياسه إلى الأماكن التي تتلقى بانتظام **مئات السنتمترات** من الأمطار سنوياً. يكون هطول الأمطار موسميّاً بشدة في بعض الأماكن، مع مواسم جافة ورطبة، ويجري توزيعها بانتظام في مناخات أخرى.

• أشكال الهطولات المطرية

المطر عبارة عن هطول سائل بقطر يزيد على (0.5 ملم)، بينما يبلغ قطر رذاذ المطر (0.2 - 0.5 ملم). الضباب عبارة عن سحابة تقع قاعدتها على السطح، وتحوي على جزيئات أصغر لا تتحول إلى هطول حقيقي إلا عندما تدفعها الرياح ضد السطح أو الأرض.

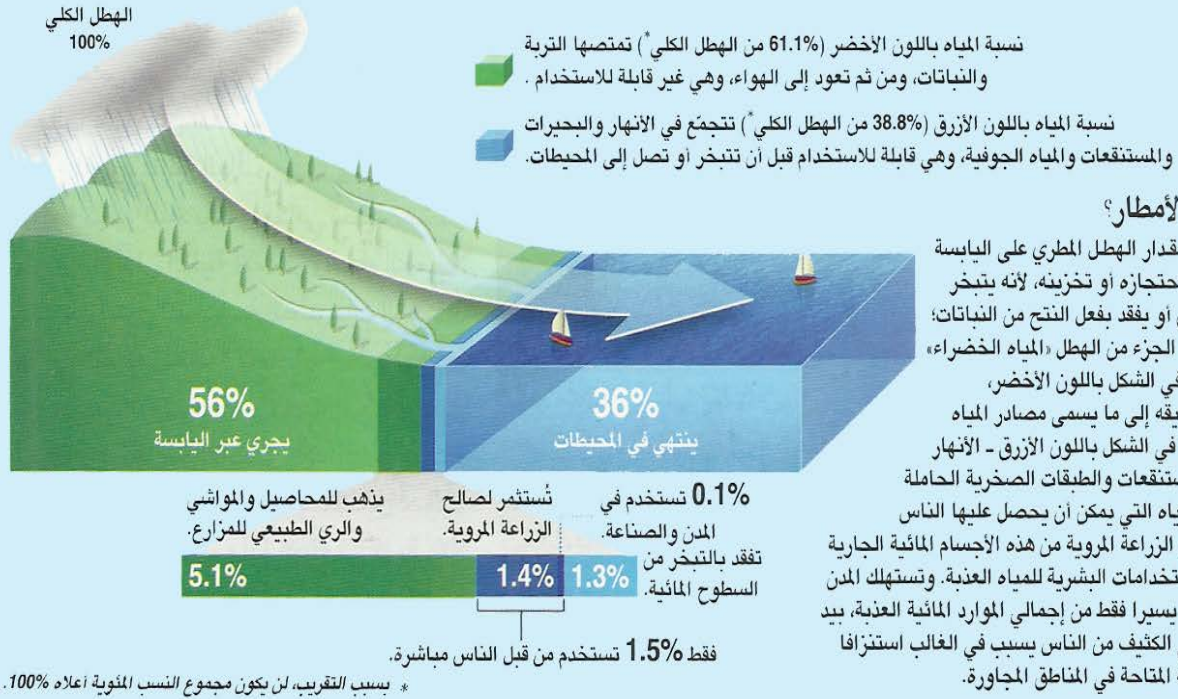
يسقط المطر المتجمد والرذاذ في شكل سائل ولكن يتجمد عند اصطدامه بالأسطح الباردة على الأرض، مما يؤدي إلى تكوين طبقة متجمدة تعرف باسم الصقيع. يتكون الصقيع من حبيبات جليدية متجمدة يبلغ قطرها أقل من (5 ملم)، ويتكون البرد من جزيئات أكبر شفاقة إلى غير شفاقة يبلغ قطرها عادة (5 ملم - 2 سم)، ولكنها تصير في بعض الأحيان بحجم كرات الجولف ونادراً ما تصير بحجم حبة الجريب فروت. أما الثلج فهو هطول متجمد يتكون من بلّورات جليدية سداسية معقدة تسقط على الأرض.





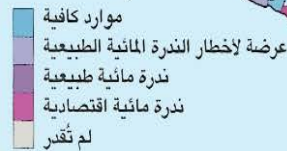
المياه كثيرة، ولكنها ليست دائما في أمكنة الحاجة إليها^(*)

يهطل على سطح الأرض سنويا عشرة آلاف كيلومتر مكعب من الأمطار، أي ما يعادل عشرة أضعاف حجم البحيرة Lake Superior. وتعتبر هذه الكمية الضخمة كافية لتلبية احتياجات كل فرد على الكوكب فيما إذا وصلت هذه المياه إلى المكان الذي يعيش فيه وزمان الحاجة إليها. بيد أن الجزء الأعظم لا يمكن الحصول عليه (أعلى الشكل) والباقي يتوزع بشكل غير منتظم (أسفل الشكل).



الإمدادات المائية حاليا

ينعم الجزء الأعظم من الأمريكتين وشمال قارتي أوروبا وآسيا بإمدادات مائية وفيرة. بيد أن عدة مناطق تعاني الندرة المائية الطبيعية بدرجات متباينة - حيث يتجاوز الطلب على المياه العذبة الموارد المتاحة لها محليا. أما المناطق الأخرى، منها أواسط إفريقيا وأجزاء من شبه القارة الهندية وجنوب شرق آسيا، فإنها تنصدي لندرة مائية اقتصادية، حيث يحد غياب التدريب التقني والحكومات الفاسدة أو التمويل الهزيل من إمكانية الحصول على المياه، على الرغم من وجود إمدادات كافية.





في المناطق الاستوائية والمناخات المعتدلة في الأجزاء الأكثر دفئاً من العام، تهطل معظم الأمطار على شكل مطر ورذاذ. يُعرّف المطر الغزير بأنه أكثر من (4 ملم) من التساقط في الساعة، وهطول الأمطار المعتدلة (4 ملم - 0.5 ملم) في الساعة، والمطر الخفيف (يطلق عليه عادة رذاذ) أقل من (0.5 ملم) في الساعة.

الأمطار المتكررة والمستمرة من سمات بعض المناطق؛ يتميز البعض الآخر بأمطار غزيرة نادرة ولكنها شديدة، بما في ذلك العواصف الرعدية التي قد تتسبب في تساقط البرد. في المرتفعات العالية وخطوط العرض العالية وفي خطوط العرض الوسطى في الأشهر الباردة، يسقط معظم هطول **الأمطار** بشكل جسيمات صلبة مجمدة. وتسقط معظم **الأمطار** المتجمدة على شكل ثلج يحوي عادةً على ما يعادل عُشر كمية الثلج المتساقط (أي أن 10 سم³ من الثلج تساوي 10 ملم³ من المطر). تتميز بعض المناطق بالمطر المتجمد والصقيع أكثر من الثلوج، ولا سيما المناطق الساحلية المتأثرة بتيارات المحيط الدافئة.

تُعد الارتفاعات العالية داخل السحب أو الأنظمة الكبيرة ضرورية بشكل عام لبدء تكوين قطرات الماء التي تتحول إلى هطول. يمكن لخلايا الحمل الحراري في القمم الرعدية، والهواء المدفوع فوق الجبال، ومناطق التقارب على طول الجبهات، والأنظمة الإعصارية أن تكون على ارتفاعات كبيرة وتحفز هطول **الأمطار**.

واحدة من أكبر العقبات التي يجب التغلب عليها حتى يتشكل هطول **الأمطار** هي أن الماء الصغير جداً (أو أن قطرات الجليد) التي تفصل بينها مساحات واسعة جداً يجب أن تتحد لتشكيل جزيئات كبيرة بما يكفي لتقع على شكل هطول مطري. بالإضافة إلى ذلك، يجب أن تتغلب الجزيئات على قوى التبخر أثناء صعودها أو سقوطها عبر الهواء غير المشبع من أجل الوصول إلى الأرض.





تساعد الحركات الجانبية والعمودية السريعة في السحب، التي تؤدي إلى الاصطدام بين الجسيمات، في اندماج الجسيمات، ثم تسرع الجاذبية الجسيمات إلى الأرض مع سقوط الجسيمات الأكبر في البداية أسرع من الجزيئات الأصغر نظراً لأنها أقل تأثراً بالتيارات الصاعدة. لذلك تميل الجسيمات الكبيرة إلى الاصطدام مع الجسيمات الأصغر ودمجها.

تتشكل الجسيمات المتجمدة في المستويات العليا من أنظمة السحب المتسعة عمودياً وقد تسقط بالتناوب وتخرج من المستويات الأدنى، حيث تذوب وتتمو وترتفع جزئياً في عمليات الترطيب. يمكن أن ينتج عن مثل هذا التدوير جزيئات كبيرة نسبياً قد تسقط على شكل هطول مطري.

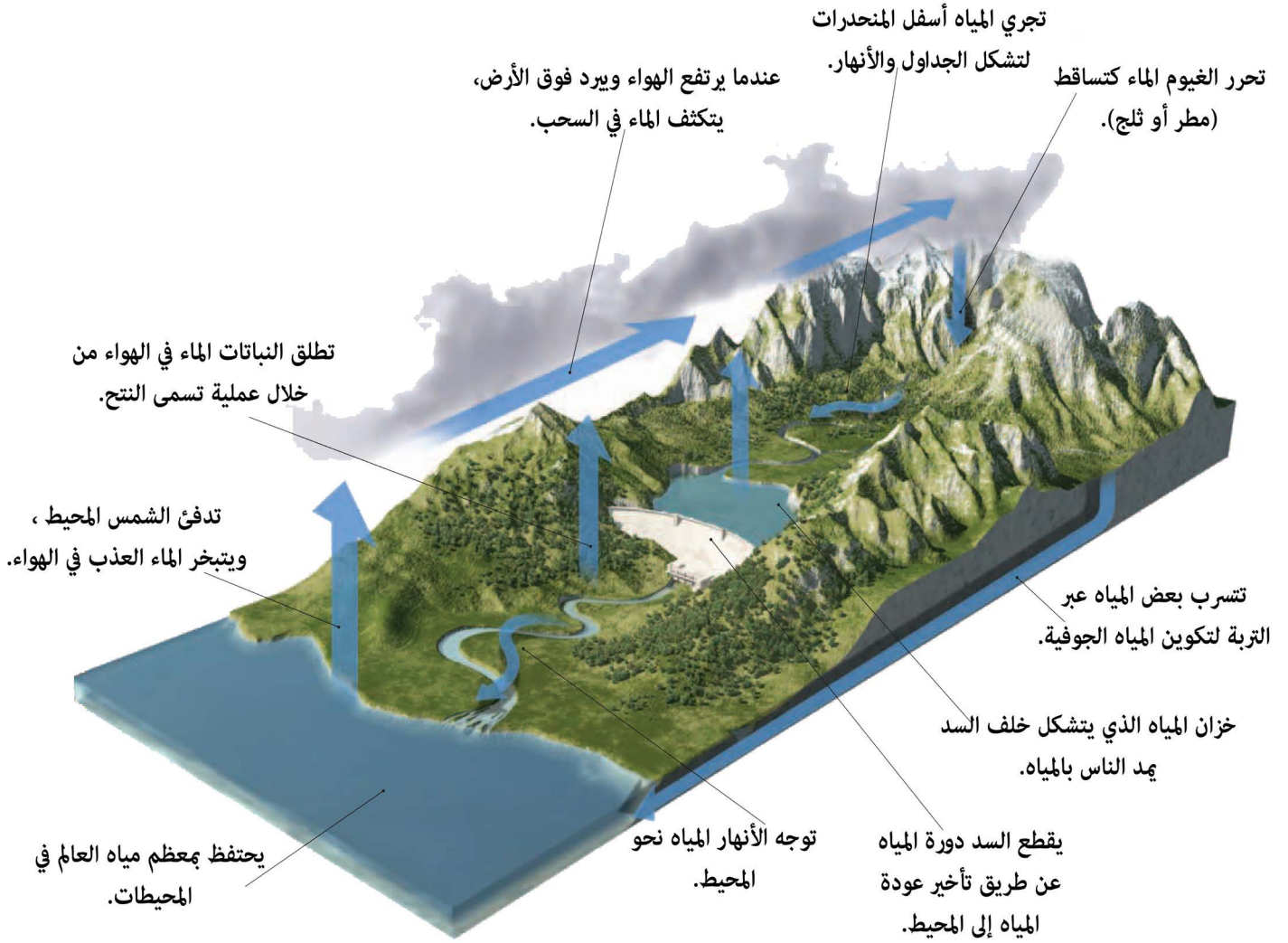
• الدورة المائية

يتحرك الماء من خلال دورة مستمرة بين المحيطات والغلاف الجوي والأرض تدعى **الدورة المائية Water cycle** أو **الدورة الهيدرولوجية Hydrologic cycle**.

وهي توفر المياه العذبة الضرورية للحياة على الأرض. كما تظهر الدورة المائية الحركة المستمرة للماء داخل الأرض والغلاف الجوي. إنها نظام معقد يتضمن العديد من العمليات المختلفة.

1. مخطط الدورة المائية

خلال هذه العملية، يغير الماء حالته من مرحلة إلى أخرى، لكن العدد الإجمالي لجزيئات الماء يبقى كما هو. بمعنى آخر، إذا كان من الممكن جمع 100 غرام من الماء وعلوها، فستبقى تحتفظ بكتلة 100 غرام كبخار. وبالمثل، إذا جُمع 100 غرام من البخار وتكثيفه، فسيبقى وزن الماء الناتج 100 غرام.



يغير الماء حالته في الدورة المائية من خلال مجموعة متنوعة من العمليات من التبخر والذوبان والتجميد إلى التسامي والتكثيف والهطول. كل هذه التغييرات تتطلب تطبيق الطاقة.





2. مراحل الدورة المائية

يوجد العديد من العمليات المتضمنة في حركة المياه بصرف النظر عن الخطوات الرئيسية الواردة في مخطط الدورة المائية. المدرجة أدناه هي مراحل مختلفة من الدورة المائية.

أ. التبخر

الشمس هي المصدر النهائي للطاقة، وهي تُشغل معظم التبخر الذي يحدث على الأرض. يحدث التبخر بشكل عام عندما تصير جزيئات الماء على سطح المسطحات المائية متحمسة وترتفع في الهواء. تتراكم هذه الجزيئات ذات الطاقة الحركية الأعلى في سحب بخار الماء.

يحدث التبخر عادة تحت نقطة غليان الماء. تحدث عملية أخرى تسمى **Evapotranspiration** عندما يحدث النتح من خلال أوراق النباتات. تسهم هذه العملية في نسبة كبيرة من الماء في الغلاف الجوي.

ب. التسامي

يحدث التسامي عندما يتحول الثلج أو الجليد مباشرة إلى بخار ماء دون أن يتحول إلى ماء. يحدث هذا عادة نتيجة الرياح الجافة وانخفاض الرطوبة. يمكن ملاحظة التسامي على قمم الجبال، حيث يكون ضغط الهواء منخفضاً جداً.

يساعد ضغط الهواء المنخفض على تسامي الثلج وتحويله إلى بخار ماء حيث يستخدم طاقة أقل في هذه العملية. مثال آخر على التسامي هو المرحلة التي يتدفق فيها الضباب من الجليد الجاف. على الأرض، المصدر الأساسي للتسامي هو من الصفائح الجليدية التي تغطي قطبي الأرض.





ج. التكثيف

يبعد بخار الماء المتراكم في الغلاف الجوي في النهاية بسبب درجات الحرارة المنخفضة الموجودة على ارتفاعات عالية. تتحول هذه الأبخرة إلى قطرات صغيرة من الماء والجليد، وتتجمع في النهاية لتشكيل غيومًا.

د. الهطول

فوق 0 درجة مئوية، ستتكتف الأبخرة في قطرات الماء. ومع ذلك، لا يمكن أن يتكثف بدون غبار أو شوائب أخرى. ومن ثم، فإن أبخرة الماء تلتصق بسطح الجسيم.

هـ. عندما يندمج عدد كافٍ من القطرات، فإنها تسقط من السحاب وتوجد على الأرض بالأسفل. هذه العملية تسمى هطول **الأمطار**. في الطقس البارد بشكل خاص أو ضغط الهواء المنخفض جدًا، تتجمد قطرات الماء وتتساقط على شكل ثلوج أو برد.

التسرب

و- يجري امتصاص مياه **الأمطار** في الأرض من خلال عملية التسلسل. يختلف مستوى الامتصاص بناءً على المادة التي تسرب الماء إليها. على سبيل المثال، ستحتفظ الصخور بكمية أقل من المياه نسبيًا مقارنة بالتربة. يمكن أن تتبع المياه الجوفية مجاري أو أنهار. لكن في بعض الأحيان، قد تفرق عميقًا، وتشكل طبقات المياه الجوفية.

ز- جريان المياه





إذا كانت المياه من مياه الأمطار لا تشكل طبقات المياه الجوفية، فإنها تتبع الجاذبية، وغالبًا ما تتدفق إلى أسفل جوانب الجبال والتلال؛ تشكل الأنهار في نهاية المطاف. هذه العملية تسمى الجريان السطحي Runoff. في المناطق الباردة، تتشكل القمم الجليدية عندما تكون كمية تساقط الثلوج أسرع من معدل التبخر أو التسامي. عثر على أكبر أغطية جليدية على وجه الأرض في القطبين. جميع الخطوات المذكورة أعلاه تحدث بشكل دوري بدون بداية ثابتة أو نهاية.

3. تداعيات الدورة المائية

- للدورة المائية تأثير هائل في المناخ. على سبيل المثال، سيؤدي تأثير الاحتباس الحراري إلى ارتفاع درجة الحرارة. بدون تأثير التبريد التبخيري للدورة المائية، سترتفع درجة الحرارة على الأرض بشكل كبير.
- تعد الدورة المائية أيضًا جزءًا لا يتجزأ من الدورات البيوجيوكيميائية الأخرى.
- تؤثر الدورة المائية في جميع عمليات الحياة على الأرض.
- تعرف دورة الماء أيضًا بمنقية الهواء. على سبيل المثال، أثناء عملية الهطول، يجب أن تلتصق أبخرة الماء بجزيئات الغبار. في المدن الملوثة، تلتقط قطرات المطر، بالإضافة إلى التقاط الغبار، الغازات القابلة للذوبان في الماء والملوثات أثناء سقوطها من السحب. ومن المعروف أيضًا أن قطرات المطر تلتقط عوامل بيولوجية، مثل: البكتيريا، وجزيئات السخام الصناعية، والدخان.





الاستمطار

الاستمطار **Rainmaking** هو عملية إسقاط المطر من السحب بطريقة علمية بحتة تُجرى على السحب المتكوّنة في الجو. ويسمى أيضاً تطعيم السحب **Cloud seeding**.

لقد جرى الاعتراف بالدور الرئيسي الذي يؤديه الإمداد الجيد بالمياه كمحرك للنمو الاقتصادي وكمساعدة في الرفاهية العامة والازدهار الوطني من قبل مثقفي البلدان المتقدمة مثل الولايات المتحدة الأمريكية الذين أطلقوا على المياه اسم «الذهب الأزرق». إذ كلما زادت الثروة المائية للأمة، زادت فرص تحقيق معدلات عالية من التقدم في مجالات الإنتاج الزراعي والنمو الصناعي الذي يساعد في تعزيز الثروة الاقتصادية وفرص العمل ورفع مستويات المعيشة.

ومن ثم، تعمل البلدان المتقدمة باستمرار على تطوير مواردها المائية من خلال تسخير ليس فقط كل المياه الجوفية والسطحية ولكن أيضاً من خلال الاستفادة من أي مورد مائي متجدد وغير محدود وغير مستغل تقريباً في الغلاف الجوي في شكل سحب لا حصر لها. كثيراً ما يستخدم العلماء المستثمرون والبيروقراطيون والصناعيون ورجال الدولة في نحو 50 دولة عمليات التطعيم السحابي لأكثر من 40 عامًا لأغراض مختلفة مثل:

1. زيادة هطول **الأمطار** السنوية لأغراض الشرب والزراعة.
2. انتشار **الضباب** في المطارات وطرق المدن الكبرى.
3. زيادة **توليد** الطاقة المائية بأرخص التكاليف.





4. قمع عواصف البَرَد لتقليل الأضرار التي تلحق بالحياة والمحاصيل والممتلكات.
5. التخفيف من الآثار المدمرة لتكرار حالات الجفاف.
6. التخفيف من الآثار الضارة للاحتباس الحراري ودرجات حرارة الصيف.
7. زيادة هطول **الأمطار** السنوي لتحسين الغابات والحياة الفطرية والبيئة.

وتستفيد العديد من الدول المتقدمة، **مثل**: الولايات المتحدة الأمريكية، وأستراليا، والصين، وتايلاند، والدول الأوروبية، ودول الاتحاد السوفيتي السابقة، ودول أمريكا اللاتينية، والدول العربية، وإندونيسيا، وباكستان بشكل كبير من خلال استخدام تقنيات التطعيم السحابي المتقدمة للأغراض المذكورة أعلاه.

• فوائد الاستمطار

1. الاستمطار يقلل من ارتفاع تكاليف الإغاثة من الجفاف

يمكن لعمليات التطعيم السحابي التخفيف من تأثير الجفاف، كما يمكن إجراء تعديل للطقس في الوقت المناسب من خلال اعتماد طرق مناسبة لإدارة موارد المياه السطحية والأرضية والجوية لإتاحة المياه للشرب والزراعة. يمكن اتخاذ خطوات مماثلة لتطعيم غيوم النطاق لترويض الأعاصير على النمط المتبع في الولايات المتحدة لتجارب العاصفة والغضب.



2. الاستمطار من أجل توليد الطاقة الكهرومائية غير المكلفة

يمكن القيام بمحاولات حقيقية لإزالة نقص الطاقة الكهربائية عن طريق إجراء تجارب التطعيم السحابي لزيادة إنتاج الطاقة الكهرومائية كما كانت تمارس خلال الأربعين عاماً الماضية من قبل ولاية تسمانيا في أستراليا التي تنتج الطاقة بأرخص سعر مع نسبة الفائدة إلى التكلفة 13:1.

3. الاستمطار للتحكم في تلوث المياه

تخضع معظم الأنهار، مثل (نهر الجانج ويامونا وكريشنا وكوفيري في الهند) والعديد من روافدها لتلوث المياه بسبب تصريف النفايات السائلة غير المعالجة أو المعالجة جزئياً من العديد من الصناعات الملوثة والمستوطنات الحضرية الواقعة على ضفافها. حيث تدخل النفايات الزراعية من بيوت المزارع والأسمدة ومخلفات المبيدات من الزراعة في دورات المياه الطبيعية وتتركز في سلاسل الأغذية والشبكات الغذائية للأنظمة البيئية المائية.

يجري تحويل المياه من هذه الأنهار من مختلف الأنهار والخزانات المبنية عبر هذه الأنهار وروافدها من خلال قنوات الري إلى خزانات القرية والحقول الزراعية. خلال فصل الصيف، تنخفض تدفقات المياه في هذه الأنهار والجداول إلى حد كبير ولا يوجد انخفاض مقابل في كميات ونوعية النفايات السائلة الصناعية والبلدية التي تدخل فيها. وبالتالي، فإن مجاري المياه الطبيعية ملوثة جداً مما يؤدي إلى عدم تمكن الناس أو الحيوانات من استخدامها للشرب ولأغراض أخرى. هناك نفوق على نطاق واسع للأسماك في هذه المجاري المائية. ومن ثم هناك حاجة لاستعادة درجة معقولة من النقاء في مياه المجاري المائية لحماية الصحة العامة والبيئة.





لاستعادة جودة مياه التيار خلال التدفقات المتناقصة لموسم الصيف، تقوم بعض البلدان ببناء السدود والاحتفاظ بالمياه الكافية في الخزانات للحفاظ على الحد الأدنى من التدفق حتى خلال موسم الصيف للأغراض البيئية.

بشأن السيطرة على التلوث في المياه المقدسة لنهر الغانج ويامونا، أمرت المحكمة العليا في الهند حكومة الولاية والحكومة المركزية أنه حتى خلال موسم الصيف، يكون الحد الأدنى من التدفق (350 قدماً مكعباً) ويجب الحفاظ على نهر ويامونا ونهر الغانج للأغراض البيئية لضمان مياه الشرب للإنسان والحيوان والتدفقات الطبيعية مع الأكسجين الكافي لبقاء النباتات والحيوانات المائية بما في ذلك مصايد الأسماك. ويجب زيادة مخزون مياه الأنهار للتغلب على الصعوبات الناجمة عن الفشل المتكرر للرياح الموسمية وكذلك لتلبية الطلبات المتزايدة باستمرار في مواسم الصيف. تبلغ مساحة المخازن الحية الحالية نحو **174 بليون** متراً مكعباً. تشكل نحو 10% من إجمالي إمكانات المياه المتوفرة في الدولة. حتى لو كان تقديراً منخفضاً للاحتياجات المائية المستقبلية يبلغ **1300 بليون** متر مكعب، فإن تخزين 600 بليون متر مكعب مطلوب حتماً.

من أجل الحفاظ على الحد الأدنى من التدفقات الصيفية لتخفيف تأثير تصريف المياه العادمة المعالجة من البلديات والصناعات، هناك حاجة إلى تخزين إضافي بمقدار **50 بليون** متر مكعب أخرى هناك حاجة للحفاظ على التوازنات البيئية في دورات المياه. بالإضافة إلى التخزين الحالي المذكور أعلاه، فإن المشاريع قيد الإنشاء وتلك قيد الدراسة تتصور مخازن إضافية تبلغ **75 بليون** متراً مكعباً. و**130 بليون** متراً مكعباً على التوالي.





وبالتالي، هناك حاجة ملحة للحفاظ على مياه الأنهار عن طريق تحويل الفائض من الأنهار، مثل: نهر الغانج ومهندي وجودافاري إلى أنهار عجز المياه، مثل: كريشنا وبنار وكوفيري، وكذلك لزيادة غلاتها عن طريق التطعيم السحابي.

• لماذا ينبغي تعزيز عمليات التطعيم السحابي؟

1. قدمت أدلة علمية أكثر إقناعاً حول الآثار الإيجابية لعمليات التطعيم السحابي التي أجريت في ولايات مختلفة في الولايات المتحدة الأمريكية وفي بلدان أخرى، مثل: الصين، وتايلاند، وأستراليا، ودول أخرى لإنشاء أوراق اعتماد عمليات للاستمطار السحابي لزيادة هطول **الأمطار** لحماية الصحة العامة وبيئة.

2. صحيح أن غياب الفهم الكافي للعديد من عمليات الغلاف الجوي الحرجة قد أدى إلى فشل في إنتاج درجة عالية من الدقة في ضمان نتائج يمكن التنبؤ بها ويمكن اكتشافها والتحقق منها. لكن مثل هذا الموقف لا يمكن أن يمنع البشرية من الاستفادة من أفضل الأدوات المتاحة في تكنولوجيا تعديل الطقس لمكافحة الآثار الضارة المتكررة للجفاف وتأثيرات النينو والتغيرات المناخية العالمية. ومن ثم يمكن البدء في الترويج لمزيد من البحث في عمليات الغلاف الجوي الحرجة ومواصلتها بقوة إذا أمكن أيضاً إجراء عمليات التطعيم السحابي في الوقت نفسه.

3. في الوقت الذي تتخذ فيه الولايات الأمريكية الغنية بالمياه موقفاً صارماً للإصرار على أنه من السابق لأوانه القيام بعمليات الرؤية السحابية دون إجراء المزيد من الأبحاث حول عمليات تعديل الطقس، يجري دعم





المقاطعات المتعطشة للمياه في الصين من قبل علمائها المهتمين اجتماعياً في الأكاديمية الصينية للعلوم التي قامت من خلال تحقيقاتها البحثية المكثفة حول عمليات التطعيم السحابي بتأييد الأساس العلمي للتطعيم السحابي وتعزز نطاق واسع من العمليات في الصين حيث يشارك أكثر من 35000 عامل سنوياً في زيادة هطول **الأمطار** من السحب.

في حين حاول العديد من العلماء تقييم الأساس العلمي ومعدلات نجاح عمليات التطعيم السحابي، فقد لجؤوا إلى نهج إحصائي لإجراء مزيد من التحقيقات لهذه التقنية مما يعني أنه لم يكن هناك تقييم حقيقي لسبب وتأثير عمليات استمطار السحب. بشكل أساسي، يجب إصلاح أكثر الظروف المرغوبة لقابلية التطعيم في المقام الأول لإثبات فعالية عمليات التطعيم السحابي إحصائياً، ولكن يجب بالضرورة أن تكون مثل هذه الظروف متنوعة للعثور على الطريقة المثلى لتنفيذ عمليات التطعيم. بدون اتباع هذا الإجراء، يجري تقييم العديد من مشاريع التطعيم السحابي، حيث قدم معظمها نتائج غير مرضية أو فشل في إحداث تأثير مقنع مادياً.

ومن ثم فإن مديري عمليات التطعيم السحابي الذين هم مقتنعون بأن النظرية الكامنة وراء التطعيم السحابي قد جرى تأسيسها بالفعل من قبل المختبر الرائد والتجارب الميدانية التي أجراها الباحث **شافير Schaefer** و**لانغموير Langmuir** في عام 1946 لا يتوقعون نتائج متطابقة من حيث الاقتصاد ومعدلات النجاح للعمليات التي أجريت في ظل درجة عالية اختلاف الظروف الجغرافية والطبوغرافية والأرصاد الجوية. وبالتالي فإن مؤيدي الاستمطار السحابي يمضون قدماً في الأساليب العملية لاستمطار السحب كأداة لإدارة المياه التي





توفر المزيد من المياه للشرب والري وتوليد الطاقة المائية والتحسينات البيئية من أجل بقاء الإنسان والطبيعة.

إن الأمريكيين، كونهم أمة ذات عقلية علمية مصحوبة بالحماسة الوطنية، يعملون دائماً من أجل تعزيز مستويات معيشة الناس، ولهذا الغرض يبحثون عن طرائق جديدة لزيادة ثروتهم المائية. وبالتالي، فإن إدارة الري التابعة للحكومة الأمريكية المعروفة باسم مكتب الاستصلاح لم تخطط فقط لتحقيق أقصى استفادة من موارد المياه الجوفية والسطحية التقليدية ولكن أيضاً للاستفادة من موارد المياه الوفيرة في الغلاف الجوي على شكل غيوم وبدأت لهذا الغرض مخططاً في عام 1962 تحت عنوان «مشروع سكاى ووتر».

الهدف الرئيسي من هذا البرنامج هو التحقيق في كيفية استخدام عمليات التطعيم السحابي بكفاءة واقتصادية وعلى أساس مقبول اجتماعياً لزيادة هطول الأمطار السنوي وتساقط الثلوج في مناطق العجز المائي في الدولة؛ في الواقع لإدارة هطول الأمطار من الغيوم من خلال الاستفادة من علم تعديل الطقس لتطوير تكنولوجيا إدارة هطول الأمطار في الغلاف الجوي تطبيقات عامة واسعة في إدارة موارد المياه.

تشمل تطبيقات تقنية تعديل الطقس هذه تشتيت الضباب، وقمع البَرَد وتعديل الأعاصير. تشمل الأنشطة الميدانية لهذا المشروع عمليات التطعيم السحابي للتطعيم:

1. نظم السحابة الأوروغرافية (العواصف الشتوية) Orographic التي تتكون فوق سلسلة الجبال حيث يتم رفع الهواء وتبريده بواسطة الحواجز الجبلية العالية.





2. السحب الركامية التي تتكون خلال فصل الشتاء.

خلال فصل الشتاء، يستخدم برنامج التطعيم السحابي لزيادة حزمة الثلوج الجبلية بحيث يجري تلقي جريان إضائي خلال موسم الذوبان الربيعي. يهدف نثر السحب الركامية إلى زيادة هطول **الأمطار** السنوي مباشرة على الأرض.

• مبادئ التطعيم السحابي

تتكون السحب من ملايين وملايين قطرات الماء أو جزيئات الجليد الصغيرة أو كليهما والتي تتكون حول جزيئات مجهرية من الغبار والدخان والترية والبلورات المالحة وغيرها من الهباء الجوي والبكتيريا والجراثيم الموجودة دائماً في الغلاف الجوي.

تصنف هذه الجسيمات على أنها 'نوى التكثيف' (CCN) التي يتكثف عليها بخار الماء لتكوين قطرات من السحب، ويصنف عدد قليل منها على أنها (نوى جليدية) (IN) حيث يتجمد الماء المكثف أو تتشكل بلورات الجليد مباشرة من بخار الماء. في الغلاف الجوي الطبيعي توجد وفرة من نوى التكثيف بينما هناك ندرة في نوى الجليد.

تؤدي أنواع النوى وأحجامها وتركيزاتها الموجودة في الهواء دوراً مهماً في تحديد الكفاءة التي يهطل بها نظام السحابة. بشكل عام، تتدفق أطنان وأطنان من المياه، مثل (أنهار رطوبة) في السماء فوق العديد من البلدان ومن هذه الأنهار في السماء إما قليل هطول **الأمطار** وإما لا يسقط على الإطلاق على الأرض بسبب عدم وجود بعض الشروط المطلوبة. من بين هذه الشروط المهمة لكل من بدء هطول **الأمطار** وكمية هطول **الأمطار** من نظام السحب:



1. الأبعاد الأفقية والعمودية للسحابة.

2. عمر السحابة.

3. أحجام وتركيزات قطرات السحب وبلورات الجليد.

في ظل الظروف المناسبة، يمكن تعديل واحد أو أكثر من هذه العوامل المذكورة أعلاه بشكل إيجابي عن طريق تطعيم نوى مناسبة للسحب، باستخدام إما ملح عادي وإما جزيئات يوديد الفضة.

• تطعيم السحب الدافئة والباردة

يتكون هطول **الأمطار** في السحب بواسطة آليتين هما «المطر الدافئ» و «المطر البارد». صاغ مصطلح المطر الدافئ العلماء الذين وجدوا أن المطر في البلدان الاستوائية غالباً ما يسقط من السحب التي كانت درجة حرارتها في جميع أنحاء السحب أكثر دفئاً من مستوى التجمد من 0 درجة مئوية. يحدث المطر في هذه السحب عندما تصطدم القطرات الأكبر بقطرات السحب الأصغر وتمتصها في عملية تُعرف باسم «الالتحام».

يحدث المطر البارد في السحب التي تكون درجة حرارتها أكثر برودة كلياً أو جزئياً من مستوى التجمد البالغ 0 درجة مئوية. وتكون مناطق السحابة التي تقع تحت مستوى التجمد فائقة التبريد وتحوي على قطرات الماء وبلورات الجليد وأحياناً الأولى فقط.

تنمو بلورات الجليد التي تتشكل في مناطق السحابة فائقة البرودة بسرعة كبيرة عن طريق سحب الرطوبة من قطرات السحب المحيطة ويستمر هذا





النمو حتى يتغلب وزنها على قوى الجاذبية ويتسبب لها في السقوط على الأرض. وأثناء سقوط هذه البلّورات الجليدية من الغيوم تتحد مع قطيرات أصغر أخرى وتسقط من السحابة على شكل ثلج أو مطر. نوى الغلاف الجوي التي تؤدي دوراً رئيسياً في تكوين السحب تمارس تأثيراً قوياً على الكفاءة التي تعمل بها عمليات المطر الدافئ والبارد.

على سبيل المثال، تنتشر نوى التكثيف العملاقة (GCN) Giant Condensation Nuclei في الغلاف الجوي للمحيطات مما يسمح بتكوين قطيرات سحابة أكبر وعملية الالتحام لبدء هطول المطر خلال فترة حياة السحابة.

لكن المناطق القارية تتميز بعدد أصغر بكثير وعدد أكبر من نوى التكثيف (CN) Condensation Nuclei. ومن ثم، فإن السحب متوسطة الحجم التي تشكلت فوق المناطق القارية تتبدد بشكل عام قبل أن تتاح لآلية الالتحام فرصة لبدء هطول الأمطار. وبالمثل، تعاني العديد من المناطق من نقص في نوى الجليد (IN) Ice Nuclei مما يقلل من كفاءة عملية المطر البارد.

• أسباب حقن المواد الكيميائية في الغيوم

عندما يكتشف عالم من خلال القياسات العلمية النوى في السحب ويدرك وجود عدد قليل جداً من النوى لبدء عملية الهطول في السحب، فإنه يساعد تلك الغيوم عن طريق حقن نوى مناسبة بأعداد كافية عن طريق تطعيمها في الوقت والمكان المناسبين بحيث تسقط الرطوبة في السحب على الأرض، مثل: تساقط الثلوج أو هطول الأمطار.



يمكن القيام بتطعيم السحابة بنواة تكثيف كبيرة جداً أو عملاقة (Giant Condensation Nuclei) (GCN) (جزيئات رطبة مثل كلوريد الصوديوم وكلوريد الكالسيوم وغيرها) لتسريع عملية المطر الدافئ والتطعيم باستخدام نوى جليدية مناسبة مثل يوديد الفضة لإمداد الجسم بشكل طبيعي بالسحب الباردة التي تعاني من نقص النوى مع التركيز الأمثل للبلورات الجليدية التي ستزيد بشكل كبير من هطول الأمطار من خلال عملية المطر البارد.

غالباً ما يمكن عمل مزيج من تطعيم نوى الجليد والرطوبة أيضاً نظراً لأن آليات المطر الدافئ والبارد تعمل في الغيوم الباردة المختلطة. أهم جانب من جوانب سحابة الركام فائقة التبريد هو التأثير الديناميكي الناتج عن تطعيم الطور الجليدي. من المعروف أنه في ظل الظروف البيئية الطبيعية المواتية، يمكن تحفيز السحب الركامية على النمو بشكل أكبر وأيضاً لتدوم لفترة أطول.

يؤدي حقن جزيئات يوديد الفضة في الجزء شديد البرودة من السحابة إلى تجميد قطرات السحابة في بلورات ثلجية. تتضاعف عملية التحويل هذه ملايين وملايين المرات داخل السحابة وتطلق كمية كبيرة من الحرارة، تُعرف باسم «الحرارة الكامنة للانصهار». تجعل هذه الظاهرة السحابة أكثر ازدهاراً وأكبر حجماً، وبالتالي تمنح السحابة مياهاً أكثر كفاءة مما كانت ستحدث بشكل طبيعي.

• ما المشكلة في الغيوم الطبيعية؟

التطعيم الكيميائي للغيوم الباردة التي توجد كعواصف أوروغرافية شتوية هي طريقة راسخة ومفهومة جيداً. تتشكل الغيوم عندما يرتفع الهواء الرطب من المحيطات والبحيرات والأنهار ويجري تبريدها أثناء مرورها فوق الغابات والجبال من الغرب إلى الشرق خلال الرياح الموسمية.





تُترك معظم الغيوم إلى العمليات والأجهزة المعتادة في الطبيعة، فهي عبارة عن هطولات غير فعّالة تماماً، وذات محتوى يحافظ على أكثر من 90 % من حمل الرطوبة. من خلال تطعيم بعض هذه السحب الباردة بجزيئات يوديد الفضة، يمكن تحسين كفاءة هطول **الأمطار** لهذه السحب بشكل كبير.

كما ذكرنا سابقاً، تعمل الجزيئات المجهرية من يوديد الفضة كنواة جليدية اصطناعية تشكل بلورات جليدية تجذب الرطوبة من قطرات السحب المحيطة وتتمو بشكل كبير بما يكفي لتسقط على الأرض مثل تساقط الثلوج أو هطول **الأمطار**. تتشكل هذه الغيوم الركامية الكبيرة عندما يرتفع الهواء الرطب الدافئ القريب إلى حد ما من سطح الأرض إلى السماء حيث يجري تبريده إلى النقطة التي يتكثف فيها بخار الماء في قطرات السحب.

يمكن أن يحدث رفع الهواء الرطب عن طريق تسخين سطح الأرض بواسطة الشمس أو مرور جبهة باردة أو جبهة دافئة عبر منطقة معينة. يبلغ العمر الافتراضي لمعظم الغيوم الركامية نحو 20 إلى 30 دقيقة وهي تعطي تساقطاً محدوداً للثلوج أو هطول **الأمطار** لأن الطبيعة توفر وقتاً قصيراً جداً لقطرات السحب لتتجمع في قطرات كبيرة ذات وزن كافٍ لتقع على الأرض.

• درجة الحرارة الحرجة للتطعيم

تقنيتنا التطعيم السحابي اللتان تستخدمان عموماً لاستخراج المزيد من الرطوبة من السحابة على شكل تساقط ثلوج وهطول **الأمطار**، هما: التطعيم الرطب للسحب الدافئة، وتطعيم الطور الجليدي للسحب الباردة مع يوديد الفضة.





يُستخدم تطعيم يوديد الفضة عندما تكون درجة حرارة السحابة العلوية لتكوين السحب الركامية (3- درجات مئوية إلى 5- درجات مئوية) أو أكثر برودة أو عندما يشير نمو السحابة إلى أنها ستصل قريباً إلى مستوى درجة الحرارة هذا قريباً في الغلاف الجوي.

الهدف الرئيسي من استمطار السحب الباردة هو بدء إطلاق الحرارة الكامنة الديناميكية التي ستحفز نمو السحابة. إذا كانت السحابات الصاعدة بطيئة، فإن الهدف هو نفسه بالنسبة للسحب الركامية (العواصف الشتوية)، وهذا يعني أن الهدف هو زيادة عدد بلورات الجليد في الجزء شديد البرودة من السحابة إلى التركيز الأمثل لمجموعة معينة من ظروف السحابة.

تجذب بلورات الجليد الرطوبة وتتمو بسرعة على حساب السحب الباردة بسبب الخصائص الخاصة للماء وتتحول بلورات الجليد إلى رقائق جليدية ذات وزن كافٍ لتساقط عبر السحابة وتذوب في قطرات مطر قبل الوصول إلى الأرض.

في تطعيم السحب الدافئة، يجري استخدام مواد رطبة مثل الملح الشائع أو كلوريد الكالسيوم أو خليط من نترات الأمونيوم واليوريا التي تمتص بخار الماء من الهواء المحيط. تُطحن المواد المسترطبة بدقة إلى جزيئات صغيرة ويجري إطلاقها في التيار الصاعد تحت السحابة المتنامية.

سوف تتمو الجسيمات الرطبة تدريجياً في الحجم بالتكثيف ثم بالالتحام مع القطرات السحابية التي تتمو إلى قطرات كثيفة تنتج هطول الأمطار. هذه العملية فعّالة بشكل خاص في السحب ذات الترطيب القوي التي قد تبقى غير فعّالة لولا ذلك.





إذا تُركت هذه السحب لنفسها فستفجر الكثير من محتواها المائي من قمم السحابة حيث تتشكل السحب البلورية الجليدية (سيروس Cirrus) وتحمل الكثير من المياه التي جرى معالجتها عالياً.

ينتج عن التطعيم الرطب للسحب عموماً تكوين قطرات كبيرة أقل بكثير في السحابة وعند مستويات درجات حرارة أكثر دفئاً حيث يوجد أكبر إمداد بالرطوبة، وبالتالي يصل المزيد من المحتوى المائي في السحب إلى الأرض مع هطول الأمطار.

• التطعيم البارد للسحب

من المعروف على نطاق واسع أنه إذا جرى تحويل معظم قطرات الماء فائقة التبريد في السحابة إلى بلورات جليدية، فإن السحابة تعطي أمطاراً جيدة جداً. الماء المبرد بشكل فائق غير مستقر، وبالتالي فهو قابل للتجميد عند ملامسته لنواة الجليد أو عندما يجري تبريده تحت درجة حرارته الحرجة.

بينما يؤدي يوديد الفضة إلى تجميد التلامس، فإن الجليد الجاف يساعد على تبريد الماء فائق البرودة إلى ما دون درجة حرارته الحرجة، مما يتسبب في تجمده وأي مادة تتجمد دائماً تطلق حرارة كامنة في البيئة المحيطة بها وتضيف هذه الحرارة الطاقة إلى السحابة، وبالتالي يزيد من نموه وعمره.

تتضمن عملية التطعيم من أجل قمع البَرَد إدخال العديد من بلورات الجليد أو يوديد الفضة AgI في السحب لاستخدام بخار الماء فائق التبريد المتوفر بحيث لا يمكن لأي بلورات الجليد أن تنمو بشكل كبير بما يكفي لتصير كتل بَرَد كبيرة.

يمكن استمطار السحب الباردة باستخدام مبدأ التطعيم الساكن أو الديناميكي.



• مرحلة التطعيم الساكن

أحد المبادئ الأساسية لاستمطار السحب الباردة هو منهجية التطعيم في المرحلة الساكنة، التي تعتمد على الفيزياء الدقيقة للسحب. لقد جرى بالفعل ذكر أن جزيئات الجليد تنمو عن طريق التكتيف والتجميد اللاحق لبخار الماء أو الهطول المباشر لبخار الماء على جسيمات الجليد.

مع ارتفاع درجة حرارة الهواء، يمكن أن يوجد المزيد من الماء في الطور الغازي. ولكن مع انخفاض درجة الحرارة، تتباطأ جزيئات الماء وتزداد فرصة تكتيفها على أسطح الجسيمات الأخرى.

إذا كان على الماء أن يتجمد، يجب أن تتماشى جزيئات الماء بشكل صحيح لتلتصق ببعضها بعضاً وهذه الفرصة تكون أقل في الكميات الصغيرة من الماء مثل قطرات السحب وهكذا في السحب تحت مستوى التجمد، يتعايش كل من الماء السائل فائق التبريد وجزيئات الجليد.

لكن لماذا يحدث هذا؟ يجب أن نتذكر أن تحويل الماء إلى غاز يحتاج إلى 600 كالوري لكل جرام بينما يتطلب تحويل الماء من الجليد الصلب إلى الغاز 680 كالوري، ومن ثم فإنه من الطبيعي أن يكون تحرير جزيء من الماء من الجليد أكثر صعوبة من تحريره من قطرة الماء. ومن ثم، عندما يكون الهواء مشبعاً، سيكون هناك عدد أكبر من الجزيئات فوق سطح الماء (ضغط بخار أكثر) مقارنة بسطح جليدي (ضغط بخار أقل).

بمعنى آخر، إذا كان لبخار الماء في السحابة أن يتكثف فوق قطيرة سائلة، فيجب أن يكون الهواء المحيط مشبعاً جداً بالنسبة لسطح قطرة الماء. كذلك





أيضاً بالنسبة للتكثيف أو الهطول على جسيمات الجليد، يجب أن يكون الهواء المحيط مشبعاً جداً فيما يتعلق بسطح جسيمات الجليد.

بسبب الخصائص الخاصة للماء، وجد العلماء أنه عند مستوى أقل من التجمد، يحدث التشبع الفائق، فيما يتعلق بجزيئات الجليد عند رطوبة نسبية أقل من التشبع الفائق فيما يتعلق بقطرات الماء. ومن ثم في البيئة نفسها، سوف تنمو جزيئات الجليد بسرعة كبيرة من قطرات الماء. عندما ينضب بخار الماء ببطء، تصير البيئة السحابية شبه مشبعة فيما يتعلق بالمياه بينما لا تزال مشبعة جداً بالجليد.

يميل الماء فائق البرودة إلى التجمد عند الاضطراب. مثال على ذلك تثلج الطائرات التي تطير عبر سحابة ذات مياه فائقة البرودة. تتجمد القطرات فائقة التبريد أيضاً عندما تتلامس مع نواة صغيرة يبلغ قطرها ميكرون واحد تُعرف باسم نواة التجميد.

نوى التجميد هذه متناثرة في الغلاف الجوي. يحدث هذا التغيير المفاجئ من ماء فائق التبريد إلى سحابة جليدية بسبب الاختلافات في ضغوط البخار الموجودة فوق قطرات الماء فائقة التبريد وبلورات الجليد التي تبقى على درجة الحرارة نفسها.

ويمكن ملاحظة أنه عند درجة حرارة 15- درجة مئوية، تكون الرطوبة النسبية 100% للماء، و115% لبلورات الجليد، وبالتالي ينتشر بخار الماء بسرعة من الهواء إلى بلورات الجليد التي تنمو على حساب قطرات الماء لأن ارتباط جزيئات الماء بإحكام ببلورات الجليد أكثر من ارتباطها بقطرات الماء.





• مرحلة التطعيم الديناميكي

المبدأ الأساسي الثاني لاستمطار السحب الباردة هو فرضية المرحلة الديناميكية التي تعتمد على ديناميكيات السحابة. تعتمد السحب الركامية على حركات الهواء الصاعد من أجل بقائها نشطة.

من داخل قاعدة السحابة، يمر الهواء في التيار الصاعد بتبريد ثابت الحرارة حيث يرتفع في السماء ويصير مشبعاً جداً ويتكثف في قطرات السحب وإذا انتقل إلى مستوى التجمد تبدأ جزيئات الجليد في التشكل.

في حين تنشأ قطرات سحابية جديدة داخل التيار الصاعد، فإن قطرات السحب الحالية وجزيئات الجليد تتبخر باستمرار وتتصاعد، وبالتالي يجب أن تتجدد عمليات الترطيب عن طريق امتصاص المزيد من الرطوبة لإطالة عمر السحابة.

يؤدي تحويل بخار الماء إلى قطرات سحابية أو بلورات ثلجية إلى إطلاق حرارة كامنة لطرد الهواء المحيط ويزيد من اختلاف درجة الحرارة مما يؤدي بدوره إلى زيادة الطفو الذي يسرع من عمليات الترطيب ويزيد من تدفق بخار الماء إلى السحابة.

تنمو السحب ذات الظروف الجوية القصية الضعيفة عمودياً ويصل هطول الأمطار إلى الأرض من خلال التيار الصاعد. ومع ذلك، فإن وزن الهطول والسحب الناتج خلال سقوطه يتسبب في تبديد التيار الصاعد.

علاوة على ذلك، ونظراً لأن الهطول يزيل كمية كبيرة من الماء من السحابة التي لا يمكن تجديدها بسهولة بواسطة التيار الصاعد، وبمجرد أن يصير التيار الصاعد ضعيفاً جداً، تنهار السحابة وتتبخر.

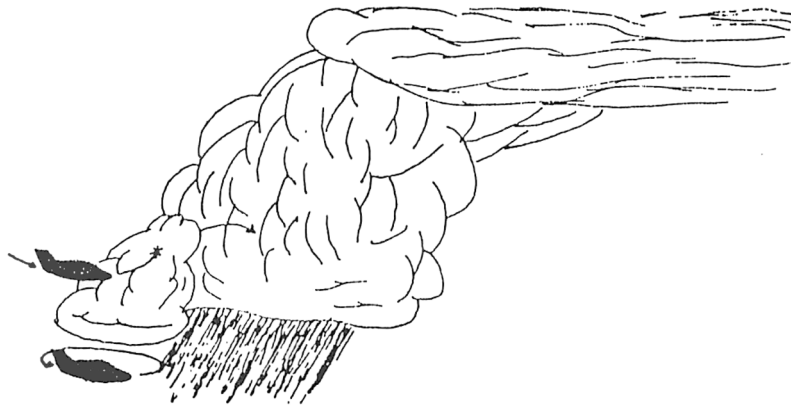




يجري استمطار السحب لتسريع تحويل بخار الماء إلى جزيئات سحابية على شكل قطرات مطر أو بلّورات ثلجية وأي زيادة في هذه العملية تطلق حرارة كامنة داخل بيئة السحابة مما يؤدي إلى تسريع عملية الترطيب التي تجلب المزيد من بخار الماء إلى السحابة والتي ستؤدي إلى بدء دورة أخرى للتغذية المرتجعة الإيجابية.



نثر خلية واحدة في قمة السحابة لإحداث تأثيرات ديناميكية أو فيزيائية دقيقة وفي قاعدة السحابة لإحداث تأثيرات فيزيائية دقيقة.



التطعيم الديناميكي في الجزء العلوي من السحابة للخلايا العنقودية وفي قاعدة السحابة لإحداث تأثيرات فيزيائية دقيقة.





ومن ثم فإن التطعيم الديناميكي للسحب ينطوي على معدلات تطعيم أعلى من الجرعات العادية المستخدمة في التطعيم الساكن. بينما يهدف التطعيم الساكن إلى مجرد تحويل المياه السحابية فائقة التبريد إلى جزيئات جليدية لتسقط على الأرض على شكل هطول، فإن التطعيم الديناميكي يعزز عمليات الترطيب ويتلقى تدفقاً متزايداً لبخار الماء مما سيؤدي في النهاية إلى معدلات هطول أعلى بشكل كبير.

عندما تزداد عمليات الترطيب داخل سحابة ركامية كبيرة يبلغ ارتفاعها نحو 10 كيلومترات، سيكون هناك امتصاص متزايد لتدفق الهواء الرطب بالقرب من قاعدة الحمل الحراري بينما ستكون هناك زيادة في تدفق الهواء السحابي بالقرب من القمة كما هو مطلوب من خلال استمرارية الكتلة.

بالنظر من زاوية الطاقة، فإن الطفو الإضافي يمثل الطاقة الكامنة المضافة التي يجري تحويلها إلى طاقة حركية في شكل حركة تدفق أفقي بالإضافة إلى حركة التيار الصاعد في السحابة.

ومن ثم فإن التأثير الديناميكي للتطعيم السحابي يوفر هذه الآلية ويعمل كمضخة تجمع معاً كتلة الهواء السفلية الرطبة، وترفع هذه الكتلة الهوائية لأعلى وتكثفها، ثم تخرج الهواء من قمة السحابة منخفضاً إلى حد ما في إجمالي محتوى الماء إذا كان هطول الأمطار قد وقع بالفعل.

في نهاية «دورة الضخ»، تكون كتلة الهواء التي تُلقى من أعلى السحابة أكثر رطوبة من بيئة الغلاف الجوي العلوي. يبقى الهواء بالقرب من قاعدة السحابة دون تغيير في محتوى الرطوبة حيث يجري استبدال الهواء الرطب المسحوب به بشكل جانبي. في الوقت نفسه يزيد هطول الأمطار.





في تطعيم كتلة الهواء غير المستقرة، يكون القياس الصحيح للاستخدام هو مضخة تمتص الماء من محيط غير محدود من الرطوبة في الغلاف الجوي وليس تحويلاً للمياه من تيار داخل ضفتين محصورتين.

أشارت الدراسات البحثية من الطائرات إلى أن السحب الركامية تشبه أنظمة الفقاعات الطافية المعروفة باسم «الحرارة» وعندما تكون هناك تيارات صاعدة قوية في هذه السحب فإنها تبدو وكأنها أعمدة أو نفاثات متنامية مع دوران هواء داخلي «يشبه الدوامة» بالقرب من قمم السحب.

تأتي الطاقة اللازمة لدفع حركات الرياح داخل السحب من الحرارة الهائلة الكامنة الناتجة عن تكثيف بخار الماء الذي يحمله التيار الصاعد وتحويله بعد ذلك إلى قطرات سائلة في السحب.

من مشروع CLIMAX، وجد أنه جرى إلقاء فائض من بلورات الجليد من الجزء العلوي من السحابة المصنفة التي انجرفت إلى اتجاه الرياح الشرقي كسحابة سمحاقية اصطناعية قد تكونت منها بضع بلورات كبيرة على مسافة كبيرة في اتجاه الرياح. تركيزات كافية لتطعيم السحب الركامية منخفضة المستوى التي ربما تكون قد أنتجت أمطاراً غير متوقعة في اتجاه الرياح للمنطقة المصنفة.

• تكاثف السحابة

تتمو قطرات السحابة إلى 5 ميكرون ونصف قطر يصل إلى 20 ميكرون بواسطة عملية التكثيف ويصير النمو في نصف القطر بطيئاً بالتناسب المباشر مع الزيادة في نصف قطر انخفاض السحابة.



ومع ذلك، بالنسبة لنمو التكثيف، يجب الحفاظ على درجة معينة من التشبع الفائق من خلال التبريد التوسعي للطرود الهوائية في التيار الصاعد الذي يعمل على الحفاظ على مستويات التشبع الفائق في أعقاب إزالة البخار بواسطة القطرات المتزايدة. في المراحل الأولى من السحابة، سيكون هناك نحو 20 إلى 2000 قطرة / سم³ اعتماداً على نوى التكثيف السحابي الفعال (CCN) وحجم التيار الصاعد.

نظراً لأن عمر السحابة قد لا يكون طويلاً بما يكفي لإنتاج قطرة سحابة بحجم 40 ميكرون، فإن إنتاج قطرة مطر أكبر بكثير يتطلب بالتأكيد بعض الآليات الإضافية الأخرى لجعل السحابة تعطي أمطاراً إضافية، وهذه العمليات هي:

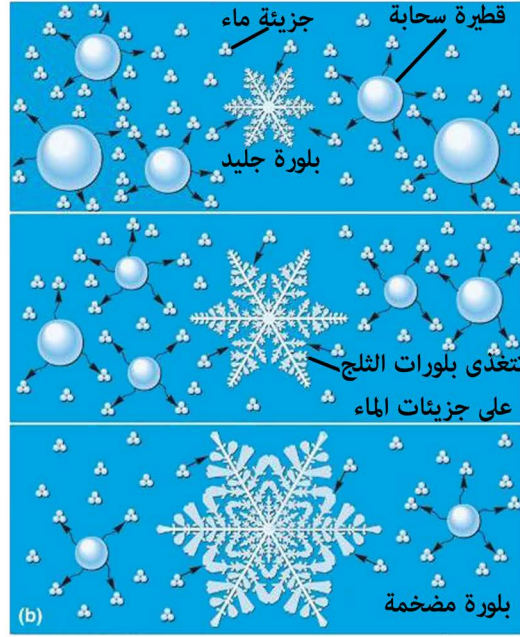
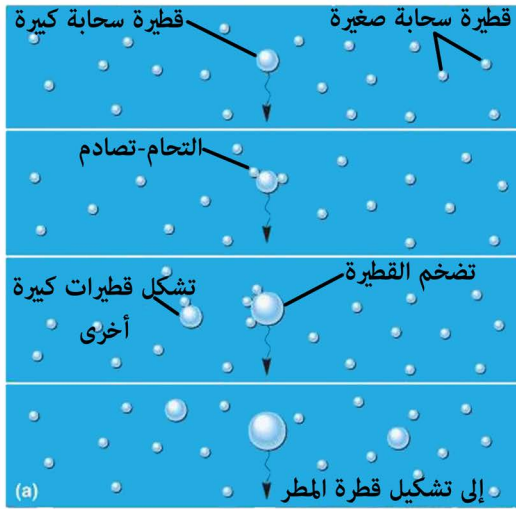
1. آليات التصادم والالتحام التي يمكن أن تنتج قطرات مطر كبيرة من نحو 1000 إلى 5000 ميكرون.
2. آلية نمو بلورات بيرجيرون **Bergeron** الجليدية التي تنتج رقائق جليدية تذوب أثناء سقوطها على الأرض على شكل قطرات مطر كبيرة.





عملية بيرجيرون

عملية التحام-اصطدام



تصف عملية بيرجيرون - فايندزاين Bergeron – Findeisen process (نسبة إلى تور بيرجيرون ووالتر فايندزاين Tor Bergeron) تكوين القطرات الكبيرة في السحب. المتطلبات عبارة عن سحب مختلطة عالية الامتداد تكون فيها قطرات الماء فائقة البرودة وبلورات الجليد في نطاق درجة حرارة من 10- درجة مئوية إلى 35- درجة مئوية بجانب بعضها بعضاً. مع شكل السطح نفسه ودرجة الحرارة، يكون ضغط بخار الماء المشبع أعلى من درجة الأيس كريم، بحيث يكون الهواء السحابي غير مشبع فوق قطرات الماء، ونتيجة لذلك تتبخّر القطرات فائقة التبريد وينعكس بخار الماء الناتج عن طريق إزالة الذوبان. بلورات الجليد. يزداد حجم بلورات الجليد بشكل أكبر عن طريق تجميد قطرات الماء فائقة التبريد وكذلك عن طريق الالتحام أو الجذب الكهروستاتيكي لبلورات الجليد الإضافية. فوق حجم معين، لا يمكن الاحتفاظ ببلورات الجليد والبدء في السقوط من الحرارة. عند فشل السحابة يتجمع المزيد من قطرات السحابة الأساسية، مما يزيد من حجم ومعدل السقوط. عند تجاوز عتبة 0 درجة مئوية (في الواقع نقطة الانصهار)، تذوب البلورات وتصل إلى الأرض على شكل قطرات كبيرة. إذا كانت مسافة الإسقاط باردة بدرجة كافية، وخاصة في فصل الشتاء، ولكن أيضاً في الظروف الجوية الخاصة في الصيف، تبقى تحت عملية الذوبان، بحيث يتساقط التساقط على شكل ثلج.





عندما يرتفع الهواء الرطب من الأرض عن طريق تسخين الأرض بواسطة الشمس، فإنه يرتفع إلى السماء ويبرد ويتكثف تدريجياً. بمجرد أن تتكثف الرطوبة داخل السحابة، وقد يتخذ المكثف شكل قطرات السحب أو قطرات المطر أو جزيئات الجليد أو الثلج أو البرد. يجري التحكم في تكثيف السحابة من خلال العوامل الآتية:

- أ. كمية بخار الماء في طرد الهواء الجاري رفعه.
- ب. مقدار الرفع الذي يؤثر في عمق السحابة.
- ج. الفرق في درجة الحرارة الذي سيحدث من خلاله التكثيف.
- د. مقدار المساحة التي تتشكل عليها السحابة.

يصير هذا المكثف السحابي المتشكل على هذا النحو مدخلاً لتحديد كفاءة الهطول. إذا لم يوفر أي من المكثفات هطول الأمطار، فستكون الكفاءة صفراً. في حين إذا انتهى الأمر بكامل المكثفات على هيئة هطول، فإن كفاءة الهطول تصير 100 %.

أحد المسارات التي يسلكها المكثف هو الالتحام عند هطول الأمطار التي تصل إلى الأرض. يتضمن المسار الآخر الذي يسلكه المكثف نقله إلى حدود السحابة حيث يتبخر، وبالتالي يعود إلى الغلاف الجوي كبخار ماء.

يتضمن المسار الثالث للمكثفات دمجها في جزيئات هطول الأمطار أو بلورات الجليد التي يجري إلقاؤها من السحابة في منطقة السحب العلوية الخارجية المعروفة باسم «السندان» حيث تتبخر الجسيمات ويجري أحياناً نقلها ودمجها في السحب البعيدة الأخرى.





ومن ثم فإن تجارب التطعيم السحابي إذا خُطِّط لها على أُسس علمية تصبح ناجحة فقط. من الضروري أن ندرك أن بعض السحب بسبب العمق المنخفض لن تمطر. قد تتبدد بعض السحب بسبب عمليات الترطيب المنخفضة وتحت ظروف الانقلاب الجوي قبل أن تصل عمليات التطعيم إلى مرحلة النضج لجعل السحب تترسب.

تتبخر معظم الغيوم الركامية دون أن تنتج أمطاراً، كما تتبدد بعض الغيوم الحاملة للحمل في الوقت الذي يظهر فيه مطر جيد من قاعدة السحابة، ووجد العلماء أن بعض الغيوم تتدمر غالباً بسبب هطول الأمطار المتكون داخلها وأن مثل هذا الانقطاع لهطول الأمطار لم يكن كذلك مفهوماً تماماً.

• عوامل التطعيم وخصائصها

إن درجة انصهار يوديد الفضة AgI هي 552 درجة مئوية ونقطة غليانه 1506 درجة مئوية. تعمل مولدات AgI على مبدأ تبخير AgI والسماح لها بالتصلب إلى جزيئات قطرها أقل من ميكرون واحد. إن غرام واحد من AgI ينتج 10^{16} جسيم، في حين ينتج غرام واحد من الجليد الجاف 10^{12} بلورة جليدية في سحابة فائقة التبريد في نطاق درجة حرارة 2- درجة مئوية إلى 12- درجة مئوية.

تعمل مولدات AgI عند نحو 1000 درجة مئوية بحيث يتسامى AgI بشكل طبيعي من الحالة الصلبة إلى البخار أو يتبخر من الحالة المنصهرة دون غليان فعلياً. تراوح استهلاك AgI من 5 غرامات في الساعة حتى 1 كغ في الساعة. تحوي الشعلة EW-20 على 78 % $AgIO_3$ ، و 12 % Al ، و 4 % Mg و 6 % مادة





رابطة **Binder**، وسوف ينتج عنه 20 غرام من **AgI** عند الاختزال، ولذلك يُعرف باسم **20g flare**.

ترجع فعالية يوديد الفضة كنواة جليدية إلى طبيعته الفوقية. التركيب البلّوري لـ **AgI** مطابق تقريباً لبنية الجليد. ففي الشكل البلّوري السداسي لـ **AgI**، تشغل أيونات الفضة واليوديد مواضع مماثلة لتلك الموجودة في ذرات الأكسجين في الشبكة الجليدية، وتكون المسافات متشابهة جداً.

ومن ثم، فإنّ الطبقة الأولى من جزيئات الماء التي توضع على ركيزة من يوديد الفضة تتلاءم بشكل وثيق جداً مع الهيكل الشبكي ليوديد الفضة، وبالتالي فإن الطاقة السطحية في الواجهة تكون قليلة جداً. مرة أخرى يكون الشكل المكعب من يوديد الفضة فعّالاً كنواة جليدية. كما أن لديها مسافات على طول مستويات معينة تتطابق مع تباعد شبكي جليدي يبلغ **0.452 نانومتر**.

وجد الباحثون أن بلّورات **CuI-3AgI** المترسبة، التي لا تحوي على أي خلل في الأساس، يمكن أن تعمل بمثابة نواة جليدية عند درجات حرارة تتراوح بين **-0.5 و -1.0 درجة مئوية**.

أجاب علماء التجربة الأولى (مشروع سيروس) على النوى المثلى المطلوبة لتحويل القطرات السحابية فائقة التبريد المتاحة إلى جليد. في عام 1949، قدر الباحث تور بيرجيرون أن نسبة بلورة جليدية واحدة (والتي يمكن تشكيلها على نواة اصطناعية) إلى 1000 قطرة ماء فائقة التبريد كانت كافية لزيادة هطول الأمطار. ونظراً لوجود نحو 10^8 قطرات سحابة / م³، فستكون هناك حاجة إلى 10^5 نواة / م³. يؤدي هذا إلى نمو الكتلة بمقدار 1000 ضعف و10





أضعاف في نصف القطر. ومن ثم تصير قطيرة سحابة قطرها 10 ميكرون كرة جليدية قطرها 100 ميكرون وتكون السرعات النهائية للجسيمات كبيرة بما يكفي لضمان سقوطها.

لكن بلورة جليدية واحدة لكل قطرة سحابة فائقة التبريد ستحوّل السحابة بكاملها إلى بلورات جليدية صغيرة توقف الهطول الطبيعي والنتيجة ستكون تطعيماً زائداً. لكن الطبيعة في ظل ظروف هطول الأمطار المواتية، توفر عموماً نوى يبلغ عددها نحو $10^3 / \text{م}^3$ ، وبالتالي فإن أي تركيز أعلى من النوى من الناحية النظرية يؤدي إلى زيادة هطول الأمطار.

يُذكر أن إدخال 100000 جسيم جليدي / لتر من الهواء السحابي يجفف سحابة عادية في نحو دقيقة أو دقيقتين بينما يؤدي إدخال 1 إلى 10 جزيئات جليدية لكل لتر إلى تعزيز نمو جزيئات الجليد لمدة 20 دقيقة تقريباً قبل المياه السحابية التي يجري استنفادها بالكامل وستتحول جزيئات الجليد إلى رقائق ثلجية لهطول الأمطار.

لكن تركيز النوى الطبيعية الفعّالة يتأرجح مع درجات الحرارة. بشكل عام، تكون النوى بتركيز $10^3 / \text{م}^3$ عند -21 درجة مئوية. لكنها تميل إلى الزيادة 10 مرات بانخفاض 4 درجات مئوية في درجة الحرارة وتخفض النوى بمقدار 10 مرات مع كل زيادة بمقدار 4 درجات مئوية في درجة الحرارة وتكمن درجة الحرارة الحاسمة في أبرد جزء من السحابة، الذي يكون عادةً في الجزء العلوي من السحابة. في أستراليا عشر على نافذة درجة حرارة أعلى السحابة الملائمة لزيادة هطول الأمطار بين نحو -10 درجة مئوية و -23 درجة مئوية.





تنمو بلورة الجليد إلى حجم البذرة (نحو 250 ميكرون) في أقل من 10 دقائق عن طريق هطول بخار الماء. في السحابة الباردة، تتبخر القطرات دائماً للحفاظ على ضغط البخار عند مستوى تشبع أسطح المياه.

إن جزيئات الملح (كلوريد الصوديوم، ونترات الأمونيوم NH_4NO_3 ، واليوريا) بقطر من نحو 5 إلى 20 ميكرون إذا جرى حقنها في الغيوم تنمو بسرعة بسبب رطوبتها إلى 40 إلى 100 ميكرون بسرعة كبيرة وبعد ذلك عندما تتصادم هذه الجزيئات الكبيرة المطعمة تتحد مع قطرات سحابية صغيرة تتساقط.

ومع ذلك، فإن تطعيم الملح يفتقر إلى التأثير المضاعف لتطعيم يوديد الفضة. جزيئات الملح أكبر مليون مرة في الكتلة من جزيئات AgI. كما أن جزيئات الملح أقل في التركيز 100 مرة. ولكن في عام 1948، طور لانغموير عملية تفاعل متسلسل يمكنها مضاعفة تأثير التطعيم بشكل كبير.

تصير قطرة المطر التي يتراوح قطرها بين 5 ملم و 10 ملم غير مستقرة من الناحية الديناميكية المائية وتتكسر إلى نحو 10 قطرات. نظراً لأن السرعة النهائية لقطرة مطر كبيرة عند نقطة الانقسام تبلغ نحو 8 متر / ثانية، يجري تعليقها عند مستوى ثابت تقريباً في حركة صاعدة قدرها 8 متر / ثانية.

بعد التفكك، تتحرك القطرات الصغيرة لأعلى نحو سرعات تيار أقل، تنمو بالالتحام أثناء التحرك مع التيار الصاعد حتى تصبح كبيرة بما يكفي للتراجع. تتوقف مرة أخرى عند المستوى 8 متر / ثانية في التيار الصاعد وتتفكك مرة أخرى وهكذا دواليك تكرر الدورة.





إذا زاد تطعيم الملح من نمو بضع قطرات كبيرة، فيمكن في ظل هذه الظروف تعزيز الهطول ويصل المطر الإضافي الناتج عن ذلك إلى الأرض عندما يضمحل التيار الصاعد في نحو 20 دقيقة.

تنتج بعض السحب الركامية أحياناً هطول الأمطار من خلال مرحلة مختلطة تشمل عمليات الالتحام والجليد. تنتج عواصف البَرَد نوى البَرَد من خلال عملية الالتحام ثم يجري تجميدها. قد يبدأ التطعيم المبكر في هطول الأمطار ولكنه قد يعكس أو يقيد النمو الطبيعي للسحابة في وقت لاحق من اليوم، وبالتالي قد يؤدي التطعيم المبكر إلى زيادة وقت هطول الأمطار دون الحاجة بالضرورة إلى زيادة إجمالي هطول الأمطار.

• معدلات التطعيم

1. يلزم وجود نواة واحدة لكل لتر من الهواء السحابي من أجل هطول فعّال في ظل النهج الساكن. لكن نهج التطعيم السحابي الديناميكي يتضمن حقن 100 إلى 1000 نواة عند -10 درجات مئوية تحت الصفر لكل لتر من هواء السحب. في هذه العملية، يؤدي تحويل الماء السائل فائق التبريد إلى بلّورات ثلجية إلى إطلاق الحرارة الكامنة للانصهار التي بدورها تزيد من طفو السحابة. يعمل هذا الطفو على تنشيط السحابة وإطالة عمرها، مما يؤدي إلى زيادة التقارب في قاعدة السحابة. علاوة على ذلك، يؤدي هذا التطعيم الديناميكي في النهاية إلى جمع أفضل للتدفق المنخفض المستوى، وبالتالي زيادة احتمال اندماج العديد من السحب القريبة وتعزيز سقوط المطر.



2. سيكون تركيز نوى الجليد التي تنتج بلّورات ثلجية عند درجة حرارة 12- درجة مئوية نحو نواة جليدية واحدة لكل 100 لتر من الهواء السحابي. لكن نوى الجليد النشطة عند درجة حرارة 20- درجة مئوية ستكون نحو واحد لكل لتر وعند سالب 28 درجة مئوية ستكون نحو 100 لكل لتر. تكون تركيزات بلّورات الثلج لنوى جليدية نشطة بشكل طبيعي لإنتاج بلّورات ثلجية أقلّ عموماً من التركيزات اللازمة لاستخدام كل مكثفات السحابة عندما تكون درجات حرارة السحابة أكثر دفئاً من 25- درجة مئوية. إن التطعيم الساكن للسحب الباردة يزيد من هطول الأمطار على المعدل الطبيعي **ببضعة أعشار من المليمتر في الساعة فقط.**

3. غيوم التطعيم مع بلّورات الجليد نحو 10 إلى 20 لكل لتر من الهواء الغائم يعزز تساقط الثلوج بنحو 1 ملم في الساعة. تظهر الملاحظات الفعلية والحسابات النظرية أن نوى الجليد الاصطناعية الفعّالة تزيد على 10 لكل لتر من أجل الزيادات التي يمكن اكتشافها في هطول الأمطار. اقترح 10 إلى 100 بلورة تطعيم لكل لتر من السحب وقد تكون هناك حاجة إلى تركيزات أعلى لتحسين الهطول المعتدل. ومع ذلك، أظهر بعض الخبراء زيادة تساقط الثلوج المصنفة من يوديد الفضة AgI بنحو 1 ملم في الساعة مع بلّورات ثلجية مصنفة 140 لكل لتر.

4. تحوي السحابة الركامية على 100 قطرة لكل سم³، يحتل **مليون منها 10 لترات** من الهواء السحابي. نحتاج إلى نواة اصطناعية واحدة لكل 10 لترات من الهواء السحابي أو ربما نواة واحدة لكل لتر إذا افترضنا أن نوى المطر تنمو بشكل معقول عن طريق الالتحام عندما تسقط على الأرض. بافتراض





وجود 10^{12} نواة نشطة لكل جرام من عامل التطعيم مثل الثلج الجاف أو من مولدات AgI عند درجات حرارة من -6 درجات مئوية إلى -19 درجة مئوية، فإن السحب الركامية التي تتراوح عموماً في نطاق 31 كم^3 إلى 10 كم^3 (أو 10^{12} إلى 10^{13} لتراً) تحتاج إلى نحو 1 غرام إلى 10 غرامات من مادة التطعيم للتطعيم.

عندما يجري تحويل كميات كبيرة من المياه السحابية فائقة التبريد إلى جزيئات جليدية، يجري إطلاق الحرارة الكامنة في السحابة بمعدل 80 كالوري من الحرارة لكل غرام من الماء المجمد، وهذا يتسبب في زيادة درجة الحرارة داخل السحابة من 0.5 درجة مئوية إلى 1.0 درجة مئوية مما يسبب ضعفاً. يزيد حجم السحابة ويوفر مزيداً من الطفو لجعل السحابة ترتفع إلى أعلى في السماء. ولكن إذا كانت السحابة مطمورة في جو مستقر، فربما يكون للطفو تأثير إجمالي ضئيل في كثير من الأحيان. لكن في بعض الأحيان قد يتسبب في «تأثير متفجر» حسب الظروف البيئية الأخرى.

أشار عدد من الدراسات العملية والنظرية إلى وجود نافذة ذات درجة حرارة باردة لفرصة استمطار السحب. يشير استمطار السحب بالحمل الحراري والأوروغرافية إلى أن السحب الأكثر برودة من -25 درجة مئوية فيها عدد كبير من بلورات الجليد بحيث يصير التطعيم غير فعال أو قد يقلل من الهطول.

يتراوح نطاق درجة الحرارة الفعالة لتطعيم يوديد الفضة بين -5 درجة مئوية و -25 درجة مئوية ويعثر على إنتاج بلورات الثلج غير الفعالة عند درجات حرارة أعلى من -4 درجة مئوية بسبب نمو ترسب البخار البطيء. ومع ذلك، فإن تطعيم الجليد الجاف من الطائرات يمتد نافذة درجة الحرارة هذه إلى أقل من 0 درجة مئوية.



لقد حدث استمطار للسحب الباردة بشكل خاص في أستراليا والولايات المتحدة الأمريكية والاتحاد السوفيتي وكندا حيث لوحظت زيادات مقنعة وكبيرة في سقوط الأمطار في أيام التطعيم.

أظهرت تجارب التطعيم السحابي في أستراليا وتكساس وجنوب غرب الولايات المتحدة ارتفاعاً ديناميكياً في قمم السحب وامتدت مناطق المطر بسبب تطعيم السحب الركامية بالجليد الجاف ويوديد الفضة AgI.

لم تكن عمليات الترطيب فقط تتزايد بسبب التطعيم ولكن الطفو الإضافي كان يحمل التيار الصاعد من خلال الطبقات المستقرة المثبطة لانعكاسات الغلاف الجوي عند المستويات العليا للسحابة القديمة وبالتالي جرى تحسين حجم المياه المكثفة داخل السحابة. وبالتالي بدأت إجراءات التطعيم في التحسين والتطوير لشرح تأثيرات التطعيم السحابي.

أظهرت تجارب التطعيم السحابي في أستراليا سقوطاً إضافياً للمطر بنسبة 15% إلى 20% في خزانات تخزين المياه في تسمانيا.

أشار التطعيم الديناميكي للسحب الحملية في جنوب فلوريدا إلى هطول أمطار إضافية بنسبة 20% فوق المنطقة المستهدفة و50% أكثر في المنطقة المحددة على أنها الهدف العائم.

تعتبر تجربة التطعيم السحابي غير مكلفة وناجحة جداً إذا أجريت بعد إجراء الدراسات العلمية المطلوبة مسبقاً بما في ذلك النمذجة. ومن خلال التطعيم الجوي الديناميكي باستخدام يوديد الفضة، ترتفع ارتفاعات السحب بمقدار 2 كم ويزيد محتواها المائي إلى أكثر من مليون متر مكعب. تشير





الدراسات في أوكرانيا إلى أنه بينما يؤدي تطعيم سحابة واحدة إلى زيادة هطول الأمطار بنحو 25 % مقارنة بسحابة غير مطعمة، فإن تطعيم السحب متعددة الخلايا يؤدي إلى هطول مرتفع جداً مقارنة بالغيوم أحادية الخلية. وهكذا نجح استمطار السحب في العديد من البلدان بما في ذلك الولايات المتحدة الأمريكية وروسيا وكندا وأستراليا والهند وهو ما سنتكلم عنه لاحقاً.

• الاستمطار الدافئ

كل الهواء يحوي على رطوبة. عندما يرتفع الهواء الدافئ من سطح الأرض بسبب حرارة الشمس، يبدأ الهواء الصاعد إلى السماء في البرودة وتتكاثر بعض الرطوبة على جزيئات الغبار إلى قطرات صغيرة مسببةً تكون السحب. تتكون الغيوم عموماً على بُعد كيلومتر واحد أو كيلومترين من مستوى الأرض اعتماداً على درجة الحرارة المحيطة وبخار الماء والظروف المناخية والسمات الطبوغرافية.

سيكون من المثير للاهتمام معرفة أن أكثر من 99 % من محتوى السحابة هو الهواء. ومن ثم فإن السحب تحوي فقط في المتوسط على واحد بالمائة من إجمالي رطوبة الغلاف الجوي في أي وقت؛ لذا حتى لو ضاعف استمطار السحب من كفاءة السحابة لإعطاء المطر، فربما يزيل النظام السحابي نحو 2 % فقط من رطوبة الغلاف الجوي المتاحة تاركاً نسبة 98 % المتبقية لأغراض أخرى.

من المعروف أن الغيوم تبدأ في التكون في السماء عندما يصير الهواء شديد التشبع، وبالتالي يجبر بخار الماء على التكاثر على جزيئات تعرف باسم نوى تكثيف السحب (CCN) التي تنمو إلى قطرات السحب.



تتشكل بلّورات الجليد أيضاً في تلك المناطق من السحابة حيث تكون درجات الحرارة أقل من مستويات التجمد بينما تتعايش القطرات السائلة أيضاً في بيئة تحت التجمد مثل المياه السائلة فائقة التبريد (SLW) التي تعد مفتاح استمطار السحب. ولكن هناك أيضاً عملية استمطار للغيوم الدافئة.

قام العديد من العلماء بالتحقيق في العوامل المختلفة التي أثرت في تكوين السحب وهطول الأمطار. وجد أن بعض السحب تهطل عند وجود ظروف مواتية.

قطرات الماء في السحب صغيرة جداً (نصف قطرها 10 ميكرومتر) بحيث لا يمكنها الوصول إلى الأرض دون أن تتبخر قبل لمس الأرض. ومن ثم، إذا جرى تشكيل قطرات مطر كبيرة (نصف قطرها 500 إلى 2000 ميكرومتر) يمكن أن تصل إلى الأرض دون تبخر، يجب أن تتحد نحو مليون قطرة سحابة صغيرة، ولهذا الغرض لا يكفي مجرد الالتحام والتكثيف.

• نظريات تشكيل قطرة المطر

يوجد نظريتان حول تكوين قطرات المطر، كل منهما صالحة في ظل ظروف مناخية مختلفة.

تستند النظرية الأولى لتكوين قطرة المطر على «تفاعل لانغموير المتسلسل» "Langmuir chain-reaction" الذي يحدث غالباً في الجو الحار والرطب في المناطق المدارية. تسقط القطرات الأكبر بشكل أسرع من القطرات الأصغر، كما أن القطرات الأكبر في السحابة تمتص جميع القطرات الأصغر الموجودة في مسارها الهابط.





في السحابة الصاعدة، تعمل التيارات الصاعدة على تعليق القطرات الكبيرة في حين يتم التقاط الصغيرة منها وتدمج مع الكبيرة. إذا صارت القطرات الكبيرة كبيرة جداً، فإنها تنفجر إلى شظايا تتصادم مرة أخرى وتتحد مع قطرات صغيرة وتسقط في النهاية على الأرض كقطرات مطر.

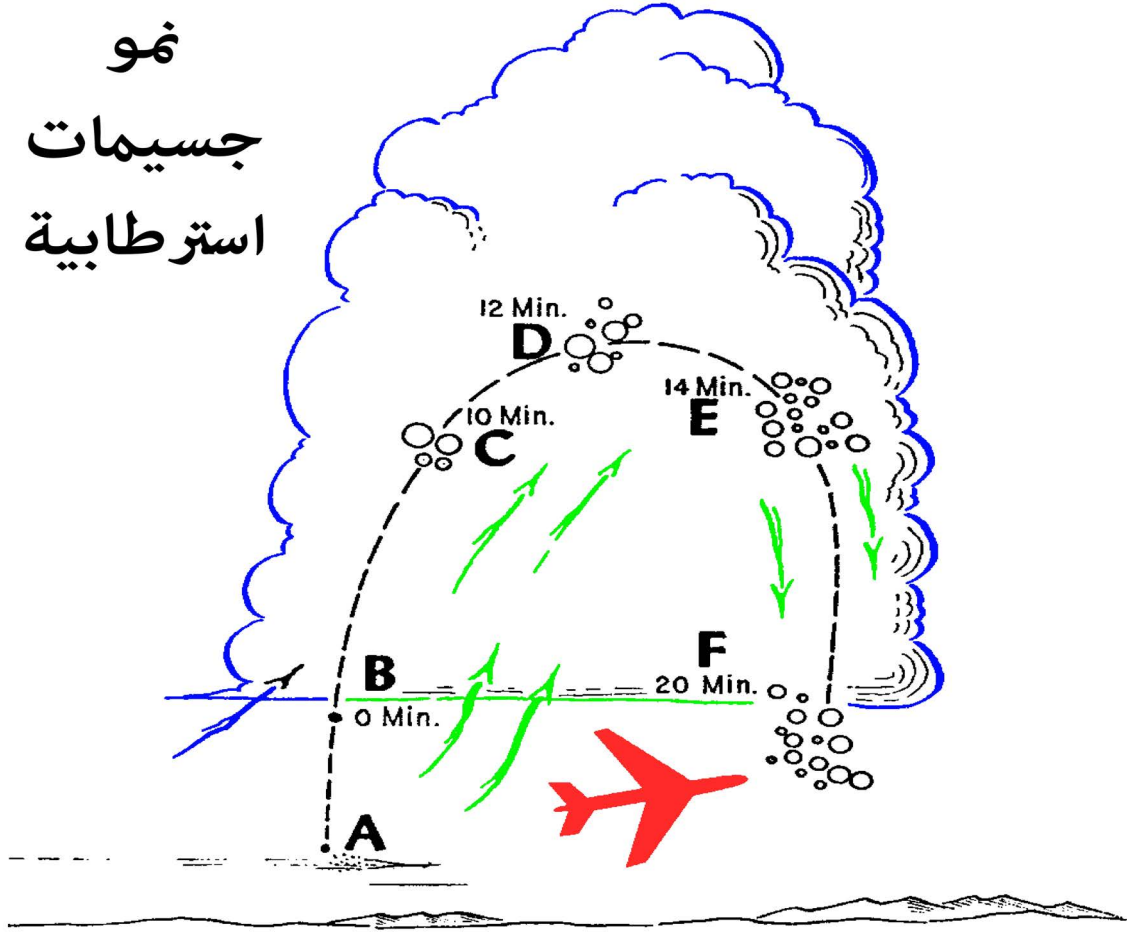
تستند النظرية الثانية لتكوين قطرة المطر إلى «تفاعل بيرجيرون المتسلسل» **“Bergeron chain-reaction”** الذي يحدث غالباً في المناطق المعتدلة. تتكون السحب التي تترسب على مستويات أعلى، من بلورات الجليد وبخار الماء شديد البرودة. لتشكيل قطيرات كبيرة في السحابة، يعتبر الطور الجليدي شرطاً مسبقاً، ولهذا الانتقال من الحالة السائلة إلى الحالة الصلبة، فإن نواة التجميد ضرورية. تسمح نوى التجميد بتبريد فائق لقطرات الماء حتى -15 درجة مئوية قبل حدوث تكوين الجليد.

لا يتجمد الماء النقي المعلق في الهواء حتى يلمس درجة حرارة -40 درجة مئوية. تنمو بلورات الجليد بسرعة عن طريق امتصاص جميع القطرات فائقة البرودة في طريقها إلى الأسفل وتتشكل كتل كبيرة من الجليد وتذوب عند مستوى درجة الصفر تقريباً في السماء لتصبح قطرات مطر تسقط على الأرض.





نمو جسيمات استرطابية



- .A إطلاق جسيم استرطابي (قطر 0.0008 بوصة).
- .B ينمو الجسيم بالتكثيف حتى قطر 0.003 بوصة.
- .C ينمو الجسيم بالاندماج إلى قطر 0.2 بوصة ويتكسر إلى قطرات أصغر.
- D & E تنمو القطرات المتكونة عند C وتكسر مرة أخرى عندما يكون قطرها = 0.2 بوصة.
- .F تسقط قطرات من قاعدة السحابة.





يوجد نقص خطير في قطرات الماء الكبيرة التي يزيد قطرها على 20 ميكرون في السحب الدافئة المراد تطعيمها، وهذا يقلل من كفاءة السحابة في إعطاء المطر. من أجل حث مثل هذه السحب على إعطاء المطر، يجب تحفيز آليات الالتحام عن طريق حقن الغيوم بجزيئات رطبة مثل الصوديوم أو كلوريد الكالسيوم من طائرة. ويحصل تفاعل لانغموير المتسلسل على دفعة، وتصير السحب التي كانت غير منتجة سابقاً منتجة والغيوم التي كانت ستعطي هطولاً طبيعياً للأمطار ستوفر بعض الأمطار الإضافية.

وبالمثل، تجري إزالة ندرية بلورات الجليد في السحب الباردة عن طريق تطعيمها بيوريد الفضة لضمان نواة واحدة لكل لتر من الهواء السحابي بحيث يولد هذا التطعيم بلورات جليدية إضافية وبالتالي تسريع عمليات تكوين المطر لتوفير هطول أمطار إضافية.

نظراً لوجود بلورات الملح بكثرة في المناطق المحيطية بسبب حركة الأمواج والتبخر، فإنها تفضل قطرات السحب الأكبر التي تتصادم وتتجمع لبدء هطول الأمطار بشكل جيد خلال فترة حياة السحب. تغطي المحيطات نحو 70 % من سطح الأرض وتتلقى نحو 80 % من الأمطار العالمية.

لكن الغلاف الجوي فوق المناطق القارية يحوي عمومًا على نوى تكثيف أصغر بكثير وأكثر عددًا بدون محتوى رطب كبير كما هو الحال في الغلاف الجوي البحري، ومن ثم تتبدد الغيوم المتوسطة الحجم في مثل هذه المناطق عادةً قبل أن تتاح لآلية الالتحام فرصة لبدء المطر.





تعتمد زيادة تساقط المطر من السحب الدافئة على افتراض وجود نقص في النوى العملاقة للرطوبة (GCN) لتغيير قطرات السحب إلى قطرات المطر وإذا تم حقن جزيئات الملح في السحب المناسبة، فإنها ستتمو بالتكثيف ثم عن طريق آليات الاصطدام والالتحام التي تبدأ سقوط المطر خلال فترة حياة السحب.

• طرق التطعيم الرطب

للقيام بالتطعيم الرطب تستخدم طريقتان لتعزيز آلية الاصطدام - الالتحام:

1. تتضمن الطريقة الأولى لتطعيم الملح وضع مئات الكيلوغرامات من جزيئات الملح بقطر 10 ميكرون إلى 30 ميكرون بالقرب من قاعدة السحابة لإنتاج قطرات بحجم رذاذ على الفور.
2. تستخدم الطريقة الثانية شعلات الملح لتفريق نحو 0.5 إلى 1 ميكرون من الجسيمات بحجمها إلى سحابة صاعدة عن طريق إطلاق مشاعل بحجم كيلوغرام واحد من الطائفة من أسفل قاعدة السحابة. يجري إطلاق العديد من الشعلات أحياناً لكل سحابة.

• أحجام نوى التطعيم

أثناء التحقق ما إذا كانت قطرة ماء كبيرة في سحابة ستتصادم مع قطيرة صغيرة أخرى قريبة، تم العثور على عدم حدوث تصادمات إذا كان قطر القطرة أقل من حد هوكينغ Hocking limit البالغ قطره 38 ميكرون (ما يسمى بحد هوكينغ البالغ 19 ميكرون هو نصف قطر القطرة). إذا كان حجم القطرة أقل من 20 ميكرون، فقد لا يحدث أي مطر بالالتحام في أقل من 40 إلى 60 دقيقة.





ذكر لانغموير أن قطرات المطر الكبيرة التي يبلغ قطرها 5 ملم تصير غير مستقرة ديناميكياً وتتحول إلى قطرات أصغر تعمل بمثابة نوى قطرة المطر (نحو 250 ميكرون) لتسريع تحويل العديد من قطرات السحب الصغيرة الأخرى إلى قطرات مطر، بخاصة في السحب التي تزيد على (6 إلى 8 قطرات متر في الثانية) يجب أن تكون قوية بما يكفي لدعم قطرات المطر هذه.

نظرياً لتغيير الفيزياء الدقيقة للسحابة لإنتاج المزيد من المطر، يمكن للمرء إضافة عوامل تطعيم اصطناعية (SCCN) بحجم وكمية كافية لمنع تنشيط جزيئات الغبار الطبيعية (CCN) بحيث تترسب الرطوبة في السحابة.

من خلال إدخال جزيئات من 1 إلى 3 ميكرون بمعدل 25 إلى 100 لكل سنتيمتر مكعب، قد يكون من الممكن التقاط كل الرطوبة تقريباً ومنع جزيئات الغبار الطبيعية التي لا حصر لها (CCN) من المشاركة في عملية تكوين السحب.

لتنفيذ هذا المفهوم، إذا جرى استخدام جزيئات كلوريد الصوديوم بحجم 2 ميكرون بمعدل 50 لكل سنتيمتر مكعب، فإن السحب الركامية عن طريق تناولها بمعدل مليون متر مكعب من الهواء في الثانية، تتطلب معدل تطعيم يبلغ 30 كغ من مادة كيميائية في الدقيقة وهذه العملية الثقيلة يكاد يكون من المستحيل تنفيذها.

ولكن إذا افترضنا أن هطول الأمطار يعمل كعدوى، فيمكن أن ندرك أنه بمجرد أن يبدأ هطول الأمطار في أي مكان في السحابة، فإنه ينتشر على شكل قطرات مطر وينقل الأجزاء بواسطة الدوران الداخلي للسحب والاضطراب. ومن ثم فإن تطعيم شعلة واحدة لمليون متر مكعب من الهواء، على سبيل المثال، قد ينجح.



ولكن هناك طريقة أخرى لتعزيز الالتحام عن طريق إدخال نوى قطرات المطر الاصطناعية في السحابة عن طريق رش قطرات ماء كبيرة في السحابة. بدلاً من تغيير كل قطرات السحابة في السحابة لتسريع عملية الالتحام، يمكن للمرء أن يتجنب المراحل الأولية من التغييرات في قطرات السحب، فنحن نقدم جزيئات كبيرة تعمل كنوى لقطرة مطر على الفور. لكن هذا ينطوي على استخدام كميات كبيرة جداً من الماء ليجري رشها من الطائرة وهذا مكلف جداً. من أجل تقليل هذه المشكلة اللوجيستية، يمكن معالجة السحابة بعوامل رطبة مثل كلوريد الكالسيوم أو كلوريد الصوديوم في شكل جزيئات جافة أو قطرات رش تشكل نوى لقطرة المطر من خلال عملها الرطب.

يشبه هذا الإجراء توفير **CCN** العملاقة التي تؤثر في تكوين بعض زخات المطر فوق المحيطات. ومع ذلك، إذا كانت نوى قطرات المطر الاصطناعية هذه فعّالة، يجب أن يكون قطر الجزيئات الرطبة العملاقة عشرات الميكرومترات، ويجب أن تنتج الجسيمات نوى تتجاوز حد هوكينغ البالغ **38 ميكرون** في القطر.

علاوة على ذلك، يجب أن يبدأ عامل التطعيم في العمل كنواة لقطرة المطر فور حقه في السحابة. تشير نماذج السحب أحادية الأبعاد إلى أن تطعيم السحب بجزيئات كلوريد الصوديوم التي يزيد قطرها على **120 ميكرون** ينتج أمطاراً بعد 10 إلى 12 دقيقة من تطعيم قاعدة السحب.

ولكن إذا جرى استخدام جزيئات أصغر، فإن قطرات المحلول لن تنمو ببطء شديد فحسب، بل سيجري إخراجها أيضاً في كثير من الأحيان من أعلى السحابة دون أن تنمو بشكل كبير بما يكفي لبدء السقوط مرة أخرى ضد التيارات الصاعدة. تظهر الدراسات البحثية أن التطعيم الرطب مفيد للغيوم





ذات درجات الحرارة الأساسية فوق 0 درجة مئوية بشكل عام و10 درجات مئوية بشكل خاص.

تزداد أحجام النوى الرطبة بالتناسب المباشر مع سرعة التيار الصاعد. بالنسبة لسحابة ركامية بعمق 5 كم مع تيار صاعد معتدل يبلغ 12 مترًا في الثانية، يجب أن يكون قطر جزيئات كلوريد الصوديوم المحقونة في قاعدة السحابة أكثر من **40 ميكرونًا** للقطرات الناتجة لتجنب طردها من أعلى السحابة. ومع ذلك، فإن استخدام نوى رطبة بقطر **50-100 ميكرون** يمثل مشكلة لوجستية خطيرة.

إذا جرى تقدير تركيز النواة اللازم لتعزيز الالتحام بـ 1000 لكل متر مكعب من السحابة، فسيكون عدد الجزيئات المسترطبة لتطعيم السحابة بكاملها 10^{15} وإذا كان قطر الجسيم **100 ميكرون**، فستكون هناك حاجة لبضعة أطنان من مادة التطعيم للغيوم.

ومع ذلك، إذا كان لا بد من التغلب على هذه المشكلة، يتعين على المرء أن يفترض أن قطرات المطر المتكونة حول النوى الاصطناعية سوف تنقسم إلى شظايا مما يؤدي مرة أخرى إلى إنشاء المزيد من نوى قطرات المطر.

لهذا الغرض، يجب إنتاج قطرات مطر من 2 إلى 3 ملم وإعاقة نزولها عبر السحابة لتجربة الاصطدامات والتفكك وهذا يتطلب عمليات ترطيب تتجاوز 5 أمتار في الثانية كل دورة نمو وتفكك، ومرة أخرى النمو في السحابة يستغرق نحو 4 دقائق.

ليس من الواضح ما إذا كانت عمليات إعادة التدوير هذه ستصيب السحابة بكاملها قبل أن تحصل عمليات الهطول الطبيعية على النتيجة نفسها. في النهاية



يتعين أن يتخذ قرار بشأن حل وسط معقول يتطلب استخدام 25 كغ إلى 50 كغ من كلوريد الصوديوم أو مسحوق رطب آخر مثل كلوريد الكالسيوم لسحابة ذات حجم معتدل.

وقد عثر على هذه الجرعة لتكون معقولة على أساس نتائج التجارب المختلفة التي أجريت في أماكن مختلفة. من الضروري أن نتذكر أنه بمجرد ظهور هطول الأمطار في أي مكان في السحابة، ستتتشر قطرات المطر وشظايا قطرات المطر في جميع أنحاء السحابة من خلال حركاتها الداخلية المنظمة والاضطراب.

ومن ثم يجب تحديد جرعات المواد الكيميائية التي ستستخدم لاستمطار السحب على أساس أنظمة السحب، والترطيب، والمعايير الطبوغرافية، والأرصاد الجوية، إلخ.

• الأساس التقني

لقد استخدم بحث وتطبيق تعديل الطقس لأكثر من ثلاثين عاماً في العديد من مناطق العالم لعدة أغراض مختلفة بما في ذلك تحسين هطول الأمطار (المطر و / أو الثلج) وتقليل البرد وتبيد الضباب.

وقد أشارت الدراسات التي أجراها برنامج أبحاث الجفاف في الجنوب الغربي وتقرير **Texas Biplax** إلى إمكانات برنامج زيادة الأمطار الصيفية. والأساس التقني لاستمطار السحب من أجل هطول الأمطار هو استخدام عدد كبير من السحب الحملية غير الفعالة في عملية هطول الأمطار.





يمكن أن يؤدي حقن جزيئات معينة في السحب المناسبة إلى زيادة كمية ومعدل تكوين الهطول عن طريق زيادة كفاءة هذه السحب.

عندما يجري تسخين الهواء الرطب بالقرب من الأرض، يصير أكثر دفئاً من البيئة المحيطة ويبدأ في الارتفاع. مع ارتفاع الهواء يتمدد ويبرد مما يرفع الرطوبة النسبية حتى تصير 100%. مع مزيد من الرفع، يصير الهواء مفرط التشبع ويتشكل تكاثف.

يمثل مستوى التكثيف هذا قاعدة السحب. عندما تصل السحب إلى ارتفاع في الغلاف الجوي حيث تكون درجة الحرارة أبرد من صفر مئوية، فإن بعض قطرات الماء ستتجمد. العامل الذي يحدد ما إذا كانت السحابة ستتجمد هو درجة نقاء الانخفاض. كلما كانت القطرة أكثر نقاءً، يمكن أن تصير أكثر برودة قبل أن تتجمد.

من أجل تكوين هطول الأمطار، يجب أن تتصادم قطرات السحب مع قطيرات أخرى أو يجب أن تتجمد وتتمو على شكل بلورات جليدية كبيرة، وتكون العملية الأخيرة أسرع وأكثر كفاءة.

يتم إنتاج بلورات الجليد عن طريق تفاعلات الرطوبة والجزيئات المجهرية التي تسمى نوى التجميد. هذه هي العملية التي يكون فيها التلطيم السحابي مفيداً. من خلال إضافة نوى اصطناعية إلى السحابة (عند مستوى 5- درجات مئوية إلى 15- درجة مئوية)، حيث تكون نوى الجليد الطبيعية ناقصة، يمكن بدء عملية نمو هطول الأمطار أو تحسينها.

حددت الأبحاث السابقة أن يوديد الفضة (AgI) هو أفضل عامل نواة لأن



تركيبته البلورية تشبه تركيب بلّورات الجليد الطبيعية. يتم حقن جزيئات AgI المجهرية في السحب المناسبة بطرائق مختلفة للمساعدة في عملية الهطول.

معايير تعليق عمليات التطعيم

نظراً للعدد الكبير من متغيرات الغلاف الجوي التي قد تسهم في الطقس في أي وقت، فقد جرى تطوير معايير التعليق لتجنب المساهمة أو الظهور في المساهمة في حالة خطرة.

فيما يأتي المعايير المستخدمة لتعليق عمليات التطعيم:

1. لا تطعم الأعاصير والسحب الحاملة للقمع عن قصد.
2. بناءً على قياسات انعكاسية الرادار، لا يتم تطعيم أنظمة السحب التي لديها القدرة على إنتاج هطول أمطار غزيرة في فترة زمنية قصيرة، وكذلك جميع السحب ضمن دائرة نصف قطرها 23 ميلاً من هذه الأنظمة. حيث استند تحديد احتمالية هطول الأمطار الغزيرة إلى المعايير الآتية:
 - أ. لا تطعم أنظمة السحب التي تتكون فقط من السحب الطبقيّة.
 - ب. لا تطعم نوى العواصف الثابتة.
 - ت. لا تطعم خلايا الحمل الحراري أو أنظمة السحب المتحركة الأخرى وستعلق أنشطة التطعيم إذا كان، بناءً على معطيات الرادار، سينتج النظام أو سيبدأ في إنتاج أكثر من بوصة واحدة في الساعة من الأمطار عند نقطة ثابتة على الأرض.





3. أيضاً لا تطعم مجتمعات العاصفة التي كان من المتوقع أن ينتج عنها برّد يصل إلى الأرض. المعايير التي جرى استخدامها هي مراقبة مستوى 45 dBz على الرادار 5 سم عند أو فوق 1.5 كم فوق مستوى التجميد. وجرى تطوير هذه المعايير للتمييز بين السحب التي تُنتج البرّد الذي يصل إلى الأرض وتلك التي لا تنتج.

4. لا تتخذ إجراءات التطعيم داخل منطقة المشروع كلما أصدر تحذير من الطقس القاسي التابع لخدمة الطقس الوطنية الذي يثر على أي جزء من المنطقة المستهدفة.

5. عند وجود رطوبة زائدة في التربة، فإنه يجري تحديد هذه الحالة من قبل مسؤولي المنطقة، وإذا طلب ذلك، لا يجري تطعيم على أي عواصف في المنطقة المحددة.

6. لا يجري أي تطعيم داخل المنطقة المستهدفة عندما تكون تحذيرات الأعاصير سارية لأي جزء من المنطقة المستهدفة.

7. تعلق العمليات، عندما يرى خبراء الأرصاد الجوية في المشروع وجود حالة خطيرة.

8. لا تطعم السحب المناسبة التي كان من المتوقع أن تخرج من حدود المنطقة المستهدفة في غضون 60 دقيقة. ويجري استخدام الرياح عند ضغط 700 ميغا بار للتنبؤ بحركة الخلية جنباً إلى جنب مع أرصاد رادار الطقس.





• الإجراءات التنفيذية

يعتمد نجاح أي برنامج على تقاني الموظفين الميدانيين المختارين. نظراً لأن الطقس يحدث على مدار 24 ساعة، يجب أن يكون الموظفون مستعدين لإجراء العمليات في غضون مهلة قصيرة. لذلك، كان الموظفون الميدانيون يعملون بشكل أساسي على مدار 24 ساعة و 7 أيام في الأسبوع.

توجد أيام لا يمكن فيها التنبؤ بالطقس المناسب (على سبيل المثال، وصول السحب إلى مستوى -10 درجات مئوية) وفي ظل هذه الظروف، جرى البدء في وضع الاستعداد الذي سمح بمزيد من الحرية لموظفي المشروع. ومع ذلك، جرى تشجيع المراقبة البصرية لأي نشاط طقس غير متوقع.

فيما يأتي ملخص للمعايير الرئيسية:

1. يجب أن تكون درجة حرارة السحابة العلوية للخلايا الحرارية المتكونة حديثاً بين -5 مئوية و -25 درجة مئوية. ينطبق هذا على كل من الخلايا والخلايا الجديدة المجاورة لمجمعات الحمل الحراري الأكبر.
2. يجب أن تكون سرعة التيار الصاعد داخل السحابة أكبر من 400 قدم / دقيقة قبل إطلاق الشعلات.
3. اعتبارات أخرى هي: محتوى الماء السحابي، وقوة الحمل الحراري، وظروف الغلاف الجوي العلوي.





• تجارب الصندوق البارد

كانت التغييرات المادية الناتجة عن تطعيم السحب فائقة التبريد واضحة في تجارب الصندوق البارد الأولى التي أجراها الباحث **شايفر Schaefer** والتي بدأت بتعديل علمي للطقس. في وقت لاحق من العام نفسه، نشر شيفر الجليد الجاف على طول خط فوق سطح سحابة طبقيّة فائقة البرودة، والتي تحولت بسرعة إلى رقاقت ثلجية تساقطت على بُعد نحو 600 متر قبل أن تتسامي.

تظهر عدة صور فوتوغرافية من أواخر الأربعينيات أجزاءً من سحابة ستراتوس فائقة التبريد تحولت إلى بلورات جليدية. وهكذا، فإن الدليل المادي على أن التطعيم يمكن أن يحول السحابة فائقة التبريد إلى جزيئات جليدية متاح من أقدم عمل في تعديل الطقس العلمي. ومع ذلك، فقد ثبت أنه من الأصعب بكثير الحصول على دليل مادي على أن التطعيم يبدأ سلسلة معقدة من الأحداث التي تؤثر في النهاية على الهطول السطحي.

كان الكثير من تجارب التطعيم السحابي في الخمسينيات والستينيات من القرن الماضي ذات طبيعة إحصائية، حيث كانت الغيوم مصنفة أو تُترك كحالات تحكم بناءً على قرار عشوائي. كانت التجارب عادةً من نوع «**الصندوق الأسود**» **black box**»، حيث جرى إطلاق مادة التطعيم ومراقبة هطول الأمطار ولكن لم تجر ملاحظة العمليات الفيزيائية المتداخلة بشكل روتيني بسبب القيود في الأجهزة.

في حين أن بعض هذه التجارب اقترحت بشدة تغييرات هطول الأمطار (زيادة أو نقصان) المتعلقة بالتطعيم، لم يتم قبول أحد على نطاق واسع على أنه قدم دليلاً علمياً على حدوث مثل هذا التعديل.





• العوامل المؤثرة في نجاح التجارب الفيزيائية

يجدر بنا محاولة فهم سبب الحصول على نتائج هامشية من بعض التجارب الفيزيائية، ونتائج مبهرة من بعض التجارب الأخرى. الواقع يعود ذلك إلى جملة من العوامل الآتية:

1. تأثير شدة هطول الأمطار

ظهر عدد من الدروس لدى مراجعة التجارب الفيزيائية المختلفة. أولاً، وليس من المستغرب، أنه من الأسهل بكثير توثيق تأثيرات التطعيم التي تؤدي إلى تساقط الثلوج على السطح من السحب غير المتساقطة مقارنة بتلك التي تكون فيها الطبيعة فعّالة إلى حد ما بالفعل.

يمكن أن تكون إشارة التطعيم واضحة من السحب ذات **IPC** المنخفض، كما هو موضح خلال تجارب التطعيم الثلاثة الأولى في **غراند ميسا Grand Mesa** في 18 مارس 1986. أيضاً، أدت تجربة التطعيم الأرضي بعد يومين إلى تساقط الثلوج الوحيد في أي مكان في **غراند ميسا**.

كانت فترات الهطول القليلة أو عدم الهطول مع **SLWare** شائعة في عواصف أريزونا الشتوية. وقد أشارت أرصاد الرادار، و**SLW**، ومعدل هطول الأمطار فوق **موغولان ريم Mogollon Rim** إلى أن مرحلتي البداية والنهاية للعاصفة غالباً ما كانتا تستغرقان عدة ساعات مع القليل من تساقط الثلوج الطبيعي ووفرة المياه العذبة، وحدثت حالات مماثلة أثناء منتصف بعض العواصف.

من المهمّ بالطبع إثبات ما إذا كان التطعيم يمكن أن ينتج دليلاً مادياً على زيادة تساقط الثلوج عند حدوث بعض تساقط الثلوج الطبيعي، ولكن لا يزال





هناك فائض من **SLW**. وقد أظهرت أدلة على زيادة تساقط الثلوج أثناء تساقط الثلوج الخفيف بشكل طبيعي، وأدلة مماثلة على مستويات الطائرات.

من المرجح أن يكون من الصعب بشكل متزايد إثبات أن التطعيم يعزز تساقط الثلوج مع زيادة معدلات هطول الأمطار الطبيعية. عندما تصير الطبيعة فعّالة جداً، لا يمكن أن تزيد التطعيم من تساقط الثلوج لأن كل **SLW** المتاح قد جرى تحويله بالفعل إلى جليد. لحسن الحظ، تميل غيوم أريزونا الشتوية إلى أن تكون إما فعّالة تماماً وإما غير فعّالة أبداً.

قد يكون هذا الاتجاه شائعاً في جميع أنحاء المنطقة الجبلية الغربية. على سبيل المثال، أشار الباحثون إلى أن السحب فوق الشلالات كانت بشكل عام في فئتين: تلك التي لا تتجاوز فيها تركيزات جزيئات الجليد مطلقاً 0.1 لتر، وتلك التي لا تقل فيها التركيزات القصوى عن نحو 10 لترات بغض النظر عن درجة الحرارة.

يبدو من المحتمل أن تحليل التجارب الفيزيائية الفردية المصممة جيداً سيظهر تعزيزاً لتساقط الثلوج من السحب غير الفعّالة بشكل طبيعي، ولا يوجد تحسين من السحب الفعّالة جداً، والأدلة توحي فقط على وجود زيادة تساقط الثلوج من السحب ذات الكفاءة المعتدلة. ومع ذلك، يجب أن يؤدي تجميع العديد من التجارب المماثلة إلى تعزيز قوة التحليلات.

2. تتبع حجم النوى المحمولة جواً

من العوامل المشتركة المهمة جداً للتجارب الفيزيائية الناجحة التتبع الجوي لحجم النوى بين نقطة أو خط الإطلاق والمنطقة المستهدفة. تعد تعقيدات تدفق





الهواء ثلاثي الأبعاد فوق الجبال كافية لإثارة الشك في أي تقديرات لسرعة الرياح والاتجاه بناءً على عمليات السبر عكس اتجاه الرياح (و / أو) بعض قياسات السطح المحلية. يكاد يكون من الضروري أن تقوم مراقبة الطائفة بإمكان انتقال مادة التطعيم حتى تمر فوق الهدف، أو يظهر أنها أخطأت الهدف. بعض المناطق فيها مناطق خطيرة في المجال الجوي -على سبيل المثال- الطرقات بين المطارات الرئيسية. يجب تجنب مثل هذه المناطق ذات الحركة المرورية العالية في تجارب التخطيط لأن كتل المجال الجوي المطلوبة لن تكون متاحة في كثير من الأحيان.

هناك اعتبار أكثر جدية وهو تجنب الحواجز الجبلية التي تمنع الطيران بالقرب من السطح. القيد المعتاد هو أن الطائرات التي تحلق بموجب **IFR** (قواعد الطيران الآلي) يجب أن تبقى على ارتفاع 600 متر على الأقل فوق أعلى التضاريس ضمن 8 كيلومترات من مسار الرحلة. يمكن الحصول على تنازلات خاصة في بعض المواقع للسماح بالطيران في نطاق 300 متر من التضاريس، ولكن عادة ما تكون المساعدة الملاحية القريبة مطلوبة.

حتى إذا كان الهدف على ارتفاع عالٍ، فقد تمنع القمم المرتفعة القريبة أخذ عينات من الطائرات في نطاق كيلومتر واحد أو أكثر فوق الموقع المستهدف. ومع ذلك، تظهر مجموعة متزايدة من الأدلة أن معظم **SLW** يتركز في أقل كيلومتر فوق منحدر اتجاه الرياح. يمكن أن يحدث نمو كبير للجسيمات الجليدية في هذه المنطقة، لذا فإن وجود «فجوة» رأسية بين أرصاد الطائرات الأدنى والسطح ستسبب قدراً كبيراً من عدم اليقين فيما يتعلق بنمو وتساقط واستهداف جزيئات الجليد الناتجة عن التطعيم.





عانت تجارب **SCPP** -على سبيل المثال- من صراعات في المجال الجوي وحاجز قوي يجعل الطيران بالقرب من الموقع المستهدف غير عملي. كانت الحالة الأخيرة أيضاً مشكلة في تجارب أوائل عام 1989 في جبال توشار. سيسمح الحاجز الجبلي المثالي للتجربة بأخذ عينات سطحية على خط القمة، ولن يكون له قمم أعلى بالقرب من الموقع المستهدف، ولن يكون له خط قمة مفاجئ يمكن أن يوجد اضطراباً شديداً في اتجاه الرياح، وسيكون له مساعدات ملاحية قريبة مثل محطة **VORTAC**. لحسن الحظ، أجزاء من **سلسلة جبال موغولون ريم Mogollon Rim** تقارب النموذج المثالي باستثناء نقص المساعدات الملاحية القريبة.

3. الكشف المباشر عن عامل التطعيم

مطلب آخر للتجارب الفيزيائية هو إما أن تكون مادة التطعيم قابلة للاكتشاف، أو يجري إطلاق مادة التتبع في وقت واحد. يمكن تتبع يوديد الفضة باستخدام عداد نواة الجليد الصوتي ولكن لا يمكن تتبع الجليد الجاف. يمكن للتغيرات الطبيعية في **IPC** إخفاء جزيئات الجليد الناتجة عن التطعيم بسهولة ما لم يقاس مادة التطعيم نفسها، أو مادة التتبع مثل غاز **SF6**، بشكل مستقل لتمييز الحجم المصنف من السحابة الطبيعية. بمعنى آخر، ستؤدي محاولة تحديد حجم النوى من خلال مراقبة جزيئات الجليد وحدها إلى تفسير غير مؤكد لتأثيرات التطعيم.

يجب توخي الحذر في تتبع **AgI** أو **SF6** باستخدام أجهزة الكشف المحمولة جواً. تتطلب أنظمة الكشف الحالية عاملاً ماهراً يمكنه التعرف على أعطال النظام وتصحيحها. فشل عدد من المحاولات السابقة للبحث عن المفقودين جواً





بسبب المعدات التي تعمل بشكل غير صحيح (و / أو) المشغلين ذوي المعرفة غير الكافية.

نادراً ما تُذكر هذه المشكلات في تقارير أو منشورات المشروع ولا يُتعرّف عليها إلا من خلال الخبرة أو التواصل الشخصي. ومع وجود المعدات التي يجري صيانتها بشكل صحيح، يمكن تتبع AgI أو SF6 لعشرات الكيلومترات تحت معدلات زوال جوية مستقرة أو محايدة بمعدلات إطلاق معقولة.

بالنسبة للظروف غير المستقرة، قد تصير معدلات إطلاق سداسي فلوريد الكبريت المطلوبة مفرطة، ولكن يمكن بسهولة اكتشاف AgI لمسافات طويلة باستخدام عداد نواة الجليد السمعي بسبب الكمية الهائلة من نوى الجليد المحتملة المنتجة. على سبيل المثال، جرى الإبلاغ عن تتبع عمود AgI من مولد واحد حتى 190 كم في اتجاه الرياح.

4. كشف الرادار

لقد استخدم الرادار أحياناً في محاولات لتتبع آثار التطعيم بين أدنى مستويات الطائرات وأدوات السطح. ومع ذلك، فإن الدليل الراداري على تأثيرات التطعيم الشتوي في الشتاء عادة ما يكون غير حاسم ما لم يكن IPC الطبيعي منخفضاً جداً. وذلك لأن عامل انعكاس الرادار لا يتناسب طردياً مع تركيز الجسيمات فحسب، بل يتناسب أيضاً مع مجموع القوى السادسة لأقطار الجسيمات.

وبالتالي، يمكن للإشارة المرتفعة من عدد قليل من رقاقات الثلج الطبيعية الكبيرة أن تخفي ذلك تماماً من آلاف البلورات الأصغر التي تُنتج عن طريق التطعيم. يمكن أن يؤدي التطعيم إلى خفض إشارة الرادار مع زيادة معدل





هطول الأمطار. وبالتالي، فإن الرادار غير مناسب لاكتشاف تأثيرات التطعيم إلا في حالات خاصة مثل تلك المبلّغ عنها.

ومع ذلك، يمكن أن يكون المسح بالرادار ذا قيمة كبيرة في مراقبة التغيرات الطبيعية في بنية السحابة عبر منطقة الهدف بكاملها. يمكن أن تختفي مثل هذه الاختلافات، أو يجري الخلط بينها، عن تواقع التطعيم الحقيقية ومن المهم أن يجري توثيقها.

يمكن أن توفر مجموعات رادار دوبلر قياسات مُهمّة للرياح فوق منطقة التجربة بالإضافة إلى بيانات الانعكاسية. يمكن أن تساعد بيانات الرياح في تفسير أنماط الانعكاس.

5. خصائص هطول الأمطار

عادةً ما يكون التأثير الأكثر قابلية للاكتشاف للتطعيم على مستوى الأرض هو زيادة IPC. تشير التغييرات في أحجام الكريستال الجليدي وعاداته، ومحتوى الفضة في الثلج، أيضاً إلى أن التطعيم أثر في عملية هطول الأمطار. ومع ذلك، فإن التطعيم الناجح عادة ما يزيد من تركيز بلّورات الجليد إلى مستويات أعلى بكثير من الخلفية.

من المحتمل أن يكون الكثير من تحسينات IPC بأحجام بلّورية صغيرة، يقل قطرها عن ملليمتر واحد. غالباً ما تكون البلّورات الصغيرة الناتجة عن التطعيم في شكل شرائح سداسية. يوفر مسبار تصوير الجسيمات الممتص أكثر الوسائل العملية لمراقبة خصائص بلّورات الثلج باستمرار. ومع ذلك، يجب استكمالها بتوثيق فوتوغرافي يوفر بيانات أكثر تفصيلاً، مع أنها تتطلب قليلاً يدوياً كبيراً.



عملية التحفيز Riming (وتسمى أيضاً النمو التراكمي Accretional growth) هي تجميد قطرات السحب الصغيرة على بلّورات الجليد المتساقطة. وقد ثبت أنه جرى تقليله في بعض التجارب التي جرت مراجعتها. يجب أن يكون هذا نتيجة التطعيم إذا جرى إنشاء بلّورات ثلجية كافية للاستفادة من معظم SLW الزائد. لا يمكن تمييز درجة الحواف عادةً من بيانات مسبار التصوير المسحوبة؛ لذا يلزم إجراء أرصاد يدوية أو فوتوغرافية عند الهدف السطحي.

يفيد الحصول على عينات من الثلج لتحليل الفضة على فترات متكررة في تقييم فعالية التطعيم. لا تثبت مستويات الفضة المحسّنة في الثلج أي تأثير تطعيم مباشر لأن معظم أو كل الفضة يمكن أن تتجم عن الكسح بواسطة رقاقت الثلج الطبيعية.

ومع ذلك، فإن العثور على تركيزات الفضة في الخلفية فقط على الأرجح يعني أن الهدف لم يتأثر بالتطعيم. وبالتالي، فإن بيانات الفضة في الثلج توفر فحصاً ضد ادعاء الاختلافات الطبيعية كتأثيرات تطعيم.

توجد حاجة إلى مقاييس هطول الأمطار شديدة الحساسية لإجراء التجارب الفيزيائية لأن تأثيرات التطعيم قد تكون قصيرة جداً (على سبيل المثال، جزء صغير فقط من الساعة لخط تطعيم واحد وضعته طائرة)، وقد تكون معدلات هطول الأمطار منخفضة. على سبيل المثال، تراوحت كميات هطول الأمطار الإجمالية من سلالات فردية من AgI المبلغ عنها من 0.10 إلى 0.22 ملم مكافئ مائي. تبلغ دقة أجهزة قياس الوزن التقليدية 0.25 ملم، وهي غير مناسبة للتجارب الفيزيائية ما لم يجر تعديلها.





6. اعتبارات عامة

حاولت بعض الدراسات التي جرى مراجعتها «إعادة» التجارب الفيزيائية على التجارب المصممة للتقييم الإحصائي. كان هذا النهج غير مرضٍ بشكل عامٍ. إذ تتطلب معظم التجارب الإحصائية للتأثير في مساحة كبيرة ولفترة طويلة تطعيم حجم كبير نسبياً من الغلاف الجوي، حيث إن إطلاق العديد من سلالات النوى المحمولة جواً يستغرق وقتاً طويلاً.

ومع ذلك، فإن أحد الأساليب الرئيسية لتحليل التجارب الفيزيائية هو فحص التغيرات الزمنية في الخصائص المتوقعة، مثل (IPC، ومعدل هطول الأمطار، ودرجة التحفيز،... إلخ). من الأفضل القيام بذلك عن طريق تقليل الوقت اللازم للتطعيم، لنقل عملية تطعيم واحدة للنوى المحمولة جواً، وبالتالي تقليل تأثير التغيرات الطبيعية في الغلاف الجوي المتغير باستمرار أثناء التجربة.

حتى مع وجود سلالة واحدة، يمكن أن يخفي التباين الطبيعي تأثيرات التطعيم. من المهم جداً مراقبة التغيرات الزمنية والمكانية على الموقع المستهدف وبالقرّب منه. أحد الأساليب المفيدة هو تشغيل محطات قياس السطح بالإضافة إلى الهدف.

يجب أن تكون هذه المحطات موجودة في المنطقة التي يتوقع أن تتأثر بالتطعيم وذلك لتوفير سجل للتغيرات الطبيعية. كما يمكن أن تكون عمليات رصد الرادار في المنطقة مفيدة جداً في هذا الصدد، كما ذكرنا سابقاً. من الضروري أن تُجمع أرصاد كافية في كل من المكان والزمان لتحديد الاضطرابات التي تمثل تأثيرات تطعيم حقيقية، والتي هي تغيرات طبيعية، وأيها قد تكون تحجبها تأثيرات تطعيم التغيرات الطبيعية.



بعض التجارب السابقة لتعديل الطقس قللت بشكل خطير من تقدير الموارد المطلوبة لتحليل أرسادهم الميدانية، أو أخرت التحليل التفصيلي حتى اكتمال عدة مواسم ميدانية. في كلتا الحالتين ضاعت التعليقات القيمة جداً من التحليل لتحسين التصميم الميداني. في أسوأ الحالات، جرى إلغاء البرامج بعد عدة سنوات من جمع البيانات المكلفة، ولكن قبل التحليل والإبلاغ المناسبين.

كانت مثل هذه البرامج مضيعة للوقت والموارد. يوصى بشدة أن يوفر برنامج التطعيم تمويلاً كبيراً للتحليل، وأن تكون تحليلات بيانات كل موسم ميداني كاملة بشكل معقول قبل الانتهاء من تصميم الموسم التالي. يعد إجراء حملات ميدانية كل سنة ثانية أو ثالثة نهجاً واحداً لتحقيق ذلك.

وهناك طريقة أخرى تتمثل في عزل مجموعة التحليلات عن أي مشاركة ميدانية تتجاوز تلك المطلوبة لإمامهم بالتقنيات والإجراءات الميدانية العامة. بشكل عام، من المفضل أن يقوم العلماء أنفسهم بجمع البيانات وتحليلها.

وهذا يضمن الجمع الدقيق، والأهم من ذلك، يوسع فهم العلماء للمشروع العام، والذي يمكن أن يحسّن بشكل كبير كل من التصميم والتحليل. ومع ذلك، فإن استخدام المجموعة نفسها في كلا الدورين يتطلب وقتاً أطول بكثير لإكمال البرنامج التجريبي.

تتطلب أي تجربة فيزيائية بعض مخطط الاستهداف لتقرير وقت ومكان إطلاق مادة التطعيم في حالة هدف ثابت، أو متى وأين يجري تشغيل «الهدف المتحرك» (عادة طائرات أخذ العينات) في حالة مواقع المولدات الثابتة.





قد لا يكون المخطط أكثر تعقيداً من استخدام سرعة الرياح النموذجية لنطاق الارتفاع المعني لتقدير وقت النقل، ومعدلات النمو النموذجية وسرعات السقوط لنوع أو أنواع جسيمات الجليد المتوقعة. يشار إلى مثل هذه الأساليب أحياناً باسم حسابات «ظهر المغلف».

على الطرف الآخر، يمكن تشغيل نموذج رقمي ثلاثي الأبعاد معقد جداً يعتمد على الزمن في حاسوب عملاق لمحاكاة نمط تدفق الهواء بالكامل حول الحاجز وجميع العمليات الفيزيائية الدقيقة المهمة للنطاقات المتوقعة من الظروف.

بالنظر إلى أوجه عدم اليقين في بعض العمليات الرئيسية (على سبيل المثال، معدلات النمو التجميعي) وعدم جدوى إجراء قياسات تفصيلية حول الجبال، لا سيَّما فيما يتعلق بالرياح والتوزيع المكاني للمياه المكشوفة، فمن المحتمل أن يكون من المعقول أكثر استخدام نموذج استهداف متطور يمكن تشغيله على جهاز حاسوب صغير في الميدان باستخدام بيانات الإدخال في الوقت الفعلي.

النهج المستخدم في **SCPP** هو حل وسط جيد. إذا سمحت الموارد، يجب تشغيل نموذج أكثر تعقيداً لمجموعات مختلفة من الظروف الجوية التي يعتقد أنها نموذجية للعواصف الشتوية في المنطقة موضع الاهتمام.

يجب أن تكون التنبؤات الناتجة متوافقة بشكل عام مع المخطط المستخدم تشغيلياً أو قد يتطلب الأخير بعض التعديل. لأغراض برنامج التطعيم، يُنصح بتكييف نموذج عددي متوسط التطور مع موغولون ريم، مقارنةً بالأرصاد الحقيقية، وتعديله إذا لزم الأمر لاتخاذ القرار في الوقت الفعلي أثناء التجارب





الفيزيائية. بسبب الشكوك المذكورة، يجب استخدام أي نموذج للإرشاد العام فقط لأن تنبؤاته ليست بديلاً عن القياسات الفعلية للواقع.

من الدروس المهمة المتعلقة بتجارب التطعيم الفيزيائي للسحب أنها يجب أن تكون معقدة بالقدر المطلوب لتوثيق وفهم الظواهر المهمة، ولكن ليس أكثر من ذلك. حاولت التجارب في كثير من الأحيان تحقيق أهداف كثيرة جداً بالنسبة للموارد وعدد العواصف المتاحة ونتيجة لذلك لم يجر الوفاء بأي منها بشكل جيد.

ونشير هنا إلى أن الأمر لا يتعلق بتحسين التنبؤ بالطقس، أو تطوير نوع جديد من الأدوات (ما لم يكن بالغ الأهمية للتجارب)، أو متابعة بعض الأبحاث الأساسية المثيرة للاهتمام أو غير الأساسية أو تقديم موضوعات للأطروحات. سمحت بعض المشاريع التجريبية لمثل هذه «الأجندات الخفية» بالتنافس على موارد محدودة. كانت النتيجة النهائية تقدماً بمعدل أبطأ بكثير مما كان ممكناً، لذا فقد سئم صانعو السياسات انتظار مؤشرات واضحة عن تقنية مفيدة موثوقة.

لقد أظهر تاريخ التعديل العلمي للطقس بوضوح أنه ليس إجابات سريعة وليس طريقة سهلة للنجاح. ومع ذلك، فإن الإصرار على متابعة أوجه عدم اليقين الحرجة سيؤدي إلى تحسينات كبيرة في التكنولوجيا الناشئة. يحتاج كل من العلماء وصانعي السياسات إلى التذكير المستمر بأن التقدم العلمي، مع أنه نادراً ما يكون سريعاً، سيكون بطيئاً جداً إذا لم يستمر التركيز على نقاط عدم اليقين الرئيسية.





الدروس المستفادة من تجارب الاستمطار

إنَّ زيادة تساقط المطر من السحب الباردة مبنية على افتراض وجود نقص في بلّورات الجليد ويجب تصحيح هذا النقص عن طريق إدخال نوى جليدية صناعية مثل يوديد الفضة في السحب المناسبة لإنتاج الجليد المطلوب، أي نشر بلّورات لتحسين هطول الأمطار.

في حالة آليات الجليد، فإن نوى الجليد الاصطناعية هي التي توفر المزيد من بلّورات الجليد التي تنمو باستخدام قطرات السحب والمياه السحابية خلال فترة عمر السحابة. تتشكل جزيئات الجليد عن طريق نواة الجليد، أي تحويل بخار الماء أو سائل شديد التبريد إلى ثلج.

توجد حاجة إلى نواة جليدية لكل بلورة جليدية تكونت في السحابة. تدريجياً، تصير أعداد أكبر من الهباء الجوي فعّالة كنواة جليدية حيث تنخفض درجات الحرارة إلى أقل من 0 درجة مئوية وعندما تصل درجة الحرارة إلى -40 درجة مئوية يحدث تنويع تلقائي ويتجمد كل الماء الإلكتروني الضعيف.

في بعض الأحيان، لا توفر الرياح القوية جداً وقتاً كافياً لنمو بلّورات الجليد إلى أحجام هطول الأمطار قبل أن تهب فوق قمم الجبال ثم تتسامى في الهواء الغارق شبه المشبع على الجانب المواجه للريح من الجبال. غالباً ما يؤدي تدفق الرياح المحملة بالرطوبة فوق حاجز جبلي إلى رفع الصخور لإنتاج السحب أو زيادة عمق السحب.

سنتعرف فيما يأتي على أبرز الدول التي أجرت عمليات استمطار ومدى نجاح تجاربها:





• الولايات المتحدة الأمريكية

1. كان المشروع التجريبي لحوض نهر كولورادو عبارة عن تجربة عشوائية خلال المرحلة غير المستقرة من السحب الشتوية ذات المحتوى المائي السائل العالي وتركيزات جزيئات الجليد المنخفضة نسبياً، وبالتالي وفر فرصة جيدة لزيادة هطول الأمطار.
2. في المواقع الجبلية، تحوي الغيوم على كمية كبيرة من المياه السائلة فائقة التبريد **Supercooled Liquid Water (SLW)** التي تعبر الحاجز الجلي وغالباً ما تظل غير مستخدمة بطبيعتها، وبالتالي توفر فرصة جيدة للتطعيم. وقد أظهرت تجربة العاصفة أنه يمكن زيادة ارتفاع قمة السحابة بشكل كبير.
3. استخدمت تجارب غرب داكوتا الغربية التي أجريت في الفترة من 1966 إلى 1969 تصميماً عشوائياً متقاطعاً ومولدات أرضية جنباً إلى جنب مع الطائرات التي رشّت **AgI** على قمة السحابة أيضاً، وأظهر هذا المشروع العشوائي الأول زيادة هطول الأمطار على مناطق مستهدفة ثابتة.
4. نتج عن استمطار السحب فوق نهر كينغز في كاليفورنيا الذي أجري لمدة 48 عاماً زيادة بنسبة 5.5 % في الجريان السطحي سنوياً.
5. نشر مشروع التطعيم السحابي لمدة 25 عاماً في ولاية يوتا نتائج لمدة 19 عاماً تشير إلى زيادة 11 % إلى 15 % في هطول الأمطار الموسمية. وقد أدت عمليات التطعيم السحابي على المدى الطويل إلى زيادة تدفق التيار من 5 % إلى 10 % من التدفق الطبيعي أشارت التقييمات الأخيرة إلى تعزيز الهطول بنسبة 10 % إلى 15 %، وأدى تحويل هذه الترسبات المتزايدة إلى زيادة تدفق التيار بنسبة 10 %.





6. في تجارب التطعيم السحابي في تكساس، نتج نمو السحب الإضافي عن تطعيم مجموعات الأبراج. ضاعف تطعيم اليوديد الفضي للسحب كمية المطر بأكثر من الضعف، عاشت أنظمة السحب الأخرى المصنفة لزمن أطول نحو 36% من نظيراتها غير المطعمة، وتوسعت لتنتج مطراً على مساحة أكبر بنسبة 43% واندمجت مع خلايا الحمل الحراري المجاورة بنحو ضعف عدد المرات. ارتفعت ارتفاعات السحب بنسبة 7% أكثر من غير المصنفة وكانت النتائج ملحوظة عند مستوى 5%. وقد تؤدي القطرات الكبيرة التي يزيد قطرها على **24 ميكرون** في السحابة عند مستوى 3- درجات مئوية إلى 8- درجات مئوية إلى تكاثر جزيئات الجليد الموجودة.

طبعاً تصير الغيوم ذات المكثفات السحابية الكبيرة غير فعّالة إذا لم تتوفر الآليات المناسبة لنمو الجسيمات خلال عمر السحابة وتكون هذه السحب مرشحة جيدة لزيادة هطول الأمطار عن طريق استمطار السحب. وغالباً ما تحوي السحب القارية على قطرات سحابية تزيد على 500 / سم³ مقابل 20 إلى 100 / سم³ في السحب البحرية.

7. أجريت سلسلة من التجارب المادية البارزة من 1968-1972 كجزء من مشروع الإفراط في البحيرات العظمى. أبلغت عن حالة واحدة أسفر فيها خط أطلق من الطائفة من **AgI** عن تغييرات ملحوظة في **IPC** (تركيز جزيئات الجليد **Ice Particle Concentration**) في موقع سطح على بُعد 28 كيلو متراً في اتجاه الرياح. كان النهج الأساسي هو فحص التاريخ الزمني لتركيز جزيئات الجليد.

لن يكون هذا وحده كافياً لإثبات تأثير التطعيم، ولكن الزيادة في **IPC** كانت متوافقة مع وقت الوصول المتوقع من سرعة الرياح السائدة، وكان **IPC** المحسن





مرتبطاً بمستويات خلفية أعلى من اليوديد. بزيادة طفيفة ولكنها ليست ذات دلالة إحصائية في معدل هطول الأمطار تتوافق مع مرور السحابة المصنفة.

أشارت مناقشة تجارب البحيرات العظمى إلى أن توزيعات تساقط الثلوج كانت شديدة التباين، مما يجعل من الصعب جداً عزل تأثيرات التطعيم عن التغيرات الطبيعية التي تحدث في نفس النطاق الزمني والمكان. وأوصى بأخذ عينات من الطائرات للسحب وعدد من محطات المراقبة الأرضية المتنقلة.

قدم تقرير شامل عن تجارب البحيرات العظمى. وخلص إلى أن هذا البحث يشكل واحدة من الدراسات القليلة المتاحة التي أظهرت بشكل لا لبس فيه دون التلاعب بالبيانات بعد التجربة أن هطول الأمطار الاصطناعي يمكن أن يتولد، وأن الحالات التي تفقد فيها الطبيعة فرصتها تحدث غالباً بشكل كافٍ لتبرير الاستكشاف المستمر.

كانت النمذجة العددية للسحب واستجابتها للتطعيم مكوناً مهماً لهذا المشروع. ومع ذلك، كانت القوة الحقيقية هي أن العديد من تجارب دراسة الحالة كانت قادرة على تتبع حجم السحب المصنفة. جرى ذلك باستخدام الملاحظات المرئية من الطائرات، من خلال مراقبة AgI، ومن خلال قياسات الرادار، بحيث يكون معروفاً عندما مرت السحابة المصنفة فوق مواقع المراقبة الأرضية.

كشفت القياسات السطحية لخصائص بلورات الجليد، بخاصة IPC، عن تغييرات زمنية مرتبطة بمرور السحب المصنف. بالإضافة إلى ذلك، جرى تحديد جزيئات AgI في الثلج المصنف. ومع اتباع العمليات المادية بنجاح من





إطلاق مادة التطعيم إلى الثلج على الأرض، لم تتحقق القياسات الكمية لمعدل تساقط الثلوج.

8. وصف العديد من المحاولات للكشف المباشر عن تأثيرات التطعيم على سلسلة جبال بريدجر **Bridger Range of Montana** في ولاية مونتانا. حيث أجري كل من التطعيم الجوي والأرضي، وأجري مسح راداري وقياسات سطحية مختلفة في المنطقة المستهدفة. كان الرادار مفيداً جداً في توفير معلومات الرياح للاستهداف، من خلال تتبع العاكسات على البالونات.

ومع ذلك، فإن التغييرات في انعكاس الرادار بسبب التطعيم لم تكن حاسمة إلا في المواضيع غير المتأثرة. ويبدو أن التغييرات في **IPC** مع مرور الوقت هي أقوى دليل على وجود تأثيرات التطعيم، لكن التغييرات الزمنية الطبيعية غالباً ما جعلت التفسير صعباً. أوصي بأن يشغل محطات سطحية إضافية مع اتجاه الرياح للهدف للمساعدة في مراقبة التغييرات الطبيعية مع مرور الوقت. لم تكن هناك طائرات مجهزة لتتبع أحجام السحب المصنفة خلال هذه التجارب، التي ثبت أنها تمثل عيباً خطيراً.

جرى إضافة قدر كبير من المصادقية إلى نتائج تجربة إحصائية استكشافية سابقة. شغلت أحد مولدات التطعيم المستخدمة في التجربة الإحصائية على ارتفاعات عالية، ومرة أخرى أجريت ملاحظات الطائرات منخفضة المستوى في السحابة فوق المنطقة المستهدفة. كان النهج الأساسي هو الطيران بشكل طبيعي مع الريح، في محاولة لاعتراض عمود التطعيم **AgI** كما جرى قياسه بواسطة عداد نواة الجليد الصوتي.





رُوقِبَت أطياف حجم بلّورات الجليد، والبيئة، و**IPC** داخل الحجم المصنّف على الفور وفي اتجاه الرياح. وقدمت السحابة الطبيعية على جانبي السحابة المصنفة أساساً متزامناً تقريباً للمقارنة، أو للتحكّم، لاختبار تأثيرات التطعيم. عُثِر على زيادات كبيرة في **IPC** ومعدل هطول الأمطار المقدر عندما احتوت السحابة على المياه السائلة فائقة التبريد بينما لم يعثر على تغييرات في ظل غياب المياه السائلة فائقة التبريد. لسوء الحظ، لم تكن الموارد كافية للأرصاء الأرضية في ظل الحجم المصنّف؛ لذا لم يتم توثيق الخطوة الأخيرة في سلسلة الأحداث المادية، مثل تساقط الثلوج على السطح. ومع ذلك، أشارت جميع الأرصاد المتاحة إلى أنه كان ينبغي زيادة الهطول السطحي.

9. من بين التجارب المادية الأكثر إقناعاً، وبالتأكيد البرنامج الرائد لتطوير أدوات وأساليب جديدة، كان عمل مشروع **كاسكيد Cascade** الذي أجرى ملاحظات على جبال كاسكيد في ولاية واشنطن خلال فصول الشتاء 1969-1970، 1971-1972، 1972-1973.

أطلقت طائرة مُجهزة جيداً مادة التطعيم ولاحظت التغييرات الناتجة في السحب، والتي كانت عادة عبارة عن طبقات ركامية. أُجِري التطعيم بمساعدة مخطط يهدف إلى التأثير في تساقط الثلوج في منطقة هدف صغيرة محددة مسبقاً. وجرى تتبع أحجام السحب المشتقة بواسطة الطائرات، باستخدام الأرصاد والقياسات المرئية لنوى الجليد وبلّورات الجليد. قام رادار دوبلر ذو توجيه رأسي برصد أطياف سرعة سقوط جسيمات هطول الأمطار.



قدمت المحطات الأرضية المأهولة عمليات رصد لجسيمات الجليد وقياسات معدل تساقط الثلوج. جرى تحليل عينات الثلج لمعرفة محتوى الفضة وتركيزات نوى التجميد. مجتمعة، كشفت هذه القياسات الفيزيائية الشاملة غالباً عن تصوير متسق لتأثيرات التطعيم التي تصل إلى هدف السطح المقصود.

جرت الإشارة إلى إن 20 دراسة حالة من 1971-1972 كُشف فيها بوضوح عن تأثيرات التطعيم بواسطة تقنية واحدة أو أكثر من التقنيات المحمولة جواً في 80% من الحالات، مع إمكانية التحقق في جميع الحالات الأخرى. بالنسبة للحالات نفسها، شوهد دليل واضح على التطعيم على الأرض في 6 مناسبات، وأدلة موحية في 4 مناسبات، ولا يوجد دليل في الحالات العشر الأخرى.

مزيد من الأدلة المادية على آثار التطعيم. وضعت ثلاثة خطوط تطعيم ثلج جاف عبر الريح في سطح سحب ركامية متوسطة غير مترسبة. وأظهرت قياسات الطائرات بوضوح زيادة في الجسيمات الأكبر في الأحجام المصنفة مقارنة بالسحابة غير المطعمة القريبة.

جرى التحقق من ذلك بواسطة الرادار الذي أظهر انعكاسات متزايدة من كل خط تطعيم. نتج عن التطعيم الثالث -الذي أطلق في أقصى اتجاه عكس اتجاه الريح- أثرٌ لتساقط الثلوج على الرادار. لم تصل الثلوج إلى الرادار من التطعيم السابق. مرت كل خطوط النوى فوق الرادار في غضون بضع دقائق من الوقت المقدر للوصول بناءً على سرعة الرياح.

10. جرى الحصول على مجموعة شاملة من القياسات في التجارب الفيزيائية التي أجريت على **Grand Mesa of Colorado**. أجري التطعيم المحمول بالهواء





باستخدام **AgI** عكس اتجاه الرياح للحاجز خلال ست تجارب. تبع حجم السحابة المصنفة ممرات على طول الرياح مع طائرة التجربة حيث مر خط التطعيم فوق ميسا.

قدم عداد نواة الجليد الصوتي دليلاً واضحاً على الحجم المصنف في معظم ممرات الطائرات. جرت مقارنة خصائص جزيئات الجليد من الأحجام المصنفة إلى السحابة الطبيعية المجاورة. ولوحظت زيادات كثيرة جداً في تركيز جزيئات الجليد بعد كل حدث تطعيم. كشف التصوير المتكرر لجسيمات الجليد على السطح عن تأثيرات التطعيم أثناء المرور العلوي لثلاثة من سلالات النوى.

أبلغ عن تجربتين للتطعيم على الأرض أسفرت أيضاً عن تأثيرات فيزيائية دقيقة على ارتفاعات الطائرات. لوحظ تساقط الثلوج الخفيف عند قمة ميسا من إحدى هذه التجارب ومن المحتمل أن يكون سبب تساقط الثلوج على السطح في الأخرى. تقدم هذه التجارب بعضاً من أكثر الأدلة المادية إقناعاً المتاحة على أن تطعيم السحب الشتوية في الجبال يمكن، في ظل بعض الظروف، أن يؤدي إلى زيادة هطول الأمطار على السطح.

11. أجريت العديد من المحاولات لإجراء تجارب فيزيائية خلال دورة **(مشروع سييرا التعاوني التجريبي SCPP)** في سييرا نيفادا بكاليفورنيا. حيث استخدم نموذج مسار لوضع طائرة التطعيم بحيث جرى حساب جزيئات الجليد الناتجة لتستقر على وحول الموقع المستهدف جيد التجهيز أعلى المنحدر المتجه نحو الرياح من الحاجز.

كانت طائرة الفيزياء السحابية، ورادار الطقس، ومسبار تصوير جسيمات الجليد في الهدف هي الوسائل الأساسية لتوثيق الروابط الرئيسية في سلسلة الأحداث الفيزيائية المتوقع أن تتبع تطعيم طبقات الغيوم الأمامية والطبقة





الركامية. وجرى تحديد معدل النجاح لاكتشاف تأثيرات التطعيم في 36 تجربة بنسبة 35% للطائرة و4% للرادار و17% لمسبار التصوير على السطح.

جرت المطالبة بحالتين فقط لتوثيق جميع الروابط في سلسلة الأحداث الناتجة عن التطعيم. وقد لاحظ الباحثون أن مجموعة متنوعة من الأسباب أسهمت في ضعف النجاح في قياس آثار التطعيم. وأشاروا إلى عوامل مثل محتوى **SLW** المحدود والمتغير للسحب، و**IPC** الطبيعي العالي (بسبب تكاثر الجليد) الذي يخفي تركيزات متزايدة من جزيئات الجليد بسبب التطعيم، والخدمات اللوجستية لتسيق منصات القياس المختلفة التي أدت في بعض الأحيان إلى تأخير طويل في بدء التطعيم.

سُجّلت دراسة حالة واحدة أكثر خلال الموسم الميداني الأخير لبرنامج مكافحة البلهارسيا. جرى إطلاق سلالة من AgI عن طريق الطيران عبر الرياح في سحابة طبقية مع مولد يعمل بوقود الأسيتون قيد التشغيل.

اتبعت طائرة البحث خط التطعيم لأكثر من 90 دقيقة (100 كم) مع عداد نوى الجليد الصوتي، مع أن الممرات بين 19 و61 دقيقة بعد التطعيم كانت على ما يبدو أقل من خط التطعيم. جرى ربط **IPC** المحسن بموضع خط التطعيم من 64 إلى 90 دقيقة بعد التطعيم. لسوء الحظ، كان من غير العملي استهداف موقع الأرض المُجهز ولم يعثر على مؤشر لتأثيرات التطعيم في شبكة قياس هطول الأمطار.

12. جرت محاولة إجراء تجارب فيزيائية على جبال توشار في ولاية يوتا خلال أوائل عام 1989. وتشير قياسات الفضة في الثلج إلى أن مادة التطعيم نادراً ما وصلت





إلى الهدف. أظهر فحص بيانات مسبار تصوير جسيمات الجليد الممتص نجاحاً ضئيلاً في إظهار تأثيرات التطعيم على الهدف المقصود.

كان النهج الأساسي في تجارب توشار هو تشغيل من واحد إلى ثلاثة مولدات **AgI** على ارتفاعات عالية، بالاستناد إلى رياح المسبار في اتجاه الرياح، في محاولات للتأثير على تساقط الثلوج وتركيب السحب (التي كشف عنها الرادار والليدار والميكرووييف الراديوي) عند الهدف وفوقه. جرى تشغيل المولدات وإيقاف تشغيلها على فترات تتراوح من ساعة إلى ساعتين، ومن المتوقع أن تتغير التغييرات الزمنية في خصائص ندفة الثلج ومعدل هطول الأمطار ومحتوى فضية الثلج وفقاً لذلك. في حالة عدم وجود أرصاف للرياح بالقرب من التضاريس الجبلية، أو تتبع الطائرات لحجم النوى، يبدو من غير المحتمل أنه سيجري تحديد مكان نقل **AgI**.

13. تجربة **HIPLEX** الصيفية. في أثناء التعامل مع الحمل الحراري الصيفي بدلاً من السحب الأوروغرافية الشتوية، من الجدير ملاحظة فرضية التطعيم المفصلة والمدروسة جيداً والبرنامج الميداني المصمم جيداً، الذي راقب كل خطوة رئيسية في الفرضية الفيزيائية.

فشلت التجربة في وجود إثبات إحصائي لجميع الخطوات المفترضة التي تؤدي إلى هطول أمطار على الأرض. ومع ذلك، كانت أسباب الفشل واضحة في مجموعة البيانات المادية، التي كانت نتيجة مهمة جداً. قد تكون تجربة إحصائية أخرى غير حاسمة قد نتجت دون الملاحظات المادية من كل حالة.





• الهند

أشارت التجارب التي أُجريت في باراماتي في الهند لمدة 11 عاماً إلى نجاح عمليات استمطار السحب الدافئة من خلال إنتاج 24 % من الأمطار السنوية الإضافية، وهي نسبة كبيرة تصل إلى 4 % بتكلفة منخفضة جداً مع نسبة فائدة إلى تكلفة تبلغ 1:60. أطلق المعهد الهندي للأرصاد الجوية المدارية (IITM)، تجربة تطعيم سحابة دافئة باستخدام طائرات في المنطقة شبه القاحلة باتجاه شرق بيون على الجانب الليلي من الغاتس الغربية من عام 1973 إلى عام 1986. لإحداث تقاطع عشوائي مزدوج المنطقة جرى استخدام تصميم مع منطقة عازلة لأعمال التطعيم الجوي. تبلغ مساحة المنطقة التجريبية 4800 كيلومتر مربع. جرى تقسيمها إلى 3 أجزاء تم تحديدها على أنها قطاعات الشمال والعازلة والجنوب في أحمد نجار، منطقة براماتي.

أظهرت النتائج بوضوح أن استمطار السحب الدافئة أدى إلى زيادة هطول الأمطار بنحو 24 % على أساس التجارب التي أُجريت لمدة 160 يوماً خلال مواسم الرياح الموسمية الصيفية الأحد عشر.

سُجلت أيضاً التغييرات الفيزيائية التي حدثت في السحب بسبب التطعيم بالملح الشائع باستخدام الأدوات العلمية المجهزة بالطائرة لأكثر من 100 زوج من السحب المطعمة (الهدف) وغير المطعمة (التحكم) لتقديم أدلة علمية إيجابية دليل على كفاءة تقنية التطعيم السحابي.

التغييرات المذكورة أعلاه في الخصائص الفيزيائية الدقيقة والديناميكية والكهربائية للسحب قبل التطعيم وبعد التطعيم جنباً إلى جنب مع التغييرات في تركيزات الكلوريدات وأيونات الصوديوم في مياه السحب ومياه الأمطار تثبت بشكل كبير أن التطعيم الدافئ للسحب كان مسؤول عن زيادة هطول الأمطار بنحو 24 %.





• جنوب إفريقيا

أشارت بعض تجارب التطعيم السحابي الدافئ في جنوب إفريقيا إلى زيادات في هطول الأمطار المقدرة للرادار من 30 % إلى 60 % من السحب المصنّفة. حتى الحسابات العددية لنمو الجسيمات الرطبة في قطرات المطر دعمت هذه النتائج على زيادة هطول الأمطار.

• الصين

تواجه العديد من المقاطعات في الصين بما في ذلك منطقتها الشمالية ظروف الجفاف بشكل متكرر. إن لهطول الأمطار في شمال الصين تبايناً كبيراً في كل من المكان والزمان بسبب تقلبات مناخ الرياح الموسمية التي تؤدي إلى انخفاض هطول الأمطار السنوي من 1000 ملم في الجنوب الشرقي إلى 100 ملم في المناطق الشمالية الغربية.

ينخفض هطول الأمطار السنوي من 1000 ملم في الجنوب الشرقي إلى 100 ملم في المناطق الشمالية الغربية. تتمتع العديد من المقاطعات بتوافر مياه عذبة متجددة أقل بكثير من 1000 متر مكعب للفرد سنوياً، وهو ما يُنظر إليه عموماً على أنه معيار لندرة المياه. في حين أن نصف إلى ثلثي هطول الأمطار السنوي يحدث خلال الصيف و15 % فقط يحدث في الربيع.

منذ عام 1950، شهد جزء كبير من شمال الصين انخفاضاً تدريجياً في معدل هطول الأمطار السنوي، أدى النمو السكاني والتنمية الاقتصادية والتدهور البيئي إلى هذا النقص في المياه، والجفاف المتكرر، ونضوب المياه الجوفية وتضاؤل التدفقات السنوية في نهر هوانغ هو.





من أجل مكافحة ندرة المياه المتزايدة، بدأت الحكومة في إجراء تجارب التطعيم السحابي منذ عام 1958 بالتعاون مع الشعب. تدريجياً، جذبت أنشطة تعزيز هطول الأمطار هذه انتباه ودعم الحكومات الإقليمية والمركزية المحلية وحظيت بتقدير كبير من قبل الأشخاص الذين استفادوا من التجارب.

خلال عام 1997، أجرت 18 مقاطعة معظمها في شمال الصين عمليات التطعيم السحابي باستخدام 360 رحلة جوية للطائرات. نحو 1170 مقاطعة (أي نحو 40% من المجموع) قامت بعمليات إطلاق نيران المدفعية وإطلاق الصواريخ ليس فقط لزيادة هطول الأمطار ولكن أيضاً لقمع الأضرار التي تسببت في عواصف البرد.

يجري تنظيم هذه التجارب ودعمها مالياً بشكل رئيسي من قبل الحكومات المحلية على مستويات مختلفة في أجزاء مختلفة من الصين. تتمثل إحدى السمات الرائعة لأنشطة البرنامج في إدارتها وإجرائها وتوجيهها في الجوانب العلمية والتقنية من قبل مسؤولي إدارة الأرصاد الجوية المحليين.

لقد شكلت الحكومة الصينية في عام 1994 على المستوى الوطني لجنة التنسيق الوطنية لتعديل الطقس، هذه اللجنة مسؤولة عن تنظيم وتنسيق وتوجيه جميع أنشطة تعديل الطقس التي تجري في جميع أنحاء البلاد. تشارك 13 وزارة في جني ثمار زيادة تساقط الثلوج وهطول الأمطار بنشاط في اجتماعات اللجنة التابعة لإدارة الأرصاد الجوية الصينية (CMA).

نظراً لأن شمال الصين يواجه حالات جفاف متكررة كل عام تقريباً، تجري العديد من مقاطعات هذه المنطقة عمليات تطعيم السحب بانتظام في مواسم





الريبع. ولكن في جنوب الصين، يحدث الجفاف بطريقة محلية موسمية، وبالتالي يجري تنفيذ عمليات التطعيم السحابي في الأوقات المناسبة.

من أجل زيادة توافر المياه في الخزانات والأنهار مثل نهر هوانغ واتش آي، يجري استمطار السحب بانتظام في المواسم الرطبة عندما تتوفر سحب أكثر ملاءمة مما كانت عليه أثناء ظروف الجفاف. ويستخدم استمطار السحب أيضاً لمنع حرائق الغابات ولحماية المحاصيل من البرد القارس من خلال زيادة الغطاء الثلجي في الشتاء.

• أستراليا

تتكون أستراليا من مناطق صحراوية شاسعة ومناطق جافة ومناطق معرضة للجفاف، وهطول الأمطار ليس منخفضاً فحسب، بل إنه لا يمكن الاعتماد عليه إلى حد كبير. ونتيجة لذلك، أقام السكان الأصليون أنواعاً مختلفة من الاحتفالات لإرضاء آلهة المطر للحصول على مزيد من الأمطار السنوية.

بعد ذلك، علم الأستراليون بنجاح تجارب صنع المطر الاصطناعي التي أجراها فينسينت شايفر في حي نيويورك عام 1946 عن طريق رش بلورات الجليد من طائرة في السحب الباردة التي تسببت في تساقط الثلوج بوسائل اصطناعية.

أثارت هذه التجربة الناجحة الآمال بين علماء أستراليا لإجراء تجارب مماثلة لإنتاج مزيد من الأمطار من السحب فوق المناطق المحلية. ونتيجة لذلك، اختار العلماء الأستراليون سحباً ركامية عميقة في السماء فوق نيو ساوث ويلز ورشوا بلورات جليدية جافة في الغيوم بتاريخ 5-2-1947 ونجحوا في عصر هطول الأمطار في غضون دقائق قليلة.





جرى تجميد الجليد الجاف ثاني أكسيد الكربون بدرجة حرارة تقل عن 80 درجة مئوية. ووجدوا أنه لم يزد حجم السحابة فحسب، بل كانت هناك أمطار غزيرة استمرت لأكثر من ساعة ووفرت نصف بوصة من الأمطار على مساحة 50 ميلاً مربعاً.

غيوم مماثلة في المنطقة المحيطة لم تعط أي مطر. عندما أثبتت التجارب أنه من الممكن إنتاج المزيد من الأمطار عن طريق طرق التطعيم السحابي الاصطناعي، بدأ مجلس الدولة للبحوث العلمية والصناعية (CSIRO) في إجراء دراسات علمية حول تجارب صنع المطر الاصطناعي.

أجريت العديد من التجارب على استمطار السحب من عام 1947 إلى عام 1950 في منطقة سيدني بأستراليا. اعتاد العلماء على رش 100 رطل من بلورات الجليد الجاف من الطائرة في السحب المناسبة وتم قياس هطول الأمطار الناتج.

عززت هذه التجارب المبكرة على عمليات التطعيم السحابي الثقة بالنفس بين العلماء. لقد اعتادوا على اختيار بعض مجموعات السحب الركامية ورش بلورات الجليد في السحب المختارة مع الاحتفاظ ببعض السحب غير المصنفة المماثلة كعناصر ضبط ثم تقدير أي من هذه الغيوم قد أعطت أمطاراً، ثم قياس كمية هطول الأمطار الناتجة عن السحب المختلفة.

بعد أن أدركوا أن درجات الحرارة القصوى للسحابة تؤثر في نتائج التجارب، أجروا تجارب عن طريق رش بلورات الجليد على قمم السحب عندما تكون القمم أكثر دفئاً من -8 درجة مئوية. ووجدوا أن نحو نصف هذه الغيوم المعالجة فقط أسفرت عن هطول أمطار بينما النصف المتبقي لم يسقط.





ولكن عندما طعموا الغيوم ببلّورات ثلجية ذات قمم عند درجة حرارة أقل من 10 درجة مئوية وما زالت أقل، أنتجت كل الغيوم هطول الأمطار. بعد رش بلّورات الجليد في الغيوم، جرى إنتاج هطول الأمطار في 10 دقائق من السحب الرقيقة وفي 20 إلى 30 دقيقة من السحب الأكثر كثافة.

عند المقارنة بالمطر الناتج من سحابة غير مصنفة، أعطت السحابة المصنفة أمطاراً إضافية تصل إلى 100 فدان، وهذا يعني أن تجارب التطعيم السحابي زادت من هطول الأمطار الإضافية من السحب المصنفة التي تزيد عدة مرات عن السحب غير المصنفة.

أجريت تجارب التطعيم السحابي من 1955 إلى 1963 في 4 مناطق هي: واراجامبا، والجبال الثلجية، ونيو إنجلاند، وجنوب استراليا.

كانت النتائج لفصلي الخريف والشتاء مشجعة بدرجة كافية لاعتماد استمطار السحب كأداة لإدارة الموارد المائية. أجريت المجموعة الثانية من التجارب خلال شهر أبريل حتى سبتمبر من 1979 إلى 1983 وجرى تحليل التجربة بواسطة **CSIRO**.

ارتبطت زيادات هطول الأمطار بنسبة تصل إلى 37% بالغيوم الطبقيّة في الجداول الجنوبية الغربية. لا يوجد دليل على تأثير استمطار السحب على المناطق الواقعة في اتجاه الرياح في المنطقة المستهدفة. جرى إدخال أبخرة يوديد الفضة في قاعدة السحب الركامية بينما طعمت غيوم الستراتوس بمواد كيميائية عند درجات حرارة تتراوح من 5- درجة مئوية إلى 10- درجة مئوية في السحابة.



أجريت التجارب لمدة 3 إلى 6 سنوات. كان للرياح الحاملة للمطر السائد تأثيرات مختلفة. تأثرت المناطق التشغيلية للجبال الثلجية ونيو إنجلاند فوق المنحدرات الغربية لسلاسل الجبال بالكتل الهوائية القارية (الغربية).

تأثرت العمليات الإقليمية في جنوب أستراليا بالكتل الجوية البحرية (الشرقية) بينما شهدت تلك الموجودة في منطقة وارا جامبا طقساً من الكتل الهوائية الغربية القارية والشرقية. أنتجت تجارب السنتين الأوليين على الجبال الثلجية 26% من الأمطار الزائدة بينما أنتجت تجارب السنة الأولى في منطقة نيو إنجلاند 30% إضافية من الأمطار.

وبعد التخطيط لإجراء تجارب التطعيم السحابي في سنوات متتالية في منطقة تسمانيا، أجروا التجارب في 1964-1971 وتشير النتائج إلى زيادة تصل إلى 30% في هطول الأمطار في الخريف عند مستوى أهمية 3%. بمعنى آخر، كانت هناك فرصة بنسبة 3% فقط أن التأثير لم يكن نتيجة التطعيم.

قامت الحكومة بتسريع الأنشطة البحثية حول عمليات الاستمطار السحابي. نظراً لأن منطقة تسمانيا بها تلال وجبال، فإن رش يوديد الفضة من الطائرات إلى السحب الطباقية المعرضة للترطيب أثبت أنه سينتج المزيد من الأمطار إلى 12 درجة مئوية.

أثبتت التجارب التي أجريت في منطقتي تسمانيا وجبل ملبورن الثلجي أن هطول الأمطار الإضافي بنسبة 5% إلى 10% الناتجة عن تجارب التطعيم السحابي مفيد اقتصادياً.





أثبتت التجارب التي أجريت في غرب أستراليا للتنمية الزراعية أنها مفيدة اقتصادياً. أسفرت التجارب التي أجريت في تسمانيا عن زيادة بنسبة 37 % في هطول الأمطار السنوي. ومع ذلك، كانت 18 يوماً فقط في السنة مناسبة لعمليات التطعيم السحابي. كانت الفوائد التي جرى الحصول عليها من الاستمطار السحابي 13 ضعف النفقات المتكبدة.

وزاد مخزون المكن من 10 % إلى 20 % وقدر إنتاج الطاقة المائية بنحو 0.2 سنت أمريكي لكل كيلوواط ساعة. السحب الحملية ذات درجات الحرارة القصوى من -10 درجة مئوية إلى -30 درجة مئوية هي أكثر ملاءمة للتطعيم وكمية يوديد الفضة ليست بهذه الأهمية إذا تم تجاوز عتبة من 5 إلى 10 غرامات لكل سحابة.

ومع ذلك، جرى تسجيل تأثيرات جوهرية باستخدام 20 غراماً من AgI لكل سحابة بينما لم يتم ملاحظة أي تأثيرات جديرة بالاهتمام عند استخدام نحو 0.2 غرام لكل سحابة.

• تجربة الكويت

لمواجهة الجفاف وتزايد عدد السكان في المنطقة الصحراوية، شرعت الكويت عام 2016 في برنامج التطعيم السحابي الخاص بها لتوفير مصدر للمياه العذبة في البلاد، حيث أجرت الهيئة العامة للبيئة المحلية دراسة لقياس مدى جدواها محلياً.

لم يكن هناك جدول زمني محدد للمشروع الذي سيجري تنفيذه بالتعاون مع الهيئة العامة للبيئة. دُرس المشروع بالاشتراك مع خبراء ألمان.



وفي حال نجاح المشروع، سيتعين على الكويت حفر قنوات خاصة لجمع مياه الأمطار. كما نفى أي احتمال أن يتسبب المشروع في أي مشاكل سياسية مع دول الجوار لأنه استخدام بالفعل في **السعودية والإمارات والأردن وسوريا**.

• تجربة الإمارات العربية المتحدة

التطعيم السحابي في دولة الإمارات العربية المتحدة هو استراتيجية تستخدمها الحكومة لمواجهة تحديات المياه في الدولة.

الإمارات العربية المتحدة هي واحدة من أولى الدول في منطقة الخليج العربي التي تستخدم تقنية التطعيم السحابي. يستخدم علماء دولة الإمارات العربية المتحدة تقنية الاستمطار السحابي لتكملة انعدام الأمن المائي في البلاد، الذي ينبع من المناخ شديد الحرارة.

يستخدمون رادار الطقس لمراقبة الغلاف الجوي بشكل مستمر. يقدر المتنبئون والعلماء أن عمليات استمطار السحب يمكن أن تعزز هطول الأمطار بنسبة تصل إلى 30-35% في جو صافٍ، وما يصل إلى 10-15% في جو أكثر رطوبة. أثارت هذه الممارسة مخاوف بشأن التأثير في البيئة لأنه من الصعب التنبؤ بالآثار العالمية طويلة الأجل.





• تجارب المملكة العربية السعودية

بدأت المملكة العربية السعودية أولى تجاربها في الاستمطار عام 1988 في منطقة عسير، في حين توالت تجاربها كما يأتي:

• (2004) التعاقد مع شركة (WMI) وإشراف علمي من (NCAR): القيام بتجارب الاستمطار في منطقة عسير ودراسة جدوى التجربة.

• (2009) التعاقد مع شركة (WMI): تنفيذ مشروع الاستمطار باستخدام 10 طائرات متخصصة بمشاركة نخبة من العلماء السعوديين.

• (2006-2007) توقيع اتفاقية مع شركة (WMI): تنفيذ تجارب الاستمطار لمدة 6 أشهر في مناطق وسط المملكة (الرياض، والقصيم، وحائل).

وقد وافق مجلس الوزراء في عام 2022 تطبيق برنامج الاستمطار الصناعي في المملكة الذي يهدف لزيادة معدل الهطول المطري بالمملكة عن المعدل الحالي الذي لا يتجاوز 100 ملم سنوياً، لكون المملكة تعدّ من أكثر بلدان العالم جفافاً، ولا تحوي على مسطحات مائية دائمة من أنهار وبحيرات.

وقد دُشنت غرفة العمليات المعنية للبرنامج بمقر المركز الوطني للأرصاد بالرياض، وهي الغرفة المعنية بمراقبة السحب المتوقع استمطارها، وبدأ تنفيذ أولى الرحلات الجوية على منطقة الرياض، وحققت أهدافها المرجوة من حيث نجاح عملية الاستمطار والعامل الزمني لها، والنتائج المرجوة.

طبعاً العمليات الحالية للاستمطار تعمل وفق الخطة الزمنية المعدة لها وفي إطار العمل التشغيلي، بالتعاون مع جميع الجهات المعنية، حيث جرى إنشاء



غرفة عمليات تعمل على مدار الساعة ومجهزة بأدق التقنيات الأرصادية والرادارات الدقيقة، إضافة إلى العلماء والخبراء الدوليين في مجال الاستمطار والدعم الفني واللوجستي؛ بهدف مراقبة السحب وتحديد مواقع الاستمطار، لتقوم الطائرات المخصصة بتطعيم المواد المحفزة التي لا تؤثر في البيئة في أماكن محددة من السحب، لتحفيز عملية هطول الأمطار على المناطق المستهدفة وزيادة كمية الأمطار.

ويهدف البرنامج الاقليمي للاستمطار الصناعي على المملكة العربية السعودية إلى ما يأتي:

1. البحث عن مصادر مائية جديدة للمساهمة في تخفيف ظواهر الجفاف.
2. تهيئة الموارد الطبيعية والبيئية للتكيف وتعزيز الأداء البيئي.
3. بناء القدرات البشرية وتأكيد تأثيرها في البيئة المحيطة.
4. زيادة هطول الأمطار وتحقيق الاستدامة البيئية.





السيول وكيفية التحكم بها

يُعرّف السيل **Torrent** بأنه عبارة عن تدفق مائي ذي تصريفات شديدة التغير، وتدرجات عالية من المنحدرات في القاع، ونشاط تنظيف عالٍ، ونقل، وترسيب للرواسب والتغيرات المتكررة لأبعاد القناة، والمعيّار الرئيسي هو التكوين والنقل وترسيب الرواسب.

قد يكون تباين التفريغ، أي النسبة بين الحد الأدنى والحد الأقصى للتصريفات، عريضاً مثل 1: 5000 أو حتى أوسع. عادة ما تحدث التغيرات المفاجئة في تصريف السيول أثناء هطول أمطار الفيضانات بعد فترة رطوبة طويلة عندما لم تعد التربة في مستجمعات المياه لديها القدرة الكافية لامتصاص مياه الأمطار الغزيرة.

من السمات المميزة للسيول أن تصريفها ينمو بسرعة ليصل إلى الحد الأقصى، ثم ينخفض مرة أخرى بسرعة متساوية. تحوي السيول على مستجمعات مياه صغيرة، لذا فإن هطول الأمطار الغزيرة يؤثر عادة في منطقة مستجمعات المياه بكاملها.

مع الميل العالي للأرض، يتركز الجريان السطحي بسرعة في القناة، ويمكن أن يصل إلى الأجزاء السفلية من السيول أثناء هطول الأمطار.

المعيّار الرئيسي لطبيعة تدفق السيول هو النشاط الذي يجري بوساطته إطلاق رواسب الحصى ونقلها في اتجاه مجرى النهر. وتشمل مصادر الرواسب قناة السيول نفسها ورواسب الحصى المنقولة إليها من المنحدرات الشديدة للوديان المعرضة للتعرية ومن الوديان الرافدة.



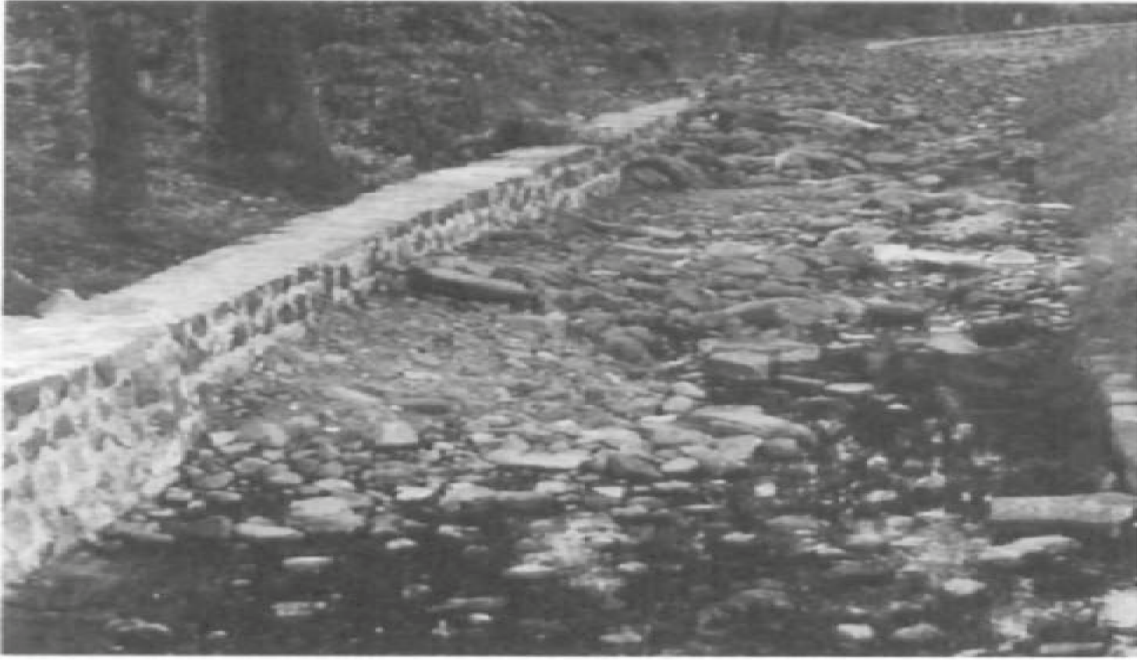
إن تجفيف ونقل الرواسب من قناة السيول يرجع إلى ارتفاع انحدارها وعدم التوازن في اتجاهات التدفق. كلما زاد تدرج القناة، زادت القوة الحاملة لتيار الماء الذي ينقل مقاعد الحصى، ويطلق كميات إضافية من الرواسب ويعمق القاع.



قناة عميقة من سيل سيرفينا الخاضع للتنظيم في جبال الركاز في بوهيميا.

في قنوات السيول ذات اتجاه التدفق غير المنظم، تتعرض الخزانات المقعرة لضغط مرتفع يؤدي إلى عمليات مسح واسعة النطاق للخزانات ولتجفيف كميات كبيرة من الحصى. يحمل الماء الرواسب، التي تُرفع من قناة السيل، بعيداً في اتجاه مجرى النهر ويودعها مرة أخرى في الأماكن التي يكون فيها السيل منحدرًا منخفضًا، وبالتالي قوة حمل أقل. يتسبب هذا في مزيد من الضرر لأن الحصى تعمل على ترسيخ قناة السيول والحقول المجاورة.





ترسيب الرواسب في قناة سيل.

يعبر الشرح الوارد سابقاً عن خصائص مجاري المياه الجوفية بشكل عام جداً بحيث لا يوفر أساساً كافياً لتقرير ما إذا كان سيتضمن مساراً مائياً معيناً في السيول. ولمعالجة ذلك، جرى تطوير عدد من طرائق التصنيف، بناءً على مواصفات مدى عمليات التعرية والعوامل التي تعدلها.





رواسب في موقف حبوب بعد فيضان على نهر تيسا في جبال الركاز، بوهيميا

• الرواسب

يتكون حوض السيول من مزيج من الرمل والحصى والجلاميد والصخور، يشار إليها عموماً باسم الرواسب **Sediments**. يتكون الخليط نفسه من جزيئات (**حبيبات**) تعتمد خصائصها على أصلها الجيولوجي. غالبية الحبيبات، التي تحدد الطبيعة العامة للخليط بكامله، تنشأ من الصخر نفسه. بالإضافة إلى ذلك، تحوي رواسب غالبية السيول أيضاً على نسبة أصغر من حبيبات أنواع أخرى من الصخور. وقد تتكون بعض رواسب السيول من خليط غير متجانس يحوي على نسب مختلفة من حبيبات صخور مختلفة، تتميز بخصائص مختلفة في اتجاه مجرى التقاء الروافد التي تحمل حطاماً من أصل جيولوجي مختلف.





الرواسب فئة مُهمّة في السيول. يؤثر تكوينها، بما في ذلك الحبيبات ذات الأحجام والأشكال المختلفة، على التخفيف الجزئي والكلي لسطح قاع السيول والذي بدوره يؤثر في خصائص التدفق. يتحكم وجود فئات الحبيبات الأكبر (**الحصى والجلاميد والصخور**) في شكل الطبقة السطحية لقاع السيل، مما يؤثر في اضطراب التدفق. يتحكم شكل الحبيبات بشكل أساسي في طريقة ترسب الأجزاء المختلفة من الرواسب في الطبقة السطحية للقاع، وبالتالي تحديد مقاومة الحبيبات المنفصلة ورواسب الحمل الكامل للرفع والنقل.

• خصائص حبيبات الرواسب

1. حجم حبيبات الرواسب

جرى تحديد حجم الحبيبات من خلال ثلاثة أبعاد رئيسية: **a, b, c**، متعامدة مع بعضها بعضاً، حيث إن **a** طول المحور الأطول، و **b** طول المحور المتوسط، و **c** طول أقصر محاور. المحور المتوسط **b** هو الأهم من ذلك كله، ويشار إليه بمتوسط حجم الحبيبات **d**.

تستخدم المناخل لتحديد متوسط أبعاد الحبيبات في مواد الرواسب الدقيقة. يمكن قياس الحبيبات الخشنة (التي يزيد أقطارها على 0.08 م) عن طريق تمريرها عبر مقاييس حلقيه أو باستخدام عيار منزلق كبير لقياس المحور **b**.

2. كثافة وكتلة حبيبات الرواسب

تعتمد كثافة الرواسب على أصلها الجيولوجي. مع أن كثافة كل معدن تختلف باختلاف مكان حدوثه، يمكن استخدام بيانات الكثافة المتوسطة للصخور المختلفة.



الكثافة هي العامل الرئيسي الذي يتحكم في وزن حبيبات الرواسب. العوامل الأخرى التي تعتمد عليها الكثافة هي حجم الحبيبات وشكلها.

يمكن قياس كتلة حبيبات الرواسب الصغيرة لحمل السرير بالوزن. ومع ذلك، فإن مخاليط الرواسب من السيول تشتمل أيضاً على صخور كبيرة لا يمكن التقاطها من القاع لوزنها. يمكن حساب كتلة هذه الحبيبات الكبيرة من اعتماد الكتلة على البعد المتوسط d :

$$G = a d^b$$

حيث إن a ، b : المعاملات التي تعبر عن تأثير شكل الحبيبات.

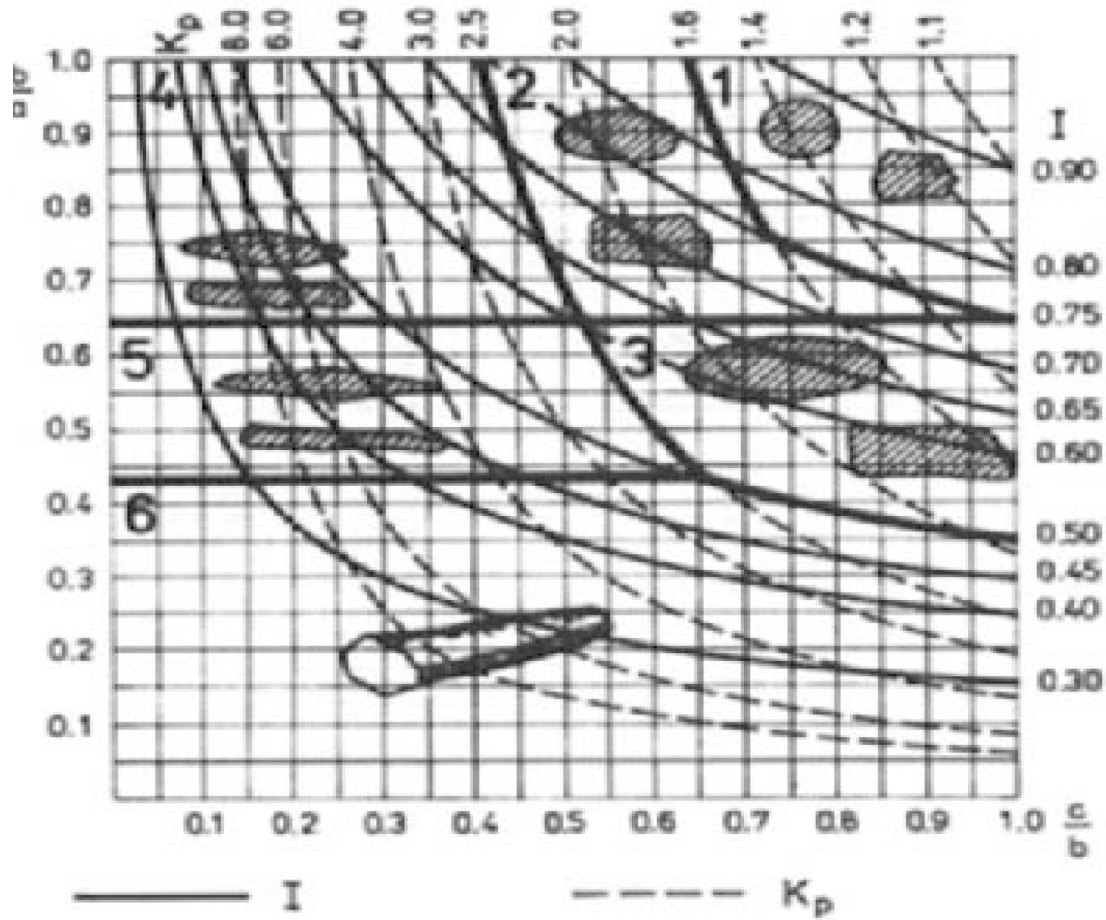
ويمكن قياس البعد المتوسط d (المحور b) في جميع الصخور الكبيرة تقريباً.

3. شكل حبيبات الرواسب

الشكل هو من بين الخصائص الرئيسية لحبيبات الرواسب. يعتمد تكوين الطبقة السطحية للقاع على شكل حبيبات الرواسب كما هو الحال أيضاً، على وجه الخصوص، المقاومة التي يجب أن يتغلب عليها التدفق أثناء المرور بحبيبات الرواسب؛ وبهذه الطريقة، يحدد شكل الحبيبات ما إذا كانت الحبيبات سترتفع أم لا من القاع ويتم نقلها بواسطة التدفق.

يوضح الشكل الآتي فئات حبيبات الرواسب حسب الشكل.



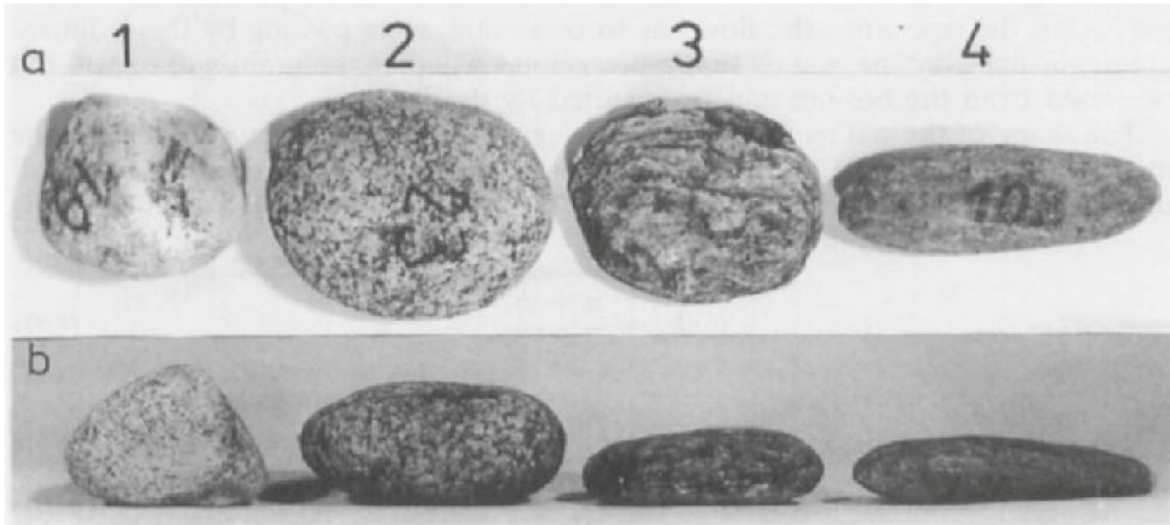


تصنيف حبيبات الرواسب حسب الشكل. حيث إن: K_p تعني معامل تسطيح الحبيبات، و I معامل استدارة الحبيبة.

الفئات هي كما يأتي:

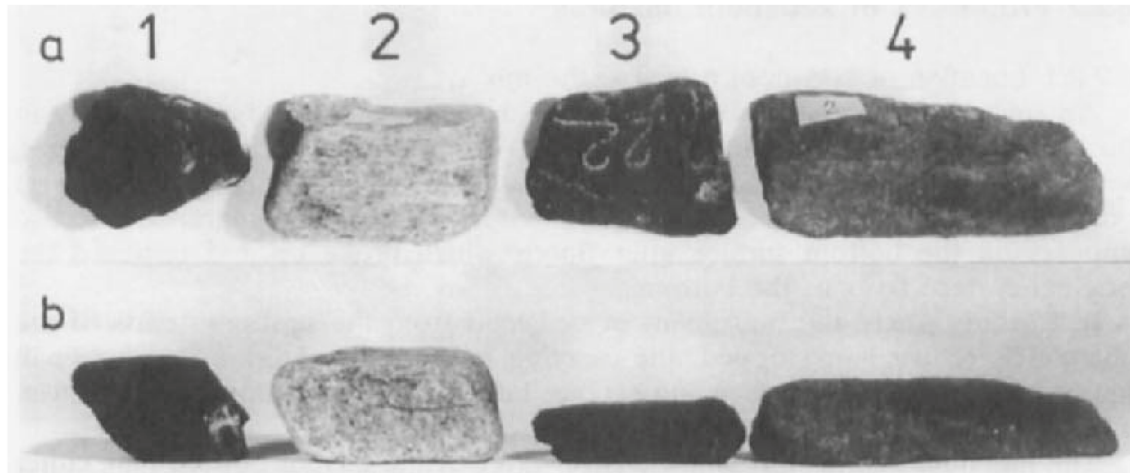
الحبيبات المستديرة وهي: كروية، وبيضوية، وقرصية وعصوية مستديرة كما في الشكل الآتي.





تصنيف شكل حبيبات الرواسب الدائرية: a- الإسقاط في مستوى المحاور a و b، b- الإسقاط في مستوى المحاور a و 1، c- كروي، 2- إهليلجي، 3- قرصي، 4- عصوي مستدير.

الحبيبات الزاوية: المكعب والمنشور واللوح والعصوي الزاوي كما في الشكل الآتي.



تصنيف شكل حبيبات الحمل السفلي الزاوي: الإسقاط في مستوى المحورين a و b، الإسقاط b في مستوى المحورين a و 1، c- مكعبة، 2- منشورية، 3- مسطحة، 4- عصوية الزوايا.





تتميز حبيبات الحمل المستديرة بالحواف المستديرة بشكل ملحوظ. أثناء تنقلها الطويل عبر قناة السيل، جرى العمل بشكل مكثف بحيث لا يمكن التعرف على شكلها الأصلي.

حبيبات الرواسب الكروية الشكل **Sphere-shaped** لها شكل كروي غير منتظم. يبدو المقطع العرضي لها في مستويات المحاور **ab** و **ac** و **bc** دائرة غير منتظمة إلى بيضوية.

إنّ السطح الإهليلجي **Ellipsoid** هو الشكل الأكثر شيوعاً لحبيبات الرواسب المستديرة في السيول. في المقطع العرضي في مستويات المحاور **ab**، و **ac**، و **bc**، يكون لها شكل قطع ناقص غير منتظم أو شكل بيضوي غير منتظم.

تتميز حبيبات الرواسب قرصية الشكل **Disc-shaped** عن الأشكال الدائرية الأخرى من خلال تسطحها. في المقطع العرضي في مستويات المحاور **ab**، عادة ما تكون مستديرة بشكل غير منتظم أو بيضوي الشكل. في مستويات المحورين **ac** و **bc**، يكون الشكل المقطعي الأكثر شيوعاً هو القطع الناقص.

الحبيبات المستديرة العصوية **Rounded rod-shaped** أحد الأشكال الإهليلجية الطويلة. المحور **a** أطول بكثير من المحاور الأخرى في مثل هذه الحبيبات.

تشمل حبيبات الحمل الزاوي الحبيبات **Angular bed-load** غير المشغولة ذات الحواف الحادة دون التقريب، والحبيبات ذات الحواف الحادة والقادمة والحبيبات ذات الحواف المستديرة قليلاً مع أجزاء مميزة غير مجوفة من السطح الأصلي.





تتميز المكعبات **Cubes** عن حبيبات الرواسب ذات الشكل الكروي بزوايا أكبر وتشكيل أجزاء مسطحة على السطح. عادة ما تكون الزوايا والحواف حادة.

الحبيبات المنشورية **Prismatic** لها شكل مناشير غير منتظمة. يتكون سطحها من جوانب مسطحة، وتكون الحواف حادة أو مستديرة قليلاً.

تختلف حبيبات الرواسب المسطحة **Plate-shaped** عن حبيبات الزاوية الأخرى كونها مسطحة بشكل أكبر. على عكس الحبيبات القرصية، يتكون سطحها من مقاطع مسطحة أكثر أو أقل مع قواطع وحواف حادة أو غير حادة. عادة ما يكون للمقاطع العرضية في مستويات المحاور **ab** و **ac** و **bc** شكل مستطيل، وقد تكون أحياناً شبه منحرفة أو معينة.

تكون القضبان الزاوية **Angular rods** ممدودة، وأحياناً غير منتظمة، وقد تكون أركانها وحوافها حادة أو غير حادة أو مدورة قليلاً، اعتماداً على المدة التي جرى نقلها فيها.

• خصائص مخاليط الرواسب

1. موقع حبيبات الرواسب في الخلطة

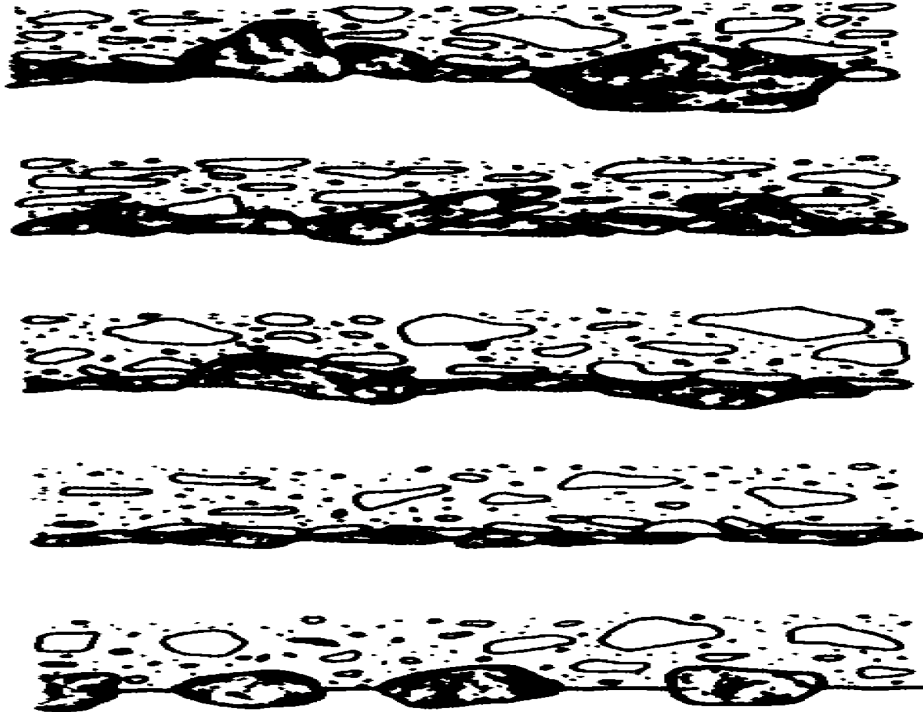
يتطور مزيج أحمال السرير غير المصنف على سطح القاع بشكل رئيسي في السيول مع حركة الرواسب المكثفة. بعد فترة من التصريفات المرتفعة، تترسب حبيبات الرواسب ذات فئات الأحجام المختلفة (الرمل، والحصى، والجلاميد) على قضبان من الحصى فوق مستوى التصريف الدائم. تظهر المخاليط غير المصنفة أيضاً على السطح السفلي بعد الفيضانات التي تحطمت وأزالت الطبقة السطحية الأصلية للقاع.





في السيول حيث يتم تقليل أو إيقاف حركة حمل السرير من الأجزاء العليا للقناة، تعمل القوة الحاملة لتدفقات الفيضانات على تفكيك الحبيبات الصغيرة من السطح السفلي وتكشف الحبيبات الأكبر التي تشكل طبقة غطاء. تغطي طبقة الغطاء طبقة من خليط الرواسب غير المفرز.

قد تكون الحبيبات الفردية التي تشكل طبقة الغلاف لقاع سيل إما ملقاة بشكل غير محكم بجانب بعضها بعضاً أو قد تكون ملتصقة ببعضها بعضاً، أو قد تكون مثبتة في الطبقة السفلية. قد تتطور طبقة الغطاء أيضاً بين مقاعد الحصى حيث يتركز تدفق المياه الدائم.



تشكل طبقة الغطاء في التيارات العذرية.





في السيول الجبلية، يحوي مزيج الرواسب أيضاً على صخور كبيرة تختلف بشكل ملحوظ في حجمها عن مواد الرواسب الأخرى. إما بمفردها وإما في مجموعات، فإن هذه الصخور تبرز من خلال طبقة الغطاء أو قد تُدفن بالكامل في الطبقة الحاملة لمزيج الرواسب.



طبقة تغطية مع صخور كبيرة.

يشكل مزيج الرواسب غير المتدرجة وطبقة الغطاء ذات الصخور الكبيرة الطبقة السطحية للقاع. يتحكم هيكل الطبقة السطحية للقاع في خشونة القاع واستقرار الرواسب.

تعتمد مقاومة كل جسيم أو قابليته للرفع والتحرك على اتجاه حبيبات الطبقة السطحية بالنسبة لاتجاه التدفق. وجد أن أطول محور للجسيمات التي يحملها التدفق مواز لاتجاه التدفق؛ ومع ذلك، عندما يتحرك الجسيم مع الملح، أو يتم دفعه أو دحرجته (بسرعات تدفق منخفضة)، يكون أطول محور له متعامداً على اتجاه التدفق. ويكون انتشار الجسيمات الموجودة في الطبقة السطحية مع محورها الأطول موازياً لاتجاه التدفق.

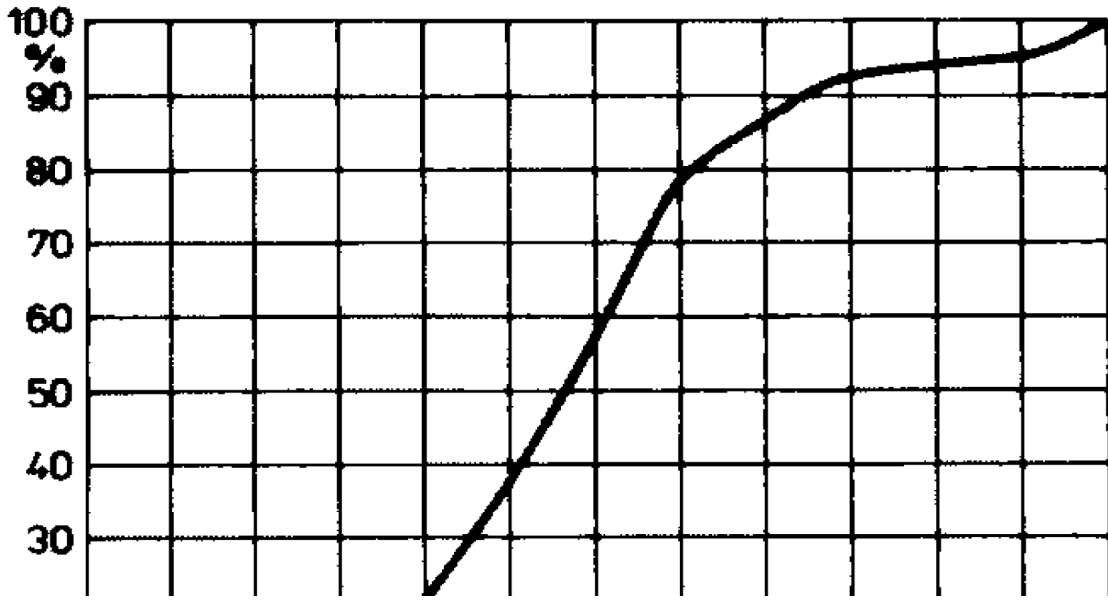
2. تكوين خليط الرواسب

تشكل الطبقة السفلية الطبقة السطحية، وتتكون الطبقة السفلية من حبيبات مختلفة الأحجام. من الأفضل توضيح قوام الخليط من خلال منحني





حجم الحبيبات؛ يوضح المنحنى أحجام الحبيبات التي تميز بنية الخليط، والتي قد تكون أحادية التشتت، ومتدرجة، ومتجانسة، وما إلى ذلك.



منحنى التحييب

• الخصائص الفيزيائية والميكانيكية الأساسية للسيول الجبلية

كما هو الحال في ظاهرة الفيضانات الخاصة، فإن السيول الجبلية لها خصائص حركية وديناميكية مختلفة عن الفيضانات العادية. تتميز العواصف المطيرة والفيضانات الجبلية بخصائص السرعة الحالية السريعة، والمحتوى العالي من الرواسب، والقدرة التدميرية الكبيرة، وإمكانية المياه الشديدة الانحدار، والمدة القصيرة.





1. خصائص حركة السيول الجبلية

تحدث السيول الجبلية في أحواض أصغر. تحت تأثير العواصف المطيرة القوية، تتقارب المياه بشكل سريع وتشكل السيول الجبلية، لتصل إلى أعلى مستوى للمياه بسرعة. وقت ارتفاع الفيضان أقصر من وقت السقوط؛ سرعة التدفق القصوى هي في الأساس نفس وقت أعلى مستوى للمياه، وسرعة التدفق عند الارتفاع أكبر من سرعة السقوط. يجري تقديم منحني الحلقة على مخطط تدفق مستوى الماء. هناك أرقام نموذجية لخط عملية تدفق فيضان الجبل وخط منسوب المياه والسرعة.

2. تفادي مخاطر الفيضانات الجبلية

السيول الجبلية هي فيضانات مفاجئة في أحودود. لها خصائص مفاجئة ومركزة ومدمرة وما إلى ذلك. لذلك، بمجرد أن تكون في منطقة جبلية، لا داعي للذعر وحاول الاستماع إلى أوامر الأشخاص ذوي الخبرة، والبحث على الفور عن أرض مرتفعة لتجنب الكارثة. اهرب في اتجاه التلال ولا تتجنب الفيضان تحت الصخور الخطرة والصخور غير المستقرة. لا تبتعد عن الوادي، فالوادي هو طريق السيول الجبلية.

عندما تقابل فيضانات وسيول الجبل، عليك القيام بما يأتي:

- تأكد من الحفاظ على الهدوء والانتقال بسرعة إلى الجبال أو المرتفعات؛ إذا كان لا يمكن نقله للحظة، فاختر مكاناً آمناً نسبياً في الوقت نفسه مع مراقبة البيئة خلفه.





- عند حدوث فيضان مفاجئ، لا تنزل على منحدر التل أو مخرج الوادي. اختر طريقاً آمناً قريباً للركض على طول التلال.
- السيول الجبلية سريعة وعنيفة وذات سرعة عالية ومدمرة، إنها لا تعبر النهر برفق.
- عندما تحاصر السيول الجبلية، من الضروري الاتصال بقسم الوقاية من الفيضانات في الحكومة المحلية على الفور وطلب المساعدة. يجب أن نستمع إلى ترتيب الأفراد المعنيين، وفي الوقت نفسه، في حالة الطوارئ، يجب أن نتعلم إرسال إشارات استغاثة، مثل الصراخ طلباً للمساعدة أو هز الملابس.

• كيفية التحكم في السيول

الغرض الرئيسي من التحكم في السيول هو التحكم في تدفقات الفيضانات على طول قنوات السيول وذلك لحماية المباني المجاورة والهيكل والطرق والحقول والمناطق السكنية المجاورة، لجعل قنوات السيول مقاومة (في اتجاهها وعمقها) للقوة الحاملة للتيار المائي، وبوجه خاص، لمنع ارتفاع ونقل وترسب الرواسب.

1. كيفية إدارة السيول

سيعتمد مدى التدخل بشكل أساسي على حالة السيول. يجري تنفيذ التدخلات المنهجية لإدارة السيول على قنوات السيول التي يكون تطويرها غير مكتمل من حيث مسار السيول والمقطع العرضي ومنحدر السرير. لا يمكن بناء الأنظمة الكاملة التي تغطي التدفق بالكامل من الجدول إلى الفم إلا على السيول القصيرة. (هذه الأنظمة مبنية في أجزاء قصيرة من منطقة المصدر إلى الفم).



نادراً ما تحتاج تدفقات السيل الطويلة إلى تنظيم طوال مسارها. حيث إن تنظيم التدخلات على مثل هذه السيول تغطي قطاعات منفصلة طويلة. في مثل هذه الحالات، يجب أن يكون قد جرى فحص السيل بالتفصيل لمعرفة ما إذا كانت أجزاء المنبع غير المنظمة للقناة لن تعرض المقاطع الخاضعة للتنظيم للخطر.

إذا لزم الأمر، ينبغي اتخاذ تدابير لإزالة هذه الأخطار. من المهم بشكل خاص ضبط المكان الذي يمر فيه المقطع غير المنظم إلى الجزء الخاضع للتنظيم ولتقليل نقل مادة حمولة السرير إلى القناة المنظمة، على سبيل المثال، عن طريق بناء مصائد من الحصى.

من الضروري أيضاً تقييم تأثير المقطع المنظم على الجزء السفلي غير المنظم من القناة من حيث السعة لمعدلات التدفق المختلفة وعمليات تحميل السرير المتغيرة.

جرى تصميم التنظيم الجزئي فقط على السيول التي لها منحدر سرير مستقر نسبياً ولكن اتجاهات التدفق غير مناسبة. تتضمن إدارة مثل هذه السيول إعادة تنظيم مسار التدفق، واستقرار عمليات مسح الخزانات المحلية، وتثبيت قضبان الحصى عن طريق بناء عتبات أو سدود منفصلة، وبناء مصائد من الحصى، وما إلى ذلك. كما يُستخدم التنظيم الجزئي حيث يجري تجسير الرافد وحيث يكون موازياً لحماية الطريق عند مصب الرافد.





2. طرائق التحكم في السيول

يتضمن التحكم في السيل عدداً من المهام المحددة، بما في ذلك تحديد تصريف التصميم، وإعادة تنظيم التدفق، وتعديل منحدر السرير، وتصميم المقطع العرضي، وتصميم بطانة القناة، وتصميم الهياكل.

أ. تدفق التصميم

قبل البحث عن الحلول التقنية للتحكم في السيول، يجب أولاً تحديد مقدار الحماية التي يجب توفيرها للأرض والمحاصيل والمرافق والمناطق السكنية وما إلى ذلك الواقعة ضمن نطاق تأثير الهيكل المخطط.

يجب أن يكون مستوى الحماية المحدد كافياً لضمان عدم زيادة تدفق المياه عند معدل معين من التدفق في الجزء المنظم من التيار. يشار إلى هذا «معدل التدفق المعين» باسم التدفق التصميمي **Design discharge**.

من المستحسن أن يعتمد تحديد تصريف التصميم على التحليل الفني الاقتصادي لتدابير إدارة السيل المخطط لها، وتكاليف الإنشاء والصيانة العادية للسيول الخاضع للرقابة مقارنة بالخسائر التي تسببها الفيضانات.

من الصعب جداً تقييم الخسائر على مستويات مختلفة من الحماية بشكل موضوعي ويجب أيضاً أن يؤخذ في الاعتبار أن التحكم في السيول يجلب عدداً من المزايا المختلفة بالإضافة إلى الفوائد الاقتصادية: بالنظر إلى ذلك، قد يكون من المفيد تحديد تصريف التصميم باستخدام البيانات الموجودة في الجدول الآتي:



درجة الحماية	المحاصيل المهددة بالانقراض، والهياكل، والمرافق، إلخ.	تدفق التصميم لسعة القناة
1	منطقة حضرية مدمجة، مجمعات سكنية أكبر، قري أكبر، منشآت صناعية، هياكل خطية مهمة متوازية (طرق سريعة، سكك حديدية، إلخ)، آثار محمية.	$Q_{50}-Q_{100}$
2	قري صغيرة، مجموعات منازل، وديان متفرقة (المسافة بين المنازل لا تقل عن 100م)، طرق ذات أهمية محلية (الفئتان الثانية والثالثة)، طرق نقل الغابات، مقالب، منتجعات ترفيهية، حقول مهددة بالانقراض.	$Q_{20}-Q_{50}$
3	مناطق البناء الخارجية، الإنتاج الزراعي المكثف، والتزلج والطرق الحرجية الأخرى.	Q_5-Q_{20}
4	مناطق البناء الخارجية، المروج والغابات المنتجة ومرافق الري والصرف.	Q_5-Q_{10}

إذا كانت تدابير إدارة السيول تنطبق على مقاطع السيل سواء خارج وداخل القرى أو البلدات، أو الأجزاء التي تمر عبر الأراضي المستخدمة بطرق مختلفة (الصالحة للزراعة، والمراعي، والغابات)، فسيكون هناك، بقدر الإمكان من الناحية الفنية، تصريفات تصميم مختلفة لقدرة القناة في مقاطع التدفق المختلفة.

إذا لم يكن مثل هذا الحل ممكناً أو مفيداً، يتم الاحتفاظ بتصريف أعلى مثل تصريف التصميم أيضاً لقطاعات التيار في المناطق التي تتطلب حماية أقل.

تتسبب تيارات السيول في أضرار أكبر بكثير من خلال تدمير قنواتها الخاصة والممتلكات الموجودة في المنطقة المجاورة لها أكثر مما تسببه الفيضانات. وبالتالي، تحتاج قيعان وضاف السيول إلى حماية أكثر من قنوات مجاري المياه الأخرى.





طاف خزان على قاع طريق بعد فيضان في نهر جيلوفسك، بوهيميا.

إن سعة التدفق يكون لها التأثير الأكبر على تكوين قناة السيل؛ ومن ثم، فإن تدفق التصميم لمقاومة قاع سيل مثل هذا هو نفسه بالنسبة لسعة القناة. وقد أظهرت التحقيقات حول تكوين قناة السيل أن عمق المياه الذي لا تزال فيها الحبيبات الفعّالة التي تشكل قاع سيل لا تتحرك يتوافق مع عمق القناة المتكونة بطريقة طبيعية. ومن ثم، فإن معدلات التدفق أعلى من التصريف المصمم وتتسبب في غمر مساحات كبيرة ليس لها تأثير كبير على تكوين القاع. ومع ذلك، في الوديان الضيقة حيث لا يمكن للمياه أن تفيض خارج الضفاف القريبة، يتعرض قاع السيل لضغط عالٍ ناتج عن التدفق المركز، في مثل هذه السيول، يجب تقييم استقرار القاع من حيث المياه لمدة 100 عام.





منازل متضررة بعد سيول في جدول ستريبرني في جبال العملاق، بوهيميا

• إعادة المآذاة

مبادئ التخطيط لتدابير إدارة السيل تعد إعادة التنظيم الصحيحة من بين المتطلبات الأساسية للحفاظ على قاع سيل مستقر. لحماية الضفاف والجزء المجاور للقاع في منحنيات مقعرة ضد الكثير من الضغط أثناء التدفق في قناة كاملة، يجب أن يكون تخطيط تدابير التنظيم أقرب ما يكون إلى تبسيط تدفق التصميم.

سوف يفي هذا أيضاً بالمتطلبات الأخرى، بما في ذلك تلك المتعلقة بأقل





التكاليف الممكنة لإعادة تجديد الخزانات والتكامل الجمالي للتيار في المناظر الطبيعية. عندما يجري تصميم مخطط الإجراءات التنظيمية، لا ينبغي أن يكون التدفق السلس والأمن للمياه على طول القناة هو الغرض الوحيد الذي يجب مراعاته، ويجب أيضاً مراعاة الحاجة إلى حماية الأراضي والمباني والممتلكات الأخرى المجاورة. يجب أن تمر المحاذاة عبر نقاط الارتفاع الأدنى للوادي مع الحفاظ على الاتجاه الحالي للتدفق.

يجب الاستفادة القصوى من القناة الأصلية حتى لا تُجرى تغييرات مفرطة في حالة الأراضي، مع أنه في بعض الحالات، من ناحية أخرى، سيكون من المفيد إعادة إنشاء القناة من أجل تنظيم أفضل لحالة الأراضي.

عندما يسير سيل موازياً لطريق ما أو عندما يتقاطع الطريق معه، فقد تؤدي المحاذاة الخاطئة إلى خطر تلف أو تعطل قاع الطريق. في مثل هذه الأماكن، يجب رسم المحاذاة بعناية خاصة للسماح للمياه بالمرور بأمان تحت الجسور أو القنوات. يوصى بأن تعبر الطرق السيول بشكل عمودي أو بزاوية 60 درجة كحد أقصى. بالطبع، يجب ألا يغيب عن الأذهان أن المعبر 90 درجة مناسب حيث يكون مسار المجرى متعامداً أو قريباً من الطريق. في حالات أخرى، قد يكون الالتزام بمبدأ العبور المحيطي خطيراً؛ فالتعديل القسري لاتجاه التيار قد يعرض للخطر ليس فقط قناة التيار ولكن أيضاً قاع الطريق.





• خط تنظيم السيل

يتكون خط تنظيم السيل من منحنيات ومقاطع مستقيمة تمر بسلاسة إلى بعضها بعضاً. وتشمل العوامل الرئيسية الأكثر أهمية للالتواء الأمثل الانحناء الصحيح وطول الانحناءات؛ يجب أن تتداخل المقاطع الطويلة المستقيمة أو شبه المستقيمة بشكل كاف بين الانحناءات المتتالية.

يجب تصميم ميزات التوجيه بعناية خاصة في التدفقات الغزيرة لفئة التدفقات الصغيرة التي لها نسبة ضيقة من عرض القناة (تقاس على سطح الماء) إلى عمق القناة والتي يسود فيها التداول المتقاطع البسيط. يجب أن يتبع خط القعر Thalweg المصمم بسلاسة من منحنى إلى آخر مع الحد الأدنى من إجهاد القص على الخزانات عند قمة كل منعطف.

جرى فحص الجاذبية المثلى في التيارات الطبيعية. وقد أثبت تحليل الاتجاهات في القنوات الطبيعية لمجري المياه في النمسا أنه لا الأقواس الدائرية ولا الخطوط المستقيمة نموذجية للقنوات التي تطورت بواسطة العمليات الطبيعية.

ومن ثم يوصى بتجنب الأقواس الهندسية والخطوط المستقيمة واستخدام منحنيات مشتركة غير منتظمة. ومع ذلك، فإن هذا النهج يتطلب الكثير من المهارة والخبرة في تصميم المشروع، وتنفيذها ليس بالأمر السهل. يمكن استخدام الأشكال غير المنتظمة مع ميزة في التعديلات الجزئية، على سبيل المثال، في تحديد خط الخزان عند توحيد عمليات المسح المصريف أو عند إعادة تنظيم الانحناءات المحلية الحادة.





• تأثير الرطوبة وتركيب الخرسانة على قياس نفاذية السيول

في بحث نُشر عام 2005 دُرست تغيرات نفاذية الغاز على الخرسانة بمرور الزمن وتأثير ظروف الرطوبة المحددة. جرى إنتاج وتخزين أربع خلطات خرسانية مختلفة في المختبر، ثلاثة منها عند رطوبة نسبية قدرها: 35% و 70% و 90%. وقد جرت مراقبة نفاذية الهواء للخرسانة المغطاة باستخدام طريقة التورنت. في ظل الظروف البيئية الخاضعة للمراقبة، تكون طريقة التورنت حساسة لجودة الخرسانة. ومع ذلك، عند اختبار الخرسانة الصغيرة أو الخرسانة الرطبة، تؤدي التأثيرات الضارة إلى نتائج غير متوقعة.

تتم مقارنة نتائج طريقة التورنت غير المدمرة مع البيانات التي تم الحصول عليها بطرائق أخرى وتشير إلى تأثيرات مُهمّة للرطوبة في ظل ظروف معينة. وقد نوقشت تأثيرات الرطوبة على النتائج التي جرى قياسها باستخدام طريقة التورنت وإمكانيات تحسين طريقة التطبيق على الهيكل الحقيقي.





السدود المائية

السدّ Dam هو منشأة تشيّد عبر نهر للقيام بإحدى المهام الآتية: تحسين الملاحة، أو تخزين المياه، أو تحويل المياه إلى قناة جانبية، أو التخلص من المواد الرسوبية، أو توليد الطاقة الكهربائية. وللسدود أنواع مختلفة حسب نوع المادة التي يتألف منها جسم السدّ.

يعدّ السدّ أحد أكبر المباني التي بناها القدماء، وقد تكون الأنظمة الهيدروليكية مخصصة لتزويد المياه أو الري أو الطاقة المائية أو أي مزيج من هذه الثلاثة، وهذا صحيح في العصور المبكرة كما هو الحال اليوم، ولكن لم يجر تقديم الأنواع الثلاثة للنظام في عصر واحد.

جرى تطبيق الأساليب الهندسية على أنظمة الري منذ فجر الحضارة، وعلى إمدادات المياه بحلول القرن السابع قبل الميلاد، وعلى الطاقة المائية بحلول القرن الأول قبل الميلاد تقريباً، مع أنه في الحالة الأخيرة ليس لدينا تاريخ مؤكّد.

السدود مطلوبة في معظم الأنظمة الهيدروليكية، مهما كان الغرض منها، لكن وظائف السدود تختلف. فهي تستخدم في ري الوديان، كما تُستخدم في حبس مياه الفيضانات التي تنتج عن هطول أمطار غزيرة ولكنها حالة نادرة، بحيث يرتفع منسوب المياه فوق مستوى الحقول المحيطة، والتي يمكن أن تجري عليها بعد ذلك تحت تأثير الجاذبية.

تستخدم السدود للري الدائم لتحويل المياه من الجداول أو الأنهار إلى شبكة القنوات. يمنح حجز الأنهار خلف السدود مزيداً من التحكم في الإمدادات





على مدار العام. كما هو الحال مع ري الوادي، فإنه يسمح أيضاً بتغذية المياه الموجودة في الخزان بالجاذبية في أنظمة الري وإمدادات المدينة. وهناك ميزة أخرى، إذا كانت المياه ستستخدم للطاقة المائية، وهي أن هناك رأس مائي مرتفع وثابت إلى حد ما، فإنه لن يكون كذلك إذا كان النهر غير منظم.

• بناء السدود

في العصر الحديث، عندما تم بناء المصانع الأولى، لم تكن الطاقة البخارية قد اخترعت بعد. في البداية، كانت الآلات الكبيرة تعمل بالطاقة المائية، والتي يجري توفيرها بواسطة النواعير. تطلبت هذه الآلات إمدادات موثوقة من المياه المتدفقة، وجرى بناء المزيد من السدود لتوفيرها. عندما حل البخار محل الطاقة المائية، لم تعد هناك حاجة لتلك السدود، وجرى التخلي عن معظمها، ولكن في الآونة الأخيرة، جرى استخدام تقنية العجلة المائية لصنع التوربينات. تُسخر هذه الطاقة الحركية للمياه المتدفقة لتشغيل الآلات بكفاءة أكبر بكثير من نواعير المياه التقليدية، وتستخدم لتوليد الطاقة الكهرومائية. وقد أدى ذلك إلى بناء المزيد من السدود. اليوم، يجري توليد نحو 19% من الكهرباء في العالم من المياه المتدفقة عبر السدود.

1. مراحل بناء السدود

لقد بُنيت معظم السدود المبكرة من الأرض أو الصخور أو مزيج من الاثنين. يعتبر بناء السد الصغير عملاً كبيراً ويستخدم كمية هائلة من المواد، لذلك كان من الطبيعي استخدام الأرض والصخور، والتي كانت متوفرة محلياً. من المحتمل أن تكون السدود الأولى مصنوعة بالكامل من الطين أو أي تربة دقيقة الحبيبات





تكون غير منفذة إلى حد ما عندما يجري تجميع جزيئاتها معاً بإحكام. يسمى السد المصنوع من مادة واحدة «بالسد المتجانس».

يوزن المتر المكعب الواحدة من الماء 1000 كغ، لذلك حتى الخزان الصغير يمارس ضغطاً كبيراً على السد. هذا يعني أن جدار السد يجب أن يكون كبيراً وعادة ما يكون أكثر سمكاً عند قاعدته منه في الجزء العلوي.

الجدار، إذن، هو مثلث في المقطع العرضي. يجب ألا ينحدر الجدار بشدة بحيث تكون الأرض أو الصخر قادرين على الانحدار إلى القاع. يجب أن يوزع المنحدر أيضاً وزن الجدار، لمنع الأرض تحته من الانضغاط بشكل غير متساوٍ والتسبب في انهيار السد.

على جانب المنبع، يجب أن يقاوم الجدار حركة الأمواج، وفي الجانب السفلي يجب أن يقاوم التعرية بفعل المطر. يمكن زرع الغطاء النباتي على جانب مجرى النهر لربط الأرض ببعضها.

غالباً ما تتراكم الصخور ذات الأحجام المختلفة، والتي تسمى التبليط الصخري أو الدكّة **Riprap**، مقابل وجه المنبع لامتصاص طاقة الأمواج. بدلاً من ذلك، يمكن حماية وجه المنبع بسطح من البناء أو الخرسانة أو الأسفلت.

لا تزال الأرض والصخور مستخدمة على نطاق واسع، ولكن في الوقت الحاضر تحوي العديد من جدران السدود أيضاً على الفولاذ والخرسانة والبناء الصلب.

يتم اختيار نوع السد الذي سيستخدم وفقاً لمدى ملاءمته للموقع، وغالباً ما يشتمل الشلال على سدود من عدة أنواع.





قد يكون السد الترابي متجانساً، ولكن الأكثر شيوعاً أنه يتكون من لب من الطين غير المنفذ مع طبقة خارجية من الأرض المتماسكة والتبليط الصخري ذات كسوة ممزقة لحماية وجهها العلوي. يمكن بناء السدود الترابية على أرضية ناعمة، لأنها واسعة جداً عند القاعدة بحيث يتوزع وزنها على مساحة كبيرة.

تعتبر السدود الصخرية **Rockfill** أكثر أهمية ولكنها أيضاً أثقل وتحتاج إلى أساس متين. كما يوحي الاسم، فهي مصنوعة من صخور فضفاضة بأحجام مختلفة وطبقة صلبة أو جلد من الخرسانة أو الأسفلت يحمي وجه المنبع. يجب أن تكون الواجهة غير منفذة لمنع الماء من اختراق الهيكل.

تتصدر السدود الأرضية والسدود الصخرية على جانبي المنبع والمصب، لكن لسد الجاذبية وجه رأسي على جانب المنبع. وهي مصنوعة من الصخور أو الكتل الخرسانية التي يجري تثبيتها مع الأسمنت والمكسوة بالخرسانة. إنه ثقيل جداً، ووزنه هو الذي يؤمنه على الأساس. يُثبت في مكانه عن طريق الجاذبية، ومن هنا جاء الاسم. قاعدته العريضة جدا توزع الوزن. مع أن التصميم يبدو حديثاً، فقد بُني أول سدود الجاذبية في إسبانيا في القرن السادس عشر؛ ولا يزال اثنان منها قيد الاستخدام.

• أنواع السدود

بشكل عام يوجد نوعان أساسيان من السدود: الجاذبية والقوسية. الأول، كما يوحي اسمه، يعتمد على وزن السد لتحمل ضغط الماء. يمكن أن تفشل سدود الجاذبية في أي قسم بسبب الانزلاق أو الانقلاب، إذا تغلب دفع الماء على مقاومة القص والاحتكاك في هذا القسم، ويمكن أن يحدث الفشل أيضاً إذا أدت عملية تجفيف المياه إلى تقويض الأساسات.





في حالة سدود الجاذبية، من المهمّ الحفاظ على خط الدفع (الناتج عن ضغط الماء ووزن السد) داخل «الثلث الأوسط» من المقطع العرضي، أي الثلث الأوسط مع الخط الذي يربط بين مراكز الجاذبية للأقسام كخط مركزي لها، وإذا تجاوز خط الدفع هذا الحد، فستنتج ضغوط شد قد تؤدي إلى حدوث كسر، لأن البناء، وبخاصة مفاصله، لا يمكنه تحمل التوتر. لمزيد من القوة، تضاف الدعائم أحياناً إلى الجدار السفلي لسدود الجاذبية.

أما النوع الثاني فهي السدود المقوسة التي صُممت لمقاومة قوة الماء والظمي من خلال حركة القوس الأفقية وهي قابلة للتكيف فقط مع تلك المواقع التي يكون الطول فيها صغيراً مقارنة بالارتفاع، وتتكون جوانب الوادي من صخور جيدة لمقاومة دفع القوس عند التدفق. مع وجود استثناءات لسدود تاريخية نادرة؛ فإن السدود القوسية الحقيقية لم تُبن قبل العصر الحديث.

السد القوسي هو أحد أشكال سد الجاذبية، حيث إن وزنها الكبير يؤمنها. ينحني السد في اتجاه المنبع، وهذا الشكل ينقل ضغط المياه إلى الجوانب، ويدفع السد إلى الضفاف ويزيد من قوته. سد هوفر من هذا النوع، لكن بعض السدود المقوسة بها أكثر من قوس واحد.





يبلغ طول سد بارتليت متعدد الأقواس الواقع على نهر فيردي في ولاية أريزونا (244 م) وله 10 أقواس وليس قوساً واحداً.

في سد الدعامة، يكون وجه المنحدر منحدرًا، غالباً عند نحو 45 درجة، والوجه السفلي يكون عمودياً، والدعامات تدعم السد على جانب المصب. لقد أنشئت السدود على شكل أقواس عندما اكتشف المهندسون -على سبيل المثال- أن أفضل قوس هو صخرة تقع على طول مسار النهر. ومع ذلك، لم تكن السدود من هذا النوع سدوداً مقوّسة حقيقية؛ وإنما كانت ذات بناء ضخم وكانت، في الواقع، سدود جاذبية.





لم يكن التحليل الرياضي للقوى المؤثرة في السدود، بالطبع، غير معروفاً بالنسبة للمهندسين الأوائل؛ ولكن استتدت تصاميمهم أيضاً إلى الخبرة المتراكمة والحدس والممارسة الإنشائية السليمة. من الواضح أن اختيار الموقع المناسب كان ذا أهمية قصوى؛ حيث تُحدّد المنطقة العامة التي سينشأ السد فيها من خلال العوامل الهيدرولوجية والاجتماعية، ولكن بالنسبة للسد من أي حجم، فإن الموقع الدقيق يعتمد على العثور على موقع فيه طبقات جيدة تحمل الأحمال، ويفضل أن تكون صخرية. أكثر من أي شيء آخر، يعتمد استقرار السد على الحفر وصولاً إلى طبقة جيدة، ثم التأكد من وجود رابطة قوية بين هذه الطبقة والهيكل.

ينطبق هذا الأمر بشكل خاص على السدود المبكرة، حيث صممت الهياكل بشكل مفرط وفقاً للمعايير الحديثة، وبالتالي كانت أضعف نقطة هي الأساسات. بمجرد اختيار الموقع، سيحدد ارتفاع السد. للقيام بذلك، ستكون هناك حاجة إلى مسح دقيق إلى حد ما للمنطقة المحيطة. كان على المهندسين أن يأخذوا في الاعتبار متغيرين رئيسيين: ارتفاع السد ومدى النظام الهيدروليكي المقترح.

لقد غذيت الأنظمة - سواء لإمدادات المياه أو للري أو كليهما - في الغالب عن طريق الجاذبية، لذلك كان ارتفاع السد عاملاً رئيسياً في تحديد حجم النظام. كما أن ارتفاع السد تأثر بعوامل أخرى: مثل الظروف المائية المحلية، والطبوغرافيا، والسلامة، والموارد المتاحة للبناء.

كما هو الحال دائماً في تصميم المشاريع الهندسية، كان لا بد من البحث عن أفضل حل وسط بين عدد من الاحتمالات. كثيراً ما نجد آلات لرفع المياه أقيمت بالقرب من السدود. يبدو من غير المحتمل أن تكون قد رُكبت لاحقاً، وإنما جرى تضمين استخدامها في تخطيط النظام الهيدروليكي بكامله.





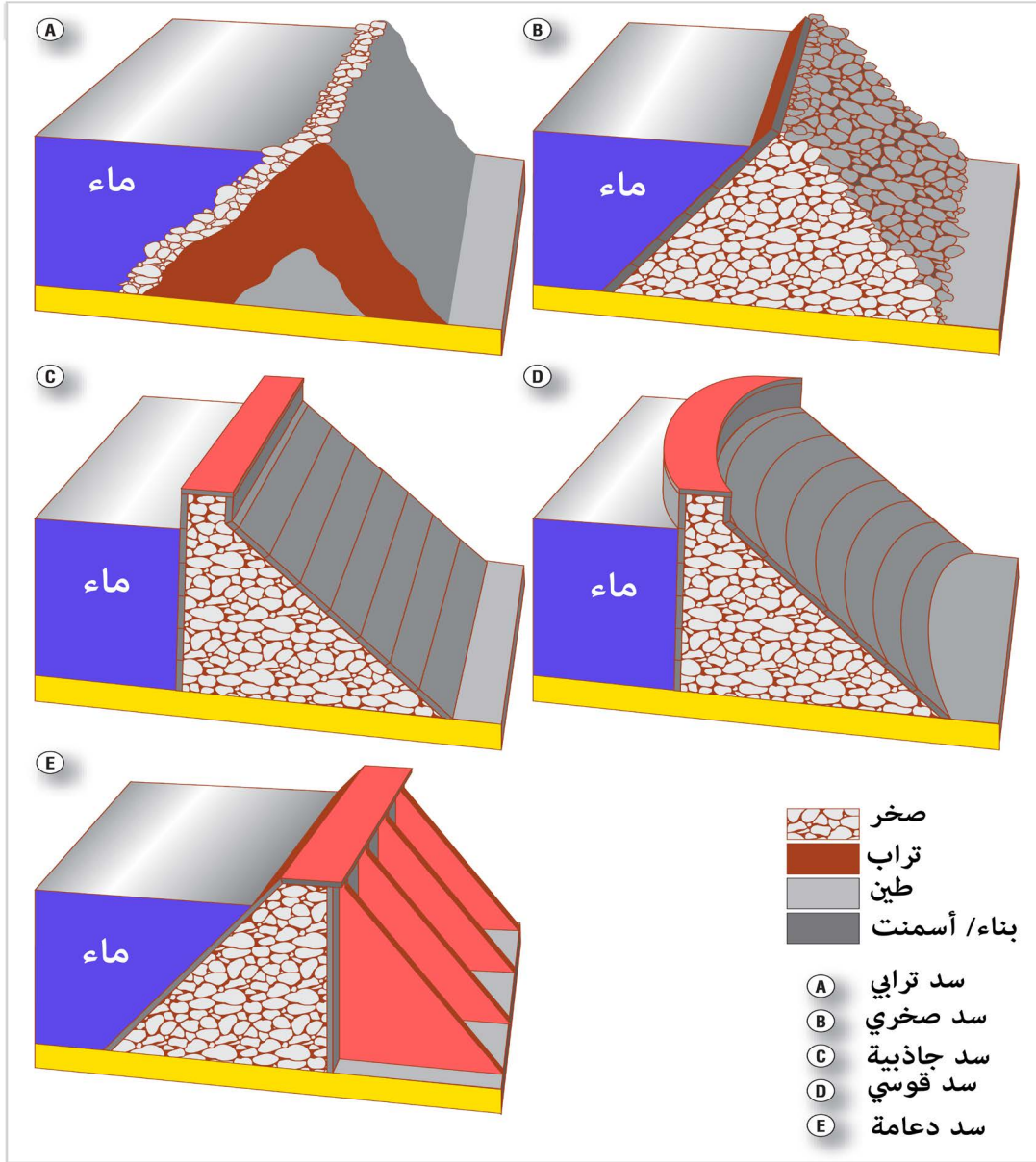
تأثر اختيار مواد البناء جزئياً بتصميم السد وجزئياً بالتوافر. كانت السدود الأرضية شائعة ولا تزال مستخدمة على نطاق واسع اليوم. إنها مرضية تماماً لأنواع معينة من الخدمة، بشرط أن تحوي على نواة من الطين أو مادة أخرى غير منفذة وقدرة كبيرة على الفائض، لكنها ليست مناسبة أبداً للسدود العالية. في مناطق معينة، ولا سيما العراق، كانت السدود الترابية شبه شائعة؛ كانت (ولا تزال) مناسبة تماماً لتحويل الأنهار إلى أنظمة القنوات، وعلى أي حال، كانت تكلفة نقل كميات كبيرة من الحجر باهظة الثمن.

في مناطق أخرى، حيث كانت هناك الحاجة إلى السدود أعلى، كان من الضروري إنشاء شكل من أشكال البناء. ويمكن أن يكون هذا باستخدام الحجر الملبس، أو بملاط أو دون ملاط، أو أنقاض عشوائية أو خرسانة.

في كثير من الأحيان، جرى بناء السدود عن طريق بناء جدارين من البناء مع وجود فجوة بينهما، ثم ملء الفجوة بمواد أرخص مثل التراب أو الأنقاض. إذا كان السد مصمماً لتصريف المياه الفائضة من قمته، فيجب أن يكون من الحجر أو الخرسانة، لأن الأرضية كانت ستتآكل بسرعة بفعل المياه.

هناك طريقة أخرى للتخلص من المياه وهي بناء قنوات تصريف يجري التحكم فيها بواسطة قنوات من الخزان إلى جانب المصب؛ كما جرى استخدام بوابات السد في هيكل السد نفسه. ولكن نظراً لأن الغرض الرئيسي للعديد من السدود هو حجز المياه، بشكل مؤقت أو دائم، لاستخدامها في الري أو الإمداد بالمياه، كان لا بد من توصيل المياه إلى حيث تكون هناك حاجة إليها.





أنواع السدود المختلفة. في جميع الرسومات، جرى المبالغة في انحدار المنحدرات. أما في السدود الحقيقية، فإن القاعدة أوسع بكثير مما تظهر هنا.





في بعض الحالات حدث ذلك عن طريق حفر قنوات الإمداد من ضفاف الخزان إلى بداية النظام الهيدروليكي. كانت هناك طريقة أخرى وهي بناء قناة كبيرة واحدة من مجرى التصريف، عبر خزان الترسيب، إلى خزان التوزيع، يجري من خلالها إخراج قنوات الإمداد. كما جرى إنشاء قنوات تحت الأرض من الخزان إلى خزان التجميع.

كانت أفواه هذه الأنفاق على مسافة ما فوق قاع الخزان، حتى لا تتسدّ بالطمي. يعتبر الطمي مشكلة شائعة في السدود والأعمال الهيدروليكية المرتبطة بها، ولكن في حين يمكن تنظيف القنوات بانتظام، وإن كان ذلك بتكلفة كبيرة، فإنه لا يمكن عادة تنظيف الخزانات من الطمي. وبالتالي، فإن الخزانات تتوقف تدريجياً على مدى سنوات، وبالتالي تقل كمية المياه المخزنة تدريجياً.

• السدود ضخمة

العديد من السدود الحديثة كبيرة جداً. في عام 2001، كان هناك أكثر من 45000 سد يزيد ارتفاعها على (15.25 متر) تعمل في أكثر من 150 دولة. وتتسع الخزانات الموجودة خلف هذه السدود لنحو (6248 كيلومتراً مكعباً) من المياه. بعض السدود أعلى بكثير من (15.25 متر).

من الناحية الفنية، لا يعتبر ارتفاع السد (15.25 متر) كبيراً. يُعرّف السد الكبير بأنه السد الذي يزيد ارتفاعه على (150 متراً)، أو الذي يحجز أكثر من (15 مليون م³) من المياه، أو أنه يشكل خزاناً قادراً على احتواء 12 مليون فدان من المياه. وهذه المياه تكفي لتغطية (4.9 مليون هكتار) حتى عمق (30 سم) وتساوي (14802 بليون لتر).

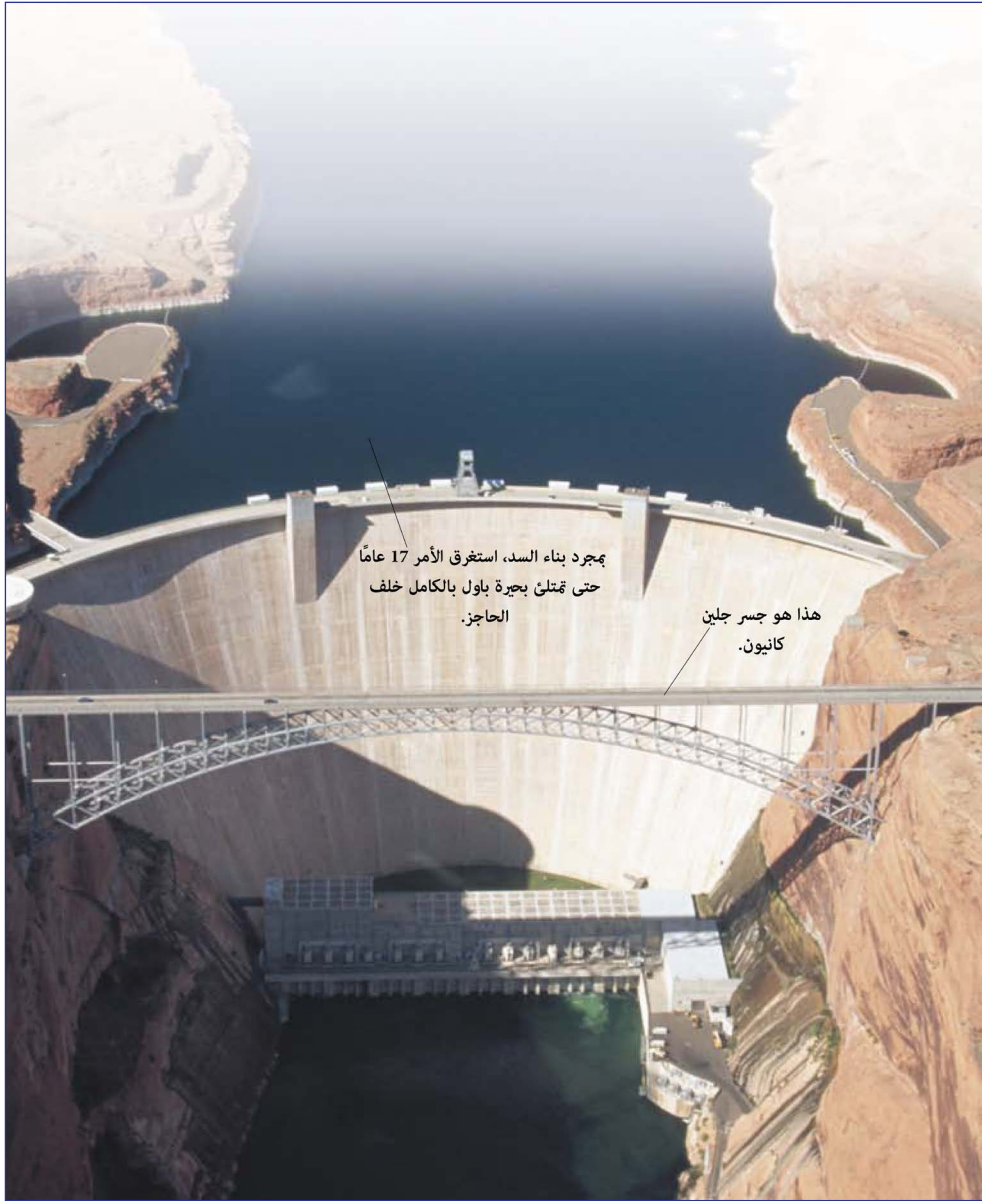




إن أعلى سد في العالم هو سد روغون، على نهر فاخش في طاجيكستان. حيث يبلغ ارتفاعه (335 متراً) من القاعدة إلى القمة. وكذلك المسافة على طول قمة سد ياسيريتا أبيبي على نهر بارانا بالقرب من الحدود بين الأرجنتين وباراغواي، تزيد قليلاً على (69 كيلومتراً). وعند الانتهاء من هذا السد في عام 1998 بلغت طاقته التوليدية 12.6 جيجاوات. ويبلغ طول قمة سد بيرجيك، على نهر الفرات في تركيا (2.5 كم).

كان أول سد كبير يجري بناؤه هو سد هوفر على نهر كولورادو. اكتمل بناؤه عام 1936 وبلغ ارتفاعه (221 متراً). يبلغ ارتفاع سد موفوازين على نهر درانس دي بانيز بسويسرا (237 متراً) وسد فايونت في شمال إيطاليا (262 متراً). وهناك العديد من السدود الأخرى أقل ارتفاعاً قليلاً مثل: سد أغواميلبا، على نهر سانتياغو، المكسيك الذي يبلغ ارتفاعه (187 متراً)، وسد لاکوار، على نهر يامونا، الهند الذي يبلغ ارتفاعه (204 مترات).





بمجرد بناء السد، استغرق الأمر 17 عاماً
حتى تمتلئ بحيرة باول بالكامل خلف
الحاجز.

هذا هو جسر جلين
كانيون.

يبلغ ارتفاع سد جلين كانيون في ولاية أريزونا (216 متراً) وسمكه (91 متراً) في الأسفل. يتسبب تقييد المياه في تكوين بحيرة اصطناعية (خزان)، تسمى بحيرة باول، خلف السد.





السدود المتتالية

من الواضح أنه لا يوجد وادي يمكنه استيعاب سد أعلى أو أوسع منه، وبالتالي فإن أبعاد الوادي تفرض قيوداً على حجم السد. ومع ذلك، فإن القيد ليس مطلقاً، لأنه من الممكن في بعض الأحيان سد النهر في أكثر من مكان، وقد يضيف سدان أو ثلاثة سدود صغيرة ما يعادل سد واحد كبير.

يجري سد العديد من الأنهار بشكل متكرر على طول مجاريها. وتسمى هذه السدود «بالسدود المتتالية». في الولايات المتحدة، تعد ولايات أوهايو وتينيسي وميسوري والميسيسيبي العليا وكولومبيا من بين تلك التي تم تتابعها. تمتلك كولومبيا، في ولاية واشنطن، أطول سلسلة شلال.

تبدأ سلسلتها المكونة من 12 سداً بالقرب من الحدود الكندية وتنتهي عند ساحل المحيط الهادئ على بُعد نحو (1030 كيلومتراً). يبدأ الشلال بسد جراند كولي، بارتفاع (168 متراً) وطوله أكثر من (1.2 كم). يعتبر جراند كولي أهم عضو في السلسلة في التحكم في تدفق النهر ومنع الفيضانات.

• الزلازل والسدود

تعتبر الزلازل من الكوارث الطبيعية التي عرفها الإنسان منذ القدم والتي تتسبب عادةً في وقوع أعداد كبيرة من الضحايا بالإضافة إلى الخسائر المادية والاقتصادية والاجتماعية الهائلة الناجمة عنها وذلك لأنها تحدث بشكل مفاجئ وسريع وبدون سابق إنذار. الزلازل عبارة عن اهتزازات في القشرة الأرضية تحدث بمشيئة الله ثم بسبب انطلاق وتحرر الطاقة الناتجة عن احتكاك





الصخور وتحرك الطبقات الأرضية حول الصدوع الكبيرة، كما تحدث نتيجة لعدة أسباب أخرى منها: الثورات البركانية والاختراق المفاجئ للمواد المنصهرة في باطن الأرض للأجزاء الهشة من القشرة الأرضية، والتفجيرات النووية تحت السطحية وسقوط النيازك كبيرة الحجم على سطح الأرض وانهيارات الكهوف الكبيرة تحت سطح الأرض وإنشاء السدود والبحيرات الصناعية وضح المياه والمخلفات داخل الآبار.

- يعتقد البعض أنه لا يوجد أي ارتباط بين إنشاء السدود والزلازل ولكن الأبحاث والدراسات أثبتت العكس، التي تعرف حالياً بالزلازل المستحثة أو الصناعية كما هو الحال في الصين، تركيا، مصر وغيرها من الدول.
- هناك علاقة طردية مباشرة بين مستوى ارتفاع المياه في السدود وعدد الزلازل التي يتعرض لها المنطقة التي تنشأ عليها السدود، وغالباً ما تقع المراكز الزلزالية في حوض السد في الموقع التي تزيد عمقها على 40 متراً وتزداد باتجاه زيادة العمق، إضافة إلى حجم وكمية المياه والمساحة التي تغطيها تلعب دوراً مهماً في تنشيط الزلازل فيها، ويزداد تأثير تلك العناصر في المناطق التي تزداد ارتفاع الجبال بحكم تشعبها بالمياه التي تمتصها من السد، مما يزداد من خطورة تعرضها إلى زلازل.

تاريخياً حدث العديد من الزلازل بسبب السدود. هناك أكثر من 100 حالة زلازل محددة يعتقد العلماء أنها سببتها الخزانات. قد تكون الحالة الأكثر خطورة هي زلزال سيتشوان الذي بلغت قوته 7.9 درجة في مايو 2008، والذي أودى بحياة ما يقدر بنحو 80 ألف شخص وجرى ربطه ببناء سد زيبينغبو Zipingpu. وكان من أخطر الحالات أيضاً في عام 1967 في كويينا،





الهند . كانت قوة هذا الزلزال 6.3 . كما لوحظت آثار كبيرة سد هسينجفينجكيانغ Hsingfengkiang في الصين، وسد كاريبا Kariba في زيمبابوي، وسد كريماستا Kremasta في اليونان .

بالنظر إلى أن كل موقع من مواقع السدود له خصائص جيولوجية مختلفة، فليس من الممكن التنبؤ بدقة بموعد ومكان حدوث الزلازل . ومع ذلك، توصي الدراسات المتعلقة بالسدود الكبيرة بضرورة مراعاة للخزانات التي يزيد عمقها على 100 متر . تُعرف ظاهرة الزلازل التي تسببها السدود بالزلازل المستحثة في الخزان (RIS) .

الزلزالية التي يسببها الخزان ليست مفهومة جيداً، ولكن ما يحدث أساساً هو: عندما يجري بناء السد ويمتلئ الخزان بالمياه، يتغير مقدار الضغط الذي يمارس على الأرض في تلك المنطقة بشكل كبير . عندما يرتفع مستوى الماء في الخزان، يزداد الضغط على الأرض تحته؛ عندما ينخفض مستوى الماء، ينخفض الضغط . يمكن أن يؤدي هذا التقلب إلى الضغط على التوازن الدقيق بين الصفائح التكتونية تحت السطح، مما قد يتسبب في انزياحها .

عامل آخر هو الماء نفسه . عندما يزداد ضغط الماء، يدفع المزيد منه إلى الأرض، وتمتلئ الشقوق . كل ضغط الماء هذا يمكن أن يوسع تلك الشقوق بل ويوجد شقوقاً جديدة صغيرة في الصخور، مما يتسبب في قدر أكبر من عدم الاستقرار تحت الأرض . علاوة على ذلك، عندما يفوص الماء بشكل أعمق، يمكن أن يعمل كنوع من مواد التشحيم للألواح الصخرية التي يجري تثبيتها في مكانها عن طريق الاحتكاك وحده . يمكن أن يتسبب التزييت في انزلاق تلك الصفائح .





يعتبر عمق الخزان هو العامل الأكثر أهمية، لكن حجم المياه يؤدي أيضاً دوراً مهماً في إحداث الزلازل. يمكن ملاحظة الهزات على الفور أثناء فترات ملء الخزانات. يمكن أن تحدث على الفور بعد ملء الخزان أو بعد فترة زمنية معينة.

تعتمد تأثيرات الزلازل على السدود بشكل أساسي على أنواع السدود.

إن المخاوف التي تتعلق بسلامة السدود هي الجسور المعرضة للزلازل التي تنطوي إما على فقدان الاستقرار بسبب فقدان قوة السد ومواد الأساس وإما التشوهات المفردة مثل السقوط، والتسوية، والتصدع، وفشل المنحدر الدوراني.

يجب أن تتضمن متطلبات السدود الخرسانية المعرضة لأحمال ديناميكية تقييم الاستقرار العام للهيكل، مثل التحقق من قدرته على مقاومة القوى الجانبية المستحثة.

سلامة السدود من الزلزال هي ظاهرة مهمة في هندسة السدود. خلال زلزال بوج عام 2001 في ولاية غوجارات، الهند، تأثر 245 سداً وأعيد تأهيلها أو تقويتها بعد الزلزال. أيضاً، في حالة 11 مارس 2011 زلزال توهوكو في اليابان، لوحظت أضرار بنحو 400 سد وارتفاع السد 18 متراً وفقدان 8 أشخاص أرواحهم.

وعلى سبيل المثال لا الحصر منطقة كونا الواقعة غربي الهند وتبعد نحو 200 كم إلى الجنوب من مدينة بومباي، حيث جرى بناء سد كونا على مجرى نهر كريشنا في 1962، وانتهى ملء خزان الماء في بحيرة شيفاجيزاجار في 1963. ويبلغ ارتفاع هذا السد الخرساني 110 أمتار وطوله 800 متر. كما تبلغ سعة





الخزان 2.8 بليون متر مكعب، وأقصى ارتفاع للماء يصل إلى 103 أمتار. وقد شهد ديسمبر 1967 وقوع زلزال بمقدار 5.6 في منطقة السد أدى إلى حدوث أضرار جسيمة، فبلغ عدد الوفيات من جراء تدمير الزلزال للمنازل نحو 200 شخص.

وفي منطقة جوانجزاهو في جنوب الصين حيث وقعت سلسلة من الزلازل في منطقة لم تحدث بها الزلازل قط. وأعقب انشاء سد هسينج فينج كيانج الخراساني في سنة 1959 (والذي يبلغ ارتفاعه 105 أمتار) ازدياد في تسجيل عدد الزلازل المحلية التي بلغ عددها في عام 1972 نحو 250.000 زلزال. ومع أن معظم هذه الزلازل كان ضعيفاً إلا أنه في 19 مارس من عام 1962 وقع زلزال قوي بمقدار 6.1 درجة، أدى إلى تخريب جسم السد وتطلب ذلك عمل الإصلاحات العاجلة له

امتد هذا النشاط بعد إنشاء السد العالي الذي تجمعت خلفه بحيرة ناصر في منطقة أسوان بمصر، والسد العالي كما هو معروف عبارة عن سد ترابي تم الانتهاء من بنائه في سنة 1970 في منطقة تبعد نحو 10 كم إلى الجنوب من أسوان. ويبلغ ارتفاع السد 111 متراً، وطوله 3.6 كم، والسعة التخزينية القصوى لبحيرة ناصر التابعة للسد تبلغ 164 بليون متراً مكعباً. وقد بدئ بملء البحيرة في سنة 1964 ووصل الماء إلى أقصى ارتفاع له في نوفمبر 1978. ويصل الماء إلى أقصى ارتفاعه موسمياً في شهري أكتوبر ونوفمبر من كل عام. وقد شهد الرابع عشر من نوفمبر سنة 1981 وقوع زلزال مقداره 5.6 وشعر به السكان بقوة في مدينة أسوان.





جدول ببعض الحالات المختارة للزلازل المستحثة

M_{max}	سنة حدوث أقوى زلزال	سنة الملء	الحجم / ($10^6 \times \text{م}^3$)	الارتفاع (متر)	البلد	السد / الخزان
6.3	1967	1964	2.780	103	الهند	كويانا
4.4	1969	1965	4.750	165	اليونان	كريماستا
6.1	1962	1959	10.500	105	الصين	هسينج فينج كيانج
6.2	1963	1959	160.368	128	زيمبابوي	كاريبا
5.0	1939	1936	36.703	221	الولايات المتحدة الأمريكية	هوفر
5.7	1938	1930	41	63	اليونان	ماراثون
5.3	1981	1978	165.000	115	مصر	أسوان
4.5	1966	1965	2.100	118	نيوزيلاند	بنمور
4.9	1963	1962	240	155	فرنسا	مونتيناورد
4.9	1961	1960	199	186	اليابان	كوروب
5.0-4.7	1967	1965	240	89	صربيا	باجينا-باتا
4.6	1972	1972	10.400	317	طاجيكستان	نوريك
4.2	1967	1967	7.250	116	باكستان	مانغالا
4.7	1963	1959	292	88	فرنسا	غراندفال
4.7	1962	1960	678	150	إسبانيا	كاناليس





عموماً يتضاءل خطر الزلازل بسبب **RIS** بسرعة إلى حد ما. إذا كان الخزان سيحرر الطاقة المخزنة على شكل زلزال، فغالباً ما يحدث هذا بمجرد امتلاء الخزان. إذا استغرق الماء بعض الوقت لاختراق التربة أسفل الخزان، فقد يكون هناك تأخير لبضع سنوات قبل حدوث الزلزال. بمجرد التخلص من الضغط في الصخور، لن يتسبب السد في المزيد من الزلازل. هذا لا يعني أنه لن يكون هناك زلزال آخر، بالطبع، ولكن فقط إذا حدث واحد، فلن يكون السد وخزانه مسؤولين. طبعاً لا ينبغي المبالغة في خطر الزلزال الناجمة عن السدود. فهي موجودة فقط في بعض مواقع السدود. يمكن للدراسات الجيولوجية التعرف عليها وقياسها، ويمكن بناء السدود لمقاومة الزلازل.

• منع فيضان المياه

بمجرد بناء سد لسد النهر، سوف تتراكم المياه خلف السد لتشكل بحيرة اصطناعية. في النهاية، سيصل منسوب المياه في البحيرة إلى قمة الحوض الذي يحويها. السدود لا تصل أبداً إلى ارتفاع الوديان التي تحويها، لذا لا يمكن أن تتسرب المياه على جوانب البحيرة إلى المناطق الريفية المحيطة. ومع ذلك، ما لم يُسمح أيضاً بتدفق المياه عبر السد أو بعده، فستكون هناك أوقات يفيض فيها.

في حالة وجود سد ترابي، سيؤدي ذلك إلى إزالة الجزء العلوي من الهيكل، وبعد فترة من الوقت سوف يدمر السد. إذا كانت قاعدة السد ضعيفة، فقد تتدفق المياه من خلالها وتهرب بهذه الطريقة، فتغسل الجدار حتى ينهار السد. حتى السدود المصنوعة من الأحجار الصلبة أو الخرسانة يجب أن تسمح للماء الزائد بالخروج بطريقة خاضعة للرقابة.





ولذلك، فإن جميع السدود إما أن يكون لها قنوات انسكاب في المركز وإما على جانب واحد أو كلا الجانبين، أو أنابيب في القاعدة يمكن من خلالها تصريف المياه. بعضها لديه مزيج من الاثنين.

يسمح تنظيم تدفق المياه عبر السد بإبقاء مستوى المياه خلف السد بعيداً بدرجة كافية عن القمة لمنع الأمواج من الغسل فوق القمة. تسمى المسافة بين القمة وأقصى ارتفاع مسموح للماء بالوصول إليه «لوح الطفو».

إذا كان من المقرر استخدام سد لتوليد الطاقة، فإن الأنابيب تحمل المياه عبر الهيكل، مما يسمح لها بالهبوط من مستوى مرتفع إلى مستوى منخفض وتوجيهها لتدفق التوربينات قبل أن يجري تفريغها في جانب المصب.

مهما كان الغرض الأساسي من السدود، فإنها توفر حماية ممتازة من الفيضانات. ربما كان أشهر مشاريع بناء السدود والسيطرة على الفيضانات هو المشروع الذي بدأته هيئة وادي تينيسي (TVA) في عام 1933. كانت فريدة من نوعها من حيث إنها جمعت المشاريع التي يديرها بالفعل عدد من الوكالات الحكومية واستندت إلى حوض تصريف لنظام نهر يغطي ما يقرب من (106190 كيلومتراً مربعاً)، بشكل رئيسي في تينيسي ولكن تمتد إلى كنتاكي، وفيرجينيا، ونورث كارولينا، وجورجيا وألاباما وميسيسيبي.

كانت أهداف TVA هي السيطرة على الفيضانات على نهر تينيسي وروافده، وتحسين الملاحة، وتوليد الطاقة الكهربائية. لقد كان نجاحاً باهراً وحظي بإعجاب كبير في البلدان الأخرى، ليس أقلها التحسينات الاجتماعية التي أدخلتها على المنطقة الخاضعة لإدارتها. كما أنها حالت دون حدوث فيضانات خطيرة.





تستخدم العديد من السدود لتوليد الطاقة الكهربائية. في بعض البلدان، يجري توفير كل الطاقة الكهربائية تقريباً بهذه الطريقة. حيث يحوي السد على محركات كبيرة تسمى التوربينات. تُطلق كميات هائلة من المياه عبر الحاجز، في النهر أدناه، مما يجعل التوربينات تدور. تعمل التوربينات الدوارة على تشغيل المولدات لإنتاج الطاقة الكهربائية.

صُممت سدودها للحفاظ على قناة صالحة للملاحة (2.7 م) بعمق ولمنع الفيضانات في جميع أنحاء (1,046 كم) من بادوكا، كنتاكي، إلى نوكسفيل، وتينيسي.

هناك **تسعة سدود رئيسية**، خمسة منها لا تزال قيد الإنشاء، لكن السدود الأصغر المستخدمة لتوليد الطاقة تجعل المجموع أكثر من 50 سداً. تُعرف الخزانات المحجوزة خلفها باسم البحيرات الكبرى في الجنوب. وتحتفظ معاً بنحو (14.79 كيلومتر مكعب) من المياه.





في فبراير 1957، كان نهر تينيسي قد غمر تشاتانوغا لو لم يحتفظ بالمياه الزائدة في الخزانات. بدلاً من أن يرتفع إلى (16.5 متر)، وصل النهر إلى ما يزيد قليلاً على (9.75 متر). بعد عام، في مايو 1958، أنقذت خزانات TVA القاهرة، إلينوي، من الفيضانات.

سنة سدود بُنيت على طول نهر ميسوري منذ عام 1944، جنباً إلى جنب مع السدود لحماية الأراضي الزراعية والبلدات المعرضة للخطر، منعت أيضاً الفيضانات، وتولد المحطات الكهرومائية التي بنيت في السدود طاقة كافية لتلبية جميع احتياجات نبراسكا. وتتسع السدود لـ 105 خزانات موزعة على طول سلسلة (1600 كم) بسعة إجمالية (92.4 كم³).

• فشل السدود

في حالة فشل السد، تكون النتيجة فيضانات كارثية للوادي أسفل مجرى النهر. حالات الفشل نادرة ولكنها تحدث. فقد فشل سد **بيونتس Puentes**، وهو سد جاذبية على نهر **غوادالتين Guadalentín** في إسبانيا والذي جرى الانتهاء منه في عام 1791، وفي عام 1802 عندما أوصلت الأمطار الغزيرة بشكل غير عادي إلى الخزان مياهاً أكثر مما يمكن أن يتحملة السد.

بُني سد جاذبية آخر، وهو نهر **سانت فرانسيس في كاليفورنيا**، على أسس غير مستقرة **جيولوجياً** وانهار في عام 1928، بعد عامين من اكتماله. تحتاج السدود الخرسانية إلى أساسات صلبة، على صخر حديث العهد لم يتآكل ويتشقق بفعل العوامل الجوية.



عندما بُني سد كلوفر، وهو سد دعامة صغير، على نهر كيوا بأستراليا، تسببت التجوية تحت بعض الدعامات في حدوث تسربات كان من الصعب إصلاحها. كان خطأً صغيراً أسفل الأساس هو الذي تسبب في انهيار سد مالباسيت، وهو سد مقوس على نهر ريان في جنوب فرنسا، في نوفمبر 1959.



تسبب فشل سد أوستن في عام 1911 في وفاة 78 شخصاً ولا يزال أحد أسوأ حالات فشل السدود في تاريخ الولايات المتحدة الأمريكية.

كان لا بد من التخلي تماماً عن سد قوسي آخر، وهو سد مونتي جاك في إسبانيا، ليس بسبب الشقوق ولكن بسبب الكهوف الموجودة في الصخور الجيرية المحيطة. جرى بناء السد وامتلاً خزانه، لكن المياه تسربت إلى الكهوف وعبرها. ومع محاولات إغلاقه، فقد ثبت أنه من المستحيل جعل الخزان مانعاً للماء، لذلك لم يحتفظ بالمياه مطلقاً.





كذلك عانى سد كنتاكي، على نهر تينيسي، من مشاكل مماثلة. في هذه الحالة جرى علاجها باستخدام التبن والقار والأسمنت لإغلاق الخزان، لكن التكلفة كانت مرتفعة جداً.

في 5 يونيو 1976، انهار سد تيتون في وادي نهر سنك بولاية أيداهو. كان سد ترابي بارتفاع 93 متراً وطوله أكثر من 0.8 كم. وقد فشلت بسبب ملء خزانها واحتوائه على نحو (3 بليون متر مكعب) من المياه بنسبة 97% من طاقته المخططة. وقد غطت الفيضانات الناتجة (64.75 كيلومتر مربع) وتشريد 30 ألف شخص.

لم يفشل سد فايونت الكبير، لكن الفيضان الذي حدث عندما انهار سفح جبل فيه أدى إلى إطلاق كمية هائلة من المياه وتسبب في العديد من الوفيات.

• ماذا يحدث لمجرى النهر؟

تشهد معظم الأنهار الرئيسية تبايناً موسمياً كبيراً في كمية المياه التي تحملها. يزيد موسم الأمطار أو ذوبان الجليد من التدفق، وبمجرد ذوبان كل الثلج، يقلل موسم الجفاف من التدفق. تنظم السدود التدفق، لذلك يبقى ثابتاً طوال العام، لكن هذا يغير مجرى النهر في اتجاه مجرى السد.

اعتادت الفيضانات الموسمية على طول نهر كولورادو أن ترسب الرمال على طول الضفاف، وتشكل الشواطئ، لكن التدفق الأبطأ والمنظم في اتجاه مجرى النهر من سد غلين كانيون تسبب في استقرار الرمال على طول السرير.

تغيرت موائل الحياة البرية، وأدرك العلماء أن السبب في ذلك هو أن هذه الموائل بحاجة إلى فيضانات دورية للحفاظ عليها، لذلك حاولوا إعادة فيضان الجدول.





من 26 مارس إلى 2 أبريل 1995، أطلق السد المياه بأسرع ما يمكن عبر غراند كانيون. عندما جرى استئناف التدفق العادي، ظهر 55 شاطئاً جديداً وازداد حجم 75% من الشواطئ الموجودة.

جرف الغطاء النباتي على جانب الضفة والذي نما في المياه بطيئة الحركة، وجرى تنشيط المستنقعات والمياه الخلفية، وتحسنت الموائل للعديد من الأنواع. تسبب الفيضان في أضرار طفيفة لبعض الموائل، ولكن حُكم عليه بشكل عام بنجاح كبير، وبدأ العلماء في البحث في الأنهار الأخرى التي قد تستفيد منها.

كان نهر كولومبيا مرشحاً رئيسياً، لكن النهر التالي الذي جرت معالجته كان نهر ترينيتي، في مقاطعة ترينيتي، شمال كاليفورنيا. بُنيت السدود في عام 1963، وسمح التدفق الأبطأ للنباتات بالنمو من الضفاف، مما قلل من موائل السلاحف والضفادع والحشرات والأسماك، وأحواض الحصى التي يستخدمها السلمون للتبويض المملوء بالرمال.

منذ عام 1991، تحدث فيضانات سنوية تستمر عدة أيام عندما تتسرب المياه بسرعة من السد. يُنظر في معاملة مماثلة للأنهار الأخرى. هذه القضية مثيرة للجدل، بخاصة في تلك الأجزاء من الغرب حيث يوجد نقص في المياه، لكنها تساعد في الحفاظ على الحياة البرية الطبيعية في النهر وبجانبه مع الاحتفاظ بمزايا السد.

إن السدود ناجحة جداً في منع الفيضانات، ولكنها تسببت في الماضي في مشاكل من خلال إتلاف الموائل وتغيير أنماط الترسيب في اتجاه مجرى النهر، وتسبب فشل السدود العرضي في حدوث كوارث مروعة. هناك رابط راسخ بين السدود الكبيرة حديثة البناء والزلازل.





يفهم العلماء والمهندسون حالياً أكثر بكثير مما فعلوا قبل بضع سنوات حول الطريقة التي تنقل بها الأنهار المياه، وحول تحديد المواقع المناسبة لبناء السدود وكيفية بنائها بأمان، وحول موائل الحياة البرية التي توفرها الأنهار وكيفية حمايتها.

• مزايا وعيوب السدود

السد عبارة عن هيكل بُني عبر نهر للتحكم في تدفق النهر. عادة، تخلق المياه المحصورة بالسدود بحيرة اصطناعية، أو خزاناً، خلف السد. تتمثل الأهداف الرئيسية لنظام السدود والخزانات في التقاط الجريان السطحي وتخزينه، وتحريره حسب الحاجة للسيطرة على الفيضانات، وتوليد الكهرباء (الطاقة الكهرومائية)، وتوفير المياه من أجل الري والبلدات والمدن.

توفر الخزانات أيضاً أنشطة ترفيهية، مثل: السباحة وصيد الأسماك وركوب القوارب. السدود والخزانات الكبيرة لها مزايا وعيوب.

أدى وجود أكثر من 45000 سد كبير في العالم (22000 منها في الصين، بما في ذلك سد الخوانق الثلاثة الضخم الذي جرى بناؤه مؤخراً) إلى زيادة الجريان السطحي الموثوق به السنوي المتاح للاستخدام البشري بنحو الثلث. نتيجة لذلك، تحوي الخزانات حالياً من 3 إلى 6 مرات على كمية من المياه أكبر من الكمية الإجمالية المتدفقة في جميع الأنهار الطبيعية في العالم.

على الجانب السلبي، أدى هذا النهج الهندسي لإدارة الأنهار إلى نزوح 40-80 مليون شخص من منازلهم، وإغراق منطقة من الأراضي المنتجة في الغالب، التي يبلغ مجموعها تقريباً مساحة ولاية كاليفورنيا الأمريكية، وإضعاف بعض الخدمات البيئية المهمة التي تزود المنطقة.





قدرت دراسة أجراها الصندوق العالمي للحياة البرية (WWF) عام 2007 أن نحو واحد من كل خمسة أنواع من أسماك المياه العذبة وأنواع النباتات في العالم إما منقرض وإما معرض للخطر، ويرجع ذلك أساساً إلى أن السدود وسحب المياه قد قللت بشكل حاد من تدفق العديد من الأنهار مثل كولورادو. ووجدت الدراسة أيضاً أنه بسبب السدود، والسحب المفرط للمياه، وفي بعض المناطق الجفاف الشديد الذي طال أمده، فإن 21 نهراً فقط من أطول 177 نهراً على كوكب الأرض تجري بحرية من مصادرها إلى البحر. سيؤدي تغير المناخ المتوقع إلى تفاقم هذا الوضع في المناطق التي تصير أكثر سخونة وتتلقى كميات أقل من الأمطار.

تمتلئ الخزانات الموجودة خلف السدود أيضاً بالرواسب مثل الطين والطيني، عادةً في غضون 50 عاماً، مما يجعلها غير مجدية لتخزين المياه أو إنتاج الكهرباء. صار عمر نحو 85% من أنظمة الخزانات الأمريكية للسدود 50 عاماً أو أكثر عام 2020. إن استخدام السدود لاحتجاز وتخزين تدفقات الأنهار وسحب كميات كبيرة من المياه من الأنهار للري ومياه الشرب يمكن أن يتسبب في جفاف البحيرات والبحار الداخلية التي تغذيها هذه الأنهار.

مثال على ذلك بحيرة تشاد في إفريقيا. فهي محاطة بالدول الأفريقية مثل تشاد والنيجر والكاميرون ونيجيريا، والتي هي بعضاً من أسرع الدول نمواً في العالم. بسبب مزيج من النمو السكاني السريع والري المتزايد بشكل كبير والري غير الفعال والجفاف المطول، تقلصت البحيرة بنسبة 97% منذ عام 1963 وقد تختفي قريباً تماماً.





إذا حدث تغير المناخ كما هو متوقع خلال هذا القرن، فسيؤدي إلى تفاقم نقص المياه في أجزاء كثيرة من العالم. يعتمد مئات الملايين من الناس في الصين والهند وأجزاء أخرى من آسيا على تدفقات الأنهار التي يغذيها ذوبان الأنهار الجليدية في جبال الهيمالايا.

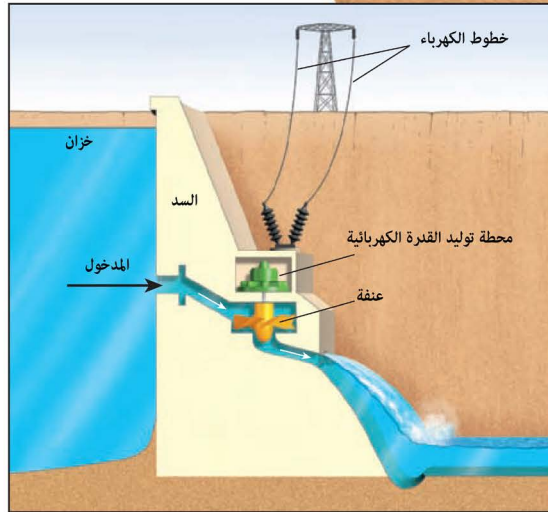
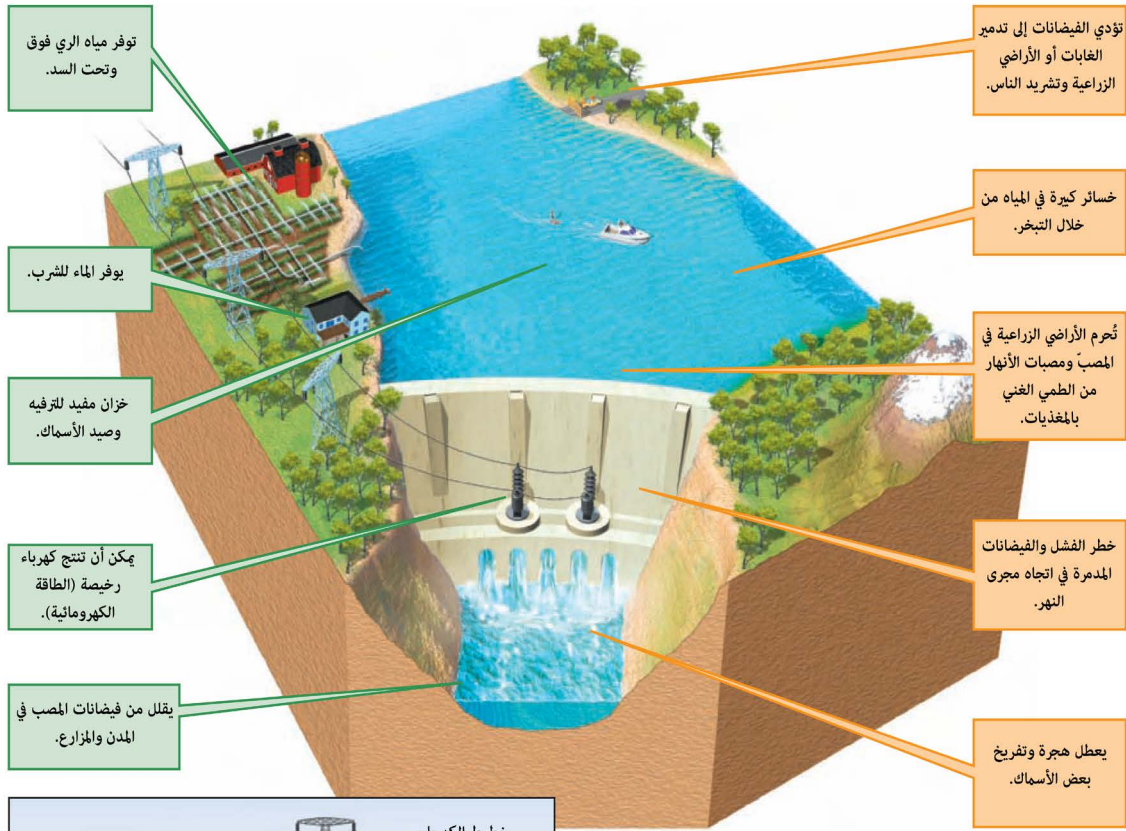
كثير من هذه الأنهار الجليدية في آسيا وأجزاء من أمريكا الجنوبية آخذة في الانحسار مع ارتفاع درجة حرارة الغلاف الجوي للأرض. إذا اختفت هذه الأنهار الجليدية الجبلية في النهاية، فسوف تتضاءل أو تجف الأنهار التي تغذيها.

سيجعل هذا الأمر أكثر صعوبة بالنسبة للمزارعين الذين يعتمدون على هذه المياه في زراعة ما يكفي من الغذاء لنحو بليون شخص، أي أكثر من 3 أضعاف عدد سكان الولايات المتحدة الحاليين. في عام 2009، أعلنت الصين عن خطط لبناء 59 خزاناً لجمع بعض المياه التي تذوب حالياً من أنهارها الجليدية المتقلصة.





الأمطار والسيول والسدود



السدود وخزانات المياه الكبيرة لها مزايا (خضراء) وعيوب (برتقالية). 45000 سد كبير في العالم (15 متراً أو أعلى) تلتقط وتخزن نحو 14% من الجريان السطحي في العالم، وتوفر المياه لما يقرب من نصف جميع الأراضي الزراعية المرورية، وتوفر أكثر من نصف الكهرباء المستخدمة في 65 دولة. تمتلك الولايات المتحدة أكثر من 70000 سد كبير وصغير، قادرة على التقاط وتخزين نصف تدفق النهر بكامله في البلاد.





• الآثار البيئية لبناء السدود

تعمل السدود المبنية على إنشاء خزان للمياه لأغراض الري، وتربية الماشية، والأنشطة الترفيهية، وتوليد الطاقة الكهربائية، وكحاجز مائي مؤقت لمنع التدفق العالي للأنهار لمنع الفيضانات. ربما كان سحب المياه مستمراً منذ آلاف السنين، ولكن لا يوجد شيء مثل النطاق الهائل والحجم الهائل الذي شهدناه منذ عام 1900. كان سد هوفر على نهر كولورادو بين أريزونا ونيفاذا، مثلاً رائعاً، فهو أعلى (221 متراً) وأطول (379 متراً) سد في العالم عندما اكتمل بناؤه عام 1936. تشكل مياهه المحجوزة بحيرة ميد، التي يبلغ طولها 1885 كم وعرضها 12.9-1.6 كم. يبدو أن اكتماله قد أدى إلى دخول حقبة جديدة في بناء السدود في جميع أنحاء العالم وربما خلق انطباعاً وهمياً بأن البشر يمكنهم التحكم في كل من أبعاد الزمان والمكان لإمدادات المياه. فقد تبعته مشاريع السدود الأخرى في الولايات المتحدة وفي بقية العالم.

كما شكل سد أسوان على نهر النيل في مصر - بارتفاع 114 متراً وطول 3600 متر - بحيرة ناصر، التي تحوي على ما يكفي من المياه لري أكثر من 2.8 مليون هكتار من الأراضي الزراعية.

صار بناء السدود واسع الانتشار لدرجة أن 2 % فقط من الأنهار في الولايات المتحدة تتدفق بحرية. على الصعيد العالمي، بلغ متوسط معدلات بناء السدود الكبيرة التي لا يقل ارتفاعها عن 15 متراً نحو 885 عاماً بين عام 1950 ومنتصف الثمانينيات ونحو 500 عام في التسعينيات. من المتوقع أن تنخفض معدلات البناء إلى 350 في السنة خلال الثلاثين سنة القادمة.





التراجع في البناء يحدث لعدة أسباب:

- ❖ **أولاً:** تبقى القليل من الأنهار التي يمكن بناء السدود عليها.
- ❖ **ثانياً:** الفقد التبخيري من مساحة 500000 كيلومتر مربع من خزانات العالم مذهل، لا سيَّما في المناطق شبه القاحلة والجافة حيث يمكن أن يتجاوز التبخر هطول الأمطار بأكثر من متر واحد في السنة.
- والأهم من ذلك، أن العديد من هذه الهياكل الهندسية مكلفة، حيث تُظهر الدراسات من العديد من مناطق العالم أن التكاليف البيئية والاجتماعية والاقتصادية والثقافية المرتبطة بالسدود كبيرة جداً.
- إن التكاليف مثل إزاحة السكان المحليين، وتدهور واستنزاف الموائل المائية، وأحمال التلوث الثقيل، وفقدان التنوع البيولوجي، وخسائر اقتصادية أخرى مثل هلاك تجمعات الأسماك، تدخل حالياً في حسابات (التكلفة - المنفعة) التي تُجرى قبل بناء السد. علاوة على ذلك، غالباً ما تُصمم السدود بحيث يكون عمرها الإنتاجي 50 عاماً فقط بسبب معدلات ملئها السريعة بالرواسب التي تحملها الأنهار التي تدخل الخزان. في حالة سد الخوانق الثلاثة في الصين، هناك اتفاق ضئيل حول مدى نجاح خطة الإدارة في منع الملاء السريع للخزان بالرواسب.





دمر بناء السدود على الامتدادات العليا لنهر كولومبيا في الشمال الغربي الأمريكي - في البداية بواسطة سد غراند كولي (في الصورة هنا) وحاليا بإجمالي 14 سداً - 40% من أكثر موائل تكاثر السلمون إنتاجية في العالم. كان ما يقرب من 10-15 مليون سمكة سلمون تسبح فوق النهر من المحيط لتفرخ في غضون عام. حتى إعادة الصغار المرباة في المفرخات إلى المحيط بواسطة البارجات أو الشاحنات فشل في استعادة إنتاجية النظام.

نجح بناء قناة الشحن في الميسيسيبي في أواخر عشرينيات القرن الماضي، جنباً إلى جنب مع عشرات السدود التي أقيمت بشكل رئيسي على نهر ميسوري، في عكس اتجاه التوسع الجيومورفولوجي لمدة 7000 عام لساحل لويزيانا في نيو أورلينز عن طريق منع الرواسب خلف السدود. وقد تسبب هذا بدوره في زحف خليج المكسيك على ساحل لويزيانا (أي خسارة الأرض) بمعدل 100 كيلومتر مربع في السنة بحلول **الثمانينيات**، والذي يستمر حالياً بمعدل 65 كيلومتراً مربعاً في السنة.





تشير الأبحاث الحديثة إلى أن أضرار العواصف الناجمة عن إعصاري دينيس وكاترينا في عام 2005 قد تفاقمت بشكل كبير بسبب فقدان الأراضي الرطبة الساحلية في خليج المكسيك والقنوات عبر الأراضي الرطبة. جرى تجريفها من قبل شركات النفط التي تريد طريقاً أكثر استقامة وأقصر عبر الأراضي الرطبة بين منصات النفط البحرية ومنشآتها البرية.

هناك أمثلة أخرى موثقة. جلبت المرحلة الأولى من مشروع جيمس باي في كيبك، الذي كلف **6 بلايين دولار** (أنفق 20 ألف دولار فقط منها على تقييم الآثار البيئية)، مصاعب خطيرة لهنود كري. لقد انتهى بناء سد الخوانق الثلاثة على نهر يانغتسي في الصين في عام 2009 بتكلفة **24.5 بليون دولار** (بقيمة دولار 1997)، وكان عرضه كيلومترين وارتفاعه 200 متر، أما الخزان الذي أغرق 600 كيلومتر مربع فقد أدى إلى نزوح **1.2 مليون شخص**.

حتى كتابة هذه السطور، فإن التأثيرات البيئية المماثلة لقناة سردار ساروفار ووندر على نهر نارمادا في وسط الهند نوقشت كثيراً. وتقدر دراسة مفصلة عن 54 سداً في ذلك البلد «بشكل متحفظ» أنه خلال الخمسين عاماً الماضية، نزح 33 مليون شخص بسبب بناء السدود وحده. وقد صُمم سد سردار ساروفار، وهو سد خرساني بطول 460 كيلومتراً مع شبكة بطول 75000 كم من القنوات الفرعية، لري مليوني هكتار من الأراضي.

سننتعرف في هذه النبذة التاريخية على أهم السدود المبنية لدى مختلف الحضارات، مع إشارة خاصة إلى السدود التي بُنيت في المنطقة العربية والإسلامية.





1. السدود عند المصريين القدماء

يعلم جميعنا أنّ مصر القديمة تُمثل إحدى أقدم حضارتين في مجال الري، وهي تتمتع بمجموعة غنية ومتنوعة من مواقع ومعالم وتقاليد تراث الماء. تُفاخر مصر بوجود أحد أقدم السدود الركامية وبيواكير المشروعات الهيدروليكية الوطنية التي تعود إلى أكثر من 3800 سنة. وقد هيأت المقاييس التي استُخدمت لقياس ارتفاع فيضانات النيل قبل أكثر من 5000 سنة وجود معايير قياس علمية حديثة وملاحظات ومنطق استنتاجي قائم على العلاقات بين فيضانات النيل والدورات الفلكية.



السدود التاريخية على نهر النيل في مصر: سد الكفرة في وادي الجراوي الركامي. سد اللاهون، الفيوم. سد إطسا، الفيوم.





سنتعرّف فيما يأتي على أهم وأبرز السدود التي بُنيت في الحضارة المصرية القديمة والحديثة.

• سد الكفرة

بُني أقدم سد معروف في مصر في عصر ما بين 2950 و 2750 قبل الميلاد، بالقرب من حلوان، على بُعد نحو 20 ميلاً جنوب القاهرة. يُعرف سد الكفرة، الذي له بقايا حتى يومنا هذا. وقد جرى بناؤه عبر وادي الجراوي، ويبلغ طول قمته 348 قدماً وطول قاعدته 265 قدماً، ويبلغ أقصى ارتفاع له 37 قدماً فوق قاع الوادي، وكان سميكاً جداً.

لقد شُيّد من جدارين من البناء العشوائي، يبلغ سمك كل منهما 78 قدماً عند القاعدة، ويحويان معاً على الأقل على 30 ألف ياردة مكعبة من البناء، وكلها كان لا بد من حفرها ونقلها إلى الموقع ووضعها في مكانها.

كان هناك فجوة بين الجدارين تبلغ 118 قدماً، وقد جرى ملؤها بنحو 60 ألف طن من الحصى من قاع الوادي. يبدو أن الخزان الذي كان يهدف شكله السد إلى توفير الشرب للعاملين في المحاجر القريبة، لا يبدو أنه استخدم لفترة طويلة. فقد جرى بناء السد بشكل فضفاض جداً ولم يكن مانعاً لتسرب المياه، لكنه مع ذلك يعد مثلاً رائعاً لمشروع هندسي مدني كبير، بخاصة عندما نعتبر أنه بُني منذ أكثر من 4500 عام.

لم يكن لسد الكفرة ما يقوم مقامه في مصر حتى العصر الحديث. ربما يرجع ذلك إلى أن الري في الأحواض، وهو الطريقة الوحيدة المستخدمة في مصر حتى عهد قريب، لا يحتاج إلى أكثر من السدود المنخفضة والسدود المبنية من الأرض.





والسد هو الأقدم عالمياً من حيث الحجم، فقد أنشئ خلال الفترة الرئيسية لبناء أهرامات المملكة القديمة. إلا أن الهدف من إنشائه لا يزال غير واضح. قد يكون أقيم بمثابة تجربة في إنشاء السدود أو لحماية المنشآت والمقابر الملكية في الجانب الآخر من النهر من عاصمة الدولة الواقعة حينئذ في سقارة ودهشور. لكن من الممكن أيضاً أن يكون قد أنشئ لتوفير المياه للحيوانات الطريدة المهددة بالجفاف المتزايد. وقد انهار السد خلال إنشائه بسبب الفيضانات الجارفة ولم يكتمل أبداً.

وبسبب عدم تصميم قناة لتصريف الفائض خلال المرحلة الأولية من الإنشاء لم يصمد السد غير المكتمل أمام الفيضان الجارف. كما لم يكن السد محمياً من فيضان المياه من أعلاه. ويُشير قُرب السد من النيل وبُعدّه عن السكان إلى أنه أقيم للحماية من مثل هذه الحوادث التي لا تزال تقع اليوم. ومن شأن 22100000 قدم مكعب من المياه والفيضان أن تجعل الحوض يفيض بمائه إلى الأودية القريبة الموازية.



يُعتقد أن فشل سد الكفرة جعل المهندسين المصريين مترددين في إنشاء سدود أخرى لمدة 8 قرون لاحقة تقريباً.





• سد اللاهون

انتهت المملكة المصرية القديمة (2686 - 2181 ق.م) على نحو مفاجئ نتيجة انحسار التدفقات المائية على نحو كارثي خلال الفترة (2200 - 2150 ق.م) بسبب ظروف مناخية واسعة النطاق أدت إلى انخفاض كبير في تدفق المياه من أثيوبيا وأفريقيا الاستوائية. كان الانخفاض في تدفقات النيل مضطرباً وصادماً فتهاوت الحكومة المركزية وصارت المدن إلى الخراب وحصدت المجاعات أرواحاً كثيرة وعمت الفوضى والجريمة. وعلى مدى 150 سنة كافح المصريون لاستعادة النظام. ظهرت قوتان إقليميتان رئيسيتان متنافستان، وبعد سلسلة من النزاعات المسلحة استُعيدت الملكية لكافة البلاد من قبل منتوحوتب الثاني

(2040 - 2010 ق.م.) ومن خلفائه سنوسرت الثاني (1897 - 1878 ق.م) الذي سعى خليفته أمنمحات الثالث (1844 - 1797 ق.م) إلى تنفيذ أول مشروع هيدروليكي طموح على مستوى مصر والعالم في ذلك الوقت في منخفض الفيوم في الصحراء جنوب شرق العاصمة القديمة ممفيس.

قبل ذلك كان سنوسرت الثاني قد قرر وصل المنخفض بالنيل لإعادة إدخال المياه للمنخفض. كما جرى التحكم بتدفق المياه الداخل للإبقاء على مستوى المياه في المنخفض غير مرتفع كثيراً للتمكن من استصلاح قاع البحيرة لزراعتها كعزبة ملكية. أُقيم سد في اللاهون عند نقطة المدخل.

أشرف الملك نفسه على المشروع وأقيم هرم الملك والمقبرة الملكية -أقدس مكان للملكية- هناك. وكانت أول مدينة منظمة اكتُشفت في مصر بموقع قريب في اللاهون تخص مجتمع عمّال منظم اشتغلوا في مشروع الفيوم الكبير.





لاحقاً خلد سنوسرت الثاني في أعمال كتاب كلاسيكيين تحت اسم سيزوستريس الثاني. أقام سنوسرت الثاني هرمًا عند مدخل اللاهون مكملاً هرم أمنمحات الثالث الواقع في هواره عند نهاية المدخل بالضبط قبل تدفق المياه إلى المنخفض. يُعتقد أن معبداً كبيراً لحفظ الموتى كان بالأصل قائماً بجانب الهرم شكل أساس مجمع بنايات بما فيه من دهاليز وقاعات سماها هيروودوت (المتاهة).

كما أضافت الملكة سوبيك نفرو من الأسرة الثانية عشرة بعض الملحقات إلى المجمع. ويعني اسمها (جمال الإله سوبيك) وهو الإله التمساح الذي كان يُعبد هناك. خلافاً للاعتقاد السائد بأن منخفض الفيوم استخدم حوضاً لحفظ المياه خلال فترات الفيضانات الكبيرة ليجري إعادة توجيهها خلال انخفاض النيل إلى سهله الفيضي الذي يبقى على مستوى للبحيرة أقل بكثير من مستوى القنوات المتصلة بها من أجل تمكين الجريان الراجع لمجرى النيل الرئيس. كان ذلك الاعتقاد نتيجة لسوء تفسير عبارة أوردها هيروودوت، وقد أظهرت أبحاث حديثة أنه بعد أن كان يجري ملء البحيرة للمستوى المطلوب كانت تُغلق بوابات السد عند مدخل القناة المتدفقة إلى الداخل. أما مياه الفيضان الزائدة فتُخزن في حوض صُنعي ضيق ممتد أمام السد لمنع الفيضانات من غمر السهل الفيضي وجعل مياهها تجري عبر قناة على امتداد الحافة الصحراوية للسهل الفيضي للنيل من الفيوم وحتى ممفيس لتوفير المياه للجنائز في الأهرامات والقرى الزراعية.

أطلق على القناة اسم البحيرة الكبيرة أو بحيرة موريس باليونانية. وقد نسبت الأشغال المائية في الفيوم لاحقاً إلى الملك موريس وأطلق الإغريق على البحيرة التي تصب في المنخفض بحيرة موريس. يمثل المنخفض الكبير في





الفيوم سمة جيولوجية وكان متصلاً بشكل طبيعي مع النيل في أزمنة بعيدة وخلال المملكة القديمة. وقد استُخدم رصيف على شواطئه لنقل حجارة البناء البازلتية من جبل قطراني شمال البحيرة عبر أحد أقدم الطرق المعبدة التي لا تزال موجودة. كان الاسم المصري الأصلي للبحيرة هو "شاي" بمعنى البحيرة، ثم أُطلق عليها لاحقاً بيوم أي البحر، التي صارت لاحقاً "فيوم" بالعربية.

ربما كان سد اللاهون أقدم السدود المصرية؛ إذ يبلغ ارتفاعه 49 قدماً وهو عبارة تل بجانب نهر النيل في مصر في نحو 2900 قبل الميلاد، ولا يزال من الممكن رؤية بقايا سد آخر قديماً تقريباً في وادي جراوي في مصر.



بدلاً من توفير الحماية من الفيضانات، جرى بناء سد اللاهون لاحقاً في عام 2500 قبل الميلاد للحيلولة دون وقوع الفيضانات الموسمية في قاع نهر جاف يغذي النيل. يبلغ سمكه 295 قدماً.





• سد أطسا وبحيرة الملاعة

يمتد هذا السد لثمانية كيلومترات بين إطسا وشموه في القسم الجنوبي الشرقي من منخفض الفيوم. وكان حوض الملاعة الذي تجري زراعته حالياً تغطيه بحيرة أوجدها السد في القرن الثالث قبل الميلاد.



سد أطسا - شدموه في الفيوم.

• سد أبو المنجا

أقام هذا السد السلطان المملوكي الظاهر بيبرس بين عامي 1266-1267م بهدف احتواء الماء خلال موسم الفيضان ثم زيادة مستوى المياه لري أراضي الشرقية. كان لهذا السد بوابات تُغلق وتُفتح حسب الحاجة. وقد جرى إصلاحه في سنة 1487م إلا أن قناة أبو المنجا امتلأت بالطمي منذ ذلك الوقت ودُمّرت الحواجز باستثناء جزء صغير استمر يحمل تمثال الأسد وهو شعار الظاهر بيبرس، كما دُمّر الجزء المتبقي من قبل الخديوي عباس حلمي الثاني.





• محاولة الحسن بن الهيثم في إنشاء سد أسوان

توجد رواية تاريخية قوية عن تقديم العالم الفيزيائي والمهندس العربي الحسن بن الهيثم (توفي نحو 430هـ / نحو 1038م) لاقتراح بناء سد على نهر النيل لحل مشكلاته. لكن لم يكن لدى ابن الهيثم خطة واضحة لبناء السد. ويبدو أنه كان على علم -بحكم قُربه من البصرة مسقط رأسه- بالسدود الكبيرة التي تسمى بالشادروان (Schadruwan) وهي في الأهواز. فقد كانت تقام عن طريق استخدام الصخور التي تعقد بجوار بعضها بعضاً مع أعمدة الحديد (قضبان) وملاط (أسمنت) إضافةً للرصاص. ويمكن أيضاً أن نعثر على هذه النظم في مدينة قاتول، وبين شيراز واصطخر. ربما عرف ابن الهيثم أيضاً قصة أنظمة الري التي ترجع لأرخميدس.

سنقدم فيما يأتي رواية المؤرخ جمال الدين أبي الحسن بن القفطي حول محاولة الحسن بن الهيثم بناء سد في مصر الذي قال: «بلغ الحاكم بأمر الله الفاطمي صاحب مصر «وهو» من العلويين وكان يميل إلى الحكمة - خبره وما هو عليه من الإتقان لهذا الشأن فتاقت نفسه إلى رؤيته ثم نقل له عنه أنه قال لو كنت بمصر لعملت في نيلها عملاً يحصل به النفع في كل حالة من حالاته من زيادة ونقص فقد بلغني أنه ينحدر على موضع عال هو في طرف الإقليم المصري فإزداد الحاكم إليه شوقاً وسير إليه سرّاً جملة من المال وأرغبه في الحضور فسار نحو مصر ولما وصلها خرج الحاكم للقائه والتقى بقرية في باب القاهرة المعزية تعرف بالخذق وأمر بإنزاله وإكرامه واحترامه وأقام ريثما استراح وطالبه بما وعد به من أمر النيل فسار ومعه جماعة من الصناع المتولين للعمارة بأيديهم ليستعين بهم على هندسته التي خطرت له ولما سار إلى الإقليم بطوله ورأى آثار من تقدم من ساكنيه من الأمم الخالية وهي على غاية من





إحكام الصنعة وجودة الهندسة وما اشتملت عليه من أشكال سماوية ومقالات هندسية وتصوير معجز، تحقق أن الذي يقصده ليس بممكن فإن من تقدمه في الصدور الخالية لم يغرب عنهم علم ما عمله ولو أمكن لفعلاه، فانكسرت همته ووقف خاطره ووصل إلى الموضع المعروف بالجنادل قبلي مدينة أسوان وهو موضع مرتفع ينحدر منه ماء النيل فعابته وباشره واختبره من جانبيه فوجد أمره لا يمشي على موافقة مراده وتحقق الخطأ والغلبة عما وعد به وعاد خجلاً ومنخدلاً واعتذر بما قبل الحاكم ظاهره وواقفه عليه، ثم إن الحاكم ولاه بعض الدواوين فتولاها رهبة لا رغبة. وتحقق الغلط في الولاية فإن الحاكم كان كثير الاستحالة مريقاً للدماء بغير سبب أو بأضعف سبب من خيال يتخيله فأجال فكرته في أمر يتخلص به فلم يجد طريقاً إلى ذلك إلا إظهار الجنون والخبال فاعتمد ذلك وشاع فأحيط على موجوده له بيد الحاكم ونوابه وجعل برسمه من يخدمه ويقوم بمصالحه وقيّد وترك في موضع من منزله».



الحسن بن الهيثم وهو يرشد العمال في أسوان.

كان الحسن بن الهيثم يلقب بـ«المهندس البصري» وأحياناً بـ«المهندس المصري» نظراً لبراعته في الهندسة النظرية والعملية، ويبدو أنه مارس صناعة السدود في العراق قبل قدومه لمصر.





المدهش في الأمر أنه في عام 1968م جرى تشييد السد العالي في أسوان، وهو المكان نفسه الذي اقترح ابن الهيثم أن يشيد عليه السد قبل نحو 900 سنة.

كما نعلم أن النيل كان يفيض بشدة كل سنة، وقد كان من عادة أهل مصر -قبل الإسلام- أن يقوموا بتقديم قربان بهيئة فتاة مزينة للنهر اتقاءً لشره، وعندما وصل عمرو بن العاص وفتح مصر، وصله خبر هذه العادة، فأرسل برسالة إلى الخليفة عمر بن الخطاب يبلغه عنها، وما كان من عمر إلا أن أرسل رسالة إلى نهر النيل يأمره ألا يفيض بإذن الله، أُلقيت الرسالة وتوقف النيل عن الفيضان، وحقت دماء الكثير من الفتيات اللواتي كانت أرواحهن ستزهق بسبب الخرافة والجهل.

• السد العالي الحديث بأسوان

سد أسوان، أو بشكل أكثر تحديداً سد أسوان العالي، كان أكبر سد في العالم حينها، بُني عبر نهر النيل في أسوان، مصر، بين عامي 1960 و1970. وقد تجاوزت أهميته إلى حد كبير السد المنخفض السابق الذي جرى الانتهاء منه في البداية في عام 1902 المصب. وبناءً على نجاح السد المنخفض، ثم عند الاستفادة القصوى منه، صار بناء السد العالي هدفاً رئيسياً للحكومة بعد الثورة المصرية عام 1952؛ نظراً لقدرته على التحكم بشكل أفضل في الفيضانات، وتوفير مخزون متزايد من المياه للري وتوليد الطاقة الكهرومائية، فقد كان يُنظر إلى السد على أنه محوري للتصنيع المخطط له في مصر. مثل التنفيذ السابق، كان للسد العالي تأثير كبير في اقتصاد وثقافة مصر.





قبل بناء السد العالي، حتى مع وجود السد القديم في مكانه، استمر الفيضان السنوي للنيل خلال أواخر الصيف بالمرور دون عوائق إلى حد كبير أسفل الوادي من حوض الصرف في شرق إفريقيا. جلبت هذه الفيضانات مياه عالية بالمغذيات الطبيعية والمعادن التي تثري سنوياً التربة الخصبة على طول السهول الفيضية والدلتا؛ جعلت هذه القدرة على التنبؤ وادي النيل مكاناً مثالياً للزراعة منذ العصور القديمة.

ومع ذلك، فقد تباينت هذه الفيضانات الطبيعية، حيث يمكن أن تدمر سنوات ارتفاع المياه المحصول بكامله، في حين أن سنوات المياه المنخفضة يمكن أن تخلق جفافاً واسع النطاق وبالتالي مجاعة. كلا هذين الحدثين قد استمر في الحدوث بشكل دوري.

مع نمو عدد سكان مصر وزيادة التكنولوجيا، تطورت الرغبة والقدرة على التحكم الكامل في الفيضانات، وبالتالي حماية ودعم الأراضي الزراعية ومحصول القطن المهم اقتصادياً. مع زيادة تخزين الخزان بشكل كبير التي يوفرها السد العالي بأسوان، يمكن التحكم في الفيضانات ويمكن تخزين المياه للإفراج عنها لاحقاً على مدار سنوات متعددة.



مشهد بانورامي للسد العالي بأسوان وهو يحجز خلفه بحيرة ناصر. لقد بُني هذا السد بالتعاون مع الاتحاد السوفيتي السابق.





2. سدود بلاد ما بين النهرين

لا توجد معلومات مؤكدة كثيرة حول بناء السدود في بلاد ما بين النهرين قبل عام 1000 قبل الميلاد، ولكن من المعروف أنها كانت جزءاً أساسياً من أنظمة الري، وأن هذه السدود تضم على الأقل سداً رئيسياً واحداً عبر نهر دجلة، جرى بناؤه نحو 1750 قبل الميلاد، وجرى بناء السدود إما من الحجر وإما من القصب والتراب مجتمعة.

سبق ذكر الأعمال الهيدروليكية للملك الآشوري سنحاريب لتزويد نينوى بالمياه في الفصل السابق. جرى بناء أربعة سدود إجمالاً، بين عامي 703 و 690 قبل الميلاد، أحدها فوق نهر الخُصر والآخر على مجار صغيرة من أجل تحويل تدفقها إلى الخُصر وبالتالي زيادة تصريفه. تُظهر بقايا النوعين الأخيرين من هذه أنها بنيت من كتل من الحجر الجيري والحجر الرملي والتكتلات، جميعها متجمعة بقوة الملاط.

لم تكن عالية جداً؛ يبلغ أقصى ارتفاع 9.5 قدم، والثاني أقل من ذلك؛ كان طولهما 340 و 750 قدماً على التوالي. لم يجر بناء أي من هذين السدين وحتى السد الرابع بشكل مستقيم عبر الوديان ولكن اتبعت مساراً متعرجاً أو مائلاً. ربما يكون هذا بسبب سعي مهندسي سنحاريب إلى الاستفادة من أفضل الأسس التي يمكن أن يجدها.

لقد استُخدمت السدود الغاطسة في بلاد الرافدين لرفع مستوى المياه والتحكم بتوزيعها. وقد وثق استعمالها في نصوص مكتوبة لعهد يعود للقرن 21 ق.م. ومن أمثلتها المكتشفة ذلك الموجود في تلو والذي لم تُعرف وظيفته عند استخراجها في أواخر القرن التاسع عشر الميلادي.





3. السدود في اليمن

لقد اشتهرت سبأ بين الأمم القديمة، وقد جاء ذكرها في التوراة، كما جاء في بعض النقوش التي خلفها الملك سرجون ملك آشور (720-705 ق.م) أن مملكة سبأ قدمت له هدية من الذهب واللالئ والبخور والأعشاب. ويرى بعض الباحثين أنه قد تكون تلك الأشياء من قبيل الهدية، وليست من قبيل الإتاوة أو الضرائب التي فرضها الملك الآشوري على حكام سبأ.

وذكر القرآن الكريم قصة سبأ في أكثر من موضع، فحكى ما كانوا فيه من النعيم، إذ كانوا في أخصب البلاد وأطيبها وذكر سد مأرب الذي أقامته ملكتهم بلقيس، ولكنهم بطروا وكفروا النعمة وطغوا وكانوا مجوساً يعبدون الشمس فأرسل الله لهم الرسل فلم يهتدوا، فأرسل عليهم سيل العرم، فهدم السد وشردهم جزاءً بما كانوا يعملون. يقول الله تعالى: ﴿لَقَدْ كَانَ لِسَبَإٍ فِي مَسْكِنِهِمْ آيَةٌ جَنَّتَانِ عَنْ يَمِينٍ وَشِمَالٍ كُلُوا مِنْ رِزْقِ رَبِّكُمْ وَاشْكُرُوا لَهُ، بَلَدَةٌ طَيِّبَةٌ وَرَبِّ غَفُورٌ ﴿١٥﴾ فَأَعْرَضُوا فَأَرْسَلْنَا عَلَيْهِمْ سَيْلَ الْعَرِمِ وَبَدَّلْنَاهُمْ بِجَنَّتَيْهِمْ جُنَّتَيْنِ ذَوَاتِ أُكُلٍ خَمْطٍ وَأَثَلٍ وَشَيْءٍ مِّن سِدْرٍ قَلِيلٍ ﴿١٦﴾ ذَلِكَ جَزَيْنَاهُمْ بِمَا كَفَرُوا وَهَلْ نُجْزِي إِلَّا الْكَفُورَ ﴿١٧﴾﴾ [سورة سبأ، الآيات 15 - 17].

وكذلك وردت في القرآن قصتهم وقصة ملكتهم بلقيس مع سليمان -عليه السلام- في سورة النمل. وكان العرب يضربون الأمثال في أشعارهم بمملكة سبأ وسدّها يقول مادحاً:

من سبأ الحاضرين مأرب إذ يبنون من دون سيله العرما





ويقول آخر:

الواردون وتيم في ذرى سبأ قد عض أعناقهم جلد الجواميس

ووافقت الآثار التي وُجدت في سبأ، ما ذكره القرآن الكريم من أن السبئيين ضربوا بسهم وافر في التقدم الزراعي وفي هندسة الري، كما كانوا متقدمين في الهندسة المعمارية. ونجح هؤلاء القوم في بناء سد مأرب في مملكتهم، لحفظ مياه الأمطار التي كانت تجري في أراضيهم دون الإفادة منها، فصاروا يستغلونها في الري بفضل السد والقنوات التي ساعدتهم على توزيع تلك المياه. ويعتقد بأن هذا السد أقيم في نحو عام 650 ق.م. وببناء السد أخذ ملوك الدولة ينظمون توزيع الأراضي والري وتطوير الزراعة، وكان من بين ما يزرعونه الحبوب والنخيل والعنب. وكان لهذه الزراعة فضل في توفير الغذاء لأصحاب القوافل وركبانها، وصاروا يجدون ما يكفيهم من غذاء، وما يحتاجونه من مأوى، خصوصاً وقد كانت الحجارة والأخشاب متوفرة في تلك المملكة. وكانت هذه المملكة قادرة على تزويد القوافل بما تحتاج إليه وهي تقطع رحلات طويلة كانت تصل إلى نحو 1500 كم من جنوبي الجزيرة العربية إلى شمالها الغربي وصولاً إلى البتراء، ومنها إلى البحر المتوسط ومصر.

مع أن سد مأرب في اليمن لم يكن السد الوحيد في جنوب شبه الجزيرة العربية القديمة، إلا أنه الأكثر شهرة والأكثر إثارة للإعجاب. جرى بناء ثلاثة سدود، جميعها على المحاذاة نفسها، عبر وادي ضنا على التوالي، من أجل حجز مياه الفيضانات لري الأراضي حول مدينة مأرب. أولها بناه أهل سبأ



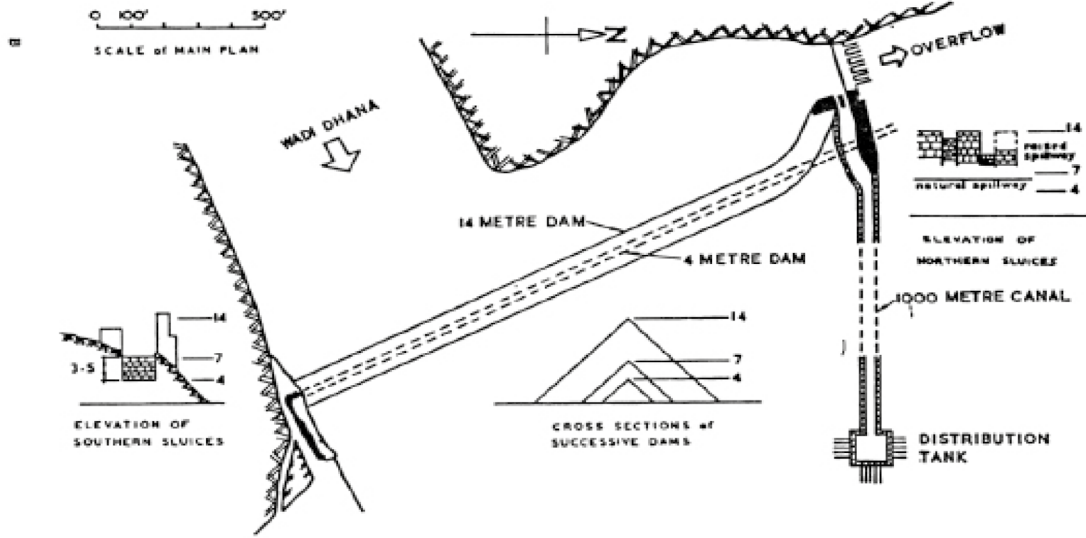


نحو 750 قبل الميلاد، لكن لم يبق أي أثر له، لكنه بني من الأرض وكان طوله نحو 2000 قدم وارتفاعه نحو 13 قدماً.

وجرى بناء السد الثاني نحو 500 قبل الميلاد للسماح بزيادة المساحة المروية. بقيت بعض الآثار منه. كان أيضاً خزاناً ترايبياً يبلغ طوله نحو 2000 قدم، ولكن جرى زيادة ارتفاعه إلى 23 قدماً.

وقد جرى بناء السد الثالث من قبل الحميريين، بعد أن خلفوا الصابئة حكماً في عام 115 قبل الميلاد. في هذا البناء، تضاعف الارتفاع إلى 46 قدماً وجرى تركيب محطات مائية أكثر تفصيلاً. وهي تتكون من قناة تصريف ذات خمس قنوات في الطرف الشمالي، وقناة تغذية أدت إلى خزان ترسب يتدفق منه عبر قناة مرصوفة، بطول 3280 قدماً، إلى خزان توزيع يمر منه إلى 14 قناة منفصلة. بالنسبة لهذا السد، جرى إعادة بناء وتوسيع السدود الجنوبية، التي بنيت في الأصل للسد الثاني. ولدعم نهاية السد الأرضي، بُنيت دعامة حجرية اصطناعية، وبين هذا الجدار والوجه الصخري يدير قناة المخرج. كانت هذه هي القناة نفسها التي زودها السد الثاني، ولكن رُفعت أرضية السد حالياً بمقدار 11 قدماً وبُنيت جدران حجرية لاحتواء التدفق. تتميز السدود الجنوبية في شكلها النهائي ببناء حجري بجودة عالية جداً، والكتل المقطوعة والمنشأة بعناية باستخدام مسامير الرصاص المصبوبة في مفاصلها ولكن بدون ملاط.





الأشغال الهيدروليكية في سد مأرب. السدود المتتالية المبنية على الموقع موضحة في المخطط والمقطع العرضي. يوضح الشكل أيضاً ارتفاعات السدود.

4. السدود في بلاد الشام

• السدود في الأردن

ازدهر شعب الأنباط في جنوب الأردن وفي صحراء النقب من القرن الأول قبل الميلاد وحتى نهاية القرن الأول الميلادي، عندما اجتاحتهم جيوش الإمبراطور **تراجان** (توفي 117م) الرومانية. لقد طوروا أنظمة هيدروليكية متقنة جداً لاستخدام مياه الجريان السطحي من المطر العرضي. لهذا الغرض، قاموا ببناء العديد من السدود الصغيرة عبر الوديان من أجل تحويل المياه إلى الحقول، إما مباشرة أو من خلال صهاريج التخزين.





سد الجلات في البادية الأردنية (بلاد الشام) يرجع على الأرجح إلى بدايات العصر الإسلامي.

وفي المنطقة المحيطة بمدينة عبدة في صحراء النقب، فإن انتشار هذه المحطات المائية مذهل: نحو 17000 سد يقع في منطقة تبلغ مساحتها 50 ميلاً مربعاً. كانت السدود التي بنيت لتحويل المياه إلى قنوات هي الأكبر بشكل عام وجرى بناؤها من الحجارة. وبنيت سدود أصغر للحفاظ على المياه والظمي في الوديان نفسها. في هذه المباني، كان البناء عادةً مركباً: عبارة عن حطام ونواة أرضية يواجهان كتل البناء ذات شكل تقريبي. كان متوسط طولها نحو 150 قدماً، ومتوسط سمكها 7 أقدام وارتفاعها نحو 6 أقدام.





مدينة عبدة مدينة نبطية مدمرة في صحراء النقب الفلسطينية المحتلة تقع على قمة جبل، وقد كانت أهم مدينة على طريق البخور بعد البتراء بين القرنين 7 و 1 قبل الميلاد وسكنها الأنباط والرومان والبيزنطيين. كانت عبدة منطقة تخييم موسمية للقوافل النبطية التي كانت تسافر على طول طريق البتراء - غزة المبكر (درب السلطان) في القرن الثالث - وأخر الثاني قبل الميلاد. جرى تغيير الاسم الأصلي للمدينة إلى عبدة تكريماً للملك النبطي عبدة الأول (من 96 قبل الميلاد إلى 85 قبل الميلاد)، الذي، وفقاً للتقاليد، كان يُقدَّر كإله ودفن هناك.

• السدود في سورية (سد بحيرة حمص «بحيرة قادس»)

يقع هذا السد على نهر العاصي في منطقة (قطينة)، ويبدو أن اختيار هذا الموقع جاء نتيجة ضيق مجرى نهر العاصي نفسه، واعتراض صبةً بازلتية مرتفعة عند نقطة الاختناق الأمر الذي أسهم بتشكيل بحيرة طبيعية مساحتها 61 كم² وطولها 30 كم وعرضها 16 كم.

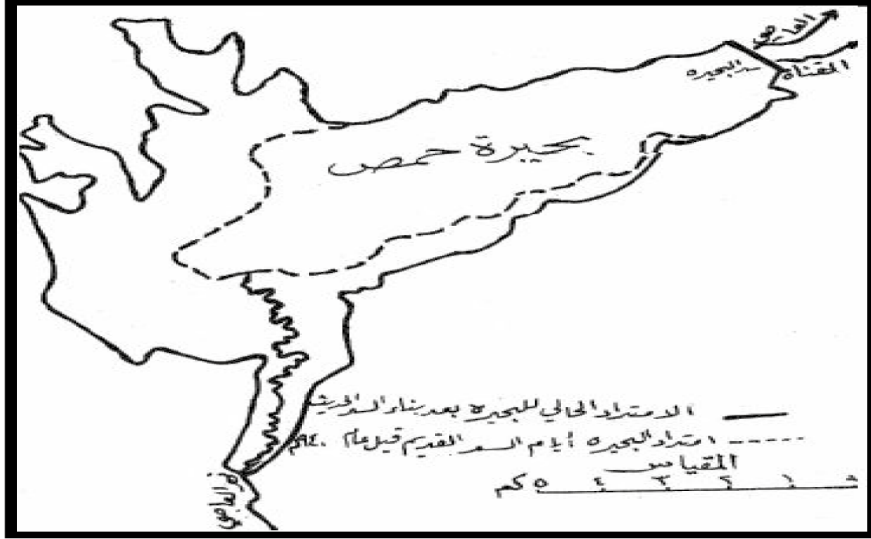




يعود تاريخ إنشاء هذا السد إلى عهدٍ قديمة غير محددة تماماً، فالمؤرخ سترابون ينسبه للفرعنة عندما قدموا إلى سورية وقاموا باحتلالها، وقد يكون القيصر الروماني ديوكليسيان هو من بناه، وربما الإسكندر المقدوني، على العموم جميع قادة الحضارات القديمة السابقة عندهم خبرة كبيرة في إنشاء السدود، كما أنّ سكان بلاد الشام أنفسهم لديهم الخبرة أيضاً نظراً لوفرة المياه، التي تحتاج لعمليات تنظيم فقط.

يصنّف سد بحيرة حمص على أنه سدّ ركامي، وهي سدود نظيرة للسدود الترابية من حيث الشكل وطريقة التنفيذ. فهو يتكوّن من نواة مبنية من كسارة حجارة البازلت المتدرجة الحجم بين (3-35 سم)، والمنتشرة بكثرة في المنطقة، يربط فيما بينها ملاطٌ أبيضٌ صلبٌ جداً، كما يغطي النواة من الخلف والأمام كتلٌ بازلتية مقطوعة على شكل أهرامات مقطوعة من الأعلى، يتراوح ارتفاعها 32.5 سم، ومساحة قاعدتها العليا 17.5 سم²، ومساحة قاعدتها السفلى 30 سم². وقد وضعت القاعدة الصّغرى لهذه الكتل على جسم السد، في حين صارت القاعدة العليا مكشوفة، ثم رُبط فيما بينها بملاطٍ أبيضٍ صلبٍ يحوي على بقايا أوان فخارية مكسورة لملء الفراغات، وقد حل الرمل مكان التراب البركاني، نظراً لعدم انتشاره في المنطقة، والذي كان يُستخدم أيام الرومان في صنع الملاط.





مسقط لموقع سد قادس على بحيرة حمص في سورية.

5. السدود عند الرومان

تعلم الرومان الكثير من الهندسة المدنية من الشعوب الأخرى. من المحتمل أنهم ورثوا القوس من الأتروسكان، وتعلموا من اليونانيين عن إمدادات المياه عن طريق القنوات، وتقنيات حفر الأنفاق واستخدام الأسمت الهيدروليكي، وفي صحراء النقب استولوا على أنظمة الري الخاصة بالأنباط وحافظوا عليها، وذلك بمساعدة المهندسين العرب النبطيين.

مفتاح نجاح الرومان الهندسي يكمن في قدرتهم على تنظيم وإدارة المشاريع واسعة النطاق، وفي نهجهم العملي في حل المشكلات الهندسية. ومع ذلك، لم يسهموا بالعديد من الأفكار الجديدة أو المفاهيم الأصيلة.

جرى بناء السدود في جميع أنحاء الإمبراطورية الرومانية. تشمل الإنشاءات الرئيسية لهم: ثلاثة في إيطاليا، وواحد في فرنسا، وخمسة في شبه الجزيرة





الأيبيرية (إسبانيا والبرتغال)، وسبعة في شمال إفريقيا، وثلاثة في آسيا الصغرى، وستة في سوريا. من المدهش إلى حد ما أنه جرى وضع ثلاثة سدود فقط في إيطاليا نفسها، وكلها بالقرب من بلدة **سويياكو**، على بُعد نحو 50 ميلاً شرق روما. جرى بناؤها جميعاً في منتصف القرن الأول من قبل مهندسي الإمبراطور **نيرون** (توفي 68م) لإنشاء بحيرات صناعية لقصره عن طريق سد نهر **آنييني Aniene** في إيطاليا. وهذا أمر غير معتاد في حد ذاته، أي بناء السدود لأسباب ترفيهية وليست نفعية. النقطة الثانية المثيرة للاهتمام هي أن السدود، التي جرى بناؤها من الحجارة، كانت كبيرة جداً. كان ارتفاع أحدها 130 قدماً على الأقل، وهو أعلى سد جرى بناؤه في أي مكان في العالم حتى ذلك العصر. لم تجر محاولة بناء أي شيء مشابه له إلا بعد 1500 عام.

كانت بلدة **غلانوم Glanum**، المستندة إلى موقع يوناني سابق في **بروفانس Provence**، مستوطنة رومانية مبكرة جداً تأسست في القرن الثاني قبل الميلاد. لا يُعرف على وجه التحديد متى جرى تزويد المدينة بإمدادات المياه، التي كانت على شكل قناة مياه تغذي من سد صغير منحني. من الممكن أن يكون هذا سداً قوسياً حقيقياً، مع أنّ السد الذي جرى بناؤه على الموقع نفسه عام 1891م هو سد جاذبية له قنطرة، لأنه يقاوم ضغط المياه بشكل أساسي بسبب وزنه.

بقدر ما يمكن التحقق منه من مصادر ما قبل عام 1891م، فقد جرى بناء السد الروماني من جدارين حجريين، يزيد سمك كل منهما قليلاً على متر واحد مع مسافة نحو متر ونصف بينهما ربما كانت مليئة في الأصل بالأرض والحجارة. كان سمكها نحو 11.5 قدم وارتفاعها 20 قدماً. تشير هذه الأبعاد، وموقع السد في ممر ضيق عميق، إلى أنه ربما كان بمثابة سد قوسي حقيقي.





إذا كان هذا هو الحال، فهو أحد الأمثلة القليلة جداً لهذا النوع الذي بُني قبل العصر الحديث.

لا يزال اثنان من السدود الرومانية في إسبانيا قيد الاستخدام حتى الوقت الحالي، حيث بُني كلاهما لتزويد مدينة ميريدا بالمياه. كان سد بروسيرينا، الذي بُني على الأرجح في الثلث الأول من القرن الثاني الميلادي، يبلغ طوله 1400 قدم وبارتفاع أقصى 40 قدماً. لقد بُني من حجارة من نواة من الخرسانة، ولكن سمك القمة في بعض الأماكن لا يتجاوز 7 - 8 أقدام، ولذلك كان من الضروري دعم وجه المصب بسد ترابي. كان المصرف يمرّ من خلال بئرين مبطنتين ببناء مدمج في هيكل السد ومتصلين بالخزان بواسطة أنفاق، يُفترض أن يجري التحكم فيهما بواسطة فتحات من نوع ما (في العصر الحاضر يجري استخدام أنابيب حديدية ذات قطر كبير مع صمامات لولبية). من قاع الآبار، تُصرّف المياه من خلال قنوات تمر عبر الضفة الأرضية.

بلغ ارتفاع سد **كومالفو 66 Comalvo 66** قدماً وطوله 656 قدماً، وتكون هيكله الداخلي من مجموعات من الجدران المتقاطعة، الطولية والعرضية، التي تقسم الداخل إلى سلسلة من صناديق البناء العميقة التي كانت إما مملوءة بالحجارة وإما بالطين، ثم غُطيت السلسلة كلها بالتراب. على جانب المنبع، جرى توفير واجهة حجرية لمنع الماء من غسل التربة بعيداً.

لقد بُنيت العديد من السدود من قبل الرومان في شمال إفريقيا، وهناك أوجه تشابه ملحوظة بين الأنظمة القائمة على السدود في شمال إفريقيا وتلك الموجودة في صحراء النقب. لم يكن هذا مفاجئاً عندما نتذكر أن الرومان استولوا على الأنظمة النبطية وحافظوا عليها. لذلك كان من الطبيعي بالنسبة





لهم أن يطبقوا التقنيات النبطية في ليبيا وتونس، حيث كان المناخ والتضاريس شبيهة بتلك الموجودة في صحراء النقب.

السدود الرومانية البارزة في المنطقة معروفة في القصرين في تونس ولبدة الكبرى في ليبيا. كان طول السد في القصرين نحو 500 قدم وارتفاع 33 قدماً، مع مقطع عرضي شبه منحرف 24 قدماً عند القاعدة و16 قدماً عند القمة. جرى بناؤه من كتل حجرية مقطوعة ومجهزة بمفاصل الملاط ونواة من الأنقاض والأرض.

توجد مجموعة سدود مهمة جداً في لبدة الكبرى في ليبيا. كان معظمها للأغراض المعتادة مثل إمدادات المياه والري، ولكن جرى بناء أحدها لحماية خزان إمداد المياه من المياه الموحلة التي اندفعت إلى أسفل بعد عاصفة ممطرة. على ارتفاع 2950 قدماً، يعد هذا أحد أطول السدود التي بناها الرومان على الإطلاق.

لا يزال سد ري الأودية في سوريا سليماً، في خربة، على بُعد نحو 45 ميلاً جنوب شرق حمص بالقرب من أنقاض قلعة تسمى قصر الحير الغربي. وهو سد مصنوع من حجارة مبنية بنواة خرسانية ويبلغ طوله 365 متراً وارتفاعه 21 متراً؛ يمكن قيادة السيارة من جانب إلى آخر. يمتلئ جانب المنبع بالطمي حتى القمة تقريباً. يقع السد الروماني المثير للإعجاب فوق نهر العاصي على بُعد ثمانية أميال جنوب غرب حمص، الذي يشكل الخزان الضخم المعروف ببحيرة حمص. جرى إصلاح السد ورفع مستواه عام 1934م، لكن الفحوصات التي أجريت قبل ذلك التاريخ حافظت على أهم تفاصيل البناء الأصلي. جرى بناؤه في عام 284 للميلاد في عهد الإمبراطور **دقلديانوس** (توفي 311م) **Diocletian** وشكل خزاناً بعرض 6 أميال وعرضه 2 ميل جرى استخدامه لكل من إمدادات المياه والري. كانت النواة مصنوعة من الكتلة المعتادة من حجارة الأنقاض،





ومربوطة مع ملاط هيدروليكي أبيض، صلب جداً وقوي، ومواجه بكتل البازلت الملبس. يبلغ طول السد نحو 2 كيلومتر ويبلغ أقصى ارتفاع له 20 قدماً، وعند هذه النقطة يبلغ عرض القمة 23 قدماً وربما تكون القاعدة 66 قدماً.

على طول الهيكل في نقاط مختلفة كانت هناك مجار مائية مصممة لتدفق المياه إلى القنوات. السدود في تركيا ليست من البناء الروماني المعتاد لأنها مبنية بجدران عمودية. على سبيل المثال، يحوي السد الواقع في أوروكايا في شمال غرب الأناضول على جدران عمودية من الحجر المغطى بالرخام. امتلأت الفجوة بينهما بأرض مدسوسة. يبلغ عرض السد الإجمالي 5 أمتار وارتفاعه 16 متراً، وكان مدعوماً من جهة المصب بدعامات.



عرف أول سد من السدود الثلاثة التي أقيمت في مدينة الثغر (دارا Dara) بأنه أقدم سد مقوس في العالم. من ناحية أخرى كان السد الواقع قرب (أيزانوي Aizanoi) في المنطقة الداخلية من إقليم بحر إيجه أعلى بناء من نوعه في العصور الكلاسيكية القديمة.





كان يعود مصدر إمداد القسطنطينية (إستانبول حالياً) بالمياه إلى زمن الإمبراطور **هادريان** (توفي 138م) **Hadrian** لكن من غير المعروف على وجه اليقين ما هي الأعمال في تلك الفترة. أربعة من السدود الثمانية التي جرى بناؤها لاحقاً لتزويد المدينة بالمياه، لا تزال قيد الاستخدام، وكلها شيّدت على نهريين صغيرين يغذيان القرن الذهبي.

أكبر هذه المنشآت هي **بويوك بينت Buyuk Bent** أو الخزان العظيم في تركيا. يبلغ إجمالي طوله 250 قدماً، ويبلغ أقصى ارتفاع له 41 قدماً، ويبلغ سمك قاعدة المقطع العرضي شبه المنحرف 33 قدماً. وهي مبنية من لب حجارة من الأنقاض تواجه كتل حجارة مربعة تقريباً. وقد جرى تزويدها حالياً بمجاري انسكاب، لكن من غير المحتمل أن تكون هذه جزءاً من المنشأة الأصلية، حيث تدفقت المياه الفائضة على الأرجح فوق قمة السد. كما توجد فتحات في وجه السد متصلة بممر داخلي ينقل المياه إلى قناة البناء المؤدية إلى القسطنطينية، على بُعد نحو تسعة أميال. ولا يُعرف كيف جرى التحكم في هذه المنافذ.

تاريخ هذا السد والسدود الثلاثة الأخرى التي كانت تخدم القسطنطينية غير معروف، لكن المؤرخ **بروكوبيوس القيسراني** (توفي بعد عام 565م) **Procopius** ترك لنا سجلاً لبناء سد في دارا في أعالي بلاد ما بين النهرين في النصف الأول من القرن السادس. فقد جرى بناء السد، الذي بُني في عهد الإمبراطور **جستينيان الأول** (توفي 565م) **Justinian I** وربما جرى تكليفه من قبله، خارج أسوار دارا للسيطرة على فيضانات النهر التي كانت تتدفق عبر المدينة. كان يحوي على فتحتين عند مستويات مختلفة، إحداهما منفذ منخفض المستوى، والأخرى من المحتمل أن تكون مفيضاً عالي المستوى. كان السد منحنياً، ويقول **بروكوبيوس** «قد يكون المنحني، من





خلال خداع التيار، قادراً على تقديم المزيد من المقاومة». لدينا إشارة واضحة هنا أن هذا السد كان قوسياً حقيقياً، وهو ثاني سدّ نتعرف عليه.

6. السدود التي بُنيت في عهد العرب والمسلمين

صارت جميع السدود الموصوفة في الأقسام السابقة تقريباً تحت سيطرة المسلمين بحلول منتصف القرن الثامن للميلاد، وبالتالي يمكن للمسلمين الاعتماد على عدد من المصادر في استلهاهم مُهمّة بناء السدود. كانت السدود الرومانية مثلاً بارزاً بشكل خاصّ بسبب الحجم الذي عملت به ولأن تأثيرها كان حديثاً نسبياً.

على عكس تصريحات بعض المؤرخين، لم يكن هناك تراجع في الأنشطة الهندسية في زمن المسلمين، بما في ذلك بناء السدود. بل على العكس من ذلك، فإن أنظمة الري الجديدة والتوسعات للأنظمة القائمة الموصوفة سابقاً تطلب منهم بناء عدد كبير من السدود.

كان العديد منها عبارة عن سدود تحويلية صغيرة، وقد بُني العديد من السدود الكبيرة في العراق، على سبيل المثال، بما في ذلك ثلاثة سدود على نهر دجلة. لكن أجود السدود ذلك الموجود في حي بغداد على النهر العظيم. جرى بناء هذا السد من كتل حجرية مقطوعة بالكامل، متصلة بمسامير من الرصاص جرى صبّها في الشقوق، وهي تقنية إسلامية شائعة إلى حد ما. إذ يبلغ طول السد 575 قدماً، مع مقطع عرضي شبه منحرف، وسمكه 10 أقدام عند القمة، وسمكه 50 عند القاعدة؛ كان أقصى ارتفاع له يزيد على 50 قدماً، لكن انخفض هذا بسرعة نحو الجانبين.





بنى المسلمون عدداً من السدود في إيران، بما في ذلك إضافة واحد، وهو **بولي بولايتي Pul-i-Bulaiti**، إلى نظام تستر. كان عضد الدولة من أعظم بُناة سلالة البويهيين، الذين احتفظوا بالسلطة الحقيقية في العراق وإيران من 945م حتى 1055م. كان السد الأكثر إثارة للإعجاب هو **باندي-أمير Band-i-Amir**، الذي بني عام 960م فوق نهر كور في مقاطعة فارس بين شيراز واصطخر (**برسيبوليس القديمة**)، وقد قال المقدسي البشاري عن هذا السد: «قد سكر عضد الدولة النهر الذي بين شيراز واصطخر بحائط عظيم جعل أساسه بالرصاص فتبحر الماء خلفه وارتفع فجعل عليه من الجانبين عشرة دواليب على ما ذكرنا من خوزستان وتحت كل دولايب رحي فهو اليوم من عجائب فارس وبنى ثم مدينة وجرى الماء في قنى فأسقى ثلاثمائة قرية».

ولا يزال سد باندي-أمير قائماً، مبني من حجارة صلبة ومدعومة بمسامير من الرصاص. يبلغ ارتفاعها نحو 30 قدماً وطولها 250 قدماً.

7. السدود في الأندلس

جرى بناء العديد من السدود من قبل المسلمين في جنوب الأندلس، بشكل رئيس للري ولكن أيضاً لإمدادات المياه والطاقة المائية. كان هناك -على سبيل المثال- سلسلة من السدود في منطقة فالنسيا. أما في مورسيا، لم تكن سلسلة السدود المنخفضة، مثل تلك الموجودة في فالنسيا، حلاً عملياً لأسباب هيدرولوجية وطبوغرافية، وبالتالي جرى بناء سد واحد محدد الموقع بعناية.

كان هذا السد بطول 420 قدماً وارتفاعه 25 قدماً. يبلغ عرضه قاعدته 160 قدماً، وينخفض إلى 125 قدماً في الربع الآخر. والسبب في هذا العرض المفرط



على ما يبدو هو أن قاع النهر كان رقيقاً وضعيفاً جداً. من المفترض أن المسلمين بنوا سداً ضخماً، ربما كان محملاً على قاعدة من الركائز، لإعطاء الهيكل وزناً كافياً لمقاومة ضغط المياه ولضمان عدم قدرته على الانزلاق على طول مجرى النهر. ويبدو أن نجاح السد في مقاومة 1000 عام من الاستخدام يشير إلى أن الارتفاع الناجم عن تسرب المياه تحت الأساسات لم يكن مشكلة. هناك ميزة أخرى مثيرة للاهتمام للسد، حيث جرى بناؤه من حجارة البناء من الأنقاض والملاط المواجهة بكتل حجرية كبيرة. وحسب كلمات نورمان سميث: «جرى استخدام مساحة السطح الكبيرة للوجه الهوائي للسد بشكل جيد. سقطت المياه المتدفقة فوق القمة في البداية عمودياً من خلال ارتفاع 13-17 قدماً على منصة مستوية، بعرض 26 قدماً، تمتد على طول السد. عمل هذا على تبديد طاقة الماء المتسرب فوق القمة. ثم تدفق الفائض إلى سفح السد فوق أقسام مسطحة أو منحدره برفق من الوجه. وبهذه الطريقة، عمل السد بكامله كمجرى تصريف، علاوة على ذلك، تبذرت الطاقة المكتسبة من المياه في السقوط 25 قدماً في الطريق. وبالتالي جرى تقليل مخاطر تقويض أسس التدفق بشكل كبير. لأسباب مثل هذه، يميل المرء إلى الاعتقاد بأن المسلمين لديهم بعض الفهم، وإن كان تجريبيًا، للهيدروليكا».

إضافة لاستخدام السدود في الزراعة والري، فقد استخدمها العرب لمنع الكوارث. وقد ذكر أبو الفرج بن الجوزي (توفي 597هـ / 1201م؟) أنه في أول رمضان من سنة 569هـ / 1173م حدث فيضان كبير لنهر دجلة وقد تمكن الناس من إقامة سد وإيقاف الفيضان.





8. السدود في المغرب العربي (سد عرارا في منطقة تافيلالت «قرب ريسان»)

لقد شُيّد سدّ عرارا في القرن السابع عشر في وادي زيز ويبلغ طوله 1701 متر وعرضه 10 أمتار، واتخذ بنيانه شكلاً موشورياً مدرج الصفحة، ومزوداً بدعامات بينية للتقوية، واعتمد بناؤه رصف الحجارة وربطها بالكلس. يشكل هذا البناء الضخم أفضل إنجاز في ميدان التحكم بمياه الفيض والسيول في منطقة تافيلالت. ما زال السدّ بحالة جيدة ويستمر بأداء وظيفته في مواجهة السيول.



سد عرارا في المغرب.





9. السدود في المملكة العربية السعودية

لقد وثقت السدود المقامة في المملكة العربية السعودية قرب الأودية في مواقع ذات تضاريس متنوعة. ويغلب على معظمها أنها منشآت كبيرة من الحجر المربع أو المصقول وأن التاريخ المفترض لإنشاء العديد منها يعود إلى العصر الإسلامي. لكن يندر وجود دليل متين على تاريخ مثبت يمكن الاعتماد عليه.

لقد وفرت الحماية لواحة خيبر في منطقة المدينة المنورة من قبل الهيئة السعودية للسياحة والتراث الوطني بواسطة سياج، وما زال منتظراً إجراء أعمال استقصائية أثرية وهيدرولوجية منتظمة. وقد أرجع إنشاء السد لاحتجاز المياه الناشئة من حرة خيبر المعروف بسد البنت إلى العصر الإسلامي.

اكتشف في منطقة المدينة المنورة سدان للاستفادة من مياه الجريان السطحي في العريضة والمندسة. السد الأول مدرّج من الجانبين وطوله 225 متراً، أما عرضه عند القاع فيبلغ 9 أمتار. ويبلغ اتساع منفذه المائي الخارج 1 متر × 7 أمتار. أقيم هذا البناء الضخم بحجارة مقالع محلية وطلاي بالحص. وخلافاً لسدود أخرى يتمتع السد بحفظ جيد.

أما السد المعروف محلياً باسم سد الصهباء أو سد البنت الواقع في وادي (ذو خشب) بالمندسة فغير محفوظ جيداً بل حفظ حتى ارتفاع 28 متراً وعرضه عند القاع 7 أمتار. فقد تألف من 3 جدران متوازية مبنية من حجارة كبيرة مكسية. يرجح أنه أقيم خلال العصر الأموي كما توحي بذلك نقوش وجدت في المنطقة؛ وكان السد يحتفظ بمياه الجريانات السطحية التي قد تكون استُعملت في الزراعة.





خَيْبَر: سد البنْت.



منطقة المدينة المنورة: سد في العَرِيضَة.



منطقة المدينة المنورة: سد في المَنْدَسَة.

خَيْبَر: سد البنْت، منطقة المدينة المنورة سد في العَرِيضَة وسد في المَنْدَسَة.





كما وثّق وجود عدد من منشآت السدود الكبيرة ضمن مجمّع واحد في وادي النقيمي قُرب المدينة المنورة. وقد بلغت الأبعاد الأصلية لسد مهدم جزئياً 43 متراً طولاً و 17 متراً ارتفاعاً و 12,7 متر عرضاً عند القاع، فيما لسد آخر سمك مشابه وطول يبلغ 56 متراً. كان الهدف من السدين ريّ منطقة خيف البصل المجاورة. استخدمت في الواجهة المدرجة التي كانت مغطاة حجارة محلية كبيرة مصقولة. ويظهر نقش سليم كلياً على السد تاريخ إنشائه وهو عهد الخليفة معاوية بن أبي سفيان مما يفسر تسميته باسمه.

كما تبين من خلال مسح المدينة في وادي العقيق وجود سدود في موقع العريضة ومنشآت مائية أخرى. وفي حالة السدود الثلاثة عشر في منطقة الطائف التي استقصتها دائرة الآثار والمتاحف السعودية اقترح العصر الأموي تاريخاً لها وذلك استناداً إلى نقش يحمل اسم الخليفة الأموي الأول معاوية بن أبي سفيان. لوحظ وجود تقنيتي بناء رئيسيتين الأولى باستخدام القصارا والطلاء بالجص والثانية البناء الجاف بدون قصارا واستخدام بوابات التحكم.

بُني أكبر سدود وادي عرضة وهو سد الدرويش بجدار مزدوج الوجه مملوء بالركام (ركام كبير في أسفله وصغير في أعلاه) والرمل. يبلغ ارتفاعه عن أسفل المجرى المائي نحو 9.8 أمتار فيما كان طوله الأصلي 150 متراً؛ وقسمه الأوسط مُدمر بشكل كبير (50 متراً بقيت سليمة). أما عرضه من القاع فهو 11 متراً ويضيق وصولاً إلى مترين عند القمة. بُني الجانب المواجه لأعلى المجرى المائي من صخور صغيرة مصقولة. عند منتصف الارتفاع يضيق السد بدرجتين. يتألف الوجه المدرج المواجه لأسفل المجرى المائي من 6 درجات المسافة بينها 1.1 – 5.7 متر، وهو مبني من صخور كبيرة مصقولة وناعمة مرصوفة طولياً. لم تستخدم القصارا أو الطلاء





فيه. قد يكون الجدار العلوي أضعف لاحقاً، وتشتمل بقايا نقشٍ عربيٍّ على الجانب المواجه لأسفل المجرى المائي على ذكر كلمة سد مرتين.

يتألف السد مزدوج الوجه في وادي داما والمقام لغايات تجميع مياه الجريان السطحي من عدة وحدات. أنشئ أصلاً بارتفاع 10,3 متر فوق أسفل المجرى المائي؛ وكان طول القسم الأوسط المنهار (75 متراً) بينما طول الأقسام الثلاثة الإضافية وأحدها جدار تحويل والآخران ربما لتفويض المياه 9.5 متر. كان الجزء الرئيسي من السد جداراً مزدوج الوجه ملئاً بالركام. للجانب المواجه لأعلى المجرى المائي من الجدار حجارة مصقولة ناعمة (صخور ناعمة)؛ ولم تستخدم قصارة أو طلاء فيه. أما الجانب المواجه لأسفل المجرى المائي فمبني من صخور كبيرة مرصوفة طولياً وله 5 درجات (0.2-1.5 متر). في أعلى السد ثمة جدار مدعم من الحجارة الصغيرة مقصور ومطلي. وتحوي صخرة كبيرة قرب الناحية الشمالية الغربية على نقش بالخط الكوفي.

أعلى مجرى وادي نجران هو موقع سد للري الدوري بأسلوب السيل كان يُعرف بسد الجلال أعيد اكتشافه في سنة 1980م، وسمي سد المضيق. بقي من هذا السد قنوات تخترق صخور الغرانيت ربما تكون موجهة نحو الحقول التي كانت واقعة شرق السد القديم. في الطرف الجنوبي لموقع الأخدود اكتُشف نظام سد صغير لتحويل مياه السيل كان يُغذى من الوهدة الطبيعية لجبل السوداء. بقي من هذا السد حوض وجدارا انحراف أحدهما مبني من كتل كبيرة مكسية جزئياً. أعيد مؤخراً البحث في هذا الموقع المعروف أيضاً بالأخدود الجنوبي. واكتُشفت في مواضع متعددة آباراً محفورة في الصخر وصفت بأنها من النوع السائد في جنوب شبه الجزيرة العربية.





عرف موقع بئر حما في شمال شرق نجران الذي يمثل محطة استراحة في الطريق الصحراوي بنقوشه وآباره التي وفّرت وصولاً يسيراً للمياه الجوفية. في الخُشبية شمال هذه البئر وقرب جبل كوكب تبين مثال على نقطة مروية بفضن صخري ونقوش. على بُعد أكثر من 230 كم شمال نجران يحوي موقع وادي آبار مريغان على بقايا بئر.



سد قرب الطائف: سد الدرويش.



سدود قرب الطائف: القسم الشمالي من سد داما.

سد الدرويش قُرب الطائف (في الأعلى)، والقسم الشمالي من سد داما (في الأسفل).





تقع تيماء في منطقة تبوك على بُعد 150 كم شمال غرب العلا. وقد عثر فيها على بعض السدود. فقد أنشأ معاوية بن أبي سفيان سد الخنق بالمدينة في المملكة العربية السعودية، ويتميز بضخامة بنائه ودقة هندسته وارتفاعه الشاهق.

وتقع ضربة إلى الغرب من مدينة الرس على مسافة 160 كم منها. ويحوي الموقع الأثري في هذه المدينة على بقايا مدينة ضربة المندثرة التي تظهر بعض منشآتها المعمارية وعدد من الآبار وسد يقع في منتصف وادي ضربة.

كذلك اهتم الخليفة معاوية بإنشاء السدود في كل من المدينة وخيبر والطائف؛ ففي المدينة كشف عن سد يسمى سد الخنق يحمل نصاً تأسيسياً يؤرخ البناء لسنة ست وخمسين للهجرة، ويشير إلى أن معاوية بن أبي سفيان هو باني هذا السد، ويتميز السد بضخامة بنائه ودقة هندسته وارتفاعه الشاهق. ومع أن أجزاء كبيرة من السد متهدمة، إلا أن الأجزاء المتبقية تعكس طبيعة البناء ودقته.

وعلى بُعد 30 كم جنوب خيبر يوجد سد البنت الذي يعد أكبر سدود خيبر، يبلغ طول السد نحو 300 م، ويصل ارتفاعه أكثر من 30 م، وسمك جداره عند القاعدة 10 م، ومع أن السد لا يحمل نقشاً تأسيسياً، إلا أن طبيعة بنائه ودقة هندسته - التي تماثل إلى حد كبير سد الخنق بالمدينة - تشير إلى أن هذا السد بني في عهد معاوية بن أبي سفيان.

أما سد سيسد في الطائف، الذي شيده معاوية بن أبي سفيان، كما يشير إلى ذلك النقش التأسيسي الذي كتب على إحدى أحجار السد، فإنه سد





صغير الحجم؛ إذ يبلغ طوله 8,5م وارتفاعه 8م، وسمك جداره 4م، إلا أن أهميته تتبع من ارتباطه بالخليفة معاوية بن أبي سفيان؛ حيث تذكر المصادر أنه كان يمتلك أراضي زراعية في منطقة الطائف.

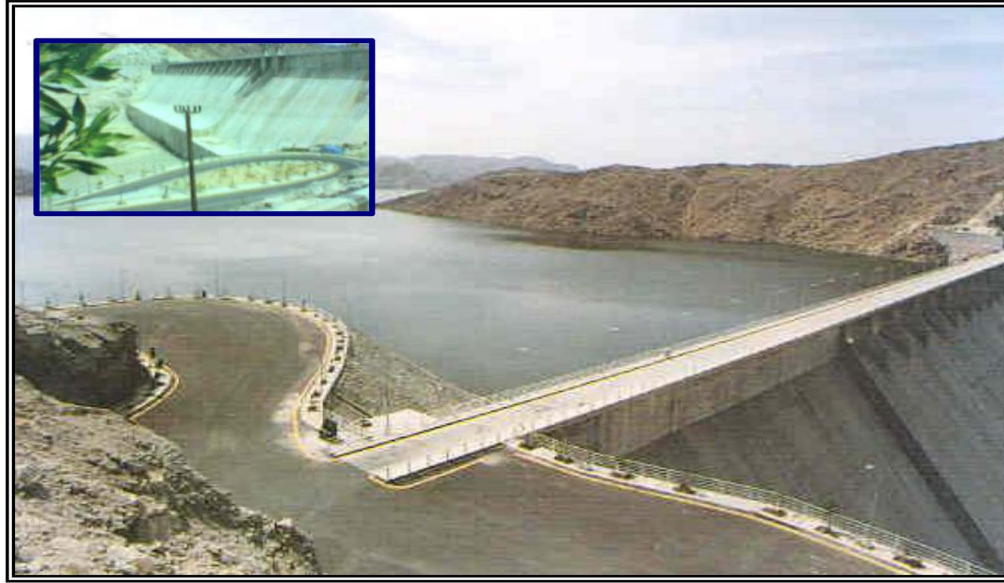
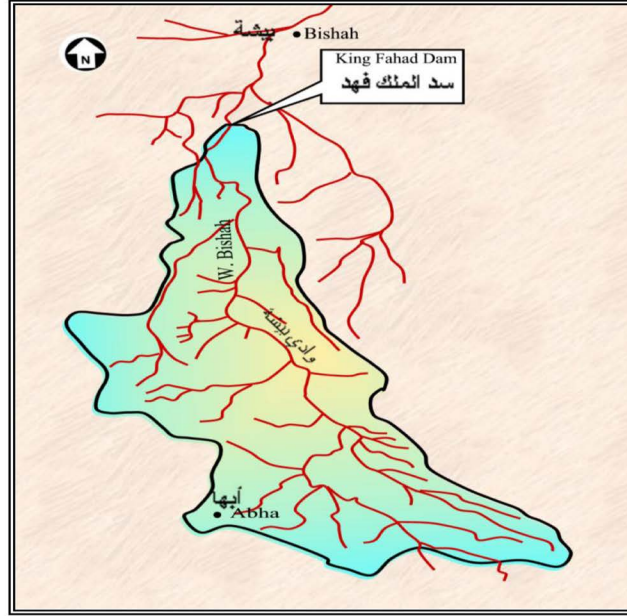
وفي عام 73هـ، شيد الحجاج بن يوسف الثقفي ثلاثة سدود في شمال المعيصم في مكة المكرمة تهدف إلى حماية مكة من السيول الجارفة وزيادة الرقعة الزراعية في محيط مكة.

ومن السدود الحديثة في المملكة العربية السعودية نذكر:

1. سد الملك فهد بن عبد العزيز

ويطلق عليه أيضاً اسم (سد وادي بيشة)، وهو سد جاذبية يقع على وادي بيشة على بُعد نحو 35 كم جنوب بيشة في منطقة عسير جنوب غرب المملكة العربية السعودية. السد له أغراض عديدة تشمل السيطرة على الفيضانات وإمدادات المياه البلدية والري وإعادة تغذية المياه الجوفية. جرى بناء محطة معالجة المياه بالتزامن مع السد ويمكن أن توفر ما يصل إلى 40000 متر مكعب من المياه لمدينة بيشة يومياً.





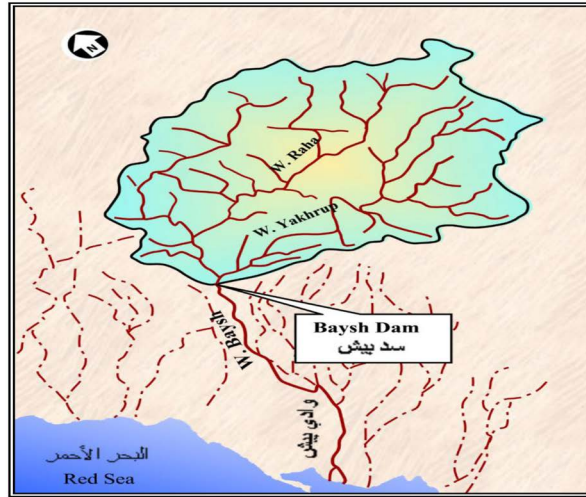
يعمل سد الملك فهد على توفير مياه الشرب وازدهار وتنمية الزراعة بالمنطقة وما حولها نتيجة المردود الإيجابي من تغذية الطبقة الجوفية وزيادة المخزون المائي وتعويض المسحوب منها لا سيما أن المنطقة تتميز بتكوينها الرسوبي الحاملة للمياه قليلة العمق، ويعمل في الوقت نفسه على درء أخطار الفيضانات التي تهدد مدينة بيشة والبلدات والقرى والمناطق الزراعية على امتداد هذا الوادي.





2. سد بيش

يقع سد بيش هو سد جاذبية على وادي بيش على بُعد نحو 35 كم شمال شرق بيش في منطقة جيزان جنوب غرب المملكة العربية السعودية. للسد أغراض عديدة منها السيطرة على الفيضانات والري وتغذية المياه الجوفية. تم إنشاء السد بين عامي 2003 و2009، وهو أطول سد في المملكة العربية السعودية. جرى بناؤه من قبل شركة Yüksel İnşaat A.Ş.



سد وادي بيش هو سد خرساني جاذبية يبلغ عرض قاعدته 79.5 متر عند مستوى الأساس. يبلغ ارتفاع السد 106 أمتار عن مستوى الأساس و74 متراً من قاع الوادي. يبلغ طول السد في الأعلى 340 متراً، وتطلب البناء نحو 675 ألف متراً مكعباً من الخرسانة.





3. سد نجران

سد وادي نجران هو سد قوسي يقع على وادي نجران على بُعد نحو 15 كم جنوب غرب نجران، في منطقة نجران جنوب غرب المملكة العربية السعودية. وله أغراض عديدة تشمل إمدادات المياه، والتحكم في الفيضانات، وإعادة تغذية المياه الجوفية. يجمع الجريان السطحي والرواسب في الوادي ويساعد على إطلاقه ببطء على مدار العام.



جرى الانتهاء من بناء سد وادي نجران عام 1981، وافتتحه ولي عهد المملكة العربية السعودية نايف بن عبد العزيز آل سعود عام 1982.





10. السدود في أوروبا

بحلول منتصف القرن الثالث عشر، استعاد المسيحيون الأندلس بكاملها باستثناء مقاطعة غرناطة في الجنوب. كان على المسلمين البقاء في غرناطة لمدة 250 عاماً أخرى، ولكن كانت هناك أيضاً مجتمعات مسلمة في أجزاء كثيرة من الأندلس المسيحية. في بعض المجالات، بما في ذلك الزراعة والتكنولوجيا، بقي التأثير الإسلامي قوياً، وبالتالي ليس من المستغرب أن نجد أن السدود الأولى التي بناها المسيحيون لم تخرج أبداً عن نظيرتها الإسلامية.

كان هناك ابتكار واحد مهم -أو بالأحرى إعادة تقليد للنظام الروماني لبناء السدود لتشكيل خزانات دائمة- تبعه الإسبان في القرن الثالث عشر وما بعده. ومن أبرز السدود التي جرى بناؤها لهذا الغرض سد الموناسيد دي كوبا، على بُعد نحو 25 ميلاً جنوب شرق سرقسطة، وسد المنسا على بُعد ثلاثة أميال إلى الغرب من المدينة التي تحمل هذا الاسم، وقد جرى بناء الأول في النصف الأول من القرن الثالث عشر وهو ضخيم، طوله 340 قدماً، وارتفاعه نحو 100 قدم. تتكون النواة من الأنقاض الخشنة المبنية من خليط من الحجارة والأرض وملاط الجير. يتكوّن الوجه الهوائي من كتلٍ حجريةٍ مقطوعةٍ بعنايةٍ ومرتبّةٍ في درجاتٍ شديدة الانحدار. سد المنسا -الذي ربما جرى بناؤه في وقتٍ مبكّرٍ من القرن الرابع عشر- مشابه للبناء ولكنه أصغر. هذه السدود جديرة بالملاحظة لكونها مقوّسة، مع أنها ثقيلة بما يكفي لتكون بمثابة سدود جاذبية.

في عام 1179م بدأ العمل في قناة ري في شمال إيطاليا من نقطة على نهر تيسينو بالقرب من أوليغيو إلى ميلانو. جرى تغذية القناة، المعروفة باسم





نافيغليو غراند Naviglio Grande، من السد نفسه تقريباً منذ ما يقرب من 800 عام. كان من الضروري إجراء عددٍ من عمليات إعادة البناء على مر القرون، وبالتالي لا يمكن معرفة شكل السد الأصلي. تبلغ أبعاده الحالية 920 قدماً وطوله نحو 6 أقدام ويتفاوت في سمكه من 60 قدماً إلى 30 قدماً؛ قد تكون أبعاد القرون الوسطى مشابهة له.

جرى بناء سد آخر في منطقة ميلانو في القرن الثالث عشر وخمسة أخرى في القرن الرابع عشر. بصرف النظر عن هذه السدود، فإن أقدم سد في إيطاليا، بُني نحو 1450م، يقف فوق نهر سافيو بالقرب من تشيزينا. لا يزال السد في الخدمة، ومع إجراء بعض التعديلات، يمكن استنتاج ملامح السد كما كانت في القرن الخامس عشر. كان ارتفاع وجهه المائي العمودي نحو 19 قدماً وعرض القمة بضعة أقدام. أسفل القمة، انحدر وجهه الهوائي لأسفل بطول يزيد على 40 قدماً، ثم انخفض بنحو 5 أقدام إلى مستوى الأساسات. ويبلغ طول السد 70.2 متر وسمك قاعدته نحو 45 قدماً، وهو مبني من الآجر والخشب. مع أن هذه المواد ليست مثالية لسد نهر بدون مجاري صرف مناسبة، إلا أنه من الواضح أن السد كان ناجحاً.

بحلول القرن الثاني عشر على أبعد تقدير، جرى بناء سدود كبيرة في شمال أوروبا لزيادة الطاقة التي توصل إلى طواحين المياه. كان أحد هذه المشاريع في منطقة تولوز، حيث جرى بناء ثلاثة سدود على نهر جارون؛ قامت معاً بتزويد 43 مصنعاً بالطاقة. أحدها، **سد بازاكل Bazacle**، الذي ورد ذكره لأول مرة في وثيقة تعود لعام 1177م، يبلغ طوله 1300 قدم، وجرى بناؤه قطعياً عبر النهر.





ومثل السدود الأخرى، بُني عن طريق رصف بآلاف أكوام البلوط بطول ستة أمتار في قاع النهر. وهكذا تشكّلت سلسلة من الحواجز المتوازية، وامتلات الفراغات بينهما بالتراب والخشب والحصى والصخور، وجرى بناء حواجز الأمواج أمام السد لحمايته من الحطام العائم.

لقد تشكّلت أقدم السدود في العصور الوسطى ببساطة من كتل من طين الصخور التي دُمجت عن طريق الدوس بواسطة الثيران أو الخيول. عادة ما يُجرّد الأساس بعناية من الغطاء النباتي، وأمام السد كان هناك بشكل عام امتداد للشاطئ الأمامي. كانت بعض السدود، ومعظمها في زيلاند، تحوي على نواة أرضية مغطاة بالطين على المنحدرات؛ كان بعضها على المنحدرات، وكان المنحدر العلوي مغطى بالطين وزُرع بالعشب. يحتاج المنحدر المواجه للبحر إلى حماية خاصة.

جرى توفير ذلك في القرن الرابع عشر عن طريق حزم الأعشاب البحرية المتراكمة بخطوات متدرجة مقابل الواجهة الرأسية للسد حتى قمته وفوقها. جرى ضغط الأعشاب البحرية حسب وزنها، وتطوّرت الحرارة حتى تعفنت تدريجياً وشكّلتها بصورة كتلة صلبة. في زيلاند وأماكن أخرى حيث لا تتوفر الأعشاب البحرية جرى استخدام القصب. كان لسد القصب واجهة من القصب مكّدة بجذور باتجاه البحر، وقد جرى تحديد قوة هذه الطبقة الواقية بطول القصب.

لم يكن هناك ضغط وكانت طبقة القصب عرضة للتعفن؛ كان لا بد من تجديده كل خمس سنوات أو نحو ذلك. خلال القرن الخامس عشر، جرى





إدخال أشكال أكثر ديمومة لحماية السد، مثل الأساسات. في عام 1440م جرت حماية السد الممتد من أمستردام إلى مويدين؛ وسرعان ما تبعه آخرون، كما جرى استخدام الأكوام كحواجز للأمواج.

كان طول الركائز بشكل عام 7-10 أمتار وقطرها 30 سم. جرى ربطها معاً بواسطة عوارض مزدوجة ومسامير حديدية. في نهاية القرن الخامس عشر، بدأ استخدام شكل جديد من أشكال حماية السدود. دُفِعَ صَفَانٌ مِنَ الْأَكْوَامِ الْقَصِيرَةِ، عَلَى بُعْدِ بضعَةِ أَقْدَامٍ، وَجَرِيَ مَلْءُ الْفَرَاغِ بَيْنَ الصَّفُوفِ بِحِزْمٍ مِنَ الْحِجَارَةِ الْمَثْبُتَةِ بِالْحِجَارَةِ. كَانَ هَذَا هُوَ سَلْفُ الْعَمَلِ الرَّائِعِ الْوَالْحَاقِقِ فِي تَطَوُّرِ السَّدُودِ.





المراجع

Allaby, Michael, (2003), **Floods**, Revised Edition, Facts On File, Inc., New York.

B. Arlin , Super, & Jon G. Medina & Jack T. McPartland (1991), **Design of physical cloud seeding experiments for the Arizona atmospheric modification research program**, Bureau of Reclamation, Denver Office, Denver.

Dam Safety Interest Group, (2013), **HDR Engineering**, Inc.

Dvořák, J., & L. Novák, (1994), **Soil Conservation and Silviculture**, 1st Edition, Elsevier Science, Amsterdam.

K. Wali, Mohan & Fatih Evrendilek, M. Siobhan Fennessy, (2010), **The Environment: science, issues, and solutions**, CRC Press is an imprint of Taylor & Francis.

Rao, Shivaji, (2018), **Cloud Seeding for India (An effective weapon to fight drought)**, Centre for Environmental Studies, Gitam University.

Risch, Dan & Don A. Griffith, (1986), **Operations Report on a Cloud Seeding Program for The Edwards Underground Water District**. NAWC Report WM-86-6, Utah.

<https://www.al-aqidah.com/OLD/?aid=show&uid=uwcum201>







أ.د. عبد الله بن محمد العمري

www.alamrigeo.com E.mail : alamri.geo@gmail.com Cell : +966505481215

المناصب الإدارية والفنية

- ❖ دكتوراه في الجيوفيزياء عام 1990 م من جامعة مينيسوتا - أمريكا.
- ❖ المشرف على مركز الدراسات الزلزالية- جامعة الملك سعود.
- ❖ المشرف على كرسي استكشاف الموارد المائية في الربع الخالي.
- ❖ المشرف على مركز الطاقة الحرارية الأرضية بجامعة الملك سعود.
- ❖ رئيس الجمعية السعودية لعلوم الأرض.
- ❖ رئيس قسم الجيولوجيا والجيوفيزياء - جامعة الملك سعود.
- ❖ مؤسس ورئيس تحرير المجلة العربية للعلوم الجيولوجية AJGS.
- ❖ رئيس فريق برنامج زمالة عالم مع جامعة أوريغون الحكومية ومعهد ماكس بلانك الألماني.

الاستشارات والعضويات

- مستشار مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية.
- مستشار هيئة المساحة الجيولوجية وهيئة المساحة العسكرية والدفاع المدني.
- مستشار مدينة الملك عبدالله للطاقة الذرية والمتجددة.
- مستشار هيئة الرقابة النووية والإشعاعية.
- باحث رئيس في عدة مشاريع بحثية مدعمة من مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية وشركة أرامكو.
- باحث رئيس في مشاريع مدعمة من وزارة الطاقة الأمريكية وجامعة كاليفورنيا ومعهد ليفرمور الأمريكي LLNL.
- عضو الجمعية الأمريكية للزلازل.
- عضو الاتحاد الأمريكي للجيوفيزياء.
- عضو الاتحاد الأوروبي للجيولوجيين.
- عضو لجنة كود البناء السعودي وعضو المنتدى الخليجي للزلازل GSF.
- عضو لجنة تخفيف مخاطر الزلازل في دول شرق البحر الأبيض المتوسط RELEMR.
- باحث رئيسي ومشارك في مشاريع بحثية مع جامعات الاباما وبنسلفانيا وأوريغون الأمريكية.
- ضمن قائمة (المنجزون البارزون العرب) من قبل منظمة ريفاسيمنتو الدولية.
- ضمن قائمة Who's Who في قارة آسيا للتميز العلمي.
- ضمن قائمة Who's Who في العالم للإسهامات العلمية.

النشر العلمي والتأليف

- ❖ نشر أكثر من 200 بحثاً علمياً في مجلات محكمة.
- ❖ ألف 35 كتاباً علمياً.
- ❖ أصدر موسوعة رقمية في علوم الأرض من 14 مجلداً و 107 ملفات علمية.

المشاريع البحثية

- ❖ أنجز 40 مشروعاً بحثياً محلياً و 16 مشروعاً بحثياً دولياً و 74 تقريراً فنياً.

المؤتمرات والندوات

- ❖ شارك في أكثر من 125 مؤتمراً محلياً ودولياً و 75 ندوة وورشة عمل متخصصة.

التعاون الدولي

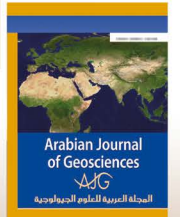
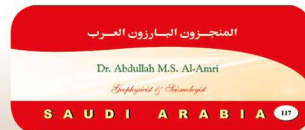
- ❖ باحث رئيسي في 13 مجموعة عمل أمريكية وألمانية.

الجوائز

- ❖ حصل على جائزة المراعي للإبداع العلمي عام 2005 م.
- ❖ حصل على جائزة التميز الذهبي من مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية عام 2006 م.
- ❖ حصل على جائزة أبها التقديرية للإسهامات العلمية عام 2007 م.
- ❖ حصل على جائزة جامعة الملك سعود للتميز العلمي عام 2013 م.
- ❖ حصل على جائزة الاتحاد الأمريكي للجيوفيزياء للتعاون الدولي والنشاط البحثي عام 2013 م.
- ❖ حصل على جائزة جامعة السلطان قابوس للإسهامات العلمية عام 2013 م.
- ❖ حصل على جائزة الملك سعود لإدراج المجلة العربية للعلوم الجيولوجية في قائمة ISI.
- ❖ حصل على جائزة أفضل رئيس تحرير مجلة علمية عام 2017 من الناشر الألماني SPRINGER.
- ❖ حصل على جائزة ألبرت نيلسون ماركيز للإنجاز مدى الحياة عام 2018 من منظمة Who's Who العالمية.

درع التكريم

- ❖ حصل على 85 درعاً تكريمياً وشهادات تقدير من المملكة وعمان والكويت والإمارات والأردن ومصر وتونس والجزائر وألمانيا وأمريكا.





موسوعة أمري في علوم الأرض



Al-Amri's Encyclopedia of Earth Sciences



المد
والجزر



المعادن
والتعدين



التركيب
الداخلي للأرض



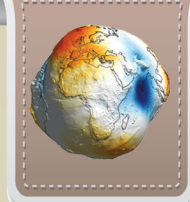
الجاذبية
الأرضية وتطبيقاتها



شكل
الأرض وحركاتها



تقدير
عمر الأرض



الأغلفة
المحيطة بالأرض



جيولوجية
القمر



البراكين
وسبل مجابقتها



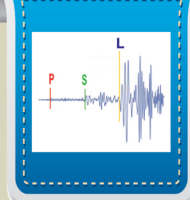
تقييم
مخاطر الزلازل



الزلازل
والتفجيرات



موجات
التسونامي



التصحّر
والجفاف



الأمطار
السيول والسدود



الانزلاقات
والانهيارات والفيضانات



التشجير
التحديات والحلول



التغيرات المناخية
والاحتباس الحراري



المشاكل
البيئية وحلولها



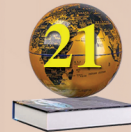
دليل كتابة
الرسائل والنشر العلمي



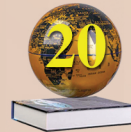
الجيولوجيا
الطبية



الجيوفيزياء
النووية



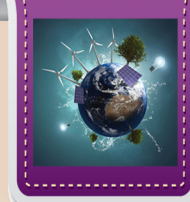
هل انتهى
عصر النفط؟



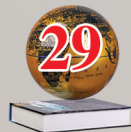
الطاقة
الحرارية الأرضية



مستقبل
الطاقة في عالمنا



300 سؤال وجواب
في الجيوفيزياء
التطبيقية



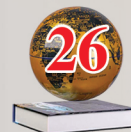
303 سؤال وجواب
في علم الزلازل
والزلزالية الهندسية



380 سؤال وجواب
في المخاطر
الجيولوجية



358 سؤال وجواب
في الثروات
الطبيعية



325 سؤال وجواب
في علم الصخور
والجيوكيمياء



321 سؤال وجواب
في تطور
الأرض



www.alamrigeo.com

