No 4A العدد4A
2026 آب Aug 2026
مجلة ساوة للدراسات الانسانية
Sawah Journal of Humanities
E-ISSN 3106 - 8324 P-ISSN 3106 - 8316
مجلة محكمة تصدر عن جامعة ساوة الاهلية

الاستمطار الصناعي كأداة تكيف مع التغير المناخي في المناطق الجافة

م.م أنمار سامي حسين الركابي
جامعة المثنى/ كلية التربية للعلوم الانسانية
anmar.sami@mu.edu.iq

المستخلص

يُعد الاستمطار الصناعي تلقيح السحب أحد أبرز صور التعديل المناخي المخطط الذي يستهدف زيادة كمية الهطول المطري أو الثلجي عبر إدخال نوى تكاثف أو نوى تجمد اصطناعية إلى السحب المؤهلة فيزيائياً لذلك، يتناول هذا البحث المفهوم العلمي للاستمطار الصناعي وأسسه الفيزيائية المرتبطة بتكون السحاب ونمو حبيبات المطر والثلج، وأبرز مواد التلقيح المستخدمة عالمياً كيوديد الفضة والثلج الجاف والأملاح الاسترطابية، فضلا عن استعراض تجارب دولية رائدة كتجربة دولة الإمارات العربية المتحدة التي سجلت زيادة سنوية بلغت نحو (٢٣%) في معدلات الهطول وتجربة اليابان التي أظهرت إمكانية زيادة الثلوج بنسبة تصل إلى (٣٠%) في الظروف المناخية الملاءمة، وتجارب الصين والهند فضلاً عن نتائج النمذجة العددية الحديثة التي تبين آليات نمو حبيبات الجليد أثناء التلقيح ويناقش البحث كذلك مدى إمكانية تطبيق هذه التقنية في المناطق الجافة وشبه الجافة، وفي مقدمتها العراق في ضوء الشروط المناخية اللازمة لنجاحها والتحديات البيئية والاقتصادية والفنية المرافقة لها وخلص البحث إلى أنّ الاستمطار الصناعي أداة تكميلية واعدة ضمن استراتيجيات التكيف مع التغير المناخي وإدارة الموارد المائية، لا بديلاً عن السياسات المائية التقليدية، وأن نجاح تطبيقه في العراق يستلزم دراسات مناخية دقيقة وبنية تحتية علمية متخصصة ورصداً راداريا مستمراً.

الكلمات المفتاحية: الاستمطار الصناعي؛ تلقيح السحب؛ المناطق الجافة؛ يوديد الفضة؛ الأمن المائي؛ التغير المناخي.

Artificial Rainmaking as an Adaptation Tool to Climate Change in Arid Regions

A.l Anmar Sami Hussein Al-Rikabi

Abstract

Artificial rainmaking (cloud seeding) is considered one of the most prominent forms of planned climate modification aimed at increasing rainfall or snowfall through the introduction of artificial condensation or freezing nuclei into physically suitable clouds. This study addresses the scientific concept of cloud seeding and its physical foundations related to cloud formation and the growth of raindrops and snow particles. It also examines the most widely used seeding materials globally, such as silver iodide, dry ice, and hygroscopic salts.In addition, the study reviews leading international experiences, including that of the United Arab Emirates, which recorded an annual increase of approximately 23% in rainfall rates, and the experience of Japan, which demonstrated the possibility of increasing snowfall by up to 30% under suitable climatic conditions. The study further discusses the experiences of China and India, as well as the results of recent numerical modeling studies that explain the mechanisms of ice particle growth during cloud seeding operations.The research also examines the potential for applying this technology in arid and semi-arid regions, particularly in Iraq, in light

of the climatic requirements necessary for its success and the accompanying environmental, economic, and technical challenges. The study concludes that cloud seeding represents a promising complementary tool within climate change adaptation strategies and water resources management, rather than a substitute for traditional water policies. Its successful implementation in Iraq requires accurate climatic studies, specialized scientific infrastructure, and continuous radar monitoring.

Keywords: Cloud Seeding; Artificial Rainmaking; Arid Regions; Silver Iodide; Water Security; Climate Change.

المقدمة

يمثل الماء أحد أهم الموارد الطبيعية المتجددة التي تقوم عليها الحياة، غير أن التوزيع الزمني والمكاني غير المنتظم لهطول الأمطار، مقروناً بتصاعد الطلب على المياه بفعل النمو السكاني والتوسع الزراعي والصناعي والتغير المناخي، جعل ندرة المياه تحدياً عالمياً متنامياً. فمن أصل (٣%) فقط من مياه الأرض العذبة، يبقى ثلثاها تقريباً محبوساً في الأنهار الجليدية أو متعذر الوصول إليه، ما جعل نحو (١.١) مليار شخص حول العالم يفتقرون إلى مصادر مياه كافية، وأصبح (٢.٧) مليار شخص آخرين يعانون شحاً مائياً موسمياً لا يقل عن شهر واحد في السنة (Jain et al., ٢٠٢٥). وتتفاقم هذه المشكلة في المناطق الجافة وشبه الجافة التي تعاني أصلاً محدودية مصادرها المائية التقليدية كالأنهار والمياه الجوفية، وتزداد حدتها مع تواتر موجات الجفاف الناجمة عن التغير المناخي.

في هذا السياق، برز الاستمطار الصناعي (Cloud seeding) بوصفه أحد أبرز أدوات التكيف مع التغير المناخي وإدارة الموارد المائية، إذ يقوم على مبدأ علمي بسيط مفاده تحفيز السحب المؤهلة مناخياً على إطلاق ما تحمله من رطوبة عبر إدخال نوى تكاثف أو تجمد اصطناعية إليها، وذلك بالاستفادة من الخصائص الفيزيائية لتكون قطرات المطر وحبيبات الثلج (Murakami ٢٠١٥ ، سالم ٢٠٢٢).

وقد بدأت الجذور العلمية لهذه التقنية عام ١٩٤٦ حين نجح العالمان فينسنت شيفر وبرنارد فونيغوت في مختبرات جنرال إلكتريك الأمريكية في تلقيح أول سحابة بالثلج الجاف واستحداث أول تساقط ثلجي اصطناعي موثق علمياً، لتتطور لاحقاً باستخدام يوديد الفضة نظراً لتشابه بنيته البلورية مع بنية الجليد (Prince et al., ٢٠٢٣؛ Sachan & Tiwari, ٢٠٢٢).

ومنذ ذلك الحين توسع استخدام هذه التقنية لتشمل اليوم أكثر من (٥٦) دولة حول العالم، من بينها دول ذات تجارب رائدة كالإمارات العربية المتحدة والصين واليابان والهند والولايات المتحدة الأمريكية (Murakami, ٢٠١٥؛ Jain et al., ٢٠٢٥؛ Al Hosari et al., ٢٠٢١).

وانطلاقاً مما تقدّم، يسعى هذا البحث إلى تسليط الضوء على الأسس العلمية للاستمطار الصناعي وآلياته المختلفة، واستعراض أبرز التجارب الدولية الناجحة، ومناقشة مدى إمكانية تطبيق هذه التقنية في البيئات الجافة، وفي مقدمتها العراق، بوصفها أداة تكميلية ضمن استراتيجية شاملة للتكيف مع التغير المناخي وتعزيز الأمن المائي.

مشكلة البحث:

١- ما مدى كفاءة تقنيات الاستمطار الصناعي؟ وهل يسهم فعلاً في تقليل آثار الجفاف؟

٢- ما العوامل المناخية اللازمة لنجاح الاستمطار الصناعي؟ هل يمكن تطبيقه في العراق؟

فرضية البحث:

١- الاستمطار الصناعي يسهم جزئياً في زيادة كميات الهطول اما فعالية الاستمطار فتعتمد على توفر شروط مناخية محددة كتوفر الرطوبة والسحب.

٢- لا يمكن الاعتماد على عملية الاستمطار الصناعي كحل مستقل بل كأداة مكملة، وإن تطبيقه في المناطق الجافة يتطلب دراسة مناخية دقيقة.

أهداف البحث:

١- تقييم فعالية الاستمطار الصناعي (تلقيح السحب) في زيادة الهطول المطري وتحليل دوره في التكيف مع التغير المناخي.

٢- دراسة تجارب دولية ناجحة (مثل الإمارات، الصين).

٣- تحديد ما إذ كان هناك إمكانية تطبيقه في البيئات الجافة (مثل العراق).

٤- تقييم التحديات البيئية والاقتصادية المرتبطة به.

منهجية البحث:

اعتمد البحث على المنهج الوصفي التحليلي لدراسة الأسس العلمية والفيزيائية لعمليات الاستمطار الصناعي، وتحليل آليات تكوين السحب وطرائق التلقيح المختلفة، فضلاً عن توظيف المنهج المقارن في دراسة التجارب الدولية الرائدة في مجال الاستمطار الصناعي، كما استند البحث إلى تحليل الدراسات المناخية والفيزيائية الحديثة المنشورة خلال المدة (٢٠١٥-٢٠٢٥)، مع الاستفادة من بيانات وتقارير المنظمات الدولية والدراسات المحكمة المتعلقة بفيزياء السحب والنمذجة العددية والرصد الراداري، واعتمد البحث كذلك على تحليل الخصائص المناخية العامة للمناطق الجافة وشبه الجافة، مع التركيز على العراق بوصفه أنموذجاً تطبيقياً، من خلال دراسة ظروف الرطوبة وتكرار السحب الشتوية وإمكانية توافر السحب المؤهلة فيزيائياً لعمليات التلقيح الصناعي، واستُعين بالخرائط المناخية والرسوم البيانية والجداول الإحصائية لتوضيح التباينات المكانية والزمانية لبرامج الاستمطار الصناعي ونتائجها في الدول المستهدفة، فضلاً عن إبراز إمكانات تطبيق هذه التقنية ضمن استراتيجيات التكيف مع التغير المناخي وإدارة الموارد المائية.

حدود منطقة البحث:

1 -الزمانية

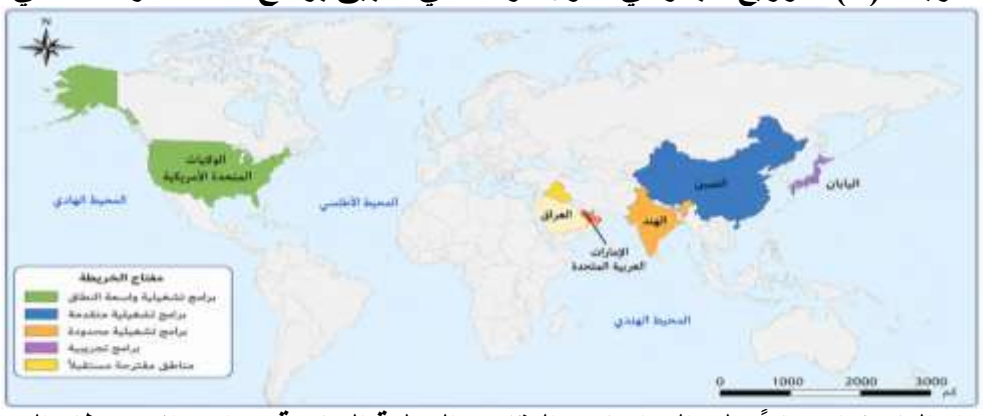
يغطي البحث المرحلة الممتدة من بدايات التأسيس العلمي للاستمطار الصناعي عام ١٩٤٦ وحتى أحدث الدراسات والتجارب التشغيلية والنمذجية المنشورة عام ٢٠٢٥، مع التركيز بصورة خاصة على الدراسات والتقييمات الإحصائية والفيزيائية الصادرة خلال العقد الممتد بين عامي (٢٠١٥-٢٠٢٥)، كونها الأكثر اعتماداً على تقنيات الرصد الراداري والنمذجة العددية المتقدمة.

٢- المكانية

يتحدد النطاق المكاني للبحث بمجموعة من التجارب الدولية المختارة التي أثبتت فاعليتها علمياً وتشغيلياً، وتشمل دولة الإمارات العربية المتحدة وجمهورية الصين الشعبية واليابان وجمهورية الهند، والولايات المتحدة الأمريكية منطقة بحيرة تاهو تحديداً، مع تركيز تحليلي خاص على إمكانية تطبيق هذه التقنية في العراق بوصفه أنموذجاً لدولة تقع ضمن النطاق المناخي الجاف وشبه الجاف، وتعاني تناقصاً متصاعداً في مواردها المائية التقليدية، خريطة(1)توضح التوزيع الجغرافي لأبرز الدول المطبقة لبرامج الاستمطار الصناعي عالمياً،ومواقع محطات الرصد والتلقيح في التجارب المستعرضة في هذا البحث.

No 4A العدد4A
2026 آب Aug 2026
مجلة ساوة للدراسات الانسانية
Sawah Journal of Humanities
E-ISSN 3106 - 8324 P-ISSN 3106 - 8316
مجلة محكمة تصدر عن
جامعة ساوة الاهلية

خريطة (١) التوزيع الجغرافي للدول الرائدة في تطبيق برامج الاستمطار الصناعي



المصدر: إعداد الباحث اعتماداً على الدراسات والتقارير الدولية الخاصة ببرامج الاستمطار الصناعي.

تُظهر خريطة (١) انتشار برامج الاستمطار الصناعي في عدد من الدول التي تعاني من مشكلات شح المياه أو التذبذب المطري، سيما في المناطق الجافة وشبه الجافة، كما يتضح تركز هذه البرامج في دول تمتلك إمكانات تقنية ومناخية ملاءمة لتطبيق عمليات التلقيح السحابي، الأمر الذي يعكس تنامي الاهتمام العالمي بهذه التقنية ضمن استراتيجيات تعزيز الأمن المائي والتكيف مع التغير المناخي.

المبحث الأول / مفهوم الاستمطار الصناعي

يُعرَّف الاستمطار الصناعي بأنّه عملية تعديل مخطط للطقس تهدف إلى تغيير كمية الهطول المطري أو نوعه الساقط من السحب، عبر تشتيت مواد كيميائية دقيقة في الهواء تعمل بمنزلة نوى تكاثف للسحب أو نوى تجمد جليدية، فتُغيّر بذلك العمليات الفيزيائية الدقيقة الحادثة داخل السحابة (Murakami, ٢٠١٥؛ سالم، ٢٠٢٢).

ويقوم المبدأ الفيزيائي لهذه التقنية على أن العاصفة الممطرة تحدث طبيعياً حينما تتجمع الرطوبة حول جسيمات عالقة في الهواء كالغبار والرمل، فيصل الهواء إلى نقطة التشبع وتتساقط القطرات على هيئة مطر؛ أما الاستمطار الصناعي فيعمل على تسريع هذه العملية عبر إضافة مزيد من النوى الاصطناعية التي تتكاثف حولها قطرات الماء أو تتجمد عليها بلورات الجليد (سالم ٢٠٢٢).

وتشير الدراسات الفيزيائية الدقيقة لتكون السحاب إلى أنّ تكاثف بخار الماء حول الأيروسولات الجوية (نوى التكاثف السحابي CCN ونوى التجمد الجليدي IN هو ما يحدد البنية المجهرية للسحابة، ويتحكم بدوره في خصائصها الإشعاعية وعمرها الزمني وكفاءتها في إنتاج الهطول (Murakami, ٢٠١٥).

فكلما ازداد عدد نوى التكاثف ازداد عدد حبيبات السحابة وصغر حجمها، في حين أن ازدياد أقطار الحبيبات إلى نحو(40) مايكرومتراً يجعلها قادرة على التقاط الحبيبات الأصغر عبر عملية التصادم والالتحام (Coalescence) لتنمو تدريجياً إلى حبيبات مطر ناضجة (سالم، ٢٠٢٢؛ Falkovich et al., ٢٠٠٤).

وتضيف الدراسات المتعلقة بفيزياء السحب الطبيعية بعداً مهماً لفهم أساس الاستمطار الصناعي؛ إذ يتباين أثر الأيروسولات الجوية في الهطول تبايناً معقداً بحسب نوعها وحجمها والنظام المناخي السائد، فقد تعمل على تعزيز الهطول أو كبحه بحسب الحالة، وتُصنَّف السحب الحملية على أساس تركيز قطيراتها عند القاعدة إلى سحب 'محيطية حين يقل هذا التركيز عن (١٠٠) قطيرة في السنتيمتر المكعب، وسحب قارية حين يبلغ التركيز نحو (١١٠٠) قطيرة في السنتيمتر المكعب؛ وتتشكل الأمطار في الأولى غالباً عبر عمليات المطر الدافئ والتصادم والالتحام ، بينما تتشكل في الحالة الثانية أساساً عبر عمليات التجمد الجليدي، وهو ما يفسر اختلاف استجابة كل نوع من السحب لمواد التلقيح المضافة اصطناعياً (Muller et al., 2010).

تكوين السحابة ومنهجية الاستمطار

تتكوّن السحب نتيجة ارتفاع بخار الماء الناتج عن ارتفاع درجة حرارة سطح الأرض، إذ يبرد الهواء الصاعد تدريجياً حتى يصل إلى نقطة التشبع، فيتكثف البخار حول جسيمات الهواء العالقة في عملية تُعرف بتكثيف النوى، منتجاً قطرات ماء دقيقة تُشكّل بمجموعها الغيوم (سالم ٢٠٢٢).

وتتطلب هذه العملية توافر رطوبة نسبية مرتفعة تتراوح عادة بين (٦٠% و ١٠٠%) ، فضلاً عن وجود عدد كافٍ من نوى التكاثف في الهواء، ويُستمطر السحاب عملياً عبر ثلاث طرائق رئيسة يُختار من بينها ما يناسب الظروف الجوية للسحابة ونوعها المستهدف، هي:

١- الاستمطار بالسحابة الاسترطابية (Hygroscopic seeding) :

الذي يعتمد على أملاح كالصوديوم والبوتاسيوم والمغنيسيوم لزيادة حجم قطرات المطر في السحب الدافئة الناتجة عن الحمل الحراري، كما هو معمول به في دولة الإمارات العربية المتحدة (سالم، ٢٠٢٢؛ Al Hosari et al., ٢٠٢١).

٢- الاستمطار بالسحابة الساكنة (Static Seeding) :

الذي يعتمد على يوديد الفضة أو الثلج الجاف لزيادة تركيز بلورات الجليد في السحب الباردة ذات القاعدة التي تتراوح درجة حرارتها بين (-١٠ و-٢٥) درجة مئوية (سالم، (2022).

٣- الاستمطار الديناميكي (Dynamic Seeding):

الذي يهدف إلى تعزيز التيارات الهوائية الصاعدة عمودياً لزيادة كمية بخار الماء المارّ عبر السحابة، وهو أكثر الطرائق تعقيداً كونه يتطلب تنفيذ سلسلة من الخطوات المتتابعة بدقة عالية (سالم، ٢٠٢٢؛ Sachan & Tiwari, ٢٠٢٢).

أنواع السحب المناسبة

تُصنف السحب من حيث درجة حرارتها إلى نوعين رئيسين تختلف باختلافهما آلية التلقيح المناسبة:

١- السحب الدافئة(Warm Clouds) : التي تقع بأكملها فوق مستوى الصفر المئوي، وتنمو فيها حبيبات المطر عبر عملية التصادم والالتحام بين القطرات السائلة، ويُستخدم لتلقيحها الأملاح الاسترطابية كملح الطعام أو محاليل كلوريد الصوديوم بتراكيز مختلفة (Murakami, ٢٠١٥؛ Prince et al., ٢٠٢٣؛ Sachan & Tiwari, ٢٠٢٢).

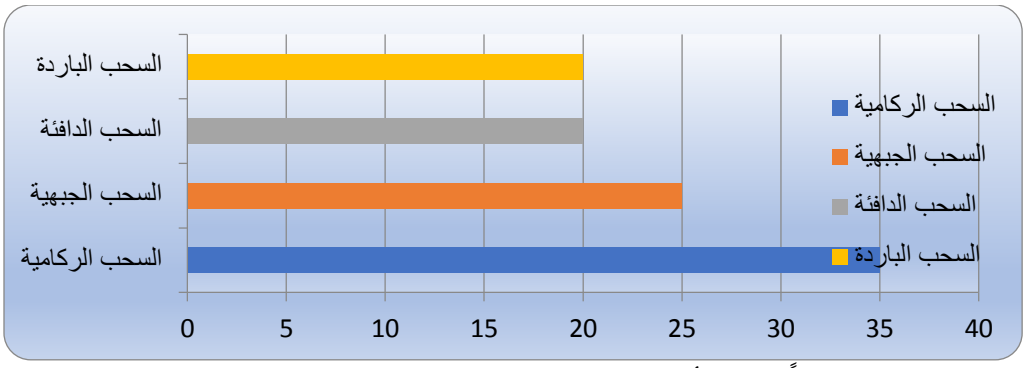
٢- والسحب الباردة(Cold Clouds) : التي يمتد جزء منها فوق مستوى التجمد، وتحتوي على مزيج من قطرات ماء فائقة التبريد وبلورات جليدية، ويُستخدم لتلقيحها يوديد الفضة أو الثلج الجاف بهدف زيادة تركيز أنوية التجمد الجليدي التي تنمو لاحقاً إلى بلورات ثلج تسقط على هيئة مطر أو ثلج بحسب درجة حرارة الطبقات الجوية السفلى (Murakami، ٢٠١٥؛ سالم، ٢٠٢٢؛ Mehdizadeh et al., ٢٠٢٤).

وتُعدّ السحب الركامية (Cumulus) والسحب الركامية الطبقية (Stratocumulus) والسحب الركامية العالية(Altocumulus) من أكثر أنواع السحب استجابة للتلقيح الصناعي، شريطة توافر محتوى كافٍ من الماء السائل فائق التبريد(Supercooled Liquid Water)وسماكة رأسية مناسبة للسحابة (Mehdizadeh et al., ٢٠٢٤).

تختلف كفاءة عمليات الاستمطار الصناعي باختلاف الخصائص الفيزيائية للسحب المستهدفة، إذ تعتمد تقنيات التلقيح السحابي على نوع السحب ومحتواها الرطوبي ودرجة حرارتها، ويبين الشكل (١) أبرز أنواع السحب الملاءمة لعمليات الاستمطار الصناعي.

شكل (١) أنواع السحب المناسبة لعمليات الاستمطار الصناعي

No 4A العدد4A
2026 آب Aug 2026
مجلة ساوة للدراسات الانسانية
Sawah Journal of Humanities
E-ISSN 3106 - 8324 P-ISSN 3106 - 8316
مجلة محكمة تصدر عن
جامعة ساوة الاهلية



المصدر: إعداد الباحث اعتماداً على الأدبيات المتعلقة بفيزياء السحب وتقنيات الاستمطار الصناعي.

يُظهر الشكل (١) التوزيع النسبي لأنواع السحب الأكثر ملاءمة لعمليات الاستمطار الصناعي، إذ تمثل السحب الركامية النسبة الأعلى نظراً لارتفاع محتواها الرطوبي وقابليتها العالية لاستجابة عمليات التلقيح السحابي، تليها السحب الجبهية، في حين تختلف كفاءة السحب الدافئة والباردة تبعاً للخصائص الحرارية وآليات التكاثف والتجمد داخل السحب.

آليات التلقيح

١- يوديد الفضة

يُعَد يوديد الفضة (AgI) أكثر مواد التلقيح استخداماً على مستوى العالم؛ إذ يمتاز ببنية بلورية شبيهةً ببنية الجليد، ما يجعله نواة تجمد فعالة عند درجات حرارة تقل عن (-٤°م) ، وينتج الغرام الواحد منه ما بين (10^{10}-10^{16}) نواة تجمد اصطناعية (Murakami, ٢٠١٥؛ Mehdizadeh et al., ٢٠٢٤؛ Sachan & Tiwari, ٢٠٢٢).

ويُبثّ يوديد الفضة إما عبر مولدات أرضية تُذيبه في الأسيتون وتحرقه لإنتاج دخان دقيق الجسيمات ينتقل بتيارات الهواء الصاعدة إلى قاعدة السحابة، أو عبر مولدات محمولة على متن الطائرات تُطلق الدخان مباشرة داخل السحابة المستهدفة، وهو الأسلوب الأكثر فاعلية لضمان وصول المادة إلى المنطقة المناسبة من السحابة (Murakami, ٢٠١٥؛ Al Hosari et al., ٢٠٢١؛ Prince et al., ٢٠٢٣).

٢- الثلج الجاف

أما الثلج الجاف (ثاني أوكسيد الكربون الصلب) فيُستخدم بطريقة التبريد الشديد (Static/Glaciogenic Seeding)، إذ يُلقى من الطائرة على هيئة كريات بحجم (٠.٥ - ١.٠) سم فوق قمة السحابة، وتنخفض درجة حرارة سطحه أثناء التسامي إلى نحو (-١٠٠°م)، فينتج الغرام الواحد منه ما يقارب (10^{13}) بلورة جليدية، ما يجعله كافياً لتلقيح حجم كبير من السحاب بكميات قليلة نسبياً (Murakami, ٢٠١٥؛ Mehdizadeh et al., ٢٠٢٤).

وتُضاف إلى ذلك الأملاح الاسترطابية (كلوريد الصوديوم وكلوريد البوتاسيوم وكلوريد الكالسيوم) المستخدمة في تلقيح السحب الدافئة، والتي تعمل على توسيع توزع أحجام حبيبات السحابة وتسريع عملية التصادم والالتحام بينها (سالم، ٢٠٢٢؛ Al Hosari et al., ٢٠٢١).

وتؤكد نماذج المحاكاة العددية الحديثة، كنموذج نمو الثلج المُغَلَّف (SGMR)، أنّ التلقيح بيوديد الفضة يرفع تركيز حبيبات الجليد ومحتواها المائي ومعدل تساقط الثلج بمعدل وسطي يتراوح بين (٦% و٣٧%) بحسب سماكة السحابة ودرجة حرارة قمتها وقاعدتها (Mehdizadeh et al., ٢٠٢٤)، في حين تظهر النماذج الحقلية المتوسطة للسحب الحارة المضطربة أنّ الإفراط في تلقيح جزء من السحابة بنوى استرطابية دقيقة قد يؤخر بدء سقوط المطر بدلاً من تسريعه ما يستدعي دقة عالية في تحديد كمية مادة التلقيح المناسبة(Falkovich et al., 2004).

تصنيف طرائق الاستمطار الاستمطار الساكن والديناميكي والاسترطابي

تُصنف طرائق الاستمطار الصناعي عموماً، بصرف النظر عن نوع السحابة المستهدفة، إلى ثلاثة أساليب رئيسة:

أ- **الاستمطار الساكن(Static) :** الذي يقوم على ببثّ مادة كيميائية كيوديد الفضة داخل السحابة لتوفير أنوية تكاثف إضافية تستغل الرطوبة المتوافرة أصلاً فيها.

ب- **والاستمطار الديناميكي(Dynamic) :** الذي يستهدف تنشيط التيارات الهوائية الصاعدة داخل السحابة لزيادة كمية الهواء المحمل بالرطوبة المار عبرها، مستخدماً كميات من الجسيمات المُلقَّحة تفوق ما يُستخدم في الأسلوب الساكن بنحو مئة ضعف، وهو أسلوب أكثر تعقيداً لاعتماده على تعاقب مراحل تشغيلية متعددة قد يؤدي فشل إحداها إلى تعطيل العملية برمتها.

ت- **الاستمطار الاسترطابي(Hygroscopic) :** الذي يبث أملاحاً استرطابية عبر مشاعل أو محركات انفجارية في الأجزاء السفلى من السحابة،وتنمو حبيبات هذه الأملاح تدريجياً بامتصاص بخار الماء المحيط بهاوإلى جانب هذا التصنيف، تُستخدم في تلقيح السحب الدافئة طريقتان تكميليتان؛**الأولى**: تقوم على رشقطيرات مائية بقطر نحو (٢٥) مليمتراً من الطائرة بمعدلات محددة فوق قاعدة السحابة لتحفيز عملية التصادم والالتحام بين القطيرات، **والثانية:** تعتمد ملح الطعام إما بصورته الصلبة أو في محلول مركز يُرش بوساطة ضواغط هوائية أو مولدات أرضية، وقد يُخلط بمادة صابونية لتفادي مشكلات تطبيقية، أو يُفجر بوساطة بالونات محملة بمسحوق البارود والملح قرب قاعدة السحابة لتوزيع الجسيمات الملحية داخلها (Sachan & Tiwari, ٢٠٢٢).

طرائق تنفيذ التلقيح

تُنفَّذ عملية الاستمطار الصناعي عبر ثلاث وسائل رئيسة :

١- **الطائرات المخصصة كطائرات Hawker و Beechcraft King Air و Cessna** : التي تحمل خراطيش الاحتراق أو حاويات الرش وتطلقها مباشرة داخل السحب المستهدفة أو أعلى قممها (Prince et al., ٢٠٢٣).

٢- **المولدات الأرضية الثابتة أو عن بعد،** التي تُستخدم غالباً لتلقيح السحب الجبلية (Orographic) في المناطق الوعرة التضاريس، معتمدة على الرياح السائدة لنقل الدخان إلى ارتفاعات السحابة المناسبة (Mehdizadeh et al., ٢٠٢٤؛ Prince et al., ٢٠٢٣)

٣- **الصواريخ**

التي تُطلق باتجاه مركز السحابة الماطرة، وتمتاز بكلفة أقل ونسبة نجاح أعلى نسبياً نحو(80%) مقارنة بأسلوب التلقيح الساكن التقليدي (نحو (٤٠%) (Prince et al.، ٢٠٢٣).

التحقق العددي من فعالية التلقيح عبر النماذج الرقمية ثلاثية الأبعاد

عزّزت دراسات النمذجة العددية الحديثة موثوقية تقييم أثر الاستمطار الصناعي كمياً ؛ فقد حاكي نموذجWRF المقترن بمخطط يوديد الفضة أربع حالات تلقيح شتوية فعلية نُفّذت فوق منطقة جبلية في ولاية أيداهو الأمريكية بأسلوبي التلقيح الأرضي والجوي، وأظهرت النتائج أنّ التلقيح الجليدي رفع معدل الهطول المداري (Orographic)بنسبة تقل عن (١%) على مستوى النطاق الكلي لحوض النهر، بينما بلغت الزيادة نحو (5%)فوق المناطق المستهدفة تحديداً، في حين وصلت القيم المحلية للتعزيز النسبي للهطول إلى نحو (٢٠%) عند نقاط محددة، وتَبيَّن أنّ معظم هذا التعزيز مصدره استنزاف بخار الماء أكثر من استهلاك الماء السائل .

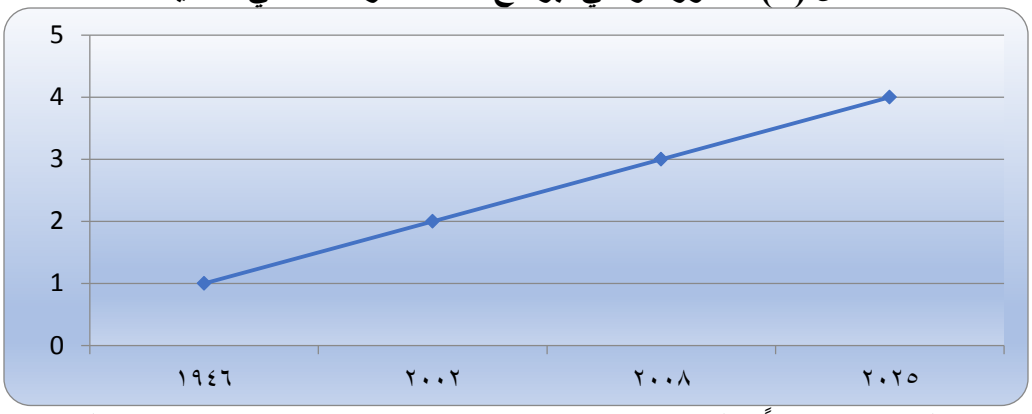
كما أكدت الدراسة نفسها أنّ التلقيح الجوي أكثر كفاءة عموماً من التلقيح الأرضي من حيث دقة استهداف المنطقة المناسبة من السحابة غير أنّ كفاءته تبقى مرهونة بالظروف الجوية السائدة قرب منطقة الهدف، وأنّ الأثر الصافي للتلقيح يتراوح بين (٠.٤) و (١.٦) ضعف القيمة الأساسية بحسب اختلاف الظروف البيئية ومعدلات التلقيح المستخدمة (Xue, L., 2013).

وتؤكد هذه النتائج أنّ الفعالية الإجمالية للاستمطار على نطاق الأحواض المائية الواسعة تبقى متواضعة نسبياً مقارنة بالقيم الموضعية المرتفعة، ما يستوجب حذراً عند تعميم نتائج التقييمات الميدانية المحلية على النطاق الإقليمي الأوسع.

المبحث الثاني: التجارب الدولية وإمكانية التطبيق في المناطق الجافة

التجارب الدولية في مجال الاستمطار الصناعي شهدت تقنيات الاستمطار الصناعي تطوراً ملحوظاً منذ منتصف القرن العشرين، إذ انتقلت من التجارب العلمية المحدودة إلى البرامج التشغيلية واسعة النطاق في عدد من دول العالم، ويبين الشكل (٢) أبرز المحطات الزمنية لتطور برامج الاستمطار الصناعي عالمياً.

شكل (٢) التطور الزمني لبرامج الاستمطار الصناعي عالمياً



المصدر: إعداد الباحث اعتماداً على (Murakami, 2015) و(WMO, 2021)والدراسات الحديثة المتعلقة بتطور برامج الاستمطار الصناعي.

تباينت نتائج التجارب الدولية لتلقيح السحب بحسب طبيعة المناخ ونوع السحب المستهدفة ومنهجية التقييم المعتمدة، ومن أبرز هذه التجارب:

أولاً: تجربة دولة الإمارات العربية المتحدة:

نفذت دولة الإمارات برنامجاً تشغيلياً لتلقيح السحب الدافئة بالأملاح الاسترطابية منذ عام ٢٠٠٢، وقد بيّن تقييم إحصائي وفيزيائي شامل قارن بيانات محطات الأمطار بين فترتي ما قبل التلقيح (١٩٨١-٢٠٠٢) وما بعده (٢٠٠٣-٢٠١٩) وجود زيادة سنوية متوسطة بلغت (٢٣%) في معدلات الهطول فوق المنطقة المستهدفة، مع نقطة تحوّل إحصائية دالة عام ٢٠١١ تزامنت مع توسع عمليات التلقيح، في حين لم تُسجل أي تغيرات دالة إحصائياً في منطقة الضبط غير المستهدفة. كما أظهر تحليل بيانات الرادار لعينة من (١٥٢) عاصفة رعدية أن العواصف الملقَّحة سجّلت زيادة في حجم الصدى بنسبة (١٥٩%) ، وفي مساحة الغطاء بنسبة (72%)، وفي عمرها الزمني بنسبة (٦٥%) خلال (١٥-٢٥ دقيقة من التلقيح (Al Hosari et al., ٢٠٢١).

ثانياً: التجربة اليابانية (JCSEPA): طوّرت اليابان، عبر مشروع البحث الشامل حول الاستمطار لمواجهة الجفاف (JCSEPA) الممتد بين عامي 2006 و ٢٠١٠ ، منهجية متكاملة جمعت بين التحليل

الإحصائي والرصد الراداري والقياس الجوي المباشر، وخلصت إلى أنّ تلقيح السحب الجبلية الثلجية بالثلج الجاف يمكن أن يحقق زيادة قصوى في التساقط الثلجي تصل إلى (٣٠%) في السحب المستوفية للشروط المناخية المناسبة، مع تسجيل تكلفة منخفضة جداً لكل متر مكعب من المياه المستحصلة مقارنة بتقنيات تحلية مياه البحر(Murakami, ٢٠١٥).

ثالثاً: تجربتا الصين والهند: تُعَدّ الصين صاحبة أكبر برنامج تشغيلي للاستمطار الصناعي عالمياً، إذ يعمل عليه أكثر من (٣٧) ألف موظف ضمن مكتب بكين لتعديل الطقس، وقد استخدمت هذه التقنية لتفريق سحب الأمطار قبيل حفل افتتاح أولمبياد بكين ٢٠٠٨ عبر إطلاق أكثر من ألف صاروخ محمَّل بيوديد الفضة، أما الهند فقد بدأت تجاربها عام1951، وأظهرت التجربة الممتدة (١١) عاماً في ولاية ماهاراشترا زيادة في معدل الهطول بلغت (٢٤%) عند مستوى دلالة (٤%)، فضلاً عن برامج تشغيلية أحدث في كل من كارناتاكا وأندرا برادش (Jain et al., ٢٠٢٥).

رابعاً: التجربة الأمريكية (منطقة بحيرة تاهو): استُخدِم نموذج نمو الثلج المُغَلَّف (SGMR) لمحاكاة خمس حالات تلقيح شتوية بيوديد الفضة عبر مولدات أرضية في منطقة جبال سييرا نيفادا ، وأظهرت النتائج ارتفاعاً وسطياً في معدل التساقط الثلجي بنسبة (٢٤%)، بلغ أعلاه (٣٧%) في السحب الأكثر برودة وسماكة، مع زيادة ملحوظة في تركيز حبيبات الجليد ومحتواها المائي عبر عمليتي الترسيب البخاري والتلبيد (Riming) (Mehdizadeh et al., ٢٠٢٤).

وبهدف إجراء مقارنة تحليلية بين التجارب الدولية المستعرضة، يعرض جدول (١) الخصائص التشغيلية ونتائج برامج الاستمطار الصناعي في بعض الدول الرائدة في هذا المجال.

جدول (١) مقارنة أبرز التجارب الدولية في الاستمطار الصناعي

الدولة	نوع الاستمطار	مواد التلقيح المستخدمة	نوع السحب المستهدفة	أبرز النتائج
الإمارات العربية المتحدة	استرطابي Hygroscopic	أملاح استرطابية (كلوريد الصوديوم والبوتاسيوم)	السحب الدافئة الركامية	زيادة متوسط الهطول السنوي بنحو ٢٣%
اليابان	Glaciogenic ساكن	الثلج الجاف	السحب الثلجية الباردة	زيادة التساقط الثلجي حتى ٣٠%
الصين	ديناميكي وساكن	يوديد الفضة	السحب الركامية والجبهية	أكبر برنامج استمطار عالمي يستخدم الصواريخ والطائرات
الهند	استرطابي وساكن	أملاح استرطابية ويوديد الفضة	السحب الموسمية	زيادة الهطول بنحو ٢٤% في بعض المناطق
الولايات المتحدة الأمريكية	ساكن	يوديد الفضة	السحب الجبلية الباردة	زيادة التساقط الثلجي بمتوسط ٢٤%
العراق (إمكانية مستقبلية)	مقترح تجريبي	يوديد الفضة والأملاح الاسترطابية	السحب الشتوية والركامية	إمكانية تحقيق زيادة تقديرية تتراوح بين ١٠-٣٠% عند توافر الظروف الملاءمة

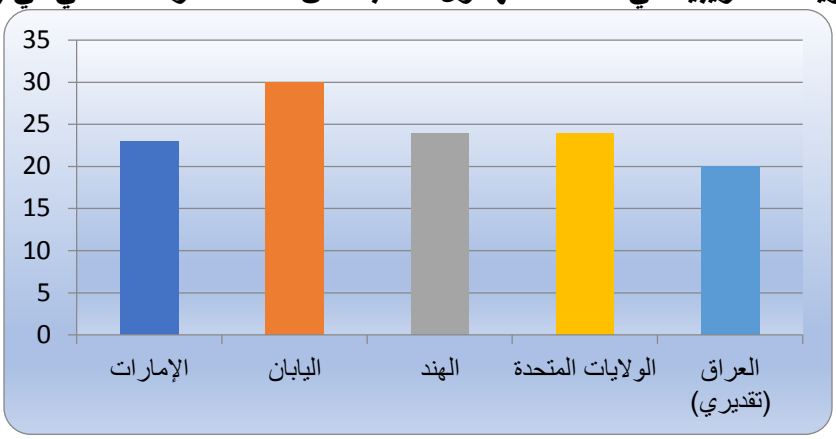
المصدر: إعداد الباحث بالاعتماد على الأدبيات والدراسات الحديثة المتعلقة بتقنيات الاستمطار الصناعي والتجارب الدولية.

يتضح من الجدول السابق أن فعالية الاستمطار الصناعي تختلف باختلاف الخصائص المناخية ونوع السحب ومواد التلقيح المستخدمة، إلا أن معظم التجارب الدولية أظهرت نتائج إيجابية نسبياً في زيادة معدلات

الهطول، الأمر الذي يعزز إمكانية الاستفادة من هذه التقنية في المناطق الجافة وشبه الجافة عند توافر الظروف المناخية الملاءمة.

ولغرض توضيح التباين في كفاءة برامج الاستمطار الصناعي بين الدول المستعرضة، يبين الشكل (٣) نسب الزيادة التقريبية في معدلات الهطول الناتجة عن عمليات الاستمطار في عدد من التجارب الدولية.

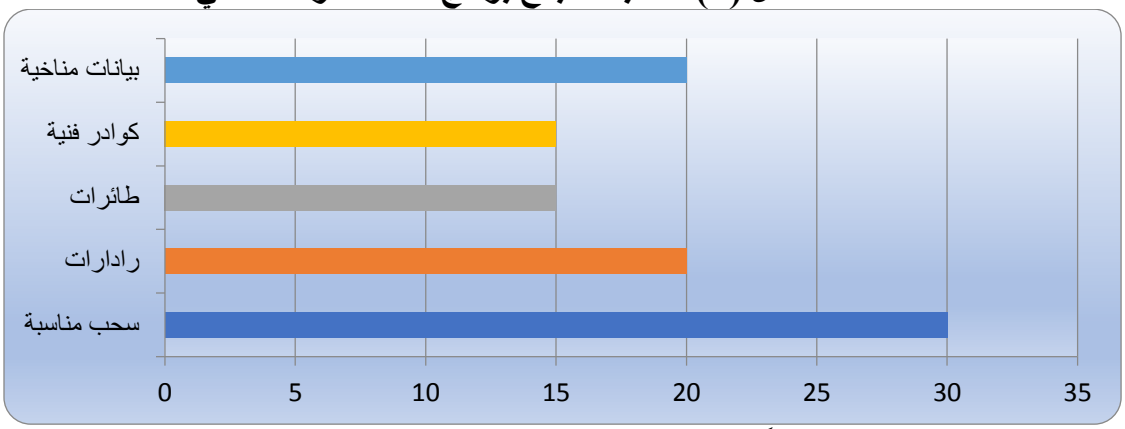
شكل (٣) نسب الزيادة التقريبية في معدلات الهطول الناتجة عن الاستمطار الصناعي في بعض دول العالم



المصدر: إعداد الباحث بالاعتماد على:(Murakami, 2015) ، و(Mehdizadeh et al., 2024)، و(Jain et al., 2025)، فضلاً عن الدراسات الواردة ضمن محور التجارب الدولية في البحث.

إمكانية تطبيق الاستمطار الصناعي في المناطق الجافة: العراق أنموذجاً يعتمد نجاح برامج الاستمطار الصناعي على توافر مجموعة من المتطلبات المناخية والتقنية والبشرية التي تسهم في رفع كفاءة عمليات التلقيح السحابي وتحقيق نتائج فعالة، ويبين الشكل (٤) أبرز متطلبات نجاح برامج الاستمطار الصناعي.

شكل (٤) متطلبات نجاح برامج الاستمطار الصناعي



المصدر: إعداد الباحث اعتماداً على الدراسات الخاصة بمتطلبات وتقنيات الاستمطار الصناعي الواردة في متن البحث.

يقع العراق ضمن النطاق المناخي الجاف وشبه الجاف الذي يتسم بتذبذب حاد في معدلات الهطول السنوية وتناقص متزايد في إيرادات نهري دجلة والفرات، ما يجعل تعزيز مصادر المياه غير التقليدية، ومنها الاستمطار الصناعي، خياراً جديراً بالدراسة ضمن استراتيجيات التكيف مع التغير المناخي (سالم، ٢٠٢٢؛ Jain et al., ٢٠٢٥).

غير أن نجاح هذه التقنية مشروط علمياً بتوافر عدد من الشروط المناخية الأساسية، أبرزها: **وجود سحب مؤهلة فيزيائياً** (ركامية أو جبهوية) ذات محتوى كافٍ من الرطوبة والماء السائل فائق التبريد، وتكرار كافٍ

لمرور هذه السحب فوق المنطقة المستهدفة خلال مواسم محددة من السنة (Murakami, ٢٠١٥؛ Mehdizadeh et al., ٢٠٢٤).

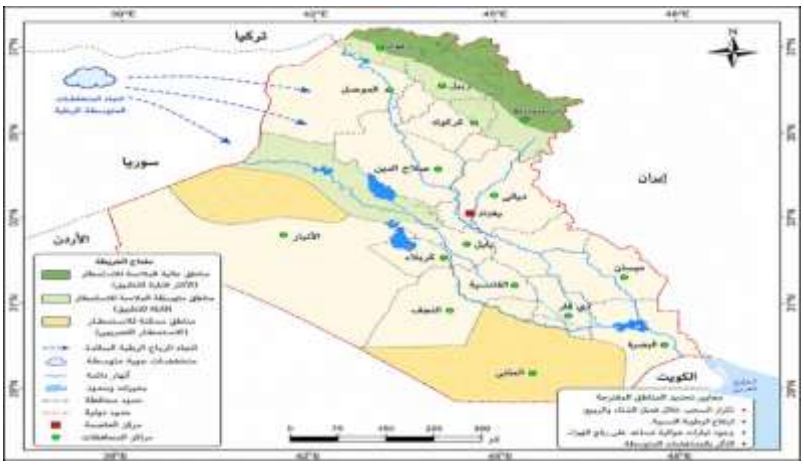
وتشير الدراسات المناخية العامة إلى أنّ فصلي الشتاء والربيع، حين تتوافر منظومات جبهوية قادمة من البحر المتوسط، قد يشكلان النافذة الزمنية الأنسب لإجراء تجارب استمطار تجريبية في العراق، على أن يُسبَق ذلك بدراسة مناخية تفصيلية تعتمد بيانات الاستشعار عن بعد والرادار الجوي لتحديد تكرار السحب المؤهلة ومناطق تمركزها جغرافياً.

كما تستلزم عملية التطبيق تأسيس بنية تحتية علمية متخصصة تشمل شبكة رادارات جوية للرصد والتتبع، ومحطات رصد أرضية كثيفة، وطائرات أو مولدات أرضية مجهزة، إضافة إلى الكوادر الفنية المدربة على تحليل البيانات الجوية وتقييم فاعلية التلقيح إحصائياً وفيزيائياً بأسلوب المنطقة المستهدفة والمنطقة الضابطة، وهو الأسلوب الأكثر اعتماداً عالمياً في تقييم برامج الاستمطار التشغيلية (Al Hosari et al., ٢٠٢١).

وفي ضوء التجارب الدولية المستعرضة، فإنّ تطبيق الاستمطار الصناعي في العراق يمكن أن يحقق نسب زيادة في الهطول تتراوح تقديرياً بين (١٠% و ٣٠%) في حال توافر الشروط المناخية الملاءمة، إلا أنّه لا ينبغي التعويل عليه بوصفه حلاً مستقلاً أو سريعاً لأزمة شح المياه، بل أداة تكميلية ضمن حزمة متكاملة من سياسات إدارة الطلب على المياه وترشيد الاستهلاك والحصاد المائي (سالم، ٢٠٢٢؛ Jain et al., ٢٠٢٥).

وتبدو المناطق الشمالية والشمالية الشرقية من العراق، سيما المرتفعات الجبلية والمناطق القريبة من الحدود الإيرانية والتركية، أكثر ملاءمة لإجراء التجارب الأولية نظراً لارتفاع معدلات الرطوبة وتكرار السحب الباردة نسبياً مقارنة بالمناطق الجنوبية الصحراوية، كما يمكن أن تمثل بعض مناطق الفرات الأوسط والبادية الغربية مواقع محتملة لتطبيق تقنيات الاستمطار الاسترطابي خلال مواسم عدم الاستقرار الجوي، شريطة توافر منظومات رصد راداري دقيقة وبيانات آنية عن خصائص السحب والرطوبة الجوية.

ولغرض توضيح المناطق العراقية الأكثر ملاءمة لتطبيق تقنيات الاستمطار الصناعي، تبين خريطة (٢) التوزيع المكاني للمناطق المتوقع ارتفاع كفاءة عمليات التلقيح السحابي فيها اعتماداً على الخصائص المناخية العامة وتكرار السحب الشتوية. **خريطة (٢) المناطق المقترحة لتطبيق الاستمطار الصناعي في العراق**



المصدر: اعداد الباحث بالاعتماد على بيانات الهيئة العامة للأنواء الجوية والرصد الزلزالي ووزارة الموارد المائية والدراسات المناخية الحديثة.

مزايا الاستمطار الصناعي وسلبياته:

تتلخص أبرز مزايا الاستمطار الصناعي في إسهامه بتوفير إغاثة نسبية للمناطق المنكوبة بالجفاف، وتحسين مقومات الاستقرار البشري والنشاط الزراعي والاقتصادي فيها، وزيادة الجريان السطحي المغذي لخزانات

توليد الطاقة الكهرومائية، فضلاً عن إمكان توظيفه للحدّ من أضرار العواصف البردية وتبديد الضباب فوق المطارات والطرق. في المقابل، تبرز على الجانب الآخر جملة من السلبيات، أبرزها اعتماد التقنية على مواد كيميائية قد تنطوي على مخاطر بيئية أو صحية لم تُحسم آثارها بعد واحتمال إحداثها اضطراباً في الأنماط المناخية الطبيعية قد يفضي إلى فيضانات موضعية أو انزياح الهطول عن مناطق أخرى، إضافة إلى ارتفاع كلفتها التشغيلية وصعوبة إثبات جدواها الاقتصادية بصورة قاطعة نظراً لتعذر عزل أثر التلقيح عن أثر العوامل المناخية الطبيعية بدقة تامة (Sachan & Tiwari, ٢٠٢٢).

النتائج

١- يستند الاستمطار الصناعي إلى مبدأ فيزيائي مدروس علمياً، قوامه تسريع العمليات الطبيعية لتكون حبيبات
المطر والثلج عبر إدخال نوى تكاثف أو تجمد اصطناعية إلى السحب المؤهلة.

٢- تختلف مادة التلقيح ومنهجيته باختلاف نوع السحابة المستهدفة؛ إذ تُستخدم الأملاح الاسترطابية في السحب
الدافئة، بينما يُستخدَم يوديد الفضة أو الثلج الجاف في السحب الباردة.

٣- أظهرت التجارب التشغيلية الدولية المستعرضة الإمارات اليابان الصين الهند نسب زيادة متفاوتة في معدلات الهطول تراوحت بين (١٠%) و (٣٠%)، بحسب نوع السحب والمنهجية المتبعة وأسلوب التقييم الإحصائي المعتمد.

٤- تدعم النماذج العددية الحديثة كنموذج SGMR والنماذج متوسطة الحقل النتائج الميدانية، وتوفر فهماً أعمق لآليات نمو حبيبات الجليد والمطر أثناء عملية التلقيح، مع التحذير من أنّ الإفراط في التلقيح قد يؤخر بدء الهطول بدلاً من تعزيزه.

٥- يظل التقييم الدقيق لفاعلية الاستمطار الصناعي تحدياً علمياً قائماً بسبب صعوبة عزل أثر التلقيح عن التقلب الطبيعي للمطر، ما يستلزم اعتماد أسلوب المنطقة المستهدفة المنطقة الضابطة ومراقبة رادارية طويلة الأمد.

٦- تبرز عوائق بيئية واقتصادية أمام التوسع في استخدام هذه التقنية، أبرزها الكلفة المرتفعة نسبياً والآثار الصحية والبيئية المحتملة ليوديد الفضة.

٧- يمتلك العراق، بوصفه دولة جافة وشبه جافة، إمكانية نظرية لتطبيق الاستمطار الصناعي، إلا أن ذلك مشروط بتوافر دراسات مناخية دقيقة تحدد مواسم ومناطق تكرار السحب المؤهلة.

٨- تبين نماذج المحاكاة العددية ثلاثية الأبعاد كنموذج WRF المقترن بمخطط يوديد الفضة أن التعزيز الإجمالي للهطول الناتج عن التلقيح يبقى محدوداً على نطاق الأحواض المائية الواسعة (أقل من ٥%)، في حين تصل قيمته الموضعية عند نقاط الاستهداف إلى نحو (٢٠%) ، وأنّ فعالية التلقيح الجوي تفوق التلقيح الأرضي من حيث دقة الاستهداف، وإن ظلت مرهونة بالظروف الجوية السائدة وقت التنفيذ.

التوصيات

١- إجراء دراسة مناخية تمهيدية شاملة تعتمد بيانات الأقمار الصناعية والرادار الجوي لتحديد مدى توافر السحب المؤهلة فيزيائياً فوق الأراضي العراقية موسمياً وجغرافياً، قبل الشروع في أي تطبيق تشغيلي.

٢- الاستفادة من الخبرات الفنية والمؤسسية للدول الرائدة في هذا المجال، وبخاصة دولة الإمارات العربية المتحدة والصين واليابان عبر برامج التعاون العلمي وبناء القدرات.

٣- تأسيس شبكة وطنية من الرادارات الجوية ومحطات الرصد الأرضي لتقييم فاعلية التلقيح فيزيائياً وإحصائياً
وفق أسلوب المنطقة المستهدفة المنطقة الضابطة.

٤- إدماج الاستمطار الصناعي ضمن استراتيجية وطنية شاملة لإدارة الموارد المائية، إلى جانب سياسات الحصاد المائي وترشيد الاستهلاك وإعادة تأهيل شبكات الري، وعدم التعويل عليه بوصفه حلاً منفرداً لأزمة شح المياه.

٥- إجراء دراسات بيئية وصحية مستقلة لتقييم الآثار المحتملة لمواد التلقيح، وبخاصة يوديد الفضة، على التربة
والمياه الجوفية وصحة الإنسان قبل التوسع في استخدامها.

٦- تشجيع البحث العلمي الأكاديمي في النمذجة العددية لعمليات التلقيح، وربطها بمراكز البحث المناخي الدولية، لتطوير قاعدة علمية عراقية متخصصة في هذا المجال.

المصادر والمراجع:

- سالم، غسان، استمطار السحب – مراجعة، مركز البيان للدراسات والتخطيط، بغداد، ٢٠٢٢ https://www.bayancenter.org
- Murakami, M., What is Rainmaking? Aerosol Research (Earozoru Kenkyu), 30(1), 5–13 ,2015. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jar/30/1/30_5/_article/-char/en?utm
- Al Hosari, T., Al Mandous, A., Wehbe, Y., Shalaby, A., Al Shamsi, N., Al Naqbi, H., Al Yazeedi, O., Al Mazroui, A., & Farrah, S., The UAE Cloud Seeding Program: A Statistical and Physical Evaluation, Atmosphere, 12(8), 1013 ,2021. https://www.mdpi.com/2073-4433/12/8/1013
- Sachan, R., & Tiwari, A., Cloud Seeding: Artificial Rain Making Process, Times of Agriculture, Issue 26, 127–128, 2022.
- Prince, Chaudhari, R., Singh, S., & Singh, D. P., Artificial Rain Making (Chapter 1), In Current Advances in Agriculture, New Delhi: AkiNik Publications ,2023.
- Xue, L., Tessendorf, S. A., Nelson, E., Rasmussen, R., Breed, D., Parkinson, S., Holbrook, P., & Blestrud, D., Implementation of a Silver Iodide Cloud-Seeding Parameterization in WRF. Part II: 3D Simulations of Actual Seeding Events and Sensitivity Tests, Journal of Applied Meteorology and Climatology, 52(6), 1458–1476 ,2013. https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.3668
- Mehdizadeh, G., Erfani, E., McDonough, F., & Hosseinpour, F., Quantifying the Influence of Cloud Seeding on Ice Particle Growth and Snowfall Through Idealized Microphysical Modeling, Atmosphere, 15(12), 1460 ,2024. https://www.mdpi.com/2073-4433/15/12/1460
- Jain, A. K., Katiyar, V., & Anjana, Cloud Seeding Technology: An Alternative Way to Get Rains, Advances in Agricultural Technology & Plant Sciences, 8(1), 180168,2025. https://www.researchgate.net/publication/389000000_Cloud_Seeding_Technology_An_Alternative_Way_to_Get_Rains