كفاءة استخدام بعض المحرّضات في عمليات زرع السحب

https://doi.org/10.37375/jlgs.v4i2.2842

د. ريم أمير فياض

وزارة الزراعة والإصلاح الزراعي- سورية/ مديرية الأراضي والمياه

rimfayad1988@gmail.com

المُلخّص:

يهدف هذا البحث إلى توضيح أهم تعديلات الطقس والتقنيات المستخدمة وكفاءتها، وفي مقدمتها زرع السحب ومواد الزرع الفعالة في إنتاج النويات، وإجراء مقارنة فيما بينها والجدوى الاقتصادية التي تحققها. تبين أنّ يوديد الفضة هي مادة الزرع الفعالة ولكنها غير كفؤة من الناحية الاقتصادية كونها ذات كلفة عالية، في حين أن الجليد الجاف مادة كفؤة وفعالة ولكن فعاليتها أقل بالمقارنة مع يوديد الفضة، كما أن هناك إمكانية لاستخدام تلك المواد في تبديد الضباب والبرد، كما تبين من خلال تحليل بيانات الزرع في سورية كأنموذج وجود علاقة بين كثافة إطلاق بيروتكنيك يوديد الفضة ومعدل الهطل المطري في أثناء فترة الزرع.

الكلمات المفتاحية: زرع السحب، يوديد الفضة، تعديل الطقس، السحب الباردة، السحب الدافئة.

Efficiency of Using Some Agents in Cloud Seeding Processes

https://doi.org/10.37375/jlgs.v4i2.2842

Dr. Reem Amir Fayad
Ministry of Agriculture and Agrarian Reform - Syria / Land and Water Directorate
rimfayad1988@gmail.com

Abstract:

This study aims to clarify the most important weather modifications and techniques used and their efficiency, the most important of which is cloud seeding and seeding materials that are effective in producing Nuclei, and to make a comparison between them and the economic feasibility they achieve. It turns out that Silver iodide has been shown to be an effective seeding material, but it is economically inefficient as it is high in cost, while dry ice is an efficient and effective material, but its effectiveness is less compared to silver iodide, and that there is a possibility of using these materials to dispel fog and hail, as was shown by analyzing the cloud seeding data in Syria as an example of a relationship between the intensity of silver iodide pyrotechnic release and the rate of rainfall during the seeding period.

Keywords: cloud seeding, silver iodide, weather modification, cold cloud, warm cloud.

المقدمة:

أراد الإنسان منذ آلاف السنين البحث عن كيفية تعديل الطقس إما لزيادة الموارد المائية أو للتخفيف من المظاهر الطقسية المتطرفة. فالحوادث الطقسية المتطرفة لا تؤدي فقط إلى كوارث كالفيضانات والأعاصير والحرائق؛ بل قد تؤدي إلى مخاطر تختلف وطأتها بحسب شدتها وطبيعة النظام المتلقي. وبما أنَّ كلّ حادثة طقسية متطرفة فريدة في مقياسها وزمنها وموقعها، لذا فإنَّ التدخُّل لتعديل الطقس للحدِّ من آثار هذه الحوادث سيكون معقداً وذي نتائج متباينة بحسب ظروف وطبيعة كلّ حادثة والحالة الاجتماعية – الاقتصادية للمنطقة التي تطالها الحادثة. يقصد بتعديل الطقس weather modification التقنية التي يتم بموجبها إجراء تغيرات في حالة الغلاف الجوي بالاعتماد على حقائق تقودنا للتحكم بالعمليات الطبيعية التي تحدث في الغلاف الجوي (Chernikov et al, 2003, p1). فكانت التقنية الحديثة لتعديل الطقس عندما اكتشف في أربعينيات القرن المنصرم أن القطيرات المائية فائقة البرودة يمكن أن تتحول إلى بلورات جليدية داخل السحب من خلال حقن تلك السحب بمواد مبردة مثل الجليد الجاف أو يوديد الفضة، وخلال عقود عدة من البحث تطورت المعرفة حول البنية الفيزيائية الدقيقة والديناميكية للسحب وعملية الهطل منها (WMO, 2010, p3). لم يقتصر تعديل الطقس على زيادة الهطل المطري في المناطق الجافة وشبه الجافة، بل تعداه إلى مكافحة عواصف البَرَدْ وتبديد الضباب وكذلك التقليل من غزارة الهطل المطري في شرق آسيا، مثال ذلك ما حدث في منطقة تونتانغ في وسط Java خلال الموسم المطري عام 1995، فقد تناقصت غزارة الهطل بنسبة 15%، وكذلك التقليل من غزارة الهطل المطري في جاكرتا خلال شهر شباط عام 2002 والتي عدت تجربة ناجحة (Seto, h., et al, W.D, p1-4).

أهمية البحث:

تأتي أهمية البحث من إضاءته على أحد أهم تقنيات تعديل الطقس وهي تقنية زرع السحب ومواد الزرع المختلفة والتقنيات الأحدث المستخدمة عالمياً وفعالية كل منها واستخدامها في تعديلات أخرى للطقس.

أهداف البحث:

يهدف هذا البحث إلى ما يأتي:

- التعريف بأهم تقنيات تعديل الطقس الحديثة في زرع السحب.
- المقارنة بين مواد الزرع المختلفة وتحديد الأكثر ملاءمة منها من حيث أدائها الاقتصادي والبيئي.
- المقارنة بين نوعي طلقات البيروتكنيك المستخدمة في زرع السحب الدافئة والسحب الباردة.
- التعرف على مجالات استخدام مواد الزرع لتعديل الطقس.

المنهجية والأساليب والبرامج المستخدمة:

استند هذا البحث إلى المنهج العلمي بشقيه الاستقرائي والاستنتاجي لتحقيق الهدف المبتغى، فضلاً عن استخدام طريقة المقارنة بين مواد الزرع المختلفة لبيان أكثرها كفاءة وفاعلية، كما اعتُمِدت وسائل البحث العلمي وأدواته كالجداول وما توفره الكتب والنشرات والتقارير والبحوث والدراسات العلمية من معلومات، استند هذا البحث إلى مجموعة كبيرة من التقارير العلمية العالمية التي توثق عمليات زرع السحب في بلدان العالم المختلفة، إضافةً إلى مخرجات العديد من المؤتمرات العلمية العالمية حول تعديل الطقس.

كما تم الحصول على بيانات نتائج زرع السحب من مشروع الاستمطار السوري خلال الفترة (1991- 2010) لمعرفة العلاقة بين كثافة إطلاق طلقات بيروتكنيك يوديد الفضة ومعدل الهطل المطري.

مشكلة البحث:

يطرح البحث تساؤلات عدة، أهمها:

- ما هو المحرض (مادة زرع السحب) الأكثر كفاءة وفعالية.
- هل محرضات السحب ذات فعالية وتحقق استدامة بيئية.
- هل يمكن استخدام محرضات السحب لأغراض تعديلات الطقس الأخرى والاستفادة منها في تقليل الخسائر المادية والبشرية.
- هل يوجد علاقة بين كثافة إطلاق البيروتكنيك والنسب المئوية للهطل المطري في سورية.

أولاً: محرضات السحب (مواد الزرع):

يقصد بمحرضات السحب (Clouds Agents) المواد التي يتم إدخالها إلى السحب بغية تعديل بنيتها لتسريع أو زيادة كمية الهطل منها. تعتمد عملية زرع السحب على إيصال الأيروسول إلى السحب، والجدير بالذكر أن هناك ثلاثة أنواع من السحب تبعاً لدرجة حرارتها (السحب الباردة، السحب الدافئة، السحب المختلطة)، يستخدم لكل منها مادة زرع مناسبة، ففي السحب الباردة يقوم الأيروسول بدور نويات تجمد، بينما يقوم بدور نويات تكاثف في السحب الدافئة. أي أن العامل المحدد (الشرط اللازم والكافي) هنا هو درجة الحرارة.

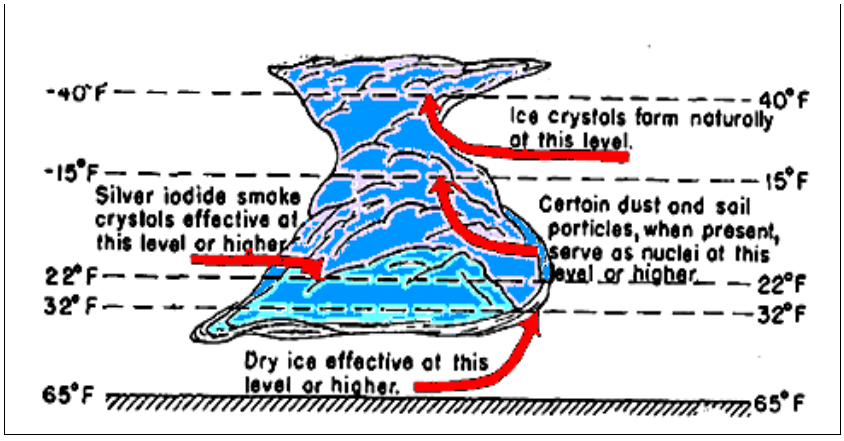
1. محرضات زرع السحب الباردة:

يتم إيصال مواد الزرع إلى السحب وفق آليتين هما الزرع الستاتيكي Static Cloud Seeding الذي يهدف إلى تعديل البنية المجهرية للسحب، والزرع الديناميكي Dynamic Seeding الذي يعزز ديناميكيات السحابة من خلال الإطلاق المفاجئ للحرارة الكامنة للتجمد والتي تعمل على تحفيز قوة الطفو وتنشيط التيارات الهوائية الصاعدة مما يسبب دفع الجزء العلوي من السحابة إلى ارتفاعات عالية ذات حرارة منخفضة، مما يؤدي إلى التجمد وهطول الأمطار.

تحتوي السحب الباردة على الماء السائل فائق البرودة (LWC) عند مستويات حرارية تصل إلى (-40°C) بشكل طبيعيّ، لذا فإن إدخال نويات التجمد يمكن أن يحفز تشكل كمية كافية من بلورات الجليد، وبالتالي فإن كفاءة مادة الزرع تعتمد على كميتها وعدد البلورات الجليدية المتشكلة من كل غرام منها، من أهم المحرضات المستخدمة الجليد الجاف (Co_2 الصلب)، يوديد الفضة (Silver Iodide)، النتروجين السائل (liquid nitrogen)، البروبان السائل (liquid propane). سيتم الحديث عن يوديد الفضة والجليد الجاف بشكل رئيسي في هذا البحث. حيث يتم تعبئة مادة الزرع ضمن طلقات، ففي إحدى الطلعات الجوية كانت الطائرة الروسية AN-30 تحمل 384 طلقة بيروتكنيك من يوديد الفضة نوع PV-26 كل طلقة منها تحتوي على 33 غ من مادة الخلطة وبنسبة 2% وأعطت حوالي 5×10^{12} بلورة جليدية/ غ من مادة الخلطة في ظل درجة حرارة (-10°C) خلال 40 ثانية من الاحتراق وغطت حوالي 1.5 كم، كما كانت تحمل

الطائرة مولد للنتروجين السائل حيث تم الحصول على 4×10^{11} بلورة جليدية/ غ في ظل درجة حرارة ($-1^{\circ}C$)، والجدير بالذكر أن المولد يستطيع استيعاب 96 كغ من النتروجين السائل (Korneev V.P., et al, 2003, p52). تحتاج تلك البلورات إلى ساعة تقريباً (54– 68 دقيقة) لتصل إلى سطح الأرض من ارتفاع (3– 3.8)كم وتلك البلورات لها شكل كروي عندما تكون الكثافة 0.9 غ/سم^3 (Nishiyama, K., et al, 2003, p.80-81)، كما أن تبخير 1 غ من الجليد الجاف في ظل درجة حرارة أقل من ($-5^{\circ}C$) يعطي ما بين (10^{11}– 10^{12}) بلورة جليدية (Chernikov, A.A, et al, 2003, p8). يبين الشكل رقم (1) المستويات الحرارية التي تكون فعالة عندها مواد الزرع(*)، حيث يكون الجليد الجاف فعالاً عند درجة حرارة ($0^{\circ}C$، $-5^{\circ}C$)، بينما تكون فعالية يوديد الفضة ما بين ($-5^{\circ}C$، $-20^{\circ}C$) مئوية. أي أن فعاليته هذا الأخير تتناسب عكساً مع درجة الحرارة. كما قدم Fukuta سنة 1996 بعض الخصائص لمحرض آخر فعال هو ثاني أكسيد الكربون السائل (LC) الذي يتميز بأن سعره نصف سعر الجليد الجاف، غير سام وآمن بيئيا، غير قابل للاشتعال، ويمكن تخزينه لفترة زمنية أطول، كما يتميز بإنتاجه لعدد كبير من النويات. (Jamali, J. B., et al, 2003, P199)

الشكل (1) المستويات الحرارية المناسبة لاستعمال مواد زرع السحب الباردة.



المصدر: E. Bollay, et al. 1948, p8

* يمكن التحويل من فهرنهايت إلى سيلسيوس باستخدام العلاقة الآتية:

(Allaby. M., 2007, p528) ($^{\circ}C=(^{\circ}F-32)\times5/9$)

اختبر فينكان وآخرون (Finnegan et al.1994) عدد نويات التجمد الناتجة عن تباين المواد المختلفة في تركيب البيروتكنيك عند درجات حرارة مختلفة ونسب متباينة من الإشباع بالرطوبة، وخلصت النتائج إلى أن الأيروسول الأكفأ هو الأيروسول المولد للنويات الذي يضم خليطه $Ag(CL)I.\ NaCl$ ويتم الحصول عليه من خلال حرق محاليل الأسيتون بالماء مع نسب محددة من AgI وNH_4I وNaI و$C_6H_4CL_2$ على التوالي: 0.375:0.125:0.213. ومما جعل ذلك الخليط الأكفأ إنتاجيته العالية من بلورات الجليد وبمعدل زمني قصير جداً (7) دقائق.

الجدول (1) تباين الإنتاجية من نويات التجمد بتباين نوع الخلطة.

الهباء (الأيروسول)	معدل تشكل النويات/السحابة (90%)	الإنتاجية نوية/ غ
AgI	أكثر من يوم	5×10^{13}
Ag(CL)I	أكثر من يوم	5×10^{14}
2AgI. NaI	40 دقيقة	1×10^{13}
Ag(CL)I. NaCl	7 دقائق	1×10^{14}

المصدر: Finnegan et al. 1994

يمكن تقدير **إنتاجية** ثاني أكسيد الكربون الجاف (Co_2) من بلورات الجليد المدخل إلى السحب في التيارات الهوائية الصاعدة عند درجات حرارة مختلفة من خلال المعادلة الآتية:

$$N_{max} = \frac{Q(q_t - q_{t_{cr}})}{4/3\pi p_i r_{cr}^3 c(t - t_{cr}) + L(q_t - q_{t_{cr}})}$$

المعادلة رقم (1)

حيث: Q الإنتاجية من ثاني أكسيد الكربون الجاف وتساوي $638.7\ J\ Kg^{-1}$.

q_t و $q_{t_{cr}}$ كمية بخار الماء في واحدة الكتلة من الهواء في ظل درجة حرارة t_{cr} و T.

P_i كثافة الثلج (gm^{-3})، r_{cr} نصف القطر الحرج لبلورات الثلج (m)، c القدرة الحرارية للهواء ($J(Kg\ K)^{-1}$)،

L الحرارة الكامنة لبلورات الجليد (JKg^{-1}). حيث أظهرت القياسات الحسابية والتجريبية أن تبخير (1 غ) من المادة المبردة في السحب المتوسطة عند درجات حرارة أقل (5°-) سينتج ما بين (10^{11} - 10^{12}) بلورة جليدية.

بينت دراسة كل من السحب التضاريسية والحملية أن السحب التي درجة حرارة قممها منخفضة (<-25°) تمتلك تركيز عالي من بلورات الجليد بشكل طبيعي وبالتالي فإن عملية الزرع لن يكون لها أثر في الهطل، أما السحب التي درجة حرارة قممها (≥ -20°C) عند مستوى الضغط الجوي 500 ميليبار تمتلك فرصة زيادة الهطل المطري بنسبة 25% في حال تم الزرع. أي أن هناك حدود حرارية لفعالية الزرع، وهذا ما يفسر الفعالية المنخفضة لبلورات الجليد المنتجة بواسطة يوديد الفضة عند درجات حرارة أعلى من (-5°C) والمعدلات البطيئة لترسب بخار الماء على بلورات الجليد (Griffith, D. 2006, p18 .A., & Solak, M. E.,).

الجدول (2) خصائص مواد زرع السحب الباردة.

مادة الزرع	عدد النويات المتشكلة غ (الإنتاجية)	درجات الحرارة المثلى (c)
يوديد الفضة (**AgI**)	5×10^{12} بلورة جليدية عند (t= -10°) 2.8×10^{17} بلورة جليدية عند (t= -20°)	(-5° حتى -25°)
الجليد الجاف(**Dry ice**) أو Co_2	(10^{11} - 10^{12}) بلورة جليدية عند(t> -5°) 10^{11} بلورة جليدية عند (t= -10°)(*)	(-1^0 حتى -11^0)
النتروجين السائل(**LN**)	4×10^{11} بلورة جليدية عند(t= -1°)	(0° و10°-)
البروبان السائل (**LP**)	4×10^{11} بلورة جليدية	(-2°)

المصدر: (Griffith, D. A., & Solak, M. E., 2006, p10- 11).

(*) Allaby. M., 2007, p152

2. محرضات زرع السحب الدافئة:

تعمل محرضات السحب الدافئة warm cloud agent على تعزيز عملية التصادم والاندماج وبالتالي زيادة عدد القطيرات كبيرة الحجم. من أهم مواد الزرع الهيجروسكوبي في السحب الدافئة أو السحب المختلطة ذات القواعد الدافئة الأملاح (كلور الصوديوم، كلور البوتاسيوم) والماء. تتنوع المواد الداخلة في تركيب طلقات البيروتكنيك المستخدمة في الزرع الهيجروسكوبي، فعلى سبيل المثال يمكن أن تحتوي كل طلقة على [NaCl (12%)، $KCLo_4$ (63%)، Mg(9%)، Li_2Co_3 (4%)، (12%) مواد عضوية] والتي تنتج حوالي 9.6×10^{12} نوية/غ أقطارها تتراوح ما بين (2- 10)

ميكرون (Bojkov, D. R., 2003, p51). وهناك نوع آخر من الطلقات التي تحتوي فقط على رباعي أكسيد كلور البوتاسيوم وكلور الكالسيوم والتي تعطي عند احتراقها (KCL و $Ca(Cl)_2$) منتجةً نويات عملاقة تتراوح أقطارها ما بين (1– 5) ميكرومتر، يستخدم هذا النوع من الطلقات بشكلٍ خاصّ في السحب الركامية (Ghate, V. P., et al, 2007, p1). كما تجدر الإشارة إلى أن استخدام الطلقات الهيجروسكوبية ينتج نويات تتراوح أقطارها ما بين (0.3– 1.5) ميكرون من كلوريد الكالسيوم ($CaCl_2$) بالنسبة للطلقات الفرنسية وكلور البوتاسيوم (KCL) وكلور الصوديوم (NaCl) بالنسبة للطلقات الأمريكية وجنوب أفريقيا والتي لا تسبب أي ضرر للبيئة (J. F., 2003, p82 Berthoumieu,).

الجدول (3) وزن المواد المكونة للبيروتكنيك المستخدم في الزرع الهيجروسكوبي.

No	المواد المكونة للبيروتكنيك	الوزن (غ)	النسبة المئوية %
1	الفتيل أو الشعلة (الفحم+ رباعي كلور البوتاسيوم ($KCLO_4$)	15	1.5
2	الأنبوب	235	23.5
3	مواد ملونة	15	1.5
4	رباعي كلور البوتاسيوم ($KCLO_4$)	495	49.5
5	المغنزيوم (Mg)	60	6
6	كلور الصوديوم (Na_2Cl)	90	9
7	الغلاف الخارجي (مادة التماسك)	90	9

المصدر: Haryanto et al, 2010, p2

كفاءة طرق الزرع:

لمعرفة الطريقة **الأكثر** كفاءة وفعالية لإيصال دقائق يوديد الفضة إلى السحب في الزمان والمكان المناسبين، سيتم دراسة يوديد الفضة كأنموذج لمادة للزرع ونبين الطريقتين المستخدمتين عالمياً لبذره.

1. بذر يوديد الفضة بالمولدات الأرضية:

تعد من أقدم طرائق الزرع المستخدمة لإنتاج يوديد الفضة، حيث يتم حرق محلول الأسيتون مع حوالي (2–3)% من مادة يوديد الفضة، يتم تثبيت تلك المولدات على

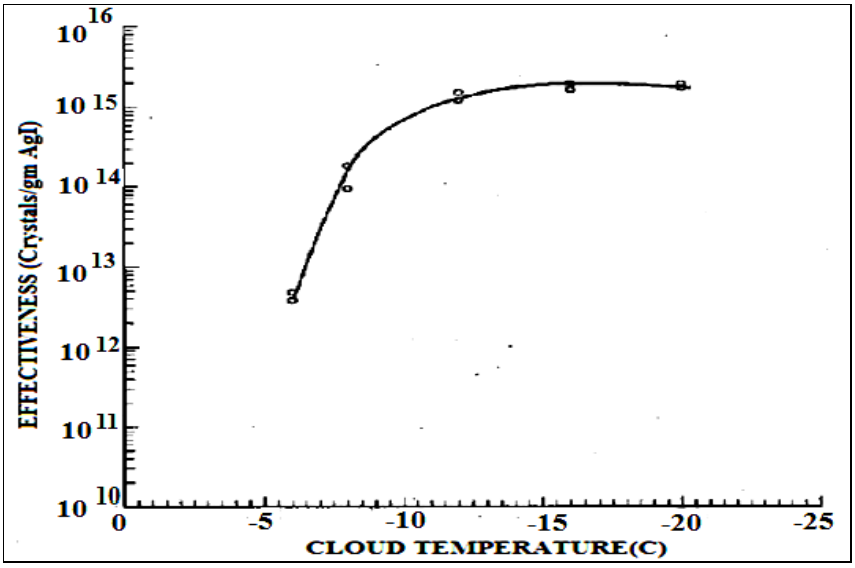
السفوح الجبلية المواجهة لجهة ورود الرياح في المنطقة الهدف المراد تنفيذ عمليات الزرع فيها. تعطي المولدات الأرضية حوالي (10- 40) غ/ الساعة من يوديد الفضة، يتم تقريباً إنتاج 8×10^{14} من البلورات الجليدية من 1 غ من يوديد الفضة عند درجة حرارة (-10°) م، وتتناسب فعالية يوديد الفضة عكساً مع تناقص درجة الحرارة. للمولدات الأرضية نوعين أوتوماتيكية ويدوية، يبين الجدول رقم (4) تباين معدل تشكل نويات التجمد باستخدام نوعين من المولدات (PGOT 02) و(GGMOT 01)، حيث أن للنوع الأول فعالية أكبر في معدل تشكل نويات التجمد وكذلك عدد البلورات الجليدية المنتجة من غرام واحد من يوديد الفضة.

الجدول (4) مقارنة بين نوعين من المولدات الأرضية وتباين معدل تشكل نويات التجمد.

نوع المولد الأرضي (GGT)	المحلول الخليط	درجة الحرارة المثلى(T)	معدل تشكل نويات التجمد (نوية/ساعة)	الإنتاجية (بلورة جليد/1غ/ AgI)
PGOT 02	$AgI-NH_4I$	-C°5 و-C°25	$^{14}10\times3.6$	$^{13}10\times8$
GGMOT 01	AgI-NAI		$^{14}10\times1.1$	$^{13}10\times2$

المصدر: Peti and Gapit, 1994

الشكل (2) فعالية يوديد الفضة في إنتاج بلورات جليدية بوساطة المولدات الأرضية.



المصدر: Griffith, D. A., & Solak, M. E. 2006, p12

يكون الزرع بواسطة المولدات الأرضية الثابتة إذا كانت نسبة الخلط جيدة في المستويات الدنيا للكتلة الهوائية أو كانت مستقرة ودرجة الحرارة عند مستوى الضغط 700 ميليبار (5C°- أو أبرد من ذلك)، وبالنسبة للمولدات المتنقلة إذا كانت المستويات الدنيا متوسطة الاستقرار أو كانت درجة الحرارة عند مستوى الضغط 700 ميليبار (5C°- أو أبرد من ذلك)، أما في حال كانت درجة الحرارة أعلى من 5°C- بغض النظر عن ظروف الاستقرار فالزرع الجوي هو الأفضل (Griffith, D. et Yorty, D. P., 2009, p91 .(A.,

كما أظهرت دراسة فرنسية جدوى الزرع باستخدام المولدات الأرضية في تقليل الضرر الذي يلحق بالمحاصيل الزراعيَّة جرّاء تساقط البرَدْ، إذ تناقص معدل التخريب في المحاصيل الزراعيَّة الرئيسة نتيجةً لتساقط البرد بنسبة 41% في المناطق التي تم بذرها باستخدام المولدات الأرضية (الهدف) مقارنةً بالمناطق التي لم يتم بذرها (الشاهدة) .(Batisha, A. F., p:1- 13)

2. بذر يوديد الفضة بالطائرات:

يمثل البذر الجوي باستخدام الطائرات النوع الثاني المستخدم عالمياً لزرع السحب من خلال استخدام طلقات البيروتكنيك المثبتة على جناحي الطائرة، كل طلقة منها تحتوي على (40- 200) غ من مادة الزرع، ومدة احتراقها حوالي (1-5) دقائق وبالتالي فإن معدل ما تحرره من مادة الزرع يقدر بحوالي (10- 100) غ/ دقيقة. يوجد نوعان من طلقات بيروتكنيك يوديد الفضة (AgI) التي يتم تحريرها عند تحليق الطائرة فوق قمم السحب الملائمة وهما (PV-26) و(PV-50)، تحتوي كل طلقة من (PV- 26) على (40) غ من الخلطة المحتوية على مادة يوديد الفضة وتصل فعالية الغرام الواحد منها إلى إنتاج (5×10^{12}) نوية تجمد وذلك في ظل درجة حرارة (10°C-)، بينما تحتوي الطلقات من نوع (PV- 50) على 320 غ من مادة الخلطة، كما يبلغ مدى فعالية الطلقة الواحدة من (PV- 50) في تكوين الدخان المحتوي على مادة الزرع حوالي (3.5) كم بينما الطلقة من نوع (PV- 26) حوالي (1) كم (عباس، 1998، ص14).

الجدول (5) خصائص طلقات البيروتكنيك لزرع السحب.

PV- 50	PV- 26	cHARACTERISTICS
50	26	العيار (القطر الداخلي للطلقة) – (ملم)
320- 400	34- 40	وزن خلطة البيروتكنيك- (غ)
6.4	0.8	محتوى الخلطة من يوديد الفضة - (غ)
5×10^{12}	5×10^{12}	فعالية تشكل بلورات الجليد (من 1 غ من مادة الخلطة)
2.5×10^{14}	2.5×10^{14}	فعالية تشكل بلورات الجليد (من 1 غ من يوديد الفضة)
1.6×10^{15}	2×10^{14}	من نويات التجمد الفعالة من طلقات البيروتكنيك– (نوية)*الإنتاجية
3500 -3000	1000 -600	الامتداد العمودي لاحتراق طلقات البيروتكنيك (فعالية الزرع)- م

المصدر: Chernikov and Koloskov, 2003, P.115.

يتم إطلاق دخان يوديد الفضة من المولدات الأرضية ويكون انتشاره ريشي الشكل ولكن يجب أن تكون المولدات مثبتة عكس الريح وعلى مسافة (4- 5) كم بعيداً عن الحاجز الجبلي. يبين الجدول المرافق رقم (6) الظروف الجوية السائدة المحددة لاستخدام طرق الزرع.

الجدول (6) مقارنة بين الظروف الجوية السائدة الملائمة للزرع الأرضي والزرع الجوي.

مادة الزرع: يوديد الفضة AgI	
الزرع الأرضي	الزرع الجوي
درجة حرارة قمة السحب $\geq -26^{\circ}$	درجة حرارة قمة السحب $\geq -26^{\circ}$
درجة الحرارة عند مستوى الضغط 700ميليبار $\leq -5^{\circ}$	درجة الحرارة عند مستوى الضغط 700ميليبار $\geq -5^{\circ}$
المستويات الدنيا من الغلاف الجوي مستقرة جدا	
يكون اتجاه الرياح في المستويات الدنيا ملائما لنقل مادة الزرع فوق المنطقة الهدف	يكون اتجاه الرياح العلوية في المستويات المتوسطة ملائما لنقل مادة الزرع فوق المنطقة الهدف
تكون قواعد السحب عند أو أقل من ارتفاع قمة الحاجز الجبلي	تكون قواعد السحب عند أو أقل من ارتفاع قمة الحاجز الجبلي

المصدر: Griffith, D. A., & Yorty, D. P., 2009, p112

كفاءة وفعالية مواد الزرع:

عادةً ما يتم التمييز بين مصطلحين هما الكفاءة (efficiency) والفعالية (Effectiveness)، يشير مصطلح **الكفاءة** من الناحية الاقتصادية الحصول على أفضل

(*) الإنتاجية: عدد بلورات الجليد المتشكلة من غرام واحد من (AgI).

ناتج من مادة الزرع بأقل تكلفة (ميا، 2007، ص36)، في حين يشير مصطلح **الفعالية** إلى تحقيق أفضل ناتج من مادة الزرع، ولنجاح عملية الزرع يجب استخدام مادة تحقق أعلى كفاءة وأقصى فعالية والعامل المحدد لكل منهما هو الإنتاجية والتي يقصد بها عدد النويات المنتجة من كمية محددة (1 غ) من مادة الزرع. تتضمن عملية إدارة زرع السحب الاستخدام الأمثل للموارد المتاحة المادية (التجهيزات الفنية ومواد الزرع...) والبشرية (الكوادر البشرية المؤهلة المدربة) من خلال التخطيط والتوجيه والمتابعة والتنظيم بغية الوصول إلى أعلى معدل من الكفاءة الإنتاجية من مادة الزرع.

هناك جملة من العوامل (المحددات) تتدخل في كفاءة زرع السحب بعضها طبيعي (بيئي) وآخر بشري، تتضمن العوامل البيئية كل من المتغيرات في الغلاف الجوي (درجة الحرارة، الرطوبة، الرياح، معدل الاستقرار، بنية السحب والنويات الطبيعية داخلها)، العوامل الجغرافية (الانحدار، رطوبة التربة ونفوذيتها، الغطاء النباتي، الإشعاع الشمسي، معدلات التبخر النتح)، أما العوامل البشرية تتمثل بـ(تكنولوجيا الزرع، مواد الزرع، مكان وزمان ومدة تحرر مواد الزرع، طريقة الزرع بالطائرات أو المولدات الأرضية)، والعلاقة بين هذه المتغيرات جميعها تتدخل في تحديد كفاءة وفعالية عملية الزرع، كما أن هناك تحديات تواجه هذه التقنية مثل استمرار تسخن الغلاف الجوي للأرض الذي يقلل من فرص استخدام المولدات الأرضية لزرع يوديد الفضة (الأكثر فعالية عند درجات حرارة ($T>-5^{\circ}C$) (Hunter, M. S, 2007, p7).

يوجد العديد من المؤشرات التي يتم الاعتماد عليها عند التخطيط الأمثل لنجاح عملية زرع السحب كدرجة الحرارة، الرطوبة النسبية، عدد الأيروسول Aerosol (غ/ ل)، ارتفاع قمة السحابة وسماكتها، محتواها من الماء فائق البرودة (LWC)، قيم الصدى الراداري (dBz)، قطر القطيرات. لقد أظهرت التجارب العالمية أن السحب الملائمة للزرع بالمواد الغلاسيوجينية (المبردة) يجب أن تكون درجة حرارتها ($-25^{\circ}C<T<-5^{\circ}C$)، والسحب الملائمة للزرع الهيجروسكوبي يجب أن تكون درجة حرارتها ($-5^{\circ}C<T<15^{\circ}C$) (Murakami, M., et al, 2010, p4). وسيكون للزرع نتائج ايجابية بنسبة 25% في السحب التي تتراوح درجة حرارتها ما بين ($-5C^{\circ}$ و$-20C^{\circ}$)، ونتائج إيجابية بنسبة 10% في السحب التي تتراوح درجة حرارة قمتها ما بين

(21°C- إلى 25C°-)، وبنسبة 0% بالنسبة للسحب التي تكون درجة حرارة قمتها (26C°-) أو أبرد من ذلك والنتيجة ذاتها في حال كانت درجة حرارة قمة السحابة أكثر حرارة من (5C°-)(Griffith, D. A., & Yorty, D. P., 2009, p90)

ومن المؤشرات التي يجب أخذها بعين الاعتبار أيضاً قبل البدء بعملية زرع السحب هو مؤشر نشاط الالتحام (**ICA***) داخل السحب، وتبين أن السحب الأنسب لاستخدام المواد الغلاسيوجينية هي السحب التي يكون فيها معدل الالتحام قليل وزيادة في كمية الماء فائق البرودة وبطء في عملية التجمد، يتراوح نطاق مؤشر (ICA) التي تكون عنده عمليات الزرع فعالة من (5- إلى 5+)، رصدت عمليات الزرع الأكثر فعالية عندما كان مؤشر الالتحام داخل السحب إيجابياً (ICA > 0) أو سلبياً بشكل طفيف. مما يشير إلى الحد الأدنى من نشاط الالتحام داخل السحابة. ولم تتم ملاحظة أي زيادة في هطول الأمطار عندما كان ICA سلبيًا للغاية أي (ICA <-5)، مما يشير إلى أن السحب ذات الالتحام الشديد ليست مناسبة للزرع بالمواد الغلاسيوجينية (المبردة) ويجب تجنب الزرع.

توضح المعادلة الآتية كيفية حساب مؤشر الالتحام (الاندماج) داخل السحب:

$$ICA = 8.6 - T_{CCL} + 1.72(PB)$$ المعادلة رقم (2)

ICA: مؤشر نشاط الالتحام (الاندماج).

T_{CCL}: درجة الحرارة عند مستوى التكاثف.

PB: الطفوية المحتملة عند مستوى الضغط 500 ميليبار لحزمة هوائية مشبعة مرفوعة من مستوى التكاثف إلى مستوى الضغط 500مليبار (Woodley, W. L., and Rosenfeld, D., 2006, p34).

من مساوئ استخدام يوديد الفضة كمادة للزرع سرعة تخربه وتأثره بالأشعة فوق البنفسجية (UV)، وكذلك سعره المرتفع نسبياً بالإضافة إلى التجهيزات الأخرى المتعلقة به، مما يجعل البحث عن محرضٍ آخر فعال وذو سعر منخفض نسبيا أمراً لابد منه. طريقة البذر الأرضي أقل تكلفة بالمقارنة مع طريقة البذر الجوي الأكثر فعالية والأكثر تكلفة وهنا يأتي دور المسؤولين عن تنفيذ أعمال الزرع في اختيار مادة الزرع من خلال حساب تكلفة الفرصة

* Index of Coalescence Activity (**ICA**)

البديلة (قيمة أفضل بديل تم التضحية به في سبيل البديل المختار فعلاً أي أنها سعر القرار أو سعر الاختيار)، فإن كانت أعمال الزرع بحثية أم أن الدولة المنفذة تعاني من نقص حاد في مواردها المائية. وهذا مرتبط أيضاً بإمكاناتها الاقتصادية. وجد في الولايات المتحدة الأمريكية أن تكلفة المولدات الأرضية أقل (5.94) دولار أمريكي/ الفدان، وحققت زيادة في الجريان النهري خلال أشهر الزرع، كما إن تكلفة الفدان الواحد باستخدام الزرع الجوي ضعف تكلفته باستخدام الزرع الأرضي (12.45) دولار أمريكي، وبلغ متوسط التكلفة لإنتاج ماء إضافي بالزرع الأرضي (173.350) دولارًا أمريكيًا، بينما بلغ متوسط التكلفة لإنتاج ماء إضافي بالزرع الجوي حوالي (460.400) دولاراً أمريكيًا. بينما بلغ متوسط النفقات لإنتاج ماء إضافي في سورية حوالي (26,500) ليرة سورية باستخدام طريقة الزرع الجوي.

وبالنسبة للجليد الجاف فإن طريقة الزرع الفعالة باستخدام الطائرات، كما أنه من الصعب تخزينه، وبالتالي فقدان كميات كبيرة منه نتيجة التبخر المستمر، وبالتالي لا يمكن الركون إلى استخدامه كمادة وحيدة في الزرع وإنما ينبغي استعمال يوديد الفضة معه كمادة معززة للهطل المطري (Griffith, D. A., & Solak, M. E.,2006, p11)، وهذا ما يميز يوديد الفضة عن غيره من مواد الزرع.

العلاقة بين كثافة إطلاق بيروتكنيك (يوديد الفضة) ومعدلات الهطل المطري:

لمعرفة ما إذا كان هناك علاقة ما بين كثافة إطلاق بيروتكنيك يوديد الفضة ومعدل الهطل المطري تم تحليل البيانات المأخوذة من مشروع الاستمطار السوري كأنموذج، ومن خلال مقارنة كثافة إطلاق مواد الزرع ($\frac{N}{S}$ /كم^2) مع مجالات النسب المئوية للهطل الفعلي مقارنةً بالمعدل والتي تراوحت ما بين (< 40%- 180%). تبين وجود علاقة واضحة فيما بينها. وعند مقارنة عدد الطلقات المستخدمة لكل (1000) كم^2 تبين أن نسبة الهطولات الفعلية مقارنة بالمعدل كانت (≤ 40%) عندما كانت كثافة الزرع (1.1459 طلقة/1000 كم^2/4 أشهر). وعند مجال (40-50)% من المعدل كانت كثافة الزرع (1.998 طلقة/ 1000 كم^2/ 4 أشهر). وعند مجال (100%) من المعدل كانت كثافة الزرع (21.779 طلقة/ 1000 كم^2/ 4 أشهر). وعند مجال (150-160%) من المعدل كانت كثافة الزرع (63.6605 طلقة/ 1000 كم^2/4 أشهر). وعند مجال (160-170)% من المعدل كانت كثافة الزرع (87.9121 طلقة/ 1000 كم^2/ 4

أشهر). فعلى سبيل المثال لا الحصر، بلغت كثافة الإطلاق المثلى خلال الموسم (1991- 1992) (20 طلقة/1000كم^2/4 أشهر)، كما بلغت كثافة الإطلاق المثلى خلال الموسم (1992- 1993) حوالي (21.9 طلقة/1000 كم^2/4 أشهر).

الجدول (7) علاقة زيادة الهطولات المطرية بكثافة إطلاق مواد الزرع لموسم (1992– 1993).

علاقة النسب المئوية للهطل مقارنة بالمعدل%	المساحة كم^{2}s	عدد الطلقات الكبيرة n	$10^4)\frac{N}{S}$ (=	لغ$\frac{N}{S}$
40 >	6981	8	11.46	1.059147
50- 40	8008	16	19.98	1.300596
60- 50	19994	200	100.03	2.00013
70- 60	32396	228	70.38	1.847443
70	247	16	647.77	2.811423
80- 70	39052	900	230.46	2.362599
90- 80	27924	536	191.95	2.283188
90	6591	136	206.34	2.314588
100- 80	1950	16	82.05	1.914084
100- 90	11219	308	274.53	2.438596
100	15795	344	217.79	2.338038
110- 100	3237	112	346.00	2.539075
120- 110	2938	120	408.44	2.611129
130- 120	3601	156	433.21	2.636702
140- 130	975	52	533.33	2.726999
150- 140	1690	128	757.40	2.879323
160- 150	754	48	636.61	2.80387
170- 160	273	24	879.12	2.944049
180- 170	130	8	615.39	2.789147
180	1430	12	83.92	1.923845

المصدر: وزارة الزراعة والإصلاح الزراعي (1992)، مشروع الاستمطار السوري، تقرير موسم (1992– 1993)، دمشق.

الجدول (8) علاقة زيادة الهطولات بكثافة إطلاق مواد الزرع خلال موسم (1993– 1994).

علاقة النسب المئوية للهطل مقارنة بالمعدل %	المساحة كم^{2}s	عدد الطلقات الكبيرة n	$10^4)\frac{N}{S}$ (=	لغ$\frac{N}{S}$
50- 80	33800	200	59.1716	1.772113
80- 100	97400	1320	135.5236	2.132015
100- 120	46700	920	197.0021	2.294471
120- 150	8400	280	333.3333	2.522879
Σ	**186300**	**2720**	-	-

المصدر: وزارة الزراعة والإصلاح الزراعي (1993)، مشروع الاستمطار السوري، تقرير موسم (1993– 1994)، دمشق.

تباينت كثافة إطلاق مواد الزرع في أثناء أشهر الزرع في سوريا وهي (كانون الأول، كانون الثاني، شباط، آذار) وهي ذاتها الأشهر التي ترتفع فيها نسبة التغيم (Cloudiness)، تبين الجداول المرافقة رقم (9)، (10)، (11)، (12)، (13) العلاقة ما بين كثافة إطلاق البيروتكنيك ومعدلات الهطل المطري.

الجدول (9) علاقة زيادة الهطولات بكثافة إطلاق مواد الزرع خلال شهر كانون الأول

علاقة النسب المئوية للهطل مقارنة بالمعدل %	المساحة كم^2 s	عدد الطلقات الكبيرة n	$10^4)\frac{N}{S}$ (=	لغ$\frac{N}{S}$
25 >	36337	5	1.376	0.1386209
25- 50	31833	21	6.597	0.8193417
50- 75	15877	13	8.188	0.9131749
75- 100	48733	86	17.647	1.2466753
100- 125	21306	81	38.017	1.5799831
125- 150	8136	71	87.266	1.9408474
150- 175	9978	47	47.104	1.673054
175- 200	3986	21	52.684	1.721682
200- 250	7972	49	61.465	1.788629
250- 300	1610	40	248.447	2.395234

المصدر: وزارة الزراعة والإصلاح الزراعي (1992)، مشروع الاستمطار السوري، تقرير موسم (1991- 1992)، دمشق.

الجدول (10) علاقة زيادة الهطولات بكثافة إطلاق مواد الزرع خلال شهر كانون الثاني.

علاقة النسب المئوية للهطل مقارنة بالمعدل %	المساحة كم^2 s	عدد الطلقات الكبيرة n	$10^4)\frac{N}{S}$ (=	لغ$\frac{N}{S}$
25- 50	6617	9	13.601	1.1335814
50- 75	74230	236	31.793	1.5023325
75- 100	49712	296	59.543	1.7748305
100- 125	15275	108	70.704	1.8494425
125- 150	10075	71	70.471	1.8480133
150- 175	5616	46	81.909	1.9133307
175- 200	3926	25	63.678	1.80399
200- 250	520	8	153.846	2.187087

المصدر: وزارة الزراعة والإصلاح الزراعي (1992)، مشروع الاستمطار السوري، تقرير موسم (1991- 1992)، دمشق.

الجدول (11) علاقة زيادة الهطولات بكثافة إطلاق مواد الزرع خلال شهر شباط.

علاقة النسب المئوية للهطل مقارنة بالمعدل %	المساحة s^2كم	عدد الطلقات الكبيرة n	$(\frac{N}{S}10^4=$	لغ$\frac{N}{S}$
100 >	27244	169	62.0320	1.7926158
100- 150	38094	127	33.3386	1.5229471
150- 200	27524	207	75.2071	1.8762588
200- 250	65172	369	56.6194	1.7529653
250- 300	18686	89	47.6292	1.6778737
300- 350	5170	139	268.8588	2.4295243
350- 400	2162	90	416.2812	2.6193868
أكثر من 400	1030	22	213.5922	2.3295855

المصدر: وزارة الزراعة والإصلاح الزراعي (1992)، مشروع الاستمطار السوري، تقرير موسم (1991- 1992)، دمشق.

الجدول (12) علاقة زيادة الهطولات بكثافة إطلاق مواد الزرع خلال شهر آذار.

علاقة النسب المئوية للهطل مقارنة بالمعدل %	المساحة s^2كم	عدد الطلقات الكبيرة n	$(\frac{N}{S}10^4=$	لغ$\frac{N}{S}$
15 >	7362	16	21.733	1.3371242
15- 25	44311	248	55.968	1.7479401
25- 50	75083	483	64.329	1.8084055
50- 75	35126	125	35.586	1.5512813
75- 100	6288	27	42.939	1.6328512
أكثر من 100	2705	16	59.150	1.7719527

المصدر: وزارة الزراعة والإصلاح الزراعي (1992)، مشروع الاستمطار السوري، تقرير موسم (1991- 1992)، دمشق.

قسمت سورية إلى ست مناطق للزرع واعتماداً على كثافة الإطلاق المثلى (20- 21.9) طلقة/ 1000 كم^2/ 4 أشهر، فإن عدد الطلقات المثلى اللازمة لإتمام عملية زرع السحب في القطاعات الستة تبعاً لمساحتها هي على النحو الآتي:

الجدول (13) كثافة الإطلاق المثلى في القطاعات الستة حسب مساحتها.

القطاع (ZONE)	المساحة كم^2	كثافة الإطلاق (20) طلقة/ 1000 كم^2	كثافة الإطلاق (21.9) طلقة/ 1000 كم^2
القطاع الأول (Z1)	12200	244	267.18
القطاع الثاني (Z2)	5300	106	116.07
القطاع الثالث (Z3)	9100	182	199.29
القطاع الرابع (Z4)	6500	130	142.35
القطاع الخامس(Z5)	39200	784	858.48
القطاع السادس(Z6)	113000	**2260**	**2474.7**

المصدر: إعداد الباحثة اعتماداً على تقارير نتائج أعمال الاستمطار في سورية للفترة (1991- 2010)، دمشق، سورية.

ثانياً: تقنيات تعديل الطقس الحديثة في زرع السحب:

1. التأيين السحابي:

يُعَدُّ التأيين السحابي من التقنيات الحديثة المستخدمة في زرع السحب في كل من الإمارات العربية المتحدة وأستراليا، حيث ترسل أبراج التأيين Ionizing Towers المكهربة جسيمات ذات شحنة سالبة ضمن طبقة التروبوسفير تعمل على تأين الغلاف الجوي وزرع الشحنات في قطيرات الماء، ثم تنجذب تلك الشحنات إلى قطيرات السحب موجبة الشحنة فيزداد حجمها لتسقط إلى سطح الأرض على هيئة مطر. لكن فعالية تلك الأبراج غير مثبته حتى الآن، إذ لم يعثر على ما يشير إلى زيادة في كمية الهطل المطري، لكنها تقوم بدور إيجابيّ فيما يتعلق بالحفاظ على نظافة البيئة لكونها تقلل من كثافة الهباء الجوي. تؤكد المنظمة العالمية للأرصاد الجوية أن مثل هذه الأساليب لم يتم إثباتها، وبالتالي لا يوصى بها. لهذه الطريقة مساوئ عدة أولها أن عمر الأيونات المنتجة قصير لأنها تلتصق بسرعة بالهباء الجوي الموجود بالفعل في الغلاف الجوي. وفيما لو استطاعت الأيونات المضافة صناعياً إنتاج نوى تكثيف السحب عند قاعدة السحابة، فإن ذلك من شأنه أن يزيد من تركيز قطيرات السحب التي تتنافس على بخار الماء المتوفر، مما يؤدي إلى تكوين قطرات أصغر. وبالتالي ستؤدي إلى تقليل كمية الأمطار الهاطلة وعندها ستكون عملية التجميع أقل فعالية.

2. تقنية النانو:

يُقصد بتقنية النانو **Nanotechnology** تقنية المواد المتناهية الصغر أو التكنولوجيا المجهرية الدقيقة، إذ تتم معالجة المواد على المقياس الذري أو الجزيئي بأبعاد تتراوح ما بين (1– 100) نانو متر(*)(الشريف، 2023، ص166). تركزت معظم جهود تعديل الطقس على وجود ظروف معينة موجودة مسبقاً، لكن حالياً يتم العمل على إنتاج بعض التأثيرات الجوية المصطنعة، بغض النظر عن الظروف الموجودة مسبقاً. فمثلا يمكن إنشاء الطقس الافتراضي من خلال التأثير على عناصر الطقس، حيث توفر تقنية النانو إمكانية

(*) النانومتر هو جزء من الألف من الميكرومتر أي جزء من المليار من المتر وهي أبعاد أقل بكثير من أبعاد البكتريا والخلية الحية.

إنشاء محاكاة للطقس (سحابة أو عدة سحب)، يمكن تصميم مثل هذه السحب بحيث تتمتع بنطاق واسع من الخصائص من خلال توفير فرق الجهد الكهربائي في الغلاف الجوي، إضافةً إلى تكلفتها المنخفضة (House, J. T. Et al, 1996, p17).

تم تطبيق تقنية النانو في الإمارات العربية المتحدة من خلال تصنيع جسيمات معالجة بتقنية النانو تقوم بدور مواد الزرع بهدف زيادة تركيز معدلات بخار الماء داخل السحب، وقد تم إجراء اختبار لمواد الزرع تلك في غرف محاكاة السحب في روسيا، ودمج مادة الزرع الجديدة ضمن نموذج لا يتجزأ مخصص للتنبؤ وتحديد معدلات الهطول الطبيعية وهطول الأمطار المعززة. كما عمل الفريق البحثي مع جامعة بلغراد لدمج خصائص المواد الفيزيائية والكيميائية لمواد الزرع ضمن نموذج رقمي للتنبؤ الجوي عن طريق تطوير نموذج طرد مخصص وقد تم تطوير كل من النماذج أحادية البعد وثلاثية الأبعاد لمحاكاة مواد الزرع الجديدة وتقييم قيمتها المضافة في عملية زرع السحب. تمتاز مواد الزرع المبتكرة بقدرتها على امتصاص كميات أكبر بكثير من الملح النقي، كما يمكن أن تساعد على تكوين قطرات مائية أكبر بكثير، وبالتالي زيادة احتمالية هطول الأمطار. وقد تم تأكيد فعالية هذه المواد الجديدة بشكل إيجابي باستخدام مجهر الفحص الالكتروني وكذلك من خلال التجارب العملية داخل حجرة السحب، حيث تم تمييزها من حيث الحجم، التركيب الكيميائي، توزع العناصر، تقييم أداءها الهيجروسكوبي ومن ثم تطوير طريقة جديدة لمراقبة التغييرات الفورية لحجمها في بيئة ثنائية الأبعاد. يعمل الفريق البحثي بعملية تصميم وتصنيع صفائح نانو الجرافين كجسيمات معززة لزيادة البلورات الجليدية. كما أظهرت النتائج أن للمواد المعالجة بتقنية النانو فاعلية كبيرة في حال كانت الرطوبة النسبية 100%، وإنتاجيتها عالية من قطرات الماء كبيرة الحجم بنسبة 300% بالمقارنة مع مواد الزرع التقليدية (Zou, L., 2019, p1-5)

ثالثاً: استخدامات مواد الزرع في تعديلات الطقس الأخرى:

كانت الغاية الأساسية من استخدام محرضات عدة لتعديل الطقس في بادئ الأمر زيادة الهطل المطري وبالتالي زيادة حجم الجريان السطحي، لكن فيما بعد برزت آراء حول إمكانية استخدام تلك المحرضات في مكافحة العديد من الظواهر الجوية أبرزها تبديد الضباب ومكافحة عواصف البرَدْ والأعاصير وغيرها من الظواهر الجوية الأخرى وفي أماكن أخرى تم توظيفها لأغراض عسكرية وفي التفوق العسكري.

1. استخدام مواد الزرع في تبديد الضباب:

ظهرت المحاولات الأولى لتبديد الضباب خلال الحرب العالمية الثانية بعملية سميت (FIDO*) تلاها تطور كبير في الأساليب المستخدمة، ولتحقيق النتائج المثلى وتبديد الضباب باستخدام المحرضات لابد من معرفة نوع الضباب لمعرفة مادة الزرع المناسبة، فالضباب البارد الذي يحدث عند درجات حرارة ($0C^{\circ} >$) يتم تبديده من خلال بذر الهواء بعوامل تعزز نمو بلورات الجليد (محرضات السحب باردة)، أما الضباب الدافئ الذي يحدث عند درجات حرارة ($0C^{\circ} <$) يمكن تبديده من خلال عمليات التسخين لدرجة حرارة كافية لتبخير الضباب، إلا أن تلك الطريقة لم تجدِ. فكانت عملية الزرع الهيجروسكوبي الطريقة الأمثل لتبديده مع الأخذ بعين الاعتبار عمق الضباب، محتوى الماء السائل، الرياح. حيث يمثل الضباب الدافئ 90% من المشاكل المرتبطة بالضباب التي تواجهها عمليات الطيران المدني والعسكري على حدٍ سواء. يتم تصنيف الضباب إلى ثلاثة أنواع ليس فقط تبعا لآلية تشكله وإنما تبعا لدرجة حرارته كما هو موضح في الجدول المرافق رقم (14).

الجدول (14) أنواع الضباب ومكونات حسب درجة حرارته

نوع الضباب (TF)	مكوناته	درجة الحرارة (T)
الضباب الدافئ (warm fog)	قطيرات مائية سائلة	$T>0^{\circ}$
الضباب فائق البرودة (Supercooled Fog)	خليط من قطيرات مائية فائقة البرودة وبلورات ثلجية	تتراوح ما بين (0° و -30°)
الضباب الجليدي (Ice Fog)	يتكون فقط من بلورات جليدية	($T<30^{\circ}$)

المصدر: (Allaby. M., 2007, p182)

يمكن تبديد الضباب الدافئ warm fog باستخدام الجزيئات الهيجروسكوبية مثل بلورات الملح التي تمتاز بشراهتها للماء، ولكن ينبغي أن تكون تلك الجزيئات ذات حجم مناسب، لأنها إذا كانت **صغيرة** جداً فإنها ستنحل في الهواء وتقلل من الرؤية أكثر، وإذا كانت **كبيرة** جداً ستسقط إلى الأرض من دون أي أثر يذكر، أما الجزيئات ذات الحجم **المثالي** تنثر في الضباب عكس الرياح وعندها تتضح الرؤية، حيث يتكاثف عليها الماء مشكلاً قطيرات ذات حجم كافي لتسقط باتجاه الأرض وهذا ما يقلل من رطوبة الهواء

* Fog Investigation Dispersal Operations (FIDO).

ويسمح للعديد من القطيرات أن تتبخر أيضاً، وخلال **10** دقائق ينزاح الضباب مع حركة الرياح (Allaby. M., 2007, p182). يمكن أيضاً استخدام تكنولوجيا النانو في إنتاج وتطوير مواد ذكية وتعديل حجمها إلى الأبعاد المثالية لبذر الضباب، وكذلك استخدام تقنيات الطاقة الإشعاعية الموجهة، مثل الموجات الدقيقة والليزر. وقد أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها من خلال استخدام مواد الزرع الهيجروسكوبي لتحسين الرؤية المرافقة للضباب في حجرة السحب أن تحسن الرؤية بشكل فعال ومعنوي حصل عند استخدام طلقات (AP384) و(CRL117) المستخدم فيها اليوريا بعد نحو 4 دقائق من الزرع، مما يشير إلى كفاءة تلك الطلقات في تبديد الضباب (Nelson, L.D., & Silverman, B.A., 1972, p156).

الجدول (15) معامل تحسين الرؤية لبعض مواد الزرع الهيجروسكوبي التي تم اختبارها في حجرة السحب بمساحة 600م^3.

Seeding mass (gm)	Seeding agent	Particle distribution			Max. visibility improvement factor*(4-ft,) level
		Mode		Size range	
5	NaCl	4	90%	1-9	7. 5
5	NaCl	8	85%	1-11	6. 2
5	NaCl		95 %	5-20	24. 0
10	NaCl	8	85%	1-11	13. 2
125	NaCl			44-125	6. 1
5	NaCl			4-20	6. 6
6	NH_4N0_3-Urea-Water	4		2-20	1. 5
15	NH_4NO_3-Urea-Water	4		2-20	4. 7
30	NH_4NO_3-Urea-Water	4		2-20	6. 1
5	Calcium Chloride				5.8
5	Sodium Nitrate			5-40	2.0
5	Disodium Phosphate		95%	4 -2 0	7.1
210	AP 384 Microencapsulated urea	45	90%	20-80	16. 6
25	CRL 117 Microencapsulated urea	15	90%	10-60	9.7

المصدر: (Nelson, L.D., & Silverman, B.A., 1972, p 157)

* يمكن حساب معامل تحسن الرؤية من خلال نسبة الرؤية في الضباب الذي تم بذره (الهدف) إلى الرؤية في الضباب الذي لم يتم بذره (الشاهد).(Nelson, L.D., and Silverman, B.A.1972, p157)

يمكن تبديد الضباب فائق البرودة Supercooled Fog باستخدام جزيئات تلعب دور نويات تجمد مثل الجليد الجاف والبروبان السائل، يتم تحرير الجليد الجاف من خلال طائرة تحلق فوق المنطقة التي فيها ضباب (Allaby. M., 2007, p182)، أما البروبان السائل فيتم رشه من الأرض وسرعان ما تتمدد قطيرات البروبان وتتبخر مسببة تجمد المياه وتشكيل بلورات ثلجية. أما الضباب المتجمد Ice Fog فمن الصعب تبديده وحتى الآن لا توجد طريقة عملية ناجعة لتحقيق ذلك.

من مزايا استخدام اليوريا كمادة للزرع فعاليتها ولا تسبب تآكل المعادن، كما أنها غير سامة ومفيدة للحياة النباتية. ولكن اليوريا مادة بلورية ناعمة وقابلة للتفتيت والتكسر لذلك تنتج أعداد كبيرة من الجزيئات ذات الحجم دون الميكرومتر. فيما يتعلق بالمواد الهيجروسكوبية تم التغلب على مشكلة التكتل أثناء التخزين من خلال تكنولوجيا الكبسولة الدقيقة حيث يتم تغليف مادة الزرع بمادة إيثيل السيليلوز ضمن قذائف وبالتالي تضمن السلامة الهيكلية للجسيمات وتقلل من تماسها مع الهواء وامتصاص الرطوبة. تبلغ التكلفة التجريبية لإنتاج الكبسولات الدقيقة من اليوريا حوالي 1.85 دولار للرطل الواحد. (Nelson, L. D., & Silverman, B.A., 1972, p154)، استخدمت FIDO أنابيب معدنية مثقبة وضعت على جانبي مدرج المطار من أجل تحسين الرؤية الأفقية بما فيه الكفاية للسماح للطائرات للتحرك بأمان، ثم تم ضخ بخار البنزين عبرها وإشعالها عند الثقوب، مما أدى إلى انطلاق حرارة شديدة رفعت درجة حرارة نقطة الندى، الأمر الذي أدى إلى تبخر الضباب. وظل معمولاً بتلك الطريقة لمدة سنتين ونصف تقريبا، وخلال تلك الفترة سمح بهبوط 2500 طائرة استهلكت حوالي (102.000 طن) من البنزين أي ما يقارب من 45 طن من الوقود لكل هبوط (Allaby. M., 2007, p182).

2. استخدام مواد الزرع للتخفيف من حدة العواصف المدمرة:

منذ بدء المحاولات الأولى لتعديل الطقس أبدت جميع الدول رغبتها في تعديل الطقس بهدف زيادة الهطل المطري أو تحسين الجريان السطحي أو تبديد الضباب ومكافحة عواصف البرد والأعاصير المدمرة، لكن البعض من تلك الدول اتجه إلى عكس عملية تعديل الطقس واستغلال الفوائد العسكرية الهجومية التي يمكن الحصول عليها من خلال إجراء أبحاث حول زيادة إمكانات البرق وشدته وزيادة الكفاءة الأساسية للعواصف الرعدية، وتطوير طرق

تعديل الخصائص الكهرومغناطيسية وإحداث ضربات صاعقة على الأهداف المطلوبة أثناء مرور العاصفة فوق موقعها.

يتمثل الهدف الرئيس من تعديل العواصف Storms بأمرين اثنين أولهما تقليل الخسائر المادية والبشرية الفادحة التي تسببها وثانيهما لدعم الأهداف العسكرية، إذ تمتلك العاصفة الاستوائية طاقة تعادل 10 آلاف قنبلة هيدروجينية بقوة 1ميغاطن. وما يزيد من قدرتها التدميرية احتوائها على الأمطار الغزيرة، والبرق والبردْ، وكذلك القص الريحي. فقد تسبب إعصار أندرو عام 1992 في تدمير قاعدة هومستيد Homestead الجوية بولاية فلوريدا جنوب شرق الولايات المتحدة بالكامل، وأسفر عن أضرار بقيمة 15.5 مليار دولار. كما تجلى خطر العواصف الرعدية بوضوح في عام 1985 عندما تحطمت طائرة كبيرة مما أسفر عن مقتل 137 شخصًا بعد تعرضهم لمقصات رياح شديدة الانفجار أثناء عاصفة مطرية (House, J. T. Et al, 1996, p18). ومن هنا كان للإدخال الدقيق لمواد الزرع إلى سحب الركام المزني Cb أثر في مكافحة عواصف البَرَد وتقليل آثارها، كما يمكن الاستفادة من كمية الأمطار الغزيرة المصاحبة لسحب الركام في إمكانية إدارة المياه في الأحواض ذات الأهمية المحلية.

الأداء البيئي لمواد الزرع:

تم دراسة الأثر البيئي المحتمل لمواد الزرع في عدد من الدول المنفذة لمشاريع تعديل الطقس، وتحديداً مادة **يوديد الفضة** المستخدمة لزرع السحب الباردة، حيث أوضح تقرير أعده Ryan (2005) في جنوب كاليفورنيا حول السمية المحتملة ليوديد الفضة وخلص التقرير إلى أن تركيز الفضة المثالي في مياه الأمطار أو الثلج من السحابة المبذورة (<0.1 mg/l)، كما أوضحت وكالة حماية البيئة (EPA*) أن تركيز الفضة في مياه الشرب لا يتجاوز 0.10 مليجرام/ل. حتى أن العديد من المناطق تحتوي في تربتها على تركيز أعلى بكثير من الفضة مقارنة بما هو موجود في السحب المبذورة. كما أن انبعاثات المصانع من الفضة تعادل 100 مرة تلك الموجودة في الغلاف الجوي وتركيز اليود في ملح الطعام المؤيّد أعلى بكثير من التركيز الموجود في مياه الأمطار من السحب المبذورة. وإذا ما افترضنا أن تأثير هذه المواد تراكمي، فقد تم اختبار تلك الإحصائيات لمدة تتراوح بين 30 إلى 40 عاماً،

*Environmental Protection Agency (EPA).

كما أن تركيز الفضة في مياه الأمطار أو الثلج أقل بمقدار 1000 مرة من معيار وكالة حماية البيئة (EPA) (Ryan, T., 2005, p34). أما مادة الزرع المستخدمة في الزرع الهيجروسكوبي (ملح الطعام، الماء، كلوريد البوتاسيوم وغيرها) لم يسجل لها أي تأثير سلبي يذكر. أما طريقة **التأيين السحابي** فهي من أكثر طرق الزرع المستدامة التي لا تشكل خطراً على البيئة كونها تقلل من كثافة الهباء الجوي.

الجدوى الاقتصادية لتعديل الطقس من خلال زرع السحب:

أسهمت عمليات تعديل الطقس (زرع السحب) في تحقيق نتائج إيجابية في مختلف دول العالم، وانعكس ذلك بصورة مباشرة على الحياة الاقتصادية، وبشكلٍ خاص على القطاع الزراعي، فأعمال زرع السحب كما أسلفنا سابقاً كانت في جلها إما بهدف زيادة الوارد المائي وتبديد الضباب أو مكافحة البرد وتقليل آثاره على المحاصيل الزراعية، وقد قدم مشروع داكوتا الشمالية لتعديل الطقس(NDCMP) تقييماً لأعمال الزرع لمدة (50) عاماً، واستند التقييم إلى سيناريوهين للزيادة المطرية (5% و10%) وجاءت النتائج إيجابية، فقد قدرت الزيادة في إنتاجية المحاصيل الزراعية بـ4.8 مليون دولار سنوياً في سيناريو الزيادة المطرية بنسبة 5%، بينما قدرت الزيادة في إنتاجية المحاصيل الزراعية بمقدار 16 مليون دولار في سيناريو الزيادة المطرية بنسبة 10%. كما أسهمت عمليات مكافحة عواصف البردْ في تحقيق إنتاج زراعي بمقدار 3.7 مليون دولار، وقد أسهم ذلك في زيادة العوائد الاقتصادية بمقدار25 مليون دولار والذي بدوره أدى إل زيادة الناتج الإجمالي بمقدار 37 مليون دولار (Langerud, D.,2009,p18). كما كان لعمليات تعديل الطقس في العديد من الدول دوراً هاماً في تقليل حجم الخسائر البشرية والمادية على حدٍ سواء.

فيما يتعلق **بالأداء الاقتصادي** لمادة يوديد الفضة في سورية فقد تبين من خلال ربط الزيادة المطرية بإنتاجية محصول القمح البعل، فلو كان سعر الكيلو غرام الواحد من القمح يعادل (80) ليرة سورية فرضاً فهذا يعني أنَّ قيمة الزيادة وصلت إلى (5.4) مليار ليرة سورية. أي أنَّ تكلفة المتر المكعب الواحد من المطر الهاطل بفعل الاستمطار المستخدم في إنتاجية القمح تساوي (0.5) ليرة سورية* وهذا أرخص بكثير من أي وسيلة أخرى يمكن

* تم حسابها على أساس قيمة العملة الرائجة أثناء فترة تنفيذ الزرع ما بين عامي (1991-2010).

اللجوء إليها لتأمين الاحتياجات المائية لهذا المحصول إذا ما قورنت بالوسائل المتبعة في الدول العربية (تحلية مياه البحر). كما تبين من خلال تقييم أعمال زرع السحب في سورية إيجابيتها على الإنتاج الزراعي، إذ بلغ متوسط الزيادة المطرية 2.68 مليار م^3، وبلغ متوسط الزيادة في غلة القمح البعل بمقدار 72.4 كغ/هـ، كما بلغ متوسط الزيادة في الإنتاجية 67.3 ألف طن/هـ (فياض، 2015، ص159).

كذلك فإن تبديد الضباب له آثار اقتصادية وبشرية عديدة فهو يسهم في تقليل الخسائر البشرية جراء الحوادث المرورية، ويضمن عدم تعطيل الملاحة الجوية والبرية وبالتالي استمرار الأنشطة داخلياً وخارجياً وتحقيق قيمة مضافة ووفورات اقتصادية. والحال ذاته بالنسبة للبردْ والعواصف، فإن مكافحتها باستخدام مواد زرع السحب يسهم في تقليل الخسائر لاسيما على الإنتاج الزراعي الأكثر تضرراً وهشاشة. يتم تقدير تكاليف برامج تعديل الطقس وبشكل خاص زرع السحب على أساس قيمة الماء والتي تتباين مكانياً وزمنياً حسب الحاجة إليها، كما تتباين حسب طريقة الزرع وحسب مواد الزرع المستخدمة، فمثلاً قيمة المياه لأغراض الزراعة في ولاية كاليفورنيا تتراوح ما بين (40–50) دولار أمريكي/الفدان، لترتفع إلى (175) دولار أمريكي/ الفدان في أثناء فترات الجفاف، ولأغراض الطاقة الكهرومائية حوالي (100) دولار / الفدان، ولأغراض الصناعة حوالي (300–600) دولار أمريكي/ الفدان (Hunter, S. M., 2007, p24). وهذا ما يحيلنا إلى ما تم ذكره سابقاً عن تكلفة الفرصة البديلة وبالتالي يجب اختيار مادة الزرع التي تعطي فعالية أكبر لزيادة حجم الوارد المائي بما يتناسب مع إمكانيات كل دولة ومدى حاجتها للمياه.

النتائج:

1. تبين من خلال المقارنة بين مواد الزرع أن مادة يوديد الفضة أكثرها فعالية من حيث إنتاج أكبر عدد من نويات التجمد وخلال فاصل زمني قصير جداً (7 دقائق)، لكن كفاءتها منخفضة كون تكلفتها الاقتصادية باهظة، أما الجليد الجاف فهو ذو فعالية جيدة وكفاءة عالية من حيث التكلفة الاقتصادية. وفيما يتعلق بالزرع الهيجروسكوبي كانت طريقة الكبسولة الدقيقة هي الأكثر نجاعة.

2. يمكن أن نعد النانو تكنولوجي طريقة واعدة خلال المستقبل القريب كونها ذات فعالية وكفاءة بآن معاً.
3. وجود علاقة وثيقة بين كثافة إطلاق بيروتكنيك يوديد الفضة (AgI) في سورية مع مجالات النسب المئوية للهطول الفعلي مقارنةً بالمعدل، حيث أدى استخدام يوديد الفضة إلى تحقيق زيادة مطرية قدرت بـ 2.68 مليار م^3، وبذلك تم حساب عدد الطلقات اللازمة تبعاً للمساحة.
4. وجود فعالية لاستخدام مواد الزرع في تبديد الضباب وخلال فترة زمنية قصيرة من الزرع (4- 10) من الزرع مما يعزز من النشاطات البشرية واستدامتها وعدم عرقلتها.

المقترحات:

1- العمل على تحسين خصائص مواد الزرع بغية زيادة فاعليتها في السحب والاستفادة من تقنيات الذكاء الاصطناعي لتحسين وضبط أدائها.
2- إجراء المزيد من الأبحاث التجريبية لفهم آلية تفاعل المحرضات مع مكونات السحب وتحديد الظروف المثلى للزرع بما يتلاءم مع المتغيرات الجوية المختلفة.
3- تحديد معايير زرع السحب القابلة للاستمطار من خلال استخدام النمذجة السحابية.
4- القيام بعمليات زرع السحب بطرق جديدة يمكن أن تحقق جدوى اقتصادية مثل طائرة بدون طيار.

المصادر والمراجع:

أولاً: المراجع العربية:

- الشريف، رباب محمود، (2023)، **مفهوم النانو تكنولوجي وتطبيقاتها**، مجلة أكاديمية ناصر العسكرية للدراسات العليا، العدد الثاني، يوليو، مصر.
- عباس، علي، (1998)، **دراسة إمكانية زيادة الهاطل المطري في سورية عن طريق زرع الغيوم**، أطروحة دكتوراه، ملخص باللغة العربية، موسكو، روسيا.
- فياض، ريم امير، (2015)، **الاستمطار وإنتاجيّة الأراضي من المحاصيل الرئيسة في المناطق شبه الجافة وشبه الرطبة السوريّة**، رسالة ماجستير، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية.
- فياض، ريم امير، (2019)، **خصائص السحب الملائمة للاستمطار في سورية**، أطروحة دكتوراه (غير منشورة)، قسم الجغرافيا، كلية الآداب، جامعة دمشق، سورية.
- ميا، علي، (2007)، **أساسيات الإدارة (1)**، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية.
- وزارة الزراعة والإصلاح الزراعي، مشروع الاستمطار، تقارير مشروع الاستمطار في سورية ما بين عامي (1991– 2010)، تقارير غير منشورة، دمشق، سورية.

ثانياً: المراجع الأجنبية:

- Allaby, M., (2007), **Encyclopedia of Weather and Climate**, 2nd edition, New York.
- Berthoumieu, J. ,(2003), **Socio-economic and environment aspects of precipitation**, WMP Rep. No. 42, WMO /TD No. 1277. Vol. 1.
- Bojkov, R. D.,(2003), **process for planning and implementation of a Precipitation Enhancement Project (PEP)**, WMP Rep. No. 42, WMO /TD No. 1277. Vol. 1.
- Chernikov, A. A., et Melnichuk, Yu. v .,(2003), **Scientific Weather Modification**. **Environmental Structure and Function: Climate System**, Encyclopedia of life support System (EOLSS) vol. I, Moscow.

- Ghate, V. P., Albrecht, B. A., Kollias. P., Jonsson, H. H., and Breed D. W., (2007), **Cloud seeding as a technique for studying aerosol-cloud interactions in marine stratocumulu.** The American Geophysical Union, Vol. 34 , L14807, USA.
- Griffith, D.A. & M.E. Solak (2006), **The Potential use of Winter Cloud seeding Programs to Augment the Flow of the Colorado River**. North American Weather Consultants, Inc., Sandy, UT. Prepared for the Upper Colorado River Commission.
- Haryanto, U. R. D. Goenawan, & D. Harsanti, (2010), **The Development of hygroscopic Cloud seeding flare in Indonesia**: Evaluation and measurement of distribution particles, Jakarta, Indonesia.
- House J. T., James, B., Shields B. W., Celentano, J.R., Husband, M. D., Mercer, E. A., Pugh E. J., (1996), **Weather as a Force Multiplier Owning the Weather in 2025**, A Research Paper Presented To Air Force 2025, USA.
- Hunter, S. M., (2007), **Optimizing Cloud Seeding For Water and Energy in California,** California Energy Commission, USA.
- Jamali, J. B., Javanmard, S., Fukuta, N., Noorian, A. M., 2003, **Improved Numerical Modeling of Rethit and Filas in LC Seeding based on Field Experiment over North Kyushu island(Japan)**, WMP Rep. No. 39. WMO /TD -No. 1146., Geneva, Switzerland.
- Nelson, L.D., and Silverman, B.A., (1972), **Optimization of Warm-Cloud Seeding Agents by Microencapsulation Techniques**. Air Force Cambridge Research Laboratories, Bedford, Mass.
- Nishiyama, K., Fukuta, N., & Wakimizu, K.,(2003), **microphysical and dynamical evaluation of radar reflectivity in Lolepshin seeded cloud**, WMP Rep. No. 39. WMO /TD -No. 1146., Geneva, Switzerland.
- Ryan, T., (2005), **Weather Modification for Precipitation Augmentation and its Potential Usefulness to the Colorado River Basin States**. Metropolitan Water District of Southern California Report.

- Seto, H., Bahri, S., Widodo, H., Mulyana E., Harsoyo B., and Karmini M., **Weather Modification for Rain Reduction- A Conceptual Design**, Weather Modification Technology Center, Agency for the Assessment and Application of Technology BPPT 1st building 19th floor, Jl. M. H. Thamrin no.8, Jakarta, Indonesia.
- WMO, (2010), **Documents on Weather Modification**. "Executive Summary of The WMO Statement on Weather Modification", Updated in the meeting of the Expert Team on Weather Modification Research, 22-24 March, Abu Dhabi,UAE.
- Woodley, W. L., and Rosenfeld, D. (2010), **Evaluation of the Effectiveness of Cloud Seeding in Texas from 2002 through 2006**, Journal of Applied Meteorology, USA.
- Zou, L., (2019), **Using Nanotechnology to Accelerate the Water Condensation nucleation and growth for Rain Enhancement**, project final report from 2016- 2019, UAE research program for rain enhancement science, national centre of meteorology & seismology, Abu Dhabi, UAE.