

أمير حسين خدائي - باحث

التحول المذهل في الطقس: من الحلم إلى الواقع

هل تساءلتم يوماً كيف سيكون شكل العالم لو تمكن الإنسان، بمجرد الضغط على زر، من جعل المطر يهطل في المكان الذي يريده؟ ربما تبدو هذه الفكرة أقرب إلى قصص الخيال العلمي منها إلى العلم، لكن الحقيقة أن البشرية تحاول القيام بذلك منذ عقود، أحياناً بنجاحات محدودة وأحياناً بنتائج مثيرة للجدل. واليوم، تشارك أكثر من خمسين دولة حول العالم، بطريقة أو بأخرى، في هذه التكنولوجيا، فيما تتوسع حدود المعرفة في هذا المجال يوماً بعد يوم. إلا أن ما أحدث تحولاً غير مسبوق في هذا المجال خلال السنوات الأخيرة هو دخول الذكاء الاصطناعي والتقنيات الحديثة إليه، وهو تحول يحول عملية استمطار السحب من فن قائم على الخبرة إلى علم دقيق قائم على البيانات. وهذه الرحلة الحافلة بالتقلبات، من التجارب الأولية إلى المشاريع الوطنية الضخمة، قصة تستحق التوقف عندها، وسنتناولها فيما يلي.

الطرق التقليدية: استمطار السحب

أبسط وأشهر طريقة لتعديل الطقس هي استمطار السحب، وهي تقنية موجودة منذ أربعينيات القرن الماضي. في هذه الطريقة، تُحقن مواد مثل يوديد الفضة أو الثلج الجاف (ثاني أكسيد الكربون المجمد) داخل السحب الباردة (دون الصفر المئوي) باستخدام الطائرات أو الطائرات المسيّرة أو الصواريخ أو المدافع الخاصة، بهدف تكوين بلورات جليدية اصطناعية وإحداث المطر أو الثلج. ويمتلك يوديد الفضة بنية بلورية شبيهة بالجليد، ومن دون الحاجة إلى تبريد البيئة، فإنه يؤدي إلى تجمد قطرات السحب فائقة التبريد.

أما بالنسبة للسحب الدافئة (فوق الصفر المئوي)، فتستخدم مواد مثل ملح الطعام (كلوريد الصوديوم)، وكلوريد البوتاسيوم، وكلوريد الكالسيوم، أو اليوريا. ومن خلال امتصاص الرطوبة، تساعد هذه المواد على تكوين قطرات أكبر وتسريع هطول الأمطار. وتشمل طرق نشر هذه المواد مولدات أرضية، وشعلات جوية، وصواريخ تحمل مواد الاستمطار.

وينبغي الانتباه إلى أن زيادة هطول الأمطار تختلف عن صناعة المطر. فاستمطار السحب لا يكون فعالاً إلا عندما تكون هناك سحب مهيأة أصلاً للهطول. وبعبارة أخرى، يشبه دوره إضافة الملح إلى الطعام، وليس خلق الطعام من العدم. وتشير الأدلة العلمية إلى أن هذه الطريقة يمكنها، في أفضل الأحوال، زيادة الهطول بنحو ١ إلى ١٠ في المئة، فيما تعتمد فعاليتها بدرجة كبيرة على الظروف الجوية ونوع السحب. كما أكدت المنظمة العالمية للأرصاد الجوية (WMO)، ٢٠٢٠ (في تقريرها أن استمطار السحب يمكن أن يكون فعالاً في ظروف محددة ومع الالتزام الدقيق بالبروتوكولات).

تفريق الضباب

من التطبيقات التشغيلية الأخرى لاستمطار السحب إزالة الضباب في المطارات والطرق السريعة. ففي حالات الضباب فائق التبريد، يتم تكوين بلورات جليدية اصطناعية باستخدام يوديد الفضة أو الثلج الجاف، فتستهلك قطرات الضباب الدقيقة ويتحسن مدى الرؤية. وتستخدم هذه الطريقة في العديد من مطارات العالم، وتعد من أنجح تطبيقات هندسة السحب.

الحد من البرد

من خلال حقن مواد الاستمطار داخل السحب المنتجة للبرد، يزداد عدد نوى الجليد. ويؤدي ذلك إلى تشكل عدد أكبر من حبات البرد الأصغر حجماً، والتي تذوب قبل وصولها إلى الأرض. وتستخدم هذه الطريقة على نطاق واسع في دول مثل الصين والولايات المتحدة وروسيا، وقد أظهرت التجارب في داكوتا الشمالية أن الاستمطار كان فعالاً في الحد من البرد في نحو ٢٠.٨ في المئة من الحالات.

ثورة الذكاء الاصطناعي في تعديل الطقس

ربما يكون أهم تطور خلال العقد الأخير في مجال هندسة السحب هو دخول الذكاء الاصطناعي إلى هذا المجال. فالذكاء الاصطناعي لم يعد مجرد أداة مساعدة، بل بدأ يتحول إلى العقل المدبر لعمليات استمطار السحب. ولكن ماذا يفعل الذكاء الاصطناعي تحديداً؟

التنبؤ الدقيق بمكان وزمان الاستمطار

كان التحدى التقليدى فى استمطار السحب يتمثل فى تحديد السحابة المناسبة للاستهداف والوقت المناسب لذلك. ولسنوات طويلة، كان الطيارون والخبراء يتخذون قراراتهم استناداً إلى الخبرة وصور الأقمار الصناعية. أما اليوم، فتستطيع أنظمة الذكاء الاصطناعى تحليل بيانات الأقمار الصناعية والرادارات ونماذج الطقس وحتى البيانات التاريخية فى الوقت نفسه، بما يتيح لها التنبؤ بموقع الاستمطار بدقة غير مسبوقة. وفى الإمارات العربية المتحدة، يستطيع نظام للذكاء الاصطناعى التنبؤ بالموقع المناسب للاستمطار قبل ست ساعات. وهذا يعنى أنه بدلاً من الرحلات التجريبية، يمكن تنفيذ العمليات بهدف محدد بدقة.

زيادة دقة نماذج الطقس

تستخدم شركة الذكاء الاصطناعى Atmo نماذج للتعليم العميق مدربة على أكثر من ٦٠ عاماً من البيانات المناخية، وقد طورت نماذج للطقس يُقال إنها أكثر دقة بما يصل إلى ١٠٠ مرة وأسرع بـ ٤٠,٠٠٠ مرة من أجهزة الحاسوب العملاقة التقليدية. وهذا يعنى أن التنبؤ بحالة السحب وتحديد أفضل وقت لتنفيذ العمليات يمكن أن يتم بسرعة ودقة لم تكن ممكنة من قبل.

التقييم الفورى للفعالية

من أكبر التحديات فى استمطار السحب الإجابة عن سؤال: هل كان المطر الذى هطل نتيجة للعمليات أم ظاهرة طبيعية؟ ويمكن للذكاء الاصطناعى تحليل بيانات رادارات الاستقطاب المزدوج، التى تستطيع التمييز بين المطر والبرد والثلج والجليد وحتى الحشرات، ومقارنتها بنماذج التنبؤ، لقياس تأثير العملية فى الوقت الحقيقى.

خفض التكاليف والرحلات غير الضرورية

مع زيادة دقة التنبؤ، يمكن تقليل عدد رحلات الاستمطار التى لا تحقق نتائج بدرجة كبيرة. وهذا يعنى توفيراً كبيراً فى الوقود والتكاليف والوقت.

وفى نوفمبر ٢٠٢٥، عقدت المنظمة العالمية للأرصاد الجوية (WMO) مؤتمرها العلمى الحادى عشر، الذى ركز على دور الذكاء الاصطناعى فى تعديل الطقس. وشارك فى المؤتمر أكثر من ٢٢٠ عالماً، وتمثلت الموضوعات الرئيسية فى استخدام الذكاء الاصطناعى والطائرات المسيّرة لدعم اتخاذ القرارات الفورية فى عمليات استمطار

السحب، وانتقال هذا المجال من سؤال «هل ينجح تعديل الطقس؟» إلى سؤال «كيف يمكن دمجه في الأنظمة التشغيلية؟».

التقنيات الحديثة: من الطائرات المسيّرة إلى الليزر والبلازما والمواد النانوية

يشهد عالم تعديل الطقس تطوراً سريعاً، وتحل التقنيات الأكثر تقدماً تدريجياً محل الأساليب التقليدية.

الطائرات المسيّرة المخصصة للاستمطار

أحدثت الطائرات المسيّرة، بفضل قدرتها العالية على المناورة وانخفاض تكلفتها وقدرتها على الطيران في الظروف الصعبة، ثورة في عمليات استمطار السحب. وقد طورت شركة Rainmaker طائرة مسيّرة يقل وزنها عن ٢٥ كيلوغراماً وقادرة على الطيران في ظروف التجمد الشديد. ويمكن لهذه الطائرات العمل ضمن مجموعات والتنسيق باستخدام الذكاء الاصطناعي. وفي مارس ٢٠٢٥، نفذت الصين عملية واسعة النطاق لاستمطار السحب في شمال البلاد باستخدام أسطول من ٣٠ طائرة وطائرة مسيّرة، أسفرت عن زيادة بنسبة ٢٠ في المئة في هطول الأمطار في المنطقة المستهدفة.

الليزر فائق القصر

يستخدم علماء من جامعة جنيف ومراكز بحثية في الإمارات نبضات الليزر لإنشاء قنوات بلازمية في الهواء تعمل مثل صواعق مجهرية، وتحفز عملية تشكل المطر. ولا تتطلب هذه الطريقة استخدام مواد كيميائية، وهي حالياً في مرحلة الاختبارات الميدانية.

الموجات الصوتية

وهي طريقة غير كيميائية ومنخفضة التكلفة تستخدم الموجات الصوتية للتأثير في توزيع الهطول، ويتم تطبيقها في المناطق الجافة وشبه الجافة لتحسين موارد المياه.

الاستمطار بالبلازما والشحنة الكهربائية

أظهرت الدراسات المخبرية أن البلازما عند الضغط الجوي يمكن أن تزيد من تشكل نوى تكاثف السحب عدة مرات. كما يجري في الإمارات اختبار طائرات مسيّرة مجهزة بأنظمة تفريغ كهربائي لإرسال شحنات كهربائية إلى داخل السحب وتحفيز تكوّن قطرات المطر.

المواد النانوية

من أهم المخاوف المتعلقة باستمطار السحب التأثيرات البيئية ليوديد الفضة. وفي عام ٢٠٢٥، طور باحثون مركباً نانوباً متوافقاً حيويّاً يتم تنشيطه باستخدام الموجات الميكروية والليزر، ويمكنه إنتاج ما يصل إلى **1.18 × 10¹⁴ جسيم من مادة الاستمطار الفعالة لكل غرام.**

كما تعمل البروفيسورة ليندا زو من جامعة فيكتوريا في أستراليا، بدعم تمويلي قدره **1.5 مليون دولار من برنامج بحثي إماراتي**، على تطوير مواد نانوية متقدمة مصممة خصيصاً لتكوين بلورات الجليد داخل السحب. ويمكن لهذه المواد أن توفر بدائل أكثر فعالية وتوافقاً مع البيئة ليوديد الفضة.

الاستخدامات العسكرية: عندما يصبح الطقس سلاحاً

قد يبدو الأمر غير قابل للتصديق، لكن تاريخ تعديل الطقس لأغراض عسكرية يكاد يكون قديماً قدم هذه التكنولوجيا نفسها. وتُعد عملية «بوب آي» خلال حرب فيتنام أبرز وأكثر المشاريع العسكرية توثيقاً في هذا المجال. وبين عامي ١٩٦٧ و١٩٧٢، نفذت القوات الجوية الأمريكية أكثر من ٢٦ ألف طلعة وأسقطت ٤٧٤ مليون قنبلة استمطار، مستهدفة السحب فوق منطقة طريق هو تشي منه، بهدف إطالة موسم الأمطار الموسمية لمدة تصل إلى ٤٥ يوماً وتحويل طرق إمداد العدو إلى مستنقعات يتعذر عبورها. وتظهر الوثائق التاريخية أن المشروع نُفذ بدعم من أعلى المسؤولين، بمن فيهم الرئيس ليندون جونسون ووزير الخارجية هنري كيسنجر.

بالإضافة إلى ذلك، سعت البحرية الأمريكية من خلال مشروع «ستورمفوري» (١٩٦٢-١٩٨٣) إلى إضعاف العواصف البحرية، إلا أن الأبحاث اللاحقة أظهرت محدودية نجاح هذه الطريقة بسبب وجود كميات كبيرة من الجليد الطبيعي داخل العواصف. كما بحث مشروع «كومولوس» البريطاني في خمسينيات القرن الماضي تأثير استمطار السحب على زيادة الأمطار لأغراض عسكرية.

وقد أدت هذه الإجراءات والمخاوف من نشوب حروب مناخية إلى اعتماد اتفاقية حظر استخدام تقنيات تعديل البيئة لأغراض عسكرية أو عدائية أخرى (ENMOD) عام ١٩٧٦. وتحظر المعاهدة الاستخدام العدائي لتقنيات تعديل البيئة التي تكون لها آثار واسعة النطاق أو طويلة الأمد أو شديدة. كما تضع الاتفاقية صراحةً تغيير أنماط الطقس، بما في ذلك السحب والهطول والعواصف، ضمن نطاق الحظر. ووفقاً لأبحاث قانونية حديثة، قد تتمتع هذه الاتفاقية بإمكانات تطبيق أوسع مما كان يُعتقد سابقاً، ويمكن أن تسهم في حماية البيئة من الأضرار المتعمدة التي تلحقها الدول، ولا سيما أثناء النزاعات المسلحة.

التحديات التي تواجه المنشآت المائية في إيران: من الحرب المفروضة إلى الحروب الأخيرة

خلال الحرب الإيرانية العراقية (١٩٨٠-١٩٨٨)، تعرضت المنشآت المائية في مناطق مختلفة من البلاد لأضرار كبيرة. ففي محافظة خوزستان، شهدت المدن الحدودية، ومنها آبادان وخرمشهر ودزفول، تدميراً واسعاً لشبكات إمدادات المياه. كما تعرضت شبكات المياه الريفية والحضرية في محافظتي لرستان وكرمانشاه لأضرار كبيرة.

لكن خلال الحروب الأخيرة (٢٠٢٥-٢٠٢٦)، ارتفعت التهديدات إلى مستوى غير مسبوق. فمنذ أواخر فبراير ٢٠٢٦، استهدفت هجمات جوية وإلكترونية مشتركة أمريكية وإسرائيلية بشكل منهجي عشرات منشآت نقل المياه ومعالجتها. وفي يونيو ٢٠٢٥، قصفت مقاتلات إسرائيلية خطأ رئيسياً لنقل المياه في طهران، ما أدى إلى تدفق المياه في الشوارع. كما تعرضت محطة لتحلية المياه في جزيرة قشم لاضطرابات، وقدمت إيران شكوى رسمية إلى اليونسكو. وفي الوقت نفسه، أثرت هجمات إلكترونية واسعة النطاق على أكثر من ٨٠ ألف موقع، بينما شنت إسرائيل، رداً على هجمات إلكترونية إيرانية، هجوماً مضاداً على ميناء الشهيد رجائي. وفي ٢٢ مارس ٢٠٢٦، هددت إيران بأنه في حال تعرض منشآتها للطاقة لهجوم، فإنها ستهاجم محطات تحلية المياه في منطقة الخليج العربي بأكملها. وتُظهر هذه الأحداث أن التهديدات العسكرية للمياه أصبحت بُعداً جديداً ومقلقاً من الصراعات الإقليمية الرامية إلى خفض قدرة السكان على الصمود، حيث لم تعد المنشآت المائية هدفاً ثانوياً، بل أصبحت إحدى الأهداف الرئيسية في ساحة المعركة.

مشاريع ناجحة حول العالم: من الصين إلى الإمارات

على مدى عقود، نُفذت مشاريع عديدة في مناطق مختلفة من العالم بدرجات متفاوتة من النجاح، وتحولت بعض هذه المشاريع إلى نماذج لافقتة:

تمتلك الصين أكبر برنامج لتعديل الطقس في العالم. وفي عام ٢٠٢٣، استخدم أسطول من الطائرات المسيّرة في شينجيانغ كيلوغراماً واحداً فقط من يوديد الفضة، ما أدى إلى زيادة هطول الأمطار بأكثر من ٤٪ خلال يوم واحد في منطقة تبلغ مساحتها ٨ آلاف كيلومتر مربع، وإنتاج أكثر من ٧٠ ألف متر مكعب من الأمطار الإضافية. وفي عام ٢٠٢٤، نفذت مقاطعة شينجيانغ ١٢٣ رحلة ونحو ٥ آلاف عملية أرضية، ونجحت في زيادة كمية الهطول بمقدار ١٤,٤١ مليار متر مكعب. وفي مارس ٢٠٢٥، نفذت الصين أيضاً عملية لاستحداث أمطار الربيع في شمال البلاد باستخدام أسطول من ٣٠ طائرة وطائرة مسيّرة. وخلال دورة الألعاب الأولمبية في بكين عام ٢٠٠٨، نجحت عمليات تفريق الأمطار في منع هطولها أثناء مراسم الافتتاح.

وتحولت دولة الإمارات العربية المتحدة، بفضل برنامجها الواسع لاستمطار السحب منذ أوائل العقد الأول من القرن الحادي والعشرين، إلى إحدى أبرز التجارب الناجحة في زيادة هطول الأمطار في المناطق الجافة. وينفذ البرنامج مئات رحلات الاستمطار سنوياً، وتشير التقارير إلى زيادة تتراوح بين ١٠ و ٣٠٪ في هطول الأمطار في بعض المناطق. وفي عام ٢٠٢٥، أطلقت الإمارات ثلاثة مشاريع بحثية جديدة، بتمويل قدره ١,٥ مليون دولار لكل مشروع، ضمن الدورة الرابعة لبرنامجها البحثي لتعزيز الأمطار، وجميعها تركز على الذكاء الاصطناعي. كما بدأت اختبار نظام ليزر عالي الطاقة لإحداث الأمطار في الظروف الجافة.

ولدى الولايات المتحدة تاريخ طويل ومتنوع في هذا المجال. فقد استخدمت ولايات مثل كولورادو ويوتا وكاليفورنيا استمطار السحب لعقود من أجل زيادة تساقط الثلوج في المناطق الجبلية. كما شكلت شركتا Rainmaker و Atmo في عام ٢٠٢٥ شراكة استراتيجية لتطوير منصة عالية الدقة لتعديل الطقس.

وشهدت المملكة العربية السعودية قفزة ملحوظة في هطول الأمطار. وأظهرت دراسة في منطقة الباحة أن عمليات الاستمطار في أغسطس رفعت عدد الأيام الممطرة من ١,٨٧ يوم إلى ٢٥ يوماً، ورفعت حجم الهطول إلى ٥٨٥٪.

وفي إندونيسيا (٢٠١٩)، أدت عمليات استمطار السحب في جاكارتا إلى خفض شدة هطول الأمطار بنسبة ٣٨٪. وتواصل تايلاند مشروعها الملكي لصناعة الأمطار منذ ستينيات القرن الماضي. كما وضعت اليابان مشروعاً طموحاً تحت عنوان «أهداف مون شوت» يشمل حتى التحكم في الأعاصير.

وفي عام ٢٠٢٥، أجرت الهند أول تجربة لاستمطار السحب باستخدام طائرة مسيرة في جايبور، واستخدمت منصة الذكاء الاصطناعي Hydro Trace لتحديد السحب المناسبة.

ومع ذلك، تُظهر تجربة دول مثل إسرائيل، التي أوقفت برنامجها عام ٢٠٢١ بسبب عدم تحقيق نجاح ملحوظ، أن هذه التكنولوجيا ليست حلاً سحرياً، وأن نجاحها يعتمد بدرجة كبيرة على الظروف الجوية والإقليمية.

الوضع المائي الحرج في إيران ودروس الدول ذات المناخ المماثل

بمتوسط هطول سنوي يبلغ نحو ٢٥٠ ملم، تُعد إيران من أكثر دول العالم جفافاً. ويعادل هذا المعدل نحو ثلث المتوسط العالمي (منظمة الأرصاد الجوية الإيرانية، ٢٠٢٣). ووفقاً لتقرير للبنك الدولي (٢٠٢٣)، تقع إيران ضمن ٣٦ دولة تعاني من إجهاد مائي مرتفع. ووفقاً لإحصاءات وزارة الطاقة الإيرانية، يبلغ استهلاك المياه في إيران نحو ٢,٥ مليار متر مكعب يومياً، ويُستهلك أكثر من ٩٢٪ منه في القطاع الزراعي. وتبلغ كفاءة الري في إيران نحو ٣٥-٤٠٪، بينما تتجاوز ٧٠٪ في الدول المتقدمة (FAO)، ٢٠٢٢. (كما ارتفع متوسط درجة الحرارة في إيران بنحو ١,٥ درجة مئوية خلال العقود الأخيرة).

واتخذت إيران أيضاً خطوات مهمة عام ٢٠٢٥ في مجال الطائرات المسيرة المخصصة لاستمطار السحب. وأعلنت وزارة الطاقة بدء تصنيع طائرات مسيرة متخصصة في الاستمطار قادرة على زيادة الهطول بنسبة ١٥-٢٠٪. وتُعد هذه الطائرات مبتكرة على المستوى العالمي، وتعمل بالتنسيق مع الطائرات والمعدات الأرضية. كما تم تحديد أربع مناطق عمليات للاستمطار خلال الأسبوع الجاري.

وفي هذا السياق، اكتسبت الدول ذات المناخ المشابه لإيران خبرات قيمة في إدارة المياه. فقد استثمرت الإمارات العربية المتحدة، بمتوسط هطول سنوي يقل عن ١٠٠ ملم، بشكل كبير في تقنيات تحلية المياه وإعادة تدويرها. كما ضمنت المملكة العربية السعودية، من خلال الاستثمار في تقنيات المياه، جزءاً من أمنها الغذائي (FAO)، ٢٠٢٢. (وتُعد إسرائيل من الدول الرائدة عالمياً من الناحية العلمية في إدارة المياه، إذ تتجاوز كفاءة الري فيها ٩٠٪، كما تتم معالجة وإعادة تدوير نحو ٩٠٪ من مياه الصرف الصحي (البنك الدولي، ٢٠٢٣)).

التقنيات المحلية لإدارة المياه في إيران

خطت إيران خلال السنوات الأخيرة خطوات مهمة في تطوير التقنيات المرتبطة بإدارة المياه. ووفقاً لتقرير صادر عن وكالة الفضاء الإيرانية، يمكن استخدام أقمار رصد (٢٠١١) ذات القدرة على التصوير عالي الدقة، وقمر «پیام» (٢٠١٨) للاتصالات، وقمر «دوستی» (٢٠١٩) الذي طُوِّر بالتعاون مع الصين، في مراقبة التغيرات في مستويات مياه البحيرات، ومراقبة رطوبة التربة، وتقييم الغطاء النباتي. كما تمتلك إيران أكثر من ١٥٠٠ محطة أرصاد جوية، تشمل المحطات السينوبتيكية والمناخية ومحطات قياس الأمطار ومحطات علم المناخ. كذلك تم تطوير أنظمة للإنذار بالفيضانات والجفاف في إيران، بما في ذلك شبكات رادارات الطقس، وأنظمة مراقبة الأنهار، ومراقبة الجفاف، وأنظمة الإنذار بالفيضانات.

ماذا سيكون عليه المستقبل؟

نظراً إلى التقدم الملحوظ، فإن مستقبل تعديل الطقس يبدو مثيراً للغة، وفي الوقت نفسه يحمل تحذيرات. وتقوم الحكومات ومراكز الأبحاث بدراسة التقنيات المحلية والإقليمية.

الآتمة الكاملة للعمليات: يمكن أن يؤدي الجمع بين الذكاء الاصطناعي والطائرات المسيرة ذاتية القيادة وأنظمة التقييم في الوقت الحقيقي إلى عمليات تلقى سحب مؤتمتة بالكامل. وقد تناول المؤتمر الحادي عشر للمنظمة العالمية للأرصاد الجوية (WMO) في نوفمبر ٢٠٢٥ صراحةً الأنشطة شبه الذاتية في مجال تعديل الطقس.

الطائرات المسيّرة الجماعية: يعمل الباحثون على تطوير أساطيل من الطائرات المسيّرة ذاتية التشغيل التي تعمل بصورة جماعية ومنسقة. ويسهم هذا النهج في حل القيود المتعلقة بحمولة كل طائرة مسيّرة، ويزيد بدرجة كبيرة من دقة العمليات.

هندسة المناخ بالذكاء الاصطناعي: إلى جانب تلقيح السحب، يستخدم الباحثون التعلم المعزز للتحكم في توزيع تركيز الجسيمات في طبقة الستراتوسفير بهدف الحد من الاحتباس الحراري العالمي. كما طرح إيلون ماسك في عام ٢٠٢٥ فكرة مثيرة للجدل لاستخدام أقمار صناعية مزودة بالذكاء الاصطناعي لتقليل الإشعاع الشمسي ومواجهة الاحتباس الحراري العالمي.

التحكم في الأعاصير المدارية: تسعى اليابان، من خلال مشروع «أهداف مون شوت»، إلى التحكم في الأعاصير المدارية، فيما يدرس العلماء أساليب نظرية مثل «جوجيتسو الطقس»، التي يمكن من خلالها، عبر تدخلات صغيرة وفي الوقت المناسب في الغلاف الجوي، تغيير مسارات العواصف.

الهندسة الجيولوجية والمخاطر الأمنية: إن تقنيات هندسة المناخ، مثل حقن الهباء الجوي في طبقة الستراتوسفير (SAI)، وعلى الرغم من إمكانية تنفيذها تقنيًا وإتاحتها للعديد من الدول، لا تخضع تقريبًا لأي إطار حوكمة عالمي ينظم هذه الأنشطة. وهذا الأمر يخلق دوافع لاتخاذ إجراءات أحادية الجانب يمكن أن تؤدي إلى نزاعات مسلحة. ويحذر الباحثون من أن الدول قد تعتبر إجراءات SAI الأحادية تهديدًا لأمنها القومي. كما يمكن لسيناريوهات غير مثالية، مثل عمليات النشر التنافسية أو الخبيثة، أن تترتب عليها تداعيات سياسية وثقافية لا يمكن التنبؤ بها. وعلى المستوى الدولي، فإن المعاهدات القائمة، مثل اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ (UNFCCC) واتفاق باريس، لا تتناول عمليًا إدارة الإشعاع الشمسي (SRM)، ولا تزال الحوكمة في هذا المجال مجزأة وناقصة بدرجة كبيرة.

ومن المنظور العسكري والأمني، يحذر الخبراء من أنه مع توسع هذه التقنيات، قد نشهد نوعًا من الحرب الباردة المناخية. وتحاول الأمم المتحدة منع مثل هذه السيناريوهات من خلال وضع قواعد أكثر وضوحًا، إلا أن الثغرات القانونية القائمة تفرض تحديات كبيرة أمام هذه الجهود.

نظرة على نظريات المؤامرة: هارب (HAARP) والأسلحة المناخية

إلى جانب الحقائق العلمية، يشهد عالم نظريات المؤامرة المرتبطة بتعديل الطقس نشاطًا واسعًا. ويُعد مشروع هارب (HAARP) في ألاسكا، وهو منشأة بحثية لدراسة الأيونوسفير (الطبقة العليا من الغلاف الجوي)، هدفًا مستمرًا لهذه النظريات. ويعتقد كثيرون أن هارب قادر على إحداث الزلازل أو موجات الحر أو الفيضانات. إلا أن العلماء أعلنوا مرارًا أنه لا توجد آلية معروفة تتيح لهارب التأثير في الظواهر الجوية. فالطقس يتشكل في طبقة التروبوسفير (من ٠ إلى ١٥ كيلومترًا)، بينما يؤثر هارب في الأيونوسفير (من ٦٠ إلى ٥٠٠ كيلومتر)، وهاتان الطبقتان منفصلتان تمامًا. وتبلغ القدرة الخارجة لهارب نحو ٣,٦ ميغاواط، وهي أقل حتى من قدرة توربين رياح كبير (٥ ميغاواط).

ومن المفاهيم الأخرى الشائعة في نظريات المؤامرة «رش الكيمتريل»، الذي يزعم أن خطوط التكاثف التي تتركها الطائرات تحتوي على مواد كيميائية. وقد رفض العلماء هذا الادعاء أيضًا بشكل كامل. فخطوط التكاثف ظاهرة طبيعية تمامًا تنتج عن تفاعل بخار الماء الخارج من محركات الطائرات مع الهواء البارد في الطبقات العليا من الغلاف الجوي، وتتكون من بلورات الجليد، وليس من مواد كيميائية.

الإطار القانوني والأخلاقي: حدود الاستخدام

يُعد الإطار القانوني والأخلاقي أحد أهم جوانب تعديل الطقس الاصطناعي. وتُعد اتفاقية حظر استخدام تقنيات تعديل البيئة لأغراض عسكرية أو لأي أغراض عدائية أخرى (ENMOD)، ١٩٧٦ (أهم وثيقة دولية في هذا المجال، وهي تحظر الاستخدام العدائي لتقنيات تعديل البيئة. كما ترتبط اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ (UNFCCC) واتفاق

باريس بهذا الموضوع بصورة غير مباشرة. وإيران عضو في اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ، وقد صادقت على اتفاق باريس عام ٢٠١٦.

وفي عام ٢٠٢٦، اعتمدت الجمعية العامة للأمم المتحدة قرارًا ينص على أن تقصير الدول في الوفاء بالتزاماتها المناخية يمكن أن يُعد فعلًا غير مشروع دوليًا. وقد اعتمد القرار بأغلبية ١٤١ صوتًا مقابل ٨ أصوات معارضة، ويمكن أن يوفر أساسًا قانونيًا لملاحقة الدول التي تتسبب إجراءاتها المتعلقة بالطقس في إلحاق الضرر بدول أخرى.

وفي داخل إيران، يعتبر المبدأ ٥٠ من الدستور حماية البيئة واجبًا على الحكومة، بينما تحدد قوانين مثل قانون التوزيع العادل للمياه (١٩٨٢) وقانون حماية واستغلال الموارد المائية (٢٠١٣) الأطر القانونية لإدارة المياه.

ومع ذلك، لا تزال هناك ثغرات خطيرة في الإطار الدولي. فالتمييز بين الاستخدام السلمي والاستخدام العدائي لم يُعرّف بوضوح. كما أن القوات المسلحة في الدول معفاة من الإبلاغ عن انبعاثاتها الكربونية، وهو ما يمثل بحد ذاته ثغرة كبيرة في مجال المناخ، إذ تُنسب نحو ٥ إلى ٦ في المائة من إجمالي الانبعاثات العالمية إلى الأنشطة العسكرية. كما أن العديد من الدول الرئيسية ليست أطرافًا في اتفاقية حظر استخدام تقنيات تعديل البيئة لأغراض عسكرية أو لأي أغراض عدائية أخرى (ENMOD).

الحكومة الذكية للمياه: هندسة الإرادة الوطنية، من البيانات إلى الحياة

إن هندسة إيران الذكية للمياه والمناخ ليست مجرد بناء هيكل تكنولوجي من أجهزة الاستشعار والأقمار الصناعية، بل هي فلسفة جديدة للحكومة تثبت روح الإرادة الجماعية في هذا الجسد. وتمثل هذه الرؤية نهاية عصر اتخاذ القرارات المركزية وبداية عصر الحكومة متعددة المراكز؛ أوركسترا وطنية ديناميكية تعترف فيها الحكومة والجامعات والقطاع الخاص والمجتمعات المحلية جميعًا مستقبل المياه بلغة واحدة ونوتة مشتركة، هي البيانات الدقيقة والشفافة.

ويستلهم هذا النموذج أفكاره من الإدارة المتكاملة في إسرائيل، والاكتفاء الذاتي المطلق في سنغافورة، ومجالس المياه المحلية في هولندا، ويعيد السلطة من المركز إلى المواطنين أنفسهم. وفي هذا النظام البيئي، لم تعد المعلومات مجرد تقرير محفوظ في الأرشيف، بل أصبحت محركًا اقتصاديًا يحول التحذير من الجفاف إلى فرصة للمزارع الذكي.

وهكذا، فإن إضافة روح الحكومة التشاركية هذه إلى الهيكل التكنولوجي تحوله إلى كيان حي وذكي وقابل للتكيف وموّلد للثروة، قادر على ضمان النبض الحيوي لهذه الأرض لأجيال قادمة.

الخلاصة النهائية: من العلم إلى السياسة

لم يعد تعديل الطقس اصطناعيًا حلمًا أو تهديدًا سينمائيًا، بل أصبح حقيقة علمية تتطور بسرعة. وتمتلك التقنيات الحالية، مثل تلقيح السحب، فعالية محدودة ولكنها حقيقية، وقد أظهرت المشاريع الناجحة في الصين والإمارات والولايات المتحدة أن هذه التكنولوجيا يمكن أن تعمل كأداة تكميلية قيّمة لإدارة الموارد المائية والحد من الكوارث الطبيعية.

لكن أهم تحول في هذا المجال يتمثل في دخول الذكاء الاصطناعي. فمن خلال التنبؤ الأكثر دقة بزمان التلقيح، والتقييم الفوري لفعالية العمليات، وخفض التكاليف غير الضرورية، يتحول الذكاء الاصطناعي إلى العقل المدبر لعمليات تلقيح السحب.

وقد نقلت التقنيات الحديثة، مثل الطائرات المسيّرة ذاتية القيادة (مع إمكانية الطيران الجماعي)، والمواد النانوية (كبدائل صديقة للبيئة ليوديد الفضة)، والليزر فائق القصر، والبلازما، والرادارات ثنائية الاستقطاب، وبمساعدة الذكاء الاصطناعي، دقة العمليات وكفاءتها إلى مستوى غير مسبوق. كما اتخذت إيران خطوات في هذا الاتجاه من خلال إنتاج طائرات مسيّرة لتلقيح السحب، مع استهداف زيادة في هطول الأمطار بنسبة ١٥ إلى ٢٠ في المائة.

وتواجه إيران أزمة مياه عميقة وتغيرات مناخية. فمع متوسط هطول سنوي يبلغ ٢٥٠ ملمترًا، وانخفاض كفاءة الري (٣٥-٤٠ في المائة)، وارتفاع درجة الحرارة بمقدار ١,٥ درجة، تُعد البلاد من بين ٣٦ دولة تعاني من إجهاد مائي مرتفع. وتُظهر تجارب الدول ذات المناخات المشابهة أن الاستثمار في التقنيات الحديثة لإدارة المياه، وتحسين كفاءة الري، وتطوير أنظمة إعادة تدوير المياه، يمكن أن يوفر حلولاً لهذه الأزمة.

لكن الأهم من القدرات التقنية هو الأسئلة الأخلاقية والقانونية والأمنية التي تقف أمامنا: من يقرر تغيير الطقس؟ وكيف يمكن منع إساءة الاستخدام العسكري لهذه التكنولوجيا؟ وهل سيعود تعديل الطقس بالنفع على البشرية جمعاء، أم سيكون على حساب إلحاق الضرر بالآخرين؟

يمثل الإطار القانوني القائم، بدءًا من اتفاقية ENMOD وصولاً إلى قرار الأمم المتحدة لعام ٢٠٢٦، خطوات في الاتجاه الصحيح، إلا أن ثغرات خطيرة، مثل التعريف الغامض للاستخدام العدائي وعدم عضوية العديد من الدول في المعاهدات الرئيسية، لا تزال تمثل تحديات كبيرة. وفي عالم أصبح فيه تغير المناخ أحد أكبر التحديات التي تواجه البشرية، يمكن أن تكون القدرة على تغيير الطقس منقذة للحياة ومدمرة في الوقت نفسه، وعلينا نحن أن نختار كيفية استخدام هذه القوة.

المصادر والمراجع الموثوقة

١. الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ. (2021). (IPCC) تغير المناخ ٢٠٢١: الأساس العلمي الفيزيائي.
٢. البنك الدولي. (2023). (World Bank) الأمن المائي في الشرق الأوسط.
٣. منظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة. (2022). (FAO) حالة الأغذية والزراعة في الشرق الأدنى.
٤. المنظمة العالمية للأرصاد الجوية. (2020). (WMO) تقييم تعديل الطقس.
٥. المنظمة العالمية للأرصاد الجوية. (2025). (WMO) تشكيل مستقبل تعديل الطقس: العلم والمسؤولية والتعاون العالمي.
٦. منظمة الأرصاد الجوية الإيرانية. (1402/2023) تقرير الوضع المناخي في إيران.
٧. وزارة الطاقة الإيرانية. (1402/2023). الكتاب الإحصائي السنوي لقطاع المياه.
٨. الأمم المتحدة – المياه. (2023). (UN-Water) تقرير التنمية العالمية للمياه.
٩. برنامج الأمم المتحدة الإنمائي. (2023). (UNDP) تغير المناخ والأمن في الشرق الأوسط.
١٠. المعهد الدولي للدراسات الاستراتيجية. (2023). (IISS)
١١. مركز أبحاث المياه الإماراتي. (2023). (EWRC)
١٢. وكالة الفضاء الإيرانية. (1402/2023) تقرير أداء أقمار الاستشعار عن بُعد.
١٣. منظمة إدارة الأزمات الوطنية. (1402/2023) تقرير أنظمة الإنذار المبكر.
١٤. برنامج الإمارات لبحوث علوم الاستمطار. (2025-2026). (UAERP) المشاريع البحثية للدورة السادسة.
١٥. مارتن، سي. ومور، إس. (2025). حروب الهندسة الجيولوجية والحوكمة الجوية. مجلة هارفارد للقانون الدولي، المجلد ٦٦، العدد ١، الصفحات ٧٧-١٥٢.
١٦. مكلارين، دي. (2025). إنه ليس الطقس، أيها الأحمق!؛ دراسة السيناريوهات غير المثالية لتطوير الهندسة الجيولوجية الشمسية. الأخلاق والشؤون الدولية.
١٧. جاروز، جي. (2024). عملاق نائم؟ اتفاقية ENMOD باعتبارها قيدًا على الأضرار البيئية المتعمدة في النزاعات المسلحة وما بعدها. المجلة الأمريكية للقانون الدولي، المجلد ١١٨، العدد ٣، الصفحات ٤٦٨-٥١١.