مؤسسة دبي للمستقبل
DUBAI FUTURE FOUNDATION

مستقبل الطاقة

الطاقة الشمسية الفضائية

أكتوبر 2025

DUBAIFUTURE.AE

عند الاقتباس من التقرير، يُرجى إضافة التالي:

مؤسسة دبي للمستقبل (2025). «مستقبل الطاقة: الطاقة الشمسية الفضائية».
www.dubaifuture.ae/the-future-of-enery-solar

الفهـــرس

	الملخص التنفيذي	5
1	الطاقة الشمسية الفضائية: حل استراتيجي لتحديات الطاقة والمناخ	6
2	القيمة الاستراتيجية للطاقة الشمسية الفضائية	8
3	لماذا الآن؟ خلفيات الاهتمام العالمي بالطاقة الشمسية الفضائية	13
4	جاهزية الطاقة الشمسية الفضائية... أين وصلنا اليوم؟	16
5	السباق العالمي نحو الطاقة الشمسية الفضائية	22
6	خارطة طريق نحو التوسع التجاري للطاقة الشمسية الفضائية	28
7	مرتكزات القرار الاستراتيجي في سياسات الطاقة الشمسية الفضائية	31
	الخاتمة	33
	شكر وتقدير	34
	المراجع	35
	نبذة عن مؤسسة دبي للمستقبل	38
	إخلاء مسؤولية	39

الملخص التنفيذي

في ظل تزايد الطلب العالمي على الطاقة، تكتسب تقنيات الطاقة الشمسية الفضائية اهتماماً متزايداً من الحكومات، باعتبارها أحد الحلول الواعدة لتلبية احتياجات الطاقة في المستقبل. وتعتمد هذه التقنية على جمع الطاقة الشمسية خارج الغلاف الجوي للأرض، ثم نقلها لاسلكياً إلى المحطات الأرضية. وتشير تقديرات وكالة الفضاء الأوروبية إلى أنّ قمراً صناعياً شمسيّاً واحداً قادر على توليد نحو 2 جيجاواط من الطاقة المستمرة، أي ما يعادل إنتاج محطة نووية تقليدية.[1]

ومع تصاعد التحديات العالمية المرتبطة بالطاقة واستمرار نمو الطلب عليها، شرعت العديد من الدول والمناطق، مثل أوروبا، في استكشاف تقنيات الطاقة الشمسية الفضائية واتخاذ خطوات عملية لتطويرها. كما تعمل دول أخرى، من بينها الصين واليابان والمملكة المتحدة والولايات المتحدة الأمريكية، إلى جانب جهات رائدة في القطاع الخاص، على تعزيز جهود البحث والتطوير وإجراء التجارب العملية في هذا المجال. وتشمل الخطط الحالية تنفيذ تجارب مدارية على مستوى الكيلوواط خلال السنوات الخمس المقبلة (2025–2030) في كل من اليابان والولايات المتحدة والصين، يعقبها إنشاء محطات تجريبية على مستوى الميجاواط خلال العقد التالي (2030–2035)، وصولاً إلى إطلاق أول قمر صناعي تجاري على مستوى الجيجاواط في غضون 15 إلى 25 عاماً (2040–2050).

وتتألف منظومة الطاقة الشمسية الفضائية من خمسة مكونات رئيسية: أنظمة الإطلاق، ومنصات التجميع في المدار، وتقنيات التقاط الطاقة الشمسية، وأنظمة نقل الطاقة لاسلكياً، ومحطات الاستقبال الأرضية. ومع التقدم السريع في مجالات الذكاء الاصطناعي، وتقنيات الألواح الشمسية، وعلوم المواد، والصواريخ القابلة لإعادة الاستخدام، وتقنيات نقل الطاقة لاسلكياً، تتزايد فرص تحويل هذه الرؤية الطموحة إلى واقع ملموس خلال العقود المقبلة.

وانطلاقاً من هذه المعطيات، يركّز هذا التقرير على تحليل المشهد الحالي لتقنية الطاقة الشمسية الفضائية، واستكشاف إمكاناتها في تلبية الطلب العالمي المتزايد على الطاقة، وتقييم دورها المحتمل في دعم الجهود الدولية لإزالة الكربون. كما يسلط الضوء على دوافع الاهتمام العالمي المتنامي بهذه التقنية، ويقيّم مدى جاهزية مكوناتها الأساسية استناداً إلى مقابلات مع نخبة من الخبراء. ويستعرض كذلك أبرز السياسات والمبادرات الحكومية الدولية، موضحاً الاعتبارات الاستراتيجية التي ينبغي على صنّاع القرار مراعاتها عند دراسة فرص هذه التكنولوجيا المستقبلية.

ومع تسارع استهلاك الطاقة في مختلف القطاعات عالمياً، يمثّل إنشاء محطات تجريبية للطاقة الشمسية الفضائية في المدار خطوة مفصلية نحو توفير مصدر طاقة نظيف ومستدام، قادر على إحداث تحوّل جذري في المشهد العالمي للطاقة.

1 الطـاقة الشمسية الفضـائية: حـل اسـتراتيجـي لتحـديات الطـاقة والمناخ

في ظل تكثيف الدول جهودها للبحث عن مصادر طاقة قابلة للتوسع، تتسارع وتيرة السباق العالمي على الطاقة وسط تقلبات مستمرة في الأسواق، ونمو متسارع في الصناعات كثيفة الاستهلاك، إلى جانب الالتزامات الدولية بتحقيق أهداف صافي الانبعاثات الصفري. وقد بات صنّاع السياسات أكثر قناعة بأن الاعتماد على مصادر الطاقة التقليدية لم يعد خياراً مستداماً، لا من الناحية الاقتصادية ولا البيئية.

ورغم أن مصادر الطاقة البديلة، مثل الطاقة الحرارية الأرضية، والطاقة الكهرومائية، والطاقة النووية، والطاقة الشمسية الكهروضوئية، وطاقة الرياح، أثارت في بداياتها موجة من التفاؤل وجذبت استثمارات ضخمة، فإن التجربة العملية أظهرت استمرار وجود تحديات جوهرية، خاصة على صعيد قابلية التوسع، وكفاءة تخزين الطاقة، ونقلها على نطاق واسع.[2]

في هذا السياق، برزت الطاقة الشمسية الفضائية كأحد الحلول الواعدة التي استقطبت اهتمام الحكومات حول العالم لتلبية احتياجات الطاقة المستقبلية. وتعتمد هذه التقنية على جمع الطاقة الشمسية خارج الغلاف الجوي للأرض، ثم نقلها لاسلكياً إلى المحطات الأرضية. ورغم أن الفكرة تبدو طموحة للغاية، فإنها في جوهرها تقوم على توسيع نطاق تطبيق تقنيات قائمة بالفعل، دون الحاجة إلى تحقيق اختراقات علمية جديدة.[3] والجدير بالذكر أن الوكالة الوطنية للملاحة الجوية والفضاء (ناسا) كانت قد درست هذا المفهوم لأول مرة في سبعينات القرن الماضي، وخلصت إلى أنه ممكن تقنياً آنذاك رغم ارتفاع التكاليف بشكل كبير.[4] أما اليوم، ومع التقدم التكنولوجي الكبير والانخفاض الحاد في تكاليف الإطلاق الفضائي،[5] فقد أصبحت الجدوى الاقتصادية لتقنيات الطاقة الشمسية الفضائية أكثر واقعية، مما أسهم في خلق زخم غير مسبوق لهذا القطاع الناشئ. ولذلك، تتسابق الحكومات ورواد الأعمال حول العالم لتطوير تقنيات الطاقة الشمسية الفضائية، فيما أطلقت وكالات فضاء في كل من الصين وأوروبا واليابان والمملكة المتحدة والولايات المتحدة الأمريكية مبادرات واسعة النطاق لدعم هذا المجال. وقد أُعلن بالفعل عن عدة مراحل إنجاز مهمة مقرّر تنفيذها خلال الأعوام القليلة المقبلة، من بينها تجارب لوكالة الفضاء اليابانية والقوات الجوية الأمريكية المزمعة في عام 2025 [a]، تليها تجارب تخطّط الصين لإجرائها في عام 2026،[6,7] ثم مبادرات القطاع الخاص من شركات مثل "سبيس سولار" (Space Solar) و"فيرتوس سوليس" (Virtus Solis) التي يتوقع انطلاقها بحلول عام 2027.[8] وإذا نجحت هذه الجهود في تحقيق النتائج المرجوة منها وفقاً للخطط الموضوعة، سيتم إرسال محطات تجريبية متعددة الميجاواط إلى المدار خلال السنوات الخمسة القادمة.

الطاقة الشمسية الفضائية كفرصة مستقبلية

الشكوك

التعاون

الطبيعة

الاتجاهات السائدة

الحدود الطاقية **للاتجاهات الكبرى**

التعاون الدولي

المواد الجديدة

صافي الانبعاثات الصفري

اقتصاد الفضاء

الاتصال المتقدم بالشبكة

التكنولوجيا

تقنيات الفضاء

تقنيات الاستشعار

الجيل القادم من الطاقة

القطاعات المتأثرة

السيارات، الفضاء والطيران

الطاقة، النفط والغاز، والطاقة المتجددة

الخدمات المالية والاستثمار

البنية التحتية والإنشاءات

المرافق

الكلمات المفتاحية

الطاقة

الأقمار الصناعية

الخلايا الكهروضوئية الشمسية

الفضاء

النقل

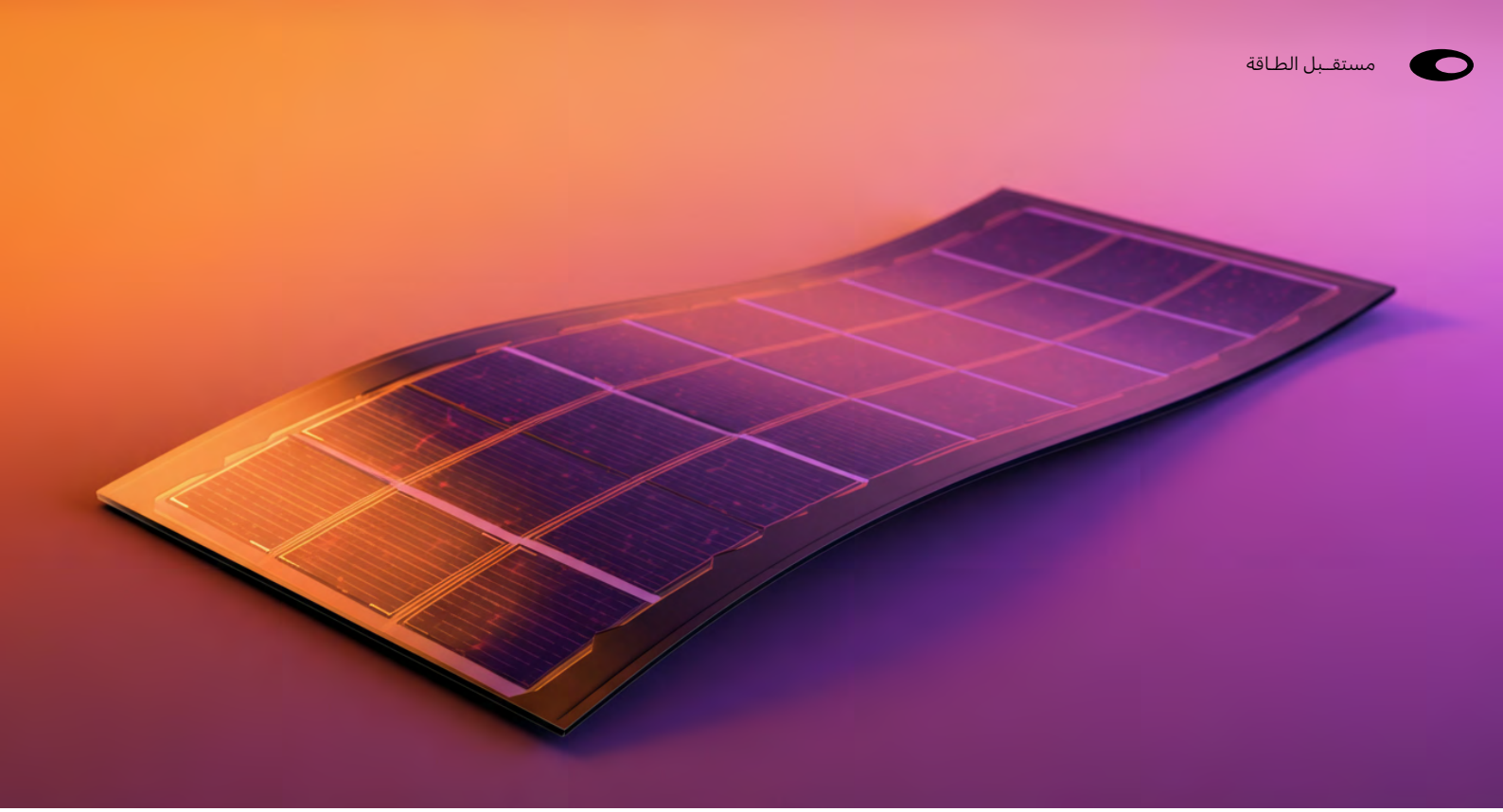
[a] استناداً إلى أحدث المعلومات المتاحة للجمهور وقت النشر.

الشكـل 1
أبـرز التحـديات أمـام التوسـع في مصـادر الطـاقة المتجـدّدة

يُعزى الزخم المتسارع الذي تشهده مبادرات الطاقة الشمسية الفضائية إلى تزايد التركيز العالمي على سياسات إزالة الكربون وتحقيق أهداف صافي الانبعاثات الصفري. فباعتبار أن قطاع الطاقة هو المصدر الأكبر للانبعاثات الكربونية عالمياً، أصبح تقليص بصمته الكربونية من الأولويات القصوى.[9] وفي هذا السياق، يُجمع الخبراء على أن المسار الأمثل لإزالة الكربون يكمن في التحوّل التدريجي نحو الاعتماد الكامل على الكهرباء، شريطة أن تكون من مصادر طاقة نظيفة ومتجددة بنسبة 100%. ووفقاً لهذا التوجه، من المتوقع أن يتضاعف الطلب العالمي على الكهرباء ثلاث مرات تقريباً بحلول عام 2050، ليصل إلى نحو 70,000 تيراواط/ الساعة سنوياً، مع اعتماد نحو 90% منها على مصادر الطاقة المتجددة. ورغم التوسع المستمر في قدرات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح التي تسهم اليوم بما يقارب 10% من إجمالي إنتاج الكهرباء عالمياً، قد لا تكون هذه المصادر — إلى جانب الطاقة الكهرومائية، والطاقة الحرارية الأرضية، والوقود الحيوي — كافية سوى لتلبية ثلثي الاحتياجات الكهربائية المستقبلية. من هنا، تبرز أهمية تبني حلول بديلة واسعة النطاق، على رأسها الطاقة الشمسية الفضائية، كخيار استراتيجي واعد وموثوق لدعم المسار العالمي نحو نظام طاقة منخفض الكربون.[10]

2

القيمة الاستراتيجية للطاقة الشمسية الفضائية



تتميّز الطاقة الشمسية الفضائية بقدرتها على توفير مصدر طاقة نظيف ومستدام وغير محدود. وبفضل موقع الأقمار الصناعية الأقرب نسبياً إلى الشمس، فإن جمع الطاقة في الفضاء يتم بكفاءة أعلى بكثير مقارنة بجمعها على سطح الأرض. كما تتجاوز هذه التقنية القيود الطبيعية، مثل تعاقب الليل والنهار والتقلبات الموسمية، ولا تتأثر بالظروف المناخية المحلية أو بظاهرة التوهين الجوي، التي تؤدي إلى انخفاض شدة الإشعاع الشمسي أثناء عبوره الغلاف الجوي نتيجة الامتصاص والتبعثر بفعل جزيئاته.[11] ونتيجة لذلك، توفر الطاقة الشمسية الفضائية تدفقاً شمسياً مستمراً وعالي الكثافة (أي كمية الإشعاع الشمسي الوارد لكل وحدة مساحة)، ويمكن التنبؤ به بدقة.[12]

أما من حيث تقنيات التقاط الطاقة، فتُعدّ الطاقة الشمسية الفضائية مصدراً مرشحاً لتوفير طاقة أساسية قابلة للتوسع، أو ما يُعرف بالطاقة المستمرة، بخلاف الطاقة الشمسية أو طاقة الرياح الأرضية التي تتطلب حلول تخزين ضخمة وأنظمة دعم معقدة لتعويض الانقطاعات في الإمداد.[13] وتشكل الطبيعة المتقطعة لمصادر الطاقة المتجددة تحدياً متزايداً لمشغلي أنظمة الطاقة، إذ يصعب الحفاظ على استمرارية الإمداد الكهربائي وضبط استقرار التردد والجهد ضمن الشبكات، خاصةً مع تنامي الاعتماد على هذه المصادر. فعلى سبيل المثال، شهدت دول ومناطق تعتمد بشكل كبير على الطاقة الشمسية وطاقة الرياح – مثل ألمانيا وكاليفورنيا في الولايات المتحدة الأمريكية – حالات متكررة من عدم استقرار الشبكة الكهربائية، اضطرت خلالها الجهات المشغّلة إلى تقليص الإنتاج الفائض.

لذلك، يتطلب دمج معظم مصادر الطاقة المتجددة استثمارات ضخمة في البنية التحتية للشبكات الكهربائية، وأنظمة تخزين الطاقة، بالإضافة إلى تطوير حلول مرنة للتوليد الاحتياطي.[14] ورغم وجود بدائل أخرى لتوليد الطاقة النظيفة، مثل الطاقة الكهرومائية، والانشطار النووي، وبدرجة أقل الطاقة الحرارية الأرضية، وطاقة الأمواج التي يمكن أن توفر إمدادات أساسية للطاقة، إلّا أنّ هذه التقنيات تواجه تحديات جوهرية تحدّ من قدرتها على التوسّع (انظر الشكل 2).

الشكل 2

يواجه توسيع نطاق مصادر الطاقة المتجددة، مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والطاقة الحرارية الأرضية، تحديات تقنية واقتصادية متعددة.

- **التقطع وصعوبة الدمج مع الشبكات الكهربائية:** تعتمد مصادر الطاقة الشمسية وطاقة الرياح على توفر أشعة الشمس أو الرياح لتوليد الكهرباء، ما يجعلها بطبيعتها متقطعة. وتفرض هذه الطبيعة المتغيرة تحديات كبيرة على مشغلي أنظمة الطاقة، خاصة مع تزايد الاعتماد عليها، حيث تصبح المحافظة على استمرارية الإمدادات واستقرار تردد الشبكة وجهدها مهمة أكثر تعقيداً. فعلى سبيل المثال، شهدت دول ومناطق مثل ألمانيا وكاليفورنيا في الولايات المتحدة الأمريكية، التي تشكل فيها هذه المصادر نسبة كبيرة من مزيج الطاقة، حالات متكررة من عدم استقرار الشبكة، اضطرت خلالها الجهات المشغلة إلى تقليص الإنتاج الفائض. ولهذا، يتطلب دمج معظم هذه المصادر في أنظمة الطاقة استثمارات كبيرة في البنية التحتية للشبكات، وأنظمة تخزين الطاقة، بالإضافة إلى تطوير حلول مرنة للتوليد الاحتياطي.[15]

- **القيود الجغرافية:** لا تتوزع موارد الطاقة المتجددة بشكل متساوٍ حول العالم، إذ تُنشأ محطات طاقة الرياح والطاقة الشمسية غالباً في مناطق نائية بعيدة عن مراكز الاستهلاك الرئيسية. أما الطاقة الحرارية الأرضية، فتتطلب مواقع محددة تتميز بتدفقات حرارية عالية، وغالباً ما تقع هذه المواقع قرب حدود الصفائح التكتونية، ما يفرض الحاجة إلى عمليات حفر عميقة ومعقدة.[16] وبالتالي، يصعّب هذا التوزيع الجغرافي غير المتوازن نقل الطاقة من مناطق الإنتاج إلى مناطق الاستهلاك من دون إنشاء شبكات نقل واسعة النطاق.

- **ارتفاع تكاليف رأس المال الأولية:** تتطلب مشاريع البنية التحتية للطاقة المتجددة استثمارات أولية كبيرة. فعلى سبيل المثال، تحتاج محطات الطاقة الحرارية الأرضية تكاليف أولية مرتفعة للغاية لإنجاز عمليات الحفر وتوفير المعدات المتخصصة اللازمة، وهو ما يجعل جذب المستثمرين إليها أكثر صعوبة نظراً لكثافة رأس المال المطلوب وارتفاع مستوى المخاطر.[17] وكذلك، رغم الانخفاض الملحوظ في تكاليف الألواح الشمسية وتوربينات الرياح، ما تزال المشاريع الكبرى بحاجة إلى إنفاق كبير لتطوير المواقع، وربطها بالشبكات الكهربائية، وإنشاء أنظمة فعّالة لتخزين الطاقة. ويُعدّ تأمين التمويل لمثل هذه المشاريع تحدياً إضافياً، لاسيّما في الأسواق التي تفتقر إلى سياسات دعم مستقرة.[18]

- **قيود البنية التحتية لشبكات النقل:** يعتمد التوسع في مشاريع الطاقة المتجددة بشكل كبير على تطوير شبكات نقل الكهرباء. وتشير التقديرات إلى أن نحو 1,500 جيجاواط من مشاريع الطاقة الشمسية وطاقة الرياح المخطط لها عالمياً ما تزال في انتظار ربطها بالشبكات القائمة بسبب محدودية القدرة الاستيعابية لخطوط النقل الحالية.[19] وفي ظل غياب خطوط جديدة تربط بين محطات الإنتاج ومراكز التوزيع، ستبقى هذه المشاريع إما عالقة أو مقيّدة بقدرات إنتاج محدودة.[20]

تواجه مصادر الطاقة المتجددة تحديات تتجاوز انقطاع الإمدادات لتشمل أيضاً تخزين الطاقة (انظر الشكل 3). وهنا، تبرز أهمية الطاقة الشمسية الفضائية التي أثبتت قدرتها على تجاوز هذه العقبات.

الشكل 3
تحديات تخزين الطاقة من مصادر الطاقة المتجددة

تُعد القدرة على تخزين فائض الطاقة الشمسية أو طاقة الرياح عاملاً حاسماً لضمان استقرار الإمدادات، لكنها في الوقت نفسه تمثل إحدى أبرز العقبات أمام توسيع نطاق الاعتماد على هذه المصادر، نظراً لطبيعتها المتقلبة.

- **القيود التقنية:** يقتصر تخزين الطاقة المتجددة حالياً على عدد محدود من التقنيات، مثل التخزين الكهرومائي بالضخ، وتخزين الطاقة باستخدام الهيدروجين، وبطاريات الليثيوم أيون.[22,21] ومع ذلك، تواجه هذه الحلول تحديات خاصة، تشمل القيود الجغرافية، وانخفاض كفاءة التحويل، وصعوبة توفير المواد الخام اللازمة.
- **التكلفة:** ما تزال تكلفة تخزين الطاقة على نطاق واسع مرتفعة للغاية. فعلى الرغم من الانخفاض الكبير في أسعار البطاريات خلال العقد الماضي، يظل نشر كميات كافية منها لدعم الشبكات الكهربائية لساعات أو أيام عدة تحدياً مالياً ضخماً. على سبيل المثال، يُعد مشروع "نوفا باور بنك" في كاليفورنيا أحد أكبر منشآت البطاريات في العالم، وتبلغ تكلفته نحو مليار دولار أمريكي، رغم أن شحنه بالكامل لا يكفي إلا لتزويد نحو 680,000 منزل بالطاقة لمدة تصل إلى أربع ساعات فقط.[24,23]
- **التركيز على التطبيقات قصيرة المدى:** تقتصر معظم حلول التخزين الحالية على سد الفجوات قصيرة المدى، بينما يبقى التخزين طويل الأمد تحدياً قائماً. ولهذا، ما تزال العديد من المناطق تعتمد على محطات الوقود الأحفوري لضمان الإمدادات عند انخفاض إنتاج الطاقة المتجددة أو في حالات الطوارئ.[25]
- **خيارات مستقبلية واعدة قيد التطوير:** رغم التقدم الملحوظ في الأبحاث الهادفة إلى ابتكار حلول جديدة، مثل البطاريات المتدفقة المتقدمة وتقنيات تحويل الطاقة إلى غازات قابلة للتخزين (كالهيدروجين أو الأمونيا)، فإن هذه التقنيات ما تزال في مراحلها التجريبية، ولم تصل بعد إلى مستوى النضج الذي يمكّن من نشرها واعتمادها على نطاق واسع.

أما فيما يتعلق بنقل الطاقة، تمثل الطاقة الشمسية الفضائية خياراً استراتيجياً يمتاز بمرونة عالية في التوزيع، إذ يمكن توجيه الأقمار الصناعية المخصصة لتوليد الطاقة، عند الحاجة، إلى المدار الجغرافي الثابت، ومن هناك إعادة توجيه حزم الطاقة إلى مواقع مختلفة على سطح الأرض بمجرد تعديل اتجاه الإشعاع. وبذلك تصبح هذه الأقمار قادرة على تزويد المستخدمين بالطاقة أينما كانوا، بما في ذلك المناطق النائية غير المتصلة بشبكات الكهرباء، مثل بعض المناطق في أوروبا وأفريقيا، مما يقلل الاعتماد على شبكات النقل التقليدية ذات التكلفة المرتفعة والحساسية العالية (انظر الشكل 4).[26]

الشكل 4
تحديات توسيع نطاق شبكات نقل الطاقة

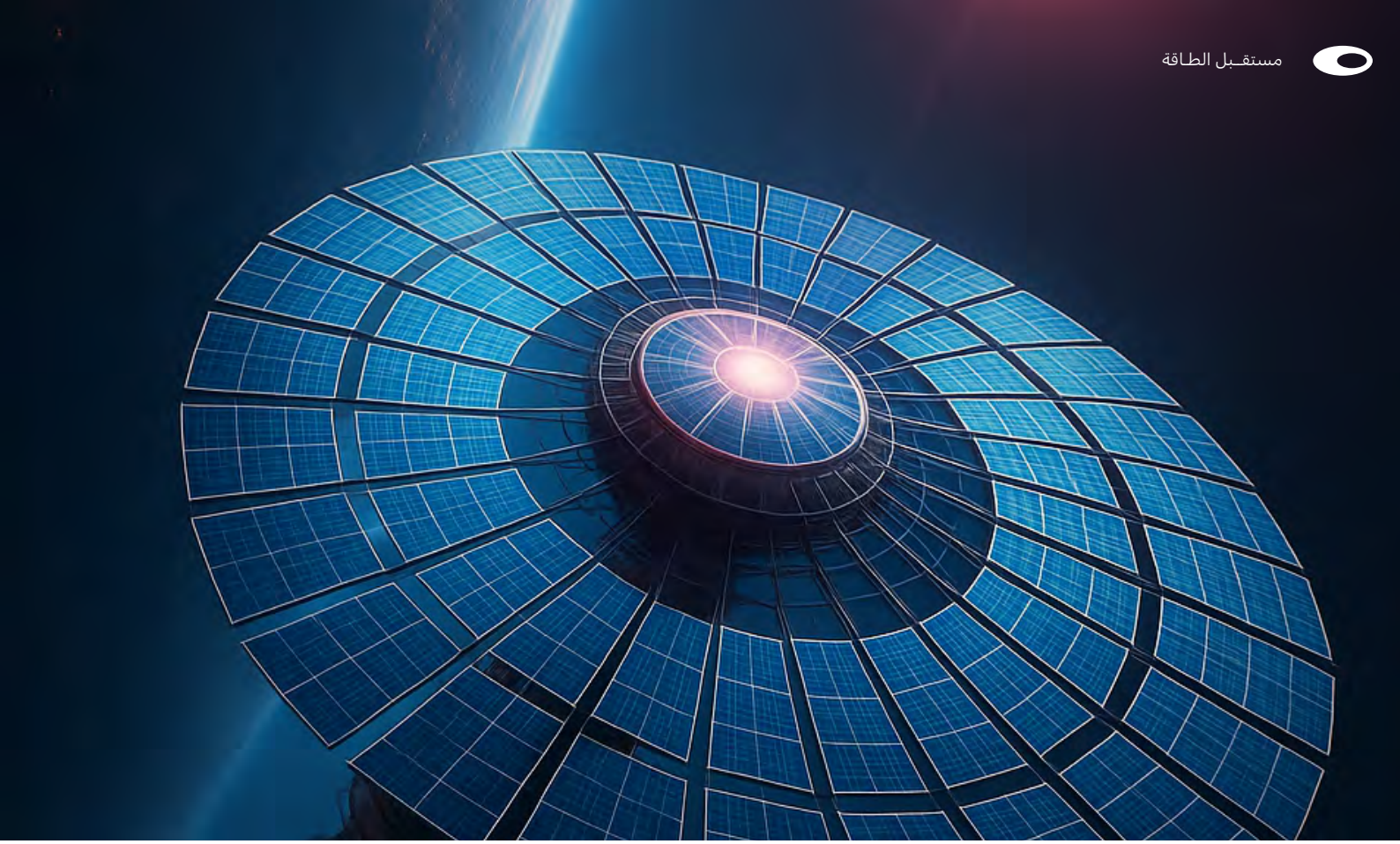
يُعد نقل الطاقة عنصراً محورياً في أنظمة الطاقة المتجددة والتقليدية، إذ يمثل الحلقة الحيوية التي تصل بين مواقع التوليد ومراكز الاستهلاك. ومع ذلك، تواجه جهود توسيع البنية التحتية لشبكات النقل تحديات كبيرة، أبرزها الحاجة إلى استثمارات رأسمالية ضخمة، والفترات الزمنية الطويلة اللازمة لإنشاء خطوط جديدة أو تحديث القائم منها. لذلك، من المتوقع أن يحتل تطوير شبكات النقل موقع الصدارة في سياسات الطاقة خلال العقود المقبلة، نظراً لدوره المباشر في تعزيز استقرار منظومة الطاقة، سواء عبر خفض التكاليف، أو تسهيل إجراءات التصاريح، أو تحديث البنية التحتية المتقادمة.

- **الفجوة الاستثمارية:** تبرز على المستوى العالمي حاجة ملحّة إلى مضاعفة الاستثمارات المخصصة لشبكات النقل والتوزيع، لتتجاوز 600 مليار دولار سنوياً بحلول عام 2030، وذلك لتلبية الطلب المتنامي على الكهرباء ومواكبة التوسع المستمر في مصادر التوليد الجديدة.[27]
- **مرونة الشبكات وإمكانية الاعتماد عليها:** تتزايد المخاوف عالمياً بشأن قدرة شبكات النقل على الصمود أمام الظواهر المناخية القاسية، مثل العواصف وموجات الحر، إذ تشير الدراسات إلى أن معظم حالات الانقطاع الكبرى للكهرباء تعود إلى أعطال في شبكات النقل أو التوزيع، وغالباً ما تكون ناجمة عن الظروف الجوية.[28]
- **التهديدات الأمنية:** تتعرض البنية التحتية لشبكات نقل الطاقة لمخاطر متصاعدة بفعل الهجمات السيبرانية. ومن أبرز الأمثلة على ذلك: الهجوم الإلكتروني الذي استهدف شركات الكهرباء الأوكرانية ومحطاتها الفرعية عام 2015،[29] وهجوم عام 2021 على خط أنابيب "كولونيال" الذي تسبب في توقف مؤقت لإمدادات البنزين على الساحل الشرقي للولايات المتحدة،[30] بالإضافة إلى الهجمات التي طالت محطات الكهرباء الفرعية في ولاية كارولينا الشمالية في الولايات المتحدة الأمريكية عام 2022.[31] ولمواجهة هذه التهديدات، تبرز الحاجة إلى حماية البنية التحتية من خلال إنشاء شبكات احتياطية إضافية، ومدّ مزيد من خطوط النقل تحت الأرض، وتوسيع أنظمة المراقبة.
- **الأثر البيئي:** يتطلب إنشاء خطوط النقل مراعاة الآثار البيئية على المستوى المحلي، إذ قد يؤدي مدّ الخطوط عبر الغابات إلى تفكك المواطن الطبيعية للحيوانات والنباتات، كما قد يسهم سوء إدارة خطوط الكهرباء في اندلاع الحرائق (مثل حرائق غابات كاليفورنيا). ومن هنا، تبرز أهمية تبني ممارسات تشغيلية فعّالة، مثل إدارة الغطاء النباتي أسفل الخطوط، كإجراء أساسي للحد من الأضرار البيئية التي قد تعطل إمدادات الطاقة.

> وفي ضوء هذه التحديات، تبرز تقنية الطاقة الشمسية الفضائية كحل مبتكر قادر على تجاوز القيود التقليدية، وتوفير مصدر طاقة نظيف ومستدام، يعزز استقلالية الدول في بناء مزيج طاقة أمثل ملائم لاحتياجاتها المستقبلية.

3

لمـاذا الآن؟ خـلفيات الاهـتمام العـالمي بالطـاقة الشمسية الفضـائية



رغم أن **مفهوم الطاقة الشمسية الفضائية** ليس جديداً، وقد شكّل محوراً لدراسات أجرتها كبرى وكالات الفضاء العالمية على مدى عقود، فإنه يشهد اليوم زخماً غير مسبوق مدفوعاً باتجاهين عالميين رئيسيين:

1. **التقدم التكنولوجي اللافت** في تقنيات الفضاء، وما رافقه من تحسن في الجدوى الاقتصادية.
2. **الحاجة الملحة إلى مصادر طاقة قابلة للتوسع** قادرة على معالجة تحديات أمن الطاقة، والاستجابة للمخاوف المناخية، والوفاء بالالتزامات الدولية.

وقد أسهم هذان الاتجاهان في إعادة إحياء الاهتمام العالمي بالطاقة الشمسية الفضائية، لتصبح في طليعة مسارات الابتكار في قطاع الطاقة.

من ناحية أخرى، شهد **قطاع إطلاق البعثات الفضائية** تطورات نوعية عززت الجدوى الاقتصادية للطاقة الشمسية الفضائية. فبعد عقود من الاستقرار النسبي في تكاليف الإطلاق منذ سبعينيات القرن الماضي، سجلت الأسعار انخفاضاً حاداً مع إدخال الصواريخ القابلة لإعادة الاستخدام، مثل صاروخ فالكون 9 (Falcon 9) من شركة "سبيس إكس" (SpaceX)، حيث تراجعت التكلفة من نحو 20,000 دولار أمريكي لكل كيلوجرام بين عامي 1970 و2000 إلى قرابة 1,400 دولار أمريكي لكل كيلوجرام في عام 2018 — وهو إنجاز بارز في التغلب على واحدة من أبرز العقبات أمام الجدوى الاقتصادية لهذه التقنية.[32]

ومع اشتداد المنافسة في القطاع الخاص والتطورات التقنية المتسارعة، تشير التقديرات إلى إمكانية استمرار انخفاض التكاليف في المدى القريب. فعلى سبيل المثال، من المتوقع أن تصل تكلفة إطلاق صاروخ فالكون هيفي (Falcon Heavy) من شركة "سبيس إكس" إلى نحو 1,000 دولار أمريكي لكل كيلوجرام.[33]

إلى جانب ذلك، شهدت **تقنيات الألواح الشمسية المخصصة للاستخدام الفضائي** تطوراً نوعياً عزز جدواها الاقتصادية. ففي السابق، كانت الخلايا الشمسية المعتمدة على مواد شبه موصلة مثل زرنيخيد الغاليوم — وهو مركب من عنصري الغاليوم والزرنيخ — **والجرمانيوم،** مرتفعة التكلفة، ما جعل استخدامها على نطاق واسع في مشاريع الطاقة الشمسية الفضائية محدوداً. أما اليوم، فقد أتاح تطوير الخلايا الشمسية المصنوعة من السيليكون المقاوم للإشعاع بدائل أكثر كفاءة واستدامة، قادرة على مقاومة التدهور في بيئة الفضاء القاسية، مع الحفاظ على مستويات أداء عالية. فعلى سبيل المثال، تقدم شركة "سوليستيل" (Solestial)، إحدى أبرز الشركات الخاصة المتخصصة في تصنيع الألواح الشمسية الكهروضوئية المقاومة لظروف الفضاء، حلولاً مبتكرة محصّنة ضد الإشعاع، وبتكلفة تقل بنحو 90% مقارنة بالخلايا الشمسية التقليدية متعددة الوصلات.[34]

كذلك، شهدت تقنية **نقل الطاقة لاسلكياً**، التي تتيح إرسال الطاقة الشمسية المجمعة في الفضاء إلى الأرض، تطورات كبيرة على صعيد الكفاءة، مما أسهم في تعزيز الزخم نحو اعتماد الطاقة الشمسية الفضائية. وبوجه عام، تُعد الموجات الدقيقة (الميكروويف) خياراً آمناً نسبياً، إذ إن تأثيرها على الكائنات الحية محدود ما لم تُوجَّه لفترات طويلة نحو هدف محدد، كما تمتاز بقدرتها على تجاوز العوائق المناخية مثل السحب أو الأمطار أو الضباب. وقد أدت التحسينات في **أجهزة الإرسال والاستقبال** إلى رفع معدلات تحويل التيار المستمر بشكل ملحوظ، حيث تشير الاختبارات الجارية إلى تحسن سريع ومتواصل في أداء هذه التقنية. ومن بين أبرز التجارب الأرضية الحديثة، نفّذ مختبر أبحاث البحرية الأمريكية التابع لوزارة الدفاع الأمريكية عام 2022 تجربة رائدة في مجال نقل الطاقة لاسلكياً، نجح خلالها في إرسال **1.6 كيلوواط** من الطاقة عبر مسافة 1 كيلومتر [35] - وهو إنجاز يُعد الأهم في هذا المجال منذ ما يقارب خمسة عقود.

كما نجحت شركة "إيمرود" (EMROD) في تطوير نظام يجمع بين تقنيات الإرسال والاستقبال،[36] مكّنها من تحقيق كفاءة نقل تصل إلى 95%. في المقابل، تخطط شركة "إيرباص" (Airbus) لتنفيذ تجارب واسعة النطاق عام 2025، بعد أن أثبتت بنجاح فعالية تقنيتها في نقل الطاقة لاسلكياً عام 2022.[37] ومن بين أبرز الإنجازات في هذا المجال، سجّل فريق معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا "كالتيك" عام 2023 سابقة علمية، إذ تمكّن من نقل الطاقة من نموذج أولي لقمر صناعي في المدار إلى جهاز استقبال على سطح الأرض، في خطوة تمثل أول وصول للطاقة الشمسية المرسلة من الفضاء إلى الأرض.[38]

أما على صعيد **مصادر الطاقة القابلة للتوسع**، فتبرز الطاقة الشمسية الفضائية كخيار استراتيجي واعد لتأمين مصدر محلي ومتجدد للطاقة، يعزّز استقلالية الإمدادات ومرونتها في مواجهة الانقطاعات أو المتغيرات الجيوسياسية غير المتوقعة. وتشير مبادرة "الطاقة الفضائية" في المملكة المتحدة إلى إمكانية مساهمة هذه التقنية في تلبية جزء كبير من احتياجات البلاد من الكهرباء عبر الطاقة المرسلة من الفضاء.[39] وفي السياق ذاته، سارعت أوروبا عام 2022 إلى زيادة تمويل برنامجها للطاقة الشمسية الفضائية، ضمن جهودها لتعزيز استقلالية الطاقة وتنويع مصادرها في أعقاب أزمة أوكرانيا.

وتؤدي الشركات العاملة في **مجالات الابتكار والتكنولوجيا** دوراً محورياً في تطوير حلول طاقة قابلة للتوسع، خاصة مع تزايد الطلب على الكهرباء في قطاعات كثيفة الاستهلاك، مثل مراكز البيانات وإنتاج الهيدروجين. وفي ظل المؤشرات على محدودية قدرة الشبكات الكهربائية الحالية على تلبية الاحتياجات المستقبلية، تتجه هذه الشركات إلى التعاون مع مطوري تقنيات الطاقة الشمسية الفضائية لإيجاد حلول مستدامة طويلة المدى.

وبالتوازي، تتسارع وتيرة تطوير **المكوّنات الأساسية للطاقة الشمسية الفضائية** بفضل الزخم المتنامي حول هذه التقنية الثورية، مدفوعاً بالاستثمارات والمبادرات الحكومية والخاصة. وتمثّل جاهزية هذه المكوّنات — من الناحيتين التقنية والتجارية — عاملاً حاسماً لتسريع الانتقال من النماذج التجريبية الحالية إلى محطات تجارية لإنتاج الطاقة الشمسية تعمل على نطاق الجيجاواط.

4

جاهـزية الطـاقة الشمسية الفضـائية... أين وصـلنا اليـوم؟

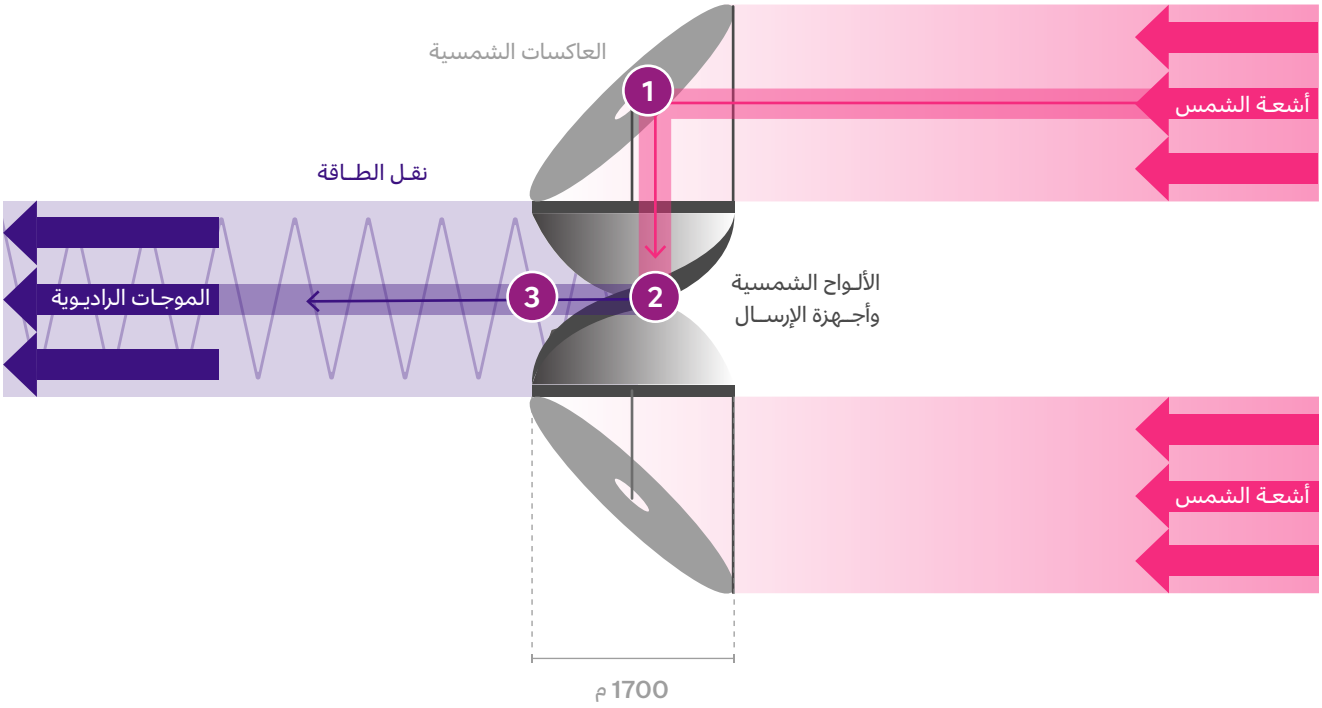
مع استمرار تطوّر تقنيات الطاقة الشمسية الفضائية، سواء بصورة مباشرة أو كنتيجة للتقدّم في مجالات تكنولوجية أخرى، تزداد الحاجة إلى تقييم مستوى الجاهزية التقنية وفهم المشهد الدولي المحيط بهذه المنظومة، لاستشراف السيناريوهات المستقبلية المحتملة. وفي هذا الإطار، يستعرض القسم التالي من التقرير الوضع الحالي للمكوّنات الأساسية لتقنية الطاقة الشمسية الفضائية، ويسلّط الضوء على أبرز المبادرات الدولية التي ترسم مسار تطوّرها.

يعتمد إنتاج الطاقة الشمسية الفضائية على خمس تقنيات متقدمة رئيسية، هي: **إطلاق الصواريخ، والتجميع المداري، والخلايا الشمسية، ونقل الطاقة لاسلكياً، ومحطات الاستقبال الأرضية.** ولكي تصبح هذه المنظومة قابلة للتطبيق على نطاق واسع وبشكل مجدٍ اقتصادياً، يجب أن تكون الطاقة المجمَّعة في الفضاء قادرة على منافسة مصادر الطاقة الأخرى على الأرض من حيث التكلفة. وتجدر الإشارة إلى أن الطاقة الشمسية الفضائية ليست الحل الوحيد المعتمد على استغلال الطاقة الشمسية من الفضاء (انظر الشكل 5)، كما أن مكوّناتها التقنية ما تزال بحاجة إلى تطوير لرفع كفاءتها وتحسين جدواها الاقتصادية، بعدما كانت في السابق مقتصرة على تطبيقات فضائية متخصصة ومحدودة النطاق.

ويُظهر الرسم التوضيحي أدناه البنية الأساسية للأقمار الصناعية الشمسية، والتي تتكون من ثلاثة مكوّنات مترابطة:

1. **العاكسات الشمسية:** صُممت لعكس ضوء الشمس وتوجيهه نحو الألواح الشمسية.
2. **الألواح الشمسية وأجـهزة الإرسال:** تقوم بتحويل الضوء المنعكس إلى موجات ميكروويف عالية التردد.
3. **نظام نقل الطاقة:** يرسل هذه الموجات إلى الهوائيات الأرضية التي تتولى استقبال الطاقة وتحويلها إلى كهرباء.

ولضمان نجاح إطلاق وتشغيل قمر صناعي شمسي، من الضروري تطوير مجموعة من التقنيات الأساسية التي تشكل ركائز لا غنى عنها لمنظومة الطاقة الشمسية الفضائية على نطاق واسع.



تقنيات الإطلاق

تُعد تقنيات الإطلاق وتكاليفها عاملاً حاسماً في منظومة الطاقة الشمسية الفضائية، إذ يتطلب نشر القمر الصناعي تنفيذ سلسلة من عمليات الإطلاق على مدى فترة زمنية طويلة. ويكمن التحدي في تجنّب الصعوبات المرتبطة بإرسال قمر صناعي ضخم وثقيل دفعة واحدة، من خلال اعتماد نهج تجزئة المكونات ونقلها إلى المدار على شكل أجزاء منفصلة، ليتم تجميعها لاحقاً بشكل متتابع في الفضاء. كما تتطلب عمليات الإطلاق المستقبلية توفير القدرة على صيانة الأقمار الصناعية بشكل دوري. ومع الانخفاض المستمر في تكاليف الإطلاق نتيجة اشتداد المنافسة في قطاع الفضاء وتزايد وتيرة المهمات الفضائية، يتفق الخبراء على أن هذا المكوّن يُصنّف ضمن «منخفض المخاطر» في سياق الاستفادة التجارية من تقنيات الطاقة الشمسية الفضائية.

ومع التوسع المتسارع في النشاط الفضائي، ستزداد الحاجة إلى حلول طاقة موثوقة، الأمر الذي سيحفّز الإنتاج الضخم للخلايا الشمسية ويؤدي تدريجياً إلى خفض تكاليفها

التجميع المداري

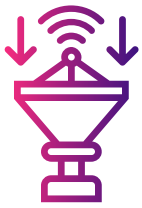
تشهد تقنيات الروبوتات والتجميع الذاتي تطوراً متسارعاً، ما يمهّد الطريق لبناء مصفوفات شمسية ضخمة في الفضاء من دون الحاجة إلى تدخل بشري مباشر. وبما أن مكونات أقمار الطاقة الشمسية الفضائية تُنقل إلى المدار على شكل أجزاء منفصلة، فإن عملية التجميع ستعتمد على روبوتات متقدمة قادرة على تنفيذ هذه المهام بكفاءة عالية. ورغم أن التجميع الروبوتي يُستخدم بالفعل في بعض المهمات الفضائية الحالية، فإن بناء أقمار صناعية مخصصة للطاقة الشمسية الفضائية يتطلب تطوير هذه التقنيات وتكييفها بما يلائم طبيعة المشروع وحجمه. كما أن تصنيع هذه الأنظمة بكميات كبيرة سيكون ضرورياً لتحقيق وفورات الحجم وضمان الجدوى الاقتصادية. لذلك، يُعد التجميع المداري أحد المكوّنات التي تحتاج إلى استثمارات بحثية وتقنية ضخمة للوصول إلى مستوى النضج التجاري، نظراً إلى تنوّع وتعقيد الأنظمة الروبوتية المطلوبة.

توليد الطاقة

تمثل الخلايا الشمسية عنصراً أساسياً في منظومة الطاقة الشمسية الكهربائية، وهي تقنية مستخدمة بالفعل في العديد من المهام الفضائية الحالية، مثل محطة الفضاء الدولية التي تعتمد على ثماني مصفوفات شمسية رئيسية.[40] وتشير الابتكارات المستمرة والتحسن في الجدوى الاقتصادية للخلايا الشمسية المقاومة لبيئة الفضاء إلى أن كفاءتها ستواصل الارتفاع في تطبيقات الطاقة الشمسية الفضائية. ويتفق الخبراء على أن هذا المكوّن بلغ مستوى الجاهزية التجارية، ما يجعله الأقل مخاطرة نسبياً مقارنة بمكونات المنظومة الأخرى. ومع التوسع المتسارع في النشاط الفضائي، ستزداد الحاجة إلى حلول طاقة موثوقة، الأمر الذي سيحفّز الإنتاج الضخم للخلايا الشمسية ويؤدي تدريجياً إلى خفض تكاليفها.

نقل الطاقة لاسلكياً

تُنقل الطاقة الشمسية المجمّعة في الفضاء إلى الأرض عبر موجات الميكروويف أو أشعة الليزر.[41] ورغم إثبات الجدوى التقنية لهذا الأسلوب في مراحل سابقة، يرى الخبراء أن الوصول إلى الجاهزية التجارية يتطلب تنفيذ تجارب فضائية واسعة النطاق لرفع مستويات الكفاءة وتحسين المدى وضمان موثوقية التشغيل. وفي هذا الإطار، تخطط دول مثل اليابان والصين لإطلاق مشاريع تجريبية كبرى خلال السنوات القادمة، إلى جانب مبادرات يقودها القطاع الخاص من خلال شركات مثل «فيرتس سوليس» (Virtus Solis) و «سبيس سولار» (Space Solar) و «إيرباص» (Airbus)، وغيرها، في خطوة تعكس التنافس المتسارع لتطوير هذه التقنية وتحويلها إلى حل طاقة عملي وقابل للتوسع.



محطات الاستقبال الأرضية

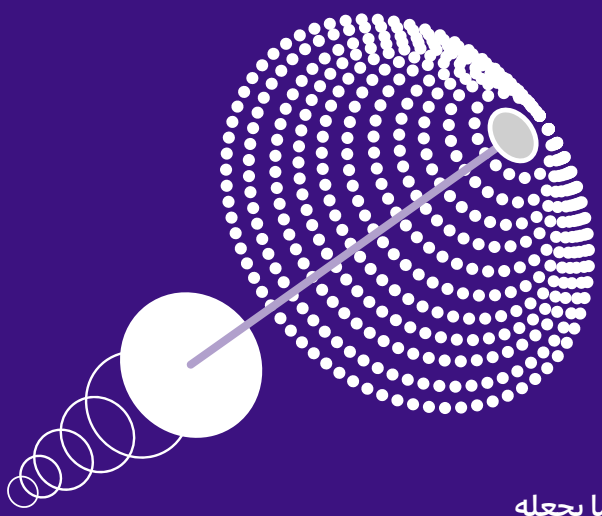
تُستقبل الطاقة المرسلة من أقمار الطاقة الشمسية الفضائية على الأرض عبر هوائيات خاصة تُعرف باسم «هوائي التقويم» (Rectenna)، وهي مصفوفات مصممة لتحويل الطاقة الكهرومغناطيسية – مثل موجات الميكروويف – إلى تيار كهربائي مباشر. ويمكن دمج هذه الهوائيات في محطات استقبال أرضية متخصصة لتحويل الموجات الدقيقة عالية التردد إلى طاقة قابلة للاستخدام.[42] ورغم أن فعالية هذه الأجهزة قد أُثبتت في البيئات المخبرية منذ سنوات، ونجح الباحثون في تطوير نماذج قادرة على تحويل إشارات الميكروويف والترددات الراديوية بكفاءة عالية، إلا أن الخبراء يشددون على ضرورة تنفيذ تجارب ميدانية واسعة لضمان تكاملها بسلاسة مع أنظمة الأقمار الصناعية وتقنيات نقل الطاقة اللاسلكية. وبذلك، يمكن اعتبار هوائيات التقويم تقنية ناضجة من الناحية الهندسية، لكنها لا تزال بحاجة إلى الاندماج الكامل في منظومة الطاقة الشمسية الفضائية قبل أن تصبح قابلة للتطبيق التجاري على نطاق واسع.

الشكل 5
تقنيات وتصاميم الطاقة الشمسية المبتكرة الأخرى (غير شاملة)

في إطار البحث عن تقنيات متقدمة لتطوير قدرات الطاقة الشمسية الفضائية، يجري استكشاف مجموعة من المفاهيم المبتكرة التي تتجاوز النماذج التقليدية للأقمار الصناعية، ولا يزال العديد منها في مراحل البحث والتطوير.

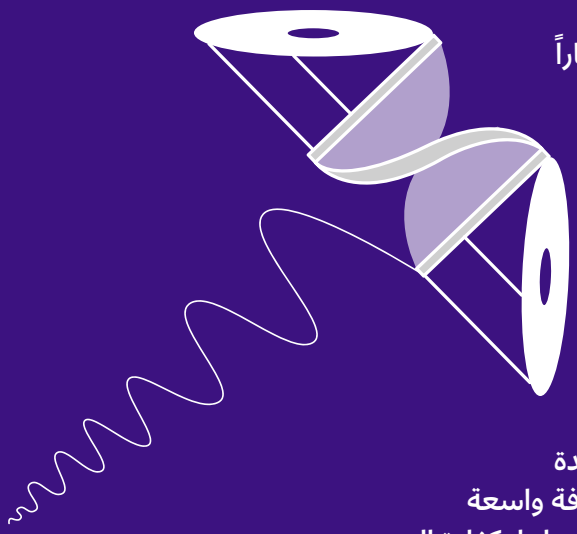
- **المرايا الفضائية المدارية:** تمثل المرايا الفضائية المدارية هياكل ضخمة تُثبت في الفضاء بهدف عكس ضوء الشمس المركّز نحو سطح الأرض، ما يتيح للألواح الشمسية الأرضية توليد الكهرباء لفترات زمنية أطول. ويسمح تثبيت مرايا كبيرة في المدار بإضافة أشعة شمسية إضافية إلى محطات الطاقة الشمسية الأرضية، مما يطيل فترة الإنتاج اليومي للطاقة بنحو 15–20 دقيقة في كل دورة مدارية، ويرفع العائد السنوي للطاقة بما يصل إلى 60%، من دون الحاجة إلى إدخال تعديلات على البنية التحتية القائمة. ورغم أن هذه التقنية يمكن أن تُحسن من أداء محطات الطاقة الشمسية الأرضية، فإنها تظل حلاً محدود القابلية للتوسع مقارنةً بالأنظمة الكاملة للطاقة الشمسية الفضائية.[43]
- **تصاميم الأقمار الصناعية المتنوّعة:** شهدت العقود الأخيرة طرح العديد من التصاميم المبتكرة لأنظمة الطاقة الشمسية الفضائية، لكل منها نهج هندسي خاص. ومن أبرز هذه التصاميم: محطات الطاقة الشمسية الفضائية من نوع ألفا (SPS-ALPHA)، التي تعتمد على هيكل معياري قابل للتوسع، ما يتيح تجميع مكونات متعددة في الفضاء لتشكيل مصفوفة شمسية ضخمة؛ ومنظومة «كاسيوبيا» (CASSIOPeiA) وتمتاز بتصميم يعتمد على شكل حلزوني مبتكر لتوزيع الألواح الشمسية وأجهزة الإرسال بكفاءة عالية؛ والمنظومة الكورية للطاقة الشمسية الفضائية (K-SSPS)[44] والتي تمثل الجيل الأحدث من هذه التصاميم، وتركز على رفع الكفاءة التشغيلية وخفض تكاليف الإطلاق والصيانة.

محطات الطاقة الشمسية الفضائية ألفا (SPS-ALPHA)[45]



محطات ألفا (SPS-ALPHA): ابتكر هذا النموذج جون مانكنز، ويُعد من أكثر التصاميم ابتكاراً في مجال الطاقة الشمسية الفضائية. يقوم المفهوم على إرسال عدد كبير من الوحدات الصغيرة القابلة للتجميع إلى الفضاء، حيث ترتبط معاً لتشكيل محطة ضخمة. تحتوي كل وحدة على مرايا رقيقة وخفيفة تعمل على توجيه ضوء الشمس نحو خلايا شمسية عالية الكفاءة، تقوم بدورها بتحويله إلى طاقة على شكل موجات ميكروويف موجهة. يتم بعد ذلك إرسال هذه الطاقة عبر هوائي دقيق وعالي الكفاءة إلى محطات استقبال على الأرض مزودة بـ "هوائي التقويم" (Rectenna) لتحويل الموجات إلى كهرباء. ويتميز هذا التصميم باستخدام مواد وهيكل خفيف الوزن، وتقنيات متقدمة لإدارة الحرارة، إضافة إلى نظام فعال لنقل الطاقة لاسلكياً، ما يجعله من أكثر النماذج الواعدة لتوليد الطاقة على نطاق واسع من الفضاء.

منظومة كاسيوبيا (CASSIOPeiA)[46]

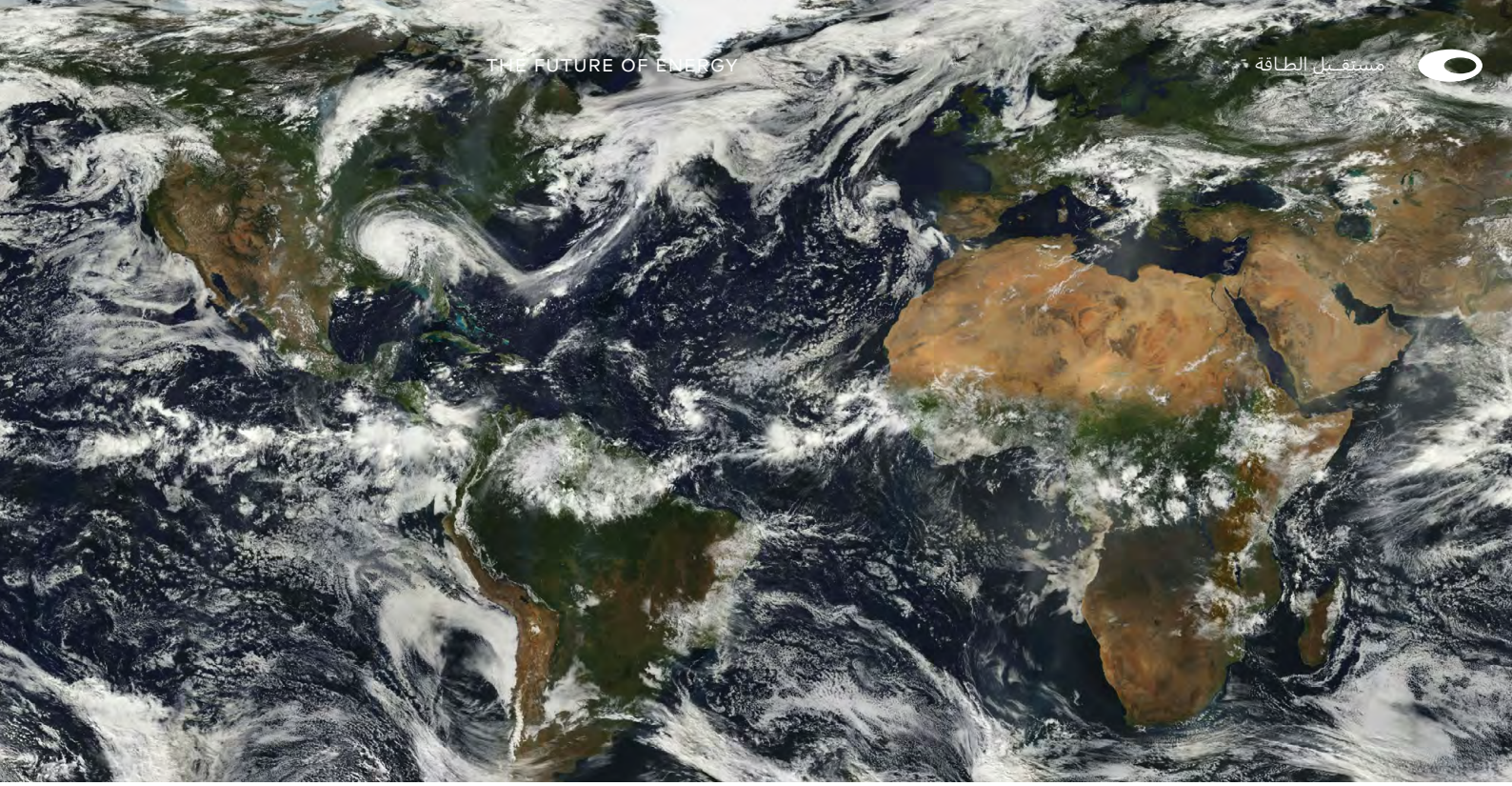


طوّر إيان كاش، كبير مهندسي شركة "سبيس سولار" (Space Solar) مفهوم كاسيوبيا كأحد أكثر النماذج ابتكاراً في مجال الطاقة الشمسية الفضائية، مستنداً إلى تصميم معياري متكامل يتيح جمع الضوء الشمسي ومعالجته بكفاءة عالية. يتميز هذا التصميم بخلوه التام من الأجزاء المتحركة، ما يمكّنه من مواجهة الشمس بشكل دائم من دون الحاجة إلى إمالة أو تعديل الاتجاه. ويأتي الهيكل خفيف الوزن وقابل للتمدد الذاتي فور وصوله إلى المدار، من دون أي دعم أو تدخل بشري إضافي، مما يقلل التعقيد التشغيلي ويرفع مستوى الاعتمادية. وبفضل هذا النهج، يمكن إطلاق المنظومة كحمولة واحدة متكاملة، ثم نشرها بسهولة في الفضاء لتشكيل مصفوفة واسعة قادرة على جمع كميات كبيرة من الطاقة الشمسية وتحويلها بكفاءة إلى طاقة قابلة للاستخدام على الأرض.

تجدر الإشارة إلى أن جميع المكوّنات الأساسية لمنظومة الطاقة الشمسية الفضائية أصبحت اليوم إما جاهزة للاستخدام التجاري أو قيد التطبيق العملي بالفعل. وتمثل المشاريع التجريبية الشاملة وواسعة النطاق الخطوة الحاسمة التالية لإثبات الجدوى التشغيلية لنظام متكامل يعتمد على هذه التقنية. وفي هذا الإطار، تعمل الحكومات على إطلاق مبادرات تجريبية تمهّد الطريق لإنشاء محطات طاقة شمسية فضائية بقدرات متعددة الميجاواط خلال السنوات الخمس إلى العشر المقبلة.

5

السباق العالمي نحو الطاقة الشمسية الفضائية



غالباً ما تضطلع الحكومات بدور محوري في تنفيذ أو تمويل المشاريع المرتبطة بمنظومة الطاقة الشمسية الفضائية، من خلال إطلاق مبادرات شاملة وخطط استراتيجية لا تقتصر على اختبار المكوّنات التقنية وتطويرها، بل تمتد إلى بناء منظومة متكاملة ترسخ هذه التقنية كقطاع وطني محوري ضمن مجالي الفضاء والطاقة.

الصين

تُعد الصين من أبرز الدول الرائدة في تطوير تقنيات الطاقة الشمسية الفضائية. ففي عام 2021، شكلت الحكومة لجنة الطاقة الشمسية الفضائية (CSSP)[47] بالتعاون مع مؤسسات أكاديمية، وأطلقت خارطة طريق واضحة المعالم تحدد مختلف المراحل لبرنامجها البحثي، وتشمل هذه المراحل:

- **المرحلة الأولى (2026–2028):** إطلاق مشروع تجريبي في الفضاء بقدرة على مستوى الكيلوواط.
- **المرحلة الثانية (2030):** تنفيذ تجربة على مستوى الميجاواط.
- **المرحلة النهائية (2050):** إطلاق قمر صناعي لإنتاج الطاقة الشمسية على مستوى الجيجاواط.

في هذا الإطار، أنشأ الباحثون الصينيون أول محطة اختبار متكاملة للطاقة الشمسية الفضائية على مستوى العالم، وهي محطة "زوري" (Zhuri).[48] وقد تمكن الباحثون من خلالها من تنفيذ سلسلة مكتملة من التجارب على الأرض للتحقق من تقنية الطاقة الشمسية الفضائية، بما في ذلك التقاط ضوء الشمس، وتحويله إلى موجات الميكروويف، ونقل حزم الأشعة إلى الأرض، ثم إعادة تحويلها إلى طاقة كهربائية باستخدام أجهزة استقبال هوائية أرضية. وقد شملت الاختبارات تقنيات أساسية مثل المكثفات عالية الكفاءة، وأجهزة إرسال طاقة الميكروويف، وأنظمة توجيه حزم الأشعة، وأجهزة هوائي التقويم "Recten-na".[49] وأظهرت التجارب نجاح النظام في نقل الطاقة لمسافة تجاوزت 55 متراً، مع تحسن ملحوظ في دقة توجيه حزم الأشعة. إلى جانب هذه الجهود، تعقد لجنة الطاقة الشمسية الفضائية مؤتمرات سنوية للإعلان عن التقدم المحرز، وتنظم مسابقات شبابية لتحفيز البحث والابتكار في تطوير بعض تقنيات الطاقة الشمسية الفضائية، كما تنشر مجلة علمية متخصصة لتسليط الضوء على أبحاث الطاقة الشمسية الفضائية.[50]

وبشكل عام، تندرج هذه الجهود ضمن استراتيجية وطنية طويلة المدى وضعتها الصين لقطاع الطاقة، إذ تعتبر الدولة أنّ الطاقة الشمسية الفضائية هي أداة لتعزيز إنتاج الطاقة النظيفة والمستدامة. كذلك، تسعى الصين إلى بناء شراكات دولية وتعزيز التعاون في مجال الطاقة الشمسية الفضائية، وتشارك بكثافة في المؤتمرات العالمية ذات الصلة. وإذا نجحت في تحقيق أهدافها المرحلية (2026–2028 و2030)، ستعزز مكانتها كقوة عالمية رائدة في المجال وستدفع الدول الأخرى إلى تسريع برامجها الخاصة، ما يحفز بالتالي الجهود الدولية والاستثمارات العالمية في تقنيات الطاقة الشمسية الفضائية.

وكالة الفضاء الأوروبية

بينما تستهدف الصين تنفيذ مشاريعها التجريبية بحلول عام 2028، وضعت وكالة الفضاء الأوروبية جدولاً زمنياً خاصاً بها، وأطلقت عام 2022 مبادرتها الرائدة للطاقة الشمسية الفضائية تحت اسم "سولاريس" (SOLARIS). جاءت هذه الخطوة كرد فعل مباشر على الأزمة الأوكرانية التي دفعت الحكومات الأوروبية إلى الإسراع في تعزيز أمن الطاقة وتقليل الاعتماد على واردات الوقود الأحفوري، بالتوازي مع الضغوط المتزايدة لوضع استراتيجيات مناخية طويلة المدى. وهكذا، أصبح أمن الطاقة واستكشاف حلول نظيفة واسعة النطاق في صدارة أولويات السياسات الأوروبية.

في عام 2022، استعانت الوكالة بالشركتين الاستشاريتين "فريزر ناش" (Frazer-Nash) و"رولاند برغر" (Roland Berger) لإعداد دراستين مستقلتين لتحليل التكاليف والفوائد المحتملة لتقنية الطاقة الشمسية الفضائية. وأظهرت النتائج أن هذه التقنية قادرة على توفير الكهرباء بأسعار تنافسية للمنازل والشركات الأوروبية بحلول عام 2040، مع تقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري وتعزيز مساهمة مصادر الطاقة المتجددة التقليدية، مثل الألواح الشمسية الكهروضوئية وطاقة الرياح، إضافةً إلى الحد من الحاجة إلى حلول تخزين الطاقة واسعة النطاق.

كما بينت الدراسات أن تبني الطاقة الشمسية الفضائية على نطاق واسع يمكن أن يحقق فوائد بيئية واقتصادية واستراتيجية كبيرة لأوروبا، أبرزها تعزيز أمن الطاقة، ودعم التحول نحو اقتصاد منخفض الكربون، وتحفيز الابتكار في تقنيات الفضاء والطاقة.[51]

وقد أكدت الدراسات أن أوروبا تمتلك بالفعل المقومات الأساسية اللازمة لتطوير الطاقة الشمسية الفضائية، رغم الحاجة إلى مزيد من الابتكارات التقنية لتمكين جمع كميات كبيرة من الطاقة على مستوى الجيجاواط في الفضاء. كما بيّنت أن التقدم في هذه المجالات لن يقتصر أثره على مشاريع الفضاء فحسب، بل سيسهم أيضاً في تطوير تطبيقات واسعة النطاق على الأرض.

وتهدف المبادرة التحضيرية لوكالة الفضاء الأوروبية "سولاريس" (SOLARIS) إلى تقييم الجدوى التقنية والسياسية لتطبيق الطاقة الشمسية الفضائية في القارة الأوروبية. ووفقاً لخارطة الطريق المعتمدة، ستركز الجهود أولاً على تطوير نموذج أولي مصغّر بحلول عام 2030، يليه إنشاء محطة تجريبية للطاقة الشمسية الفضائية بحلول عام 2035، وصولاً إلى بناء محطة متكاملة على نطاق تجاري بحلول عام 2040.

وتماشياً مع خطة عمل المبادرة، أجرت الوكالة دراسات متخصصة وأعمال تطوير تقنية بالتعاون مع القطاع الصناعي الأوروبي، بهدف تعزيز الجدوى الفنية، وتقييم الفوائد الاستراتيجية والاقتصادية، واستكشاف خيارات التنفيذ، وتحديد الفرص التجارية، بالإضافة إلى رصد المخاطر المحتملة المرتبطة بهذه التقنية المستقبلية.[52]

اليابان

تُعد اليابان من الدول الرائدة عالمياً في مجال أبحاث الطاقة الشمسية الفضائية منذ عقود، حيث تعتمد بشكل كبير على واردات الطاقة وتتفوّق في القطاعات التكنولوجية. وقد سجلت اليابان أولى خطواتها المبكرة بإجراء اختبارات نقل الطاقة لاسلكياً عام 1983،[53] كما وضعت خارطة طريق متكاملة تجمع بين الحكومة والأوساط الأكاديمية والقطاع الصناعي، بهدف الوصول إلى تطبيق تقنية الطاقة الشمسية الفضائية لأغراض تجارية بحلول عام 2040. وعلى مدار السنوات الماضية، حققت اليابان إنجازات كبيرة، من بينها المشروع التجريبي الذي أطلقته عام 2015 ونجحت من خلاله في نقل الطاقة لاسلكياً عبر موجات الميكروويف بقدرة 1.8 كيلوواط، مع تحكم بالغ الدقة في توجيه حزم الأشعة.[54] كما أحرزت تقدماً ملحوظاً في اختبارات التجميع الروبوتي، إلى جانب التجارب التي أجرتها على تقنيات نقل الطاقة باستخدام الليزر على نطاقات أصغر.[55]

كما يقود اتحاد ياباني يضم جامعة كيوتو ووكالة الفضاء اليابانية مشروعاً طموحاً يُعرف باسم "أوهيساما" (OHISAMA) يهدف إلى تنفيذ تجربة نقل الطاقة من الفضاء إلى الأرض بحلول عام 2025.[56] ويتضمن المشروع إطلاق قمر صناعي صغير مزود بألواح شمسية ووحدة إرسال لطاقة الميكروويف. وقد نجح فريق العمل بالفعل في إثبات فعالية تقنية نقل الطاقة لاسلكياً على مستوى أرضي، كما يخطط لاختبار إرسال الطاقة من طائرة إلى محطة استقبال أرضية على مسافات تمتد لعدة كيلومترات،[57] وذلك ضمن نهج تدريجي (الأرض - الطائرة - المدار) لإثبات التقنية خطوة بخطوة. وفي حال نجاح التجربة المدارية المقررة خلال عام 2025 [b]، ولو حتى في إرسال طاقة محدودة ولو بضعة واطات أو كيلوواطات إلى محطة استقبال أرضية، ستحقق اليابان إنجازاً عالمياً غير مسبوق يتجاوز التجارب منخفضة القدرة مثل تجربة معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا "كالتيك".

المملكة المتحدة

أطلقت المملكة المتحدة عام 2022 مبادرة الطاقة الفضائية، بهدف تطوير تقنيات الطاقة الشمسية الفضائية، وذلك عقب دراسة شاملة أجرتها وزارة الأعمال والطاقة والاستراتيجية الصناعية تناولت الجدوى التقنية والتكاليف والأبعاد الاقتصادية لهذه التكنولوجيا. وأظهرت نتائج الدراسة أن الطاقة الشمسية الفضائية تمثل خياراً قابلاً للتنفيذ من الناحية التقنية، ومجدياً اقتصادياً، وقادراً على تحقيق فوائد كبيرة للاقتصاد الوطني.[58]

تستهدف المبادرة إطلاق أول نظام تجريبي مداري للطاقة الشمسية الفضائية بحلول عام 2030، على أن يبدأ بدعم الشبكة الكهربائية الوطنية بحلول عام 2040. ومن المقرر أن يدخل الجيل الأول من الأقمار الصناعية للطاقة الشمسية حيز التشغيل بحلول منتصف أربعينات القرن الحالي، ليسهم في خفض الاعتماد على الوقود الأحفوري بشكل كبير في إنتاج الطاقة.[59] وتعكس هذه المبادرة شراكة واسعة النطاق تجمع بين القطاع الحكومي، والمؤسسات البحثية، والجهات الصناعية الرائدة في مجالي الطاقة والفضاء.

وفي إطار هذه الجهود، تخطط شركة "سبيس سولار" (Space Solar) لإطلاق قمر صناعي تجريبي بقدرة 6 ميجاواط قادر على نقل الطاقة إلى محطة استقبال أرضية بحلول عام 2030، يليه تشغيل أول قمر صناعي تجاري للطاقة الشمسية بقدرة 2 جيجاواط بحلول عام 2035. واستعداداً لهذه المرحلة، يعتزم أعضاء المبادرة، بالتعاون مع حكومة المملكة المتحدة، تقديم مساهمات مالية تصل إلى 7.3 مليون دولار، بهدف تقليل المخاطر وضمان جاهزية تقنيات نقل الطاقة لاسلكياً والألواح الشمسية الكهروضوئية للنظام التجريبي المرتقب.[60]

[b] استناداً إلى أحدث المعلومات المتاحة للجمهور وقت النشر.

الولايات المتحدة الأمريكية

تمتلك الولايات المتحدة الأمريكية تاريخاً طويلاً في مجال أبحاث الطاقة الشمسية الفضائية، غير أن جهودها الواسعة في هذا المجال لم تُستأنف بشكل فعّال إلا في السنوات الأخيرة. فقد درست وكالة ناسا هذا المفهوم في سبعينات وتسعينات القرن الماضي، لكنها لم تشرع في تنفيذ مشاريع فعلية آنذاك، نظراً لانخفاض الجدوى الاقتصادية في ذلك الوقت.

وفي الفترة الأخيرة، أعادت جهات أمريكية متعددة إحياء الاهتمام بتطوير الطاقة الشمسية الفضائية. ففي عام 2023، أصدر **مكتب التكنولوجيا والسياسات والاستراتيجية** التابع لوكالة ناسا تقريراً رئيسياً تناول تحليل الجدوى المستقبلية لاعتماد الطاقة الشمسية الفضائية بحلول عام 2050.[61] كما نظّمت **وزارة الطاقة الأمريكية** ورش عمل متخصصة ضمن إطار استراتيجيتها الأوسع للطاقة، لبحث فرص هذه التقنية وممكناتها.[62]

من جهة أخرى، يستثمر مختبر أبحاث القوات الجوية الأمريكية في تطوير تقنيات نقل الطاقة الشمسية من الفضاء لأغراض عسكرية، عبر مشروع الأبحاث والمشاريع التجريبية للطاقة الشمسية الفضائية (SSPIDR). يهدف المشروع إلى تزويد القواعد النائية أو الأقمار الصناعية التي يصعب تزويدها بالوقود بمصادر طاقة مستدامة. ويتضمن المشروع سلسلة من التجارب، أبرزها تجربة "أراكني" (Arachne)، وهو قمر صناعي تجريبي يختبر تحويل الطاقة الشمسية إلى موجات ميكروويف باستخدام مصفوفة مبتكرة، ثم إرسالها إلى هوائي استقبال أرضي، والمقرر إطلاقه في عام 2025[c]. وتهدف هذه المشاريع ذات الأبعاد الدفاعية إلى إثبات جدوى التقنية على نطاق صغير، وتحسين كفاءة تحويل الطاقة وتوجيه حزم الأشعة بدقة، تمهيداً لتوسيع نطاق استخدامها. وإذا نجحت، فمن المرجح أن يصبح الجيش الأمريكي من أوائل المستخدمين الرئيسيين لها، مما قد يسرّع وتيرة تطويرها واعتمادها تجارياً.

جدير بالذكر أن مختبر أبحاث البحرية الأمريكية كان قد صمّم أول قمر صناعي يعمل بالخلايا الشمسية في العالم، "فانغارد1" (Vanguard 1)، وأطلقه عام 1958. ومنذ ذلك الحين، واصل المختبر دوره الريادي في أبحاث الطاقة الشمسية، ومن أبرز مشاريعه الحديثة:

- **وحدة هوائي تعمل بالترددات الراديوية والضوئية (PRAM):** أول تجربة مدارية لنظام الطاقة الشمسية، أُطلقت في مايو 2020 على متن المهمة السادسة للطائرة الفضائية التابعة للقوات الجوية الأمريكية، لاختبار تحويل ضوء الشمس إلى موجات ميكروويف وقياس الكفاءة والأداء الحراري.
- **تجربة "ليكتينا" (LEctenna):** تجربة أُجريت على متن محطة الفضاء الدولية في فبراير 2020، لاختبار هوائي مزوّد بصمام ثنائي باعث للضوء يحوّل إشارة شبكة لاسلكية إلى طاقة كهربائية.
- **نقل الطاقة باستخدام الليزر:** مشروع تجريبي ناجح عام 2019 لاستخدام ليزر الأشعة تحت الحمراء لإرسال الطاقة ضمن نظام أرضي.
- **نقل الطاقة عبر موجات الميكروويف:** تجربة عام 2021 أرسل خلالها المختبر طاقة بقدرة 1.6 كيلوواط عبر مسافة تجاوزت كيلومتراً واحداً.

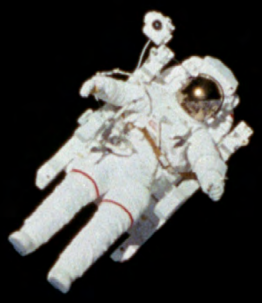
وتجدر الإشارة إلى أن معظم الدول والتكتلات العاملة في تطوير تقنيات الطاقة الشمسية الفضائية تتبنى جداول زمنية متقاربة، مع تنفيذ المشاريع التجريبية والنماذج الأولية خلال السنوات الخمس المقبلة، والتخطيط لإطلاق محطات توليد على مستوى الجيجاواط خلال العقدين القادمين. ورغم أن الجهود الحالية في الولايات المتحدة تواكب أولوياتها الوطنية والمؤسسية، فمن المتوقع أن يشهد المستقبل مستويات أعلى من التعاون والتنسيق بين الوكالات الأمريكية والدول الأخرى في هذا المجال.

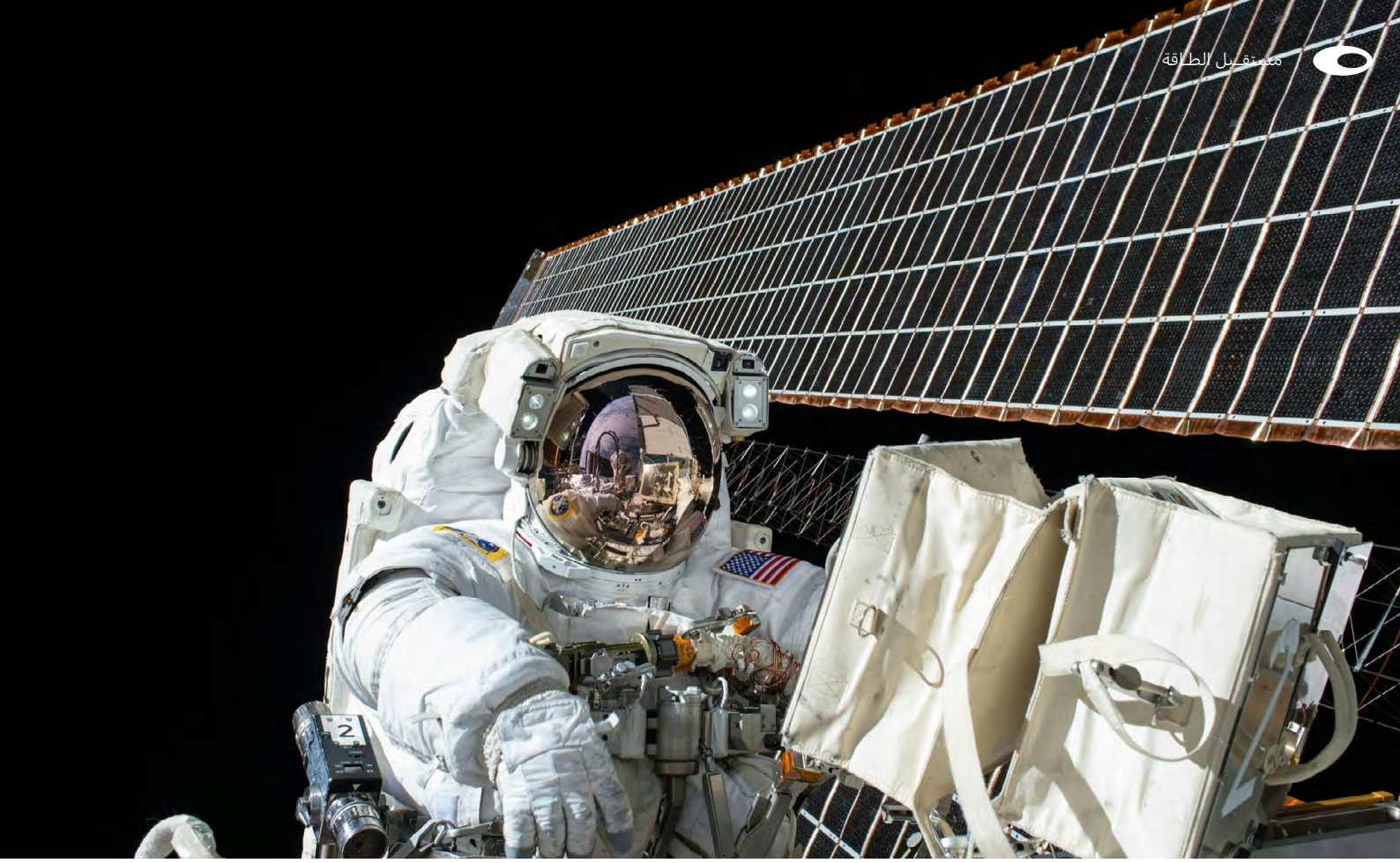
وتجدر الإشارة إلى أن معظم الدول والتكتلات العاملة في تطوير تقنيات الطاقة الشمسية الفضائية تتبنى جداول زمنية متقاربة، مع تنفيذ المشاريع التجريبية والنماذج الأولية خلال السنوات الخمس المقبلة، والتخطيط لإطلاق محطات توليد على مستوى الجيجاواط خلال العقدين القادمين.

[c] استناداً إلى أحدث المعلومات المتاحة للجمهور وقت النشر.

6

خـارطة طـريق نحـو التوسع التجـاري للطاقة الشمسية الفضـائية





استناداً إلى أبحاثنا، تشير التقديرات إلى أن تقنيات الطاقة الشمسية الفضائية ستشهد خلال العقود المقبلة ثلاث مراحل رئيسية للتطور التجاري:

- **المرحلة الأولى (2025–2030):** إطلاق مشاريع تجريبية مدارية على نطاق الكيلوواط في اليابان والولايات المتحدة والصين.
- **المرحلة الثانية (2030–2035):** تطوير محطات تجريبية على نطاق الميجاواط.
- **المرحلة الثالثة (2040–2050):** إطلاق أول قمر صناعي تجاري لتوليد الطاقة على نطاق الجيجاواط.

مسار التطوّر التجاري لتقنيات الطاقة الشمسية الفضائية

إنّ المسار نحو التوسّع التجاري في تقنيات الطاقة الشمسية الفضائية محفوف بالعقبات الهندسية واللوجستية، حتّى ولو لم يتطلّب ذلك أي خطوات علمية كبيرة.

[d] استناداً إلى أحدث المعلومات المتاحة للجمهور وقت النشر.

ورغم الزخم المتزايد عقب إنجازات مهمة، مثل تجربة معهد كالتيك عام 2023 لنقل الطاقة من الفضاء إلى الأرض وانخفاض تكاليف الإطلاق، يؤكد الخبراء أن هذه التقنية لن تتحول إلى عنصر رئيسي في مزيج الطاقة العالمي ما لم تتحقق قفزات نوعية متزامنة في عدة مجالات رئيسية:

1 الإطـلاق والتجـميع المداري

رغم التطور الكبير في إعادة استخدام الصواريخ وانخفاض تكاليف الإطلاق، تظل عملية نقل مكونات أقمار الطاقة الشمسية الفضائية إلى المدار تحدياً كبيراً نظراً لضخامتها التي قد تصل إلى مئات الأمتار وآلاف الأطنان وللتكاليف المرتفعة التي تفرضها.
ويتطلب نشر هذه الهياكل وتجميعها في المدار الثابت تطوير أنظمة روبوتية أو ذاتية التشغيل عالية الدقة، قادرة على تنفيذ التجميع والصيانة على نطاق واسع من دون تدخل بشري.

2 كفـاءة وسـلامة نقـل الطـاقة لاسلكياً

تعتمد المنظومة على تحويل الطاقة الشمسية إلى موجات ميكروويف أو أشعة ليزر، ثم نقلها لمسافة تصل إلى 36 ألف كيلومتر قبل تحويلها مجدداً إلى كهرباء على الأرض.
ولتحقيق الجدوى الاقتصادية، يجب الحد من الخسائر في كل مرحلة، وتحسين كفاءة الترددات اللاسلكية، وتطوير تقنيات دقيقة لتوجيه الحزم الإشعاعية، مع الالتزام بمعايير صارمة لحماية البشر والبيئة.

3 إدارة الحـرارة في الفضـاء

يُعد التخلص من الحرارة الزائدة تحدياً كبيراً، إذ لا يمكن تبديدها في الفضاء إلا بالإشعاع الحراري. ويؤثر تراكم الحرارة على كفاءة التشغيل وقد يسبب أضراراً للمعدات، ما يستدعي حلولاً مبتكرة تحقق التوازن بين جمع الطاقة والتبريد الفعال من دون زيادة كبيرة في الكتلة أو التأثير على كفاءة نقل الطاقة.

4 الحطـام الفضـائي ونهـاية العـمر التشغيلي

يشكل الحجم الكبير لأقمار الطاقة الشمسية الفضائية خطراً في بيئة مدارية مزدحمة، حيث قد تتسبب الاصطدامات حتى ولو مع أجسام صغيرة في أضرار بالغة. كما أن خطط التعامل مع هذه الهياكل الضخمة بعد نهاية عمرها التشغيلي ما تزال في بدايتها، وتتطلب أطر تعاون دولي صارمة لتفادي تفاقم مشكلة الحطام الفضائي.

7

مرتكزات القرار الاستراتيجي في سياسات الطاقة الشمسية الفضائية

بالنسبة إلى الدول التي لم تبدأ بعد في تطوير تقنيات الطاقة الشمسية الفضائية، يبرز عاملان استراتيجيان سيحددان نطاق وشكل مشاركتها المستقبلية: **سرعة نضوج المكونات التقنية، ومستوى التنسيق الدولي** في مجالات الفضاء والطاقة.

ومع تسارع التقدم التكنولوجي في هذا المجال، مدفوعاً باستثمارات الدول الرائدة، من المتوقع أن تتراجع تدريجياً المعوقات التي تحول دون دخول الدول الأخرى إلى القطاع. ومع انخفاض تكاليف الإطلاق، وتطور أنظمة نقل الطاقة لاسلكياً، وتوفر سلاسل تصنيع قابلة للتوسع، ستتاح الفرصة للعديد من الدول للانخراط في هذا المجال، حتى من دون امتلاك برامج فضائية متقدمة.

ورغم هذه الفرص، فإن البنية التحتية العالمية المرتقبة للطاقة الشمسية الفضائية ستتطلب مستوى غير مسبوق من التعاون الدولي. وتشمل الخطوات الضرورية في هذا الإطار: وضع أطر حوكمة واضحة لعمليات النشر الفضائي، وتقاسم المواقع المدارية، وإدارة الطيف الترددي، وتنظيم حزم نقل الطاقة، فضلاً عن تقييم الأثر البيئي. وفي هذه المرحلة المبكرة، يمكن للدول غير المنخرطة بعد في هذا القطاع أن تسهم في صياغة هذه الأطر بما ينسجم مع مصالحها الاستراتيجية.

وفي هذا السياق، يمكن للدول المهتمة أن تتبنى نهجاً عملياً يبدأ بـ:

- **دراسة إمكانية دمج** تقنيات الطاقة الشمسية الفضائية ضمن برامج البحث والتطوير القائمة، خصوصاً في مجالات الأنظمة الروبوتية، ونقل الطاقة لاسلكياً، وأجهزة هوائي التقويم "Rectenna" المصممة لاستقبال الطاقة على الأرض.
- **إطلاق تجارب صغيرة النطاق** ومبادرات تجريبية تسهم في بناء قاعدة معرفية وتعزز القدرات الوطنية.
- **بناء شراكات دولية** مع الدول الرائدة، والمشاركة في ورش عمل مشتركة أو استضافة منصات حوار عالمية حول التقنية وممكّناتها المستقبلية.
- **تقييم جدوى إنشاء محطات استقبال أرضية** استعداداً لاحتمال تشغيل منظومات الطاقة الشمسية الفضائية، ودمج احتياجاتها المستقبلية ضمن خطط التطوير العمراني.
- **رفع مستوى الوعي الوطني** بأهمية التنسيق الدولي في مجالي الفضاء والطاقة.

من المتوقع أن تشهد السنوات القادمة سلسلة مهام تجريبية لإثبات فعالية هذا الحل، مما سيساعد على تقييم مدى اقترابنا من تجاوز التحديات التقنية الأساسية. وسيؤدي استمرار الابتكار في مكونات الطاقة الشمسية الفضائية، مدعوماً بتمويل مستدام لتجارب واسعة النطاق، إلى تضييق الفجوة بينها وبين مصادر الطاقة المنافسة، مما يمهّد لقيام سوق عالمي تُقدّر قيمته بنحو تريليوني دولار[63] ويجعل من الطاقة الشمسية الفضائية ركناً أساسياً في مزيج الطاقة العالمي لعقود قادمة.

2

تريليــون دولار

قيمة سوق العالمي للطاقة الشمسية الفضائية

الخـاتمة

تمثّل الطاقة الشمسية الفضائية فرصة تحول استراتيجية لا يمكن تجاهلها، إذ تتيح مصدراً نظيفاً ومستداماً للطاقة، وتفتح آفاقاً لواقع اقتصادي وسياسي جديد كلياً. وقد بدأت حكومات وشركات ذات رؤى استشرافية الاستثمار في تطوير تقنياتها، مدفوعة بأهداف مرحلية واضحة ومكاسب استراتيجية بعيدة المدى.

ورغم وضوح فوائدها المحتملة، يبقى تحقيق الإمكانات الكاملة لهذه التقنية رهناً بتطوير مجموعة من التقنيات التمكينية وتجاوز التحديات الهندسية واللوجستية الراهنة. واللافت أن أي تقدم في مجالات رئيسية مثل نقل الطاقة لاسلكياً أو التصنيع الروبوتي في الفضاء، ستكون له انعكاسات واسعة على قطاعات متعددة، سواء على الأرض أو خارجها. وكما أثبت تاريخ أبحاث الفضاء، فإن مواجهة التحديات الكبرى لا تتحقق دائماً بحلول مباشرة، بل عبر أهداف أكثر طموحاً وبيئات متطورة تدفع إلى ابتكار حلول عالية الدقة والكفاءة، تتجاوز في كثير من الأحيان حدود الاستخدامات الأرضية التقليدية.

وبما أن الطاقة تمثل حجر الزاوية في نمو الاقتصادات، فإن أي حل يسهم في تأمينها يستحق التقييم الجاد. وفي حالة الطاقة الشمسية الفضائية، لا يمكن اختزال قيمتها الاقتصادية في مقارنة تقليدية لتكلفة الكيلوواط/ ساعة، إذ إن هذا المصدر لا يحتاج إلى تخزين أو أنظمة احتياطية، ما يمنحه ميزة استراتيجية تتفوق على معظم البدائل الحالية.[64]

وقد تدفع هذه المزايا بعض الدول إلى الاستثمار المبكر فيها لتعزيز أمن الطاقة وترسيخ مكانتها في تكنولوجيا الفضاء، حتى إذا كانت العوائد المالية المباشرة محدودة في المراحل الأولى. فالمبادرة المبكرة قد تمنحها موقعاً قيادياً في قطاع يُتوقع أن يصبح من أهم مصادر الطاقة في النصف الثاني من القرن الحادي والعشرين. وفي ظل المبادرات الطموحة لدول مثل الصين واليابان، يزداد زخم هذا القطاع وتتعاظم قابليته للنمو، فيما يلعب القطاع الخاص دوراً محورياً من خلال الاستثمار المباشر والمساهمة في تطوير التقنيات. وبينما تركز البرامج الحكومية على الأهداف الوطنية بعيدة المدى، تعكس مشاركة الشركات الخاصة وجود فرص تجارية حقيقية على المدى القريب، ما يمهّد الطريق لولادة صناعة طاقة جديدة ذات بعد عالمي.

شكـر وتـقــدير

أروبة خالد
مؤسسة دبي للمستقبل

الود الفلاسي
مؤسسة دبي للمستقبل

إيهاب خطاب
مؤسسة دبي للمستقبل

فراس صبح
مؤسسة دبي للمستقبل

د. هبة شحادة
مؤسسة دبي للمستقبل

مريم يوسف
مؤسسة دبي للمستقبل

د. باتريك نواك
مؤسسة دبي للمستقبل

آندي أثرتون
شركة سولستيال

إيريكا رودجرز
وكالة ناسا

جون باكنيل
شركة فيرتوس سوليس

جون مانكن
شركة أرتميس إنوفيشن مانجمنت

جو آندي أثرتون
شركة سولستيال

مارتن سولتاو
شركة سبيس سولار

ناوكي شينوهارا
جامعة كيوتو

نيكلاس فوغت
شركة أو إتش بي

سانجاي فيجندران
مؤسسة سبيس إنرجي إنسايتس

شينبين هو
الأكاديمية الصينية لتكنولوجيا الفضاء

المراجـــع

1 ESA (2022) ‘Space-Based Solar Power overview’. 8 August, www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/SOLARIS/Space-Based_Solar_Power_overview (accessed 2 May 2025)

2 ESA (2022) ‘The case for an ESA preparatory programme for Space-Based Solar Power for terrestrial energy needs’, https://esamultimedia.esa.int/docs/technology/The_Case_for_an_ESA_preparatory_programme_for_Space-Based_Solar_Power_for_terrestrial_energy_needs.pdf (accessed 2 May 2025)

3 IAE (2021) ‘Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector’, www.iea.org/reports/net-zero-by-2050 (accessed 26 June 2025)

4 ESA (2022) ‘The case for an ESA preparatory programme for Space-Based Solar Power for terrestrial energy needs’, https://esamultimedia.esa.int/docs/technology/The_Case_for_an_ESA_preparatory_programme_for_Space-Based_Solar_Power_for_terrestrial_energy_needs.pdf (accessed 2 May 2025)

5 ESA (2022) ‘Space-Based Solar Power overview’. 8 August 2022, www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/SOLARIS/Space-Based_Solar_Power_overview#:~:text=Space,scale%20of%20size%20and%20power (accessed 2 May 2025)

6 Joseph, N. et al. (2022) ‘Methodology Report of Cost Benefit Analysis of Space Based Solar Power’, https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20220014049/downloads/IAC%202022%20SBSP%20090914-1.pdf (accessed 19 May 2025)

7 Jones, H. (2018) ‘The recent large reduction in space launch cost’. 12 July 2018, https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20200001093/downloads/20200001093.pdf (accessed 4 May 2025)

8 JAXA (2024) ‘About the SSPS’, www.kenkai.jaxa.jp/eng/research/ssps/ssps-ssps.html (accessed 2 May 2025)

9 AFRL, ‘Space power beaming’, https://afresearchlab.com/technology/space-power-beaming/ (accessed 2 May 2025)

10 Werner, D. (2024) ‘Orbital composites and Virtus Solis announce space-based solar power demonstration’ 1 February, SpaceNews, https://spacenews.com/orbital-composites-and-virtus-solis-announce-space-based-solar-power-demonstration (accessed 2 May 2025)

11 ESA (2022) ‘The case for an ESA preparatory programme for Space-Based Solar Power for terrestrial energy needs’, https://esamultimedia.esa.int/docs/technology/The_Case_for_an_ESA_preparatory_programme_for_Space-Based_Solar_Power_for_terrestrial_energy_needs.pdf (accessed 2 May 2025)

12 Shukla, N (2024). ‘Understanding solar flux: Its definition and importance in solar studies’. 6 May, Fenice Energy, https://blog.feniceenergy.com/understanding-solar-flux-its-definition-and-importance-in-solar-studies/#:~:text=Solar%20flux%20measures%20the%20solar,can%20use%20to%20make%20electricity (accessed 2 May 2025)

13 ESA (2022) ‘The case for an ESA preparatory programme for Space-Based Solar Power for terrestrial energy needs’, https://esamultimedia.esa.int/docs/technology/The_Case_for_an_ESA_preparatory_programme_for_Space-Based_Solar_Power_for_terrestrial_energy_needs.pdf (accessed 2 May 2025)

14 Hirschhorn, P. and Brijs, T (2021) ‘Rising to the challenges of integrating solar and wind at scale’. 17 December, BCG, www.bcg.com/publications/2021/addressing-variable-renewable-energy-challenges#:~:text=Generating%20electricity%20from%20VRE%20sources%E2%80%94such,significant%20challenges%20in%20four%20areas (accessed 19 May 2025)

15 Hirschhorn, P. and Brijs, T (2021) ‘Rising to the challenges of integrating solar and wind at scale’. 17 December, BCG, www.bcg.com/publications/2021/addressing-variable-renewable-energy-challenges#:~:text=Generating%20electricity%20from%20VRE%20sources%E2%80%94such,significant%20challenges%20in%20four%20areas (accessed 19 May 2025)

16 EPCM, (‘Geothermal energy: Global potential, current practices and major challenges’, https://epcmholdings.com/geothermal-energy-global-potential-current-practices-and-major-challenges/#:~:text=Resource%20Availability (accessed 2 May 2025)

17 EPCM, ‘Geothermal energy: Global potential, current practices and major challenges’, https://epcmholdings.com/geothermal-energy-global-potential-current-practices-and-major-challenges/#:~:text=High%20Upfront%20Costs (accessed 2 May 2025)

18 REN21 (2024) ‘Renewables in energy supply: Global trends’, Renewables 2024 Global Status Report Collection, www.ren21.net/gsr-2024/modules/energy_supply/01_global_trends/#:~:text=RENEWABLE%20ENERGY%20IN%20ENERGY%20SUPPLY,higher%20costs%20of%20raw%20materials (accessed 2 May 2025)

19 Hevia-Koch, P, Rawlins Bilbao, A and Morris, D. (2024) 'The clean energy economy demands massive integration investments now'. 25 January, IEA, www.iea.org/commentaries/the-clean-energy-economy-demands-massive-integration-investments-now (accessed 2 May 2025)

20 Purton, M (2024). 'Wind energy projects waiting years for electricity grid connection' 10 September, World Economic Forum, www.weforum.org/stories/2024/07/nature-climate-news-renewable-energy/ (accessed 2 May 2025)

21 IHA, 'Pumped storage hydropower', www.hydropower.org/factsheets/pumped-storage#:~:text=World%27s%20biggest%20battery (accessed 2 May 2025)

22 IEA, 'Hydrogen', www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/hydrogen (accessed 2 May 2025)

23 Groom, N and Garcia, J (2024). 'California battery plant is among world's largest as power storage booms'. 15 April, Reuters, www.reuters.com/business/energy/california-battery-plant-is-among-worlds-largest-power-storage-booms-2024-04-12/ (accessed 2 May)

24 United States Government Accountability Office, (2023) 'Technology Assessment. Utility-Scale Energy Storage', www.gao.gov/assets/gao-23-105583.pdf (accessed 2 May 2025)

25 Zimmer, K. (2024) 'Solving renewable energy's sticky storage problem'. 18 December, Knowable Magazine, https://knowablemagazine.org/content/article/food-environment/2024/developing-renewable-energy-storage-methods#:~:text=Solving%20renewable%20energy%E2%80%99s%20sticky%20storage,problem (accessed 2 May 2025)

26 JEC, (2024). 'How renewable energy can make the power grid more reliable and address risks to electricity infrastructure'. 19 January, www.jec.senate.gov/public/index.cfm/democrats/2024/1/how-renewable-energy-can-make-the-power-grid-more-reliable-and-address-risks-to-electricity-infrastructure#:~:text=From%202000%20to%202021%2C%20weather,damaging%20grid%20infrastructure%E2%80%94when%20heat%20from (accessed 2 May 2025)

27 CISA, 'Cyber-attack against Ukrainian critical infrastructure' (20 July 2021), https://www.cisa.gov/news-events/ics-alerts/ir-alert-h-16-056-01 (accessed 19 May 2025)

28 Sanger, D. et al., (2021) 'Cyberattack forces a shutdown of a top U.S. pipeline'. 13 May, https://www.nytimes.com/2021/05/08/us/politics/cyberattack-colonial-pipeline.html (accessed 19 May 2025)

29 Hammond, E. et al. (2022), 'Attacks on North Carolina substations leave thousands without power' . 5 December, https://edition.cnn.com/us/live-news/power-outage-north-carolina-updates/index.html (accessed 19 May 2025)

30 Jones, A (2022) 'China aims for space-based solar power test in LEO in 2028, GEO in 2030'. 8 June, SpaceNews, https://spacenews.com/china-aims-for-space-based-solar-power-test-in-leo-in-2028-geo-in-2030 (accessed 2 May 2025)

31 Henderson, D. (2020) 'The future of space is (or should be) private' 5 September, https://www.econlib.org/the-future-of-space-is-or-should-be-private/#:~:text=The%20private%20launch%20provider%20has,as%20five%20to%20ten%20years (accessed 19 May 2025)

32 Henderson, D. (2020) 'The future of space is (or should be) private' 5 September, <https://www.econlib.org/the-future-of-space-is-or-should-be-private/#:~:text=The%20private%20launch%20provider%20has,as%20five%20to%20ten%20years> accessed 19 May 2025

33 Henderson, D. (2020) 'The future of space is (or should be) private' 5 September, <https://www.econlib.org/the-future-of-space-is-or-should-be-private/#:~:text=The%20private%20launch%20provider%20has,as%20five%20to%20ten%20years> accessed 19 May 2025

34 Solestial, Interview. 31 July 2024.

35 ESA (2022) 'The case for an ESA preparatory programme for Space-Based Solar Power for terrestrial energy needs', https://esamultimedia.esa.int/docs/technology/The_Case_for_an_ESA_preparatory_programme_for_Space-Based_Solar_Power_for_terrestrial_energy_needs.pdf (accessed 2 May 2025)

36 De Chant,T (2022). 'Wireless power company Emrod beams 550 W across an Airbus warehouse'. 4 October https://techcrunch.com/2022/10/04/wireless-power-company-emrod-beams-550-w-across-an-airbus-warehouse/ (accessed 19 May 2025)

37 Airbus, Interview. 11 June 2024.

38 Perkins, R (2023). 'In a first, Caltech's space solar power demonstrator wirelessly transmits power in space'. 1 June, https://www.caltech.edu/about/news/in-a-first-caltechs-space-solar-power-demonstrator-wirelessly-transmits-power-in-space (accessed 19 May 2025)

39 Paul, J (2022) 'UK to launch first power station in SPACE – limitless green energy to slash foreign ties' 21 March, https://www.express.co.uk/news/science/1583031/uk-power-station-space-energy-initiative-green-solar (accessed 4 May 2025)

40 NASA, (2015) 'Solar arrays on the International Space Station'. 14 April, www.nasa.gov/image-article/solar-arrays-international-space-station-2/ (accessed 2 May 2025)

41 ESA, 'FAQ: Frequently asked questions on space-based solar power', www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/SOLARIS/FAQ_Frequently_Asked_Questions_on_Space-Based_Solar_Power (accessed 2 May 2025)

42 Gosavi, S et al. (2021) 'A review on space based solar power'. Journal of Thermal Energy Systems, 6(1): 16–24. https://doi.org/10.46610/JoTES.2021.v06i01.003 (accessed 5 May 2025)

43 ESA, Interview, 26 June 2024.

44 Kahana, L (2024). 'South Korea plans 120 GW space solar project'. 23 April, Pv magazine, www.pv-magazine.com/2024/04/23/south-korea-plans-120-gw-space-solar-project/ (accessed 19 May 2025)

45 Hall, L (2014) 'SPS-ALPHA: The first practical Solar Power Satellite via Arbitrarily Large Phased Array'. 16 February, NASA, www.nasa.gov/general/sps-alpha-the-first-practical-solar-power-satellite-via-arbitrarily-large-phased-array/ (accessed 2 May 2025)

46 Cambridge Society for the Application of Research, (2023) 'CSAR lecture: The CASSIOPeiA Solar Power Satellite'. 1 May, www.csar.org.uk/lectures/2022-2023/20230501/ (accessed 2 May 2025)

47 Jones, A (2022). 'China aims for space-based solar power test in LEO in 2028, GEO in 2030'. 8 June, SpaceNews, https://spacenews.com/china-aims-for-space-based-solar-power-test-in-leo-in-2028-geo-in-2030/ (accessed 2 May 2025)

48 NCSTI, (2024) 'China looks set to build space solar power station'. 14 June, https://en.ncsti.gov.cn/home/gridview/202406/t20240613_164551.html#:~:text=China%20has%20made%20a%20milestone,power%20back%20to%20the%20Earth (accessed 2 May 2025)

49 NCSTI, (2024) 'China looks set to build space solar power station' . 14 June, https://en.ncsti.gov.cn/home/gridview/202406/t20240613_164551.html#:~:text=China%20has%20made%20a%20milestone,power%20back%20to%20the%20Earth (accessed 2 May 2025)

50 Jones, A (2022) 'China aims for space-based solar power test in LEO in 2028, GEO in 2030'. 8 June, SpaceNews, https://spacenews.com/china-aims-for-space-based-solar-power-test-in-leo-in-2028-geo-in-2030 (accessed 2 May 2025)

51 ESA (2022) 'The case for an ESA preparatory programme for Space-Based Solar Power for terrestrial energy needs', https://esamultimedia.esa.int/docs/technology/The_Case_for_an_ESA_preparatory_programme_for_Space-Based_Solar_Power_for_terrestrial_energy_needs.pdf (accessed 2 May 2025)

52 ESA, 'Solaris', www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/SOLARIS/SOLARIS2 (accessed 2 May 2025)

53 Government of Japan, (2023) 'Japan's long-planned photovoltaics: Space-based solar power and perovskite solar cells'. 4 August, www.japan.go.jp/kizuna/2023/08/japans_long-planned_photovoltaics.html (accessed 2 May 2025)

54 JAXA, 'Ground demonstration testing of microwave wireless power transmission', www.kenkai.jaxa.jp/eng/research/ssps/150301.html#:~:text=Transmit%20frequency%205,340%20W (accessed 2 May 2025)

55 Tanaka, K (2022) 'R&D activities on solar power satellite in Japan'. 26 May, JAXA, www.spacedevelopmentfoundation.org/wordpress/wp-content/uploads/2022/06/Tanaka-Koji-JAXA-ISDC-2022.pdf#:~:text=,and%20the%20assembly%20of (accessed 2 May 2025)

56 Pultarova, T (2024) 'Japanese satellite will beam solar power to Earth in 2025'. 19 April, Space.com, www.space.com/japan-space-based-solar-power-demonstration-2025 (accessed 2 May 2025)

57 Pultarova, T (2024) 'Japanese satellite will beam solar power to Earth in 2025'. 19 April, Space.com, www.space.com/japan-space-based-solar-power-demonstration-2025 (accessed 2 May 2025)

58 Frazer-Nash Consultancy, (2021) 'Frazer-Nash report for UK government shows feasibility of space solar power'. 27 September, www.fnc.co.uk/discover-frazer-nash/news/frazer-nash-report-for-uk-government-shows-feasibility-of-space-solar-power (accessed 2 May 2025)

59 Space Energy Initiative, https://spaceenergyinitiative.org.uk (accessed 2 May 2025)

60 Rodgers, E et al. (2024) 'Space-based solar power'. 11 January, NASA, www.nasa.gov/wp-content/uploads/2024/01/otps-sbsp-report-final-tagged-approved-1-8-24-tagged-v2.pdf#:~:text=This%20study%20evaluates%20the%20potential,benefits%20of%20SBSP%20as%20more (accessed 2 May 2025)

61 Rodgers, E et al. (2024) 'Space-based solar power'. 11 January, NASA, www.nasa.gov/wp-content/uploads/2024/01/otps-sbsp-report-final-tagged-approved-1-8-24-tagged-v2.pdf#:~:text=This%20study%20evaluates%20the%20potential,benefits%20of%20SBSP%20as%20more (accessed 2 May 2025)

62 AFRL, 'Space power beaming', https://afresearchlab.com/technology/space-power-beaming (accessed 2 May 2025)

63 Future Data Stats, 'Global Report 2023–2030', www.futuredatastats.com/energy-market?utm_sourc (accessed 2 May 2025)

64 Pultarova, T (2024) 'Japanese satellite will beam solar power to Earth in 2025'. 19 April, Space.com, www.space.com/japan-space-based-solar-power-demonstration-2025 (accessed 2 May 2025)

نبــذة عــن
مؤسسـة دبــي للمستقــبل

تسعى مؤسسة دبي للمستقبل إلى تحقيق رؤية صاحب السمو الشيخ محمد بن راشد آل مكتوم، نائب رئيس الدولة رئيس مجلس الوزراء حاكم دبي، رعاه الله، لجعل دبي رائدة مدن المستقبل ومركزاً عالمياً لتقنياته وتحولاته، بالتعاون مع شركائها من الجـهات الحكومية والشركات العالمية والمبتكرين والشركات الناشئة ورواد الأعمال في دولة الإمـارات وخـارجها. كما تقـود المؤسسة جـهوداً مشتركة لتخـيّل مستقبل دبـي وتصميمه وتحقيقه.

وتتمثل ركائز استراتيجية المؤسسة في تخيّل المستقبل وتصميمه وتنفيذه، وذلك بدعم وإشراف سمو الشيخ حمدان بن محمد بن راشد آل مكتوم، ولي عهد دبي نائب رئيس المجلس التنفيذي، رئيس مجلس أمناء مؤسسة دبي للمستقبل. وتطلق المؤسسة برامج ومبادرات محلية وعالمية ومشاريع مبتكرة ونوعية لتحقيق هذا الهدف، كما تتولى إعداد خطط واستراتيجيات مستقبلية وتقارير حول السيناريوهات المستقبلية المحتملة، بما يدعم مكانة دبي كمركز عالمي لتطوير وتبني أحدث الحلول والممارسات المبتكرة لخدمة الإنسانية.

وتركز المؤسسة على تحديد أبرز التحديات التي تواجه المدن والمجتمعات والقطاعات في المستقبل وتحويلها إلى فرص نمو واعدة من خلال جمع البيانات وتحليلها ودراسة التوجهات العالمية ومواكبة التغيرات المتسارعة. كما تحرص على استكشاف القطاعات الجديدة والناشئة وتكاملها مع القطاعات والصناعات القائمة.

وتشرف مؤسسة دبي للمستقبل على عدد كبير من المشاريع والمبادرات الرائدة مثل متحف المستقبل، ومنطقة 2071، ومركز الثورة الصناعية الرابعة في الإمارات، ومسرعات دبي للمستقبل، ومليون مبرمج عربي، وحي دبي للمستقبل، وحلول دبي للمستقبل، ومنتدى دبي للمستقبل، وملتقى دبي للذكاء الاصطناعي، وغيرها. وتسهم المؤسسة، من خلال مبادراتها المعرفية ومراكزها لتصميم المستقبل، في بناء قدرات أصحاب المواهب، وتمكينهم وصقل مهاراتهم، بما يمكّنهم من الإسهام في تحقيق التنمية المستدامة في دبي ودولة الإمارات.

dubaifuture.ae

research@dubaifuture.gov.ae

@dubaifuture

إخلاء مسؤولية

تم إعداد هذا التقرير لأغراض إعلامية وتعليمية وإرشادية. ويتضمن توجهات مستقبلية مبنية على الدراسات والبحوث، وليس الهدف منها بالضرورة تبنيها كما هي أو العمل بها. كما أن النتائج والتفسيرات والاستنتاجات الواردة في هذا التقرير لا تمثل بالضرورة آراء مؤسسة دبي للمستقبل.

المعلومات الواردة في هذا التقرير تستند إلى الدراسات والبحوث والبيانات المتاحة حتى تاريخ النشر. ويهدف التقرير إلى تقديم المعلومات وتحفيز التفكير النقدي واتخاذ القرارات المستنيرة في مجالات استشراف المستقبل. وتخلي مؤسسة دبي للمستقبل مسؤوليتها بالكامل فيما يتعلق بمحتوى واستخدام التقرير (أو أي اعتماد عليه، وخصوصاً، أي تفسير أو قرار أو إجراءات تعتمد على المعلومات الموجودة في هذا التقرير). ولا توصي مؤسسة دبي للمستقبل كما أنها لا تؤيد أي إجراءات أو استراتيجيات أو وجهات نظر تمت مناقشتها في هذا التقرير.

قد تمتلك أطراف أخرى حقوق ملكية في بعض المحتوى الوارد في هذا التقرير. وبأي حال من الأحوال، فإن مؤسسة دبي للمستقبل لا تدّعي أو تضمن امتلاكها أو سيطرتها على جميع الحقوق في المحتوى بأكمله، ولن تكون مؤسسة دبي للمستقبل مسؤولة أمام المستخدمين عن أي مطالبات تقدم ضدهم من قبل أطراف ثالثة فيما يتعلق باستخدامهم لأي محتوى.

© 2025 جميع حقوق الطبع والنشر محفوظة لمؤسسة دبي للمستقبل.

جميع المواد الواردة في هذا التقرير مرخصة بموجب رخصة المشاع الإبداعي - نَسب المصنف 4.0 دولي (رخصة المشاع الإبداعي)، باستثناء المحتوى المقدم من أطراف ثالثة أو الشعارات أو أي مادة محمية بعلامة تجارية أو مشار إليها في هذا التقرير. رخصة المشاع الإبداعي اتفاقية ترخيص نموذجية تتيح نسخ التقرير وتوزيعه ونقله وتكييفه شريطة نسب العمل لصاحبه، وهي متاحة على الرابط:
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode

يمكن الاطلاع على القائمة الكاملة لمعلومات الأطراف الثالثة المدرجة في هذا التقرير ومواردها ضمن قسم الملاحظات وقائمة المراجع. ويستثني إخلاء المسؤولية بصفة خاصة العلامات التجارية لكلمة مؤسسة دبي للمستقبل وشعارها من نطاق ترخيص المشاع الإبداعي هذا.

تم إعداد هذا التقرير باللغة الإنجليزية، وتمت ترجمته إلى اللغة العربية بهدف إيصال التقرير إلى أكبر شريحة ممكنة من القرّاء. ورغم الجهود المبذولة لضمان الدقة في الترجمة، إلا أنه يجب الرجوع إلى النسخة الإنجليزية في حال وجود أي تناقضات أو اختلافات بين النسختين.

المحتوى الوارد في هذا التقرير من إعداد مؤسسة دبي للمستقبل. وقد تم الاستعانة بتقنيات الذكاء الاصطناعي التوليدي للمساعدة في التدقيق اللغوي، والتحرير، والترجمة، وإنتاج الصور، وذلك تحت إشراف فريق العمل.

مؤسسة دبي للمستقبل
DUBAI FUTURE FOUNDATION

أعدّ هذا التقرير فريق عمل أبحاث دبي للمستقبل لدى مؤسسة دبي للمستقبل التي تصدر العديد من الدراسات والتقارير الاستشرافية باستخدام الأساليب التحليلية القائمة على الأدلة والخيال بهدف مساعدة الجهات المعنية على التنبؤ بالمستقبل والاستعداد له بشكل أفضل. يمكنكم الاطلاع على منشوراتنا السابقة عبر الرابط الإلكتروني:
www.dubaifuture.ae/insights