دراسات خاصة

سلسلة دراسات تصدر بصورة غير دورية عن المستقبل للأبحاث والدراسات المتقدمة أبوظبي، الإمارات العربية المتحدة

حدود الاستغلال

استخدام الفضاء من أجل مستقبل مستدام للطاقة

إبراهيم الغيطاني

العدد 19 - ديسمبر 2022

دراسات خاصة

عن "دراسات خاصة"

سلسلة دراسات، تصدر بصورة غير دورية عن "المستقبل للأبحاث والدراسات المتقدمة"، وتركز الدراسات على الظواهر الصاعدة، والمؤشرات المركبة والأفكار غير التقليدية، والاتجاهات القادمة التي ترتبط بالعالم قيد التشكل منذ بداية عام 2020.

وتتناول "السلسلة" أبرز القضايا الصاعدة في المجالات الأمنية والسياسية والاقتصادية والاجتماعية والتكنولوجية، والظواهر كافة التي يمكن أن تساهم في تشكيل مستقبل التفاعلات الدولية والإقليمية.

*الآراء الواردة في الإصدار تعبر عن كُتابها، ولا تعبر بالضرورة عن "دراسات خاصة" أو آراء مركز المستقبل للأبحاث والدراسات المتقدمة.

*حقوق النشر محفوظة ولا يجوز الاقتباس من مواد الإصدار من دون الإشارة إلى المصدر، كما لا يجوز إعادة نشر الدراسات دون اتفاق مسبق مع المركز.

المدير التنفيذي:
حسام إبراهيم

رئيس التحرير التنفيذي:
مصطفى ربيع

نائب رئيس التحرير:
إبراهيم الغيطاني

الهيئة العلمية:
د.إبراهيم غالي
علي صلاح
د. شادي عبدالوهاب
أحمد عاطف
د. إيهاب خليفة
هالة الحفناوي
يارا منصور
عبداللطيف حجازي
آية يحيى
جيداء أبو الفتوح
محمد محمود السيد
شريف هريدي

الإخراج الفني:
عبدالله خميس
عادل خطاش

العلاقات العامة:
رحاب مكرم
info@futureuae.com

مدير النشر والتسويق:
أمجد محمد جروين
marketing@futureuae.com

حدود الاستغلال:

استخدام الفضاء من أجل مستقبل مستدام للطاقة

إبراهيم الغيطاني

رئيس برنامج الطاقة -المستقبل للأبحاث والدراسات المتقدمة

ملخص الدراسة:

بعد أن كان الفضاء ساحة للتنافس الاستراتيجي بين القوى الكبرى في خمسينيات القرن الماضي، تزايد اهتمام الحكومات العالمية والشركات في العقود الثلاثة الأخيرة بالاستغلال التجاري للمدار الفضائي حتى بلغ حجم صناعة الفضاء العالمية نحو 400 مليار دولار حالياً، ومدعوماً بشكل أساسي باستثمارات الحكومات والشركات في مجال البحوث الأساسية للفضاء، وإطلاق أقمار صناعية من قبل القوى الكبرى، مثل الولايات المتحدة وروسيا والصين للأغراض العسكرية والمدنية. في السنوات الأخيرة، بدا واضحاً أيضاً أن العديد من الدول المتقدمة لديها اهتمام باستغلال الفضاء في مجال الطاقة، وذلك استناداً إلى ثلاثة تطبيقات رئيسية، هي توفير البيانات لشركات الطاقة عبر الأقمار الصناعية، وإطلاق مشاريع مستقبلية للطاقة الشمسية الفضائية، والتعدين في الكويكبات، وهي مجالات ستخدم في النهاية بناء مستقبل مستدام للطاقة في العالم. بيد أن نمط الاستغلال الحالي للفضاء يستدعي وضع إطار دولي جديد لتنظيم الاستغلال التجاري للفضاء، جنباً إلى جنب مع تحفيز الطلب العالمي على الخدمات الفضائية، عبر حزمة من الإجراءات الحكومية، بغرض تأسيس سوق واسع يبرر الاستثمارات العامة والخاصة في صناعة الفضاء.

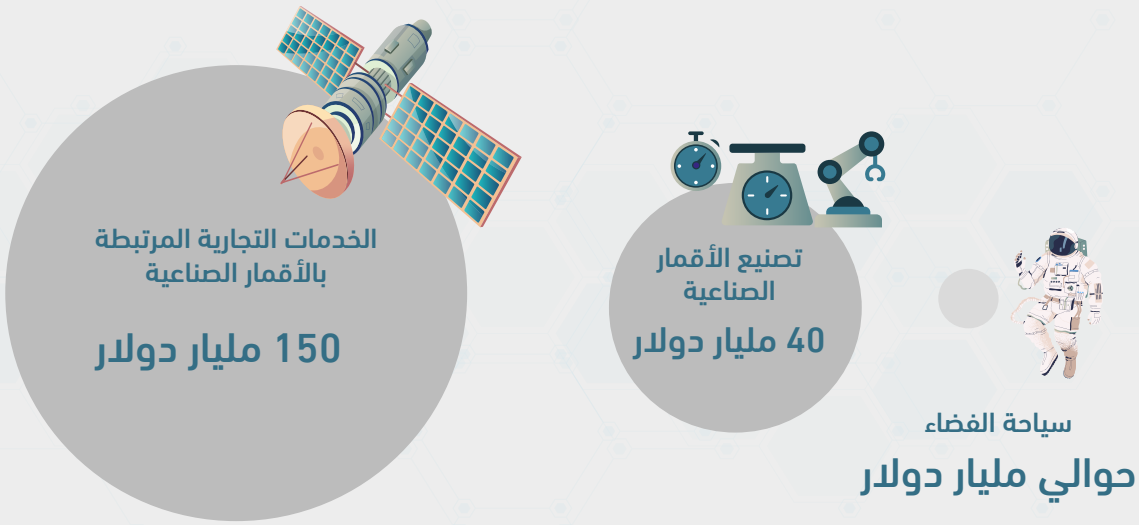
أولاً: اقتصادات الفضاء

في خمسينيات القرن العشرين، كان استكشاف الفضاء -ولايزال- أحد ساحات التنافس الاستراتيجي بين الولايات المتحدة الأمريكية والاتحاد السوفييتي سابقاً، حيث حرص كل طرف على توظيف تطبيقات الفضاء المختلفة من أجل تعزيز التفوق العسكري وحماية المصالح الاستراتيجية له على حساب الآخر. أما اليوم، فيحمل استغلال المدارات الفضائية والكويكبات وسطح القمر طابعاً تجارياً إلى جانب خاصيته العسكرية، حيث تتنافس الحكومات والشركات الدولية فيما بينها الآن لتطوير تطبيقات تجارية واسعة لاستغلال الفضاء في مختلف القطاعات ويشمل ذلك الزراعة والصناعة والطاقة وغيرها [1].

اليـوم، هنـاك عـدد قيـاسي مـن الـدول والـشركات التجاريـة التـي لديهـا برامـج اسـتثمارية خاصـة بالفضـاء، والتـي يتوجـه معظـم الأمـوال المخصصة لهـا لصالـح إطـلاق الأقمـار الصناعية والبنيـة التحتيـة الأخـرى ذات الصلـة بالفضـاء. وقـد شـكلت ميزانيـات برامـج الفضـاء لـدى اقتصـادات مجموعـة العشريـن مـا يقـرب مـن 0.05% مـن الناتـج المحـلي الإجمـالي في عـام 2019 (بمـا في ذلـك الميزانيـات المدنيـة وأنشـطة الفضـاء العسـكرية) طبقـاً لتقديـرات منظمـة التعـاون الاقتصـادي والتنميـة (Organization for Economic Co-operation and Development)[2].

ويعـد إطـلاق الأقمـار الصناعيـة والخدمـات المتعلقـة بهـا الركيـزة الأساسـية لصناعـة الفضاء، حيـث تسـاهم اليـوم بحـوالي 190 مليـار دولار سـنوياً طبقـاً لتقديـرات شركـة "ماكينـزي آنـد كومبانـي"، أي مـا يصـل إلى أكثـر مـن 40% مـن اقتصـاد الفضـاء سـنوياً. وقـد نمـا هـذا المجال تحديـداً بنسـبة 15% بمعـدل نمـو سـنوي عـلى مـدى السـنوات الخمـس الماضيـة. وبشـكل إجمـالي، يبلـغ حجـم صناعـة الفضـاء حـوالي 400 مليـار دولار حالياً، ويتوقـع بنـك أوف أمريـكا أن تتضاعـف لتصـل إلى 1.4 تريليـون دولار بنهايـة عـام 2030. وقـد تزيـد قيمـة صناعـة الفضـاء إلى مـا يقـرب مـن 3 تريليونـات دولار بعـد ثلاثـة عقـود مـن الآن [3].

شكل (1): إجمالي حجم صناعة الفضاء التجارية نحو 400 مليار دولار



Source: The role of space in driving sustainability, security, and development on Earth, McKinsey & Company, 2022, accessible at: https://mck.co/3Uy7uJZ

ومـع تنامـي التطبيقـات التجاريـة لصناعـة الفضـاء، أصـدرت منظمـة التعـاون الاقتصـادي والتنميـة دليـلاً تعريفيـاً خـاص بـ "اقتصـاد الفضـاء" وأنشـطته، وعرفتـه المنظمة بأنـه النطاق

الكامل للأنشطة والموارد التي تخلق وتتيح قيمة وفوائد للبشر في سياق الاستكشاف والفهم والإدارة والاستفادة من الفضاء، ويشتمل أيضاً بشكل متزايد الآثار الواسعة الانتشار للمنتجات والخدمات والمعرفة المستمدة من الفضاء على الاقتصادات العالمية والمجتمعات. وسيوضح الجدول (1) أنشطة "اقتصاد الفضاء" بحسب تصنيف منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية.

جدول (1): أنشطة اقتصاد الفضاء بحسب تصنيف منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية

القطاع	الأنشطة الرئيسية
قطاع المنبع (Upstream sector)	البحث والتطوير، التصنيع، الإطلاق
قطاع المصب (Downstream sector)	العمليات الفضائية، والمنتجات والخدمات المستمدة منها (مثل بيانات الأقمار الصناعية)
التكنولوجيا المبنية على أنشطة الفضاء	نقل التكنولوجيا من قطاع الفضاء إلى قطاعات أخرى

Source: Impact of the Space Sector Key Indicators and Options to Improve Data, **Organization for Economic Co-operation and Development**, October 2020, accessible at: https://bit.ly/3iDFqY7

ثانياً: اقتصاد الفضاء والطاقة

في السنوات الأخيرة، نشأ اهتمام خاص من قبل العديد من الدول وبعض الكيانات الخاصة باستغلال الفضاء في قطاع الطاقة العالمي، الأمر الذي يتواكب مع الجهود الدولية الحثيثة للتعامل مع قضية التغير المناخي، وخفض البصمة الكربونية لقطاع الطاقة العالمي. وتتطلع الآن العديد من الحكومات وشركات الطاقة إلى تعزيز استدامة الطاقة، وتحسين كفاءة إدارة أصول الطاقة[4].

ومثلاً على السياق السابق، في عام 2021 أطلقت إدارة الطاقة الأمريكية (Department of Energy) استراتيجية "الطاقة من أجل الفضاء"، وهي تهدف لتطوير تقنيات جديدة للطاقة (نووية وغير نووية) من أجل تسهيل مهمات البعثات الأمريكية في الفضاء، وكذلك دعم نشر الأقمار الصناعية للأغراض المدنية والعسكرية. إلى جانب ذلك، تستهدف الاستراتيجية تكثيف البحوث من أجل تعزيز عمليات تعدين الفضاء والحصول على الطاقة الشمسية

الفضائية[5].

بصفة عامة، ظهرت ثلاثة تطبيقات رئيسية محتملة في مجال الطاقة عبر استغلال الفضاء، ويمكن توضيحها على النحو التالي:

1- الأقمار الصناعية من أجل البيانات:

في السنوات الأخيرة، نما استخدام شركات الطاقة العالمية للتقنيات المختلفة من أجل تحسين كفاءة وإدارة أصول الطاقة. يجري بشكل شائع في معظم شركات الطاقة العالمية حالياً استخدام أجهزة الاستشعار لمراقبة عمليات وأصول شركات الطاقة عن بُعد. وعن طريق الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء (Internet of Things) أيضاً، يمكن التنبؤ بأعطال الشبكات الكهربائية مبكراً فيما يعرف بـ "الصيانة التنبؤية"، بالإضافة للكشف عن الخلل بأنظمة وشبكات خطوط الأنابيب[6].

ومع تحول مزيد من الدول نحو الطاقة المتجددة وزيادة الرقمنة، تزايد اعتماد الشركات على البيانات المستندة إلى صور الأقمار الصناعية. تقليدياً، دعمت الأقمار الصناعية مزودي الطاقة الرئيسيين في مراقبة تأثيرهم البيئي والتحكم فيه، وذلك عبر رصد انبعاثات غازات الاحتباس الحراري الصادرة عن أنشطتها، أو تتبع تأثيرها على التنوع البيئي في محيطها البري أو البحري. وللأقمار الصناعية دور حيوي أيضاً في مراقبة أصول وعمليات الشركات من المنصات البحرية إلى خطوط الأنابيب، لاسيما بالمناطق النائية.

إحدى المهام الأخرى التي تضطلع بها الأقمار الصناعية أيضاً هي تحديد المواقع الواعدة لمصادر الطاقة المتجددة عن طريق رسم خرائط الإشعاع الشمسي وسرعات الرياح أو تدفقات المياه. كما تقدم معلومات قيمة لمشغلي شبكات الطاقة لمراقبة حالة وسلامة شبكات الطاقة الكهربائية وخطوط الأنابيب[7].

وقد ابتكرت المفوضية الأوروبية، بالشراكة مع وكالة الفضاء الأوروبية برنامج كوبرنيكوس (Copernicus Programme) لمراقبة الأرض بُغية مساعدة صانعي القرار لتحقيق أهداف سياسة الاتحاد الأوروبي، الخاصة بتغير المناخ وحماية البيئة، حيث توفر الأقمار الصناعية الخاصة بالبرنامج بيانات مناخية رئيسية حول ارتفاع مستويات سطح البحر، وارتفاع درجة حرارة مياه المحيطات، وزوال الجليد في العالم وغير ذلك. وتوفر البيانات المأخوذة من الأقمار الصناعية أيضاً ملاحظات أساسية حول جودة الهواء في أوروبا وغيرها من مناطق العالم.

إلى جانب السابق، تُقدم خدمة مراقبة البيئة البحرية في "كوبرنيكوس"، على سبيل المثال، المعلومات ذات الصلة بمزارع الرياح البحرية، مثل سرعة الرياح وحجم الموجة وترددها. هذه المعلمات ضرورية في تحديد مكان توليد طاقة الرياح بأكثر الطرق فعالية من

حيث التكلفة مع تقليل مخاطر الأصول. يمكن استخدام أقمار "كوبرنيكوس" أيضاً لمراقبة الغطاء السحابي - شديد التغير- والهباء الجوي اللذان يؤثران على توفر الإشعاع الشمسي[8].

حالياً، تعتمد كثير من المؤسسات الدولية مثل البنك الدولي على صور الأقمار الصناعية للاتحاد الأوروبي كمدخل أساسي لدراسة جدوى المشروعات التي تمولها، أو رصد تأثيرها البيئي. كما ستستفيد الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (إيرينا) أيضاً من الأقمار الخاصة بوكالة الفضاء الأوروبية بموجب مذكرة تفاهم وُقعت بين الطرفين. وستستخدم "إيرينا" الخدمات والمنتجات المستندة إلى الفضاء لتحسين الوصول إلى الطاقة، ونمذجة الكهرباء، ورسم خرائط الموارد المتجددة، وتخطيط الشبكة الذكية. يمكن أن تلعب صور وبيانات الأقمار الصناعية، التي ستحصل عليها "إيرينا" دوراً مهماً في مساعدة البلدان على تقييم الإمكانات الجغرافية لمصادر الطاقة المتجددة بشكل أفضل، وتحديد أفضل المواقع للمشاريع وأنماط الطقس المتوقعة [9].

جدول (2): مجموعة بيانات نموذجية لرصد الكرة الأرضية

البيان	المتغير
الهندسة الشمسية	- انتصاف الشمس في وقت الظهيرة - ساعات النهار - الزوايا الشمسية كل ساعة من الأفق
الإشعاع الشمسي	- الإشعاع الشمسي (متوسط، الحد الأدنى، الحد الأقصى) - فرق الإشعاع الأفقي (متوسط، الحد الأدنى، الحد الأقصى) - إشعاع عادي مباشر (متوسط، الحد الأدنى، الحد الأقصى) - إشعاع السماء الصافية - أيام السماء الصافية
الإضاءة	- الإضاءة على الأسطح المائلة في الأوقات المتاحة بتوقيت جرينتش - الإضاءة على الأسطح المائلة على مدار 24 ساعة
كميات السحب	- كميات السحب في الأوقات المتاحة بتوقيت جرينتش - تواتر كميات السحب

البيان	المتغير
الرياح	- سرعة الرياح عند 50 متراً (متوسط، دقيقة، الحد الأقصى) - النسبة المئوية من الوقت لنطاقات سرعة الرياح عند 50 مترً - سرعة الرياح 10 أمتار لتضاريس مشابهة للمطارات
درجة الحرارة	- درجة حرارة الهواء عند 10 أمتار - درجة الحرارة اليومية عند 10 أمتار - درجة حرارة نقطة الندى عند 10 أمتار - عدد أيام درجة الحرارة فوق 18 درجة مئوية - عدد أيام درجة الحرارة أقل من 18 درجة مئوية - عدد أيام الصقيع

Source: Mariarosa Argentiero and Pasquale Marcello Falcone, The Role of Earth Observation Satellites in Maximizing Renewable Energy Production: Case Studies Analysis for Renewable Power Plants, **MDPI**, March 7, 2022, accessible at: https://bit.ly/3irRcVu

2- الطاقة الشمسية الفضائية (Space-based solar power)

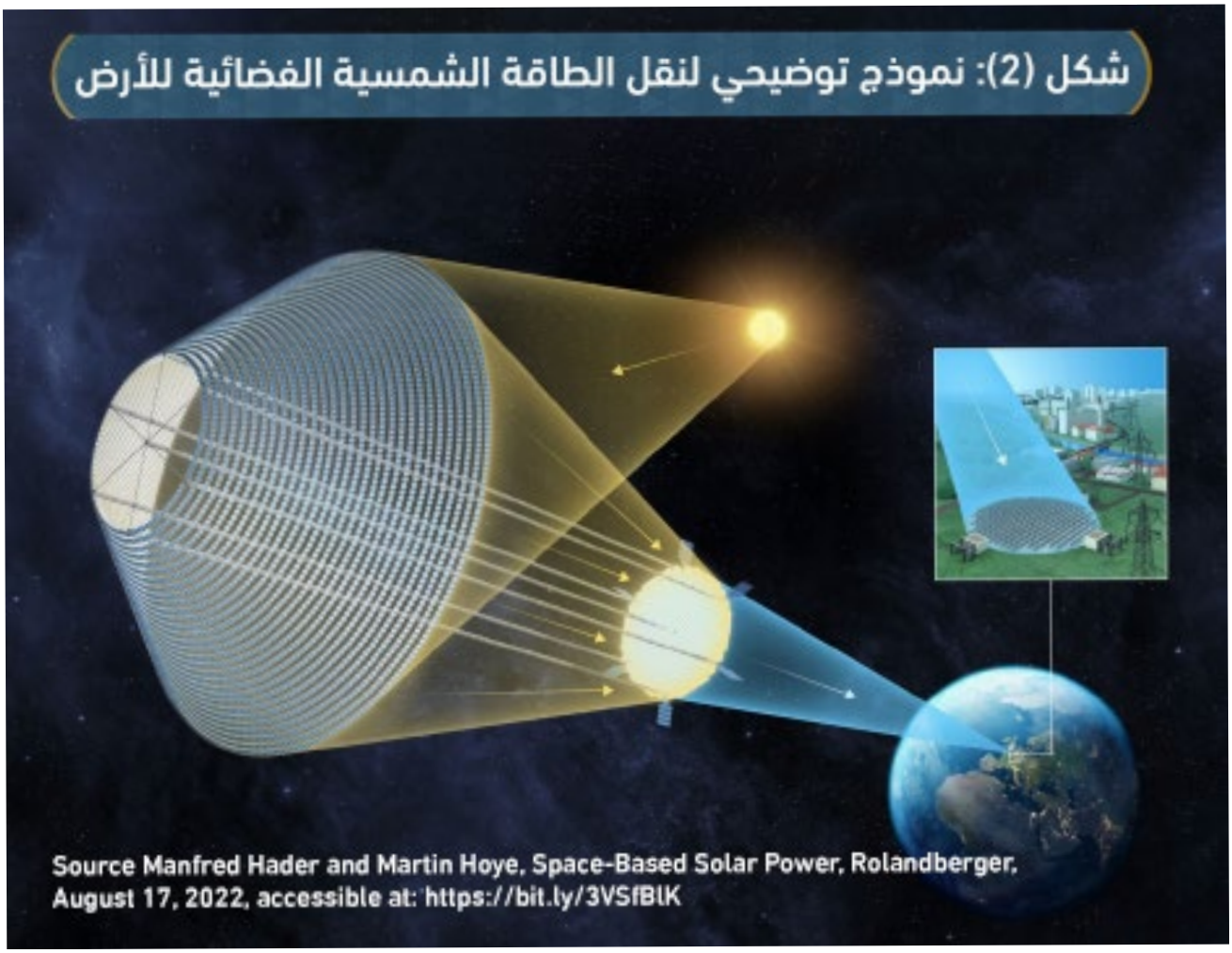
في قصته القصيرة "السبب" (Reason)، وصف الكاتب والعالم الفيزيائي الأمريكي إسحاق عظيموف عالماً جديداً يمكن فيه استغلال الفضاء للحصول على الطاقة الشمسية. وبعد أكثر من 80 عاماً من القصة الصادرة عام 1941، قد تصبح رؤية عظيموف المستقبلية حقيقة واقعة [10]. وفي السنوات الأخيرة بالفعل، كثفت بعض الدول من بحوثها الأساسية والعملية لتعزيز تقنيات استقبال الطاقة الشمسية من الفضاء.

في البداية سنوضح النموذج التكنولوجي للطاقة الشمسية الفضائية، وهو يتكون من أربعة عناصر رئيسية: (1) القمر الصناعي للطاقة الشمسية (The solar power satellite-lite)، (2) الإطلاق الفضائي والنقل إلى المدار، (3) الهوائي الأرضي، (4) وحدة مراقبة الأقمار الصناعية ومحطات الطاقة الأرضية.

ويتم نقل الطاقة الشمسية للأرض عبر مراحل مختلفة تبدأ من إطلاق القمر الصناعي للطاقة الشمسية. بالمرحلة الأولى، يتم إطلاق مركبة فضائية ضخمة تمتد لنطاق كيلومتر أو أزيد، وعادة ما تقع في مدار ثابت بالنسبة للأرض، وهي تتكون من ألواح شمسية كبيرة وخفيفة الوزن قادرة - نظرياً- على توليد ما بين 2 إلى 3 جيجاوات من الكهرباء.

يعقب ذلك بث الطاقة للأرض عبر هوائي تصحيح (Rectenna)، وهذا ما يسمى

"نقل الطاقة اللاسلكية (Wireless Power Transmission) ، على أن يكون التردد اللاسلكي المقترح في "نافذة الغلاف الجوي" يتراوح قدرته بين من 1 إلى 10 جيجاهرتز، مما يجعلها قادرة على الإرسال بكامل طاقتها بغض النظر عن فصول السنة وظروف الطقس. يقوم الهوائي بتحويل موجات الراديو المنقولة إلى كهرباء وعادة ما يتم توصيل حوالي 2 جيجاوات إلى الشبكة الكهربائية الأرضية [11]. جدير بالذكر أنه يتم نقل الطاقة الشمسية للأرض إما عبر موجات الراديو، أو عن طريق إشعاع الليزر، والأول يتميز بكفاءة لتحويل الطاقة بنسبة تصل أكثر من 95% [12] .



وتُحضر بعض الحكومات العالمية (مثل بريطانيا والولايات المتحدة والصين) حالياً للتوسع في استخدام الطاقة الشمسية الفضائية مستقبلاً، وهي تجري حالياً الدراسات الأساسية والفنية والجدوى الخاصة بتقنيات الطاقة الشمسية الفضائية، كما تطور بعض المشاريع التجريبية محدودة القدرة. وكجزء من خطتها للحياد الكربوني بحلول عام 2050،

تـدرس الحكومـة البريطانيـة بنـاء محطـة طاقـة شمسـية فضائيـة كاملـة بقيمـة 16 مليـارات جنيـه إسـترليني. ومـن المتوقـع أن يبـدأ المـشروع بنمـوذج تجريبـي سـيقود لبنـاء محطـة طاقـة شمسـية كاملـة في عـام 2040. يبلـغ قطـر القمـر الصناعـي الشـمسي المقـترح نحـو 1.7 كيلومـتر بـوزن قـدره 2000 طـن، بينمـا يشـغل الهوائـي الأرضي مسـاحة كبـيرة قدرهـا (6.7 كيلومـتر x 13 كيلومـتراً). سـيوفر هـذا القمـر الصناعـي طاقـة كهربائيـة قدرهـا 2 جيجـاوات. في حـين أن هـذه كميـة كبـيرة مـن الطاقـة، إلا أنهـا ستسـاهم بحصـة صغـيرة في قـدرة التوليـد في المملكـة المتحـدة، والتـي تبلـغ نحـو 76 جيجـاوات حاليـاً [13] .

جدول (3): برامج بعض الدول لتطوير تقنيات محطات الطاقة الشمسية الفضائية

الدولة	مسار التطوير
الولايات المتحدة الأمريكية	**إجـراء بحـوث أساسـية ومشـاريع تجريبيـة لتطويـر تقنيـات الطاقـة الشمسـية الأرضيـة، خاصـة مـن قبـل مختـبري أبحـاث القـوات الجويـة، والقـوات البحريـة الأمريكيـة.**
اليابان	**لـدى وكالـة استكشـاف الفضـاء اليابانيـة خريطـة طريـق للطاقـة الشمسـية الفضائيـة، ونجحـت في إثبـات نقـل الطاقـة اللاسـلكية عـلى نطـاق كيلـووات في عـام 2015.**
الصين	**الأكاديميـة الصينيـة لتكنولوجيـا الفضـاء لديهـا برنامـج معلـن للطاقـة الشمسـية الفضائيـة، وقدمـت خريطـة طريـق في مؤتمـر تطويـر الفضـاء الـدولي في عـام 2015.**
أوروبا	**إجـراء وكالـة الفضـاء الأوروبيـة بشـكل دوري دراسـات حـول الطاقـة الشمسـية الفضائيـة عـلى مـدار العقديـن الماضيـين، وهـي طـور تنفيـذ دراسـة جـدوى بشـأن إنشـاء محطـة شمسـية فضائيـة في المسـتقبل.**

Source: Space Based Solar Power De-risking the pathway to Net Zero, Frazer-Nash Consultancy, 2021, accessible at: https://bit.ly/3iCXhOU

وفي تقييـم أولي لـدورة حيـاة محطـة الطاقـة الشمسـية الفضائيـة المقترحـة، توصلـت جامعـة سـتراثكلايد في أسـكتلندا إلى أن المحطـة سـيكون لهـا بصمـة كربونيـة تبلـغ 24 جرامـاً مـن ثانـي أكسـيد الكربـون لـكل كيلـووات/ سـاعة، مـا يعـادل نصـف البصمـة الكربونيـة للطاقـة الشمسـية الأرضيـة. ربمـا الأهـم مـن ذلـك، أن الطاقـة الشمسـية الفضائيـة سـتكون تنافسـية

بالنظر إلى مصادر الطاقة الأخرى، وقد توقعت دراسة لشركة "فريزر ناش" للاستشارات أن تكلفة إنتاج الكهرباء من المحطة الفضائية ستبلغ 26 جنيهاً إسترلينياً لكل ميجاوات في الساعة، أي حوالي ثلث تكلفة الطاقة النووية وأرخص من كل من طاقة الرياح، والطاقة الشمسية.[14]

من بين الدول الأخرى التي تستكشف إمكانات الطاقة الشمسية الفضائية الصين والولايات المتحدة الأمريكية واليابان. في الولايات المتحدة، أجرت مؤسسات الجيش الأمريكي، مثل مختبر الأبحاث البحرية الأمريكية (US Naval Research Laboratory) اختباراً لوحدة شمسية ونظام تحويل طاقة من الفضاء في عام 2020. وفي الوقت نفسه، أحرزت الصين تقدماً - علمياً وعملياً- لتشييد محطة الطاقة الشمسية الفضائية "بيشان" Bishan الخاصة بها، والتي من المفترض أن تبدأ عملها بحلول عام 2035.

كما تبدي الشركات الخاصة اهتماماً لإجراء دراسات ومشاريع تجريبية بهدف تطوير الطاقة الشمسية الفضائية. وقد تم إطلاق مبادرة الطاقة الفضائية Space Energy In-itiative، وهي تضم نحو 50 مؤسسة في قطاعات الطاقة والفضاء والتمويل، بما في ذلك شركات مثل "إيرباص" الفرنسية، و"تاليس" الفرنسية ووزارة التجارة البريطانية و"إمبريال كوليدج لندن" و"جامعة كامبريدج"، بهدف تطوير نموذج تجاري لاستخدام الطاقة الشمسية الفضائية [15].

بصفة عامة يُنظر إلى الطاقة الشمسية الفضائية بأنها باتت مجدية تقنياً مقارنة بالسنوات الفائتة، ويرجع ذلك في المقام الأول بسبب التقدم في التقنيات الرئيسية، بما في ذلك الخلايا الشمسية خفيفة الوزن، ونقل الطاقة اللاسلكية، وروبوتات الفضاء. مع ذلك، تثير تقنيات الطاقة الشمسية الفضائية شكوكاً جوهرية حول جدواها التجارية، بسبب ارتفاع التكاليف الأولية، وبطء العائد على الاستثمار، مما يعني أن إقامة المشروع يحتاج إلى موارد حكومية كبيرة بالتضافر مع استثمارات القطاع الخاص.

ويتطلب تجميع محطة طاقة شمسية واحدة فقط في الفضاء إطلاق العديد من مركبات الفضاء، مما يرفع من التكلفة الإجمالية للطاقة الشمسية الفضائية بشكل كبير. في الوقت نفسه، سيزيد هذا النشاط من الانبعاثات الكربونية الصادرة عن عمليات الإطلاق. وحتى إذا تمكن العالم من بناء محطة طاقة شمسية فضائية بنجاح، فإن تشغيلها سيواجه أيضاً العديد من التحديات العملية أبرزها احتمالية تلف الألواح الشمسية بسبب الحطام الفضائي، وإمكانية تحللها بمعدل أسرع بكثير من نظيراتها الأرضية بسبب الإشعاع الشمسي الشديد. وتم التشكيك أيضاً من قبل بعض العلماء في كفاءة نقل الطاقة اللاسلكية الطاقة مع المسافات الكبيرة، وبناءً على التكنولوجيا القائمةحالياً، لن يصل سوى جزء صغير من الطاقة الشمسية المجمعة إلى الأرض.[16] كل تلك الاعتبارات دفعت إيلون ماسك، مؤسس شركة "تسلا" للسيارات الكهربائية، أن يصف تقنية الطاقة الشمسية الفضائية بأنها "أغبى شيء على الإطلاق"[17].

بصفة إجمالية، يفرض تطوير محطة طاقة شمسية فضائية عدة تحديات من أبرزها التكلفة الكبيرة اللازمة لبناء قمر صناعي وإرساله إلى الفضاء والتكلفة المقابلة لمحطة الاستقبال على الأرض. وتعتبر صيانة الألواح الشمسية الأرضية أمراً بسيطاً، ولكن بناء وصيانة الألواح الشمسية في الفضاء سيتم عن بُعد آلياً، وهو أمر معقد للغاية. كما من المحتمل أن تعاني الألواح الشمسية للتدهور بمقدار 8 أضعاف مما تعانيه على الأرض. فيما يمثل الحطام الفضائي خطراً كبيراً على الأجسام الكبيرة في الفضاء مثل أنظمة الطاقة الشمسية الفضائية [18].

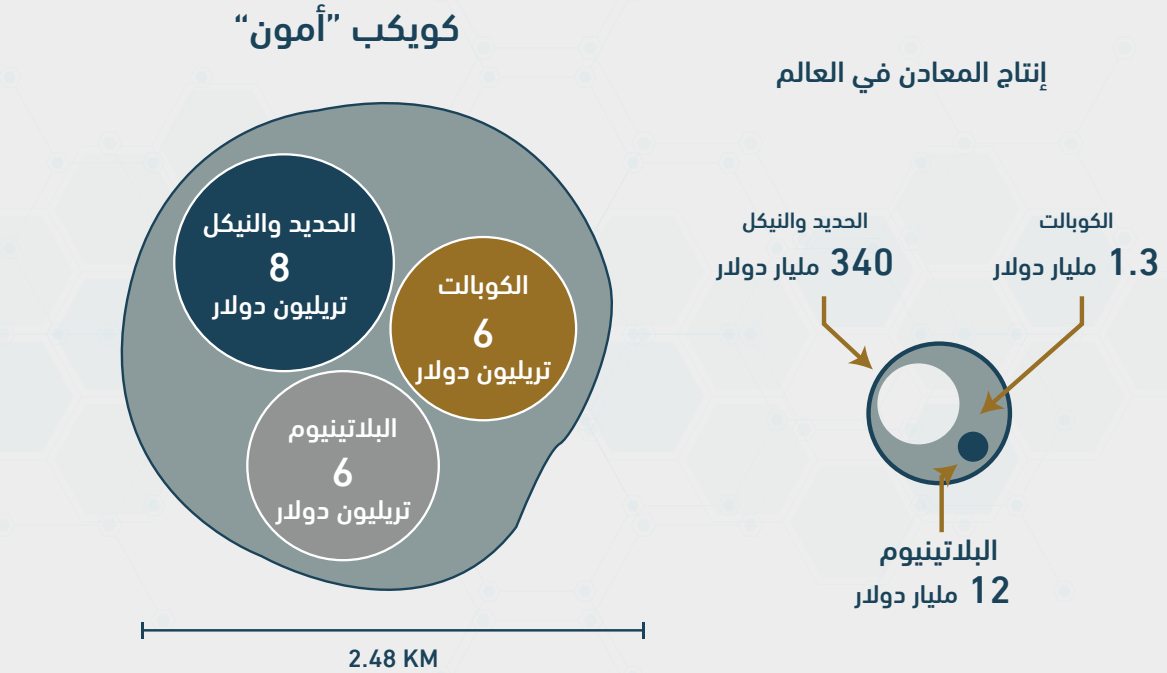
3- التعدين الفضائي من أجل الطاقة:

توقع المحللون وأصحاب الرؤى العلمية الثاقبة وحتى عالم الفيزياء الفلكية- ذائع الصيت- نيل ديجراس تايسون أن التعدين في الفضاء سيكون عملاً تجارياً كبيراً. على الرغم من التكلفة الباهظة للتنقيب في الفضاء، اعتبر البعض أن تطوير تقنية تعدين الكويكبات قد يكون جهداً مفيداً للغاية نظراً للموارد القيمة للغاية التي توفرها الكويكبات. ساعد تلك الرؤية المتفائلة على ظهور شركات ناشئة للتعدين في الفضاء بالسنوات الماضية على غرار Planetary Resources وDeep Space Industries. ويقوم النموذج التجاري لتلك الشركات بالطبع على بيع المواد المستخرجة - المعادن الثمينة أو العناصر النادرة – للشركات الأخرى [19].

جدير بالذكر أن تقنيات الطاقة النظيفة، بدءاً من توربينات الرياح والألواح الشمسية إلى المركبات الكهربائية والبطاريات – تتطلب وفرة مجموعة واسعة من المعادن بما في ذلك النيكل والكوبالت والحديد والنحاس وغيرها. وطبقاً للوكالة الدولية للطاقة، سيكون للتحولات العالمية في مجال الطاقة النظيفة تبعات بعيدة المدى على الطلب على المعادن خلال العشرين عاماً القادمة. بحلول عام 2040، سيتضاعف إجمالي الطلب على المعادن من تقنيات الطاقة النظيفة أربع مرات في ظل "سيناريو التنمية المستدامة". وسيهيمن الجرافيت والنحاس والنيكل على هيكل طلب تقنيات الطاقة النظيفة على المعادن في عام 2040، في حين سيشهد الليثيوم أسرع معدل نمو، مع نمو الطلب عليه بأكثر من 40 ضعف في سيناريو التنمية المستدامة [20].

وقد حددت Asterank، قاعدة البيانات التي تقيس القيمة المحتملة لأكثر من 6000 كويكب تتبعها وكالة الفضاء الأمريكية "ناسا"، أن التعدين في أفضل 10 كويكبات فقط - أي تلك الأقرب إلى الأرض والأكبر حجماً - ستحقق عوائد مالية تقدر بحوالي 1.5 تريليون دولار أمريكي. لذا، يجادل البعض بأن إحراز تقدم في تعدين الكويكبات يمكن أن يؤسس لتطوير اقتصاد فضاء أكثر رسوخاً في المستقبل. ومع ذلك، يجادل العديد من الخبراء على الجانب الآخر بأن تعدين الكويكبات سيدمر سريعاً صناعة التعدين في العالم والتي تقدر قيمتها حالياً بنحو 660 مليار دولار [21].

شكل (3): إمكانات تعدين بعض الكويكبات بالفضاء



Source: Anders Sandström, Mining In Zero Gravity, UMEÅ INSTITUTE OF DESIGN, 2018, accessible at: https://bit.ly/3Hb8rEV

بخلاف السابق يعتقد البعض أن التنقيب عن المعادن الثمينة في الكويكبات أمر غير ذي جدوى تجارية، نظراً لارتفاع تكلفة الوصول إلى الكويكبات، وطول مدة إرسال المركبات وعودتها إلى الأرض والتي تصل إلى 7 سنوات، والتي ستتعدى إلى حد كبير قيمة أي شيء يمكنك استخدامه من الكويكبات. يضاف للسابق تكاليف أخرى ترتبط بإجراء مهام استشكافية لتقييم موارد التعدين المحتملة في الكويكباب [22]. لذا، يعتبر جيف كارجيل Jeff Kargel، الجيولوجي السابق في هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية، والذي يشغل منصب كبير العلماء في معهد علوم الكواكب في توكسون، أريزونا، أن إرسال رواد فضاء الكويكباب ليس له معنى اقتصادي كبير، وهناك قدر كبير من المبالغة بشأن إمكانات التعدين الفضائية. على أية حال، سيتطلب تعزيز عمليات تعدين الكويكبات تطوير كل من تكنولوجيا المركبات الفضائية وقدرة الإطلاق، وسوف تحتاج أيضاً إلى تمويلات كبيرة، لكي تصبح ذات جدوى تجارية[23].

يظل هناك تحدي آخر يتعلق بخلق الطلب الكافي على المعادن المنقب عنها من الفضاء، فمن دون عملاء، لا يوجد حافز للتنقيب. وليس من الواضح حتى الآن ما إذا كانت الأسواق

الدولية ستوفر طلباً كافياً لتبرير التكاليف الثابتة العالية للإنتاج. ركزت الشركات الناشئة المبكرة، مثل Planetary Resources و Deep Space Industries ، على تعدين المعادن بهدف بيعها مرة أخرى على الأرض. ومع ذلك، كانت حالة عدم اليقين في السوق عاملاً رئيسياً في تراجعها، ودفعها للتخلي عن هدفها الرئيسي[24].

لكن برغم إخفاق الجيل الأول من شركات التعدين الفضائية، ظهرت شركات أخرى مثل "أسترو فورج" AstroForge ، وهي تعتقد أن التعدين في الفضاء سيصبح حقيقة. تأسست الشركة في عام 2022 من قبل مهندسين سابقين في شركتي SpaceX وVirgin Galactic . تخطط AstroForge لتعدين المعادن وتنقيتها في الفضاء ثم إعادتها إلى الأرض لبيعها. وللحفاظ على نموذج منخفض التكاليف، ستلحق AstroForge حمولتها الصافية بالأقمار الصناعية الجاهزة مثل تلك المملوكة لشركة "سبيس إكس" [25].

ثالثاً: قضايا من أجل المستقبل:

تفرض التطبيقات التجارية للفضاء إشكالات مستقبلية تتعلق بتنظيم الحقوق الدولية لاستغلال الفضاء، وتطوير النظام التكنولوجي والابتكار وخلق الأسواق اللازمة لتعزيز جدواها الفنية والتجارية، ويمكن إيضاح ذلك على النحو التالي:

1- تنظيم حقوق الاستغلال:

افتراض أن الموارد الفضائية تحمل قيمة اقتصادية، يعني نظرياً أن حقوق الملكية محددة ومضمونة جيداً. وفي الحقيقة، يقع الفضاء الخارجي خارج نطاق الولاية الوطنية لأي دولة، مما يعني أن القانون الدولي هو الإطار الحاكم لتنظيم استغلال الفضاء وموارده. وتحظر معاهدة الفضاء الخارجي لعام 1967، الاستيلاء على الأجرام السماوية، مثل القمر أو الكويكبات، من قبل الدول الفردية. مع ذلك، فإنه لا يحظر بوضوح امتلاك واستخدام الموارد بمجرد استخراجها من جرم سماوي أو كويكب.

في ضوء ذلك، أقر الكونجرس الأمريكي في عام 2015 أول قانون وطني لموارد الفضاء في العالم. يعترف القانون بحقوق المقيمين في الولايات المتحدة في امتلاك المواد التي يتم جمعها في الفضاء الخارجي، لكنه لا يدعي ملكية الولايات المتحدة أو الملكية الخاصة للأجرام السماوية. كما أصدرت لوكسمبرج قانوناً خاصاً بها بشأن التعدين في الفضاء، والذي ينظم مسائل استغلال الموارد الفضائية والشراكات مع وكالات الفضاء في جميع أنحاء العالم [26].

برغم تقديم التشريعات المحلية لتنظيم استغلال موارد الفضاء، فإن القانون الدولي يتخلف عن الركب، لذا هناك حاجة ملحة إذن لسن تشريعات دولية جديدة تنظم مسألة الاستغلال التجاري للفضاء، فضلاً عن ضرورة وجود هيئة دولية للتحكم في إطلاق الأقمار الصناعية وخدمتها، ومراقبة الحركة الفضائية وتوفير مبادئ إنفاذ مشتركة لدعمها [27].

2- تطوير النظام التكنولوجي:

يعد عمل الشركات في الفضاء معقداً، حيث يمثل كل شيء من الغبار إلى الإشعاع مشكلة محتملة للشركات الراغبة في الانتقال ما وراء المدار - لأسباب تتراوح من التنقيب عن الكويكبات إلى مهام الاستكشاف -. كما أن أعمال الشركات عرضة للتعامل مع إشكالات أخرى مثل مستويات الإشعاع وتوليد الوقود والحطام الفضائي [28].

كما يثير النشاط التجاري الفضائي إشكالات بيئية أخرى تتمثل في تزايد مخلفات الفضاء في السنوات الماضية، إلى جانب تزاحم المدارات بشكل متزايد مما يهدد بحدوث اصطدامات. وقد لا يكون التلوث القمري بعيداً عن الركب، ويمكن أن تتسبب أنشطة التعدين نفسها في حدوث مشكلات غبار الثرى[29].

إذن، النشاط التجاري في الفضاء بحاجة إلى اتخاذ خطوات تنظيمية لتنسيق عمليات الإطلاق وتقليل مخاطر الاصطدامات العرضية أو تحقيق الابتكارات التكنولوجية للمساعدة في "تنظيف" البيئة المدارية. ومع ذلك، من المرجح أن يتطلب أي من النهجين مفاوضات دولية دقيقة وسيتطلب ذلك تعاون عالمي أكبر مما هو موجود حالياً[30] .

3- تحقيق اقتصادات الحجم:

على الرغم من الطموح الواسع للدول والشركات لتحقيق مكاسب تجارية من الفضاء، فإن الإخفاقات التي حلت بالشركات العاملة في مجالات مثل تعدين الفضاء ظهرت بوضوح في السنوات الماضية. على سبيل المثال، أدركت شركتان ناشئتان في العقد الأول من القرن الحادي والعشرين، وهما Planetary Resources وDeep Space Industries ، إمكانات التعدين الفضائي في وقت مبكر. ومع ذلك، بالنسبة لكلا الشركتين، فإن ضعف اقتصادات التنقيب كانت إيذاناً بجفاف التمويل الخاص، واتجهت الشركتان إلى مشاريع أخرى.

معنى ذلك أنه ينبغي على الحكومات أن تستمر في سد الثغرات المالية في النظام الإيكولوجي للفضاء، ومن خلال تقديم العقود للشركات الناشئة في مجال الفضاء، وتقديم المساعدة لها للتغلب على الإشكالات الفنية، مثل تقليل الحطام الفضائي، بما يعمل في نهاية المطاف على تحسين نموذجها الفني والتجاري[31].

ختاماً، يمكن القول إن استغلال الفضاء للأغراض التجارية يحمل فرصاً واعدة في المجالات كافة، خاصة الطاقة. مع ذلك، ينبغي أن ندرك أن تقنيات مثل تعدين الفضاء أو الطاقة الشمسية الفضائية ما زالت في مهدها ولم تنضج بعد، وسيستغرق تحولها لتطبيق تجاري راسخ دورة زمنية طويلة، تقتضي استمرار التدخل الحكومي من أجل دعم البحوث الأساسية، وتحفيز الأسواق.

1- The role of space in driving sustainability, security, and development on Earth, **McKinsey & Company**, 2022, accessible at: https://mck.co/3Uy7uJZ

2- Impact Of the Space Sector Key Indicators and Options to Improve Data, **Organization for Economic Co-operation and Development**, October 2020, accessible at: https://bit.ly/3iDFqY7

3- Op.cit. The role of space in driving sustainability, security, and development on Earth, accessible at: https://mck.co/3Uy7uJZ

4 -Kevin Quillien, Space technology holds the key for energy transition, **energyvocie**, October 22, 2022, accessible at: https://bit.ly/3gZISfq

5- Energy For Space, Department of Energy, accessible at: https://bit.ly/3gVaKkV

6- Space technology holds the key for energy transition, accessible at: https://bit.ly/3gZISfq

7- -How Space Supports the Energy Transition, **The European Space Agency, accessible at:** https://bit.ly/3Vxmzg1

8- Josef Aschbacher, The role of space programmes in energy and development, **friendsofeurope, November 19, 2019, accessible at:** https://bit.ly/3gSpUYc

9- - IRENA and ESA agree to use space assets for global energy transition, **power-technology**, August 2, 2021, accessible at: https://bit.ly/3VASRqv

10 -Peggy Hollinger, Asimov's vision of space-based solar power is more than science fiction, **Financial Times, August 25**, 2021, accessible at: https://on.ft.com/3B7pZxX

11- Space Based Solar Power De-risking the pathway to Net Zero**, Frazer-Nash Consultancy**, 2021, accessible at: https://bit.ly/3iCXhOU

12- Sohan Chandrakanth and others, A Study on Space-Based Solar Power, **International Journal of Applied Engineering Research** ISSN 0973-4562 Volume 13, Number 1 (2018) pp.13-15, accessible at: https://bit.ly/3HaNRnZ

13- A solar power station in space? Here's how it would work - and help us get to net zero, **World Economic Forum, Mar 23, 2022, accessible at:** https://bit.ly/3F8ICD0

14-**Ibid**

15-Oliver Gordon,Can solar panels in space power the race to net zero?, **power-technology** May 26, 2022, accessible at: https://bit.ly/3Vz0U7e

16- solar power station in space? Here's how it would work - and help us get to net zero, accessible at: https://bit.ly/3F8ICD0

17- Op.cit, Can solar panels in space power the race to net zero?, accessible at: https://bit.ly/3Vz0U7e

18- Sohan Chandrakanth and others, A Study on Space-Based Solar Power, **International Journal of Applied Engineering Research** ISSN 0973-4562 Volume 13, Number 1 (2018) pp.13-15, accessible at: https://bit.ly/3HaNRnZ

19- Magdalena Petrova,The first crop of space mining companies didn't work out, but a new generation is trying again, **CNBC**, October 9 ,2022, accessible at: https://cnb.cx/3VLBBz7

20-Mineral requirements for clean energy transitions, **International Energy Agency**, https://bit.ly/3BbFHIq

21- Shriya Yarlagadda, Economics of the Stars: The Future of Asteroid Mining and the Global Economy, **Harvard International Review**, April 8,2022, accessible at: https://bit.ly/3EYAW65

22-Op.cit,The first crop of space mining companies didn't work out, but a new generation is trying again, accessible at: https://cnb.cx/3VLBBz7

23-Bruce Dorminey, Does Commercial Asteroid Mining Still Have A Future?, **Forbes, accessible at:** https://bit.ly/3Vv9vb5

24-Alex gilbert, Mining in Space Is Coming, **Milken Institute Review, April 26, 2021, accessible at:** https://bit.ly/3XYrat9

25-Op.cit,The first crop of space mining companies didn't work out, but a new generation is trying again, accessible at: https://cnb.cx/3VLBBz7

26-Op.cit, Mining in Space Is Coming, **Milken Institute Review, April 26, 2021, accessible at:** https://bit.ly/3XYrat9

27- As private satellites increase in number, what are the risks of the commercialization of space?, **World Economic Forum**, Jan 12, 2022, accessible at: https://bit.ly/3UCqnLz
28-Joshua Hampson,The Future of Space Commercialization, **Niskanen Center, January 25, 2017, accessible at:** https://bit.ly/3B4n09h

29-As private satellites increase in number, what are the risks of the commercialization of space?, **World Economic Forum**, Jan 12, 2022, accessible at: https://bit.ly/3UCqnLz
30-Op.cit, ,The Future of Space Commercialization, accessible at: https://bit.ly/3B4n09h

31-Mehak Sarang, The Commercial Space Age Is Here, **Harvard Business Review**, February 12, 2021, accessible at: https://bit.ly/3FobyIh

عن المستقبل:

"المستقبل للأبحاث والدراسات المتقدمة"، هو مركز تفكير Think Tank مستقل، تأسس في 2014/4/4، في أبوظبي، بدولة الإمارات العربية المتحدة، للمساهمة في تعميق الحوار العام، ومساندة صنع القرار، ودعم البحث العلمي، فيما يتعلق باتجاهات المستقبل، التي أصبحت تمثل مشكلة حقيقية بالمنطقة، في ظل حالة عدم الاستقرار وعدم القدرة على التنبؤ خلال المرحلة الحالية، بهدف المساهمة في تجنب "صدمات المستقبل" قدر الإمكان.

ويهتم المركز بالاتجاهات التي يمكن أن تساهم في تشكيل المستقبل، على المدى القصير، خاصة الأفكار غير التقليدية والظواهر "تحت التشكيل"، مع التطبيق على منطقة الخليج، من خلال رصد وتحليل الاحتمالات الممكنة، للتفاعلات القائمة والتيارات القادمة، وتقدير البدائل المتصورة للتعامل معها، باستخدام مناهج التفكير المتقدمة، عبر أنشطة علمية تجمع بين الأكاديميين والممارسين، والشخصيات العامة، من داخل الإمارات وخارجها.

أنشطة المركز:

مجلة اتجاهات الأحداث: دورية أكاديمية، تصدر كل شهرين، تهتم بتحليل اتجاهات المستقبل على المدى القصير، بما يتضمنه من تيارات وتطورات، متعددة الأبعاد، وذات تأثيرات استراتيجية، وذلك في مجالات اهتمام برامج المركز.

تقديرات المستقبل: تقديرات يومية ترصد وتحلل وتقييم الأحداث والتحولات الإقليمية على المدى القصير التي تشهدها منطقة الشرق الأوسط والعالم وتداعياتها على منطقة الخليج العربي لدعم عملية صنع القرار.

دراسات المستقبل: سلسلة دراسات أكاديمية تصدر شهرياً عن «المستقبل للأبحاث والدراسات المتقدمة»، وتركز كل دراسة على قضية واحدة تمثل ظاهرة صاعدة على المستوى الاستراتيجي تتسم بالتعقيد وتعدد الأبعاد، وتهيمن على الجدل العام في الشرق الأوسط والعالم.

أوراق أكاديمية: أوراق علمية متخصصة، تتضمن أحد المفاهيم المتقدمة، أو الاتجاهات النظرية الراهنة، وتطبيقاتها المختلفة، سواء في العالم أو في منطقة الشرق الأوسط.

بوابة المستقبل: موقع إلكتروني أكاديمي، يقوم بنشر تحليلات يومية، باللغتين العربية والإنجليزية، حول أهم الأحداث والتطورات الجارية في المنطقة والعالم، ويغطي الموقع إنتاج المركز المطبوع وأنشطته المختلفة، من لقاءات عامة وحلقات نقاشية، ويقدم خدمات علمية تتعلق بعروض الكتب والدراسات، وقواعد البيانات والخرائط السياسية.

تقرير المستقبل: نشرة يومية تُرسل على مدار 5 أيام في الأسبوع، عبر البريد الإلكتروني إلى قوائم المشتركين، حيث تُسلط الضوء على كل إصدارات وأنشطة مركز "المستقبل للأبحاث والدراسات المتقدمة".

فعاليات المستقبل: ينظم مركز "المستقبل" عدة فعاليات مثل (اللقاءات العامة - حلقات النقاش - الدورات التدريبية)

جميع حقوق النشر محفوظة © 2021