ردمد: 2961-4074
ISSN: 2961-4074
رقم الإيداع: 1446/3664

سلسلة تقارير أسبار

رقم (482)

التقنية الكمية وأثرها الاستراتيجي على الاقتصاد السعودي

لجنة شؤون التحول الرقمي والابتكار

ملتقى أسبار
Asbar Council
(نادي تفكير)

مركز أسبار
ASBAR CENTER
32 عامًا Years
منذ 1994 Since

بسم الله الرحمن الرحيم

تقرير يصدر عن ملتقى أسبار

- رئيس الملتقى:
  د. فهد العرابي الحارثي
- رئيس الهيئة الإشرافية للملتقى
  د. عبدالرحمن العريني
- الأمين العام
- **د. أماني البريكان**
- التحرير
  د. إبراهيم إسماعيل عبده
- التصميم والإخراج:
  أ. صفوان يحيى مسعد

- **لجنة شؤون التحول الرقمي والابتكار**
- د. عبد الرحمن العريني **(رئيس اللجنة)**
- د. علي سليمان الوهيبي **(نائب رئيس اللجنة)**
- **أعضاء اللجنة***
- د. أماني عبد الرحمن البريكان
- د. أيمن التميمي
- د. حامد ضافي الشراري
- د. ريم طيبة
- د. زياد بن عثمان الحقيل
- د. سلطان خالد المورقي
- د. عبد العزيز الحرقان
- د. غالب الشمري

* ترتيب الأسماء حسب الحروف الأبجدية

مقدمو الأوراق العلمية

- **الورقة الرئيسة:** د. ريم طيبة
- **التعقيب الأول:** د. سعد العويد
- **التعقيب الثاني:** د. سمية مدخلي
- **التعقيب الثالث:** د. خلود المطيري
- **إدارة الحوار:** د. عبدالرحمن العريني

المحتويات

الموضوع	الصفحة
الملخص التنفيذي	3
الإطار العام للقضية	7
الورقة الرئيسة	9
التعقيبات	17
المداخلات حول القضية	32
• واقع التقنية الكمية وموقع المملكة في السباق الكمي العالمي	32
• الاستراتيجية الوطنية واقتصاديات الاستثمار والحوكمة في التقنية الكمية	34
• بناء القدرات الوطنية والتعليم والتدريب والبنية التحتية الكمية	36
• التكامل بين الجامعات ومراكز البحث والقطاع الخاص والشراكات الدولية	37
• بناء سلسلة قيمة وطنية وتوطين التقنية وتنمية الاقتصاد الكمي	38
• التطبيقات الاقتصادية والقطاعية ذات الأولوية	39
• الأمن السيبراني والقطاع المالي والاستعداد للمخاطر الكمية	41
• ضبط المصطلحات والتوعية وصناعة القرار العلمي والاقتصادي	42
• التقنية الكمية ورؤية 2030 والتحول نحو اقتصاد المعرفة والابتكار	43
خلاصة النقاش ومخرجاته	44
التوصيات	47
خاتمة	50
المصادر والمراجع	51
المشاركون	53

تمهيد

يتناول هذا التقرير قضية (التقنية الكمية وأثرها الاستراتيجي على الاقتصاد السعودي).



الملخص التنفيذي:

يتناول هذا التقرير قضية التقنية الكمية وأثرها الاستراتيجي على الاقتصاد السعودي. وأشارت د. ريم طيبة في الورقة الرئيسة إلى أنه يمكن أن تمثل التقنية الكمية تحولًا استراتيجيًا في معالجة المعلومات وتطوير قطاعات اقتصادية وأمنية متعددة، من خلال الحوسبة والاتصالات والاستشعار الكمي. ورغم أن الحوسبة الكمية لا تزال في مراحل التطوير، فإن التموضع المبكر فيها يتيح بناء القدرات والشراكات وتحديد التطبيقات ذات الأولوية، وهو ما بدأت به أرامكو من خلال تشغيل حاسوب كمي في المملكة وتطوير تطبيقاته في قطاع النفط والغاز. وأكدت أهمية وضع استراتيجية وطنية للتقنية الكمية تشمل الحوكمة والتمويل والبنية التحتية والشراكات الدولية وبناء القدرات، للاستفادة من الفرص الاقتصادية المتوقعة في قطاعات النفط والغاز والطاقة والبتروكيماويات والتمويل والخدمات اللوجستية والصحة والثروة المعدنية. كما أوضحت أن الحوسبة الكمية ستعمل بصورة تكاملية مع الحوسبة التقليدية والذكاء الاصطناعي ضمن نموذج الحوسبة الهجينة، في حين يفرض التهديد المستقبلي للتشفير الكمي ضرورة الاستعداد المبكر للتشفير المقاوم للكم. وخلصت إلى أن الاستثمار في الكفاءات والتطبيقات والشراكات منذ الآن يمكن أن يعزز قدرة المملكة على توطين التقنية وتحويلها إلى مصدر للابتكار والتنافسية الاقتصادية والأمنية، في حين قد يؤدي التأخر إلى اتساع فجوة المهارات والتموضع العالمي.

بينما أكَّد د. سعد العويد في التعقيب الأول أن التقنية الكمية أصبحت عنصرًا مؤثرًا في القوة الاقتصادية والسيادية، وأن التحرك المبكر يمثل ضرورة لضمان التموضع الاستراتيجي للمملكة، مشيرًا إلى أهمية الانتقال من استهلاك التقنيات الكمية المستوردة إلى بناء موقع فاعل في سلسلة قيمتها، من خلال توطين بعض مكونات العتاد والبنية التحتية المتخصصة، وتطوير البرمجيات والخوارزميات التطبيقية في قطاعات النفط والغاز والطاقة والمعادن والتمويل، والتوسع في خدمات التشفير ما بعد الكم.

كما أكد أهمية دمج المعالجات الكمية مع الحوسبة الفائقة والذكاء الاصطناعي ضمن نموذج الحوسبة الهجينة، مع تطوير البرمجيات الوسيطة وحماية البيانات الحساسة داخل البيئات المحلية. وخلص إلى أن امتلاك المملكة لبنية متقدمة في الحوسبة الفائقة والذكاء الاصطناعي، إلى جانب قوة قطاعاتها الصناعية والمالية، يوفر مقومات للانتقال من مستهلك للتقنية الكمية إلى صانع للقيمة ومطور ومصدر للحلول والتطبيقات الكمية.

في حين ذكرت د. سمية مدخلي في التعقيب الثاني أن المملكة اتخذت خطوات صحيحة في مجال التقنية الكمية، إلا أن تعظيم أثرها يتطلب إعادة ترتيب الأولويات وتسريع الاستجابة المؤسسية وبناء الكفاءات. وأوضحت أن التقنيات الكمية تختلف في مستوى نضجها وعوائدها، إذ يمثل الاستشعار الكمي أقربها إلى تحقيق عوائد اقتصادية ملموسة، يليه الاتصال الكمي ثم الحوسبة الكمية، مما يستدعي توسيع الاهتمام الوطني بالاستشعار إلى جانب الاستثمار في الحوسبة. كما أشارت إلى أن منصة الذرات المحايدة تمثل فرصة استراتيجية لإمكان توظيف بنيتها التحتية في الحوسبة والاستشعار والساعات الذرية والملاحة الكمية، بما يعظم كفاءة الاستثمار. ودعت إلى ترتيب الفرص وفق أفقها الزمني، بدءًا من تطبيقات الاستشعار في الاستكشاف والبنية التحتية والملاحة، ثم الحوسبة الهجينة في الخدمات اللوجستية والتمويل، وصولًا إلى المحاكاة المتقدمة في الطاقة والبتروكيماويات والصحة والدواء. وأكدت أهمية التشفير المقاوم للكم، إلى جانب تعزيز سيادة الزمن والموقع، ورأت أن التحدي الرئيس لا يكمن في التمويل بقدر ما يرتبط بسرعة الاستجابة المؤسسية واستقطاب الكفاءات وتحويل المبادرات إلى تنفيذ فعلي، مع تطوير القدرة الوطنية على تصنيع مكونات الأنظمة الكمية. وخلصت إلى أن المملكة تمتلك مقومات قوية للتموضع في الاقتصاد الكمي، وأن تعظيم العائد يتطلب استثمار البنية القائمة، وتسريع التنفيذ، وبناء القدرات، والانتقال من استهلاك التقنية إلى تطوير مكوناتها وتطبيقاتها.

أما د. خلود المطيري فتناولت في التعقيب الثالث أهمية التموضع المبكر في التقنية الكمية، مؤكدة أن القيمة المستدامة لا تكمن في امتلاك العتاد مبكرًا بقدر ما تتراكم في البيانات المهيأة، والخبرات، والمشكلات المحددة، والعلاقات التقنية. وأوضحت أن التقنيات الكمية تختلف في نضجها وعوائدها، مما يستدعي بناء محفظة زمنية تشمل تطبيقات قريبة مثل التشفير المقاوم للكم والساعات الذرية والمستشعرات الكمية، وتطبيقات متوسطة في الاتصالات والحوسبة الهجينة، وأخرى طويلة الأجل في الحوسبة الكمية المقاومة للأخطاء. كما أكدت أهمية الاستفادة من تجربة أرامكو وباسكال مع تنويع الموردين وتعزيز سيادة البيانات والقدرات التقنية، وتطوير حوكمة واضحة تفصل بين البحث والبنية التحتية والأمن والتبني القطاعي، وتحويل الدولة إلى عميل أول للتقنيات الكمية. ودعت إلى تحديد مشكلات وطنية ذات قيمة وقابلية للتطبيق بدل الاكتفاء بتقديرات السوق العالمية، مع التركيز على البرمجيات والخوارزميات بوصفها مصدرًا رئيسًا للقيمة. وفي الجانب الأمني، شددت على الانتقال المبكر إلى التشفير المقاوم للكم، بدءًا من جرد الأصول التشفيرية وتعزيز المرونة التشفيرية، مع توسيع الاستعداد ليشمل البنى التحتية الحيوية. كما أكدت أهمية الجمع بين تأهيل الكفاءات الهندسية القائمة وإعداد متخصصين في الفيزياء والمعلومات الكمية لبناء قدرة وطنية مستدامة، وخلصت إلى أن نجاح المملكة يتطلب الاستثمار في المعرفة والقدرات المتراكمة، وبناء محفظة متوازنة للتطبيقات، وحوكمة واضحة، وقاعدة كفاءات وطنية تدعم انتقالها من تبني التقنية إلى بناء موقع مؤثر في سلاسل قيمتها عالميًا.


التقنية الكمية
آفاق جديدة للاقتصاد المعرفي
تطرفت المداخلات لعددٍ من المحاور الرئيسة تناولت واقع التقنية الكمية وموقع المملكة في السباق الكمي العالمي، وما يرتبط بذلك من بناء استراتيجية وطنية تحدد أولويات الاستثمار وحوكمة التقنية الكمية، إلى جانب متطلبات بناء القدرات الوطنية من خلال تطوير التعليم والتدريب والبنية التحتية الكمية.
1
واقع التقنية الكمية
استعراض واقع التقنية الكمية وموقع المملكة في السباق الكمي العالمي.
2
استراتيجية وطنية
بناء استراتيجية وطنية تحدد أولويات الاستثمار وحوكمة التقنية الكمية.
3
التكامل والشراكات
أهمية تحقيق التكامل بين الجامعات ومراكز البحث والقطاع الخاص وتعزيز الشراكات الدولية، بما يدعم بُناء سلسلة قيمة وطنية وتوطين التقنية وتنمية الاقتصاد الكمي.
4
التطبيقات الاقتصادية
استعراض التطبيقات الاقتصادية والقطاعية ذات الأولوية.
5
الأمن السيبراني والقطاع المالي
مناقشة متطلبات الأمن السيبراني واستعداد القطاع المالي للمخاطر الكمية.
6
الوعي والتكامل
أهمية ضبط المصطلحات ونشر الوعي وتعزيز التكامل بين القرار العلمي والاقتصادي.
7
رؤية 2030 والاقتصاد المعرفي
بيان ارتباط التقنية الكمية بمستهدفات رؤية 2030 ودورها في دعم التحول نحو اقتصاد قائم على المعرفة والابتكار.

⊙ الإطار العام للقضية

تتجه التقنية الكمية إلى أن تصبح أحد المجالات المؤثرة في التحولات التقنية والاقتصادية العالمية، لما توفره من إمكانات متقدمة في معالجة المعلومات، والاستشعار، والاتصالات، والتوقيت والملاحة. ولا تنحصر هذه التقنية في الحوسبة الكمية، بل تضم منظومة مترابطة من التطبيقات التي يمكن أن تؤثر في قطاعات اقتصادية وأمنية متعددة، الأمر الذي يجعلها تتجاوز كونها تطورًا تقنيًا إلى قضية ترتبط بالتنافس الاقتصادي والسيادة والقدرة على امتلاك أدوات المستقبل.

وتكتسب هذه القضية أهمية خاصة في المملكة العربية السعودية بالنظر إلى طبيعة اقتصادها وتنوع قطاعاتها الاستثمارية، وما تمتلكه من بنية متقدمة في الحوسبة عالية الأداء والذكاء الاصطناعي، إلى جانب قطاعات يمكن أن تستفيد من التطبيقات الكمية، مثل الطاقة والنفط والغاز والبتروكيماويات والتمويل والتعدين والخدمات اللوجستية والصحة. ومن هذا المنطلق، لا تتمثل المسألة في متابعة التطور العالمي للتقنية فحسب، وإنما في تحديد المجالات التي تتقاطع فيها القدرات الكمية مع الاحتياجات والأولويات الاقتصادية الوطنية.

ويفرض تفاوت النضج بين مجالات التقنية الكمية ضرورة التعامل معها وفق مسارات زمنية مختلفة؛ إذ تتيح بعض تطبيقات الاستشعار والتوقيت إمكانات أقرب إلى الاستخدام العملي، بينما تتطلب الاتصالات الكمية والحوسبة الكمية مراحل أطول من التطوير والاختبار قبل اتساع نطاق تطبيقاتها. ومن ثم، فإن بناء الأولويات ينبغي أن يستند إلى مستوى الجاهزية وإمكان تحقيق القيمة، مع المحافظة في الوقت نفسه على الاستثمار طويل الأجل في المجالات التي قد تصبح أكثر تأثيرًا مع نضج التقنية.

وتتجاوز القيمة الاقتصادية المحتملة امتلاك الأجهزة الكمية إلى ما يرتبط بها من برمجيات وخوارزميات وبيانات وخبرات ومكونات متخصصة. وتبرز أهمية هذا الجانب في نموذج الحوسبة الهجينة الذي يجمع بين الموارد الكمية والحوسبة عالية الأداء والذكاء الاصطناعي، بما يسمح بتوظيف كل بيئة في المهام التي تتلاءم مع قدراتها. كما يفتح المجال أمام نشوء أنشطة محلية في تطوير البرمجيات، والخوارزميات، والبرمجيات الوسيطة، والخدمات التقنية، بدل اقتصار المشاركة على شراء الأنظمة وتشغيلها.

ويحمل التحول الكمي في الوقت نفسه أبعادًا تتصل بالأمن والسيادة، خصوصًا مع احتمال تأثير الحوسبة الكمية المتقدمة في بعض أنظمة التشفير الحالية. ولذلك تبرز الحاجة إلى الانتقال التدريجي نحو التشفير المقاوم للكم، إلى جانب تعزيز القدرة على حماية البنى التحتية الحيوية. كما يمكن للتطبيقات الكمية في التوقيت والملاحة والاستشعار أن تسهم في تقليل بعض أشكال الاعتماد الخارجي في المجالات المرتبطة بالزمن والموقع والقياس الدقيق.

وتتصل فاعلية التوجه الوطني كذلك بقدرة المؤسسات على تحويل الاهتمام بالتقنية إلى منظومة مستدامة للبحث والتطبيق والتطوير. ويشمل ذلك تأهيل الكفاءات العلمية والهندسية، وتوفير مسارات تعليمية وبحثية متخصصة، ودعم تطوير المكونات ذات الصلة، وتنويع الشراكات والموردين، وتحديد مسؤوليات واضحة بين الجهات المعنية بالبحث والأمن والتطبيق القطاعي. كما يمكن للجهات الحكومية والقطاعات الكبرى أن تؤدي دور المستخدم الأول للحلول الكمية، بما يساعد على اختبارها في مشكلات واقعية وتكوين سوق محلية للمنتجات والخدمات المرتبطة بها.

وبذلك تتمحور القضية حول قدرة المملكة على تحويل التطورات الكمية من مجال تقني ناشئ إلى مورد استراتيجي ذي قيمة اقتصادية وطنية. ويتطلب ذلك اختيار التطبيقات وفق احتياجات واضحة، والاستفادة من البنية التقنية القائمة، وبناء قاعدة بشرية ومعرفية قادرة على التطوير، مع مراعاة المتطلبات الأمنية والسيادية. وبهذا يمكن أن يتشكل مسار تدريجي يعزز حضور المملكة في الاقتصاد الكمي، لا بوصفها مستخدمًا للتقنية فقط، وإنما طرفًا قادرًا على إنتاج المعرفة والحلول والمشاركة في سلاسل القيمة المستقبلية.

الورقة الرئيسة: د. ريم طيبة

المقدمة

تشهد تقنيات الكم تحولًا من نظريات الفيزياء في المختبرات إلى تطبيقات عملية تسهم في إعادة تشكيل قطاعات اقتصادية وأمنية، من خلال معالجة مشكلات عجزت النماذج التقليدية عن حلها. وتعتمد تقنيات الكم على هندسة الجسيمات واستغلال الظواهر الكمية لمحاكاة ما يصعب على الأنظمة التقليدية محاكاته. وتنقسم تقنيات الكم إلى ثلاثة أنواع رئيسة:

- تقنية الحوسبة الكمية (Quantum Computing): نمط جديد من معالجة المعلومات تتعامل فيه وحدة المعلومات (الكيوبت / Qubit) مع حالات متعددة في آنٍ واحد، بدلًا من حالتي الصفر والواحد كما في وحدة المعلومات الكلاسيكية (البت / bit). ويتيح ذلك حل فئات معينة من المسائل المعقدة، مثل المحاكاة الفيزيائية والكيميائية ومسائل التحسين، كتحسين كفاءة اتخاذ القرارات، إضافة إلى مسائل تتعلق بالنماذج اللغوية ذات البيانات المعقدة. وتُعد الحوسبة الكمية من التقنيات الناشئة التي ما تزال في طور التطوير الهندسي ولم تصل إلى مرحلة النضج. ويتسارع السباق بين الشركات العالمية لنضج هذه التقنية؛ فبحسب خرائط التطور الهندسي، تتوقع الشركات الوصول إلى حاسوب كمي ناضج ومقاوم للأخطاء بين عامي 2030 و2035.
- تقنية الاتصالات الكمية (Quantum Communication): من أهم تطبيقاتها توزيع المفاتيح الكمية (Quantum Key Distribution)، الذي يولّد مفاتيح تشفير تتيح مستوى عاليًا من الأمان في الاتصالات. ويمكن إثبات أمن هذه المفاتيح في مواجهة محاولات الاختراق التقليدية أو الكمية. وتكشف تقنية توزيع المفاتيح الكمية أي محاولة لاختراق قنوات الاتصال فور حدوثها، مما يؤسس لبنية اتصالات محمية في مواجهة التهديدات المستقبلية. ويُعد توزيع المفاتيح الكمية أكثر نضجًا من الحوسبة الكمية؛ إذ أُثبتت جدوى التقنية عبر الأقمار الصناعية في دراسة أُجريت في الصين، ويجري حاليًا توسيعها نحو خدمات تشغيلية في الصين وأمريكا والاتحاد الأوروبي.

·تقنية الاستشعار الكمي (QUANTUM SENSING): تستخدم أجهزة قياس فائقة الحساسية الخصائص الكمية لقياس كميات فيزيائية، مثل الزمن والمجال المغناطيسي والجاذبية والدوران والتسارع، بدقة تفوق قدرة المستشعرات التقليدية. ومن أبرز تطبيقات المستشعرات الكمية أجهزة قياس الجاذبية التي تستطيع الكشف عن وزن الذرات في المساحات الجيولوجية، وأجهزة فائقة التوصيل لقياس المجال المغناطيسي بدقة قد تُستخدم في تصوير القلب والدماغ والاستكشاف المعدني، والساعات الذرية لقياس الزمن. ويُعد الاستشعار الكمي من أكثر مجالات التقنية الكمية نضجًا، مع تفاوت النضج بحسب نوع المستشعر والتطبيق المستهدف.

على الرغم من أن الحوسبة الكمية لا تزال في مراحلها المبكرة عالميًا، فإن الدول والمؤسسات الكبرى بدأت التموضع مبكرًا، إدراكًا لمخاطر التأخر في فهم هذه التقنية ومواكبتها، وما قد يترتب على ذلك من فجوة اقتصادية وأمنية يصعب تداركها لاحقًا. وتبدأ الدول الدخول إلى هذا المجال من خلال استراتيجية وطنية تستهدف قطاعات اقتصادية محددة ومبادرات لتدريب الكفاءات، ثم تعزز تموضعها عبر الشراكات الاستراتيجية مع شركات التقنية الكمية العالمية. وتواجه هذه المبادرات تحديات عدة، أبرزها أن هذه التقنيات تتعامل مع بيانات وطنية حساسة لحل المشكلات؛ فإذا كانت الشركة المزودة غير وطنية ولا يُسمح لها بالوصول إلى هذه المعلومات، فلن تتمكن المؤسسة من تحقيق الفوائد الاقتصادية التي يعد بها الحاسوب الكمي. كما أن ندرة الكفاءات المتخصصة في هذا المجال تطيل فترة استكشاف مشروعات الحوسبة الكمية وتطويرها. لذلك، تبدأ المؤسسات الوطنية مشروعاتها التطبيقية ببيانات تجريبية، لبناء سير العمل وتدريب الكفاءات وفهم المشكلات التي يستدعي حلها استخدام الحاسوب الكمي، وتجاوز التحديات المؤسسية والتنظيمية المرتبطة بالتقنيات الناشئة. وتتطلب هذه المشروعات مبدئيًا ما بين سنتين وثلاث سنوات. والمؤسسات التي تبدأ مبكرًا هي الأوفر حظًا في الاستفادة من التقنية عند نضجها، وهو ما يُعرف بميزة المتصدرين الأوائل.

ومن أوائل الشركات المتصدرة في المملكة العربية السعودية شركة أرامكو، التي اشترت أول حاسوب كمي من شركة باسكال الفرنسية، ويعمل حاليًا في مركز البيانات بمقر أرامكو. وبدأت أرامكو تنفيذ مشروعات لتطبيقات الكم بهدف حل مشكلات التحسين في قطاع النفط والغاز.

أهمية وجود استراتيجية وطنية للتقنية الكمية

تُظهر التجارب الدولية أن الدول التي أطلقت استراتيجيات وطنية مخصصة للتقنية الكمية، من خلال تمويل البحث وبناء الشراكات وتحديد القطاعات ذات الأولوية، حققت تموضعًا أفضل في سلاسل القيمة الناشئة المرتبطة بهذه التقنية. لذلك تدرس المملكة موقفها الاستراتيجي لتكون جزءًا مواكبًا لتطور التقنية واستخدامها عالميًا.



أثر التقنية الكمية على الاقتصاد واستخداماتها

السؤال العملي هو: ما القيمة الاقتصادية المتوقعة من تقنية الحوسبة الكمية؟ تشير تقديرات شركة ماكنزي إلى أن سوق التقنية الكمية قد يصل إلى 2.7 تريليون دولار بحلول عام 2035. ومن أبرز القطاعات التي قد تستفيد من التقنية الكمية، والتي تتلاءم مع الاقتصاد السعودي، ما يأتي:

·النفط والغاز: تشمل تطبيقاتهما تحسين الاستكشاف والتنقيب.

·الطاقة والبتروكيماويات: تشمل تطبيقاتهما محاكاة المواد والمحفزات وتحسين عمليات التكرير.

·القطاع المالي: تشمل تطبيقاته تحسين المحافظ الاستثمارية وإدارة المخاطر ونمذجة التسعير.

·الخدمات اللوجستية: تشمل تطبيقاتها تحسين مسارات النقل وسلاسل الإمداد وإعادة توزيع الإمدادات في ظل قيود إضافية.

·الصحة والدواء: تشمل تطبيقاتهما تسريع اكتشاف الجزيئات والعقاقير ومحاكاة الجزيئات الكيميائية.

·الثروة المعدنية: تشمل تطبيقاتها التنبؤ بمواقع الرواسب المعدنية من خلال معالجة البيانات الجيولوجية والجيوفيزيائية.

تُعد الحوسبة الكمية تقنية عامة تمثل الموجة القادمة من التقنيات الناشئة، كما يقول الخبراء: «نحن الآن في مرحلة تشبه ما كان عليه الذكاء الاصطناعي قبل 5 إلى 7 سنوات». والمقصود بأنها تقنية عامة أنها لن تنشئ قطاعًا خاصًا بها، بل ستدخل في مختلف القطاعات، كما يحدث الآن مع الذكاء الاصطناعي.

تتمثل قوة الحوسبة الكمية في نوع البيانات التي تعالجها؛ فالخصائص الكمية، مثل التشابك والتراكب الكميين، قد تسهم في تقديم نتائج إحصائية تدعم اتخاذ القرار. كما تتمثل قوتها في دقة البيانات التي تعالجها؛ إذ إن دمج المستشعرات الكمية مع الحوسبة الكمية يعطي صورة أدق عن الاحتمالات والنتائج المفضلة للمشكلة المطروحة، وهو ما يتطلب وضع خطة أولية وأخرى ثانوية.

الحوسبة الكمية ليست تقنية مستقبلية بعيدة، بل لها مسارات تطبيق تتقاطع مباشرة مع ركائز الاقتصاد المحلي. ويتمثل التحدي الحالي في تحديد المشكلات التي تستدعي المعالجة بالحاسوب الكمي، وهو ما يتطلب تعاون أخصائيي التقنية وخبراء القطاعات؛ فليست جميع المشكلات بحاجة إلى المعالجة بالحاسوب الكمي. ومن المفاهيم المهمة التي ينبغي توضيحها أن الحاسوب الكمي لن يحل محل الحواسيب التقليدية والفائقة، بل سيكملها. والنموذج السائد هو الحوسبة الهجينة (QUANTUM-HYBRID)، حيث يؤدي الحاسوب الكلاسيكي المهام التقليدية، ويُستدعى المعالج الكمي للأجزاء التي يتفوق فيها فقط. لذلك يُتوقع أن يجري تشغيل الحوسبة الكمية في مراكز البيانات، حيث تُدمج وحدة المعالجة المركزية (CPU) ووحدة معالجة الرسوميات (GPU) مع المعالج الكمي (QPU). وتملك المملكة فرصة للبدء مبكرًا في دمج هذه التقنيات والبناء على استثماراتها في الحوسبة الفائقة والذكاء الاصطناعي بدلًا من البدء من الصفر.

الأمن السيبراني ومخاطر "الجمع الآن وفك التشفير لاحقاً"

هذا هو المحور الأشد إلحاحًا من حيث التوقيت. فالحواسيب الكمية إذا وصلت إلى درجة النضج، تهدد أغلب أنظمة التشفير الحالية التي تحمي البيانات الحكومية والمالية والاتصالات. فأي جهة تمتلك حاسوبًا كميًا متقدمًا قد تتمكن من فك تشفير البيانات التي جُمعت، من دون أن يشعر أصحابها بحدوث اختراق. وتكمن الخطورة الحالية في فعل المخترقين من "جمع البيانات الآن وفك التشفير لاحقا" (HARVEST NOW, DECRYPT LATER) إذ قد تجمّع جهات معادية بيانات مشفّرة اليوم وتخزنها، انتظارًا لنضج الحوسبة الكمية لفكها مستقبلًا. وهذا يعني أن البيانات الحسّاسة طويلة العمر معرّضة للخطر الآن.

للتأمين ضد مخاطر «جمع البيانات الآن وفك التشفير لاحقًا»، لا بد للمؤسسات والجهات من الانتقال إلى التشفير المقاوم للكم (POST-QUANTUM CRYPTOGRAPHY). وتعمل المؤسسات الدولية حاليًا على وضع هذه المعايير والبروتوكولات لبناء طبقة إضافية من التشفير تحمي البيانات من مخاطر الاختراق الكمي. ويتطلب تنفيذ هذه المعايير نقل البيانات إلى نظام جديد يحتاج إلى قدرات مخصصة وخطة زمنية للانتقال قد لا تقل عن سنة. ولهذا السبب، نحث المؤسسات على تعيين خبراء في الكم ضمن فرق العمل، للبدء في دراسة مخاطر هذه التقنية وفرصها.

بناء القدرات الوطنية

يُعد نقص الكفاءات الكمية عالميًا أحد أبرز معوقات تبني الحوسبة الكمية، لأن التقنية تتطور بوتيرة أسرع من إعداد خريجين أكاديميين مدربين في هذا المجال. لذلك نقترح، على المدى القصير، التدريب من خلال برامج وشهادات متخصصة للكوادر الحالية والباحثين، عبر الشراكات العالمية في مجال الحوسبة الكمية. وعلى المدى الطويل، نقترح إدراج تخصصات «فيزياء الكم» و«المعلومات الكمية» و«تطبيقات الكم» ضمن التخصصات المطلوبة للدراسات العليا وبرامج المنح الوطنية، إلى جانب إدخال مفاهيم تمهيدية لعلوم الكم في مناهج المرحلة الثانوية، لتهيئة جيل يألف مفاهيم فيزياء الكم منذ الصغر. كما نؤكد دور الجامعات السعودية والشراكات الأكاديمية الدولية في تسريع بناء منظومة تُخرّج كفاءات قادرة على تلبية احتياجات شركات التقنية لتوطين الخدمات، واحتياجات القطاعات إلى فرق عمل متخصصة في تطبيقات الكم. فالاستثمار في الكفاءات هو ما يحول التقنية المستوردة إلى قدرة وطنية أصيلة.

الخاتمة

تمثل تقنيات الحوسبة والاتصالات والاستشعار الكمية ثلاثة مسارات لتحول واحد في طبيعة معالجة المعلومات. والدرس المشترك بينها أن النضج التقني ليس شرطًا مسبقًا للتموضع الاستراتيجي؛ فأرامكو لم تنتظر ظهور الحاسوب الكمي المقاوم للأخطاء لتشتري حصة في معالج كمي وتشغّله في المملكة. وقد أطلقت الدول المتقدمة استراتيجيات لتعظيم أثر المبادرات والجهود المبذولة في القطاعات، سواء أكانت عامة أم خاصة. فالتموضع المبكر هو استثمار في بناء القدرات الآن للاستفادة منها عند نضج التقنية.

توضح التجربة الدولية أن أفضل الممارسات تُقاس بقدرتها على الانتقال من الوعي إلى التنفيذ. فعلى سبيل المثال، خصصت المملكة المتحدة 2.5 مليار جنيه إسترليني على مدى عقد كامل، ثم أطلقت في عام 2026 برنامجًا حكوميًا لتوريد الحوسبة الكمية تجاريًا، أي لتحويل الدولة من ممول للبحث إلى عميل فعلي للتقنية. وأعلنت اليابان عام 2025 «عام التصنيع الكمي»، بينما تستثمر سنغافورة مبكرًا وبشكل متعمد لنقل التقنية من النظرية إلى الواقع التجاري. وأصدرت الولايات المتحدة الأمريكية في يونيو 2026 أمرين تنفيذيين متزامنين: أحدهما لتسريع تطوير التقنية، والآخر لتأمين البنية التحتية من مخاطرها. ويعكس ذلك أن التقدم التقني ومخاطره الأمنية مساران ينبغي إدارتهما بالتوازي. وتشترك هذه المبادرات الدولية في أربعة عناصر: حوكمة واضحة، وتمويل مخصص، وشراكات دولية، وبناء القدرات المحلية؛ ولا يغني أحدها عن الآخر.

وقد تغيّر الموقف العالمي من هذه التقنية بشكل ملحوظ خلال عام واحد فقط؛ إذ انتقل الخطاب الدولي من «عام التوعية الكمية» في مطلع 2026 إلى «عام الأمن الكمي» بحلول نهاية العام نفسه. أي أن الإجماع العالمي لم يعد يناقش «هل ستصل هذه التقنية؟» بل «هل نحن مستعدون لتبعاتها الأمنية قبل وصولها؟». هذا التحول في اللهجة الدولية من الفضول العلمي إلى الاستعجال الأمني والاقتصادي يشير إلى أن نافذة "التموضع المبكر" تضيق كل عام. ومع تصدّر أرامكو في تشغيل أول حاسب كمي في المملكة، تنتقل المملكة الآن من التحضير للمستقبل إلى بناء الحاضر.

عندما نترجم القيمة المتوقعة للسوق العالمية (2.7 تريليون دولار بحلول عام 2035) إلى قطاعات محلية، مثل النفط والغاز والطاقة والبتروكيماويات والثروة المعدنية والتمويل، فإننا نتحدث عن أثر هذه التقنيات في حل المشكلات وفتح فرص قد تعزز الاقتصاد. كما أن إيجاد الوظائف وبناء القدرات في هذا المجال سيسهمان في تحويل المملكة من مستهلك للتقنية إلى مصدر للتطبيقات. وتكمن قوة المملكة في صناعاتها وحجم قطاعاتها. فبعد تطور الحوسبة الكمية بوتيرة بطيئة في أمريكا والاتحاد الأوروبي، تسعى الشركات الكبرى الآن إلى إثبات وجودها في المملكة العربية السعودية، مستفيدةً من زخم التطور الاقتصادي وحجم القطاعات الصناعية، وإلى إظهار جودة تقنياتها ونضجها.

يتراكم ثمن الانتظار حتى نضج التقنية قبل البدء في تشكيل فريق لدراسة فرص الانتقال إلى التشفير المقاوم للكم وتطبيقات الحوسبة الكمية، ويقع هذا الثمن على المؤسسات ذات البيانات الحساسة والمؤسسات المتقدمة في التقنية والابتكار. ولا ينتظر هذا الخطر اكتمال استراتيجية وطنية أو نضج السوق؛ فهو يتراكم منذ الآن. وسيؤدي التأخر في بناء القدرات إلى اتساع الفجوة في المهارات عالميًا، كما أن كل سنة تأخير وطني تمنح الآخرين سنة إضافية لتثبيت مواقعهم في سلاسل القيمة الناشئة. وكما تعلمنا من تجارب تقنية سابقة، فإن السؤال الحقيقي أمام صناع القرار اليوم هو: «كم يكلّفنا أن نبدأ بعد أن ينضج الآخرون قبلنا؟»

التعقيبات:

- **التعقيب الأول: د. سعد العويد**

المقدمة والتأطير العام

تُقدّم الورقة الرئيسة تشخيصًا دقيقًا وبالغ الأهمية للفرص والتحديات المرتبطة بظهور التقنيات الكمية، وتسلط الضوء على التوقيت الحرج الذي يفرض ضرورة التحرك الوطني السريع لضمان التموضع الاستراتيجي للمملكة. وتأكيدًا لما ورد في الورقة، لم تعد التقنية الكمية ترفًا أكاديميًا، بل باتت عنصرًا حاسمًا في إعادة تشكيل القوة الاقتصادية والسيادية للدول.

يأتي هذا التعقيب لتوسيع ركيزتين جوهريتين وتعميقهما، تمثلان مفتاح النجاح العملي لأي استراتيجية وطنية قادمة. أولًا، عرض سلسلة القيمة وتحديد المواضع التي تملك فيها المملكة ميزة نسبية وتنافسية مستدامة، بدلًا من الاقتصار على دور مستهلك العتاد التقني المستورد. ثانيًا، الانتقال عمليًا إلى دمج وحدات المعالجة الكمية (QPUS) مع البنية التحتية القائمة للحوسبة الفائقة (HPC) ومراكز بيانات الذكاء الاصطناعي.

عرض سلسلة القيمة للتقنيات الكمية وموقع التموضع الاستراتيجي للمملكة

تتألف سلسلة القيمة للتقنيات الكمية من عدة طبقات متسلسلة، تتفاوت فيها متطلبات رأس المال، والتعقيد الصناعي، والعائد الاقتصادي، والموقع الاستراتيجي كما يوضح الجدول الآتي:

طبقة سلسلة القيمة	المكونات والأنشطة الرئيسية	الموقع الاستراتيجي الأنسب للمملكة
المواد والمكونات الدقيقة	الليزر فائق الدقة، أنظمة التبريد الفائق، أجهزة التردد الراديوي، الرقائق شبه الموصلة المتخصصة.	بناء شراكات توريد استراتيجية وضمان سلاسل الإمداد، مع دعم أبحاث علوم المواد المتقدمة محلياً.
تصنيع وتجميع العتاد الكمي	تصنيع وحدات المعالجة (الذرات المحتجزة، الموصلات الفائقة، الفوتونات، الأيونات المحاصرة) لوحدات المعالجة الكمية (QPUs)	الاستثمار والشراكة في أجهزة قائمة ومختارة (مثل تجربة أرامكو مع باسكال) وتوطين الاستضافة السحابية على المدى القريب.
بيئة التحكم والبرمجيات الوسيطة	أنظمة التشغيل الكمية، المترجمات، تصحيح الأخطاء.	بناء وتطوير أدوات وطنية لحماية السيادة التقنية.
خوارزميات وتطبيقات القطاعات	حلول مخصصة لقطاعات النفط والغاز، الكيماويات، اكتشاف المواد، سلاسل الإمداد، والتحسين المالي.	تحويل الريادة الصناعية القائمة إلى ميزة ريادية في البرمجيات القطاعية المتخصصة.
الخدمات والاستشارات والأمن السيبراني	خدمات الانتقال للتشفير ما بعد الكم، خدمات الحوسبة السحابية الكمية، الاستشارات التخصصية.	إلزام القطاعات بالتحول التشفيري وتأسيس شركات استشارية وطنية في هذا المجال.

يُظهر هذا التحليل المبسط بوضوح أن المملكة تقف أمام ميزتين تنافسيتين متكاملتين: الأولى تتمثل في توطين أجزاء من العتاد المادي والبنية التحتية المتخصصة مثل أنظمة التبريد الفائق؛ والأخرى تتجسد في ريادة طبقتي الخوارزميات التطبيقية والخدمات التشفيرية السيادية، مما يُمهّد للبناء عليهما لقيادة قطاع برمجيات الطاقة والمعادن عالمياً.

معمارية الحوسبة الهجينة (HYBRID HPC-QC)

أشارت الورقة الأساسية بدقة إلى أن الحواسيب الكمية لن تلغي الحواسيب الفائقة التقليدية، بل ستتكامل معها. ولترجمة هذا المفهوم إلى واقع تنفيذي ملموس في المملكة، ينبغي التركيز على الأبعاد الفنية والتنظيمية الآتية:

أولًا: التكامل الهيكلي بين المعالجات

تمتلك المملكة اليوم استثمارات ضخمة ومتنامية في الحوسبة الفائقة الأداء ومراكز بيانات الذكاء الاصطناعي السيادية. لا تتطلب المرحلة الحالية بناء مراكز بيانات كمية معزولة ومستقلة، بل دمج معالجات كمية بوصفها مسرّعات متخصصة مرتبطة بأنظمة الحوسبة الفائقة القائمة. وتتولى المعالجات التقليدية ومعالجات الرسوميات المعالجة الأولية وتجهيز البيانات، بينما تُحال العمليات المعقدة، مثل مسائل التحسين التوافقي والمحاكاة الجزيئية، إلى المعالج الكمي، ثم تعود النتائج إلى المعالجة اللاحقة.

ثانيا: بناء طبقة البرمجيات الوسيطة وجدولة المهام

العقبة التقنية الكبرى في الحوسبة الهجينة ليست مجرد وصل العتاد، بل تكمن في تطوير طبقة برمجيات وسيطة ذكية قادرة على تفكيك المشكلات الحسابية الضخمة ديناميكيًا وإرسال الجزء المناسب إلى المعالج الأمثل في الوقت الفعلي. يمثل الاستثمار في تطوير هذه الطبقة البرمجية فرصة وطنية كبرى لتأسيس ملكية فكرية سيادية في إدارة بيئات الحوسبة الهجينة المعقدة.

ثالثا: حماية السيادة الرقمية ومعالجة البيانات الحساسة

كما أوضحت الورقة، تشكل سرية البيانات الوطنية في قطاعات النفط والتعدين والمالية عائقاً أمام إرسالها إلى سحابات كمية خارجية. يُعد النموذج الهجين المحلي يمثل النموذج الهجين المحلي مسارًا آمنًا يتيح للقطاعات الصناعية الحيوية استغلال القدرات الكمية دون المخاطرة بنقل البيانات خارج البيئات التشغيلية المعتمدة.

الخاتمة

إن النضج الفعلي لاقتصادات التقنية الكمية، ولا سيما الحوسبة الكمية، سيتشكل خلال السنوات القليلة القادمة، والمملكة تمتلك العناصر المثالية للتموضع الفعّال: وفرة الطاقة، الاستثمارات المتقدمة في الحوسبة الفائقة والذكاء الاصطناعي، وقطاعات صناعية ومالية ضخمة تملك بيانات كثيرة وتحديات تطبيقية حقيقية. إن التركيز على المعمارية الهجينة واقتناص الفرص ذات القيمة المضافة العالية في سلسلة القيمة مع التركيز على السيادة التقنية للعتاد ونقل التقنية سيضمن للمملكة الانتقال من موقع المتبني والمستهلك إلى صانع القيمة والمُصدّر للحلول والتطبيقات الكمية إقليمياً ودولياً.

- **التعقيب الثاني: د. سمية مدخلي**

تمهيد: من أين أكتب

يدور في المملكة اليوم نقاش جاد حول التقنية الكمية، ومعظم ما يُكتب فيه يأتي من موقع السياسات أو الاستشارات الاقتصادية. هذا موقع ضروري، ولا غنى عنه. لكنني أكتب هذه الورقة من موقع مختلف: موقع المختبر.

قضيت سنوات الدكتوراه في جامعة نوتنغهام في بناء أنظمة الذرات الباردة وتصغيرها، وتحديدًا في تطوير منصة لإنتاج الذرات الباردة تقل في الوزن والحجم والتكلفة بنسبة تصل إلى 90% عن الأنظمة المعملية التقليدية، باستخدام تقنيات التصنيع الإضافي. عملت داخل البرنامج الوطني البريطاني للتقنيات الكمية، ورأيت من الداخل كيف تتحول ورقة بحثية إلى جهاز، وكيف يتحول الجهاز إلى منتج، وكم من الوقت والمال والكفاءات يستهلك كل انتقال بين هذه المراحل.

هذا الموقع يجعلني أرى بعض الأمور من زاوية مختلفة عما يُطرح عادة، وأحيانًا من زاوية معاكسة. وخلاصة رأيي في جملة واحدة: القرارات الكبرى التي اتخذتها المملكة صحيحة، لكن ترتيب الأولويات داخلها يحتاج مراجعة، والفجوة الحقيقية ليست في التمويل ولا في الرؤية، بل في سرعة الاستجابة المؤسسية وفي الكفاءات.

أولًا: التقنيات الثلاث لا تنضج بالتساوي، ولا تعود بالعائد بالتساوي

تُقدَّم التقنية الكمية عادة في ثلاث عائلات: الحوسبة، والاتصالات، والاستشعار. هذا التقسيم صحيح، لكنه يُعرض غالبًا بطريقة توحي بأن المجالات الثلاثة تسير في خط زمني واحد وتنتظر اللحظة نفسها. الواقع الهندسي مختلف تمامًا.

حين أنظر إلى الخارطة من موقع من بنى هذه الأجهزة، أرى الترتيب الآتي: الاستشعار الكمي أقرب المجالات الثلاثة إلى تحقيق عائد اقتصادي ملموس، يليه الاتصال، ثم الحوسبة. ومع ذلك، يتركز ما يقارب 90% من النقاش الوطني ومعظم الاستثمار على الحوسبة.

السبب في هذا الاختلال مفهوم: الحوسبة الكمية أسهل في السرد. لها قصة واضحة عن حل مسائل مستحيلة، ولها رقم مبيعات واضح، ولها منافسة عالمية مرئية بين أسماء كبرى. الاستشعار الكمي، في المقابل، تقنية صامتة: جهاز يوضع في طائرة أو على سفينة أو في مركز بيانات، ويعمل بهدوء، ولا ينتج عنوانًا صحفيًا.

لكن أجهزة قياس الجاذبية بالذرات الباردة تُباع تجاريًا اليوم، وليس في عام 2035. والساعات الذرية المصغّرة منتج ناضج متاح للشراء مباشرة. وأنظمة الملاحة بالتداخل الذري خرجت من المختبر إلى الاختبار الميداني في عدة دول. هذه ليست تقنيات مستقبلية ننتظر نضجها، بل تقنيات قائمة ننتظر أن نقرر شراءها أو بناءها.

وفي المقابل، أقول بصراحة ما لا يُقال كثيراً: الحاسوب الكمي المقاوم للأخطاء، القادر على تحقيق تفوق اقتصادي فعلي في المحاكاة الكيميائية أو التحسين واسع النطاق، لا يزال أمامه سنوات، والتقديرات التي تضعه بين 2030 و2035 هي تقديرات متفائلة تعتمد على استمرار وتيرة التقدم الحالية دون عوائق. الاستثمار فيه اليوم قرار صحيح، لكنه استثمار في حجز مكانة المملكة مبكرًا في هذا السباق وفي التعلّم، لا في العائد القريب. الخلط بين الاثنين هو أخطر ما يمكن أن يقع فيه أي برنامج وطني.

ثانياً: اختيار المنصة قرار اقتصادي، لا قرار تقني فقط

اختارت المملكة الرهان على منصة الذرات المحايدة الباردة عبر شراكة أرامكو مع باسكال، وتشغيل أول حاسوب كمي في المنطقة. أرى أن هذا الاختيار أذكى مما يُقدَّر له عادة، لسبب نادراً ما يُذكر في التغطية الاقتصادية.

عائلة الذرات المحايدة ليست منصة حوسبة فحسب. هي البيئة التقنية الوحيدة التي تخدم الأركان الأربعة معاً: الحوسبة الكمية، والاستشعار الكمي، والساعات الذرية، والملاحة الكمية - من البنية التحتية نفسها. أنظمة الليزر لتبريد الذرات، وغرف التفريغ الفائق، والحقول المغناطيسية والضوئية للحصر واصطياد الذرات، وأنظمة القياس والتحكم الإلكتروني، والكفاءات البشرية المتخصصة: كل هذه مشتركة بين التطبيقات.

من تقديري الهندسي، فإن المختبر المبني للحوسبة الكمية بالذرات المحايدة يحتوي على ما يقارب 80% من البنية التحتية اللازمة لتشغيله كمستشعر فائق الدقة. الانتقال من الحوسبة إلى الاستشعار لا يتطلب إعادة اختراع الأجهزة، بل إعادة تكوين برمجية وزمنية لأنظمة التحكم البصري: في الحوسبة نثبّت الذرات في مصفوفات ثابتة لإجراء البوابات المنطقية، وفي الاستشعار نستخدم الملاقط نفسها لترتيب الذرات ثم إطلاقها في تداخل ذري لقياس فرق الطور.

معنى هذا بلغة الاقتصاد: المملكة تملك اليوم منصة مزدوجة الغرض، وتستثمر في غرض واحد منها. التكلفة الحدية لتوسيع الاستثمار إلى الغرض الثاني أقل بكثير من تكلفة البدء من الصفر في منصة جديدة. هذه، في رأيي، أعلى نقطة عائد متاحة أمام البرنامج الوطني اليوم، وهي لا تتطلب تشكيكاً في أي قرار سابق، بل توسيعاً طبيعياً له.

ثالثاً: أين يقع الأثر على الاقتصاد السعودي فعلياً؟

تتداول التقارير رقماً عالمياً لسوق التقنية الكمية يقارب 2.7 تريليون دولار بحلول 2035. أتعامل مع هذا الرقم بحذر، وأنصح صانع القرار بالمثل: هو تقدير لحجم سوق عالمي، لا لعائد وطني، والفارق بينهما هو بالضبط قدرة الاقتصاد المحلي على الالتقاط. الاستراتيجية التي تُبنى على رقم يرد في العنوان تنهار عند أول مراجعة ميزانية.

الأنفع، برأيي، أن نرتب الأثر بحسب الأفق الزمني للعائد، لا بحسب حجم السوق:

الأفق القريب (3 إلى 5 سنوات) - الاستشعار

-الاستكشاف النفطي والمعدني: تكشف أجهزة قياس الجاذبية بالذرات الباردة الخزانات الجوفية والكهوف والتغيرات في الكتلة الجيولوجية بدقة تتجاوز الأجهزة التقليدية بعدة أوامر مقدارية. وبالنسبة إلى أرامكو ومعادن، يمثل ذلك خفضًا مباشرًا لتكلفة التنقيب الاستكشافي غير المجدي، وهي تكلفة تُقاس بمئات الملايين.

-البنية التحتية الحرجة: شبكات الاتصالات والشبكات المالية وشبكات الطاقة تعتمد جميعها على مرجع زمني دقيق مستورد. الساعات الذرية المحمولة توفر سيادة زمنية لا تعتمد على مصدر خارجي.

-الملاحة المستقلة: في ظل تصاعد التشويش والانتحال على أنظمة تحديد المواقع عالمياً، تصبح الملاحة بالتداخل الذري أصلًا دفاعياً ومدنياً في آن واحد.

الأفق المتوسط (5 إلى 8 سنوات) - الحوسبة الهجينة

-الخدمات اللوجستية وسلاسل الإمداد: تحسين المسارات وإعادة التوزيع تحت قيود معقدة، بنمط هجين يعمل فيه المعالج الكمي كمسرّع لجزء محدد من المسألة، لا كبديل للحوسبة التقليدية.

-التمويل: تحسين المحافظ، ونمذجة المخاطر والتسعير.

الأفق البعيد (8 سنوات فأكثر) - المحاكاة

-البتروكيماويات والطاقة: محاكاة المواد والمحفزات وعمليات التكرير - وهي أعلى القطاعات قيمة على المدى البعيد، وأبعدها زمنياً، لأنها تتطلب تحديداً الحاسوب الكمي المقاوم للأخطاء.

-الصحة والدواء: تسريع اكتشاف الجزيئات ومحاكاة التفاعلات الكيميائية.

هذا الترتيب يحمل رسالة إدارية واضحة: البرنامج الذي يبني قصته كلها على الأفق البعيد سيواجه سنوات طويلة بلا نتائج قابلة للعرض، وهذه بيئة قاتلة لأي مبادرة وطنية. أما البرنامج الذي يحقق مكاسب ملموسة في الأفق القريب عبر الاستشعار، فهو يشتري لنفسه الشرعية والوقت اللازمين لينضج رهانه الحوسبي.

رابعاً: الأمن الكمي - بُعدان لا بُعد واحد

يتركز النقاش الأمني حول التقنية الكمية في مسار واحد: خطر كسر أنظمة التشفير الحالية، ومنطق "اجمع الآن وفك التشفير لاحقاً"، والانتقال إلى التشفير المقاوم للكم. هذا التشخيص صحيح، وأتفق معه، وأرى أن تأخير الانتقال خطأ يتراكم كل يوم لأن البيانات الحساسة طويلة العمر مُعرّضة من اليوم لا من لحظة نضج التقنية.

لكنني أضيف بعداً ثانياً يكاد يغيب عن النقاش المحلي، وهو بعد أراه من موقع تخصصي: سيادة الزمن والموقع.

كل بنية تحتية حديثة - الاتصالات، المدفوعات (المالية)، توزيع الطاقة، الملاحة الجوية والبحرية - تعتمد على إشارة توقيت وموقع تأتي في معظمها من أنظمة أقمار صناعية أجنبية. هذه الإشارة يمكن تشويشها وانتحالها، وقد حدث ذلك فعلًا في محيطنا الإقليمي مرات متعددة خلال السنوات الأخيرة. الحل ليس تشفيراً أفضل، بل مرجع زمني ومكاني محلي مستقل. والتقنية الكمية تقدم هذا الحل اليوم، بأجهزة قابلة للشراء والتشغيل، عبر الساعات الذرية والملاحة بالتداخل الذري.

أي استراتيجية أمنية كمية تتوقف عند التشفير المقاوم للكم هي استراتيجية ناقصة النصف.

خامسًا: المعوّق الحقيقي ليس المال

أكتب هذا الجزء بصراحة، لأن المجاملة فيه لا تخدم أحداً.

أنجزت المملكة في أقل من ثلاث سنوات ما تستغرقه دول أخرى في عشر: تأسيس التحالف الوطني الكمي، وإطلاق مصنع الكم في كاوست، وتشغيل أول حاسوب كمي في المنطقة. هذه إنجازات حقيقية تعكس إرادة سياسية وقدرة تمويلية لا تتوفر لكثيرين. الاعتراف بها واجب.

لكن المنظومة التي تنجح في الصفقات الكبرى ذات الدعم السياسي المباشر تواجه تحدياً مختلفاً تماماً في التقاط المبادرات المتوسطة والصغيرة، وهي المبادرات التي تُبنى عليها القدرة الوطنية فعلياً.

أستند هنا إلى تجربة شخصية لا أعرضها بوصفها شكوى، بل بوصفها حالة تكشف نمطاً. سعيت منذ سنوات، عبر أكثر من مسار، إلى تأسيس قدرة محلية في استشعار الذرات الباردة. لم تُغلق تلك المسارات برفض، بل ظلّت مفتوحة دون قرار - بينما استغرق عرض مماثل من خارج المملكة أشهراً معدودة حتى وصل إلى التنفيذ.

ويتكون النمط من ثلاثة عناصر: أولًا، فجوة بين الموافقة المبدئية والتنفيذ الفعلي؛ ثانيًا، غياب جهة تتابع الملف باسمها؛ وثالثًا، منافسة إقليمية تستقطب الكفاءات النادرة بسرعة تفوق سرعة الاستجابة لها. وأؤكد أن هذا تشخيص مؤسسي قابل للإصلاح، وليس مأزقًا، لأن المنظومة نفسها أثبتت قدرتها على التنفيذ على نطاق واسع.

أضيف إلى ذلك ملاحظة تخص جوهر بناء القدرة: هناك فرق بين أن نكون مستهلكاً متقدماً للتقنية الكمية عبر السحابة، وأن نكون قادرين على بنائها. الطريق الثاني لا يعني تصنيع حواسيب كمية كاملة - هذا هدف غير واقعي اليوم لأي دولة خارج النادي الضيق. لكنه يعني القدرة على تصنيع المكوّنات: غرف التفريغ الفائق، والأنظمة البصرية، ووحدات التحكم. أطروحتي كلها كانت في هذا الاتجاه تحديداً: خفض كلفة وحجم هذه المكوّنات بتقنيات التصنيع الإضافي. هذا مستوى من السيادة التقنية قابل للتحقيق في المملكة خلال سنوات قليلة، ولا يتطلب ميزانيات القوى العظمى.



التوصيات

1 توسيع الرهان القائم من الحوسبة إلى الاستشعار:



إنشاء برنامج وطني للاستشعار الكمي بالذرات الباردة، مدمج ضمن التحالف الوطني الكمي، بميزانية تتراوح بين 20 و50 مليون ريال على خمس سنوات، يستضاف في إحدى الجامعات أو المراكز البحثية الكبرى، بشراكات تطبيقية مع أرامكو في الاستشعار الجاذبي، ومع الجهات لطفاعية في الملاحة، ومع هيئة الاتصالات والفضاء والتقنية في الساعات الذرية.

2 تصنيف المشاريع الوطنية وفق أفقها الزمني، لا بجاذبيتها الإعلامية:



إلزام كل مقترح كمي بتحديد أفق العائد المتوقع صراحة، وأن تتوازن المحفظة الوطنية بين مشاريع الأفق القريب التي تنتج نتائج قابلة للقياس، ومشاريع الأفق البعيد التي تبني الموقع المستقبلي للمملكة.

3 توسيع الاستراتيجية الأمنية لتشمل سيادة الزمن والموقع:



إلى جانب وضع خارطة للانتقال إلى التشفير المقاوم للكم، ينبغي إعداد خطة وطنية لمرجع زمني ومكاني مستقل يحمي البنية التحتية الحرجة من تعطل الإشارات الخارجية أو التحالها.

4 إصلاح آليات الاستجابة المؤسسية:



التزام الجهات الممولة بإصدار قرار نهائي - قبولاً أو رفضا مكتوبًا ومسببًا - خلال 120 يومًا من الموافقة المبدئية؛ وتخصيص مسؤول ملف لكل مقترح يتجاوز حدا معينا من الأهمية الاستراتيجية؛ وإطلاق آلية شفافة لتتبع حالة الملفات على غرار الأنظمة الحكومية المتقدمة لتتبع المعاملات.

5 مسح وطني للكفاءات قبل الاستقطاب الخارجي:



حصر الباحثين السعوديين المتخصصين داخل المملكة وخارجها، والطلاب السعوديين الدارسين في هذا المجال، وربط تخصصاتهم بالأولويات الوطنية. والاستقطاب الخارجي، ضروري، لكنه يصبح مكلفا وغير مستدام حين يسبق استثمار الكفاءات الموجودة.

6 بناء قدرة تصنيعية على مستوى المكوّنات:



برنامج مخصص لتوطين تصنيع مكونات الأنظمة الكمية - الفراغ الفائق، والأنظمة البصرية، ووحدات التحكم - بالاستفادة من تقنيات التصنيع الإضافي، بوصفه المسار الواقعي للانتقال من مستهلك للتقنية إلى مصدر لتطبيقاتها.



الخاتمة

السؤال المطروح على المملكة اليوم لم يعد «هل نستثمر في التقنية الكمية؟»؛ هذا السؤال أُغلق بقرارات فعلية على الأرض. السؤال الحقيقي هو: هل نستخرج من استثماراتنا القائمة كل ما تستطيع أن تعطيه؟

أرى أن الإجابة اليوم: ليس بعد. نملك منصة مزدوجة الغرض ونستفيد من غرض واحد منها. ونتحدث عن الأمن الكمي بنصف تعريفه. ونبحث عن الكفاءات في الخارج قبل أن نُحصي ما لدينا في الداخل. وفي كل حالة من هذه الحالات الثلاث، الكلفة ليست في المال، بل في السنوات.

وأقول هذا وأنا أعلم أن نافذة بناء الموقع المستقبلي للسعودية في هذا السباق المبكر تضيق كل عام. الفارق بين دولة تصنع التقنية ودولة تشتريها لا يتحدد لحظة نضج التقنية، بل يتحدد في السنوات التي تسبقها، وهي السنوات التي نعيشها الآن.

أكتب هذا التعقيب بصفتي باحثة سعودية أمضت سنواتها في المختبر لا في المكتب، ومستعدة للمساهمة الفعلية متى توفرت الأطر المؤسسية المناسبة. الأفكار موجودة، والكفاءات موجودة، والقرار الكبير قد اتُّخذ بالفعل. وما تبقى هو التفصيل التنفيذي؛ وهو، في تجربتي، ما يحدد نجاح البرامج الوطنية أو تعثرها.

- **التعقيب الثالث: د. خلود المطيري**

أولًا: القراءة العامة: الأطروحة صحيحة، والسبب أعمق مما تقوله الورقة

تقوم الورقة على أطروحة واحدة: النضج ليس شرطًا للتموضع، والتأخر كلفة تتراكم قبل وصول الحاسوب المقاوم للأخطاء لا بعده. وقد أثبتت الأشهر الماضية شواهدها: حاسوب أرامكو-باسكال دخل الخدمة، والأمران التنفيذيان الأمريكيان صدرا في يونيو 2026، ثم جاء تعميم البنك المركزي السعودي في أغسطس ليجعل الأمن التشفيري التزامًا تنظيميًا بمواعيد داخل المملكة. لكن الورقة تسمّي «ميزة المتصدرين الأوائل» دون أن تفسّر لماذا تصح في هذه التقنية تحديدًا، والتفسير يحدد ما يُشترى: العتاد الكمي يتقادم سريعًا، بينما تتراكم قيمة الأصول المكمّلة، مثل البيانات المهيّأة والمشكلات المحددة بدقة والفرق التي تعلمت حدود التقنية وعلاقات الموردين تُترجم إلى شروط أفضل. فالميزة ليست في امتلاك الجهاز مبكرًا بل في بناء ما لا يُشترى لاحقًا، وهذا يقلب أولويات الإنفاق نحو ما يتراكم لا ما يتقادم. والورقة قوية في التشخيص، لكنها تترك أسئلتها الخمسة مفتوحة.

ثانياً: التقنيات الثلاث: لماذا سلّم النضج معكوس على سلّم القيمة؟

التصنيف دقيق، لكن الورقة لا تشرح سبب تفاوت النضج، والسبب يفسر ما بعده. فالاستشعار والاتصالات يستثمران خصائص كمية لعدد قليل من الجسيمات دون تشابك واسع ولا تصحيح أخطاء، فخرجا من المختبر؛ أما الحوسبة فقيمتها من التشابك بين آلاف الكيوبتات لمدد طويلة، والضوضاء عدوها البنيوي، فالأكبر وعدًا هو الأبعد وصولًا. والنتيجة محفظة بثلاثة آفاق: فوري (التشفير المقاوم للكم، والساعات الذرية، ومستشعرات الجاذبية والمغناطيسية)، ومتوسط (الاتصالات والبنية الهجينة)، وطويل (الحوسبة المقاومة للأخطاء). وتقدير «2030–2035» تسويقي بنيويًا، فخرائط الشركات تُكتب لجذب رأس المال؛ والأصح ربط الاستراتيجية بمؤشرات نضج الكيوبتات المنطقية، ومعدل الخطأ، وإثبات تصحيح الأخطاء لا بتاريخ. وتغفل الورقة أن الاستشعار الكمي أقرب التقنيات إلى ميزتنا النسبية: فمقاييس الجاذبية الكمية، القائمة على تداخل ذرات باردة في سقوط حر، تقيس قياسًا مطلقًا لا ينجرف، فترصد تغيّر كثافة الصخر المشبع مع حركة السوائل في العمق، أي إنها تقدم صورة زمنية لجبهة الماء المحقون، ونضوب أجزاء المكمن، وبقاء ثاني أكسيد الكربون حيث حُقن.

ثالثاً: أرامكو والمتصدرون الأوائل: منارة لا منظومة

وبالإشارة إلى أن شركة أرامكو من أوائل المتصدرين في المملكة العربية السعودية، وأنها اشترت أول حاسوب كمي من شركة باسكال الفرنسية، تجدر الإشارة إلى أن باسكال تُركّب النظام وتصونه وتشغّله، وأن «واعد» شاركت في تمويلها عام 2023، وأن النظام يضم 200 كيوبت من الذرات المحايدة، وقد دخل الخدمة في نوفمبر 2025، وأُطلقت منصته التجارية في مايو 2026.

وفي التحليل، يبرز خطر «انحياز المنارة (LIGHTHOUSE BIAS)»، المتمثل في أن يُقرأ إعلان واحد بوصفه مؤشرًا على الجاهزية الوطنية؛ فمؤشر النجاح ليس وجود الجهاز، بل عدد الجهات الأخرى التي شغّلت عليه عبء عمل حقيقيًا، كما أن القيمة القابلة للنقل تتمثل في المنهجية لا العتاد. وفيما يتعلق بحجة السيادة، يبرز تحفظ على ربط الورقة فائدة التقنية بكون المزوّد وطنيًا، مع أن حاسوب أرامكو نفسه يعتمد على تقنية فرنسية. فالسيادة تتكون من ثلاث طبقات: سيادة البيانات، وسيادة القدرة، وتنوّع المورّدين. ويكمن الخطر الأكبر في الانغلاق على نمط تقني واحد قبل أن يحسم السوق، لأن الكفاءات والبرمجيات تُبنى على حزم أدوات بعينها؛ ومن ثم، فإن الاستثمار في نمطين يمثل شراءً لقيمة الخيار.

رابعاً: الحوكمة: التشتت ليس خللًا عارضًا بل التوازن الطبيعي

أدق ملاحظة في الورقة أن الجهود «مجزأة وشبه مرئية»، لكنها تعالج التشتت كأنه نقص تنسيق يُعالج بلجنة. والواقع أنه التوازن الطبيعي حين تُكافأ كل جهة على ظهورها لا على إسهامها في نتيجة مشتركة، فجهة تنسيق لا تملك موردًا نادرًا: تمويلًا يُوزَّع، أو وصولًا إلى بنية تحتية، أو صلاحية اعتماد المشروعات، ستُستشار ثم تُتجاهل. ويقترح النص فصل ثلاث وظائف مع تحديد جهة مسؤولة عن كل منها: البحث والبنية التحتية لدى الجامعات ومراكز البحث، والأمن لدى الجهة السيبرانية الوطنية، والتبني القطاعي لدى منظّمي الطاقة والمالية والاتصالات والصحة. وفي التمويل، الدرس البريطاني أعمق من رقمه: المنح تصنع أبحاثًا والمشتريات تصنع سوقًا، فالدولة بوصفها «العميل الأول» أرخص أداة صناعية متاحة؛ والورقة تسأل عن نسبة الاستثمار حيث كان ينبغي أن تسأل عن نسبة المشتريات. وتُقاس الاستراتيجية بمؤشرات لا بمخرجات إعلامية: الجهات التي شغّلت عبء عمل كميًا حقيقيًا، ونسبة الأنظمة الحرجة المكتمل جردها التشفيري، والكفاءات العاملة فعلًا في فرق وطنية، وقيمة المشتريات الحكومية، والإنتاج البحثي المرتبط بمشكلات معرّفة.


خامساً: القيمة الاقتصادية:
الرقم الكبير يخفي ترتيبًا مقلوبًا للقطاعات
ما الذي يخفية الرقم ؟
الأهم أنه يخفي فوارق نوعية بين فئات المشكلات:
محاكاة الكيمياء والمواد
تملك أقوى أساس نظري لتفوق كمي حقيقي لكنها تحتاج إلى تصحيح الأخطاء، أي أنها الأبعد زمناً.
التحسين
هو الأكثر تسويقاً والأقل إثباتاً لأن الخوارزميات الكلاسيكية تنافس فيه بشراسة.
تقدير تراكمي عالمي يجمع التقنيات الثلاث ويقيس «القيمة المعَرضة» لا المحصّلة.
2.7
تريليون دولار
بحلول 2035
النتيجة: انقلاب ترتيب الورقة
القطاع الأثقل استراتيجيّاً، أي البتروكيماويات والمواد، يمثل رهاناً طويل الأجل يبستحق برنامجًا بحثيّاً، والقطاعات المسوّقة على أنها قريبة تستحق تجارب محدودة بمعايير نجاح صارمة.
الحوسبة الهجينة والبناء فوق مراكز البيانات
أقوى ما في الورقة اقتصاديًا، بتحفظ واحد:
AI
الاستضافة ليست القدرة، فالقيمة في طبقة البرمجيات والخوارزميات لا في الغرفة المبردة.
سجل وطني للمشكلات المرشحه
عشر إلى عشرين مشكلة مصنفة بنمطها وجاهزيتها وقيمتها عند الحل.
النمط
الجاهزية
القيمة عند الحل

سادساً: الأمن السيبراني: أقوى المحاور، وقد تجاوزه الواقع

المخاطرة هنا لا تناظرية: كلفة الانتقال المبكر محدودة ومعروفة، وكلفة التأخر تراكمية غير قابلة للرد، فالبيانات المسروقة اليوم لا تُستعاد بتحديث لاحق وهذا وحده يبرر أن يتحرك الملف على جدوله لا على جدول الحاسوب. وثلاثة تشديدات: أن يكون الانتقال مشروعًا يبدأ بجرد تشفيري قبل أن يكون استبدالًا، فالمؤسسات لا تعرف أين يُستخدم RSA وECC في أنظمتها؛ وتقدير «سنة على الأقل» يقلل من الحجم، فمعايير NIST رُبطت بجدول يُهمل الخوارزميات 2030 ويمنعها 2035، والانتقال مشكلة سلسلة توريد لا تحديث داخلي؛ و«المرونة التشفيرية» (CRYPTOGRAPHIC AGILITY) أهم من أي خوارزمية. أما توزيع المفاتيح الكمي فحل عتادي لروابط محدودة المسافة يحتاج عقدًا موثوقة ولا يحل المصادقة، فيظل مكملًا للتشفير المقاوم للكم: الأولوية للثاني، والأول مسار بحثي للبنى الحرجة. وقد تجاوز الواقع الورقة هنا: فتعميم البنك المركزي السعودي «رفع مستوى المتانة التشغيلية لمواجهة مخاطر الحوسبة الكمية» (27 أغسطس 2026) ألزم المؤسسات المالية بتقييم مؤسسي للمخاطر بنهاية الربع الأول 2027، وحصر الأصول التشفيرية بنهاية الربع الرابع 2026، وخطط للمرونة التشفيرية، وإدراج المخاطر الكمية بندًا لدى لجنة المخاطر. ومنطقه يطابق ما تقدم، لكنه لا يحدد موعد الانتقال الفعلي، ولا يُسمّي إطارًا خوارزميًا مرجعيًا، ولا يمتد خارج القطاع المالي، وهذه فجوة تسدّها الجهة السيبرانية الوطنية بتعميم موازٍ للبنى الحرجة.

سابعاً: القدرات: رافعتان لا واحدة: المهندس القائم والفيزيائي الذي نصنعه

التوصيات صائبة، لكنها تحتاج إلى تحليل لسوق المواهب والتمييز بين رافعتين تختلفان في الزمن والوظيفة. الرافعة الأولى قصيرة الأمد، وتتمثل في إعادة تأهيل الكفاءات المجاورة، مثل مهندسي الحوسبة الفائقة والتشفير والبرمجيات العلمية؛ فتأهيل مئة منهم أسرع من تخريج عشرة فيزيائيين، ويلبي الحاجة التي أكدها التعميم حين عدّ «الكوادر البشرية» بندًا ضمن المخاطر. لكن أثر هذه الرافعة يقتصر على التطبيق والامتثال، ولا يشمل التطوير. أما الرافعة الثانية، وهي طويلة الأمد ولا غنى عنها، فتتمثل في تكوين الفيزيائيين وتطويرهم؛ فما يفصل الدولة المستهلكة عن المصدرة ليس عدد مشغلي الأجهزة، بل عدد من يفهمون آلية عملها وحدودها، ويصممون المنصات، ويعالجون الأخطاء، ويهندسون الكيوبتات، ويطورون الخوارزميات الأصيلة، ويقيّمون ادعاءات الموردين تقييمًا مستقلًا.

العلاقة بين الرافعتين تسلسلية لا تنافسية: المهندسون يشترون الوقت، والفيزيائيون يبنون العمق، والخطأ أن يُقدَّم أحدهما بديلًا عن الآخر. عمليًا يعني ذلك مسارًا مزدوجًا: برامج تحويل مهني قصيرة للكفاءات القائمة بشراكة مع الشركات العالمية، وبالتوازي توسيع منح الدراسات العليا في فيزياء الكم والمعلومات الكمية بأهداف عددية معلنة، ودعم مجموعات بحثية وطنية تعمل على مشكلات محددة لا على موضوعات عامة، وإدخال مفاهيم تمهيدية في المرحلة الثانوية كما تدعو الورقة بحق. ولا يقل الاحتفاظ بالكفاءات أهمية عن تكوينها: الفيزيائي الذي يعود ولا يجد مختبرًا ولا فريقًا ولا مشكلة تستحق وقته يعود إلى حيث تدرّب، فبناء المقاعد البحثية شرط لجدوى المنح، وليس مجرد تكملة لها. أما التركيبة المهنية المطلوبة فأوسع من الفئتين معًا: مهندسو برمجيات كمية، ومهندسو تحكم وإلكترونيات، ومتخصصو تبريد وفراغ، ومحللو مخاطر تشفيرية، إلى جانب الفيزيائيين النظريين والتجريبيين. وتملك المملكة نواة مجتمعية وتدريبية قائمة مثل المجتمعات الكمية، ومعسكرات، ومسارات شهادات مهنية، تستطيع الاستراتيجية أن تبني عليها بدل البدء من الصفر.

خلاصة

تنجح الورقة في إقناع القارئ بأن الانتظار قرار له كلفة. وما اقترحته يحوّلها من دعوة إلى برنامج: تمويل ما يتراكم لا ما يتقادم، ومحفظة بثلاثة آفاق، وحوكمة تُسمّي المالك، والدولة عميلًا أول، وسجل مشكلات يقلب ترتيب القطاعات، وتشفير مقاوم للكم بوصفه جردًا ومرونة لا مشروع سنة، وقدرات تُبنى من المهندس القائم والفيزيائي الذي نصنعه معًا. ويتمثل سؤال الورقة الختامي في: «كم يكلفنا أن نبدأ بعد أن ينضج الآخرون؟» والجواب أن الكلفة ليست مالية أولًا بل كلفة موقع: في سلاسل القيمة، وفي المعايير التي تُكتب الآن، وفي الكفاءات التي تختار أين تستقر.

المداخلات حول القضية

- **واقع التقنية الكمية وموقع المملكة في السباق الكمي العالمي**

تشهد التقنيات الكمية تطورًا عالميًا متسارعًا، إلا أن مساراتها تتفاوت من حيث النضج العلمي والجاهزية التقنية والتجارية، وهو ما يستدعي التمييز بين الحوسبة الكمية، والاستشعار الكمي، والاتصالات الكمية، والبرمجيات والخوارزميات، وغيرها من المجالات المرتبطة بها. وعلى الرغم من أن بعض الدول بدأت الاستثمار في العلوم الكمية منذ وقت مبكر، فإن الانتقال إلى برامج وطنية متكاملة للتقنيات الكمية يعد حديثًا نسبيًا، بما يعني أن فرص الدخول والمنافسة لا تزال قائمة، ولا سيما في المجالات التطبيقية التي لم تستقر فيها خريطة المنافسة العالمية بصورة نهائية.

وتشير التقديرات الحديثة إلى تنامي الأهمية الاقتصادية للحوسبة الكمية، إذ يرى بنك مورغان ستانلي أن سوق الحوسبة الكمية قد يتجاوز 100 مليار دولار سنويًا بحلول عام 2040، مقارنة بنحو 10 مليارات دولار في عام 2030، شريطة تحقق انتشار تجاري واسع للحواسيب الكمية القادرة على تصحيح الأخطاء، وهو ما يؤكد أن النمو المتوقع للسوق يرتبط بمدى نجاح التطورات التقنية وتحولها إلى تطبيقات تجارية قابلة للتوسع[1].

ويمتلك الاقتصاد السعودي عددًا من المقومات التي يمكن أن تدعم موقع المملكة في هذا السباق، من أبرزها حجم الاقتصاد، والقدرة الاستثمارية، والاستقرار، ووجود قطاعات اقتصادية وصناعية كبيرة يمكن أن تستفيد من التطبيقات الكمية. كما تمنح هذه المقومات المملكة قدرة على جذب الشركات العالمية المطورة للتقنيات المتقدمة، والاستفادة من السوق المحلية بوصفها بيئة لتجريب التطبيقات وتطويرها. غير أن القيمة الاستراتيجية لهذا الموقع لا تتحقق بمجرد استيراد التقنيات أو توفير سوق لها، وإنما بتحويل جاذبية السوق السعودية إلى وسيلة لاكتساب المعرفة، وبناء الخبرات الوطنية، وتطوير التطبيقات محليًا، والدخول التدريجي في حلقات سلسلة القيمة المرتبطة بالتقنيات الكمية.

[1] MT Newswires. (2026, October 15). Quantum computing market could grow to $100 billion-plus per year by 2040, Morgan Stanley says. Yahoo Finance. https://finance.yahoo.com/technology/ai/articles/quantum-computing-market-could-grow-172749617.html

ويتطلب تحديد الموقع الوطني المستهدف التميز بين الريادة في تطوير الحاسوب الكمي نفسه وبين الريادة في استخدام التقنيات الكمية وتطوير تطبيقاتها. فقد تكون المنافسة في تصنيع بعض مكونات الأجهزة الكمية مرتفعة التكلفة وشديدة التعقيد، في حين تتوافر فرص أكثر واقعية في البرمجيات والخوارزميات والاستشعار والتطبيقات القطاعية والخدمات المرتبطة بها. ومن ثم، يمكن بناء موقع وطني تنافسي من خلال اختيار المجالات التي تتوافق مع احتياجات المملكة وقطاعاتها الاقتصادية وإمكاناتها العلمية والتقنية، بدل السعي إلى المنافسة في جميع مسارات التقنية في وقت واحد.

كما أن تقييم موقع المملكة ينبغي ألا يقتصر على مقارنة عدد الأجهزة أو المختبرات بما تمتلكه الدول الأخرى، بل يشمل القدرة على إنتاج المعرفة، وإعداد الكفاءات، وتحويل البحوث إلى تطبيقات، وبناء الشراكات، وتطوير منتجات وخدمات قابلة للاستخدام الاقتصادي. ويجعل ذلك السباق الكمي أوسع من مجرد سباق على امتلاك الحواسيب، ليصبح تنافسًا على المعرفة والمهارات والملكية الفكرية والتطبيقات والأسواق.



- **الاستراتيجية الوطنية واقتصاديات الاستثمار والحوكمة في التقنية الكمية**

يتطلب التعامل الاستراتيجي مع التقنية الكمية وجود رؤية وطنية مترابطة تحدد الغاية من الاستثمار، والموقع المستهدف للمملكة، والتقنيات والقطاعات ذات الأولوية، والأدوار المؤسسية، والأهداف قصيرة ومتوسطة وبعيدة المدى. ولا يكفي امتلاك جهاز متقدم، أو استقطاب خبرة متخصصة، أو تمويل مشروعات بحثية منفردة لبناء منظومة كمية وطنية، بل ينبغي ربط البحث العلمي بالتعليم والتدريب والتطبيق الاقتصادي والاستثمار والتصنيع ونقل التقنية ضمن إطار متكامل.

وتبرز في هذا السياق ضرورة تحديد المجالات التي ينبغي تطويرها محليًا، والمجالات التي يمكن الحصول عليها من الخارج، والتقنيات التي يمكن توطينها من خلال الشراكات الدولية. كما ينبغي المفاضلة بين الاستثمار في تطوير الحوسبة الكمية نفسها وبين الاستثمار في البرمجيات والخوارزميات والاستشعار والتطبيقات الأكثر ارتباطًا بالاقتصاد السعودي. ويساعد هذا التحديد على تجنب تشتيت الموارد بين مسارات متعددة، وتوجيهها إلى المجالات التي تمتلك المملكة فيها حاجة استراتيجية أو قدرة على بناء ميزة تنافسية.

وينبغي التعامل مع الإنفاق على التقنية الكمية بوصفه استثمارًا استراتيجيًا له غايات محددة، قد تكون اقتصادية مباشرة، أو علمية ومعرفية، أو أمنية وسيادية، أو مرتبطة ببناء قدرات وطنية طويلة المدى. ولا يمكن قياس جميع هذه الاستثمارات بمعيار الربحية التجارية قصيرة الأجل، خصوصًا أن بعض المجالات الكمية لا تزال في مرحلة البحث الأساسي، بينما وصلت مجالات أخرى إلى درجات أعلى من النضج وقابلية الاستخدام.

وفي الوقت نفسه، تبرز أهمية تقييم تكلفة الفرصة البديلة؛ إذ إن أهمية التقنية الكمية عالميًا لا تعني بالضرورة أن جميع مساراتها تستحق الدرجة نفسها من الاستثمار. فقد يكون الاستثمار في مستشعر كمي أو برنامج أو خوارزمية أو تطبيق قطاعي محدد أكثر جدوى من توجيه موارد كبيرة نحو محاولة تطوير منظومة حوسبة كمية متكاملة. ولذلك ينبغي أن تستند المفاضلة إلى دراسة مستوى النضج التقني، والتكلفة، وحجم السوق، والاحتياجات الوطنية، وإمكانات التوطين، والعائد المتوقع.

ولا ينبغي إخضاع البحث الأساسي لمعيار العائد التجاري السريع وحده، لأن كثيرًا من التقنيات الكبرى نشأت من استثمارات بحثية طويلة الأجل لم تكن تطبيقاتها الاقتصادية واضحة في بدايتها. ومع ذلك، ينبغي أن تكون أهداف التمويل واضحة، وأن توجد مؤشرات لقياس جودة المخرجات وبناء القدرات وصلتها بالأولويات الوطنية، بما يحقق التوازن بين دعم البحث طويل المدى وبين الحد من الإنفاق غير الموجه.

وتفيد الاستفادة من التجارب السابقة في الاستثمار في التقنيات الناشئة، ومنها تجربة تقنية النانو، في تقييم العلاقة بين حجم الإنفاق والبنية التحتية والكوادر والمخرجات العلمية والتطبيقية. ولا يقتضي ذلك النظر إلى التجارب السابقة من زاوية النجاح أو الإخفاق فقط، وإنما تحليل ما تحقق منها واستخلاص الدروس التي يمكن الاستفادة منها في إدارة الاستثمار الكمي، خصوصًا فيما يتعلق باستدامة المختبرات، وتأهيل الكفاءات، وتحويل البحث إلى تطبيقات اقتصادية.

كما تزداد أهمية الحوكمة في ظل ارتفاع تكلفة التجهيزات وتعدد الجهات المعنية والتخصصات. ويقتضي ذلك الحد من ازدواجية المشروعات والمختبرات، وتحديد مسؤوليات الجهات، وتوجيه التمويل وفق القدرة الفعلية على الإنجاز والميزة التخصصية لكل مؤسسة، مع إجراء مراجعات دورية تسمح بإعادة ترتيب الأولويات. ويمكن في هذا السياق تبني الاستثمار المرحلي الذي يبدأ ببناء الكفاءات والبنية الأساسية والتطبيقات الأقرب إلى النضج، ثم يتوسع وفق النتائج والتطور العالمي للتقنية، بما يحقق التوازن بين مخاطر الدخول المبكر ومخاطر التأخر عن المنافسة.

- **بناء القدرات الوطنية والتعليم والتدريب والبنية التحتية الكمية**

يمثل رأس المال البشري أحد أهم مرتكزات بناء الاقتصاد الكمي، نظرًا إلى الطبيعة البينية للتقنيات الكمية وتداخل الفيزياء والرياضيات والحاسب والإحصاء والهندسة والتخصصات التطبيقية فيها. ولذلك فإن بناء الكفاءات لا يقتضي بالضرورة إنشاء تخصص مستقل في كل جامعة، بل يمكن تطوير مسارات فرعية وبرامج دراسات عليا متخصصة، مع توزيع المجالات بين الجامعات ومراكز البحث وفق القدرات والخبرات المتاحة، بما يحقق التكامل ويحد من تكرار البرامج والتجهيزات.

كما ينبغي التمييز بين المهارات المطلوبة لتطوير الأجهزة الكمية والمهارات اللازمة لاستخدام الحوسبة الكمية أو تطوير برمجياتها. فتطوير الأجهزة يحتاج إلى خبرات في الفيزياء التجريبية والهندسة والإلكترونيات والليزر وأنظمة الفراغ والتبريد والتحكم الدقيق والتصنيع، بينما تحتاج التطبيقات والخوارزميات إلى خبرات في الحاسب والرياضيات والبرمجيات والبيانات، إلى جانب المعرفة المتخصصة بالمجال الذي سيستخدم التطبيق فيه. ويعني ذلك أن بناء القدرة الوطنية يتطلب فرقًا متعددة التخصصات قادرة على الربط بين الجانب النظري والتجريبي والتطبيقي.

ولا يمكن الاعتماد على التعليم الجامعي وحده لتلبية الاحتياجات المستقبلية، لأن سرعة تطور التقنية قد تتجاوز سرعة تحديث البرامج الأكاديمية. ومن ثم، تبرز أهمية التدريب المستمر وإعادة التأهيل لخريجي الفيزياء والحاسب والرياضيات والهندسة، وكذلك للعاملين في القطاعات التي ستتأثر بالتقنيات الكمية. ويعد القطاع المالي مثالًا على ذلك، إذ يحتاج إلى كوادر تفهم الآثار المحتملة للحوسبة الكمية على التشفير والأمن السيبراني، دون اشتراط تحول جميع العاملين فيه إلى متخصصين في الفيزياء أو الخوارزميات الكمية.

ويرتبط بناء الكفاءات بالحاجة إلى بنية تحتية وطنية تسمح بالتعليم والبحث والتدريب والتجريب والتطوير. وتشمل هذه البنية المختبرات المتقدمة، وأنظمة الليزر والفراغ والتبريد والتحكم والقياس الدقيق، والتصنيع، والمحاكاة، والمنصات البرمجية والسحابية. ويمكن تنظيم هذه الإمكانات ضمن مركز وطني متخصص أو شبكة مترابطة من المختبرات والمنشآت القائمة، بما يتيح الاستفادة منها من قبل الجامعات والباحثين والشركات والقطاعات الاقتصادية.

كما يمكن النظر إلى البنية التحتية الكمية بوصفها منصات متعددة الاستخدام؛ فالتجهيزات التي تنشأ لتطوير الحوسبة الكمية يمكن أن تستخدم كذلك في الاستشعار والقياس والتجارب الفيزيائية والتطبيقات الصناعية والطبية. ومن ثم، ينبغي ألا يقتصر تقييم العائد من المختبرات على قدرتها على إنتاج حاسوب كمي، بل أن يشمل ما تولده من معرفة وكفاءات وأجهزة فرعية وتطبيقات ومنتجات يمكن استخدامها في مجالات أخرى.

- **التكامل بين الجامعات ومراكز البحث والقطاع الخاص والشراكات الدولية**

يتطلب بناء منظومة كمية وطنية تجاوز تشتت الجهود وتعزيز التعاون بين الجامعات ومراكز البحث والمؤسسات الحكومية والقطاع الخاص. فوجود خبرات أو مختبرات متقدمة في مؤسسات مختلفة لا يؤدي تلقائيًا إلى تكوين قدرة وطنية متكاملة ما لم توجد آليات تسمح بتبادل المعرفة والخبرات، والاستخدام المشترك للتجهيزات، وتنفيذ المشروعات البحثية المشتركة، وربط الباحثين بالمشكلات الاقتصادية والتقنية الفعلية.

ويبرز في هذا السياق أهمية تعزيز التعاون البحثي المحلي بالتوازي مع التعاون الدولي، بحيث لا تعمل الجامعات والمراكز في مسارات منفصلة. ويمكن دعم ذلك من خلال تمويل المشروعات المشتركة، وتبادل الباحثين والطلاب، وإتاحة المختبرات والتجهيزات بين المؤسسات، وتطوير قواعد بيانات وطنية توضح الخبرات والمشروعات والبنية التحتية المتاحة.

كما ينبغي توزيع الأدوار وفق نقاط القوة والقدرات التخصصية بدل إنشاء البنى والتخصصات نفسها في جميع المؤسسات. ويمكن أن تركز بعض الجهات على الأجهزة والتجارب، وأخرى على الخوارزميات والبرمجيات، وأخرى على الاستشعار أو المواد أو التطبيقات القطاعية، بما يسمح ببناء منظومة وطنية تكاملية ويقلل من الازدواجية في الإنفاق.

ويمثل القطاع الخاص عنصرًا أساسيًا في تحويل المعرفة العلمية إلى قيمة اقتصادية، إذ يمكن للشركات الوطنية الدخول في مجالات البرمجيات والخدمات والاستشعار والتطبيقات القطاعية والتدريب والتكامل التقني دون اشتراط البدء بتصنيع حاسوب كمي متكامل. كما يمكن للشركات الكبرى العاملة في الطاقة والمال والصناعة والاتصالات والصحة أن تؤدي دور المستخدم الأول للتطبيقات، من خلال تحديد مشكلات فعلية وتمويل مشروعات تجريبية بالتعاون مع الجامعات ومراكز البحث.

وتبرز كذلك أهمية الشركات الناشئة في تطوير منتجات وخدمات متخصصة، الأمر الذي يستدعي توفير حاضنات ومسرعات وتمويل استثماري مناسب للمشروعات الكمية. وقد تنشأ القيمة الاقتصادية المستقبلية من شركات صغيرة متخصصة في خوارزمية أو مستشعر أو مكون أو خدمة تقنية دقيقة، وليس بالضرورة من الشركات المصنعة للحواسيب الكمية فقط.

أما الشراكات الدولية فتمثل وسيلة مهمة لتسريع الوصول إلى المعرفة والتجهيزات والمنصات المتقدمة، غير أن قيمتها الاستراتيجية ينبغي أن تقاس بما تحققه من بناء للقدرة المحلية. ولذلك ينبغي أن تتضمن التدريب، والبحث والتطوير المشترك، وتبادل الباحثين، واكتساب الخبرات التشغيلية والتصنيعية، وتطوير الملكية الفكرية عندما يكون ذلك ممكنًا. كما يمكن الاستفادة من جاذبية السوق السعودية في الانتقال من علاقة شراء المنتجات إلى شراكات تتضمن أنشطة بحث وتطوير وتجريب وتوطين داخل المملكة.

- **بناء سلسلة قيمة وطنية وتوطين التقنية وتنمية الاقتصاد الكمي**

لا يقتصر الاقتصاد الكمي على صناعة الحواسيب الكمية، وإنما يشمل سلسلة قيمة واسعة تبدأ بالبحث الأساسي والتعليم وإعداد الكفاءات، وتمر بالمكونات والأجهزة وأنظمة التحكم والبرمجيات والخوارزميات والاستشعار والاتصالات والحوسبة السحابية، وتنتهي بالتطبيقات والخدمات والاستشارات والتدريب والصيانة والتشغيل والمنتجات التجارية.

ويقتضي بناء سلسلة قيمة وطنية تحديد الحلقات التي تستطيع المملكة المنافسة فيها أو تحقيق قيمة اقتصادية واستراتيجية من خلالها. ولا يشترط ذلك تصنيع جميع مكونات المنظومة محليًا، بل تحديد المجالات التي تمثل أهمية سيادية أو فرصة سوقية أو ميزة تنافسية، وتوجيه الاستثمار والبحث والتطوير نحوها. ويساعد هذا النهج على الانتقال من نموذج شراء الحلول الجاهزة إلى نموذج يحتفظ بجزء أكبر من القيمة الاقتصادية والمعرفية داخل الاقتصاد الوطني.

كما أن توطين التقنية لا يتحقق بمجرد شراء الأجهزة أو استقطاب الشركات العالمية، بل بقدرة الفرق الوطنية على تشغيل التقنية وفهمها وصيانتها وتطوير تطبيقاتها وإنتاج معرفة جديدة انطلاقًا منها. ومن ثم، ينبغي ربط استيراد الأنظمة والتجهيزات والشراكات التقنية بمسارات واضحة لنقل المعرفة والتدريب والتأهيل والتطوير المحلي.

ويمكن أن تنشأ حول التقنية الكمية أنشطة اقتصادية جديدة تشمل تطوير البرمجيات والخوارزميات، والخدمات السحابية، والاستشارات، والأمن المرتبط بالتقنيات الكمية، وأجهزة الاستشعار، والتدريب والصيانة والتشغيل. ويؤكد ذلك أن بناء الاقتصاد الكمي لا يعتمد على نجاح مسار واحد، وإنما على تكوين منظومة متنوعة من الأنشطة والشركات والخدمات.

ويتمثل الهدف بعيد المدى في الانتقال التدريجي من استخدام التقنية إلى استيعابها، ثم توطين تطبيقاتها، ثم تطوير حلول ومنتجات وملكية فكرية وطنية يمكن توظيفها محليًا أو المنافسة بها في الأسواق الخارجية، بما يعزز القيمة المضافة الناتجة عن الاستثمار في هذا المجال.

- **التطبيقات الاقتصادية والقطاعية ذات الأولوية**

ينبغي توجيه جانب مهم من الجهود الكمية نحو المشكلات الفعلية للقطاعات ذات الوزن الاستراتيجي في الاقتصاد السعودي، مثل الطاقة والنفط والغاز والتعدين والصناعة والخدمات المالية والصحة والمياه والنقل والطيران والدفاع. ويساعد هذا التوجه على الانتقال من البحث عن تطبيقات للتقنية إلى تحديد مشكلات اقتصادية حقيقية يمكن للتقنيات الكمية الإسهام في معالجتها.

ويبرز الاستشعار الكمي بوصفه من المجالات الأقرب إلى الاستخدام التجاري مقارنة ببعض تطبيقات الحوسبة الكمية بعيدة المدى. ويمكن توظيف المستشعرات عالية الدقة في قياس المجالات المغناطيسية والجاذبية والتغيرات الدقيقة، بما يدعم التنقيب عن النفط والغاز والمعادن، ويسهم في تحسين القدرة على استكشاف التكوينات تحت سطح الأرض وتقليل بعض تكاليف عمليات الاستكشاف.

كما يمكن الاستفادة من الاستشعار الكمي في تطوير أنظمة الملاحة المستقلة أو المساندة التي لا تعتمد بصورة كاملة على أنظمة تحديد المواقع الفضائية، وهو ما يمنح هذه التطبيقات أهمية في النقل والطيران والدفاع. وتظهر كذلك تطبيقات صحية من خلال أجهزة قادرة على قياس المجالات المغناطيسية الدقيقة الناتجة عن نشاط الدماغ والقلب، بما في ذلك تقنيات تتيح بعض عمليات القياس أثناء الحركة. ويؤكد ذلك أن القيمة الاقتصادية الأقرب للتقنيات الكمية قد تظهر في الاستشعار والقياس قبل الوصول إلى حواسيب كمية واسعة النطاق.

وفي قطاع الطاقة والصناعة، تفتح التطورات المستقبلية في المحاكاة والحوسبة الكمية آفاقًا لتطوير البطاريات وتقنيات تخزين الطاقة، وتصميم المواد المتقدمة، وتحسين المحفزات الكيميائية، وتطوير الموصلات الفائقة، ودعم بعض تطبيقات خفض الانبعاثات وإعادة التدوير واقتصاد الكربون. كما يمكن أن تمتد التطبيقات مستقبلًا إلى اكتشاف الأدوية وفهم الأنظمة الجزيئية المعقدة.

وتعد محاكاة الكيمياء وعلوم المواد من المجالات الواعدة للحوسبة الكمية، نظرًا إلى الطبيعة الكمية للإلكترونات والروابط الجزيئية وصعوبة محاكاة بعض الأنظمة المعقدة بالحواسيب التقليدية. إلا أن محاكاة الجزيئات الصناعية المعقدة تتطلب قدرات أكبر بكثير من المتاح حاليًا، وترتبط بدرجة كبيرة بتطوير الحواسيب الكمية المقاومة للأخطاء. ولذلك ينبغي التعامل معها بوصفها رهانًا علميًا واستراتيجيًا طويل الأجل، وليس باعتبارها مصدرًا مضمونًا لعائد تجاري قريب.

كما ينبغي الفصل علميًا بين الكيمياء فائقة البرودة، التي تتعامل مع ذرات وجزيئات حقيقية عند درجات شديدة الانخفاض، وبين محاكاة الكيمياء باستخدام الحواسيب الكمية، لأنها مسألة حسابية مختلفة. ويؤثر هذا التمييز في طبيعة الاستثمار المطلوب، ونوع البنية التحتية، والمهارات اللازمة، والجدول الزمني المتوقع للعائد.

ومن ثم، ينبغي تصنيف التطبيقات وفق درجة نضجها إلى تطبيقات يمكن اختبارها أو الاستفادة منها في المدى القريب، وتطبيقات تحتاج إلى مزيد من التطوير، ورهانات علمية بعيدة المدى. ويساعد هذا التصنيف على توجيه الاستثمار بطريقة أكثر واقعية، ويحد من الخلط بين الإمكانات العلمية المستقبلية والفرص التجارية المتاحة في الوقت الحاضر.

- **الأمن السيبراني والقطاع المالي والاستعداد للمخاطر الكمية**

تتجاوز الآثار الاقتصادية للتقنية الكمية مجالات الإنتاج والتطبيق إلى المخاطر المحتملة التي قد تفرضها الحوسبة الكمية على أنظمة التشفير وحماية البيانات. ويكتسب ذلك أهمية خاصة في المؤسسات المالية والمصرفية والجهات الحكومية والقطاعات التي تعتمد على بيانات ومعاملات حساسة، بما يجعل الاستعداد للأمن في العصر الكمي جزءًا من التخطيط الاقتصادي والاستراتيجي.

ويستلزم ذلك بناء كوادر قادرة على فهم المخاطر المستقبلية ومتابعة التطورات المرتبطة بأنظمة التشفير الملائمة للعصر الكمي، إلى جانب تطوير خطط مؤسسية للانتقال التدريجي عندما يصبح ذلك ضروريًا. ولا يعني ذلك ضرورة تحويل العاملين في المؤسسات المالية إلى متخصصين في الفيزياء الكمية، وإنما تزويد كل فئة بالمستوى المعرفي الذي يسمح لها بفهم المخاطر المرتبطة بعملها واتخاذ القرارات المناسبة.

كما تبرز أهمية الاستعداد المبكر لأن تحديث الأنظمة الأمنية والبنية التقنية وتدريب القوى البشرية عمليات تحتاج إلى وقت، وقد يؤدي الانتظار حتى وصول التهديدات إلى مرحلة متقدمة إلى ارتفاع تكلفة التحول. ولذلك يمثل الأمن السيبراني مجالًا يمكن البدء في الاستعداد له قبل اكتمال النضج التجاري للحواسيب الكمية واسعة النطاق.

ويمثل القطاع المالي كذلك مجالًا محتملًا لتطبيقات الحوسبة والخوارزميات الكمية مستقبلًا، غير أن التعامل معه ينبغي أن يوازن بين فرص التطبيقات الجديدة من جهة، ومخاطر الأمن والتشفير من جهة أخرى، بحيث لا ينحصر تقييم أثر التقنية على القطاع في جانب الفرص الاقتصادية فقط.

- **ضبط المصطلحات والتوعية وصناعة القرار العلمي والاقتصادي**

تحتاج التقنية الكمية إلى خطاب علمي ومؤسسي واضح يحد من الالتباس في المفاهيم والمصطلحات، ولا سيما عند نقل المصطلحات الأجنبية إلى العربية. ويمكن أن يؤدي الخلط بين مفهوم QUANTUM وغيره من استخدامات مصطلح «الكمي» إلى سوء فهم لدى غير المتخصصين، كما أن استخدام أوصاف أو ترجمات غير دقيقة قد يغير الدلالة العلمية للمفهوم.

ومن هنا تبرز الحاجة إلى تطوير مرجعية عربية واضحة أو قاموس موحد للمصطلحات الكمية، وربط المصطلح العربي بأصله العلمي عند الحاجة، وتوحيد الاستخدام في التعليم والتقارير والسياسات والمواد الإعلامية. ولا يمثل ذلك قضية لغوية فقط، بل يسهم في تحسين التواصل بين العلماء وصناع القرار والمستثمرين والعاملين في القطاعات المختلفة.

ويرتبط بذلك نشر الوعي بالتقنيات الكمية وتبسيطها لصناع القرار والمستثمرين والطلاب والعاملين في القطاعات الاقتصادية والمجتمع. وينبغي أن يركز الخطاب التوعوي على بيان ما تستطيع التقنية القيام به في الوقت الحالي، وما يزال في نطاق البحث والتطوير، وما يتطلب تطورات علمية مستقبلية، مع توضيح التكلفة ودرجة النضج والمستفيدين المحتملين، بعيدًا عن المبالغة في تصوير القدرات أو تقديم التطبيقات المستقبلية بوصفها حلولًا متاحة بالفعل.

كما ينبغي تحقيق التكامل بين القرار العلمي والقرار الاقتصادي. فالتركيز على الجهاز والتطور الفيزيائي وحده قد يؤدي إلى إغفال أسئلة السوق والمستخدم والعائد الاقتصادي، بينما قد يؤدي التركيز على الربحية المباشرة إلى إهمال البحث الأساسي وبناء القدرات طويلة المدى. ومن ثم، تحتاج قرارات الاستثمار إلى مشاركة خبرات علمية وهندسية واقتصادية واستثمارية وقطاعية في عمليات التقييم وصناعة القرار.

ويقتضي ذلك طرح مجموعة من الأسئلة عند تقييم المشروعات، من بينها: مدى نضج التقنية، وإمكان استخدامها أو تسويقها، والجهة المستفيدة منها داخل المملكة، والمهارات اللازمة لتشغيلها، وتكلفة تطويرها وصيانتها، والبدائل التقنية المتاحة، ومدى قدرتها على توليد معرفة أو قيمة اقتصادية أو استراتيجية. ويسهم هذا النهج في تقليل الفجوة بين الخطاب العلمي ومتطلبات القرار الاقتصادي.



التقنية الكمية ورؤية 2030

والتحول نحو اقتصاد المعرفة والابتكار



يمكن النظر إلى التقنية الكمية في إطار التحول الأوسع الذي تستهدفه رؤية 2030 نحو اقتصاد أكثر تنوعا واعتماداً على المعرفة والابتكار والصناعات المتقدمة. وتنسجم تنمية القدرات الوطنية في هذا المجال مع مستهدفات تنمية رأس المال البشري، وتعزيز البحث والتطوير والابتكار، وتوطين التقنيات والصناعات المتقدمة، وتنويع القاعدة الإنتاجية، ورفع القدرة التنافسية للاقتصاد السعودي.

مسار متكامل للتنمية

ويقتضي ذلك بناء مسار مترابط يبدأ بالتعليم والبحث الأساسي، ويمر بالتدريب والبنية التحتية والتجريب والشراكات، وينتهي بالتطبيق والتوطين والتصنيع والاستثمار التجاري.

التعليم والبحث الأساسي ← التدريب والبنية التحتية ← التجريب والشراكات ← التطبيق والتوطين ← التصنيع والاستثمار التجاري

مؤشرات النجاح في الاستثمار

ولا ينبغي قياس نجاح الاستثمار في التقنية الكمية بعدد الأجهزة أو المختبرات أو المشروعات المعلنة فقط، وإنما بقدرته على تكوين معرفة وطنية وكفاءات متخصصة وملكية فكرية وشركات ومنتجات وخدمات وفرص عمل، وبمدى ارتباط البحث العلمي باحتياجات القطاعات الاقتصادية.

معرفة وطنية · كفاءات متخصصة · ملكية فكرية · شركات ومشاريع · منتجات وخدمات · فرص عمل

التدرج نحو الاستدامة

يتمثل المسار الأكثر استدامة في التدرج من الاستفادة من التقنيات المتاحة عالمياً إلى استيعابها وتشغيلها محلياً، ثم توطين تطبيقاتها ومعارفها، وتطويرها، ولتطوير مكوناتها وحلولها في المجالات ذات الأولوية، وصولاً إلى المنافسة فيها في المجالات التي يمكن أن تحقق فيها ميزة نوعية.

المنافسة وتحقيق الميزة النوعية ← التوطين وتطوير المكونات والحلول ← الاستيعاب والتشغيل محلياً ← الاستفادة من التقنيات العالمية

ويتيح هذا التدرج تحقيق التوازن بين الاستفادة من الخبرة العالمية وبين بناء الاستقلالية والقدرة الوطنية على المدى الطويل.

دعم التحول نحو اقتصاد المعرفة

يمكن للتقنيات الكمية أن تدعم التحول نحو اقتصاد المعرفة من خلال تعزيز العلاقة بين الجامعات ومراكز البحث والقطاعات الإنتاجية، وتحويل المعرفة العلمية المتقدمة إلى حلول للمشكلات الاقتصادية والصناعية.

أولويات وطنية رئيسية

التقنيات المتقدمة · الخدمات المالية · الصحة · الصناعة · التعدين · الطاقة

مما يجعل الاستثمار في المجال مرتبطاً بصورة مباشرة بمسار تنويع الاقتصاد.

قيمة استراتيجية لمستقبل المملكة



وبذلك لا يمثل الاستثمار في التقنية الكمية استجابة لموجة تقنية عالمية فحسب، وإنما يمكن أن يشكل أحد المسارات الداعمة لبناء قاعدة علمية وتقنية وصناعية متقدمة في المملكة، إذا ارتبط بأولويات اقتصادية واضحة، وبناء رأس المال البشري، والتوطين، ونقل المعرفة، وتحويل البحث والابتكار إلى قيمة اقتصادية. ومن هذا المنظور، تتحدد القيمة الاستراتيجية للتقنية الكمية في قدرتها على الإسهام في الانتقال من استهلاك التقنية إلى المشاركة في تطويرها وإنتاجها، وتعزيز موقع الاقتصاد السعودي في منظومة الاقتصاد العالمي القائم على المعرفة والابتكار.



○ خلاصة النقاش ومخرجاته

يبدو جليًا أن الأهمية الاستراتيجية للتقنية الكمية بالنسبة للاقتصاد السعودي لا ترتبط بامتلاك الحاسوب الكمي في حد ذاته، بقدر ارتباطها بالقدرة على تحديد المجالات التي يمكن أن تحقق فيها المملكة قيمة علمية واقتصادية وسيادية، وتحويل التطورات الكمية إلى قدرات وطنية قابلة للتوظيف في القطاعات ذات الأولوية. ويقتضي ذلك تبني نهج انتقائي ومتدرج يراعي تفاوت مستويات النضج بين الحوسبة الكمية والاستشعار والخوارزميات والتطبيقات المختلفة، ويميز بين الفرص القابلة للاستفادة في المدى القريب والرهانات البحثية التي تتطلب أفقًا زمنيًا أطول.

كما تبين أن الدخول الفاعل في الاقتصاد الكمي يستلزم وضوح التوجه الوطني وتحديد الأولويات قبل التوسع في الإنفاق على التجهيزات والمشروعات، بحيث ترتبط الاستثمارات باحتياجات الاقتصاد السعودي والميزة التي يمكن بناؤها في كل مسار. ويتطلب ذلك تقييم الجدوى بصورة تتجاوز العائد المالي المباشر لتشمل بناء المعرفة والكفاءات والأمن التقني والاستقلالية الاستراتيجية، مع مراعاة تكلفة الفرصة البديلة، والاستفادة من الدروس المستخلصة من تجارب الاستثمار السابقة في التقنيات الناشئة، وتطبيق حوكمة تضمن التنسيق بين الجهات وتحد من ازدواجية المشروعات وتشتت الموارد.

ويبرز رأس المال البشري بوصفه الأساس الأكثر استدامة لأي توجه وطني في هذا المجال؛ فامتلاك الأجهزة دون توافر القدرة المحلية على تشغيلها وفهمها وصيانتها وتطوير تطبيقاتها لا يحقق توطينًا حقيقيًا للتقنية. ومن ثم، تبرز الحاجة إلى بناء مسارات تعليمية وتدريبية مرنة تجمع بين الفيزياء والرياضيات والحاسب والهندسة والتخصصات التطبيقية، إلى جانب تطوير الخبرات التجريبية وإعادة تأهيل العاملين في القطاعات التي يمكن أن تتأثر بالتقنية الكمية. ويرتبط بذلك توفير بنية تحتية بحثية وتجريبية مشتركة تسمح بالاستفادة من التجهيزات المتقدمة في أكثر من مجال، بدل حصرها في مشروعات منفصلة أو استخدامات محدودة.

ويتطلب بناء القدرة الوطنية منظومة مترابطة تتجاوز حدود المؤسسات المنفردة، من خلال تكامل الجامعات ومراكز البحث والقطاع الخاص، وتعزيز الاستخدام المشترك للخبرات والمختبرات، وتوزيع الأدوار وفق نقاط القوة التخصصية. كما تمثل الشراكات الدولية وسيلة لتسريع اكتساب المعرفة والخبرة، شريطة ألا تقتصر على شراء الأجهزة أو الحلول الجاهزة، وإنما تقترن بالتدريب والبحث المشترك ونقل المعرفة وبناء قدرة محلية مستدامة. وفي هذا الإطار، يمكن للقطاع الخاص والشركات الناشئة أن يؤدي دورًا مهمًا في تحويل المخرجات العلمية إلى منتجات وخدمات وتطبيقات قابلة للاستخدام التجاري.

ويلاحظ كذلك أن الفرص الاقتصادية لا تقتصر على تصنيع الحواسيب الكمية، بل تمتد إلى سلسلة واسعة من الأنشطة تشمل البرمجيات والخوارزميات، وأجهزة الاستشعار، وأنظمة التحكم، والخدمات السحابية، والأمن السيبراني، والتدريب والصيانة والتطبيقات المتخصصة. ويتيح هذا الاتساع للمملكة اختيار حلقات محددة من سلسلة القيمة يمكن بناء ميزة تنافسية فيها، والانتقال تدريجيًا من استيراد التقنية إلى استيعابها وتطويعها، ثم تطوير حلول ومنتجات وملكية فكرية وطنية.

وفي الجانب التطبيقي، برزت أهمية توجيه الأولوية نحو المجالات المرتبطة باحتياجات القطاعات السعودية، وفي مقدمتها الطاقة والنفط والغاز والتعدين والصناعة والصحة والخدمات المالية والنقل والطيران والدفاع. ويعد الاستشعار الكمي من المسارات الأقرب إلى الاستخدام العملي، لما يتيحه من تطبيقات في الاستكشاف والقياس الدقيق والملاحة والتطبيقات الطبية، في حين تمثل تطبيقات الحوسبة الكمية في الكيمياء وعلوم المواد وتطوير البطاريات والأدوية والمحفزات والمواد المتقدمة فرصًا استراتيجية واعدة على المدى البعيد، ينبغي التعامل معها وفق مستوى نضجها الفعلي دون المبالغة في تقدير عوائدها القريبة.

كما تبرز ضرورة الاستعداد المبكر للآثار الأمنية المصاحبة للتطور الكمي، ولا سيما ما يتعلق بمستقبل التشفير وحماية البيانات والمعاملات في القطاعات المالية والحكومية والحساسة. ويقتضي ذلك بناء الوعي والقدرات المؤسسية والاستعداد التدريجي للتحولات المرتبطة بالأمن في العصر الكمي، بالتوازي مع تطوير لغة علمية ومؤسسية واضحة تضبط المصطلحات، وتفرق بين الإمكانات المتاحة حاليًا والتوقعات المستقبلية، بما يدعم اتخاذ قرارات استثمارية أكثر واقعية.

وبناءً على ما سبق، تتمثل أبرز المخرجات في أهمية بناء مسار وطني متدرج للتقنية الكمية يبدأ بتحديد المجالات ذات الأولوية، ويرتكز على الاستثمار في الإنسان والمعرفة والبنية التحتية المشتركة، ويعزز التكامل بين البحث والتطبيق والقطاع الخاص، ويوظف الشراكات الدولية في نقل المعرفة والتوطين، ويربط التمويل بمستوى النضج والعائد المتوقع. ويقود هذا المسار إلى الانتقال من استهلاك التقنية إلى امتلاك القدرة على تطويعها وتطويرها والمنافسة في بعض حلقات قيمتها، بما ينسجم مع مستهدفات رؤية 2030 في تنويع الاقتصاد، وتوطين التقنيات المتقدمة، وتعزيز البحث والابتكار، وبناء اقتصاد سعودي أكثر اعتمادًا على المعرفة والقدرات الوطنية.



التوصيات

1.إعداد استراتيجية وطنية متكاملة للحوسبة الكمية، تتضمن إنشاء لجنة وطنية متخصصة لتنسيق الجهود وتحديد الأولويات البحثية والتقنية والبشرية والتنظيمية والأمنية.

- الجهة المسؤولة: وزارة الاتصالات وتقنية المعلومات، وهيئة تنمية البحث والتطوير والابتكار، ومدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية، والهيئة الوطنية للأمن السيبراني.
- آلية التنفيذ: إعداد خارطة طريق وطنية بأهداف ومؤشرات أداء ومراحل زمنية محددة، وتشكيل لجنة وطنية لمتابعة تنفيذها وتنسيق المبادرات بين الجهات ذات العلاقة.

2.إنشاء مركز وطني متخصص لأبحاث وتقنيات الحوسبة الكمية، ودعم البنية التحتية البحثية والتعليمية وبرامج الدراسات العليا في الجامعات السعودية.

- الجهة المسؤولة: مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية، ووزارة التعليم، وهيئة تنمية البحث والتطوير والابتكار، والجامعات السعودية.
- آلية التنفيذ: إنشاء المركز وتجهيز المختبرات والمنصات البحثية، واستحداث برامج ومسارات للدراسات العليا، واستقطاب الكفاءات المتخصصة، وتمويل الأبحاث التطبيقية ذات الأولوية الوطنية.

3.بناء منظومة وطنية لتنمية القدرات البشرية ونشر المعرفة بالحوسبة الكمية، تبدأ من المرحلة الثانوية وتمتد إلى التعليم الجامعي والتخصصي.

- الجهة المسؤولة: وزارة التعليم، وهيئة تقويم التعليم والتدريب، وجامعة الملك فهد للبترول والمعادن، وجامعة الملك عبدالله للعلوم والتقنية (كاوست)، والجامعات السعودية عمومًا.
- آلية التنفيذ: إدراج موضوعات الحوسبة الكمية في المناهج ذات الصلة، وتطوير برامج أكاديمية وتدريبية متخصصة، وتأهيل الكفاءات الوطنية في المجالات الكمية.

4.إطلاق مبادرة وطنية لدعم تطبيقات وبرمجيات الحوسبة الكمية وتوظيفها في القطاعات ذات الأولوية، بما يعزز إسهامها في التنمية الوطنية.

- الجهة المسؤولة: برنامج التحول الوطني NTP، ووزارة الاتصالات وتقنية المعلومات، وهيئة تنمية البحث والتطوير والابتكار، وهيئة الحكومة الرقمية.
- آلية التنفيذ: تخصيص برامج تمويل وحوافز للبحوث والبرمجيات والتطبيقات الكمية، وإطلاق مشروعات تجريبية في القطاعات ذات الأولوية، وقياس آثارها الاقتصادية والتنموية وفرص تطويرها تجاريًا.

5.تعزيز الشراكات الوطنية والدولية في الحوسبة الكمية، بما يدعم نقل المعرفة والتقنية وتكامل الاستثمارات بين القطاعين الحكومي والخاص.

•الجهة المسؤولة: وزارة الاتصالات وتقنية المعلومات، ومدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية، وهيئة تنمية البحث والتطوير والابتكار، وجامعة الملك عبدالله للعلوم والتقنية (كاوست)، واتحاد الغرف السعودية.

•آلية التنفيذ: إنشاء منصة للشراكة بين القطاعين الحكومي والخاص، وإبرام اتفاقيات تعاون مع الدول والمؤسسات الدولية الرائدة، وتنفيذ مشروعات مشتركة وتبادل الباحثين والخبراء ودعم الفرص الاستثمارية.

6.إقامة مؤتمر وطني دوري متخصص في الحوسبة الكمية تحت شعار «نحو أبحاث حوسبة كمية لخدمة الإنسانية»، لمناقشة متطلبات النهوض بالتقنيات الكمية في المملكة وربط الخبرات العلمية بالأولويات الوطنية.

•الجهة المسؤولة: وزارة الاتصالات وتقنية المعلومات، ومدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية، والجامعات السعودية.

•آلية التنفيذ: تشكيل لجنة علمية وتنظيمية، واستقطاب الخبراء والمتخصصين محليًا ودوليًا، وتحديد القضايا ذات الأولوية، وتحويل مخرجات المؤتمر إلى مبادرات ومشروعات بحثية قابلة للتنفيذ.

7.إطلاق برنامج وطني للاستشعار الكمي، يركز على تطبيقات مقاييس الجاذبية للاستكشاف، والساعات الذرية، والملاحة المستقلة، بما يدعم تحقيق عوائد تطبيقية خلال ثلاث إلى خمس سنوات.

•الجهة المسؤولة: مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية (كاكست)، بالتعاون مع الجامعات، وبشراكات تطبيقية مع أرامكو والجهات الدفاعية وهيئة الاتصالات والفضاء والتقنية.

•آلية التنفيذ: تحديد التطبيقات ذات الأولوية، وتمويل مشروعات تجريبية مشتركة، وتطوير نماذج أولية واختبارها ميدانيًا، ثم التوسع في التطبيقات التي تثبت جدواها.

8.إعداد خارطة وطنية للانتقال إلى التشفير المقاوم للكم، تشمل الأصول والأنظمة التشفيرية في الجهات الحكومية والبنى التحتية الحيوية والقطاعات ذات الأولوية.

•الجهة المسؤولة: الهيئة الوطنية للأمن السيبراني، بالتنسيق مع الجهات الحكومية والقطاعات المشغلة للبنى التحتية الحيوية.

•آلية التنفيذ: إجراء جرد شامل للأصول التشفيرية، وتصنيفها بحسب مستوى المخاطر والأولوية، ووضع جدول زمني مرحلي لاستبدال الأنظمة الحالية بحلول مقاومة للكم، مع متابعة الالتزام بمتطلبات الانتقال.

9.إطلاق برنامج وطني لتوطين تصنيع مكوّنات الأنظمة الكمية، مع التركيز على تقنيات الفراغ الفائق، والأنظمة البصرية، ووحدات التحكم، بما يعزز انتقال المملكة من استهلاك التقنية إلى تطويرها.

•الجهة المسؤولة: وزارة الصناعة والثروة المعدنية، بالتعاون مع مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية (كاكست) والجامعات والقطاع الصناعي.

•آلية التنفيذ: تحديد المكوّنات ذات الأولوية للتوطين، ودعم مشروعات البحث والتطوير والتصنيع التجريبي، وتحفيز الشراكات ونقل التقنية مع الشركات المتخصصة، وصولًا إلى إنشاء قدرات إنتاج محلية قابلة للتوسع.

10. تعزيز الأمن الكمي والسيادة الرقمية من خلال تسريع الانتقال إلى التشفير المقاوم للكم، وتأمين سيادة الزمن والموقع، بما يضمن حماية البنية التحتية الحيوية ورفع جاهزيتها لمواجهة المخاطر الكمية المستقبلية.

•الجهة المسؤولة: الهيئة الوطنية للأمن السيبراني، بالتنسيق مع هيئة الاتصالات والفضاء والتقنية، ومدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية (كاكست)، والجهات المشغلة للبنى التحتية الحيوية.

•آلية التنفيذ: وضع متطلبات وطنية ملزمة وجدول زمني محدد للانتقال إلى التشفير المقاوم للكم، وتطوير حلول وطنية آمنة للتوقيت والملاحة وتحديد الموقع، مع إجراء اختبارات دورية لقياس جاهزية البنى التحتية الحيوية ومتابعة الالتزام بمتطلبات الأمن الكمي.



خاتمة



1 تمثل التقنية الكمية أحد المسارات التقنية التي يمكن أن تعيد تشكيل جوانب مهمة من الاقتصاد والأمن والقدرة التنافسية خلال السنوات المقبلة، بما تتيحة من إمكانات في الحوسبة والاستشعار والاتصالات والتوقيت والملاحة. وتنبع أهمبتها بالنسبة للمملكة العربية السعودية من ارتباط تطبيقاتها بعدد من القطاعات الحيوية، ومن قدرتها على دعم كفاءة العمليات، وتحسين اتخاذ القرار، وفتح مجالات جديدة للابتكار والتطوير التقني.



2 وتتطلب الاستفادة من هذه الإمكانات تبني رؤية متدرجة تراعى اختلاف مستويات نضج التقنيات الكمية، بحيث تتكامل التطبيقات القابلة للتوظيف في المدى القريب مع الاستثمارات البحثية والتطويرية بعيدة المدى. كما يظل تحقيق قيمة اقتصادية مستدامة مرتبطاً بقدرة المملكة على تطوير البرمجيات والخوارزميات والمهارات والمكونات المرتبطة بهذه التقنية، وعدم الاقتصار على اقتناء الأنظمة الجاهزة.



3 ويمتد الأثر المتوقع إلى تعزيز الأمن والسيادة التقنية، من خلال الاستعداد للتحولات التي قد تفرضها الحوسبة الكمية على منظومات التشفير، وتطوير قدرات وطنية في مجالات التوقيت والاستشعار والملاحة، وحماية البني التحتية الحيوية. ويتطلب ذلك رفع مستوى الجاهزية المؤسسية، وتنمية الكفاءات المتخصصة، وتوسيع الشراكات العلمية والصناعية، مع الحفاظ على تنوع الخبارات التقنية ومصادر التوريد



4 وفي ضوء ذلك، فإن تعظيم الأثر الاستراتيجي للتقنية الكمية في الاقتصاد السعودي يعتمد على تحويلها من مجال تقني ناشئ، إلى منظومة متكاملة للمعرفة والتطبيق، والاستثمار، تستند إلى أولويات وطنية واضحة ومؤشرات تقيس القيمة الفعلية المتحققة. ومن شأن بناء هذه المنظومة أن يعزز قدرة المملكة على استثمار الفرص الاقتصادية المستقبلية، وتطوير حلول محلية، والمشاركة بصورة أكثر فاعلية في الاقتصاد الكمي العالمي.



المصادر والمراجع

1- QUANTUM TECHNOLOGY MONITOR 2026

2- POST-QUANTUM CRYPTOGRAPHY | CSRC

3- HTTPS://WWW.MCKINSEY.COM/CAPABILITIES/MCKINSEY-TECHNOLOGY/OUR-INSIGHTS/MCKINSEY-QUANTUM-TECHNOLOGY-MONITOR-2026-A-COMMERCIAL-TIPPING-POINT

4-MT NEWSWIRES. (2026, OCTOBER 15). QUANTUM COMPUTING MARKET COULD GROW TO $100 BILLION-PLUS PER YEAR BY 2040, MORGAN STANLEY SAYS. YAHOO FINANCE. HTTPS://FINANCE.YAHOO.COM/TECHNOLOGY/AI/ARTICLES/QUANTUM-COMPUTING-MARKET-COULD-GROW-172749617.HTML

5-«عكاظ»، تغطية التعميم وتفصيل الإجراءات الأربعة ومواعيدها، 3 سبتمبر 2026.
OKAZ.COM.SA/ECONOMY/NA/2264171

6-MCKINSEY، QUANTUM TECHNOLOGY MONITOR 2026 مصدر تقدير 2.7 تريليون دولار كما أوردته الورقة.

7-13 NIST، FIPS 203/204/205، أغسطس 2024، وجدول 2030/2035 (CSRC).

8-QUANTUM COMPUTING REPORT، مواصفات المعالج (200 كيوبت، ذرات محايدة)، مايو 2026.
QUANTUMCOMPUTINGREPORT.COM

9- أحمد، أبو بكر سلطان. (2020). هذا ما سيتغير مع التحول من الحوسبة التقليدية إلى الحوسبة الكمومية. مجلة القافلة، 69(3)، 81-88.

10- أحمد، فرج أحمد وسالم، زينب محمد هشام. (2022). تقنيات الذكاء الاصطناعي وتأثيراتها على فاعلية محتوى وخدمات مؤسسات المعلومات: دراسة استشرافية. المجلة العربية الدولية لدراسات المكتبات والمعلومات، 1(3)، 27-70.

11-أرامكو وباسكال، بيان إطلاق أول حاسوب كمي في المملكة ومنصة QCAAS، الظهران، 18 مايو 2026. HPCWIRE.COM/OFF-THE-WIRE

12-الأمران التنفيذيان الأمريكيان: SECURING AGAINST ADVANCEDو QUANTUM INNOVATION CRYPTOGRAPHIC ATTACKS، 22 يونيو 2026؛ وتحليل SIDLEY AUSTIN. DATAMATTERS.SIDLEY.COM/2026/07/01؛ NEXTGOV/FCW، تغطية توقيع الأمرين التنفيذيين، 22 يونيو 2026. NEXTGOV.COM/EMERGING-TECH/2026/06

13- أمين، رحاب عادل صلاح الدين. (2024). الحوسبة الكمومية ودورها في التعليم: دراسة استشرافية تجريبية باستخدام CHAT GPT. مجلة الاقتصاد الإسلامي العالمية، (140)، 83–88.

14-البنك المركزي السعودي، تعميم «رفع مستوى المتانة التشغيلية لمواجهة مخاطر الحوسبة الكمية»، 27 أغسطس 2026. RULEBOOK.SAMA.GOV.SA

15- بيان، فياض محمد هاني. (2024). لمحة عن مستقبل الحوسبة الكمومية والذكاء الاصطناعي. مجلة العلوم الهندسية وتكنولوجيا المعلومات، 4(8)، 1-20.

16- سليم، عماد علي مصطفى، وزيدان، إسراء سعدي محمد. (2024). مدخل مقترح لاستخدام الحوسبة الكمية في إدارة مخاطر تغيرات أسعار الصرف. المجلة العلمية للدراسات والبحوث المالية والإدارية، 16(عدد خاص)، 841-854.

17- الشوفي، جمال. (2020). الحوسبة الكمومية: المفاهيم الأساسية والدارات المنطقية الكمومية. المجلة العربية للبحث العلمي: مجلة أجسر، 1(1)، 1-8.

18- الطراونة، أشرف ياسين. (2025). الحوسبة الكمومية: الثورة القادمة في البيانات والتكنولوجيا: دراسة تحليلية استراتيجية في سياق التحول الرقمي الوطني في المملكة العربية السعودية. مجلة ريحان للنشر العلمي، 2(60)، 64-99.

19-الطراونة، أشرف ياسين. (2025). الحوسبة الكمومية: الثورة القادمة في البيانات والتكنولوجيا: دراسة تحليلية استراتيجية في سياق التحول الرقمي الوطني في المملكة العربية السعودية. مجلة ريحان للنشر العلمي، (60)، 64-99.

المشاركون

- **الورقة الرئيسة:** د. ريم طيبة
- **التعقيب الأول:** د. سعد العويد
- **التعقيب الثاني:** د. سمية مدخلي
- **التعقيب الثالث:** د. خلود المطيري
- **إدارة الحوار:** د. عبدالرحمن العريني

المشاركون بالحوار والمناقشة*:

-د. أماني البريكان
-د. حمد البريثن
-د. خالد الرديعان
-د. زياد الحقيل
-د. سعيد مزهر
-الفريق د. عبدالإله الصالح
-م. عبدالله الرخيص
-أ. د. فيصل المبارك

*ترتيب الأسماء حسب الحروف الأبجدية



ملتـقى أسبـار

Asbar Council

(نادي تفكير)

تأسس الملتقى في 28 يونيو 2015م

@MultaqaAsbar

@Multaqa_Asbar

https://cutt.us/U0nnC

00966114624229

www.asbar.com