الترميز الدولي / ISSN (P) :2710-2653
ISSN (E) :2960-253X /
رقم الايداع الوطني / 2375 /2019

تاريخ استلام البحث : ٢٠٢٦/٣/٢٣
تاريخ قبول البحث : ٢٠٢٦/٥/١٠
تاريخ النشـــــــــر: ٢٠٢٦/٦/٣٠

سياسات دعم الابتكار في إيران وأثرها في إعادة تشكيل القدرات الاستراتيجية (تقنية النانو دراسة حالة)

Innovation Support Policies in Iran and Their Impact on the Reshaping of Strategic Capabilities (Nanotechnology as a Case Study)

م.د. علي احمد عبد مرزوك
Dr. Ali Ahmed Abed Marzook
ديوان الوقف السني
Sunni Endowment Diwan
ali_almarzook@outlook.com

IRAQI
Academic Scientific Journals
https://iasj.rdd.eedu.iq/journals/journal/view/229

سياسات دعم الابتكار في إيران وأثرها في إعادة تشكيل القدرات الاستراتيجية (تقنية النانو دراسة حالة)

م.د. علي احمد عبد مرزوك

الملخص

دفعت تقنية النانو سياسات الابتكار والتكنولوجيا في إيران نحو بناء مسار مؤسسي وتنظيمي اتصل بإعادة تشكيل بعض القدرات الاستراتيجية داخل قطاعات الصحة والطاقة والصناعة والمياه والبيئة، ويعالج البحث أثر هذه السياسات من خلال تحليل العلاقة بين السياسة العامة ونظام الابتكار الوطني وآليات تحويل المعرفة النانوية إلى منتجات وشركات ومعايير وتطبيقات ذات أثر قطاعي، ويتتبع البحث تطور البرنامج النانوي الإيراني منذ تأسيس المجلس الإيراني لتطوير تقنيات النانو والميكرو عام ٢٠٠٣، الخطط الوطنية المتعاقبة التي نظمت هذا المجال عبر أدوات التخطيط والتمويل والتنظيم والتحفيز والتحويل التجاري، ويعتمد البحث المنهج الاستقرائي، ومدخل دراسة الحالة، وتتبع المسار مع تحليل دور المؤسسات الوسيطة والمختبرات والمعايير والشركات في ربط البحث العلمي بالصناعة والسوق، وتبين الدراسة أن السياسة النانوية الإيرانية أنتجت قدرات استراتيجية جزئية ومتدرجة ظهر أثرها في الصحة عبر النانوأدوية والتطبيقات التشخيصية، وفي الطاقة والصناعة عبر المحفزات والطلاءات والمواد المركبة، وفي المياه والبيئة عبر تطبيقات المعالجة والامتزاز والفقاعات النانوية، كما يوضح البحث أن العقوبات والقيود الخارجية أسهمت في دفع السياسة الإيرانية نحو التوطين وبناء مرونة ابتكارية قائمة على تعظيم الموارد الداخلية، وينتهي البحث إلى أن النانو الإيراني يمثل قدرة قطاعية قابلة للتراكم مع ارتباط اكتمالها الاستراتيجي بدرجة اندماجها داخل السياسات الوطنية وسلاسل القيمة الحيوية.

الكلمات المفتاحية: سياسات دعم الابتكار، تقنية النانو، إيران، القدرات الاستراتيجية، نظام الابتكار الوطني.

Abstract

This study examines the impact of Iran's innovation and technology support policies on reshaping strategic capabilities through nanotechnology. It analyzes the relationship between public policy, technological knowledge, and capability-building by tracing Iran's nanotechnology program since the establishment of the Iran Nanotechnology Innovation Council in 2003 and the adoption of successive national plans. The study employs the inductive approach, case study method, and process tracing to assess the role of institutions, laboratories, standards, intermediary bodies, and firms in linking scientific research to industry and markets. The findings show that Iranian nanotechnology policies produced partial and gradual strategic capabilities. These appeared in health through therapeutic and diagnostic products, in energy and industry through catalysts, coatings, and composite materials, and in water and environment through adsorption, treatment, and nanobubble applications. The study concludes that Iranian nanotechnology represents an accumulative sectoral capability shaped under external constraints.

Keywords: Innovation Policy, Nanotechnology, Iran, Strategic Capabilities, National Innovation System.

المقدمة

تبوأت التقنيات الصاعدة مثل (الذكاء الاصطناعي، وتكنولوجيا النانو، والتقانات الحيوية، والحوسبة الكمية، وإنترنت الأشياء) موقعاً متقدماً في دراسات السياسات العامة خلال العقدين الأخيرين، بفعل أثرها المتزايد في إعادة تشكيل البنية الإنتاجية والتنموية للدولة، وقد دفع هذا التحول الدول إلى التعامل مع هذه التقنيات باعتبارها حقولاً استراتيجية تستدعي سياسات بحث وتطوير وأطر حوكمة وتنظيم وبرامج تمويل وشراكات فاعلة بين الدولة والقطاع الخاص والمؤسسات العلمية، ومن ثم أخذت السياسات العامة تتجه نحو إدارة المعرفة العلمية وتنظيم تطبيقاتها وربطها بمسارات التنمية والاقتصاد والإنتاج حتى غدا اقتصاد المعرفة أحد مكونات القدرة الوطنية ومجالاً من مجالات التنمية والتدبير الاستراتيجي للدولة، واتسع الاهتمام مع التطور المتسارع في الحقول التقنية الدقيقة وفي مقدمتها تكنولوجيا النانو إذ أخذ النانو موقعاً متقدماً بين التقنيات التمكينية بحكم قدرته على تطوير خصائص المواد ورفع كفاءة استخدامها في قطاعات متعددة، حتى غدا مجالاً مؤثراً في الصناعات المتقدمة والصحة والطاقة والمياه وغيرها من الصناعات، ورافداً مهماً لموازنات الدول وتطور اقتصاداتها وتعزيز قدرتها التنافسية.

وجدت الدول في تقنية النانو مجالاً كاشفاً لقدرة السياسة العامة على نقل المعرفة المتقدمة من حيز التراكم العلمي إلى فضاء التمكين الإنتاجي والصناعي، لذلك أخذت هذه التقنية موقعها داخل خطط الابتكار والتكنولوجيا بوصفها أداة لبناء القدرة لا مجرد مظهر من مظاهر التقدم العلمي، وقد بدا هذا التوجه أكثر وضوحاً في نماذج الدول المتقدمة التي تعاملت مع النانو كحقل منتج لإعادة تنظيم العلاقة بين البحث والتطوير والصناعة والقدرة الاستراتيجية، وقد بدا هذا التوجه في نماذج الدول الصناعية الكبرى قبل أن يتسع إلى الدول الصاعدة. ففي الولايات المتحدة الأمريكية مثّلت "المبادرة الوطنية لتكنولوجيا النانو – NNI" إطاراً اتحادياً لتنسيق البحث والتطوير بين الوزارات والوكالات والهيئات الاتحادية، وربط البنية البحثية المشتركة بالأولويات الوطنية لهذا المجال، وفي اليابان اتجهت "وزارة التعليم والثقافة والرياضة والعلوم والتكنولوجيا – MEXT" إلى ترسيخ تقنية النانو وعلوم المواد ضمن التقنيات الأساسية الداعمة للتنافسية الصناعية ومجتمع المستقبل، أما ألمانيا فقد منحت السياسة النانوية طابعاً تنسيقياً عابراً للوزارات، بدأ بخطط عمل دورية منذ عام ٢٠٠٦، ثم تبلور في "خطة عمل تكنولوجيا النانو ٢٠٢٠" التي جمعت البحث والتعليم والاقتصاد والسياسة والمجتمع داخل مقاربة وطنية واحدة.

ومن هذا المسار المؤسسي في الدول الصناعية، انتقل التنافس النانوي إلى فضاء أوسع دخلت فيه الدول الصاعدة بوصفها فاعلاً علمياً وتنموياً، ووفق تقرير StatNano عن منشورات تكنولوجيا النانو لعام ٢٠٢٤ تجاوز عدد المقالات النانوية المفهرسة في Web of Science حاجز ٢٥٦ ألف مقالة، وتصدرت الصين المشهد بنسبة تقارب ٤٦٪ من الإنتاج العالمي، تلتها الهند في المرتبة الثانية، ثم الولايات المتحدة

في المرتبة الثالثة، وكوريا الجنوبية في المرتبة الرابعة، ويكشف هذا الترتيب أن مركز الثقل البحثي في النانو لم يعد محصوراً في الغرب الصناعي، فقد برزت دول مثل إيران والسعودية ومصر ضمن الحضور البحثي النانوي مع دلالة خاصة لحالتي إيران والسعودية بسبب ارتفاع حصة النانو داخل إنتاجهما العلمي العام.

ومن بين هذه التجارب يتخصص بحثنا في دراسة الجمهورية الإسلامية الإيرانية بوصفها حالة مناسبة لقراءة صلة السياسة العامة ببناء القدرة التكنولوجية، فقد تشكّل برنامج النانو الإيراني داخل مسار أوسع في سياسة العلم والتكنولوجيا والابتكار، ثم أخذ صورته المؤسسية عبر المجلس الإيراني لتطوير تقنيات النانو والميكرو (INIC) عام ٢٠٠٣، لتبدأ معه صيرورة تخطيطية متعاقبة جعلت هذا المجال جزءاً من هندسة وطنية للمعرفة والتصنيع والسوق، وتعرض "ستات نانو– شركات ناشئة تعمل ضمن منظومات الابتكار النانوي والتحويل التقني" وثائق السياسة الإيرانية بوصفها سلسلة وطنية ممتدة تضم الخطة الأولى للأعوام ٢٠٠٥–٢٠١٥، والخطة الثانية للأعوام ٢٠١٦–٢٠٢٥، والخطة الثالثة للأعوام ٢٠٢٣–٢٠٣٥، بما جعل النانو في إيران مشروعاً ممتداً في الزمن ومتدرجاً في أدواته ومفتوحاً على قطاعات متعددة وقادراً على تحويل المعرفة من مورد علمي إلى مسار مؤسسي ذي قابلية تطبيقية.

وعلى هذا يتخصص بحثنا في تحليل سياسات دعم الابتكار والتكنولوجيا في إيران من خلال تقنية النانو بوصفها مجالاً تطبيقياً كاشفاً لطبيعة اشتغال الدولة في بناء القدرة تحت ضغط القيود الخارجية، عبر تتبع الأدوار التي أدتها الخطط الوطنية والمجلس الإيراني لتطوير تقنيات النانو والميكرو والمؤسسات الوسيطة وأدوات التمويل والتنظيم والتحفيز في تنظيم المعرفة وتوسيع قاعدتها البشرية وربطها بالتصنيع والتسويق والتصدير، وبهذا يقرأ البحث النانو الإيراني بوصفه سياسة ابتكار ومشروع بلوغ قدرة استراتيجية في آن واحد، تتجسد آثاره في قطاعات الصحة والطاقة والمياه والمواد المتقدمة وتتكشف عبره قدرة السياسة العامة على تحويل المعرفة العلمية إلى مورد وطني ذي أثر اقتصادي وصناعي واستراتيجي.

أهمية البحث : تنبع أهمية البحث من نقل النانو من حدوده التقنية الضيقة إلى مجاله أوسع داخل سياسات دعم الابتكار، حيث تغدو السياسة العامة بأدواتها ومؤسساتها وآليات التحويل فيها المدخل الأقدر على فهم مسار التقنية وهي تنتقل من المعرفة إلى القدرة ومن البحث إلى التطبيق ومن المختبر إلى المجال الصناعي، بما يسمح باستجلاء الديناميات التي تعيد عبرها الدولة الصاعدة تنظيم مواردها العلمية والصناعية داخل نظام ابتكار وطني تتشابك فيه عمليات التخطيط، والتمويل، والتنظيم، والتحفيز، والوساطة المؤسسية، والسوق، والقطاع الصناعي. كما تتصل أهمية البحث بخصوصية الحالة الإيرانية بوصفها تجربة دولة صاعدة شيدت برنامجاً نانوياً داخل بيئة دولية ضاغطة، وراكمت مخرجات علمية وصناعية وتجارية في ظل حساسية عالية لقضايا التمويل، والتعاون الدولي، والوصول إلى المعدات، والأسواق.

وعلى مقتضى هذه الحيثيات يكتسب البحث قيمته التطبيقية من استجلاء الديناميات التي تتشكل بها قدرات استراتيجية جزئية في قطاعات الصحة والطاقة والمياه والمواد المتقدمة، عبر سياسات عامة تتداخل فيها آليات التوجيه المؤسسي، وتوطين المعرفة، وتوسيع القاعدة البشرية، وتحريك القطاع الخاص، وبناء منصات وسيطة تصل البحث بالصناعة.

وعلى وفق هذا المقترب يتجه البحث إلى قراءة النانو بوصفه مشروع قدرة وتجربة سياسة ومجالاً لاختبار فاعلية الدولة في إدارة الصلة بين القيد الخارجي والبناء الداخلي وتحويل الابتكار إلى مورد استراتيجي داخل مسار التنمية.

إشكالية البحث : تتحرك تقنية النانو في البيئة الدولية المعاصرة خارج حدودها التقنية التقليدية بعد أن أصبحت جزءاً من بنية القوة المرتبطة بسياسات العلم والتكنولوجيا والابتكار، ومجالاً تتقاطع داخله القدرة العلمية مع الصناعة والسياسة والاقتصاد والأمن والتنمية، وفي هذا الامتداد برزت التجربة الإيرانية بوصفها حالة لافتة داخل الدول الصاعدة نتيجة انتقالها بالنانو من مستوى المشروع البحثي إلى مستوى السياسة العامة المنظمة للإنتاج المعرفي والتحويل الصناعي والتوسع القطاعي، عبر منظومة مؤسسات وخطط وتمويل وأدوات تحفيز ومراكز وساطة وشبكات ابتكار امتدت داخل قطاعات الصحة والطاقة والمواد المتقدمة والمياه والبيئة، ومع اتساع هذا المسار ظهرت إشكالية تتعلق بطبيعة العلاقة بين سياسات دعم الابتكار والتكنولوجيا وبين إعادة تشكيل القدرات الاستراتيجية للدولة، ولاسيما في البيئات المقيدة بالعقوبات والضغوط الخارجية، فالتقدم الكمي في النشر العلمي أو عدد الشركات والمنتجات لا يكفي وحده لتفسير التحول في بنية القدرة كما أن امتلاك المعرفة التقنية لا يقود تلقائياً إلى بناء قدرة استراتيجية مستقرة ما لم يرتبط بمنظومة تحويل قادرة على وصل المختبر بالصناعة والسوق والدولة.

ومن هنا تتمثل إشكالية الدراسة في بحث الدور الذي أدته سياسات دعم الابتكار والتكنولوجيا في إيران في تحويل تقنية النانو من حقل معرفي إلى مورد استراتيجي داخل بنية الدولة، والكشف عن حدود قدرة النظام الوطني للابتكار على إعادة تنظيم الموارد العلمية والصناعية ضمن مسار يربط المعرفة بالإنتاج والابتكار بالقدرة والتنمية بالسيادة التقنية.

فرضية البحث: ينطلق البحث من فرضية مفادها أن سياسات دعم الابتكار والتكنولوجيا في إيران من خلال نموذج تقنية النانو أسهمت في إعادة تشكيل القدرات الإيرانية بصورة جزئية وقطاعية ومتدرجة، وذلك عبر تحويل المعرفة النانوية من رصيد علمي وبحثي إلى منتجات وشركات ومعايير وتطبيقات ذات أثر في قطاعات الصحة والطاقة والصناعة والمياه والبيئة، غير أن هذه السياسات لم تثمر أثراً استراتيجياً شاملاً بقدر ما أنتجت أثراً قطاعياً محدداً، ارتبط بدرجة فاعلية سياسات دعم الابتكار والتحديات التي رافقتها، بما جعل النانو الإيراني ينتقل من مجال علمي متخصص إلى أداة من أدوات بناء القدرة داخل

قطاعات مختارة، وتبعاً لذلك بلغت السياسة النانوية الإيرانية مستوى القدرة الاستراتيجية الجزئية، إذ أنتجت أثراً علاجياً وتشخيصياً في القطاع الصحي، وأثراً تشغيلياً وصناعياً في قطاعات الطاقة والبتروكيمياويات والمواد المتقدمة، وأثراً مائياً وبيئياً أولياً في مجالات المعالجة والامتزاز والزراعة، وبقي هذا الأثر متدرجاً في مداه تبعاً لاختلاف نضج السوق وحجم الشركات وكفاءة التحويل التجاري ودرجة إدماج المنتجات النانوية داخل السياسات القطاعية الوطنية.

مناهج البحث: يعتمد البحث المنهج الاستقرائي ومدخل دراسة الحالة لتحليل السياسة النانوية الإيرانية بوصفها حالة تطبيقية داخل حقل سياسات العلم والتكنولوجيا والابتكار، كما يستعين بتتبع المسار لتحليل الآليات التي انتقلت عبرها السياسة العامة من التخطيط الوطني إلى بناء المؤسسات والشركات والتطبيقات القطاعية، ويستند الإطار التحليلي إلى مقاربة نظام الابتكار الوطني لفهم البنية المؤسسية للابتكار مع الإفادة من السياسات الابتكارية الموجهة بالمهمة في تفسير دور الدولة ومزيج أدوات السياسة العامة في تحليل أدوات الدعم والتنظيم والتحفيز.

الدراسات السابقة : تحتل دراسة (Ghazinoory, Mirzaei, and Ghazinoori) موقعاً تأسيسياً في تحليل التخطيط الوطني للمجالات العلمية والتكنولوجية إذ قدمت نموذجاً تفسيرياً يقوم على تركيب ثلاثة أدوار حكومية مترابطة: إنتاج الذكاء السياساتي، وصنع القرار، والتنفيذ، مقرونة بأربع أدوات للسياسة العامة هي: التدخل المباشر، والتنظيم، والحوافز، والترويج، وتستمد هذه الدراسة قيمتها المباشرة من اتخاذها المبادرة الوطنية الإيرانية للنانو حالة تطبيقية ومن قدرتها على ربط التخطيط الوطني بأدوات السياسة العامة، بما يجعلها مدخلاً مهماً لفهم هندسة التدخل الحكومي في بناء الحقول التكنولوجية الصاعدة[١]، وتفتح هذه المقاربة أفقاً بحثياً يتعلق بالأثر الاستراتيجي اللاحق لمرحلة التخطيط فهي تمنح البحث أساساً لفهم بنية السياسة وتفسح المجال أمام مقاربة أوسع تربط تلك البنية بالتحول القطاعي في الصحة والطاقة والمياه، ومن هنا يأتي البحث الحالي لتوسيع هذا النموذج عبر إدخال مفهوم القدرات الاستراتيجية، والعقوبات بوصفها متغيراً معدّلاً لمسار السياسة، والانتشار القطاعي بوصفه حلقة قياس بين أدوات الدعم ومخرجات القدرة.

وتنتقل دراسة (Soltani, Tabatabaeian, Hanafizadeh, and Bamdadsoofi) إلى مستوى آخر من تحليل التجربة الإيرانية من خلال بناء نموذج لتقييم الخطة الوطنية للنانو على مستويي السياسة والبرنامج وقدمت الدراسة إطاراً زمنياً ومعيارياً يتضمن (٤٦) مؤشراً موزعة على الملاءمة والكفاءة والفاعلية، بما يمنح تقييم سياسة النانو لغة قياس قادرة على التمييز بين النشاط، والمخرج، والنتيجة، والأثر[٢]، وتتضح أهمية هذه الدراسة في نقل الاهتمام من رصد الأنشطة المفردة إلى قياس النتائج القابلة للتحقق، الأمر الذي يخدم البحث الحالي في بناء الفاصل التحليلي بين المخرجات العلمية، والتحويل الصناعي، والقدرة

الاستراتيجية، وتستثمر الدراسة الحالية هذا الجهد القياسي في اتجاه تفسيري أوسع يربط المؤشرات بسياقها المؤسسي والجيوسياسي ويقرأ الأثر بوصفه حصيلة لتفاعل السياسات، والوسطاء المؤسسيين، والأسواق، والقطاعات الحيوية.

وتقارب دراسة (Nikraftar, Hosseini, and Mohammadi) التجربة من زاوية ريادة الأعمال التكنولوجية داخل شركات النانو الإيرانية معتمدةً منهجاً مختلطاً جمع بين مقابلات الخبراء والمديرين واستبانة موجهة إلى مديري الشركات النانوية، وقد خلصت الدراسة إلى تصنيف العوامل المؤثرة في نجاح ريادة الأعمال التكنولوجية ضمن خمس فئات: تنظيمية، وبيئية، ومؤسسية، وفردية، وتكنولوجية، مع إبراز أثر البعدين التنظيمي والبيئي في إنجاح الشركات النانوية[٣]، وتمنح هذه الدراسة قيمة تحليلية على مستوى الشركة بوصفه مجالاً تطبيقياً لفهم انتقال المعرفة من المختبر إلى السوق؛ في حين تعمل الدراسة الحالية على إدماج هذا المستوى ضمن نسق أوسع هو مستوى السياسة العامة ونظام الابتكار الوطني، وبهذا تتحول ريادة الأعمال التكنولوجية من متغير خاص بالشركات إلى حلقة وسيطة بين سياسة الدعم والقدرة الاستراتيجية، حيث تصبح الشركات النانوية جزءاً من آلية التحويل التي تربط البحث العلمي بالمنتج، والسوق، والقطاع الاستراتيجي.

تتبدى الفجوة العلمية التي يعالجها هذا البحث في توزع الأدبيات الخاصة بالنانو الإيراني على ثلاث مسارات تحليلية متجاورة: مسار أول انشغل بالتخطيط الوطني للنانو من زاوية أدوار الحكومة وأدواتها، ومسار ثانٍ اتجه إلى مؤشرات التقييم وقياس المخرجات، ومسار ثالث تناول ريادة الأعمال والمؤسسات الوسيطة داخل شركات النانو، ويكشف هذا التوزع عن حاجة معرفية إلى تركيب نموذج تحليلي قادر على وصل سياسات الدعم بآليات التنفيذ، وربط التحويل التجاري ببناء القدرات الاستراتيجية ضمن نسق واحد تتفاعل فيه الدولة، والمؤسسة، والسوق، والقطاع الحيوي.

وعلى مقتضى ذلك تتمثل الإضافة العلمية للبحث الحالي في جمع هذه المستويات داخل مقاربة تحليلية واحدة تقرأ النانوتكنولوجي بوصفه مجالاً كاشفاً لتفاعل السياسة العامة مع نظام الابتكار الوطني ومساراً تتحول عبره المعرفة من مورد علمي إلى قدرة قطاعية ذات أثر في الصحة والطاقة والمياه بما يجعل التجربة الإيرانية مدخلاً مناسباً لفهم الديناميكية التي تنتج بها سياسات الابتكار قدرة استراتيجية جزئية داخل بيئة دولية ضاغطة ومفتوحة على التنافس.

هيكلية البحث: تتوزع هيكلية البحث على ثلاثة محاور، يتناول الأول المقتربات النظرية لسياسات الابتكار وتقنية النانو والقدرات الاستراتيجية، ويعالج الثاني مسار السياسات النانوية الإيرانية وبنيتها المؤسسية وتحدياتها الداخلية والخارجية، فيما ينصرف الثالث إلى قياس أثر هذه السياسات في بناء قدرات قطاعية داخل مجالات الصحة والطاقة والصناعة والمياه والبيئة.

□

أولا: سياسات الابتكار وتكنولوجيا النانو والقدرات الاستراتيجية: مقتربات نظرية معاصرة

تداخلت سياسات الابتكار والتكنولوجيا في العقود الأخيرة مع سؤال القدرة والتنمية والتنافس، بعد أن انتقلت المعرفة من مجالها البحثي المحدود إلى موقعها الفاعل في بناء الدولة وتنظيم مواردها وتوجيه خياراتها الإنتاجية، وجاءت تقنية النانو ضمن هذا المسار باعتبارها حقلاً كاشفاً لطبيعة الصلة بين العلم والسياسة والقدرة، لما تتيحه من إمكانات تحويلية تمتد إلى الصناعة والصحة والطاقة والبيئة والمياه، ومن هنا يتجه هذا المحور إلى ضبط المفاهيم المؤسسة لهذا التداخل وبيان مسارات اشتغالها ضمن ثلاثة موضوعات رئيسة هي:

١. مفهوم سياسات دعم الابتكار

ارتبط صعود الابتكار في الدولة الحديثة بإدراك سياسي أخذ يتبلور مع التحولات الكبرى التي رافقت الحرب العالمية الثانية وما أعقبها من تقدم صناعي وتقني واسع، إذ دخلت المعرفة العلمية في السياسات العامة وغدت المؤسسات العلمية جزءاً من بنية القدرة الوطنية وأخذت الدولة تنظم العلاقة بين العلماء والجامعات والقطاع الصناعي داخل برامج ممولة وموجهة بسياسات مدروسة، بما يحقق قدراً أعلى من الانسجام بين البحث العلمي والحاجات الاستراتيجية والتنموية، قبل أن يتعزز هذا المسار مع الثورة الصناعية الرابعة وما فرضته من تسارع في التقنيات الرقمية والذكية وتداخل أعمق بين المعرفة والإنتاج والتفوق التقني[٤]، وعلى مقتضى هذا الإدراك تبلورت رؤية جديدة لمكانة العلم داخل الدولة، حيث غدت الجامعات فضاءات لإنتاج معرفة ذات قابلية تطبيقية وأخذ التمويل العام يؤدي وظيفة تتجاوز الإسناد المالي نحو توجيه الأولويات العلمية وربطها بالمجال الصناعي والاقتصادي، وقد عبّر التقرير الموسوم "العلم: الأفق اللامتناهي" الذي قدمه "فانيفار بوش – Vannevar Bush" عن هذا التصور بصورة مبكرة حين ربط الخبرة البحثية المتراكمة في زمن الحرب بالحاجة إلى تنظيم المجال العلمي في مرحلة السلم، عبر تأسيس جهاز وطني يتولى تمويل البحث الأساسي، وتنسيق الجهود العلمية، وصياغة سياسة وطنية للعلوم، بما يجعل المعرفة جزءاً من التدبير الاستراتيجي للدولة ورافعة من روافع قدرتها[٥].

ومع تصاعد الاقتصاد المعرفي أخذ الابتكار يتموضع داخل شبكة واسعة من التفاعلات المؤسسية والتنظيمية، حيث تتقاطع الجامعات، ومراكز البحث، والقطاع الخاص، والمؤسسات الحكومية، ضمن بيئة تتشارك في إنتاج المعرفة وتوجيهها وتوسيع أثرها الاقتصادي والصناعي، وانسجاماً مع هذا التصور اكتسبت سياسات الابتكار حضوراً متزايداً داخل الأدبيات منذ منتصف تسعينيات القرن العشرين ثم اتسع هذا الحضور بعد الأزمة المالية العالمية عام ٢٠٠٨، مع تنامي الإدراك المتصل بمكانة الابتكار في تعزيز القدرة التنافسية وتحريك النمو والإنتاجية، وقد ميزت هذه الأدبيات بين مقاربة تقترب من السياسات المباشرة المؤثرة في الابتكار، ومقاربة أوسع تتصل بمجمل السياسات التي تصوغ البيئة العامة للابتكار وتحدد شروط اشتغالها واتجاهاتها[٦].

وعلى هدي هذا التوسع تتعامل منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية (OECD) مع الابتكار بوصفه عملية إبداعية وتفاعلية تقوم على تدفقات المعرفة وتشابك الفواعل والمؤسسات حيث تمتد وظيفة السياسة العامة من تمويل البحث والتطوير إلى معالجة الاختلالات النظامية وتيسير انتشار التكنولوجيا وبناء الشبكات والعناقيد وتعزيز الصلة بين العلم والصناعة[٧]، وبهذا يغدو الابتكار جزءاً من البنية العامة لإدارة القدرة لا مجرد نشاط تقني منفصل عن المجال الاقتصادي والمؤسسي والاجتماعي.

ونظراً لتصاعد الاهتمام الدولي بالابتكار أخذ هذا المفهوم ينتقل من حدود المبادرات الفردية والفعل التقني المحدود إلى مستوى منظومة الابتكار الوطنية؛ أي إلى إطار مؤسسي ترعاه الدولة وتشارك في بنائه المؤسسات العلمية والإنتاجية والتمويلية والتنظيمية، وقد صيغ هذا المفهوم أولاً للتعبير عن شبكة المؤسسات العامة والخاصة التي تتفاعل في إنتاج التكنولوجيا واستيرادها وتكييفها ونشرها داخل الاقتصاد الوطني[٨]، ثم اتسع ليشير إلى مجموعة العناصر والعلاقات التي تسهم في إنتاج المعرفة الجديدة وتداولها وتوظيفها اقتصادياً داخل الإطار الوطني[٩]، قبل أن يستقر بوصفه نسقاً مؤسسياً تتحدد من خلاله قدرة الشركات الوطنية على الابتكار تبعاً لطبيعة التفاعل بين مؤسسات البحث العلمي، والقطاع الإنتاجي، وأدوات التمويل والتنظيم[١٠]، وعند هذه العتبة غدا الابتكار جزءاً من البنية المؤسسية لادارة المعرفة والإنتاج والقدرة داخل الدولة الحديثة.

وعليه تتحدد وظيفة منظومة الابتكار الوطنية في قدرتها على تحويل المعرفة من رصيد علمي تراكمي إلى قدرة تطبيقية قابلة للتوظيف داخل الاقتصاد، عبر مسارات نقل التكنولوجيا، وتسويق المعرفة، وتعزيز القدرة الامتصاصية للشركات والقطاعات الإنتاجية، فالاختراع العلمي يمثل بداية معرفية أما الابتكار فينشأ حين تمتلك المؤسسات القدرة على التقاط قيمة المعرفة، واستيعابها، وتكييفها، ثم إدخالها في منتجات أو عمليات أو خدمات قابلة للتطبيق[١١]، ومن هذا الموضع تتضح أهمية سياسات دعم الابتكار في وصل البحث الأساسي بالتطوير التطبيقي وبناء قنوات الترخيص وبراءات الاختراع وتمويل المراحل السابقة للتسويق وتوسيع التعاون بين المنتج البحثي والصناعة، بما يجعل المنظومة إطاراً لإدارة المعرفة لا لإنتاجها وحده[١٢]، وتزداد أهمية هذا الترتيب في التكنولوجيات الناشئة ذات الكثافة العلمية العالية وفي طليعتها تكنولوجيا النانو بوصفها حقلاً يكشف العلاقة بين السياسة الابتكارية وبناء القدرة الاستراتيجية للدولة.

استناداً إلى ما تقدم يمكن القول أن سياسات دعم الابتكار تمثل مجالاً من مجالات السياسة العامة يستهدف التأثير في دورة الابتكار بأكملها ابتداءً من إنتاج المعرفة وتطويرها مروراً بتحويلها إلى تكنولوجيا قابلة للاستخدام وانتهاءً بتبنيها وانتشارها داخل القطاعات الاقتصادية والاجتماعية، وبهذا المعنى يتصل المفهوم بكل تدخل عام يمتلك أثراً مباشراً أو غير مباشر في توليد الابتكار أو تسريعه أو توجيهه، سواء ظهر هذا التدخل تحت مسمى سياسة الابتكار أو تحت مسميات أخرى مثل السياسة العلمية، أو السياسة

التكنولوجية، أو سياسة البحث والتطوير، أو السياسة الصناعية، وتؤكد أدبيات السياسة الابتكارية أن الابتكار يتطلب الجمع بين عنصرين: الجدة والتطبيق، وأن أثره الاقتصادي والاجتماعي يتحقق عبر الاستغلال والتبني والانتشار، الأمر الذي يجعل سياسة الابتكار أوسع من دعم الاختراع أو تمويل البحث العلمي وحده(١٣).

فضلاً عن ذلك يقتضي الضبط المفاهيمي التمييز بين ثلاثة مستويات متداخلة هي:

١. **السياسة العلمية:** التي تركز على إنتاج المعرفة الأساسية، وبناء القدرات البحثية، وتمويل الجامعات ومراكز البحث.
٢. **السياسة التكنولوجية:** التي تعنى بتطوير القدرات التقنية والتطبيقات الصناعية ونقل التكنولوجيا.
٣. **سياسة الابتكار:** التي تتعامل مع إنتاج المعرفة وتطوير التكنولوجيا وتبنيها وانتشارها ضمن إطار مؤسسي وسوقي وتنظيمي واحد.

وقد بيّن "شوت وشتاينمولر" أن تطور سياسات العلم والتكنولوجيا والابتكار مرّ بثلاثة أطر كبرى هي: إطار البحث والتطوير بعد الحرب العالمية الثانية، ثم إطار منظومات الابتكار الوطنية في سياق التنافسية والعولمة، ثم إطار الابتكار التحويلي المرتبط بالتحديات الاجتماعية والاقتصادية والبيئية المعاصرة، وبذلك تصبح سياسة الابتكار مفهوماً تركيبياً يجمع بين المعرفة العلمية، والقدرة التقنية، وشروط الاستخدام الاقتصادي والاجتماعي، بدلاً من حصرها في إنتاج المعرفة أو تطوير التكنولوجيا بمعزل عن منظومة التبني والانتشار(١٤)، ومن حيث الأدوات تتشكل سياسات دعم الابتكار من حزمة تدخلات متداخلة يمكن تصنيفها إلى الآتي:

١. **أدوات تنظيمية:** تشمل تشريعات الملكية الفكرية، وقواعد المنافسة، وتنظيم الجامعات ومؤسسات البحث، والمعايير الفنية، والأطر القانونية الخاصة بالقطاعات التكنولوجية.
٢. **أدوات اقتصادية ومالية:** تشمل التمويل التنافسي للبحث العلمي، منح البحث والتطوير، الحوافز الضريبية، القروض الميسرة، رأس المال والمخاطر، ودعم مكاتب نقل التكنولوجيا.
٣. **أدوات مرنة** : تتضمن الشراكات العامة–الخاصة، الشبكات البحثية، المعايير الطوعية، الحاضنات، المسرعات، وبرامج بناء الثقة والتنسيق بين الفاعلين.

وذلك يمنح سياسة الابتكار بعداً إجرائياً واضحاً؛ فهي مجموعة أدوات مصممة لمعالجة مشكلات محددة داخل منظومة الابتكار، مثل ضعف التمويل، قصور الروابط بين الجامعة والصناعة، محدودية الطلب على التكنولوجيا، أو ضعف القدرة الامتصاصية للشركات(١٥)، كما أن هذه الأدوات تعمل ضمن ما تسميه الأدبيات مزيج السياسات Policy Mix، أي أن أثر سياسة الابتكار يتحدد من خلال تفاعل الأدوات وتكاملها عبر الزمن، وعبر مستويات الحكم، وعبر القطاعات، فالتمويل البحثي يحتاج إلى تشريعات ملكية

فكرية، ونقل التكنولوجيا يحتاج إلى حاضنات ومكاتب ترخيص وشركات ناشئة، والحوافز الضريبية تحتاج إلى سوق قادر على استيعاب المنتجات الجديدة، والمشتريات الحكومية يمكن أن تؤدي وظيفة تحفيز الطلب على الحلول التكنولوجية عندما تستخدم الدولة قوتها الشرائية لتكوين أسواق مبكرة للابتكار[١٦].

وبالاستناد إلى ما سبق من تعريفات وتفسيرات علمية، وما أفرزه مفهوم مزيج السياسات من فهم مركب لأدوات الدولة في توجيه الابتكار، يعرف البحث سياسات دعم الابتكار بأنها: حزمة منظمة من التدخلات العامة التي تستخدمها الدولة، منفردة أو بالشراكة مع الفاعلين العلميين والاقتصاديين، لتوجيه إنتاج المعرفة، وتحفيز البحث والتطوير، وبناء الروابط المؤسسية، وتسهيل انتقال التكنولوجيا، وتكوين الطلب على المنتجات والخدمات الجديدة، بما يؤدي إلى تحويل المعرفة إلى مخرجات اقتصادية وصناعية واجتماعية قابلة للتبني والانتشار. ويستوعب هذا التعريف ثلاثة أبعاد متلازمة: بعداً معرفياً يرتبط بالبحث والتطوير، وبعداً مؤسسياً يرتبط بالشبكات والتنظيم والحوكمة، وبعداً سوقياً يرتبط بالتمويل والطلب والتسويق.

٢. مفهوم تقنية النانو ومجالات استخدامها

تشكّلت تقنية النانو داخل مسار علمي تراكمي أخذت فيه الفكرة طريقها من حدسٍ فيزيائي مبكر بإمكان التحكم بالمادة في مستوياتها الدقيقة، إلى تسمية هندسية للمقياس النانوي ثم إلى أدوات مختبرية أتاحت رؤية الذرة والتعامل مع البنى الجزيئية وصولاً إلى مرحلة البرامج الوطنية التي جعلت النانو مجالاً منظماً في سياسات العلم والتكنولوجيا والابتكار (ينظر شكل (١))، إذ ارتبطت البدايات التصورية لتقنية النانو بمحاضرة الفيزيائي الأمريكي ريتشارد فاينمان الموسومة "هناك متسع كبير في القاع" التي ألقاها في اجتماع الجمعية الفيزيائية الأمريكية في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا بتاريخ ٢٩ كانون الأول ١٩٥٩، حيث وضع فاينمان إحدى اللحظات المبكرة في التفكير بإمكان التحكم بالأشياء عند المقاييس الصغيرة وربط ذلك بتخزين المعلومات والكتابة المصغّرة وبناء أدوات قادرة على التعامل مع مستويات أدق من المادة مستعيناً بمثال كتابة مجلدات "الموسوعة البريطانية" على رأس دبوس لتقريب معنى التصغير الفيزيائي وحدوده الممكنة، وتستمد هذه المحاضرة قيمتها من كونها وسّعت أفق التفكير العلمي في المادة إذ جعلت السؤال متعلقاً بقدرة الإنسان على ترتيب الذرات والجزيئات على نحو مقصود، لا بمجرد تحسين أدوات التصنيع التقليدي، ففي خاتمة النص أشار فاينمان إلى إمكان ترتيب الذرات بالطريقة المرغوبة عند اكتمال القدرة التقنية المناسبة، وهو ما جعل الفكرة النانوية منذ لحظتها الأولى متصلة بمفهوم المناورة الذرية والجزيئية، وبإمكان تحويل البنية المادية ذاتها إلى مجال للتصميم والضبط والتوجيه[١٧].

وجاءت المرحلة الاصطلاحية مع العالم الياباني "نوريو تانيغوتشي" الذي استخدم مصطلح "تكنولوجيا النانو" عام ١٩٧٤ في مؤتمر الإنتاج الهندسي في طوكيو، معرّفاً إياه في سياق عمليات الفصل والتجميع والتشكيل المادي عند مستوى الذرة أو الجزيء، وقد منح هذا التحديد النانو ملامحه الهندسية الأولى، إذ

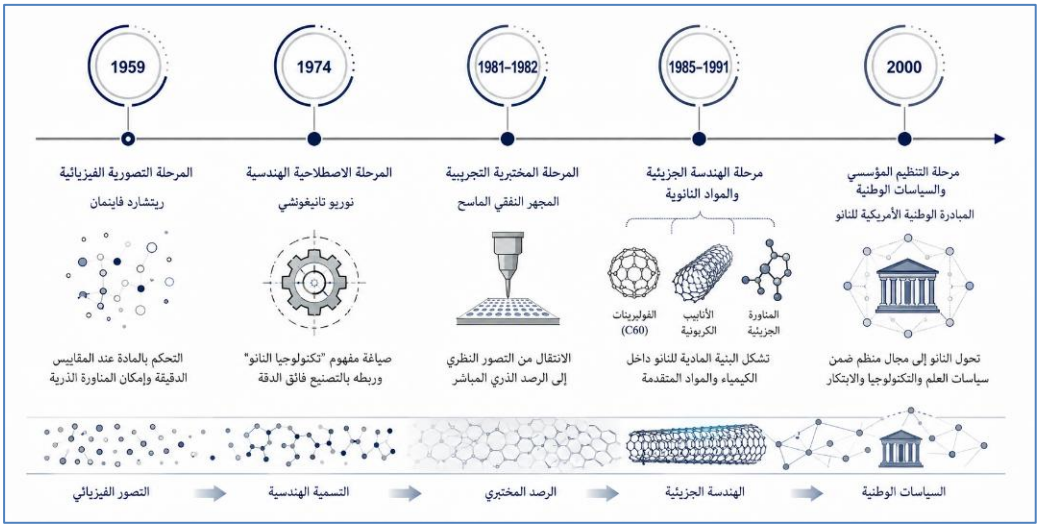
ربطه بالهندسة فائقة الدقة، ومعالجة المواد، وجعل المقياس الذري والجزيئي مجالاً لعمل تقني مضبوط لا فكرة فيزيائية عامة فحسب[١٨].

وتقدمت الفكرة خطوة حاسمة مع اختراع "غيرد بينيغ" و"هاينريش روهرر" في مختبرات (IBM Zurich Laboratories) للمجهر النفقي الماسح عام ١٩٨١، ثم نشر ورقتهما البحثية عام ١٩٨٢ في مجلة "رسائل المراجعة الفيزيائية" إذ أتاح هذا الجهاز تصوير الأسطح على المستوى الذري[١٩]، ومن هذه اللحظة أخذ المقياس النانوي يخرج من أفق التصور إلى أفق الرصد والقياس والتدخل التجريبي لتغدو تقنية النانو مجالاً مختبرياً قابلاً للملاحظة والتطوير داخل علوم المواد والنانوعلم[٢٠].

أما مرحلة التبلور العلمي فقد أخذت صورتها الأوضح خلال ثمانينيات وتسعينيات القرن العشرين مع اتساع البحث في الهندسة الجزيئية، إذ نشر "إريك دريكسلر" عام ١٩٨١ بحثه حول تطوير قدرات عامة للمناورة الجزيئية، ثم وسّع أطروحته في كتاب "محركات الخلق" عام ١٩٨٦[٢١]، ما أسهم في نقل النانو إلى حقل أكثر اتساعاً تتداخل فيه الرؤية النظرية مع إمكانات التصميم الجزيئي وتخيل أدوات جديدة للسيطرة على البنية الدقيقة للمادة، وفي عام ١٩٨٥ أعلن "هارولد كروتو" مع مجموعة من الباحثين اكتشاف جزيء "بكمنسترفوليرين – C60 Buckminsterfullerene" في مجلة (Nature)، وهو اكتشاف فتح مساراً واسعاً في كيمياء الكربون النانوية[٢٢]، ثم جاء "سوميو إيجيما" عام ١٩٩١ ليصف الأنابيب النانوية الكربونية في مجلة (Nature)، مبيناً أن البنى الأنبوبية الغرافيتية تمتلك أقطاراً تقع في مدى بضعة نانومترات إلى عشرات النانومترات، بما عزز حضور المواد الكربونية النانوية في بناء النانوتكنولوجيا الحديثة[٢٣].

ومع إطلاق "المبادرة الوطنية لتكنولوجيا النانو" (NNI) في الولايات المتحدة الأمريكية عام ٢٠٠٠ دخلت تقنية النانو طور التنظيم المؤسسي الواسع، إذ أصبحت موضوعاً لبرامج بحث وتطوير وطنية تجمع بين التمويل العام، والأولويات الصناعية، والتطبيقات المتعددة في المواد والطاقة والصحة والإلكترونيات[٢٤]، وعند هذه العتبة اكتملت ملامح النانو بوصفه حقلاً علمياً وتطبيقياً وسياساتياً في آن واحد، تتداخل فيه الفكرة الفيزيائية، والتسمية الهندسية، والأداة المختبرية، والاكتشاف المادي والتخطيط الوطني المنظم.

شكل (١): المراحل التاريخية لتشكل تقنية النانو وتطورها العلمي والتطبيقي



المصدر: من اعداد الباحث بالاعتماد على الفقرات السابقة.

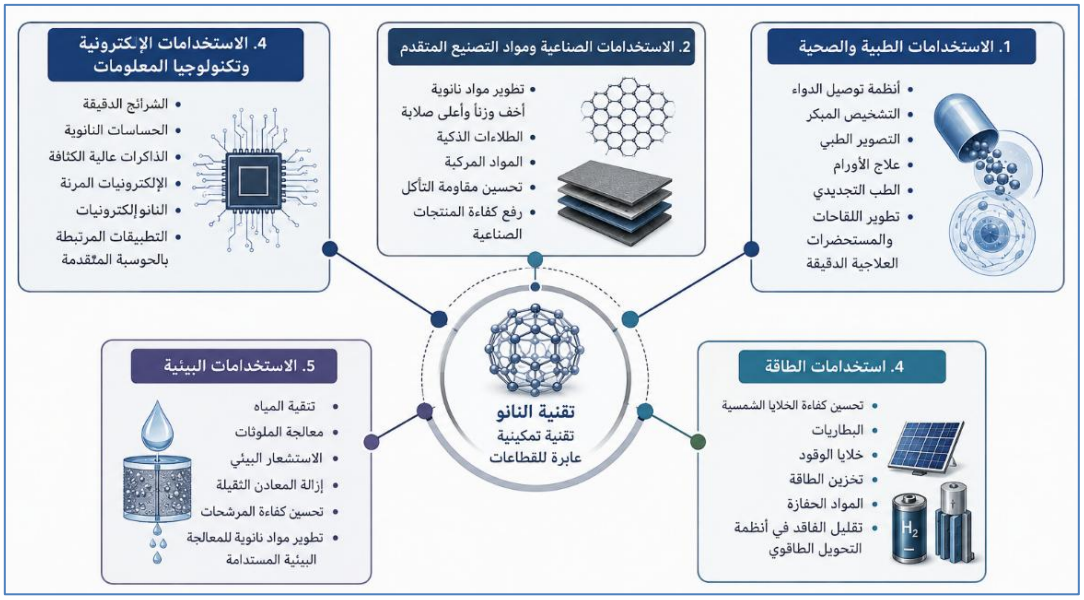
نظراً للطبيعة البينية لتقنية النانو وتداخلها مع الفيزياء والكيمياء وعلوم المواد والهندسة والعلوم الحيوية، فضلاً عن امتدادها إلى الطب والحوسبة والإلكترونيات والطاقة والقطاعات الصناعية، وكما اتضح من انتقالاتها التاريخية في الفقرات السابقة، يصبح من الضروري استعراض أبرز التعريفات التي ضبطت هذا المفهوم داخل الأدبيات العلمية المعاصرة؛ فقد عرّفت تقنية النانو بأنها فهم المادة والتحكم فيها عند أبعاد تقع بين ١–١٠٠ نانومتر، حيث تظهر ظواهر خاصة تتيح تطبيقات جديدة، وهو تعريف يركز على عنصرين أساسيين هما: المقياس النانوي وتغير الخصائص عند هذا المقياس[٢٥]، فضلاً عن ذلك فسرت تقنية النانو بأنها المناورة بالذرات والجزيئات المفردة لإنتاج مواد قابلة للاستخدام في تطبيقات تقع دون المستوى تحت المجهري، مع اعتماد معرفة فيزيائية وكيميائية وبيولوجية تمتد من الذرة والجزيء إلى حدود تقارب ١٠٠ نانومتر، فضلاً عن دمج البنى الناتجة داخل أنظمة أكبر[٢٦]، وهو تعريف يوضح البعد متعدد التخصصات والانتقال من البنية النانوية إلى النظام الوظيفي، فضلاً عن ذلك عرفت تقنية النانو بأنها تطوير المواد والأجهزة وتركيبها وتوصيفها وتطبيقها عبر تعديل الحجم والشكل عند المقياس النانوي، مع التأكيد على أن الحقل يجمع بين الفيزياء والكيمياء وعلوم المواد والهندسة والعلوم الحيوية؛ وبهذا التعريف تظهر تقنية النانو بوصفها مجالاً يرتبط بسلسلة متكاملة تبدأ من التصنيع وتمر عبر التوصيف وتنتهي إلى التطبيق[٢٧].

وتعد تقنية النانو مجال من مجالات العلم والهندسة تُستخدم فيه الظواهر الحاصلة عند الأبعاد النانوية في تصميم المواد والبنى والأجهزة والأنظمة وتوصيفها وتصنيعها وتطبيقها، وهو تعريف يمنح المفهوم بعداً هندسياً وتطبيقياً واضحاً؛ لأنه يربط الظاهرة النانوية بعمليات التصميم والتصنيع والاستخدام داخل المجالات الطبية والتكنولوجية المعاصرة[٢٨]، فضلاً عن ذلك وظفت تقنية النانو في العديد من المجالات والاستخدامات

حتى وصلت إلى عشرة مجالات استخدام رئيسة شملت: (المواد والتصنيع، والنانوإلكترونيات، والطب والرعاية الصحية، والبيئة، والطاقة، والكيميائيات، والتكنولوجيا الحيوية، والزراعة، وتكنولوجيا المعلومات، والأسلحة)[٢٩] (ينظر شكل (٢))، وفي ضوء هذا الاتساع التطبيقي سنتناول فيما يلي أبرز خمسة استخدامات لهذه التقنية وهي:

١. **المجال الطبي والصحي:** تستخدم تقنية النانو في تطوير أنظمة توصيل الدواء، وأدوات التشخيص، والتصوير الطبي، والمنتجات الدوائية، والزرعات الحيوية، والهندسة النسيجية، بما يجعلها أساساً تطبيقياً لما يعرف بالطب النانوي[٣٠].
٢. **مجال المواد والتصنيع المتقدم:** توظف تقنية النانو في إنتاج مواد ذات خصائص محسنة من حيث الخفة، والصلابة، والمقاومة، والكفاءة الوظيفية، فضلاً عن استخدامها في المواد المركبة والطلاءات والمحفزات والمنتجات الصناعية عالية الأداء[٣١].
٣. **مجال الإلكترونيات وتكنولوجيا المعلومات:** تدخل تقنية النانو في تطوير الترانزستورات متناهية الصغر، وشرائح الذاكرة، والحساسات، والنانوإلكترونيات، بما يدعم رفع سرعة المعالجة وكفاءة الأجهزة وتقليل الحجم المادي للمكونات الإلكترونية[٣٢].
٤. **مجال الطاقة:** تستخدم تقنية النانو في تحسين كفاءة الخلايا الشمسية، وتطوير مواد تخزين الطاقة، وتحسين خلايا الوقود، ودعم تقنيات الهيدروجين، إذ تشير الأدبيات إلى أن التطبيقات النانوية في الطاقة ترتبط بالإنتاج والتحويل والتخزين والاستخدام الكفوء للطاقة[٣٣].
٥. **المجال البيئي:** توظف تقنية النانو في الاستشعار البيئي، ومراقبة الملوثات، وتنقية المياه، وتطوير مواد وعمليات أكثر استدامة، ومعالجة النفايات والملوثات عبر مواد نانوية قادرة على القياس والفصل والمعالجة عند مستويات دقيقة[٣٤].

شكل(٢): البنية القطاعية للتطبيقات الرئيسة لتقنية النانو



المصدر: من اعداد الباحث بالاعتماد على الفقرات السابقة.

وعلى أساس ما تقدم يمكن القول إن تقنية النانو هي حقل علمي–تكنولوجي بيني يقوم على فهم المادة والتحكم في بنيتها وخصائصها عند المقياس النانوي ولا سيما بين ١ و١٠٠ نانومتر من أجل تصميم مواد وبنى وأجهزة وأنظمة تمتلك خصائص فيزيائية أو كيميائية أو بيولوجية مختلفة عن خصائصها في الحالة الحجمية التقليدية، ثم توظيف هذه الخصائص في تطبيقات صناعية وطبية وبيئية وإلكترونية وطاقوية.. وغيرها، وبهذا المعنى صارت تقنية النانو واحدة من أبرز مرتكزات سياسات الابتكار والتكنولوجيا في الدول لأنها تجمع بين البحث الأساسي والتصنيع المتقدم ونقل التكنولوجيا وبناء أسواق جديدة للمنتجات عالية الكثافة المعرفية.

٣. القدرات الاستراتيجية وعلاقتها بالتقنيات التمكينية

يقصد بالتقنيات التمكينية تلك التقنيات كثيفة المعرفة التي تتميز بارتفاع متطلبات البحث والتطوير وسرعة دورات الابتكار وكثافة رأس المال والحاجة إلى قوة عمل عالية المهارة فضلاً عن قدرتها على تمكين الابتكار في المنتجات والعمليات والخدمات عبر قطاعات اقتصادية متعددة، وتعد تقنية النانو واحدة من أبرز هذه التقنيات، إلى جانب الإلكترونيات الدقيقة والنانوية، والمواد المتقدمة، والفوتونيات، والتكنولوجيا الحيوية الصناعية بسبب طبيعتها الأفقية وقدرتها على توليد تطبيقات عابرة للقطاعات، وفي هذا الإطار يقصد بالقدرات الاستراتيجية المرتبطة بالتقنيات التمكينية قدرة الدولة على تحويل المعرفة العلمية المتقدمة إلى أصول مؤسسية وإنتاجية وتنظيمية قابلة للتوظيف في قطاعات حيوية بحيث تنتقل التقنية من كونها رصيداً معرفياً إلى عنصر فاعل في الأمن الصحي، والمرونة الصناعية، وكفاءة الطاقة، وأمن المياه، وتماسك سلاسل القيمة ويتقاطع هذا المعنى مع أدبيات التراكم التكنولوجي التي تربط التنمية الصناعية ببناء

قدرات داخلية في التعلم، والهندسة، والاستيعاب، والتطوير، بدلاً من اختزال التقدم التقني في امتلاك المنتجات أو استيراد المعدات[٣٥].

وتكتسب التقنيات التمكينية صفتها الاستراتيجية من قابليتها للانتشار الأفقي داخل أكثر من قطاع، ومن قدرتها على توليد أثر تراكمي يتجاوز المجال التقني الذي نشأت فيه، وضمن هذا المعنى تمثل تقنية النانو قاعدة معرفية قابلة للانتقال بين (الدواء، والمواد، والتحفيز الصناعي، والأغشية، والطلاءات، وأجهزة القياس) وهو ما يجعلها تقنية ذات أثر بنيوي في منظومات الإنتاج والخدمات، وبذلك لا تتشكل القدرة الاستراتيجية من امتلاك المعرفة النانوية فقط لكن من قدرة النظام الوطني على تحويل هذه المعرفة عبر طبقات مترابطة: طبقة معرفية تنتج الباحثين والمنشورات، وطبقة امتصاصية تستوعب الخبرة العالمية وتعيد تكييفها، وطبقة هندسية تحول المعرفة إلى نماذج أولية ومعدات وعمليات، وطبقة تجارية تربط المنتج بالسوق، وطبقة قطاعية تدمج التطبيق داخل الصحة والطاقة والمياه والصناعة، ويقترب هذا الفهم من مفهوم القدرات الديناميكية، حيث تقوم القدرة المتقدمة على استشعار الفرص واقتناصها وإعادة تشكيل الأصول والمؤسسات بما ينسجم مع بيئة ابتكار سريعة التغير[٣٦].

وتقتضي دراسة القدرات الاستراتيجية التمييز بين ثلاثة مستويات تحليلية مترابطة هي: (المخرج العلمي، والنتيجة الابتكارية، والأثر القطاعي) إذ يظهر المخرج العلمي في المقالات، والاقتباسات، والأطروحات، والمختبرات، وبرامج التدريب، أما النتيجة الابتكارية فتظهر في البراءات، والنماذج الأولية، والشركات الناشئة، والمنتجات المسجلة، والمعايير الفنية، ويظهر الأثر القطاعي عندما تدخل هذه المخرجات في منظومات إنتاج أو خدمات ذات قيمة وطنية، مثل دواء نانوي مضاد للسرطان، أو محفز نانوي داخل سلسلة بتروكيمياوية، أو غشاء لمعالجة المياه، أو فلتر صناعي يرفع كفاءة التشغيل، وبهذا تصبح القدرة الاستراتيجية انتقالاً منظماً من معرفة قابلة للنشر إلى معرفة قابلة للاستعمال، ثم إلى قدرة قابلة للانتشار القطاعي، وينسجم ذلك مع أطروحة التعقيد الاقتصادي التي ترى أن الازدهار يرتبط بتراكم معرفة إنتاجية موزعة داخل شبكات من الأفراد والمؤسسات والأنشطة، وأن تنوع المنتجات وتعقيدها يعكسان قدرة الاقتصاد على تركيب معرفة أعمق وأكثر تخصصاً[٣٧].

وتتحدد القيمة الاستراتيجية للتقنيات التمكينية عبر معيارين متلازمين هما:

أ. **قابلية التحويل**: وتعني قدرة نظام الابتكار على نقل البحث من المختبر إلى نموذج أولي، ثم إلى منتج أو عملية إنتاجية قابلة للاستخدام.

ب. **قابلية الانتشار**: وتعني قدرة هذا المنتج أو هذه العملية على الدخول في قطاعات متعددة أو سلاسل قيمة حساسة.

وبذلك يتجه السؤال البحثي إلى آلية الانتقال بين المستويات وليس إلى تراكم المؤشرات الكمية وحدها فترتيب الدولة في النشر العلمي يعطي مؤشراً على الكثافة المعرفية بينما تعكس المنتجات، والشركات، والمعايير، والتطبيقات القطاعية درجة نضج التحويل، أما الأثر الاستراتيجي فيتجسد عندما تسهم هذه المخرجات في تقليل فجوات الاعتماد التقني، أو تحسين قدرة قطاع حيوي على العمل تحت القيود، أو بناء بدائل محلية في حلقات إنتاجية ذات قيمة مرتفعة.

تسعف أدبيات السياسات الابتكارية الموجهة بالمهمة في فهم الصلة بين دعم الابتكار وبناء القدرة، إذ تنظر "ماريانا مازوكاتو" إلى سياسة الابتكار الفاعلة بوصفها جهداً عاماً يتجاوز معالجة إخفاقات السوق نحو تشكيل الأسواق، وتنسيق الاستثمارات، وتوجيه الفاعلين حول مهمة وطنية أو اجتماعية محددة[٣٨]، وبهذا تصبح القدرة الاستراتيجية حصيلة تدبير سياساتي قادر على وصل التقنية بهدف وطني واضح كتعزيز الأمن الصحي ورفع كفاءة الطاقة ومعالجة المياه ودعم الصناعة وتوسيع قاعدة المنتجات المعرفية، ويعمق "راتيل ومازوكاتو" هذا الاتجاه عبر مفهوم القدرات الديناميكية في القطاع العام بما يجعل الدولة محتاجة إلى قدرات تنظيمية وتنسيقية وتعلمية لإدارة الابتكار الموجه بالمهمة وتحويله إلى نتائج مؤسسية وقطاعية قابلة للقياس[٣٩]، ويبدو البعد الاستراتيجي لهذه العلاقة أوضح عند النظر في القطاعات المختارة للدراسة، ففي الصحة تحمل الأدوية والمنتجات النانوية دلالة تتصل بالقدرة العلاجية والتصنيعية، لاسيما حين ترتبط بأنظمة توصيل دوائي أو منتجات مضادة للأورام، وفي الطاقة والبتروكيمياويات تعبر المحفزات النانوية وفلاتر التوربينات وسوائل التبريد عن قدرة على تحسين كفاءة التشغيل وتعزيز مرونة البنية الصناعية، وفي المياه والبيئة تمنح الأغشية والمواد الممتزة والفقاعات النانوية أدوات عملية لإدارة الندرة المائية وتحسين الإنتاجية الزراعية والبيئية، ومن هذا التداخل يتشكل مفهوم القدرة الاستراتيجية بوصفه استعمالاً فعلياً للتكنولوجيا داخل قطاع حساس، مقروناً بقابلية التكرار والتوسيع والتراكم.

وتمنح القيود الخارجية هذا المفهوم بعداً تفسيرياً إضافياً إذ تجعل القدرة الاستراتيجية مرتبطة بقدرة النظام الوطني على إعادة ترتيب موارده وتصنيع أدواته وتوجيه المعرفة نحو احتياجات داخلية محددة، وفي الحالة الإيرانية تسهم القيود المفروضة على المعدات والتعاون العلمي والتمويل وسلاسل الإمداد في دفع السياسة التكنولوجية نحو التصنيع المحلي... وغيرها بما يجعل العقوبات جزءاً من البيئة الضاغطة التي تعيد توجيه السياسة التكنولوجية الإيرانية نحو التصنيع المحلي وإعادة ترتيب أولويات المعرفة والإنتاج.

وبالاستناد إلى ما تقدم يعرف البحث القدرات الاستراتيجية بأنها قدرة نظام الابتكار الوطني على تنظيم المعرفة النانوية وتوجيهها نحو منتجات وعمليات ومعايير وتطبيقات قطاعية تسهم في تعزيز المرونة الصحية والصناعية والمائية والطاقوية مع توسيع قدرة الدولة على التكيف التكنولوجي داخل بيئة دولية ضاغطة. ويجري الاقتراب من هذا المفهوم عبر خمس حزم من المؤشرات تشمل المؤشرات المعرفية المرتبطة

بالباحثين والمنشورات، والمؤشرات التحويلية المتصلة بالبراءات والنماذج الأولية، والمؤشرات الصناعية الخاصة بالشركات والمنتجات، والمؤشرات المعيارية المتعلقة بالشهادات والمختبرات، ثم المؤشرات القطاعية التي تتصل بأثر التطبيقات في الصحة والطاقة والمياه، وبهذا يكتسب المفهوم مساره التحليلي داخل هذا البحث حيث تتشكل القدرة من تفاعل المعرفة بالمؤسسة والسوق، ثم تتجسد آثارها داخل القطاعات الحيوية ذات الحساسية الاستراتيجية.

ثانيا: سياسات دعم الابتكار والتكنولوجيا في مجال النانو في إيران

تقدم إيران حالة تطبيقية تكشف نمط اشتغال السياسة العامة حين تتعامل مع التكنولوجيا الناشئة بوصفها مجالاً لبناء القدرة لا مجرد نشاط علمي متخصص، فقد أخذ النانو الإيراني صورته الوطنية المنظمة عبر التخطيط المتدرج والبناء المؤسسي وتوجيه الموارد البشرية وربط المعرفة بالصناعة والسوق، ضمن مسار جعل التكنولوجيا جزءاً من تدبير الدولة لأولوياتها العلمية والصناعية، وتزداد قيمة هذه الحالة بفعل البيئة الخارجية الضاغطة إذ منحت العقوبات والقيود التجارية والمالية السياسة التكنولوجية الإيرانية دافعاً إضافياً نحو التوطين وتنويع أدوات الدعم وتوسيع قابلية التحويل التجاري في قطاعات الصحة والطاقة والمياه والصناعة، ويتجه البحث في هذا المحور إلى بيان تطور السياسة النانوية الإيرانية عبر خططها الوطنية المتعاقبة وتحليل البنية المؤسسية التي تولت حوكمة هذا المجال ثم الوقوف عند أبرز التحديات الداخلية والخارجية التي اختبرت قدرة هذه السياسة على تحويل المعرفة النانوية إلى منتجات وشركات ومعايير وتطبيقات ذات أثر قطاعي.

١. تطور السياسة النانوية الإيرانية ومسار الخطط الوطنية

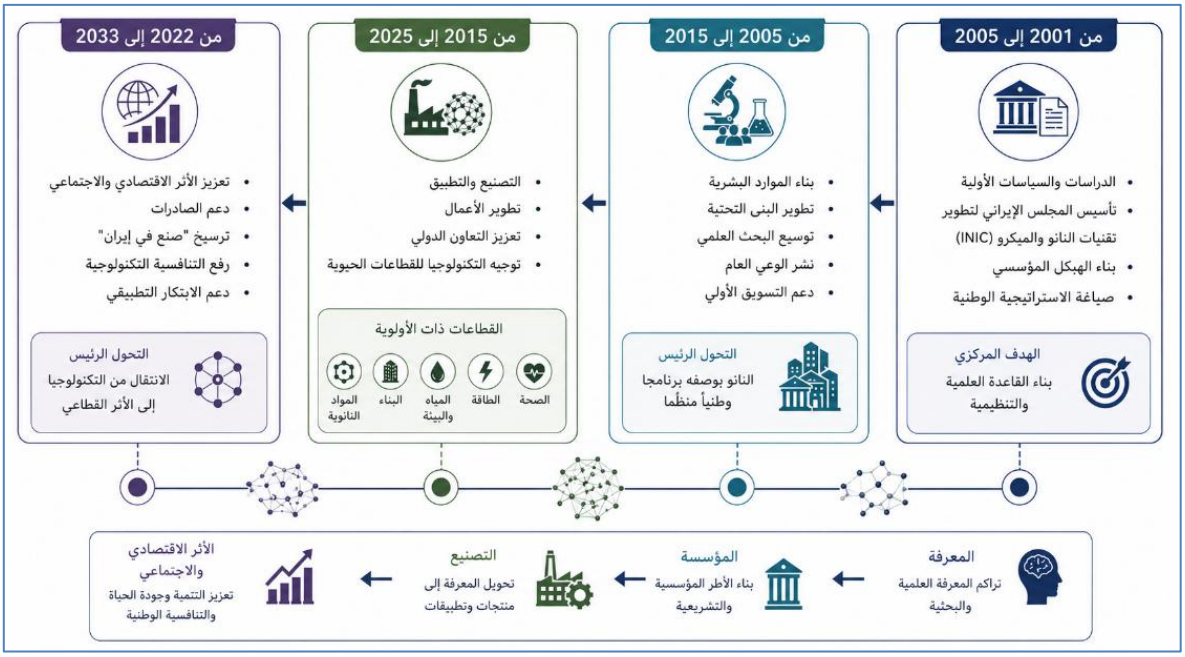
بدأت السياسة النانوية الإيرانية تتشكل مطلع الألفية الثالثة داخل اهتمام أوسع بالعلوم والتقنيات الصاعدة، بعد أن أخذت الدولة تنظر إلى النانو باعتباره مجالاً قابلاً لتنظيم المعرفة وتوجيهها نحو القدرة، وقد سبقت مرحلة التخطيط الرسمي دراسات سياساتية بدأت عام ٢٠٠١ ثم اكتسب المسار صورته المؤسسية عام ٢٠٠٣ مع تأسيس المجلس الإيراني لتطوير تقنيات النانو والميكرو (INIC) استجابة لإدراك مبكر بمكانة النانو في سلم الأولويات الوطنية، وعمل المجلس ضمن بنية حكومية مرتبطة بنيابة الرئاسة للعلوم والتكنولوجيا والاقتصاد القائم على المعرفة، وتولى صياغة الاستراتيجية طويلة الأمد لتطوير تقنية النانو التي حصلت على موافقة الحكومة عام ٢٠٠٥[٤٠]، وقد اتخذت المبادرة الوطنية الإيرانية للنانو بنية جمعت بين إنتاج الذكاء السياساتي وصنع القرار والتنفيذ مع توظيف أدوات التدخل المباشر والتنظيم والحوافز والترويج بما منح السياسة النانوية طابعاً مؤسسياً يتجاوز الدعم العلمي المحدود إلى بناء مجال تكنولوجي موجه، وغدا النانو في إيران مجالاً لتجميع المعرفة والقرار والأداة داخل مسار واحد تتولى فيه الدولة صناعة الأولويات وتحريك الموارد وربط البحث العلمي بمقتضيات التنمية الصناعية وبناء القدرة الوطنية[٤١].

مثّلت الخطة الوطنية الأولى لتقنية النانو ٢٠٠٥–٢٠١٥ نقطة تأسيس مركزية في السياسات الإيرانية إذ أخذ هذا المجال منذ تلك المرحلة صورة برنامج وطني منظم ذي أهداف ومؤشرات وأدوار تنفيذية واضحة، بعد مرحلة أولى ارتبطت بتراكم الاهتمام البحثي والسياساتي، فقد بدأ التخطيط الرسمي للنانو مع تشكيل الإطار التنسيقي الخاص بتطوير تقنية النانو، الذي أخذ لاحقاً صورته المؤسسية في المجلس الإيراني لتطوير تقنيات النانو والميكرو INIC، ثم اكتسبت السياسات الإيرانية في هذا المجال إطارها العشري الأول عبر وثيقة "استراتيجية المستقبل" التي وضعت إيران أمام هدف الدخول ضمن الدول الخمس عشرة الأولى عالمياً في تقنية النانو، وربطت تطوير هذا الحقل بإنتاج الثروة وتحسين نوعية الحياة، عبر بناء الموارد البشرية وتأسيس البنى التحتية وتوسيع مسارات البحث والتسويق التجاري بما منح السياسة النانوية الإيرانية طابعاً مؤسسياً جمع بين المعرفة والتخطيط والسوق داخل إطار وطني منظم(٤٢).

ومع اكتمال المرحلة الأولى اتجهت السياسات الإيرانية نحو التصنيع والتطبيق عبر الخطة الثانية "الخطة الوطنية لتطوير تكنولوجيا النانو" ٢٠١٥–٢٠٢٥"، والتي ركزت على تعظيم الأثر التنموي للنانو وتوليد الثروة وتحسين نوعية الحياة وتعزيز التعاون الدولي وحددت مجالات أولوية شملت (الصحة، والطاقة، والمياه والبيئة، والبناء، والمعدات والآلات، والمواد النانوية) بما جعل السياسة النانوية أكثر اتصالاً بالقطاعات الإنتاجية والحيوية(٤٣).

ومع الوثيقة الوطنية الصادرة عن المجلس الأعلى للثورة الثقافية بموجب المصوبة رقم ٣٣٠٧ في ١٥ تشرين الثاني ٢٠٢٢ أخذت السياسة النانوية الإيرانية اتجاهاً أكثر اتصالاً بسؤال الأثر بعد أن صار المطلوب من هذا المجال أن يحافظ على المكانة العلمية ويوسع التصنيع ويمنح المنتج الإيراني حضوراً أوسع في الأسواق، فقد رسمت الوثيقة أفقاً يمتد إلى عام ٢٠٣٣، وجعلت من علم وتقنية النانو مجالاً لتعزيز الاقتدار العلمي وترقية الابتكار ذي العائد الاقتصادي والاجتماعي وتطوير الصناعات القائمة ودعم الصادرات المستدامة وعلامة "صنع في إيران" ورفع أثر التكنولوجيا في جودة الحياة(٤٤)، ويعرض تقرير المجلس الإيراني لتطوير تقنيات النانو والميكرو (INIC) لعام ٢٠٢٣ تسلسلاً زمنياً يؤكد انتقال السياسة من الخطة الأولى ٢٠٠٥–٢٠١٥ إلى الخطة الثانية ٢٠١٦–٢٠٢٥، ثم إلى خطة ثالثة بدأ تنفيذها في كانون الأول ٢٠٢٣، مع تركيز أكبر على الأثر الاجتماعي والاقتصادي، وتشجيع الابتكار، ومعالجة التحديات العالمية، وترسيخ موقع إيران بين الرواد العلميين عالمياً(٤٥) (ينظر شكل (٣)).

شكل (٣): تطور السياسة النانوية الإيرانية



المصدر: من اعداد الباحث.

٢. البنية المؤسسية لحوكمة تقنية النانو في إيران

تشكلت حوكمة تقنية النانو في السياسة العامة الإيرانية عبر بنية مؤسسية جمعت بين التوجيه السياساتي، وبناء الموارد البشرية، والبنية المختبرية، والتحويل الصناعي، والمعايير التنظيمية، بما منح السياسة النانوية طابعاً مترابطاً يتداخل فيه البحث العلمي بالمؤسسة والسوق، وعلى هذا الأساس تقوم الحوكمة النانوية الإيرانية على خمسة مرتكزات رئيسة نبينها في الآتي:

أ. **المرتكز الأول: التوجيه المؤسسي:** يقف المجلس الإيراني لتطوير تقنيات النانو والميكرو INIC في صدارة البنية المؤسسية لحوكمة النانو في إيران، بوصفه مركز التوجيه والتنسيق الذي تولى إدخال هذا المجال في نظام الدولة المعرفي والصناعي، فقد تأسس المجلس عام ٢٠٠٣ بعد إدراج تقنية النانو ضمن الأولويات الوطنية، وعمل ضمن بنية نيابة الرئاسة للعلوم والتكنولوجيا والاقتصاد القائم على المعرفة، وتولى صياغة الاستراتيجية طويلة الأمد لتطوير تقنية النانو التي نالت موافقة الحكومة عام ٢٠٠٥[٤٦]، وقد منحت طبيعة عمله السياسة النانوية الإيرانية وظيفة تتجاوز إدارة التمويل البحثي إلى الحوكمة التنسيقية بما جعل النانو مجالاً عاماً لتدبير الأولويات والمؤسسات وقنوات التحويل بين العلم والصناعة[٤٧].

ب. **المرتكز الثاني: بناء الموارد البشرية والقاعدة البحثية:** ينصرف المرتكز الثاني إلى بناء القاعدة البشرية التي حملت المشروع النانوي الإيراني من مستوى الوعي الأولي إلى مستوى التكوين البحثي والريادي، فقد بدأت أنشطة نشر الوعي النانوي بين طلبة المدارس منذ عام ٢٠٠١، ثم تأسس "نادي

النانو – NanoClub" عام ٢٠٠٨ بوصفه منصة تعليمية وتدريبية أتاحت تعريف نحو ١.٦ مليون طالب بمبادئ النانو وتطبيقاته عبر المسابقات والورش والمهرجانات والأولمبيادات، وامتد هذا المسار إلى التعليم الجامعي من خلال مسابقات وبرامج تدريبية ومبادرات مثل NanoStartup التي بدأت عام ٢٠١٧ لدعم فرق طلابية قادرة على تقديم منتج أولي قابل للتطوير وربطه بالداعمين أو المستثمرين أو العملاء(٤٨)، بذلك اتخذت الحوكمة النانوية في إيران بعداً تكوينياً جعل بناء الكفاءات جزءاً من السياسة العامة، وربط التعليم والجامعة والريادة بمسار إنتاج المعرفة النانوية وتحويلها إلى قدرات بحثية وتطبيقية.

ج. **المرتكز الثالث: البنية المختبرية والخدمات العلمية:** يتعلق المرتكز الثالث بالبنية المختبرية التي منحت المشروع النانوي الإيراني قابلية القياس والتحليل والتجريب وقد تجسد ذلك في شبكة مختبرات تقنية النانو الإيرانية INLN التي تأسست عام ٢٠٠٤ باعتبارها منصة وطنية لتقديم الخدمات المختبرية وتحسين استخدام المختبرات القائمة، وتوفر هذه الشبكة مجالاً لتبادل القدرات والخبرات والمعرفة وتدعم تجديد المرافق وتوحيدها معيارياً فضلاً عن عملها في مجالات المجاهر الإلكترونية، والأشعة السينية، والمجاهر الماسحة، والتحليل العنصري، وتحليل حجم الجسيمات، وتحليل السطوح، والتحليل الحراري، وبحلول أيلول ٢٠٢٣ ضمت الشبكة ٣,٠٥٥ جهازاً مرتبطاً بالنانو موزعة على ٨٦ مختبراً، منها ٥١ جامعة، و٢٥ مركزاً بحثياً، و١٠ شركات، مع تقديم نحو ٧.٩ مليون خدمة مختبرية(٤٩)، وبهذا تحولت شبكة مختبرات تقنية النانو في ايران إلى وسيط مؤسسي يربط القاعدة البحثية بالاحتياجات التطبيقية عبر تنظيم الوصول إلى البنية المختبرية، وخفض كلفة استخدامها، وتسهيل حركة المعرفة بين الجامعات والمراكز والشركات.

د. **المرتكز الرابع: التحويل الصناعي والتجاري:** يتصل هذا المرتكز بالوجه التطبيقي للحوكمة النانوية الإيرانية حيث تتقدم العلاقة بين المعرفة والطلب الصناعي بوصفها معياراً لفاعلية السياسة وقدرتها على إخراج النانو من حدود الإنتاج البحثي إلى مجال المنتج والقطاع والسوق، وفي هذا الإطار برز برنامج NanoChallenge بوصفه آلية تسمح للشركات الصناعية بعرض مشكلاتها التقنية والبحث عن حلول نانوية مناسبة، كما جاءت شبكة Nanotechnology Exchange Network التي أطلقت عام ٢٠١٦ لتلبية طلبات الشركات الصناعية اعتماداً على التقنيات النانوية المحلية، وقد ضمت ٤٤ وسيطاً تقنياً حتى نهاية عام ٢٠٢١(٥٠)، ويؤكد تقرير INIC لعام ٢٠٢٣ هذا الاتجاه إذ بلغ عدد المنتجات النانوية الإيرانية ١,٦٠٨ منتجات موزعة على ١٢ قطاعاً صناعياً حتى أيلول ٢٠٢٣(٥١)، وتتضح أهمية هذا المرتكز من طبيعة الفجوة التي رافقت النمو البحثي السريع في النانو الإيراني إذ بقيت المسافة قائمة بين حجم المقالات المنتجة في الجامعات وحجم المعرفة التقنية المتولدة

داخل الشركات، الأمر الذي جعل شبكات الابتكار وآليات التمويل والمشاريع المشتركة أدوات لازمة لرفع كفاءة التحويل التجاري[٥٢].

هـ. **المرتكز الخامس: المعايير والاعتماد والسلامة:** يرتبط بحوكمة المعايير والاعتماد والسلامة بوصفها المجال الذي تنتقل عبره المنتجات النانوية من نطاق المختبر والتطوير إلى نطاق التداول الصناعي والتجاري، إذ تأسست لجنة توحيد المعايير النانوية الإيرانية عام ٢٠٠٦ بهدف تطوير المعايير الخاصة بالنانو، كما شاركت في اللجنة الفنية الدولية للمنظمة الدولية للتقييس الخاصة بتقنيات النانو، وبحلول أيلول ٢٠٢٣ كانت اللجنة قد نشرت ١٥٩ معياراً وطنياً نانوياً فضلاً عن نشر ١١ معياراً دولياً تحت قيادة إيران ضمن[٥٣] اللجنة الفنية الدولية لتقنيات النانو، ومن هذا الموضع تؤدي المعايير وظيفة تتصل بضبط جودة المنتجات وسلامتها، وفي الوقت ذاته تمنح المنتجات النانوية لغة فنية مشتركة تدعم قبولها الصناعي والتجاري داخل الأسواق.

ومن ذلك يتضح أن السياسات العامة الإيرانية في مجال النانو اتجهت نحو بناء حوكمة تكنولوجية تقوم على وصل المعرفة بالمؤسسة والسوق ضمن إطار تتداخل فيه الدولة بالجامعة والمختبر والقطاع الصناعي بما منح النانو وظيفة تتجاوز البعد العلمي إلى بعد يرتبط بإدارة القدرة وتوجيهها.

٣. تحديات السياسات الإيرانية في مجال تقنية النانو

تقاس فاعلية السياسة العامة في مجال التقنيات الناشئة بقدرتها على تدبير القيود التي تعترض حركة المعرفة بين المختبر والصناعة والسوق، لأن قيمة التكنولوجيا تتحدد بمدى قابليتها للتحول إلى منتج وقطاع وأثر، وفي هذا الإطار واجهت السياسة الإيرانية في مجال تقنية النانو تحديات داخلية تتصل بكفاءة التحويل الصناعي ونضج السوق وقدرة الشركات على التوسع وتحديات خارجية ترتبط بالعقوبات والقيود المفروضة على التمويل والتجهيزات والتعاون العلمي وسلاسل الإمداد.

أ. التحديات الداخلية

تتمثل التحديات الداخلية للسياسة الإيرانية في مجال تقنية النانو في قدرة النظام الوطني على تحويل القاعدة العلمية الواسعة إلى قدرة صناعية وسوقية مستقرة، فقد راكمت إيران موارد بشرية ومختبرية ومعيارية واضحة، غير أن قيمة هذه الموارد تتحدد بمدى قابليتها للتحول إلى شركات ومنتجات وأسواق وقطاعات منتجة، ومن هنا يصبح التحدي الداخلي مرتبطاً بكفاءة المراحل الوسيطة التي تصل البحث بالتطبيق، والمنتج بالطلب، والشركة بالسوق، ومن ابرز هذه التحديات هي:

- تحدي التحويل الصناعي فالتقدم في النشر العلمي يعبر عن وفرة المعرفة، بينما تكشف البراءات والمنتجات والشركات عن درجة نضج التحويل، وقد بلغ عدد المقالات النانوية الإيرانية منذ عام ٢٠٠٠ حتى أيلول ٢٠٢٣ أكثر من ١١٥ ألف مقالة، في حين بلغ عدد البراءات النانوية المسجلة في مكتبي الولايات المتحدة وأوروبا ٣١٨ براءة حتى حزيران ٢٠٢٣، وهو ما يشير إلى حاجة

السياسة النانوية إلى رفع قدرة المعرفة الجامعية على التحول إلى حقوق تقنية ونماذج صناعية ومنتجات قابلة للتوسع(٥٤).

- يتصل التحدي الثاني بنضج السوق المحلي فالمنتج النانوي يحتاج إلى ثقة معيارية، وقبول صناعي، وقنوات توزيع، وطلب قادر على استيعاب قيمته التقنية والاقتصادية، وقد أشارت دراسة "Fartash" إلى أن أدوات تشكيل سوق النانو في إيران جاءت في أغلبها بين الفاعلية المتوسطة والمنخفضة باستثناء الترويج للمنافع والتطبيقات(٥٥)، ومع ذلك تظهر البيانات نمواً واضحاً في السوق إذ بلغ عدد المنتجات الحاصلة على شهادة نانومقياس ١٥٧٧ منتجاً من إنتاج ٣٥٩ شركة حتى نهاية عام ٢٠٢٣، وبلغت قيمة السوق نحو ٦٢٠ ألف مليار ريال مع صادرات قاربت ١٤٥ مليون دولار (٥٦).
- يرتبط التحدي الثالث بقدرة الشركات على التوسع فارتفاع عدد الشركات والمنتجات يعكس اتساع القاعدة التجارية لكنه يكشف في الوقت نفسه عن تركّز القدرة داخل عدد محدود من الفاعلين، ففي عام ٢٠٢٣ استحوذت أكثر من ١٠٠ شركة ذات مبيعات تفوق ١٠٠ مليار تومان سنوياً على نحو ٨٠٪ من سوق النانو الإيراني(٥٧)، وفي عام ٢٠٢٤ بلغ عدد المنتجات التجارية ١٧٣٥ منتجاً عبر ٤٠١ شركة، غير أن نحو ١٥٠ شركة استحوذت على ٩٣٪ من السوق وتركز نحو ٨٠٪ من المبيعات في خمسة عشر منتجاً كبيراً(٥٨)، وهذا يعني أن السياسة النانوية مطالبة بتوسيع قاعدة الشركات القادرة على النمو لا الاكتفاء بزيادة عدد المنتجات والشركات المسجلة.
- يتصل التحدي الرابع بالجودة والمعايير والاعتماد فالمنتجات النانوية خصوصاً في المجالات الطبية والصناعية والبيئية تحتاج إلى قياس دقيق وتوصيف مختبري ومعيار فني وشهادة مطابقة، وقد عالجت إيران هذا الجانب عبر لجنة المعايير النانوية التي تأسست عام ٢٠٠٦، وبلغ عدد المعايير الوطنية المنشورة حتى أيلول ٢٠٢٣ نحو ١٥٩ معياراً إلى جانب ١١ معياراً دولياً نُشر بقيادة إيران ضمن المنظومة الدولية للمعايير النانوية(٥٩)، غير أن اتساع منظومة المعايير يضع عبئاً إضافياً على الشركات الصغيرة والمتوسطة، بسبب كلفة الاختبار والمطابقة والاعتماد.

ومن ذلك يتضح أن التحديات الداخلية ترتبط بدرجة بنضج البنية النانوية وقدرتها على التحويل، فالتجربة الإيرانية تبدو أقرب إلى نموذج ابتكار قائم على القيود المؤسسية والسوقية حيث يجري تعويض محدودية الموارد وضغط السوق عبر تنظيم المختبرات وتوسيع المعايير وربط الشركات بالمنتجات، وتبقى فاعلية السياسة مرهونة بقدرتها على تحويل النمو الكمي في المقالات والمنتجات والشركات إلى نضج صناعي مستدام وأثر قطاعي واضح في الصحة والطاقة والمياه والصناعة.

□

ب. التحديات الخارجية

تتحرك السياسة النانوية الإيرانية داخل بيئة خارجية ضاغطة تمسّ التمويل والتجهيزات والتراخيص والتعاون العلمي وسلاسل الإمداد والأسواق وهي عناصر شديدة الاتصال بطبيعة النانو نفسه، لكونه حقلاً يحتاج إلى أجهزة قياس وتحليل دقيقة، ومواد متخصصة، وخدمات معايرة، وبرمجيات فنية، وشهادات مطابقة، لذلك غدت العقوبات في هذا المجال عاملاً يرفع كلفة الابتكار، ويبطئ دورة التطوير ويزيد حساسية التعامل الدولي مع المعدات والمواد ذات الاستخدامات المتعددة خصوصاً بعد إعادة تفعيل منظومات ضغط واسعة في الأعوام ٢٠١٨ و٢٠٢٥ و٢٠٢٦، قد ظهر أثر الضغط الخارجي في المجال المالي والتجاري، ففي ٥ تشرين الثاني ٢٠١٨ أعادت الولايات المتحدة فرض العقوبات التي رُفعت أو عُلقت بموجب الاتفاق النووي، وشملت الإجراءات أكثر من ٧٠٠ فرد وكيان وطائرة وسفينة، مع استهداف قطاعات المال والطاقة والشحن وبناء السفن[٦٠]، وفي ٢٩ أيلول ٢٠٢٥ أعاد الاتحاد الأوروبي فرض العقوبات الاقتصادية والمالية المتصلة بالملف النووي الإيراني، بما في ذلك تجميد أصول البنك المركزي الإيراني ومصارف تجارية كبرى، وقيود على التجارة والنقل والقطاع المالي، فضلاً عن حظر أو تقييد معدات ومواد وتقنيات وبرمجيات ذات حساسية عالية[٦١]، وهذه البيئة تضغط على الحقول التقنية المتقدمة عبر التمويل، والدفع، والتوريد، والتأمين، وخدمات ما بعد البيع.

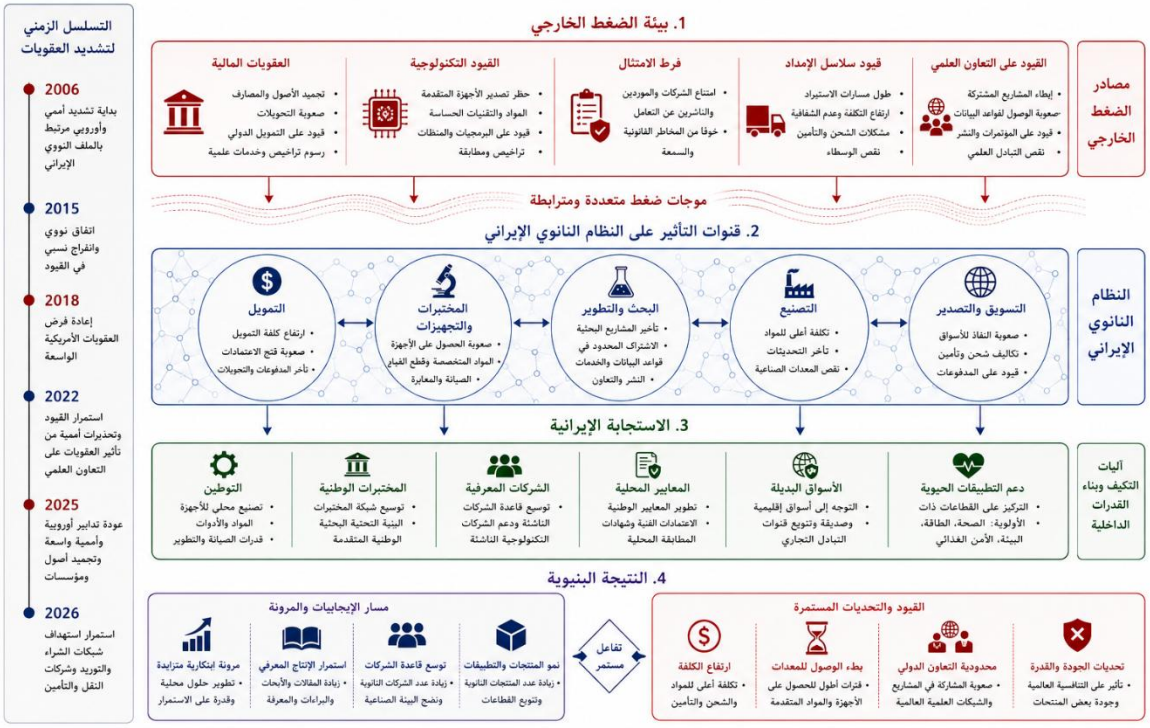
وتتعاظم كلفة القيود في تقنية النانو بسبب حاجتها إلى بنية مختبرية دقيقة، فالمجاهر الإلكترونية، وأجهزة توصيف المواد، والتحليل السطحي، وقياس حجم الجسيمات، والمعايرة والصيانة، كلها عناصر تدخل في صميم القدرة التجريبية، وتحتاج إلى موردين وشبكات خدمة وسلاسل إمداد مستقرة، وبما أن جزءاً من هذه الأدوات يقع ضمن منطقة الاستخدامات المدنية والصناعية الحساسة فقد صار الوصول إليها مرتبطاً بإجراءات امتثال وتدقيق وترخيص وهي إجراءات تجعل الزمن والكلفة جزءاً من معادلة البحث والتصنيع، بجانب المعرفة العلمية ذاتها[٦٢]، كما ضغطت العقوبات على التعاون العلمي بفعل ظاهرة فرط الامتثال لدى بعض الناشرين والمختبرات والشركات والوسطاء الماليين، وقد حذر خبراء أمميون عام ٢٠٢٢ من أثر العقوبات الأحادية في البحث العلمي والحرية الأكاديمية، وأشاروا إلى تقلص فرص التعاون مع المجلات والجمعيات العلمية، وإلى ممارسات احترازية لدى بعض دور النشر والمحررين عند التعامل مع باحثين ينتمون إلى دول خاضعة للعقوبات[٦٣]، وفي مجال النانو ينعكس ذلك على المؤتمرات، والنشر، والتحكيم، والاشتراك في قواعد البيانات، والمشاريع المشتركة، وهي كلها روافع لازمة لبناء قدرة علمية قابلة للتوظيف.

ومع ذلك فإن السياسة النانوية الإيرانية حافظت على مسارها عبر تعويض جزء من ضغط البيئة الخارجية بتوسيع الاعتماد على البنى الداخلية، فقد استندت إيران إلى المختبرات الوطنية والشركات المعرفية والمعايير المحلية وبرامج الربط بين البحث والصناعة وجرى توجيه التطبيقات نحو قطاعات الصحة والطاقة والمياه والصناعة، وتدل المؤشرات الحديثة على استمرار هذا المسار رغم القيود؛ إذ بلغت صادرات المنتجات

النانوية الإيرانية في العام ٢٠٢٣ أكثر من ١٤٥ مليون دولار إلى ٥٠ دولة، مع حضور قطاعات البناء والمواد النانوية والإلكترونيات والبصريات والكيميائيات ضمن أعلى القطاعات تصديراً[٦٤]، وتشير بيانات العام ٢٠٢٤ إلى حصول ١,٧٣٥ منتجاً نانوياً على شهادات نانومقياس وتسويقها عبر ٢٠١ شركة وبلوغ المبيعات نحو ٩٧٣ تريليون ريال بزيادة قدرها ٥٧٪ عن السنة السابقة مع صادرات تقارب ١٨٣ مليون دولار[٦٥].

ومن خلال ما تقدم نجد أن الضغط الخارجي أعاد توجيه السياسة النانوية الإيرانية نحو نمط من المرونة الابتكارية القائمة على تعظيم الموارد الداخلية وتوسيع قاعدة المنتجات وتثبيت المعايير والبحث عن أسواق بديلة، فإيران لم تستند في النانو إلى مسار انفتاح تقني وتجاري اعتيادي إنما إلى سياسة تعمل تحت قيد مالي وتجاري وتقني مستمر وتدفع المعرفة نحو قطاعات ذات حساسية وطنية، وبذلك أخذت العقوبات وظيفة تفسيرية في فهم التجربة؛ فهي رفعت كلفة الابتكار وضيّقت قنوات الوصول وفي الوقت ذاته دفعت الدولة إلى بناء أدوات توطين وتوسيع المختبرات وتنشيط الشركات المحلية وربط النانو بحاجات عملية في الصحة والطاقة والمياه والصناعة، ومن ذلك يتضح أن التحديات الخارجية منحت السياسة النانوية الإيرانية اختباراً مزدوجاً: اختبار القدرة على الاستمرار العلمي داخل بيئة مقيدة، واختبار القدرة على إنتاج أثر اقتصادي وصناعي قابل للقياس، ولهذا تبدو فاعلية هذه السياسة مرتبطة بقدرتها على تحويل الضغط الخارجي إلى تدبير داخلي منظم يرفع كفاءة الموارد الوطنية ويوسع قاعدة الشركات ويجعل المنتج النانوي جزءاً من بنية القدرة القطاعية.

شكل(٤): تأثير التحديات الخارجية في إعادة تشكيل السياسة النانوية الإيرانية ومسارات الاستجابة



المصدر: من اعداد الباحث بالاعتماد على الفقرات السابقة.

لم تبقَ التحديات الخارجية محصورة في دائرة العقوبات والقيود التجارية والمالية فقد امتدّت لاحقاً إلى مستوى أكثر حدّة تمثل في الضغط العسكري المباشر على البيئة العلمية والتقنية التي تتحرك داخلها السياسة النانوية الإيرانية، فقد أضافت الحرب الصهيونية – الأميركية على إيران طبقة ضغط عسكري مباشر فوق طبقة العقوبات، إذ انتقل التأثير من تقييد التمويل والتوريد إلى إرباك البنية العلمية والتقنية نفسها، ففي ١٣ حزيران ٢٠٢٥ بدأ الكيان الصهيوني سلسلة ضربات ضد منشآت نووية وصاروخية وطاقوية داخل إيران، ثم نفذت الولايات المتحدة في ٢٢ حزيران ٢٠٢٥ ضربات على فوردو ونطنز وأصفهان، وأكدت الوكالة الدولية للطاقة الذرية إصابة المواقع الثلاثة مع تقدير أضرار إضافية واسعة في أصفهان وتأثر مداخل أنفاق تحت الأرض وتعذر تقدير الضرر الداخلي في فوردو بدقة بسبب طبيعته الجبلية العميقة، ومن زاوية سياسة النانو يقرأ أثر هذه الضربات عبر إصابة البيئة العلمية المشتركة التي تعتمد عليها التطبيقات النانوية في المواد، والحفازات، والطاقة، والتحليل السطحي، وأجهزة القياس والمعايرة؛ فالنانو الإيراني كان يعمل قبل التصعيد العسكري داخل سوق يضم ١,٧٣٥ منتجاً نانوياً مسوقاً عبر ٢٠١ شركة، بمبيعات قدرها ٩٧٣ تريليون ريال، وصادرات تقارب ١٨٣ مليون دولار وهذه القاعدة الصناعية تحتاج إلى مختبرات مستقرة، كهرباء، شبكات بيانات، مواد أولية، وخدمات فنية، لذلك فإن الضربات الجوية حتى حين ركزت على منشآت نووية أو طاقوية ولدت أثراً جانبياً على برنامج النانو عبر رفع مخاطر التشغيل وتعطيل حلقات البحث والتجريب والتصنيع خصوصاً أن الوكالة الدولية للطاقة الذرية عادت في ٣ آذار ٢٠٢٦ إلى تأكيد ظهور

أضرار حديثة في مباني الدخول إلى منشأة نطنز تحت الأرض الأمر الذي يدل على استمرار الضغط العسكري على البنية التقنية الحساسة[٦٦].

أما الأثر الأوضح على البنى التحتية العلمية المرتبطة بالنانو فقد ظهر في ضرب الجامعات والمراكز البحثية ففي ٢٨ شباط ٢٠٢٦ بدأت جولة عمليات أميركية – صهيونية جديدة، وتضررت بعدها أكثر من ٣٠ جامعة ومركزاً أكاديمياً ومن بينها جامعة إيران للعلوم والتكنولوجيا التي أصيبت في ٢٨ آذار ٢٠٢٦، وجامعة أصفهان للتكنولوجيا التي تعرضت لضربات في ٢٦ و٢٩ آذار ٢٠٢٦، وقدرت خسائر مبانيها ومرافقها أولياً بنحو ١١ مليون دولار، وفي ٣ نيسان ٢٠٢٦ استهدف القصف معهد الليزر والبلازما في جامعة شهيد بهشتي، وهو مجال قريب من النانو – فوتونيات والبلازما والمواد المتقدمة، ثم أصيبت جامعة شريف للتكنولوجيا في ٦ نيسان ٢٠٢٦، وذكرت تقارير موثقة أن الضرر شمل مركز تقنية المعلومات، وكلية الهندسة المدنية، وكلية الهندسة الكهربائية، ومراكز بحوث النانو والبيئة، ومبنى التقنيات المتقاربة، وتضيف تقديرات وزارة العلوم الإيرانية في ٣١ آذار ٢٠٢٦ أن الأضرار شملت ١٣ مبنى في جامعة أرومية بقيمة ١.٧–١.٨ تريليون ريال، و٩ مبان في جامعة أصفهان بقيمة ٦٠٠ مليار ريال، ومبنى في مدينة أصفهان العلمية بقيمة ١٥٠ مليار ريال، وسكناً جامعياً في بوشهر بقيمة ٣٠٠ مليار ريال، و١٦ مبنى في جامعة جندي شابور للتكنولوجيا بقيمة ١٤٠ مليار ريال، وسكناً في جامعة إيران للعلوم والتكنولوجيا بقيمة ٢٠٠ مليار ريال، و٦ مبان في جامعة تشابهار بقيمة ١٠٠ مليار ريال، وبحساب نسبي تمثل خسائر جامعة أصفهان للتكنولوجيا وحدها البالغة ١١ مليون دولار نحو ١.٦٪ من حجم مبيعات النانو الإيرانية المقدرة بنحو ٧٠٠ مليون دولار ونحو ٦٪ من صادرات النانو البالغة ١٨٣ مليون دولار؛ وهذه المقارنة هي مؤشر على حجم الصدمة الواقعة على البيئة البحثية، مع بقاء نسبة الخسارة الوطنية الخاصة ببرنامج النانو وحده خارج الإحصاء العلني المفصل حتى ١٦ أيار ٢٠٢٦[٦٧].

ثالثا: أثر سياسات النانو في بناء القدرات الاستراتيجية الإيرانية

بعد استعراض مسار السياسات النانوية الإيرانية وبنيتها المؤسسية وآليات الدعم التي أحاطت بها، يتجه البحث إلى موضع الأثر بوصفه محكّ السياسة ومجال اختبار جدواها، فالتكنولوجيا حين تدخل مدار الدولة تغدو طاقة قابلة للتدبير متى وجدت مؤسسة تحسن توجيهها وسوقاً يستوعبها وقطاعاً يحتاج إليها[٦٨]، وعلى هذا الأساس يتعامل هذا المحور مع تطبيقات النانو بوصفها مخرجات لسياسات الابتكار والتكنولوجيا، تكشف درجة انتقال إيران من بناء القاعدة العلمية إلى بناء القدرة القطاعية، فالقدرة الاستراتيجية هنا تعني قابلية نظام الابتكار الوطني على تحويل المعرفة النانوية إلى منتجات وخدمات ومعايير وتطبيقات تدخل في قطاعات ذات أولوية اقتصادية وصناعية وصحية ومائية وطاقوية بما يمنح التكنولوجيا وظيفة عملية داخل البنية الوطنية[٦٩].

وتشير الوثائق الإيرانية الحديثة إلى أن السياسة النانوية أخذت في مرحلتها الأخيرة وجهة أكثر اتصالاً بالأثر الاقتصادي والاجتماعي عبر تحديث الصناعات القائمة ودعم الصادرات وتوجيه التطبيقات نحو المياه والبيئة والطاقة والزراعة والصحة والبناء، وبذلك اتجهت هذه السياسة إلى جعل النانو مورداً فاعلاً في ترميم الفجوات القطاعية وتعزيز المرونة الإنتاجية(٧٠).

١. تطبيقات النانو في القطاع الصحي

يمثل القطاع الصحي ميداناً كاشفاً لأثر السياسة النانوية الإيرانية بحكم اتصاله بالأمن الإنساني وكلفة العلاج واستمرار الإمداد الدوائي وقدرة الدولة على حماية السكان في بيئة مقيدة، ومن هذه الزاوية يتجاوز البحث عدّ المنتجات الطبية النانوية إلى فحص وظيفتها داخل السياسة الصحية، من حيث دعم الصناعة الدوائية المحلية وتخفيف أعباء العلاج وتوفير بدائل في مجالات علاجية حساسة وبناء قدر من المرونة الصحية داخل شروط ضغط خارجي مستمر، وتكتسب التطبيقات الطبية للنانو قيمتها من التقاء البحث العلمي بالصناعة الدوائية والاعتماد التنظيمي والسوق الصحي، فالأدبيات الحديثة تضع النانو في مجالات التشخيص، والتصوير، والمنتجات الدوائية، والغرسات، وهندسة الأنسجة، مع قدرة خاصة في بعض العلاجات عالية السمية ولا سيما أدوية السرطان عبر أنظمة توصيل أكثر دقة وسلامة نسبية، وفي الحالة الإيرانية تأخذ هذه التطبيقات دلالتها السياساتية من قابليتها على تحويل المعرفة النانوية إلى أداة عامة لتأمين العلاج وتقليل هشاشة القطاع الصحي أمام اضطرابات الاستيراد والتمويل، إذ تشير بيانات سوق المنتجات النانوية الإيرانية لعام ٢٠٢٣ إلى أن مجال الصحة والدواء والنظافة بلغ نحو ١١,٠٠٠ مليار ريال، موزعاً بين الوقاية بنسبة ٥١٪، والعلاج بنسبة ٤٥٪، والتشخيص بنسبة ٤٪(٧١).

وتبدو دلالة السياسة العامة أوضح في مجال توصيل الدواء إذ تمثل تقنيات توصيل الدواء نحو ٤٠٪ من سوق الصحة والدواء النانوي، وتتصل بالنانوأدوية والمكملات الغذائية إلى جانب منتجات مرتبطة بالغرسات والمرشحات والكواشف السريعة، وهذا المؤشر يعبر عن دخول السياسة النانوية في حلقات صحية ذات قيمة عالية، لأن توصيل الدواء يحتاج إلى شركات ومعايير ورقابة وتجارب واعتماد وسوق علاجية قادرة على الاستيعاب(٧٢).

وتتأكد القيمة الاستراتيجية لهذه السياسة في النانوأدوية المضادة للسرطان فقد أدى إنتاج أربعة أصناف خلال ثماني سنوات إلى توفير عملة أجنبية بقيمة ١٢٦ مليون دولار، وتحقيق مبيعات إجمالية بلغت نحو ٨,٧٠٠ مليار ريال، منها ٦,٠٤٠ مليار ريال في السوق الداخلي، وصادرات قدرها ١٢ مليون دولار، فضلاً عن خفض تكاليف شركات التأمين بنحو ١٢,٠٠٠ مليار ريال، وتمنح هذه الأرقام السياسة النانوية معنى يتجاوز المنتج ذاته، لأنها تصل التصنيع المحلي بتخفيف ضغط الاستيراد وتقليل كلفة التأمين وبناء بديل علاجي في مجال شديد الحساسية، وتعبر هذه المؤشرات عن قدرة صحية جزئية ذات أثر استراتيجي، فهي جزئية من حيث نطاقها داخل منظومة الدواء والتجهيزات الطبية، واستراتيجية من حيث تمركزها في علاجات

حساسة وربطها بين التصنيع المحلي وتقليل خروج العملة وخفض كلفة العلاج، وعند هذا الموضع تقاس السياسة الصحية النانوية بقدرتها على إدخال المنتج في نظام الصحة العامة، وجعله جزءاً من إدارة العلاج والكلفة والإمداد، فضلاً عن ذلك بلغت حصة الصحة والدواء والنظافة ١.٨٪ من سوق النانو الإيراني عام ٢٠٢٣، وهي أدنى من قطاعات البناء والنقل والمواد الكيميائية والنفط والبتروكيمياويات[٧٣]، غير أن قيمتها الاستراتيجية تتجاوز وزنها السوقي، لأن المنتج الصحي يمس الأمن العلاجي واستمرارية الدواء وكلفة الخدمة الصحية، وهي عناصر تتجاوز دلالة المبيعات المباشرة.

ومن ذلك يتضح أن السياسات النانوية في القطاع الصحي الإيراني دفعت باتجاه بناء قدرة علاجية وتشخيصية ذات أثر نوعي، إلا أن مستوى التحول إلى قدرة استراتيجية شاملة ما يزال مرتبطاً بمدى اتساع حضور هذه المنتجات داخل البنية الصحية الوطنية، من حيث الاعتماد والمشتريات العامة والتغطية العلاجية والتصنيع الواسع واستقرار سلاسل الإمداد تحت القيود الخارجية، فالمؤشرات الحالية تكشف عن نجاحات مهمة في مجالات دوائية وتشخيصية حساسة مع بقاء الأثر محصوراً في نطاقات قطاعية محددة قياساً بحجم الاحتياجات الصحية الكلية، وبالتالي يبدو النانو الصحي الإيراني أقرب إلى قدرة قطاعية صاعدة تحمل قابلية التراكم والتوسع أكثر من كونه قدرة استراتيجية مكتملة داخل النظام الصحي الإيراني.

٢. تطبيقات النانو في قطاعي المياه والبيئة

تأخذ الطاقة والصناعة في التجربة الإيرانية موقعاً يتجاوز حسابات الإنتاج المباشر بحكم اتصالهما بالموارد العامة واستمرار التشغيل وحساسية العقوبات وموقع النفط والغاز والبتروكيمياويات في بنية الاقتصاد الوطني، ووفق إدارة معلومات الطاقة الأمريكية امتلكت إيران عام ٢٠٢٣ موقعاً متقدماً في الاحتياطيات العالمية، مع نحو ١٢٪ من احتياطيات النفط العالمية و١٦٪ من احتياطيات الغاز الطبيعي المثبتة، وارتفع إنتاج النفط والسوائل لديها إلى متوسط يقارب ٤ ملايين برميل يومياً عام ٢٠٢٣ قياساً بمستوى أدنى من ٣ ملايين برميل يومياً عام ٢٠٢٠، مع بقاء الاستثمار والتكنولوجيا والتمويل عناصر ضغط واضحة على الحقول الناضجة ومشاريع الغاز والطاقة[٧٤].

ومن ذلك تكتسب السياسة النانوية معناها الصناعي فهي تعمل عند نقاط تشغيلية دقيقة هي (المحفزات، والطلاءات، والمواد المركبة، وتحسين خصائص السطوح، ورفع عمر المعدات، وتقليل كلفة الصيانة، وتدعيم حلقات محلية في سلاسل إنتاج حساسة) وهنا تبدو قيمة النانو في قدرته على إعانة الصناعة على الصمود التشغيلي، أكثر من حضوره كتقنية منفردة داخل السوق، فالمسألة تتصل بقدرة الدولة على إدخال المعرفة النانوية في بنية التكرير والبتروكيمياويات والصناعة التحويلية حيث تصبح المادة الدقيقة جزءاً من إدارة القدرة، وتعطي مؤشرات السوق معنى أوضح لهذا الاتجاه فقد أظهرت بيانات المنتجات النانوية الإيرانية أن المبيعات الكلية للمنتجات النانوية بلغت نحو ١.٦٢ مليار دولار في آذار ٢٠٢٤، وأن ٩١٪ منها جرى داخل السوق المحلية في مقابل ٩٪ للصادرات، مع نمو سنوي في الصادرات بلغ ١١٠٪ وبلوغها ١٤٥

مليون دولار، وتذكر هذه البيانات أن الطلاءات النانوية والمواد المركبة النانوية والمحفزات النانوية شكّلت الحصة الرئيسة في السوق المحلية(٧٥).

وتزداد ما تم ذكره عند النظر إلى توزيع التقنيات داخل السوق فقد حازت الطلاءات النانوية ٤١٪ من سوق التقنيات النانوية في إيران تلتها المركبات النانوية ٢٧٪ ثم المحفزات النانوية ١٢٪ في حين ارتبطت ٤٢٪ من المنتجات النانوية بقطاع البناء و١٧٪ بقطاع النفط و١٣٪ بصناعة السيارات(٧٦)،

وتظهر المحفزات النانوية تحديداً بوصفها مؤشراً ذا وزن استراتيجي في الحالة الإيرانية، فالمحفز الصناعي يدخل في التكرير والغاز والبتروكيمياويات ومعالجة المركبات الكبريتية وإنتاج المواد الوسيطة، أي في مواضع يصعب فيها الفصل بين التقنية والقدرة، ففي العام ٢٠٢٣ اعتمد قطاعي السيارات والنفط والغاز بدرجة كبيرة على المحفزات النانوية، وأن نحو ٧٠٪ من المحفزات النانوية المستخدمة في صناعات الغاز والبتروكيمياويات أنتجت داخل إيران(٧٧)، وهذه النسبة تمنح السياسة النانوية دلالة تتصل بتقليل حساسية الصناعة تجاه القيود الخارجية في مدخلات ذات قيمة تشغيلية عالية.

كما تكشف بيانات عام ٢٠٢٣ عن اتساع نسبي في قاعدة الشركات والمنتجات، مع تمركز واضح داخل السوق فقد بلغ عدد الشركات النشطة في إنتاج المنتجات والمعدات والخدمات النانوية نحو ٤٣٨ شركة، غير أن أكثر من ٨٠٪ من السوق بقي في يد ١٠٠ شركة مع تصدر منتجات مثل الصمامات الصحية والمحفزات الصناعية والبولي إيثيلين الأسود والكربون الأسود الصناعي قائمة المنتجات الأعلى مبيعاً(٧٨).

وعند ربط هذه المؤشرات ببنية قطاع الطاقة الإيراني يظهر أن النانو يؤدي وظيفة تعويضية وانتقائية داخل حلقات محددة لا وظيفة إحلال شامل، فإدارة معلومات الطاقة الأمريكية تشير إلى استمرار حاجة إيران إلى استثمارات كبيرة في الحقول الناضجة ومشاريع الغاز والبنية التحتية وتذكر أن الشركات المحلية تولت جانباً أكبر من تطوير مشاريع النفط والغاز بعد عام ٢٠١٨، مع حدود في رأس المال والتكنولوجيا اللازمة للمحافظة على الإنتاج في الحقول القديمة فضلاً عن حاجة جنوب فارس إلى استثمارات ضغط كبيرة لتجنب تراجع الإنتاج وبهذا تصبح النانو إحدى أدوات ترميم الفجوات التشغيلية، لا حلاً كاملاً لمعضلة الطاقة الإيرانية(٧٩).

أما في الصناعة، فتظهر الطلاءات والمواد المركبة بوصفها قناة أكثر انتشاراً من المحفزات. فالطلاء النانوي، بحكم حصته البالغة ٤١٪، يرتبط بطلب واسع في البناء والسيارات والنفط والغاز، بسبب أثره في تقليل الكلفة وإطالة عمر المعدات وتحسين مقاومة السطوح(٨٠)، وتلك الخاصية تمنح السياسة النانوية بعداً عملياً؛ إذ تدخل التقنية في حفظ المعدات، وحماية المنشآت، وتحسين كفاءة الاستخدام، وهي عناصر تتصل مباشرة بالقدرة الصناعية في بيئة تعاني ضغط التمويل والتجهيزات والاستيراد.

وتكشف الصادرات أيضاً عن بعد مهم في قياس القدرة. فإيران صدّرت منتجات نانوية إلى ٤٩ دولة في السنة المنتهية في آذار/مارس ٢٠٢٤، مع تركّز نحو ٦٠٪ من الصادرات في العراق وسوريا والهند والصين وتركيا. كما تشير بيانات أخرى إلى أن ٨٩.٦٪ من صادرات المنتجات النانوية اتجهت إلى آسيا، وأن العراق وتركيا وأفغانستان جاءوا بين أبرز المشترين، وهذا يعني أن النانو الإيراني وجد أسواقاً إقليمية وآسيوية، وهي أسواق تمنحه قابلية تجارية، لكنها تعكس في الوقت نفسه اعتماداً واضحاً على محيط قريب ومتوسط التقنية.

ومن ذلك يتضح أن السياسة النانوية الإيرانية في الطاقة والصناعة بلغت مستوى قدرة تشغيلية وقطاعية متقدمة خاصة في المحفزات والطلاءات والمواد المركبة وبعض المدخلات الصناعية، فقد أنتجت هذه السياسة شركات، ومنتجات، ومعايير، وصادرات، وقاعدة سوقية داخلية، وأدوات تخفف أثر القيود في بعض حلقات النفط والغاز والبتروكيمياويات والبناء والنقل، غير أن اكتمال القدرة الاستراتيجية يحتاج إلى تعميق الاندماج بين هذه التطبيقات وبرامج تحديث صناعي أوسع وتوسيع قاعدة الشركات القادرة على النمو وتقليل التمركز السوقي ورفع قيمة الصادرات خارج الأسواق القريبة وربط النانو بمشاريع الطاقة الكبرى ذات الأثر الطويل، وبالتالي نجد أن السياسة النانوية الإيرانية اقتربت من تخوم القدرة الاستراتيجية في الطاقة والصناعة وبلغت مستوى قدرة قطاعية قابلة للتراكم، أما مستوى القدرة الاستراتيجية المكتملة فيظل مرهوناً باتساع أثر النانو داخل سلاسل القيمة الكبرى، وارتفاع مساهمته في معالجة اختناقات الطاقة، وتثبيت حضوره في التحديث الصناعي، وتوسيع قدرته على المنافسة خارج نطاق السوق المحلية والإقليمية.

٣. تطبيقات النانو في القطاع المائي والبيئي

تأخذ المياه في إيران موقعاً يتجاوز المجال البيئي إلى معنى تنموي واجتماعي وزراعي وسياسي بحكم اتصالها بالأمن الغذائي واستقرار الريف وضغط المدن وكلفة الإنتاج، وتشير دراسة مشروع إيران ٢٠٤٠ في جامعة ستانفورد إلى أن الاستهلاك السنوي للمياه يقارب ٩٦ مليار متر مكعب مقابل موارد مائية متجددة بحدود ٨٩ مليار متر مكعب، وبعيداً عن عتبة استدامة تقدر بنحو ٥٣ مليار متر مكعب[٨١]؛ وهي أرقام تجعل إدارة المياه ميداناً كاشفاً لقدرة الدولة على ضبط المورد وتوجيه استخدامه، ضمن هذا المعطى يظهر النانو في المياه والبيئة بوصفه أداة مساندة لحوكمة المورد، عبر الامتزاز، والترشيح، والمعالجة، وتحسين كفاءة بعض العمليات الزراعية والبيئية، وتفيد بيانات سوق المنتجات النانوية الإيرانية لعام ٢٠٢٣ بأن حصة المياه والبيئة بلغت نحو ١٪ من السوق النانوي، مع ٩ شركات عاملة في هذا المجال، مقابل ٢٤ شركة في الزراعة والثروة الحيوانية والصناعات الغذائية[٨٢]، وتعطي هذه المؤشرات دلالة مزدوجة الحاجة الوطنية إلى حلول مائية مرتفعة، والحضور السوقي للنانو البيئي في مرحلة تكوين أولي يحتاج إلى إدماج أوسع داخل مشاريع المياه والزراعة والبيئة.

وتبرز المواد الممتزة ولا سيما الزيوليت النانوي بوصفها أحد أكثر التطبيقات اتصالاً بالسياسة البيئية الإيرانية حيث تستعمل في امتصاص النفط ومشتقاته والمعادن الثقيلة وبعض الملوثات الصناعية إلى جانب تطبيقات معالجة المياه ومياه الصرف والزراعة وتنسجم هذه التطبيقات مع الدراسات الحديثة التي تشير إلى قدرة المواد النانوية الهندسية على إزالة المعادن الثقيلة بفعل مساحة السطح العالية وقابلية الامتزاز والتعديل الكيميائي عند التراكيز المنخفضة(٨٣). وتكتسب هذه التطبيقات قيمتها من اتصالها المباشر بجودة المياه وتقليل أثر التلوث الصناعي والنفطي، وهي وظائف ترتبط بإدارة المورد لا بإنتاج سلعة تقنية معزولة، كما تظهر الفقاعات النانوية بوصفها مساراً يرتبط بكفاءة المياه والزراعة، مع وجود شركات إيرانية تعمل ضمن هذا المجال، وتربط الأدبيات الحديثة هذه التقنية بتحسين كفاءة استخدام المياه وتقليل استهلاك الطاقة والمواد الكيميائية في بعض عمليات المعالجة والزراعة والاستزراع المائي(٨٤)، غير أن القيمة السياساتية لهذه التطبيقات تتحدد بقدرتها على الدخول في مشاريع مائية وزراعية واسعة، مدعومة بمعايير سلامة، وتقييم اقتصادي، وبرامج تبنٍّ حكومي مستقر.

ويمتد حضور النانو إلى التقاطع بين المياه والطاقة عبر الأقطاب النانوية المستخدمة في التحليل الكهربائي وتحسين بعض تقنيات المعالجة والتحلية، وتكشف هذه التطبيقات عن اتجاه السياسة الإيرانية نحو توظيف النانو في إدارة التحديات المركبة، حيث تتداخل المياه بالطاقة والزراعة والصناعة داخل بيئة تعاني ضغط الموارد والتمويل، ومع ذلك فإن تقييم فاعلية السياسة النانوية في المياه والبيئة يقود إلى ملاحظة مركزية تتصل بطبيعة الأثر نفسه فالتطبيقات الحالية منحت إيران قدرة مائية وبيئية أولية ذات طابع تقني وتشغيلي، ظهرت في المعالجة والامتزاز وبعض التطبيقات الزراعية والبيئية، مع بقاء التحول إلى مستوى القدرة الاستراتيجية مرتبطاً بدرجة إدماج هذه التقنيات داخل شبكات المياه ومحطات المعالجة والبنية الزراعية والصناعية على نطاق وطني، فالمياه في إيران ترتبط بالحوكمة والتسعير والبنية التحتية وأنماط الاستهلاك والزراعة بقدر ارتباطها بالتكنولوجيا، وهو ما يجعل النانو جزءاً من منظومة إدارة المورد، لا مركزها الوحيد.

وبالتالي فإن السياسة النانوية الإيرانية في قطاع المياه والبيئة تبدو أقرب إلى بناء قدرة قطاعية ناشئة تحمل قابلية التوسع والتراكم، مع حضور محدود داخل البنية المائية الكلية للدولة، ولذلك فإن قيمة النانو هنا تتحدد بقدرته على دعم المرونة البيئية وتحسين الكفاءة وتقليل بعض مواطن الهشاشة أكثر من ارتباطها ببلوغ مستوى القدرة الاستراتيجية الشاملة في إدارة المياه والبيئة.

الخاتمة

في ختام هذا البحث يتضح أن تجربة سياسات دعم الابتكار في إيران من خلال تقنية النانو تقدم نموذجاً كاشفاً لطريقة اشتغال السياسة العامة حين تتعامل مع التكنولوجيا بوصفها مجالاً لبناء القدرة لا بوصفها نشاطاً علمياً محدود الأثر، فقد أظهر البحث أن البرنامج النانوي الإيراني تدرج من بناء القاعدة العلمية والمؤسسية إلى توسيع أدوات التحويل التجاري، ثم إلى إدخال التطبيقات النانوية في قطاعات حيوية ذات صلة مباشرة بالصحة، والطاقة، والصناعة، والمياه، والبيئة، وهذا المسار يمنح التجربة الإيرانية قيمة تحليلية خاصة لأنها تكشف كيف تستطيع الدولة الصاعدة أن توظف (التخطيط، والمؤسسة، والمعايير، والسوق، والشركات المعرفية) في تحويل المعرفة من رصيد بحثي إلى مخرجات ذات أثر قطاعي، وقد بين البحث أن أثر السياسات النانوية الإيرانية جاء متفاوتاً بين القطاعات ففي المجال الصحي أسهمت هذه السياسات في بناء قدرة علاجية وتشخيصية جزئية ذات قيمة واضحة، ولا سيما في النانوأدوية المضادة للسرطان، وأنظمة توصيل الدواء، وبعض المنتجات التشخيصية والصحية، بما وفر بدائل محلية وخفف جانباً من كلفة الاستيراد والتأمين. وفي مجال الطاقة والصناعة ظهر الأثر بصورة أكثر اتصالاً بالقدرة التشغيلية عبر المحفزات النانوية، والطلاءات، والمواد المركبة، وبعض المدخلات المستخدمة في النفط والغاز والبتروكيمياويات والبناء والنقل، وهو ما منح الصناعة الإيرانية أدوات محلية لتحسين الأداء وتقليل بعض مواطن الهشاشة تحت القيود الخارجية، أما في المياه والبيئة فقد ظل الأثر في طور قدرة قطاعية ناشئة من خلال مواد الامتزاز، والزيوليت النانوي، والفقاعات النانوية، وبعض تطبيقات المعالجة والزراعة، مع حاجة هذا المجال إلى إدماج أوسع داخل برامج المياه والزراعة والبيئة حتى يكتسب وزناً استراتيجياً أكثر رسوخاً.

أن السياسات النانوية الإيرانية بلغت مستوى القدرة الاستراتيجية الجزئية أو القدرة القطاعية القابلة للتراكم، إذ أنتجت مخرجات قابلة للقياس في قطاعات محددة، ونجحت في بناء منظومة تشمل التخطيط، والتوجيه المؤسسي، والموارد البشرية، والمختبرات، والمعايير، والشركات، والمنتجات، والتصدير، غير أن هذا المستوى يختلف عن القدرة الاستراتيجية الشاملة التي تفترض انتشاراً أوسع للتكنولوجيا داخل سلاسل القيمة الكبرى واتساعاً أكبر في قاعدة الشركات، ونضجاً أعلى في السوق، واندماجاً أعمق بين المنتج النانوي والسياسات القطاعية الوطنية، ومن هنا فإن النانو الإيراني يمثل مساراً متقدماً في بناء القدرة لكنه ما يزال محكوماً بدرجة نضج التحويل من المنتج إلى القطاع ومن السوق إلى الأثر الاستراتيجي المستدام.

كما كشف البحث أن البيئة الخارجية الضاغطة أدت دوراً حاسماً في تشكيل اتجاهات السياسة النانوية الإيرانية فقد دفعت العقوبات والقيود المالية والتجارية والتقنية إيران إلى التركيز على التوطين وبناء المختبرات الوطنية وتحريك الشركات المعرفية وتطوير المعايير والبحث عن أسواق بديلة، وبهذا المعنى لم تكن القيود مجرد عامل إعاقة بقدر ما تحولت داخل السياسة الإيرانية إلى حافز لإعادة ترتيب الموارد وبناء قدر من

المرونة الابتكارية، غير أن هذه المرونة تبقى مرتبطة بقدرة النظام الوطني على المحافظة على جودة المنتجات، وتوسيع قاعدة الشركات، وتعميق الأثر القطاعي، وتجاوز محدودية الأسواق القريبة.

وعلى ذلك ينتهي البحث إلى نتيجة مفادها أن سياسات دعم الابتكار في إيران عبر نموذج تقنية النانو أسهمت في إعادة تشكيل بعض القدرات الاستراتيجية بصورة جزئية ومتدرجة، فقد منحت الدولة أدوات لتحويل المعرفة إلى منتجات، والمنتجات إلى شركات، والشركات إلى سوق، والسوق إلى أثر قطاعي في مجالات مختارة، وتكمن قيمة التجربة الإيرانية في أنها تبين أن القدرة الاستراتيجية في الدول الصاعدة تولد من تفاعل السياسة والمؤسسة والسوق والقطاع، ومن قدرة الدولة على إدارة القيود وتحويلها إلى مسارات تنظيم وإنتاج وتوطين، وبذلك يقدم النانو الإيراني مثالاً على سياسة ابتكار استطاعت بناء قدرة قطاعية ملموسة، وفتحت مجالاً أوسع لدراسة علاقة التكنولوجيا بالسيادة الاقتصادية والمرونة الصناعية والتنمية القائمة على المعرفة.

المصادر:

(1) Sepehr Ghazinoory et al., "Government Roles in the Iranian National Nanotechnology Initiative", Technological Forecasting and Social Change 76, no. 2 (2009): 241.

(2) Behzad Soltani et al., "Evaluation Model for National Nanotechnology Development Plan in Iran", Technological Forecasting and Social Change 160 (2020): 563.

(3) Tahereh Nikraftar et al., "Technological Entrepreneurship in Iranian Nanotechnology Firms", Journal of Science and Technology Policy Management 13, no. 1 (2022): 76.

(٤) سعيد عبد السميع حسانين علي، أحمد عبد الرحيم زردق، أحمد صبري أبو زيد، وشيماء عمر الشهاوي، "تجارب دولية ناجحة في التحول لاقتصاد المعرفة"، المجلة العلمية للدراسات التجارية والبيئية ١٤، العدد ٤ (أكتوبر ٢٠٢٣)، ص٤٩٧٤-٤٩٧٥. https://doi.org/10.21608/jces.2023.344352

(5) Vannevar Bush, Science: The Endless Frontier (Washington, DC: United States Government Printing Office, 1960), 3–4, 27–29.

(٦) المحمود، وآخرون، سياسات الابتكار: المفاهيم والاتجاهات المعاصرة (مكان النشر: مؤسسة النشر، ٢٠١٨)، ٧٤–٧٦.

(7) Organisation for Economic Co-operation and Development, Managing National Innovation Systems (Paris: OECD, 1999), 13, 63–66.

(8) Christopher Freeman, Technology Policy and Economic Performance: Lessons from Japan (London: Pinter Publishers, 1987), 1.

(9) Bengt-Åke Lundvall, National Systems of Innovation: Toward a Theory of Innovation and Interactive Learning (London: Anthem Press, 2010), 2, 13–14.

(10) Richard R. Nelson and Nathan Rosenberg, National Innovation Systems: A Comparative Analysis (New York: Oxford University Press, 1993), 4.

(11) Wesley M. Cohen and Daniel A. Levinthal, "Absorptive Capacity: A New Perspective on Learning and Innovation", Administrative Science Quarterly 35, no. 1 (1990): 128–131.

(12) Henry Etzkowitz, The Triple Helix: University–Industry–Government Innovation in Action (London: Routledge, 2008), 1–3, 7–9.

(13) Jakob Edler and Jan Fagerberg, "Innovation Policy: What, Why, and How", Oxford Review of Economic Policy 33, no. 1 (2017): 4–6.

(14) Johan Schot and W. Edward Steinmueller, "Three Frames for Innovation Policy: R&D, Systems of Innovation and Transformative Change", Research Policy 47, no. 9 (2018): 1554–1557.

(15) Susana Borrás and Charles Edquist, "The Choice of Innovation Policy Instruments", Technological Forecasting and Social Change 80, no. 8 (2013): 1514–1518.
(16) Kieron Flanagan et al., "Policy Mixes for Innovation: Complexity and the Evolution of Systemic Instrumentation", Research Policy 40, no. 5 (2011): 702–706. Jakob Edler and Luke Georghiou, "Public Procurement and Innovation—Resurrecting the Demand Side", Research Policy 36, no. 7 (2007): 950–953.
(17) Richard P. Feynman, "There's Plenty of Room at the Bottom", Engineering and Science 23, no. 5 (1960): 22.
(18) Norio Taniguchi, "On the Basic Concept of Nano-Technology", in Proceedings of the International Conference on Production Engineering (Tokyo: Japan Society of Precision Engineering, 1974), 18–23.
(19) Gerd Binnig et al., "Surface Studies by Scanning Tunneling Microscopy", Physical Review Letters 49, no. 1 (1982): 57–61.
(20) Bayda et al., "The History of Nanoscience and Nanotechnology", sec. 4.
(21) K. Eric Drexler, "Molecular Engineering: An Approach to the Development of General Capabilities for Molecular Manipulation", Proceedings of the National Academy of Sciences 78, no. 9 (1981): 5275–5278. Bayda et al., "The History of Nanoscience and Nanotechnology", sec. 2.
(22) Harold W. Kroto et al., "C60: Buckminsterfullerene", Nature 318 (1985): 162–163.
(23) Sumio Iijima, "Helical Microtubules of Graphitic Carbon", Nature 354 (1991): 56–58.
(24) Mihail C. Roco, "The Long View of Nanotechnology Development: The National Nanotechnology Initiative at 10 Years", Journal of Nanoparticle Research 13 (2011): 427–445.
(25) Jitendra Hulla et al., "Nanotechnology: Future Aspects", Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences 7, no. 2 (2015): 1318.
(26) Leon Adams and Carlo Barbante, Nanoscience, Nanotechnology and Spectrometry (Amsterdam: Elsevier, 2013), 3.
(27) Lakshmi A. Kolahalam et al., "Review on Nanomaterials: Synthesis and Applications", Materials Today: Proceedings 18 (2019): 2182.
(28) Abid Haleem et al., "Nanotechnology Applications in Medicine and Healthcare: A Review", Global Health Journal 7, no. 2 (2023): 70.
(29) National Science and Technology Council, National Nanotechnology Initiative: Leading to the Next Industrial Revolution (Washington, DC: United States Government Printing Office, 2000), 14.
(30) Haleem et al., "Nanotechnology Applications in Medicine and Healthcare", 70.
(31) National Science and Technology Council, National Nanotechnology Initiative, 15.
(32) National Science and Technology Council, National Nanotechnology Initiative, 15.
(33) Elena Serrano, Guillermo Rus, and Javier García-Martínez, "Nanotechnology for Sustainable Energy", Renewable and Sustainable Energy Reviews 13, no. 9 (2009): 2374.
(34) National Nanotechnology Coordination Office, Nanotechnology: Environmental Applications (Washington, DC: NNCO, 2005), 2.
(35) David J. Teece, "Explicating Dynamic Capabilities: The Nature and Microfoundations of Sustainable Enterprise Performance", Strategic Management Journal 28, no. 13 (2007): 1319.
(36) Teece, "Explicating Dynamic Capabilities", 1319.
(37) César A. Hidalgo and Ricardo Hausmann, "The Building Blocks of Economic Complexity", Proceedings of the National Academy of Sciences 106, no. 26 (2009): 10570.
(38) Mariana Mazzucato, "Mission-Oriented Innovation Policies: Challenges and Opportunities", Industrial and Corporate Change 27, no. 5 (2018): 803.

(39) Rainer Kattel and Mariana Mazzucato, "Mission-Oriented Innovation Policy and Dynamic Capabilities in the Public Sector", Industrial and Corporate Change 27, no. 5 (2018): 787.
(40) Iran Nanotechnology Innovation Council (INIC), Progress Review of Iran Nanotechnology Plan (Tehran: INIC Press, 2023), 5.
(41) Sepehr Ghazinoory, Samaneh Mirzaei, and Sepehr Ghazinoori, "A Model for National Planning under New Roles for Government: Case Study of the National Iranian Nanotechnology Initiative", Science and Public Policy 36, no. 3 (2009): 241 .
(42) Supreme Council of the Cultural Revolution (SCCR), Future Strategy Document for Nanotechnology Development (Tehran: SCCR, 1401/2022).
(43) StatNano, Nanotechnology in Iran 2025: National Nanotechnology Development Plan (Tehran: Iran Nanotechnology Innovation Council, 2015).
(44) Supreme Council of the Cultural Revolution, Future Strategy Document for Nanotechnology Development.
(45) Iran Nanotechnology Innovation Council, Progress Review of Iran Nanotechnology Plan, 5–6.
(46) Iran Nanotechnology Innovation Council (INIC), Progress Review of Iran Nanotechnology Plan (Tehran: INIC Press, 2023), 5.
(47) Sepehr Ghazinoory, Samaneh Mirzaei, and Sepehr Ghazinoori, "A Model for National Planning under New Roles for Government: Case Study of the National Iranian Nanotechnology Initiative", Science and Public Policy 36, no. 3 (2009): 241 .
(48) Iran Nanotechnology Innovation Council, Progress Review of Iran Nanotechnology Plan, 10.
(49) Iran Nanotechnology Innovation Council, Progress Review of Iran Nanotechnology Plan, 16.
(50) StatNano, "Progress Review of Iran Nanotechnology Plan Published in English", StatNano, 2022. https://statnano.com/news/70537/Progress-Review-of-Iran-Nanotechnology-Plan-Published-in-English
(51) Iran Nanotechnology Innovation Council, Progress Review of Iran Nanotechnology Plan, 18.
(52) Mahmoud Mahmoudzadeh and Mohammad Alborzi, "Modeling Iranian Innovation Network in Nanotech for Policy: Applying an Adopted Version of SKIN Model", Journal of Science and Technology Policy Management 8, no. 2 (2017): 129.
(53) Iran Nanotechnology Innovation Council, Progress Review of Iran Nanotechnology Plan, 20.
(54) Iran Nanotechnology Innovation Council (INIC), Progress Review of Iran Nanotechnology Plan (Tehran: INIC Press, 2023), 11, 13.
(55) Farshad Fartash et al., "Market Formation Policy Instruments in Iran's Nanotechnology Sector", Journal/Publisher, Country, 2025, 56.
(٥٦) قصة صعود .. ماذا حققت تقنية النانو في ايران خلال ٢٠ عاماً؟ وما اف اقها المستقبلية، وكالة تسنيم الدولية للانباء، ٢٠٢٦، على الرابط: https://www.tasnimnews.ir/ar/news/2026/02/10/351369
(٥٧) رواد النانو في ايران: ١١ شركة عملاقة تستحوذ على السوق المحلي، وكالة تسنيم الدولية للانباء، ٢٠٢٥، على الرابط: https://www.tasnimnews.ir/ar/news/
(58) Islamic Republic News Agency (IRNA), "Report on Commercial Nanotechnology Products and Market Concentration in Iran", IRNA, Iran, 2025. https://en.irna.ir/archive?pi=1&kw=Nano-Technology&ms=0&dy=8&mn=4&yr=2024
(59) Iran Nanotechnology Innovation Council, Progress Review of Iran Nanotechnology Plan, 19.
(60) Haleem, A., Javaid, M., Singh, R. P., Rab, S. R., & Suman, R. "Applications of Nanotechnology in Medical Field: A Brief Review." Global Health Journal, vol. 7, no. 2, 2023, p. 70.
(61) Iran Nanotechnology Innovation Council. Progress Review of Iran Nanotechnology Plan. Tehran: INIC Press, 2023.
(٦٢) ستاد ویژه توسعه فناوری‌های نانو و میکرو، گزارش بازار محصولات نانو ساخت ایران در سال ۲۰۲۳، گروه سیاستگذاری و ارزیابی، طهران، ٢٠٢٤، ص ٣٥.

(٦٣) المصد نفسه، ص٣٦.
(٦٤) المصدر نفسه، ص٣٧.
(65) StatNano. Cancer Treatment Drug (Paclinab). StatNano Product Database. https://product.statnano.com/product/11510/cancer-treatment-drug-(paclinab)
(66) Loft, P. (2025) Iran: Impacts of June 2025 Israel and US strikes. House of Commons Library. Available at: https://commonslibrary.parliament.uk (Accessed: 4 May 2026). International Atomic Energy Agency (2025) Update on Developments in Iran (5). Available at: https://www.iaea.org/newscenter/pressreleases (Accessed: 4 May 2026). Tehran Times (2026) Nanotech constitutes 19% of Iran's inventions. Available at: https://www.tehrantimes.com/news/522694 (Accessed: 4 May 2026).
(67) UNESCO (2026) UNESCO expresses its grave concern over recent developments affecting higher education institutions in the Middle East. Available at: https://www.unesco.org/en/articles/unesco-expr (Accessed: 4 May 2026). Scholars at Risk (2026) 2026-03-28 Iran University of Science and Technology. Available at: https://www.scholarsatrisk.org/report/2026-03-28- (Accessed:4 May 2026). Motamedi, M. (2026) Universities hit as US, Israel ramp up attacks on Iran's infrastructure. Al Jazeera. Available at: https://www.aljazeera.com/news/2026/4/4 (Accessed: 4 May 2026). Human Rights Institute of the University of Isfahan (2026) News Report: Damage to Academic Institutions and Scientific Assets of Iran During the 2026 Military Attacks. Available at: https://www.hriui.com/en/news-report (Accessed: 4 May 2026). AFP (2026) Iran plans to turn university site hit in US-Israeli strikes into museum. ETEducation. Available at: https://education.economictimes.indiatimes.com/news/ (Accessed: 4 May 2026).
(68) Mariana Mazzucato, "Mission-Oriented Innovation Policies: Challenges and Opportunities", Industrial and Corporate Change 27, no. 5 (2018): 803, https://doi.org/10.1093/icc/dty034
(69) Rainer Kattel and Mariana Mazzucato, "Mission-Oriented Innovation Policy and Dynamic Capabilities in the Public Sector", Industrial and Corporate Change 27, no. 5 (2018): 787, https://doi.org/10.1093/icc/dty032
(70) Iran Nanotechnology Innovation Council (INIC), Progress Review of Iran Nanotechnology Plan (Tehran: INIC Press, 2023), 5–6.
(٧١) ستاد ویژه توسعه فناوری‌های نانو و میکرو، گزارش بازار محصولات نانو ساخت ایران در سال ١٤٠٢، تهران، ستاد ویژه توسعه فناوری‌های نانو و میکرو، ٢٠٢٤، ٣٥، https://nano.ir/fa/199
(٧٢) المصدر نفسه، ص٣٦.
(٧٣) المصدر نفسه، ص٣٧.
(74) U.S. Energy Information Administration, Country Analysis Brief: Iran (Washington, DC: U.S. Department of Energy, U.S. Energy Information Administration, October 10, 2024), https://www.eia.gov/international/content/analysis/countries_long/Iran/pdf/Iran%20CAB%202024.pdf , accessed : 5 May 2026.
(75) ANA, "Iran's Annual Exports of Nanotechnology Products Experience 110% Growth", ANA, November 29, 2024, https://ana.ir/en/news/7590/iran%E2%80%99s-annual-exports-of-, accessed May 5, 2026
(76) ANA, "Nanocoating Enjoys Largest Share in Iran's Nanotechnology Products Market", ANA, April 10, 2025, https://ana.ir/en/news/8641/nanocoating-enjoys-largest-share-in-ir , accessed: May 5, 2026
(77) Iran Daily, "News in Brief: Iran's Nano Market Worth $600m", Iran Daily, no. 7414, October 22, 2023, page 2, https://newspaper.irandaily.ir/7414/2/5516 , accessed May 5, 2026
(78) Kayhan, "100 Companies Own 80% of Iran's Nanotechnology Market", Kayhan, August 15, 2025, https://kayhan.ir/en/news/142544/100-companies-own-80-of-ir , accessed May 5, 2026

(79) Maryam Tavassoli, "Which Countries Are Main Buyers of Iranian Nanotech Products?" Tehran Times, April 19, 2025, https://www.tehrantimes.com/news/512023/Which-countries-are-main-buyers-of-Iranian-nanotech-products, accessed May ٥, 2026

(80) ANA, "Nanocoating Enjoys Largest Share in Iran's Nanotechnology Products Market", ANA, April 10, 2025, https://ana.ir/en/news/8641/nanocoating-enjoys-largest-share-inducts-market

(81) Azadi, P. and Mesgaran, M.B. (2018) A National Adaptation Plan for Water Scarcity in Iran. Stanford Iran 2040 Project, Stanford University, USA. Available at: https://iranian-studies.stanford.edu/iran-2040-project/publications/national-adaptation-plan-water-scarcity-iran

(٨٢) ستاد ویژه توسعه فناوری‌های نانو و میکرو (٢٠٢٤) گزارش بازار محصولات فناوری نانو در ایران ١٤٠٢. معاونت علمی، فناوری و اقتصاد دانش‌بنیان ریاست جمهوری، إیران. https://nano.ir/fa/199

(83) Karnwal, A. and Malik, T. (2024) 'Nano-revolution in heavy metal removal: engineered nanomaterials for cleaner water', Frontiers in Environmental Science, 12, Article 1393694. doi: 10.3389/fenvs.2024.1393694

(84) Esmaili, M.M. (2025) 'Nanobubble Technology and Its Applications in Water Consumption Management in Iran: A Novel Solution to the Water Crisis', Nanoscale and Advanced Materials, 2(1), pp. 84–92.