الطاقة الكهرونووية..
كفاءة اقتصادية ومحاذير إشعاعية

د.أحمد بن ناصر الراجحي
قسم الإقتصاد - جامعة الملك سعود (الرياض)

إن الحديث عن الطاقة الكهرونووية وهي الطاقة الكهربائية الناتجة عن الانشطار أو الاندماج النووي أصبح قضية مهمة؛ لأسباب عدة منها، ارتفاع أسعار النفط التي قفزت بسرعة إلى مستويات غير متوقعة في السنوات القليلة الماضية؛ نتيجة وجود طلب كبير لا تقابله زيادة في الطاقة الإنتاجية، وكذلك تصاعد المخاوف من نضوب النفط وعواقب ما يسمى (الإدمان العالمي على النفط)، كما أن مشروع البرنامج النووي الكوري والمشروع الإيراني أعادا موضوع الطاقة الكهرونووية إلى الواجهة، خصوصاً مع تزايد الشكوك حول تحول هذه البرامج من الاستخدام السلمي (طاقة) إلى الاستخدام العسكري (أسلحة).

لقد أنشئت أول محطة للطاقة الكهرونووية عام 1956 في بريطانيا، ولكن الجدل حولها يعود إلى فترة السبعينيات التي شهدت توسعاً في الاستثمار بالطاقة الكهرونووية؛ لتزايد التخوف من الإشعاعات النووية، خصوصاً بعد حادثة ولاية بنسلفانيا الأمريكية عام 1979، وكذلك حادثة تشرنوبل في أوكرانيا عام 1986، والغواصة النووية الروسية كورسك عام 2000. وعلى الرغم من كل ذلك الجدل، إلا أن الطاقة الكهرونووية تشكل نحو 5% من حجم الطاقة العالمية؛ حيث يوجد في العالم حالياً أكثر من 1000 مفاعل نووي منها نحو 600 جزء كبير تستخدم في السفن والغواصات النووية، والجزء الآخر يستخدم في مجالات بحوث الطاقة الكهرونووية، أما ما يوجد في العالم حالياً من مفاعلات نووية لأغراض توليد الكهرباء فهي نحو 450 مفاعلاً

جدول (1): نمو استهلاك الطاقة العالمي حسب النوع

السنة	بترول	غاز	فحم	كهرونووية	كهرومائية	المجموع
2007	3953	2638	3178	622	709.2	11099
2006	3911	2558	3042	634.9	697.2	10843
2005	3827	2497	2892	627	670.4	10514
2004	3824	2428	2768	625.4	644.7	10290
2003	3682	2341	2600	598.7	607.7	9829
2002	3611	2288	2407	610.9	607.8	9524
2001	3576	2217	2352	600.9	596.3	9341
2000	3559	2199	2340	584.5	610.4	9293
1999	3518	2108	2253	571.2	602.1	9052
1998	3449	2059	2264	550.2	597.1	8919
1997	3433	2026	2318	541.3	588.7	8907

المصدر: BP Statistical Review of World Energy 2008

أنشئت أول محطة للطاقة الكهرونووية عام 1956م في بريطانيا

يوجد منها 104 مفاعلات في الولايات المتحدة، و59 مفاعلاً في فرنسا، و53 مفاعلاً في اليابان، و29 مفاعلاً في روسيا ودول أخرى. كما أن مستقبل هذا النوع من الطاقة قد يكون أفضل مما يتوقعه الكثيرون، خصوصاً مع ظهور تقنيات حديثة في الصين مؤخراً من خلال أسلوب الطبقات الحصوية (Pebble-bed) الذي يتميز بقدرته على خفض النفايات الناتجة وإشعاعاتها النووية.

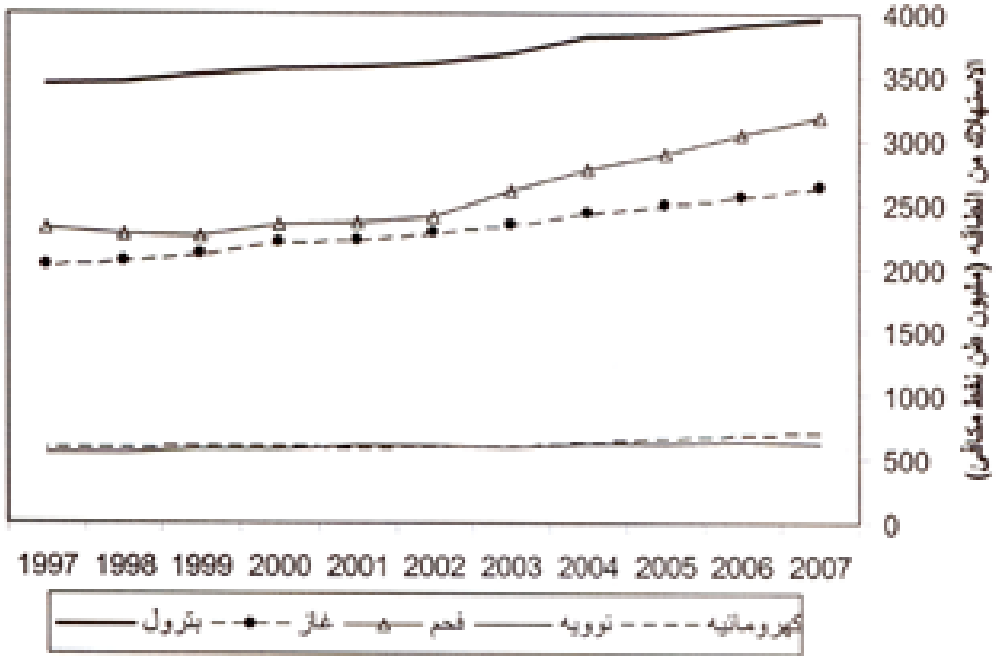
تحاول هذه الدراسة إطلاع القارئ المتخصص وغير المتخصص – على حد سواء – على مستجدات قضية الطاقة الكهرونووية، وتحليل اقتصاديات هذا النوع من الطاقة والميزات والعيوب المرتبطة بها، ومدى إمكانية أن تصبح الطاقة الكهرونووية وقود المستقبل، وجدوى الاستثمار بها في دول نفطية مثل السعودية، وإيران، ودول الخليج العربي الأخرى.

أولاً: استهلاك الطاقة في العالم

ما زالت مصادر الطاقة الأحفورية التقليدية وهي: البترول، والفحم، والغاز تسيطر على سوق الطاقة في العالم؛ حيث يشكل البترول 36%، والفحم 29%، والغاز الطبيعي 24%، بينما يكون الباقي موزعاً أساساً على الطاقة الكهرومائية 6% والطاقة الكهرونووية 5%. (انظر الجدول رقم 1 والشكل رقم 1).

إن هذا التوزيع قد شهد تغيراً واضحاً منذ الستينيات الميلادية من القرن الماضي، كما أن تراجع الفحم، بسبب مشكلاته البيئية وانخفاض كفاءته الحرارية أعطى مجالاً بعد الحرب العالمية الثانية لتقدم البترول ليصبح المصدر الأول للطاقة، وذلك لكثرة مشتقاته وسهولة نقله، ومن ناحية أخرى فإن الغاز الطبيعي ظهر كمنافس جديد نتيجة ميزاته الاقتصادية مثل ارتفاع كفاءته الحرارية مقارنة بالبترول والفحم ونظافته نسبياً؛ حيث أطلق عليه

شكل (1) نمو استهلاك الطاقة العالمي حسب النوع



مازالت مصادر الطاقة الأحفورية تسيطر على سوق الطاقة في العالم

مسمى (صديق البيئة)، وأهميته كلقيم لصناعة البتروكيماويات العالمية.

أما مصادر الطاقة الأخرى مثل الطاقة الكهرومائية، والطاقة الكهرونووية، وغيرهما من مصادر الطاقة تشكل مصدراً إضافياً محدوداً؛ بسبب ارتفاع كلفتها، أو وجود قيود بيئية وأمنية، بالإضافة إلى اعتماد بعضها على ظروف المناخ والطقس التي لا يمكن الاعتماد عليها طوال الوقت مثلما هو الوضع في الطاقة الكهرومائية وطاقة الرياح.

إن استهلاك الطاقة مؤشر مهم على مدى تطور الاقتصاد ونموه؛ لذا نجد من جدول رقم (2) أن نحو 70%، من الاستهلاك العالمي للطاقة موجود في القارتين الأمريكية والأوروبية، وتشكل دول آسيا والمحيط الهادي أكثر من 27% وهي منطقة تشمل دولاً صناعية مثل: اليابان، والصين، وكوريا الجنوبية.

أما استهلاك منطقة الشرق الأوسط فيشكل أقل من 1%، وهو أقل بكثير حتى من القارة الأفريقية؛ مما يدل على التحديات الاقتصادية التي يجب أن تتخطاها دول المنطقة لكي تحتل مكانة أفضل على الخارطة الاقتصادية للعالم (انظر الجدول رقم 3).

عند النظر إلى مصادر الطاقة كل على حدة، نجد أن هناك بعض التغيير، فعلى الرغم من تأكد سيطرة الدول الصناعية حيث تشكل الدول الغربية 59%، ودول آسيا والمحيط الهادي 30% من استهلاك البترول، إلا أن دول منطقة الشرق الأوسط

جدول (2): توزيع استهلاك العالم من الطاقة حسب القارات

القارة	حجم الاستهلاك (مليون طن نفط مكافئ)	%
أمريكا الشمالية	146.2	20.6
أمريكا الجنوبية	153.1	21.6
أوروبا	188.6	26.6
الشرق الأوسط	5.1	0.7
أفريقيا	22.2	3.1
آسيا والمحيط الهادي	194	27.3
جميع العالم	709	100

المصدر: BP Statistical Review of World Energy 2008

يعد الغاز الطبيعي منافساً جديداً للطاقة لميزاته الاقتصادية

جدول (3): استهلاك البترول حسب القارات

القارات	حجم الاستهلاك (مليون طن نفط مكافئ)	%
أمريكا الشمالية	1135	28.71
أمريكا الجنوبية	252	6.38
أوروبا	949	24
الشرق الأوسط	294	7.44
أفريقيا	138	3.49
آسيا والمحيط الهادي	1185	29.98
جميع العالم	3953	100

المصدر: BP Statistical Review of World Energy 2008

تستهلك أكثر من 7%، وهذا يعكس اعتماد دول هذه المنطقة على البترول في حاجاتها التنموية، خصوصاً بسبب توفر البترول في المنطقة.

إن ما تم ذكره عن استهلاك البترول يتكرر – إلى حد كبير – في جدول رقم (4) الخاص باستهلاك الغاز؛ حيث إن استهلاك الدول الغربية 61%، ودول آسيا والمحيط الهادي 15% تشكل الجزء الأكبر من الطلب على الغاز، خصوصاً مع توفر الغاز في الدول الغربية نفسها. أما نصيب دول الشرق الأوسط فإنه أفضل من البترول؛ حيث إن الغاز أصبح مصدراً مرغوباً في صناعة الكهرباء، وكذلك توفير اللقيم اللازم للصناعات البتروكيماوية الناشئة في المنطقة.

نظراً لوجود مشكلات بيئية للفحم وانخفاض كفاءته

جدول (4): استهلاك الغاز حسب القارات

القارة	حجم الاستهلاك (مليون طن نفط مكافئ)	%
أمريكا الشمالية	728.9	27.7
أمريكا الجنوبية	121.1	4.6
أوروبا	1040.1	39.4
الشرق الأوسط	269.4	10.2
أفريقيا	75.2	2.8
آسيا والمحيط الهادي	403.1	15.3
جميع العالم	2638	100

المصدر: BP Statistical Review of World Energy 2008

يعتمد استخراج الطاقة الكهرومائية على وجود الأنهار ومساقط المياه

الحرارية، وكذلك عدم وجود كميات تجارية من الفحم في أمريكا الجنوبية، فإن استهلاك الدول الغربية هذا المصدر أقل نسبياً من استهلاكها من البترول والغاز؛ لذا فإن معظم الاستهلاك العالمي للفحم موجود في دول آسيا والمحيط الهادي، خصوصاً الصين والهند ذات النمو الاقتصادي السريع وقيود بيئية متساهلة، أما استهلاك دول الشرق الأوسط فقريب من الصفر؛ بسبب عدم إنتاج الفحم في هذه المنطقة واعتمادها على البترول والغاز المتوفرين لديها. (انظر جدول رقم 5).

إن استخدام الطاقة الكهرومائية يعتمد - إلى حد كبير - على وجود الأنهار ومساقط المياه؛ لذا فإنه باستثناء منطقة الشرق الأوسط وأجزاء كبيرة من أفريقيا، فإن القارات الأخرى تعتمد بنسب متقاربة على الطاقة الكهرومائية في سد جزء من حاجاتها إلى الكهرباء؛ لذا فإن نسبة مساهمة هذا النوع من الطاقة في الاستهلاك منخفضة، لاعتماده على الظروف الطبيعية، وعدم رغبة العديد من الدول في الاعتماد على دول أخرى تمر بها الأنهار في تلبية حاجاتها من الكهرباء على الرغم من وجود تطور حديث في توربينات توليد الكهرباء من السدود. (انظر جدول رقم 6).

إن الاستهلاك العالمي من الطاقة الكهرونووية متركز - بشكل كبير - في الدول الغربية الصناعية؛ حيث تستهلك 79% منها، بينما تستهلك دول آسيا والمحيط الهادي 20% من إنتاج العالم

جدول (5): استهلاك الفحم حسب القارات

الدولة	حجم الاستهلاك (مليون طن نفط مكافئ)	%
أمريكا الشمالية	613.3	19.3
أمريكا الجنوبية	22.4	0.7
أوروبا	533.7	16.8
الشرق الأوسط	6.1	0.2
أفريقيا	105.9	3.33
آسيا والمحيط الهادي	1896.2	59.7
جميع العالم	3178	100

المصدر: BP Statistical Review of World Energy 2008

يرجع عدم استغلال منطقة الشرق الأوسط لاستخدام الطاقة النووية لأسباب سياسية

جدول (6): استهلاك الطاقة الكهرومائية حسب القارات

الدولة	حجم الاستهلاك (مليون طن نفط مكافئ)	%
أمريكا الشمالية	146	20.6
أمريكا الجنوبية	153	21.7
أوروبا	189	26.6
الشرق الأوسط	5	0.7
أفريقيا	22	3.1
آسيا والمحيط الهادي	194	27.3
جميع العالم	709	100

المصدر: BP Statistical Review of World Energy 2008

من الطاقة الكهرونووية. (انظر جدول رقم 7). أما باقي القارات فإن استهلاكها من الطاقة الكهرونووية ضئيل جداً، بل إنه لا يوجد في منطقة الشرق الأوسط (الدول العربية والإسلامية) أي استهلاك لهذا المصدر المهم من مصادر الطاقة، إذا استثنيت إسرائيل ومفاعلها النووي في ديمونة في صحراء النقب.

من ناحية أخرى فإن غياب منطقة الشرق الأوسط عن المجال النووي ليس فقط لتوافر البترول والغاز فيها، ولكن لأسباب سياسية؛ حيث إن هذه المنطقة ينقصها الاستقرار السياسي؛ مما يجعل الاستفادة السلمية من الطاقة الكهرونووية قد تتحول إلى تطوير برامج تسلح نووي، فزيادة تخصيب اليورانيوم عن

جدول (7): استهلاك الطاقة الكهرونووية حسب القارات

القارة	حجم الاستهلاك (مليون طن نفط مكافئ)	%
أمريكا الشمالية	215.6	34.7
أمريكا الجنوبية	4.4	0.7
أوروبا	275.6	44.3
الشرق الأوسط	–	0
أفريقيا	3	0.5
آسيا والمحيط الهادي	123.4	19.8
جميع العالم	622	100

المصدر: BP Statistical Review of World Energy 2008

الاستهلاك العالمي من الطاقة الكهرونووية متركز في الدول المتقدمة الغربية

الحد الذي تحتاج إليه الطاقة الكهرونووية قد يمكن بعض دول المنطقة من إنتاج السلاح النووي الذي قد يدفع المنطقة إلى منزلق التسلح النووي، وهو ما قد تكون له عواقب وخيمة على الأمن والتنمية المستديمة في المنطقة.

على الرغم من حرمان كثير من دول العالم، خصوصاً الدول العربية والإسلامية باستثناء باكستان، إلا أن 10 دول مستهلكة للطاقة الكهرونووية تشكل 85% من الاستهلاك العالمي، فهناك نحو 40 دولة مستهلكة لها تحتل الولايات المتحدة المركز الأول بنحو 31% تليها فرنسا بمراحل بنحو 16% في المرتبة الثانية، وتحتل اليابان المرتبة الثالثة بنحو 10% وهي الدولة الأكبر في آسيا والمحيط الهادي من حيث الاعتماد على الطاقة الكهرونووية؛ حيث إنها تعتمد بشكل كلي على استيراد الطاقة، بينما كوريا الجنوبية والصين تشكلان نسبة 5.3% 2.3% على التوالي. (انظر جدول رقم 8).

ثانياً: طبيعة الطاقة الكهرونووية

ترتبط عملية توليد الطاقة الكهرونووية بفعل الانشطار النووي المتمثل في (قصف) ذرات اليورانيوم بجزئيات صغيرة

جدول (8): أكبر 10 دول مستهلكة للطاقة الكهرونووية

م	الدولة	حجم الاستهلاك (مليون طن نفط مكافئ)	%
1	الولايات المتحدة	192.1	31
2	فرنسا	99.7	16
3	اليابان	63.1	10
4	روسيا	36.2	5.9
5	كوريا الجنوبية	32.3	5.3
6	ألمانيا	31.8	5.1
7	كندا	21.1	3.5
8	أوكرانيا	20.9	3.4
9	السويد	15.3	2.5
10	الصين	14.2	2.3
	مجموع فرعي	527	85
	جميع العالم	622	100

المصدر: BP Statistical Review of World Energy 2008

الطاقة ضرورية لإنتاج السلع والخدمات التي تسهم في رفاهية المجتمعات

تدعى النيترونات، وهي التي تنفلق جراء هذا القصف؛ مما يمكنها من توليد طاقة حرارية أثناء انفلاقها، ومن ثم ينتج عن ذلك بخار ذي درجة حرارة هائلة يستخدم في دفع التوربينات البخارية المولدة للكهرباء كما هو معمول به – عادة – في محطات الكهرباء البخارية المعروفة، وهي الطريقة المستخدمة حالياً بشكل متقدم في روسيا وبريطانيا، وهي الطاقة الكهرونووية المستمدة من الانشطار النووي (Nuclear Fission). وهناك طريقة أخرى حديثة أكثر فاعلية تقوم على توليد الطاقة الكهرونووية باستخدام مفاعل المولد السريع (Fast Breeder Reactor) الذي يتميز بأنه ينتج من المواد القابلة للانشطار أكثر مما يستهلك، وهذا مصدر المعارضة له؛ لأن هناك إمكانية لاستخدام هذه المواد الانشطارية في صناعة القنبلة النووية.

إن تطوير هذه الطريقة يمكننا من توليد 50 إلى 100 ضعف من الطاقة من الكمية نفسها من اليورانيوم، وإمكانية التوجه لاستخدام أنواع أفضل حتى لو كانت أغلى سعراً، فالطريقة الحديثة المعتمدة على المولدات السريعة ذات الكفاءة العالية تستفيد من نحو 70% (مقارنة بالطريقة الانشطارية 20%) من وقود اليورانيوم المستخدم؛ مما يزيد احتياطات اليورانيوم المتوافرة.

إن الطلب على الطاقة الكهرونووية ومصادر الطاقة الأخرى المتجددة لها ما يبرره لكل من الدول الصناعية المستهلكة وكذلك الدول النفطية؛ لأن الطاقة بشكل عام ضرورية لإنتاج السلع والخدمات وتلبية الاحتياجات الضرورية التي تسهم في رفاهية المجتمعات، إلا أن هناك إشكالات مرتبطة باستخدام الطاقة؛ حيث إن أغلبها مصادر طاقة ناضبة مثل: البترول، والغاز، والفحم، كما أن هناك مشكلات بيئية مرتبطة بهذه المصادر الأحفورية كإسهامها في زيادة الاحتباس الحراري من خلال ارتفاع درجة حرارة الأرض، وتهديده طبقة الأوزون الممثلة للغلاف الجوي للأرض؛ لذا فإن هناك دوافع لجميع الدول للبحث عن مصادر طاقة أخرى ذات طبيعة متجددة وليس لها تأثير سلبي على البيئة، مما جعل العودة إلى الطاقة الكهرونووية أمراً مقبولاً على الرغم من مخاوف السلامة التي تحف بها.

ثالثاً: مميزات الطاقة الكهرونووية وعيوبها

لقد كتب الكثير عن كل من مميزات الطاقة الكهرونووية وعيوبها، ولكن يمكن تلخيص ذلك فيما يلي:

ميزات الطاقة الكهرونووية:

1 – كمية الوقود النووي المستخدم في توليد حجم معين من الطاقة الكهربائية هو أقل بكثير من كمية الفحم أو البترول المستخدم لتوليد الحجم نفسه من الطاقة الكهربائية؛ مما يعكس الكفاءة الحرارية العالية جداً.

2 – تعد محطات الطاقة الكهرونووية نظيفة نسبياً؛ حيث لا تصدر منها غازات مثل ثاني أكسيد الكربون أو ثاني أكسيد الكبريت.

3– توافر اليورانيوم وهو مصدر الوقود بكثرة وكثافة عالية، بالإضافة إلى سهولة استخراجه ونقله مقارنة بالفحم الملوث أو النفط الذي تتراجع معدلات اكتشافه.

4 – إن الطاقة الكهرونووية – مقارنة بالطاقة الشمسية أو طاقة الرياح – تولد من مفاعلات لا تحتاج إلى مساحات جغرافية كبيرة؛ مما يجعلها مناسبة للدول المكتظة بالسكان أو ذات المساحة الصغيرة.

5 – يتزايد استهلاك العالم للكهرباء بمعدل 8% سنوياً؛ مما يدل على أن الاستهلاك العالمي يتضاعف مرة كل عقد من الزمان؛ لذا تصبح الطاقة الكهرونووية من أهم البدائل في توليد الطاقة الكهربائية بعد المحطات التقليدية القائمة على البترول أو الفحم كوقود، خصوصاً أنها تتصف بالكفاءة الحرارية العالية.

يتزايد استهلاك العالم من الكهرباء بمعدل 8% سنوياً

6 – قلة التكلفة الإجمالية؛ حيث إنه على الرغم من ارتفاع التكلفة الرأسمالية لها إلا أن انخفاض تكلفتها التشغيلية وقدرتها على العمل بشكل مستمر لفترات زمنية طويلة يجعلها رخيصة نسبياً.

7 – المحافظة على الاحتياطات الموجودة من البترول والغاز، والاستفادة منها في التصدير، والحصول على العملة الصعبة، خصوصاً في الدول التي تعتمد على البترول والغاز في دخلها القومي، وترغب – أيضاً – في تطوير صناعاتها البتروكيماوية.

8 – يمكن الاستفادة من الطاقة الكهرونووية في مجال تحلية المياه من خلال البخار الناتج عن استخدام الماء كمادة تبريد؛ حيث إن هذا البخار يتم تقطيره بإحدى الطرق الحديثة لتحلية المياه، والتي تكون تكلفتها منخفضة جداً، بسبب الاستفادة مما يسمي (اقتصادات النطاق أو التنوع) (Economies of Scope)؛ حيث يتم إنتاج الكهرباء والماء بالتكاليف الرأسمالية المستثمرة نفسها.

عيوب الطاقة الكهرونووية:

1 – طول فترة إنشاء محطات الطاقة الكهرونووية (7 – 10 سنوات) وارتفاع فترة استرداد رأس المال؛ مما يجعلها استثمارات عالية المخاطر، خصوصاً للقطاع الخاص؛ حيث إن جدواها الاقتصادية تعتمد على طول عمرها التشغيلي الذي يصل إلى 40 سنة أحياناً؛ مما يعرضها لتقلبات أسعار الفائدة وأسعار الصرف.

2 – من أضرار الطاقة الكهرونووية استخدام الوقود النووي في محطات التوليد، ومخاطر نقل الوقود إلى هذه المحطات، بالإضافة إلى مشكلات التخلص من النفايات النووية ذات الإشعاعات التي قد تبقى في الأرض آلاف السنين وتزايد تكاليف تخزينها.

3 – التخوف من انتشار مادة البلوتونيوم الناتجة عن تخصيب

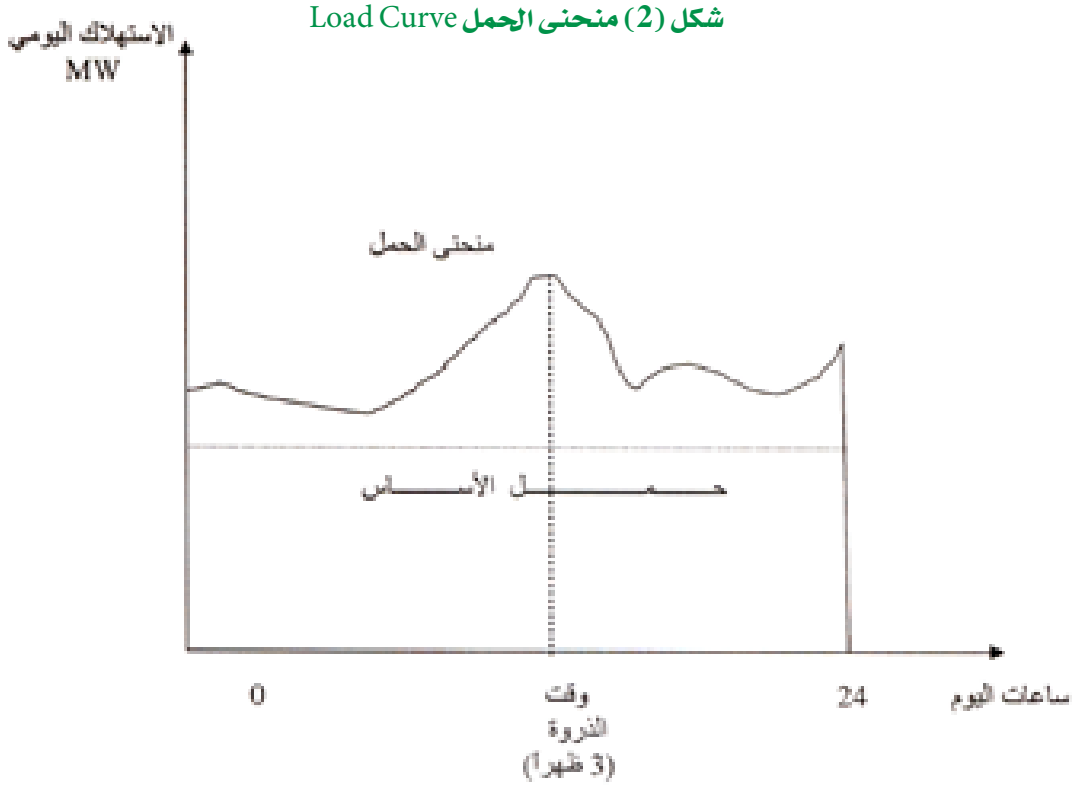
اليورانيوم عن طريق دورة الوقود؛ مما يسهل الحصول على القنبلة الذرية.

رابعاً: اقتصاديات الطاقة الكهرونووية

الكهرباء صناعة مرتبطة بالطلب (Demand Driven) فنمط الطلب ومساره اليومي والموسمي له دور مباشر في تحديد تكلفة الإنتاج؛ حيث إن النظام الكهربائي Electricity System مصمم لتلبية الطلب عند أقصى مستوى له حسبما يمثله منحنى الحمل (Load Curve) أي تلبية الطلب في وقت الذروة حتى لو كان هذا الوقت هو عدد قليل من الساعات. فإذا لم تتم مقابلة هذا الطلب في ساعة الذروة، فإن النظام الكهربائي سينهار بشكل انقطاع الكهرباء جزئياً أو حتى كلياً عن الشبكة، وقد يسبب تكاليف إضافية نتيجة الأضرار الفنية للشبكة نفسها. فشكل منحنى الحمل وكذلك وقت الذروة يختلفان من دولة إلى أخرى أو من منطقة جغرافية إلى أخرى حسب طبيعة الطقس والمواسم بها؛ لذا فإن منحنى الحمل في شكل رقم 2 يوضح سلوك الاستهلاك خلال يوم معين في دولة مثل المملكة التي يمكن تعميمها – إلى حد كبير – على جميع المستهلكين خلال العام.

من مخاطر الطاقة الكهرونووية
استخدام الوقود النووي
في محطات التوليد

شكل (2) منحنى الحمل Load Curve



المحور الأفقي يوضح عدد ساعات اليوم (24 ساعة)، ويوضح المحور الرأسي حجم الاستهلاك لكل ساعة من ساعات اليوم، فبداية اليوم يكون الاستهلاك منخفضًا (MW2)، ولكن مع تزايد النشاط اليومي يتصاعد المنحنى حتى يصل إلى ذروته عند فترة ما بعد الظهيرة (10 MW في الساعة 3 ظهراً)، ثم يبدأ في التناقص حتى يصل إلى MW2 نهاية اليوم، وهذا يعني أن هناك حداً أدنى للاستهلاك في يوم عادي من السنة هو MW2 يسمى حمل الأساس (Base Load)، وهو أقل طلب مستمر بغض النظر عن وقت الاستهلاك أو موسمه؛ مما يشكل طلباً ثابتاً يمكن توقعه خلال فترة زمنية معقولة.

إن مفهوم حمل الأساس مرتبط باقتصاديات الطاقة الكهرونووية؛ حيث إن طبيعة عمل المفاعلات النووية وقدرتها على العمل بشكل مستمر فترة طويلة (عدا وقت محدد للصيانة)، بالإضافة إلى أن انخفاض تكاليفها التشغيلية (المتغيرة) يجعلها قادرة على تلبية هذا الطلب طوال العام، ثم تصبح قادرة على خفض تكاليفها المتوسطة من خلال الاستفادة من اقتصادات الحجم (Economies of Scale)؛ لذا فإن زيادة حجم الاستهلاك وهو المساحة تحت منحنى المحمل تؤدي إلى ارتفاع ما يسمى معامل الحمل (Load Factor). (انظر الإطار رقم 1).

من ناحية أخرى فإن محطات الكهرباء التي تستطيع أن تنتج كميات كبيرة بشكل مستمر خلال العام ترفع استغلال قدرتها الإنتاجية المصممة؛ مما يحسن معامل السعة Capacity Factor؛ ويعكس استغلالاً أفضل لهذه القدرة الإنتاجية. فتلبية جزء كبير

تجمع الطاقة الكهرونووية بين إنخفاض التكاليف الرأسمالية والتشغيلية

من حمل الأساس هو أحد أسباب ارتفاع معامل السعة لمحطات الطاقة الكهرونووية التي تصل إلى 80% وهي نسبة مرتفعة جداً مقارنة بمحطات الكهرباء العاملة على مصادر الوقود التقليدية التي لا يتجاوز معامل السعة لديها 50% كحد أقصى.

التكاليف الرأسمالية والتشغيلية للطاقة الكهرونووية:

تتصف الطاقة الكهرونووية - دائماً - بأنها تجمع بين تكاليف رأسمالية (ثابتة) مرتفعة جداً وتكاليف تشغيلية (متغيرة) منخفضة جداً مقارنة بمحطات الطاقة الكهربائية القائمة على مصادر أخرى للطاقة مثل: الفحم، والبترول، والغاز. فارتفاع تكاليفها الرأسمالية (التكاليف الثابتة) هو نتيجة لحجم الاستثمارات الضخمة اللازمة لبناء المحطة مع إضافة تكاليف النفايات وانتهاء الخدمة، بينما تكون تكاليفها المتغيرة منخفضة؛ لانخفاض أسعار اليورانيوم وهو الوقود الرئيس لهذه المحطات.

تتكون تكلفة توليد الطاقة الكهرومائية أساساً من التكاليف الرأسمالية بنحو 80%، بينما تشكل تكاليف الوقود والنفقات التشغيلية ما لا يزيد على 20%؛ حيث تكون تكلفة وقود اليورانيوم هي أكبر جزء من هذه التكاليف، ولكنها تشكل فقط 4% إلى 5%

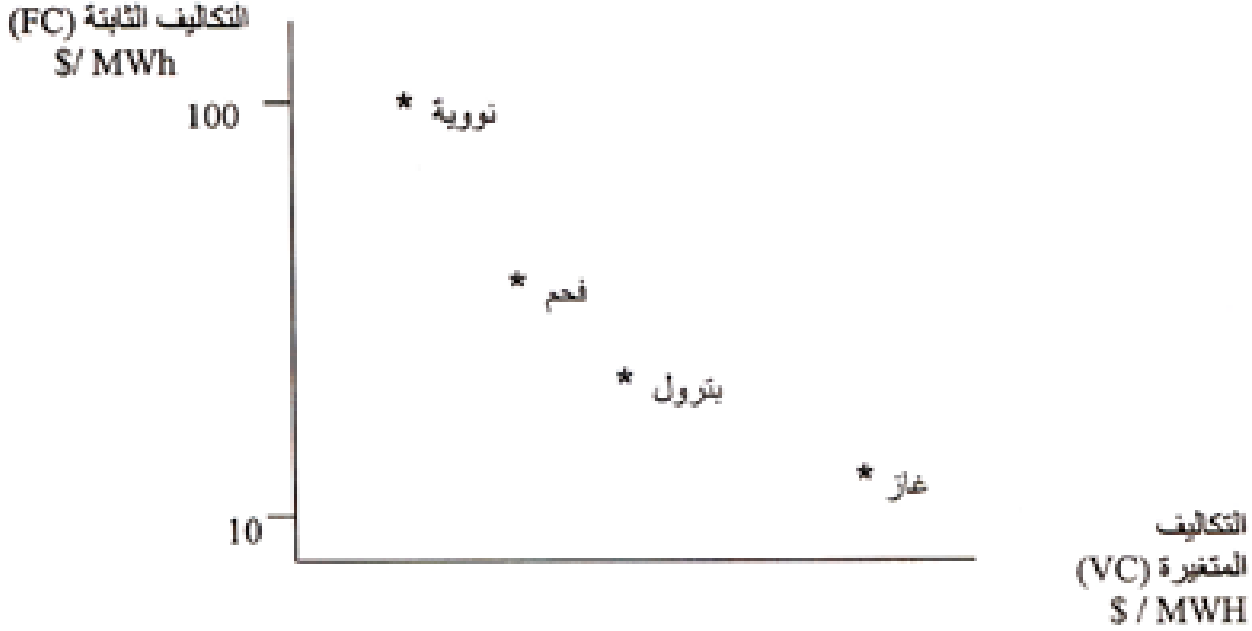
إطار رقم (1) ارتباط حمل الأساس باقتصاديات الطاقة الكهرونووية

معامل الحمل (LF) = متوسط الاستهلاك خلال الفترة / أقصى استهلاك (حمل) في الفترة

معامل السعة (CF) = عدد وحدات الكهرباء المنتجة فعلاً خلال الفترة / عدد الوحدات التي يمكن إنتاجها عند التشغيل الكامل والمستمر خلال الفترة نفسها

المحطات الكهرونووية الجديدة مصممة لتعمل بشكل أكثر كفاءة من السابق

شكل (3) التكاليف الثابتة والمتغيرة لمحطات الكهرباء حسب مصدر الوقود المستخدم



من إجمالي تكاليف التوليد؛ لذا فإن تكلفة الوقود تتأثر بشكل مباشر بالتغيرات في أسعار اليورانيوم، ولكن تكلفة التوليد لا تتأثر بهذه الأسعار إلا عند مستويات عالية؛ مما يجعل الخيار بين محطات الطاقة الكهرونووية والمحطات التقليدية خصوصاً الفحم أكثر صعوبة.

وعلى الرغم من وجود تحسن كبير في اقتصادات الطاقة الكهرونووية من حيث انخفاض التكاليف في كلا النوعين، إلا أن المقارنة النسبية مع المصادر الأخرى ما زالت سارية، فمن حيث متوسط التكلفة لكل كيلووات/ساعة نجد أنه عام 2005 الطاقة الكهرونووية هي أقل تكلفة من غيرها (في الولايات المتحدة مثلاً)، حيث تبلغ التكلفة 1.72 سنت، بينما يأتي بعدها الفحم الحجري 2.21 سنت، ويصل الغاز إلى 7.21 سنت، بينما البترول هو الأعلى حيث يصل إلى 8.1 سنت.

فالمحطات الكهرونووية الجديدة مصممة لتعمل بشكل أكثر كفاءة من السابق؛ حيث إن تكاليفها التشغيلية في انخفاض مستمر، خصوصاً أن حجم الاستثمارات في أعمال الصيانة (Refurbishment) من خلال تقديم الخدمات الميكانيكية والكهربائية لمحطات التوليد وتركيب الأنابيب المرتبطة بها أقل بكثير من تكلفة المحطات التقليدية، كما أن إنتاج المحطات الكهرونووية الحالية قد تم التمكن من زيادته عن طريق رفع سعتها الإنتاجية المصممة (Capacity Up-rates)، وتهيئتها للعمل بشكل مستمر لفترات طويلة أكثر من السابق.

إن تنافسية المحطات الكهرونووية مع المصادر الأخرى تعتمد على ميزة الوقود؛ لذا فإن تأخير بناء المحطات الكهرونووية وتشغيلها، بالإضافة إلى عدم توافر البنية الأساسية، خصوصاً في الدول النامية يزيد تكاليفها الرأسمالية، ويضعف هذه القدرة

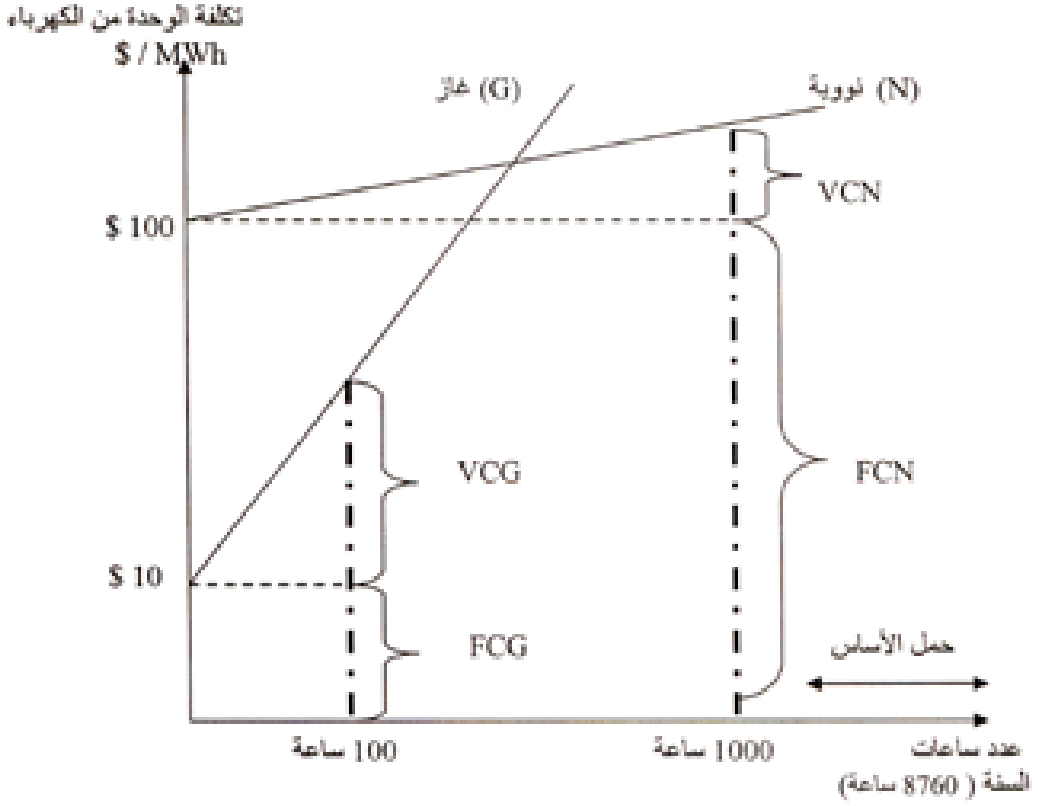
المحطات الكهرونووية تصبح أكثر كفاءة عند التشغيل المستمر لساعات طويلة خلال السنة

التنافسية. وعلى الرغم من هذه الإشكالات إلا أن ميزة انخفاض التكاليف التشغيلية لها ما زالت من أكبر أسباب جعل الطاقة الكهرونووية أفضل مصادر الكهرباء من حيث الكفاءة الاقتصادية؛ مما يجعلها مصدراً لا يمكن تجاهله مستقبلاً، خصوصاً مع تزايد التوجه إلى تقليل الاعتماد على مصادر الطاقة التقليدية.

إن قدرة المحطات الكهرونووية على العمل بشكل شبه مستمر يمكنها من تحقيق خفض في متوسط كلفتها، والاستفادة من اقتصاديات الحجم (Economies of Scale)، بينما انخفاض كلفتها التشغيلية بسبب انخفاض كلفة الوقود يجعل تكاليفها الإضافية أو التكاليف الحدية (Marginal Costs) منخفضة جداً.

عند مقارنة هذه السمات في تكاليف الإنتاج مع المحطات التقليدية القائمة على الفحم أو البترول أو الغاز نجد كما في شكل (3) أنه في ظل مستوى معين من أسعار الوقود فإن الطاقة الكهرونووية هي الأعلى من حيث التكاليف الثابتة (تكلفة السعة

شكل (4) التكاليف الثابتة والمتغيرة لساعات تشغيل المحطات النووية والغازية



تزيد تكاليف المحطات الغازية بحدة خلال تشغيلها ساعات قليلة

المصممة) والأقل من حيث التكلفة التشغيلية، وهو على العكس تماماً من المحطات الكهربائية القائمة على الغاز، خصوصاً البترول والفحم.

مقارنة المحطات الكهرونووية مع المحطات الأخرى

عند مقارنة تأثير هذه التكاليف من حيث عدد الساعات التشغيلية نجد أن المحطات الكهرونووية تصبح أكثر كفاءة عند التشغيل المستمر لساعات طويلة خلال السنة؛ لتلبية الطلب الأساسي، بينما المحطات الغازية تصبح أكثر كفاءة، خصوصاً مع ارتفاع أسعار الغاز عند التشغيل لساعات محدودة فقط لمواجهة طلب وقت الذروة، أما محطات الفحم والبترول فتقع بين هاتين الحالتين، وتسهم في تكوين مزيج من مصادر الطاقة المتاحة للنظام الكهربائي.

يوضح شكل (4) أن تكاليف السعة أو التكلفة الثابتة (Fixed Cost) تكون عالية، وقد تصل مثلاً إلى 100 دولار لكل MW من القدرة المركبة للمحطة الكهرونووية، بينما هي فقط 10 دولار لكل MW للمحطات الغازية، ولكن عند التشغيل ساعات قليلة، فإن خط تكاليف المحطة الكهرونووية يتصاعد بشكل متدرج؛ لأن الساعات الإضافية التشغيلية تضيف تكاليف ضئيلة فقط (تكاليف وقود منخفضة) أي أن تكلفتها الإضافية (الحدية) منخفضة جداً.

أما المحطات الغازية فإن خط تكاليفها يتصاعد بحدة لمجرد تشغيلها ساعات قليلة؛ لأن تكلفة التشغيل (تكلفة الوقود بشكل أساسي) تكون عالية أي أن التكاليف الإضافية (الحدية) مرتفعة جداً؛ مما يجعل هذا النوع من المحطات مناسباً للتشغيل في وقت الذروة المرتبطة بكلفة عالية، ولكن فقط لساعات معدودة خلال العام. أما شكل (5) فيوضح المقارنة عند إضافة المحطات العاملة إلى البترول والفحم، وهما حالتان متوسطتان بين الطاقة الكهرونووية والغاز كحالتين متضادتين.

الطاقة الكهرونووية والتخصيص:

إن التوجه التاريخي للطاقة الكهرونووية منذ الخمسينيات وأواخر الستينيات الميلادية يعود إلى أسباب عدة منها تسارع اكتشاف مناجم جديدة غير مكلفة لكميات تجارية من اليورانيوم؛ مما دفع إلى الاستفادة منه في التصنيع العسكري، وكذلك المجال المدني في الطب وتوليد الكهرباء. أما السبب الثاني فكان متأثراً بشكل مباشر بارتفاع أسعار البترول منذ بداية السبعينيات الميلادية ومحاولة تطوير مصادر بديلة للطاقة، ولكن إشكالات السلامة ومحاذير الإشعاعات النووية مع انخفاض أسعار النفط في الثمانينيات الميلادية أديا إلى تراجع الاستثمارات في الطاقة الكهرونووية. أما تأثير التوجه في أغلب دول العالم نحو تخصيص قطاع الكهرباء وإنشاء أسواق حرة للتبادل التجاري، فإنه لم يتضح بعد؛ لتردد القطاع الخاص في الاستثمار – بشكل كبير – في هذه الطاقة ذات المخاطر المالية العالية.

إن هذه المخاطرة المالية تعود إلى أنه بجانب ارتفاع حجم التكاليف الرأسمالية اللازمة فطول فترة الإنشاء التي تصل إلى أكثر من سبع سنوات أحياناً، وكذلك امتداد العمر الافتراضي لمحطات الطاقة الكهرونووية إلى نحو أربعين سنة يجعل فترة استرداد رأس المال طويلة جداً وتعرض المشروع لتقلبات أسعار الفائدة وأسعار الصرف العالمية؛ لذا فإنه ليس مفاجئاً أن نجد أن تجربة بريطانيا الناجحة عالمياً في تخصيص صناعة الكهرباء لم تشمل شركة برتيش إنرجي British Energy للطاقة الكهرونووية؛ لذا اضطرت الحكومة البريطانية إلى إبقائها تحت إشرافها، وحتى محاولة تسويقها لدول نفطية خليجية مقابل دخول استثمارات بريطانية في قطاع البترول والغاز الخليجي.

كما أن تجربة فرنسا في هذا المجال تدل على استمرار خضوع صناعة الطاقة بشكل عام والكهرونووية بشكل خاص للقطاع الحكومي أو ضرورة وجود ضمانات وإعانات حكومية

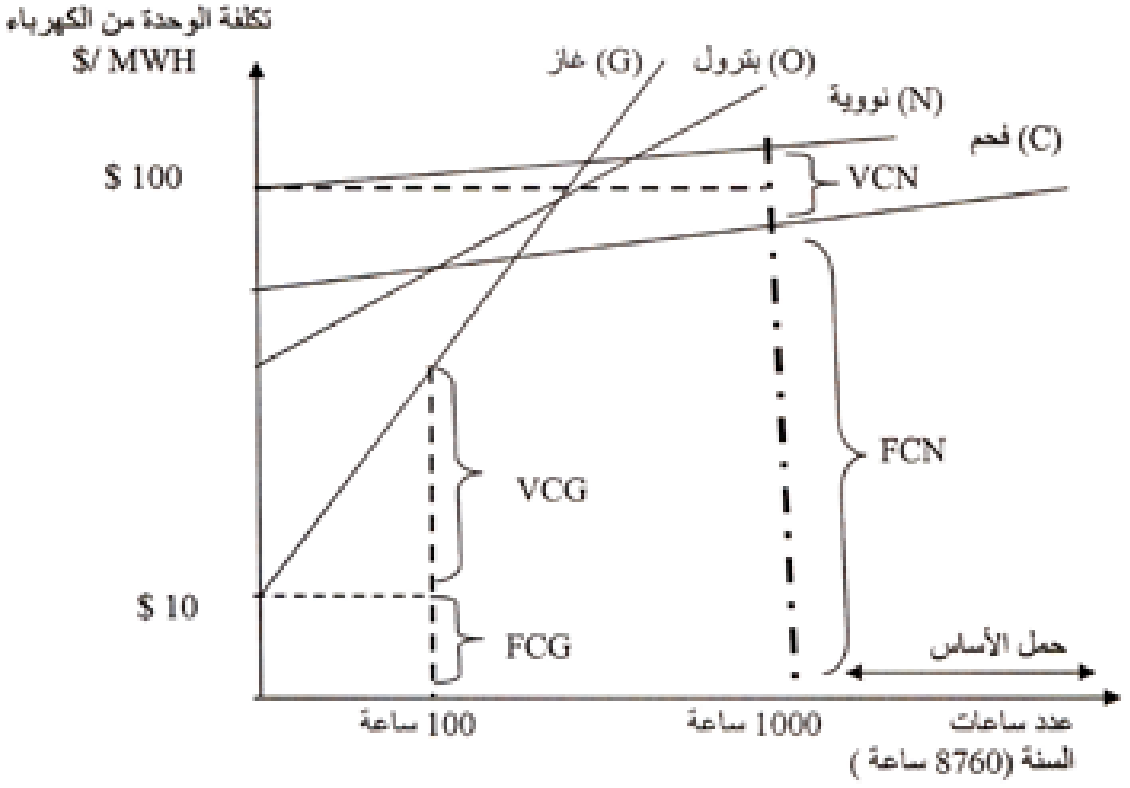
أدى إنخفاض أسعار النفط في الثمانينيات إلى تراجع الاستثمارات في الطاقة الكهرونووية

ودعم للقطاع الخاص؛ مما قد يؤدي إلى توسع الاستثمارات في هذه الطاقة مستقبلاً، كما أن التجربة في الولايات المتحدة تدل على أنه من الممكن أن تنجح الطاقة الكهرونووية - على الرغم من تردد القطاع الخاص - إذا توافرت الضمانات المالية وظروف السوق المناسبة.

الطاقة الكهرونووية وأسواق الكهرباء:

إن الظروف الخاصة بأسواق الكهرباء في تغير نحو مزيد من التبادل التجاري للكهرباء كسلعة وليس كما كان سائداً في السابق بالنظر إلى الكهرباء كخدمة عامة تخضع لتسعير حكومي وليس لقوى الطلب والعرض. إن طبيعة إنتاج الطاقة

شكل (5) التكاليف الثابتة والمتغيرة لساعات التشغيل للمحطات النووية، والغازية، والبترولية، والفحم

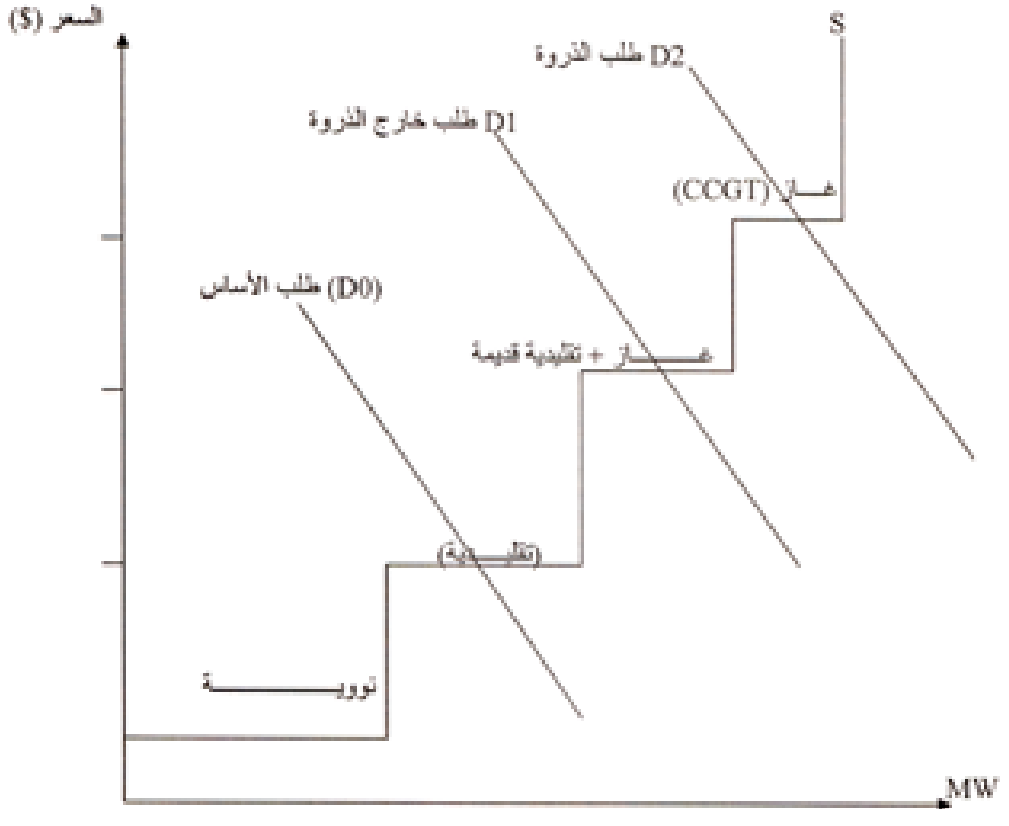


التحولات في سوق الطاقة جعلت من الكهرباء سلعة خاضعة لمتغيرات عرض السوق

الكهرونووية تنسجم – إلى حد كبير – مع هذا التوجه سواء كانت طريقة العقود الثنائية (Bilateral Contract) هي المتبعة في سوق الكهرباء؛ حيث تكون عقود الطاقة تتم مباشرة بين المحطات وكبار المشترين أو كانت السوق تحدد السعر الفوري (Spot Price) الذي يتميز بأن المحطات الكهرونووية ذات التكاليف الحدية المنخفضة تحقق فائض منتج عالياً يمكنها من تغطية تكاليفه الثابتة. لذا فإن وجود سوق حرة للكهرباء قد يكون أحد أسباب وجود مستقبل واعد لهذا النوع من الكهرباء على الرغم مما تواجهه الطاقة الكهرونووية من التحديات العملية والاتهامات المثيرة للجدل.

إن سوق الكهرباء التنافسية الحرة (إذا عمل بها) تقوم نظرياً على أن السعر في السوق يتحدد من تفاعل عوامل الطلب والعرض أي أن السعر يصبح هو السعر التوازني الناتج من تقاطع منحنى الطلب مع خط العرض وليس تحت نطاق تعرفة حكومية. كما يتضح من الشكل رقم (6) تتشكل السوق من جانب الطلب (منحنى الطلب D) وجانب العرض (منحنى العرض S)؛ حيث يشكل منحنى الطلب رغبات المستهلكين المختلفة في الحصول على وحدة من الكهرباء عند أسعار مختلفة، كما أن هناك أكثر من منحنى للطلب يعكس الفترة التي يتم فيها طلب الكهرباء خلال اليوم، فهناك فترة طلب أساسي منخفض جداً (D0)،

شكل (6) سوق الكهرباء ومساهمة المحطات حسب نوعية مصدر وقود التوليد



تجربة فرنسا في مجال الطاقة الكهرونووية تؤكد خضوع صناعة الطاقة للقطاع الحكومي

وطلب أعلى ولكنه خارج وقت الذروة (D1)، وطلب عالٍ جداً في وقت الذروة (D2).

أما جانب العرض فإنه مرتبط بمستوى التكاليف الحدية (الإضافية) التي تواجهها محطات الطاقة المختلفة ورغبات المنتجين المختلفة في إنتاج الكهرباء عند أسعار مختلفة. نظراً للاختلاف في التكاليف الثابتة والمتغيرة ومن ثم الحدية كما سبق ذكره حسب نوعية المحطة المستخدمة، فإن مدير المنظومة الكهربائية (System Operator) يرتب المحطات الراغبة في الإنتاج وفق تدرج تكاليفها الحدية من الأقل للأعلى لمواجهة كل مستوى من مستويات الطلب؛ مما يجعل منحنى العرض (S) يأخذ الشكل المتصاعد على شكل درج كما يظهر في الشكل (6).

لذا نجد أن محطات الطاقة الكهرونووية توضع في البداية بسبب قدرتها على الإنتاج عند أي سعر مهما كان منخفضاً (في وقت طلب الأساس D0)؛ لأن تكاليفها الحدية منخفضة جداً وقريبة من الصفر، بينما تكون المحطات الأخرى التقليدية، خصوصاً القديمة ذات التكاليف الحدية المرتفعة عند مستويات طلب أعلى (D1). أما في وقت طلب عالٍ جداً في وقت الذروة مثل الطلب (D2)، فإنه يتم اللجوء إلى محطات ذات تكاليف حدية عالية جداً؛ لأنها محطات قديمة تعمل ساعات محدودة فقط، أو بسبب نوعية التقنية المستخدمة مثل المحطات ذات الدورة الغازية المركبة (CCGT).

خامساً: حاجة الدول النفطية إلى الطاقة الكهرونووية

هناك اتفاق عام على أن الدول غير النفطية لها مبرراتها للبحث عن مصادر بديلة سواء كانت كهرونووية أو من المصادر المتجددة مثل طاقة الرياح والطاقة الشمسية وكأن الدول النفطية مستثناة من هذه الحاجة، على الرغم من أن هذه الدول لديها مبررات اقتصادية لتنويع مصادر الطاقة أيضاً. خصوصاً في ظل عودة الحديث عن النضوب النفطي، وكذلك تزايد الطلب المحلي من النفط والغاز في هذه الدول؛ مما يخلق تنافساً بين الاستهلاك المحلى للطاقة والرغبة في التصدير. إن دول الخليج العربي تهدف إلى اللحاق بكثير من دول العالم من خلال اللجوء إلى مصادر طاقة بديلة؛ لتقليل الاعتماد على مصادر ناضبة كمصدر رئيس وربما وحيد للدخل؛ مما يجعل الطاقة الكهرونووية أحد الخيارات المتاحة والمجدية اقتصادياً.

عند المقارنة بين مصادر الطاقة المختلفة في منطقة الخليج العربي، فإن بعض التقارير تصنف الطاقة الكهرونووية كأرخص مصدر للطاقة؛ حيث تراوح التكلفة بين 8 و12 هللة لكل كيلو وات- ساعة مقارنة بتكلفة محطات الغاز التي تراوح بين 14 و22 هللة لكل كيلو وات- ساعة، خصوصاً أن التوجه الحالي هو لخيار الغاز كلقيم لمحطات الكهرباء؛ مما يبرر أخذ خيار الطاقة الكهرونووية جدياً كبديل مبرر اقتصادياً؛ لذا فإنه ليس

تحتوي أراضي المملكة على أكبر احتياطي نفطي في العالم

مستغرباً أن تهدف دولة خليجية مثل المملكة العربية السعودية إلى الحصول على الطاقة الكهرونووية قبل عام 2025، كما أن دولة عربية أخرى وهي مصر (دولة منتجة للنفط ومصدرة للغاز) لديها برنامج لتشغيل أول محطة للطاقة الكهرونووية عام 2015؛ لتلبية جزء مهم من احتياجاتها من الكهرباء.

الحالة السعودية:

تحتوي أراضي المملكة العربية السعودية على أكبر احتياطي من النفط في العالم الذي يصل إلى 264 بليون برميل من النفط الخام، أي ما نسبته أكثر من 21 % من الاحتياطات العالمية المؤكدة، (انظر الجدولين رقمي 9 و10) كما تحتل المرتبة الرابعة عالمياً في احتياطات الغاز الطبيعي التي تصل إلى أكثر من 253 تريليون قدم مكعبة أو نحو 4% من الاحتياطات العالمية المؤكدة. وعلى الرغم من كل هذا فإن هناك مسوغات اقتصادية واستراتيجية تتطلب تنويع مصادر الدخل القومي، وعدم الاعتماد على مصادر الطاقة القابلة للنضوب مثل البترول والغاز. لذا نجد أن التوجه نحو مصادر الطاقة الأخرى مثل الطاقة الكهرونووية والطاقة الشمسية مثلاً يصب في هذا الإطار، وهو أمر يسهم في تحقيق التقدم والنمو الاقتصادي ودعم مقومات التنمية المستدامة للوطن، خصوصاً مع توفر الموارد المالية والعائدة من إيرادات النفط التي تم تحقيقها في السنوات الأخيرة التي شهدت قفزة كبيرة في أسعار النفط.

إن التوجه إلى الطاقة الكهرونووية في المملكة يتناسق مع

جدول (9): أكبر 10 دول في احتياطات البترول عام 2007

م	الدولة	بليون برميل نفط	%
1	السعودية	264.2	21.3
2	إيران	138.4	11.2
3	العراق	115	9.3
4	الكويت	101.5	8.2
5	الإمارات	97.8	7.9
6	فنزويلا	87	7
7	روسيا	79.4	6.4
8	ليبيا	41.5	3.3
9	كازخستان	39.8	3.2
10	نيجيريا	36.2	2.9
	مجموع فرعي	1000.8	80.7
	جميع العالم	1237.9	100

المصدر: BP Statistical Review of World Energy 2008

يمثل الغاز بديل رئيسي للنفط في توليد الكهرباء

استراتيجيات تنمية وتطوير قطاع الطاقة بمختلف مجالاته وهي: البترول، والغاز، وكذلك صناعة الكهرباء. فتحقيق المحافظة على حصة البترول في الاستهلاك العالمي من الطاقة، وموقع المملكة المهم في السوق العالمية يتطلب استغلال النفط محلياً استغلالاً أمثل؛ لذا ينبغي تلبية الاحتياجات المحلية من المشتقات النفطية العديدة التي ليس لها بديل في الغالب، وذلك من خلال وضع أسعار اقتصادية تعكس التكلفة الحقيقية للإنتاج ومن ثم تسهم في ترشيد الاستهلاك المحلي، وهذا يعني أن زيادة القيمة المضافة للنفط تتطلب استخدام مشتقاته استخداماً صحيحاً وفق أسعار حقيقية تتناسب مع الأسعار العالمية لهذه المنتجات؛ مما يحقق فعلياً التوزيع الأمثل للنفط ومشتقاته بين الاستهلاك المحلي

جدول (10): أكبر 10 دول في احتياطات الغاز الطبيعي عام 2007

م	الدولة	تريليون قدم مكعبة	%
1	روسيا	104.57	25.2
2	إيران	981.75	15.7
3	قطر	904.06	14.4
4	السعودية	253.03	4
5	الإمارات	215.07	3.4
6	أمريكا	211.08	3.4
7	نيجيريا	186.99	3
8	فنزويلا	181.87	2.9
9	الجزائر	159.45	2.5
10	النرويج	104.57	1.7
	مجموع فرعي	3302.44	76.2
	جميع العالم	6263.34	100

المصدر: BP Statistical Review of World Energy 2008

زيادة القيمة المضافة للنفط تتطلب استخدام مشتقاته استخداماً صحيحاً

والتصدير إلى الأسواق العالمية. (انظر الجدول رقم 11).

يمكن اللجوء إلى الغاز كبديل للنفط في بعض الاستخدامات المحلية مثل توليد الكهرباء، وهذا يسهم في توفير قدر أكبر من النفط الخام للتصدير، ولكن هذا المسار قد يخلق مشكلات أخرى، حيث إن الغاز نفسه يمكن تصديره كسائل أو حتى استخدامه في قطاعات ذات قيمة مضافة عالية مثل صناعة البتروكيماويات التي تتميز بوجود سوق محلية وعالمية لمنتجاتها.

إن البيانات المتاحة حالياً توضح أن الغاز الطبيعي يتم توزيعه بين قطاعات عدة يأتي في مقدمتها توليد الكهرباء التي وصلت نسبتها إلى 40%، خصوصاً مع التوجه أخيراً نحو استخدام الغاز بدلاً من النفط الخام في توليد الكهرباء، ثم الصناعات البتروكيماوية بنسبة تصل إلى 28%، وتحلية المياه 16% وقطاعات أخرى تحصل على الباقي.

إذا كان تحقيق مرونة في إنتاج النفط الخام وتصديره يتطلب تشجيع الاستهلاك المحلي من الغاز الطبيعي، فإن الاعتماد على الغاز، خاصة في توليد الكهرباء قد يضيع فرصة استخدامه في الصناعات البتروكيماوية ذات العائد الاستثماري الأعلى، وتنتج منتجات متعددة مطلوبة محلياً وعالمياً. إن التوسع في استخدام الغاز في الكهرباء لارتفاع كفاءته الحرارية العالية يزيد التنافس محلياً على كمية الغاز المتوفرة للاستثمارات ذات القيمة المضافة العالية في صناعة البتروكيماويات، خصوصاً أن قطاع الكهرباء ما زال يعمل في ظل أسعار غير اقتصادية وهو في حاجة إلى مزيد من الوقت لتحسين كفاءته وخفض كلفته التشغيلية وتنويع مصادر تمويله.

جدول (11): الاستهلاك المحلي من البترول والغاز والمنتجات المكررة في المملكة العربية السعودية
(ألف برميل نفط مكافئ)

المنتج	1994	2004	*2010	2014 *
بنزين	76865	102682	138914	165657
ديزل	125326	158039	202113	227456
وقود نفاثات	17605	18206	22554	25913
الكيروسين	1894	2476	2925	3085
غاز البترول المسال	9085	11560	15055	16922
زيت الوقود	34818	120758	167503	167805
الإسفلت	5807	13615	19153	21116
مجموع المنتجات البترولية المكررة	283810	427336	568217	627954
الزيت الخام	79096	53193	198923	225765
الغاز الطبيعي	188000	315000	447125	502605
إجمالي استهلاك الطاقة	550911	813754	1214265	1356324

المصدر: شركة أرامكو السعودية. * متوقع

صناعة الكهرباء في المملكة في حاجة للبحث عن بدائل أخرى غير النفط والغاز

إن هذا يعني أن صناعة الكهرباء في المملكة هي - أيضاً - في حاجة إلى البحث عن بدائل أخرى غير النفط والغاز لدعم قدرات التوليد المطلوبة، خصوصاً مع نمو الطلب المحلي على الكهرباء بمعدلات تفوق 7% سنوياً مع وجود صعوبات في قدرات التوليد الحالية لتلبية هذا الطلب بموثوقية عالية، لذلك نجد أن هذه الصناعة اعتمدت منذ عام 1985، وما زالت تعتمد على الطاقة المستوردة من محطات التحلية التابعة للمؤسسة العامة للتحلية لسد جزء مهم من الطلب الكهربائي، خصوصاً في أوقات الذروة التي شهدت أخيراً بعض الانقطاعات المفاجئة.

من ناحية أخرى فإن إسهام محطات التحلية في تعويض النقص في حاجة قطاع الكهرباء لقدرات توليد إضافية هو - أيضاً - مرتبط باستهلاك الغاز؛ حيث إن قطاع تحلية المياه المالحة تشكل نحو 16% من الاستهلاك المحلي من الغاز الطبيعي، مما يعني أن محاولة تلبية الحاجات المحلية للطاقة قد يؤدي إلى توجيه الغاز ذي القيمة المضافة الأعلى إلى قطاعات

جدول (12): الطاقة الكهربائية المنتجة والمتاحة حسب نوع وحدات التوليد في المملكة العربية السعودية (ج.و.س)

البيان	2000	2005	2006	2007
توربينات بخارية	39012	71416	71131	78026
توربينات غازية	51392	60121	67543	70217
دورة مركبة مزدوجة	11261	15725	14762	14727
مولدات ديزل	1882	2952	2683	2372
الكهرباء المستوردة من محطات التحلية (نسبة مساهمة محطات التحلية٪)	21651 17.1%	21026 11.94%	22328 12.31%	20847 10.94%
مساهمة كبار المنتجين	993	4884	2987	4346
الإجمالي	126191	176124	181434	190535

المصدر: الشركة السعودية للكهرباء. التقرير السنوي 2007

لدى إيران برنامج طموح في مجال الطاقة الكهرونووية

ذات قيمة مضافة أقل، خصوصاً أن الأسعار الحالية للكهرباء (وكذلك الماء) هي مدعومة حكومياً، وتباع بأقل من تكلفة إنتاجها الحقيقية. ولذا فإن اللجوء إلى مصدر إضافي للطاقة الكهربائية مثل الطاقة الكهرونووية هو أمر مطلوب ومبرر من جوانب عدة أقلها الإسهام في سد الحاجة المتنامية للكهرباء بتكلفة منخفضة والإسهام في المحافظة على موارد المملكة من البترول والغاز الطبيعي الناضبين بطبيعتهما، والاستفادة منهما في مجالات أفضل اقتصادياً. (انظر الجدول رقم 12).

الحالة الإيرانية:

لمناقشة حاجة الدول النفطية إلى الطاقة الكهرونووية وتحليلها سوف يكون الاستنارة بالحالة الإيرانية ضرورياً. لأن إيران دولة نفطية لديها برنامج طموح في مجال الطاقة الكهرونووية يمكن الاستفادة منه من قبل الدول النفطية الأخرى. فالتعامل مع هذه القضية يتشعب إلى زوايا عدة. لأن البرنامج النووي الإيراني لم يبدأ في السنوات الأخيرة فقط. ولكنه يعود إلى أوائل السبعينيات، كما أنه أصبح مؤخراً مركز الاهتمام والتجاذب الاقتصادي والسياسي عالمياً. لذا فإن التركيز سوف يكون هنا على المبررات الاقتصادية لإيران؛ لمتابعة برنامجها النووي الطموح، وطرح وجهات النظر المتباينة حيال هذا القضية المهمة.

إن السؤالين المطروحين هما: هل إيران بحاجة إلى الحصول على الطاقة الكهرونووية؟ وهل هذا الهدف في مصلحتها الوطنية الحالية والمستقبلية، خصوصاً إذا كانت محاولة تحقيقه ستعرضها لعقوبات اقتصادية قاسية وربما عقوبات عسكرية مدمرة؟

إن الاتهام الموجهة إلى إيران هو أنها دولة ذات احتياطات كبيرة من البترول والغاز، فهي ليست بحاجة إلى الاستثمار في الطاقة الكهرونووية. ويمكن القول إن هذا الرأي يتجاهل عدداً من الدول الغنية في مصادر الطاقة بل هي مصدرة للنفط مثل بريطانيا وروسيا اللتين تعتمدان – أيضاً – على الطاقة الكهرونووية في سد احتياجاتهما من الكهرباء بنسبة كبيرة، وفي المقابل هناك دول أخرى مستوردة للطاقة مثل: ألمانيا، وفرنسا، واليابان ما زالت مستمرة في الاعتماد على الطاقة الكهرونووية على الرغم من التحذيرات منها. يرى المدافعون عن إيران أن احتياجاتها إلى الطاقة الكهرونووية قضية يمكن الدفاع عنها بقوة ووضوح على أساس مبررات تنموية واقتصادية وبيئية، يمكن استعراضها فيما يلي:

المبررات التنموية:

إن أغلب الدول المصدرة للنفط مثل إيران دول نامية تواجه تغيرات اجتماعية وسياسية، وكذلك نمواً سكنياً هائلاً دون توفر جهاز إداري قوي ونمو اقتصادي مستمر، بالإضافة إلى عدم جاهزية الكوادر الفنية والبنية الأساسية المتكاملة. في المقابل نجد أن الدول المستهلكة وأغلبها مستوردة للطاقة دول متقدمة اقتصادياً وتقنياً؛ مما يعني أن الدول النامية هي التي في حاجة إلى كل ما هو متوافر لديها لمواجهة المتطلبات التنموية للأجيال الحالية والقادمة. حيث إن النفط مصدر طاقة ناضب؛ لذا فإن إيران وغيرها من الدول النفطية تتطلع إلى تعظيم عوائد إيراداتها الذاتية لمواجهة متطلباتها التنموية، وهذا لا يمكن تحقيقه دون تنويع مصادرها، وعدم المجازفة بالاعتماد فقط على إيرادات النفط والغاز كمصدر لدخلها القومي وميزانيتها العامة.

إن أغلب الدول النفطية تعتمد على إيرادات نفطية؛ مما يجعلها عرضة للعديد من المشكلات مثل تأثرها بتقلبات أسعار

أغلب الدول المصدرة للنفط دول نامية تواجه تغيرات اجتماعية وسياسية

النفط ومخاطر الاعتماد على مصدر رئيس للدخل قد ينضب خلال فترة قصيرة. من ناحية أخرى، قد تكون هناك تأثيرات سلبية لنضوب النفط والغاز بشكل متسارع على الدول المستهلكة وصناعاتها البتروكيماوية؛ خصوصا إذا لم يتم تنويع مصادر الطاقة عالمياً بما في ذلك في الدول النفطية ذاتها.

فضرورة عدم الاعتماد على مصادر محدودة للطاقة ينطبق على كل من الدول المنتجة والمستهلكة للطاقة على حد سواء؛ حيث إن الاعتماد على مصادر الطاقة الخام يفقد الدول المنتجة فرصة الاستفادة من القيمة المضافة إلى منتجات البتروكيماويات الوسيطة التي يمكن تصديرها.

المبررات الاقتصادية:

إن أغلب حقول النفط الإيرانية قد أصبحت قديمة كما أن بعضها قد نضب فعلاً، بالإضافة إلى أن الثورة الإسلامية الإيرانية عام 1979م كانت سبباً في توقف الاستثمارات الكبيرة في القطاع على الرغم من أنه قد بدأت منذ عام 1997 بعض المحاولات الجادة لجذب الاستثمارات الكبيرة في حقول جديدة من النفط والغاز.

إن إنتاج إيران الحالي من النفط الذي يبلغ 4.2 مليون برميل ما زال أقل من مستواه قبل الثورة الإيرانية البالغ 6 ملايين؛ بسبب المقاطعة الاقتصادية، وتردد الاستثمارات الأجنبية؛ مما يزيد العبء على إيران في تطوير قطاع الطاقة لمواجهة متطلبات التصدير والاستهلاك المحلي معاً.

لقد قفز الاستهلاك المحلي الإيراني من النفط بمعدل نمو سنوي يصل إلى 8% منذ عام 1990، كما أن استهلاك الطاقة قد قفز بنحو 280% منذ عام 1980؛ مما يعني أن إيران قد تصبح دولة مستوردة للطاقة خلال سنوات عدة؛ مما يشكل خطراً حقيقياً؛ لأن إيران تحصل على 80% من عملتها الصعبة من إيرادات النفط التي تمثل 45% من الميزانية الحكومية. إن حدوث هذا السيناريو يشكل تحدياً لبرامج إيران التنموية؛ خصوصا أنه من المتوقع أن يصل عدد سكان إيران إلى 100 مليون نسمة قبل عام 2025، وما يعني ذلك من إشكالات اجتماعية وسياسية لها. حيث إن إيران تنتج حالياً نحو 3 بلايين دولار سنوياً من منتجات بتروكيماوية، وحيث إن الغاز سوف يكون مصدراً أكثر أهمية في العقود المقبلة، فإيران ستكون مهمة جداً لسد احتياجات آسيا وأوروبا من الغاز الضروري لصناعاتها البتروكيماوية.

يعتقد أن احتياطات اليورانيوم المكتشفة في إيران قادرة على إنتاج من الكهرباء ما يساوي 45 بليون برميل من النفط المكافئ؛ مما يعد حجماً ضخماً يساوي 50% تقريباً من احتياطاتها النفطية؛ وأن التوجه إلى الطاقة الكهرونووية يقلل الاعتماد على النفط والغاز محلياً، ويحد من استخداماتها لأغراض ذات قيمة

يزداد الطلب على الكهرباء في إيران ليصل إلى 7% سنوياً

مضافة منخفضة كلقيم لمحطات الكهرباء بدلاً من استخدامه في صناعة البتروكيماويات.

إن الطلب على الكهرباء في إيران يزداد بمعدل عالٍ يصل إلى 7% سنوياً؛ مما يجعل القدرة الكهربائية المركبة على مواجهة هذا الطلب تفوق كل التقديرات، وأنه حتى لو تم رفع العقوبات الاقتصادية وتدفقت الاستثمارات الأجنبية على إيران، فإنه لا يمكن بسهولة إضافة قدرة إنتاجية كافية في الأجل القصير وفي الوقت المناسب.

المبررات البيئية:

إن المعارضين للطاقة الكهرونووية يحتجون بأن كلفتها أعلى من غيرها فمثلاً إذا كان مفاعل بوشهر يكلف 1000 دولار للكيلو وات من القدرة المركبة، فإن ما يقابله هو 600- 800 دولار كيلو وات من القدرة المركبة للمحطات القائمة على الغاز الطبيعي التي تعد أرخص من غيرها. بالإضافة إلا أن هذه المقارنة تغفل ميزات انخفاض التكاليف التشغيلية التي تتمتع بها المحطات الكهرونووية، فهذه الأرقام المبسطة تتجاهل التكاليف الإضافية للخدمات الصحية لآثار التلوث البيئي الناتج عن البترول والغاز، فتكاليف إنتاج الكهرباء القائمة على الغاز، والبترول، والفحم تعكس تكاليف المواد الخام والتكاليف التشغيلية فقط، ولكنها تعكس هذه التكاليف الإضافية.

إن إيران تواجه فعلاً تكلفة بيئية تتمثل في التلوث المتزايد في مدن كبيرة مثل طهران الذي انعكس بوضوح في تدهور جودة البيئة المحيطة بالسكان. كما أن اعتماد الصناعات الوطنية على النفط والغاز له تأثير سلبي على نوعية المياه المتاحة للشرب؛ بسبب اختلاطها بالنفايات الصناعية؛ لذا فإن وضع هذه التكاليف في الحسبان يجعل تكلفة إنتاج الكهرباء من البترول والغاز أكبر بكثير مما يقدر فعلاً في الأسعار التي لا تعكس هذه التكاليف الاجتماعية.

من ناحية أخرى، فإن المصادر الأخرى للطاقة النظيفة ليست متاحة لإيران، فمثلاً الطاقة الشمسية تظل تقنيتها غير متطورة وتكاليفها غير مجدية للاستخدام بحجم كبير فيما عدا بعض الاستخدامات في المناطق النائية واستخدامات أخرى محدودة؛ مما يعني أن الخيار الوارد بقوة هو الطاقة الكهرونووية كمكمل للنفط والغاز وليس كبديل.

الآراء المعارضة:

هناك العديد من الآراء المعارضة للاستثمارات الإيرانية في برنامجها النووي التي يمكن تلخيصها في عدد من النقاط منها:

1- من المؤكد أن إيران تواجه نمواً سريعاً في استهلاك الطاقة، كما تواجه مشكلات بيئية، ولكن هل التوسع في الطاقة الكهرونووية هو الحل من الناحية الاقتصادية، خصوصاً أن إيران لديها احتياطات كبيرة من النفط والغاز، بالإضافة إلى وجود

يحتج المعارضون للطاقة الكهرونووية بمخاطرها البيئية

كميات كبيرة من الفحم الحجري.

2- إن تقادم حقول النفط الإيرانية هو أحد المبررات للتوجه إلى الطاقة الكهرونووية، ولكن المعارضون لمشروع إيران النووي يرون أن الحل في مزيد من الاستثمار بقطاع النفط والغاز وليس في الطاقة الكهرونووية المكلفة.

3 - يرى بعض المعارضين أن التخوف من تحول إيران إلى دولة مستوردة للنفط مبالغ فيه؛ لأن الاحتياطات المؤكدة قد ترتفع عند إضافة الاحتياطات المحتملة، كما أن جعل النفط أكثر كلفة سوف يشجع سياسات الكفاءة في استخدام الطاقة حتى في الدول المنتجة للطاقة، من خلال عزل المنازل واستخدام السيارات بشكل كفء.

بالطبع هذا الرأي لا يأخذ في الحسبان مطالبة الغرب بنفط رخيص، واستخدام سيارات ذات كفاءة وقود عالية؛ مما يعني أن هذه السياسات يجب مطالبة الدول المستهلكة بها قبل الدول المنتجة للطاقة.

4 - على الرغم من أن التكلفة الاجتماعية مثل تكاليف التلوث حقيقة لا يمكن تجاهلها، إلا أنه من المستحيل للطاقة الكهرونووية أن تحل محل المصادر التقليدية في تدفئة المنازل أو كوقود للسيارات، فكفاءة استهلاك الطاقة واستخدام الغاز النظيف قد يساعدان كثيراً في الحد من التلوث، كما أنه يجب عدم إغفال التأثيرات السلبية للنفايات الكهرونووية، بالإضافة إلى مشكلات السلامة المرتبطة بها.

5 - يرى المعارضون أن تخلف قطاع الطاقة وتدهور الاستثمارات فيه أمر واضح في إيران في العقود الماضية؛ لذا لا يوجد ضمان على أن عدم الكفاءة لن يطول الطاقة الكهرونووية أيضاً.

6 - يرى بعض المعارضين أن إيران لها الحق في تطوير برنامج سلمي للطاقة الكهرونووية، ولكن هناك شك في أن حرص إيران على استثمار مبالغ طائلة في برنامج تخصيب اليورانيوم هو من أجل إنتاج أسلحة نووية تزيد سلطتها الإقليمية ونفوذها في منطقة الشرق الأوسط والخليج العربي؛ مما دفع العديد من دول المنطقة، خصوصاً مصر ودول مجلس التعاون الخليجي إلى استخدام مبررات مشابهة للمبررات الإيرانية في المطالبة بتطوير برامج نووية خاصة بها، حتى لو تطلب ذلك وجودها تحت مظلة مراقبة دولية.

الخاتمة:

يهدف العالم - حالياً - إلى تنويع مصادر الطاقة، فبالإضافة إلى المصادر التقليدية من فحم، وبترول، وغاز إلا أن هناك توجه نحو مصادر أخري مثل: الطاقة الكهرونووية، والطاقة الشمسية، وطاقة الرياح والهيدروجين، ومقارنة بهذه المصادر تشكل الطاقة الكهرونووية المصدر الأكثر واقعية؛ لأنه قد تمت تجربتها في الماضي وما زالت تسهم فعلاً في تنويع مصادر الطاقة، بالإضافة إلى نظافتها وكفاءتها الاقتصادية، ولكن إشكالاتها تبقي في جوانب: الأمن، والسلامة، والتخوف من استخدام تقنيتها في التسلح النووي. إن العودة إلى الحديث عن الطاقة الكهرونووية يعكس - على الرغم من المحاذير والجدل المستمر حولها - تزايد أهميتها كمصدر أساسي للطاقة ذي جدوى اقتصادية واضحة سواء للدول المستهلكة (المستوردة

الطاقة الكهرونووية لا يمكن أن تصبح بديلاً كاملاً لمصادر الطاقة التقليدية

للطاقة) وكذلك الدول المنتجة (المصدرة للطاقة) في العالم، فاستفادة الدول المنتجة تتأتى من خلال القيمة المضافة من تصنيع مشتقات النفط الخام والغاز في الصناعات البتروكيماوية وغيرها، وتوفير الباقي للتصدير؛ للحصول على العملة الصعبة التي تحتاج إليها. فهذا التوجه سوف يؤخر حدوث سيناريو نضوب النفط، ويفيد الدول المستهلكة من نواحٍ عدة أهمها توفر اللقيم الرخيص لصناعاتها البتروكيماوية ذات الكلفة العالية أصلاً.

إن الطاقة الكهرونووية لا يمكن أن تصبح بديلاً كاملاً لمصادر الطاقة التقليدية، خصوصاً النفط الذي يتصف بكثرة مشتقاته واستخداماته في قطاعات اقتصادية مختلفة، إلا أنه يمكن أن يصبح مصدراً مكملاً في توليد الكهرباء بشكل كفء.

إن إدراك هذه الحقائق قد يكون الدافع وراء تفهم عدد من دول الخليج العربي (من ضمنها المملكة العربية السعودية) عندما بدأت الحديث عن دخول مجال الطاقة الكهرونووية وحتى البدء في الإجراءات العملية نحو الوصول إلى هذا الهدف خلال أقل من عشرين عاماً من الآن. لذا فإنه على الرغم من الانخفاض السريع مؤخراً في أسعار النفط، إلا أن الإيرادات والفوائض المالية المتحققة في الأعوام السابقة يمكن استثمار جزء منها في دعم برنامج نووي سلمي طموح يهدف إلى الإسهام في سد الحاجات المتزايدة إلى الكهرباء في المملكة. هذا التوجه يساعد كثيراً في استثمار إنتاج النفط الخام والغاز الطبيعي في قطاعات ذات قيمة مضافة عالية؛ مما يمكن المملكة من التوسع أكثر في التصدير والتواجد في الأسواق العالمية بشكل أقوى، خصوصاً في مجال الغاز وصناعة البتروكيماويات.

إن هذه الاستراتيجية سوف تدعم في نهاية المطاف الوصول إلى الأهداف المرسومة المتمثلة في تحقيق تنمية شاملة ومستدامة تفيد في زيادة رفاهية الأجيال الحالية والقادمة على حد سواء.

وأخيراً، تجدر الإشارة إلى أنه على الرغم من الميزات الاقتصادية التي تتصف بها الطاقة الكهرونووية، إلا أن الذي يحد من توسعها هو مشكلات الأمن والسلامة المرتبطة باستخدام تقنياتها، وكيفية التخلص من مخلفاتها الإشعاعية النووية الضارة بالبيئة والإنسان؛ لذا فإن مستقبل هذا النوع من الطاقة يعتمد – إلى حد كبير – على وجود اختراقات علمية واضحة تتعامل بشكل فعال مع هذه الإشكالات الخطيرة مماثل لأسلوب الطبقات الحصوية الذي تعتزم الصين تطبيقه في مفاعلاتها الجديدة التي تهدف أساساً إلى التقليل من النفايات ذات الإشعاعات النووية.

من ناحية أخرى، إن مدى نجاح الطاقة الكهرونووية مستقبلاً قد يعتمد على مدى استفادتها من التبادل التجاري لها في ظل توجه العالم في السنوات الأخيرة نحو فتح المجال لأسواق الكهرباء الحرة التي تكون عوامل الطلب والعرض فيها هي أساس القرارات المبنية على معايير الكفاءة الاقتصادية قبل كل شيء.

المراجع:

المصادر العربية:

■ دكتور حسين عبدالله، البترول العربي: دراسة اقتصادية سياسية (2003).

■ أحمد شريف عودة، الطاقة الذرية و استخداماتها. جامعة الملك عبد العزيز (1410).

المصادر الانجليزية:

- The New Economics of Nuclear Power, World Nuclear Association (2008).
- Energy: a crisis-a dilemma- or just another problem? Jesse S. Doolittle (1997).
- http://www.payvand.com/news/03/oct/1015.htm (Mohammad. Sahimi).
- http://www.mideasweb.org/log/archives/00000078.htm (Ami Isseroff).

تعقيب على دراسة: الطاقة الكهرونووية.. كفاءة اقتصادية ومحاذير إشعاعية

د. خليل زهر
مستشار في شؤون التنمية

تناول الكاتب موضوع الطاقة الكهرونووية من جوانبه المتعددة، فاستعرض تطور الطاقة النووية في سوق الطاقة العالمية والأسواق الإقليمية الرئيسة، سواء من جانب مصادر الإنتاج أو الطلب على الطاقة الكهربائية، كما استعرض العوامل الاقتصادية والتقنية المؤثرة في إنتاج الطاقة الكهرونووية ودورها في أسواق الطاقة المختلفة، علاوة على ذلك استعرض الكاتب إيجابيات وسلبيات الطاقة الكهرونووية من جوانبها الاقتصادية والأمنية والبيئية، وانتهى إلى تناول جدوى استحواذ هذه التقنية من قبل دول المنطقة العربية.

وفي ضوء شمولية المعالجة قد يكون من المفيد إلقاء مزيد من الضوء على بعض جوانب الموضوع التي تناولها الكاتب؛ بهدف

تعزيز الفائدة من هذا العمل الجيد والمتكامل.

الجانب الأول:

يخص التكلفة، سواء الرأسمالية أو المتكررة للطاقة النووية، فمن المهم الإشارة إلى أن التكلفة الدفترية لا تعكس في الوقت الراهن التكلفة كاملة، وذلك في غياب وجود حل دائم لموضوع التخلص من مخلفات الوقود السامة؛ حيث إن التكلفة الإجمالية لأي حل مستقبلي يجب أن تدخل في حسابات التكلفة الشاملة للطاقة النووية.

من جانب آخر، لا تشمل التكلفة الدفترية للطاقة النووية التكاليف التي تتحملها الحكومة سواء في إدارة دورة الوقود النووي وأمنها، علاوة على ما تحملته الحكومات من مصروفات على أنشطة البحث العلمي والتطوير بغرض تطوير هذا النوع من الطاقة ذات الاستخدام السلمي والعسكري معًا. وبالتالي فإن التكلفة الاجتماعية للطاقة النووية قد تكون أعلى بكثير من تكاليفها الدفترية الحالية.

الجانب الثاني:

يتعلق بعيوب الطاقة النووية أو سلبياتها التي أشار إليها الكاتب، والتي أسهمت حتى الآن في الحد من انتشار استخدام هذا النوع من الطاقة أو نموها. وفي هذا الإطار لا بد من الإشارة إلى أن بعض هذه السلبيات يرتبط أساساً بما يسمى (الجيل الثاني من المفاعلات النووية) الذي تنتمي إليه معظم المفاعلات التجارية العاملة حالياً. وقد يكون العامل الأهم من بين العوامل التي أشار إليها الكاتب الذي يسهم في إعادة الاعتبار إلى صناعة الطاقة النووية وإنعاشها، هو التطور التقني والهندسي الذي تم إنجازه خلال العقود الثلاثة الماضية في مجالات زيادة أمن المفاعلات وترشيد تصاميمها الهندسية؛

شهدت تصاميم المفاعلات النووية تطورات مهمة بعد الجيل الثالث

الإطار رقم (1) المفاعلات النووية التجارية أو مفاعلات الجيل الثاني

تعرف المفاعلات النووية عادة بمادة تبريد المفاعل ومادة ملطف التفاعل النووي. وتمثل المفاعلات التالية أكثر أنواع المفاعلات النووية انتشاراً وإنتاجاً للطاقة:

■ **مفاعل المياه المضغوط (Pressurized Water Reactor):**

وهو أكثر أنواع المفاعلات استعمالاً حول العالم لأغراض توليد الطاقة الكهربائية وللأغراض العسكرية، ويستعمل هذا النوع من المفاعلات المياه المضغوطة لتبريد التفاعل وتلطيفه، وتصل كفاءته إلى (31%)، وهذا يوازي كفاءة محطات التوليد التقليدية، ويستخدم هذا المفاعل اليورانيوم المخصب كوقود.

■ **مفاعل المياه في حالة الغليان (Boiling Water Reactor):**

كما في مفاعل المياه المضغوط، فإن المياه تستخدم للتبريد ولكنها في حالة الغليان، أي تحت ضغط أقل. كما أن هذا المفاعل يستخدم اليورانيوم ولكن بدرجة تخصيب أقل من مفاعل المياه المضغوط.

ويتميز هذا المفاعل بتصميم غير معقد، لكن من سلبياته أنه ذو دورة مائية واحدة، أي أن مياه المفاعل المشعة تدخل التوربين البخاري بخلاف مفاعل المياه المضغوط المزدوج الدورة؛ حيث يفصل بين الدورة المشعة وبخار التوربين ناقل للحرارة.

■ **المفاعل السوفيتي آر. بي. أم. كي (R.B.M.K):**

تم تصنيعه في الاتحاد السوفيتي السابق، ويتم استعماله في عدد من الدول الاشتراكية السابقة، وهو من حيث المبدأ شبيه بمفاعل المياه المضغوط، إلا أنه يختلف عنه في عدم وجود بناء مسلح حوله للحماية كما في المفاعلات الغربية، ويعود ذلك إلى أن هذا المفاعل كبير الحجم نظراً لاستخدامه لإنتاج البلوتونيوم لصنع القنابل النووية، بالإضافة إلى توليد الطاقة الكهربائية، وبالتالي فإن ضرورة التعامل مع الوقود دون وقف التفاعل يتطلب مساحة واسعة، ويحتاج هذا المفاعل إلى وقود اليورانيوم المخصب.

■ **مفاعل الديتريوم اليورانيوم الكندي CANDU- Canadian Deuterium Uranium Reactor :**

تم تطوير هذا المفاعل من قبل هيئة الطاقة الذرية الكندية عام 1950م، ويتم تبريد التفاعل بوساطة المياه الثقيلة (الديتريوم)، ويتميز بأنه يستعمل اليورانيوم الطبيعي غير المخصب، ويستعمل هذا النوع من المفاعلات في بعض الدول الأخرى مثل الهند.

هناك عدد من أنواع المفاعلات الأخرى لكنها ليست واسعة الانتشار ولم تحرز نجاحاً تجارياً لأسباب متعددة.

بهدف تخفيض تكاليف الإنشاء والصيانة والتشغيل؛ مما عزز ميزاتها التنافسية.

وتمثل التصاميم المطورة الحالية في مسيرة هذه التقنية، الجيل الثالث من المفاعلات النووية الانشطارية، التي ولدت في منتصف عقد الأربعينيات من القرن الماضي؛ حيث كان الجيل الأول الذي امتدت حقبته الزمنية حتى منتصف عقد الستينيات، عبارة عن مفاعلات تجريبية صغيرة الحجم كان الغرض الأساسي منها هو التأكد من إمكانية التشغيل التجاري في توليد الطاقة. وقد تبع هذه المرحلة، مرحلة الجيل الثاني، (انظر الإطار رقم 1)، والتي شهدت إنشاء المفاعلات النووية ذات القدرة العالية وهي المفاعلات التجارية العاملة حالياً. وقد امتدت الحقبة الزمنية لهذا الجيل حتى منتصف عقد التسعينيات. أما

إن جميع محطات الطاقة النووية الحالية والمطورة لا تحل مشكلة مخلفات الوقود النووي

المفاعلات المطورة بفضل التقدم التقني والهندسي المشار إليه، وما هو متوقع من تطورات أخرى خلال السنوات المقبلة، فإنها تشكل الجيل الثالث، والتي يتوقع أن تمتد حقبته الزمنية حتى عام 2030م، أي أن محطات الطاقة النووية تحت الإنشاء أو التخطيط ستنتمي إلى الجيل الثالث.

إن القاسم المشترك بين محطات الطاقة النووية الحالية (الجيل الثاني) والتصاميم المطورة للجيل الثالث، هو أن جميعها لا توفر حلاً جذرياً مستداماً لمشكلة مخلفات الوقود؛ لأن جميعها تعتمد على ما يسمى (دورة الوقود المفتوحة)، فالوقود بعد استعماله يجب التخلص منه بأمن وسلامة، خاصة أن مكوناته تبقى مشعة وسامة إلى ما يزيد على ألف سنة، كما أن التخلص

الإطار رقم (2): لمحة عن برنامج تطوير الجيل الرابع من المفاعلات النووية:

يتم تطوير الجيل الرابع من قبل ما يسمى (مجموعة دول المنتدى الدولي للجيل الرابع)؛ حيث اختارت مجموعة نظم مفاعلات للتطوير لتحقيق الأهداف التالية من خلالها:

■ **توفير طاقة نووية مستدامة:**

وذلك بالتأثير الإيجابي على البيئة من خلال إحلال الطاقة النووية الكهربائية والهيدروجين محل الطاقة الأحفورية، وتقليل المخلفات النووية إلى أقل قدر ممكن، ومعالجة إشعاعاتها بحيث يسهل التخلص منها جيولوجياً، والاستفادة الكاملة من الوقود النووي من خلال استخراج الطاقة كاملة منه وبالتالي توفير الوقود الكافي لقرون مقبلة.

■ **توفير طاقة نووية منافسة اقتصادياً:**

يتحقق ذلك من خلال تطوير تقنيات مناسبة لتعزيز الكفاءة والإنتاجية وترشيد التصاميم الهندسية، بالإضافة إلى تخفيض المخاطر الاقتصادية للمشروعات النووية من خلال ابتكار وسائل تصنيع وإنشاء فعالة، وإتاحة إنتاج الهيدروجين والمياه المحلاة، والتدفئة المركزية وغيرها من الخدمات.

■ **توفير طاقة نووية آمنة ذات اعتمادية:**

وذلك من خلال استعمال سمات أمن ذاتية وشفافة يمكن فهمها واستيعابها من قبل غير الاختصاصيين، وتعزيز ثقة الرأي العام في أمن الطاقة النووية.

■ **مقاومة الانتشار النووي وحماية المنشآت النووية:**

وذلك من خلال تطوير مقاومة فعالة للانتشار تستند إلى معوقات ذاتية للنظم ووسائل حماية خارجية، وزيادة الحماية المادية ضد الإرهاب بزيادة مناعة المنشآت النووية.

بناء القدرات التقنية النووية حاجة ضرورية في الاقتصاد الحديث

الدائم منه في تكوينات جيولوجية – كما هو الاتجاه حالياً – يثير جدلاً كبيراً، علاوة على أن تخزين هذه المخلفات مؤقتاً حتى يتم التخلص الدائم منها، يبقي على خطر التلوث الإشعاعي قائماً وكذلك على إمكانية وقوع المخلفات في أيدي منظمات، أو جماعات إرهابية، أو دول تهدد السلام والأمن العالميين؛ لذا هناك مسار تقني وهندسي آخر يهدف إلى تطوير جيل رابع من المفاعلات النووية الانشطارية، (انظر الإطار رقم 2)، يعالج السلبيات المشار إليها أعلاه.

تتميز تقنية الجيل الرابع، بين أشياء أخرى، باعتمادها على دورة الوقود المقفلة، وهي بمثابة إعادة معالجة المخلفات؛ لاستخراج الوقود منها مجدداً لإعادة استعماله؛ حيث يتكرر ذلك إلى أن تتقلص المخلفات بقدر كبير لتقتصر على بعض المواد السامة التي يتم معالجتها لإزالة سمومها، ومن ثم التخلص منها بشكل دائم. ويتوقع لمفاعلات الجيل الرابع أن تدخل الحيز التجاري نحو عام 2030م في حال نجحت جهود البحث والتطوير الجارية حالياً والمخطط لها.

وتجدر الإشارة في هذا المضمار إلى أن هذه الجهود تقوم في إطار شراكة عالمية تحت مظلة الوكالة الدولية للطاقة الذرية وتشترك فيها حالياً عشر دول هي: الأرجنتين، والبرازيل، وكندا، وفرنسا، واليابان، وكوريا الجنوبية، وجمهورية جنوب أفريقيا، وسويسرا، والمملكة المتحدة، والولايات المتحدة الأمريكية.

ومن المهم الإشارة – في هذا السياق – إلى أن تقنية الجيل الرابع تضاعف عمر احتياط اليورانيوم بما يتيح لهذه التقنية لعب دور أساسي في أسواق الطاقة المستقبلية لفترة طويلة جداً تمتد إلى القرن المقبل.

الجانب الثالث:

الذي نود توضيحه هو ما يتعلق بالدوافع إلى استحواذ التقنية النووية؛ حيث إن تلك الدوافع لا تقتصر على تطوير بدائل لمصادر الطاقة المستخدمة، أو تنويع مصادرها، أو استخدامها لأغراض غير مدنية فحسب، بل – أيضاً – لدوافع قد تفوق في أهميتها تلك المتعلقة بإنتاج الطاقة؛ نظراً لأن استخدامات التقنية النووية تنتشر في معظم قطاعات الاقتصاد الحديث، وتشكل أكثر التقنيات تأثيراً في حاضر ومستقبل التنمية الاقتصادية والاجتماعية، فالتقنية النووية تستخدم حالياً في عدد من المجالات، قد يكون مجال الصحة أكثرها دلالة؛ إذ يكاد لا يخلو مستشفى أو مركز صحي رئيس من قسم للأشعة (Radiology)، كما تستعمل التقنية النووية العديد من المجالات الحيوية مثل: الإدارة المستدامة للأراضي، والاستعمال الكفء لمصادر المياه، وتطوير المحاصيل الزراعية وحمايتها، وتحسين إنتاجية الثروة الحيوانية وصحتها، وضمان أمن الغذاء والمنتجات الغذائية الحيوانية والنباتية، وصحة البشر، وموارد المياه، والبيئة الأرضية والبحرية، وعلوم فيزياء الجزئيات، ومراقبة العمليات الصناعية، وتقنية صناعة الأجهزة والسلع الفائقة الدقة، وغيرها.

كل ذلك يجعل من بناء القدرات في مجالات التقنية النووية، بما تشمله من أنشطة بحث وتطوير، ومختبرات، وجامعات متطورة، وقوى بشرية علمية وفنية، وغيرها، حاجة ضرورية في الاقتصاد الحديث. وفي ضوء التخصص والتكامل الذي يتسم به الاقتصاد العالمي، ومحدودية الموارد التي قد تتاح لأية دولة، علاوة على تعقيدات هذه التقنية، وتعدد أبعادها، وارتفاع متطلباتها من الموارد البشرية المؤهلة والموارد المادية، تدفع – كما هي الحال في جهود تطوير الجيل الرابع من المفاعلات النووية الانشطارية – إلى التعاون بين الدول والمشاركة في هذه الجهود، مما يرفع احتمالات النجاح، ويقلص حجم المخاطر، ويضمن المشاركة في العائد من ثمار هذه الجهود سواء كانت مادية أو معنوية.

أحمد بن عبد العزيز الجمعي

تعقيب على دراسة: (الطاقة الكهرونووية.. كفاءة اقتصادية ومحاذير إشعاعية)

أبدت هذه الدراسة الثرية في المعلومات التي جرت في سياق سلس عن الطاقة النووية، وأظهرت جهداً تجلى في تكامل عناصرها، وشمولية في توفير الجداول الإحصائية اللازمة لإيضاح الفكرة ودعم القناعة بجدواها الاقتصادية. وكأية دراسة تنشر لا بد من وجود نقاط للاتفاق وأخرى للاختلاف. وفي هذا التعقيب لي بعض الوقفات السريعة وهي:

الوقفة الأولى: الأبعاد البيئية

يبدو أن كثيراً من الاقتصاديين والسياسيين ينبهرون بكفاءة المفاعلات النووية كمصدر بديل للطاقة وإنتاج الكهرباء، خاصة من ناحية التوفير الاقتصادي، لذا تميل إليه الحكومات لخفض ميزانيات توليد الطاقة بشكل اقتصادي. فمثلاً لنتخيل أن مقدار طن من اليورانيوم يولد طاقة حرارية حين انشطار ذراته تعادل ما ينتجه ما يزيد على مليون طن من الزيت، وهذا التناسب المغري جعل بعض الدول تتجه اقتصادياً نحو المفاعلات النووية بسبب الجدوى الاقتصادية دون الاكتراث بما يحدث بعد ذلك، ولكن على الرغم من هذا التوفير المادي إلا أن المفاعلات النووية لها تكاليف ومحاذير عظيمة بيئية وغير بيئية يمكن عرضها على النحو التالي:

■ إن بناء هذه المفاعلات يحتاج قدراً كبيراً من الاحتياطات مثل: سمك جدران المفاعل؛ حيث يجب ألا يقل عن 16سم من الفولاذ الكربوني الصلب، ويجب ألا يقل عرض جدران مبانيها عن ثلاثة أمتار من الكتل الأسمنتية المسلحة، مما يكلف الكثير بالإضافة إلى ضرورة مراقبة صحة هذه المواصفات ومطابقتها لعوامل البيئة في المنطقة التي يبنى فيها ذلك المفاعل.

إن إمدادات التغذية بهذا الوقود ليست اعتيادية، فلها بروتوكولات بمواصفات مكلفة تستمر مع كل إمدادات التغذية.

■ إن الوقود حين انشطاره يولد مخلفات أو نفايات مشعة خطيرة جداً، وعلى الرغم من خطرها إلا أنه لمقتضيات اقتصادية بحتة يجري البحث فيها عن صيغة نظائر اليورانيوم من (البلوتونيوم) التي لم تستهلك أو لم تنشطر ذراتها في التفاعل؛ لكي يعاد استخدامها مرة أخرى، وهذا يجري ضمن سلوك إجرائي مرهق؛ لما له من محاذير، حيث المخاطر والتأثيرات الإشعاعية.

■ كما يشكل العمل في ميدان المفاعل النووي أمراً مخيفاً، ولذلك توجد صعوبة في إيجاد الكفاءات الذكية التي تعمل في هذا المجال الخطر.

■ التخوف من المخاطر والتأثيرات البيئية التي ترافق وجود المفاعل فيما لو حدث منه أي تسرب إشعاعي.

■ صعوبة التخلص من النفايات والمخلفات المشعة الناتجة عن الرماد النووي والمواد التي تم احتكاكها بهذه المواد المشعة.

■ التكلفة الباهظة لإجراءات الاحتياطات الصحية، وتصاعد الزيادات المالية التي تفرضها شركات التأمين كنوع من الضمان لاحتواء حوادث الإشعاع المدمرة.

■ قلق الأهالي في المدن القريبة من تلك المفاعلات على مستقبلها واحتراسهم المخيف منها.

هذه المحاذير وغيرها الكثير يجعل الإقدام على بناء مفاعلات نووية للاستخدام السلمي عبثاً وترفاً غير حضاري، خاصة حين تكون البدائل الموجودة أفضل وأكثر أمناً منها، وأوفر على المدى البعيد.

الوقفة الثانية: إغفال أهمية الطاقة الشمسية

لقد أغفلت الدراسة أهمية الطاقة الشمسية وهي طاقة رخيصة وصديقة للبيئة، وتعد المفاعلات الشمسية أهم المفاعلات السلمية الحديثة التي سلطت عليها الأضواء العالمية في وقتنا الحاضر؛ حيث إن هذا المفاعلات تقوم بتوليد الطاقة الكهربائية باستحلاب خلايا بلورات السيليكون أو ما جرى تسميته (الخلايا الشمسية). وهذا المصدر المهم للطاقة أغفلته الدراسة، وهو نتاج

للطاقة النووية العديد من المحاذير البيئية والفنية

فاعـل لتوفير الوهج الحراري المركز من الشـمس المباشـرة عن طريـق الانعكاس؛ حيث يكون كافياً لتوفير أشـعة مركزة بدرجة حرارة كافية لتشغيل المفاعل المولد للطاقة، ويطلق عليه (المفاعل الشمسي). (انظر شكل رقم 1).

لـذا فإن المجالات الآمنـة للطاقة والمتاحة لبنـاء المفاعلات الشمسـية التي جرى تشـييدها في كثير من الـدول المتحضرة توفـر خدمة راقيـة تدعم التنمية المسـتديمة، خاصة في مجال استخدامها في توليد الطاقة الكهربائية بشكل آمن.

لقـد نجحـت المفاعلات الشمسـية في جميـع دول أوروبا، واليابـان، والصـين، وألمانيا سـباقة في هذا المجـال، مما جعل مهندسيها يجدون التقدير والاحترام، ويتواجدون في كل مشروع؛ حيـث تبادر الدول الأخرى إلى دعوتهم كخبراء، والاسـتفادة من خبراتهم في هذا المجال، أو جلبهم كمهندسـين ومشـرفين على الفنيين.

ويمكن أن نورد بعض المعلومات عن مشروع (سالوكار لامايور) الإسباني؛ حيث تم تشييده بخبرات ألمانية في (سالوكار لامايور) جنـوب مدينة أشـبيلية الإسـبانية، وفكرة المشـروع تقوم على إنشـاء مفاعل يعتمد على تركيز أشعة الشـمس لتوليد الحرارة كبديل للحرارة الناتجة من التفاعل النووي؛ حيث تسـلط بتركيز علـى قلب هـذا المفاعل. يتكون المشـروع من برجين أساسـيين يستقبلان انعكاس أشعة الشمس من 624 مرآة عاكسة مخصصة (Heliostats)، وجميعها تعكس أشـعة الشمس تجاه هذه الأبراج (انظر شكل 2). هذا المشروع الجبار سينتهي العمل به بداية عام 2013 ليكون قادراً على توليد طاقة كهربائية تكفي لأكثر من 180

شكل رقم 1 المفاعل الشمسي

على دول الخليج العربية استغلال الطاقة الشمسية لوفرتها في المنطقة

ألف منزل ليخدم ما يقارب من 20 ألف نسمة.

إن هذا المشـــروع مبهر وجديد وفيه إبداع؛ لأن المرايا تعكس حرارة الشـــمس بشـــكل مركز لتولد حرارة تفوق حرارة الشمس المعتادة بثمانين مرة لتناســـب درجة نظام المفاعلات، وتكفي هذه الحرارة لتســـخين زيت حراري خاص يدور داخل أنابيب زجاجية ملتوية إلى درجة 400 درجة مئوية ليجري بعدها تبريده بوساطة المـــاء، فينتج عن تلـــك العملية تبريد كمية مـــن البخار المتصاعد الكثيـــف كافيـــة لتحريـــك توربينات مولـــد كبير لإنتـــاج الطاقة الكهربائية، وقد تولت شـــركة (شـــوت) إنتاج الأنابيب الزجاجية المستخدمة في هذا المشروع بطول 100 كم، وهي أنابيب صممت بشـــكل خاص يجعلها لا تسرب الحرارة. العجيب في المحطة أنها صممت بحيث تكون قادرة على العمل في حالة غياب الشمس في الشتاء، فجعلوا أشـــعة الشمس تعمل يومياً على تسخين مرجلين هائلـــين يحتويان علـــى 28500 طن من خليط نتـــرات الصوديوم والبوتاسيوم بشكل دائم؛ لاستخدامهما في مواصلة إنتاج الطاقة في حال غياب الشـــمس. يعمل هذان المرجـــلان كبطارية لخزن الحرارة، فيكفيان لتشـــغيل المحطة بأكملها لمدة 7.5 ساعات في حالة الظلام الدامس.

مـــن المهم لدول الخليج العربي، وخاصـــة المملكة التفكير في إقامة مشروعات المفاعلات الشمسية بدلاً من النووية، لأن بيئتنا تستحق مثل هذا الأمل السلمي السليم الآمن للإنسان والبيئة معاً، والتـــي تعد نتيجته – بكل تأكيد – مكســـباً للطاقة والتنمية، وهي مضمونة النتائج بكل المقاييس بدلاً من المشروعات الاستعراضية للطاقة النووية التي تعد مكلفة وخطرة.

الوقفة الثالثة: العنوان وبعض الأبعاد الفنية

إن عنـــوان الدراســـة المتمثل في (الطاقـــة الكهرونووية) غير معروف لـــدى كثير من المحرريـــن؛ حيث يتم عادة الإشـــارة إلى العنوان المتصل بالطاقة النووية، وحقيقة يستخدم المفاعل النووي

شكل (2) أحد أبراج المفاعل الشمسي الإسباني الحديث

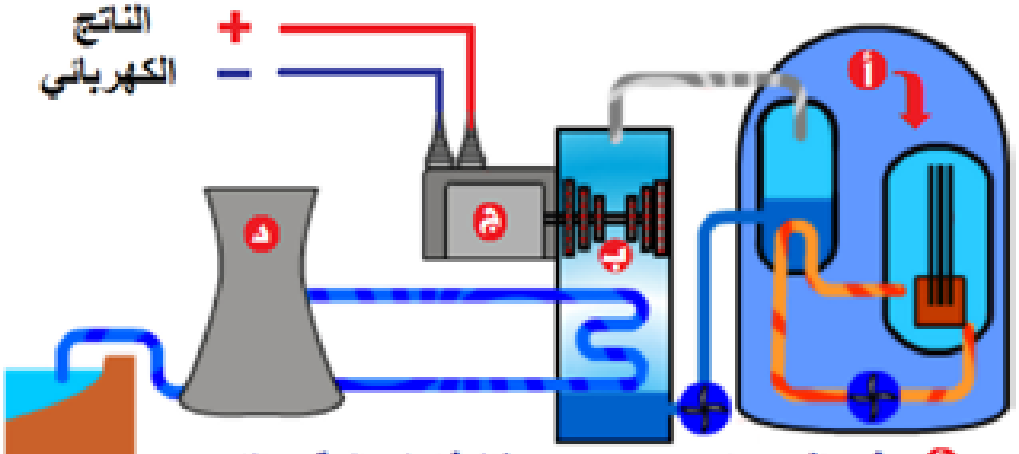
على الدول النامية الابتعاد عن المشروعات النووية الاستعراضية

استخدامات متعددة لا مجال للدخول في تفاصيلها هنا، ومنها الكهرباء. ولم يلاحظ في سياقات أخرى تسمية الكهرباء بالمواد التي تستخدم لتوليد الحرارة، وإنما يمكن استعمال التسمية للمفاعل نفسه لنقول مثلاً مفاعل ذري أو نووي لمحطة توليد الحرارة باستخدام انشطار الذرة، ومفاعل فحمي لمحطة توليد الحرارة بالفحم، ومفاعل زيتي أو نفطي، ومفاعل غاز طبيعي أو مفاعل هيدروجيني وهكذا ... لذا لا تتم إلا الإشارة إلى الطاقة الكهربائية المستمدة من مولدات تعتمد منتجات الحفريات من فحم وبترول بكهروفحمي، ولا كهروبترولي، ولا كهروغازي، ولا كهروهيدروجيني. ويبدو العنوان غريباً، فما الذي يدعم استناد الدراسة إلى استخدام عنوان (الكهرونووي) .

وفي تقديري قد يتسبب العنوان في تعتيم الفكرة الفنية لدى القارئ، فيصعب عليه فهم جريان الفكر العلمي التفاعلي مع الحدث، فيضعف الفهم الفني في هذا المجال، فالانشطار الذري أو كما جرت تسميته بـ(النووي) الذي يتمثل في توليد الطاقة بالانشطار لا دخل له بالكهرباء مباشرة ولا يمت إليها بصلة غير وجودهما في موقع واحد، وهذا الوجود يعد رباطاً تكاملياً وليس اندماجياً لكي يتحد معه في الاسم؛ لأن هذا الفعل الناتج من الانشطار هو لتوليد الطاقة الحرارية التي يُستفاد منها في تبخير الماء المتنوع التركيب ودفعه حيث شدة الضغط الناتج من ذلك؛ لكي يعمل على إدارة توربينات الكهرباء ومحفزات الدوران التي تدير مولدات الكهرباء الضخمة، ومجرد خدمته في هذا المجال وكونه يولد الحرارة لا يكون مؤهلاً لتسمية الكهرباء به (انظر شكل 3) .

وفي نهاية هذه التعقيب، أود أن أشيد بالبعد التحليلي الاقتصادي للدراسة ومعلوماتها الإحصائية، ولكن ملاحظاتي انصبت على بدائل الطاقة النووية، لإضافة بعد آخر إلى الدراسة.

شكل رقم 3 رسم توضيحي مبسط لفكرة المفاعل النووي



أ مبنى الفرن النووي والتبخير (المفاعل بالوقود النووي).
ب برج توربينات بخار الماء لإدارة مولدات إنتاج الطاقة الكهربائية .
ج مولدات الطاقة الكهربائية .
د محطة تبريد مساندة لكامل المشروع .