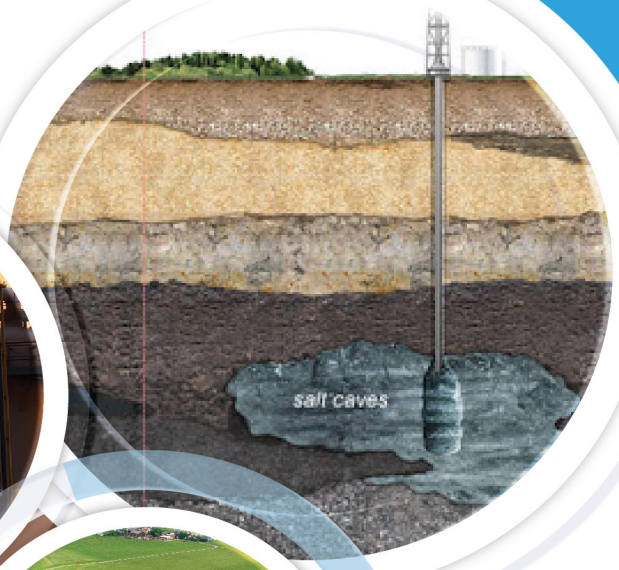
منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)

التخزين الجوفي للغاز..

ودوره في تحقيق أمن الطاقة

Natural Gas Underground Storage (UGS) and Its Role in Attaining Energy Security

منظمة الأقطار
العربية المصدرة
للبترول (أوابك)



التخزين الجوفي للغاز..
ودوره في تحقيق أمن الطاقة

Natural Gas Underground Storage (UGS) and Its Role in Attaining Energy Security

إعداد
م. وائل حامد عبد المعطي
خبير صناعات غازية

مراجعة
م. عماد ناصيف مكي
مدير إدارة الشؤون الفنية

إعتماد
المهندس جمال عيسى اللوغاني
الأمين العام

جميع حقوق الطبع محفوظة، ولا يجوز إعادة النشر أو الاقتباس دون إذن خطي مسبق من المنظمة، 2025

منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)

ص.ب 20501 الصفاة الكويت 13066
هاتف 24959000 (965) - فاكسميلي 24959755 (965)
الموقع على الإنترنت: www.oapecorg.org
البريد الإلكتروني: oapec@oapecorg.org

مقدمة

في ظل التحولات المتسارعة في سوق الطاقة العالمي، والحاجة المتزايدة إلى تعزيز أمن الإمدادات ومرونتها، برز التخزين الجوفي للغاز الطبيعي كخيار استراتيجي يجمع بين الجدوى الاقتصادية والفوائد البيئية، ومعالجة موسمية الطلب بمرونة عالية. فمن خلال عملية التخزين، يمكن حقن الغاز في تكوينات جيولوجية تقع تحت سطح الأرض تتسم بقدرتها على احتواء الغاز ومنع تسربه، وذلك خلال الفترات التي تشهد تراجعاً في الطلب على الغاز، ثم يُسحب الغاز مجدداً في فترات لاحقة وقت الحاجة أو عند تنامي الطلب.

كما لم يعد دور التخزين الجوفي للغاز مقتصراً على تلبية الطلب الموسمي فحسب، بل أصبح عنصراً مسانداً للانتقال الطاقي، وداعماً لتكامل مصادر الطاقة المتجددة، ومُساهماً في تحقيق استدامة منظومة الطاقة. وقد ظهر ذلك من خلال تزايد مشاريع التخزين الجوفي حول العالم، وتبني سياسات طاقة تشجع على تطويره وتوسيع نطاق استخدامه.

عالمياً يتم التخزين الجوفي في ثلاثة أنواع والتي تشمل حقول النفط والغاز المُستنفدة، وكهوف الملح، وطبقات المياه الجوفية العميقة. ويُراعى عند اختيار مواقع التخزين أن تكون قريبة من مراكز الطلب الرئيسية، بهدف سرعة تغذية الشبكات المحلية بالغاز، وضمان تحقيق مرونة تشغيلية عالية تساهم في استقرار تلك الشبكات، وتلبية احتياجات المستهلكين المتزايدة. وقد اكتسب التخزين الجوفي أهمية متزايدة بعد اندلاع الأزمة الروسية الأوكرانية في فبراير 2022، حيث سارعت العديد من الدول الأوروبية إلى تبني سياسات وتشريعات تهدف إلى تأمين مستويات كافية من المخزون لتفادي أزمات طاقة محتملة، والتغلب على أية انقطاعات.

ومن هذا المنطلق، تأتي أهمية هذه الدراسة التي تهدف إلى استعراض أنواع الخزانات الجوفية، والخصائص الفنية لكل نوع، وآليات تشغيلها، وكذلك الدور الذي تؤديه في دعم استقرار الشبكات، وتلبية الطلب الموسمي، والحد من تقلبات أسعار الغاز.

كما تتناول الدراسة توزيع مواقع التخزين الجوفي حول العالم، والتشريعات المُنظمة لهذا القطاع للاستفادة منها، بالإضافة إلى المشاريع الجاري تنفيذها والمخطط لها وسعاتها التصميمية، ومدى تأثيرها على إجمالي الطاقة التخزينية العالمية.

ومن بين ما **خلصت إليه الدراسة** أن هناك إمكانيات كبيرة لتطوير قطاع التخزين الجوفي للغاز في الدول العربية والذي لا يزال في مرحلة مبكرة من التطوير. حيث تمتلك الدول العربية مزيجاً من المقومات الجيولوجية والاقتصادية والاستراتيجية. فوجود حقول غاز ونفط مُستنفدة، ووفرة في الموارد الغازية، وتوافر بنى تحتية قريبة من مناطق الطلب، إلى جانب الموقع الجغرافي المحوري، يشكل أساساً صلباً لبناء منظومة تخزين استراتيجية.

تصدر الأمانة العامة هذه الدراسة المتخصصة، في إطار سعيها نحو رصد أبرز التطورات على الساحة الدولية، وكيفية استفادة الدول العربية منها. وتأمل أن يجد فيها المختصون والخبراء وصانعي القرار الفائدة المرجوة.

والله ولي التوفيق،،،

الأمين العام

جمال عيسى اللوغاني

قائمة المحتويات

مقدمة 3

قائمة المحتويات 5

قائمة الأشكال 6

قائمة الجداول 8

ملخص تنفيذي 9

الفصل الأول: أنواع خزانات الغاز الجوفية، وسماتها الفنية 11

1-1: أهمية الغاز الطبيعي في نظام الطاقة العالمي 12

2-1: أهمية التخزين الجوفي للغاز 15

1-2-1: لمحة عامة عن سلسلة القيمة لصناعة الغاز الطبيعي 15

2-2-1: دوافع التخزين الجوفي للغاز 17

3-2-1: مكونات منشأة التخزين الجوفي للغاز، وسير العمليات بها 23

4-2-1: المقاييس المستخدمة في توصيف خزانات الغاز الجوفية 26

3-1: أنواع خزانات الغاز الجوفية، وسماتها الفنية 30

1-3-1: حقول النفط والغاز المُستنفدة (Depleted Oil & Gas Fields) 30

2-3-1: كهوف الملح (Salt Caverns) 31

3-3-1: طبقات المياه الجوفية العميقة (Aquifers) 34

4-1: كيفية اختيار خزانات الغاز الجوفية المناسبة 36

الفصل الثاني: الانتشار الجغرافي لمنشآت التخزين الجوفي للغاز عالمياً، والسياسات المُنظمة لها 44

1-2: تطور السعة التخزينية لمنشآت تخزين الغاز الجوفي عالمياً 45

2-2: السعة التخزينية لمنشآت تخزين الغاز حسب النوع والتوزيع الجغرافي 48

3-2: الدول التي تملك أكبر عدد من منشآت تخزين الغاز الجوفي، وأهميتها 51

1-3-2: منشآت التخزين الجوفي في الولايات المتحدة الأمريكية 52

2-3-2: منشآت التخزين الجوفي في روسيا 56

3-3-2: منشآت التخزين الجوفي في أوكرانيا 58

4-3-2: منشآت التخزين الجوفي في كندا 61

5-3-2: منشآت التخزين الجوفي في الصين 63

4-2: سياسات الطاقة المرتبطة بالتخزين الجوفي للغاز 65

2-4-1: سياسات التخزين الجوفي في الاتحاد الأوروبي 65

2-4-2: سياسات التخزين الجوفي في أمريكا الشمالية 67

2-4-3: سياسات التخزين الجوفي في آسيا والمحيط الهادي 68

2-4-4: مقارنة السياسات بين مناطق العالم المختلفة 71

الفصل الثالث: مستقبل التخزين الجوفي للغاز في العالم، وضرورة الاستثمار في الدول العربية 73
3-1: مشروعات التخزين الجوفي للغاز قيد الإنشاء عالمياً..... 74
3-2: توزيع مشاريع التخزين الجوفي للغاز قيد الإنشاء حسب نوع الخزان الجوفي 78
3-3: حزمة مشاريع التخزين الجوفي للغاز المقترحة عالمياً..... 81
3-4: التخزين الجوفي في الدول العربية، ودوره في دعم أمن واستدامة الطاقة..... 84
3-4-1: المشهد الراهن 84
3-4-2: دوافع الاستثمار في التخزين الجوفي للغاز في الدول العربية..... 91
3-4-3: مقومات وعوامل نجاح الاستثمار في التخزين الجوفي للغاز..... 95
الاستنتاجات..... 98
التوصيات والإجراءات المقترحة..... 103
المراجع 105

قائمة الأشكال

الشكل 1-1: مزيج الطاقة الأولية في العالم، عام 2024 13
الشكل 1-2: النمو الإجمالي في الطلب على أنواع الوقود الأحفوري خلال الفترة 2000-2023..... 14
الشكل 1-3: العمليات والأنشطة المختلفة داخل سلسلة القيمة لصناعة الغاز الطبيعي..... 16
الشكل 1-4: تغير مخزون الغاز الجوفي في الولايات المتحدة على مدار العام..... 18
الشكل 1-5: صهاريج مدفونة في الأرض لتخزين الغاز الطبيعي المسال في محطة استقبال في اليابان 21
الشكل 1-6: المخطط العام للعمليات في منشأة تخزين الغاز تحت الأرض..... 23
الشكل 1-7: منظومة قياس معدلات السحب والحقن المستخدمة في إحدى منشآت تخزين الغاز الجوفي..... 24
الشكل 1-8: منشأة لتخزين الغاز في باطن الأرض في أحد المواقع في رومانيا..... 25
الشكل 1-9: أنواع الخزانات المستخدمة في التخزين الجوفي للغاز الطبيعي 26
الشكل 1-10: العلاقة بين السعة التخزينية العاملة وإجمالي السعة التخزينية في الخزان الجوفي للغاز..... 27
الشكل 1-11: مثال على العلاقة بين مستوى ملء الخزانات ومعدل كل من السحب والحقن 29
الشكل 1-12: أحد مواقع تخزين الغاز الجوفية في مكامن غاز مُستنفدة في ألمانيا 31
الشكل 1-13: كهوف الملح المستخدمة في التخزين الجوفي للغاز..... 32
الشكل 1-14: أحد مواقع تخزين الغاز الجوفية في كهوف الملح في ألمانيا..... 33
الشكل 1-15: رسم توضيحي لطريقة تخزين الغاز الطبيعي في طبقة المياه الجوفية العميقة..... 34
الشكل 1-16: مشروع "Jackson Prairie" لتخزين الغاز في الطبقات الحاوية للمياه في الولايات المتحدة..... 36
الشكل 1-17: العوامل المحددة لاختيار نوع الخزان الجوفي لتخزين الغاز الطبيعي 37
الشكل 1-18: متوسط نطاق التكاليف الرأسمالية المطلوبة (دولار لكل مليون قدم مكعب) لإنشاء منشأة التخزين الغاز حسب نوع الخزان الجوفي 41

الشكل 1-19: توزيع السعة التخزينية العاملة (القابلة للسحب) لأكثر من 700 مشروع للتخزين الجوفي للغاز حسب نوع الخزان..... 42
الشكل 2-1: تطور السعة التخزينية العاملة من الغاز في الخزانات الجوفية، وحصتها من إجمالي الاستهلاك العالمي 46
الشكل 2-2: حصة السعة التخزينية العاملة من الغاز في الخزانات الجوفية من إجمالي الاستهلاك حسب المناطق 48
الشكل 2-3: توزيع عدد منشآت التخزين والسعة التخزينية حسب نوع الخزان الجوفي 49
الشكل 2-4: الدول الخمس الكبرى من حيث سعة تخزين الغاز الجوفي، نهاية عام 2023 52
الشكل 2-5: توزع السعة التخزينية العاملة من الغاز في الولايات المتحدة حسب نوع الخزان الجوفي..... 53
الشكل 2-6: مواقع منشآت التخزين الجوفي للغاز في الولايات المتحدة..... 55
الشكل 2-7: توزيع السعة التخزينية العاملة للغاز في الولايات المتحدة حسب الكيانات المشغلة 56
الشكل 2-8: مواقع منشآت التخزين الجوفي للغاز في روسيا 57
الشكل 2-9: مواقع منشآت التخزين الجوفي للغاز في أوكرانيا، والسعة التخزينية لكل منها 59
الشكل 2-10: تطور عدد منشآت التخزين والسعة التخزينية العاملة في الصين خلال 2017-2023..... 63
الشكل 2-11: مواقع منشآت التخزين الجوفي للغاز في الصين 64
الشكل 2-12: تطور أسعار الغاز الطبيعي في السوق الأوروبي (حسب مؤشر TTF) والسوق الآسيوي (JKM) 67
الشكل 3-1: تطور السعة التخزينية عالمياً وعدد منشآت التخزين الجوفي بحلول عام 2030 75
الشكل 3-2: توزيع عدد منشآت التخزين الجوفي قيد البناء في أوروبا والسعة التخزينية لها..... 77
الشكل 3-3: توزيع مشاريع منشآت التخزين الجوفي قيد الإنشاء والسعة التخزينية لها حسب المناطق..... 78
الشكل 3-4: توزيع السعة التخزينية العاملة في منشآت التخزين الجوفي قيد الإنشاء حسب نوع الخزان الجوفي..... 80
الشكل 3-5: معدل السحب الأقصى (مليار قدم مكعب غاز/اليوم) لمنشآت التخزين الجوفي قيد البناء حسب نوع الخزان الجوفي..... 81
الشكل 3-6: توزيع مشاريع التخزين الجوفي قيد التخطيط والسعة التخزينية لها حسب المناطق..... 83
الشكل 3-7: آفاق سعة التخزين الجوفي للغاز عالمياً بحلول 2030-2035 84
الشكل 3-8: صهاريج تخزين الغاز الطبيعي المسال في مرفأ الزور في دولة الكويت..... 86
الشكل 3-9: منشأة "مرغم" للتخزين الجوفي للغاز في مدينة دبي، دولة الإمارات 87
الشكل 3-10: مشروع "مويعيد" للتخزين الجوفي للغاز في إمارة الشارقة، دولة الإمارات 88
الشكل 3-11: مواقع منشآت التخزين الجوفي للغاز في الدول العربية 91

قائمة الجداول

الجدول 1-1: أوجه المقارنة بين التخزين الجوفي والسطحي والمدفون للغاز الطبيعي..... 22
الجدول 1-2: المقاييس المستخدمة في توصيف مخزون الغاز الطبيعي في الخزان الجوفي..... 29
الجدول 1-3: أمثلة من مشروعات تخزين الغاز الجوفية في دول مختارة 39
الجدول 1-4: أبرز سمات المقارنة بين الأنواع الرئيسية الثلاثة لخزانات الغاز الجوفية 43
الجدول 2-1: عدد منشآت تخزين الغاز الجوفي في روسيا حسب النوع، والسعة التخزينية العاملة لكل منها، مطلع عام 2024 58
الجدول 2-2: عدد منشآت التخزين الجوفي في أوكرانيا حسب النوع، والسعة التخزينية العاملة لكل منها، مطلع عام 2024 60
الجدول 2-3: عدد منشآت تخزين الغاز الجوفي في كندا حسب النوع، والسعة التخزينية العاملة لكل منها، مطلع عام 2024 62
الجدول 2-4: مقارنة بين تأثير السياسات على التخزين الجوفي للغاز 72

ملخص تنفيذي

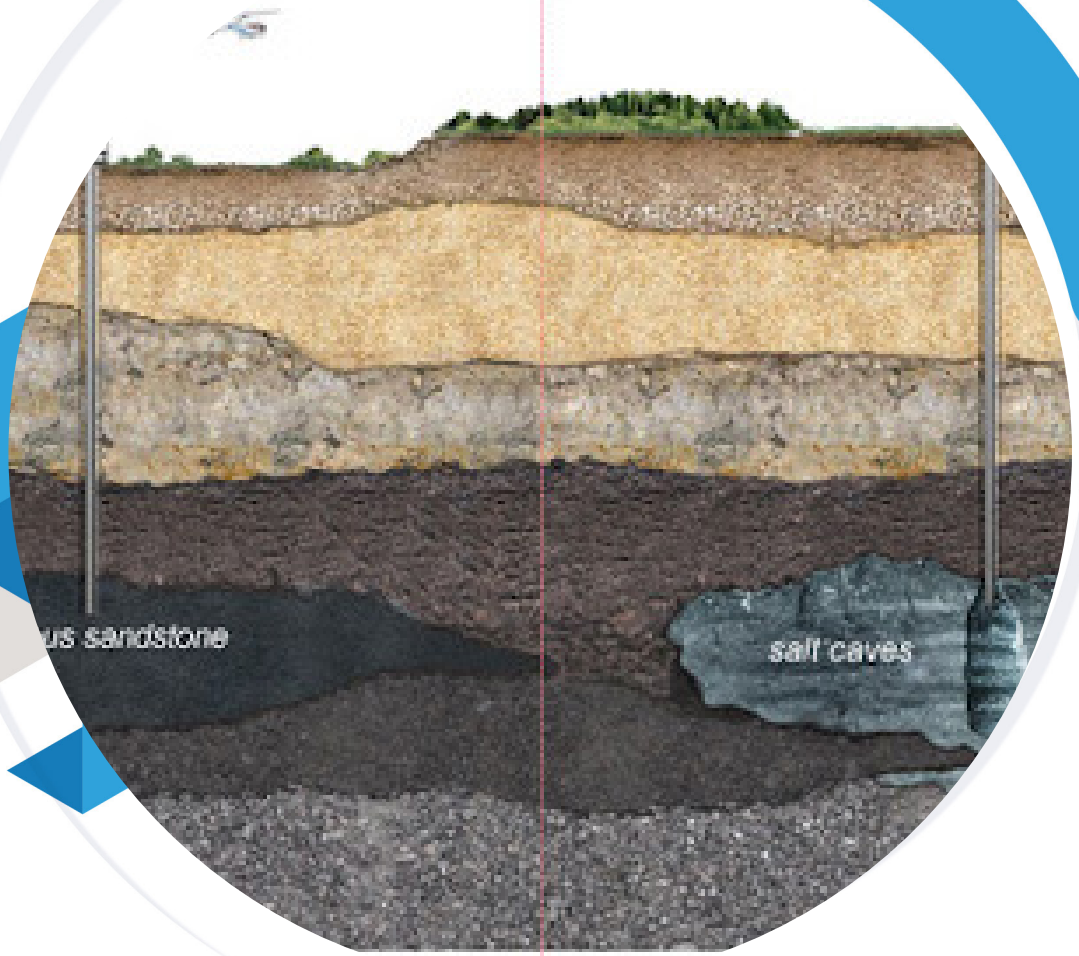
تُعدّ مواقع التخزين الجوفي للغاز الطبيعي مكوناً أساسياً من سلسلة القيمة في صناعة الغاز، حيث تؤدي دوراً محورياً في تعزيز استقرار الأسواق التي تتأثر بموسمية الطلب، مثل السوق الأوروبي الذي يشهد ارتفاعاً في استهلاك الغاز خلال فصل الشتاء. كما تلعب منشآت التخزين الجوفي دوراً مهماً في تأمين إمدادات الغاز في حالات الطوارئ، مثل تعطل إنتاج الحقول أو الارتفاع المفاجئ في درجات الحرارة، أو وجود نقص في الإمدادات بسبب أزمات جيوسياسية. ونتيجة لهذه الأدوار الحيوية، اتجهت عدة دول إلى الاستثمار في منشآت التخزين لتعزيز أمن الإمدادات وضمان استقرار منظومة الطاقة.

عالمياً يمكن تقسيم منشآت التخزين الجوفي إلى ثلاثة أنواع رئيسية وهي حقول النفط والغاز المُستنفدة، وهي الأقل في التكلفة الرأسمالية وتتمتع بسعات كبيرة وانتشار واسع. كما يمكن تخزين الغاز في كهوف الملح، وهي تجاويف صناعية يتم عملها داخل الطبقات الملحية، وهي توفّر مرونة عالية ومعدلات سحب مرتفعة لكنها ذات تكلفة مرتفعة وتنتشر في مناطق محدودة. أما النوع الثالث فهو طبقات المياه الجوفية العميقة، وهي تشبه مكامن الغاز المُستنفدة، لكنها ذات تكاليف أعلى بسبب الدراسات الجيولوجية المُعقدة التي تتطلبها، والحاجة إلى تخزين كميات كبيرة من الغاز والحفاظ عليها بشكل دائم دون سحبها، وهي تعرف باسم "غاز الأساس"، للحفاظ على ضغط الخزان.

وتنتشر منشآت التخزين الجوفي للغاز على نطاق واسع في أمريكا الشمالية، وأوروبا، وكذلك في منطقة أوراسيا (تشمل أوكرانيا)، إلا أن انتشارها لا يزال محدوداً في أمريكا الجنوبية والشرق الأوسط. بينما بدأت بعض الدول في آسيا-بقيادة الصين- في رفع قدراتها التخزينية من خلال الاستثمار في منشآت التخزين الجوفي، لضمان أمن الإمدادات.

أما في الدول العربية، ورغم كونها من كبار منتجي الغاز عالمياً، إلا أن تجربتها في التخزين الجوفي لا تزال محدودة، مع اقتصار وجود المنشآت الحالية في الإمارات والسعودية فقط. ويعود ذلك إلى اعتماد أغلب الدول العربية على وسائل التخزين السطحية مثل تخزين الغاز الطبيعي المسال في الصهاريج أو تخزين الغاز المضغوط في خطوط الأنابيب. على الرغم من ذلك، تمتلك الدول العربية مقومات قوية تؤهلها لتطوير قطاع واعد للتخزين الجوفي للغاز، منها توافر البنية الجيولوجية المناسبة مثل حقول الغاز المُستنفدة، والموارد المالية الوفيرة، والبنية التحتية لشبكات الغاز.

منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)



الفصل الأول:
أنواع خزانات الغاز الجوفية، وسماتها الفنية

1-1 أهمية الغاز الطبيعي في نظام الطاقة العالمي

2-1 أهمية التخزين الجوفي للغاز

3-1 أنواع خزانات الغاز الجوفية، وسماتها الفنية

4-1 كيفية اختيار خزانات الغاز الجوفية المناسبة

مقدمة

يتعرض استهلاك الغاز لتقلبات موسمية كبيرة بين فصلي الصيف والشتاء، بسبب تفاوت الطلب على الكهرباء لأغراض التبريد والتدفئة. وقد يتأثر أيضـاً بأية اضـطرابات جيوسياسية أو مشاكل تقنية قد تؤثر على حجم الإمدادات المطلوب لتلبية احتياجات السوق الداخلي في بلد ما. لذلك تسـاهم عملية تخزين الغاز على نطاق واسـع في مرافق تخزين الغاز الجوفية (باطن الأرض) في تحقيق التوازن بين العرض والطلب. يضـاف إلى ذلك، تلعب مرافق تخزين الغاز دوراً مهماً في الحفاظ على استقرار شبكات الغاز حتى يتم تلبية ذروة الاستهلاك بأمان في فصل الشتاء أو الصيف حسب حالة كل سوق، وفي غضون مهلة قصيرة.

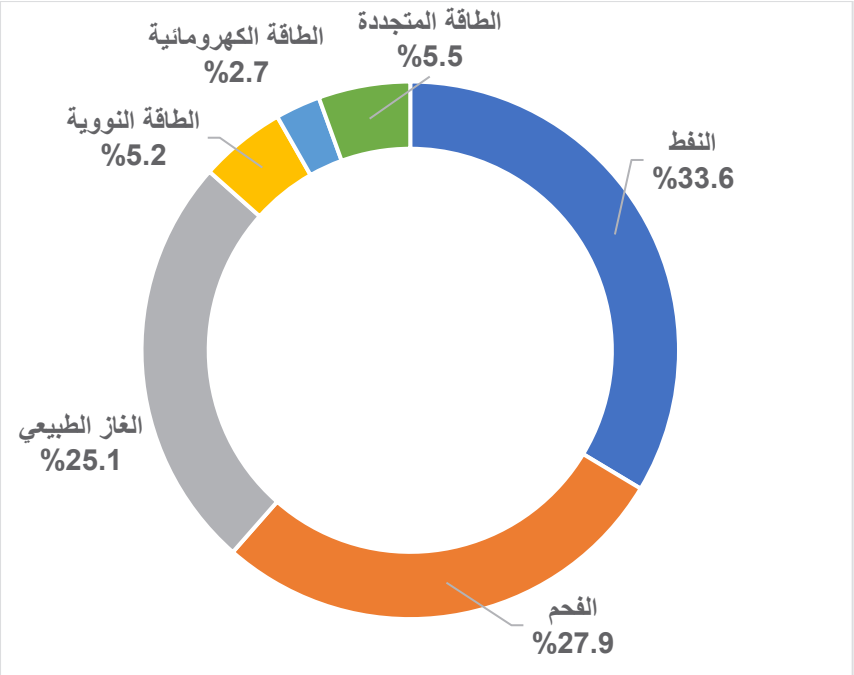
1-1: أهمية الغاز الطبيعي في نظام الطاقة العالمي

يُعدّ الغاز الطبيعي في الوقت الراهن من أكثر مصـادر الطاقة أهمية، حيث يلعب دورًا رئيسيًا في دعم الاقتصاد العالمي وضمان استقرار منظومة الطاقة، لا سيما في ظل التحولات العالمية نحو اعتماد مصـادر طاقة أكثر نظافة تسـاهم في تخفيض البصـمة الكربونية للاقتصاد العالمي. فالغاز الطبيعي يتسم بانخفاض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون الناتجة عن احتراقه مقارنة بأنواع الوقود الأحفوري الأخرى مثل الفحم والنفط، وبارتفاع كفاءته الحرارية عند اسـتخدامه كوقود في العديد من التطبيقات مثل محطات توليد الكهرباء والتي تصـل كفاءتها في المحطات ذات الدورة المركبة إلى نحو 58% مقارنة بنحو 30%-33% في المحطات ذات الدورة المفتوحة التي تعتمد على النفط أو الفحم. كما يعد الغاز الشريك المثالي لمصـادر الطاقة المتجددة التي تتسم بطبيعة متقطعة نتيجة لاختلاف سرعة الرياح من وقت لآخر، أو عدم توافر ضوء الشمس خلال فترات الليل، ومن ثم يستطيع الغاز أن يحل محل مصـادر الطاقة المتجددة خلال تلك الفترات، ليعوض الفقد في توليد الطاقة الكهربائية منها، ويضمن استقرار الشبكات.

كما ساهم التطور الكبير في تقنية إسالة الغاز والتقدم في تصميم وبناء ناقلات الغاز بحمولة ضخمة، في نمو تجارة الغاز الطبيعي المسال وتوسيع نطاق أسواقه عالمياً. فقد أصبح بالإمكان نقل الغاز الطبيعي بكميات كبيرة من أماكن إنتاجه إلى مراكز الطلب في مناطق العالم المختلفة لتلبية الارتفاع المستمر في استهلاك الغاز. وبنهاية عام 2024، ارتفع عدد الدول المصدرة للغاز الطبيعي المسال إلى 24 دولة، والتي تصدر الغاز الطبيعي المسال إلى نحو 49 سوقاً في أوروبا، وآسيا، وأمريكا الشمالية والجنوبية، إضافة إلى منطقة الشرق الأوسط.

ويساهم الغاز الطبيعي بنحو 25.1% من إجمالي الطلب العالمي على الطاقة في مزيج الطاقة الأولية، ليحل بذلك في المرتبة الثالثة بعد النفط الذي يحل في المرتبة الأولى بحصة 33.6%، والفحم في المرتبة الثانية بنسبة 27.9%. بينما تساهم مصادر الطاقة المتجددة بنسبة 5.5%، والطاقة النووية بنسبة 5.2%، وأخيراً الطاقة الكهرومائية بحصة 2.7%، كما هو مبين بالشكل 1-1.

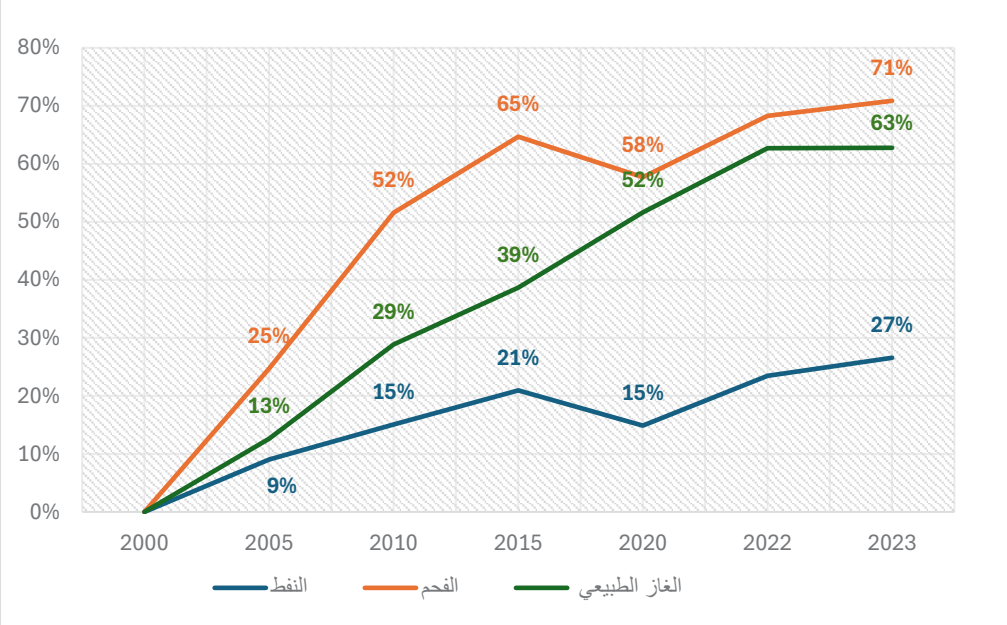
الشكل 1-1: مزيج الطاقة الأولية في العالم، عام 2024



مصدر البيانات: معهد الطاقة EI

وبالرغم من أن الغاز الطبيعي ثالث أهم مصدر للطاقة في مزيج الطاقة العالمي، إلا أن الطلب العالمي عليه يشهد نمواً متسارعاً، وبمعدلات نمو تفوق تلك المسجلة للنفط بفارق ملحوظ، وتكاد تقترب من الفحم. فخلال الفترة 2000-2023، ارتفع الطلب الإجمالي على الغاز الطبيعي بنحو 63%، بينما بلغ نمو الطلب الإجمالي على النفط نحو 27%، وحوالي 71% بالنسبة للفحم كما هو مبين بالشكل 1-2.

الشكل 1-2: النمو الإجمالي في الطلب على أنواع الوقود الأحفوري خلال الفترة 2000-2023



المصدر: أوابك استناداً إلى بيانات BP & Energy Institute ([1،2])

وفي ظل تزايد الاهتمام العالمي بالغاز الطبيعي واعتباره وقوداً انتقالياً ضمن مسارات التحول الطاقي، يُتوقع أن يستمر الطلب عليه في النمو بمعدلات تفوق تلك الخاصة ببقية أنواع الوقود الأحفوري. ويتطلب هذا النمو تأمين إمدادات مستقرة من الغاز، وتوفير مخزونات كافية ومرنة، لاسيما في الأسواق الكبرى المستوردة مثل السوق الأوروبية، بحيث يمكن الاعتماد على هذه المخزونات خلال فترات الذروة الموسمية أو في حالات الطوارئ لضمان استمرارية الإمدادات، واستقرار السوق.

2-1: أهمية التخزين الجوفي للغاز

1-2-1: لمحة عامة عن سلسلة القيمة لصناعة الغاز الطبيعي

تضم سلسلة القيمة لصناعة الغاز ثلاث مراحل، حيث تبدأ المرحلة الأولى أو مرحلة المنبع (Upstream) عمليات حفر وإنتاج الغاز الطبيعي سواء كان حراً أو مصاحباً لإنتاج النفط. وقد تكون الحقول المنتجة للغاز إما برية أو بحرية. أما المرحلة الثانية والتي تعرف بالمرحلة الوسطى (Midstream) وهي المرحلة الأكثر تعقيداً وتكلفة في سلسلة القيمة لصناعة الغاز حيث تضم-حسب الحاجة- كافة عمليات معالجة الغاز للتخلص من الشوائب الضارة المصاحبة له، وكذلك استخلاص سوائل الغاز مثل البروبان والبيوتان والجازولين الطبيعي إذا كان الغاز غنياً بتلك المكونات. كما تضم هذه المرحلة عمليات إسالة الغاز بغية تصديره إلى الأسواق البعيدة (في حالة الدول المصدرة) أو النقل مباشرة عبر خطوط الأنابيب سواء إلى داخل السوق المحلي أو التصدير دون الحاجة إلى الإسالة. كما تقع مرافئ تغويز الغاز في حالة الدول المستوردة ضمن عمليات المرحلة الوسطى.

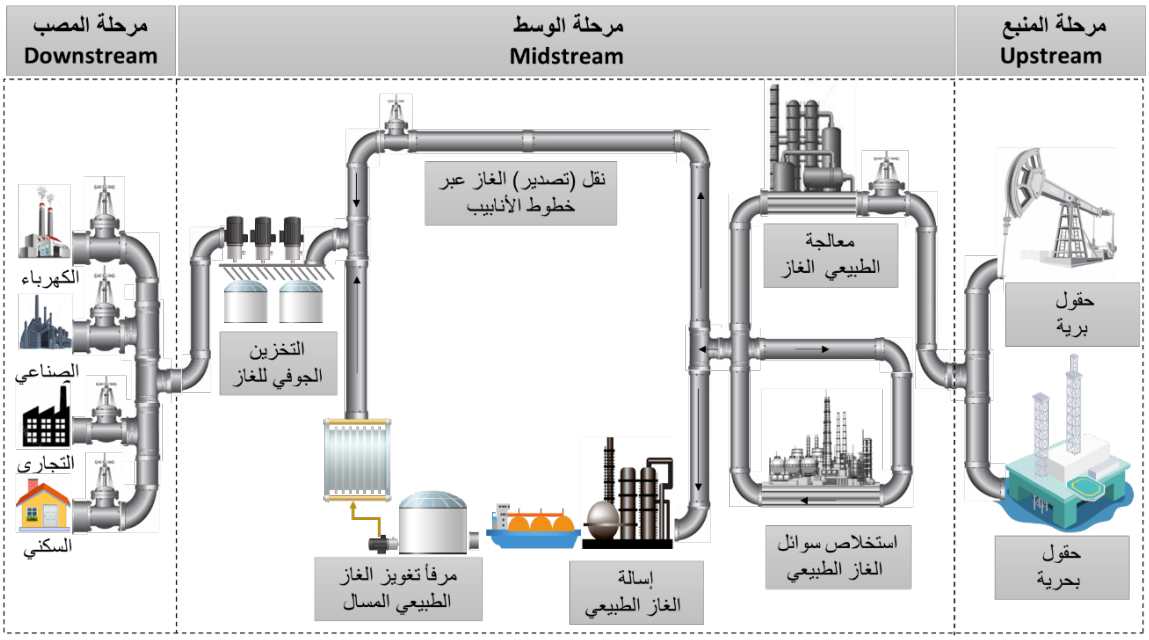
أما المرحلة الثالثة والأخيرة فهي مرحلة المصب (Downstream) ومن خلالها يتم توزيع الغاز على القطاعات الرئيسية المستهلكة له مثل قطاع الكهرباء، والقطاع السكني، والتجاري، والصناعي، والتي يتنوع فيها استخدام الغاز إما كوقود أو كمادة خام (لقيم) في الصناعات البتروكيماوية.

وتعتمد الدول أو الأسواق المستوردة للغاز إما على استقبال إمدادات الغاز عبر خطوط الأنابيب وهو في حالته الغازية أو عبر استقبال ناقلات الغاز الطبيعي المسال في موانئ سواء كانت مقامة على البر أو موانئ عائمة مثل الوحدات العائمة لاستقبال وتخزين الغاز الطبيعي المسال وإعادته إلى الحالة الغازية (FSRUs).

وتضم موانئ الاستقبال تسهيلات خاصة تسمح بتفريغ الغاز الطبيعي المسال وتخزينه في صهاريج داخل الميناء قبل أن يتم سحبه وتغويزه عبر التسخين بهدف ضخه في شبكة الغاز المحلية للتوزيع على القاعات المستهلكة.

وعادة ما تكون خزانات الغاز الجوفية (Underground Gas Storage, UGS) الحلقة الأخيرة في المرحلة الوسطية بعد أن يتم تغويز الغاز الطبيعي المسال (إعادة الغاز الطبيعي المسال إلى حالته الغازية) أو بعد استقباله مباشرة عبر خطوط الأنابيب، والتي يمكن من خلالها تخزين الكميات الفائضة عن الطلب قبل توزيعه على قطاعات المستهلكين. ومن هذا المنطلق، توفر منشآت التخزين الجوفي للغاز مرونة عالية في إدارة الطلب المحلي، وتضمن تحقيق التوزان المطلوب بين مرحلتي الإنتاج (الإمداد) والاستهلاك كما هو مبين بالشكل 1-3.

الشكل 1-3: العمليات والأنشطة المختلفة داخل سلسلة القيمة لصناعة الغاز الطبيعي



المصدر: من إعداد الباحث

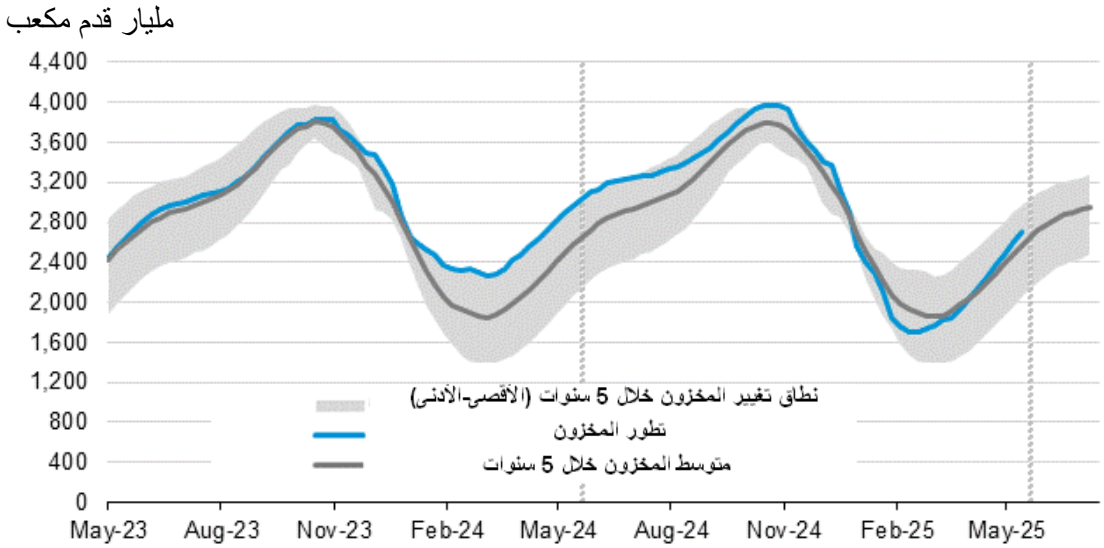
1-2-2: دوافع التخزين الجوفي للغاز

يعتبر أمن الطاقة من الأعمدة الأساسية للسياسات الاقتصادية بسبب الارتباط الوثيق بين النمو الاقتصادي وتوافر الطاقة. فأمن الطاقة بمفهومه الأوسع يتطلب القدرة على توفير كميات كافية من مصادر الطاقة أياً كان مصدرها بشكل مستقر، وآمن، ومستدام وبأسعار معقولة ليس فقط على المدى القريب، بل والبعيد أيضاً. ولا يرتبط أمن الطاقة بالدول المستهلكة فقط كما هو شائع، بل يمس أيضاً الدول المنتجة التي بدورها تحتاج إلى تأمين وجود طلب على مواردها الطاقية، لتستمر في ضخ الاستثمارات الكافية لتلبية الطلب المتوقع. كما أنها تحتاج إلى ضمان تشغيل منظومة التصدير بمرونة عالية، تحقق الاستغلال الأمثل لمواردها.

ومن هذا المنطلق، تبرز أهمية التخزين الجوفي للغاز كأحد الأدوات الاستراتيجية لتحقيق أمن الطاقة من خلال ما يوفره من مرونة تشغيلية عالية لشبكة إمدادات الغاز، وتوفير القدرة على الاستجابة السريعة لحالات الطوارئ أو تقلبات الطلب. فمن خلال عملية التخزين، يمكن حقن الغاز في تكوينات جيولوجية جوفية تتسم بقدرتها على احتواء الغاز ومنع تسربه، وذلك خلال الفترات التي تشهد تراجعاً في الطلب على الغاز، ثم يُسحب الغاز مجدداً في فترات لاحقة وقت الحاجة. وعادة ما تكون منشآت التخزين الجوفي للغاز قريبة من مراكز الطلب/أماكن الاستهلاك، لتوفير الاستجابة السريعة.

وتعد عملية التخزين الجوفي عملية حلقية (Cyclic)، بحيث يرتفع المخزون من الغاز في الخزانات الجوفية وقت الحقن "أثناء انخفاض الطلب"، ثم يتراجع تدريجياً وقت السحب "أثناء ارتفاع الطلب"، كما يوضح الشكل 1-4.

الشكل 1-4: تغير مخزون الغاز الجوفي في الولايات المتحدة على مدار العام



المصدر: إدارة معلومات الطاقة الأمريكية (EIA) [3]

عالمياً، تنتشر منشآت التخزين الجوفي للغاز في عدة دول سواء كانت مستهلكة أو منتجة للغاز، لما يوفره من مزايا ومنافع تتلخص في:

- تحقيق التوازن بين العرض والطلب على الغاز خلال فترات معينة قد تشهد ذروة في الطلب (مثل فترة الشتاء في أوروبا التي تشهداً زيادة في الطلب على الغاز لأغراض التدفئة).
- ضمان تدفق إمدادات الغاز في حالات الطوارئ الناتجة عن حدوث أعطال سواء في مواقع الإنتاج أو منظومة استقبال ونقل الغاز.
- ضمان التشغيل الأمثل لمنظومة الإنتاج والتصدير في الدول المنتجة والمصدرة للغاز أو الغاز الطبيعي المسال.
- توفير إمدادات الغاز للمستهلكين بالأسعار المناسبة من خلال شراء الغاز خلال فترات انخفاض أسعاره لتخزينه ثم إعادة بيعه لاحقاً أثناء ارتفاع الأسعار، بغرض الحد من تقلبات السوق.

ولتحقيق الجدوى الاقتصادية من الاستثمار في منشآت التخزين الجوفي للغاز، يقوم مشغلة المنشآت بشراء الغاز أثناء انخفاض أسعاره (عادة في فصل الصيف) على أن يتم بيعه مجدداً للمستهلكين بأسعار أعلى في فصل الشتاء ومن ثم تحقيق عائدات مالية بعد خصم مصاريف التشغيل.

وكمثال على الجدوى الاقتصادية للاستثمار في مشاريع التخزين الجوفي، كانت أسعار الغاز في صيف 2024 في حدود 30 يورو لكل ميجاوات ساعة (ما يعادل 9.6 دولار لكل مليون وحدة حرارية بريطانية)، وهي تعد أسعار منخفضة مقارنة بالفترة السابقة لها، وعليه قامت شركة NAFTA في سلوفاكيا، وهي تقوم بتشغيل منشآت للتخزين الجوفي للغاز بسعة تخزين 27.7 تيراوات ساعة[4]، بشراء نحو 100 مليون متر مكعب من الغاز، لحقنه في الخزانات الجوفية. وبالتالي بلغت قيمة مشتريات الغاز نحو 30 مليون يورو[1]. ومع دخول شهر ديسمبر من نفس العام (2024)، ارتفعت أسعار الغاز تدريجياً لتسجل 45 يورو لكل ميجاوات ساعة، وعليه قامت NAFTA بسحب الغاز الذي تم تخزينه وإعادة بيعه بأسعار السوق المرتفعة، لتحقق إيرادات من بيع الغاز قدرها 45 مليون يورو. وبذلك تكون شركة NAFTA قد حققت عائدات من عملية التخزين والسحب (قبل احتساب مصاريف التشغيل) قدرها 15 مليون يورو.

وتختلف عملية التخزين الجوفي للغاز عن تخزين الغاز الطبيعي في التسهيلات السطحية (التخزين السطحي) مثل خطوط الأنابيب أو الصهاريج، حيث يمكن استخدام خطوط الأنابيب كوعاء لتخزين الغاز الطبيعي في حالته

[1] 100 متر مكعب من الغاز تعادل في المتوسط 1 ميجاوات ساعة، وبذلك يكون سعر 100 مليون متر مكعب على أساس 30 يورو للميجاوات ساعة هو 30 مليون يورو

الغازية تحت ضغط مرتفع، وهو الأمر الذي يلجأ إليه مشغلو شبكات نقل وتوزيع الغاز (TSOs) لضمان وجود مخزون سريع يمكن الاستعانة به لضمان استقرار شبكات الغاز، ولكن لفترات قصيرة جداً. كما يمكن إسالة الغاز الطبيعي إلى غاز طبيعي مسال، وتخزينه في صهاريج تحافظ عليه في صورته السائلة عند -162 درجة مئوية، لتوفير مخزون كاف لتغذية أجهزة التبخير قبل ضخ الغاز في الشبكات المحلية في الأسواق المستوردة للغاز. وفي أغلب الحالات تكون الصهاريج في محطات استيراد الغاز الطبيعي المسال فوق سطح الأرض. وقد تصل سعة الصهريج الواحد إلى أكثر من 225 ألف متر مكعب من الغاز الطبيعي المسال.

وفي بعض الحالات الأخرى، يمكن تخزين الغاز الطبيعي المسال في صهاريج مدفونة في الأرض (Inground Storage) كما هو مبين بالشكل 1-5، بدلاً من استخدام الصهاريج السطحية، ولكن لا يمكن إدراجها ضمن التخزين الجوفي للغاز. وتلجأ عدة دول وفي مقدمتها اليابان إلى هذا النموذج الخاص بالصهاريج المدفونة في الأرض، لما يوفره من مزايا تخص الأمن والسلامة، أهمها:

- تقليل تأثيرات حركة الزلازل على الصهاريج المدفونة مقارنة بالصهاريج السطحية.
- الحد من التداعيات في حالة حدوث تسرب للمنتج من الصهريج.
- تساهم التربة في الحفاظ على درجة برودة الغاز الطبيعي المسال، وتحد من تسرب الحرارة إلى داخل الصهاريج، وهو الأمر الذي يقلل من الفقد الناتج عن التبخر (Boiloff Gas, BOG) من الصهاريج.

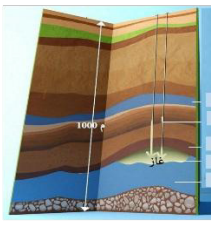
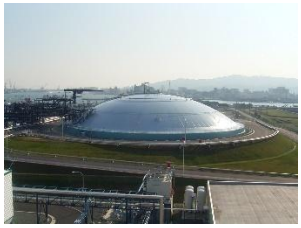
الشكل 1-5: صهاريج مدفونة في الأرض لتخزين الغاز الطبيعي المسال في محطة استقبال في اليابان

المصدر: shimz ([5])

وبالرغم من تلك الخيارات المتنوعة للتخزين السطحي أو المدفون في الأرض للغاز وما توفره من إمدادات سريعة، إلا أنها ليست فعالة في تأمين الإمدادات لفترات طويلة مثل موسم الشتاء، بسبب السعة المحدودة للتخزين. حيث أن حجم المخزون يكفي عادة لفترة لا تتجاوز عدة أيام، بينما يكفي التخزين الجوفي للغاز لتغطية الطلب لفترة تصل إلى عدة شهور، وقد يساهم وحده في تلبية ما قد يصل إلى 30-40% من الاحتياجات اليومية في السوق المستورد للغاز في فترات ذروة الطلب.

ففي السوق الأوروبي، تكفي منشآت التخزين الجوفي للغاز لتلبية نحو 40% من الطلب اليومي على الغاز خلال فترة الشتاء في ظروف البرد القارس. يلخص الجدول 1-1، أوجه المقارنة بين التخزين الجوفي والسطحي والمدفون للغاز الطبيعي.

الجدول 1-1: أوجه المقارنة بين التخزين الجوفي والسطحي والمدفون للغاز الطبيعي

البند	التخزين الجوفي Underground Storage	التخزين السطحي Surface Storage	التخزين المدفون في الأرض In-Ground Storage
السعة التخزينية	مرتفعة	محدودة إلى متوسطة	محدودة إلى متوسطة
شكل الخزان	تكوينات جيولوجية (مكامن النفط والغاز المُستنفدة، كهوف الملح، طبقات المياه الجوفية العميقة)	صهاريج سطحية، خطوط الأنابيب	صهاريج مدفونة في الأرض
موقع الخزان	في باطن الأرض على عمق قد يصل إلى 3000 متر	فوق الأرض	في الأرض، ويظهر منها سقف الصهريج
التكلفة الرأسمالية	عالية	منخفضة	منخفضة
الغرض والمدى الزمني للتخزين	تخزين طويل الأجل يصل إلى عدة شهور لتأمين السوق ومواجهة الطلب الموسمي أو الطارئ	تخزين قصير إلى متوسط الأجل لضمان توازن الإمدادات من محطات الاستيراد/التصدير	تخزين قصير إلى متوسط الأجل لضمان توازن الإمدادات من محطات الاستيراد/التصدير
حالة الغاز عند التخزين	الحالة الغازية (تحت ضغط عال)	-الحالة الغازية (تحت ضغط مرتفع) -الحالة السائلة عند -162 درجة مئوية	الحالة السائلة عند -162 درجة مئوية
الأمان والمراقبة	عال بشكل عام	يتطلب مراقبة دائمة	يتطلب مراقبة دائمة
الشكل			

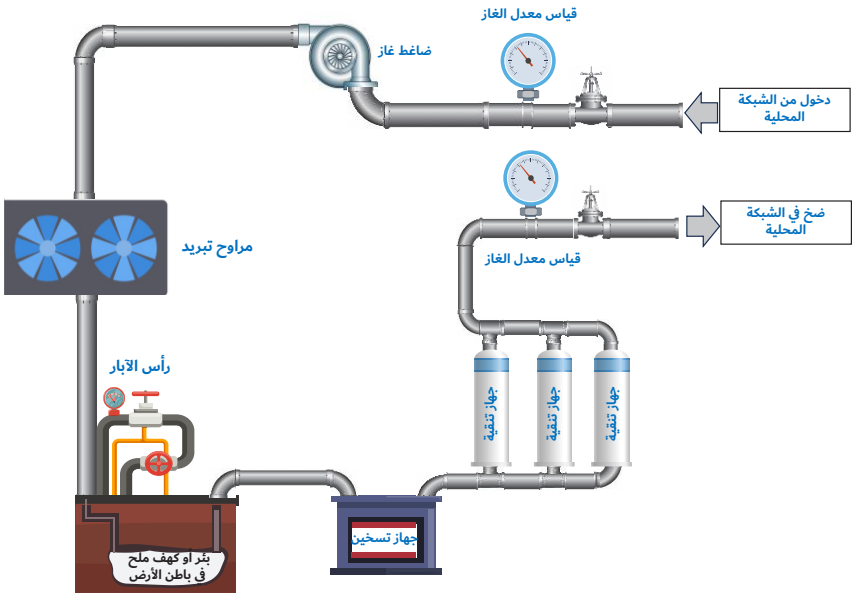
المصدر: من إعداد الباحث

1-2-3: مكونات منشأة التخزين الجوفي للغاز، وسير العمليات بها

تضـم منشـأة تخزين الغاز مجموعة من التسـهيلات والمرافق تشـمل خطوط أنابيب، وضـواغط لرفع ضـغط الغاز إلى المسـتوى المطلوب لحقنه داخل الآبار المخصـصـة لتخزين الغاز في باطن الأرض. وعادة يتم تركيب مراوح تبريد بعد ضـواغط الغاز، لتخفيض درجة حرارة الغاز إلى مسـتويات مناسـبة، ثم يتم حقن الغاز عبر رؤوس الآبار إلى المكامن الجيولوجية في باطن الأرض.

أما في حالة سـحب الغاز في فترات نمو الطلب أو حالات الطوارئ، فيتم أولاً تسـخينه بشـكل مبدئي قبل تخفيض ضـغطه لاحقاً وهي العملية التي ينتج عنها انخفاض درجة حرارته ثم يمر عبر فلاتر لفصل أية شوائب ضارة، وفي بعض الحالات أجهزة فصل للمياه المصاحبة لإنتاج الغاز ثم يتم قياسه وضخه في الشبكة المحلية مرة أخرى، كما هو موضـح بالشـكل 1-6. ولضـمان التحكم والمراقبة، تضـم منشـأة تخزين الغاز أجهزة لرصد ومراقبة ضغط وحرارة الغاز قبل وبعد عملية الحقن أو السحب.

الشكل 1-6: المخطط العام للعمليات في منشأة تخزين الغاز تحت الأرض



المصدر: من إعداد الباحث

وتعد منظومة القياس (Measuring System) من المكونات الرئيسية في منشأة التخزين الجوفي للغاز، والتي تقوم بحساب كميات الغاز المتدفقة إلى آبار التخزين عند عملية الحقن، وكذلك في حساب كميات الغاز المعاد إنتاجها عند سحب الغاز وضخه في الشبكة المحلية للغاز في أوقات نمو الطلب.

يبين الشكل 1-7 منظومة قياس معدلات السحب والحقن المستخدمة في إحدى منشآت تخزين الغاز الجوفي، والتي تكون متصلة بالآبار، وتتكون من مجموعة من الأنابيب (Tubes) مثبت عليها أجهزة للقياس، وكذلك أجهزة للتحليل الطيفي للغاز (Gas Chromatography)، لقياس جودة الغاز والقيمة الحرارية له لضمان مطابقتهما للمواصفات القياسية قبل الضخ في السوق المحلي.

الشكل 1-7: منظومة قياس معدلات السحب والحقن المستخدمة في إحدى منشآت تخزين الغاز الجوفي

وعادة لا تحتاج منشأة التحكم في تخزين الغاز الجوفي إلى مساحة كبيرة على سطح الأرض كما هو مبين بالشكل 1-8، بسبب بساطة العمليات التي تتطلبها المنشأة، بينما يبقى القسم الرئيسي والأهم منها هو الخزان الجيولوجي في باطن الأرض، والذي يتم تخزين الغاز بداخله.

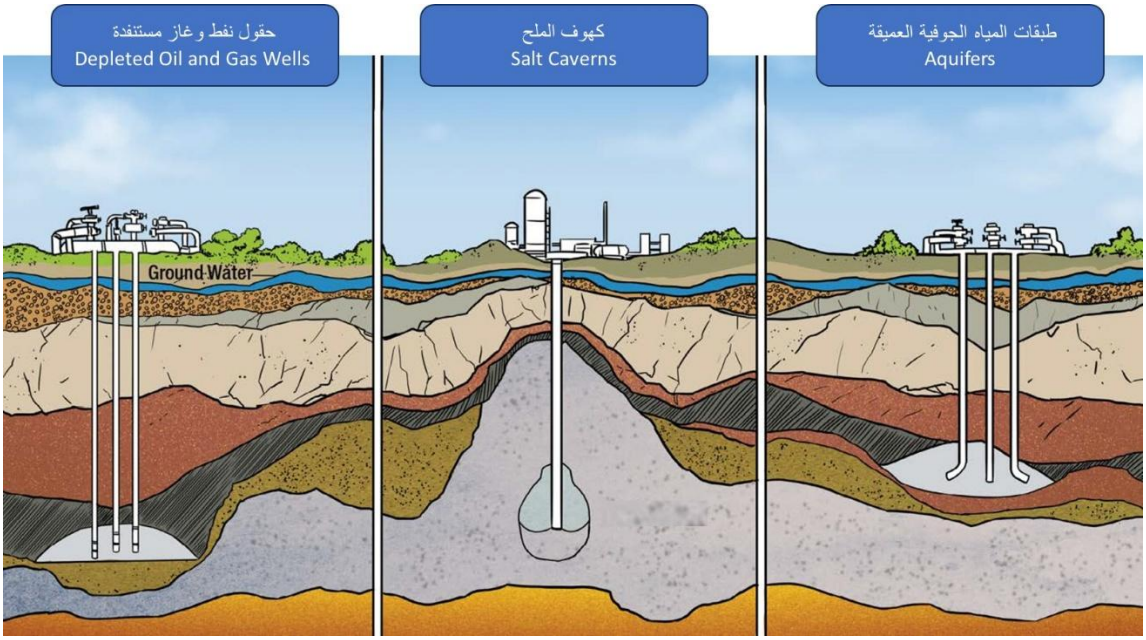
الشكل 1-8: منشأة لتخزين الغاز في باطن الأرض في أحد المواقع في رومانيا

المصدر: Energy Industry Review [6]

عالمياً يمكن تخزين الغاز في باطن الأرض في ثلاثة أنواع من الخزانات الجيولوجية[7]، وهي إما حقول نفط أو غاز ناضبة (مُستنفدة) والتي كانت في الأصل حقولاً منتجة ثم تم استخراج مخزوناتها من النفط أو الغاز خلال فترة الإنتاج ووصلت إلى حالة النضوب. كما يمكن تخزين الغاز في كهوف الملح (Salt Caverns) وهي تجاويف صناعية في طبقات ملح طبيعية، أو في طبقات المياه الجوفية العميقة (Aquifers)، كما هو مبين بالشكل 1-9. وفي بعض الحالات يمكن تخزين الغاز في تجاويف داخل الصخور (Rock Caverns)، لكنها محدودة للغاية، مقارنة بالأنواع سالفة الذكر.

ولكل من الأنواع سالفة الذكر سماتها المختلفة ويشمل ذلك المسامية (Porosity)، والنفاذية (Permeability)، بالإضافة إلى القدرة على الاحتجاز (Retention Capacity).

الشكل 1-9: أنواع الخزانات المستخدمة في التخزين الجوفي للغاز الطبيعي



المصدر: API & AGA [8]

1-2-4: المقاييس المستخدمة في توصيف خزانات الغاز الجوفية

تستخدم عادة عدة مقاييس لتوصيف حجم الغاز في الخزان الجوفي ويشمل ذلك كل من حجم غاز الأساس (Cushion Gas or Base Gas)، وحجم الغاز النشط أو الفاعل في الخزان الجوفي (Working Gas)، وإجمالي السعة التخزينية للخزان من الغاز (Total Gas Storage Capacity)، ومعدل حقن (Gas Injection Rate) وتوصيل الغاز (Gas Deliverability Rate) [9].

فبحسب متطلبات التشغيل في خزانات الغاز الجوفية، يجب الحفاظ على كمية ثابتة من الغاز لا يتم سحبها تحت أي ظرف وهي تعرف باسم "غاز الأساس"، وهو الحجم الأدنى من الغاز الذي يجب الاحتفاظ به داخل الخزان بشكل دائم للحفاظ على ضغط مناسب لضمان إتمام عملية سحب الغاز الطبيعي وقت الحاجة. ويختلف حجم

"غاز الأساس" حسب طبيعة كل خزان، وقد يصل حجمه إلى 80% من مخزون الغاز الكلي الذي يتم تخزينه داخل الخزان الجوفي، كما هو الحال في طبقات المياه الجوفية العميقة.

بينما يشير حجم الغاز العامل أو النشط (Working or Active Gas) إلى حجم الغاز الذي يمكن سحبه من الخزانات الجوفية، أياً كان نوعها، فوق مستوى غاز الأساس، ليتم بيعه وتسويقه في السوق المحلي. وبذلك يكون إجمالي حجم الغاز في الخزان الجوفي (Gas in Storage) وقت الحاجة إلى سحبه هو مجموع كلٍ من غاز الأساس والغاز النشط أو العامل.

أما إجمالي السعة التخزينية من الغاز (Total Gas Storage Capacity) للخزان الجوفي فيعرف بأنه أقصى حجم يمكن تخزينه من الغاز الطبيعي، استناداً إلى عدة عوامل من بينها نوع الخزان نفسه، والمعدات والأجهزة المستخدمة في حقن الغاز بداخل الخزان، وظروف التشغيل.

أما السعة التخزينية العاملة أو القابلة للسحب (Working Gas Capacity) للخزان الجوفي فهي إجمالي السعة التخزينية للغاز مطروحاً منها حجم غاز الأساس، وهي تمثل مخزون الغاز القابل للسحب، الشكل 1-10.

الشكل 1-10: العلاقة بين السعة التخزينية العاملة وإجمالي السعة التخزينية في الخزان الجوفي للغاز

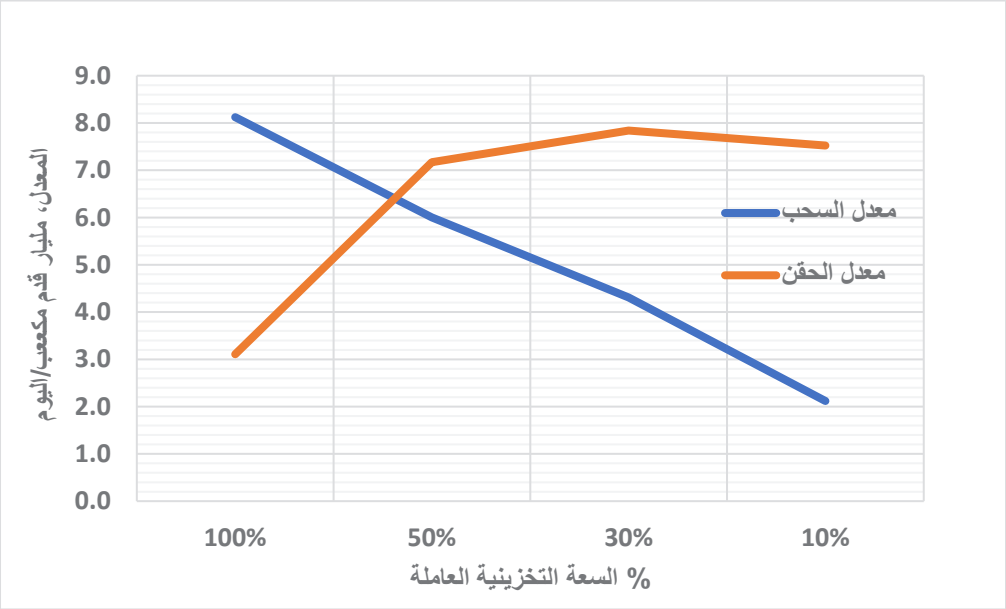
كما يعد معدل التوصـيل (Deliverability Rate)، ويطلق عليه أيضـاً معدل السـحب (Withdrawal Rate)، من العوامل الفنية المهمة لمنشـأة تخزين الغاز الجوفية، وهي كمية الغاز التي يمكن سـحبها وقت الحاجة خلال فترة زمنية معينة، وعادة ما تكون بوحدة قدم مكعب غاز/اليوم (أو متر مكعب غاز/اليوم).

ومعدل التوصـيل ليس ثابت، بل متغير ويتوقف على عدد من العوامل أهمها كمية الغاز الطبيعي المتوافرة في الخزان الجوفي وقت عملية السحب، والضغط داخل الخزان، وقدرة الضواغط المتوفرة. وبشكل عام، يتغير معدل التوصيل لمنشأة التخزين بشـكل مباشـر مع كمية الغاز الطبيعي المتوفرة في الخزان وقت عملية السحب، حيث يكون عند أعلى قيمة لـه عندما يكون الخزان ممتلئاً بالكامل، وينخفض تدريجياً مع استمرار السحب من الغاز العامل أو النشط.

أما معدل الحقن (Injection Rate)، فهو كمية الغاز التي يمكن حقنها داخل الخزان الجوفي خلال فترة زمنية معينة، أي المفهوم العكسـي لمعدل السـحب أو التوصـيل، وهو معدل متغير حيث يقل إذا كان الخزان الجوفي ممتلئاً بالغاز، ويزيد كلما قل مخزون الغاز داخل الخزان. ويكون معدل الحقن عند أعلى قيمة لـه عندما يكون الخزان شـبه فارغ من المخزون، وعند أقل قيمة له عندما يكون ممتلئاً بالغاز. يبين الشـكل 1-11 العلاقة بين مسـتوى ملء الخزانات عند نسـب متفاوتة من الغاز النشـط مع كل من معدل السـحب، ومعدل الحقن، وذلك اسـتناداً إلى بيانات واقعية من منشآت لتخزين الغاز الجوفي في أوكرانيا.

إن أهم عاملين حاسـمين في اختيار نوع الخزان الجوفي للغاز هما القدرة على احتجاز الغاز، ومعدل التوصـيل (أي معدل سـحب الغاز من الغاز وقت الحاجة)، لضـمان الحصـول على الكميات المطلوبة لتلبية الطلب. يلخص الجدول 1-2 كافة المقاييس المستخدمة في توصيف مخزون الخزان الجوفي من الغاز الطبيعي.

الشكل 1-11: مثال على العلاقة بين مستوى ملء الخزانات ومعدل كل من السحب والحقن



المصدر: من إعداد الباحث استناداً إلى بيانات واقعية من مشغلي منشآت تخزين الغاز الجوفي في أوكرانيا

الجدول 1-2: المقاييس المستخدمة في توصيف مخزون الغاز الطبيعي في الخزان الجوفي

المقياس	الوصف
غاز الأساس (Cushion Gas or Base Gas)	الحجم الأدنى من الغاز المطلوب توافره بداخل الخزان بشكل دائم للحفاظ على ضغط مناسب، وضمان إتمام عملية سحب الغاز الطبيعي وقت الحاجة
حجم الغاز العامل أو النشط (Working Gas)	حجم الغاز الذي يمكن سحبه من الخزانات الجوفية فوق مستوى غاز الأساس، ليتم بيعه وتسويقه في السوق المحلي.
إجمالي السعة التخزينية من الغاز (Total Gas Storage Capacity)	أقصى حجم يمكن تخزينه من الغاز الطبيعي في الخزان الجوفي
السعة التخزينية العاملة (Working Gas Capacity)	إجمالي السعة التخزينية للخزان الجوفي مطروحاً منها حجم غاز الأساس
معدل الحقن (Injection Rate)	معدل ضخ الغاز بداخل الخزان الجوفي وقت انخفاض الطلب، ويكون عند أعلى قيمة له والخزان فارغ
معدل السحب أو التوصيل (Withdrawal/Deliverability Rate)	معدل سحب الغاز من الخزان الجوفي وقت الحاجة، ويكون عند أعلى قيمة له والخزان ممتلئ

المصدر: من إعداد الباحث

3-1: أنواع خزانات الغاز الجوفية، وسماتها الفنية

1-3-1: حقول النفط والغاز المُستنفدة (Depleted Oil & Gas Fields)

تعد حقول النفط والغاز المُستنفدة (الناضبة) الأكثر شيوعاً في الاستخدام في تخزين الغاز في العديد من المناطق، وهي عبارة عن حقول كانت منتجة وتم استنزاف احتياطياتها من النفط والغاز بمرور الزمن. ومن ثم يمكن إعادة استغلالها في التخزين الجوفي للغاز. وتوفر حقول النفط والغاز المُستنفدة العديد من المزايا مثل إمكانية استغلال البنية التحتية القائمة، الأمر الذي يقلل من التكاليف الرأسمالية المطلوبة. علاوة على المعرفة المُسبقة بالسمات الجيولوجية للخزان الجوفي، والذي يضم صخور تتسم بمسامية عالية تمكن من تخزين الغاز في المسام داخل الصخور.

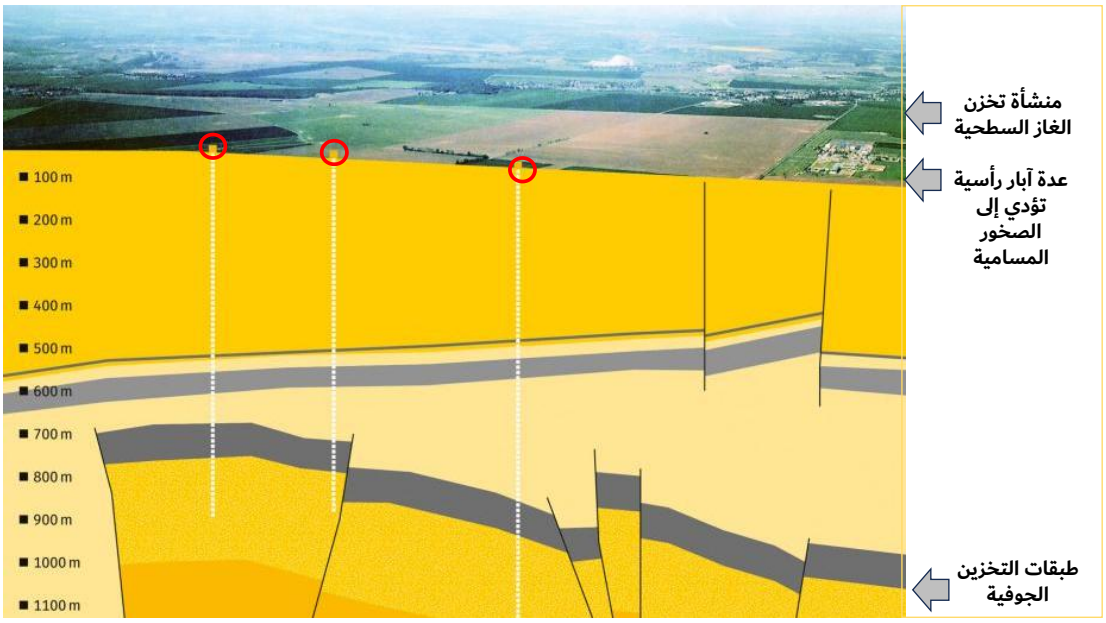
كما أنها لا تحتاج إلى حفر آبار جديدة كون أن الآبار موجودة بالفعل. علاوة على أن كميات غاز الأساس عادة تكون أقل مقارنة بأنواع الخزانات الجوفية الأخرى. وقد توجد الطبقات المستنفدة المستخدمة في تخزين الغاز على أعماق مختلفة قد تتراوح بين 1,000 و 3,000 متر.

في المقابل، تتطلب هذه الخزانات فترتي توقف سنوياً، تستمر كل منهما قرابة أسبوعين، يتم خلالهما تعليق عمليات الحقن والسحب بالكامل. ونظراً لطبيعة الصخور المسامية في الخزانات المُستنفدة، فإن توزيع الغاز داخلها يكون أكثر انتشاراً مقارنةً بأنواع الخزانات الجوفية الأخرى، ونتيجة لذلك يكون ضغط الخزان غير مرتفع، ومعدل السحب منه أقل مقارنة بالأنواع الأخرى.

وقد سُجلت أول تجربة ناجحة لتخزين الغاز الطبيعي تحت الأرض على مستوى العالم في عام 1915، وذلك من خلال إعادة تأهيل بئر غاز مستنزف وتحويله

إلى حقل تخزين في مقاطعة ويلاند (Welland) بكندا. يبين الشكل 1-12، أحد المواقع المستخدمة في تخزين الغاز في مكامن مُستنفدة في ألمانيا.

الشكل 1-12: أحد مواقع تخزين الغاز الجوفية في مكامن غاز مُستنفدة في ألمانيا

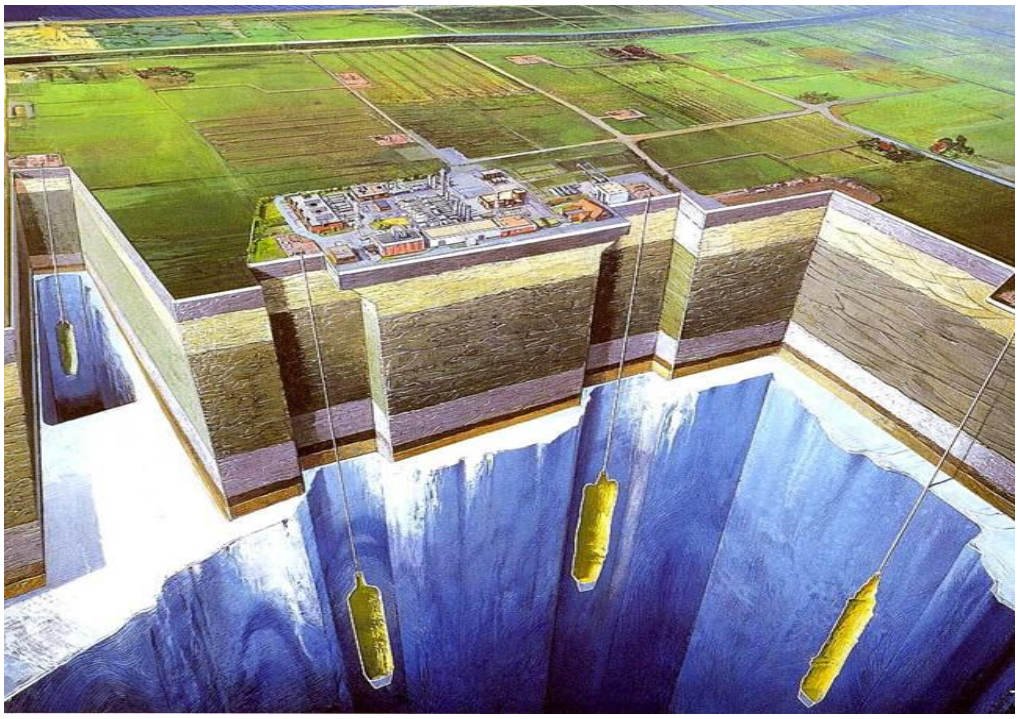


المصدر: معدل عن vng-gasspeicher

1-3-2: كهوف الملح (Salt Caverns)

كهوف الملح هي تجاويف صـــناعية يتم تشـــكيلها داخل طبقات ملح طبيعية موجودة تحت سطح الأرض، سواء كانت هذه التكوينات قبب ملحية (Salt Domes)، أو تكوينات ملحية (Salt Beds)، كما هو مبين بالشـــكل 1-13. وهي تتميز بقدرتها على منع تســرب الغاز، وكفاءتها ومرونتها العالية بســبب ما توفره من معدلات عالية للسحب والحقن، وبالتالي تعتبر من الحلول المناسبة للأوقات الطارئة التي تشهد تغيراً مفاجئاً في الطلب على الغاز داخل السوق المحلي.

الشكل 1-13: كهوف الملح المستخدمة في التخزين الجوفي للغاز



المصدر: API

ويتطلب هذا النوع من الخزانات الجوفية تنفيذ عملية صـــناعية يتم من خلالها تشـكيل تجاويف (كهوف) ضـمن طبقات الملح. حيث تبدأ العملية بحفر بئر رأسـي إلى العمق الذي تتواجد فيه الطبقات الملحية، والتي غالباً ما تقع بين 500 و1,500 متر تحت سطح الأرض. بعد ذلك، يُضخ الماء العذب من السطح عبر أنبوب إلى الطبقات الملحية، حيث يتفاعل مع الملح ويذوُبه، مكونًا محلولاً ملحيًا (Brine)، والذي يتم سحبه فيما بعد إلى السطح والتخلص منه.

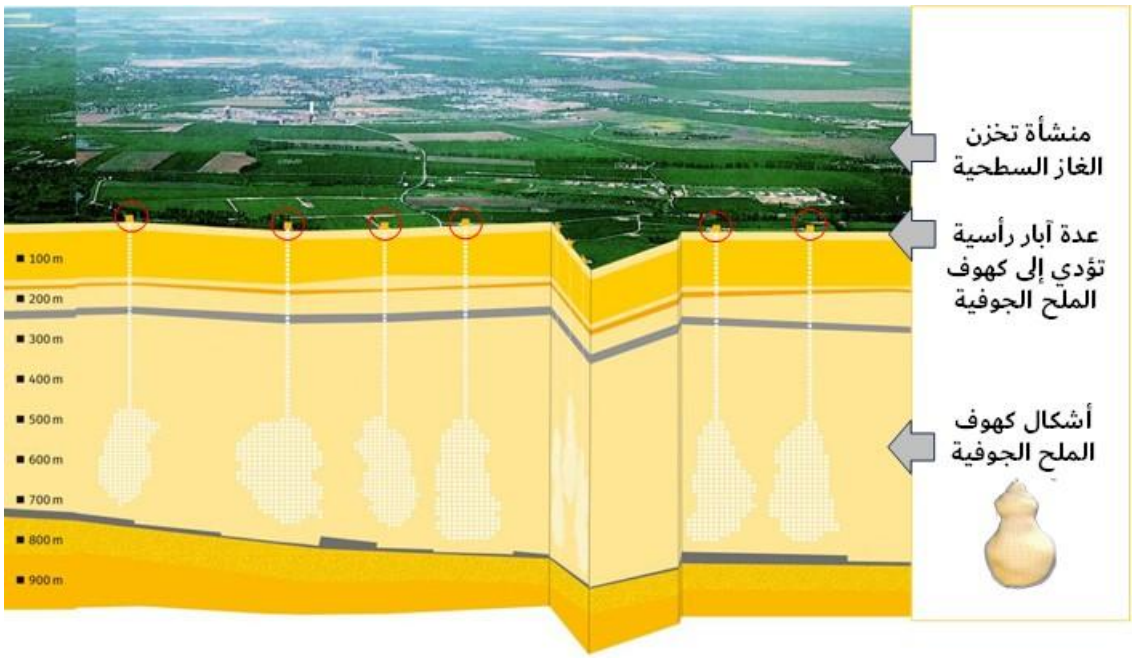
ونتيجة لعملية التذويب المتكررة، تتكون فراغات تشـــبه الكهف داخل الطبقة الملحية. ويتم إعادة هذه العملية حتى يتم الوصـول بالشـكل والحجم المطلوب للتجويف (الكهف) والذي يكون أقرب إلى الشكل الأسطواني بقطر قد يصل طوله إلى 100 متر، وارتفاع نحو 500 متر. وتتســم جدران كهوف الملح بصــلابة شــديدة تعادل صــلابة

الفولاذ، ولذلك فهي تحمي الكهف من الانهيار طوال فترة تشـــغليه كخزان جوفي[10]، والتي قد تمتد إلى أكثر من ثلاثين عاماً.

وعادة يتم إنشاء عدة كهوف ملحية في نفس موقع منشأة التخزين عبر حفر عدة آبار لضـــمان تخزين كميات كبيرة من الغاز، وقد يصـــل العدد إلى نحو 50-60 كهف ملحي كما هو الحال في بعض المنشآت الواقعة في النمسا، وألمانيا، وتركيا.

ونظراً لطول فترة الإنشاء التي قد تستغرق عدة سنوات في بعض الحالات، فقد يبدأ المشروع بحفر عدد قليل من الكهوف الملحية ثم يتم زيادتها تباعاً عبر حفر المزيد من الآبار لتشكيل تجاويف إضافية بهدف الوصول إلى السعة التخزينية المطلوبة. يبين الشكل 1-14، أحد مواقع تخزين الغاز في كهوف الملح في ألمانيا.

الشكل 1-14: أحد مواقع تخزين الغاز الجوفية في كهوف الملح في ألمانيا

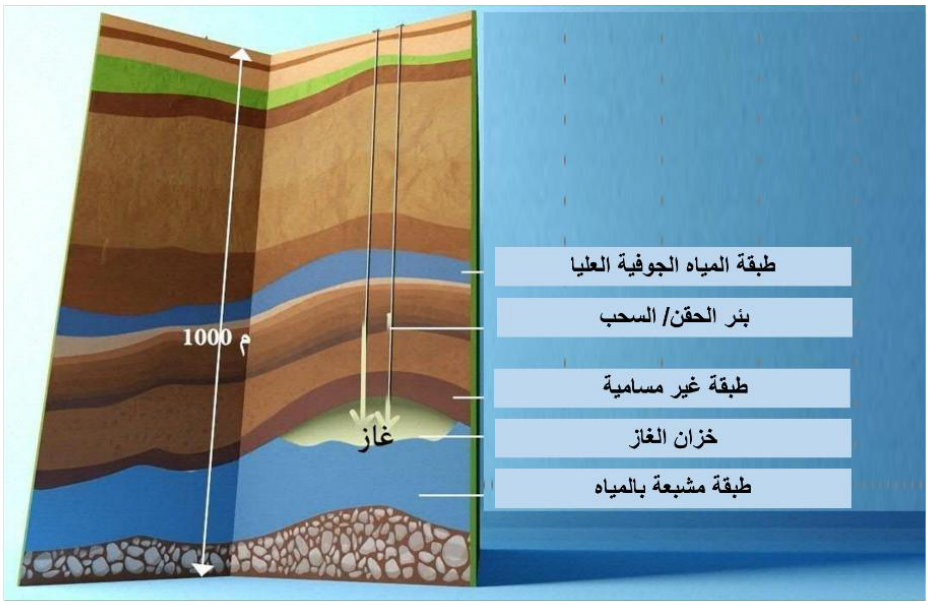


المصدر: معدل عن vng-gasspeicher [11]

1-3-3: طبقات المياه الجوفية العميقة (Aquifers)

يمكن استغلال الصخور المسامية التي تحتوي على المياه الجوفية العميقة كخزان جوفي للغاز الطبيعي بشرط وجود طبقة صخرية غير مسامية (Impermeable Rock) فوقها لمنع تسرب الغاز. ولدى تلك الصخور المسامية خصائص جيولوجية مشابهة لحقول النفط والغاز، مثل المسامية والنفاذية، والتي بدورها تسمح بتخزين كميات كبيرة من الغاز الطبيعي، من خلال إزاحة المياه، كما هو موضح بالشكل 1-15.

الشكل 1-15: رسم توضيحي لطريقة تخزين الغاز الطبيعي في طبقة المياه الجوفية العميقة



المصدر: معدل عن AFP

ويمكن استخدام هذا النوع من الخزانات الجوفية في المناطق التي لا تتوافر فيها حقول نفط وغاز مُستنفدة يمكن استغلالها، أو طبقات ملحية يمكن من خلالها تشكيل كهوف الملح. لكنها تتطلب وجود كميات كبيرة من غاز الأساس قد تصل إلى 50-

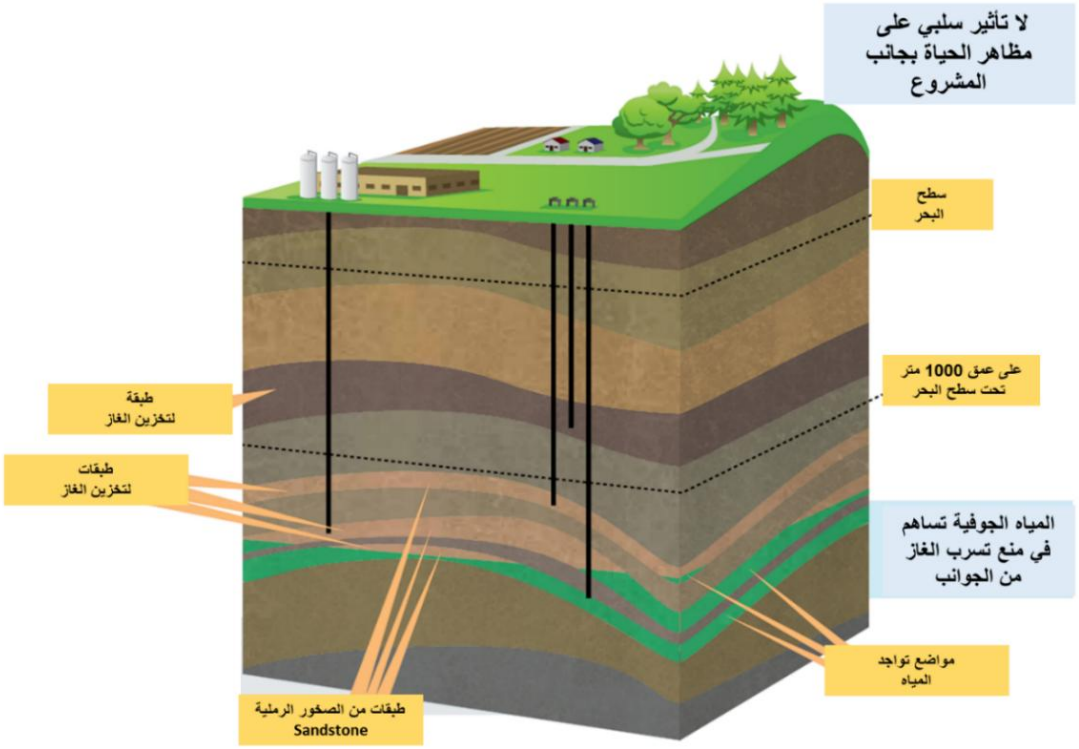
80% من إجمالي السعة التخزينية[12]، كما أنها تحتاج إلى وقت أطول خلال عملية الحقن. ولذلك تستخدم لتلبية الطلب الموسمي على الغاز ولدورة واحدة سنوياً.

وبشكل عام تعد طبقات المياه الجوفية من الخيارات الصعبة وغير المفضلة في الاستخدام، لعدة أسباب:

- عدم المعرفة المسبقة بالخصائص الجيولوجية لطبقات المياه الجوفية، وهو الأمر الذي يتطلب عمل أنشطة للمسح الزلزالي للمنطقة.
- عدم القدرة على تحديد حجم الخزان الجوفي وأقصى كمية من الغاز يمكن تخزينها، وهو الأمر الذي يتطلب حفر آبار أولية في الطبقات الجيولوجية للحصول على تلك المعلومات، ودراسة خصائصها مثل المسامية والنفاذية.
- الحاجة إلى حفر آبار داخل الطبقات الحاوية على المياه، وإنشاء بنية تحتية مرتبطة بها مثل خطوط الأنابيب، معدات الحقن، وكذلك أجهزة تجفيف للتخلص من المياه التي قد تصاحب عملية إعادة إنتاج الغاز من الطبقات.
- ارتفاع حجم غاز الأساس، مع عدم إمكانية استرجاعه حتى بعد الإيقاف النهائي لمنشأة التخزين في نهاية العمر الافتراضي لها.

جدير بالذكر أن التخزين الجوفي للغاز في طبقات المياه يمكن أن يتم في عدة طبقات حسب شكل الخزان، ومن أمثلة ذلك مشروع "Jackson Prairie" في الولايات المتحدة الأمريكية والذي يتم من خلاله تخزين الغاز في عدة طبقات من الصخر الرملي (Sandstone)، من خلال 45 بئر تم حفرها لهذا الغرض كما هو مبين بالشكل 1-16.

الشكل 1-16: مشروع "Jackson Prairie" لتخزين الغاز في الطبقات الحاوية للمياه في الولايات المتحدة



المصدر: PSE [13]

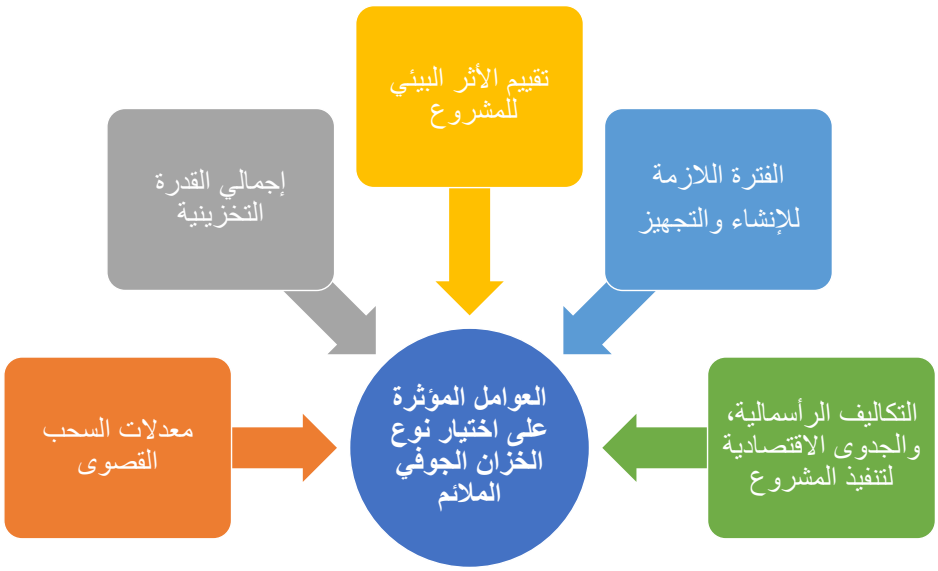
1-4: كيفية اختيار خزانات الغاز الجوفية المناسبة

يعتمد اختيار النوع المناسب من الخزانات الجوفية لتخزين الغاز على عدة عوامل رئيسية. ومن أبرز هذه العوامل، التكاليف الرأسمالية، التي يمكن قياسها بالدولار لكل قدم مكعب من السعة التخزينية العاملة، إضافةً إلى الجدوى الاقتصادية للمشروع، ومدة الإنشاء والتجهيز، وإجمالي السعة التخزينية المتاحة، وتقييم الأثر البيئي للمشروع بناءً على موقعه الجغرافي (الشكل 1-17).

كما تلعب الجوانب التشغيلية دوراً مهماً في عملية الاختيار، مثل معدلات السحب، التي تُستخدم لتحديد قدرة الخزان على تلبية الطلب الموسمي أو الاستجابة لحالات الطوارئ، بالإضافة إلى التكاليف التشغيلية.

وتعتمد التكاليف الرأسـمالية على إجمالي الطاقة التخزينية للخزان الجوفي، والحجم المطلوب من غاز الأسـاس الذي لا يتم اسـترجاعه طوال فترة عمل المنشـأة، والبنية التحتية المطلوبة من آبار وخطوط أنابيب، والتكنولوجيا المستخدمة، وهل هناك حاجة إلى تركيب ضواغط للغاز التي ستستخدم في عمليات السحب والحقن. ومن بين كل هذه العناصـر، يعد "غاز الأسـاس" المكون الأكبر في التكاليف الرأسـمالية، بما يصل إلى نحو 20-50% من التكاليف الإجمالية للمشروع.

الشكل 1-17: العوامل المحددة لاختيار نوع الخزان الجوفي لتخزين الغاز الطبيعي



المصدر: من إعداد الباحث

وتختلف التكاليف الرأسمالية بشكل كبير من مشروع لآخر، ومن موقع لآخر، ومن بلد لآخر، وحتى لنفس الجيولوجيا المستخدمة سواء كانت آبار مُستنفدة أو طبقات مياه جوفية أو كهوف ملحية، **الأمر الذي يجعل من الصعب تحديد التكاليف الرأسمالية حسب نوع التخزين الجوفي بشكل دقيق**. كما أن المراحل التوسعية لنفس المشروع عادة ما تكون بتكاليف مختلفة (أقل في أغلب الحالات) مقارنة بالمرحلة الأولى من التطوير.

وبالرغم من تلك التحديات، إلا أنه من الممكن تحديد مدى للتكاليف الرأسمالية من خلال دراسة أمثلة من عدة مشاريع (كالمبينة بالجدول 1-3) تم تنفيذها في طبقات متنوعة وفي مناطق مختلفة.

فمن أمثلة مشاريع التخزين في حقول الغاز المستنفدة، التي تعد الأكثر انتشاراً، مشروع Bergermeer في هولندا، والذي قام بتنفيذه ائتلاف من شركة Taqa بحصة 60% وشركة EBN بحصة 40% وتم تشغيله عام 2015 [14]. والمشروع بطاقة تخزين عاملة 145 مليار قدم مكعب (4.1 مليار متر مكعب)، وبلغت التكاليف الرأسمالية حوالي 800 مليون يورو (ما يعادل 880 مليون دولار) أي بمتوسط 6,000 دولار لكل مليون قدم مكعب. كما يوجد مشروع Haidach في النمسا والذي تم تنفيذ المرحلة الأولى منه بسعة تخزين 42 مليار قدم مكعب، وبتكلفة رأسمالية بلغت 275 مليون دولار وتم تشغيله عام 2007 [15].

ويعد مشروع Spindletop في الولايات المتحدة، من أمثلة مشاريع التخزين في كهوف الملح، وتبلغ سعته التخزينية نحو 15 مليار قدم مكعب، بتكلفة رأسمالية 180 مليون دولار (أي متوسط 12,000 دولار لكل مليون قدم مكعب). وفي تركيا، يوجد مشروع بحيرة توز "Tuz" والذي تم تنفيذه على مرحلتين، حيث تم في المرحلة الأولى حفر 12 كهف ملحي بسعة تخزين 42.4 مليار قدم مكعب وبتكلفة استثمارية 700 مليون دولار (متوسط 16,500 دولار لكل مليون قدم مكعب). ثم أضيفت مرحلة توسعية ضخمة لرفع سعة التخزين بنحو 400% عبر حفر 48 كهف ملحي بسعة تخزين 148.3 مليار قدم مكعب، بتكاليف رأسمالية بلغت 2.73 مليار دولار[16]، (أي متوسط 18,400 دولار لكل مليون قدم مكعب)[17].

ومن أبرز أمثلة مشاريع التخزين في طبقات المياه الجوفية العميقة مشروع Jackson Praire في شمال شرق الولايات المتحدة، والذي شهد تنفيذ مرحلة توسعية

بسعة تخزين قابلة للسحب 1.2 مليار قدم مكعب، بهدف رفع إجمالي السعة التخزينية إلى 25 مليار قدم مكعب. وقد بلغت تكلفة هذه المرحلة نحو 6.1 مليون دولار، أي ما يعادل حوالي 5,100 دولار لكل مليون قدم مكعب.

الجدول 1-3: أمثلة من مشروعات تخزين الغاز الجوفية في دول مختارة

الدولة	اسم المشروع	نوع الخزان	السعة التخزينية	التكلفة الرأسمالية الاجمالية	التكلفة /مليار قدم مكعب	ملاحظات
أوزبكستان	Gazli	حقل غاز مستنفد	212-106 مليار قدم مكعب	550 مليون دولار	5,000 دولار	-
هولندا	Bergermeer	حقل غاز مستنفد	145 مليار قدم مكعب	880 مليون دولار	6,000 دولار	تكلفة المرحلة الأولى فقط
النمسا	Haidach	حقل غاز مستنفد	42 مليار قدم مكعب (المرحلة الأولى)	275 مليون دولار	6,500 دولار	تكلفة المرحلة الأولى فقط
تركيا	بحيرة توز (Lake Tuz)	كهوف ملحية	42.4 مليار قدم مكعب (المرحلة الأولى)	700 مليون دولار	16,500 دولار	12 كهف ملحي
	بحيرة توز (Lake Tuz)	كهوف ملحية	148.3 مليار قدم مكعب (المرحلة الثانية)	2.73 مليار دولار	18,400 دولار	48 كهف ملحي
بلجيكا	Loenhout	طبقة حاوية للمياه	27 مليار قدم مكعب	غير متوفر	7,000 دولار	تقديرية
الولايات المتحدة	Jackson Prairie	طبقة حاوية للمياه	1.2 مليار قدم مكعب (مرحلة توسعية)	6.1 مليون دولار	5,100 دولار	إجمالي السعة التخزينية العاملة 25 مليار قدم مكعب
	Spindletop	كهوف ملحية	15	180	12,000 دولار	-

المصدر: من إعداد الباحث استنادا إلى بيانات الشركات المشغلة للمشاريع

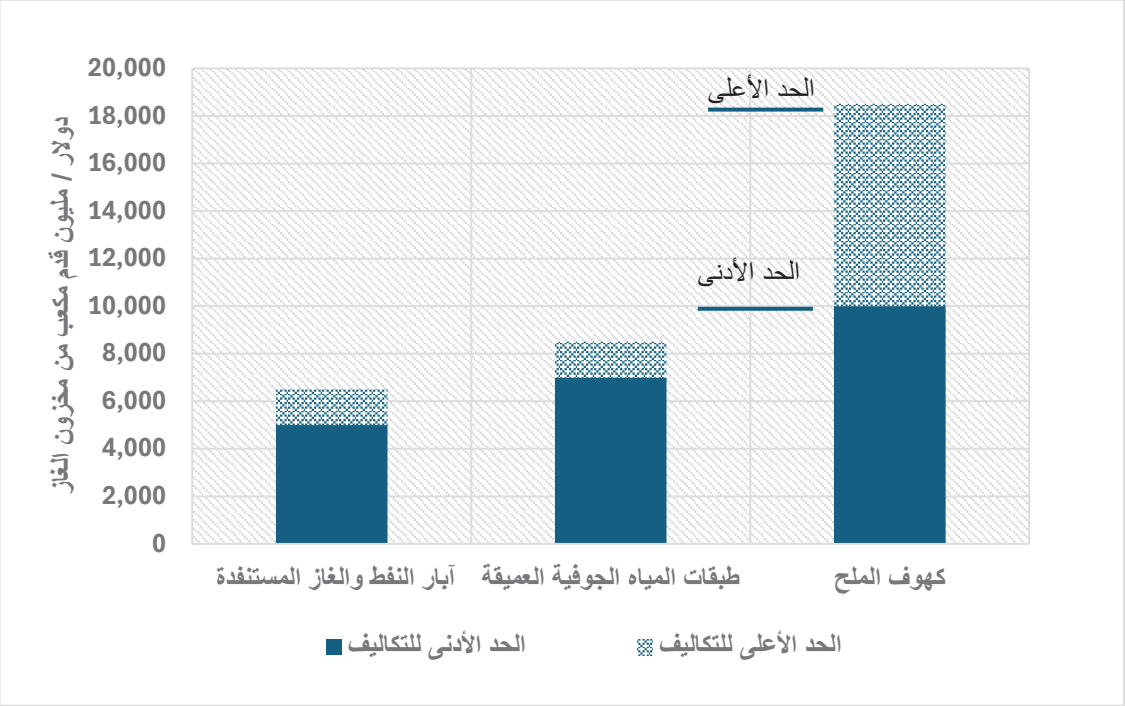
ووفق بينات تلك المشاريع، وأمثلة من مشاريع أخرى في أوروبا والولايات المتحدة، يتضح أن حقول النفط والغاز المُستنفدة الأقل عموماً في التكاليف الرأسمالية مقارنة بباقي الأنواع الأخرى، وهي تتراوح بين 5,000-6,500 دولار لكل مليون قدم مكعب من السعة التخزينية العاملة (القابلة للسحب فوق غاز الأساس). لكن يجب الأخذ في الاعتبار أن التكلفة في مشاريع جديدة قد تزيد عن هذا النطاق، خاصة في ظل ارتفاع أسعار الغاز في السنوات الأخيرة.

أما لطبقات المياه الجوفية العميقة، فبحسب البيانات المتوفرة من بعض المشاريع العاملة في الولايات المتحدة وغيرها، **تتراوح التكاليف الرأسمالية بين 8,500-7,000 دولار لكل مليون قدم مكعب من السعة التشغيلية العاملة**، أي أعلى من حقول النفط والغاز المُستنفدة، بسبب ما تتطلبه من دراسات جيولوجية معقدة، وكذلك الكمية الكبيرة المطلوبة من غاز الأساس، المكون الرئيسي للتكاليف الرأسمالية لأي مشروع، والتي تصل إلى نحو 80% من إجمالي السعة التخزينية.

بينما قد تتراوح التكاليف الرأسمالية في حالة كهوف الملح في نطاق **18,500-10,000** دولار لكل مليون قدم مكعب من السعة التخزينية العاملة (القابلة للسحب)، لتصبح الخيار الأعلى في التكاليف. ويعود ذلك بشكل أساسي إلى ارتفاع تكاليف حفر التجاويف (الكهوف) داخل طبقات الملح، بالإضافة إلى ندرة انتشار هذا النوع من المشاريع، لعدم انتشار طبقات الملح في العديد من المناطق.

يلخص الشكل 1-18، متوسط نطاق التكاليف الرأسمالية المطلوبة لبناء منشأة لتخزين الغاز تحت الأرض حسب نوع الخزان الجوفي.

الشكل 1-18: متوسط نطاق التكاليف الرأسمالية المطلوبة (دولار لكل مليون قدم مكعب) لإنشاء منشأة التخزين الغاز حسب نوع الخزان الجوفي



ملحوظة: *استنادا إلى البيانات القليلة المتوفرة من بعض المشاريع القائمة

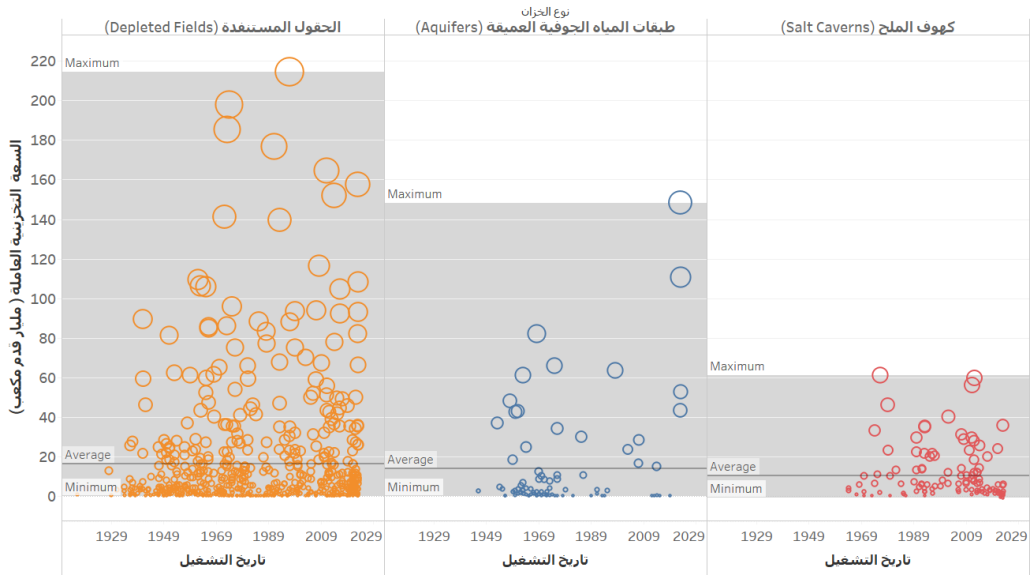
المصدر: من إعداد الباحث

ويُعد كل من معدل السحب الأقصى ومدى قدرة الخزان الجوفي على الاستجابة لحالات الطوارئ من العوامل الحاسمة عند المفاضلة بين أنواع الخزانات الجوفية. فبينما تُعتبر الكهوف الملحية الخيار الأكثر كفاءة في تلبية الطلب الطارئ بفضل قدرتها على تحقيق معدلات سحب عالية جداً، فإن الحقول المُستنفدة وطبقات المياه الجوفية بما توفره من معدلات سحب أقل، يجعلها أكثر ملاءمة لتلبية الاحتياجات الموسمية ومتطلبات التخزين المتوازن على المدى الطويل.

في المقابل، وبدراسة أكثر من 700 منشأة تخزين جوفي للغاز في مناطق العالم المختلفة، توفر حقول النفط والغاز المستنفدة مساحة تخزينية أكبر من أنواع التخزين الأخرى، بمتوسط 16.5 مليار قدم مكعب للخزان الجوفي الواحد. وهناك سعات تخزين استثنائية في بعض المنشآت، لا سيما في روسيا، حيث تجاوزت السعة التخزينية في بعض الحقول المُستنفدة نحو 200 مليار قدم مكعب.

وتأتي طبقات المياه الجوفية في المرتبة الثانية من حيث السعة التخزينية بمتوسط 14 مليار قدم مكعب للخزان الجوفي، وهناك سعات تخزين استثنائية في بعض المنشآت، لاسيما في روسيا، وصلت إلى 80 مليار قدم مكعب. ومن ثم تكون حقول النفط والغاز المستنفدة وطبقات المياه الجوفية العميقة أكثر فاعلية في التخزين الموسمي والطويل. أما كهوف الملح، فهي تعطي أقل مساحة تخزينية تبلغ في المتوسط 10 مليار قدم مكعب للخزان الملحي، مع بعض المنشآت لديها سعات أكبر بلغت نحو 50 مليار قدم مكعب كما هو مبين بالشكل 1-19.

الشكل 1-19: توزيع السعة التخزينية العاملة (القابلة للسحب) لأكثر من 700 مشروع للتخزين الجوفي للغاز حسب نوع الخزان



المصدر: من إعداد الباحث

يلخص الجدول 1-4، أبرز سمات المقارنة بين الأنواع الثلاثة للتخزين الجوفي للغاز الطبيعي.

الجدول 1-4: أبرز سمات المقارنة بين الأنواع الرئيسية الثلاثة لخزانات الغاز الجوفية

وجه المقارنة	حقول النفط والغاز المُستنفدة	كهوف الملح	طبقات المياه الجوفية
التكاليف الرأسمالية*	-منخفضة إلى متوسطة (يعتمد على البنية التحتية المتوفرة)	مرتفعة جدًا (حفر الكهوف مكلف ومعقد)	-مرتفعة (تحتاج إلى دراسات جيولوجية وتحضيرات خاصة)
	6,500-5,000 دولار/مليون قدم مكعب	18,500-10,000 دولار/مليون قدم مكعب	8,500-7,000 دولار/مليون قدم مكعب
الجيولوجيا المطلوبة	مكامن نفط أو غاز مستنفدة	طبقات ملحية سميكة	طبقات مياه جوفية يعلوها صخر عازل
السعة التخزينية	كبيرة جداً	متوسطة	كبيرة
متطلبات غاز الأساس	متوسطة %50	منخفضة %30-20	كبيرة جداً %80-50
زمن الإنشاء	2-1 سنوات	6-3 سنوات	4 -2 سنوات
فترة الاستخدام المثلى	موسمية / طويلة الأجل	يومي / أسبوعي	موسمية
المرونة التشغيلية في حالات الطوارئ	مناسبة نسبيًا	عالية جداً	أقل ملاءمة بسبب بطء معدل السحب
نضج التقنية والتجربة	مجرب ومتوفر تجاريًا	دقيق وسريع لكن تقنيًا أكثر تعقيدًا	مجرب جيداً
إمكانية إنتاج المياه مع الغاز	منخفضة	لا يوجد	عالية
الانتشار الجغرافي	واسع الانتشار	محدود	محدود

*استنادا إلى البيانات القليلة المتوفرة من بعض المشاريع القائمة في الولايات المتحدة وبعض الدول الأوروبية

المصدر: من إعداد الباحث

منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)

الفصل الثاني:
الانتشار الجغرافي لمنشآت التخزين الجوفي للغاز عالمياً، والسياسات المُنظمة لها

1-2	تطور السعة التخزينية لمنشآت تخزين الغاز الجوفي عالمياً
2-2	السعة التخزينية لمنشآت تخزين الغاز حسب النوع والتوزيع الجغرافي
3-2	الدول التي تملك أكبر عدد من منشآت تخزين الغاز الجوفي، وأهميتها
4-2	سياسات الطاقة المرتبطة بالتخزين الجوفي للغاز

تمهيد

في ظل التغيرات السريعة في سوق الطاقة العالمي، وتصاعد الحاجة إلى أمن الطاقة والمرونة في الإمدادات، برز التخزين الجوفي للغاز الطبيعي كأداة فعالة ذات فوائد اقتصادية وبيئية متعددة. حيث لا يقتصر هذا النوع من التخزين على تلبية الطلب الموسمي، بل يمتد دوره إلى تمكين الانتقال الطاقي، دعم الطاقة المتجددة، وتحقيق استدامة بيئية واقتصادية. الأمر الذي أدى إلى انتشار مشاريع التخزين الجوفي في عدة مناطق، وتبني سياسات طاقة داعمة له.

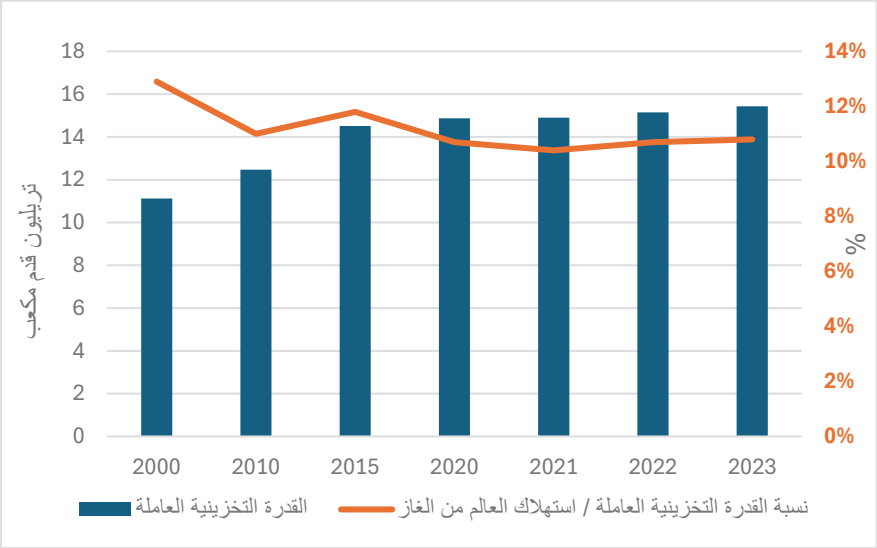
1-2: تطور السعة التخزينية لمنشآت تخزين الغاز الجوفي عالمياً

مع استمرار نمو الطلب العالمي على الغاز الطبيعي في منظومة الطاقة العالمية، ولجوء عدة أسواق إلى التوسع في استخدامه، زاد الاهتمام بالاستثمار في منشآت تخزين الغاز الجوفية، لضمان تلبية الطلب الموسمي، وتحقيق التوازن بين العرض والطلب. الأمر الذي ساهم في نمو القدرة التخزينية العاملة بداخل تلك المنشآت الجوفية. فبنهاية عام 2023، ارتفع إجمالي القدرة التخزينية العاملة لتبلغ 15.44 تريليون قدم مكعب مقارنة بـــ 11.1 تريليون قدم مكعب عام 2000، أي بنسبة نمو إجمالية 38% خلال تلك الفترة، علماً بأن نسبة نمو الطلب العالمي على الغاز الطبيعي بلغت خلال نفس الفترة نحو 63%.

ويعد قياس حصة السعة التخزينية العاملة (Working Gas Capacity) من إجمالي الطلب العالمي على الغاز الطبيعي أحد المؤشرات الرئيسية في تقييم تطور منشآت التخزين الجوفي. حيث تعد هذه النسبة بمثابة أداة مهمة لرصد قدرة البنية التحتية للتخزين على مواكبة احتياجات السوق. وتجدر الإشارة إلى أن هذه النسبة تتغير سنوياً نتيجة لتقلبات الاستهلاك العالمي من الغاز، إلى جانب ما يتم إضافته من سعات جديدة سواء من خلال تشغيل منشآت جديدة أو عبر التوسعات في المرافق القائمة.

على الصعيد العالمي، شكّلت السعة التخزينية العاملة في الخزانات الجوفية ما نسبته 12.9% من إجمالي الطلب العالمي على الغاز في عام 2000. إلا أن هذه النسبة شهدت تراجعاً تدريجياً خلال العقدين التاليين، لتصل إلى نحو 10.7% بحلول عام 2020. ويُعزى هذا الانخفاض إلى نمو الطلب العالمي على الغاز بوتيرة أسرع من توسّع قدرات التخزين الجوفي. ومنذ ذلك الحين، استقرت هذه النسبة ضمن نطاق يتراوح بين 10.7% و10.8% من الطلب العالمي، كما هو مبين بالشكل 2-1.

الشكل 2-1: تطور السعة التخزينية العاملة من الغاز في الخزانات الجوفية، وحصتها من إجمالي الاستهلاك العالمي



المصدر: من إعداد الباحث استنادا إلى قاعدة بيانات CEDIGAZ

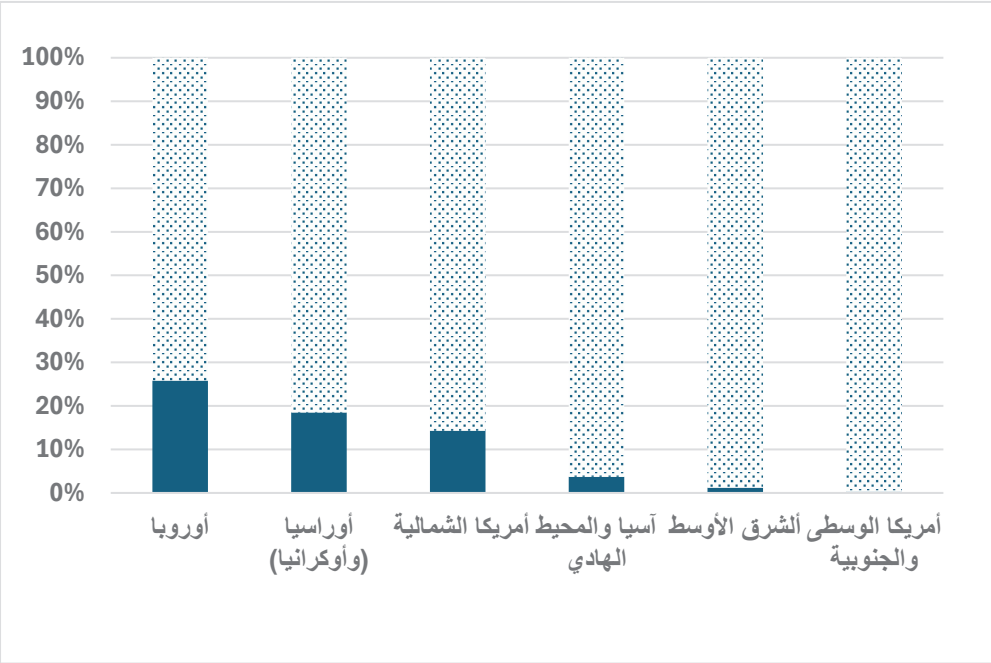
وتتباين نسبة السعة التخزينية العاملة إلى الطلب على الغاز من منطقة إلى أخرى، طبقاً لعدد من العوامل الجيولوجية وأخرى متعلقة بالسوق. ويأتي في مقدمة هذه العوامل مدى توفر الطبقات الجيولوجية الملائمة للتخزين الجوفي، والتي قد تكون نادرة أو غير متوفرة في بعض الدول مثل اليابان. كما تؤثر منظومة الإمدادات في كل سوق، ودرجة الاعتماد على واردات الغاز، في تحديد الحاجة إلى منشآت تخزين، ومدى تغطيتها للطلب المحلي.

ومن العوامل الإضافية المؤثرة في تطور مشاريع التخزين الجوفي للغاز درجة تطور شبكات نقل الغاز، إذ تُعد هذه الشبكات عنصراً أساسياً في تمكين التوسع، وربط منشآت التخزين ضمن سلسلة القيمة لقطاع الغاز. كما يلعب مزيج الطاقة الكهربائية دورًا مهمًا، حيث يؤدي ارتفاع الاعتماد على مصادر الطاقة المتجددة إلى زيادة الحاجة لتوافر مخزونات كافية من الغاز، لضمان استقرار الشبكة الكهربائية في فترات انخفاض إنتاج الكهرباء من المصادر المتجددة. كذلك تُعد موسمية الطلب على الغاز من العوامل المؤثرة في مستوى الاستهلاك، مما يعزز أهمية وجود سعات تخزينية مرنة قادرة على تلبية هذه التقلبات.

على مستوى المناطق، تصل نسبة السعة التخزينية العاملة من إجمالي استهلاك الغاز إلى 25.8% في أوروبا وهي النسبة الأعلى عالمياً، حيث تنتشر منشآت التخزين الجوفي في غالبية الأسواق الأوروبية، والتي بدورها تعتمد بدرجة كبيرة على واردات الغاز (سواء عبر خطوط الأنابيب أو ناقلات الغاز الطبيعي المسال) في مزيج إمدادات الغاز. أما في أوراسيا (وأوكرانيا) فتصل نسبة السعة التخزينية العاملة من إجمالي الاستهلاك إلى 18.5%، حيث تعد تلك المنطقة من المناطق ذات التاريخ الطويل في بناء منشآت التخزين الجوفي لخدمة السوق الأوروبي، وذلك عبر شبكات النقل والتصدير التي تربط روسيا وأوكرانيا بالسوق الأوروبي منذ عدة عقود.

وتعتبر أيضاً أمريكا الشمالية من المناطق ذات النسبة المرتفعة من السعة التخزينية من إجمالي الاستهلاك والتي تصل إلى 14.3%، حيث ينتشر عدد ضخم من منشآت التخزين الجوفي في كندا والولايات المتحدة على امتداد الجغرافيا الواسعة والممتدة لكلا البلدين. أما في بقية المناطق، فلا تزال النسبة ضئيلة للغاية ويعود ذلك بشكل أساسي إلى محدودية عدد منشآت التخزين الجوفي لديها، حيث تبلغ النسبة في منطقة آسيا والمحيط الهادي نحو 3.7%، وفي الشرق الأوسط 1.2%، أما في أمريكا الوسطى والجنوبية فتبلغ النسبة نحو 0.3%، كما هو مبين بالشكل 2-2.

الشكل 2-2: حصة السعة التخزينية العاملة من الغاز في الخزانات الجوفية من إجمالي الاستهلاك حسب المناطق



المصدر: الباحث استنادا إلى قاعدة بيانات CEDIGAZ

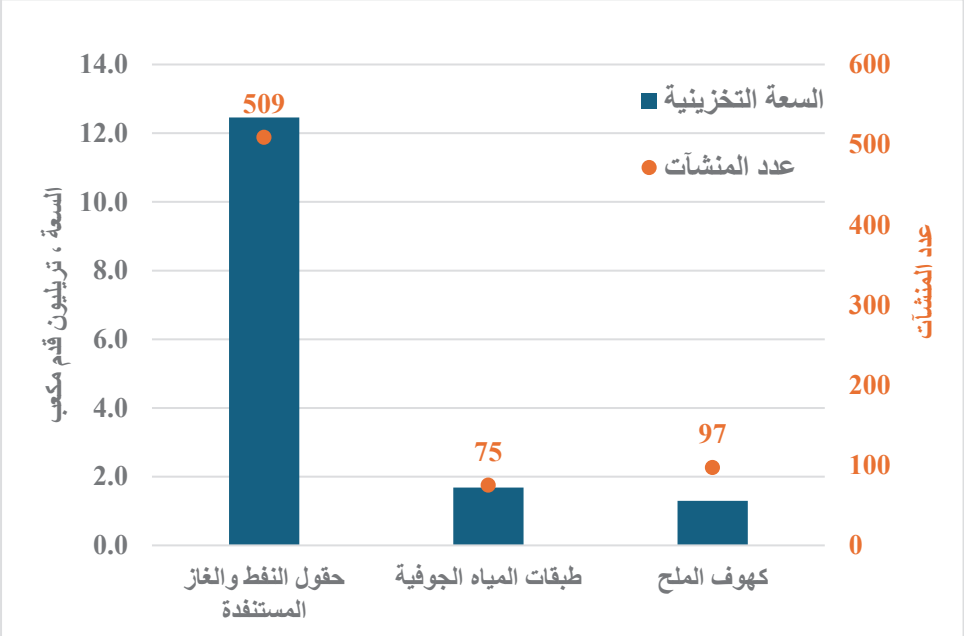
2-2: السعة التخزينية لمنشآت تخزين الغاز حسب النوع والتوزيع الجغرافي

تتواجد منشـــآت تخزين الغاز الجوفية في أغلب مناطق العالم، حيث بلغ عددها في مطلع عام 2024 نحو 681 منشـــأة بســـعات تخزينية متفاوتة. وتشـــكل الحقول المُستنفدة النسبة الأكبر من هذه المنشآت بإجمالي 509 منشأة، وبسعة تخزين قدرها 12.46 تريليون قدم مكعب، بما يعادل نحو 80.7% من سعة التخزين العالمية وبمعدل سحب يقدر بنحو 172 مليار قدم مكعب/اليوم.

أما منشـــآت التخزين الجوفي في طبقات المياه الجوفية فتبلغ نحو 75 منشـــأة، وبسعة تخزينية 1.68 تريليون قدم مكعب، بما يعادل نحو 10.9% من السعة العالمية، وبمعدل سحب يقدر بنحو 27.5 مليار قدم مكعب/اليوم.

وبالرغم من أن منشآت التخزين في كهوف الملح عددها أعلى من طبقات المياه الجوفية العميقة، إذ يبلغ العدد نحو 97 منشأة، إلا أن سعتها التخزينية أقل وتقدر بنحو 1.3 تريليون قدم مكعب، بما يعادل نحو 8.4% من السعة العالمية، وبمعدل سحب يقدر بنحو 66 مليار قدم مكعب/اليوم، كما هو موضح بالشكل 2-3.

الشكل 2-3: توزيع عدد منشآت التخزين والسعة التخزينية حسب نوع الخزان الجوفي



المصدر: الباحث استنادا إلى قاعدة بيانات CEDIGAZ

أما على مستوى المناطق، فتتركز منشآت تخزين الغاز الجوفية بشكل كبير في منطقة أمريكا الشمالية التي تتصدر المشهد العالمي بإجمالي 442 منشأة قيد التشغيل، بقدرة تخزينية عاملة (قابلة للسحب) قدرها 5.74 تريليون قدم مكعب، أي ما يعادل نحو 37% من السعة التخزينية العالمية. وتنتشر تلك المنشآت في كل من الولايات المتحدة وكندا على وجه الخصوص، بينما لا يوجد أي منشأة تخزين في المكسيك.

أما في **أوروبا** فتوجد نحو 139 منشـــأة تخزين جوفي للغاز، بســـعة تخزينية عاملة (قابلة للســـحب) تقدر بحوالي 4 تريليون قدم مكعب، بما يعادل نحو 26% من إجمالي الســـعة التخزينية العالمية. وتنتشـــر منشـــآت تخزين الغاز في غالبية الدول الأوروبية تقريباً خاصـــة أن أغلبها يعتمد على اســـتيراد الغاز في تلبية الطلب الداخلي، وتتصـــدرها ألمانيا التي تضـــم وحدها نحو 44 منشـــأة، بســـعة تخزينية تقدر بنحو 0.64 تريليون قدم مكعب.

وبالرغم من أن منطقة أوراســـيا (تشـــمل أوكرانيا) تضـــم عدد أقل من منشـــآت تخزين الغاز الجوفي مقارنة بأوروبا بإجمالي 47 منشـــأة تخزين، إلا أن ســـعاتها التخزينية كبيرة حيث تبلغ نحو 4.22 تريليون قدم مكعب، بما يعادل نحو 27.4% من الســـعة العالمية. وتســـتحوذ روســـيا، وهي ثاني أكبر منتج للغاز الطبيعي عالمياً بعد الولايات المتحدة، بالعدد الأكبر من منشـــآت تخزين الغاز في هذه المنطقة بإجمالي 23 منشـــأة، بســـعة تخزينية تبلغ 2.65 تريليون قدم مكعب. كما تعد أوكرانيا ثاني أكبر دول المنطقة في نشـــاط تخزين الغاز الجوفي حيث يوجد في أراضـــيها حوالي 13 منشـــأة، بسعة تخزين 1.1 تريليون قدم مكعب.

أما في منطقة **آســـيا والمحيط الهادي**، فتوجد نحو 45 منشـــأة تخزين بســـعة تخزينية 1.2 تريليون قدم مكعب، وهو ما يمثل نحو 7.8% من الســـعة التخزينية العالمية. وعلى الرغم من أن قدرات التخزين في هذه المنطقة لا تزال محدودة مقارنةً بأوروبا وأمريكا الشـــمالية، إلا أنها تشـــهد نمواً مطردًا، مدفوعة بالاســـتثمارات الكبيرة التي تقودها الصين، والتي أصبحت الدولة الأكثر نشاطًا في هذا المجال ضمن المنطقة. إذ تمتلك الصـــين حالياً نحو 35 منشـــأة تخزين جوفي، بســـعة إجمالية تقترب من 1 تريليون قدم مكعب.

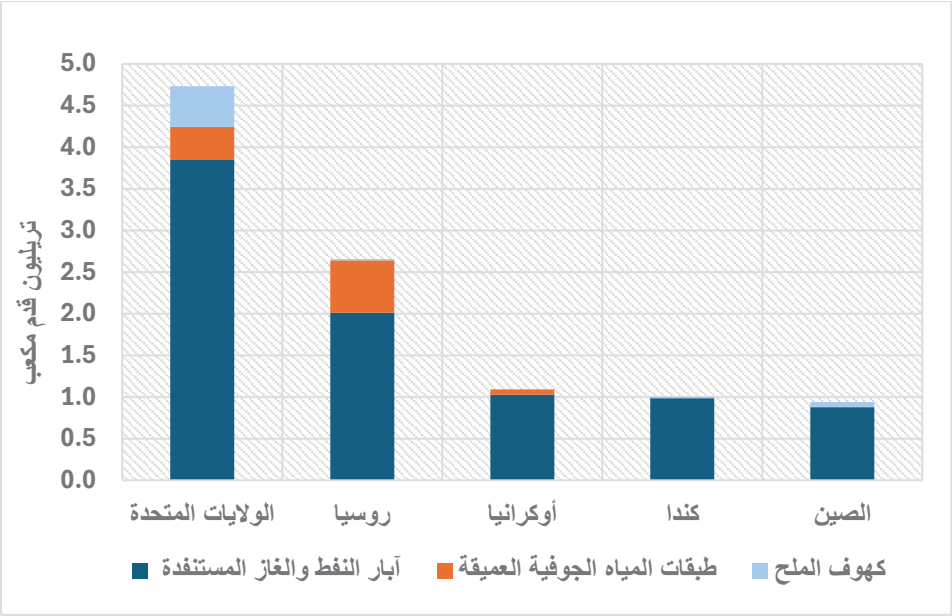
أما في منطقة الشرق الأوسط، فيبلغ عدد منشآت التخزين قيد التشغيل حوالي 4 منشآت بسعة تخزينية عاملة قدرها 0.235 تريليون قدم مكعب، بحصة 1.5% من الإجمالي العالمي. وتتواجد تلك المنشآت في كل من إيران، دولة الإمارات، مؤخراً انضمت إليهم المملكة العربية السعودية بعد تنفيذ أول مشروع في المملكة لتخزين الغاز الطبيعي عن طريق حقن الغاز المعالج في مكمن "الحوية-عنيزة" بما يسهم في إدارة التغيرات الموسمية على الطلب، وتحقيق مستهدفات برنامج إزاحة الوقود السائل، وخفض الانبعاثات الكربونية[18].

ولا تتواجد منشآت التخزين الجوفي في منطقة أمريكا الجنوبية إلا في دولة واحدة وهي الأرجنتين، التي تتواجد بها ثلاثة منشآت بسعة تخزينية محدودة تقدر بنحو 14 مليار قدم مكعب، بحصة 0.1% من إجمالي السعة العالمية.

2-3: الدول التي تملك أكبر عدد من منشآت تخزين الغاز الجوفي، وأهميتها

عالمياً تستحوذ خمس دول فقط (هي الولايات المتحدة، روسيا، أوكرانيا، كندا الصين) المبينة بالشكل 2-4، على أكثر من ثلثي السعة التخزينية الجوفية للغاز على مستوى العالم، بما يعادل نحو 10.42 تريليون قدم مكعب. وهي تشكل مزيج من كبار منتجي ومصدري الغاز في العالم مثل الولايات المتحدة وروسيا، وكبار المستهلكين المستوردين للغاز مثل الصين التي تعد أكبر مستورد للغاز الطبيعي المسال عالمياً منذ عام 2021، بالإضافة إلى دول العبور (الترانزيت) والتي تمثلها أوكرانيا التي كانت تعد تاريخياً بوابة عبور الغاز الروسي إلى أوروبا. ويعكس هذا التنوع الجغرافي أهمية التخزين الجوفي للغاز ليس في الدول المستهلكة أو المستوردة للغاز فقط وإنما أيضاً لكبار المنتجين، ودول العبور بما يضمن إدارة أسواق الغاز بمرونة عالية، وتحقيق أمن الإمدادات.

الشكل 2-4: الدول الخمس الكبرى من حيث سعة تخزين الغاز الجوفي، نهاية عام 2023



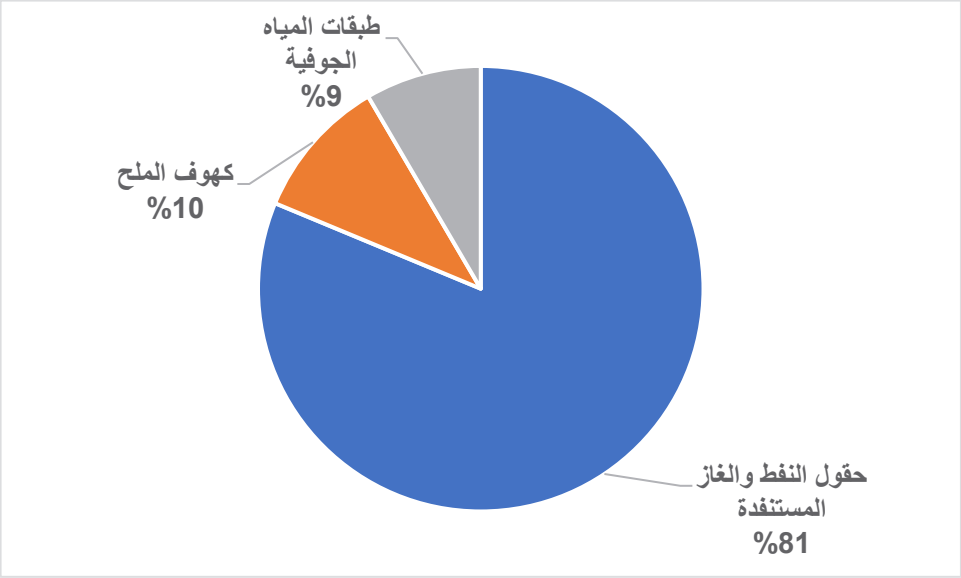
المصدر: الباحث استنادا إلى قاعدة بيانات CEDIGAZ

وتعتمد تلك الدول الخمس بشكل رئيسي على حقول الغاز المُستنفدة التي تشكل وحدها نحو 84% من إجمالي السعة التخزينية العاملة، بينما تشكل منشآت التخزين المعتمدة على طبقات المياه الجوفية العميقة نحو 10%، وتمثل كهوف الملح النسبة المتبقية والبالغة 6%.

2-3-1: منشآت التخزين الجوفي في الولايات المتحدة الأمريكية

تاريخياً، تعد الولايات المتحدة من بين الدول الرائدة عالمياً في مجال التخزين الجوفي للغاز، والذي بدأت في الاستثمار فيه منذ أكثر من 100 عام. ويقدر عدد المنشآت لديها بنحو 385 منشأة، بسعة تخزينية تقدر بنحو 4.7 تريليون قدم مكعب، أي نحو 30% من سعة التخزين الجوفي للغاز عالمياً. وتشكل الحقول المُستنفدة العدد الأكبر من منشآت التخزين الجوفي بإجمالي 304 منشأة بسعة تخزين عاملة تعادل 81% من إجمالي السعة في الولايات المتحدة، بينما يبلغ عدد كهوف الملح 37 منشأة، وبحصة 10%، أما طبقات المياه الجوفية فعددها 44 منشأة وبحصة 9% كما هو مبين بالشكل 2-5.

الشكل 2-5: توزع السعة التخزينية العاملة من الغاز في الولايات المتحدة حسب نوع الخزان الجوفي



المصدر: الباحث استنادا إلى بيانات EIA

وتلعب منشـــآت التخزين الجوفي دوراً محورياً في ضـــمان أمن الطاقة على المســـتوى الوطني، وتحقيق المرونة في الســـوق، ودعم انتقال الطاقة والتوســـع في مصادر الطاقة المتجددة، وذلك عن طريق القيام بمهام متعددة:

- **تأمين الإمدادات خلال الذروة**: من خلال توفير توفر الغاز خلال فترات الطلب المرتفع (الشتاء)، ما يقلل من مخاطر الانقطاعات.
- **دعم الاســتجابة الســريعة لحالات الطوارئ**: لتعويض الفاقد الناتج عن الأعطال، والأعاصـــير التي تعاني منها كثيراً الولايات المتحدة خاصـــة في منطقة خليج المكسيك.
- **خفض تقلبات الأســعار**: وذلك بهدف تخفيض الضــغط على الســوق الفوري عند ارتفاع الأسعار وفقاً لمركز هنري (Henry Hub).
- **تحقيق أرباح تجارية**: من خلال استغلال الفروق السعرية بين فصول السنة.

- **دعم محطات توليد الكهرباء**: تستخدم منشآت التخزين الغاز الجوفي لتوفير تغذية سريعة لمحطات التوليد العاملة بالغاز، خاصة مع الاعتماد المتزايد في الولايات المتحدة على الطاقة المتجددة.
- **دعم صادرات الولايات المتحدة من الغاز الطبيعي المسال**: عبر تأمين وصول الغاز إلى منشآت الإسالة التسعة المنتشرة في تكساس ولويزيانا عند حدوث أية انقطاعات طارئة.

ولتحقيق تلك الأهداف، تتوزع منشآت تخزين الغاز الجوفي على امتداد جغرافية الولايات المتحدة ضمن خمس مناطق الموضحة بالشكل 2-6، وهي:

- **منطقة الشرق (East Region)**

والتي تعتمد بشكل رئيسي على التخزين الجوفي في حقول الغاز المُستنفدة، كما يوجد بعض المنشآت الصغيرة التي تعتمد على التخزين في الكهوف الملحية.

- **منطقة الوسط الغربي (Midwest)**

وتنتشر بها منشآت التخزين الجوفي للغاز في طبقات المياه الجوفية العميقة بشكل كبير.

- **منطقة الجنوب المركزية (South Central Region)**

وهي تعتمد بشكل رئيسي على التخزين الجوفي في كهوف الملح التي توفر معدلات سحب عالية للاستجابة السريعة في حالات الطوارئ مثل الأعاصير التي تعاني منها تلك المنطقة على وجه الخصوص.

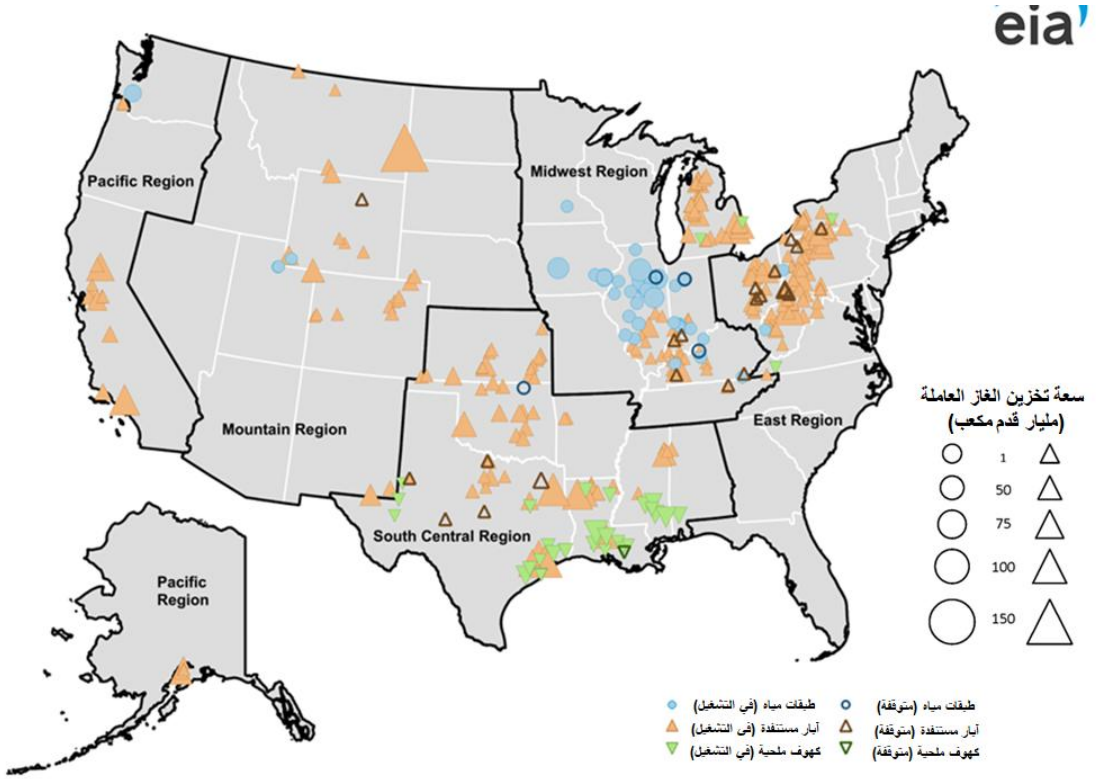
- **منطقة (Mountain)**

وبها عدد أقل من منشآت التخزين الجوفي للغاز، وأغلبها حقول غاز مُستنفدة.

- **منطقة الهادي** (Pacific Region)

وبها عدد أقل من منشآت التخزين الجوفي للغاز، وهي تعتمد بشكل شبه كامل على حقول الغاز المُستنفدة.

الشكل 2-6: مواقع منشآت التخزين الجوفي للغاز في الولايات المتحدة

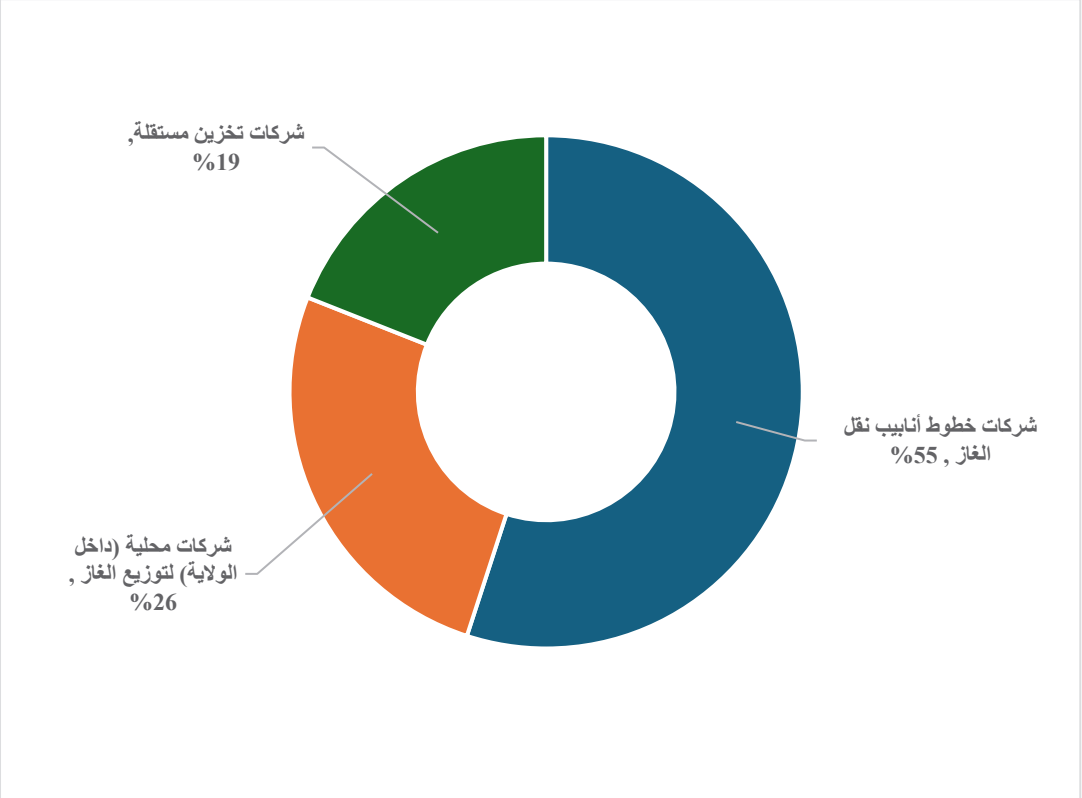


المصدر: EIA

ويقوم بإدارة هذه المنشآت قرابة 120 كياناً مشغلاً، وهي إما شركات مُشغلة لخطوط أنابيب الغاز (Pipeline Midstream Operators)، أو شركات محلية لتوزيع الغاز داخل الولايات (Local Distribution Companies, LDCs)، أو شركات تخزين مستقلة (Independent Storage Operators). وتتوزع السعة التخزينية العاملة بين هذه الجهات المشغلة على النحو المبين بالشكل 2-7.

وتتولى اللجنة الاتحادية لتنظيم الطاقة (FERC) منح التراخيص لمنشآت التخزين عبر الولايات (Interstate)، بينما تتولى السلطات المحلية منح التراخيص داخل الولايات (Intrastate). وقد وصل إجمالي التراخيص الممنوحة لتشغيل منشآت التخزين وفق آخر تحديث من إدارة معلومات الطاقة الأمريكية إلى 415 ترخيص.

الشكل 2-7: توزيع السعة التخزينية العاملة للغاز في الولايات المتحدة حسب الكيانات المشغلة



المصدر: الباحث استناداً إلى تحليل بيانات من EIA

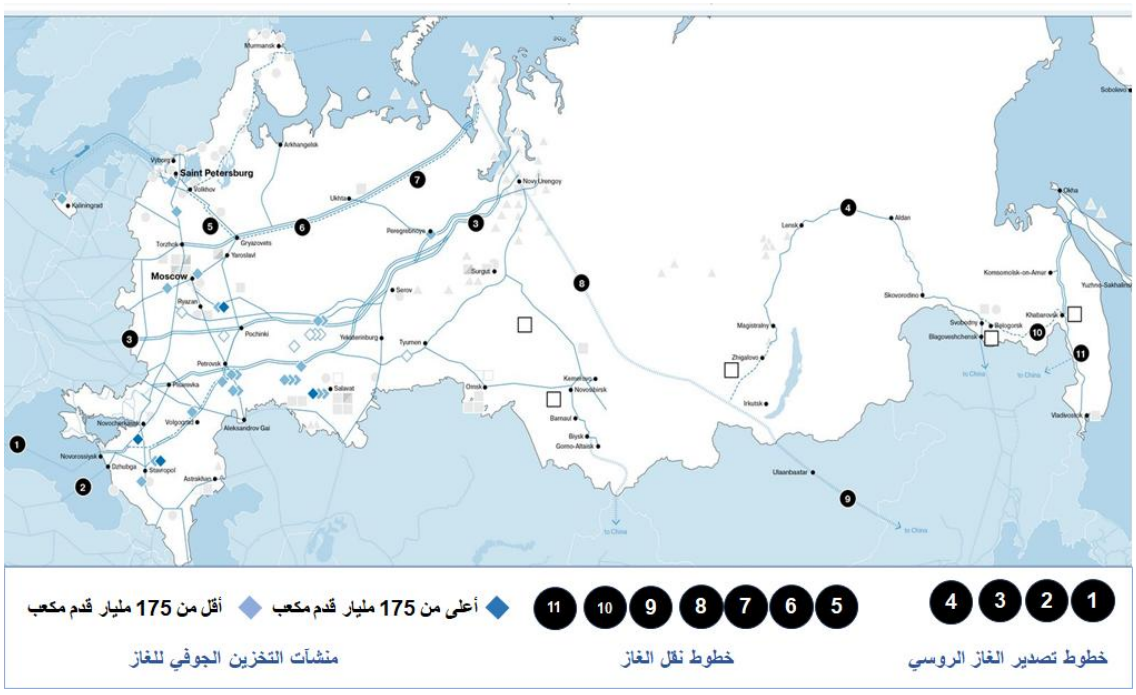
2-3-2: منشآت التخزين الجوفي في روسيا

تضم روسيا حوالي 23 منشأة لتخزين الغاز الجوفي، بسعة تخزينية عاملة (قابلة للسحب) تُقدّر بنحو 2.65 تريليون قدم مكعب، وهو ما يمثل حوالي 17.2% من إجمالي السعة التخزينية العالمية. وتتولى شركة Gazprom مسؤولية تشغيل وإدارة جميع هذه المنشآت. وتُعد منشآت التخزين الجوفي أحد الركائز الأساسية في منظومة الغاز الروسية، حيث تسهم في تلبية ما بين 20% إلى 40% من الطلب على الغاز خلال موسم التدفئة، فضلًا عن دورها الحيوي في تعزيز استقرار شبكات التوزيع وضمان توافر الإمدادات في حالات الطوارئ.

ومن بين الأدوار الاستراتيجية لمنشآت التخزين الجوفي الروسية، دعم صادرات Gazprom ، حيث تُسهم في تلبية الطلب لدى الأسواق الأوروبية،

وبالأخص في فصل الشتاء. ولهذا السبب، تتركز الغالبية العظمى من هذه المنشآت في الجزء الغربي من روسيا، بالقرب من خطوط أنابيب التصدير المتجهة إلى أوروبا، كما هو مبين بالشكل 2-8. إلا أن هذا الدور الاستراتيجي قد تراجع بشكل كبير بعد الأزمة الروسية-الأوكرانية في عام 2022، والتي كان من أبرز تداعياتها التراجع الحاد في صادرات الغاز الروسي في منظومة الطاقة الأوروبية بنسبة بلغت 80% مقارنة بمستويات ما قبل الأزمة.

الشكل 2-8: مواقع منشآت التخزين الجوفي للغاز في روسيا



المصدر: معدل عن شركة Gazprom [19]

وتعتمد روسيا بشكل أساسي على التخزين الجوفي في آبار الغاز المستنفدة، كونها أحد أكبر منتجي الغاز عالمياً، حيث يقدر العدد الإجمالي للمنشآت من هذا النوع بنحو 14 منشأة، بما يعادل نحو 75.8% من إجمالي السعة التخزينية (القابلة للسحب) في روسيا. بينما يبلغ عدد منشآت التخزين التي تعتمد على طبقات المياه الجوفية

العميقة نحو 7 منشآت وبحصة 23.8%. بينما يشكل التخزين في كهوف الملح العدد الأقل بإجمالي منشأتين، والتي تشكل نحو 0.4% فقط من سعة تخزين الغاز الجوفية في روسيا، ويبلغ الحد الأقصى لمعدل السحب من هذه المنشآت مجتمعة أكثر من 30 مليار قدم مكعب/اليوم. يلخص الجدول 2-1، عدد منشآت تخزين الغاز الجوفي في روسيا حسب النوع، والسعة التخزينية العاملة لكل منها.

الجدول 2-1: عدد منشآت تخزين الغاز الجوفي في روسيا حسب النوع، والسعة التخزينية العاملة لكل منها، مطلع عام 2024

البند	حقول الغاز المُستنفدة	طبقات المياه الجوفية العميقة	كهوف الملح	الإجمالي
العدد الإجمالي	14	7	2	23
أقصى معدل للسحب (مليار قدم مكعب/اليوم)	20.7	9.1	0.6	30.45
السعة التخزينية العاملة (تريليون قدم مكعب)	2.01	0.63	0.01	2.65
الحصة من إجمالي السعة التخزينية العاملة	%75.8	%23.8	%0.4	%100

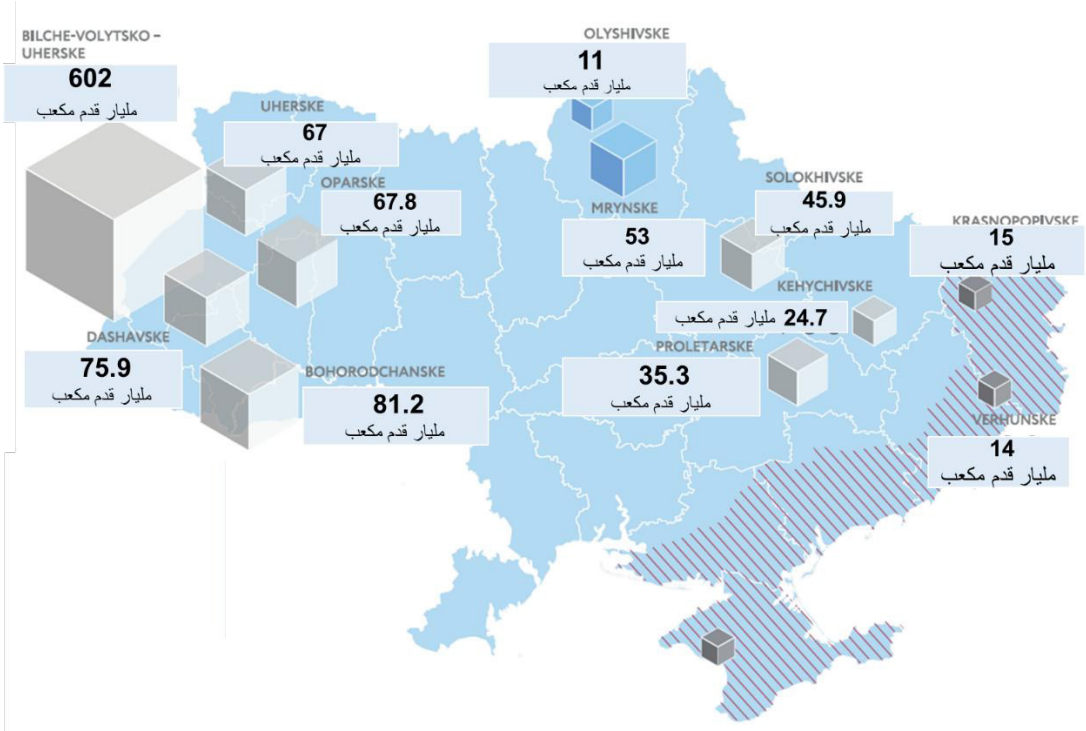
المصدر: الباحث استناداً إلى تحليل بيانات من Cedigaz

2-3-3: منشآت التخزين الجوفي في أوكرانيا

تعد أوكرانيا ثالث أكبر دولة في العالم من حيث السعة التخزينية لمنشآت الغاز الجوفي، إذ تمتلك 13 منشأة بسعة تخزينية عاملة تُقدّر بنحو 1.09 تريليون قدم مكعب، ما يعادل حوالي 7.1% من إجمالي السعة التخزينية العالمية. وتتركز نحو 80% من هذه السعة في منشآت تقع غرب البلاد، بالقرب من السوق الأوروبي، كما هو موضح في الشكل 2-9. أما في المناطق الشرقية وشبه جزيرة القرم، فتوجد منشآت تخزين

إضـــافية، إلا أنها لا تخضـــع لســـيطرة الحكومة الأوكرانية، بل تقع تحت إدارة الجانب الروسي.

الشكل 2-9: مواقع منشآت التخزين الجوفي للغاز في أوكرانيا، والسعة التخزينية لكل منها



المصدر: معدل عن Ukrtransgaz [20]

وتحظى منشـــآت التخزين الجوفي الأوكرانية بأهمية خاصـــة لدى أوروبا، إذ تُستخدم كوسيلة استراتيجية لتعزيز أمن الطاقة في القارة. حيث تتيح أوكرانيا خدمات تخزين الغاز خلال أشهر الصيف مقابل رسوم، ما يتيح للدول الأوروبية سحب الغاز المخزّن خلال فصـــل الشـــتاء لتلبية الطلب المرتفع. وبهذا يتجاوز الدور الوظيفي لهذه المنشآت الحدود الجغرافية لأوكرانيا، ليصبح جزءًا من منظومة أمن الطاقة الأوروبية.

وتتولى شـــركة Ukrtransgaz وهي إحدى شـــركات مجموعة النفط والغاز الأوكرانية Naftogaz، إدارة وتشـــغيل تلك المنشـــآت، وهي تقدم خدماتها لأكثر من 1,260 مستخدم مُسجل في داخل وخارج أوكرانيا، ويمثلون أكثر من 32 دولة.

وتعتمد **أوكرانيا** بشكل أساسي على التخزين الجوفي في حقول الغاز المُستنفدة، حيث يقدر العدد الإجمالي للمنشـــآت من هذا النوع بنحو 11 منشـــأة، بما يعادل نحو 94% من إجمالي السعة التخزينية (القابلة للسحب) في أوكرانيا. بينما يشكل التخزين في طبقات المياه الجوفية العميقة العدد الأقل بإجمالي منشأتين، والتي تشكل نحو 6% من سعة تخزين الغاز الجوفية. ويبلغ الحد الأقصى لمعدل السحب من تلك المنشآت مجتمعة أكثر من 8.1 مليار قدم مكعب/اليوم. يلخص الجدول 2-2، عدد منشآت تخزين الغاز الجوفي في أوكرانيا حسب النوع، والسعة التخزينية العاملة لكل منها.

الجدول 2-2: عدد منشآت التخزين الجوفي في أوكرانيا حسب النوع، والسعة التخزينية العاملة لكل منها، مطلع عام 2024

البند	حقول الغاز المُستنفدة	طبقات المياه الجوفية العميقة	الإجمالي
العدد الإجمالي	11	2	13
أقصى معدل للسحب (مليار قدم مكعب/اليوم)	7.55	0.57	8.12
السعة التخزينية العاملة (تريليون قدم مكعب)	1.03	0.06	1.09
الحصة من إجمالي السعة التخزينية العاملة	%94	%6	%100

المصدر: الباحث استناداً إلى تحليل بيانات من Cedigaz

2-3-4: منشآت التخزين الجوفي في كندا

تحتل كندا المرتبة الرابعة عالمياً من حيث سعة التخزين الجوفي للغاز بإجمالي 1 تريليون قدم مكعب، وهي أول دولة في العالم قامت ببناء أول منشأة لتخزين الغاز ويعود ذلك إلى عام 1915[21]. ويلعب التخزين الجوفي للغاز في كندا دوراً حيوياً في تعزيز أمن الطاقة، وإدارة السوق، عبر توفير المهام التالية:

- **توازن العرض والطلب الموسمي**

حيث يُستخدم التخزين الجوفي لتخزين الغاز الفائض عن الحاجة في الشهور ذات الطلب المنخفض (الصيف)، على أن يتم سحبه خلال الطلب المرتفع (الشتاء)، بسبب التفاوت الكبير في الاستهلاك بين فصلي الصيف والشتاء.

- **دعم أمن الطاقة الوطني**

تستطيع البنية التحتية لتخزين الغاز الجوفي تغطية فترة 40 -70 يوماً من الطلب الشتوي، مما يتيح الاستجابة السريعة لانقطاعات العرض المؤقتة.

- **التكامل مع السوق الأمريكية**

بفضل شبكات خطوط الأنابيب الضخمة مع الولايات المتحدة، يمكن لمنشآت التخزين الموجودة في كندا توفير الغاز وقت تنامي الطلب في بعض الولايات الأمريكية. وفي نفس الوقت، يمكن لكندا الاستفادة من مخزونات الغاز الأمريكية لدعم مناطق مثل Ontario، الأمر الذي يعزز مرونة الإمداد.

داخليًا، تتولى شـركات خاصـة مثل Enbridge و TC Energy مسـؤولية تشـغيل وإدارة منشـآت التخزين الجوفي. وتوفر هذه الشـركات، إلى جانب غيرها، خدمات تأجير سـعات التخزين لأطراف ثالثة، وذلك بعد الحصـول على الموافقات اللازمة من الجهات التنظيمية المحلية. ويُسهم هذا النشاط في تنويع مصادر الدخل لتلك الشركات وزيادة إيراداتها المالية.

وتعتمد **كندا** بشـكل أسـاسـي على التخزين الجوفي في حقول الغاز المُسـتنفدة، حيث يقدر العدد الإجمالي للمنشـآت من هذا النوع بنحو 50 منشـأة، بما يعادل نحو 98% من إجمالي السـعة التخزينية (القابلة للسـحب). بينما يبلغ التخزين في طبقات كهوف الملح نحو 7 منشـآت، والتي تشـكل نحو 2% من سـعة تخزين الغاز الجوفية. ويبلغ الحد الأقصـى لمعدل السحب الإجمالي من هذه المنشـآت مجتمعة أكثر من 14.5 مليار قدم مكعب/اليوم. يلخص الجدول 2-3، عدد منشآت تخزين الغاز الجوفي في كندا حسب النوع، والسعة التخزينية العاملة لكل منها.

الجدول 2-3: عدد منشآت تخزين الغاز الجوفي في كندا حسب النوع، والسعة التخزينية العاملة لكل منها، مطلع عام 2024

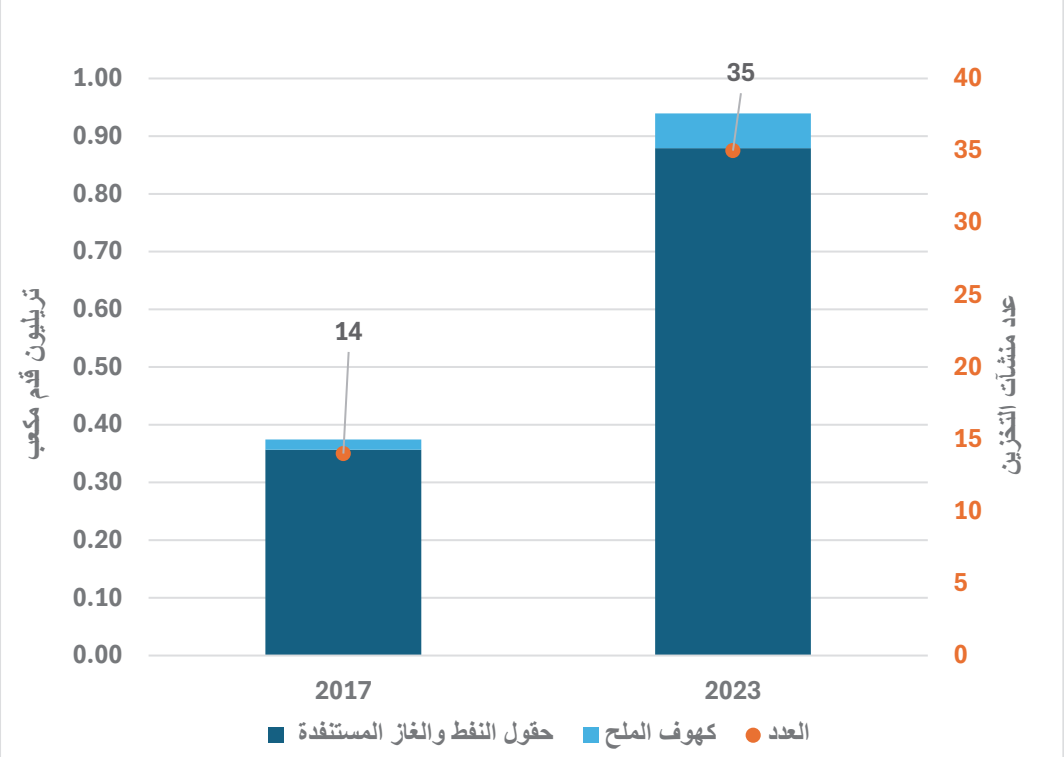
البند	حقول الغاز المُستنفدة	كهوف الملح	الإجمالي
العدد الإجمالي	50	7	57
أقصى معدل للسحب (مليار قدم مكعب/اليوم)	13.35	1.2	14.55
السعة التخزينية العاملة (تريليون قدم مكعب)	0.99	0.01	1
الحصة من السعة التخزينية الإجمالية	%98	%2	%100

المصدر: الباحث استناداً إلى تحليل قاعدة بيانات Cedigaz

2-3-5: منشآت التخزين الجوفي في الصين

من أبرز التحولات التي شـهدها سـوق التخزين الجوفي للغاز خلال السـنوات الأخيرة، بروز الصـين كإحدى القوى الخمس الكبرى عالمياً في تطوير منشـآت التخزين. فمنذ عام 2017، اعتمدت الصين سياسات داعمة للاستثمار في هذا القطاع الاستراتيجي. وقد اسفرت هذه السياسات عن ارتفاع عدد منشآت التخزين من 14 إلى 35 منشـأة خلال 2017-2023، فيما ارتفعت السـعة التخزينية من 0.374 إلى 0.939 تريليون قدم مكعب، محققة بذلك نسـبة نمو تراكمية بلغت 150%، كما هو موضـح بالشكل 2-10.

الشكل 2-10: تطور عدد منشآت التخزين والسعة التخزينية العاملة في الصين خلال 2017-2023



المصدر: الباحث استناداً إلى بيانات من Cedigaz، الشركات الصينية المشغلة

تُشـغّل شـركات النفط الوطنية الكبرى في الصـين، مثل CNPC وSinopec، غالبية منشآت التخزين الجوفي، حيث تدير ما يصل إلى 23 منشأة من أصل 35 منشأة

قائمة. وقد انضمت إليهما شركة PipeChina، التي أصبحت المشغّل الرئيسي الثاني في البلاد. وفي بعض المقاطعات، تتولى شركات توزيع الغاز المحلية تشغيل المنشآت الصغيرة. وتنتشر منشآت التخزين الجوفي في الصين عبر ثلاث مناطق رئيسية هي: شرق الصين، وشمال غرب الصين، وجنوب الصين، كما هو مبين بالشكل 2-11.

الشكل 2-11: مواقع منشآت التخزين الجوفي للغاز في الصين

المصدر: الباحث

وبالرغم من التقدم السريع في تطوير منشآت التخزين الجوفي للغاز الطبيعي في الصين، إلا أن حصتها لم تتجاوز 6% من إجمالي الاستهلاك في عام 2023، حيث لا يزال هناك عددًا من التحديات البنيوية والتشغيلية والتنظيمية التي تعيق التوسع في منشآت التخزين من بينها:

- **نقص في البنية الجيولوجية المناسبة**

معظم الخزانات الحالية (أكثر من 92%) تقع في حقول غاز مُستنفدة، في حين أن خيارات أخرى مثل الكهوف الملحية أو طبقات المياه الجوفية غير منتشرة أو يصعب تطويرها في الصين.

➢ **بُعد المسافة بين مراكز الطلب الرئيسية ومواقع التخزين المناسبة**

- يتركز الطلب على الغاز الطبيعي في المناطق الساحلية والشرقية من الصين، مثل شنغهاي وبكين، الأمر الذي يصعّب إيجاد أراضٍ أو مواقع جيولوجية مناسبة لإنشاء منشآت تخزين جوفي بالقرب من مراكز الطلب، بسبب الكثافة العمرانية وارتفاع قيمة الأراضي.
- تواجه بعض مواقع التخزين المحتملة تحديات بيئية وتشريعية، خاصة تلك الواقعة بالقرب من مناطق حضرية مكتظة أو أراضٍ زراعية، ما يعقّد عملية الحصول على التراخيص اللازمة لإنشاء وتشغيل منشآت التخزين الجوفي.

➢ **تكاليف رأسمالية مرتفعة وطول دورة الاستثمار**

تكلفة تطوير منشآت التخزين الجوفي في الصين تصل إلى 500-800 مليون دولار للمشروع المتوسط، وتحتاج فترة زمنية تصل إلى 5-7 سنوات بين التخطيط والتشغيل الكامل، الأمر الذي يؤخر العوائد الاقتصادية ويضعف الحوافز للمستثمرين.

➢ **عدم كفاية سياسة تحرير السوق**

لا يزال سوق الغاز في الصين غير محرر كلياً، رغم ما تم تطبيقه من إصلاحات تدريجية، حيث لا تزال الأسعار تخضع لتنظيم حكومي، وهو الأمر الذي يقلل من رغبة الشركات الخاصة للدخول إلى مشاريع التخزين الجوفي مقارنة بالأسواق الأوروبية أو الأمريكية.

2-4: سياسات الطاقة المرتبطة بالتخزين الجوفي للغاز

2-4-1: سياسات التخزين الجوفي في الاتحاد الأوروبي

يعتبر سوق الاتحاد الأوروبي من الأسواق الناجحة في مجال تخزين الغاز لما له سياسات محفزة للاستثمار في منشآت تخزين الغاز، ووضع قواعد تنظيمية صارمة لها. وتهدف تلك القواعد إلى توفير تدفق مستقر وآمن للغاز الطبيعي إلى المستهلكين

النهائيين في جميع دول الاتحاد الأوروبي، خاصة أثناء الأزمات أو حالات الطوارئ، مع تعزيز التعاون والتضامن بين الدول الأعضاء.

ومن بين تلك القواعد اللائحة التنظيمية رقم 2017/1938 التي تشترط توفير سعة تخزين كافية لتغطية حالات الطوارئ لمدة 30 يومًا على الأقل. كما تنص على مبدأ التضامن الإقليمي، وتقييم المخاطر المشترك، وخطط الطوارئ الإقليمية للدول الأعضاء، وضرورة الإفصاح عن مستويات التخزين وتحديثها شهرياً في نظام تبادل البيانات الأوروبية، بالإضافة إلى إلزام المُشغلين بتقديم بيانات عن العقود الكبيرة، ومستويات التخزين، تحقيقاً للشفافية وتبادل المعلومات.

وإلى جانب الأطر التنظيمية، يوفر الاتحاد الأوروبي دعماً مالياً مباشراً بهدف تحفيز الدول الأعضاء على الاستثمار في تطوير منشآت تخزين الغاز الطبيعي. وقد استفادت عدة مشاريع في كل من النمسا، ألمانيا، رومانيا، وبلغاريا من هذا الدعم، الأمر الذي ساهم في تنفيذ منشآت جديدة، وتوسيع القدرة التخزينية لعدد من مرافق التخزين القائمة.

ومع اندلاع الأزمة الروسية-الأوكرانية في فبراير 2022، وما تبعها من تقليص روسيا لإمدادات الغاز المتجهة إلى أوروبا، أصدرت المفوضية الأوروبية اللائحة التنظيمية رقم (EU 2022/1023) الخاصة بمستويات مخزون الغاز. وتضمنت اللائحة هدفاً ملزماً للدول الأعضاء يقضي بوجوب وصول معدلات ملء منشآت التخزين إلى 80% على الأقل بحلول الأول من نوفمبر 2022، على أن يُرفع هذا الهدف إلى 90% بحلول الأول من نوفمبر من كل عام لاحق حتى نهاية ديسمبر 2025.

وهدفت هذه الإجراءات إلى ضمان تأمين مخزونات كافية لتلبية احتياجات السوق الأوروبية خلال فصل الشتاء، وتعزيز استقرار سوق الغاز. وقد أسهمت هذه السياسات بشكل ملموس في تخفيف حدة تقلبات الأسعار، التي بلغت ذروتها خلال

الأزمة في أغسطس 2022 لتصل إلى 102 دولار لكل مليون وحدة حرارية بريطانية، كما هو موضح في الشكل 2-12. إلا أن الأسعار شهدت تراجعاً ملحوظاً في الأعوام التالية، حيث بلغ متوسط السعر في أغسطس 2023 نحو 13.2 دولار لكل مليون وحدة حرارية بريطانية، ثم استمر في الانخفاض ليسجل 12.4 دولار لكل مليون وحدة حرارية بريطانية في أغسطس 2024، مدعوماً بتطبيق هذه اللوائح والإجراءات المصاحبة.

الشكل 2-12: تطور أسعار الغاز الطبيعي في السوق الأوروبي (حسب مؤشر TTF) والسوق الآسيوي (JKM)

المصدر: أوابك [22]

2-4-2: سياسات التخزين الجوفي في أمريكا الشمالية

تعد كل من الولايات المتحدة وكندا من الدول الرائدة في مجال تطوير وتشغيل منشآت التخزين الجوفي للغاز، وتمتلكان تجارب عريقة وأطراً تنظيمية متقدمة. ففي الولايات المتحدة، يُعتبر التخزين الجوفي عنصراً أساسياً ضمن منظومة الغاز الوطني، إلا أن تنظيم السوق لا يفرض التزامات بتعبئة المخزونات كما هو الحال في الاتحاد

الأوروبي. بل يُدار هذا القطاع وفق آليات السوق الحر، بناءً على مستويات العرض والطلب والأسعار السائدة. وتتمتع الشركات المُشغلة بحرية تسعيرية، مما يعزز من قدرة السوق على المنافسة، ويمنحها درجة عالية من المرونة التشغيلية.

أما في كندا، فلا يختلف النهج كثيراً، إذ تُدار سياسات التخزين الجوفي بشكل متكامل مع الأسواق الأمريكية، ما يجعلها امتدادًا طبيعيًا لها من حيث التنظيم والتشغيل.

2-4-3: سياسات التخزين الجوفي في آسيا والمحيط الهادي

بشكل عام، يُعد السوق الآسيوي أقل نضجاً وتحرراً وتنافسية مقارنةً بنظيريه الأوروبي والأمريكي، وإن كانت درجة التطور تختلف من دولة لأخرى بحسب مستوى التقدم المحرز في كل منها. ففي الصين، على سبيل المثال، لا تزال تجربة التخزين الجوفي حديثة نسبياً، إذ لا تتجاوز العشرين عاماً، مقارنةً بالولايات المتحدة التي تمتلك أكثر من 400 منشأة، بعضها يعود لأكثر من مئة عام.

وقد شكّلت أزمة نقص الغاز التي شهدتها الصين خلال شتاء 2018/2017 محطة تحول رئيسية في سياسة الطاقة الوطنية، حيث كشفت تلك الأزمة، التي جاءت نتيجة التحول السريع من الفحم إلى الغاز في قطاع التدفئة، عن هشاشة منظومة الإمداد، وعدم كفاية البنية التحتية للتخزين لمواجهة حالات الطوارئ. وقد دفعت هذه التجربة الصعبة السلطات الصينية إلى اعتماد التخزين الجوفي كأولوية وطنية ترتبط بشكل مباشر بأمن الطاقة واستقرار الإمدادات. وقد مر هذا التطور عبر ثلاث مراحل:

- **المرحلة الأولى: سياسة تحديد الحد الأدنى من التخزين: بداية الإطار التنظيمي**

في عام 2018، أصدرت اللجنة الوطنية للتنمية والإصلاح (NDRC) أولى السياسات التنظيمية الملزمة المتعلقة بالتخزين، حيث فرضت على جميع المشاركين

في سوق الغاز الاحتفاظ بحد أدنى من المخزون بنهاية عام 2020، على النحو التالي[23]:

- بالنسبة لموردي الغاز: امتلاك قدرات تخزين تعادل 10% من مبيعاتهم السنوية.
- بالنسبة لموزعي غاز المدن: تأمين مخزون يعادل 5 أيام من الطلب السنوي.
- بالنسبة للحكومات المحلية في المقاطعات: تأمين مخزون يكفي 3 أيام من الاستهلاك.

وكان لافتاً أن هذه السياسة لم تُلزم المشاركين باستخدام تقنيات معينة، بل فتحت المجال لتحقيق تلك الأهداف من خلال منشآت تخزين جوفي، أو خزانات الغاز الطبيعي المسال في مرافئ الاستقبال، أو حتى عبر محطات التسييل الصغيرة (ssLNG) التي تنتشر في الصين.

➢ **المرحلة الثانية: خطة تنفيذ وطنية لبناء قدرات تخزين الغاز**

رغم الطابع الإلزامي للسياسة الأولى، لم يتمكن السوق الصيني من بلوغ الأهداف التي كانت مرجوة في عام 2020. ونتيجة لذلك، أطلقت الوكالة الوطنية للطاقة في سبتمبر 2021 "خطة تنفيذ وطنية لبناء قدرات تخزين الغاز"، بهدف تسريع وتيرة تطوير البنية التحتية للتخزين، وتحقيق أهداف جديدة أكثر طموحًا وفق المدى الزمني التالي:

- رفع إجمالي السعة التخزينية إلى 55-60 مليار متر مكعب (1.9-2.1 تريليون قدم مكعب) بحلول 2025، أي ما يعادل نحو 13% من إجمالي الاستهلاك السنوي من الغاز.

- رفع إجمالي السعة التخزينية إلى 60 -70 مليار متر مكعب (2.1-2.5 تريليون قدم مكعب) بحلول عام 2030.
- رفع إجمالي السعة التخزينية إلى 70-80 مليار متر مكعب (2.5-2.8 تريليون قدم مكعب) بحلول عام 2035.

ورغم أن هذه الأهداف تشمل كل أنواع التخزين (السطحي والجوفي)، إلا أن الخطط تنص صراحة على مضاعفة سعة منشآت التخزين الجوفي مقارنة بعام 2020.

➢ **المرحلة الثالثة: تنفيذ تدابير إدارة استخدام الغاز الطبيعي**

استكمالاً للسياسات السابقة، دخلت تدابير جديدة لإدارة استخدام الغاز الطبيعي في شهر أغسطس من عام 2024 حيز التنفيذ، وهي تمثل خارطة طريق لتطوير سوق الغاز الصيني في السنوات القادمة، ودعم البنية التحتية للتخزين. حيث ترتكز السياسة الجديدة على تعزيز الدور المحوري للغاز الطبيعي في دعم منظومة الطاقة المتجددة، عبر استقراره ومرونته كمصدر طاقة تكميلي.

وإجمالاً، أدت هذه السياسات المتدرجة إلى نمو عدد مشاريع التخزين الجوفي إلى 35 منشأة مطلع عام 2024، وهو رقم مرشح للزيادة على ضوء استمرار تطبيق تلك الخطط.

أما في **الهند**، ورغم كونها واحدة من أكبر الاقتصادات في العالم، وأحد أكبر مستوردي الغاز الطبيعي المسال، إلا أنها لا تمتلك حتى الآن منشآت للتخزين الجوفي للغاز. كما تعاني الهند من محدودية قدرات التخزين السطحي في مرافئ استقبال الغاز الطبيعي المسال، التي لا تتجاوز 40 مليار قدم مكعب مكافئ من الغاز الطبيعي (بعد تحويل الغاز الطبيعي المسال إلى الحالة الغازية). وقد شكّل هذا الوضع ثغرة استراتيجية كشفتها بوضوح أزمة نقص الإمدادات العالمية بسبب الأزمة الروسية

الأوكرانية في عام 2022، الأمر الذي دفع السلطات الهندية إلى اتخاذ خطوات عملية نحو بناء منظومة وطنية لتخزين الغاز الطبيعي.

وقد جاءت أولى الخطوات من خلال طرح هيئة تنظيم البترول والغاز الطبيعي في الهند (PNGRB) في يوليو 2023، مقترحاً ببناء مخزونات استراتيجية من الغاز، بهدف تعزيز أمن الطاقة، وتلبية الطلب الصناعي المتزايد، والحد من التقلبات العالمية في الأسعار. وقد تبع ذلك في نوفمبر 2023 تكليف وزارة البترول والغاز الطبيعي لثلاث شركات هندية كبرى لإعداد دراسة جدوى مفصلة حول تطوير منشآت تخزين بطاقة تبلغ ما بين 3 إلى 4 مليارات متر مكعب[24]. ومن المخطط أن تتضمن الدراسة تحديد التكاليف، واختيار المواقع، والجداول الزمنية للبناء، ونماذج العمل والتمويل، إضافة إلى تقييم النماذج الأنسب للتخزين، سواء كانت استراتيجية بحتة أو تجارية أو هجينة. ويُقدّر أن تتراوح تكلفة هذه السعة التخزينية في حدود 1- 2 مليار دولار، على أن يستغرق إنشاء أول منشأة تخزين من ثلاث إلى أربع سنوات بعد الحصول على الموافقات الحكومية. وتأتي تلك الجهود تماشياً مع سعي الحكومة الهندية نحو رفع حصة الغاز الطبيعي في مزيج الطاقة من 6.5% حالياً إلى 15% بحلول عام 2030.

2-4-4: مقارنة السياسات بين مناطق العالم المختلفة

بخلاف أوروبا وأمريكا الشمالية وبعض الدول الآسيوية، لا تزال باقي مناطق العالم (مثل أمريكا اللاتينية، والشرق الأوسط) محدودة الإمكانيات في مجال التخزين الجوفي للغاز كما في الجدول 2-4، مع عدم وجود سياسات وضحة لتشجيع الاستثمار رغم ما تملكه من مكامن جيولوجية مثل طبقات المياه الجوفية العميقة وحقول النفط والغاز المستنفدة والتي يمكن إعادة استغلالها وتأهيلها لهذا النشاط.

وباســـتثناء أوروبا والصـــين، لا يتم تطبيق أهداف إلزامية تخص مســـتويات المخزون في مناطق العالم الأخرى، حيث يخضع الأمر لاعتبارات قواعد السوق الحر وفق العرض والطلب.

الجدول 2-4: مقارنة بين تأثير السياسات على التخزين الجوفي للغاز

الإقليم	مستوى اللوائح التنظيمية	دعم مالي حكومي	مرونة السوق	وجود أهداف تخزين إلزامية	مشاريع نشطة
أوروبا	مرتفع	نعم	متوسط	نعم	**مرتفع**
أمريكا الشمالية	متوسط إلى منخفض	لا	مرتفع	لا	**مرتفع**
آسيا: منها الصين	مرتفع نسبيًا	نعم	منخفض	نعم (ضمن خطة وطنية)	**متوسط إلى مرتفع**
أسيا: منها الهند	منخفض	جزئيًا	منخفض	لا	**منخفض**
الشرق الأوسط	منخفض جدًا	لا	محدود جدًا	لا	**محدود**
أمريكا اللاتينية	منخفض جدًا	لا	منخفض	لا	**محدود**

المصدر: من إعداد الباحث

منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)

الفصل الثالث:
مستقبل التخزين الجوفي للغاز في العالم، وضرورة الاستثمار في الدول العربية

1-3	مشروعات التخزين الجوفي للغاز قيد الإنشاء عالمياً
2-3	توزيع مشاريع التخزين الجوفي للغاز قيد الإنشاء حسب نوع الخزان الجوفي
3-3	حزمة مشاريع التخزين الجوفي للغاز المقترحة عالمياً
4-3	التخزين الجوفي في الدول العربية، ودوره في دعم أمن واستدامة الطاقة

تمهيد

شهدت الأعوام القليلة الماضية تقلبات كبيرة في أسواق الطاقة، تجسدت بأزمات قوية مثل أزمة الغاز الناجمة عن الصراع الروسي-الأوكراني، وارتفاع الطلب الأوروبي على الغاز الطبيعي المسال غير المسبوق لتعويض نقص إمدادات الغاز الروسي. وقد أدت تلك التطورات إلى ارتفاع الأسعار ووصولها إلى مستويات تاريخية غير مسبوقة هددت الاقتصاد العالمي. وقد أدّت هذه الأزمة إلى تجديد الاهتمام بمفهوم **"التخزين كخط دفاع أول"** لمواجهة أي أزمة نقص في الإمدادات قد تطرأ مستقبلاً، وتحقيق المرونة الاقتصادية ودعم جهود تحوّل الطاقة. وهو الأمر الذي دفع الحكومات والمستثمرين مرة أخرى إلى ضخ استثمارات كبيرة في منشآت التخزين الجوفي للغاز، كأداة استراتيجية فعالة لضمان الأمن الطاقي وسلامة الأسواق.

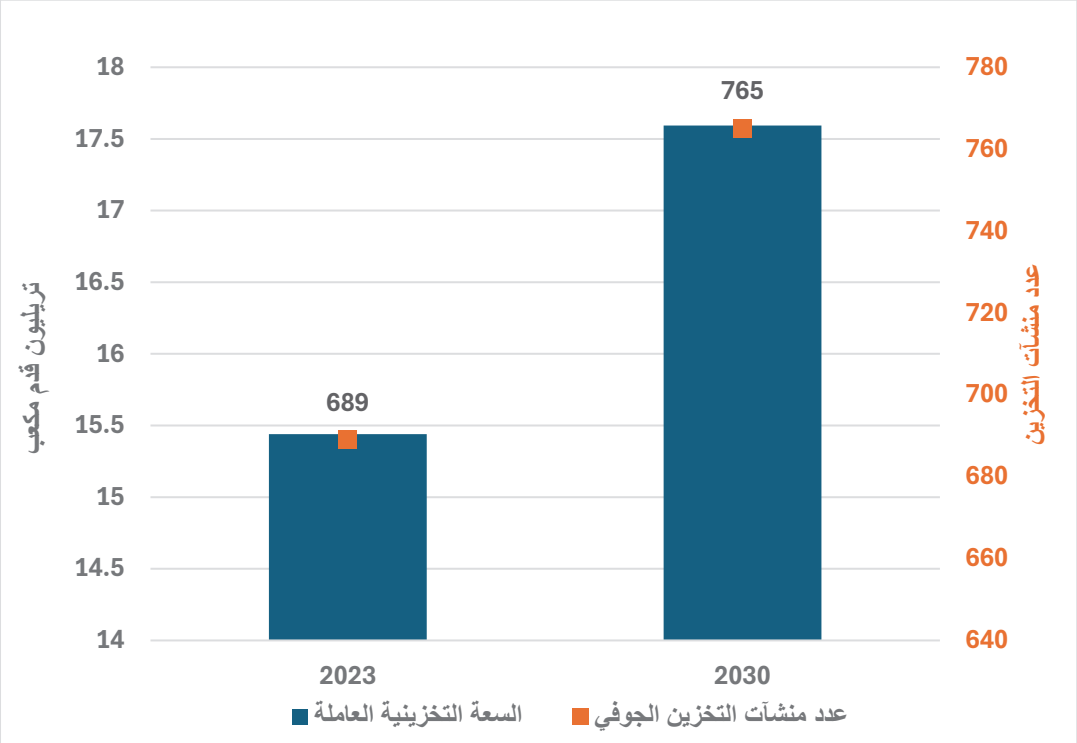
1-3: مشروعات التخزين الجوفي للغاز قيد الإنشاء عالمياً

عالمياً هناك نحو 76 مشروعاً جديداً وتوسعياً للتخزين الجوفي للغاز قيد البناء موزعة على ما يقارب 20 دولة في مختلف مناطق العالم. وتشمل هذه القائمة حوالي 28 مشروعًا جديدًا بالكامل، تتركز غالبيتها في الصين، وتبلغ السعة التخزينية العاملة لهذه المشاريع نحو 0.989 تريليون قدم مكعب. أما المشاريع الـ48 المتبقية، فهي توسعات في منشآت قائمة في كل من أوروبا، وروسيا، ومناطق أخرى، وتُقدّر سعتها الإجمالية بحوالي 1.165 تريليون قدم مكعب.

ومن ثم فإن المشاريع الجاري تنفيذها حالياً يُتوقع أن تُضيف عند اكتمالها ودخولها حيز التشغيل نحو 2.154 تريليون قدم مكعب إلى إجمالي سعة التخزين الجوفي للغاز عالمياً، لترتفع السعة الإجمالية إلى نحو 17.6 تريليون قدم مكعب بحلول عام 2030. ويُعادل هذا التوسع نسبة نمو إجمالية تقارب 14% مقارنة بالمستويات الحالية.

وبإضافة تلك المشاريع إلى منشآت التخزين الجوفي قيد التشغيل في الوقت الراهن، سيصل عدد منشآت التخزين الجوفي إلى 765 منشأة بنهاية عام 2030، كما هو موضح بالشكل 3-1.

الشكل 3-1: تطور السعة التخزينية عالمياً وعدد منشآت التخزين الجوفي بحلول عام 2030



المصدر: الباحث استناداً إلى قاعدة بيانات Cedigaz

على صعيد المناطق، تتصدر منطقة آسيا والمحيط الهادئ جميع مناطق العالم من حيث النشاط الاستثماري في مشاريع التخزين الجوفي للغاز، سواء من حيث تنفيذ مشاريع جديدة أو توسعات في منشآت قائمة. إذ يتم حالياً تنفيذ نحو 37 مشروعاً في المنطقة، وهو ما يمثل قرابة نصف إجمالي عدد المشاريع الجاري تنفيذها عالمياً. وتُقدَّر السعة التشغيلية الإجمالية لهذه المشاريع بنحو 1.211 تريليون قدم مكعب، أي ما يعادل نحو 56% من السعة الإضافية المتوقعة عالمياً بحلول عام 2030.

وتتركز هذه المشـــاريع بشـــكل شـــبه كامل في الصـــين، التي تنفذ وحدها 36 مشـروعاً من أصـل 37 مشـروع، بينما يقع المشـروع الوحيد خارجها في أسـتراليا. وتسـتهدف الصـين من خلال هذه المشـاريع مضـاعفة سـعتها التخزينية من نحو 1 تريليون قدم مكعب حالياً إلى ما يقارب 2 تريليون قدم مكعب بنهاية عام 2030. وبدخول هذه المشاريع حيز التشغيل سيرتفع عدد منشآت التخزين الجوفي في الصين إلى 71 منشأة بحلول عام 2030، مقارنة بنحو 35 منشأة في عام 2023.

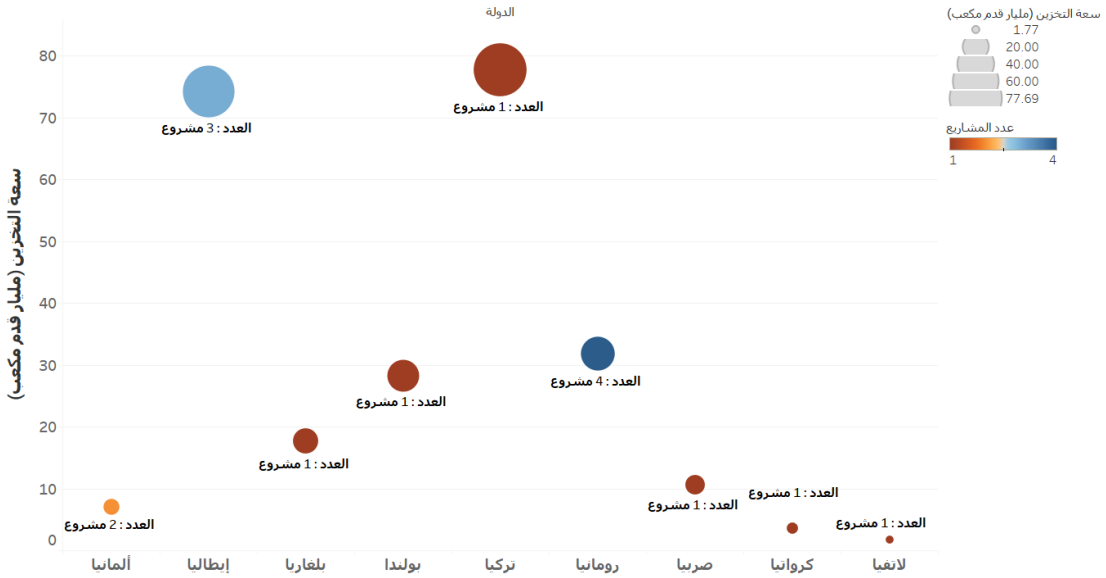
ومن أبرز التطورات الراهنة في سـوق التخزين الجوفي للغاز، الزيادة الملحوظة في عدد المنشآت الجديدة الجاري تنفيذها في منطقة الشرق الأوسط، حيث يُنفَّذ حالياً نحو 7 منشآت، من المتوقع أن تضيف سعة تخزينية تُقدَّر بنحو 328 مليار قدم مكعب (0.328 تريليون قدم مكعب)، وهو ما يمثل حوالي 15% من إجمالي السعة العالمية الإضافية المتوقعة بحلول عام 2030.

وتقع جميع هذه المشاريع في إيران، التي تُكثّف استثماراتها في منشآت التخزين بهدف تحقيق توازن أفضـل بين العرض والطلب في سـوق الغاز، لا سـيما في ظل الفروقات الموسـمية الحادة، حيث يرتفع الطلب خلال فصـل الشـتاء إلى نحو 3.5 أضعاف مستوياته في فصل الصيف.

كما يُجرى حالياً تنفيذ 10 مشـاريع للتخزين الجوفي للغاز في منطقة أوراسـيا، ستسهم في إضافة سعة تخزينية تقدر بنحو 0.311 تريليون قدم مكعب (311 مليار قدم مكعب)، وهو ما يعادل نحو 11% من إجمالي السـعة العالمية الإضـافية المتوقعة. وتستأثر روسيا بالحصة الأكبر من هذه المشاريع، حيث تحتضن 7 مشاريع، وتتوزع المشـاريع الثلاثة الأخرى في كل من أرمينيا، وروسـيا البيضـاء، وأوزبكسـتان بواقع مشروع واحد لكل منها.

أما في أوروبا، فيُجرى حالياً تنفيذ 15 مشـــروعاً جديداً للتخزين الجوفي للغاز موزعين على 9 دول أوروبية، كما هو موضح في الشكل 3-2، ومن المتوقع أن تضيف هذه المشاريع عند اكتمالها، سعة تخزين عاملة (قابلة للسحب) تبلغ نحو 0.247 تريليون قدم مكعب (247 مليار قدم مكعب)، أي ما يعادل حوالي 11.5% من إجمالي السعة العالمية الإضافية المتوقعة بحلول عام 2030.

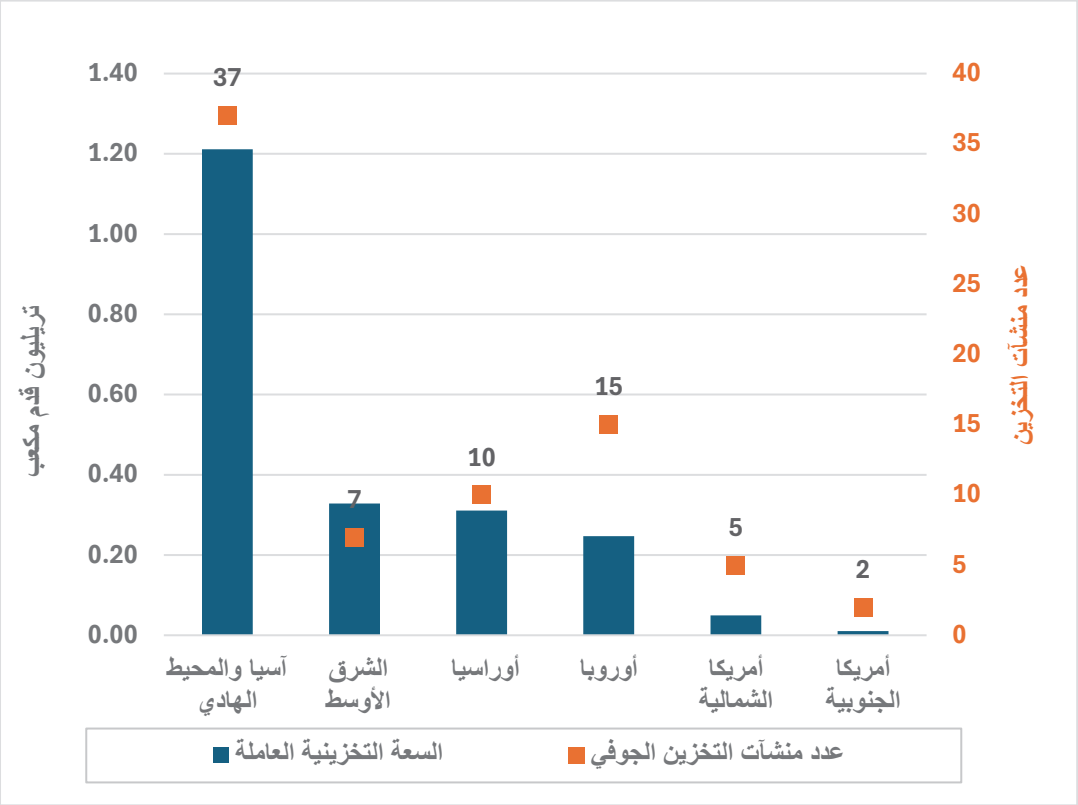
الشكل 3-2: توزيع عدد منشآت التخزين الجوفي قيد البناء في أوروبا والسعة التخزينية لها



المصدر: الباحث استناداً إلى تحليل بيانات Cedigaz

وفي أمريكا الشمالية، يُجرى تنفيذ خمسة مشاريع جديدة للتخزين الجوفي للغاز في كل من كندا والولايات المتحدة، ستُضيف سعة تخزينية تُقدَّر بنحو 49 مليار قدم مكعب، وهو ما يعادل نحو 2.3% من إجمالي السعة العالمية الإضافية المتوقعة بحلول عام 2030. وفي أمريكا الجنوبية، يجرى تنفيذ مشـــروعين واحد في الأرجنتين ومشروع آخر في البرازيل التي ستنضم لأول مرة إلى هذا النشاط، بسعة إجمالية 11 مليار قدم مكعب، وبحصة 0.5% من السعة العالمية المضافة بحلول عام 2030، كما هو مبين بالشكل 3-3.

الشكل 3-3: توزيع مشاريع منشآت التخزين الجوفي قيد الإنشاء والسعة التخزينية لها حسب المناطق



المصدر: الباحث استناداً إلى قاعدة بيانات Cedigaz

3-2: توزيع مشاريع التخزين الجوفي للغاز قيد الإنشاء حسب نوع الخزان الجوفي

أما وفق نوع الخزان الجوفي المستخدم في مشاريع تخزين الغاز تحت الإنشاء، فغالبية المشـــاريع قائمة على التخزين الجوفي في حقول الغاز المُســـتنفدة بإجمالي نحو 50 مشروعاً من أصل الـ 76 مشروعاً الجاري تنفيذها في مختلف مناطق العالم.

ويقدر إجمالي السعة التخزينية العاملة لهذه المشاريع بنحو 1.776 تريليون قدم مكعب (1,776 مليار قدم مكعب) أي ما يعادل نحو 82% من إجمالي السعة التخزينية العالمية المتوقع إضافتها بحلول عام 2030. ويؤكد ذلك التطور على أن خيار استغلال حقول الغاز المُســـتنفدة هو الخيار الأمثل والأكثر فاعلية وانتشـــاراً في معظم مناطق العالم إذا توفرت البنية الجيولوجية المناسبة له.

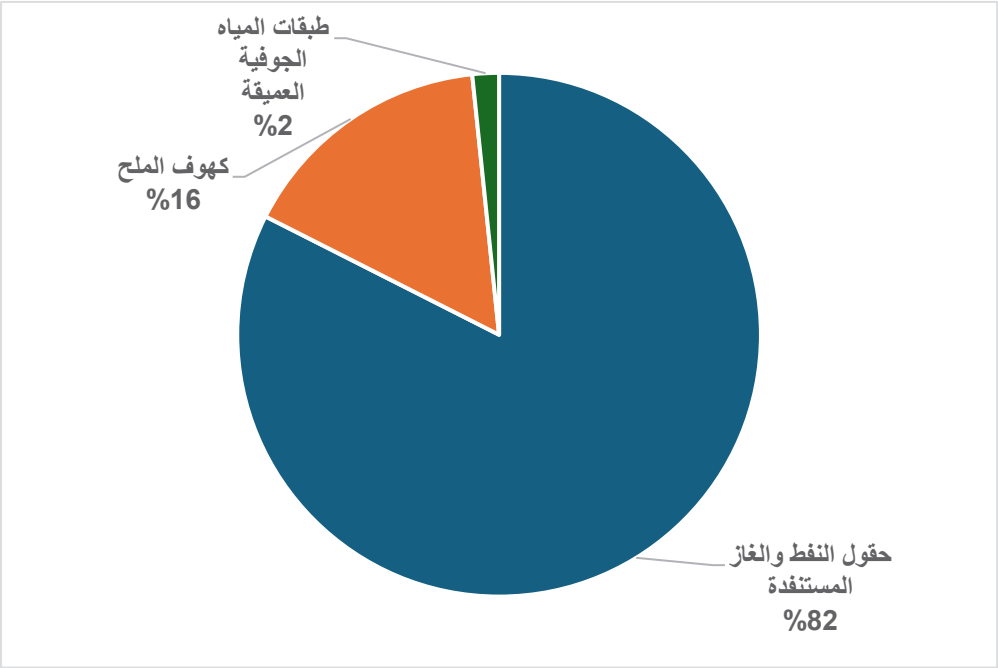
أما مشـاريع التخزين الجوفي للغاز القائمة على حفر كهوف الملح، فيبلغ عددها نحو 23 مشـروعاً، ومن بينها 11 مشـروعاً جديداً في الصـين التي لجأت لهذا الخيار عالي التكلفة بسـبب بعض الصـعوبات الجيولوجية لحقول الغاز الطبيعي المُسـتنفدة في السـوق الصـيني التي تقع على أعماق كبيرة تصـل إلى أكثر من 2,500 متر، علاوة على أن الصـخور نفسـها ذات نفاذية ضـعيفة مقارنة بطبقات الغاز المسـتنفدة المنتشـرة حول العـالم[25]. وهو الأمر الـذي يؤدي إلى ارتفـاع تكـاليف تحويـل هذه الطبقـات إلى منشـآت تخزين، وانخفاض معدل السـحب منها مقارنة بكهوف الملح. بينما ينتشـر العدد المتبقي في الولايات المتحدة (3 مشـاريع)، وروسـيا (3 مشـاريع)، ومشـروع واحد في كل من إيران، وروسيا البيضاء، وأرمينيا.

وتبلغ السـعة التخزينية العاملة في مشـاريع التخزين الجوفي في كهوف الملح قيد الإنشـاء نحو 343 مليار قدم مكعب (0.343 تريليون قدم مكعب)، أي ما يعادل حصـة 16% من إجمالي السعة التخزينية لمشاريع التخزين الجوفي الجاري تنفيذها عالمياً.

أما مشـــاريع التخزين الجوفي للغاز القائمة على تخزين الغاز في طبقات المياه الجوفية العميقة، فعددها محدود حيث يبلغ نحو 3 مشاريع فقط، بواقع مشروع واحد في كل من روسـيا، ولاتفيا، وإيران. وتبلغ السـعة التخزينية العاملة لهذه المشـاريع الجاري تنفيذها نحو 35.3 مليار قدم مكعب، بحصـــة ضـــئيلة قدرها 2% من إجمالي الســـعة التخزينية لمشاريع التخزين الجوفي قيد البناء عالمياً.

يلخص الشـكل 3-4، توزيع السـعة التخزينية العاملة لمنشـآت التخزين الجوفي قيد الإنشاء حسب نوع الخزان الجوفي.

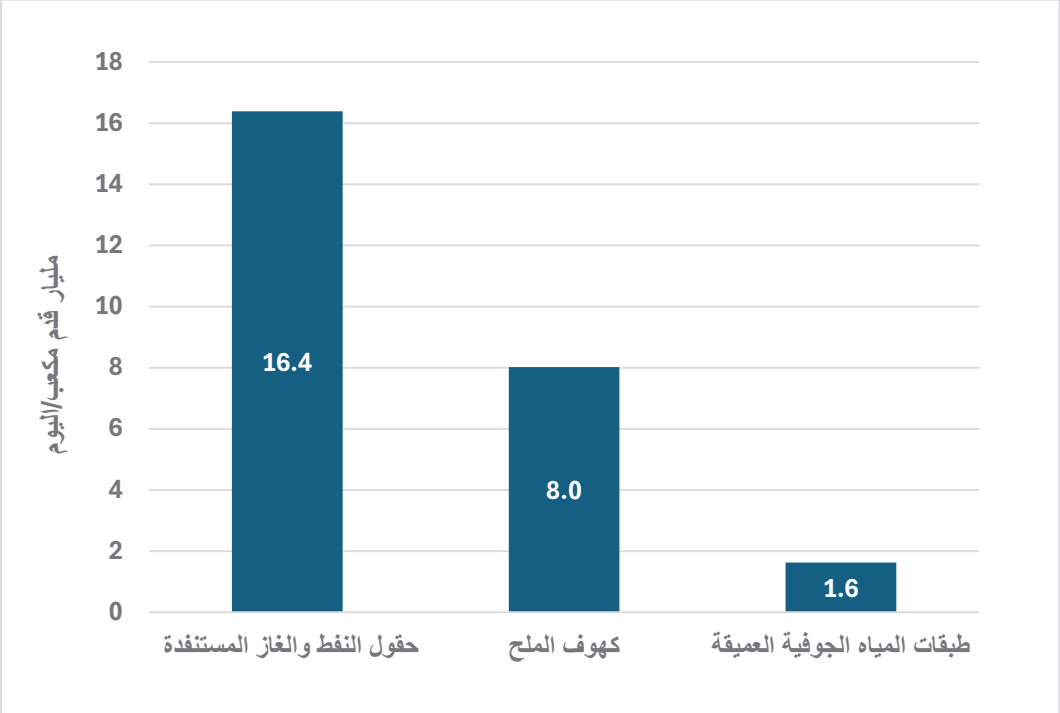
الشكل 3-4: توزيع السعة التخزينية العاملة في منشآت التخزين الجوفي قيد الإنشاء حسب نوع الخزان الجوفي



المصدر: الباحث استناداً إلى تحليل قاعدة بيانات Cedigaz

وفي السياق ذاته، يُقدَّر إجمالي معدل السحب الأقصى من منشآت التخزين الجوفي الجاري إنشاؤها في مشاريع حقول الغاز المستنفدة بنحو 16.4 مليار قدم مكعب/اليوم. أما مشاريع التخزين الجديدة في كهوف الملح، فيُتوقَّع أن يبلغ إجمالي معدل السحب منها نحو 8 مليار قدم مكعب/اليوم. وبالنسبة لمشاريع التخزين في طبقات المياه الجوفية العميقة، فيُقدَّر الحد الأقصى لمعدل السحب بحوالي 1.6 مليار قدم مكعب/اليوم، وهو الأقل مقارنة بالمشاريع الأخرى كما هو موضح بالشكل 3-5، ويرجع ذلك إلى قلة عدد المشاريع الجارية ضمن هذا النوع من التخزين من ناحية، إضافة إلى أن معدلات السحب من طبقات المياه الجوفية تكون عادة أقل مقارنةً بغيرها من خيارات التخزين الجوفي.

الشكل 3-5: معدل السحب الأقصى (مليار قدم مكعب غاز/اليوم) لمنشآت التخزين الجوفي قيد البناء حسب نوع الخزان الجوفي



المصدر: الباحث استناداً إلى تحليل بيانات Cedigaz

3-3: حزمة مشاريع التخزين الجوفي للغاز المقترحة عالمياً

بخلاف مشروعات التخزين الجوفي للغاز قيد البناء، أبدت عدة دول رغبتها في تنفيذ مشـــروعات للتخزين الجوفي للغاز، إلا أنها لا تزال ضـــمن مراحل مختلفة من التخطيط ودراسة الجدوى. ويقدر العدد الإجمالي لهذه المشاريع قيد التخطيط والدراسة بنحو 117 مشروعاً، والتي إن تم تنفيذها، سيرتفع عدد منشآت التخزين الجوفي عالمياً إلى 877 منشـأة. ويعكس هذا العدد الضـخم من المشـاريع المخططة والمقترحة حجم الزخم العالمي حول الرغبة في الاستثمار في منشـآت التخزين الجوفي للغاز في سبيل تحقيق أمن إمدادات الطاقة، وتجنب أي أزمة نقص في الطاقة.

كما تقدر سعة التخزين الإجمالية لهذه المشاريع بنحو 3.966 تريليون قدم مكعب (3,966 مليار قدم مكعب)، أي ما يعادل نحو 26% من سعة التخزين الجوفي القائمة، وأكثر من ضعف السعة التخزينية الجاري تنفيذها عالمياً والتي تقدر بنحو 1.776 تريليون قدم مكعب.

على مستوى المناطق، تتصدر منطقة آسيا والمحيط الهادئ جميع مناطق العالم من حيث عدد مشروعات التخزين الجوفي المقترحة، حيث تضم حزمة من 23 مشروعاً مقترحاً بسعة تخزينية عاملة تُقدّر بحوالي 1.25 تريليون قدم مكعب. وتعتمد الغالبية العظمى من هذه المشاريع على استخدام مكامن الغاز المُستنفدة كمواقع للتخزين. وتحتل الصين الصدارة الإقليمية، إذ تستأثر وحدها بنحو 17 مشروعاً من إجمالي المشاريع، تليها أستراليا بخمسة مشاريع، وهناك مشروع واحد في الهند.

أما في **أوروبا**، فتضم حزمة المشاريع المقترحة نحو 33 مشروعاً بسعة تخزين 1.031 تريليون قدم مكعب (1,031 مليار قدم مكعب). وتتوزع هذه المشاريع على عشرة دول أوروبية وفي مقدمتهم المملكة المتحدة التي تخطط لتنفيذ سبعة مشاريع بسعة تخزين 0.28 تريليون قدم مكعب (280 مليار قدم مكعب).

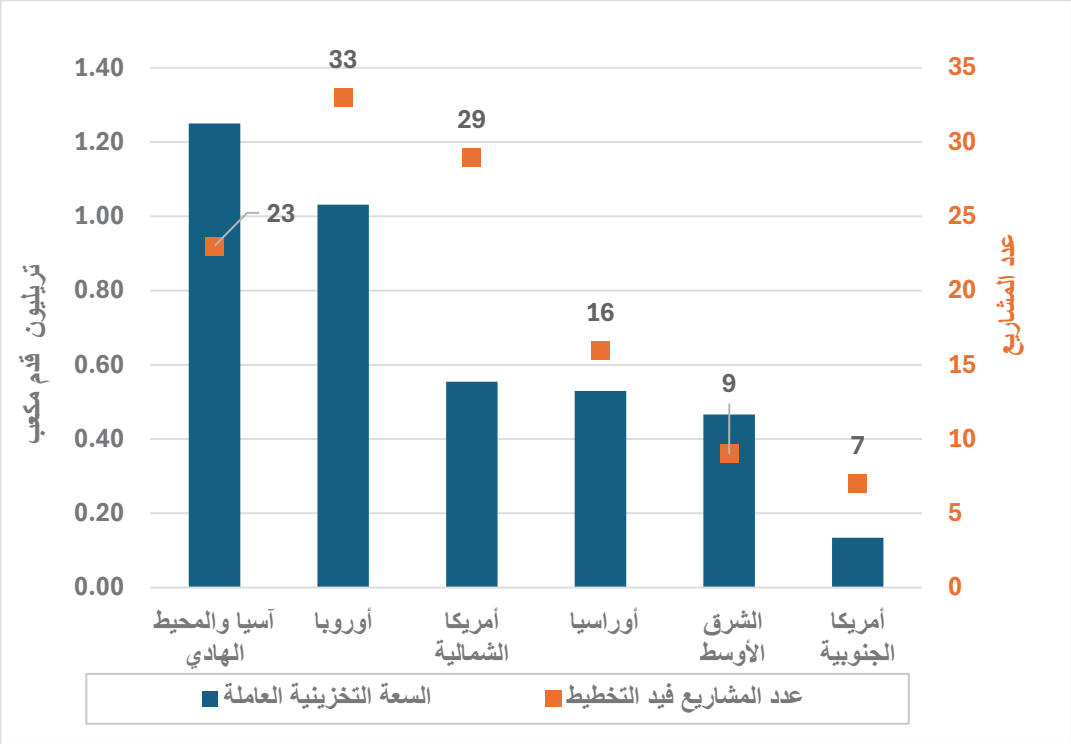
كما يجرى التخطيط لتنفيذ نحو 29 مشروعاً للتخزين الجوفي الغاز في **أمريكا الشمالية**، بسعة تخزين 554 مليار قدم مكعب، بواقع 16 مشروعاً في الولايات المتحدة وحدها، و 12 مشروعاً في المكسيك، ومشروع واحد في كندا.

أما في **أوراسيا**، فيوجد نحو 16 مشروعاً مقترحا بسعة تخزين 0.53 تريليون قدم مكعب (530 مليار قدم مكعب). وتتميز هذه المشاريع بتنوعها الجيولوجي حيث تتوزع بين طبقات المياه الجوفية العميقة والمكامن المُستنفدة، وكهوف الملح. وتُشكّل روسيا مركز الثقل الإقليمي في هذا المجال، إذ تحتضن وحدها عشرة مشاريع من هذه

الحزمة. أما المشاريع المتبقية فتتوزع بين أذربيجان (مشروعين)، ومشروع واحد في كل من أرمينيا، وتركمنستان، وأوزبكستان، وروسيا البيضاء.

كما يجرى التخطيط لتسعة مشاريع في منطقة الشرق الأوسط، بسعة تخزين 0.466 تريليون قدم مكعب (466 مليار قدم مكعب)، بواقع ثمانية مشاريع في إيران وحدها، ومشروع واحد مقترح في المغرب. أما في أمريكا الجنوبية، فيوجد سبعة مشاريع مقترحة بسعة تخزين 0.134 تريليون قدم مكعب (134 مليار قدم مكعب) كما هو مبين بالشكل 3-6، منها خمسة مشاريع في البرازيل ومشروعين في الأرجنتين.

الشكل 3-6: توزيع مشاريع التخزين الجوفي قيد التخطيط والسعة التخزينية لها حسب المناطق

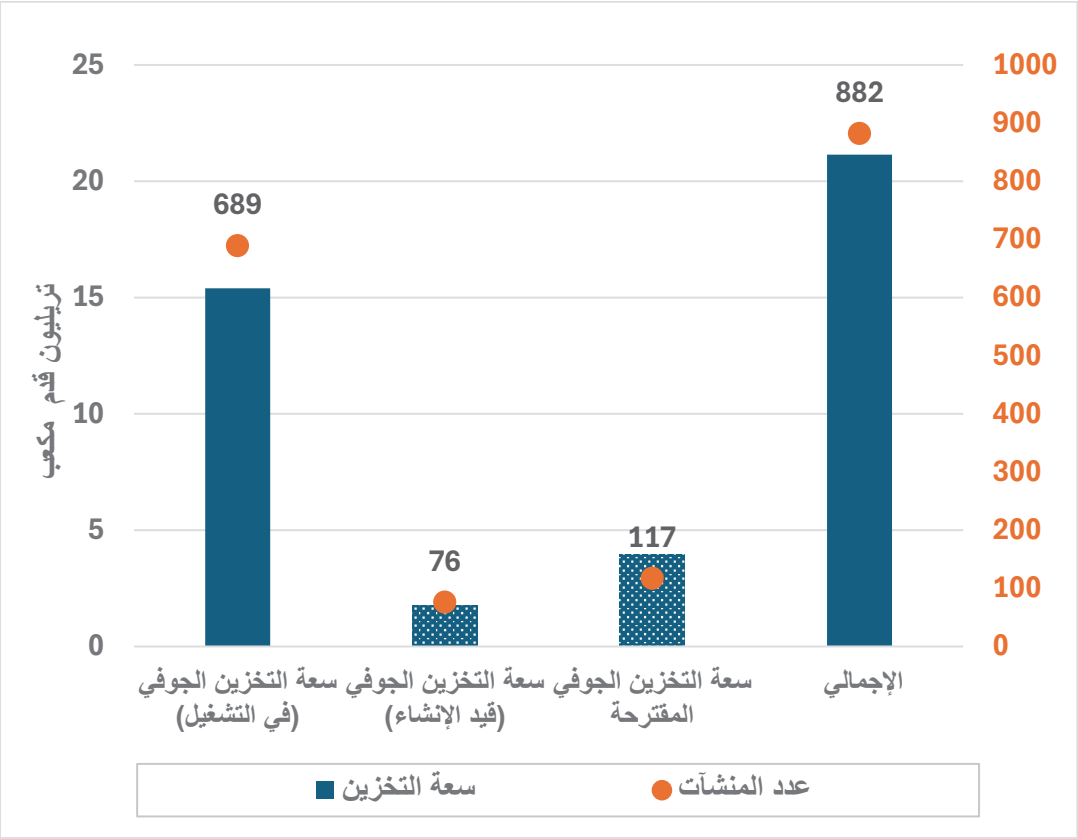


المصدر: الباحث استناداً إلى تحليل بيانات Cedigaz

وإجمالا فإن العدد الضخم من مشاريع التخزين الجوفي للغاز قيد الإنشاء والمشاريع المقترحة ستساهم حال تخزينها في رفع السعة التخزينية العاملة بما يصل إلى 5.74 تريليون قدم مكعب (5,742 مليار قدم مكعب)، وهو الأمر الذي سيساهم في

وصـول سـعات التخزين الجوفي للغاز عالمياً إلى 21.14 تريليون قدم مكعب، بحلول عام 2030-2035، بنسبة نمو إجمالية 37% كما هو مبين بالشكل 3-7.

الشكل 3-7: آفاق سعة التخزين الجوفي للغاز عالمياً بحلول 2030-2035



المصدر: الباحث استناداً إلى تحليل بيانات Cedigaz

3-4: التخزين الجوفي في الدول العربية، ودوره في دعم أمن واستدامة الطاقة

3-4-1: المشهد الراهن

تتمتع الدول العربية باحتياطيات كبيرة من الغاز الطبيعي، تمثل نحو 27% من إجمالي الاحتياطيات العالمية. وتسـاهم بما يقارب 15% من الإنتاج العالمي، بينما يبلغ اسـتهلاكها حوالي 10.8% من إجمالي الاسـتهلاك العالمي. وبهذا تُعد المنطقة العربية مصدراً صـافياً للغاز، إذ يغطي إنتاجها احتياجات الاستهلاك الداخلي، مع فائض يُوجّه للتصدير عبر خطوط الأنابيب إلى أوروبا، وفي صورة غاز طبيعي مسال إلى مختلف الأسواق العالمية.

ومع ذلك، فإن الطبيعة الموسمية للطلب، لا سيما خلال فصل الصيف عندما يرتفع الاستهلاك لتوليد الكهرباء، قد تؤدي إلى تجاوز الطلب لمستوى الإنتاج المحلي في بعض الدول. وقد دفع هذا الواقع بعض الدول العربية، مثل الكويت ومصر، إلى اللجوء إلى استيراد الغاز الطبيعي المسال لتغطية الفجوات المؤقتة في الإمدادات.

وعلى الرغم من المكانة البارزة التي تحتلها المنطقة العربية على خارطة الطاقة العالمية، إلا أن بنيتها التحتية لتخزين الغاز الجوفي لا تزال في مراحلها الأولية، مقارنةً بما هو قائم في أوروبا أو الولايات المتحدة، وحتى في بعض دول آسيا والمحيط الهادئ. حيث تعتمد الدول العربية سواء كانت مستوردة أو مُصدرة للغاز على التخزين السطحي للغاز، مثل التخزين في خطوط الأنابيب أو التخزين في صهاريج الغاز الطبيعي المسال. ففي دولة الكويت، التي تعد السوق الأكبر للغاز الطبيعي المسال في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا، يتم استيراد الغاز الطبيعي المسال عبر ميناء الزور الذي يضم ثمانية صهاريج كما هو مبين بالشكل 3-8، سعة الصهريج الواحد منها 225 ألف متر مكعب، أي بسعة تخزين إجمالية تبلغ حوالي 1.8 مليون متر مكعب من الغاز الطبيعي المسال. ويشكل هذا المخزون الاستراتيجي أداة لضمان تشغيل المرفأ ذاتياً لمدة 12 يوماً في حال توقف واردات الغاز الطبيعي المسال من الخارج[26].

أما في دولة قطر، وهي ثاني أكبر مصدر للغاز الطبيعي المسال عالمياً، فتعتمد أيضاً على طريقة التخزين السطحي في صهاريج الغاز الطبيعي المسال في ميناء "رأس لفان". وبشكل عام هذه الطريقة فعالة للآجال القصيرة لكنها لا تتمتع بالمرونة الكافية لسد الطلب في أوقات الذروة.

الشكل 3-8: صهاريج تخزين الغاز الطبيعي المسال في مرفأ الزور في دولة الكويت

المصدر: Hyundai [27]

على مستوى الدول العربية، يوجد ثلاث منشآت للتخزين الجوفي للغاز في دولتين فقط هما دولة الإمارات العربية المتحدة والمملكة العربية السعودية. حيث قامت دولة الإمارات بتشغيل أول مشروع في عام 2008، بعد أن قامت "هيئة دبي للتجهيزات" في مدينة دبي بتشغيل مشروع "مرغم للتخزين الجوفي للغاز" (Margham UGS)، بغية تلبية الاحتياجات الموسمية للغاز والكهرباء، ودعم مشاريع إزالة الكربون وتقليل استخدام الوقود السائل في قطاع الكهرباء. وحقل "مرغم" هو حقل غاز مستنزف يضم طبقات جيولوجية على عمق أكبر من 10,000 قدم، ويعود تشغيله إلى عام 1984. ويضم محطة معالجة المبينة بالشكل 3-9، تضم وحدات لتنقية الغاز، وضواغط، وحدات تبريد، وكان الهدف منها استخلاص المتكثفات من الغاز بعد إنتاجه ومعالجته لضخها إلى مصفاة في منطقة "جبل علي" بينما كان يعاد حقن الغاز مجدداً في الخزان. ومنذ عام 2008، تم استغلال الحقل كمنشأة تخزين استراتيجية لمدينة دبي بحيث يمكن حقن الغاز بداخله أو سحبه في أوقات الطلب

الموسمي[28]. وتُقدر سعة التخزين الجوفي لمنشأة "مرغم" بنحو 117 مليار قدم مكعب، بينما يصل معدل السحب الأقصى إلى 141 مليون قدم مكعب/اليوم.

واستكمالاً لعملية تطوير المنشأة ورفع سعتها التخزينية ومعدلات السحب، منحت مؤسسة دبي للبترول (Dubai Petroleum Establishment) بالنيابة عن هيئة دبي للتجهيزات عقداً لشركة Baker Hughes في شهر أكتوبر 2024 لتوسيع قدرات الحقن وإعادة الإنتاج عبر توريد 10 ضواغط جديدة يخصص منها خمسة ضواغط للحقن، وخمسة ضواغط مزدوجة الاستخدام[29]. وتهدف المرحلة التوسعية الجديدة إلى ضمان استدامة منظومة إمدادات الطاقة في دبي، وتحقيق التوسع في استخدام الطاقة المتجددة عبر السماح بالتبادل بين استخدام الغاز الطبيعي ومصادر الطاقة الشمسية في توليد الكهرباء. كما حصلت Baker Hughes على عقد مدته عدة سنوات في شهر مارس 2025، لتقديم خدمات الحفر في نفس موقع المنشأة عبر حفر آبار حقن جديدة[30].

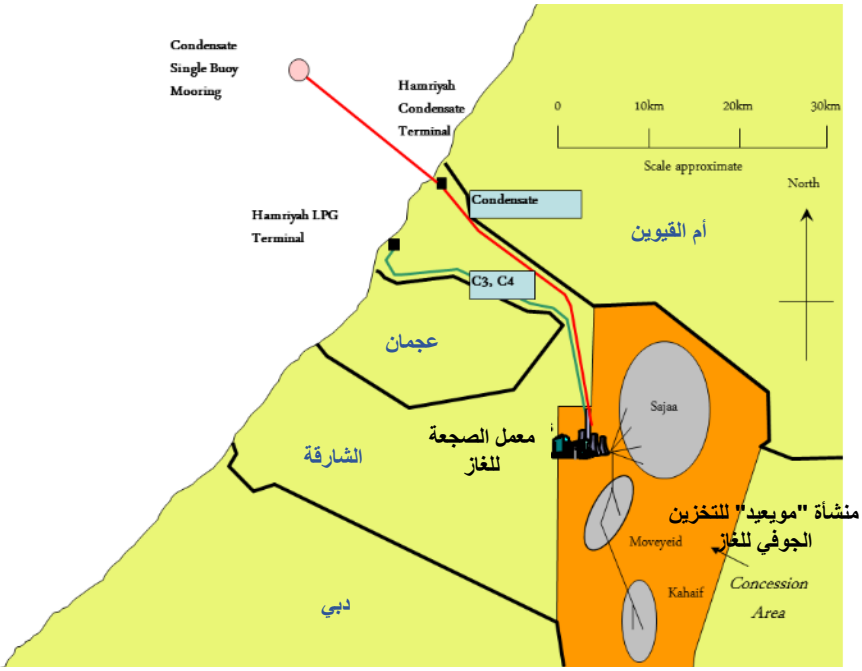
الشكل 3-9: منشأة "مرغم" للتخزين الجوفي للغاز في مدينة دبي، دولة الإمارات

المصدر: هيئة دبي للتجهيزات

كما تضـــم دولة الإمارات منشـــأة أخرى للتخزين الجوفي للغاز تقع في إمارة الشـارقة. حيث قامت مؤسـسـة نفط الشـارقة الوطنية بتنفيذ مشـروع "**مويعيد**" للتخزين الجوفي للغاز في منطقة "الصجعة" (الشكل 3-10)، بغية تحقيق الأهداف الاستراتيجية التالية:

- تخزين كميات الغاز الفائضة عن الاستهلاك في فصل الشتاء لتلبية ذروة الطلب على الغاز في فترة الصيف في إمارة الشارقة.
- توفير مخزون اسـتراتيجي متاح للاسـتخدام بشـكل فوري لتلبية الاسـتجابة في حالات الطوارئ نتيجة أعطال تشغيلية أو حدوث اضطرابات في سوق الغاز.
- إمكانية توفير مخزون للغاز لتلبية احتياجات دولة الإمارات ككل، بعد تنفيذ مراحل توسعية لرفع سعة التخزين الجوفي.

الشكل 3-10: مشروع "مويعيد" للتخزين الجوفي للغاز في إمارة الشارقة، دولة الإمارات



المصدر: مؤسسة نفط الشارقة الوطنية

ولتحقيق تلك الأهداف بدأ العمل في تنفيذ المشروع الذي مر بالمراحل التالية:

- **المرحلة الأولى**

وهي مرحلة تجريبية استغرقت حوالي أربع سنوات (خلال الفترة 2017-2020)، وتم خلالها بناء منشـأة تجريبية لاختبار عملية حقن الغاز، بهدف اختبار التقنية ومدى جدواها، والوصول بأفضل تصميم نهائي للمشروع.

- **المرحلة الثانية**

تم تشـغيلها رسـمياً في بداية عام 2021 [31]، بعد نجاح المرحلة التجريبية، قامت شركة Petrofac بأعمال الهندسة والتوريد والإنشاء في المشروع بموجب عقد قيمته 40 مليون دولار[32]. والتي تضـمنت تركيب ضـواغط عالية الضـغط، وخط أنابيب لنقل الغاز عالي الضـغط، ووحدات قياس، وأنابيب لسـريان الغاز من أربعة آبار من الخزان. كما تضـمنت المرحلة الثانية حفر مسـارات أفقية (Horizontal Legs) في الخزان الجوفي عبر الآبار القائمة بهدف تقليل الضغط اللازم للحقن وبالتالي تقليل التكاليف التشغيلية (تكاليف الطاقة المستغلة في تشغيل الضواغط). وقد رُوعي في تصميم المشروع أن يتضمن مساحة إضافية سطحية وجوفية بحيث تسمح بمراحل توسعية مستقبلاً[33].

- **المرحلة المستقبلية**

تخطط مؤسسة نفط الشارقة الوطنية لإضافة مراحل مستقبلية لرفع سعة التخزين إلى أربعة أمثال السـعة الحالية[2]، وكذلك رفع معدلات السـحب، لتلبية احتياجات دولة الإمارات وليس فقط إمارة الشارقة[34].

[2] السعة التخزينية الحالية لمشروع "مويعيد" غير معلنة

وقد انضـمت **المملكة العربية السـعودية** إلى نشـاط التخزين الجوفي للغاز من خلال تنفيذ برنامج "خزن الغاز"، الذي يهدف إلى اسـتغلال بعض الحقول المُسـتنفدة كمواقع لتخزين الغـاز الطبيعي. ويرتكز البرنـامج على مبدأ التوازن الموسـمي في استهلاك الغاز، من خلال ما يلي:

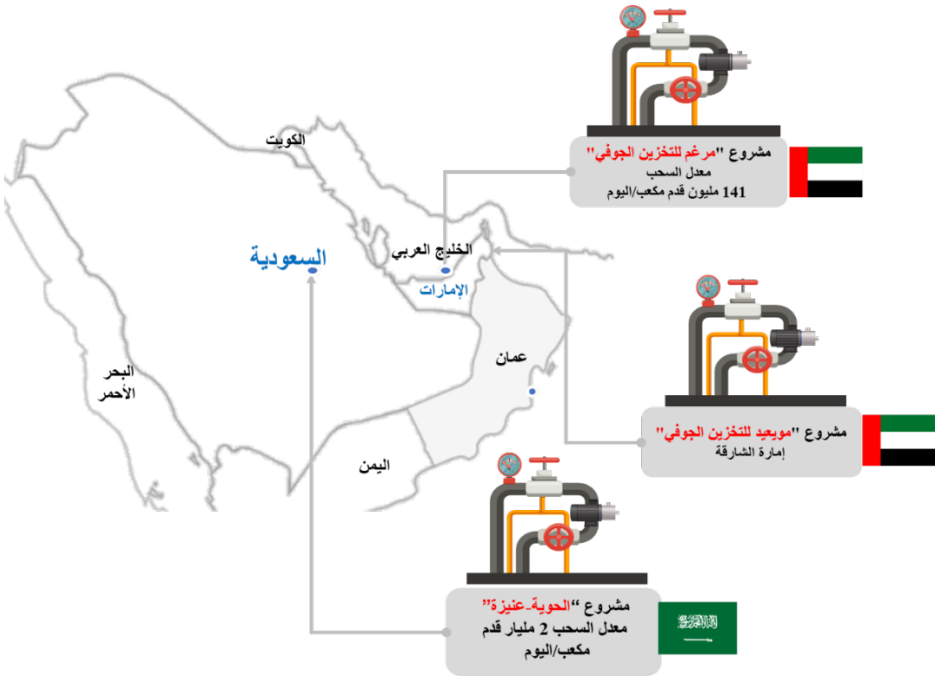
- حقن الغاز خلال فترات انخفاض الطلب، والتي تتزامن عادة مع فصل الشتاء.
- سحب الغاز خلال فترات ذروة الطلب، والتي تقع في فصل الصيف.

وبذلك، يُسـهم البرنامج في معالجة التقلبات الموسـمية في الطلب على الغاز، وتحسـين كفاءة اسـتخدامه على مدار العام، بما يعزز اسـتقرار منظومة الطاقة في المملكة".

وتفعيلاً لهذا البرنامج، قامت شركة أرامكو السعودية بتنفيذ مشروع " الحوية - عنيزة" للتخزين الجوفي للغاز (HUGRS)، وهو الأول من نوعه في المملكة ويقع على بعد 260 كم من شـرق العاصـمة الرياض. وقد بدأت مرحلة حقن الغاز بداخل المكمن خلال عـام 2023، ووصـل معدل الحقن الأقصـى إلى 1.5 مليـار قـدم مكعب/اليوم[35]. وبحلول الربع الثالث من عام 2024، تم انجاز أول دورة حقن وإعادة إنتاج كاملة[36]. ويصـل معدل السـحب الأقصـى من الخزان الجوفي إلى 2 مليار قدم مكعب غاز/اليوم، والذي يتم ضخه في شبكة الغاز الرئيسة.

وقد قامت شـركة Samsung Engineering بأعمال الهندسـة والتوريد والإنشـاء وإدارة المشـروع بموجب عقد قيمته 1.85 مليار دولار[37]، وبدورها أسـندت عملية توريد ضـواغط الغاز إلى شـركة Siemens الألمانية التي قامت بتوريد 10 ضواغط خاصة بمرحلة حقن الغاز، و10 ضواغط أخرى خاصة بمرحلة إعادة الإنتاج (السـحب) من المكمن[38]. يلخص الشـكل 3-11، مواقع منشـآت التخزين الجوفي في المنطقة العربية وأبرز سماتها الفنية.

الشكل 3-11: مواقع منشآت التخزين الجوفي للغاز في الدول العربية



المصدر: من إعداد الباحث

3-4-2: دوافع الاستثمار في التخزين الجوفي للغاز في الدول العربية

لا شك أن تبني استراتيجيات مرنة ومستدامة لإدارة إمدادات الغاز الطبيعي سواءً كانت من حقول منتجة محلياً أو واردات من الخارج، سيساهم في تعزيز أمن الطاقة، واستقرار الأسواق في الدول العربية. ومن هذا المنطلق، فإن الاستثمار في منشآت التخزين الجوفي للغاز بات ضرورة ملحة لعدة أسباب، أبرزها:

- **تعزيز أمن الإمدادات وتجنب حدوث فترات انقطاع**

تعتمد أغلب الدول العربية على الغاز الطبيعي بشكل كبير في منظومة توليد الطاقة الكهربائية. وعادة ما يرتفع الطلب بشكل كبير على الكهرباء في فصل الصيف بسبب ارتفاع درجات الحرارة لتلبية احتياجات التكييف، ومن ثم يقفز الطلب على الغاز إلى مستويات مرتفعة مقارنة بباقي شهور السنة، مما يشكل تحدياً كبيراً خاصة في

الدول المستوردة، التي تحتاج إلى توفير إمدادات إضافية وعاجلة من الغاز الطبيعي. وفي حالة عدم توفر تلك الإمدادات، يتم اللجوء إلى تخفيف الأحمال وقطع التيار الكهربائي عن المنشآت الصناعية أو الوحدات السكنية. ومن ثم فإن وجود منشآت تخزين جوفي سيسهم في تعزيز أمن الإمدادات ويقلل من مخاطر الانقطاعات.

- **الاستفادة من الفروقات السعرية الموسمية لتقليل التكاليف أو تحقيق عائدات**

تُوفر منشآت التخزين الجوفي ميزة استراتيجية تتمثل في إمكانية شراء الغاز من الأسواق العالمية خلال فترات انخفاض أسعاره، مثل أشهر الصيف، وتخزينه لاستخدامه لاحقاً عند ارتفاع الأسعار. وتُسهم هذه الآلية في تقليل فاتورة الاستيراد للدول المستوردة. كما تمكّن مشغلي منشآت التخزين من تحقيق عوائد اقتصادية مجزية من خلال الاستفادة من فروقات الأسعار بين فترتي الشراء والسحب.

- **دعم خطط التوسع في استخدام الغاز في مزيج الطاقة، وضمان مرونتها**

تسعى عدة دول عربية نحو التوسع بشكل أكبر في استخدام الغاز في منظومة الطاقة، وهو الأمر الذي يتطلب توفير إمدادات دائمة ومستقرة من الغاز في الشبكات المحلية. ولا شك أن دعم شبكة الغاز المحلية بمنشآت التخزين الجوفي للغاز سيساهم في رفع درجة المرونة، ودعم شبكة توليد الكهرباء في فترات تقلب الطاقة المتجددة.

- **تعزيز التعاون الإقليمي في مجال الغاز**

سعت بعض الدول العربية منذ عدة سنوات نحو تعزيز التعاون الإقليمي في قطاع الغاز من خلال بناء شبكات لربط الغاز.

ومن أمثلة ذلك مشروع خط الغاز العربي الذي يربط مصر بكل من الأردن وسوريا ولبنان. وهناك اتفاقيات للتعاون بين كل من مصر والأردن، تقوم مصر

بموجبها بتوريد كميات يومية من الغاز إلى الجانب الأردني. وفي حالة حدوث اضطرابات في الإمدادات، يمكن للتخزين الجوفي للغاز تعويض الفقد المطلوب، ومن ثم تعزيز التعاون الإقليمي. كما أن مصر-على سبيل المثال- أعلنت عن رؤيتها في أن تكون مركز إقليمي لتجارة الغاز في منطقة شرق المتوسط. ولا شك أن توفر منشآت للتخزين الجوفي سيدعم تلك الرؤية، ويضمن إدارة إمدادات الغاز سواء المنتجة محلياً أو المستوردة من الخارج بمرونة عالية، ويشكل أساساً صلباً لبناء مركز إقليمي لتجارة الغاز.

- **تكوين احتياطي استراتيجي من الغاز للتعامل مع الأزمات الخارجية**

لقد مر العالم خلال السنوات الخمس الأخيرة بأزمات أثرت على قطاع الطاقة العالمي، بدأت بجائحة فيروس كورونا (كوفيد-19)، مروراً بالأزمة الروسية الأوكرانية، ووصولاً إلى الحرب التجارية بين الولايات المتحدة والصين. وخلال تلك الفترات، شهدت أسعار الغاز تقلبات حادة، الأمر الذي أدى إلى أعباء مالية كبيرة على الدول المستوردة. ولذلك فإن توفير وجود احتياطات غازية محلية بات مسألة استراتيجية ملحة، تمكن الدول من التعامل مع الأزمات الخارجية، وتعزيز أمنها الطاقي.

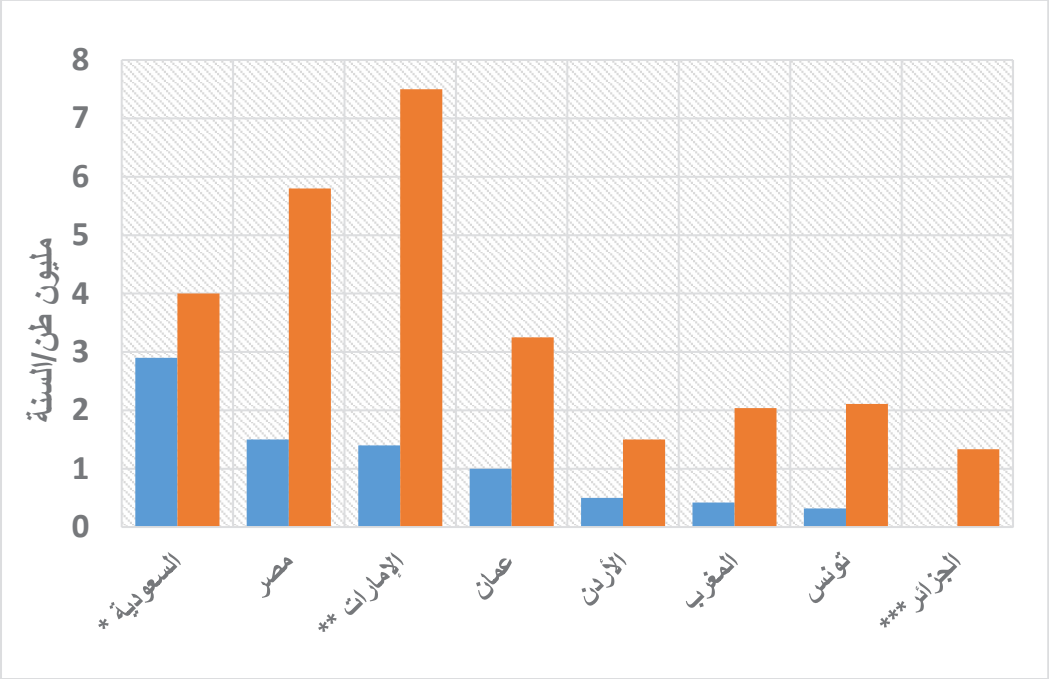
- **دعم توجهات التحول الطاقي والتكامل مع الهيدروجين**

بدأ الاهتمام العربي بالاستثمار في قطاع الهيدروجين منذ قرابة خمس سنوات، وشرع العديد من الدول العربية في وضع أهداف محددة ضمن أطر زمنية واضحة لقدرات إنتاج الهيدروجين، أو الحصة المستهدفة في السوق العالمية.

وقد وصل عدد الدول العربية التي أعلنت عن خطط في هذا الشأن عشر دول (الإمارات، السعودية، مصر، سلطنة عُمان، الجزائر، المغرب، تونس، الكويت،

الأردن، وموريتانيا)، وهو ما يعكس حرص الدول العربية على التواجد الفعّال في هذا السوق الواعد، وتأمين دور تنافسي ضمن التجارة العالمية للهيدروجين ومشتقاته. وبحسب تقديرات منظمة أوابك، فإن إجمالي الإنتاج المستهدف من الهيدروجين المنخفض الكربون في الدول العربية سيصل إلى نحو 8 مليون طن/السنة بحلول عام 2030، من خلال مشاريع إنتاجية في دول مثل الإمارات، السعودية، مصر، تونس، عُمان، والجزائر، كما هو موضح في الشكل 3-12. ويُتوقع أن يرتفع هذا الرقم ليصل إلى أكثر من 27 مليون طن/السنة بحلول عام 2040، في ظل استمرار تنفيذ وتوسعة مشاريع كبرى في عدد من هذه الدول.

الشكل 3-12: أهداف إنتاج الهيدروجين المنخفض الكربون في الدول العربية بحلول عام 2030 وعام 2040



المصدر: أوابك

ملاحظات

- بعض الدول العربية المبينة بالجدول وضعت أهدافاً لإنتاج الهيدروجين بوحدة المليون طن، والبعض الآخر مقدراً بـ التيراواط ساعة، وتم استخدام وحدة المليون طن لتوحيد المقارنة
- الأهداف المعلنة المبينة تقع ضمن القيم الصغرى أو السيناريوهات الأقل طموحاً للأهداف الحكومية
- *هدف السعودية لعام 2040 (تم وضع هدف عام 2035 وفق مبادرة السعودية الخضراء الرامي نحو إنتاج 4 مليون طن/السنة)
- **هدف الإمارات لعام 2030 (هدف عام 2031 حسب الاستراتيجية الوطنية للهيدروجين لدولة الإمارات)
- *** أول مستهدف لإنتاج الهيدروجين في الجزائر بحلول عام 2040

ولتحقيق تلك الأهداف، لابد من تأسيس سلسلة قيمة متكاملة تسمح بتخزين كميات كبيرة لتلبية متطلبات التصدير أو تغذية السوق الداخلي. ومن هذا المنظور، يمكن استخدام منشآت التخزين الجوفي مستقبلاً، خاصة الكهوف الملحية، لتخزين الهيدروجين أو مزيج الهيدروجين والغاز الطبيعي، حسب اتجاهات السوق العالمية. كما أن استخدام الكهوف الملحية لتخزين الهيدروجين مُطبق عالمياً، حيث قامت شركة Linde الألمانية بتشغيل أول كهف ملحي لهذا الغرض في عام 2007، لتلبية الطلب على الهيدروجين في عدة مصافي لتكرير النفط في تكساس ولويزيانا في الولايات المتحدة[39]. ولا شك أن هذه الإمكانية تفتح آفاقًا جديدة لمشاريع التخزين في إطار التحول الطاقي منخفض الكربون.

تشكل هذه الدوافع أساساً لأهمية التخزين الجوفي للغاز في المنطقة العربية، ليس فقط من منطلق اقتصادي، وإنما أيضاً كجزء من رؤية شاملة لأمن الطاقة والتحول نحو طاقات أكثر استدامة ومرونة داخل المنطقة. ولضمان نجاح هذه الاستثمارات، يجب أن تُرفق بخطط تنظيمية وتمويلية واضحة، وتعاون إقليمي لاستغلال الإمكانات الجيولوجية المتوفرة في الدول العربية.

3-4-3: مقومات وعوامل نجاح الاستثمار في التخزين الجوفي للغاز

تتوافر لدى الدول العربية عدة عوامل ومقومات أساسية تمكنها من الاستثمار بنجاح في مشاريع التخزين الجوفي للغاز، وأبرزها:

- **توافر البنية الجيولوجية المناسبة للتخزين**

لدى الكثير من الدول العربية وبالأخص المُنتجة للنفط والغاز، مكامن نفط وغاز مُستنفدة، والتي يمكن إعادة استغلالها وتأهيلها في عملية التخزين الجوفي للغاز. كما تتواجد التكوينات الملحية في بعض الدول والتي تسمح أيضاً بتنويع خيارات التخزين

الجوفي لاختيار الأنسب منها. ومن ثم فإن الدول العربية تستطيع الاستثمار في تلك البنية الجيولوجية بتكاليف استثمارية مجدية.

- **وجود شبكات نقل وتوزيع متطورة**

تتوافر في الدول العربية بنى تحتية واسعة ومتطورة لنقل وتوزيع الغاز من مناطق إنتاجه وحتى القطاعات الرئيسية المستهلكة له. ومن ثم فإنه يمكن إدراج منشآت التخزين ضمن تلك البنى التحتية، الأمر الذي سيقلل من الاستثمارات الرأسمالية المطلوبة.

- **الخبرة الفنية والمؤسسية في مجال الطاقة**

لدى الدول العربية تاريخ عريق في صناعة النفط والغاز، ولديها شركات وطنية عريقة مثل أرامكو السعودية، وشركة بترول أبو ظبي الوطنية "أدنوك"، وشركة "قطر للطاقة"، وشركة "نفط الكويت"، وشركة "سوناطراك" وغيرهم، والتي لديها خبرات فنية ومؤسسية تراكمية تشمل هندسة الخزانات، وإدارة مكامن الغاز، علاوة على تطبيقات تتشابه تقنياً مع التخزين الجوفي للغاز مثل التقاط وتخزين الكربون (CCS)، والاستخلاص المحسن للنفط (EOR). وتلك الخبرات يمكن استغلالها في دراسة الطبقات الجيولوجية المناسبة للتخزين الجوفي للغاز، وكذلك إدارة منشآت التخزين بعد دخولها حيز التشغيل.

- **استراتيجيات واضحة لأمن الطاقة**

وضعت معظم الدول العربية خططاً واضحة ضمن رؤاها الاستراتيجية لتعزيز أمن الطاقة، في ظل التحديات العالمية المتزايدة. ولا شك أن التخزين الجوفي للغاز يمكن أن يُشكّل ركيزة أساسية في دعم هذه الاستراتيجيات، من خلال توفير مخزونات

مرنة وآمنة، تُعزز استقرار الإمدادات وتتكامل مع جهود تنويع مصادر الطاقة وتعزيز مرونة الشبكات.

أبدت العديد من الدول العربية، ولا سيما الدول المنتجة للنفط والغاز، اهتماماً متزايدًا بمصادر الطاقة المتجددة خلال السنوات الأخيرة، في إطار جهودها لتنويع مزيج الطاقة الأولية المُعتمد بشكل كبير على الوقود الأحفوري. ويأتي هذا التوجه بهدف تحقيق استدامة مزيج الطاقة، وتقليل الاعتماد على النفط والغاز في تلبية الطلب المحلي، ما يتيح الحفاظ على الفوائض التصديرية التي تُعد مصدراً رئيسياً للإيرادات العامة في العديد من هذه الدول.

وانطلاقًا من هذا التوجه، وضعت غالبية الدول العربية أهدافًا طموحة للتوسع في الطاقة المتجددة، سواء من حيث الحصة المستهدفة في مزيج الطاقة الأولية، أو في مزيج توليد الكهرباء، أو في استخدامات الطاقة النهائية، مع تحديد التقنيات المستهدفة لكل حالة.

وفي هذا السياق، فإن التوسع في استخدام الطاقة المتجددة يتطلب بناء منظومة طاقة مرنة ومتكاملة، قادرة على استيعاب تقلبات التوليد الناتجة عن الطبيعة غير المستقرة لمصادر الطاقة المتجددة. وهنا يبرز دور منشآت التخزين الجوفي كأداة داعمة لاستقرار الشبكات الكهربائية، من خلال تأمين إمدادات الغاز اللازمة لتغطية فجوات التوليد.

الاستنتاجات

- **أنواع التخزين الجوفي للغاز والتكاليف الرأسمالية المطلوبة**

على الرغم من تعدد الخيارات المتاحة لتخزين الغاز والغاز الطبيعي المسال، كالصهاريج السطحية أو المدفونة في الأرض أو خطوط الأنابيب، فإن فعاليتها تبقى محدودة من حيث القدرة على تأمين كميات كبيرة من الإمدادات لفترات زمنية ممتدة . فهذه الوسائل تصلح لتوفير إمدادات سريعة في الأجل القصير، حيث غالباً ما تُستخدم لتلبية الطلب الفوري خلال أيام معدودة، بسبب سعتها التخزينية المحدودة.

في المقابل، يُعد التخزين الجوفي للغاز خياراً استراتيجياً يتمتع بقدرة تخزينية عالية، وإمكانية الحفاظ على مخزون الغاز لفترات تمتد لعدة شهور، ما يجعله مثالياً لتغطية الطلب خلال مواسم الذروة، مثل فصل الشتاء في أوروبا أو الصيف في الدول العربية. وتُظهر التجارب الدولية أن التخزين الجوفي قد يساهم في تلبية ما بين 30% إلى 40% من إجمالي الطلب اليومي على الغاز في بعض الأسواق المستوردة خلال فترات الطلب المرتفع.

ومن هذا المنطلق، يُعد التخزين الجوفي أداة محورية ضمن منظومة أمن الطاقة، لما يوفره من مرونة تشغيلية عالية لشبكات الغاز، وقدرة فعالة على الاستجابة الفورية لحالات الطوارئ أو التقلبات الحادة في الطلب، بما يعزز استقرار السوق. كما يقلل من الاعتماد على الاستيراد الفوري بأسعار عالية، في أوقات الأزمات.

عالمياً يتم التخزين الجوفي للغاز في ثلاثة أنواع من الخزانات الجيولوجية في باطن الأرض وهي إما حقول نفط أو غاز ناضبة (مُستنفدة) التي كانت حقولاً منتجة ثم وصلت إلى حالة النضوب، أو ما يعرف باسم كهوف الملح وهي تجاويف صناعية في طبقات ملح طبيعية، كما يمكن تخزين الغاز في طبقات المياه الجوفية العميقة.

وقد **أبرزت الدراسة** العوامل المحددة لاختيار نوع الخزان الجوفي الملائم للتخزين، وأبرزها التكاليف الرأسمالية المطلوبة، والجدوى الاقتصادية لتنفيذ المشروع والفترة اللازمة للإنشاء والتجهيز، وإجمالي السعة التخزينية للخزان، وأقصى معدل لسحب الغاز لتحديد مدى ملائمة الخزان الجوفي لتلبية الطلب الموسمي وفي حالات الطوارئ، والحجم المطلوب من غاز الأساس الذي لا يمكن سحبه إلا في نهاية عمر المنشأة.

ومن أبرز ما توصلت إليه الدراسة هو تحديد نطاق التكاليف الرأسمالية في مشاريع التخزين الجوفي للغاز حسب نوع الخزان الجوفي، حيث تعد حقول النفط والغاز المستنفدة الأقل عموماً في التكاليف الرأسمالية مقارنة بباقي الأنواع الأخرى، وهي تتراوح بين 5,000-6,500 دولار لكل مليون قدم مكعب من السعة التخزينية العاملة (القابلة للسحب فوق غاز الأساس). لكن لابد من الأخذ في الاعتبار أن التكلفة قد تزيد عن هذا النطاق في مشاريع جديدة، في ظل ارتفاع أسعار الغاز في السنوات الأخيرة.

أما لطبقات المياه الجوفية العميقة، فتتراوح التكاليف الرأسمالية بين 7,000-8,500 دولار لكل مليون قدم مكعب من السعة التشغيلية العاملة، أي أعلى من حقول النفط والغاز المستنفدة. ويعود ذلك إلى متطلباتها المتعددة من دراسات جيولوجية معقدة، وكذلك الكمية الكبيرة المطلوبة من غاز الأساس، والتي تصل إلى نحو 80% من إجمالي السعة التخزينية. أما في حالة كهوف الملح، فتُعد التكاليف الرأسمالية الأعلى بين أنواع التخزين الجوفي، حيث تتراوح بين 10,000 و18,500 دولار لكل مليون قدم مكعب من السعة التخزينية العاملة (القابلة للسحب). ويعود هذا الارتفاع في التكاليف بشكل رئيسي إلى تعقيد عمليات حفر الكهوف داخل التكوينات الملحية، فضلاً عن محدودية انتشار طبقات الملح الجيولوجية المناسبة في العديد من المناطق حول العالم.

- **منشآت التخزين الجوفي للغاز عالمياً والمشاريع قيد الإنشاء والتخطيط**

أوضحت الدراسة أن التزايد المستمر في الطلب العالمي على الغاز الطبيعي، باعتباره مكوناً رئيسياً في مزيج الطاقة العالمي، أدى إلى تنامي الاهتمام بالاستثمار في منشآت التخزين الجوفي للغاز، لدورها المحوري في تلبية الطلب الموسمي المتغير، وتحقيق التوازن بين العرض والطلب، خاصة في الدول المستوردة. وقد انعكس هذا الأمر على نمو السعات التخزين العاملة ضمن هذه المنشآت لتبلغ 15.44 تريليون قدم مكعب نهاية عام 2023، مقارنة بـ 11.1 تريليون قدم مكعب عام 2000، أي بنسبة نمو إجمالية 38%.

كما رصدت الدراسة توزيع **منشآت تخزين الغاز الطبيعي الجوفي على مستوى العالم وتقنياتها**. حيث بلغ عدد هذه المنشآت، في مطلع عام 2024، نحو 681 منشأة تتفاوت في قدراتها التخزينية وتقنياتها الجيولوجية. وتشكل الحقول المُستنفدة النسبة الأكبر من هذه المنشآت بإجمالي 509 منشأة، وبسعة تخزين قدرها 12.46 تريليون قدم مكعب بما يعادل نحو 80.7% من سعة التخزين العالمية وبمعدل سحب يقدر بنحو 172 مليار قدم مكعب/اليوم. أما منشآت التخزين الجوفي في طبقات المياه الجوفية فتبلغ نحو 75 منشأة، وبسعة تخزينية 1.68 تريليون قدم مكعب، بما يعادل نحو 10.9% من السعة العالمية، وبمعدل سحب يقدر بنحو 27.5 مليار قدم مكعب/اليوم. وبالرغم من أن منشآت التخزين في كهوف الملح عددها أعلى من طبقات المياه الجوفية العميقة، إذ يبلغ العدد نحو 97 منشأة، إلا أن سعتها التخزينية أقل وتقدر بنحو 1.3 تريليون قدم مكعب، بما يعادل نحو 8.4% من السعة العالمية، وبمعدل سحب يقدر بنحو 66 مليار قدم مكعب/اليوم.

عالمياً هناك نحو 76 مشروعاً جديداً وتوسعياً للتخزين الجوفي للغاز قيد البناء موزعة على ما يقارب 20 دولة في مختلف مناطق العالم. وتشمل هذه القائمة حوالي 28 مشروعاً جديداً بالكامل، تتركز غالبيتها في الصين، وتبلغ السعة التخزينية العاملة لهذه المشاريع مجتمعة نحو 0.989 تريليون قدم مكعب. أما المشاريع الـ48 المتبقية، فهي توسعات في منشآت قائمة في كل من أوروبا، وروسيا، ومناطق أخرى، وتُقدّر سعتها الإجمالية بحوالي 1.165 تريليون قدم مكعب.

ومن ثم فإن المشاريع الجاري تنفيذها حالياً يُتوقع أن تُضيف عند اكتمالها ودخولها حيز التشغيل نحو 2.154 تريليون قدم مكعب إلى إجمالي سعة التخزين الجوفي للغاز عالمياً، لترتفع السعة الإجمالية إلى نحو 17.6 تريليون قدم مكعب بحلول عام 2030. ويُعادل هذا التوسع نسبة نمو إجمالية تقارب 14% مقارنة بالمستويات الحالية.

وبخلاف مشروعات التخزين الجوفي للغاز قيد البناء، أبدت عدة دول رغبتها في تنفيذ مشروعات للتخزين الجوفي للغاز، إلا أنها لا تزال ضمن مراحل مختلفة من التخطيط ودراسة الجدوى. ويقدر العدد الإجمالي لهذه المشاريع قيد التخطيط والدراسة بنحو 117 مشروعاً، والتي إن تم تنفيذها، سيرتفع عدد منشآت التخزين الجوفي عالمياً إلى 877 منشأة. وتُقدّر السعة التخزينية الإجمالية لهذه المشاريع المخطط تنفيذها بحوالي 3.966 تريليون قدم مكعب، أي ما يعادل 26% من السعة العالمية الحالية. ويعكس هذا الزخم الكبير في عدد المشاريع الجديدة سواء قيد الإنشاء أو المخطط لها مدى الاهتمام العالمي المتزايد بالاستثمار في منشآت التخزين الجوفي للغاز، وذلك في سياق تعزيز أمن إمدادات الطاقة، وتلافي أخطار نقص الإمدادات خلال فترات الذروة أو الأزمات.

- **التخزين الجوفي في الدول العربية والحاجة إلى الاستثمار**

رغم الأهمية الكبيرة التي تحظى بها المنطقة على الخريطة العالمية للغاز، من احتياطيات كبيرة من الغاز ومعدلات إنتاج وتصـــدير مرتفعة، إلا أنها لا تزال في مرحلة مبكرة من تطوير البنية التحتية لتخزين الغاز الجوفي حسب ما أوردته الدراسة حيث يوجد ثلاث منشـــآت للتخزين الجوفي للغاز في دولتين فقط هما دولة الإمارات العربية المتحدة والمملكة العربية الســـعودية. بينما تعتمد غالبية الدول العربية على التخزين الســـطحي للغاز، مثل التخزين في خطوط الأنابيب أو التخزين في صـــهاريج الغاز الطبيعي المسال سواء كانت دول مستوردة أو مصدرة للغاز.

ومع ذلك، هناك إمكانيات كبيرة لتطوير هذا القطاع في المســـتقبل، لما تملكه الدول العربية من مقومات تضـــم مزيجاً من المقومات الجيولوجية والاقتصـــادية والاســـتراتيجية. فوجود حقول غاز ونفط مُســـتنفدة، ووفرة في الموارد الغازية، وتوافر بنى تحتية قيد التشـــغيل أو قريبة من مناطق الطلب، إلى جانب الموقع الجغرافي المحوري، يشكل أساساً صلباً لبناء منظومة تخزين استراتيجية.

كما توصلت الدراسة إلى أن الاستثمار في منشآت التخزين الجوفي للغاز في الدول العربية بات ذو ضرورة استراتيجية لعدة أسباب من بينها ضمان أمن الإمدادات، وتجنب حدوث فترات انقطاع لها، ودعم التوســع في اســتخدام الغاز في مزيج الطاقة. وأهمية تكوين احتياطي اســـتراتيجي من الغاز للتعامل مع الأزمات الخارجية، وأخيراً دعم توجهات التحول الطاقي والتكامل مع الهيدروجين.

وتشكل هذه الدوافع أساس لأهمية التخزين الجوفي للغاز في المنطقة العربية، ليس فقط من منطلق اقتصـــادي، وإنما أيضـــاً كجزء من رؤية شـــاملة لأمن الطاقة والتحول نحو طاقات أكثر استدامة ومرونة داخل المنطقة.

التوصيات والإجراءات المقترحة

لضمان نجاح مشاريع تطوير التخزين الجوفي في الدول العربية، فإن الدراسة توصي بما يلي:

1. دراسة وتطوير البنية التحتية الجيولوجية والتقنية

- إعداد خرائط جيولوجية دقيقة لتحديد المواقع المناسبة لإنشاء منشآت التخزين الجوفي (حقول مستنفدة، كهوف ملحية، طبقات مائية)، حسب كل دولة.
- إعداد دراسة جيوفيزيائية وجيولوجية لدراسة خصائص الطبقات، ومعرفة السعة التخزينية الممكنة، وأقصى معدلات ممكنة عند التشغيل.
- اختيار المواقع القريبة من البنية التحتية للغاز للاستفادة منها في ربط منشآت التخزين الجوفي بشبكة الغاز المحلية.

2. تطوير الإطار التشريعي والتنظيمي والجهات المنظمة للاستثمار في التخزين الجوفي

- إصدار تشريعات داعمة ذات أطر قانونية واضحة لتنظيم الاستثمار في منشآت التخزين الجوفي تتضمن شروط الترخيص، وقواعد الأمن والسلامة، وحقوق استغلال للبنية التحتية للقطاع الخاص.
- تحديد دور الجهات المنظمة والمشغلين عبر تمكين الهيئات التنظيمية في كل دولة (مثل هيئة تنظيم الكهرباء والماء أو الطاقة أو البترول) لتوجيه الاستثمارات، ومنح الرخص، ومراقبة الأداء.

3. تحفيز الاستثمارات وتخفيف مخاطر التمويل

- تقديم حوافز مالية مثل الإعفاءات الضريبية أو الدعم الحكومي في مراحل التطوير الأولى لمشاريع التخزين الجوفي.
- تأمين مشاريع التخزين من خلال ضمانات حكومية أو اتفاقيات شراء طويلة الأجل مع مستهلكين محليين أو صناعيين.

4. **إبرام شـــراكات مع الشـــركات العالمية** التي تمتلك خبرات متقدمة في التخزين الجوفي للغاز، والبدء في تنفيذ مشـــاريع تجريبية لاختبار التقنية، ومدى جدواها الاقتصادي قبل تنفيذ أي مشروع بسعته التخزينية الكاملة.

5. **مشاركة المعرفة بين الدول العربية التي حققت اختراقاً في مجال التخزين الجوفي** مثل دولة الإمارات والمملكة العربية الســـعودية، من خلال تأســـيس منتديات أو شراكات لتبادل الخبرات والتقنيات الخاصة بالتخزين الجوفي. الأمر الذي سيسهم في تبني أفضل الممارسات، ورفع القدرات الوطنية في الدول العربية.

المراجع

[1] Energy Institute (EI), Annual Statistical Review of the World Energy several editions; (2023 & 2024).

[2] British Petroleum (BP); Annual Statistical Review of the World Energy several editions; (2001-2022).

[3] US EIA;" Weekly Natural Gas Storage Report", Released: June 12, 2025.
https://ir.eia.gov/ngs/ngs.html

[4] NAFTA Website. Link:
https://www.nafta.sk/en/gas-storage
[5] Shimz;" Tokyo Gas Co., Ltd. Ohgishima Factory C-6 LNG Underground LNG Storage Tank"

https://www.shimz.co.jp/en/works/jp_ene_199308_tokyogassodegaura03.html

[6] Energy Industry Review;" Strategic Sector in Romania: Underground Gas Storage"; March 20, 2024.
https://energyindustryreview.com/oil-gas/strategic-sector-in-romania-underground-gas-storage/

[7] American Petroleum Institute (API):" Supporting the American way of Life: The Importance of Natural Gas storage"; 2016.
https://www.api.org/-/media/files/oil-and-natural-gas/natural-gas/underground-ng-storage-brochure.pdf

[8] American Petroleum Institute (API) & American gas Association (AGA); Underground Natural Gas Storage: Facts & Figures, February 2016. Available at:
https://ingaa.org/wp-content/uploads/2016/02/27274.pdf

[9] EIA (US Energy Information Administration); "Natural Gas: The Basics of Underground Natural Gas Storage"; November 16, 2015.
https://www.eia.gov/naturalgas/storage/basics/

[10] Natural Gas Storage Org;" Storage of Natural Gas"; available at:
https://naturalgas.org/naturalgas/storage/

[11] VNG Gasspeicher;" Holding it All Together: Types of Storage Facilities"; available at:
https://www.vng-gasspeicher.de/en/types_of_storage

[12] Federal Energy Regulatory Commission (FERC):" Natural Gas Storage - Storage Fields"; July 22, 2020.
https://www.ferc.gov/industries-data/natural-gas/overview/natural-gas-storage/natural-gas-storage-storage-fields#:~:text=Depleted%20Oil%20and/or%20Gas%20Fields:%20These%20reservoirs%20are%20naturally,remaining%20capacity%20as%20working%20gas.

[13] Puget Sound Energy (PSE);" Jackson Prairie Underground Natural Gas Storage Facility"; April, 2018.
https://protect-us.mimecast.com/s/iJ7ECgJxxDTABJ5ysomNik?domain=pse.com

[14] Offshore Technology;" Dutch UGS Bergermeer put into full commercial operation"; April 3, 2015.
https://www.offshore-energy.biz/dutch-ugs-bergermeer-put-into-full-commercial-operation/?utm_source=chatgpt.com

[15] SEFE;" Haidach storage facility".
https://www.sefe-storage.de/en/company/storage-locations/haidach-storage-facility?utm_source=chatgpt.com

[16] Offshore Technology;" Tuz Golu Underground Gas Storage Project"; July 17, 2018..
https://www.offshore-technology.com/projects/tuz-golu-underground-gas-storage-project/?utm_source=chatgpt.com

[17] ANews;" World Bank, AIIB allocate $1.2B loan for Lake Tuz natural gas storage facility"; June 28, 2018.
https://www.anews.com.tr/economy/2018/06/28/world-bank-aiib-allocate-12b-loan-for-lake-tuz-natural-gas-storage-facility-1530142244?utm_source=chatgpt.com

[18] Oil and Gas;" Aramco announces major updates for key oil and gas projects"; August 07, 2023.
https://www.oilandgasmiddleeast.com/news/aramco-announces-major-updates-for-key-oil-and-gas-projects

[19] Gazprom;" Underground gas storage", Available at:
https://www.gazprom.com/about/production/underground-storage/

[20] Ukrtransgaz;" 60 Years of Gas Storage in Ukraine"; 2024.

[21] Dana Energy;" Underground Gas Storage"; Dana Magazine. Available at:
https://www.danaenergy.com/underground-gas-storage/

[22] أوابك، تقرير تطورات الغاز الطبيعي المسال والهيدروجين: الربع الأول 2025، فبراير 2025.

[23] Natural Gas World Magazine;" China's Storage Shortage"; Feb 12, 2021.
https://www.naturalgasworld.com/chinas-storage-shortage-ngw-magazine-85170

[24] Argus Media;" Viewpoint: India eyes strategic gas storage reserve"; Jan 1, 2024.
https://www.argusmedia.com/en/news-and-insights/latest-market-news/2525293-viewpoint-india-eyes-strategic-gas-storage-reserve

[25] Environmental Defend Fund (EDF); "Underground Gas Storage in China: Developing a World Class Program"; 2019.
https://blogs.edf.org/energyexchange/wp-content/blogs.dir/38/files/2019/05/DevelopingUndergroundGasStorageinChina.pdf

[26] وائل حامد عبد المعطي، تقرير حول الحلقة النقاشية " مشروع الكويت للغاز الطبيعي المسال"، أوابك، أغسطس 2021.

[27] Hyundai;" Kuwait EPCC of Al-Zour LNG Terminal project emerges as a new base for clean energy"; March 23, 2021.
https://en.hdec.kr/en/newsroom/news_view.aspx?NewsListType=news_clist&NewsSeq=208&NewsType=LATEST

[28] DUSUP; " Margham Gas pant & Field".
https://www.dusup.ae/our-business/margham-gas-plant-field/

[29] worldoil;" Baker Hughes secures largest compressor line order for Dubai gas storage facility"; October 8, 2024.
https://www.worldoil.com/news/2024/10/8/baker-hughes-secures-largest-compressor-line-order-for-dubai-gas-storage-facility/

[30] WorldOil; Baker Hughes awarded multi-year contract for Dubai's Margham gas project"; March 26, 2025.
https://worldoil.com/news/2025/3/26/baker-hughes-awarded-multi-year-contract-for-dubai-s-margham-gas-project/

[31] المكتب الإعلامي لحكومة الشارقة، " مؤسسة نفط الشارقة الوطنية (سنوك) تطلق مشروعاً رائداً لتخزين الغاز"، 6 يناير 2021.
https://sgmb.ae/ar/news/%D9%85%D8%A4%D8%B3%D8%B3%D8%A9-%D9%86%D9%81%D8%B7-%D8%A7%D9%84%D8%B4%D8%A7%D8%B1%D9%82%D8%A9-%D8%A7%D9%84%D9%88%D8%B7%D9%86%D9%8A%D8%A9-%D8%B3%D9%86%D9%88%D9%83-%D8%AA%D8%B7%D9%84%D9%82-%D9%85%D8%B4%D8%B1%D9%88%D8%B9%D8%A7%D9%8B-%D8%B1%D8%A7%D8%A6%D8%AF%D8%A7%D9%8B-%D9%84%D8%AA%D8%AE%D8%B2%D9%8A%D9%86-%D8%A7%D9%84%D8%BA%D8%A7%D8%B2-06-01-2021

[32] Enerdata, Petrofac will build a US$40m gas storage project in Sharjah (UAE)"; March 27, 2020.
https://www.enerdata.net/publications/daily-energy-news/petrofac-will-build-us40m-gas-storage-project-sharjah-uae.html

[33] GufNews"; Sharjah National Oil Corporation completes second phase of gas storage project"; November 4, 2024.
https://gulfnews.com/business/energy/sharjah-national-oil-corporation-completes-second-phase-of-gas-storage-project-1.1730713526807?utm_source=chatgpt.com

[34] SNOC;" SHARJAH NATIONAL OIL CORPORATION COMPLETES ITS MILESTONE GAS STORAGE PROJECT".
https://www.snoc.ae/news/sharjah-national-oil-corporation-completes-its-milestone-gas-storage-project/

[35] نفس المصدر رقم 18

[36] أرامكو السعودية، التقرير السنوي لعام 2024.
https://www.aramco.com/-/media/publications/corporate-reports/annual-reports/saudi-aramco-ara-2024-arabic.pdf

[37] Upstream Online;" Samsung scoops $1.85 billion Hawiyah Unayzah gas prize"; January 29, 2020.
https://www.upstreamonline.com/production/samsung-scoops-1-85-billion-hawiyah-unayzah-gas-prize/2-1-746345

[38] Siemens; "Siemens compressors selected for gas reservoir storage project with Saudi Aramco"; July 30, 2020.
https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/siemens-compressors-selected-gas-reservoir-storage-project-saudi-aramco

[39] Linde;" Increase Hydrogen Supply Availability with Cavern Storage"; 2022
https://assets.linde.com/-/media/global/corporate/corporate/documents/clean-energy/expert-insights-2022-hydrogen-supply-in-caverns.pdf

منظمة الأقطار
العربية المصدرة
للبترول(أوابك)