



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة الشهيد حمه لخضر- الوادي

كلية التكنولوجيا

قسم هندسة الطرائق والبتروكيمياء

مذكرة تخرج لنيل شهادة:

ماستر أكاديمي

ميدان: علوم وتكنولوجيا

شعبة: صناعات بترو كيميائية

التخصص: هندسة بيطرو كيميائية

من إعداد:

السويسي عبد المنعم

بن السبتي عبد الرؤوف

عنوان المذكرة

**الغاز الطبيعي من الاستخراج إلى التحول الطاقوي:
دراسة نظرية لعمليات المعالجة، النقل والأبعاد
البيئية والاقتصادية**

تمت مناقشة المذكرة في 2026/05/23

أمام اللجنة المكونة من الأساتذة:

جامعة الوادي
جامعة الوادي
جامعة الوادي

رئيسا
مناقشا
مؤطرا

التجاني محمد العيد
خالد بلال
قرام عبد المجيد

الموسم الجامعي: 2026/2025

الإهداء

نحمد الله عز وجل الذي وفقنا وسهل لنا في إتمام هذا البحث العلمي والذي ألهمنا الصحة والعافية

فالحمد لله حمدا كثيرا طيبا مباركا فيه

✓ إلى من بلغ الرسالة وأدى الأمانة ونصح الأمة، سيدنا محمد صل الله عليه وسلم.

✓ إلى أمي الغالية التي سهرت طول السنين لأصل لما وصلت إليه.

✓ إلى أبي الذي علمني كيف تكون العزيمة والإصرار في سبيل النجاح.

✓ إلى إخوتنا وأخواننا وكل أفراد عائلتنا.

✓ إلى أصدقائنا وكل من شاركنا كرسي الدراسة يوما.

✓ وإلى كل من تعلمنا على يده حرفا، فكان نورا يبدد الظلم فأنا سبيلنا.

عبد الرؤوف بن
السبتي

الإهداء

أهدي نتائج جهدي هذا

✓ إلى من حملتني وسهرت عني الليالي "أمي الغالية"

✓ إلى والدي حفظه الله وأطال عمره.

✓ إلى من تقاسمت معهم حلو الحياة ومرها. إخوتي وأخواتي وخالتي أنار الله دربهم.

✓ إلى جميع أساتذتي وكل من علمني حرفاً.

✓ إلى جميع أصدقاء الدراسة ومن تقاسمت معهم حلوة الجامعة.

✓ إلى جميع من قرأ مذكرتي وذكرني بخير.

السويسي عبد المنعم

شكر وتقدير

إن الحمد لله نحمده سبحانه وتعالى حمدا يليق بجلاله وعظيم سلطانه، فقد سدّد الخطي
وشرح الصدر ويسر الأمر كله وله الفضل كله، والصلاة والسلام على أشرف المرسلين سيدنا
محمد "صل الله عليه وسلم" النبي الأمين.

أما بعد فإننا نشكر الله تعالى على فضله حيث أتاح لنا إنجاز هذا العمل، فله الحمد أولا و آخر.

ننقدم بجزيل الشكر والعرفان إلى المشرف أ.د. قرام على ما قدمه من تشجيعات
وملاحظات وحث على الاستمرار، فكانت توجيهاته وإرشاداته ذات منفعة وفائدة لنا في تحديد
ماهية موضوع الدراسة والتي كان لها الأثر الأكبر في إتمام هذا العمل.

وفي الأخير أشكر أولئك الأخيار الذين مدوا لنا يد المساعدة خلال هذه الفترة.

الملخص

يتناول هذا العمل دراسة نظرية شاملة للغاز الطبيعي باعتباره من أهم مصادر الطاقة في العالم، مع التركيز على أهميته الاقتصادية والبيئية، والعمليات التقنية والهندسية التي يمر بها منذ الاستخراج حتى وصوله إلى المستهلك. كما يتطرق إلى خصائص الغاز الطبيعي وأنواعه المختلفة وطرق استخراجه، إضافة إلى شرح عمليات معالجته التي تهدف إلى تحسين جودته وجعله مطابقاً لمعايير النقل والاستعمال التجاري، بما في ذلك تقنيات التجزئة والتسييل. كذلك يستعرض البحث أساليب نقل وتخزين الغاز الطبيعي عبر خطوط الأنابيب والغاز الطبيعي المسال والتخزين الجوفي، مع مناقشة التكاليف والآثار البيئية المرتبطة بهذه الصناعة، وأخيراً إبراز دور الغاز الطبيعي كوقود انتقالي في ظل التحول الطاقوي العالمي نحو مستقبل أكثر استدامة.

الكلمات المفتاحية

الغاز الطبيعي، الغاز الطبيعي المسال، التجزئة، التسييل، تحول طاقوي.

Abstract

Ce travail présente une étude théorique globale du gaz naturel en tant que l'une des sources d'énergie les plus importantes au monde, en se concentrant sur son importance économique et environnementale, ainsi que sur les processus techniques et d'ingénierie qu'il subit depuis son extraction jusqu'au consommateur final. Il aborde également les propriétés du gaz naturel, ses différents types et ses méthodes d'extraction, en plus d'expliquer les opérations de traitement visant à améliorer sa qualité et à le rendre conforme aux normes de transport et d'utilisation commerciale, y compris les technologies de fractionnement et de liquéfaction. De plus, la recherche passe en revue les méthodes de transport et de stockage du gaz naturel via les pipelines, le gaz naturel liquéfié (GNL) et le stockage souterrain, tout en discutant des coûts et des impacts environnementaux associés à cette industrie. Enfin, elle met en évidence le rôle du gaz naturel comme carburant de transition dans le cadre de la transition énergétique mondiale vers un avenir plus durable."

Key Words:

Gaz naturel, Gaz naturel liquéfié (GNL), Fractionnement, Liquéfaction, Transition énergétique.

فهرس المحتويات

الإهداء.....	أ
شكر وتقدير.....	ث
الملخص.....	ج
فهرس المحتويات.....	و
قائمة الرموز والاختصارات.....	د
قائمة المعادلات.....	ن
قائمة الجداول.....	ر
قائمة الاشكال.....	ز
مقدمة عامة.....	1

الجزء النظري

الفصل الأول: عموميات حول الغاز الطبيعي وطرق استخراجه

الملخص.....	5
فهرس المحتويات.....	6
1.1 مقدمة.....	5
2.1 تعريف الغاز الطبيعي.....	5
3.1 نشأة الغاز الطبيعي.....	6
4.1 أنواع الغاز الطبيعي.....	6
14.1. الغاز الرطب.....	6
24.1. الغاز الجاف.....	6
34.1. الغاز المرفق.....	6

44..1	الغاز غير المرفق	6
54..1	غاز المكثفات	6
64..1	الغاز البترولى المسال	6
74..1	الغاز لطبعى الخام	6
5.1	مكونات الغاز الطبعى	7
6.1	خصائص الغاز الطبعى	8
7.1	الخصائص الفيزيائية للغاز الطبعى	8
1.7.1	اللون والرائحة	8
2.7.1	الكثافة	8
3.7.1	القيمة الحرارية	8
4.7.1	القيمة الحرارية العليا	8
5.7.1	القيمة الحرارية الدنيا	8
6.7.1	نقطة الغليان والتكثف	8
7.7.1	اللزوجة (VISCOSITY)	8
8.7.1	القابلية الانضغاطية	8
9.7.1	الدوبانية فى الماء	9
8.1	الخصائص الكيمائية للغاز الطبعى	9
18..1	التركيب الكيمائى	9
28..1	الشوائب غير الهيدروكربونية	9
38..1	الاحتراق	9
48..1	حدود الاشتعال	9
58..1	درجة حرارة الاشتعال الذاتى	10
9.1	طرق استخراج الغاز الطبعى	10
19.1.	تحضير موقع الحفر	10

12	29.1. الاستكشاف والمسح السيزمي (Exploration & Seismic Survey)
14	39.1. التكسير الهيدروليكي
15	49.1. الحفر الأفقي
17	69.1. الحفر المائل والموجه
18	7.9.1. التحميص
19	89.1. استخراج ميثان طبقة الفحم (Coalbed Méthane - CBM)
20	99.1. المعالجة والنقل (Processing and Transportation)
22	109.1. النقل والتخزين (Transportation & Storage)
23	10.1. خاتمة
الفصل الثاني: اساليب وعمليات معالجة الغاز الطبيعي	
25	1.2. مقدمة
25	2.2. معلومات عامة عن المعالجة
26	3.2. اساليب وطرق معالجة الغاز الطبيعي
26	1.3.2. الفصل الأولي وإزالة المكثف (C5+)
26	2.3.2. ازالة المكثف (C5+)
28	3.3.2. نزع الماء وتجفيف الغاز (Gas Dehydration)
30	4.3.2. إزالة الزنبيق
30	1.4.3.2. تقنيات إزالة الزنبيق
31	5.3.2. استخلاص وتجزئة سوائل الغاز الطبيعي (استخلاص وتجزئة الغاز الطبيعي المسال)
31	1.53.2. أهمية استعادة الغاز الطبيعي المسال والمكثف (C5+)
31	2.53.2. تقنيات استعادة الغاز الطبيعي المسال
31	3.53.2. تجزئة الغاز الطبيعي المسال
32	6.3.2. التسييل
34	73.2. المخطط العام لتدفق العمليات (General Process Flow Diagram)
35	4.2. خاتمة

الفصل الثالث: الابعاد الاقتصادية والبيئية لصناعة الغاز الطبيعي

1.3	مقدمة.....	37
2.3	تقنيات نقل الغاز الطبيعي.....	37
1.2.3	النقل عبر خطوط الأنابيب (Pipeline Transportation).....	37
1.1.2.3	المبادئ الهندسية والفيزيائية.....	37
1.1.2.3	مكونات منظومة الأنابيب وتقنياتها المتقدمة.....	37
2.1.2.3	مميزات ومحدودية نقل الغاز بالأنابيب.....	38
2.2.3	النقل عبر ناقلات الغاز الطبيعي المسال (LNG).....	38
1.2.2.3	مفهوم الغاز الطبيعي المسال وتقنيات الإسالة.....	38
2.2.2.3	ناقلات LNG: التصميم والتقنيات المتطورة.....	38
3.2.2.3	محطات الاستقبال وإعادة التغويز.....	39
4.2.2.3	مقارنة بين طرق النقل ومعايير اختيار الأنسب.....	40
3.3	تقنيات تخزين الغاز الطبيعي.....	40
13..3	التخزين في الحقول المستنزفة (Depleted Reservoirs).....	40
1.1.3.3	المبدأ الجيولوجي للتخزين في الحقول المستنزفة.....	40
2.1.3.3	العمليات التشغيلية ودورة الحقن والسحب.....	41
23..3	التخزين في الكهوف الملحية (Salt Caverns).....	42
1.2.3.3	آلية إنشاء الكهوف الملحية وخصائصها.....	42
2.2.3.3	التوزيع الجغرافي والقيود الجيولوجية.....	43
3.2.3.3	أنواع أخرى من التخزين الجوفي ومقارنة بين الأنواع.....	43
4.3	توزيع الغاز الطبيعي – الشبكات الوطنية والدولية.....	43
1.4.3	الشبكات الوطنية لتوزيع الغاز.....	44
1.1.4.3	هيكلية الشبكة الوطنية وتراتبيتها الضغطية.....	44
2.1.4.3	التحديات التشغيلية في الشبكات الوطنية.....	44
5.3	الشبكات الدولية وخطوط الأنابيب العابرة للحدود.....	44

44	1.5.3. جغرافيا التجارة الغازية الدولية
45	2.5.3. الجزائر في الخريطة الدولية لتوزيع الغاز
45	6.3. التحديات الراهنة والآفاق المستقبلية
45	1.6.3. التحديات الجيوسياسية والتنظيمية
45	2.6.3. الهيدروجين الأخضر والتوافق مع الغاز الطبيعي
46	3.6.3. الرقمنة والذكاء الاصطناعي في إدارة شبكات الغاز
46	7.3. خاتمة
الفصل الرابع: استراتيجيات نقل وتخزين وتوزيع الغاز الطبيعي	
48	1.4. مقدمة
48	2.4. الأهمية الاقتصادية للغاز الطبيعي
48	1.2.4. الأسواق العالمية للغاز الطبيعي
49	2.2.4. دور الغاز الطبيعي في أمن الطاقة
50	3.2.4. تكاليف عمليات المعالجة
51	3.4. الأثر البيئي لعمليات المعالجة
51	1.3.4. الكبريت
52	2.3.4. سوائل الحفر
53	3.3.4. المياه المصاحبة
53	4.3.4. غازات الحرق
53	5.3.4. الانبعاثات المتسرّبة
54	4.4. تقليل الانبعاثات الكربونية
55	5.4. الآفاق المستقبلية للغاز الطبيعي
55	1.5.4. الغاز الطبيعي والتحول الطاقوي العالمي
57	2.5.4. الغاز الطبيعي بديلاً أنظف للفحم والنفط
59	6.4. خاتمة

◆ الحروف اللاتينية :

الحروف	المعنى
T	درجة الحرارة
P	الضغط
Q	معدل التدفق الحجمي
ρ	الكثافة
μ	اللزوجة الديناميكية
Z	معامل الانضغاطية
D	قطر الأنبوب
L	طول الأنبوب أو المسافة

◆ الاختصارات :

الاختصار	المعنى
CH_4	الميثان (المكون الرئيسي للغاز الطبيعي)
C_2H_6	الإيثان
C_3H_8	البروبان
C_4H_{10}	البيوتان
CO_2	ثاني أكسيد الكربون
H_2S	كبريتيد الهيدروجين
H_2O	الماء (بخار)
SO_2	ثاني أكسيد الكبريت
O_2	الأكسجين
N_2	النيتروجين
He	الهيليوم
Hg	الزئبق
HgS	كبريتيد الزئبق
$C5+$	المكثفات (البنتان وما أثقل منه)
LNG	— الغاز الطبيعي المسال

Liquefied Natural Gas	
— الغاز البترولي المسال Liquefied Petroleum Gas	LPG
— سائل الغاز الطبيعي Natural Gas Liquid	NGL
— الغاز الطبيعي المضغوط Compressed Natural Gas	CNG
— إزالة الغازات الحمضية Acid Gas Removal	AGR
— ثلاثي إيثيلين جليكول Triethylene Glycol	TEG
— وحدة معالجة ذيل الغاز Tail Gas Unit	TGU
— ميثان طبقة الفحم Coalbed Methane	CBM
— احتجاز الكربون وتخزينه Carbon Capture and Storage	CCS
— وحدة حرارية بريطانية British Thermal Unit	BTU
— إمكانية الاحترار العالمي Global Warming Potential	GWP
البنزين والتولوين والإيثيل بنزين والزيلين — Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene	BTEX
— وكالة الطاقة الدولية International Energy Agency	IEA
الشراكة العالمية للحد من حرق الغاز — Global Gas Flaring Reduction Partnership	GGFR
برنامج رصد التسربات وإصلاحها — Leak Detection and Repair	LDAR
— الانبعاثات الصافية الصفرية Net Zero Emissions	NZE
طيف امتصاص الليزر الثنائي القابل للضبط — Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy	TDLAS
وحدة التخزين العائمة وإعادة التغويز — Floating Storage and Regasification Unit	FSRU

شركة منتجات الهواء والكيمائيات — Air Products and Chemicals Inc.	APCI
معهد البترول الأمريكي — American Petroleum Institute	API
Boil-Off Gas — الغاز المتبخر	BOG
Liquid — تقصف المعدن السائل Metal Embrittlement	LME
Reid — ضغط البخار حسب ريد Vapor Pressure	RVP

قائمة المعادلات

صفحة	الصيغة	وصف المعادلة	رقم المعادلة
9	$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{طاقة حرارية}$	معادلة الاحتراق الكامل للميثان	(1.1)

قائمة الجداول

الجدول	العنوان	الصفحة
	الفصل الأول: عموميات حول الغاز الطبيعي وطرق استخراجه	
(1.1)	مختلف نسب تركيبة الغاز الطبيعي	6
	الفصل الثالث: استراتيجيات النقل والتخزين والتوزيع	
(3.3)	مقارنة شاملة بين أنواع التخزين الجوفي	38
	الفصل الرابع: الأبعاد الاقتصادية والبيئية لصناعة الغاز الطبيعي	
(1.4)	أبرز الدول المنتجة للغاز الطبيعي وحصصها السوقية	44
(2.4)	مقارنة بين الوقود الأحفوري من منضور امن الطاقة	46
(3.4)	تفصيل تكاليف مراحل معالجة الغاز الطبيعي	47
(4.4)	مقارنة تقنيات استرداد الكبريت من الغاز الطبيعي الحامضي	47
(5.4)	تصنيف سوائل الحفر وخصائصها البيئية	48
(6.4)	نطاقات التركيزات النموذجية للملوثات في المياه المصاحبة	49
(7.4)	مصادر الانبعاثات المتسربة في منشآت النفط والغاز ونسبها التقريبية	50
(8.4)	مقارنة سيناريوهات حصة الغاز الطبيعي في مزيج الطاقة العالمي عام 2050	52
(9.4)	مقارنة الانبعاثات الرئيسية لمصادر الوقود الأحفوري عند الاحتراق لتوليد الكهرباء	53

قائمة الاشكال

الصفحة	العنوان	الشكل
الفصل الأول		
11	عملية المسح السيزمي لتحديد موقع مكامن الغاز	الشكل (1.1)
12	الذي يتم استخراج الغاز (shale) عينة من صخر الشيست منه بالتكسير الهيدروليكي	الشكل (2.1)
13	مخطط توضيحي لتقنية الحفر الافقي	الشكل (3.1)
14	منصة حفر عمودية تستخدم لاستخراج الغاز الطبيعي	الشكل (4.1)
15	مخطط توضيحي لكيفية الحفر المائل والموجه للوصول الى مكن بعيد 6	الشكل (5.1)
16	صورة توضيحية لعملية التحميص لإذابة الصخور وتحسين التدفق في المكن	الشكل (6.1)
17	مخطط يوضح عملية استخراج غاز الميثان عن طريق خفض منسوب المياه	الشكل (6.1)
18	مخطط محطة معالجة الغاز الطبيعي يوضح مراحل التنقية المختلفة	الشكل (7.1)
الفصل الثاني		
25	مخطط مرحلة الفصل الاولي	الشكل (1.2)
27	مخطط تجفيف الغاز بالجليكول	الشكل (2.2)
28	مخطط وحدة إزالة الزبيق	الشكل (3.2)
30	مخطط عملية تجزئة سوائل الغاز الطبيعي	الشكل (4.2)
31	مخطط عملية التسييل	الشكل (5.2)
32	المخطط العام لمعالجة الغاز	الشكل (6.2)
الفصل الثالث		
34	ناقلة الغاز الطبيعي المسال (LNG) ذات الخزانات الكروية.	الشكل (1.3)
35	صورة عملية تفريغ الغاز الطبيعي المسال (LNG) في محطة استقبال ساحلية	الشكل (2.3)

37	مخطط دورة تخزين واسترجاع الغاز الطبيعي الموسمية.	الشكل (3.3)
الفصل الرابع		
50	منحنى بياني لتوزيع مصادر الاتبعاثات في صناعة مألجة الغاز الطبيعي (%)	الشكل (1.4)
52	منحنى بياني لتوزيع استهلاك الغاز الطبيعي حسب القطاعات (%)	الشكل (2.4)
53	منحنى بياني لتوزيع استهلاك الغاز الطبيعي حسب القطاعات	الشكل (3.4)

مقدمة عامة

مقدمة عامة

يعتبر الغاز الطبيعي اليوم أحد أهم ركائز نظام الطاقة العالمي، إذ يمثل وقوداً انتقالياً هاماً يجمع بين الكفاءة العالية في إنتاج الطاقة وانخفاض الأثر البيئي مقارنة بالوقود الأحفوري التقليدي مثل الفحم والنفط [1]. يشكل الغاز الطبيعي خليطاً هيدروكربونياً معقداً، يتكون أساساً من غاز الميثان (CH_4)، لكن حالته الفيزيائية والكيميائية تختلف جذرياً بين مرحلة الاستخراج من الآبار ومرحلة التوزيع على المستهلكين. يتطلب هذا التناقض تمييزاً دقيقاً بين الغاز الطبيعي الخام والغاز الطبيعي المعالج [2]. يعرف الغاز الطبيعي الخام بأنه الغاز الذي يتم استخراجه مباشرة من الآبار الجوفية قبل إخضاعه لأية عمليات معالجة. يتكون هذا الغاز بشكل أساسي من الميثان، ولكنه يشمل أيضاً الهيدروكربونات السائلة (سوائل الغاز الطبيعي (NGLs)) مثل الإيثان والبروبان والبيوتان، بالإضافة إلى الشوائب غير الهيدروكربونية مثل بخار الماء وثاني أكسيد الكربون (CO_2) وكبريتيد الهيدروجين (H_2S) والهيليوم..... ويسمى أحياناً "الغاز الحامض" إذا كان يحتوي على نسبة عالية من كبريتيد الهيدروجين، أو "الغاز الرطب" إذا كان يحتوي على سوائل هيدروكربونية [3]. وفي المقابل فإن الغاز الطبيعي المعالج هو الغاز الذي يخضع لسلسلة من عمليات التنقية والمعالجة لإزالة الشوائب والسوائل، مما يجعله مناسباً للاستخدام التجاري والنقل عبر خطوط الأنابيب. يتكون الغاز المعالج من أكثر من 90% من الميثان، ويتميز بأنه وقود نظيف، عديم اللون والرائحة (يضاف المركبتان لأغراض السلامة)، وسهل الاحتراق [4]. والغرض من هذه العمليات الصناعية هو إزالة المكونات غير المرغوب فيها وفصل الغازات الثقيلة، مما يضمن سلامة وكفاءة نقلها واستخدامها [5]. وتكمن الأهمية الاستراتيجية للغاز الطبيعي في تنوعه، بدءاً من توليد الطاقة الكهربائية والتدفئة المنزلية إلى كونه مادة خام أساسية في الصناعات البتروكيميائية والأسمدة. ومع تزايد الاتجاه العالمي نحو الحد من انبعاثات الكربون، يظهر الغاز الطبيعي كبديل مثالي لتحقيق التوازن بين الاحتياجات المتزايدة.

يهدف هذا العمل إلى الدراسة النظرية حول معالجة الغاز الطبيعي ودراسة خصائصه ومعرفة طرق استخراجه بمجموعة من المراحل المتبعة لاستخراجه ومعالجته وتطرق لدراسة البعد البيئي والاقتصادية لصناعة الغاز الطبيعي وهذه الدراسة لا بد أن تمر حول إستراتيجيات متبعة لنقل الغاز وتخزينه بطرق عديدة وجد معقدة ومتطورة.

حيث تطرقنا في بحثنا إلى الجزء النظري فقط:

الفصل الأول: تحت عنوان عموميات حول الغاز الطبيعي و طرق استخراجه وقد تطرقنا في هذا الفصل إلى عموميات حول الغاز الطبيعي وطرق استخراجه

الفصل الثاني: تحت عنوان اساليب وعمليات معالجة الغاز الطبيعي وقد تطرقنا في هذا الفصل إلى وفيه عرض حول اهم المراحل المتنوعة المتبعة لمعالجة الغاز الطبيعي التي تهدف إلى تحويل الغاز الخام المستخرج من الآبار إلى منتج نهائي عالي الجودة يتوافق مع معايير النقل والاستخدام التجاري.

الفصل الثالث: تحت عنوان استراتيجيات نقل وتخزين وتوزيع الغاز الطبيعي حيث صلطنا الضوء على الاستراتيجيات المتبعة في نقل وتخزين الغاز الطبيعي حيث تم تحليل دور الانابيب كناقل رئيسي للغاز إلى أهمية الغاز الطبيعي المسال

في الوصول الى الأسواق البعيدة كما ناقشنا تقنيات التخزين الجوفي ودورها في ضمان امن الامدادات لتلبية الطلب الموسمي.

الفصل الرابع تحت عنوان الابعاد الاقتصادية والبيئية لصناعة الغاز الطبيعي حيث تطرقنا الى توجيه النظر حول الافاق المستقبلية للغاز الطبيعي في سياق التحول الطاقوي العالمي ودوره كوقود انتقالي نحو مستقبل طاقوي أفضل.

الجزء النظري

الفصل الأول

خصائص الغاز الطبيعي و طرق استخراجه

1.1 مقدمة

الغاز الطبيعي هو نوع من الوقود الأحفوري، وهو يتكون من مزيج من الهيدروكربونات الموجودة بشكل طبيعي في حالة الغاز، وقد شهد زيادة ملحوظة منذ السبعينات. يشكل الغاز الطبيعي حوالي 20% من استهلاك الطاقة في العالم.

يعتبر هذا النوع من الوقود أنظف وأكثر توافقاً مع البيئة مقارنة بأنواع الوقود الأحفوري الأخرى. تكمن ميزته البيئية نسبياً بالمقارنة مع الفحم والنفط في انخفاض انبعاثات ثاني أكسيد الكبريت إلى حد كبير، إن عملية استخراج الغاز الطبيعي ليست مجرد مهمة بسيطة، بل هي سلسلة معقدة ومتكاملة من العمليات الهندسية والجيولوجية التي تتطلب دقة متناهية وتكنولوجيا متطورة، فضلاً عن انخفاض مستويات أكاسيد النيتروجين وثنائي أكسيد الكربون. زيادة الاعتماد على هذا المصدر من الطاقة سيكون له تأثير كبير في تقليل الآثار الضارة على البيئة، مثل الأمطار الحمضية، واستنزاف طبقة الأوزون، وإطلاق الغازات الدفيئة. يُستخدم الغاز الطبيعي أيضاً في مجال التدفئة والطهي، ويمكن توظيفه في إنتاج الأسمدة والوقود والدهانات والعديد من المنتجات الأخرى. [6]

وفي هذا الفصل سنتطرق الى بعض المفاهيم الأساسية عن الغاز الطبيعي انواعه ومكوناته وكذلك خصائصه الفيزيائية والكيميائية وطرق استخراجه.

2.1 تعريف الغاز الطبيعي

يعتبر الغاز الطبيعي مصدراً رئيسياً للطاقة غير المتجددة، حيث يتواجد بشكل واسع في مختلف أنحاء العالم، ويشهد زيادة مستمرة في استخدامه. يتمتع الغاز الطبيعي بعدد من المزايا، مثل توفره النسبي، ومرونة استخداماته، ومنافعه البيئية، بالإضافة إلى سعره التنافسي. يعتمد استثمار هذا المورد على فهم شامل لكل مراحل سلسلة إنتاج الغاز، بدءاً من الاستخراج والمعالجة وصولاً إلى النقل. يُعتبر الغاز الطبيعي، الذي يعد مادة خام مطلوبة بشكل متزايد لأسباب تتعلق بالبيئة والكفاءة، خياراً رئيسياً للطاقة في القرن الحادي والعشرين، وذلك بفضل توافره ونظافته، مما يجعله يؤدي دوراً متزايد الأهمية في قطاع الطاقة الكهربائية. الغاز الطبيعي هو نوع من الوقود الأحفوري، مثل النفط والفحم، ويتواجد بصورة طبيعية في الصخور المسامية بحالته الغازية. وهو يتكون بشكل أساسي من الميثان (CH_4) بنسبة تتراوح حوالي 70%. [7]

3.1 نشأة الغاز الطبيعي

تُمثّل النظرية العضوية الأكثر قبولاً علمياً في تفسير نشأة الغاز الطبيعي، إذ ترجع أصله إلى بقايا الكائنات الحية الدقيقة من نباتات وحيوانات، كالعوالق والطحالب، التي استقرّت في أعماق البحار والمحيطات والبحيرات قبل ملايين السنين. وبمرور الزمن، تراكمت فوق هذه البقايا طبقات رسوبية ضخمة عرّضتها لضغوط هائلة وحرارة مرتفعة في غياب تامّ للأكسجين، فأسهمت هذه الظروف في إحداث تفاعلات كيميائية وحيوية معقّدة حوّلتها تدريجياً إلى مركّبات هيدروكربونية غازية، يأتي في مقدّمتها غاز الميثان الذي يُشكّل المكوّن الرئيسي بنسبة تتراوح عادةً بين 70% و 100%، وفقاً لطبيعة المكنم وظروف تكوّنه. [8]

4.1 أنواع الغاز الطبيعي [9]

14..1. الغاز الرطب: تحت ظروف إنتاج الغاز الرطب، تحدث حالة سائلة في الظروف السطحية ويكون تركيز الغاز منخفضاً في الميثان

24..1. الغاز الجاف: تحت الظروف التي يتم فيها إنتاج هذا الغاز لا يتوفر تكوين بشكل سائل ويكون الغاز محصوراً في الميثان ويتضمن كمية ضئيلة جداً من الهيدروكربونات الأكثر وزناً من الإيثان.

34..1. الغاز المرفق: هو الغاز الذي يحيط بمرحلة الزيت في خزانات النفط (حقل النفط)

44..1. الغاز غير المرفق: هو الغاز الطبيعي الذي يتواجد في مواقع منفصلة تفتقر إلى وجود النفط الخام. تتميز هذه المواقع بكونها غنية في الأساس بالغاز الطبيعي

54..1. غاز المكثفات: خلال عملية استخراج هذا الغاز، تتكون مرحلة مكثفة تحتوي على كميات وفيرة من الهيدروكربونات الثقيلة داخل الخزان

64..1. الغاز البترولي المسال: من الضروري القيام بتفرقة بين الغاز الطبيعي والغاز البترولي المسال. الغاز البترولي المسال هو خليط يتكون من البروبان والبيوتان، ويتم إنتاجه كمنتج ثانوي خلال عملية تكرير النفط الخام أو عبر معالجة الغاز الطبيعي. في حين أن الغاز الطبيعي يتشكل أساساً من الميثان، فإن الغاز البترولي المسال يتميز بكثافة أعلى وسهولة في التسييل عند ضغوط منخفضة نسبياً، مما يجعله ملائماً للاستخدامات المنزلية والصناعية في أسطوانات

74..1. الغاز لطبيعي الخام: يمكن وصف الغاز الخام بأنه الغاز الذي يتم استخراجه بشكل مباشر من تحت سطح الأرض من الآبار، دون أن يخضع لأي عمليات معالجة. غالباً ما يتضمن الغاز الخام الميثان كمكون رئيسي، ولكنه يحتوي أيضاً على مجموعة من الشوائب ومركبات أخرى يجب التخلص منها قبل أن يصبح مناسباً للاستخدام التجاري أو النقل عبر الأنابيب

5.1. مكونات الغاز الطبيعي [10]

تركيب الغاز الطبيعي: يتكون الغاز الطبيعي من مجموعة من الهيدروكربونات الخفيفة، مثل الميثان والإيثان والبروبان والبيوتان والبنتان. كما يمكن أن توجد مواد أخرى مثل ثاني أكسيد الكربون والهيليوم وكبريتيد الهيدروجين والنيتروجين. المكون الأساسي للغاز الطبيعي هو الميثان (CH_4) ، وتختلف نسبته باختلاف الحقول

الجدول (1.1): مختلف نسب تركيبة الغاز الطبيعي

النسبة المئوية التقريبية (حجمًا)	الصيغة الكيميائية	المكون
70% - 90%	CH_4	الميثان
0% - 20%	C_2H_6	الإيثان
0% - 5%	C_3H_8	البروبان
0% - 2%	C_4H_{10}	البيوتان
0% - 50% في الغاز الخام)	CO_2	ثاني أكسيد الكربون
آثار - 30% (في الغاز الخام)	H_2S	كبريتيد الهيدروجين
0% - 15%	N_2	النيتروجين
آثار - 7%	He	الهيليوم
آثار (يجب إزالته)	H_2O	بخار الماء

6.1. خصائص الغاز الطبيعي

7.1. الخصائص الفيزيائية للغاز الطبيعي

1.7.1. اللون والرائحة: غاز طبيعي عديم اللون والرائحة والطعم في حالته النقية [11]

2.7.1. الكثافة: تعرف الكثافة كحساب لمعدل كتلة المادة المقاسة في ظروف محددة (مثل ضغط جوي مساوٍ

لوحة وحرارة 15 درجة مئوية) مقارنة بكثافة الهواء في تلك الظروف نفسها (1.225 كجم/م³). كما يمكن

حسابها من خلال الكتلة الجزيئية، التي يمكن استنتاجها من تركيبها الكيميائية والعلاقة التي تلي ذلك

[12]

3.7.1. القيمة الحرارية: القيمة الحرارية: القيمة الحرارية للوقود تعبر عن كمية الحرارة، والتي تقاس

بالكيلوواط ساعة أو الميغا جول، الناتجة عن الاحتراق الكامل لمتر مكعب قياسي من الغاز الجاف في الهواء عند

ضغط ثابت يبلغ 1.01325 بار. هناك نوعان من القيم الحرارية يتم التمييز بينهما أثناء عملية إنتاج الغاز

الطبيعي تتكون طبقة سائلة على السطح ويكون تركيز الميثان فيها اقل [13]

4.7.1. القيمة الحرارية العليا (HVV): هي مقدار الحرارة (كيلوواط/ساعة أو ميغا جول) التي ستصدر نتيجة

الاحتراق التام لكميات عادية من الغاز، مع الحفاظ على الماء الناتج خلال الاحتراق في الحالة السائلة وبقاء

المنتجات الأخرى في الحالة الغازية [14]

5.7.1. القيمة الحرارية الدنيا (LHV): هي مقدار الطاقة الحرارية (كيلوواط/ساعة أو ميغا جول التي

ستصدر نتيجة للاحتراق الكامل لكميات معتادة من الغاز، مع وجود الماء الناتج عن الاحتراق في الحالة السائلة

واحتفاظ المنتجات الأخرى في الوضع الغازي [15]

6.7.1. نقطة الغليان والتكثف: الميثان، الذي يعتبر العنصر الأساسي في الغاز الطبيعي، يمتاز بنقطة غليان

منخفضة للغاية تقدر بحوالي -161.5 درجة مئوية (-258.7 درجة فهرنهايت) عند الضغط الجوي. هذه السمة

هي أساس عملية تسييل الغاز الطبيعي (LNG) حيث يتم تبريده إلى تلك الدرجات المنخفضة للغاية بهدف تقليل

حجمه وجعل نقله أكثر سهولة [16]

7.7.1. اللزوجة (VISCOSITY): يتمتع الغاز الطبيعي بمستوى منخفض للغاية من اللزوجة مقارنة

بالسوائل. هذه اللزوجة القليلة تساعد على التدفق بسلاسة من خلال أنابيب النقل والمسام في الصخور

ضمن المكامن، مما يجعل عملية استخراجها ونقله أكثر يسراً [17]

8.7.1. القابلية للانضغاطية (Compressibility): يمكن أن يتقلص الغاز الطبيعي بشكل كبير. تتيح هذه

الميزة تخزين كميات ضخمة من الغاز في مناطق صغيرة نسبياً أثناء تعرضه لضغط مرتفع، كما يحدث مع الغاز

الطبيعي المضغوط (CNG)، أو عند نقله عبر أنابيب تحت ضغوط مرتفعة لتعزيز فعالية النقل [18]

1.9.7. الذوبانية في الماء (Solubility in water) : الغاز الطبيعي (الميثان) يتمتع بدرجة منخفضة من الذوبان في الماء. تعد هذه السمة ذات أهمية كبيرة في عمليات الاستخراج والتكرير، حيث أن الغاز لا يمتزج بسهولة مع الماء الموجود في الخزانات أو خلال مراحل المعالجة [19]

8.1. الخصائص الكيميائية للغاز الطبيعي [13]

18..1. التركيب الكيميائي: الغاز الطبيعي يتكون من مزيج من الهيدروكربونات، ويعتبر الميثان (CH₄) العنصر الأساسي. التركيب الخاص للغاز الطبيعي يختلف وفقاً لمصدره الجيولوجي، لكن العناصر الرئيسية تتضمن

- الميثان (CH₄): يشكل عادةً 70% إلى 90% من حجم الغاز الطبيعي. وهو أبسط الهيدروكربونات وأكثرها استقراراً، ويُعد الوقود الأساسي في الغاز الطبيعي. [20]

- الإيثان (C₂H₆): يتواجد بنسبة تتراوح بين 0% إلى 20%. يُستخدم بشكل أساسي كمادة خام في صناعة البتروكيماويات لإنتاج الإيثيلين.

- البروبان (C₃H₈) والبيوتان (C₄H₁₀) يتواجدان بنسب أقل، ويُستخدمان كوقود وكجزء من الغاز البترولي المسال

- البننتان والمركبات الأثقل (Pentanes+) توجد بكميات ضئيلة وتُعرف بسوائل الغاز الطبيعي (NGLS).

28..1. الشوائب غير الهيدروكربونية: مثل ثاني أكسيد الكربون (CO₂)، كبريتيد الهيدروجين (H₂S)، النيتروجين (N₂)، والهيليوم (He). هذه الشوائب يجب إزالتها أو تقليلها لأنها قد تكون سامة، مسببة للتآكل، أو تقلل من القيمة الحرارية للغاز. [21]

38..1. لاحتراق: من أهم الخصائص الكيميائية للغاز الطبيعي هو قدرته على الاحتراق، مما يجعله مصدراً فعالاً للطاقة. يحدث الاحتراق عندما يتفاعل الغاز الطبيعي (الهيدروكربونات) مع الأكسجين (O₂) وتوفر مصدر للاشتعال، وينتج عن هذا التفاعل طاقة حرارية، بالإضافة إلى ثاني أكسيد الكربون (CO₂) وبخار الماء (H₂O)

معادلة الاحتراق الكامل للميثان (المكون الرئيسي). [22]



48..1. حدود الاشتعال (Flammability Limits) : لكي يتمكن الغاز الطبيعي من الاشتعال، يجب أن يكون تركيبه في الجو ضمن مدى معين يُعرف بحدود الاشتعال أو الانفجار. بالنسبة للغاز الطبيعي (الميثان)، تتراوح هذه الحدود عادةً بين 4% و15% من نسبة الغاز في الهواء. أي كمية أقل من 4% تكون "فقيرة جداً"

للاشتعال، وأي نسبة تتجاوز 15% تعتبر "غنية جدًا" للاشتعال. هذا النطاق الضيق نسبيًا يجعله أكثر أمانًا خلال التعامل معه مقارنة بأنواع وقود أخرى [23]

58..1. درجة حرارة الاشتعال الذاتي: هي الحد الأدنى من الحرارة التي يمكن أن يؤدي فيها الغاز الطبيعي إلى الاشتعال من تلقاء نفسه في الهواء دون الحاجة لشرارة أو لهب خارجي. بالنسبة للميثان، فإن حرارة الاشتعال الذاتي تصل تقريبًا إلى 537 درجة مئوية والتي تعادل 999 درجة فهرنهايت [24]

9.1. طرق استخراج الغاز الطبيعي

19.1. تحضير موقع الحفر: [24]

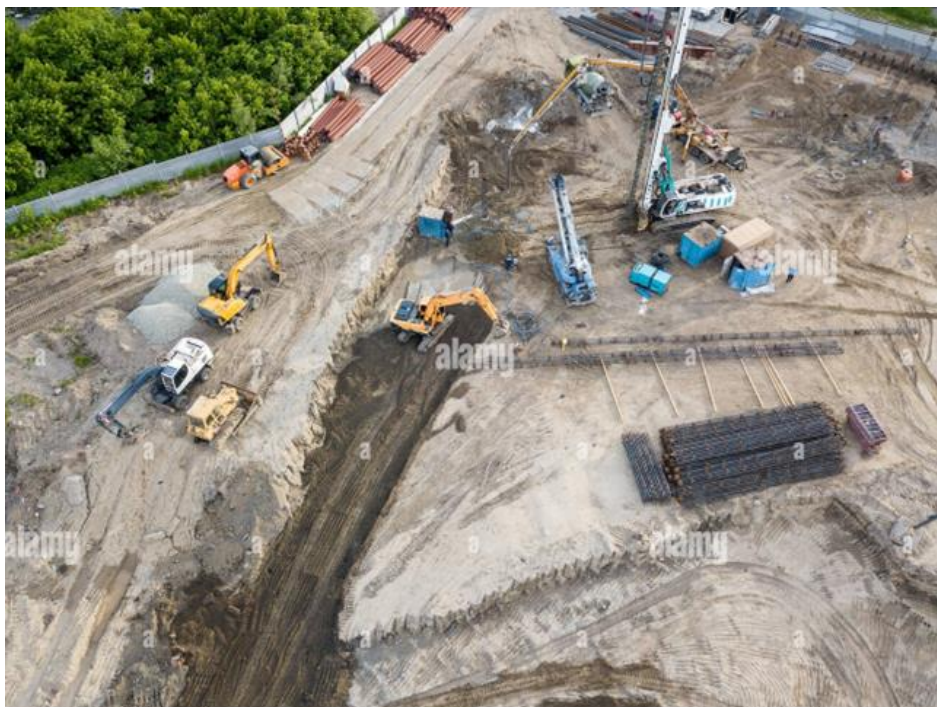
حيث تبدأ المرحلة الميدانية بتحويل الموقع الجغرافي المختار إلى منشأة صناعية متكاملة. لا تقتصر هذه المرحلة على الجوانب الإنشائية فقط، بل تشمل تخطيطًا هندسيًا دقيقًا وشامل لضمان ساهم العمليات والبيئة المحيطة حيث تكمن التفاصيل في:

- المسح والترخيص: يتم إجراء مسح طبوغرافي دقيق للموقع وتحديد حدود الملكية والحصول على التصاريح البيئية والقانونية اللازمة
- بناء الطرق والمنصة: يتم إنشاء طرق وصول قوية قادرة على تحمل أوزان معدات الحفر الثقيلة التي يتم تدعيمها بطبقات من (Pad Drilling) يتم تسوية أرضية الموقع وبناء منصة الحفر . الحصى والمواد العازلة لمنع تسرب أي سوائل إلى التربة بشكل

أنظمة الاحتواء: يتم حفر أحواض التبططين لتخزين سوائل الحفر والنفايات السائلة

لمنع التلوث الجوفي مع وضع أغشية عازلة

- تجهيز البنية التحتية: يتم توفير مصادر المياه، وبناء مرافق الإقامة للعمال، وتركيب أنظمة توليد الطاقة الكهربائية اللازمة لتشغيل منصة الحفر



الشكل (1.1): مرحلة تجهيز الموقع والمنشأة القاعدية

29.1. الاستكشاف والمسح السيزمي (Exploration & Seismic Survey)

تُعد مرحلة الاستكشاف بمثابة عملية "رؤية" ما تحت سطح الأرض دون الحاجة إلى الحفر الفعلي. تعتمد هذه المرحلة على مبادئ الفيزياء الجيولوجية لإنشاء خرائط تفصيلية للبنية الجيولوجية تحت السطحية، مما يقلل بشكل كبير من المخاطر والتكاليف المرتبطة بعمليات الحفر الاستكشافية. [25]

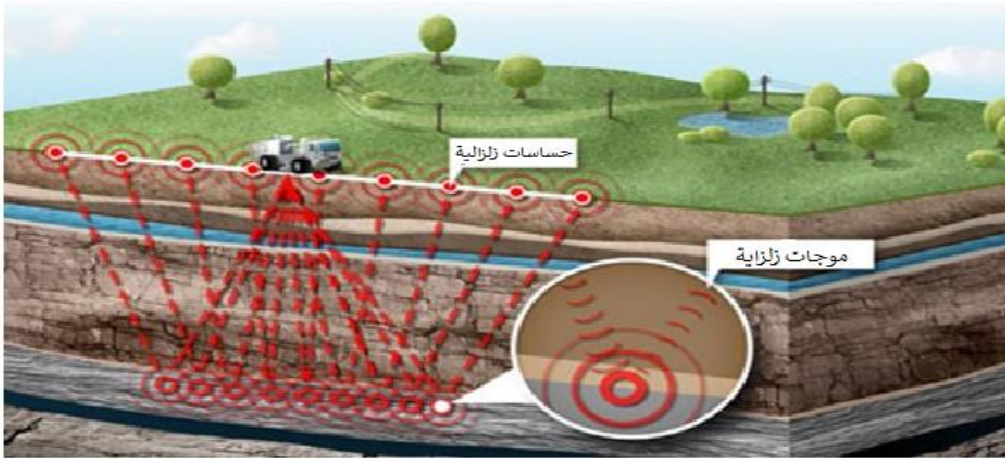
التفاصيل: [26]

- المسح السيزمي ثنائي الأبعاد (2D Seismic) في المراحل الأولية، يتم إجراء مسوحات سيزمية ثنائية الأبعاد للحصول على مقاطع عرضية للطبقات الصخرية. يتم نشر مصادر صوتية (مثل شاحنات الاهتزاز على اليابسة أو مدافع الهواء في البحر) على طول خط مستقيم، وتُسجل الموجات المرتدة بواسطة أجهزة استشعار (جيوفونات على اليابسة أو هيدروفونات في البحر) موزعة على نفس الخط. توفر هذه المسوحات نظرة عامة على التركيب الجيولوجي للمنطقة.

- المسح السيزمي ثلاثي الأبعاد (3D Seismic) لإنشاء صورة أكثر تفصيلاً ودقة للمكان المحتمل، يتم استخدام المسح السيزمي ثلاثي الأبعاد. في هذه التقنية، يتم نشر مصادر الصوت وأجهزة الاستشعار في شبكة واسعة تغطي منطقة الدراسة. تسمح البيانات المجمعة بإنشاء نموذج ثلاثي الأبعاد للطبقات الصخرية، مما يتيح للجيولوجيين تحديد الهياكل الجيولوجية المعقدة مثل الصدوع (Faults)، والطيات (Folds)، والمصائد (Traps) التي يمكن أن تحبس الغاز الطبيعي.

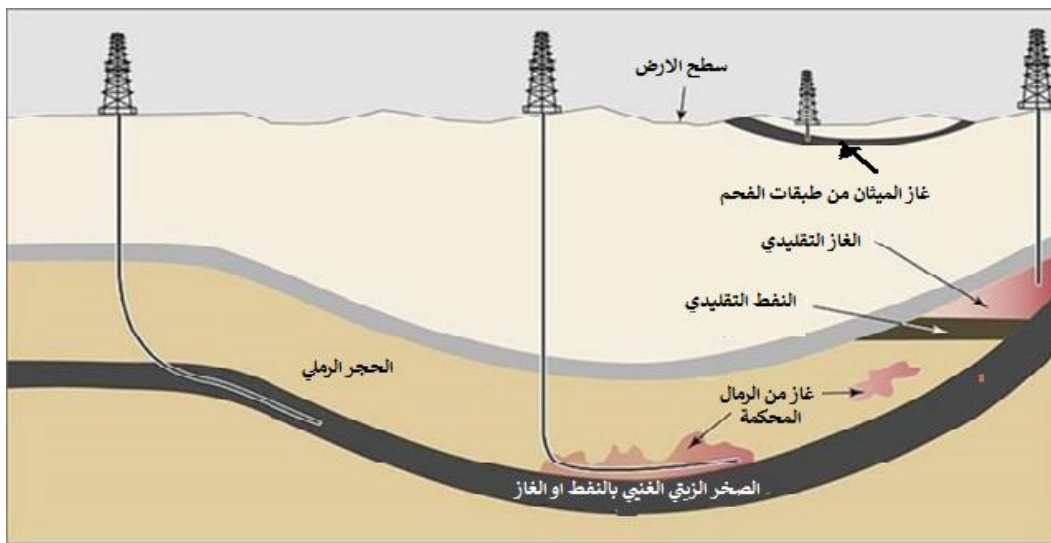
- شاحنات الاهتزاز (Vibroseis Trucks) تُستخدم هذه الشاحنات الضخمة على اليابسة كمصادر للموجات الصوتية. تحتوي الشاحنة على لوحة اهتزازية كبيرة تُخفف إلى الأرض وتصدر موجات اهتزازية بترددات مختلفة (Sweep Frequencies) تنتقل عبر الطبقات الصخرية. تتميز هذه الطريقة بأنها غير مدمرة نسبياً للبيئة مقارنة باستخدام المتفجرات.

- معالجة وتفسير البيانات السيزمية: تُجمع كميات هائلة من البيانات الخام من أجهزة الاستشعار، وتُعالج باستخدام خوارزميات حاسوبية معقدة لإزالة الضوضاء وتحسين جودة الإشارة. يقوم الجيوفيزيائيون بعد ذلك بتفسير هذه البيانات لإنشاء خرائط تحت سطحية مفصلة، وتحديد المكان المحتمل، وتقدير حجمها وشكلها، وتقييم خصائص الصخور (مثل المسامية والنفاذية).



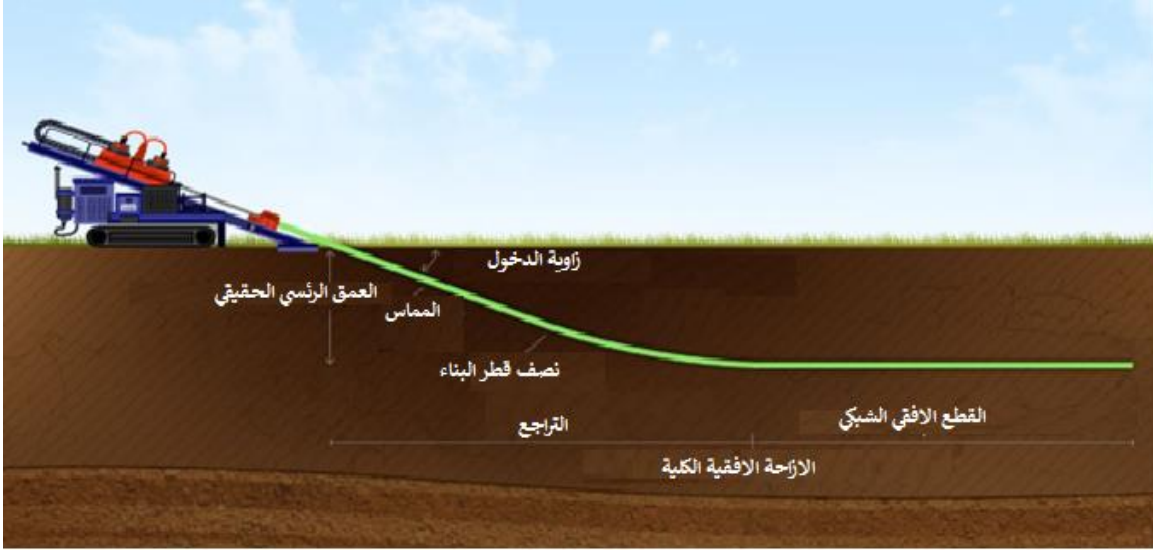
الشكل (2.1): عملية المسح السيزمي لتحديد موقع مكامن الغاز

39.1. التكسير الهيدروليكي: يعرف التكسير الهيدروليكي بأنه الأسلوب المستخدم لتمزيق التشكيلات الصخرية بواسطة تدفقات عالية الضغط من الماء والمواد الكيميائية والرمال. لهذا الأسلوب عدة آثار سلبية مثل الحاجة إلى كميات كبيرة من الماء، مما يؤدي إلى انخفاض مستوى المياه في المنطقة بشكل ملحوظ، وكذلك إنتاجه لمياه صرف عالية السمية، والتي تكون غالباً مشعة. تسرب هذه المياه يسبب تلوثاً لمصادر المياه الجوفية التي تُستخدم للأغراض الأساسية مثل الشرب والتنظيف وكذلك الاستخدامات الزراعية والصناعية. بالإضافة إلى ذلك، يمكن أن تؤدي عملية التكسير الهيدروليكي إلى هزات أرضية طفيفة، يعتقد بعض الباحثين في مجالات الجيولوجيا والبيئة أنه بالرغم من كونها بسيطة إلا أنها قد تتسبب في مجموعة من الأضرار، بما في ذلك التأثيرات على بعض أنظمة الأنابيب. [27]



الشكل (3.1): عينة من صخر الشيست (shale) الذي يتم استخراج الغاز منه بالتكسير الهيدروليكي

49.1. الحفر الأفقي: الحفر الأفقي يُستخدم كطريقة لتوسيع مجال البئر دون الحاجة إلى فتح مواقع جديدة للحفر، مما يعد أمرًا مكلفًا وله تأثيرات سلبية على البيئة، في هذه الطريقة يُجري حفر البئر بشكل أفقي لتعزيز إنتاجيته. [28]



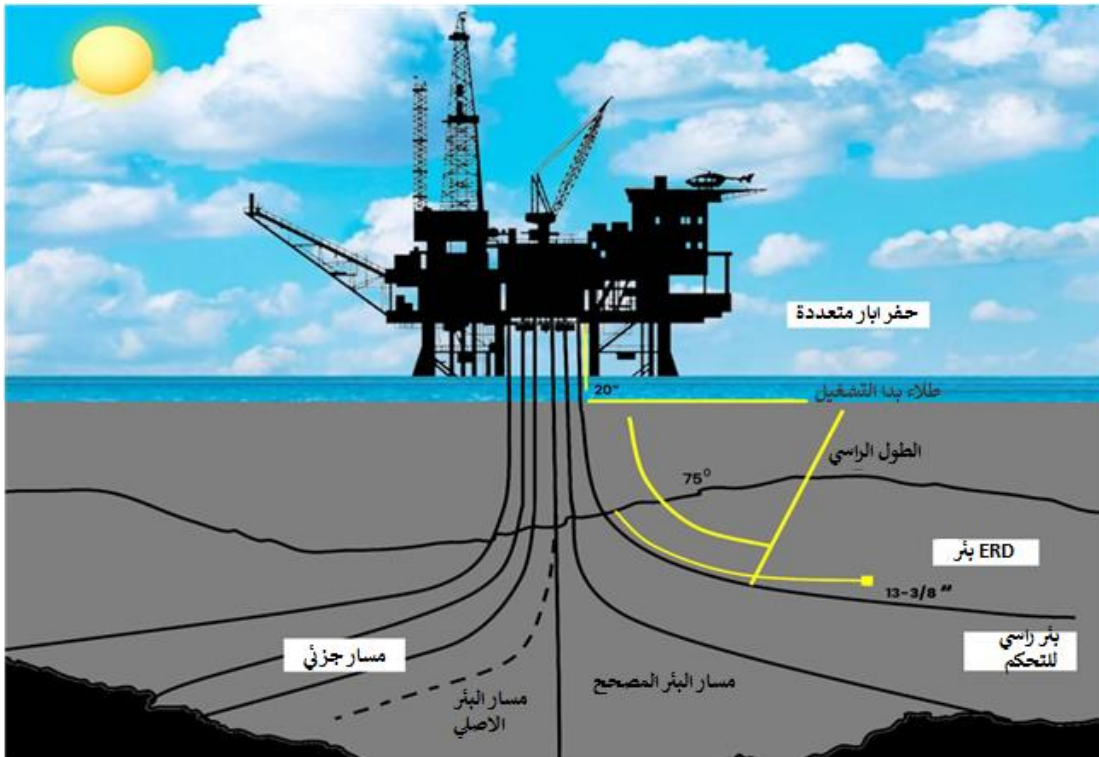
الشكل (4.1): مخطط توضيحي لتقنية الحفر الأفقي

1.59. الحفر العمودي: تعتبر هذه التقنية الأقدم والأكثر تقليدية في هذا المجال. يتم إنشاء بئر بشكل عمودي من سطح الأرض حتى الوصول إلى مصدر الغاز. بعد الوصول إلى المصدر، يتم تثبيت أنابيب التغليف وتدعيمها بمادة الأسمنت لضمان عدم انهيار البئر وعزل الطبقات المتنوعة. بعد ذلك، يتم إدخال أنابيب الإنتاج إلى المصدر، ويتم إدارة تدفق الغاز نحو السطح. تعتمد هذه الطريقة بشكل رئيسي على استخراج الغاز الطبيعي التقليدي من المكامن التي تتمتع بنفاذية ومسامية مرتفعة، [29]



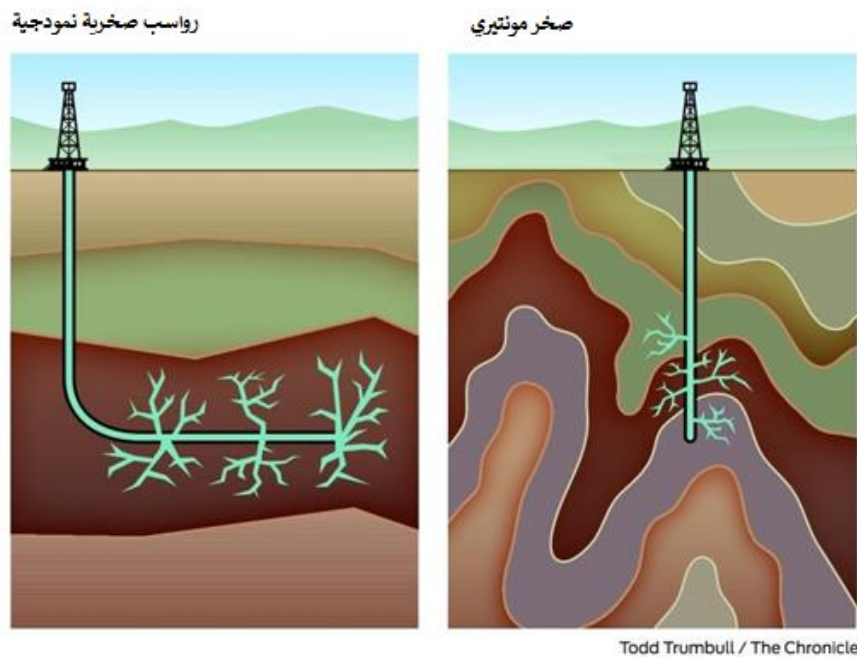
الشكل (5.1): منصة حفر عمودية تستخدم لاستخراج الغاز الطبيعي

69..1. الحفر المائل والموجه: تُعتبر هذه الأساليب مفيدة لحفر آبار ليست رأسية بالكامل، بل تتجه بزاوية محددة لتحقيق الوصول إلى احتياطات تقع بعيدًا عن نقطة الحفر السطحية المباشرة، أو للوصول إلى مجموعة من الاحتياطات من منصة حفر واحدة. يساعد هذا في تقليل الأثر البيئي ويسمح بالوصول إلى الاحتياطات الواقعة تحت المناطق السكنية أو المسطحات. [30]



الشكل (6.1): مخطط توضيحي لكيفية الحفر المائل والموجه للوصول إلى مكامن بعيدة

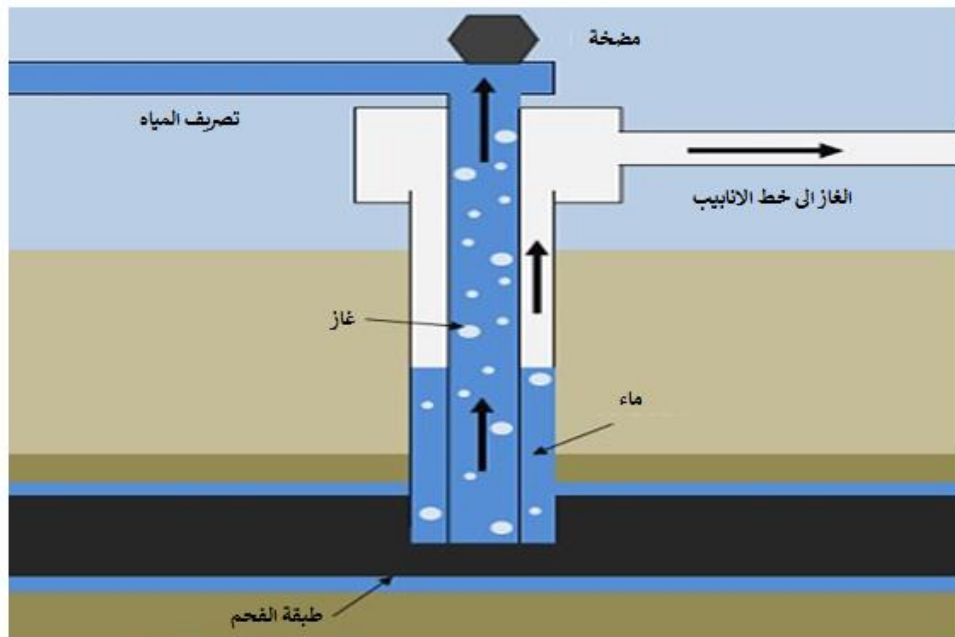
7.9.1. التحميض: عملية التحميض تُستخدم لاستخراج الغاز الطبيعي عن طريق إذابة بعض المواد الحمضية، ثم يتم ضخها داخل البئر بهدف تذويب الصخور التي قد تعرقل تدفق الغاز. استخدامات الغاز الطبيعي يُعتبر الغاز الطبيعي مصدراً نظيفاً للطاقة، وله استخدامات متعددة، حيث يتم الاستفادة منه في مجموعة واسعة من التطبيقات بشكل فعال. [31]



الشكل (7.1): صورة توضيحية لعملية التحميض لإذابة الصخور وتحسين التدفق في المكمن

89..1. استخراج ميثان طبقة الفحم (Coalbed Méthane - CBM): يتطلب استخراج ميثان طبقة الفحم استخدام تقنيات محددة. يبدأ العمل بحفر آبار داخل طبقات الفحم، ثم يتم سحب الماء من تلك الطبقات لتقليل الضغط. يؤدي

تقليل الضغط إلى إطلاق جزيئات الميثان التي كانت مرتبطة بأسطح الفحم، مما يتيح لها الانتقال إلى البئر. استخراج هيدرات الميثان: (Methane Hydrates) لا تزال تقنيات استخراج هيدرات الميثان في مراحل البحث والتطوير. تشمل الطرق المقترحة خفض الضغط، أو تسخين التكوينات، أو حقن مواد كيميائية لزعزعة استقرار الهيدرات وتحرير الميثان. التحدي الرئيسي يكمن في استخراجها بأمان وفعالية من حيث التكلفة دون التأثير سلباً على البيئة. [32]



الشكل (8.1): مخطط يوضح عملية استخراج غاز الميثان عن طريق خفض منسوب المياه

1.99. المعالجة والنقل (Processing and Transportation) :

بعد استخراج الغاز الطبيعي من البئر، يكون في حالته الخام (Raw Natural Gas) ويحتوي على شوائب يجب إزالتها قبل أن يصبح صالحاً للاستخدام التجاري أو النقل عبر خطوط الأنابيب. [33]

- المعالجة:

تهدف عملية المعالجة إلى تنقية الغاز الطبيعي الخام وتحويله إلى غاز طبيعي بجودة تجارية (Pipeline-Quality Gas). تشمل المراحل الرئيسية ما يلي:

- فصل السوائل: يتم فصل الماء الحر والهيدروكربونات السائلة الثقيلة (المكثفات) من تيار الغاز باستخدام فواصل ميكانيكية. [34] (Separators)

- إزالة الغازات الحمضية: (Acid Gas Removal / Sweetening) تُزال المركبات الحمضية مثل كبريتيد الهيدروجين (H_2S) وثنائي أكسيد الكربون (CO_2) باستخدام محاليل الأمينات (Amine Solutions) أو عمليات أخرى. هذه المركبات تسبب التآكل وتخفض من قيمة الغاز. [35]

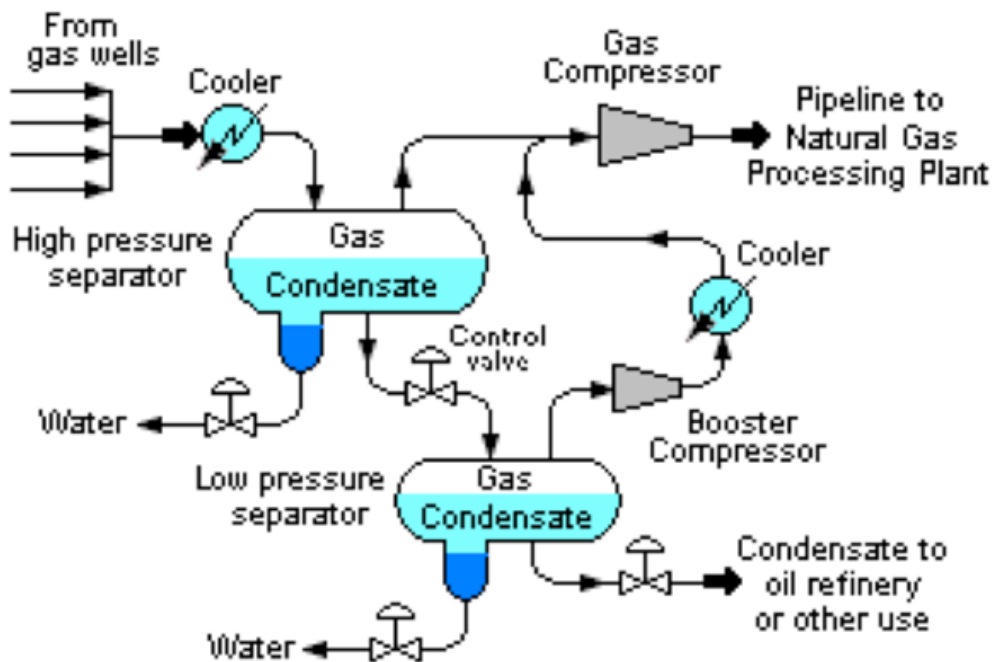
- التجفيف: (Dehydration) تُزال بخار الماء من الغاز لمنع تكون الهيدرات (Hydrates) التي يمكن أن تسد خطوط الأنابيب، وتجنب التآكل. يتم ذلك عادة باستخدام مواد مجففة مثل الجليكول (Glycol) أو المناخل الجزيئية (Molecular Sieves)

- فصل سوائل الغاز الطبيعي: (NGL Fractionation) يتم فصل الهيدروكربونات السائلة الخفيفة (مثل الإيثان، البروبان، البيوتان، والبنتان) عن الميثان. تُعرف هذه السوائل بسوائل الغاز الطبيعي

(Natural Gas Liquids – NGLS) ولها استخدامات صناعية وتجارية قيمة. [37]

- إزالة الزئبق والنيتروجين: في بعض الحالات، قد يحتوي الغاز على الزئبق أو النيتروجين، والتي يجب إزالتها لأسباب تتعلق بالسلامة أو جودة المنتج. [38]

Condensate and Water Removal



الشكل (9.1): مخطط محطة معالجة الغاز الطبيعي يوضح مراحل التنقية المختلفة

109..1. النقل والتخزين (Transportation & Storage) :

بعد المعالجة، يتم نقل الغاز الطبيعي إلى مراكز الاستهلاك أو منشآت التخزين.

- خطوط الأنابيب (Pipelines) تُعد خطوط الأنابيب هي الوسيلة الأكثر شيوعاً وفعالية لنقل الغاز الطبيعي لمسافات طويلة عبر اليابسة. يتم ضغط الغاز في هذه الأنابيب الفولاذية الضخمة بواسطة محطات ضغط

(Compressor Stations) موزعة على طول المسار. [39]

- الغاز الطبيعي المسال (Liquefied Natural Gas - LNG) لنقل الغاز الطبيعي عبر المحيطات إلى الأسواق البعيدة، يتم تسيله. تتضمن عملية التسييل تبريد الغاز إلى درجة حرارة منخفضة جداً (حوالي -162 درجة مئوية أو -260 درجة فهرنهايت)، مما يقلل من حجمه بحوالي 600 مرة. يُنقل الغاز المسال بعد ذلك في ناقلات LNG متخصصة ذات خزانات معزولة. [40]

- التخزين (Storage) يتم تخزين الغاز الطبيعي لضمان استقرار الإمدادات وتلبية الطلب الموسمي. تشمل طرق التخزين الشائعة: التخزين في المكامن المستنفدة (Depleted Réservoirs)، أو في طبقات المياه الجوفية (Aquifers)، أو في الكهوف الملحية (Salt Caverns) [41]



الشكل (10.1): ناقلات الغاز الطبيعي المسال في عرض البحر

10.1. خاتمة:

يُعد الغاز الطبيعي وقوداً استراتيجياً محورياً في مزيج الطاقة العالمي، و هذا بفضل خصائصه الفريدة كوقود أحفوري نظيف الاحتراق يتكون أساساً من الميثان، ويتميز بكفاءة عالية وانبعثات كربونية منخفضة نسبياً. لقد استعرضت في هذا الفصل خصائص الغاز الطبيعي ومكوناته وأنواعه ومراحل استخراجه المعقدة، بدءاً من الاستكشاف والحفر، وصولاً إلى المعالجة والتنقية الحيوية لتحويل الغاز الخام إلى غاز صالح للاستخدام التجاري والنقل. إن فهم هذه الجوانب التقنية والاقتصادية والبيئية للغاز الطبيعي يؤكد دوره الحاسم كجسر انتقالي نحو مستقبل طاقة أكثر استدامة، مما يستدعي مواصلة الاستثمار في تطوير تقنيات استخراجه ومعالجته لضمان أمن الطاقة العالمي وتحقيق التنمية المستدامة.

اساليب وعمليات معالجة الغاز الطبيعي

الفصل الثاني: اساليب وعمليات معالجة الغاز الطبيعي

1.2 مقدمة

تعتبر عملية تفكيك الغاز الطبيعي نشاطاً صناعياً أساسياً ومعقداً يهدف إلى تحويل الغاز الخام المستخرج من الاحتياطات الجوفية إلى منتج نهائي يتوافق مع المعايير المطلوبة لأنابيب النقل والاستخدامات النهائية المتعددة [1]. يتكون الغاز الطبيعي الخام أساساً من الميثان، لكنه يحتوي أيضاً على عدد من الشوائب غير المرغوب فيها مثل الهيدروكربونات الثقيلة المكثفات (C5+) ، والمركبات الحمضية مثل كبريتيد الهيدروجين (H₂S) وثنائي أكسيد الكربون (CO₂) ، والماء (H₂O) إما بشكل بخار أو سائل، بالإضافة إلى عناصر نادرة مثل الزئبق (Hg)

إن بقاء هذه الشوائب بدون إزالة يمكن أن يؤدي إلى مشاكل خطيرة من ناحية التشغيل، الاقتصاد والبيئة. على سبيل المثال، الغازات الحمضية قد تسبب تآكلاً كبيراً للمعدات وخطوط الأنابيب، بالإضافة إلى كونها سامة للبشر وتساهم في تلوث البيئة بالنسبة للماء، يمكن أن يؤدي إلى تكوين هيدرات تسد الأنابيب، أو يتسبب في تآكلها عند وجود الغازات الحمضية. حتى الزئبق بتركيز منخفض يشكل خطراً كبيراً على المبادلات الحرارية المصنوعة من الألمنيوم في وحدات التبريد العميق. كما يجب التخلص من المكثفات الثقيلة (C5+) لضمان جودة الغاز وتقليل نقطة الندى للهيدروكربونات. تناقش هذه المذكرة الخطوات الأساسية والمتسلسلة لمعالجة الغاز الطبيعي، مركزة على الأساليب المستخدمة لإزالة المكثفات الثقيلة (C5+) والغازات الحمضية (H₂S, CO₂) والزئبق (Hg) والماء (H₂O) ، بهدف إنتاج غاز طبيعي يتوافق مع المواصفات التجارية.

في هذا الفصل سنقوم بنصرة عامة حول المعالجة المتمثلة في عدة مراحل لمعالجة الغاز الطبيعي واستخدام التقنيات المناسبة لكل مرحلة صناعة الغاز الطبيعي.

2.2 معلومات عامة عن المعالجة [42]

تهدف معالجة الغاز الطبيعي الفصل الكلي أو الجزئي للمكونات التي تخرج عند فوهة البئر، كالماء والغازات الحمضية والهيدروكربونات الثقيلة. والغرض من هذه المعالجة هو جعل الغاز مطابقاً لمواصفات تجارية أو نقل محددة بدقة. تمت طرق عديدة لأجراء هذه المعالجة، ويتوقف اختيار الطريقة المناسبة على المعايير التالية:

- جودة الغاز الخام المنتج
- التكلفة الإجمالية للمشروع
- مواصفات البئر
- معدل استخلاص الهيدروكربونات الثقيلة المستهدف

3.2. اساليب وطرق معالجة الغاز الطبيعي: يمكن تلخيص المعالجات الرئيسية التي تُجرى على الغاز الطبيعي الخام على النحو التالي:

1.3.2 الفصل الأولي وإزالة المكثف (Primary Separation and Condensate Removal) (C5+)[43]

تعتبر مرحلة الفصل الأول هي الأهم عند استقبال الغاز غير المعالج من الآبار، حيث يتواجد الغاز في حالة "متعددة الأطوار" تحتوي على غازات، مياه حرة، وهيدروكربونات سائلة ثقيلة. الآلية الدقيقة للفصل:

تستند هذه المرحلة إلى استغلال الفروقات في الكثافة والقصور الذاتي بين الأطوار الثلاثة. يتم استخدام الفواصل ثلاثية الأطوار (Three-Phase Separators) التي تعمل وفق الخطوات التالية:

- تقليل السرعة: (Velocity Reduction) عندما يدخل تيار الغاز إلى القطر الأوسع للفصل، تنخفض سرعته بشكل ملحوظ، مما يتيح للجاذبية التأثير على قطرات السائل.

- تغيير الاتجاه: (Directional Change) يتم استخدام حواجز داخلية (Inlet Slug Catchers) لإجبار التيار على تغيير مساره، مما يؤدي إلى تصادم قطرات السائل مع جدران الحواجز وتجمعها.

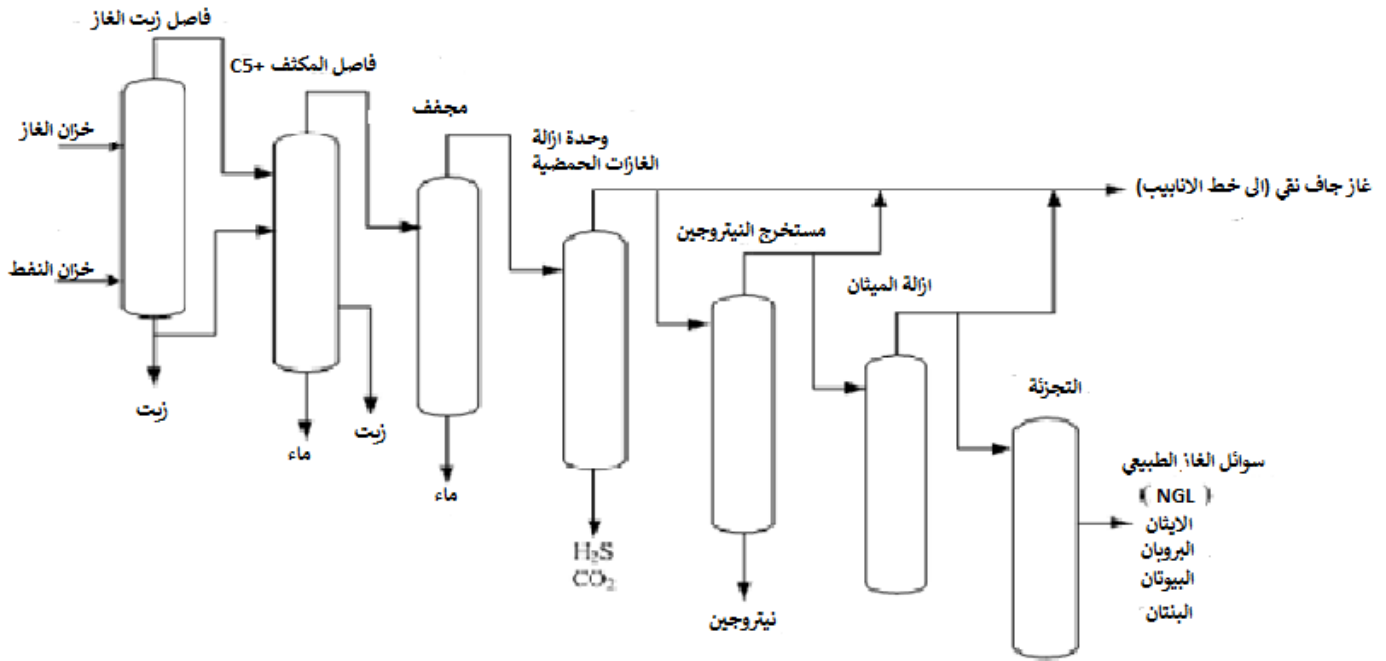
- تجمع القطرات: (Coalescing) يمر الغاز عبر "مانع الرذاذ" (Mist Eliminator) الذي يقوم بالتقاط القطرات الصغيرة الميكروبية التي لم تسقط بفعل الجاذبية.

2.3.2 إزالة المكثف (C5+) : [44]

المكثفات تمثل مزيجاً من الهيدروكربونات الثقيلة مثل البنزين والهكسان والهبتان وغيرها، وهذه المكثفات توجد في صورة غازية ضمن المكنن بسبب الضغط العالي، لكنها تتحول إلى سائل عندما ينخفض الضغط عند سطح البئر.

-الاستقرار: (Stabilization) المكثفات التي تم فصلها تُرسل إلى "برج الاستقرار" لتقليل ضغطها البخاري (RVP) من خلال إزالة الغازات الخفيفة الذائبة مثل الميثان والإيثان، مما يجعلها آمنة للتخزين والنقل.

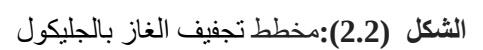
-الأهمية التقنية: في البداية، فإن إزالة هذه المكثفات تمنع حدوث "نقطة الندى الهيدروكربونية" داخل الأنابيب، وهو ما قد يؤدي إلى تراكم السوائل التي تعيق تدفق الغاز وتسبب أضراراً للضواغط.



الشكل (1.2): مخطط مرحلة الفصل الاول

3.3.2. نزع الماء وتجفيف الغاز (Gas Dehydration)

- عقب إزالة المياه الأساسية في المرحلة الأولى، يبقى الغاز مشبعاً ببخار الماء (بخار غير مدرك). هذا البخار هو السبب الرئيسي في حدوث الهيدرات (Hydrates) وتآكل الأنابيب. [45]
- أولاً: التجفيف بالامتصاص (Glycol Dehydration - TEG)
- تُستخدم هذه التقنية للتخلص من كميات كبيرة من الماء لتحقيق معايير خطوط الأنابيب. [46]
- برج التلامس (Contactor) يدخل الغاز من الجزء السفلي، بينما يأتي الجليكول "الفقر" (المركز) من الجزء العلوي. يمتص الجليكول الماء بشكل كيميائي أثناء نزوله.
- دورة التجديد (Regeneration Cycle) يتم تحويل الجليكول "الغني" (المشبع بالماء) إلى غلاية (Reboiler) حيث يتم تسخينه إلى نحو 200 درجة مئوية لتبخير الماء واستعادة الجليكول المركز لاستخدامه مرة أخرى.
- الدقة التقنية: يُفضل استخدام ثلاثي إيثيلين جليكول (TEG) بسبب استقراره الحراري العالي وانخفاض ضغطه البخاري، مما يؤدي إلى تقليل الفواقد.
- ثانياً: التجفيف بالامتزاز (Molecular Sieve Adsorption)
- تُطبق هذه الطريقة عندما يكون الهدف هو "التجفيف العميق" (Deep Drying) قبل تسييل الغاز (LNG).
- آلية المنخل الجزيئي: تتكون المادة الممتزة (Zeolites) من حبيبات صلبة تحتوي على مسام صغيرة جداً بحجم جزيء الماء (حوالي 3-4 أنجستروم). تمر جزيئات الميثان الكبيرة بينما تُحتجز جزيئات الماء الصغيرة داخل المسام. [47]
- نظام الأبراج التبادلي: يتم استخدام برجان على الأقل، أحدهما في مرحلة "الامتزاز" (العمل) والآخر في مرحلة "التجديد" (التسخين بواسطة غاز ساخن لطرده الماء). [48]



43.2. إزالة الزئبق:

- تقصف المعدن السائل (LME): هذا التأثير هو أكبر تهديد للزئبق. يتفاعل الزئبق السائل مع المعادن الخفيفة مثل الألومنيوم، الذي يستخدم على نطاق واسع في المبادلات الحرارية المبردة في وحدات استعادة سائل الغاز الطبيعي (NGL) وتسييل الغاز الطبيعي (LNG) ويؤدي رد الفعل هذا إلى تلوث سريع وتلف هذه المكونات، مما قد يسبب عطلاً كارثياً في المعدات. [49]
- السمية البيئية والصحية: الزئبق مركب شديد السمية للإنسان والبيئة، وبسبب اللوائح البيئية الصارمة، يجب إزالته قبل إطلاق الغاز أو منتجاته.
- تكوين الملغم: يمكن أن يتحد الزئبق مع معادن أخرى لتكوين سبائك، مما يؤدي إلى تآكل المعدات وتلفها.

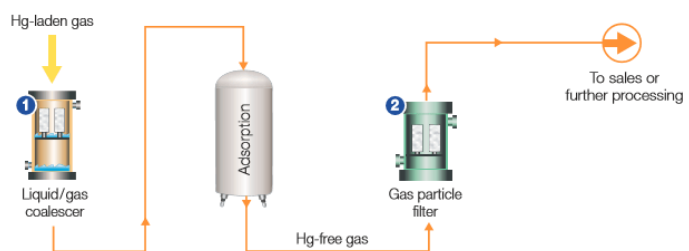
1.4.3.2. تقنيات إزالة الزئبق:

- تستخدم تقنيات الامتصاص بشكل أساسي لإزالة الزئبق من الغاز الطبيعي:
- الامتزاز بالكربون المنشط المشرب بالكبريت: هذه هي الطريقة الأكثر شيوعاً. يمر الغاز عبر طبقة ثابتة تحتوي على الكربون المنشط الحبيبي الذي يتم معالجته بالكبريت. يتفاعل الزئبق مع الكبريت لتكوين كبريتيد الزئبق (HgS)، وهو مركب مستقر وغير سام يلتصق بسطح الكربون المنشط [50].
- امتصاص المنخل الجزيئي: يمكن استخدام أنواع معينة من المناخل الجزيئية التي تحتوي على مواد كيميائية تتفاعل مع الزئبق أو تمتز. تُستخدم هذه الطريقة عموماً عندما تكون هناك حاجة لإزالة الزئبق والماء في نفس الوقت أو للوصول إلى مستويات منخفضة جداً من الزئبق [51].
- المواد الكيميائية الماصة: تُستخدم مواد كيميائية صلبة أخرى خصيصاً للتفاعل مع الزئبق وإزالته من مجرى الغاز.

Process Flow Diagram

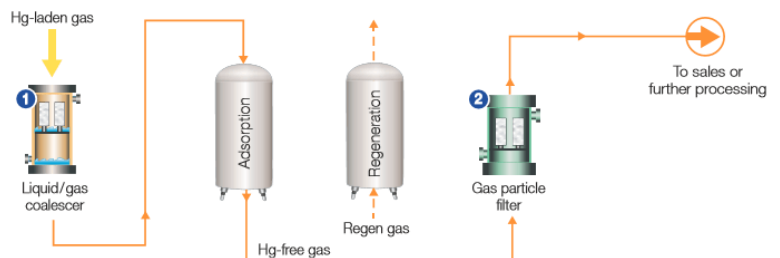
Non-regenerative adsorption

- Activated carbon
- Sulfur or halide—impregnated activated carbon
- Mixed or metal sulfide on alumina or activated carbon



Regenerative adsorption

- Silver on molecular sieve (can be a layer in a molecular sieve dehydration bed)



الشكل (3.2): مخطط وحدة إزالة الزئبق

2.53.. استخلاص وتجزئة سوائل الغاز الطبيعي (استخلاص وتجزئة الغاز الطبيعي المسال)

بعد إزالة الشوائب الأساسية مثل الغازات الحمضية والماء والزرنيق، يصبح الغاز الطبيعي جاهزاً للاسترداد كسوائل غاز طبيعي (NGL). تعتبر هذه المرحلة حاسمة لاستعادة الهيدروكربونات الأثقل من الميثان، بما في ذلك الإيثان (C2)، والبروبان (C3)، والبيوتان (C4)، والمكثفات (C5+) ولهذه المكونات قيمة اقتصادية عالية كمواد أولية للصناعات البتروكيمياوية أو كوقود. [52]

2.53..1. أهمية استعادة الغاز الطبيعي المسال والمكثف: (C5+) [53]

- القيمة الاقتصادية: يعتبر الإيثان والبروبان والبيوتان والمكثفات من المنتجات القيمة المستخدمة في إنتاج البلاستيك والمطاط الصناعي والوقود وغيرها.
- استيفاء مواصفات خطوط الأنابيب: يجب أن يستوفي الغاز الطبيعي المنقول عبر خطوط الأنابيب مواصفات معينة تتعلق بنقطة الندى الهيدروكربونية لمنع تكثيف السائل داخل خط الأنابيب. تضمن إزالة سوائل الغاز الطبيعي استيفاء هذه المواصفات
- زيادة القيمة الحرارية للغاز المتبقي: بعد إزالة الغاز الطبيعي المسال، يصبح الغاز المتبقي (الميثان في الغالب) أنقى وله قيمة حرارية أعلى.

2.53..2. تقنيات استعادة الغاز الطبيعي المسال:

- امتصاص الزيت الخالي من الدهون: تعتبر هذه الطريقة من أقدم الطرق، حيث يتم تمرير الغاز عبر زيت خفيف يمتص الهيدروكربونات الثقيلة. يتم بعد ذلك فصل الغاز الطبيعي المسال عن الزيت عن طريق التقطير [54].
- التوسيع المبرد: هذه هي الطريقة الأكثر شيوعاً وفعالية حالياً. يتم تبريد الغاز إلى درجات حرارة منخفضة جداً (-150 درجة فهرنهايت أو أقل) باستخدام أنظمة التبريد بالضغط أو الموسع التوربيني. يؤدي هذا التبريد إلى تكثيف معظم الغاز الطبيعي المسال، والذي يفصل بعد ذلك [55].

2.53..3. تجزئة الغاز الطبيعي المسال:

بعد استخلاص خليط سوائل الغاز الطبيعي، يتم فصلها إلى مكوناتها الفردية في وحدة تجزئة باستخدام سلسلة من أبراج التقطير:

- مزيل الإيثان: (Deethanizer) يفصل الإيثان عن المكونات الأثقل.
- مزيل البروبان: (Depropanizer) يفصل البروبان عن البيوتان والمكثفات.
- مزيل البيوتان: (Debutanizer) يفصل البيوتان عن المكثف (C5+).
- فاصل البيوتان: (Butane Splitter / Deisobutanizer) في بعض الأحيان، يتم فصل البيوتان إلى بيوتان عادي (n-butane) وإيزوبيوتان (iso-butane) لاستخدامات محددة. [56]

يعرف المكثف (C5+) التي يتم استخلاصه في هذه المرحلة باسم "البنزين الطبيعي (Natural Gasoline)" وتستخدم

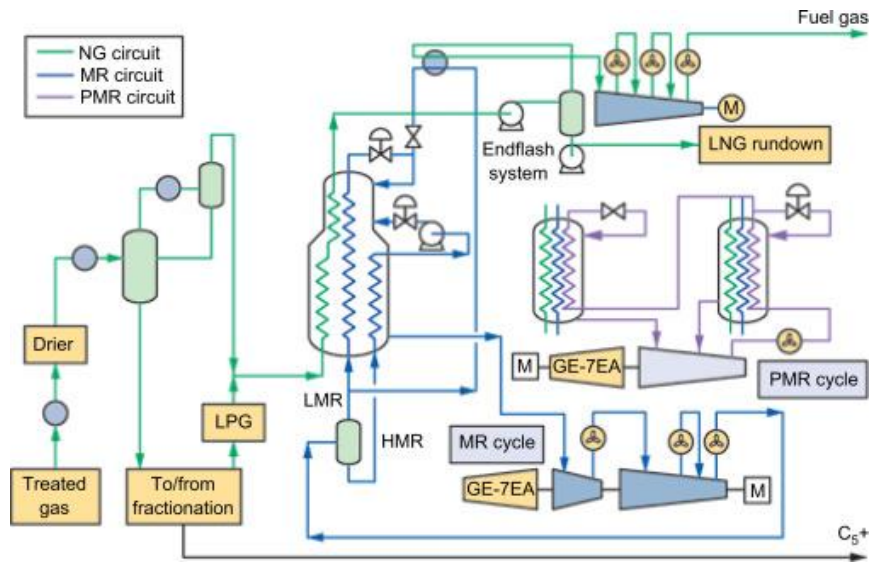
[illegible]

الشكل (4.2): مخطط عملية تجزئة سوائل الغاز الطبيعي

6.3.2. التسييل (Liquefaction) :

تحويل الغاز الطبيعي إلى سائل (LNG) لتسهيل نقله عبر البحار.

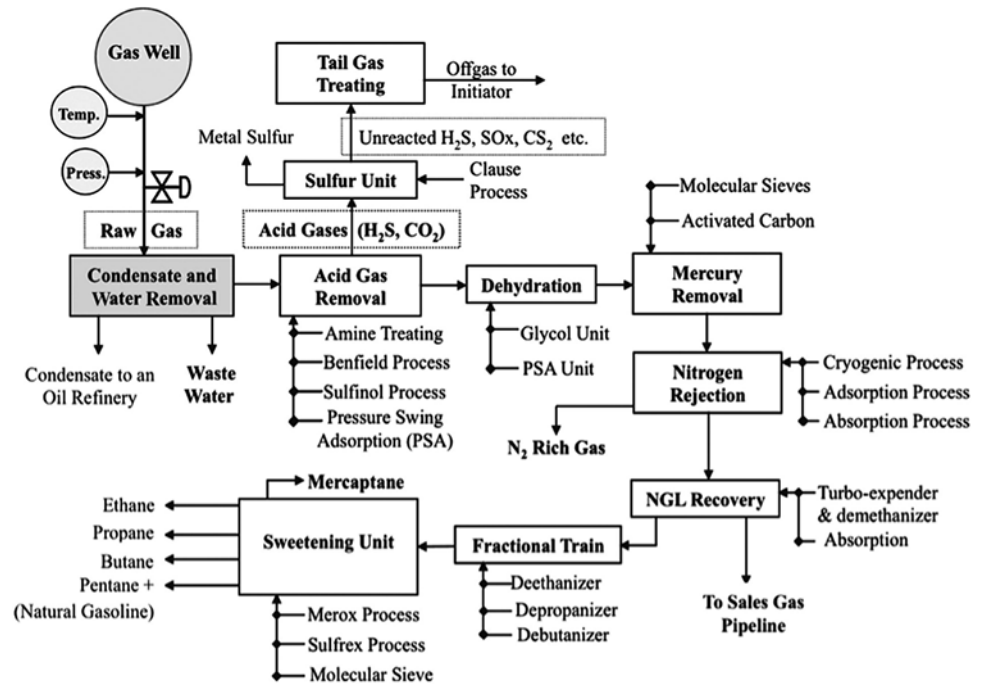
حيث يتم تبريد الميثان النقي إلى درجة حرارة 162- درجة مئوية تحت الضغط الجوي. تتقلص مساحة الغاز بمقدار 600 مرة عند تحوله إلى سائل. تُستخدم متقدمة متطورة مثل دورة التبريد المختلط (Mixed Refrigerant) أو دورة الشلال (Cascade) . [57]



الشكل (5.2): مخطط عملية التسييل

73..2. المخطط العام لتدفق العمليات (General Process Flow Diagram)

يوضح هذا المخطط التسلسل الهرمي لكافة العمليات داخل محطة معالجة الغاز الطبيعي، بدءاً من استقبال الغاز الخام وصولاً إلى المنتجات النهائية



الشكل (6.2): المخطط العام لمعالجة الغاز

4.2. خاتمة

تُظهر عملية معالجة الغاز الطبيعي تحدياً معقداً وتطور تكنولوجيا المطلوب لتحويل مورد خام إلى مصدر طاقة نظيف ومنتجات بتروكيماوية قيمة. من خلال إزالة الشوائب الضارة مثل الغازات الحمضية والماء والزرنيق، واستعادة الهيدروكربونات السائلة الثمينة، تضمن هذه العمليات ليس فقط سلامة وكفاءة البنية التحتية للغاز، بل تساهم أيضاً في حماية البيئة وتوفير مواد خام حيوية للصناعات المختلفة. إن الالتزام بالترتيب الصحيح لهذه الخطوات واستخدام التقنيات المناسبة لكل مرحلة هو مفتاح النجاح في صناعة الغاز الطبيعي.

الفصل الثالث

استراتيجيات نقل وتخزين وتوزيع الغاز الطبيعي

1.3. مقدمة

في هذا الفصل كيف تُسهم تقنيات نقل الغاز الطبيعي وتخزينه وتوزيعه في تحسين أمن الإمداد الطاقوي وتعزيز الكفاءة الاقتصادية؟ وللإجابة عن هذه الإشكالية، نسير وفق خطة منهجية لدراسة استراتيجيات نقل الغاز الطبيعي و تقنيات التخزين وتوزيع الغاز الطبيعي.

2.3. تقنيات نقل الغاز الطبيعي

1.2.3. النقل عبر خطوط الأنابيب (Pipeline Transportation)

1.1.2.3. المبادئ الهندسية والفيزيائية

يُمثل النقل عبر خطوط الأنابيب الوسيلة الأكثر استخداماً ورسوخاً في تاريخ صناعة الغاز الطبيعي، لا سيما في الأسواق الكبرى كأمريكا الشمالية وأوروبا وروسيا. ويرتكز هذا النظام على مبدأ الجريان المستمر للغاز تحت ضغط مرتفع يتراوح في الغالب بين 50 و 100 بار (bar) في خطوط النقل الرئيسية، ويتناقص تدريجياً كلما اقتربنا من مراكز الاستهلاك النهائية.

وتستوجب إدارة الضغط في هذه المنظومة نشر محطات ضغط (Compressor Stations) على امتداد الخط وبفواصل منتظمة تتراوح بين 80 و 150 كيلومتراً، وذلك للتعويض عن خسائر الضغط الناجمة عن الاحتكاك على طول الأنبوب. وتُجسد ظاهرة تدفق الغاز في الأنابيب معادلة بانيلزول الشهيرة (Panhandle A & B equations) التي تربط معدل التدفق بعوامل الضغط وقطر الأنبوب وخشونة جداره ولزوجة الغاز والمسافة. [58]

1.1.2.3. مكونات منظومة الأنابيب وتقنياتها المتقدمة

تتألف منظومة نقل الغاز عبر الأنابيب من عدة عناصر تقنية متكاملة. فمن حيث الأنابيب ذاتها، تُصنع في الغالب من الفولاذ عالي الجودة وفق مواصفات API (American Petroleum Institute)، ويتراوح قطرها الخارجي بين 500 و 1219 ملمتراً في خطوط النقل الرئيسية. كما تخضع لمعالجات مضادة للتآكل تشمل الطلاء الداخلي والخارجي وأنظمة الحماية الكاثودية (Cathodic Protection) التي تحول دون التدهور الكيميائي على مدار عقود.

وتُضطلع محطات الضغط بدور محوري في الحفاظ على استمرارية الجريان؛ إذ تضم توربينات غازية أو محركات كهربائية تُشغّل ضواغط من نوع ترددي (Reciprocating) أو دوراني (Centrifugal) وتُمثل كفاءة هذه المحطات مؤشراً اقتصادياً حاسماً، لكونها تستهلك من الغاز المنقول ذاته قدرأ يتراوح بين 0.3 و 0.5 بالمائة من الكمية الإجمالية لكل محطة. ويُضاف إلى ذلك بنية تحتية من محطات قياس وتحكم، وصمامات أمان تلقائية، وأنظمة رصد وكشف عن التسربات عبر تقنيات الليزر وتحليل الاهتزازات.

وفيما يخص خطوط الأنابيب تحت البحر (Offshore Pipelines)، فإنها تُضيف طبقات من التعقيد الهندسي المتصلة بالضغط الهيدروستاتيكي، وهو ما يستوجب استخدام مواد خاصة وتصميمات مدروسة للمفاصل والوصلات. وتُعدّ منظومة Nord Stream الممتدة في قاع بحر البلطيق من أبرز الأمثلة على هذا النمط من خطوط النقل، وتبلغ طاقتها التصميمية نحو خمسة وخمسين مليار متر مكعب سنوياً. [59]

2.1.2.3. مميزات ومحدودية نقل الغاز بالأنابيب

يتمتع نقل الغاز عبر الأنابيب بجملة من المزايا الجوهرية تجعله الخيار الأمثل في حالات معينة؛ فالتكلفة التشغيلية منخفضة نسبياً بعد استهلاك التكاليف الرأسمالية الأولية للبناء، كما تُوفّر هذه المنظومة تدفقاً مستمراً وموثوقاً مناسباً لتلبية الطلب القاعدي (Base Load Demand) بيد أن هذا النمط ينطوي على قيود لا يمكن إغفالها: فالتكاليف الأولية ضخمة وغير قابلة للاسترداد، كما تُلزم الأطراف المعنية بعلاقات طويلة الأمد تكاد تكون حصرية، فضلاً عن ثبات المسار الجغرافي الذي يجعل النظام عرضة للمخاطر الجيوسياسية. [60]

2.2.3. النقل عبر ناقلات الغاز الطبيعي المسال (LNG)

1.2.2.3. مفهوم الغاز الطبيعي المسال وتقنيات الإسالة

يُقصد بالغاز الطبيعي المسال (Liquefied Natural Gas - LNG) الغاز الذي يُبرّد حتى يبلغ درجة حرارة نحو ناقص مئة واثنين وستين درجة مئوية عند الضغط الجوي، مما يُحوّله إلى حالة سائلة ويُقلّص حجمه إلى ما يعادل نحو ستمئة ضعف من الحجم الغازي الأصلي. ويُتيح هذا التحول نقل كميات هائلة من الطاقة في أحجام محدودة، مما يفتح آفاق التجارة الغازية أمام أسواق بعيدة لا تربطها أنابيب. [61]

وتمر عملية الإسالة بمراحل تقنية متعاقبة: تبدأ بمعالجة الغاز الخام وإزالة الشوائب (الكبريت وثنائي أكسيد الكربون وبخار الماء والهيدروكربونات الثقيلة)، ثم تتدرج في التبريد عبر دورات تبريد متتالية تستخدم مبردات مخصصة. وتُعدّ تقنية APCI (Air Products and Chemicals Inc.) من أكثر تقنيات الإسالة انتشاراً في المنشآت الكبرى حول العالم. وتُقاس الكفاءة الطاقوية لعملية الإسالة بكمية الطاقة المستهلكة مقارنةً بالمحتوى الطاقوي للغاز المُسال، وتتراوح في أفضل حالاتها بين 10 و12 بالمائة. [62]

2.2.2.3. ناقلات LNG: التصميم والتقنيات المتطورة

تتميز ناقلات الغاز الطبيعي المسال بتصميم هندسي متخصص يستجيب للخصائص الفيزيائية لهذه المادة؛ إذ تُجهّز بخزانات عازلة حرارياً عازلاً استثنائياً تُعرف بـ Membrane Tanks أو Moss Tanks، وهي مصممة لتحمل ظروف التبريد الشديد (Cryogenic Conditions) وتتراوح طاقة الناقل الحديث بين مئة وثمانين ألف وثلثمئة وخمسة وأربعين ألف متر مكعب، في حين تصل ناقلات الجيل الجديد (Q-Max) إلى طاقة تبلغ ما يقارب ثلاثمئة وستة وستين ألف متر مكعب.

وتُعالج سفن LNG تحدياً خاصاً يُعرف بظاهرة «التبخّر الطبيعي» (Boil-Off Gas - BOG)؛ إذ يتبخر جزء من الشحنة السائلة أثناء الرحلة نتيجة انتقال الحرارة. وقد حُلّت هذه المسألة تقنياً إما بإعادة استخدام الغاز المتبخر وقوداً للناقل، أو بإعادة إسلته عبر وحدات إسالة متكاملة في السفينة ذاتها. (DFDE Propulsion Systems). [63]



الشكل (1.3): ناقلة الغاز الطبيعي المسال (LNG) ذات الخزانات الكروية.

3.2.2.3. محطات الاستقبال وإعادة التغويز

لا تكتمل منظومة LNG دون محطات الاستقبال والتغويز (Regasification Terminals) ، وهي المنشآت التي تستقبل الغاز السائل وتُعيد رفع درجة حرارته حتى يعود إلى حالته الغازية بغية ضخه في شبكة توزيع الغاز المحلية. وتستخدم هذه المحطات تقنيتين رئيسيتين للتغويز: الأولى تعتمد على مبادلات حرارية تستخدم مياه البحر أو مياهاً دافئة، والثانية تستخدم وحدات تسخين تعمل بالغاز الطبيعي المسال ذاته أو بالطاقة الكهربائية.

وظهر خلال السنوات الأخيرة نوع متطور من محطات الاستقبال العائمة يُعرف بـ FSRU (Floating Storage and Regasification Unit)، وهو في جوهره سفينة LNG معدلة ومتوقفة في موقع ثابت قريب من الشاطئ. وتوفر هذه الوحدات مرونة استراتيجية لا تُقدَّر، إذ تُخفّض التكاليف الرأسمالية لإنشاء محطات الاستقبال بنسبة تبلغ وفق بعض الدراسات ما يقارب 40 بالمائة مقارنةً بالمحطات البرية التقليدية. [64]



الشكل (2.3): تمثل هذه الصورة عملية تفريغ الغاز الطبيعي المسال (LNG) في محطة استقبال ساحلية

4.2.2.3. مقارنة بين طرق النقل ومعايير اختيار الأنسب

يُعدّ اختيار وسيلة النقل الملائمة قراراً استراتيجياً متعدد الأبعاد يستوجب الموازنة بين متغيرات الكلفة والمسافة وحجم الطلب والاعتبارات الجيوسياسية. وعلى وجه العموم، يُرجّح أن تكون الأنابيب الأجدى اقتصادياً للأسواق التي تقع في نطاق دون أربعة آلاف كيلومتر، ريثما يُصبح الغاز المسال أكثر تنافسية في الأسواق البعيدة. بيد أن هذا النطاق يتقلص باستمرار مع التقدم التكنولوجي وانخفاض تكاليف إسالة الغاز وبناء السفن المتخصصة. [65]

3.3. تقنيات تخزين الغاز الطبيعي

يُعدّ تخزين الغاز الطبيعي ركيزةً جوهرية في منظومة أمن الإمداد الطاقوي، إذ يُتيح الموازنة بين التذبذب الموسمي في الطلب والإنتاج المتواصل نسبياً. كما يُوفّر هامشاً استراتيجياً يحمي الشبكات من أثر الانقطاعات المفاجئة في الإمداد. وتتوزع تقنيات التخزين بحسب البنية الجيولوجية والتقنية المعتمدة، ويمكن تصنيفها في ثلاثة أنواع رئيسية.

13..3. التخزين في الحقول المستنزفة (Depleted Reservoirs)

1.1.3.3. المبدأ الجيولوجي للتخزين في الحقول المستنزفة

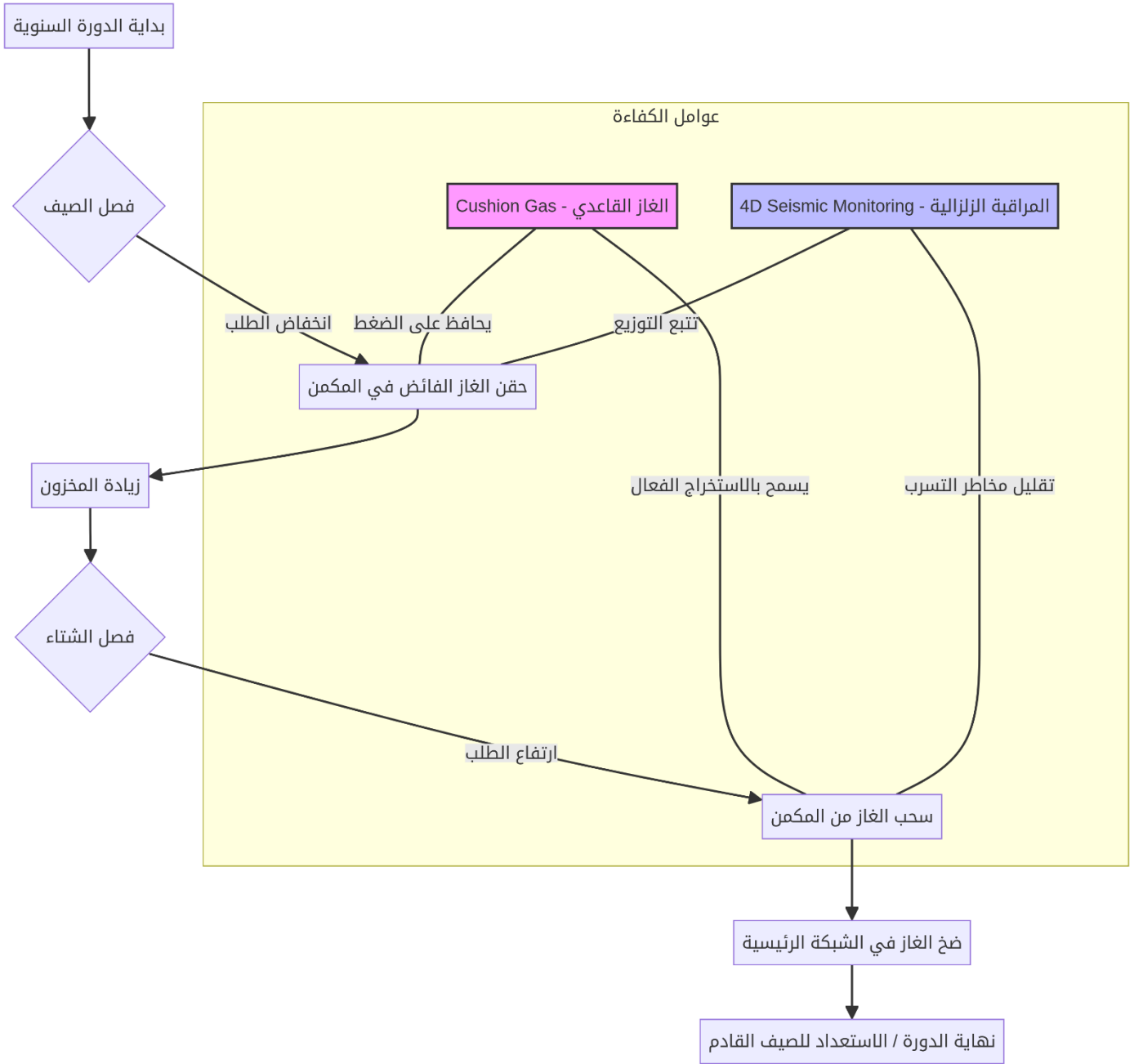
تُمثّل الحقول الهيدروكربونية المستنزفة النوع الأوسع انتشاراً في العالم بين منشآت التخزين الجوفي؛ إذ يُوظّف المكنم الجيولوجي الذي كان يحتوي سابقاً على النفط أو الغاز خزاناً لتخزين الغاز الطبيعي. ويُستند في هذا النهج إلى حقيقة جيولوجية أساسية: أن هذه المكامن أثبتت عبر الزمن قدرتها على حفظ الهيدروكربونات بفضل طبقات الصخر الصلب المانعة للنفاذية (Caprock) التي تعلوها.

وتتيح هذه المكامن طاقات تخزينية هائلة تُقاس بالمليارات من الأمتار المكعبة، كما تتميز بتكاليف رأسمالية منخفضة نسبياً مقارنةً بالبدائل الأخرى نظراً لوجود البنية التحتية سلفاً من آبار وخطوط ومعدات. غير أن معدل التغذية والسحب (Deliverability Rate) في هذا النوع من التخزين يكون في الغالب متوسطاً، مما يجعله ملائماً للتعامل مع التذبذبات الموسمية المتوقعة أكثر من ملاءمته لأحداث الطوارئ والذروات المفاجئة. [66]

2.1.3.3. العمليات التشغيلية ودورة الحقن والسحب

تسير عمليات التخزين في الحقول المستنزفة وفق دورة سنوية منتظمة؛ ففي فصل الصيف حين يكون الطلب على الطاقة منخفضاً، تُضخ كميات الغاز الفائضة إلى المكمن وتُحفظ فيه. أما في فصل الشتاء حين يرتفع الطلب، فيُستقطب الغاز المخزن ويُضخ في الشبكة الرئيسية. ولضمان كفاءة هذه العملية، يُستخدم ما يُعرف بالغاز القاعدي (Cushion Gas) وهو حجم غاز ثابت يظل في المكمن في جميع الأحوال للحفاظ على ضغط كافٍ يُتيح الاستخراج الفعّال، وعادةً ما يُمتلئ بين 30 و50 بالمائة من الطاقة الكلية للمخزن. [67]

وقد طرأت على هذه الصناعة ابتكارات تقنية بارزة في سنوات أخيرة؛ إذ باتت تقنيات المراقبة الزلزالية الرباعية (4D Seismic Monitoring) تُستخدم لتتبع توزيع الغاز داخل المكمن في الزمن الحقيقي، مما يُحسن إدارة دورة الحقن والسحب ويقلل من مخاطر التسرب إلى باطن الأرض. [68]



الشكل (3.3): مخطط دورة تخزين واسترجاع الغاز الطبيعي الموسمية.

23.3. التخزين في الكهوف الملحية (Salt Caverns)

1.2.3.3. آلية إنشاء الكهوف الملحية وخصائصها

تُعدّ الكهوف الملحية من الأنواع الأكثر كفاءةً من الناحية التشغيلية ضمن خيارات التخزين الجوفي، وتُنشأ بحفر آبار في طبقات الملح الصخري (Halite formations) ثم ضخ الماء العذب لإذابة الملح وتكوين تجويف اصطناعي ذي أبعاد وشكل يمكن التحكم فيهما بدقة نسبياً. وتتراوح سعة هذه الكهوف عادةً بين عشرة آلاف ومليون متر مكعب. تنفرد الكهوف الملحية بميزات تشغيلية فائقة تجعلها الحل المفضل لمتطلبات المرونة والسرعة في الاستجابة؛ فمعدلات التغذية والسحب لديها أعلى بمراحل مما تُتيحها الحقول المستنزفة أو طبقات المياه الجوفية. إذ يُمكن هذا النوع من التخزين

من رفع أو خفض حجم الغاز في الشبكة خلال ساعات معدودة، مما يجعله الأنسب لاستيعاب الطلب خلال ذروات الاستهلاك اليومي أو للاستجابة لحوادث فجائية في الشبكة. [69]

2.2.3.3. التوزيع الجغرافي والقيود الجيولوجية

يتوقف توافر هذا النوع من التخزين على الخصائص الجيولوجية للمنطقة؛ إذ يستلزم وجود طبقات ملح صخري بسمكة كافية وعمق مناسب (يتراوح في الغالب بين 300 و2000 متر). وهو ما يجعل التوزيع الجغرافي لمنشآت الكهوف الملحية غير متكافئ: فتركز أعلى الكثافات في مناطق هولندا وألمانيا والساحل الخليجي الأمريكي حيث توجد أحواض ملحية واسعة.

وتتشرط عملية البناء والتشغيل تحديات متعلقة بالحماية البيئية؛ إذ ينبغي معالجة محلول الملح (النفق الملحي) الناتج عن عملية الغسيل المائي (Solution Mining) قبل تصريفه لتجنب الأضرار البيئية. كما أن الرقابة على سلامة المنشأة تستلزم برامج صيانة دورية مكثفة نظراً للضغوط المرتفعة التي يعمل في ظلها الكهف. [70]

3.2.3.3. أنواع أخرى من التخزين الجوفي ومقارنة بين الأنواع

إلى جانب الحقول المستنزفة والكهوف الملحية، توجد أنواع أخرى من التخزين الجوفي؛ أبرزها التخزين في طبقات المياه الجوفية (Aquifer Storage) التي تُستخدم في مناطق تفتقر إلى الحقول الهيدروكربونية أو الطبقات الملحية. غير أن هذا النوع الأخير ينطوي على مخاطر تتعلق بتلوث المياه الجوفية المجاورة، مما يستوجب دراسات هيدروجيولوجية معمقة قبل الشروع فيه.

وتُجمع الأدبيات التقنية على أن اختيار نوع التخزين يستوجب تقييماً شاملاً يأخذ في الاعتبار: الطاقة الاستيعابية المطلوبة، وسرعة الاستجابة الضرورية، والجدوى الجيولوجية للموقع، والكلفة الرأسمالية والتشغيلية، فضلاً عن المتطلبات التنظيمية والبيئية. [71]

4.3. توزيع الغاز الطبيعي – الشبكات الوطنية والدولية

يُمثل التوزيع المرحلة الأخيرة في سلسلة قيمة الغاز الطبيعي، وهي المرحلة التي تربط بين منشآت النقل الكبرى من جهة، والمستهلك النهائي من جهة أخرى. وتمتد هذه المنظومة لتشمل شبكات وطنية متشعبة وخطوطاً دولية عابرة للقارات، مشكّلةً نسيجاً طاقوياً بالغ الأهمية الاستراتيجية.

الجدول (3.3): مقارنة شاملة بين أنواع التخزين الجوفي

المعيار	الحقول المستنزفة	الكهوف الملحية	طبقات المياه الجوفية
المرونة	متوسطة إلى منخفضة	عالية جداً	منخفضة إلى متوسطة
سرعة الاستجابة	متوسطة	عالية جداً	منخفضة
معدلات الحقن/السحب	متوسطة	عالية جداً	منخفضة
السعة التخزينية	كبيرة جداً	كبيرة	كبيرة جداً

الغاز القاعدي	30-50%	أقل نسبة	كميات كبيرة
المخاطر الرئيسية	تسرب لباطن الأرض	انهيار أو تسرب	تلوث المياه الجوفية
التكلفة	متوسطة	عالية (إنشاء)	عالية (دراسات)

1.4.3 الشبكات الوطنية لتوزيع الغاز

1.1.4.3. هيكليّة الشبكة الوطنية وترتيباتها الضغطيّة.

تتنظم الشبكات الوطنية لتوزيع الغاز وفق تراتبية ضغطية متدرجة تنبثق من حاجات المستخدمين المختلفين. فعلى المستوى الأعلى، تضم شبكات النقل الرئيسية (Transmission Networks) التي تعمل بضغط مرتفع بين 16 و 100 بار، وتنقل كميات ضخمة من الغاز بين المنابع والمراكز الصناعية الكبرى ومحطات التوزيع الإقليمية. ويليهما مستوى الشبكات الوسيطة (Intermediate Pressure Networks) التي تعمل بضغط بين 4 و 16 بار وتربط محطات التخفيض الإقليمية بالمحطات المحلية.

وعلى المستوى الأدنى، تمتد شبكات التوزيع المحلية (Distribution Networks) التي تعمل بضغط منخفضة (بين 0.1 و 4 بار) وتصل إلى الأحياء السكنية والمنشآت التجارية والصغيرة. وتتضمن هذه الشبكة منظومة معقدة من محطات التخفيض والقياس (Pressure Reduction and Measurement Stations) التي تُخفّض الضغط وتُضبطه بدقة، وتُقيس الكميات المنقولة للأغراض التجارية والمحاسبية. [2]

2.1.4.3. التحديات التشغيلية في الشبكات الوطنية

تواجه الشبكات الوطنية تحديات تشغيلية متنوعة، أبرزها إدارة التذبذبات في الطلب اليومي والموسمي؛ إذ قد يرتفع الطلب خلال ساعات الذروة الشتوية إلى ما يفوق مثلين أو ثلاثة أمثال متوسط الطلب السنوي. وتُعالج هذه المسألة بالتنسيق بين طاقة الإنتاج وطاقة النقل ومنشآت التخزين في إطار ما يُعرف بـ Grid Balancing. كما تطرح قضية تحديث الشبكات القائمة والبنية التحتية المتقادمة تحدياً مالياً وتقنياً مستمراً؛ إذ تُعاني كثير من الشبكات الأوروبية والأمريكية من تآكل الأنابيب الممتدة منذ خمسينيات القرن الماضي. وتُشير إحصاءات قطاع الطاقة إلى أن معدل الفقد في بعض شبكات التوزيع الوطنية يبلغ بين 2 و 5 بالمائة، وهو فقد يُقلّص الكفاءة الاقتصادية ويُمثّل تحدياً بيئياً بالغاً في آن. [73]

5.3 الشبكات الدولية وخطوط الأنابيب العابرة للحدود

1.5.3. جغرافيا التجارة الغازية الدولية

تُرسّم جغرافية التجارة الدولية في الغاز الطبيعي بناءً على التوزيع غير المتكافئ للاحتياجات والطلب على الكرة الأرضية. فبينما تتركز الاحتياجات الكبرى في روسيا وآسيا الوسطى والشرق الأوسط وأفريقيا الشمالية، يتوزع أكبر مراكز الاستهلاك في أوروبا الغربية وشرق آسيا وأمريكا الشمالية، مما يُحتم إنشاء منظومات نقل دولية متشعبة. وتحتل أوروبا موقع الريادة في هذا المجال؛ [73]

إذ تمتلك واحدة من أكثر شبكات الغاز الدولية تطوراً وتعقيداً في العالم. فضلاً عن شبكة الأنابيب الروسية التاريخية (Trans-Siberian Pipeline)، تتضمن البنية الأوروبية منظومة TAG (Trans Austria Gasleitung)، والشبكة الجزائرية-الأوروبية المتمثلة في خط ترانسمد وخط الميدغاز وخط غالسي، وغيرها من خطوط الربط بين دول القارة. [74]

2.5.3. الجزائر في الخريطة الدولية لتوزيع الغاز

تحتل الجزائر موقعاً جيوسياسياً استثنائياً بوصفها مورداً رئيسياً للغاز الطبيعي إلى القارة الأوروبية. فمنذ أن افتتحت أول خطوط الأنابيب العابرة للبحر الأبيض المتوسط في السبعينيات، طورت الجزائر منظومة نقل دولية متكاملة عبر محاور متعددة: يمتد خط Transmed عبر تونس وصقلية ليصل إلى إيطاليا، وينقل نحو 30 مليار متر مكعب سنوياً، فيما يعبر خط Medgaz مباشرةً إلى إسبانيا من ميناء بني صاف ويبلغ طاقته الاستيعابية نحو 8 مليارات متر مكعب سنوياً. وتطوّر الجزائر هذه الإمكانيات من خلال شركة سوناطراك (Sonatrach)، الذراع الوطنية للقطاع الهيدروكربوني، التي تُشغّل بالإضافة إلى خطوط الأنابيب منشآت ضخمة لإنتاج الغاز المسال في بلدي أرزيو وسكيدة، مما يُتيح لها الوصول إلى أسواق آسيوية وأمريكية لا يخدمها نقل الأنابيب. [75]

6.3. التحديات الراهنة والآفاق المستقبلية

1.6.3. التحديات الجيوسياسية والتنظيمية

تتشابك في قطاع الغاز الطبيعي تحديات جيوسياسية وتنظيمية بالغة التعقيد؛ فالاعتماد المفرط على مورد واحد يُشكّل ثغرة استراتيجية كشفت عنها أزمة الغاز الأوروبية الروسية في أعقاب عام 2022، حين أجبرت دول الاتحاد الأوروبي على إعادة رسم خريطة إمداداتها بشكل مستعجل. وقد أسفر ذلك عن تسريع الاستثمار في محطات استقبال الغاز المسال والتعاقد مع موردين بديلين من الولايات المتحدة وقطر وأذربيجان والجزائر. وعلى الصعيد التنظيمي، أطلق الاتحاد الأوروبي مبادرات طموحة لتنويع الإمداد وتعزيز ترابط الشبكات الوطنية وفق مستهدفات REPowerEU كما تُفرز مساعي تحرير أسواق الغاز متطلبات جديدة من حيث الفصل بين نشاطات النقل والبيع (Unbundling)، وضمان الوصول المفتوح لثالث طرف إلى البنية التحتية (Third Party Access - TPA). [76]

2.6.3. الهيدروجين الأخضر والتوافق مع الغاز الطبيعي

يُمثّل الهيدروجين الأخضر أحد أبرز الآفاق التي تنفتح أمام البنية التحتية للغاز الطبيعي؛ إذ تُشير الدراسات الهندسية إلى إمكانية تحويل نسبة معتبرة من شبكات أنابيب الغاز الطبيعي لنقل الهيدروجين النقي أو خلطه مع الغاز الطبيعي. وتتراوح نسب الخلط المقبولة في كثير من الشبكات الأوروبية الحالية بين 10 و20 بالمائة حتماً دون إجراء تعديلات جوهرية. وفي ضوء هذه التوجهات، أعلنت الجزائر عزمها الاستثمار في إنتاج الهيدروجين الأخضر بالاستفادة من طاقتها الشمسية الهائلة ووجود بنية تحتية جاهزة للتصدير نحو أوروبا. ويُعدّ مشروع Desertec وما خلفه من مبادرات في صميم هذه الرؤية الاستراتيجية. [77]

3.6.3. الرقمنة والذكاء الاصطناعي في إدارة شبكات الغاز

تُفتح أمام صناعة نقل الغاز وتوزيعه آفاق تقنية جديدة بفعل موجة الرقمنة الشاملة؛ إذ باتت تقنيات إنترنت الأشياء الصناعي (IIoT) وتحليل البيانات الضخمة تُوظَّف في مراقبة شبكات الأنابيب في الزمن الحقيقي وكشف التسربات والشذوذات في الضغط. ويُضاف إلى ذلك تطور نماذج التنبؤ بالطلب المستندة إلى تقنيات التعلم الآلي (Machine Learning)، مما يُحسن دقة التوازن اليومي للشبكة ويُخفِّض الاحتياطي التشغيلي اللازم. كما تُسهم الطباعة ثلاثية الأبعاد في تقليص فترات توقف الصيانة عبر إنتاج قطع الغيار في الموقع، فيما تُوظَّف الطائرات المسيَّرة (Drones) للمراقبة الميدانية لخطوط الأنابيب في المناطق النائية بتكاليف أقل وسرعة أعلى مقارنةً بطرق الرصد التقليدية. [78]

7.3. خاتمة

لخصت هذه الدراسة إلى جملة من النتائج العلمية والتطبيقية التي يمكن تلخيصها على النحو الآتي:

أولاً: تقنيات النقل. يُكرّس الواقع العالمي ازدواجية تقنية في نقل الغاز الطبيعي بين الأنابيب وناقلات LNG؛ وكنتا الوسيطتين تنطوي على مزايا وقيود لا يمكن الفصل بينها. وتكشف المعطيات المتاحة أن الأنابيب تهيمن على التجارة الإقليمية، فيما تُرسِّخ ناقلات LNG مكانتها في التجارة البينية القارية.

ثانياً: التخزين الجوفي. يُمثِّل التخزين حلقةً وظيفية حيوية في منظومة أمن الإمداد؛ ولا يُوجد حل أمثل موحد بل تكاملٌ بين الأنواع المختلفة تبعاً للأهداف التشغيلية: فالكهوف الملحية للمرونة الفورية، والحقول المستنزفة للإدارة الموسمية.

ثالثاً: شبكات التوزيع. تُواجه الشبكات الوطنية والدولية تحديات متداخلة تبرز فيها المتطلبات التقنية بالاعتبارات الجيوسياسية، وتبدو المرونة والتنوع مساراً لا مناص منه في ظل عالم تتزايد فيه المخاطر المتصلة بأمن الطاقة.

وفي المحصلة، تُجسِّد هذه الصناعة نموذجاً للتعقيد الهندسي والتشابك الاستراتيجي الذي يتطلب من المهندسين والصانعين القرار على حدٍّ سواء الإلمام بأبعاد متعددة ومتشعبة. ومما تجدر الإشارة إليه أن ثمة آفاقاً واعدة تتشكَّل على أعتاب هذه الصناعة، في مقدمتها انصهار منظومة الغاز الطبيعي مع منظومة الهيدروجين الأخضر الناشئة، وهو ما قد يُعيد رسم الخريطة الطاقوية الدولية في العقود المقبلة.

الفصل الرابع

الابعاد الاقتصادية والبيئية لصناعة الغاز الطبيعي

1.4. مقدمة

يُعدّ الغاز الطبيعي اليوم من أكثر مصادر الطاقة الأولية حضوراً في المعادلة الطاقوية العالمية؛ إذ تتشابك أبعاده الاقتصادية والبيئية والجيوسياسية في نسيجٍ واحد يصعب فكّه. فمنذ أن تصاعدت ضغوط التغير المناخي، وتكشّفت هشاشة الاعتماد على الوقود النفطي، بات الغاز الطبيعي يحتل موقعاً استراتيجياً محورياً في مسار انتقال الطاقة نحو أفقٍ أكثر نظافةً واستدامةً.

يتناول هذا الفصل ثلاثة محاور كبرى مترابطة: يرصد المحور الأول الثقل الاقتصادي الذي يمثله الغاز في الأسواق الدولية، ويستجلي دوره المحوري في صون أمن الطاقة، فيما يتوقف عند تكاليف عمليات المعالجة التي تُشكّل شرطاً ضرورياً لجعل هذا المورد قابلاً للاستخدام. ويتناول المحور الثاني البُعد البيئي لهذه الصناعة، مُركّزاً على كيفية التعامل مع مخلفاتها ولا سيما الكبريت وعلى مساعي تقليص الانبعاثات الكربونية. أما المحور الثالث فيستشرف الآفاق المستقبلية، مُساءلاً موقعاً الغاز في سيناريوهات التحول الطاقوي العالمي. إن فهم هذه الأبعاد المتشابكة لا يعني الدعوة المطلقة لهذا المورد، بل يعني امتلاك أدوات التحليل النقدي الضروري لرسم سياسات طاقوية رشيدة ومتوازنة.

2.4. الأهمية الاقتصادية للغاز الطبيعي

1.2.4. الأسواق العالمية للغاز الطبيعي

شكل الغاز الطبيعي في السنوات الأخيرة ركيزةً لا غنى عنها في تركيبة استهلاك الطاقة العالمية. فوفقاً لأحدث التقارير الدولية، ارتفع الطلب العالمي على الغاز ارتفاعاً لافتاً خلال العقود الثلاثة الماضية، مدفوعاً بالتحضر المتسارع في الدول الناشئة ومتطلبات التحول الطاقوي في الدول المتقدمة. ويمكن القول إن السوق العالمية للغاز باتت تُشكّل منظومةً شبكية معقدة تتنافس فيها مصالح المنتجين والمستهلكين، وتتقاطع فيها مسارات البنية التحتية للأنابيب مع حركة ناقلات الغاز المسال (LNG).

وتبرز في خارطة الإنتاج العالمي ثلاثة أقطاب رئيسية: الولايات المتحدة الأمريكية التي أصبحت المنتج الأول في العالم إثر ثورة الغاز الصخري، وروسيا التي تمتلك أضخم الاحتياطيات على الإطلاق، وإيران المحتفظة بالمرتبة الثانية احتياطياً. وتوزّع هذه الدول إنتاجها على أسواق أوروبا وآسيا والأمريكتين عبر شبكة من الأنابيب الممتدة عبر القارات وعبر موانئ تسييل متطورة [58]

أما على صعيد التجارة الدولية، فقد شهدت تجارة الغاز المسال (LNG) نمواً استثنائياً إذ تجاوزت صادراته عتبة 400 مليار متر مكعب سنوياً، وهو ما يمثل قفزةً نوعية قياساً بما كان عليه الحال في مطلع الألفية الثالثة. وقد جاء هذا النمو في معظمه من توسّع القدرات التصديرية لأستراليا وقطر والولايات المتحدة، ومن تزايد الطلب الآسيوي، لا سيما في اليابان وكوريا الجنوبية والصين والهند.

وتجدر الإشارة إلى أن أسعار الغاز الطبيعي تتفاوتت تفاوتاً ملحوظاً بين الأسواق الإقليمية؛ فبينما يعمل سوق أمريكا الشمالية وفق مرجعية Henry Hub، يعتمد السوق الأوروبي على مرجعيات TTF و NBP، في حين تسود في آسيا أسعار عقود LNG المرتبطة بأسعار النفط الخام. هذا التنشّط السعري يُفضي إلى فرص تحكيم جيوسياسية واقتصادية تستغلها الدول ذات الاحتياطيات الكبيرة. [59]

الجدول 1.4: إبراز الدول المنتجة للغاز الطبيعي وحصصها السوقية

الدولة	الإنتاج مليار م ³ /سنة ³ ()	الحصة السوقية (%)	الاحتياطي المؤكد (تريليون م ³)
الولايات المتحدة	934	23.1	12.6
روسيا	701	17.4	37.4
إيران	259	6.4	34.0
الصين	220	5.5	6.3
قطر	177	4.4	23.8
الجزائر	101	2.5	4.5
دول أخرى	645	16.0	—

2.2.4. دور الغاز الطبيعي في أمن الطاقة

يعرف مفهوم أمن الطاقة في أدبياته الأكاديمية السائدة بأنه القدرة المستدامة على الوصول إلى مصادر الطاقة بأسعار معقولة وبكميات كافية لدعم النمو الاقتصادي والتنمية الاجتماعية. وفي هذا الإطار، يكتسب الغاز الطبيعي أهمية استراتيجية بالغة من حيث توافر الاحتياطيات وتنوع طرق التوصيل وانخفاض انبعاثاته النسبية مقارنةً بالفحم الحجري والنفط الخام.

وعلى صعيد التنوع في مصادر الطاقة، أسهم الغاز الطبيعي إسهاماً حقيقياً في تقليص اعتماد كثير من الدول على النفط الخام، وهو ما حدّ بدوره من هشاشتها أمام صدمات التسعير التي طبعت عقود السبعينيات والثمانينيات. كذلك أتاح تطور تقنيات تسهيل الغاز (LNG) للدول المستوردة قدراً أكبر من المرونة الاستراتيجية؛ إذ باتت قادرة على تنويع مورديها دون الارتهاق لشبكات أنابيب ثابتة قد تُشكّل أداة ضغط في يد دول العبور. [60]

غير أن الاعتماد على الغاز الطبيعي لا يخلو من مخاطر جيوسياسية؛ فقد كشفت الأزمة الأوكرانية-الروسية (2022-2023) عن مدى هشاشة الاعتماد الأوروبي على الغاز الروسي، مما دفع دول الاتحاد الأوروبي إلى إعادة رسم خارطة إمداداتها بشكل متسارع لم يسبق له نظير في تاريخ سياسات الطاقة القارية. وقد ترتّب على ذلك ارتفاع حاد في أسعار الطاقة ألقى بظلاله على التضخم وعلى القدرة التنافسية للصناعات الأوروبية.

وفي المقابل، تستثمر الدول المصدرة الكبرى هذا الموقع الاستراتيجي لاستقطاب الاستثمارات وتعزيز نفوذها الإقليمي

والدولي. فقطر مثلاً تحوّلت إلى قوة دبلوماسية من الدرجة الأولى يفوق ثقلها السياسي حجمها الجغرافي، ولعل ذلك يعود في جوهره إلى تحكّمها في جزء وازن من تجارة LNG العالمية. [61]

الجدول 2.4: مقارنة بين الوقود الاحفوري من منضور امن الطاقة

المؤشر	الغاز الطبيعي	النفط الخام	الفحم الحجري
احتياطي عالمي (سنة)	~52	~50	~132
مرونة التوصيل	عالية (LNG)	عالية	متوسطة
تنوع المنتجين	عالٍ	متوسط	عالٍ
حساسية السعر للأزمات	متوسطة	عالية جداً	منخفضة
قابلية التخزين	محدودة	عالية	عالية
البنية التحتية المطلوبة	مكثّفة	معتدلة	بسيطة

3.2.4. تكاليف عمليات المعالجة

لا يخرج الغاز الطبيعي من باطن الأرض بالصورة التي يُستخدم بها نهائياً؛ بل يمرّ عادةً بسلسلة من العمليات التقنية المتخصصة التي تُشكّل مجتمعةً ما يُعرف بـ'صناعة المعالجة أو التكرير'. وتشمل هذه العمليات: إزالة الرطوبة والمكثّفات، وفصل الهيدروكربونات الثقيلة كالايثان والبروبان والبيوتان، وإزالة مركبات الكبريت والكبريت الهيدروجيني (H_2S) وتقليص مستوى ثاني أكسيد الكربون.

وتتباين تكاليف هذه العمليات تبايناً ملحوظاً تبعاً لعوامل متعددة، أبرزها: تركيبة الغاز الخام، والتقنيات المستخدمة، والطاقة الإنتاجية للمنشأة، وتكاليف الطاقة المحلية، والقيود البيئية المفروضة. ففي حقول الغاز الحامضية ترتفع التكاليف بصورة لافتة بسبب الحاجة إلى منشآت كبريت متخصصة كمحطات H_2S ذات المحتوى العالي من كلاوس. [62]

وتجدر الإشارة إلى أن التطور التكنولوجي المتواصل أسهم في خفض هذه التكاليف بصورة ملموسة خلال العقد الماضي. فبفضل الذكاء الاصطناعي والأتمتة الصناعية، باتت كثير من عمليات الرصد والتشخيص تجري في الزمن الفعلي، مما يقلّص وقت التوقف عن العمل ويُحسّن نسب الاسترداد. كذلك أفضى التوسّع في بناء المصانع المتكاملة

(Modular Plants) إلى تقليص التكاليف الرأسمالية في الحقول النائية.. [63]

الجدول 3.4: تفصيل تكاليف مراحل معالجة الغاز الطبيعي

مرحلة المعالجة	التكلفة التقريبية (\$/مليون BTU)	النسبة من التكلفة الكلية (%)	التقنية الرئيسية
فصل المكثفات والمياه	0.08 - 0.15	8 - 12	Separateurs triphasiques
إزالة الرطوبة	0.05 - 0.10	5 - 8	Glycol dehydration
إزالة CO ₂ و H ₂ S	0.20 - 0.45	20 - 35	Amine absorption
وحدة استرداد الكبريت	0.15 - 0.30	15 - 22	Procédé Claus
فصل الهيدروكربونات الثقيلة	0.10 - 0.22	10 - 18	Cryogenic extraction
الضغط والتسييل	0.25 - 0.60	25 - 35	Liquéfaction LNG

3.4. الأثر البيئي لعمليات المعالجة

1.3.4. الكبريت

تنتج عمليات معالجة الغاز الطبيعي كميات وازنة من المواد الثانوية التي تستدعي إدارة دقيقة ومنهجية، ولعل أبرز هذه المواد هو الكبريت الصلب الذي يُستخلص أساساً بموجب اتفاقيات بيئية صارمة تحول دون إطلاق غاز ثاني أكسيد الكبريت (SO₂) في الغلاف الجوي. ويُمثل الكبريت الناتج عن عمليات المعالجة ما يزيد على 90% من الإنتاج العالمي للكبريت الأولي. (Elemental Sulfur)

وتعتمد معظم مصافي الغاز الطبيعي الحديثة على ما يُعرف بمحطة إزالة الغازات الحمضية (AGR - Acid Gas Removal) لإزالة H₂S وتحويله إلى كبريت عنصري صلب، يعقبها معالج "كلاوس" (Claus Unit) الذي ترفع نسبة الاسترداد فيه من نحو 95% إلى 96%، ثم وحدة معالجة ذيل الغاز (TGU - Tail Gas Unit) مما يقلص SO₂ المنبعثة إلى أقصى حد ممكن (99.9%).

الجدول 4.4: مقارنة تقنيات استرداد الكبريت من الغاز الطبيعي الحامضي

الملاحظات	التكلفة النسبية	كفاءة استرداد الكبريت (%)	التقنية
الأساس في معظم المنشآت	منخفضة	94 - 96	وحدة كلاوس (مرحلتان)
للحقول الحمضية	متوسطة	97 - 98	وحدة كلاوس (3 مراحل)
لمعالجة ذيل الغاز	مرتفعة	99.5 - 99.8	SCOT / SuperClaus
معايير أوروبية صارمة	مرتفعة جداً	99.9+	Euroclaus / LoCAT

ولا يقتصر الأثر البيئي لعمليات المعالجة على إدارة الكبريت، بل يمتد ليشمل سوائل الحفر، والمياه المصاحبة المحملة بالمعادن الثقيلة والهيدروكربونات، وغازات الحرق (Flaring)، والانبعاثات المتسربة من صمامات ووصلات المنشأة وقد باتت هذه العناصر تخضع لأطر تنظيمية صارمة في معظم دول العالم، مع توجه متزايد نحو الالتزام بمعايير البنك الدولي في مجال الحرق الصناعي والانبعاثات. حيث [65]

2.3.4. سوائل الحفر [66]

سوائل الحفر نظام كيميائي معقد يؤدي وظائف متعددة داخل البئر، لكن مخلفاته خاصة الفتاتات الصخرية المشبعة بالسائل تحمل معادن ثقيلة كالباريوم والرصاص وتركيبات كيميائية ضارة. التخلص منها بدون معالجة يُلوث التربة والمياه الجوفية، وفي البيئات البحرية يُضر بالأحياء القاعية مباشرة

الجدول 5.3: تصنيف سوائل الحفر وخصائصها البيئية

القيود التنظيمية	الخطورة البيئية	نوع السائل
مقبول مع قيود	منخفضة-متوسطة	الطين المائي (WBM)
محظور بحرياً في أغلب الدول	عالية جداً	الطين الزيتي (OBM)
مقبول بعد معالجة	متوسطة	الطين الاصطناعي (SBM)

أساليب التعامل

- إعادة استخدام السائل وتأهيله: تُصَفَّى السوائل وتُعدَّل كيميائياً لإعادة توظيفها في الحفر التالي، مما يُخفّض حجم النفايات 30-50%.

- الحقن تحت الأرض (CRI): تُطحن الفتاتات وتُحقن في طبقات جيولوجية معزولة وتعد الخيار الأمثل في البيئات البحرية.

- المعالجة الحرارية (Thermal Desorption): تُطرد الزيوت بالحرارة، فتُنتج مواد صلبة آمنة قابلة لإعادة الاستخدام.

- الترسيب الكيميائي: للسوائل المائية الأقل خطورة، يُرسَّب الملوثون قبل التصريف

3.3.4. المياه المصاحبة [67]

كل برميل نفط يصحبه في المتوسط ثلاثة أضعاف كميته مياهًا مصاحبة في مرحلة البئر الناضجة، وقد يرتفع الرقم أكثر. هذه المياه محملة بمعادن ثقيلة كالرصاص والزرنيخ والباريوم، وبهيدروكربونات ذائبة (BTEX) شديدة السمية وسرطانية. تصريفها دون معالجة يُدمّر الأحياء المائية ويُلوث الموارد المائية السطحية والجوفية.

الجدول 6.4: نطاقات التركيزات النموذجية للملوثات في المياه المصاحبة

الخطر الرئيسي	النطاق (mg/L)	الملوث
سام للأحياء المائية	50–500	مجموع الهيدروكربونات (TPH)
رواسب ضارة بالبيئة	200–1,500	الباريوم (Ba)
يضر الجهاز العصبي	1–60	الرصاص (Pb)
سرطاني، شديد السمية	1–300	(BTEX) بنزين وتوابعه

أساليب التعامل

تسير المعالجة في مراحل متتابعة :

- فصل أولي (فاصل ثلاثي الأطوار): يُزيل النفط الحر والغاز بكفاءة 90–95%.
- إزالة النفط المستحلب (مُوجّد كهربائي / طاردة مركزية): يُصَفّي القطيرات الدقيقة.
- إزالة المعادن الثقيلة (ترسيب كيميائي + تبادل أيوني): يُزيل Pb و Ba و As بكفاءة 90–99%.
- معالجة متقدمة (تناضح عكسي + فحم مُنشّط): يُزيل BTEX والأملاح الكلية.

4.3.4. غازات الحرق [68]

حين لا يجد الغاز المصاحب بنية تحتية للنقل أو استخدامًا اقتصاديًا، يُحرق في الهواء الطلق. يُقدّر البنك الدولي أن ما فوق 144 مليار متر مكعب أُحرق في 2022 وحده. الحرق غير الكامل الأكثر شيوعًا يُنتج ميثانًا وسخامًا (Black Carbon) ومركبات BTX السرطانية، إضافةً إلى CO₂

أساليب التعامل

- حقن الغاز في المكمن: (Re-injection) يُلغى الحرق ويُعزز الإنتاج في آبار واحد ويعد الخيار الأمثل.
- توليد الكهرباء محليًا: يُستخدم الغاز لتشغيل توربينات تخدم المنشأة أو المجتمعات القريبة.
- ضغط الغاز وتسييله: (Micro-LNG / CNG) مناسب حين لا تتوافر خطوط أنابيب.
- استخدامه وقودًا داخليًا: يُحرق في محطات الطاقة بدلًا من الحرق المفتوح، فيقلّ الانبعاثات بفارق كبير.

5.3.4. الانبعاثات المتسرّبة [69]

من صمام مُتآكل أو وصلة مُرخاة أو حشوة بالية تتسرب كميات من الغاز بصمت مستمر. دراسات أمريكية قدّرت هذه التسرّبات بـ 1.5-3% من إجمالي إنتاج الغاز—وهو ما يُعادل في تأثيره المناخي احتراق مئات الملايين من أطنان الفحم سنوياً. المادة الأخطر هنا هي الميثان؛ غاز دفيئة يفوق CO₂ في قوته التسخينية 28 ضعفاً على مدى مئة عام.

الجدول 7.3: مصادر الانبعاثات المتسربة في منشآت النفط والغاز ونسبها التقريبية

نسبة تقريبية من إجمالي التسرّبات	مصدر التسرّب
32-38%	صمامات العزل والتحكم
22-26%	وصلات الأنابيب والحواف
18-22%	محاور المضخات والضواغط
10-14%	أجهزة القياس والضبط
6-10%	مزايا التفريغ والتنفيس

أساليب التعامل

- برامج (LDAR) هو برنامج رصد دوري ممنهج يجمع بين الكشف والإصلاح. أبرز تقنياته:
- كاميرا التصوير الحراري: OGI تُصوّر الغازات المتسرّبة كأنها دخان مرئي—تمسح 1000 مكوّن يومياً.
- كاشف الليزر عن بُعد: (TDLAS) دقة عالية ومدى أطول، مناسب للمنشآت الكبيرة.
- طائرات مسيرة بمسشعرات: تُغطي الحقل بالكامل في ساعات.
- الكشف اليدوي (PID): رغوّة + اقتصادي للصيانة الدورية في المناطق الصغيرة.

4.4. تقليل الانبعاثات الكربونية

الانبعاثات الكربونية في صناعة الغاز الطبيعي

تُشكل قضية الانبعاثات الكربونية المتولدة عن صناعة الغاز الطبيعي محوراً حاسماً في النقاشات المناخية والتنظيمية المعاصرة؛ فرغم أن الغاز يُصنّف الوقود الأحفوري الأقل كثافة كربونية، إلا أن عمليات إنتاجه ونقله ومعالجته تنطوي على انبعاثات من ثاني أكسيد الكربون والميثان قد تُلغي جزءاً كبيراً من مزاياه المناخية إذا لم تُدار بكفاءة عالية.

مصادر الانبعاثات في سلسلة قيمة الغاز الطبيعي:

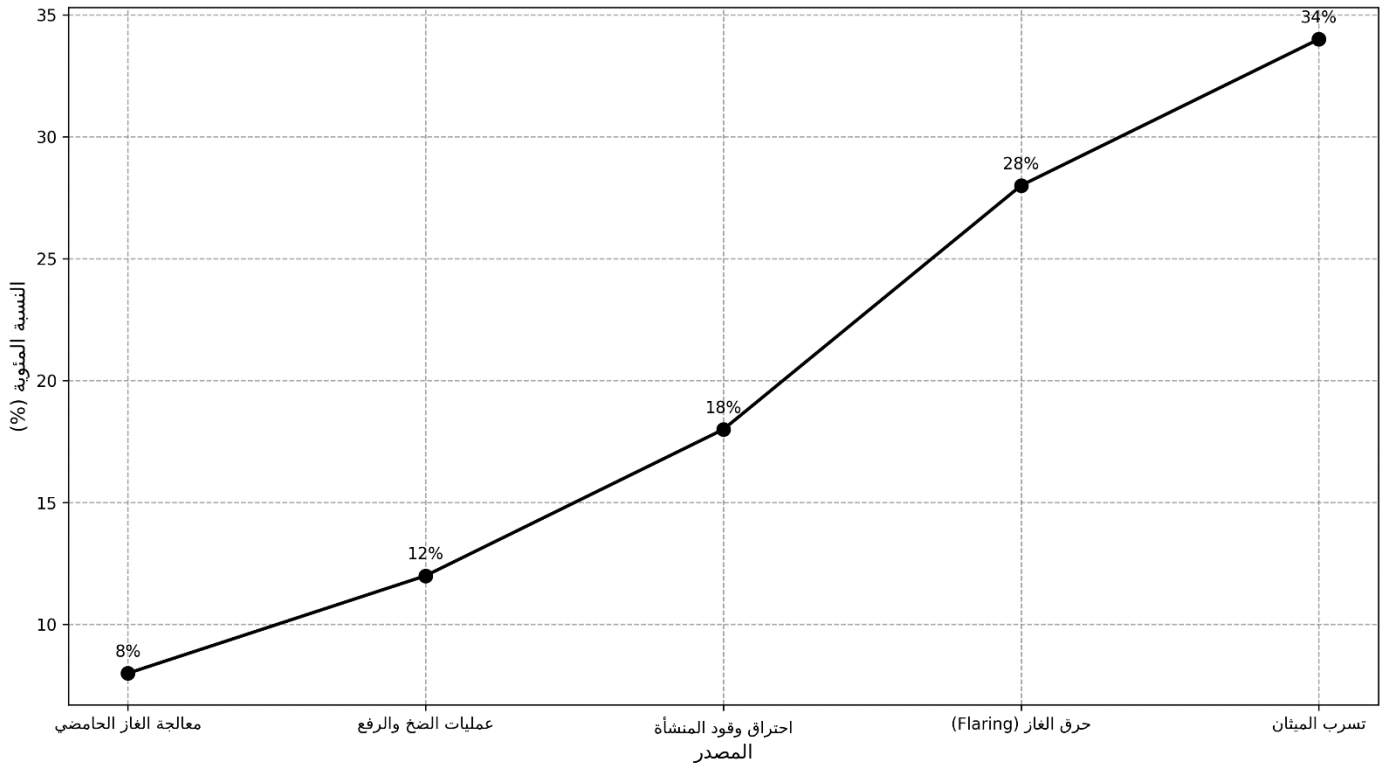
تتوزع هذه الانبعاثات على ثلاث فئات:

1. انبعاثات الاحتراق المباشر: عند توليد الطاقة اللازمة لتشغيل المنشأة.
2. غازات الحرق: (Flaring) التي تمثل هدرًا صناعيًا وبيئيًا في آن واحد.
3. التسربات الميثانية: (Fugitive Emissions) التي باتت تستقطب اهتماماً علمياً وتشريعياً متصاعداً [70].

المقاربات التقنية والإدارية لتقليص الأثر الكربوني:

- في مواجهة هذه التحديات، طورت الصناعة جملة من المقاربات الهادفة إلى تقليص الأثر الكربوني، ولعل أبرزها:
 - **تقنيات احتجاز الكربون وتخزينه (CCS - Carbon Capture and Storage)** التي تُخزن الكربون في طبقات جيولوجية عميقة بدلاً من إطلاقه في الغلاف الجوي. وقد خطت هذه التقنيات خطوات واسعة في السنوات الأخيرة، وإن ظلت تكاليفها مرتفعة مقارنة بالبداية التشغيلية الأخرى.
 - **مبادرات الحد من حرق الغاز**: تكتسب هذه المبادرات زخماً تشريعياً واسعاً، إذ تبنت مجموعة من أبرز الدول المنتجة هدف "وضع حد للحرق الروتيني" بحلول عام 2030 في إطار مبادرة البنك الدولي (GGFR - Global Gas Flaring Reduction Partnership). وتجدر الإشارة إلى أن إجمالي الغاز المحروق في العالم انخفض من نحو 150 مليار متر مكعب عام 2019 إلى أقل من 137 مليار متر مكعب عام 2023. [70].

الشكل 1.3: توزيع مصادر الانبعاثات في صناعة معالجة الغاز الطبيعي (%)



5.4. الآفاق المستقبلية للغاز الطبيعي

1.5.4. الغاز الطبيعي والتحول الطاقوي العالمي

يشهد العالم، منذ مطلع العقد الثالث من الألفية الثالثة، تحولاً طاقوياً غير مسبوق في سرعته وعمقه وتعقيده. ويُجمع معظم المحللين والمؤسسات الدولية المتخصصة على أن هذا التحول لن يكون نقلة آنية من الوقود الأحفوري إلى الطاقات المتجددة، بل سيمر حتماً بمرحلة انتقالية قد تمتد لعقود.

ويلعب فيها الغاز الطبيعي دوراً محورياً بوصفه وقوداً جسرياً (Bridge Fuel) ، يُقلص الانبعاثات الفورية في انتظار بلوغ الطاقات المتجددة درجة النضج الاقتصادي والتقني الكاملة.

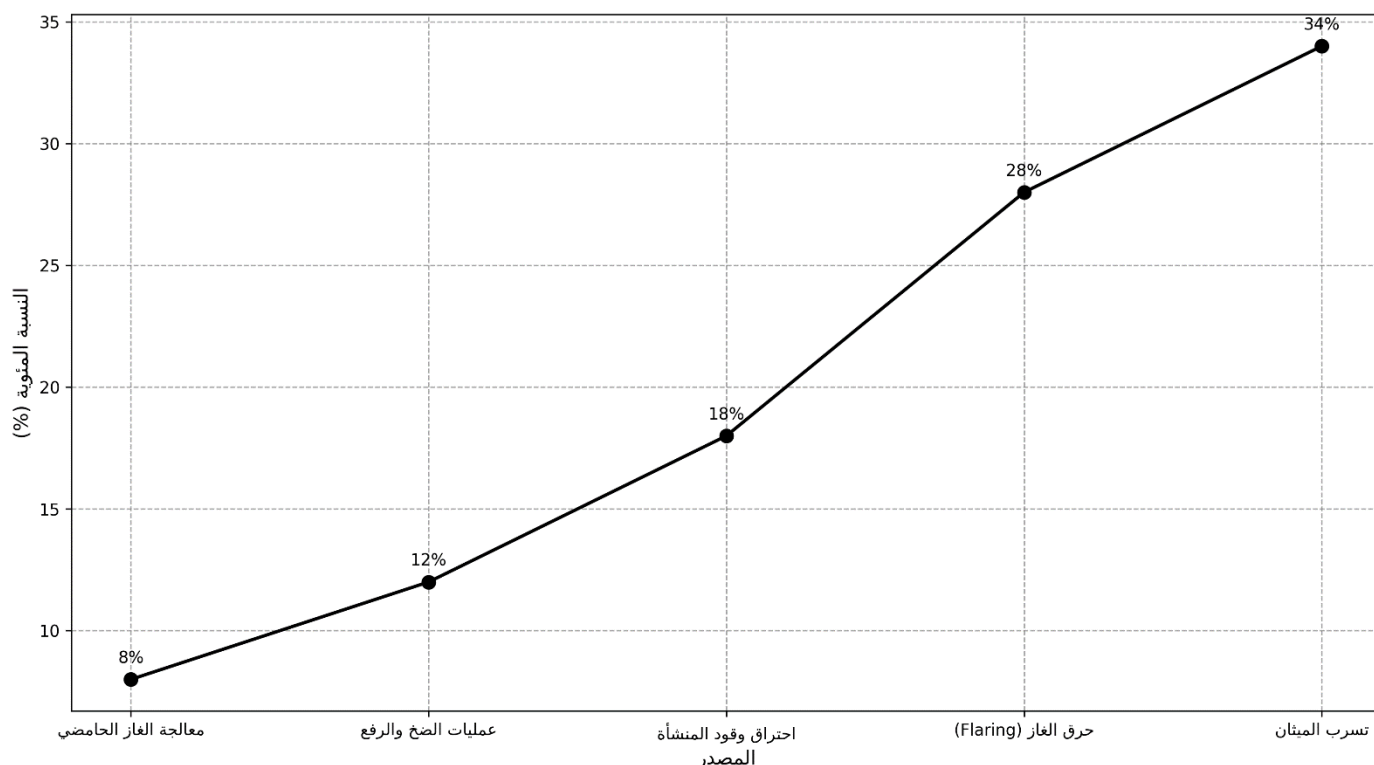
وتستند هذه الرؤية إلى جملة من الحقائق التقنية والاقتصادية الموضوعية، أبرزها أن توليد الكهرباء من الغاز يُنتج ما يقارب نصف انبعاثات CO₂ التي يُفرزها الفحم الحجري بالكمية ذاتها من الطاقة. فضلاً عن ذلك، تتوفر لدى الغاز قابلية استجابة فائقة لتلبية الطلب، مما يجعله الرديف المثالي لمصادر الطاقة المتجددة المتقطعة، كطاقة الشمس وطاقة الرياح التي لا تعمل على مدار الساعة [72].

الجدول 8.3: مقارنات سيناريوهات حصة الغاز الطبيعي في مزيج الطاقة العالمي عام 2050

الملاحظات	المرجعية	حصة الغاز الطبيعي عام 2050 (%)	السيناريو
نمو معتدل	IEA 2023	24	استمرار السياسات الحالية (STEPS)
انخفاض تدريجي	IEA 2023	20	سياسات معلنه (APS)
تراجع حاد	IEA 2023	11	صافي انبعاثات صفري (NZE)
نمو منخفض	McKinsey 2023	16	سيناريو مكنزي للانتقال السريع
نمو ثابت	BP 2023	22	سيناريو BP للتطور (Evolving Transition)

رسم تقرير "آفاق الطاقة العالمية" الصادر عن وكالة الطاقة الدولية سيناريوهات متباينة لمستقبل الغاز؛ ففي سيناريو بحلول عام 2050، يتراجع الطلب العالمي على الغاز تراجعاً ملموساً في الوصول إلى انبعاثات صفرية صافية (NZE) في النصف الثاني من هذا القرن. غير أن هذا السيناريو يستلزم استثمارات ضخمة في البنية التحتية للطاقات المتجددة وفي تقنيات الهيدروجين والكفاءة الطاقوية، وهي استثمارات لا تزال تواجه عقبات تمويلية وتنظيمية جوهرية. ولهذا، يُرجّح في معظم السيناريوهات الواقعية أن يظل الطلب العالمي على الغاز مرتفعاً حتى عام 2040 على أقل تقدير، ليشهد انحساراً تدريجياً بعد ذلك في ضوء مدى سرعة نشر الطاقات المتجددة وتطور تخزين الطاقة. ويبدو جلياً أن مستقبل الغاز لن يُحدده الوفرة الجيولوجية بقدر ما سٌحدده السياسات المناخية وتطور المنافسة من الطاقات البديلة. [73]

الشكل 4.2: توزيع استهلاك الغاز الطبيعي حسب القطاعات (%)



2.5.4. الغاز الطبيعي بديلاً أنظف للفحم والنفط

ينضر الى الغاز الطبيعي بوصفه بديلاً أنظف للفحم والنفط على ثلاثة محاور رئيسية متشابكة: أولها المحور البيئي الكمّي القائل بأن الغاز يُنتج انبعاثات ثاني أكسيد الكربون أقل عند الاحتراق، وثانيها المحور التقني المتمثل في سهولة تكيف البنى التحتية الراهنة للتعامل مع الغاز بدلاً من الفحم، وثالثها المحور الاقتصادي المرتكز على تنافسية أسعار الغاز وقدرته على تأمين الأمن الطاقوي في مرحلة انتقالية.

فمن الزاوية الكربونية الصرفة، تُشير البيانات الدولية إلى أن احتراق الغاز الطبيعي لإنتاج كيلوواط/ساعة من الكهرباء يُفرز نحو 400-450 غرام من CO_2 مقارنةً بـ 800-950 غراماً لاحتراق الفحم. وهذه الفجوة الكبيرة تجعل التحول من الفحم إلى الغاز في محطات الكهرباء ذا أثر فوري وملحوس على خفض انبعاثات الكربون. [74]

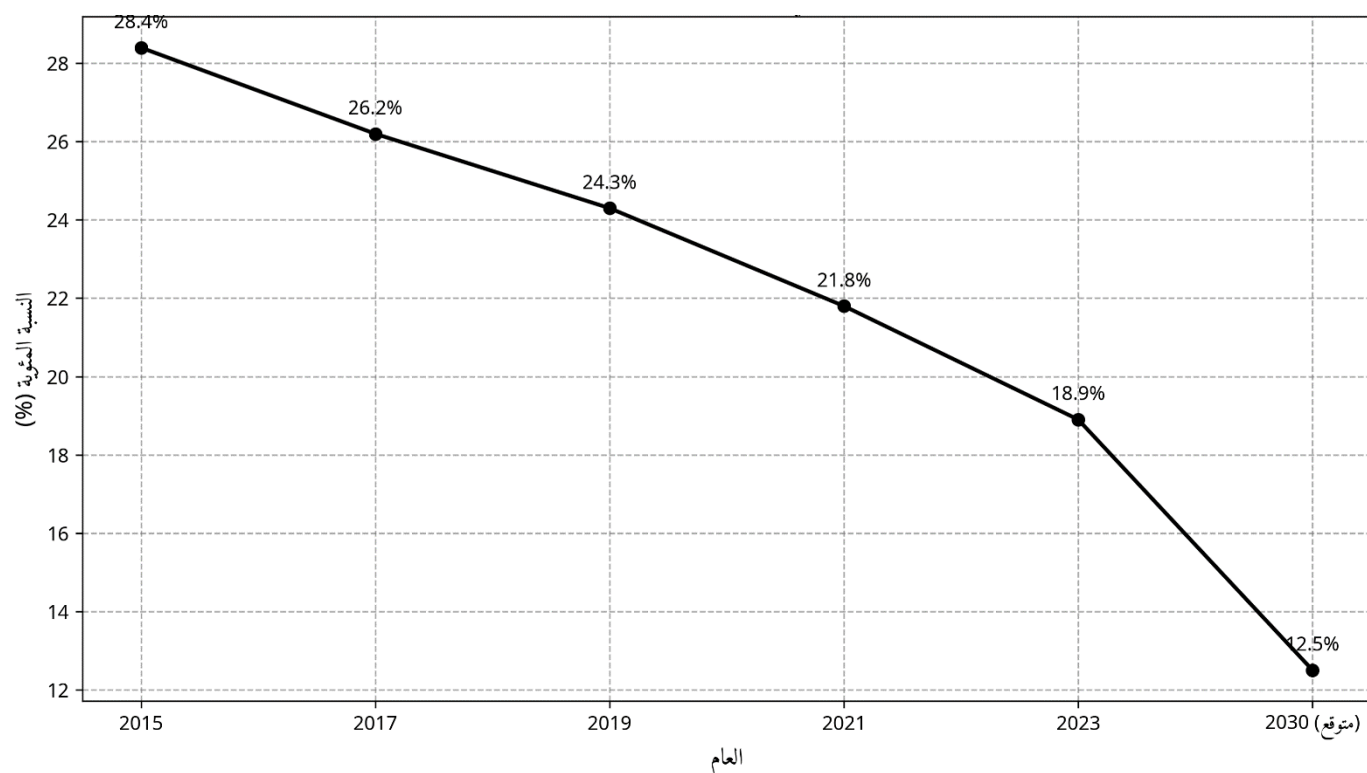
الجدول 9.4: مقارنة الانبعاثات الرئيسية لمصادر الوقود الاحفوري عند الاحتراق لتوليد الكهرباء

مصدر الطاقة	انبعاثات CO_2 (غ/كيلوواط-ساعة)	انبعاثات SO_2 (غ/GJ)	انبعاثات NO_x (غ/GJ)	أكسيد الكربون الأحادي (غ/GJ)
الفحم الحجري	820 - 950	701	170	430
الفحم الأسمر (ليغنيت)	1000 - 1200	1200	190	580
النفط الثقيل (Fuel Oil)	600 - 700	480	195	260
النفط الخفيف (Gasoil)	520 - 580	76	143	192

مصدر الطاقة	انبعاثات CO ₂ (غ/كيلوواط-ساعة)	انبعاثات SO ₂ (غ/GJ)	انبعاثات NO _x (غ/GJ)	أكسيد الكربون الأحادي (غ/GJ)
الغاز الطبيعي	370 - 450	0.68	54	15

إذ يُشير الباحثون المتخصصون إلى أن ظاهرة تسربات الميثان قد تُضعف المزايا المناخية للغاز إذا تجاوزت معدلات التسرب عتبة معينة تتراوح بين 2% و3%. وذلك لأن الميثان يمتلك قدرة على الاحترار العالمي (GWP) تفوق قدرة ثاني أكسيد الكربون بنحو 25 مرة على مدى مئة سنة، ونحو 87 مرة على مدى عشرين سنة. وتنتج الصناعة لمعالجة هذا الإشكال نحو توظيف الأقمار الاصطناعية وطائرات الرصد الجوي المتخصصة للكشف عن التسربات، إضافة إلى برامج قياس وإبلاغ تضمن مراجعة بيئية لشركات الغاز. وفي المحصلة، تقع قضية التحول الطاقوي في منظومة الغاز الطبيعي ضمن مسألة خاضعة لمتغيرات سياسية واقتصادية وتقنية متداخلة. غير أن الاتجاه الغالب في الأبحاث الأكاديمية والتقارير الدولية يميل إلى الاعتراف بأن الانتقال الذي لا مفر منه، مع التأكيد في الوقت ذاته على ضرورة إرساء أطر تنظيمية صارمة للحد من انبعاثاته وتسرباته، حتى لا يصبح "الجسر" أطول مما تقتضيه الضرورة المناخية [75].

الشكل 4.3: توزيع استهلاك الغاز الطبيعي حسب القطاعات



6.4. خاتمة

تلخص الدراسة في فصلها الأخير إلى أن الغاز الطبيعي يشكل ركيزة استراتيجية في الأمن الطاقوي العالمي، مع تزايد أهميته الاقتصادية بفضل التطور التكنولوجي الذي خفّض تكاليف معالجته. ورغم التحديات البيئية المرتبطة بالانبعاثات والنفايات الصناعية، فإن تبني تقنيات حديثة مثل احتجاز الكربون يجعل منه وقوداً انتقالياً حاسماً؛ فهو يربط بين الطاقة التقليدية والمتجددة، مما يستوجب موازنة دقيقة بين تلبية احتياجات الطاقة العالمية والالتزام بالمعايير البيئية لضمان تنمية مستدامة.

خاتمة عامة

في ختام هذه الدراسة، يتجلى لنا بوضوح أن الغاز الطبيعي ليس مجرد مصدر للطاقة، بل هو محور استراتيجي تتشابك حوله أبعاد اقتصادية، بيئية، وجيوسياسية معقدة. لقد أثبت هذا العمل أن هذا المورد الحيوي يحظى بدور حاسم في تلبية الطلب العالمي المتزايد على الطاقة، مع تقديم ميزة بيئية نسبية مقارنة بالوقود الأحفوري التقليدي، مما يجعله وقوداً انتقالياً لا غنى عنه في مسيرة التحول الطاقوي نحو مستقبل أكثر استدامة. لقد استعرضنا رحلة الغاز الطبيعي الشاقة، بدءاً من أعماق الأرض حيث تتشكل مكانه، مروراً بعمليات الاستكشاف والاستخراج التي تتطلب دقة هندسية وتكنولوجية متطورة فائقة، وصولاً إلى مراحل المعالجة والتنقية التي تحوله من غاز خام محمل بالشوائب إلى منتج نظيف وصالح للاستخدام التجاري.

كما تناولنا تعقيدات منظومات النقل والتخزين، سواء عبر شبكات الأنابيب المترامية الأطراف أو من خلال تقنيات الغاز الطبيعي المسال (LNG) التي فتحت آفاقاً جديدة للتجارة العالمية، مؤكدين على الدور المحوري لتقنيات التخزين الجوفي في ضمان أمن الإمدادات ومواجهة التقلبات الموسمية في الطلب. إن التحديات التي تواجه صناعة الغاز الطبيعي، من تقلبات الأسواق العالمية إلى المخاوف البيئية المتعلقة بالانبعاثات وتسربات الميثان، تتطلب حلولاً مبتكرة وتعاوناً دولياً. وفي هذا السياق، تبرز أهمية الاستثمار في التقنيات الحديثة لاحتجاز الكربون، والحد من حرق الغاز، وتطوير برامج وطرق رصد التسربات وإصلاحها.

إن فهم هذه الأبعاد المترابطة، والتعامل معها بمنهجية علمية وعملية، هو السبيل للاستفادة من هذا المورد، وضمان مساهمته الفعالة في تحقيق التوازن بين متطلبات التنمية الاقتصادية والحفاظ على بيئة كوكبنا للأجيال القادمة. فالغاز الطبيعي، بمرونته وكفاءته، يبقى عنصراً أساسياً في المشهد الطاقوي العالمي، ومفتاحاً لمستقبل طاقي أكثر أماناً

- [1]: Speight, James G. (2018). Natural Gas: A Basic Handbook. Gulf Publishing Company. p. 45 .
- [2]: Mokhatab, Saeid; Poe, William A.; & Mak, John Y. (2012). Handbook of Natural Gas Transmission and Processing. Gulf Professional Publishing. p. 181
- [3] : حمادي عبد الرؤوف؛ وتومي صالح. نمذجة ومحاكاة وحدة تجزئة سوائل الغاز الطبيعي باستخدام برنامج HYSYS. جامعة الشهيد حمة لخضر بالوادي، (2023). ص. 22. [1]
- [4]: سعودي عبد القادر؛ و خلفه عيسى. دراسة وتحسين أداء وحدة نزع الماء بالامتزاز. جامعة الشهيد حمة لخضر بالوادي، (2022) ص. 35.
- [5]: Kidnay, Arthur J.; Parrish, William R.; & McCartney, Daniel G. Fundamentals of Natural Gas Processing. CRC Press.(2011) .p 138
- [6]: speight, James G. Natural Gas: A Basic Handbook. Gulf Publishing Company. (2018).p. 4
- [7]: الشاروني، خالد. (2010). كتاب هندسة تكرير البترول ومعالجة الغاز الطبيعي. دار الكتب العلمية للنشر والتوزيع، ص 243.
- [8]: رضواني، محمد؛ وساسي، علي. المشاكل التقنية في وحدات معالجة الغاز الطبيعي: دراسة حالة وحدة إزالة الغازات الحمضية. جامعة الشهيد حمة لخضر بالوادي، (2021). ص. 12.
- [9]:Guo, B., & Ghalambor, A. (2012/2014/2016). Natural Gas Engineering Handbook (2nd ed.). Gulf Publishing Company p(1_6)
- [10]: Handbook of Natural Gas Transmission and Processing – Saeid Mokhatab et al., 2012, Chapter 1 (Gas Density), pp. 10–15
- [11]:عمر، محمود أبو زيد. (2007). صناعة الغاز الطبيعي. دار الكتب العلمية، ص 19.
- [12]: Mokhatab, S., Poe, W. A., & Speight, J. G. (2018). Handbook of Natural Gas Transmission and Processing.4th Edition, Page 11.
- [13]: Campbell, J. M. (2014). Gas Conditioning and Processing (Vol. 1). Campbell Petroleum Series.p(5_2)
- [14]: Campbell, J. M. (2014). Gas Conditioning and Processing (Vol. 1). Campbell Petroleum Series.p(5_2)

- [15]: Speight, J. G. (2018). *Natural Gas: A Basic Handbook*. 2nd Edition, Page 42.
- [16]: Mokhatab, Saeid; Poe, William A.; & Mak, John Y. *Handbook of Natural Gas Transmission and Processing*. Gulf Professional Publishing.(2012). p. 42.
- [17]:Guo, B., & Ghalambor, A. (2014). *Natural Gas Engineering Handbook*. 2nd Edition, Page 34.
- [18]:Speight, J. G. (2018). *Natural Gas: A Basic Handbook*. 2nd Edition, Page 48
- [19]: Speight, J. G. (2018). *Natural Gas: A Basic Handbook*. Second Edition. Gulf Professional Publishing (Elsevier).
- [20]: Speight, J. G. (2018). *Natural Gas: A Basic Handbook*. Second Edition. Gulf Professional Publishing (Elsevier).
- [21]: Speight, J. G. (2018). *Natural Gas: A Basic Handbook*. Second Edition. Gulf Professional Publishing (Elsevier).
- [22]: Speight, J. G. (2018). *Natural Gas: A Basic Handbook* (2nd ed.). Gulf Professional Publishing (Elsevier), p. 105–107.
- [23]: James G. Speight (2018). *Natural Gas: A Basic Handbook* (2nd ed.). Gulf Professional Publishing (Elsevier), p. 109–110.
- [24]: الضبع، محمد بن أحمد؛ وباسي، طارق محمد. أساسيات هندسة حفر آبار النفط. الرياض: جامعة الملك سعود، النشر العلمي والمطابع، (2012). ص. 45-52.
- [25]:Gadallah, M. R., & Fisher, R. (2009). *Exploration Geophysics*. Springer Science & Business Media. Page 11.
- [26]: Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2013). *An Introduction to Geophysical Exploration* (3rd ed.). Blackwell Publishing, Oxford, pp. 44-58
- [27]: بن علي، عبد القادر؛ بن عيسى، أحمد. تقنيات استغلال الغاز غير التقليدي – دراسة التكسير الهيدروليكي. جامعة قاصدي مرباح ورقلة، (2018)
- [28]: Hevert, J. J. *Horizontal Drilling*. In L. W. Lake (Ed.), *Petroleum Engineering Handbook: Volume II Drilling Engineering*. Society of Petroleum Engineers. (2007). pp.(56

- [29]: Bourgoyne, A. T., Chenevert, M. E., Millheim, K. K., & Young, F. S. (1986). *Applied Drilling Engineering*. Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers p 11
- [30]: Mitchell, R. F., & Miska, S. Z. (2011). *Fundamentals of Drilling Engineering*. Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers. p. 341
- [31]: conomides, M. J., & Nolte, K. G. (2000). *Reservoir Stimulation* (3rd ed.). Chichester: John Wiley & Sons. p. 13-1
- [32]: Sarkar, A., & Subramanian, K. O. (2015). *Unconventional Gas Reservoirs: Evaluation, Appraisal, and Development*. Oxford, UK: Gulf Professional Publishing. p. 125
- [33]: Kidnay, A. J., Parrish, W. R., & McCartney, D. G. (2011). *Fundamentals of Natural Gas Processing* (2nd ed.). CRC Press. Page 5.
- [34]: Stewart, M., & Arnold, K. (2008). *Gas-Liquid Separators*. In: *Gas-Liquid And Liquid-Liquid Separators*. Gulf Professional Publishing. p. 45.
- [35]: Kohl, A. L., & Nielsen, R. B. (1997). *Gas Purification* (5th ed.). Gulf Professional Publishing. p. 40.
- [36]: Mokhatab, S., Poe, W. A., & Mak, J. Y. (2012). *Handbook of Natural Gas Transmission and Processing*. Gulf Professional Publishing. p. 320
- [37]: Speight, J. G. (2018). *Natural Gas: A Basic Handbook*. Gulf Publishing Company. p. 185.
- [38]: Mokhatab, S., Poe, W. A., & Mak, J. Y. (2012). *Handbook of Natural Gas Transmission and Processing (2nd ed.)*. Gulf Professional Publishing. p. 385.
- [39]: Kidnay, A. J., Parrish, W. R., & McCartney, D. G. (2011). *Fundamentals of Natural Gas Processing* (2nd ed.). CRC P315
- [40]: Rojey, A., et al. (1997). *Natural Gas : Production, Processing, Transport*. Editions Technip. p. 312. CT
- [41]: البياتي، فالح حسن. تكنولوجيا الغاز الطبيعي: الاستخراج، المعالجة، النقل. دار الكتب العلمية، بغداد. (2010) ص. 145.
- [42]: بوشمال، مريم؛ وبلقاسمي، حفصة. دراسة تقنية وتقييم أداء وحدات معالجة الغاز الطبيعي (وحدة الفصل وإزالة الغازات الحمضية). جامعة قاصدي مرباح - ورقلة. (2021) ص. 28.

(2010) [43]: دار الكتب العلمية، بغداد. *تكنولوجيا الغاز الطبيعي: الاستخراج، المعالجة، النقل*. البياتي، فالح حسن ص. 118

[44]: عبد العال، محمد نبيل. *تكرير البترول ومعالجة الغاز*. دار الفجر للنشر والتوزيع، القاهرة. (2015) ص. 244

[45]: البياتي، فالح حسن. *تكنولوجيا الغاز الطبيعي: الاستخراج، المعالجة، النقل*. دار الكتب العلمية، بغداد. (2010) ص. 145

[46]: Mokhatab, S., Poe, W. A., & Mak, J. Y. (2012). *Handbook of Natural Gas Transmission and Processing* (2nd ed.). Gulf Professional Publishing. Page 165.

[47]: Kidnay, A. J., Parrish, W. R., & McCartney, D. G. (2011). *Fundamentals of Natural Gas Processing* (2nd ed.). CRC Press. Page 138

[48]: Campbell, J. M. (2014). *Gas Conditioning and Processing, Vol. 2: The Equipment Modules* (9th Ed.), Chapter 18, p. 412

[49]: Speight, J. G. (2018). *Natural Gas: A Basic Handbook*. Gulf Publishing Company. Page 185.

[50]: Mokhatab, S., Poe, W. A., & Mak, J. Y. (2012). *Handbook of Natural Gas Transmission and Processing* (2nd ed.). Gulf Professional Publishing. Page 205

[51]: Kidnay, A. J., Parrish, W. R., & McCartney, D. G. (2011). *Fundamentals of Natural Gas Processing* (2nd ed.). CRC Press. Page 142.

[52]: Kidnay, A. J., Parrish, W. R., & McCartney, D. G. (2011). *Fundamentals of Natural Gas Processing* (2nd ed.). CRC Press. Page 317

[53]: Mokhatab, S., Poe, W. A., & Mak, J. Y. (2012). *Handbook of Natural Gas Transmission and Processing* (2nd ed.). Gulf Professional Publishing. Pages 315-318.

[54]: Speight, J. G. (2018). *Natural Gas: A Basic Handbook*. Gulf Publishing Company. Page 192.

[55]: Mokhatab, S., Poe, W. A., & Mak, J. Y. (2012). *Handbook of Natural Gas Transmission and Processing* (2nd ed.). Gulf Professional Publishing. Page 328.

[56]: Kidnay, A. J., Parrish, W. R., & McCartney, D. G. (2011). *Fundamentals of Natural Gas Processing* (2nd ed.). CRC Press. Pages 352-355.

- [57]: بوزيان، أحلام؛ وبن زروق، إيمان. دراسة تقنية لعملية تسهيل الغاز الطبيعي وتخزينه في المركبات الصناعية. جامعة قاصدي مرباح - ورقلة. (2021) ص. 35.
- [58]: Mokhatab, S., Poe, W. A., & Mak, J. Y.. (2019). Handbook of Natural Gas pp. 421-430 ،Transmission and Processing (4th ed.). Gulf Professional Publishing
- [59]: Mokhatab, S., Poe, W. A., & Mak, J. Y.. (2019). Handbook of Natural Gas pp. 421-430 ،Transmission and Processing (4th ed.). Gulf Professional Publishing
- [60]: Lochner, S., & Bothe, D.. (2019). The Development of Natural Gas Supply Costs to Europe, the United States and Japan in a Globalizing Gas Market. Energy pp. 1518-1528 ،Policy, Elsevier, 37(4)
- [61]: Foss, Michelle Michot (2020). Introduction to LNG: An Overview on Liquefied Natural Gas, Its Properties, the LNG Industry and Safety Considerations. Bureau of pp. 1-25 ،Economic Geology, University of Texas at Austin
- [62]: Foss, Michelle Michot (2020). Introduction to LNG. Bureau of Economic Geology, pp. 26-50 ،University of Texas at Austin
- [63]: IGU (International Gas Union). (2023). World LNG Report 2023. IGU Secretariat, pp. 18-40 ،Barcelona
- [64]: Foss, Michelle Michot (2020). Introduction to LNG. Bureau of Economic Geology, pp. 51-78 ،University of Texas at Austin
- [65]: Lochner, S., & Bothe, D.. (2019). The Development of Natural Gas Supply Costs to Europe, the United States and Japan in a Globalizing Gas Market. Energy Policy, Elsevier, pp. 1518-1528 ،37(4)
- [66]: Mokhatab, S., Poe, W. A., & Mak, J. Y.. (2019). Handbook of Natural Gas .pp. 470-490 ،Transmission and Processing (4th ed.). Gulf Professional Publishing
- [67]: Nwaoha, C., & Wood, D. A. (Eds.). (2019). Continuing Education in the Natural Gas pp. 213-240 ،Industry. Elsevier
- [68]: Nwaoha, C., & Wood, D. A. (Eds.). (2019). Continuing Education in the Natural Gas .pp. 241-260 ،Industry. Elsevier

- [69]: Mokhatab, S., Poe, W. A., & Mak, J. Y.. (2019). Handbook of Natural Gas pp. 470-490 ،Transmission and Processing (4th ed.). Gulf Professional Publishing
- [70]: Mokhatab, S., Poe, W. A., & Mak, J. Y.. (2019). Handbook of Natural Gas pp. 470-490 ،Transmission and Processing (4th ed.). Gulf Professional Publishing
- [71]: Nwaoha, C., & Wood, D. A. (Eds.). (2019). Continuing Education in the Natural Gas pp. 213-240 ،Industry. Elsevier
- [72]: Osiadacz, A. J., & Chaczykowski, M.. (2021). Simulation and Analysis of Gas .pp. 101-134 ،Networks. CRC Press
- [73]: Osiadacz, A. J., & Chaczykowski, M.. (2021). Simulation and Analysis of Gas .pp. 101-134 ،Networks. CRC Press
- [74]: BP Statistical Review of World Energy. (2023). 72nd Edition. British Petroleum pp. 28-35 ،Company, London
- [75]: BP Statistical Review of World Energy. (2023). 72nd Edition. British Petroleum pp. 36-42 ،Company, London
- [76]: (ACER). (2022). Annual Report on the Results of Monitoring the Internal Electricity ،and Natural Gas Markets 2022. Publications Office of the European Union, Luxembourg pp. 76-90
- [77]: عيسى، فاروق. (2020). تقنيات البترول والغاز: مدخل متكامل. دار الفكر الجامعي، القاهرة، ص ص 260-289.
- [78]: عيسى، فاروق. (2020). تقنيات البترول والغاز: مدخل متكامل. دار الفكر الجامعي، القاهرة، ص ص 260-289.
- [79]: [Foreign Ref] BP Statistical Review of World Energy 2023. London: British Petroleum, pp. 34-41.
- [80]: International Energy Agency (2023). Gas Market Report Q4-2023. Paris: IEA, pp. 12-19.
- [81]: Yergin, D. (2020). The New Map: Energy, Climate, and the Clash of Nations. New York : Penguin Press, pp. 87-102.
- [82]: Simmons, M. R. (2020). Energy Security in the 21st Century. London : Oxford University Press, pp. 56-70.

[83]: بن عزة، محمد2020. ()اقتصاديات صناعة الغاز الطبيعي في الجزائر. الجزائر :ديوان المطبوعات الجامعية،

- [84]: Wood Mackenzie (2023). Global Gas Processing Cost Benchmarking Report. Edinburgh: Wood Mackenzie Ltd., pp. 22-35
- [85]: Speight, J. G. (2018). Natural Gas: A Basic Handbook (2nd ed.). Oxford: Gulf Professional Publishing, pp. 265-290.
- [86]: الصيد، عبد الرحمن (2022). الكبريت الصناعي بين الإنتاج والاستثمار. طرابلس: المنظمة العربية للتنمية الصناعية والتعدين، ص. 31-44
- [87]: بلمختار، عبد القادر. الأبعاد الاقتصادية والبيئية لصناعة الغاز الطبيعي (أطروحة دكتوراه)، جامعة الجزائر 3، 2014. ص 40.
- [88]: بلمختار، عبد القادر. (2014). الأبعاد الاقتصادية والبيئية لصناعة الغاز الطبيعي (أطروحة دكتوراه)، جامعة الجزائر 3، ص 41.
- [89]: البنك الدولي. تقرير تتبع حرق الغاز العالمي 2022 (Global Gas Flaring Tracker Report) ، الشراكة العالمية للحد من حرق الغاز (GGFR) ، ص. 9-11
- [90]: International Energy Agency (IEA). (2024). Global Methane Tracker 2024. Paris: IEA, pp. 25–31.
- [91]: IPCC (2023). Climate Change 2023: Mitigation of Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 660-695.
- [92]: معهد البترول العربي (2023). تقرير الانبعاثات الكربونية في قطاع الطاقة العربي. الكويت: معهد البترول العربي، ص. 91-108
- [93]: International Energy Agency (2023). World Energy Outlook 2023. Paris: IEA Publications, pp. 156-185
- [94]: ALECSO المنظمة العربية للتربية والثقافة والعلوم (2023). الطاقة المتجددة والتحول الطاقوي في الوطن العربي. تونس ص. 77-94
- [95]: العمادي، حسين (2022). الغاز الطبيعي في مرحلة التحول الطاقوي. الدوحة: المعهد العربي للتخطيط، ص. 112-130.
- [96]: Howarth, R. W. (2022). Methane and Climate Change. Nature Energy, 7(1), pp. 29-38