

# BRIQ

Belt & Road Initiative Quarterly



On its 70th Anniversary

## From Bandung to BRICS The Emergence of the Global South Against Hegemonism

**BELKACEM IRATNI**

From the Bandung Basic Initiation to  
a New Concept of Non-Alignment

**INTERVIEW**

**SEMIH KORAY**

"From 'non-alignment' to shared development  
and cooperation of national states"

**ZHANG QINGYI & DU DONGHUI**

Revisiting the Bandung Legacy  
in Indonesian Foreign Policy

**CÜNEYT AKALIN**

Bandung Spirit is 70 Years Old

**FANG XUTING**

New China's Foreign Policy Before and After  
the Bandung Conference

**G. ÇİFCİ, S. S. ÇELEBİ, M. PARLAKTUNA,**

**A. KAÇAR, S. O. GÜNAYDIN**

Gas Hydrates as  
a New Energy Resource

**POEM**

**AGUS R. SARJANO**

Fake Poem (Sajak Palsu)

**POEM**

**ENVER GÖKÇE**

War Of 39

# Gas Hydrates as a New Energy Resource



---

**GÜNAY ÇİFCİ (Corresponding author)\***

Prof. Dr.  
Institute of Marine Sciences and Technology, Dokuz Eylül University

**SERDAR S. ÇELEBİ**

Prof. Dr.  
İSTUN, Istanbul Health and Technology University, Department of Chemical Engineering  
ORCID: 0000-0003-0993-9762

**MAHMUT PARLAKTUNA**

Prof. Dr.  
Petroleum and Natural Gas Eng. Dept, Middle East Technical University  
ORCID: 0000-0001-6340-3307

**ASLI KAÇAR**

Prof. Dr.  
Institute of Marine Sciences and Technology, Dokuz Eylül University  
ORCID: 0000-0002-8705-3695

**SEDA OKAY GÜNAYDIN**

Doç. Dr.  
Institute of Marine Sciences and Technology, Dokuz Eylül University  
ORCID: 0000-0002-6976-7854

---



*\*Prof. Dr. Günay Çifci completed his undergraduate education in the Department of Geophysics at Yıldız University, his master's degree at the Institute of Marine Sciences and Technology (IMST) at Dokuz Eylül University (DEU), and his Ph.D. at the University of Trieste (Italy) and the Graduate School of Natural and Applied Sciences at DEU. He participated in the UNESCO-supported Floating University Training through Research Cruises in the international waters of the Mediterranean and Black Seas in 1991, 1995, 1996, 2000, 2001, and 2004. In 2001, he was a visiting researcher for postdoctoral studies at Virginia Tech University's Department of Earth Sciences in the United States. He served as a member of the Executive Committee representing Türkiye for the project "Marine Gas Hydrates: Indigenous Resources in the European Seas (MIGRATE)." He has acted as a partner and coordinator in European Union 5th, 6th, and 7th Framework Programme projects, as well as Horizon 2020 initiatives. From 2005 to 2018, he conducted research as the founder of the Seismic Laboratory (Seis Lab) at Dokuz Eylül University, established with the support of the State Planning Organization (DPT). Additionally, he completed over 10 TÜBİTAK projects and 9 EU-funded projects, alongside participation in more than 11 national and international projects. As the coordinator of Türkiye's first national gas hydrate project, he successfully implemented its initial phase in collaboration with Turkish Petroleum and DEPARK. He continues his research in the fields of marine geology and geophysics at the Institute of Marine Sciences and Technology at Dokuz Eylül University.*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4380-8056>

e-mail: [gunay.cifci@deu.edu.tr](mailto:gunay.cifci@deu.edu.tr) ve [gunay.cifci@gazhidratek.com](mailto:gunay.cifci@gazhidratek.com)

**Received:** 03.12.2024

**Accepted:** 22.04.2025

Çifci, G. & Çelebi, S. S. & Parlaktuna, M. & Kaçar, A. & Günaydın S. O. (2025). Gas Hydrates as a New Energy Resource. *BRIQ Belt & Road Initiative Quarterly* 6(3), 351-374.



## ABSTRACT

Gas hydrates, solid ice-like structures formed by water and methane molecules, are emerging as a critical future energy resource, offering abundant reserves of cleaner-burning methane. These reserves have the potential to enhance energy security, diversify energy portfolios, and support the transition from traditional hydrocarbons to more sustainable energy systems. Globally, nations such as Japan, China, the United States, India, South Korea, and Canada are leading research and development in gas hydrates, making substantial investments in advanced technologies and field tests. These efforts aim to overcome the significant technical and economic challenges currently limiting commercial-scale production. Türkiye's proximity to significant gas hydrate deposits, particularly in the Black Sea, presents a notable strategic opportunity. It is imperative that Türkiye capitalizes on this unique positioning by transforming these inherent advantages into long-term competitive strengths. The confirmed gas reserves in the Black Sea exemplifies such potential.

**Keywords:** Energy security, environmental sustainability, gas hydrates, new energy resources, Turkey National Gas Hydrate Project.

---

## Introduction

GAS HYDRATES, CRYSTALLINE COMPOUNDS composed of water and methane, have captured significant attention as an unconventional energy resource with immense potential. Methane hydrates, also known as 'burning ice,' occur at all ocean margins (Figures 1 and 2). Minshull et al., 2021, identified a series of regions where there is substantial evidence for hydrate occurrence. The base of gas hydrate accumulations follows the seabed topography and is called "Bottom Simulated Reflectors (BSR)" in seismic sections. The bottom-simulating reflector (BSR) is a reflection event that is closely

associated with identifying hydrates in multichannel seismic reflection sections (Ojha & Sain, 2009). Identifying and analyzing hydrates is important (Figure 3). Found primarily in marine sediments and permafrost regions, these naturally occurring compounds are estimated to contain more energy than all known fossil fuel reserves combined. The methane stored in gas hydrates represents a cleaner-burning alternative to traditional hydrocarbons like coal and oil, positioning this resource as a promising contributor to universal energy security and sustainability (Figure 2). Çifci (2020) emphasizes the importance of gas hydrates as a future energy source for earth science and economics.

The gas hydrate resource pyramid, conceptualized by Boswell & Collett (2011) categorizes these deposits based on their geological and economic recoverability (Figure 4). It highlights the substantial variation in resource accessibility, ranging from easily extractable accumulations to those requiring advanced technologies for recovery. Such diversity underscores the need for innovative extraction techniques and strategic planning to unlock their full potential. Moreover, their widespread distribution in continental margins and Arctic regions presents opportunities for countries seeking to diversify their energy portfolios and reduce dependency on imported fuels.

Innovative extraction technologies have been a

focal point of global research efforts. Methods like depressurization, thermal stimulation, and chemical injection are under active development, each offering unique benefits and challenges (Figure 5). Among these, CO<sub>2</sub> injection stands out due to its dual benefit of methane recovery and carbon sequestration, aligning with international climate change mitigation goals. Emerging techniques such as electromagnetic heating, microbiological stimulation, and nanotechnology applications are being explored to improve efficiency, reduce environmental impacts, and address the technical barriers to commercial production. Çifci et al., (in press) examines these production methods from gas hydrates.

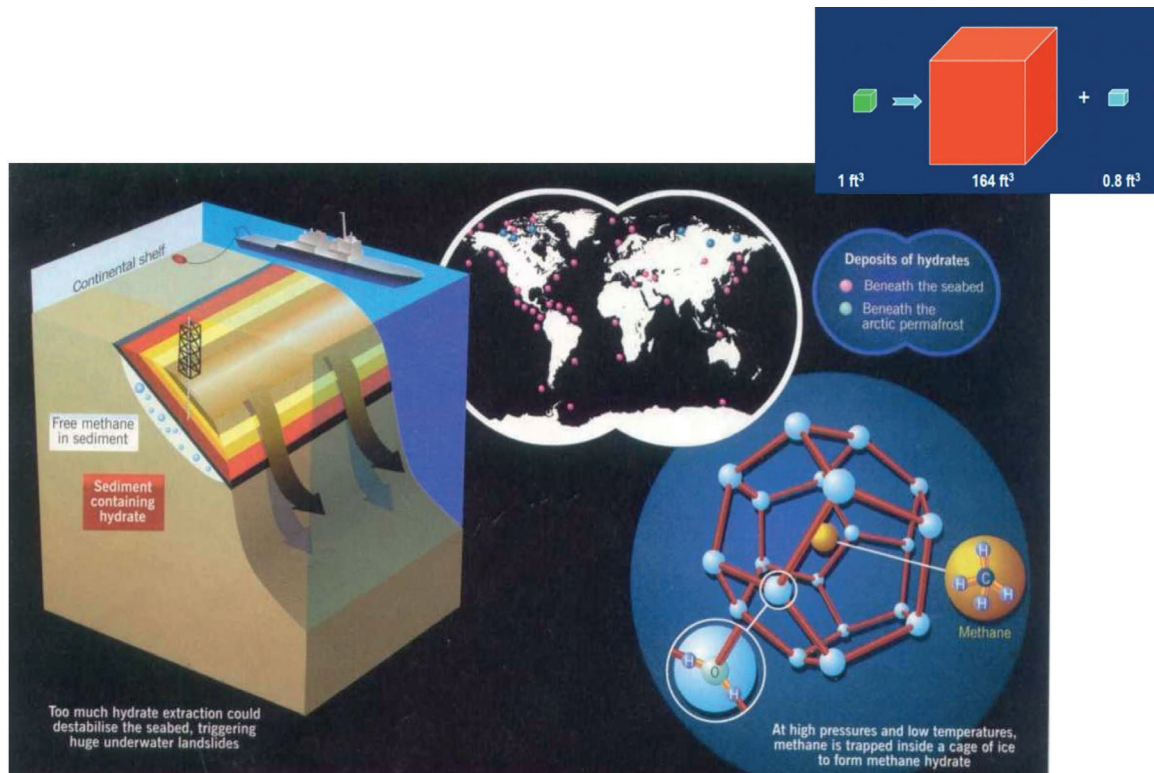


Figure 1. This shows the importance and locations of gas hydrates in marine sediments and permafrost regions, which are crystalline compounds composed of water and methane. At high pressure and low temperatures, methane is trapped inside a cage of ice, which forms methane hydrate (Figure: Çifci et al., in press).

Nations such as Japan, China, and the United States are leading in research and development, conducting field tests and pilot projects to refine these methods and scale up production. For instance, Japan's Methane Hydrate R&D program has demonstrated the feasibility of extracting methane from hydrates through depressurization, making it a frontrunner in this domain. Similarly, China has achieved significant milestones with its offshore hydrate production trials, showcasing advancements in extraction technologies and environmental safety protocols. The country is conducting intensive research on the discovery and production of gas hydrates and making significant investments in scientific and engineering endeavors in

this field. It holds numerous patents related to production and processing technologies, encompassing processes such as extraction, storage, and transportation of gas hydrates.

The potential of gas hydrates as an alternative source to fossil fuels is of considerable importance for energy security strategies, making advancements in this area a strategic priority for the nation. The country is working on improvements to transition to commercial applications in gas hydrate production and is undertaking various technology development projects in this process. This leadership in the field of gas hydrates plays a significant role in both national energy policies and global energy dynamics.



Figure 2. Images of recovered gas hydrates from the seafloor and their appearance when burned in the western Black Sea (Figure: TP-DEPARK Project Report, 2018).

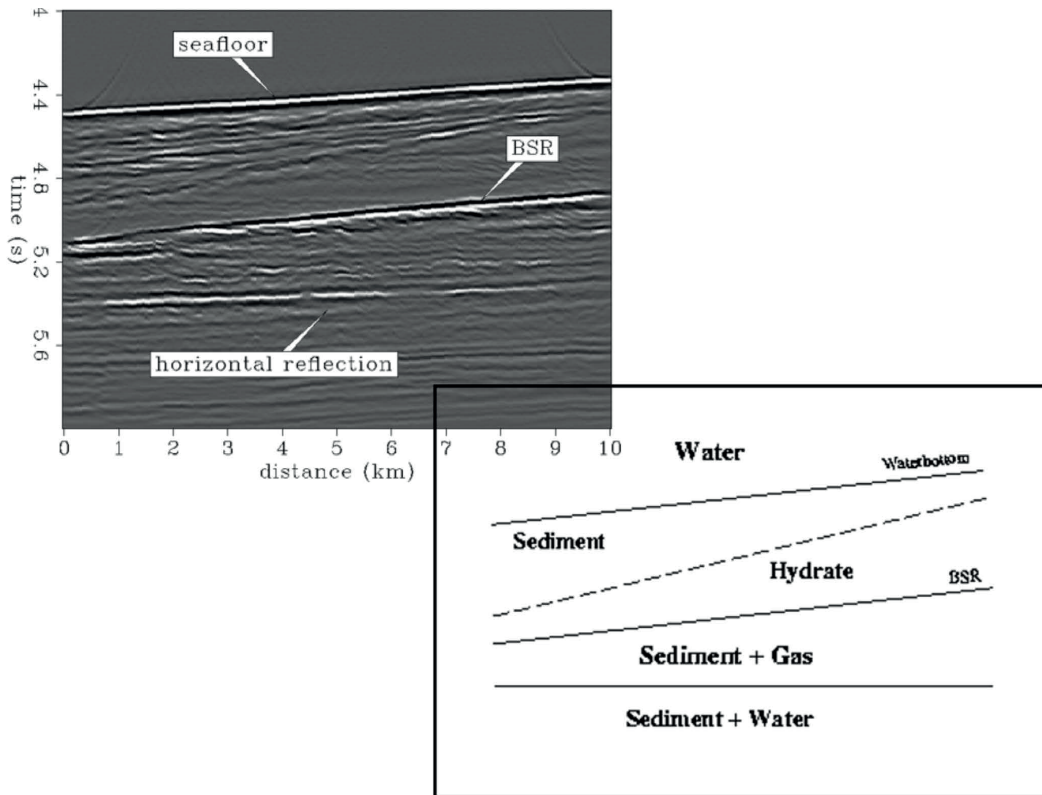


Figure 3. Geophysics, seismic reflection section interpretation showing bottom-simulating reflector (BSR) as an indicator to identify gas hydrates in marine sediments (Figure: Çıfci et al., in press).

Globally, nations such as Japan, China, the United States, India, South Korea, and Canada are leading research and development in gas hydrates, making substantial investments in advanced technologies and field tests. These efforts aim to overcome the significant technical and economic challenges currently limiting commercial-scale production. Integrating gas hydrate extraction with carbon capture and storage technologies further strengthens its potential as an environmentally sustainable energy source. With proper innovation and international collaboration, gas hydrates could supply energy for decades, serving as a transitional resource in the global shift toward cleaner energy. Advancing these

technologies will be essential for unlocking the economic and environmental benefits of gas hydrates, making them a cornerstone of future energy strategies. China is among the leading countries globally in terms of patent ownership in gas hydrate production technologies. This status is a result of its active efforts in gas hydrate research and development. China is also engaged in international collaborations and joint research projects concerning gas hydrate technologies, promoting knowledge sharing and technological innovations. “Gas Hydrates,” recognized as the energy source of the near future, have been identified and mapped in a pilot area as part of the first phase of Türkiye’s National Gas Hydrate Project.

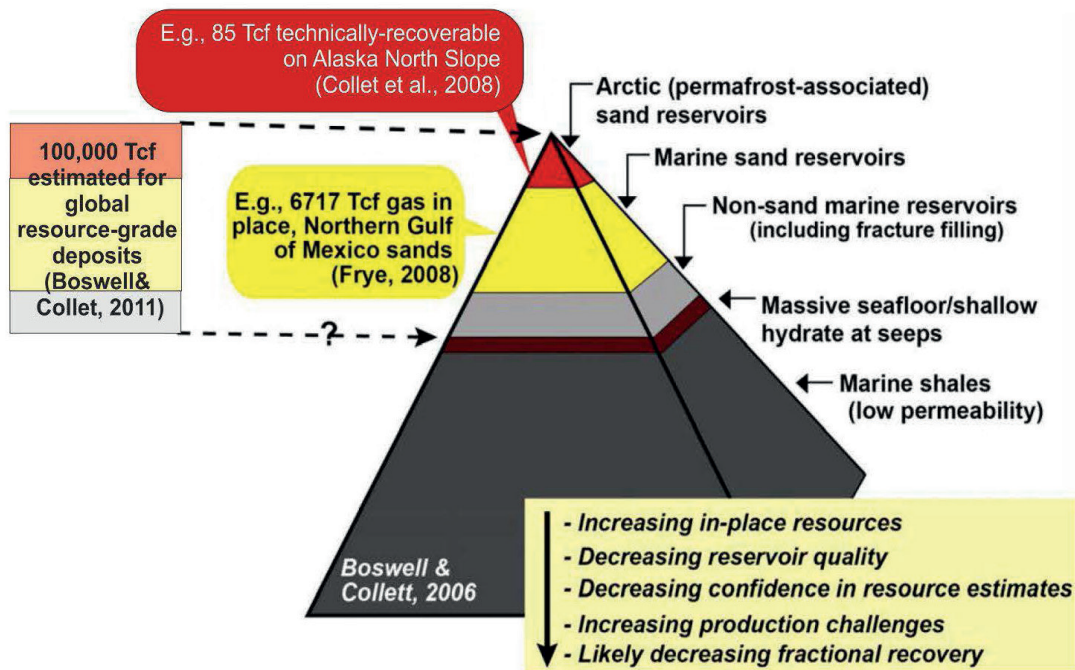


Figure 4. Gas hydrate resource pyramid, which categorizes these deposits based on their geological and economic recoverability (Figure: Boswell & Collett, 2011).

Through multidisciplinary collaboration involving multiple institutions and universities, the presence of gas hydrates has been officially confirmed, and reserve estimations have been conducted. The discovery of gas hydrates, which are widely regarded as a potential energy resource, in an extensive and significant area positions this reserve as a “game-changer” with strategic importance, capable of altering Türkiye’s energy future when considering global energy resource dynamics. Türkiye’s proximity to significant gas hydrate deposits, particularly in the Black Sea, presents a notable strategic opportunity. It is imperative that Türkiye capitalizes on this unique positioning by transforming these inherent advantages into long-term competitive strengths. The confir-

med gas reserves in the Black Sea exemplifies such potential. In addition to the fact that this discovery was achieved by Turkish researchers, its scientific contribution, which has the potential to resonate both nationally, regionally, and globally, could lead to immense opportunities. Within this framework, the next steps include mapping the distribution of gas hydrates in other areas, transitioning to the second phase in the completed pilot site, producing gas using existing production techniques in the pilot area, and, in the final phase, collaborating with countries that possess advanced production technologies.

This paper delves into the environmental, economic, and geopolitical implications of gas hydrate development, examining the current state of re-

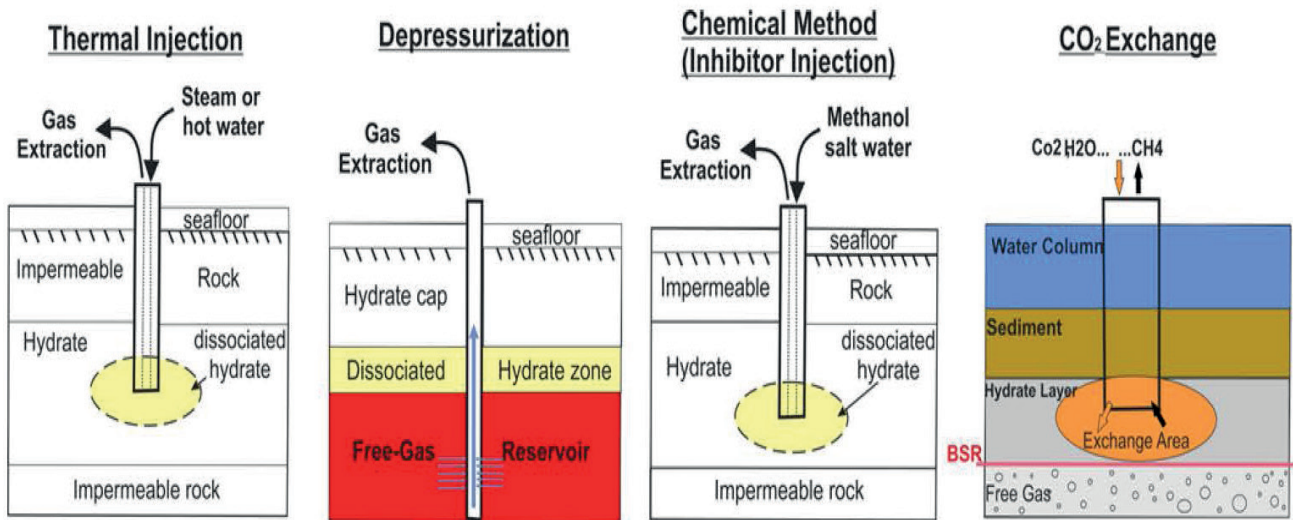


Figure 5: Extraction methods in which natural gas can be extracted from gas hydrates. Depressurization, thermal stimulation, chemical injection and CO<sub>2</sub> exchange, each of these methods offering unique benefits and challenges (Figure: Çifci et al., in press).

search, technological advancements, and potential challenges. It explores how gas hydrates could serve as a transitional energy resource, bridging the gap between fossil fuels and cleaner alternatives. Furthermore, the paper emphasizes the importance of international collaboration in developing unified standards and sustainable practices for responsible exploitation of this promising resource.

### Methane Production Methods from Gas Hydrates

The extraction of natural gas from gas hydrates can be accomplished through various methods, each of which presents specific environmental and economic implications (Figure 5). This section explores these methods and their potential effects in greater detail:

#### Depressurization

This method involves reducing the pressure within the gas hydrate reservoir, thereby inducing the dissociation of hydrates into natural gas. The environmental impacts associated with depressurization may include alterations in the mechanical structure of the reservoir, which can potentially lead to subsidence or surface collapse. Additionally, the dissociation process absorbs heat, causing local freezing of the surrounding water and potentially impacting marine ecosystems. Economically, depressurization is generally less expensive compared to other methods, as it does not require complex technologies or the use of costly chemicals (Boswell & Collett, 2011). It offers the potential for efficient production, capturing a substantial proportion of the reservoir (up to 60%).

However, efficiency may decline over time due to changes in the reservoir's mechanical and thermodynamic characteristics. Furthermore, this method's relatively lower energy consumption translates to reduced operational costs.

### **Thermal Injection**

In thermal injections, the reservoir temperature is increased through the injection of hot water or steam or by heating the wellbore. Environmental impacts include the potential warming of adjacent water layers, which could pose risks to aquatic organisms (Lee & Lee, 2014). Moreover, the high energy requirements of thermal injections necessitate substantial fossil fuel consumption, leading to increased greenhouse gas emissions. This method demands significant initial investment in equipment and energy for steam or hot water generation and injection. While it has the potential to achieve nearly complete production of the reservoir, yielding high returns, a considerable portion of the produced gas's energy is expended in heating the reservoir, which lowers the net energy output.

### **Chemical Injection**

In this method, chemicals such as glycol or methanol are injected to alter the reservoir's conditions and induce gas release. The associated environmental impacts may involve potential chemical leakage, which could contaminate groundwater sources and damage ecosystems (Makogon et al., 2007). The disposal of used chemicals further presents environmental management challenges. From an economic standpoint, chemical injection incurs substan-

tial costs due to the chemicals involved, which significantly increase operational expenses. This method typically requires extensive laboratory and pilot-scale testing, leading to elevated research and development costs. Moreover, compliance with environmental regulations and waste management protocols can further raise costs. However, combining CO<sub>2</sub> injection with methane production can potentially yield long-term sustainability by offering environmental credits or tax incentives for reducing emissions.

### **CO<sub>2</sub> Injection**

This method entails capturing CO<sub>2</sub> and displacing methane within the reservoir by injecting it. The primary environmental advantage is the potential reduction in atmospheric CO<sub>2</sub> emissions, which contributes positively to mitigating climate change (Hovland & Judd, 2004). Nonetheless, CO<sub>2</sub> injection can disrupt the reservoir's pressure balance, potentially causing geological instability issues.

### **Emerging Methods**

Several innovative approaches are under investigation, including gas injection, microbiological techniques, ultrasonic stimulation, and electrical heating. Each of these methods has unique environmental implications. For instance, microbiological methods might disrupt microbial balances within ecosystems (Liu et al., 2012 ; Chong et al., 2016). Microbial methanogenesis, which promotes methane release through the biological activities of microorganisms, offers an environmentally sustainable alternative, particularly in low-temperature and

low-pressure conditions. Conversely, methods involving electrical heating require significant energy input, which may carry environmental impacts contingent on the energy sources employed.

Various microbiological investigations of gas hydrates suggest the potential of biological applications for producing hydrates through destabilization. Among these are processes involving microbial conversion of CO<sub>2</sub>, biological in-situ methane production, and organisms that produce antifreeze proteins (AFPs), which inhibit the crystallization of hydrates and eliminate more rapid recrystallization or “memory effect.” These concepts require more research to explore techniques to uncover “green inhibitors” for hydrates. This represents a challenge to researchers involved in projects related to monetizing the significant gas hydrate accumulations worldwide: microbiological processes may be the key to their economical recovery (Jones et al., 2010).

### **Economic Considerations**

Understanding and mitigating the environmental impacts of these methods are crucial for sustainable energy production and environmental management. As such, detailed environmental impact assessments and monitoring protocols must be conducted during the implementation of each method. The economic viability of natural gas production from gas hydrates depends on the method employed, technological accessibility, energy market conditions, and prevailing environmental regulations (Jones et al., 2010). New methods generally require substantial research and development expenditures, with returns contingent upon the commercial

success of the technologies. The implementation of novel technologies can entail operational risks, such as unforeseen technical challenges or suboptimal performance. Given the high initial costs and technical uncertainties, comprehensive cost analyses and pilot projects are essential to maximize economic profitability and minimize associated risks.

### **Geopolitical and Technological Considerations**

The potential to exploit gas hydrates primarily benefits countries with abundant natural resources and advanced technological capabilities. Currently, several nations are leading research and development initiatives in the domain of gas hydrate extraction, positioning themselves to capitalize on these resources (Cherskiy & Tsarev, 1977).

### **Innovative Approaches for Future Projects**

Ongoing research seeks to enhance the efficiency of existing methods, reduce environmental impacts, and lower economic costs. Several innovative techniques proposed for future gas hydrate projects include:

#### **Microbiological Processes**

Gas hydrates are closely linked to specific micro- and macrofauna, presenting opportunities to leverage these organisms or their metabolic processes to stimulate hydrate destabilization for natural gas production. Three primary methods for producing natural gas from hydrates are identified: pressure destabilization, methanol-induced destabilization, and thermal destabilization.

Experimental findings suggest that these methods can be operated under conditions sufficient to cover operational costs, with microbial processes potentially facilitating hydrate dissociation and methane production through the use of methanol.

Microbial processes hold promise for enhancing the conversion of hydrates to natural gas. For instance, *Methylococcus capsulatus* Bath and *Methylosinus trichosporium*, both of which possess methanotrophic capabilities, can be cultivated at elevated temperatures and demonstrate copper-tolerant monooxygenase activity, positioning them as viable candidates for biotechnological applications in methane conversion. Additionally, microbial communities in methane hydrate-bearing sediments are dominated by groups such as JS1, Planctomycetes, and Chloroflexi, indicating significant potential for their application in hydrate destabilization. Furthermore, organisms like *Acidimethylosilex fumarolicum* SolV can grow on methane under extreme conditions, suggesting that CO<sub>2</sub>-converting microbial communities could enable controlled destabilization of methane hydrates. Ongoing research, including studies from the Pacific Northwest National Laboratory, underscores the role of microbial methods in hydrate dissociation, highlighting the potential of antifreeze proteins from organisms like *Chryseobacterium* sp. C14 to inhibit hydrate crystallization. As commercial production methods for gas hydrates evolve, microbiological processes are strong candidates for integration into future projects aimed at sustainable gas production (Inagaki et al., 2006; Heijmans et al., 2007; Yan et al., 2006; White, 2008).

**Electromagnetic Heating:** As an alternative to traditional thermal stimulation, electromagnetic waves can effectively distribute heat even in deep and less accessible reservoirs. This method is characterized by its high energy efficiency and low environmental impact.

**Nanotechnology Applications:** The use of nano-sized materials and chemicals can enhance the solubility of hydrates or catalyze chemical reactions to accelerate gas release. Additionally, nanoparticles may improve reservoir porosity and permeability, facilitating gas flow.

**Enhanced CO<sub>2</sub> Injection:** By utilizing CO<sub>2</sub> at higher pressures, this method can facilitate more efficient methane displacement while simultaneously contributing to atmospheric CO<sub>2</sub> reduction.

**Ultrasonic or Acoustic Waves:** These methods aim to increase gas hydrate solubility and aid in methane release by disrupting the hydrate structure.

**Hybrid Methods:** Combining existing techniques can generate synergistic effects throughout the extraction process. For example, integrating thermal stimulation with chemical or CO<sub>2</sub> injections can optimize solubility and accelerate extraction.

These innovative techniques should undergo further validation through laboratory tests and pilot projects. Future applications must consider the environmental compatibility, economic sustainability, and technical feasibility of these approaches. By advancing these methods, the potential for sustainable and environmentally friendly energy production from gas hydrates can be realized.

### Energy Production from Gas Hydrates

Countries such as Japan, China, the USA, Canada, India, and South Korea have significantly advanced their capacities to exploit gas hydrates through technological innovation, strategic investments, and alignment with national energy policies (Boswell et al., 2012). Detection of gas hydrates through geophysical methods (seismic reflection) has been demonstrated through drilling and coring programs (McConnell, 2019). Figure 6 shows BSR, which is the base of gas hydrate. These nations are allocating substantial resources to research and development (R&D)

activities, aiming to maximize the potential benefits of gas hydrates soon. Gas hydrates are expected to play a critical role in diversifying energy portfolios and transitioning to cleaner energy systems, which is increasingly pertinent given global concerns about energy sustainability and environmental impacts (Boswell & Collett, 2006).

Another academic paper by Zhang et al. (2012) examines the dual nature of marine gas hydrates as both a promising energy resource and a potential environmental threat. The authors highlight three key resource characteristics that make gas hydrates appealing as a future energy source:

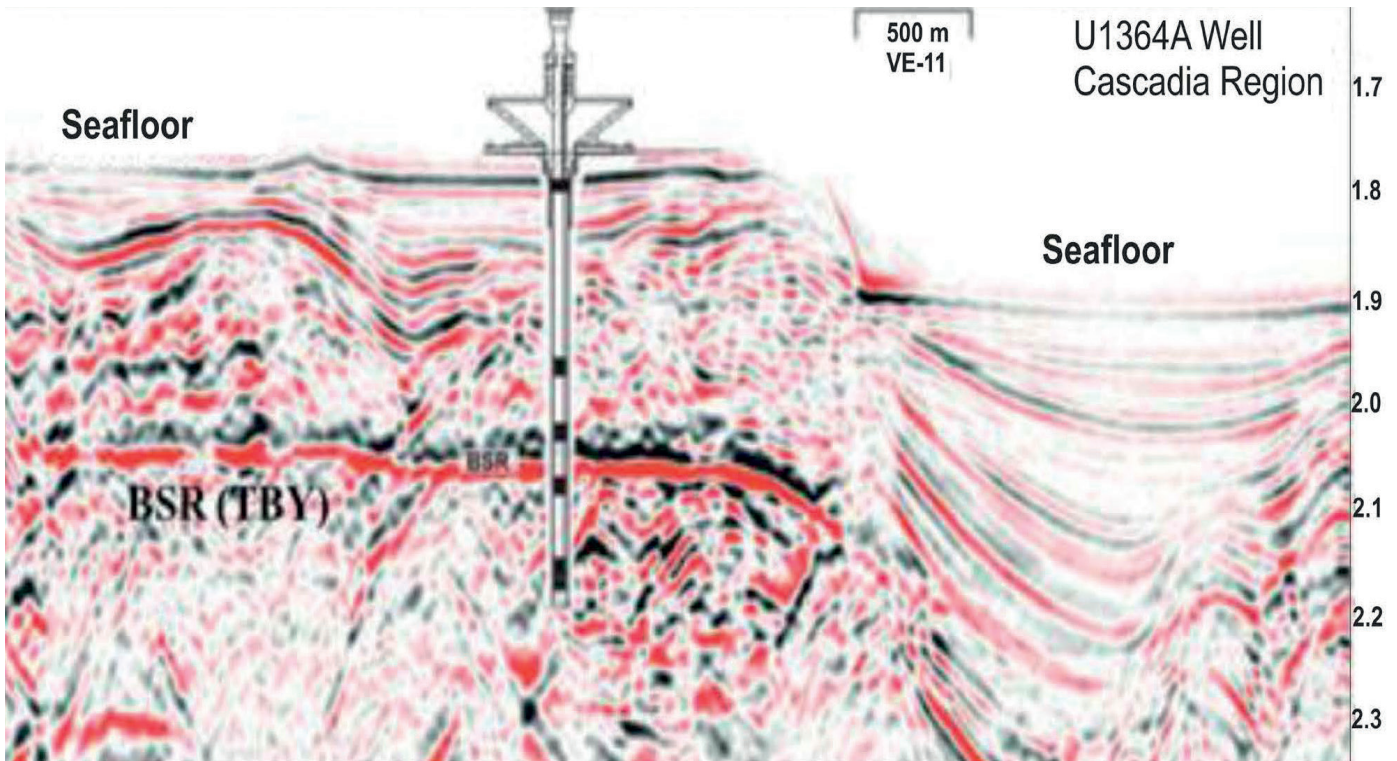


Figure 6. An example from the Cascadia region showing drilling depth that reaches to BSR, the base of gas hydrates (Figure: McConnell, 2019).

Enormous quantity: Credible estimates suggest  $10^{13}$  to  $20 \times 10^{15}$  m<sup>3</sup> of methane gas in global deposits, potentially meeting human energy needs for nearly 1,000 years.

The carbon content ( $10 \times 10^{12}$ t) is twice that of all fossil fuel minerals combined. Cleanliness: Contains high-purity methane with fewer harmful gases compared to coal, oil, and natural gas. High energy density: 1m<sup>3</sup> of gas hydrates equals 164m<sup>3</sup> of methane under normal conditions - 10 times the energy density of other non-conventional sources and 2-5 times that of conventional natural gas. The authors identify three major environmental risks associated with gas hydrate destabilization: Global Warming: Methane is a potent greenhouse gas with 3.7 times the global warming potential of CO<sub>2</sub> by mole and 20 times by weight. The paper connects historical rapid warming events (particularly the “Latest Paleocene Thermal Maximum” about 55.6 million years ago) to massive methane releases from hydrates. Seabed Geological Disasters: Gas hydrates lack consolidation cap and are prone to phase transformation. When temperature-pressure conditions change, hydrates can dissociate, releasing methane and potentially triggering submarine landslides.

**Ecological Disasters:** The paper links massive methane releases to historical extinction events, noting evidence that suggests hydrate decomposition caused the extinction of 1/2 to 2/3 of benthic animals around the Paleocene-Eocene boundary (55 Ma). The discussion section emphasizes that while gas hyd-

rates represent an important potential energy resource, any development must prioritize safety and environmental protection. This balanced assessment illustrates the complex nature of gas hydrates as both a promising energy solution and a potential environmental threat, highlighting the need for careful, environmentally conscious approaches to their development (Zhen-guo et al., 2012).

Gas hydrates offer the potential to enhance energy security, particularly in regions where conventional hydrocarbon reserves are depleting or access is constrained. This resource could be a viable option for countries seeking to reduce reliance on energy imports and establish a more diversified and resilient energy portfolio.

### **Environmental Implications and Technological Considerations**

The environmental implications of gas hydrate extraction present both opportunities and challenges. On one hand, gas hydrates could contribute to reducing carbon emissions if combined with innovative techniques such as carbon capture and storage/utilization (CCSU). On the other hand, the extraction process carries risks such as potential methane leaks and other ecological disturbances, which must be managed effectively. As a result, rigorous environmental assessments are essential to ensure sustainable and responsible development.

Despite its potential, the commercial-scale production of gas hydrates remains hinde-

red by technical challenges. Ongoing R&D efforts aim to address these barriers through the development of advanced extraction technologies. Energy policies should therefore support technological innovation while ensuring economic growth and environmental sustainability.

### Role of International Collaborations

The complexity and global significance of gas hydrates necessitate international collaborations to establish unified standards, policies, and practices (International Energy Agency, 2018). These collaborations facilitate joint R&D initiatives, enabling countries to pool expertise and resources. Furthermore, harmonizing international standards is critical to managing environmental and safety risks during gas hydrate extraction. Collaborative frameworks also provide opportunities for coordinated policy development, training programs, and investment strategies, all of which are essential for the responsible and efficient utilization of gas hydrate resources.

### Notable Projects and Future Directions

Japonya, Çin ve Hindistan'daki kayda değer projeler, gaz hidrat çıkarma teknolojilerinin geliştirilmesine öncülük etmektedir (Matsumoto vd., 2013). Bu girişimler, gaz hidratlarla ilişkili teknik ve çevresel zorluklara dair değerli bilgiler sağlamakta ve potansiyel ticari uygulamalara yönelik önemli adımlar teşkil etmektedir. Bu projelerden elde edilen bulgular,

teknik engellerin aşılmasına, çevresel etkilerin en aza indirilmesine ve ekonomik verimliliğin optimize edilmesine yardımcı olarak diğer ülkeler için bir ölçüt teşkil edebilir. Gaz hidratların önemli enerji içeriği ve geniş dağılımı göz önüne alındığında, gelecekteki enerji tedarik stratejileri için kilit bir kaynak olarak konumlanmaktadır.

### Economic Potential and Market Implications

The economic viability of gas hydrates is a key area of ongoing research. Studies generally focus on assessing the cost-effectiveness of various extraction techniques, such as thermal stimulation, chemical injection, depressurization, and CO<sub>2</sub> injection (Matsumoto et al., 2013). Additionally, these studies examine the competitiveness of gas hydrates in global energy markets, evaluating their potential to diversify energy portfolios and enhance energy security. Environmental regulations also play a significant role in determining the economic sustainability of gas hydrate projects, given the costs associated with compliance and risk mitigation (Jones et al., 2010).

Geopolitical analyses highlight the implications of gas hydrate reserves for national energy strategies. Countries with substantial reserves may leverage this resource to achieve greater energy independence, thereby influencing global energy dynamics. Scenario-based studies further explore the long-term economic potential of gas hydrates under various technological and market conditions, offering insights into their role in future energy systems.

## Key Policy Considerations

General key considerations emerge from research on gas hydrates and their integration into energy policies:

**Diversification of Energy Resources:** Incorporating gas hydrates into energy portfolios enhances energy security and reduces dependence on traditional hydrocarbons. This is particularly relevant for regions facing depleting reserves or restricted access to conventional resources.

**Energy Security:** With their high methane content, gas hydrates are seen as a strategic energy resource that could reduce import dependency and promote self-sufficiency in energy policies.

**Environmental Sustainability:** Environmentally responsible extraction techniques, such as CO<sub>2</sub> injection, could mitigate greenhouse gas emissions, thereby influencing environmental regulations and sustainability policies.

**Economic Development:** The development of gas hydrate resources could stimulate job creation and economic growth, especially in coastal regions and countries with ocean access, driving further investment in this emerging sector.

**International Collaborations and Policies:** The global importance of gas hydrates necessitates international standards and protocols for their research, production, and management. Strengthening international regulations and cooperation can foster innovation and improve environmental outcomes (International Energy Agency, 2018).

## Results

The extraction of methane from gas hydrates through various methods has yielded significant insights into both environmental and economic implications.

“Depressurization” emerged as a cost-effective technique, capable of producing up to 60% of the reservoir’s gas (Boswell & Collett, 2011). However, it poses risks such as subsidence and local freezing, which can adversely affect marine ecosystems. The method’s lower energy consumption contributes to reduced operational costs, although efficiency may diminish over time due to reservoir changes.

“Thermal Injection”, while potentially achieving nearly complete gas production, faces challenges related to high energy requirements and substantial fossil fuel use, leading to increased greenhouse gas emissions. The initial investment for this method is significant, and much of the energy produced is consumed in heating the reservoir, reducing net energy output.

“Chemical Injection” involves the use of chemicals like glycol or methanol, raising concerns about potential leakage and groundwater contamination (Makogon et al., 2007). The high costs associated with chemicals and compliance with environmental regulations make this method economically burdensome, despite the possible long-term benefits of combining CO<sub>2</sub> injection with methane production for sustainability.

“CO<sub>2</sub> Injection” presents an environmental advantage by potentially reducing atmo-

ric carbon dioxide emissions (Hovland & Judd, 2004). However, it can disrupt the pressure balance within the reservoir, leading to geological stability issues.

Emerging methods such as “microbiological techniques,” “ultrasonic stimulation,” and “electromagnetic heating” are under investigation. These innovative approaches aim to enhance extraction efficiency while minimizing environmental impacts. For instance, microbiological methods could provide a sustainable alternative by promoting methane release under favorable conditions (Liu et al., 2012).

Countries like Japan, China, and the United States are leading advancements in gas hydrate extraction technologies. Their ongoing research focuses on addressing technical challenges and optimizing economic viability. Notably, Japan and China are poised to achieve commercial production soon.

Gas hydrates provide an opportunity to diversify energy portfolios and reduce reliance on imported fuels. Environmentally, integrating extraction with carbon capture technologies could mitigate methane emissions and promote sustainability.

Gas hydrates have the potential to act as an intermediary energy source, facilitating the transition from high-carbon fuels like coal and oil to more sustainable energy systems. Innovative methods, such as electromagnetic heating and enhanced CO<sub>2</sub> injection, are essential for realizing their full potential.

The integration of gas hydrate extraction with carbon capture and storage/utilization

(CCSU) technologies further strengthens its potential as an environmentally sustainable energy source. With proper innovation and international collaboration, gas hydrates could supply energy for decades, serving as a transitional resource in the global shift toward cleaner energy. Advancing these technologies will be essential for unlocking the economic and environmental benefits of gas hydrates, making them a cornerstone of future energy strategies.

As a result, gas hydrates represent a viable energy source with the capability to meet future energy demands sustainably. Their successful utilization will depend on continued technological innovation, international collaboration, and robust environmental safeguards.

Our country’s primary goals include reducing Turkey’s external dependency on energy by using domestic and national resources. Considering the research conducted by major countries that have a say in the world economy on gas hydrates and the latest production tests for natural gas production from gas hydrates, it becomes clear that our country needs to rapidly increase its activities for gas hydrate research with domestic and national resources. In this context, the roadmap to be followed was mentioned in Küçük’s (2018) study.

The tables below summarize the comparison of natural gas production methods from gas hydrates, advantages and disadvantages of gas hydrate production methods, and technological maturity and application status of gas hydrate production methods.

Table 1. Comparison of Natural Gas Production Methods from Gas Hydrates

Production Method	Basic Principle	Technical Applicability	Gas Production Efficiency	Energy Efficiency	Economic feasibility	Environmental Impact	Technological Maturity	Important Successful Applications
<b>Depressurization</b>	Triggering of dissociation by lowering reservoir pressure below the hydrate stability zone (Konno et al., 2010; Li et al., 2018)	High - Applicable with existing offshore technologies (Yamamoto et al., 2014)	%35-55 recovery rate (Moridis et al., 2011; Feng et al., 2015)	Yüksek (EROI: 5:1 - 8:1) (Walsh et al., 2009)	8-15 USD/MMBtu (Anderson et al., 2014)	Medium - Seabed stability risk and water production problems (Rutqvist et al., 2009)	High (TRL: 7-8) Field tests completed (Fujii et al., 2018)	Japan Nankai Trough (2013, 2017), China South China Sea (2020) (Yamamoto et al., 2014; Su et al., 2021)
<b>Thermal Injection</b>	Decomposition by applying heat to the hydrate-containing formation (Li et al., 2016; Song et al., 2016)	Medium - Heat loss problems in deep waters (Islam, 2015)	%40-70 potential recovery (Li et al., 2015)	Low (EROI: 1.5:1 - 3:1) (Yang et al., 2012)	15-25 USD/MMBtu (Anderson et al., 2014)	Medium-High - Thermal pollution and higher CH <sub>4</sub> leakage risk (Ruppel ve Kessler, 2017)	Medium (TRL: 5-6) Lab and limited pilot tests (Li et al., 2016)	Laboratory and pilot-scale tests in the South China Sea, China (Li et al., 2016; Song et al., 2016)
<b>Chemical Injection</b>	Modification of hydrate stability curve using chemicals (Sloan and Koh, 2008)	Medium - Chemical distribution issues and logistical challenges (Sahu et al., 2018)	%30-50 estimated yield (Kamath and Patil, 2013)	Orta (EROI: 3:1 - 5:1) (Liu et al., 2012)	12-20 USD/MMBtu (Chong et al., 2016)	High - Chemical pollution potential (Chong et al., 2016)	Medium (TRL: 4-5) Weighted lab tests (Xu et al., 2016)	India NGHP laboratory studies, limited field tests (Sahu et al., 2018)
<b>CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> CO<sub>2</sub> Exchange</b>	Displacement of methane by CO <sub>2</sub> injection (Park et al., 2008; Koh et al., 2012)	Low - Challenges of CO <sub>2</sub> transport/injection in the deep sea (Espinoza and Santamarina, 2011)	%60-80 theoretical potential (Boswell et al., 2017)	Variable (EROI: 2:1 - 4:1) (McGrail et al., 2007)	18-30 USD/MMBtu, without carbon credits (Anderson et al., 2014)	Low - Carbon capture and storage potential (Boswell et al., 2017)	Low (TRL: 3-4) Alaska field test (permafrost) (Boswell et al., 2017)	Alaska North Slope Ignik Sikumi (2012) (Konno et al., 2014)

Table 1. Comparison of Natural Gas Production Methods from Gas Hydrates (continued)

Production Method	Basic Principle	Technical Applicability	Gas Production Efficiency	Energy Efficiency	Economic feasibility	Environmental Impact	Technological Maturity	Important Successful Applications
<b>Mechanical Methods</b>	Physical removal of hydrate containing material (Chong et al., 2016)	Very Low - Very difficult to apply in deep sea (Yamamoto et al., 2014)	%70-90 Theoretical, not practical (Chong et al., 2016)	Very Low (EROI: 1:1 - 2:1) (Anderson vd., 2014)	25-40 USD/MMBtu (estimated) (Anderson et al., 2014)	Very High - Major physical impact on the seabed (Chong vd., 2016)	Very Low (TRL: 2-3) At the concept stage (Yamamoto vd., 2014)	Only concept studies and shallow sea suggestions (Chong vd., 2016)
<b>Depressurization + Thermal Stimulation Hybrid Method</b>	Partial thermal support with pressure reduction (Konno et al., 2010; Li et al., 2018)	Medium-High - More accessible based on pressure reduction (Li vd., 2018)	%40-60 - Increase by reducing the cooling effect (Feng vd., 2015)	Medium (EROI: 4:1 - 7:1) (Li vd., 2018)	10-15 USD/MMBtu (Japon METI, 2017)	Medium - Less effect than simple thermal method (Feng vd., 2015)	Medium (TRL: 6-7) Tested in Japan (Fujii vd., 2018)	Japan MH21 hybrid tests, China Guangzhou tests (Li vd., 2018)
<b>Depressurization + Chemical Inhibitor Hybrid Method</b>	Low concentration inhibitor and pressure reducing combination (Feng et al., 2015; Sun et al., 2015)	High - Less chemical requirements (Sun et al., 2015)	%35-50 - Improved stability (Sun et al., 2015)	High (EROI: 5:1 - 8:1) (Feng et al., 2015)	9-14 USD/MMBtu (China GMGS, 2020)	Medium - Reduced chemical use (Xu et al., 2016)	Medium (TRL: 6-7) Çin'de test edildi (Li et al., 2018)	China South China Sea GMGS projects (Su et al., 2021)

(Table: Çifci et al., 2024)

## Conclusion

The extraction of gas hydrates and their integration into the economy are feasible using existing methods and technologies. Future research aimed at refining and advancing these extraction techniques will contribute to patented innovations.

Field studies previously conducted in the Black Sea indicate that regional gas hydrate reser-

ves may exceed 100 trillion cubic meters (Bazauk et al., 2021). Of the Black Sea's total surface area (approximately 470,000 square kilometers), around 200,000 square kilometers fall within Türkiye's Exclusive Economic Zone (EEZ). Although the exact volume of reserves within this jurisdiction has yet to be precisely determined, there is strong reason to believe they would be sufficient to meet the country's energy needs for many years.

**Table 2. Advantages and Disadvantages of Gas Hydrate Production Methods**

Production Method	Advantages	Disadvantages	References
<b>Depressurization</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Technically the simplest approach</li> <li>• Low energy requirement</li> <li>• Better economic feasibility</li> <li>• Proven Field application</li> <li>• Long-term sustainable production potential</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reservoir cooling</li> <li>• Slow production in low permeability reservoirs</li> <li>• Sand production problems</li> <li>• High water production</li> </ul>	Dallimore et al. (2012) Konno et al. (2010) Moridis et al. (2011) Yamamoto et al. (2014) Reagan et al. (2010)
<b>Thermal Injection</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Potential for rapid hydrate dissociation</li> <li>• Effective in low permeability formations</li> <li>• High production speed under suitable conditions</li> <li>• Eliminate the cooling effect</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Excessive heat losses in the deep sea</li> <li>• Very high energy requirement</li> <li>• Low energy efficiency</li> <li>• Thermal energy transport difficulties</li> <li>• Slow heat transfer and limited penetration</li> </ul>	Li et al. (2015) Moridis et al. (2011) Song et al. (2016) Feng et al. (2015) Islam (2015) Chen et al. (2017)
<b>Chemical Inhibitor Injection</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fast decomposition in some cases</li> <li>• Ability to work at low temperatures</li> <li>• Lower energy requirements than thermal methods</li> <li>• Can be combined with other methods</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Difficulty using large volumes of chemicals</li> <li>• High chemical costs</li> <li>• Penetration limitations</li> <li>• Environmental concerns</li> <li>• Chemical recovery issues</li> </ul>	Dong et al. (2009) Kamath and Patil (2013) Li et al. (2014) Sun et al. (2015) Sahu et al. (2018) Liu et al. (2012)
<b>CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> Exchange</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carbon capture/storage integration</li> <li>• The most environmentally positive approach</li> <li>• Maintaining seabed stability</li> <li>• Simultaneous methane production and CO<sub>2</sub> storage</li> <li>• Exothermic process advantage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Low exchange kinetics and slow reaction</li> <li>• High pressure requirements</li> <li>• Reservoir heterogeneity problems</li> <li>• High cost and complex logistics</li> </ul>	Koh et al. (2012) Chong et al. (2016) Jung et al. (2010) Boswell et al. (2017) McGrail et al. (2007) Lee et al. (2013)
<b>Mechanical Methods</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Direct and controlled access</li> <li>• Usability in areas where other methods cannot be applied</li> <li>• Potential for shallow sea-bed hydrates</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Extremely difficult to implement in deep water</li> <li>• Very high technical difficulties</li> <li>• Seabed stability hazards</li> <li>• Extremely high cost</li> <li>• Serious environmental impacts</li> </ul>	Chong et al. (2016) Yamamoto et al. (2014)
<b>Depressurization + Thermal Hybrid</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compensate for decompression cooling</li> <li>• Increase production speed and stability</li> <li>• Less energy required than full thermal method</li> <li>• Prevent hydrate regeneration</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Additional heating equipment required</li> <li>• Deep sea heating challenges</li> <li>• High equipment cost</li> <li>• Energy efficiency still a problem</li> </ul>	Konno et al. (2010) Li et al. (2018) Feng et al. (2015) Fujii et al. (2018)
<b>Depressurization + Chemical Hybrid</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Less chemical use</li> <li>• Reduce cooling by lowering decomposition temperature</li> <li>• Prevent hydrate reformation</li> <li>• Reducing sand production</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Chemical distribution issues</li> <li>• Partial increase in cost</li> <li>• Reservoir heterogeneity challenge</li> <li>• Environmental impact still present</li> </ul>	Feng et al. (2015) Sun et al. (2015) Xu et al. (2016) Li et al. (2018)

(Table: Çifci et al., 2024)

**Table 3. Technological Maturity and Application Status of Gas Hydrate Production Methods**

Production Method	Technologic Ripeness Level (TRL)	Field Application	Research Situation Assessment	Correlation of Laboratory Results with Field Applications	References
<b>Depressurization</b>	TRL 7-8 Tested at field scale	Japan (2013): 6 day, 120,000 m <sup>3</sup> gas Japan (2017): 36 day, 235,000 m <sup>3</sup> gas China (2020): 30 day, 861,400 m <sup>3</sup> gas	The most mature technology, especially in sand-rich Class 1 and Class 2 hydrate reservoirs	High correlation - laboratory models predict field behavior well	Yamamoto et al. (2014) Fujii et al. (2018) Su et al. (2021) Li et al. (2018)
<b>Thermal Inhibitor</b>	TRL 5-6 Laboratory and limited pilot tests	Mainly laboratory and reservoir simulations Partial heating applications in Japan and China	Limited application in deep seas due to energy efficiency issues More valuable in hybrid use	Moderate correlation - heat losses exceed laboratory estimates under field conditions	Li et al. (2016) Song et al. (2016) Li et al. (2015) Chen et al. (2017)
<b>Chemical Inhibitor</b>	TRL 4-5 Laboratory and small-scale pilot tests	India NGHP laboratory studies Small-scale field tests	Focus on hybrid use rather than pure form due to environmental concerns and costs	Low-Medium correlation - Reservoir heterogeneity	Sahu et al. (2018) Kamath and Patil (2013) Xu et al. (2016) Sun et al. (2015)
				and field conditions significantly affect laboratory results.	
<b>CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> Exchange</b>	TRL 3-4 Proven concept, limited field testing	Alaska Ignik Sikumi Test (2012) In permafrost environment, not in deep sea	The most environmentally friendly method in the long run. However, due to technical difficulties, commercial application is far from possible.	Low correlation - field tests show slower kinetics than laboratory results	Boswell et al. (2017) Konno et al. (2014) Koh et al. (2012) Park et al. (2008)
<b>Mechanical Methods</b>	TRL 2-3 In concept stage	Only theoretical and conceptual studies Recommendations for shallow sea	Impractical approach in deep seas Limited application potential for shallow hydrates	Very low correlation - no real field applications yet	Chong et al. (2016) Yamamoto et al. (2014)
<b>Depressurization + Thermal Hybrid</b>	TRL 6-7 Tested on pilot scale	Japan MH21 hybrid tests (2019) China Guangzhou tests (2018-2020)	Improved version of traditional decompression Practical approach to eliminate cooling effect	High correlation - practical applications give results close to laboratory predictions	Li et al. (2018) Feng et al. (2015) Fujii et al. (2018) METI (2017)
<b>Depressurization + Chemical Hybrid</b>	TRL 6-7 Tested on pilot scale	China GMGS projects (2020-2023) Daily gas production of 28,700 m <sup>3</sup>	Hybrid method most likely to be commercially available in the near future Advantages with less chemical use	High correlation - field tests at optimization stage before commercial scale	Su et al. (2021) Feng et al. (2015) Sun et al. (2015) Li et al. (2018)

(Table: Çifci et al., 2024)


From the extracted gas hydrates, blue hydrogen or synthesis gas can be produced through processes such as steam methane reforming (SMR) and pyrolysis. These methods not only yield hydrogen but also generate synthesis gas and pure carbon as valuable by-products, which can be employed in the production of a wide range of advanced materials.

This approach not only prevents the release of greenhouse gases into the atmosphere but also supports sustainable development. Thus, the economic utilization of gas hydrates presents a promising avenue for mitigating climate change while harnessing these resources for industrial applications.

Japan, China, and the United States are at the forefront of global gas hydrate research and development, with significant advancements in field tests and extraction methods. India, South Korea, and Canada are also making substantial progress in exploring gas hydrate reservoirs and refining extraction technologies. While commercial production is yet to be realized, these nations are laying the groundwork for future development by addressing technical and environmental challenges. In the coming years, Japan and China are likely to be among the first to achieve commercial production.

Gas hydrates can serve as a transitional energy resource, bridging the gap between fossil fuels and cleaner energy systems. With their vast methane reserves, gas hydrates have the potential to supply energy for decades, offering an opportunity to reduce the environmental impact of energy production.

In sum, the comprehensive study of gas hydrates is essential for shaping energy policies and creating the frameworks necessary to sustainably harness this resource. The collaborative efforts of

nations, driven by shared interests in energy security and environmental stewardship, will play a crucial role in realizing the potential of gas hydrates as a future energy source. 

### **Acknowledgments**

*We are deeply indebted to the Turkish State Planning Organization (DPT) for their invaluable support in procuring equipment and establishing the data acquisition, processing, and interpretation laboratory through project 2003K120360.*

*We would like to thank our Team, dozens of geophysical (especially Orhan Atgın, Özkan Özel etc), geological (Talip Güngör, Altuğ Hasözbeke, Namık Çağatay et al.), and chemical engineers (Esin Süzer, Hakan Alyürük, Enis Darılmaz et al.), microbiologists (Burcu Omuzbüken), physical oceanographer (Murat Gündüz), DEU researchers (Burcu Barın, Sermet Gündüz, H. Mert Küçük and et al., scientists from METU (Çağlar Söyüncü), Istanbul University (Hakan Hoşgörmez, et al.), Ege University (Güven Özdemir), and K. Piri Reis and Dokuz Eylül 4 research vessels crews and Captain Kemal Dursun who worked on the projects during the Gas Hydrate researches and gave us a shoulder to overcome every problem we encountered. We also like to thank DEU IMST faculty members (Prof. Dr. Mustafa Ergün) and our colleague, Prof. Dr. Aynur Konaş, whom we lost, for her precious contribution to GH research. May her soul rest in peace. Also, we thank Prof. Michael Ivanov from Moscow State University for pioneering gas hydrate research on Training Through Research (TTR) surveys at different seas, and we remember him with love and respect. Last but not least, we would like to send a very special thanks to Salih Ertan for his valuable contributions to this manuscript.*

## References

- Anderson, B. J., Boswell, R., Collett, T. S., Farrell, H., Ohtsuki, S., White, M., & Zyrianova, M. (2014). Review of the findings of the İgnik Sikumi CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> gas hydrate exchange field trial. *Proceedings of the 8th International Conference on Gas Hydrates*, 1-8.
- Bazauk, O., Sai, K., Lozynskiy, V., Petlovanti, M., Saik, P., (2021) Research into Dissociation Zones of Gas Hydrate Deposits with a Heterogeneous Structure in the Black Sea - MDPI Energies
- Boswell, R., ve Collett, T.S., (2006) The gas hydrates resource pyramid. *Fire in the Ice, Methane Hydrate Newsletter*, US Department of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory, pp. 5-7.
- Boswell, R., & Collett, T. S. (2011). "The Gas Hydrate Resource: A Review of the Current State of Knowledge." *Natural Gas Hydrates: Energy Resource Potential and Environmental Impacts*.
- Boswell, R., Collett, T.S., Frye, M., Shedd, W., McConnell, D.R., ve Shelander, D., (2012) Subsurface gas hydrates in the northern Gulf of Mexico. *Marine and Petroleum Geology*, vol. 34, no. 1, pp. 4-30, June.
- Boswell, R., Schoderbek, D., Collett, T. S., Ohtsuki, S., White, M., & Anderson, B. J. (2017). The İgnik Sikumi Field Experiment, Alaska North Slope: Design, operations, and implications for CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> exchange in gas hydrate reservoirs. *Energy & Fuels*, 31(1), 140-153.
- Chen, L., Feng, Y., Okajima, J., Komiya, A., & Maruyama, S. (2017). Production behavior and numerical analysis for 2017 methane hydrate extraction test of Shenhu, South China Sea. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 53, 55-66.
- Cherskiy, N.V., ve Tsarev, V.P., (1977) Evaluation of the reserves in the light of search and prospecting of natural gases from the bottom sediments of the world's ocean (in Russian). *Geologiya Nefti i Geofizika*, vol. 5, pp. 21-31.
- Chong, Z. R., Yang, S. H. B., Babu, P., Linga, P., & Li, X. S. (2016). Review of natural gas hydrates as an energy resource: Prospects and challenges. *Applied Energy*, 162, 1633-1652.
- Chong, Z.R., Yang, M., Khoo, B.C., Linga, P., (2016) Size effect of porous media on methane hydrate formation and dissociation in an excess gas environment. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 55, 7981-7991.
- Çifci, G., 2020. Gas Hydrates: The Energy Source of the Near Future, BRIQ, Volume 2, Issue 1, Winter 2020-2021.
- Çifci G., Parlaktuna M., Çelebi, S.S., Okay Günaydın, S., (in press). Energy production from gas hydrates, ENY2, Elsevier.
- Collett, T. S., et al. (2015). "Economic Viability of Gas Hydrate Production in North America." *Natural Gas Hydrates: Energy Resource Potential and Environmental Impacts*.
- Dallimore, S. R., Wright, J. F., Nixon, F. M., Kurihara, M., Yamamoto, K., Fujii, T., Fujii, K., Numasawa, M., Yasuda, M., & Imasato, Y. (2012). Geologic and porous media factors affecting the 2007 production response characteristics of the JOGMEC/NRCAN/AURORA Mallik gas hydrate production research well. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 81, 45-55.
- Dong, F., Zang, X., Li, D., Fan, S., & Liang, D. (2009). Experimental investigation on propane hydrate dissociation by high concentration methanol and ethylene glycol solution injection. *Energy & Fuels*, 23(3), 1563-1567.
- Espinoza, D. N., & Santamarina, J. C. (2011). P-wave monitoring of hydrate-bearing sand during CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub> replacement. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 5(4), 1031-1038.
- Feng, J. C., Wang, Y., Li, X. S., Li, G., & Chen, Z. Y. (2015). Production behavior and numerical model for gas hydrate accumulation by the combination of depressurization and thermal stimulation. *Applied Energy*, 145, 25-33.
- Fujii, T., Nakamizu, M., Tsuji, Y., Namikawa, T., Okui, T., Kawasaki, M., Ochiai, K., Nishimura, M., & Takano, O. (2018). Resource assessment of methane hydrate in the eastern Nankai Trough, Japan. In Y.
- TP-DEPARK Project Report, 2018. "Gas Hydrate Potential Potential Study and Research Project in the Western Black Sea Pilot Area with Turkish Petroleum and Dokuz Eylül Technology Development INC".

- Konno, Y. Masuda, Y. Takai (Eds.), *Gas Hydrates 2: Geoscience Issues and Potential Industrial Applications* (pp. 88-107). Wiley-VCH.
- Hovland, M., & Judd, A. G. (2004). "Seabed Methane Hydrates: A Review of Their Environmental Impact." *Environmental Science & Policy*.
- Heijmans, K., et al., (2007). Methanotrophy below pH 1 by a new Verrucomicrobia species: *Nature*, v. 6, no. 450, p. 874-878.
- Inagaki, F., et al., (2006). Biogeographical distribution and diversity of microbes in methane hydrate-bearing deep marine sediments on the Pacific Ocean Margin: *PNAS*, v. 103, no. 8, p. 2815-2820.
- International Energy Agency (IEA) (2018). "Gas Hydrates: A Potential Future Energy Source".
- Islam, M. R. (2015). Unconventional gas hydrates: Role of thermal stimulation and unconventional resources. In M. R. Islam (Ed.), *Unconventional Gas Hydrates* (pp. 231-263). Gulf Professional Publishing.
- Jones, C. M., Dourado, J.D.A. and Chaves, H.A.F., (2010). *Gas Hydrates and Microbiological Processes. Search and Discovery*. 80081.
- Jung, J. W., Santamarina, J. C., & Soga, K. (2010). Stress-strain response of hydrate-bearing sands: Numerical study using distinct element method simulations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B6).
- Kamath, V. A., & Patil, S. L. (2013). Experimental study of gas hydrate dissociation in porous media by depressurization and inhibitor injection. *Proceedings of the 7th International Conference on Gas Hydrates*, 1-10.
- Koh, C. A., Sum, A. K., & Sloan, E. D. (2012). Gas hydrates: Unlocking the energy from icy cages. *Journal of Applied Physics*, 106(6), 061101.
- Konno, Y., Masuda, Y., Hariguchi, Y., Kurihara, M., & Ouchi, H. (2010). Key factors for depressurization-induced gas production from oceanic methane hydrates. *Energy & Fuels*, 24(3), 1736-1744.
- Konno, Y., Fujii, T., Sato, A., Akamine, K., Naiki, M., Masuda, Y., Yamamoto, K., & Nagao, J. (2014). Key findings of the world's first offshore methane hydrate production test off the coast of Japan: Toward future commercial production. *Energy & Fuels*, 28(5), 3544-3553.
- Konno, Y., Masuda, Y., Hariguchi, Y., Kurihara, M., & Ouchi, H. (2010). Key factors for depressurization-induced gas production from oceanic methane hydrates. *Energy & Fuels*, 24(3), 1736-1744.
- Küçük, H.M., 2018 Türkiye's Gas Hydrate Road Map Proposal, World Energy Council, Turk Milli Komitesi, Oil and Gas Working Group PDG1.
- Lee, J., Park, S., & Sung, W. (2013). An experimental study on the productivity of dissociated gas from hydrate by depressurization scheme. *Transport in Porous Media*, 92(1), 69-81.
- Lee, J., & Lee, K. (2014). "Recent Advances in Gas Hydrate Research: A Review." *Journal of Petroleum Science and Engineering*.
- Li, B., Li, G., Li, X. S., Li, Q. P., Yang, B., Zhang, Y., & Chen, Z. Y. (2014). Gas production from methane hydrate in a pilot-scale hydrate simulator using the huff and puff method by experimental and numerical studies. *Energy & Fuels*, 26(12), 7183-7194.
- Li, X. S., Yang, B., Li, G., Li, B., Zhang, Y., & Chen, Z. Y. (2015). Experimental study on gas production from methane hydrate in porous media by huff and puff method. *Fuel*, 119, 102-110.
- Li, X. S., Xu, C. G., Zhang, Y., Ruan, X. K., Li, G., & Wang, Y. (2016). Investigation into gas production from natural gas hydrate: A review. *Applied Energy*, 172, 286-322.
- Li, X. S., Xu, C. G., Zhang, Y., Ruan, X. K., & Li, G. (2018). Experimental investigation into the production behavior of methane hydrate under different depressurization schemes. *Applied Energy*, 227, 710-718.
- Liu, Y., Gamwo, I. K., & Myshakin, E. M. (2012). Role of methanol in hydrate dissolution. *Journal of Physical Chemistry B*, 116(44), 13294-13301
- Liu, Y., et al. (2012). "Environmental Impact Assessment of Gas Hydrate Exploitation: A Review." *Energy Procedia*.
- Makogon, Y. F., et al. (2007). "Hydrate Formation and Its Prevention in Natural Gas Production." *Journal of Natural Gas Science and Engineering*.
- Matsumoto, R., et al. (2013). "The Role of Natural Gas Hydrates in Global Energy Supply: An Economic Perspective." *Energy Policy*.
- McConnell, D.R. (2019). *Gas Hydrate Prospecting Prospecting and Characterization*. The Offshore Technology Conference held in Houston, Texas, USA, 6- 9May 2019, OTCOTC -29604 -MS .
- McGrail, B. P., Zhu, T., Hunter, R. B., White, M. D., Patil, S. L., & Kulkarni, A. S. (2007). A new method for enhanced production of gas hydrates with CO<sub>2</sub>. *Proceedings of the AAPG Hedberg Conference "Natural Gas Hydrates: Energy Resource Potential and Associated Geologic Hazards"*, 1-5.

- METI (Ministry of Economy, Trade and Industry, Japan). (2017). FY 2016 methane hydrate resource development offshore production test in the Sea of Japan. METI Press Release.
- Minshull, T.A., Marín-Moreno, H., Betlem, P., Bialas, J., Buenz, S., Burwicz, E., Cameselle, A.L., Cifci, G., Giustiniani, M., Hillman, J.I.T., Hölz, S., Hopper, J.R., Ion, G., León, R., Magalhaes, V., Makovsky, Y., Mata, M.-P., Max, M.D., Nielsen, T., Okay, S., Ostrovsky, I., O'Neill, N., Pinheiro, L.M., Plaza-Faverola, A.A., Rey, D., Roy, S., Schwalenberg, K., Senger, K., Vadakkepuliambatta, S., Vasilev, A., Vázquez, Juan.-Tomá., Hydrate occurrence in Europe: A review of available evidence, *Marine and Petroleum Geology* (2019), doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.08.014>.
- Moridis, G. J., Collett, T. S., Pooladi-Darvish, M., Hancock, S., Santamarina, C., Boswell, R., Kneafsey, T., Rutqvist, J., Kowalsky, M. B., Reagan, M. T., Sloan, E. D., Sum, A. K., & Koh, C. A. (2011). Challenges, uncertainties, and issues facing gas production from gas-hydrate deposits. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 14(01), 76-112.
- Ojha, M., & Sain, K. 2009. Seismic attributes for identifying gas-hydrates and free-gas zones: application to the Makran accretionary prism. 32, 264-270.
- Park, Y., Cha, M., Cha, J. H., Shin, K., Lee, H., Park, K. P., Huh, D. G., Lee, H. Y., Kim, S. J., & Lee, J. (2008). Swapping carbon dioxide for complex gas hydrate structures. *Proceedings of the 6th International Conference on Gas Hydrates*, 1-10.
- Reagan, M. T., Moridis, G. J., Elliott, S. M., & Maltrud, M. (2010). Contribution of oceanic gas hydrate dissociation to the formation of Arctic Ocean methane plumes. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C9).
- Ruppel, C. D., & Kessler, J. D. (2017). The interaction of climate change and methane hydrates. *Reviews of Geophysics*, 55(1), 126-168.
- Rutqvist, J., Moridis, G. J., Grover, T., & Collett, T. (2009). Geomechanical response of permafrost-associated hydrate deposits to depressurization-induced gas production. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 67(1-2), 1-12.
- Sahu, S. K., Yamada, Y., Tsuji, T., & Matsuoka, T. (2018). Chemical agent effects on methane hydrate dissociation: A review. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 45, 581-593.
- Sloan, E. D., & Koh, C. A. (2008). *Clathrate hydrates of natural gases* (3rd ed.). CRC Press.
- Song, Y., Yang, L., Zhao, J., Liu, W., Yang, M., Li, Y., Liu, Y., & Li, Q. (2016). The status of natural gas hydrate research in China: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 1498-1513.
- Su, Z., He, Y., Wu, N., Zhang, K., & Moridis, G. J. (2021). Evaluation of gas production from the first gas hydrate production test in the South China Sea. *Applied Energy*, 290, 116574.
- Sun, Z., Wang, R., Ma, R., Guo, K., & Fan, S. (2015). Effect of surfactant on natural gas hydrate production by using hydrate formation. *Energy & Fuels*, 17(5), 1180-1185.
- Xu, C. G., Li, X. S., Ruan, X. K., Chen, Z. Y., & Yan, K. F. (2016). Advances in pilot-scale investigations on gas hydrate exploitation and scale-up research. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 24(2), 271-281.
- Yamamoto, K., Terao, Y., Fujii, T., Ikawa, T., Seki, M., Matsuzawa, M., & Kanno, T. (2014). Operational overview of the first offshore production test of methane hydrates in the Eastern Nankai Trough. In *Offshore Technology Conference* (pp. 1-11).
- Yan, T., Zhou, Y. Q., Zhang, C. L. (2006). Diversity of functional genes for methanotrophs in sediments associated with gas hydrates and hydrocarbon seeps in the Gulf of Mexico: *FEMS Microbiology Ecology*, v. 57, no. 2, p. 251-259.
- Yang, M., Song, Y., Ruan, X., Liu, Y., Zhao, J., & Li, Q. (2012). Comparative analysis of hydrate-based natural gas storage methods through numerical simulation. *Energy & Fuels*, 26(8), 4911-4918.
- Walsh, M. R., Hancock, S. H., Wilson, S. J., Patil, S. L., Moridis, G. J., Boswell, R., Collett, T. S., Koh, C. A., & Sloan, E. D. (2009). Preliminary report on the commercial viability of gas production from natural gas hydrates. *Energy Economics*, 31(5), 815-823.
- White, M. (2008). Comparative Assessment of Advanced Gas Hydrate Production Methods: NETL Hydrate Program Peer Review, Pacific Northwest National Laboratory, Aug 2008.
- Zhen-guo Z., Yu W., Lian-feng G., Ying Z., Chang-shui L., (2012) "International Conference on Future Energy, Environment, and Materials Marine Gas Hydrates: Future Energy or Environmental Killer?"

# Yeni Bir Enerji Kaynağı Olarak Gaz Hidratlar



---

**GÜNAY ÇİFCİ (Sorumlu yazar)\***

Prof. Dr.  
DEÜ Deniz Bilimleri ve Teknoloji Enstitüsü

**SERDAR S. ÇELEBİ**

Prof. Dr.  
İSTÜN, İstanbul Sağlık ve Teknoloji Üniversitesi  
ORCID: 0000-0003-0993-9762

**MAHMUT PARLAKTUNA**

Prof. Dr.  
ODTÜ Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü  
ORCID: 0000-0001-6340-3307

**ASLI KAÇAR**

Prof. Dr.  
DEÜ Deniz Bilimleri ve Teknoloji Enstitüsü  
ORCID: 0000-0002-8705-3695

**SEDA OKAY GÜNAYDIN**

Doç. Dr.  
DEÜ Deniz Bilimleri ve Teknoloji Enstitüsü  
ORCID: 0000-0002-6976-7854

---



*\*Prof. Dr. Günay Çifci, lisans eğitimini Yıldız Üniversitesi Jeofizik Bölümü'nde, yüksek lisansını Dokuz Eylül Üniversitesi (DEÜ) Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Enstitüsü'nde doktorasını ise Trieste Üniversitesi (İtalya) ve DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü'nde tamamladı. 1991, 1995, 1996, 2000 ve 2001, 2004 yıllarında Akdeniz ve Karadeniz uluslararası sularında UNESCO destekli Araştırma Yoluyla Yüzen Üniversite Eğitim seferlerine katıldı. 2001 yılında ABD Virginia Tech Üniversitesi Yer Bilimleri Bölümü'nde misafir araştırmacı olarak bulunmuştur. Avrupa Denizlerindeki Doğal Gazlar için Yerli Kaynaklar: Gaz Hidratlar (MIGRATE) Türkiye Temsilciliği Yürütme Komitesi üyesi olmuştur. AB 5.,6., 7. Çerçeve projelerinde ve Horizon 2020'de proje ortağı ve koordinatörlüğü yapmıştır. 2005-2018 yılları arasında Devlet Planlama Teşkilatı (DPT) desteği ile faaliyetlerine başlayan Dokuz Eylül Üniversitesi Jeofizik Sismik (Seis Lab) Laboratuvarı'nın kurucusudur. 10'dan fazla TÜBİTAK ve 9 AB projesini tamamlamış, ulusal ve uluslararası 11 den fazla projede yer almıştır. Türkiye'nin ilk milli gaz hidrat projesinin koordinatörü olarak ilk fazını Türkiye Petrolleri ve DEPARK ile birlikte hayata geçirmiştir. DEÜ Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Enstitüsü Deniz Jeolojisi ve Jeofiziği alanında çalışmalarını sürdürmektedir.*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4380-8056>

e-posta: [gunay.cifci@deu.edu.tr](mailto:gunay.cifci@deu.edu.tr) ve [gunay.cifci@gazhidratek.com](mailto:gunay.cifci@gazhidratek.com)

**Geliş Tarihi:** 03.12.2024

**Kabul Tarihi:** 22.04.2025

Çifci, G. & Çelebi, S. S. & Parlaktuna, M. & Kaçar, A. & Günaydın S. O. (2025). Yeni Bir Enerji Kaynağı Olarak Gaz Hidratlar. *BRIQ Kuşak ve Yol Girişimi Dergisi* 6(3), 351-374.



## ÖZ

Su ve metan moleküllerinin oluşturduğu katı buz benzeri yapılar olan gaz hidratlar, daha temiz yanan metan için bol miktarda rezerv sunarak gelecekte kritik bir enerji kaynağı olarak ortaya çıkmaktadır. Bu rezervler enerji güvenliğini artırma, enerji portföylerini çeşitlendirme ve geleneksel hidrokarbonlardan daha sürdürülebilir enerji sistemlerine geçişi destekleme potansiyeline sahiptir. Nanoteknoloji, mikrobiyolojik yöntemler ve hibrit yaklaşımlar gibi yeni teknolojiler, verimliliği artırmak ve çevresel etkileri azaltmak için geliştirilmektedir. Küresel olarak Japonya, Çin, ABD, Hindistan, Güney Kore ve Kanada gibi ülkeler gaz hidratlar konusunda araştırma ve geliştirmeye öncülük etmekte, ileri teknolojilere ve saha testlerine önemli yatırımlar yapmaktadır. Yakın geleceğin enerji kaynağı olarak kabul edilen “Gaz Hidratlar”, Türkiye’nin Ulusal Gaz Hidrat Projesi’nin ilk aşaması kapsamında pilot bir bölgede tespit edilmiş ve haritalanmıştır. Karadeniz başta olmak üzere Türkiye’yi çevreleyen denizlerde mevcut gaz hidratı kaynakları Türkiye için stratejik bir avantaj oluşturuyor.

**Anahtar Kelimeler:** Çevresel sürdürülebilirlik, enerji güvenliği, gaz hidratlar, Türkiye Ulusal Gaz Hidrat Projesi, yeni enerji kaynakları.

---

## Gas Hydrates as a New Energy Resource

### ABSTRACT

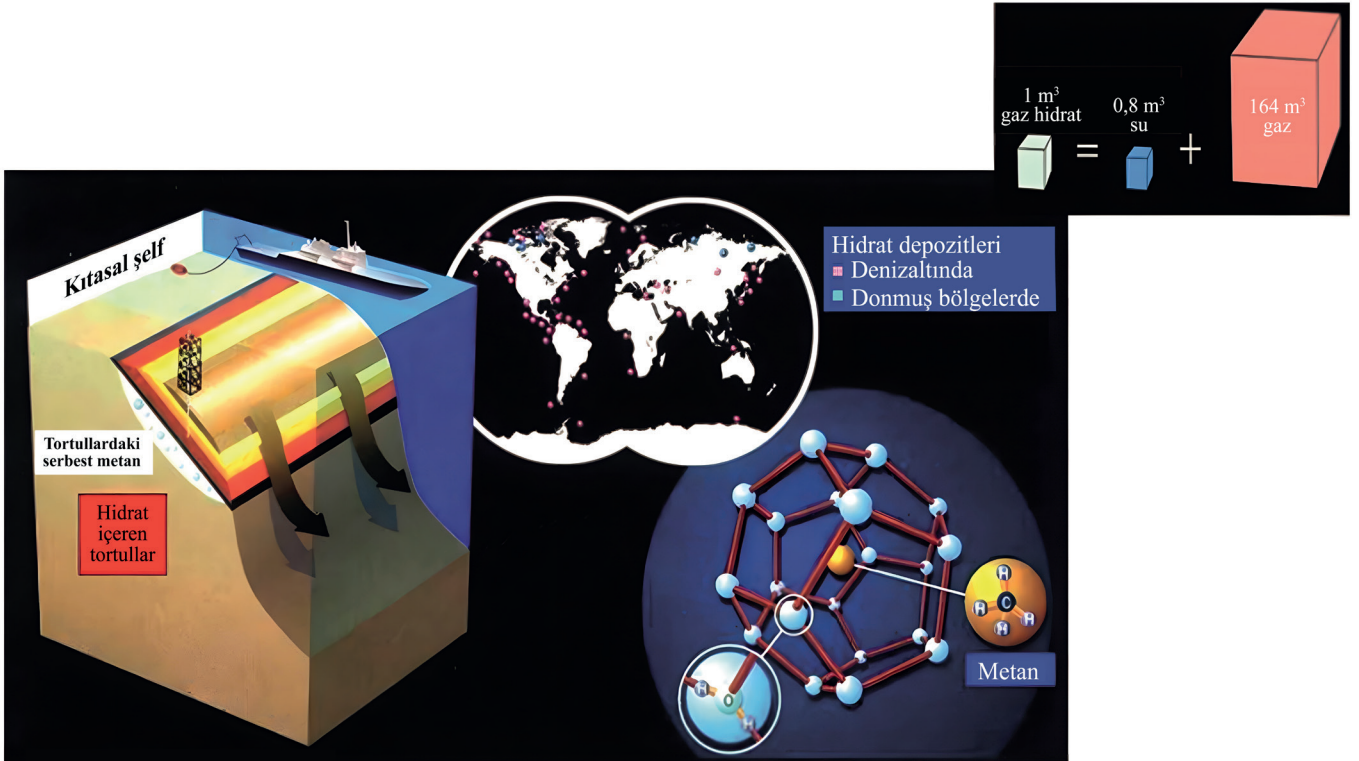
Gas hydrates, solid ice-like structures formed by water and methane molecules, are emerging as a critical future energy resource, offering abundant reserves of cleaner-burning methane. These reserves have the potential to enhance energy security, diversify energy portfolios, and support the transition from traditional hydrocarbons to more sustainable energy systems. Globally, nations such as Japan, China, the United States, India, South Korea, and Canada are leading research and development in gas hydrates, making substantial investments in advanced technologies and field tests. These efforts aim to overcome the significant technical and economic challenges currently limiting commercial-scale production. Türkiye’s proximity to significant gas hydrate deposits, particularly in the Black Sea, presents a notable strategic opportunity. It is imperative that Türkiye capitalizes on this unique positioning by transforming these inherent advantages into long-term competitive strengths. The confirmed gas reserves in the Black Sea exemplifies such potential.

**Keywords:** Energy security, environmental sustainability, gas hydrates, new energy resources, Turkey National Gas Hydrate Project.

## Giriş

SU VE METANDAN OLUŞAN KRİSTAL bileşikler olan gaz hidratlar, muazzam potansiyele sahip geleneksel olmayan bir enerji kaynağı olarak büyük ilgi çekmiştir. ‘Yanan buz’ olarak da bilinen metan hidratlar tüm okyanus kenarlarında meydana gelmektedir (Şekil 1 ve 2). Minshull vd., 2021 yılında yaptıkları çalışmada hidrat oluşumuna dair önemli kanıtların bulunduğu birçok bölgeyi tanımlamışlardır. Gaz hidrat birikimlerinin tabanı deniz tabanı topoğrafyasını takip eder ve sismik kesitlerde “Tabana Benzeyen Yansıtıcı (BSR)” olarak adlandırılır. BSR’lar çok kanallı sismik yansıma kesitlerinde hidratların tanımla-

nabilmesi için takip edilen bir yansımadır (Ojha & Sain, 2009). Hidratların tanımlanması ve analiz edilmesi önem taşımaktadır (Şekil 3). Öncelikle deniz çökeltilerinde ve donmuş bölgelerde bulunan bu doğal olarak oluşan bileşiklerin, bilinen tüm fosil yakıt rezervlerinin toplamından daha fazla enerji içerdiği tahmin edilmektedir. Gaz hidratlarda depolanan metan, kömür ve petrol gibi geleneksel hidrokarbonlara göre daha temiz yanan bir alternatifi temsil etmekte ve bu kaynağı küresel enerji güvenliği ve sürdürülebilirliğine umut verici bir katkı olarak konumlandırmaktadır (Şekil 2). Çifci (2020) çalışmasında gaz hidratlarının yer bilimi ve ülke ekonomisi için gelecekteki bir enerji kaynağı olarak önemini vurgulamaktadır.



Şekil 1. Su ve metandan oluşan kristal bileşikler olan gaz hidratların, önemi ve deniz çökeltilerinde ve don ayazı (permafrost) bölgelerindeki yerleri gösterilmektedir. Yüksek basınç ve düşük sıcaklıklarda metan, metan hidratı oluşturmak üzere bir buz kafesinin içinde hapsolür (Şekil: Çifci vd., baskıda).

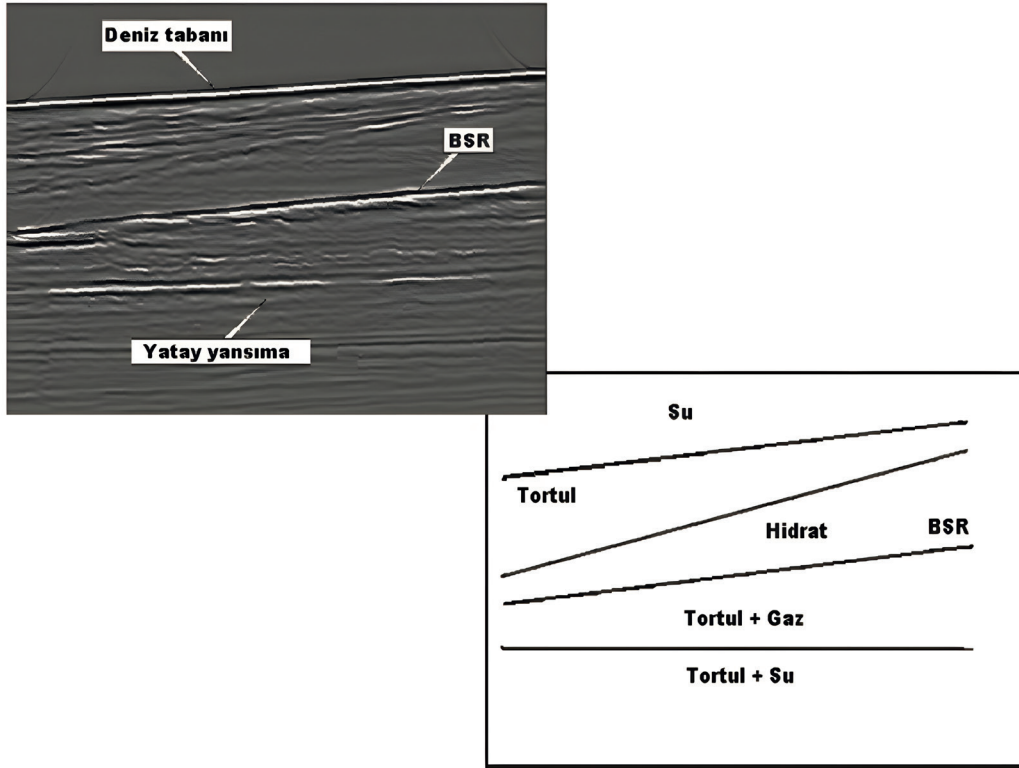
Boswell ve Collett (2011) tarafından kavramsallaştırılan gaz hidrat kaynak piramidi, bu yatakları jeolojik ve ekonomik geri kazanılabilirliklerine göre kategorize etmektedir (Şekil 4). Kolayca çıkarılabilen birikimlerden geri kazanım için ileri teknolojiler gerektirenlere kadar kaynak erişilebilirliğindeki önemli çeşitliliği vurgulamaktadır. Bu çeşitlilik, kaynakların tam potansiyelini ortaya çıkarmak için yenilikçi çıkarma tekniklerine ve stratejik planlamaya duyulan ihtiyacın altını çizmektedir. Ayrıca, kıta kenarları ve Arktik bölgelerdeki yaygın dağılımları, enerji portföylerini çeşitlendirmek ve ithal yakıtlara bağımlılığı azaltmak isteyen ülkeler için fırsatlar sunmaktadır.

Yenilikçi çıkarma teknolojileri küresel ara-

tırma çabalarının odak noktası olmuştur. Basınç düşürme, ısıtma ve kimyasal püskürtme gibi yöntemler aktif olarak geliştirilmekte olup her biri benzersiz faydalar ve zorluklar sunmaktadır (Şekil 5). Bunlar arasında CO<sub>2</sub> püskürtme metan geri kazanımı ve karbon tutma gibi uluslararası iklim değişikliği azaltma hedefleriyle uyumlu ikili faydası nedeniyle öne çıkmaktadır. Elektromanyetik ısıtma, mikrobiyolojik stimülasyon ve nanoteknoloji uygulamaları gibi yeni teknikler verimliliği artırmak, çevresel etkileri azaltmak ve ticari üretimin önündeki teknik engelleri aşmak için araştırılmaktadır. Çifci vd. (baskıda) çalışmalarında gaz hidratlarından bu üretim yöntemlerini irdelemektedir.



Şekil 2. Batı Karadeniz'de deniz tabanından elde edilen gaz hidratlar ve yakıldıklarındaki görüntüsü. (Şekil: TP-DEPARK Proje Raporu, 2018).



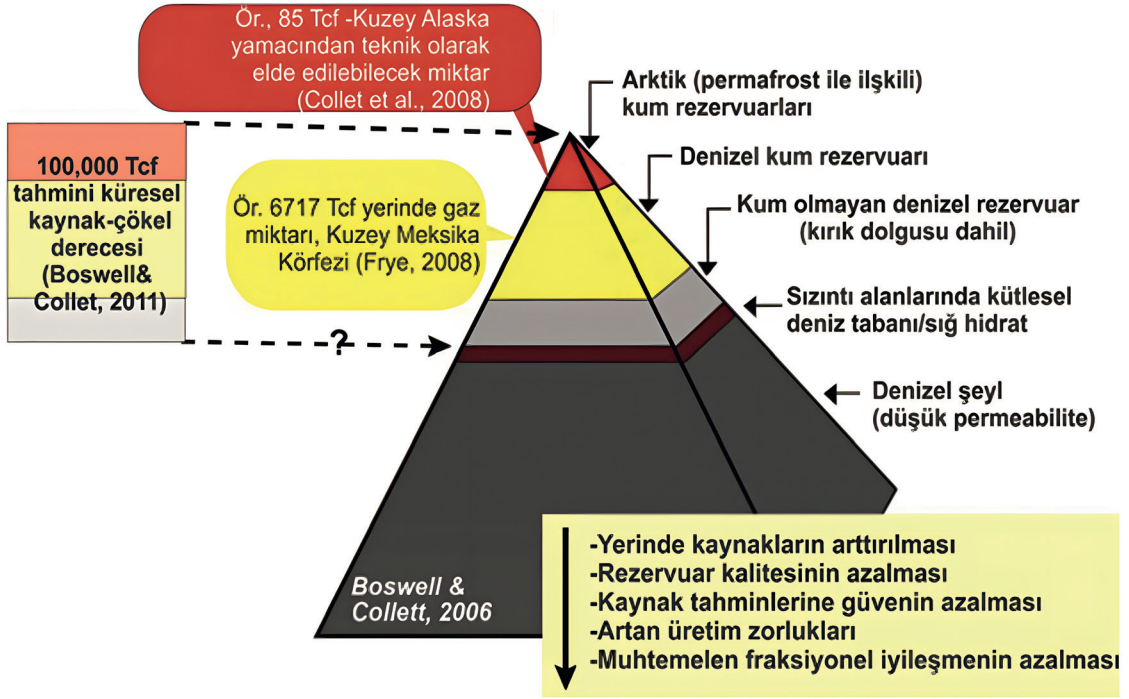
Şekil 3. Denizel tortullarda gaz hidratların tanımlanabilmesi için belirteç olan Tabana Benzeyen Yansıtıcıyı (BSR) gösteren jeofizik sismik yansıma kesiti yorumu (Şekil: Çifci vd., baskıda).

Japonya, Çin ve Amerika Birleşik Devletleri gibi ülkeler, bu yöntemleri iyileştirmek ve üretimi artırmak için saha testleri ve pilot projeler yürüterek araştırma ve geliştirmeye öncülük etmektedir. Örneğin, Japonya'nın Metan Hidrat Ar-Ge programı, basınç düşürme yoluyla hidratlardan metan çıkarmanın fizibilitesini göstererek bu alanda öncü olmuştur. Benzer şekilde Çin de açık deniz hidrat üretim denemelerinde önemli aşamalar kaydederek çıkarma teknolojileri ve çevresel güvenlik protokollerindeki ilerlemeleri sergilemiştir. Ülke, gaz hidratların keşfi ve üretimi konusunda yoğun araştırmalar yürütmekte ve bu alandaki bilimsel ve mühendislik çalışmalarına önemli yatırımlar yapmaktadır. Gaz hidratların çıkarılması, depolanması ve taşınması gibi süreçleri kapsayan üretim ve işleme teknolojileriyle ilgili

çok sayıda patente sahiptir.

Fosil yakıtlara alternatif bir kaynak olarak gaz hidratların potansiyeli, enerji güvenliği stratejileri açısından büyük önem taşıyor ve bu alandaki gelişmeleri ülke için stratejik bir öncelik haline getiriyor. Ülke, gaz hidrat üretiminde ticari uygulamalara geçiş için iyileştirmeler üzerinde çalışmakta ve bu süreçte çeşitli teknoloji geliştirme projeleri yürütmektedir. Gaz hidratlar alanındaki bu liderlik, hem ulusal enerji politikalarında hem de küresel enerji dinamiklerinde önemli bir rol oynamaktadır.

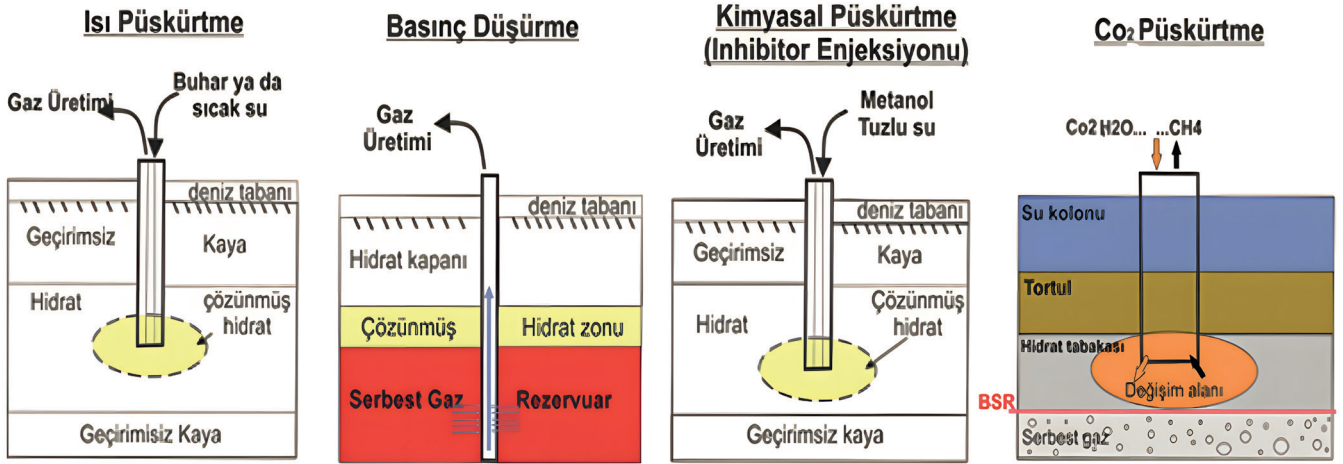
Küresel olarak Japonya, Çin, ABD, Hindistan, Güney Kore ve Kanada gibi ülkeler gaz hidratlar konusunda araştırma ve geliştirmeye öncülük etmekte, ileri teknolojilere ve saha testlerine önemli yatırımlar yapmaktadır.



Şekil 4. Bu yatakları jeolojik ve ekonomik geri kazanılabilirliklerine göre sınıflandıran Gaz hidrat kaynak piramidi. (Şekil: Boswell & Collett, 2011).

Bu çabalar, şu anda ticari ölçekte üretimi sınırlayan önemli teknik ve ekonomik zorlukların üstesinden gelmeyi amaçlamaktadır. Gaz hidrat çıkarımının karbon yakalama ve depolama teknolojileriyle entegre edilmesi, çevresel açıdan sürdürülebilir bir enerji kaynağı olma potansiyelini daha da güçlendirmektedir. Uygun inovasyon ve uluslararası işbirliği ile gaz hidratlar on yıllar boyunca enerji sağlayabilir ve daha temiz enerjiye doğru küresel geçişte bir geçiş kaynağı olarak hizmet edebilir. Bu teknolojilerin geliştirilmesi, gaz hidratların ekonomik ve çevresel faydalarını ortaya çıkarmak ve onları gelecekteki enerji stratejilerinin temel taşı haline getirmek için çok önemli olacaktır. Çin, gaz hidrat üretim teknolojilerinde patent

sahipliği açısından dünyanın önde gelen ülkeleri arasında yer almaktadır. Bu durum, gaz hidrat araştırma ve geliştirme alanındaki aktif çabalarının bir sonucudur. Çin ayrıca gaz hidrat teknolojileriyle ilgili uluslararası işbirlikleri ve ortak araştırma projeleri yürütmekte, bilgi paylaşımını ve teknolojik yenilikleri teşvik etmektedir. Yakın geleceğin enerji kaynağı olarak kabul edilen “Gaz Hidratlar”, Türkiye’nin Ulusal Gaz Hidrat Projesi’nin ilk aşaması kapsamında pilot bir bölgede tespit edilmiş ve haritalanmıştır. Çok sayıda kurum ve üniversitenin dahil olduğu çoklu bilim dallarının iş birliği sayesinde gaz hidratların varlığı resmi olarak teyit edildi ve rezerv tahminleri yapıldı. Potansiyel bir enerji kaynağı olarak kabul



Şekil 5. Gaz hidratlardan doğal gaz elde etmek için uygulanabilecek üretim yöntemleri. Isı püskürtme, Basınç düşürme, kimyasal püskürtme ve CO<sub>2</sub> değişimi, her biri benzersiz faydalar ve zorluklar sunar. (Şekil: Çifci vd., baskıda).

edilen gaz hidratların geniş ve önemli bir alanda keşfedilmesi, bu rezervi küresel enerji kaynakları dinamikleri göz önüne alındığında Türkiye'nin enerji geleceğini değiştirebilecek stratejik öneme sahip bir "oyun değiştirici" olarak konumlandırılmaktadır. Karadeniz başta olmak üzere Türkiye'yi çevreleyen denizlerde mevcut gaz hidratı kaynakları Türkiye için stratejik bir avantaj oluşturuyor. Bu arada, Türkiye'nin, biricik avantajlarını rekabetçi üstünlüklere dönüştürmek gibi bir önceliği olması gerektiğine de işaret etmek yerinde olur. Karadeniz'de mevcut gaz rezervleri böyle bir avantaja işaret ediyor. Bu keşfin Türk araştırmacılar tarafından gerçekleştirilmiş olmasının yanı sıra, ulusal, bölgesel ve küresel ölçekte yankı uyandırma potansiyeline sahip bilimsel katkısı da büyük fırsatlara yol açabilir. Bu çerçevede, gaz hidratların diğer alanlardaki dağılımının harita-

lanması, tamamlanan pilot sahada ikinci aşamaya geçilmesi, pilot alanda mevcut üretim teknikleri kullanılarak gaz üretilmesi ve son aşamada ileri üretim teknolojilerine sahip ülkelerle işbirliğine gidilmesi bundan sonraki adımları oluşturmaktadır.

Bu makale, gaz hidrat gelişiminin çevresel, ekonomik ve jeopolitik etkilerini ele alarak araştırmaların mevcut durumunu, teknolojik ilerlemeleri ve potansiyel zorlukları incelemektedir. Gaz hidratların fosil yakıtlar ve daha temiz alternatifler arasındaki boşluğu doldurarak nasıl bir geçiş enerji kaynağı olarak hizmet edebileceğini araştırmaktadır. Ayrıca, bu umut verici kaynağın sorumlu bir şekilde kullanılması için birleşik standartların ve sürdürülebilir uygulamaların geliştirilmesinde uluslararası işbirliğinin önemini vurgulamaktadır.

## Gaz Hidratlardan Metan Üretim Yöntemleri

Doğal gazın gaz hidratlardan çıkarılması, her biri belirli çevresel ve ekonomik sonuçlar doğuran çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilebilir (Şekil 5). Bu bölümde bu yöntemler ve potansiyel etkileri daha ayrıntılı olarak incelenmektedir:

### Basıncsızlaştırma

Bu yöntem, gaz hidrat rezervuarı içindeki basıncın düşürülmesini ve böylece hidratların doğal gaza ayrışmasının sağlanmasını içerir. Basıncsızlaştırma ile ilişkili çevresel etkiler, rezervuarın mekanik yapısında potansiyel olarak çökme veya yüzey çökmesine yol açabilecek değişiklikleri içerebilir. Ayrıca, ayrışma süreci ısıyı emerek çevredeki suyun yerel olarak donmasına neden olur ve potansiyel olarak deniz ekosistemlerini etkiler. Ekonomik açıdan basıncsızlaştırma, karmaşık teknolojiler veya pahalı kimyasalların kullanımını gerektirmediği için diğer yöntemlere kıyasla genellikle daha ucuzdur (Boswell & Collett, 2011). Rezervuarın önemli bir bölümünü (%60'a kadar) yakalayarak verimli üretim potansiyeli sunar. Ancak, rezervuarın mekanik ve termodinamik özelliklerindeki değişiklikler nedeniyle verimlilik zaman içinde düşebilir. Ayrıca, bu yöntemin nispeten daha düşük enerji tüketimi, daha düşük işletme maliyetleri anlamına gelir.

### Isı Püskürtme

Isı püskürtmede rezervuar sıcaklığı, sıcak su veya buhar enjeksiyonu ya da kuyu deliğinin ısıtılması yoluyla artırılır. Çevresel etkiler, suda yaşayan organizmalar için risk oluşturabilecek bitişik su katmanlarının potansiyel ısınmasını içerir (Lee & Lee 2014). Bunun da ötesinde

ısı püskürtmenin bu ısıyı üreten enerji kaynağı, katmana bu ısıyı taşıyan akışkanın sevk pompası ve sistemlere bağlı olarak enerji maliyeti, CO2 salımı ve diğer sera gazı salım sorumlulukları da irdelenmelidir. Ayrıca, ısı püskürtmeleri yüksek enerji gereksinimleri önemli miktarda fosil yakıt tüketimini gerektirmekte ve bu da sera gazı emisyonlarının artmasına neden olmaktadır. Bu yöntem, buhar veya sıcak su üretimi ve püskürtmesi için ekipman ve enerjiye önemli miktarda ilk yatırım gerektirir. Rezervuarın neredeyse tamamen üretilmesini sağlayarak yüksek getiri elde etme potansiyeline sahip olsa da, üretilen gazın enerjisinin önemli bir kısmı rezervuarı ısıtmak için harcanır ve bu da net enerji çıktısını düşürür.

### Kimyasal Püskürtme

Bu yöntemde, rezervuarın koşullarını değiştirmek ve gaz salınımını tetiklemek için glikol veya metanol gibi kimyasallar enjekte edilir. İlgili çevresel etkiler, yeraltı suyu kaynaklarını kirletebilecek ve ekosistemlere zarar verebilecek potansiyel kimyasal sızıntıyı içerebilir [4]. Kullanılmış kimyasalların bertarafı da çevresel yönetim zorluklarını beraberinde getirmektedir. Ekonomik açıdan bakıldığında, kimyasal püskürtme, içerdiği kimyasallar nedeniyle önemli maliyetlere neden olur ve bu da işletme giderlerini önemli ölçüde artırır. Bu yöntem tipik olarak kapsamlı laboratuvar ve pilot ölçekli testler gerektirmekte, bu da araştırma ve geliştirme maliyetlerinin yükselmesine yol açmaktadır. Ayrıca, çevresel düzenlemelere ve atık yönetimi protokollerine uyum maliyetleri daha da artırabilir. Bununla birlikte, CO2 püskürtmesini metan üretimiyle birleştirmek, emisyonları azaltmak için çevresel krediler veya vergi teşvikleri sunarak potansiyel olarak uzun vadeli sürdürülebilirlik sağlayabilir.

## CO<sub>2</sub> Püskürtme

Bu yöntem, CO<sub>2</sub>'nin yakalanmasını ve enjekte edilerek rezervuar içindeki metanın yer değiştirmesini gerektirir. Birincil çevresel avantaj, atmosferik CO<sub>2</sub> emisyonlarındaki potansiyel azalmadır ve bu da iklim değişikliğinin hafifletilmesine olumlu katkıda bulunur (Hovland & Judd, 2004). Bununla birlikte, CO<sub>2</sub> püskürtmesi rezervuarın basınç dengesini bozabilir ve potansiyel olarak jeolojik denge sorunlarına neden olabilir.

## Gelişen Yöntemler

Gaz püskürtmesi, mikrobiyolojik teknikler, ultrasonik stimülasyon ve elektrikli ısıtma dahil olmak üzere çeşitli yenilikçi yaklaşımlar araştırılmaktadır. Bu yöntemlerin her birinin kendine özgü çevresel etkileri vardır. Örneğin, mikrobiyolojik yöntemler ekosistemlerdeki mikrobiyal dengeleri bozabilir (Liu vd., 2012 ; Chong vd., 2016). Mikroorganizmaların biyolojik faaliyetleri yoluyla metan salınımını teşvik eden mikrobiyal metanojenez, özellikle düşük sıcaklık ve düşük basınç koşullarında çevresel olarak sürdürülebilir bir alternatif sunmaktadır. Buna karşılık, elektrikli ısıtma içeren yöntemler, kullanılan enerji kaynaklarına bağlı olarak çevresel etkiler taşıyabilecek önemli miktarda enerji girdisi gerektirir.

Gaz hidratlar üzerine yapılan çeşitli mikrobiyolojik araştırmalar, istikrarsızlaştırma yoluyla hidrat üretimi için biyolojik uygulamaların potansiyeline işaret etmektedir. Bunlar arasında CO<sub>2</sub>'nin mikrobiyal dönüşümünü, biyolojik yerrinde metan üretimini ve hidratların kristalleşmesini engelleyen ve daha hızlı yeniden kristalleşmeyi veya "hafıza etkisini" ortadan kaldıran antifriz proteinleri (AFP'ler) üreten organizmaları içeren süreçler yer almaktadır. Bu kavramlar,

hidratlar için "yeşil inhibitörleri" ortaya çıkaracak teknikleri keşfetmek üzere daha fazla araştırma yapılmasını gerektirmektedir. Bu durum, dünya çapındaki önemli gaz hidrat birikimlerinden para kazanılmasıyla ilgili projelerde yer alan araştırmacılar için bir zorluk teşkil etmektedir: mikrobiyolojik süreçler, bunların ekonomik olarak geri kazanılmasının anahtarı olabilir (Jones, C. M. vd., 2010).

## Ekonomik Değerlendirmeler

Bu yöntemlerin çevresel etkilerinin anlaşılması ve azaltılması, sürdürülebilir enerji üretimi ve çevre yönetimi için çok önemlidir. Bu nedenle, her bir yöntemin uygulanması sırasında ayrıntılı çevresel etki değerlendirmeleri ve izleme protokolleri yürütülmelidir. Gaz hidratlardan doğal gaz üretiminin ekonomik uygulanabilirliği, kullanılan yöntem, teknolojik erişilebilirliğe, enerji piyasası koşullarına ve geçerli çevresel düzenlemelere bağlıdır (Jones vd., 2010). Yeni yöntemler genellikle önemli araştırma ve geliştirme harcamaları gerektirmekte ve geri dönüşleri teknolojilerin ticari başarısına bağlı olmaktadır. Yeni teknolojilerin uygulanması, öngörülemeyen teknik zorluklar veya optimum olmayan performans gibi operasyonel riskleri beraberinde getirebilir. Yüksek başlangıç maliyetleri ve teknik belirsizlikler göz önüne alındığında, ekonomik karlılığı en üst düzeye çıkarmak ve ilgili riskleri en aza indirmek için kapsamlı maliyet analizleri ve pilot projeler gereklidir.

## Jeopolitik ve Teknolojik Hususlar

Gaz hidratlardan faydalanma potansiyeli, öncelikle bol doğal kaynaklara ve gelişmiş teknolojik kabiliyetlere sahip ülkelere fayda sağlamaktadır.

Şu anda birkaç ülke, gaz hidrat çıkarma alanında araştırma ve geliştirme girişimlerine öncülük etmekte ve kendilerini bu kaynaklardan yararlanmak üzere konumlandırmaktadır (Cherskiy & Tsarev, 1977).

### Gelecek Projeler için Yenilikçi Yaklaşımlar

Devam eden araştırmalar mevcut yöntemlerin verimliliğini artırmayı, çevresel etkileri azaltmayı ve ekonomik maliyetleri düşürmeyi amaçlamaktadır. Gelecekteki gaz hidrat projeleri için önerilen birkaç yenilikçi teknik şunlardır:

#### Mikrobiyolojik Süreçler

Gaz hidratlar belirli mikro ve makrofauna ile yakından bağlantılıdır ve doğal gaz üretimi için hidrat destabilizasyonunu teşvik etmek üzere bu organizmalardan veya metabolik süreçlerinden yararlanma fırsatları sunar. Hidratlardan doğal gaz üretmek için üç temel yöntem tanımlanmıştır: Basınç destabilizasyonu, metanol kaynaklı destabilizasyon ve termal destabilizasyon. Deneysel bulgular, bu yöntemlerin işletme maliyetlerini karşılamaya yetecek koşullar altında işletebileceğini ve mikrobiyal süreçlerin metanol kullanımı yoluyla hidrat ayrışmasını ve metan üretimini potansiyel olarak kolaylaştırabileceğini göstermektedir.

Mikrobiyal süreçler, hidratların doğal gaz dönüşümünü arttırmak için umut vaat etmektedir. Örneğin, her ikisi de metanotrofik özelliklere sahip olan *Methylococcus capsulatus* Bath ve *Methylosinus trichosporium*, yüksek sıcaklıklarda yetiştirilebilir ve bakıra toleranslı monooksijenaz aktivitesi göstererek metan dönüşümünde biyoteknolojik uygulamalar için uygun adaylar olarak konumlandırılabilir. Ayrıca, metan hid-

rat içeren çökeltilerdeki mikrobiyal topluluklara JS1, Planctomycetes ve Chloroflexi gibi gruplar hakimdir ve bu da hidrat destabilizasyonunda uygulanmaları için önemli bir potansiyele işaret etmektedir. Ayrıca, Acidimethylosilex fumarolicum SolV gibi organizmalar aşırı koşullar altında metan üzerinde büyüyebilir, bu da CO<sub>2</sub> dönüştürücü mikrobiyal toplulukların metan hidratların kontrollü istikrarsızlaştırılmasını sağlayabileceğini düşündürmektedir. Pasifik Kuzeybatı Ulusal Laboratuvarı'nın çalışmaları da dahil olmak üzere devam eden araştırmalar, hidrat ayrışmasında mikrobiyal yöntemlerin rolünün altını çiziyor *Chryseobacterium* sp. C14 gibi organizmalardan elde edilen antifriz proteinlerinin hidrat kristalizasyonunu engelleme potansiyelini vurguluyor. Gaz hidratlar için ticari üretim yöntemleri geliştikçe, mikrobiyolojik süreçler sürdürülebilir gaz üretimini amaçlayan gelecekteki projelere entegrasyon için güçlü adaylardır (Inagaki vd., 2006 ; Heijmans vd., 2007 ; Yan vd., 2006 ; White, 2008).

**Elektromanyetik Isıtma:** Geleneksel ısı uyarılmaya (termal stimülasyon) alternatif olarak elektromanyetik dalgalar, derin ve daha az erişilebilir rezervuarlarda bile ısıyı etkili bir şekilde dağıtabilir. Bu yöntem, yüksek enerji verimliliği ve düşük çevresel etkisi ile karakterize edilir.

**Nanoteknoloji Uygulamaları:** Nano boyutlu malzemelerin ve kimyasalların kullanımı hidratların çözünürlüğünü artırabilir veya gaz salınımını hızlandırmak için kimyasal reaksiyonları katalize edebilir. Ayrıca, nano parçacıklar rezervuar gözenekliliğini ve geçirgenliğini artırarak gaz akışını kolaylaştırabilir.

**Geliştirilmiş CO<sub>2</sub> Püskürtme:** Bu yöntem, CO<sub>2</sub>'yi daha yüksek basınçlarda kullanarak daha verimli metan yer değiştirmesini kolaylaştırabilir ve aynı zamanda atmosferik CO<sub>2</sub> azaltımına katkıda bulunabilir.

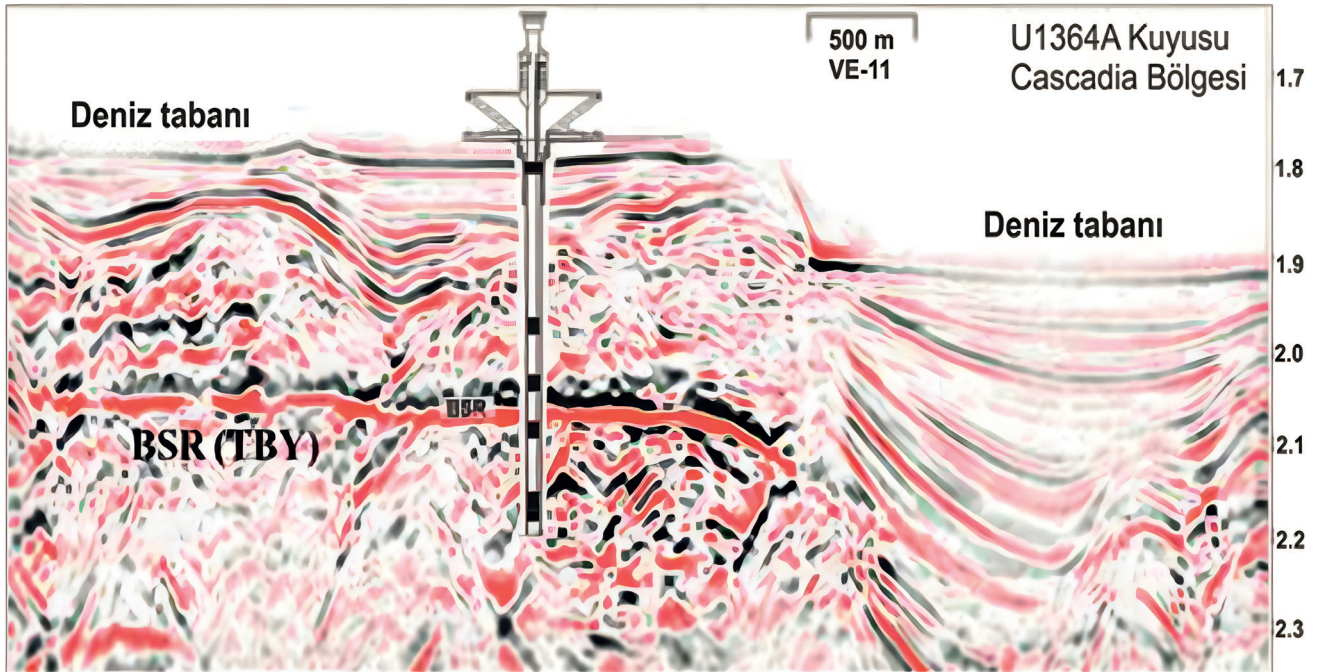
**Ultrasonik veya Akustik Dalgalar:** Bu yöntemler gaz hidrat çözünürlüğünü artırmayı ve hidrat yapısını bozarak metan salınımına yardımcı olmayı amaçlamaktadır.

**Hibrit Yöntemler:** Mevcut tekniklerin birleştirilmesi, üretim süreci boyunca birlikt hareket ederek etkiler yaratabilir. Örneğin, ısı uyarılmanın (termal stimülasyon) kimyasal veya CO<sub>2</sub> püskürtmeleri ile bütünleşik çözünürlüğü en iyi hale getirilebilir ve üretimi hızlandırabilir.

Bu yenilikçi teknikler, laboratuvar testleri ve pilot projeler yoluyla daha fazla doğrulamaya tabi tutulmalıdır. Gelecekteki uygulamalarda bu yaklaşımların çevresel uyumluluğu, ekonomik sürdürülebilirliği ve teknik fizibilitesi göz önünde bulundurulmalıdır. Bu yöntemlerin geliştirilmesiyle, gaz hidratlardan sürdürülebilir ve çevre dostu enerji üretimi potansiyeli gerçekleştirilebilir.

## Gaz Hidratlardan Enerji Üretimi

Japonya, Çin, ABD, Kanada, Hindistan ve Güney Kore gibi ülkeler teknolojik yenilikler, stratejik yatırımlar ve ulusal enerji politikalarına uyum yoluyla gaz hidratlardan yararlanma kapasitelerini önemli ölçüde geliştirmiştir (Boswell vd., 2012) Gaz hidratların jeofizik yöntemlerle (çok kanallı sismik yansıma) tespiti, sondaj ve karot programları aracılığıyla kanıtlanmıştır (McConnell, 2019). Şekil 6 gaz hidratın temeli olan BSR'yi göstermektedir. Bu ülkeler, gaz hidratların potansiyel faydalarını kısa sürede en üst düzeye çıkarmayı amaçlayarak araştırma ve geliştirme (Ar-Ge) faaliyetlerine önemli kaynaklar ayırmaktadır. Gaz hidratların enerji portföylerinin çeşitlendirilmesinde ve daha temiz enerji sistemlerine geçişte kritik bir rol oynaması beklenmektedir ki bu da



Şekil 6. Cascadia bölgesinde Gaz hidratların tabanı, tabana benzeyen yansıtıcı (BSR)'e ulaşan sondaj derinliğini gösteren bir kesit örneği (Şekil: McConnell, 2019).

enerjinin sürdürülebilirliği ve çevresel etkileriyle ilgili küresel kaygılar göz önüne alındığında giderek daha önemli hale gelmektedir (Boswell & Collett, 2006).

Zhang ve arkadaşlarının 2012 yılında yayımladıkları bir- başka akademik makale, deniz gaz hidratlarının hem umut vadeden bir enerji kaynağı hem de potansiyel bir çevresel tehdit olarak ikili doğasını incelemektedir. Yazarlar, gaz hidratlarını gelecekteki bir enerji kaynağı olarak cazip kılan üç temel kaynak özelliğini vurgulamaktadırlar: Muazzam miktarı: Güvenilir tahminler, küresel yataklarda  $10^{13}$  ila  $20 \times 10^{15}$  m<sup>3</sup> metan gazı bulunduğunu ve bunun potansiyel olarak insanlığın enerji ihtiyacını yaklaşık 1.000 yıl boyunca karşılayabileceğini göstermektedir. Karbon içeriği ( $10 \times 10^{12}$  ton), tüm fosil yakıt minerallerinin toplamının iki katıdır. Temizliği: Kömür, petrol ve doğal gaza kıyasla daha az zararlı gaz içeren yüksek saflıkta metan bulundurmaktadır. Yüksek enerji yoğunluğu: Normal koşullar altında 1m<sup>3</sup> gaz hidrat, 164m<sup>3</sup> metana eşdeğerdir- bu, diğer konvansiyonel olmayan kaynakların 10 katı ve konvansiyonel doğal gazın 2-5 katı enerji yoğunluğuna sahiptir. Yazarlar, gaz hidrat destabilizasyonu ile ilişkili üç büyük çevresel riski tanımlamaktadırlar: Küresel Isınma: Metan, mol başına CO<sub>2</sub>'den 3,7 kat ve ağırlık olarak 20 kat daha yüksek küresel ısınma potansiyeline sahip güçlü bir sera gazıdır. Makale, tarihsel hızlı ısınma olaylarını (özellikle yaklaşık 55,6 milyon yıl önce gerçekleşen "Geç Paleosen Termal Maksimum"u) hidratlardan salınan büyük miktardaki metan gazına bağlamaktadır.

**Deniz Tabanı Jeolojik Afetleri:** Gaz hidratlar konsolidasyon örtüsünden yoksundur ve faz dönüşümüne eğilimlidir. Sıcaklık-basınç koşulları değiştiğinde, hidratlar ayrışabilir, metan salabilir ve potansiyel olarak denizaltı heyelanlarını tetik-

leyebilir. Ekolojik Afetler: Makale, büyük çaplı metan salınımlarını tarihsel yokoluş olaylarıyla ilişkilendirmekte ve hidrat ayrışmasının Paleosen-Eosen sınırı civarında (55 milyon yıl önce) bentik hayvanların 1/2 ila 2/3'ünün neslinin tükenmesine neden olduğunu öne süren kanıtları belirtmektedir. Tartışma bölümü, gaz hidratların önemli bir potansiyel enerji kaynağı olduğunu, ancak herhangi bir gelişmenin öncelikle güvenliği ve çevresel korumayı gözetmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Bu dengeli değerlendirme, gaz hidratların hem umut vadeden bir enerji çözümü hem de potansiyel bir çevresel tehdit olarak karmaşık doğasını ortaya koymakta ve geliştirilmelerinde dikkatli, çevreye duyarlı yaklaşımlara duyulan ihtiyacı vurgulamaktadır (Zhen-guo vd., 2012).

Gaz hidratlar, özellikle geleneksel hidrokarbon rezervlerinin tükenmekte olduğu veya erişimin kısıtlı olduğu bölgelerde enerji güvenliğini artırma potansiyeli sunmaktadır. Bu kaynak, enerji ithalatına bağımlılığı azaltmak ve daha çeşitlendirilmiş ve dirençli bir enerji portföyü oluşturmak isteyen ülkeler için uygun bir seçenek olabilir.

### **Çevresel Etkiler ve Teknolojik Hususlar**

Gaz hidrat çıkarımının çevresel etkileri hem fırsatlar hem de zorluklar sunmaktadır. Bir yandan gaz hidratlar, karbon yakalama ve depolama/kullanma (CCSU- Carbon Capture Storage and Use) gibi yenilikçi tekniklerle birleştirilirse karbon emisyonlarının azaltılmasına katkıda bulunabilir. Öte yandan, çıkarma süreci potansiyel metan sızıntıları ve diğer ekolojik rahatsızlıklar gibi riskler taşımaktadır ve bunların etkin bir şekilde yönetilmesi gerekmektedir. Sonuç olarak, sürdürülebilir ve sorumlu kalkınmayı sağlamak için titiz çevresel değerlendirmeler şarttır.

Potansiyeline rağmen, gaz hidratların ticari ölçekte üretimi teknik zorluklar nedeniyle engellenmektedir. Devam eden Ar-Ge çalışmaları, ileri çıkarma teknolojilerinin geliştirilmesi yoluyla bu engelleri aşmayı amaçlamaktadır. Bu nedenle enerji politikaları, ekonomik büyüme ve çevresel sürdürülebilirliği sağlarken teknolojik yenilikleri de desteklemelidir.

### Uluslararası İşbirliklerinin Rolü

Gaz hidratların karmaşıklığı ve küresel önemi, birleşik standartlar, politikalar ve uygulamalar oluşturmak için uluslararası işbirliklerini gerekli kılmaktadır (International Energy Agency, 2018). Bu işbirlikleri, ortak Ar-Ge girişimlerini kolaylaştırarak ülkelerin uzmanlık ve kaynaklarını bir araya getirmelerini sağlar. Ayrıca, uluslararası standartların uyumlaştırılması, gaz hidrat çıkarımı sırasında çevresel ve güvenlik risklerinin yönetilmesi için kritik öneme sahiptir. İşbirliğine dayalı çerçeveler aynı zamanda koordineli politika geliştirme, eğitim programları ve yatırım stratejileri için de fırsatlar sunmaktadır ve bunların tümü gaz hidrat kaynaklarının sorumlu ve verimli bir şekilde kullanılması için gereklidir.

### Önemli Projeler ve Gelecek Yönelimleri

Japonya, Çin ve Hindistan'daki kayda değer projeler, gaz hidrat çıkarma teknolojilerinin geliştirilmesine öncülük etmektedir (Matsumoto vd., 2013). Bu girişimler, gaz hidratlarla ilişkili teknik ve çevresel zorluklara dair değerli bilgiler sağlamak ve potansiyel ticari uygulamalara yönelik önemli adımlar teşkil etmektedir. Bu projelerden elde edilen bulgular,

teknik engellerin aşılmasına, çevresel etkilerin en aza indirilmesine ve ekonomik verimliliğin optimize edilmesine yardımcı olarak diğer ülkeler için bir ölçüt teşkil edebilir. Gaz hidratların önemli enerji içeriği ve geniş dağılımı göz önüne alındığında, gelecekteki enerji tedarik stratejileri için kilit bir kaynak olarak konumlanmaktadır.

### Ekonomik Potansiyel ve Pazar Etkileri

Gaz hidratların ekonomik uygulanabilirliği, devam eden araştırmaların önemli bir alanıdır. Çalışmalar genellikle termal stimülasyon, kimyasal püskürtme, basınçsızlaştırma ve CO<sub>2</sub> püskürtme gibi çeşitli çıkarma tekniklerinin maliyet etkinliğini değerlendirmeye odaklanmaktadır (Matsumoto vd., 2013). Ayrıca, bu çalışmalar gaz hidratların küresel enerji piyasalarındaki rekabet gücünü incelemek, enerji portföylerini çeşitlendirme ve enerji güvenliğini artırma potansiyellerini değerlendirmektedir. Çevresel düzenlemeler de, uyum ve risk azaltma ile ilgili maliyetler göz önüne alındığında, gaz hidrat projelerinin ekonomik sürdürülebilirliğinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır (Jones vd., 2010). Jeopolitik analizler, gaz hidrat rezervlerinin ulusal enerji stratejileri üzerindeki etkilerini vurgulamaktadır. Önemli rezervlere sahip ülkeler, daha fazla enerji bağımsızlığı elde etmek için bu kaynaktan yararlanabilir ve böylece küresel enerji dinamiklerini etkileyebilir. Senaryo bazlı çalışmalar, çeşitli teknolojik ve piyasa koşulları altında gaz hidratların uzun vadeli ekonomik potansiyelini araştırarak, gelecekteki enerji sistemlerindeki rollerine ilişkin iç görüler sunmaktadır.

## Temel Politika Hususları

Gaz hidratlar ve bunların enerji politikalarına entegrasyonu üzerine yapılan araştırmalardan birkaç temel husus ortaya çıkmaktadır:

**Enerji Kaynaklarının Çeşitlendirilmesi:** Gaz hidratların enerji portföylerine dahil edilmesi enerji güvenliğini artırır ve geleneksel hidrokarbonlara olan bağımlılığı azaltır. Bu durum özellikle rezervlerin tükenmekte olduğu veya geleneksel kaynaklara erişimin kısıtlı olduğu bölgeler için geçerlidir.

**Enerji Güvenliği:** Yüksek metan içeriğiyle gaz hidratlar, ithalat bağımlılığını azaltabilecek ve enerji politikalarında kendi kendine yeterliliği teşvik edebilecek stratejik bir enerji kaynağı olarak görülmektedir.

**Çevresel Sürdürülebilirlik:** CO<sub>2</sub> püskürtmesi gibi çevreye duyarlı çıkarma teknikleri, sera gazı emisyonlarını azaltabilir ve böylece çevresel düzenlemeleri ve sürdürülebilirlik politikalarını etkileyebilir.

**Ekonomik Kalkınma:** Gaz hidrat kaynaklarının geliştirilmesi, özellikle kıyı bölgelerinde ve okyanus erişimi olan ülkelerde istihdam yaratılmasını ve ekonomik büyümeyi teşvik ederek, gelişmekte olan bu sektöre daha fazla yatırım yapılmasını sağlayabilir.

**Uluslararası İşbirlikleri ve Politikalar:** Gaz hidratların küresel önemi, bunların araştırılması, üretimi ve yönetimi için uluslararası standartlar ve protokoller gerektirmektedir. Uluslararası düzenlemelerin ve işbirliğinin güçlendirilmesi yenilikçi buluş teşvik edebilir ve çevresel sonuçları iyileştirebilir (International Energy Agency, 2018)..

## Bulgular

Metanın gaz hidratlardan çeşitli yöntemlerle çıkarılması, hem çevresel hem de ekonomik sonuçlara ilişkin önemli bilgiler sağlamıştır.

“Basınçsızlaştırma”, rezervardaki gazın %60’ına kadarını üretebilen uygun maliyetli bir teknik olarak ortaya çıkmıştır (Boswell & Collett, 2011). Bununla birlikte, deniz ekosistemlerini olumsuz etkileyebilecek çökme ve yerel donma gibi riskler taşımaktadır. Yöntemin daha düşük enerji tüketimi, işletme maliyetlerinin düşmesine katkıda bulunur, ancak rezervuar değişiklikleri nedeniyle verimlilik zaman içinde azalabilir.

“Isı Püskürtme”, potansiyel olarak neredeyse tam gaz üretimi sağlasa da, yüksek enerji gereksinimleri ve sera gazı emisyonlarının artmasına yol açan önemli fosil yakıt kullanımı ile ilgili zorluklarla karşı karşıyadır. Bu yöntem için yapılan ilk yatırım önemlidir ve üretilen enerjinin büyük bir kısmı rezervuarın ısıtılmasında harcanarak net enerji çıktısını azaltmaktadır.

“Kimyasal Püskürtme”, glikol veya metanol gibi kimyasalların kullanımını içerir ve potansiyel sızıntı ve yeraltı suyu kirliliği ile ilgili endişeleri artırır (Makogon vd., 2007). Sürdürülebilirlik için CO<sub>2</sub> püskürtmesi metan üretimi ile birleştirmenin olası uzun vadeli faydalarına rağmen, kimyasallarla ilişkili yüksek maliyetler ve çevresel düzenlemelere uyum, bu yöntemi ekonomik açıdan külfetli hale getirmektedir.

“CO<sub>2</sub> Püskürtme” atmosferik karbondioksit emisyonlarını potansiyel olarak azaltarak çevresel bir avantaj sunar (Hovland & Judd, 2004). Bununla birlikte, rezervuar içindeki basınç dengesini bozarak jeolojik stabilite sorunlarına yol açabilir.

“Mikrobiyolojik teknikler”, “ultrasonik stimülasyon” ve “elektromanyetik ısıtma” gibi yeni yöntemler araştırılmaktadır. Bu yenilikçi yaklaşımlar, çevresel etkileri en aza indirirken ekstraksiyon verimliliğini artırmayı amaçlamaktadır. Örneğin, mikrobiyolojik yöntemler uygun koşullar altında metan salınımını teşvik ederek sürdürülebilir bir alternatif sağlayabilir (Liu vd., 2012).

Japonya, Çin ve Amerika Birleşik Devletleri gibi ülkeler gaz hidrat çıkarma teknolojilerindeki gelişmelere öncülük etmektedir. Devam eden araştırmaları, teknik zorlukları ele almaya ve ekonomik uygulanabilirliği optimize etmeye odaklanmaktadır. Özellikle Japonya ve Çin, yakın zamanda ticari üretime geçmeye hazırlanıyor.

Gaz hidratlar enerji portföylerinin çeşitlendirilmesi ve ithal yakıtlara bağımlılığın azaltılması için bir fırsat sunmaktadır. Çevresel olarak, çıkarma işleminin karbon yakalama teknolojileriyle bütünleştirilmesi metan emisyonlarını azaltabilir ve sürdürülebilirliği teşvik edebilir.

Gaz hidratlar, kömür ve petrol gibi yüksek karbonlu yakıtlardan daha sürdürülebilir enerji sistemlerine geçişi kolaylaştıran bir ara enerji kaynağı olarak hareket etme potansiyeline sahiptir. Elektromanyetik ısıtma ve geliştirilmiş CO<sub>2</sub> püskürtme gibi yenilikçi yöntemler, bu potansiyelin tam olarak hayata geçirilmesi için elzemdir.

Gaz hidrat çıkarımının karbon yakalama ve depolama/kullanma (CCSU) teknolojileriyle bütünleştirilmesi, çevresel açıdan sürdürülebilir bir enerji kaynağı olma potansiyelini daha

da güçlendirmektedir. Uygun yenilikçi buluş ve uluslararası iş birliği ile gaz hidratlar on yıllar boyunca enerji sağlayabilir ve daha temiz enerjiye doğru küresel geçişte bir geçiş kaynağı olarak hizmet edebilir. Bu teknolojilerin ilerletilmesi, gaz hidratların ekonomik ve çevresel faydalarını ortaya çıkarmak ve onları gelecekteki enerji stratejilerinin temel taşı haline getirmek için gerekli olacaktır.

Sonuç olarak, gaz hidratlar gelecekteki enerji taleplerini sürdürülebilir bir şekilde karşılama kapasitesine sahip uygulanabilir bir enerji kaynağını temsil etmektedir. Bunların başarılı bir şekilde kullanılması, teknolojik yeniliklerin devamına, uluslararası iş birliğine ve sağlam çevresel önlemlere bağlı olacaktır.

Ülkemizin öncelikli hedefleri arasında yerli ve milli kaynakların kullanılarak Türkiye'nin enerjide dışa bağımlılığını azaltmak yer almaktadır. Dünya ekonomisinde söz sahibi büyük ülkelerin gaz hidratlarla ilgili yaptığı araştırmalar ve gelinen son noktanın gaz hidratlardan doğal gaz üretimine yönelik üretim testleri olduğu göz önünde bulundurulduğunda, ülkemizin süratle gaz hidrat araştırmaları için yaptığı faaliyetleri yerli ve milli kaynaklarla arttırması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda izlenmesi gereken yol haritası Küçük, H.M., 2018 çalışmasında değinmiştir.

Aşağıdaki tablolarda gaz hidratlarından doğal gaz üretim yöntemlerinin karşılaştırması, gaz hidrat üretim yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları, gaz hidrat üretim yöntemlerinin teknolojik olgunluk ve uygulama durumları özetlenmiştir.

Tablo 1. Gaz Hidratlardan Doğal Gaz Üretim Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Üretim Yöntemi	Temel Prensiptir	Teknik Uygulanabilirlik	Gaz Üretim Verimi	Enerji Verimliliği	Ekonomik Fizibilite	Çevresel Etki	Teknolojik Olgunluk	Önemli Başarılı Uygulamalar
<b>Basınç Düşürme (Depressurizasyon)</b>	Rezervuar basıncının hidrat kararlılık bölgesinin altına düşürülmesiyle ayrışmanın tetiklenmesi (Konno vd., 2010; Li vd., 2018)	Yüksek - Mevcut offshore teknolojileriyle uygulanabilir (Yamamoto vd., 2014)	%35-55 geri kazanım oranı (Moridis vd., 2011; Feng vd., 2015)	Yüksek (EROI: 5:1 - 8:1) (Walsh vd., 2009)	8-15 USD/MM Btu (Anderson vd., 2014)	Orta - Deniz tabanı stabilite riski ve su üretimi sorunu (Rutqvist vd., 2009)	Yüksek (TRL: 7-8) Saha testleri tamamlanmış (Fujii vd., 2018)	Japonya Nankai Çukuru (2013, 2017), Çin Güney Çin Denizi (2020) (Yamamoto vd., 2014; Su vd., 2021)
<b>Termal Uyarım</b>	Hidrat içeren formasyona ısı verilmesi yoluyla ayrışma (Li vd., 2016; Song vd., 2016)	Orta - Derin sularda ısı kaybı sorunları (Islam, 2015)	%40-70 potansiyel geri kazanım (Li vd., 2015)	Düşük (EROI: 1.5:1 - 3:1) (Yang vd., 2012)	15-25 USD/MM Btu (Anderson vd., 2014)	Orta - Yüksek - Termal kirlilik ve daha yüksek CH <sub>4</sub> kaçak riski (Ruppel ve Kessler, 2017)	Orta (TRL: 5-6) Lab ve sınırlı pilot testler (Li vd., 2016)	Çin Güney Çin Denizi laboratuvar ve pilot ölçekli testler (Li vd., 2016; Song vd., 2016)
<b>Kimyasal İnhibitör Enjeksiyonu</b>	Kimyasallar kullanarak hidrat kararlılık eğrisinin değiştirilmesi (Sloan ve Koh, 2008)	Orta - Kimyasal sorunları ve lojistik zorluklar (Sahu vd., 2018)	%30-50 tahmini verim (Kamath ve Patil, 2013)	Orta (EROI: 3:1 - 5:1) (Liu vd., 2012)	12-20 USD/MM Btu (Chong vd., 2016)	Yüksek - Kimyasal kirlilik potansiyeli (Chong vd., 2016)	Düşük-Orta (TRL: 4-5) Ağır lab testleri (Xu vd., 2016)	Hindistan NGHP laboratuvar çalışmaları, sınırlı saha testleri (Sahu vd., 2018)
<b>CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> Değişimi</b>	CO <sub>2</sub> enjeksiyonu ile metanın yer değiştirmesi (Park vd., 2008; Koh vd., 2012)	Düşük - Derin denizde CO <sub>2</sub> taşıma/enjeksiyon zorlukları (Espinoza ve Santamarina, 2011)	%60-80 teorik potansiyel (Boswell vd., 2017)	Değişken (EROI: 2:1 - 4:1) (McGrail vd., 2007)	18-30 USD/MM Btu, karbon kredisi olmadan (Anderson vd., 2014)	Düşük - Karbon yakalama ve depolama potansiyeli (Boswell vd., 2017)	Düşük (TRL: 3-4) Alaska saha testi (permafrost) (Boswell vd., 2017)	Alaska Kuzey Yamağı İğnik Sikumi testi (2012) (Konno vd., 2014)

Tablo 1. Gaz Hidratlardan Doğal Gaz Üretim Yöntemlerinin Karşılaştırılması (devam)

Üretim Yöntemi	Temel Prencip	Teknik Uygulanabilirlik	Gaz Üretim Verimi	Enerji Verimliliği	Ekonomik Fizibilite	Çevresel Etki	Teknolojik Olgunluk	Önemli Başarımlar
<b>Mekanik Yöntemler</b>	Hidrat içeren materyalin fiziksel çıkarılması (Chong vd., 2016)	Çok Düşük - Derin denizde uygulanması çok zor (Yamamoto vd., 2014)	%70-90 teorik, pratik değil (Chong vd., 2016)	Çok Düşük (EROI: 1:1 - 2:1) (Anderson vd., 2014)	25-40 USD/MM Btu (tahmini) (Anderson vd., 2014)	Çok Yüksek - Deniz tabanında büyük fiziksel etki (Chong vd., 2016)	Çok Düşük (TRL: 2-3) Konsept aşamasında (Yamamoto vd., 2014)	Sadece konsept çalışmaları ve sığ deniz önerileri (Chong vd., 2016)
<b>Basınç Düşürme + Termal Uyarım Hibrit Yöntem</b>	Basınç düşürme ile birlikte kısmi termal destek (Konno vd., 2010; Li vd., 2018)	Orta-Yüksek - Basınç düşürme temelli daha ulaşılabilir (Li vd., 2018)	%40-60 - Soğuma etkisinin azaltılmasıyla artış (Feng vd., 2015)	Orta (EROI: 4:1 - 7:1) (Li vd., 2018)	10-15 USD/MM Btu (Japon METI, 2017)	Orta - Basit termal yöntemden daha az etki (Feng vd., 2015)	Orta (TRL: 6-7) Japonya'da test edildi (Fujii vd., 2018)	Japonya MH21 hibrit testleri, Çin Guangzhou testleri (Li vd., 2018)
<b>Basınç Düşürme + Kimyasal İnhibitör Hibrit Yöntem</b>	Düşük konsantrasyonlu inhibitör ve basınç düşürme kombinasyonu (Feng vd., 2015; Sun vd., 2015)	Yüksek - Daha az kimyasal gereksinimi (Sun vd., 2015)	%35-50 - Geliştirilmiş kararlılık (Sun vd., 2015)	Yüksek (EROI: 5:1 - 8:1) (Feng vd., 2015)	9-14 USD/MM Btu (Çin GMGS, 2020)	Orta - Azaltılmış kimyasal kullanımı (Xu vd., 2016)	Orta (TRL: 6-7) Çin'de test edildi (Li vd., 2018)	Çin Güney Çin Denizi GMGS projeleri (Su vd., 2021)

(Tablo: Çifçi vd., 2024)

## Sonuç

Karadeniz'de gaz hidratları araştırmaları alanında geçmişte yapılmış saha çalışmalarının sonuçlarına bakılırsa, mevcut rezervler 100 trilyon m<sup>3</sup>'ün üzerinde olabilir (Bazauk, vd. 2021). Karadeniz'in 470 bin km<sup>2</sup> olan toplam alanının yaklaşık 200 bin km<sup>2</sup>'lik bölümü Türkiye'nin Münhasır Ekonomik Bölgesi (Deniz Yetki Alanı) içerisinde kalıyor. Mevcut rezervin ne kadarının Türkiye'nin tasarrufunda

olan alanda bulunduğu dair kesin bilimsel veriler olmamakla birlikte, söz konusu kaynakların Türkiye'nin enerji gereksinimini çok uzun yıllar boyunca karşılamaya yeterli olacağı hesaplanmaktadır.

Gaz hidratların çıkarılması ve ekonomiye entegrasyonu mevcut yöntem ve teknolojiler kullanılarak gerçekleştirilebilir. Bu çıkarma tekniklerini iyileştirmeyi ve geliştirmeyi amaçlayan gelecekteki araştırmalar, patentli yeniliklere katkıda bulunacaktır.

**Tablo 2. Gaz Hidrat Üretim Yöntemlerinin Avantajları ve Dezavantajları**

Üretim Yöntemi	Avantajlar	Dezavantajlar	Referanslar
<b>Basınç Düşürme (Depressurizasyon)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teknik olarak en basit yaklaşım</li> <li>• Düşük enerji gereksinimi</li> <li>• Daha iyi ekonomik fizibilite</li> <li>• Saha uygulaması kanıtlanmış</li> <li>• Uzun süreli sürdürülebilir üretim potansiyeli</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rezervuar soğuması</li> <li>• Düşük geçirgenlikli rezervuarlarda yavaş üretim</li> <li>• Kum üretimi sorunları</li> <li>• Yüksek miktarda su üretimi</li> </ul>	<p>Dallimore vd. (2012) Konno vd.(2010) Moridis vd. (2011) Yamamoto vd. (2014) Reagan vd. (2010)</p>
<b>Termal Uyarım</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hızlı hidrat ayrışması potansiyeli</li> <li>• Düşük geçirgenlikli formasyonlarda etkili</li> <li>• Uygun koşullarda yüksek üretim hızı</li> <li>• Soğuma etkisini giderme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Derin denizde aşırı ısı kayıpları</li> <li>• Çok yüksek enerji gereksinimi</li> <li>• Düşük enerji verimliliği</li> <li>• Termal enerji taşıma zorlukları</li> <li>• Yavaş ısı transferi ve sınırlı penetrasyon</li> </ul>	<p>Li vd. (2015) Moridis vd. (2011) Song vd. (2016) Feng vd. (2015) Islam (2015) Chen vd. (2017)</p>
<b>Kimyasal İnhibitör Enjeksiyonu</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bazı durumlarda hızlı ayrışma</li> <li>• Düşük sıcaklıklarda çalışabilme</li> <li>• Termal yöntemden daha düşük enerji gereksinimi</li> <li>• Diğer yöntemlerle kombine edilebilir</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Büyük hacimlerde kimyasal kullanım zorluğu</li> <li>• Yüksek kimyasal maliyetleri</li> <li>• Penetrasyon sınırlamaları</li> <li>• Çevresel endişeler</li> <li>• Kimyasal geri kazanım sorunları</li> </ul>	<p>Dong vd. (2009) Kamath ve Patil (2013) Li vd. (2014) Sun vd. (2015) Sahu vd. (2018)</p>
			Liu vd. (2012)
<b>CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> Değişimi</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Karbon yakalama/depolama entegrasyonu</li> <li>• Çevresel açıdan en olumlu yaklaşım</li> <li>• Deniz tabanı stabilitesini koruma</li> <li>• Metan üretimi ve CO<sub>2</sub> depolamanın eş zamanlı gerçekleşmesi</li> <li>• Ekzotermik süreç avantajı</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Düşük değişim kinetiği ve yavaş reaksiyon</li> <li>• Derin denizde CO<sub>2</sub> taşıma/enjeksiyon zorlukları</li> <li>• Yüksek basınç gereksinimleri</li> <li>• Rezervuar heterojenitesi problemleri</li> <li>• Yüksek maliyet ve karmaşık lojistik</li> </ul>	<p>Koh vd. (2012) Chong vd. (2016) Jung vd. (2010) Boswell vd. (2017) McGrail vd. (2007) Lee vd. (2013)</p>
<b>Mekanik Yöntemler</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Doğrudan ve kontrollü erişim</li> <li>• Diğer yöntemlerin uygulanamadığı alanlarda kullanılabilir</li> <li>• Sığ deniz tabanı hidratları için potansiyel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Derin denizde uygulanması son derece zor</li> <li>• Çok yüksek teknik zorluklar</li> <li>• Deniz tabanı stabilitesi tehlikeleri</li> <li>• Aşırı yüksek maliyet</li> <li>• Ciddi çevresel etkiler</li> </ul>	<p>Chong vd. (2016) Yamamoto vd. (2014)</p>
<b>Basınç Düşürme + Termal Hibrit</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Basınç düşürme soğumasını telafi etme</li> <li>• Üretim hızını ve kararlılığını artırma</li> <li>• Tam termal yöntemden daha az enerji gereksinimi</li> <li>• Hidrat yeniden oluşumunu önleme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ek ısıtma ekipmanı gereksinimi</li> <li>• Derin denizde ısıtma zorlukları</li> <li>• Yüksek ekipman maliyeti</li> <li>• Enerji verimliliği hala sorun</li> </ul>	<p>Konno vd. (2010) Li vd. (2018) Feng vd. (2015) Fujii vd. (2018)</p>
<b>Basınç Düşürme + Kimyasal Hibrit</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Daha az kimyasal kullanımı</li> <li>• Ayrışma sıcaklığını düşürerek soğumayı azaltma</li> <li>• Hidrat tekrar oluşumunu engelleme</li> <li>• Kum üretiminin azaltılması</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kimyasal dağılım sorunları</li> <li>• Maliyette kısmi artış</li> <li>• Rezervuar heterojenliği zorluğu</li> <li>• Çevresel etki hala mevcut</li> </ul>	<p>Feng vd. (2015) Sun vd. (2015) Xu vd. (2016) Li vd. (2018)</p>

(Tablo: Çiççi vd., 2024)

Tablo 3. Gaz Hidrat Üretim Yöntemlerinin Teknolojik Olgunluk ve Uygulama Durumu

Üretim Yöntemi	Teknolojik Olgunluk Seviyesi (TRL)	Saha Uygulaması	Araştırma Durum Değerlendirmesi	Laboratuvar Sonuçları ile Saha Uygulama Korelasyonu	Referanslar
<b>Basınç Düşürme</b>	TRL 7-8 Saha ölçeğinde test edilmiş	Japonya (2013): 6 gün, 120.000 m <sup>3</sup> gaz Japonya (2017): 36 gün, 235.000 m <sup>3</sup> gaz Çin (2020): 30 gün, 861.400 m <sup>3</sup> gaz	En olgun teknoloji, özellikle kum bakımından zengin Sınıf 1 ve Sınıf 2 hidrat rezervuarlarında	Yüksek korelasyon-laboratuvar modelleri saha davranışını iyi öngörüyor	Yamamoto vd. (2014) Fujii vd. (2018) Su vd. (2021) Li vd. (2018)
<b>Termal Uyarım</b>	TRL 5-6 Laboratuvar ve sınırlı pilot testler	Ağırlıklı olarak laboratuvar ve rezervuar simülasyonları Japonya ve Çin'de kısmi ısıtma uygulamaları	Derin denizlerde enerji verimliliği sorunu nedeniyle sınırlı uygulama Daha çok hibrit kullanımda değerli	Orta korelasyon-ısı kayıpları saha koşullarında laboratuvar tahminlerini aşılıyor	Li vd. (2016) Song vd. (2016) Li vd. (2015) Chen vd. (2017)
<b>Kimyasal İnhibitör</b>	TRL 4-5 Laboratuvar ve küçük ölçekli pilot testler	Hindistan NGHP laboratuvar çalışmaları Küçük ölçekli saha testleri	Çevre kaygıları ve maliyetler nedeniyle saf form yerine hibrit kullanıma odaklanılmış	Düşük-Orta korelasyon-rezervuar heterojenitesi ve saha koşulları laboratuvar	Sahu vd. (2018) Kamath ve Patil (2013) Xu vd. (2016) Sun vd. (2015)
				sonuçlarını önemli ölçüde etkiliyor	
<b>CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> Değişimi</b>	TRL 3-4 Konsept kanıtlanmış, sınırlı saha testi	Alaska İğnik Sikumi Testi (2012) Permafrost ortamında, derin denizde değil	Uzun vadede en çevre dostu yöntem Ancak teknik zorluklar nedeniyle ticari uygulaması en uzak	Düşük korelasyon-saha testleri laboratuvar sonuçlarından daha yavaş kinetik gösteriyor	Boswell vd. (2017) Konno vd. (2014) Koh vd. (2012) Park vd. (2008)
<b>Mekanik Yöntemler</b>	TRL 2-3 Konsept aşamasında	Sadece teorik ve kavramsal çalışmalar Sığ deniz için öneriler	Derin denizlerde pratik olmayan yaklaşım Sığ hidratlar için sınırlı uygulama potansiyeli	Çok düşük korelasyon-gerçek saha uygulamaları henüz yok	Chong vd. (2016) Yamamoto vd. (2014)
<b>Basınç Düşürme + Termal Hibrit</b>	TRL 6-7 Pilot ölçekte test edilmiş	Japonya MH21 hibrit testleri (2019) Çin Guangzhou testleri (2018-2020)	Geleneksel basınç düşürmenin iyileştirilmiş versiyonu Soğuma etkisini gidermek için pratik yaklaşım	Yüksek korelasyon-pratik uygulamalar laboratuvar tahminlerine yakın sonuçlar veriyor	Li vd. (2018) Feng vd. (2015) Fujii vd. (2018) METI (2017)
<b>Basınç Düşürme + Kimyasal Hibrit</b>	TRL 6-7 Pilot ölçekte test edilmiş	Çin GMGS projeleri (2020-2023) Günlük 28.700 m <sup>3</sup> gaz üretimi	Yakın gelecekte ticari uygulaması en olası hibrit yöntem Daha az kimyasal kullanımı ile avantajlı	Yüksek korelasyon-saha testleri ticari ölçek öncesi optimizasyon aşamasında	Su vd. (2021) Feng vd. (2015) Sun vd. (2015) Li vd. (2018)

(Tablo: Çifci vd., 2024)


Çıkarılan gaz hidratlardan, buhar metan reformu (SMR) ve piroliz gibi işlemlerle mavi hidrojen veya sentez gazı üretilebilir. Bu yöntemler sadece hidrojen üretmekle kalmaz, aynı zamanda çok çeşitli gelişmiş malzemelerin üretiminde kullanılacak değerli yan ürünler olarak sentez gazı ve saf karbon da üretir.

Bu yaklaşım sadece sera gazlarının atmosfere salınmasını engellemekle kalmaz, aynı zamanda sürdürülebilir kalkınmayı da destekler. Dolayısıyla, gaz hidratların ekonomik kullanımı, bu kaynaklardan endüstriyel uygulamalar için yararlanırken küresel ısınma değişikliğini azaltmak için umut verici bir yol sunmaktadır.

Japonya, Çin ve Amerika Birleşik Devletleri, saha testleri ve çıkarma yöntemlerindeki önemli ilerlemelerle küresel gaz hidrat araştırma ve geliştirmesinde ön sıralarda yer almaktadır. Hindistan, Güney Kore ve Kanada da gaz hidrat rezervuarlarını keşfetme ve çıkarma teknolojilerini iyileştirme konusunda önemli ilerlemeler kaydetmektedir. Ticari üretim henüz gerçekleşmemiş olsa da, bu ülkeler teknik ve çevresel zorlukları ele alarak gelecekteki gelişim için zemin hazırlamaktadır. Önümüzdeki yıllarda Japonya ve Çin'in ticari üretime geçen ilk ülkeler arasında yer alması çok muhtemeldir.

Gaz hidratlar, fosil yakıtlar ile daha temiz enerji sistemleri arasındaki boşluğu dolduran bir geçiş enerji kaynağı olarak hizmet edebilir. Geniş metan rezervleriyle gaz hidratlar onlarca yıl boyunca enerji sağlama potansiyeline sahiptir ve enerji üretiminin çevresel etkilerini azaltma fırsatı sunar.

Özetle, gaz hidratların kapsamlı bir şekilde incelenmesi, enerji politikalarının şekillendirilmesi ve bu kaynaktan sürdürülebilir bir şekilde faydalanmak için gerekli çerçevelerin oluşturulması açısından elzemdir. Ulusların enerji güvenliği ve çevre

yönetimi konularındaki ortak çıkarları doğrultusunda gösterecekleri işbirliği çabaları, gaz hidratların geleceğin enerji kaynağı olma potansiyelinin hayata geçirilmesinde çok önemli bir rol oynayacaktır. 

### **Teşekkür**

*2003K120360 numaralı proje ile ekipman temini ve veri toplama, işleme ve yorumlama laboratuvarının kurulmasında verdikleri değerli destek için Devlet Planlama Teşkilatı'na (DPT) teşekkürü bir borç biliriz.*

*Ekibimize, onlarca jeofizik (özellikle Orhan Atgın, Özkan Özel vb.), jeoloji (Talip Güngör, Altuğ Hasöz-bek, Namık Çağatay, Mine S. Kayserilioğlu vd.) ve kimya mühendisine (Esin Süzer, Hakan Alyürük, Enis Darılmaz vb), mikrobiyologlar (Burcu Omuzbükten), fiziksel oşinograf (Murat Gündüz), DEÜ araştırmacıları (Burcu Barın, Sermet Gündüz, H. Mert Küçük vd.), ODTÜ'den bilim insanları (Çağlar Söyüncü), İstanbul Üniversitesi (Hakan Hoşgörmez vd.), Ege Üniversitesi (Güven Özdemir) ve K. Gaz Hidrat araştırmaları sırasında projelerde çalışan diğer genç araştırmacılarımıza ve karşılaştığımız her sorunun üstesinden gelmemiz için bize omuz veren Piri Reis ve Dokuz Eylül 4 araştırma gemisi mürettebatına başta Kaptan Kemal Dursun'a teşekkür ederiz. Ayrıca DEÜ IMST öğretim üyelerine (Mustafa Ergün) ve kaybettiğimiz çok değerli meslektaşımız Prof. Dr. Aynur Konaş'a GH araştırmalarına yaptığı değerli katkılardan dolayı teşekkür ederiz. Ruhu şad olsun. Ayrıca Moskova Devlet Üniversitesi'nden Prof. Michael Ivanoav'a Araştırma ile Eğitim (TTR) seferleri ile gaz hidrat araştırmalarına öncülük ettiği için teşekkür ediyor, sevgi ve saygı ile anıyoruz. Son olarak, bu makaleye değerli katkılarından dolayı Salih Ertan'a çok özel bir teşekkür göndermek isteriz.*

## Kaynakça

- Anderson, B. J., Boswell, R., Collett, T. S., Farrell, H., Ohtsuki, S., White, M., & Zyrianova, M. (2014). İgnik Sikumi CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> gaz hidrat değişimi saha denemesinin bulgularının gözden geçirilmesi. 8. Uluslararası Gaz Hidratları Konferansı Bildirileri, 1-8.
- Bazauk, O., Sai, K., Lozynski, V., Petlovanti, M., Saik, P., (2021) "Karadenizde Heterojen Yapıya Sahip Gaz Hidrat Yataklarının Ayırışma Bölgelerinin Araştırılması" MDPI Energies.
- Boswell, R., ve Collett, T.S., (2006). Gaz hidratları kaynak piramidi. Fire in the Ice, Methane Hydrate Newsletter, ABD Enerji Bakanlığı, Fosil Enerji Ofisi, Ulusal Enerji Teknoloji Laboratuvarı, s. 5-7.
- Boswell, R., & Collett, T. S. (2011). "Gaz Hidrat Kaynağı: Mevcut Bilgi Durumunun Gözden Geçirilmesi." Doğal Gaz Hidratları: Enerji Kaynağı Potansiyeli ve Çevresel Etkiler.
- Boswell, R., Collett, T.S., Frye, M., Shedd, W., McConnell, D.R., ve Shelander, D., (2012) Kuzey Meksika Körfezinde yeraltı gaz hidratları. Marine and Petroleum Geology, cilt. 34, no. 1, s. 4-30, Haziran.
- Boswell, R., Schoderbek, D., Collett, T. S., Ohtsuki, S., White, M., & Anderson, B. J. (2017). İgnik Sikumi Saha Deneyi, Alaska Kuzey Yamacı: Gaz hidrat rezervuarlarında CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> değişimi için tasarım, işlemler ve çıkarımlar. Enerji ve Yakıtlar, 31(1), 140-153.
- Chen, L., Feng, Y., Okajima, J., Komiya, A., & Maruyama, S. (2017). 2017 Shenhu, Güney Çin Denizi metan hidrat çıkarma testi için üretim davranışı ve sayısal analiz. Doğal Gaz Bilimi ve Mühendisliği Dergisi, 53, 55-66.
- Cherskiy, N.V., ve Tsarev, V.P., (1977) Dünya okyanuslarının dip çökeltilerinden doğal gazların aranması ve araştırılması ışığında rezervlerin değerlendirilmesi (Rusça). Geologiya Nefti i Geofizika, cilt 5, s. 21-31.
- Chong, Z. R., Yang, S. H. B., Babu, P., Linga, P., & Li, X. S. (2016). Doğal gaz hidratlarının bir enerji kaynağı olarak incelenmesi: Beklentiler ve zorluklar. Uygulamalı Enerji, 162, 1633-1652.
- Chong, Z.R., Yang, M., Khoo, B.C., Linga, P., (2016) Aşırı gaz ortamında metan hidrat oluşumu ve ayrışması üzerinde gözenekli ortamın boyut etkisi. Ind. Eng. Chem. Res., 55, 7981-7991. 7.
- Jones, C. M., Dourado, J. D. A. ve Chaves, H. A. F. (2010). Gaz Hidratlar ve Mikrobiyolojik Süreçler. Arama ve Keşif. 80081.
- Çifci, G., 2020. Gaz Hidratlar: Yakın Geleceğin Enerji Kaynağı BRIQ, Volume 2, Issue 1, Winter 2020-2021.
- Çifci G., Parlaktuna M., Çelebi, S.S., Okay Günaydın, S., (baskıda). Gaz Hidratlardan Enerji üretimi, ENY2, Elsevier.
- Collett, T. S., ve diğerleri (2015). "Kuzey Amerika'da Gaz Hidrat Üretimini Ekonomik Uygulanabilirliği." Doğal Gaz Hidratları: Enerji Kaynağı Potansiyeli ve Çevresel Etkiler.
- Dallimore, S. R., Wright, J. F., Nixon, F. M., Kurihara, M., Yamamoto, K., Fujii, T., Fujii, K., Numasawa, M., Yasuda, M., & Imasato, Y. (2012). JOGMEC/NRCAN/AURORA Mallik gaz hidrat üretim araştırma kuyusunun 2007 üretim tepkisi özelliklerini etkileyen jeolojik ve gözenekli ortam faktörleri. Petrol Bilimi ve Mühendisliği Dergisi, 81, 45-55.
- Dong, F., Zang, X., Li, D., Fan, S., & Liang, D. (2009). Yüksek konsantrasyonlu metanol ve etilen glikol çözeltisi enjeksiyonu ile propan hidrat ayrışmasının deneysel olarak incelenmesi. Enerji ve Yakıtlar, 23(3), 1563-1567.
- Espinoza, D. N., & Santamarina, J. C. (2011). CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub> replasmanı sırasında hidrat taşıyan kumun P-dalgası izlenmesi. Uluslararası Sera Gazı Kontrolü Dergisi, 5(4), 1031-1038.
- Feng, J. C., Wang, Y., Li, X. S., Li, G., & Chen, Z. Y. (2015). Basınç düşürme ve termal uyarının birleşimiyle gaz hidrat birikimi için üretim davranışı ve sayısal model. Uygulanan Enerji, 145, 25-33.
- Fujii, T., Nakamizu, M., Tsuji, Y., Namikawa, T., Okui, T., Kawasaki, M., Ochiai, K., Nishimura, M., & Takano, O. (2018). Doğu Nankai Çukuru'ndaki metan hidratının kaynak değerlendirmesi Nankai Trough, Japonya. Y. Konno, Y. Masuda, Y. Takai (Eds.), Gaz Hidratlar 2: Jeolojik Bilim Sorunları ve Potansiyel Endüstriyel Uygulamalar (pp. 88-107). Wiley-VCH.
- Hovland, M., & Judd, A. G. (2004). "Deniz Tabanı Metan Hidratları: Çevresel Etkileri Üzerine Bir İnceleme." Çevre Bilimi ve Politikası.
- Heijmans, K., ve diğerleri, (2007). Yeni bir Verrucomicrobia türü tarafından pH 1'in altında metanotrofi: Nature, v. 6, no. 450, p. 874-878.

- Inagaki, F., ve diğerleri, (2006). Metan hidrat içeren derin deniz çökeltilerindeki mikropların biyocoğrafik dağılımı ve çeşitliliği, Pasifik Okyanusu Kenarındaki: PNAS, v. 103, no. 8, p. 2815-2820.
- International Energy Agency (IEA) (2018).
- Islam, M. R. (2015). Geleneksel olmayan gaz hidratları: Termal uyarımın ve geleneksel olmayan kaynakların rolü. M. R. Islam (Ed.), Geleneksel Olmayan Gaz Hidratları (s. 231-263). Gulf Professional Publishing.
- Jones, C. M., Dourado, J.D.A. and Chaves, H.A.F., (2010). Gaz Hidratları ve Mikrobiyolojik Prosesler. Arama ve Keşif. 80081.
- Jung, J. W., Santamarina, J. C., & Soga, K. (2010). Hidrat taşıyan kumların gerilim-şekil değiştirme tepkisi: Ayrık eleman yöntemi simülasyonları kullanılarak sayısal çalışma. Jeofizik Araştırma Dergisi: Katı Dünya, 115(B6).
- Kamath, V. A., & Patil, S. L. (2013). Gözenekli ortamlarda basınç düşürme ve inhibitör enjeksiyonu ile gaz hidrat ayrışmasının deneysel çalışması. 7. Uluslararası Gaz Hidratları Konferansı Bildirileri, 1-10.
- Koh, C. A., Sum, A. K., & Sloan, E. D. (2012). Gaz hidratlar: Buzlu kafeslerden enerjinin kilidini açmak. Uygulamalı Fizik Dergisi, 106(6), 061101.
- Konno, Y., Masuda, Y., Hariguchi, Y., Kurihara, M., & Ouchi, H. (2010). Okyanus metan hidratlarından basınçsızlaştırma kaynaklı gaz üretiminin temel faktörleri. Enerji ve Yakıtlar, 24(3), 1736-1744.
- Konno, Y., Fujii, T., Sato, A., Akamine, K., Naiki, M., Masuda, Y., Yamamoto, K., & Nagao, J. (2014). Japonya kıyılarında dünyanın ilk açık deniz metan hidrat üretim testinin temel bulguları: Gelecekteki ticari üretime doğru. Enerji ve Yakıtlar, 28(5), 3544-3553.
- Küçük, H.M., 2018. Türkiye'nin Gaz Hidrat Yol Haritası Önerisi, World Energy Council, Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi Petrol ve Doğal Gaz Çalışma Grubu PDG1.
- Konno, Y., Masuda, Y., Hariguchi, Y., Kurihara, M., & Ouchi, H. (2010). Okyanus metan hidratlarından basınçsızlaştırma kaynaklı gaz üretiminin temel faktörleri. Enerji ve Yakıtlar, 24(3), 1736-1744.
- Lee, J., Park, S., & Sung, W. (2013). Hidrattan ayrışmış gazın basınçsızlaştırma şemasıyla üretkenliği üzerine deneysel bir çalışma. Gözenekli Ortamda Taşıma, 92(1), 69-81.
- Lee, J., & Lee, K. (2014). "Gaz Hidrat Araştırmalarının Son Gelişmeler: Bir İnceleme." Petrol Bilimi ve Mühendisliği Dergisi.
- Li, B., Li, G., Li, X. S., Li, Q. P., Yang, B., Zhang, Y., & Chen, Z. Y. (2014). Deneysel ve sayısal çalışmalarla, pilot ölçekli bir hidrat simülöründe, huff ve puff yöntemi kullanılarak metan hidratından gaz üretimi. Enerji ve Yakıtlar, 26(12), 7183-7194.
- Li, X. S., Yang, B., Li, G., Li, B., Zhang, Y., & Chen, Z. Y. (2015). Gözenekli ortamda metan hidratından huff ve puff yöntemi ile gaz üretimi üzerine deneysel çalışma. Yakıt, 119, 102-110.
- Li, X. S., Xu, C. G., Zhang, Y., Ruan, X. K., Li, G., & Wang, Y. (2016). Doğal gaz hidratından gaz üretiminin araştırılması: Bir inceleme. Uygulamalı Enerji, 172, 286-322.
- Li, X. S., Xu, C. G., Zhang, Y., Ruan, X. K., & Li, G. (2018). Farklı basınç düşürme şemaları altında metan hidratının üretim davranışının deneysel olarak incelenmesi. Uygulamalı Enerji, 227, 710-718.
- Liu, Y., Gamwo, I. K., & Myshakin, E. M. (2012). Hidrat çözünmesinde metanolün rolü. Fiziksel Kimya Dergisi B, 116(44), 13294-13301
- Liu, Y., ve diğerleri (2012). "Gaz Hidrat Kullanımının Çevresel Etki Değerlendirmesi: Bir İnceleme." Energy Procedia
- Makogon, Y. F., ve diğerleri (2007). "Doğal Gaz Üretiminde Hidrat Oluşumu ve Önlenmesi." Doğal Gaz Bilimi ve Mühendisliği Dergisi.
- Matsumoto, R., ve diğerleri (2013). "Doğal Gaz Hidratlarının Küresel Enerji Arzındaki Rolü: Ekonomik Bir Perspektif." Enerji Politikası.
- McConnell, D.R. (2019). Gaz hidrat arama, arama ve karakterizasyonu. Houston'da düzenlenen Kıyıötesi (offshore) Teknoloji Konferansı, USA, 6- 9May 2019, OTCOTC -29604-MS.
- McGrail, B. P., Zhu, T., Hunter, R. B., White, M. D., Patil, S. L., & Kulkarni, A. S. (2007). CO<sub>2</sub> ile gaz hidratlarının gelişmiş üretimi için yeni bir yöntem. AAPG Hedberg Konferansı Bildirileri "Doğal Gaz Hidratları: Enerji Kaynağı Potansiyeli ve İlgili Jeolojik Tehlikeler", 1-5.
- METI (Ministry of Economy, Trade and Industry, Japan). (2017). FY 2016 Japonya Denizinde metan hidrat kaynağı geliştirme açık deniz üretim testi. METI Press Release.

- Minshull, T.A., Marín-Moreno, H., Betlem, P., Bialas, J., Buenz, S., Burwicz, E., Cameselle, A.L., Cifci, G., Giustiniani, M., Hillman, J.I.T., Hölz, S., Hopper, J.R., Ion, G., León, R., Magalhaes, V., Makovsky, Y., Mata, M.-P., Max, M.D., Nielsen, T., Okay, S., Ostrovsky, I., O'Neill, N., Pinheiro, L.M., Plaza-Faverola, A.A., Rey, D., Roy, S., Schwalenberg, K., Senger, K., Vadakkepuliambatta, S., Vasilev, A., Vázquez, Juan.-Tomá., Avrupa'da hidrat oluşumu: Mevcut kanıtların gözden geçirilmesi, *Deniz ve Petrol Jeolojisi* (2019), doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.08.014>.
- Moridis, G. J., Collett, T. S., Pooladi-Darvish, M., Hancock, S., Santamarina, C., Boswell, R., Kneafsey, T., Rutqvist, J., Kowalsky, M. B., Reagan, M. T., Sloan, E. D., Sum, A. K., & Koh, C. A. (2011). Gaz-hidrat yataklarından gaz üretiminin karşı karşıya olduğu zorluklar, belirsizlikler ve sorunlar. *SPE Rezervuar Değerlendirmesi ve Mühendisliği*, 14(01), 76-112.
- Ojha, M., & Sain, K. 2009. Gaz hidratları ve serbest gaz bölgelerini kaydetmek için sismik nitelik analizleri: Makran birikim ödülüne uygulama. 32, 264-270.
- Park, Y., Cha, M., Cha, J. H., Shin, K., Lee, H., Park, K. P., Huh, D. G., Lee, H. Y., Kim, S. J., & Lee, J. (2008). Karbondioksitin karmaşık gaz hidrat yapıları ile değiştirilmesi. 6. Uluslararası Gaz Hidratları Konferansı Bildirileri, 1-10.
- Reagan, M. T., Moridis, G. J., Elliott, S. M., & Maltrud, M. (2010). Okyanus gazı hidrat ayrışmasının Arktik Okyanusu metan tüylerinin oluşumuna katkısı. *Jeofizik Araştırma Dergisi: Okyanuslar*, 116(C9).
- Ruppel, C. D., & Kessler, J. D. (2017). İklim değişikliği ve metan hidratlarının etkileşimi. *Jeofizik İncelemeleri*, 55(1), 126-168.
- Rutqvist, J., Moridis, G. J., Grover, T., & Collett, T. (2009). Permafrost ile ilişkili hidrat yataklarının basınçsızlaştırma kaynaklı gaz üretimine jeomekanik tepkisi. *Petrol Bilimi ve Mühendisliği Dergisi*, 67(1-2), 1-12.
- Sahu, S. K., Yamada, Y., Tsuji, T., & Matsuoka, T. (2018). Kimyasal ajanların metan hidrat ayrışması üzerindeki etkileri: Bir inceleme. *Doğal Gaz Bilimi ve Mühendisliği Dergisi*, 45, 581-593.
- Sloan, E. D., & Koh, C. A. (2008). *Doğal gazların klatrat hidratları* (3rd ed.). CRC Baskısı.
- Song, Y., Yang, L., Zhao, J., Liu, W., Yang, M., Li, Y., Liu, Y., & Li, Q. (2016). Çin'de doğal gaz hidrat araştırmalarının durumu: Bir inceleme. *Yenilenebilir ve Sürdürülebilir Enerji İncelemeleri*, 59, 1498-1513.
- Su, Z., He, Y., Wu, N., Zhang, K., & Moridis, G. J. (2021). Güney Çin Denizi'ndeki ilk gaz hidrat üretim testinden elde edilen gaz üretiminin değerlendirilmesi. *Uygulamalı Enerji*, 290, 116574.
- Sun, Z., Wang, R., Ma, R., Guo, K., & Fan, S. (2015). Doğal gaz hidrat üretimi üzerine hidrat oluşumunu kullanarak yüzey aktif maddenin etkisi. *Enerji ve Yakıtlar*, 17(5), 1180-1185.
- TP-DEPARK Proje Raporu, 2018. Türkiye Petrolleri ve Dokuz Eylül Teknoloji Geliştirme A.Ş. ile Batı Karadeniz Pilot Alanda Gazhidrat Potansiyeli Etüt ve Araştırma Projesi.
- Xu, C. G., Li, X. S., Ruan, X. K., Chen, Z. Y., & Yan, K. F. (2016). Gaz hidratı işletmesi ve ölçek büyütme araştırmaları üzerine pilot ölçekli araştırmalardaki ilerlemeler. *Çin Kimya Mühendisliği Dergisi*, 24(2), 271-281.
- Yamamoto, K., Terao, Y., Fujii, T., Ikawa, T., Seki, M., Matsuzawa, M., & Kanno, T. (2014). Doğu Nankai Çukuru'ndaki ilk açık deniz metan hidrat üretim testinin operasyonel genel görünümü. *Açık Deniz Teknolojisi Konferansı'nda* (pp. 1-11).
- Yan, T., Zhou, Y.Q., Zhang, C.L., (2006). Meksika Körfezi'ndeki gaz hidratlar ve hidrokarbon sızıntıları ile ilişkili sedimanlardaki metanotroflar için fonksiyonel genlerin çeşitliliği: *FEMS Microbiology Ecology*, v. 57, no. 2, p. 251-259.
- Yang, M., Song, Y., Ruan, X., Liu, Y., Zhao, J., & Li, Q. (2012). Sayısal simülasyon yoluyla hidrat bazlı doğal gaz depolama yöntemlerinin karşılaştırmalı analizi. *Enerji ve Yakıtlar*, 26(8), 4911-4918.
- Walsh, M. R., Hancock, S. H., Wilson, S. J., Patil, S. L., Moridis, G. J., Boswell, R., Collett, T. S., Koh, C. A., & Sloan, E. D. (2009). Doğal gaz hidratlarından gaz üretiminin ticari uygulanabilirliğine ilişkin ön rapor. *Enerji Ekonomisi*, 31(5), 815-823.
- White, M., (2008). Gelişmiş Gaz Hidrat Üretim Yöntemlerinin Karşılaştırmalı Değerlendirmesi: NETL Hidrat Programı Akran Değerlendirmesi, Pasifik Kuzeybatı Ulusal Laboratuvarı, Ağustos 2008.
- Zhen-guo Z., Yu W., Lian-feng G., Ying Z., Chang-shui Liu. (2012) " Geleceğin Enerjisi, Çevresi ve Malzemeleri Konulu Uluslararası Konferans Deniz Gazı Hidratları: Geleceğin Enerjisi mi, Çevre Katili mi?"