

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**KARADENİZ'DE GAZ HİDRAT BARINDIRAN SEDİMANLARDA SICAKLIK
VE AKIŞKAN AKIŞININ MODELLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bahar GÜVEM

Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Jeofizik Mühendisliği Programı

OCAK 2025

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**KARADENİZ'DE GAZ HİDRAT BARINDIRAN SEDİMANLARDA SICAKLIK
VE AKIŞKAN AKIŞININ MODELLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Bahar GÜVEM
(505211411)**

Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Jeofizik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Doğa DOĞAN

OCAK 2025

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**NUMERICAL MODELING OF FLUID FLOW AND HEAT FLOW IN GAS
HYDRATE BEARING SEDIMENTS IN BLACK SEA**

M.Sc. THESIS

**Bahar GÜVEM
(505211411)**

Department of Geophysical Engineering

Geophysical Engineering Programme

Thesis Advisor: Prof. Dr. Doğa DOĞAN

JANUARY 2025

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 505211411 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Bahar GÜVEM, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “KARADENİZ'DE GAZ HİDRAT BARINDIRAN SEDİMANLARDA SICAKLIK VE AKIŞKAN AKIŞININ MODELLENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Doğa DOĞAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Neslihan Ocakoğlu GÖKAŞAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Diğdem ACEREL
Gebze Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 11 Aralık 2024
Savunma Tarihi : 9 Ocak 2025





Her daim yanımda olan aileme,



ÖNSÖZ

Hem lisans hem de lisansüstü eğitimim boyunca bilgi birikimiyle ve rehberliğiyle bana her zaman yol gösteren, akademik ve kişisel gelişimimde büyük bir rol oynayan değerli hocam Prof. Dr. Doğa DOĞAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Onun sabrı, destekleyici yaklaşımı hayatımın her aşamasında benim için büyük bir motivasyon kaynağı olmuştur.

Bilgi ve birikimiyle yalnızca akademik çalışmalarımı şekillendirmekle kalmayıp, her zaman bana yol gösteren, destekleyen ve ilham veren değerli hocam Prof. Dr. Neslihan OCAKOĞLU GÖKAŞAN'a teşekkür ederim.

Hayatıma girdiği günden beri hep güzellikler getiren, her zorlu süreçte yanımda olan ve bir an olsun yalnız hissetmeme izin vermeyen sevgili Araş. Gör. Deniz ORTA'ya sonsuz teşekkür ederim. Onun varlığı, bu zorlu süreci daha anlamlı kılan ve beni daima ileriye taşıyan en büyük güçlerden biri oldu.

Bu süreçte bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan Selvican TÜRKDOĞAN'a, hem bilgi birikimleriyle hem de kıymetli dostluklarıyla hayatıma renk katan Araş. Gör. Orhan APAYDIN, Araş. Gör. Berkan ÖZKAN, Araş. Gör. Ceyhun ERMAN ve Araş. Gör. Ezgi SAĞLAM'a içten teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımdaki varlıklarından dolayı büyük mutluluk duyduğum, her anımda yanımda olan, birlikte geçirdiğimiz zamanlarla ve paylaştığımız anılarla bana değer katan sevgili Selen KADER ve Ayşegül YILMAZ'a kıymetli arkadaşlıkları için içtenlikle teşekkür ederim.

Ayrıca, MGA-2023-45036 kodlu projemizi destekleyen Bilimsel Araştırma Projesi (BAP) Birimi'ne, projemize katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Değerli ailem Suat GÜVEM, Huriye GÜVEM ve Murat Can GÜVEM'e, bu çalışmanın ortaya çıkmasına olanak sağladığınız, her anımda yanımda olduğunuz, sürecin her aşamasında desteklerini esirgemediğiniz ve bana duyduğunuz inancı bir an olsun kaybetmediğiniz için sonsuz minnettarlığımı sunarım. Ailemizin neşe kaynağı, varlıklarıyla huzur veren Bihter ve Dali'ye sessiz destekleri için teşekkür ederim.

Aralık 2025

Bahar GÜVEM
(Jeofizik Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Karadeniz Jeolojisi ve Tektoniği.....	1
1.2 Tuna Derin Deniz Yelpazesi	2
2. GAZ HİDRATLAR.....	5
2.1 Gaz Hidratların Önemi	5
2.2 Gaz Hidratların Tanımı ve Özellikleri	5
2.3 Gaz Hidratların Oluşumu ve Kararlılık Koşulları	8
2.4 Gaz Hidrat Konsantrasyonu	11
2.5 Olası Gaz Hidrat Rezerv Miktarı ve Küresel Isınma	12
2.6 Gaz Hidratlar Nasıl Tespit Edilir?.....	14
2.6.1 BSR (Bottom Simulating Reflector, Tabana Benzeyen Yansıtıcı)	14
2.7 Gaz Hidrat İçeren Sedimanlarda Akışkan Akışı için Yönetici Denklemler.....	14
3. YÖNTEM.....	17
3.1 Kullanılan ANSYS Fluent Yazılımı.....	17
3.2 Verileri Dijitalleştirme	19
3.3 Geometri Yaratma	19
3.4 Ağ Yapısı Oluşturma.....	21
3.5 Sınır Koşulları	23
3.6 Kimyasal Reaksiyon.....	25
3.7 Kullanılan Fiziksel Parametreler	26
3.7.1 Model-1 için kullanılan fiziksel parametreler	28
3.7.2 Model-2 için kullanılan fiziksel parametreler	29
3.8 Hesaplanan Zaman Aralıkları.....	30
3.8.1 Model-1 için kullanılan zaman aralıkları	30
3.8.2 Model-2 için kullanılan zaman aralıkları	31
4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA.....	33
4.1 Sonuçlar.....	33
4.1.1 Model-1 sonuçları	33
4.1.1.1 Metan (CH ₄) kütle oranı değişimleri.....	33
4.1.1.2 Su (H ₂ O) ve karbondioksit (CO ₂) kütle oranı değişimleri	35
4.1.2 Model-2 sonuçları	38
4.2 Tartışma.....	41
KAYNAKLAR	45
ÖZGEÇMİŞ.....	51



KISALTMALAR

ANSYS	: Analiz Sistem
BKB	: Batı Karadeniz Bloğu
DKB	: Doğu Karadeniz Bloğu
OKS	: Orta Karadeniz Sırtı
GHKZ	: Gaz Hidrat Kararlılık Zonu
BSR	: Bottom Simulating Reflector, Tabana Benzeyen Yansıtıcı
GWP	: Global Warming Potential, Küresel Isınma Potansiyeli
TBY	: Tabana Benzeyen Yansıtıcı
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamği
GHASS	: Gas Hydrates, Fluid Activities, and Sediment Deformations



SEMBOLLER

sI	: Yapı 1
sII	: Yapı 2
sH	: Yapı H
CH₄	: Metan
T	: Sıcaklık (°C)
K	: Sıcaklık (Kelvin)
$\partial T/\partial x$	: Termal gradyan (°C/km)
C_p	: Özgül ısı (J/(kg.K))
H₂O	: Su
N₂	: Azot
H₂S	: Hidrojen sülfür
CO₂	: Karbondioksit
H₂	: Hidrojen
NaCl	: Tuz
Gt	: Gigaton
$\partial/\partial t$	: Zamana bağlı değişim
A, G, H	: Sıvı faz, Gaz faz, Hidrat faz
S_{β}	: Faz doygunluğu
S_G	: Gaz fazı doygunluğu
ρ_{β}	: Faz yoğunluğu (kgm ⁻³)
ρ_A	: Sıvı fazı yoğunluğu
ρ_G	: Gaz fazı yoğunluğu
X_{β}^W	: Her bir fazın metandaki kütle oranı
X_A^W	: Sıvı fazdaki kütle oranı
X_G^W	: Gaz fazdaki kütle oranı
ϕ	: Gözeneklilik
k	: Geçirgenlik (m ²)
k_{rA}	: Sıvı fazı bağıl geçirgenliği
k_{rG}	: Gaz fazı bağıl geçirgenliği

μ_A	: Sıvı fazı viskozitesi
μ_G	: Gaz fazı viskozitesi
P_A	: Sıvı faz basınç gradyanı (Pa)
P_G	: Gaz faz basınç gradyanı (Pa)
γ_A	: Sıvı fazın hidrostatik basınç gradyanı
γ_G	: Gaz fazın hidrostatik basınç gradyanı
D	: Derinlik (m)
∇	: Gradyan operatörü
ψ^w	: Kütle transfer hızı ($\text{kgm}^{-3}\text{s}^{-1}$)
τ_A	: Sıvı fazdaki tortuoosite
D_A^w	: Sıvı fazın difüzyon katsayısı
D_G^w	: Gaz fazın difüzyon katsayısı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Modelin üçgen ağ elemanlarının (hücrelerin) ve düğüm noktalarının sayısı.	23
Çizelge 3.2 : Kullanılan derinlik değerlerine karşılık hesaplanan hidrostatik basınç değerleri.	25
Çizelge 3.3 : Belirli sıcaklık değerlerinde CH ₄ , CO ₂ ve H ₂ için tanımlanmış C _p değerleri.	26
Çizelge 3.4 : Model-1 kapsamında her bir sediman için tanımlanan fiziksel parametreler.	28
Çizelge 3.5 : Model-2 kapsamında her bir sediman için tanımlanan fiziksel parametreler.	29
Çizelge 3.6 : Model-1’de kullanılan zaman adımları.	30
Çizelge 3.7 : Model-2’de kullanılan zaman adımları.	31



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Karadeniz'in ana tektonik elemanları (Önal ve Demirbağ, 2019'dan değiştirilerek).....	1
Şekil 1.2 : Tuna Derin Deniz Yelpazesi batimetrisi ve ana kanalları (Constantinescu vd., 2015'ten değiştirilerek).....	3
Şekil 2.1 : Çıkarılmış gaz hidrat numunesi (Al-Khatib, 2020).....	6
Şekil 2.2 : Gaz hidrat bileşimi (Makogon, 1966'dan değiştirilerek).....	6
Şekil 2.3 : Kafes yapısı genel bilgileri. Solda: Yapı 1 kafes yapısı gösterimi; büyük küreler gaz molekülleri, küçük küreler kafes yapısını oluşturan su molekülleridir. Sağda: kafes tipleri ve üç ortak hidrat kristal yapısının kafes sayıları. Daire içindeki sayılar, hidrat yapısını oluşturmak için kullanılan hücre sayısıdır (Bohrmann ve Torres, 2006'dan değiştirilerek).....	7
Şekil 2.4 : Dünya gaz hidrat haritası (Ocakoğlu, 2009; USGS, 2004 ve MMS, 2008'den değiştirilerek).....	8
Şekil 2.5 :Gaz hidrat denge eğrisi (Ocakoğlu, 2009; Kvenvolden, 1988'den değiştirilerek).....	9
Şekil 2.6 : Donmuş kara alanlarında (permafrost) ve denizlerde gaz hidratın kararlı olduğu zonların gösterimi (Ocakoğlu, 2009 ; Kvenvolden, 1988'den değiştirilerek).....	10
Şekil 2.7 : Gaz hidrat içeren denizaltı sediman bölümünün ve P dalga hızı ile ilişkisinin gösterimi (Haacke ve diğ, 2007'den değiştirilerek).....	11
Şekil 2.8 : Dünya genelinde organik karbon dağılımı (Ocakoğlu, 2009; Kvenvolden, 1988 ve USGS, 1992'den değiştirilerek).....	13
Şekil 3.1 : Çalışma alanının yer bulduru haritası ve modellemesi yapılacak sismik kesitin görüntüsü (Ker ve diğ, 2019'dan uyarlanmıştır).....	18
Şekil 3.2 : Seçilen sismik kesitte, Plot Digitizer programı kullanılarak dijitalleştirilmiş bazı katman örneği.	19
Şekil 3.3 : Dijitalleştirilmiş veri noktalarının Design Modeler arayüzündeki görüntüsü.	20
Şekil 3.4 : Modellenen kesitte fayın Design Modeler arayüzünde yakın görüntüsü.	20
Şekil 3.5 : Design Modeller arayüzünde oluşturulan sismik kesit simülasyonu.	21
Şekil 3.6 : Tüm modelin ağ yapısı görüntüsü.	22
Şekil 3.7 : Fay bölgesinin ağ yapısının yakın görüntüsü.	23

Şekil 3.8 : Modelin ağ yapısı(mesh) görüntüsü ve tanımlanan sınır koşulları. Şekil içinde fayın ağ görünümü (yakınlaştırılmış).....	24
Şekil 3.9 : Deniz tabanı üzerinde hidrostatik basınç değerleri tanımlanmış bölgeler.	24
Şekil 3.10 : Model içerisindeki tabakaların isimleri.	27
Şekil 4.1 : 1-3-5-20-60 dakikalık zaman aralıklarında metan (CH_4) gazının kütle oranının değişimi.	34
Şekil 4.2 : 1-3-4-20-60 dakikalık zaman aralıklarında a) suyun (H_2O) ve b) karbondioksitin (CO_2) kütle oran değişimi.	36
Şekil 4.3 : 200-500-1000-1500-2700 yıllık zaman aralıklarında akışkan akış ve sıcaklık akışının zamana bağlı değişimleri.	39
Şekil 4.4 : (a) 1000 yıllık zaman adımında hesaplanan modelin sonucu. (b) Faylı bölgedeki akışkan akış hızları dağılımının yakın görüntüsü. (c) Fay sonrası bölgedeki akışkan akış hızları dağılımının yakın görüntüsü ...	40



KARADENİZ'DE GAZ HİDRAT BARINDIRAN SEDİMANLARDA SICAKLIK VE AKIŞKAN AKIŞININ MODELLENMESİ

ÖZET

Gaz hidratlar, suyun (veya buzun) belirli sıcaklık ve basınç koşullarında küçük moleküllerle etkileşime girdiğinde oluşan kristal bileşiklerdir. Birim hacim başına gaz hidratlar yüksek oranda gaz içermektedirler. 1 m³ hidrat, atmosfer basınç ve sıcaklığında, ayrışarak 164 m³ serbest gaz (metan) ve 0.8 m³ su oluşturmaktadır. Gaz hidratların kararlılığını, davranışını ve çevresel etkilerini anlamak bu rezervlerin gelecekteki potansiyel enerji kaynakları olarak değerlendirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Yapılan birçok çalışma, Karadeniz'in gaz hidrat oluşumu için uygun basınç ve sıcaklık koşullarına sahip olduğunu ortaya koymuş ve deniz sedimanlarında gaz hidrat varlığını işaret eden bulgular tespit edilmiştir.

Bu çalışmada, sonlu hacimler yöntemiyle çalışan ve gaz hidrat alanlarında kullanılabilirliği önceki çalışmalarla kanıtlanmış, bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) programı olan ANSYS Fluent tercih edilmiştir. Sayısal modelleme, Batı Karadeniz'deki Tuna Derin Deniz Yelpazesi'nden alınan sismik yansıma kesidi ve bölgeye ait jeolojik veriler temel alınarak gerçekleştirilmiştir. Referans alınan sismik yansıma kesidi, gaz hidratların olası bir göstergesi olan Tabana Benzeyen Yansıtıcıyı (Bottom Simulating Reflector (BSR)) sismik izi ve akış üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla bir fay zone içermektedir.

Bu tez kapsamında referans sismik kesit modeli kullanılarak, iki farklı senaryo üzerinden gaz hidratların deniz sedimanlarındaki davranışları incelenmiştir.

Gaz hidratların serbest gaz (özellikle metan (CH₄)) ve yeraltı suyu ile kimyasal etkileşiminin incelendiği ilk modelde, metan gazının yeraltı suyu (H₂O) ile reaksiyona girerek CO₂ ve H₂ üretmesine neden olan kimyasal süreçler ve zamana bağlı bu tepkime elemanlarının kütle oranlarındaki değişimleri simüle edilmiştir. Elde edilen bulgular, tepkime elemanlarının çözünme ve üretim sürelerinin; fay varlığı, deniz tabanı batimetrisi ve deniz sedimanlarındaki başlangıçtaki metan oranı gibi faktörlerden büyük ölçüde etkilendiğini ortaya koymuştur.

Gaz hidratların rezerv sedimanlarda çimentolaşmasının çevre sedimanlara etkisini anlamaya yönelik geliştirilen ikinci modelde, gaz hidratların gözeneklilik değerlerinin ve sedimanların geçirimsizlik özelliklerinin, akışkan akışının ve sıcaklık akışının zamana bağlı nasıl değiştirdiği detaylı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen bulgular, akışkan akışı ve sıcaklık akışının; fay varlığına ve sedimanlar arası gözeneklilik ve geçirimsizlik farkına bağlı olarak değiştiğini ortaya koymuştur.

Her iki modelin sonuçları değerlendirildiğinde, gaz hidratların davranışının hem kimyasal reaksiyon süreçleri hem de fiziksel ortam özellikleri tarafından şekillendiği görülmektedir. Fayların varlığı, deniz tabanı morfolojisi, sedimanların geçirgenlik ve gözeneklilik özellikleri gibi faktörler, gaz hidrat kaynaklı süreçlerin zamansal dağılımını doğrudan etkilemektedir. Bu sonuçlar, gaz hidratların potansiyel enerji

kaynağı olarak değerdendirilmesi ve çevresel etkilerinin anlaşılması için kritik öneme sahiptir.



NUMERICAL MODELING OF FLUID FLOW AND HEAT FLOW IN GAS HYDRATE BEARING SEDIMENTS IN BLACK SEA

SUMMARY

Gas hydrates, primarily methane hydrates, are crystalline compounds formed under specific high-pressure and low-temperature conditions where water molecules encase gas molecules. These hydrates are predominantly found in marine sediments and permafrost regions, offering significant potential as an energy resource. Notably, 1 cubic meter of gas hydrate can contain approximately 164 cubic meters of gas, underscoring the high energy density of these compounds. However, the stability of gas hydrates is highly sensitive to variations in temperature and pressure. Their dissociation could lead to the release of large quantities of methane, a potent greenhouse gas, which raises environmental concerns. Thus, understanding the formation, stability, and behavior of gas hydrate is essential, not only for their energy potential but also due to their implications for greenhouse gas emissions and marine sediment destabilization.

The Black Sea has garnered considerable interest in gas hydrate research owing to its suitable pressure-temperature regime for hydrate stability. Numerous studies have confirmed the presence of Bottom Simulating Reflectors (BSRs) in seismic data, which are indicative of gas hydrates, and have identified significant methane reserves within marine sediments. This research aims to investigate the dynamic behavior of gas hydrates in the Black Sea by applying advanced numerical modeling methodology. Specifically, this study focuses on the chemical and physical processes governing gas hydrates within marine sediments, emphasizing the influence of geological discontinuities, such as faults.

The study utilized ANSYS Fluent, a Computational Fluid Dynamics (CFD) program that applies the finite volume method to solve complex fluid flow and chemical interaction problems. The program has been validated for its reliability in modeling gas hydrate systems. The modeling approach was based on seismic and geological data obtained from the Tuna Deep-Sea Fan region in the western Black Sea, where significant gas hydrate indicators have been identified. The Tuna Deep-Sea Fan region is a depositional area rich in organic matter, which acts as the source of methane production through microbial processes. The interaction between gas hydrates and this organic-rich sediment is central to understanding methane migration and hydrate formation.

A depth-converted seismic reflection profile containing a clear BSR was used as the reference model. This profile also incorporated a fault-like irregularity to simulate the impact of structural discontinuities on the gas hydrate system. Two scenarios were developed to analyze different aspects of hydrate behavior.

The first model, the chemical interaction model, focused on the reaction between methane (CH_4) and groundwater (H_2O), resulting in the formation of carbon dioxide

(CO₂) and hydrogen (H₂). The temporal changes in the mass ratios of these components were examined.

The second model, the physical properties model, investigated how gas hydrates influence sediment porosity and permeability, as well as their effects on the fluid flow and heat flow within the sedimentary layers over time.

The chemical interaction model explored the dynamics of methane dissolution and the subsequent production of CO₂, and the displacement of both CO₂ and H₂O. Key findings from the model include the significant impact of faults, which revealed that they affect the spatial distribution of methane and its reaction products. Faults acted as conduits facilitating fluid migration. Additionally, variations in the seafloor's topography influenced pressure, affecting the rate and extent of chemical reactions. The model demonstrated that the chemical interactions within hydrate-bearing sediments are highly sensitive to geological and geochemical conditions. These findings highlight the importance of incorporating detailed geological features into numerical simulations to fully capture the complexity of these systems.

The physical properties model designed to investigate the effects of gas hydrate cementation in reservoir sediments on the surrounding sediments, provides a detailed analysis of how the porosity characteristics of gas hydrates and the permeability properties of sediments influence the temporal evolution of fluid flow and heat flow. Hydrate cementation has resulted in a substantial reduction in the porosity of the sediment-containing gas hydrate, inducing localized variations in both fluid flow and heat flow. The presence of faults further introduced heterogeneity in fluid and heat flow patterns, creating zones of enhanced fluid migration and altering temperature patterns. This highlighted the complex interplay between structural and hydrological processes within hydrate-bearing systems.

The combined results of both models provide valuable insights into the behavior of gas hydrates under varying geological and chemical conditions, highlighting the critical role of geological discontinuities, such as faults, in shaping the dynamics of hydrate systems. Faults facilitate gas migration, significantly influencing the spatial distribution of methane and its reaction products. Similarly, sediment properties such as porosity and permeability play a vital role in governing fluid flow and heat flow within hydrate-bearing layers. Understanding the factors that influence methane dissolution and migrations is essential for evaluating the potential of extracting energy from gas hydrates. Additionally, the release of greenhouse gases, such as CO₂ and CH₄ during hydrate dissociation could have significant environmental consequences. Methane is one of the most potent greenhouse gases, with a much higher warming potential and climate change. Since hydrate dissociation can release large amounts of these greenhouse gases, it may result in long-term effects on marine ecosystems, coastal areas, and the atmosphere. This situation could accelerate climate change and lead to increased environmental problems.

This study underscores the complexity of gas hydrate systems in the Black Sea, emphasizing the importance of incorporating both chemical and physical processes into numerical models. The findings highlight the influence of faults, seafloor morphology, and sediment properties on the dynamics of hydrates and their associated reactions.

The results obtained from both models offer significant insights that can support the development of more accurate simulations for predicting the energy potential and assessing the environmental risks associated with gas hydrates. These findings have

facilitated the identification and upward migration of gas in these regions have provided a foundation for a more detailed analysis of methane gas production and release processes. Furthermore, in the context of global challenges such as climate change and greenhouse gas emissions, these models enable a more comprehensive investigation of the long-term effects of gas hydrate chemical reactions and physical parameters. These results are crucial for evaluating the potential of gas hydrates as an energy source and for understanding their environmental impacts.

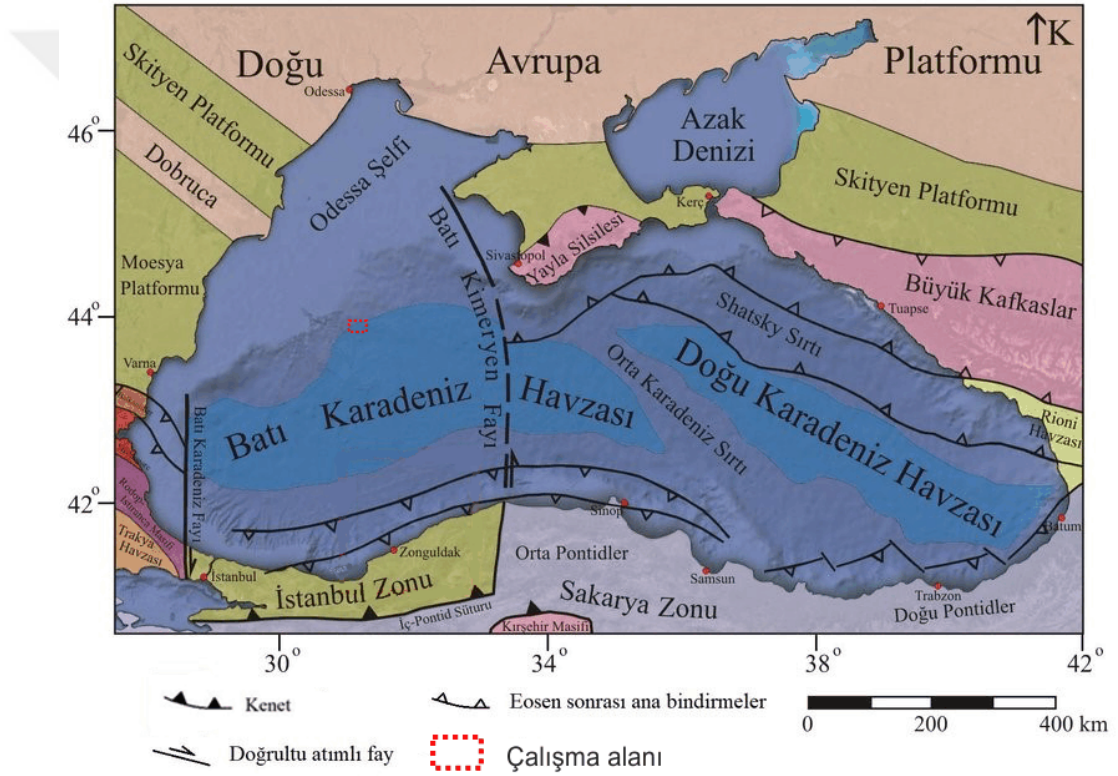




1. GİRİŞ

1.1 Karadeniz Jeolojisi ve Tektoniği

Karadeniz, 432.000 km² alana yayılan yarı kapalı bir havza olup küresel okyanuslarla bağlantısı İstanbul Boğazı ve Çanakkale Boğazı aracılığıyla olan dünyanın en büyük anoksik (oksijensiz) havzasıdır (Ross ve diğ., 1974).



Şekil 1.1 : Karadeniz'in ana tektonik elemanları (Önal ve Demirbağ, 2020'den değiştirilerek).

Karadeniz, Mesozoyik ve Erken Senozoyik dönemlerinde, Tetis Okyanusu'nun kuzeye doğru dalması sonucu oluşan bir yay-ardı (back-arc) havzasıdır (Finetti ve diğ., 1988; Okay ve diğ., 1994; Robinson ve diğ., 1996; Spadini ve diğ., 1996; Nikishin ve diğ., 2003). Günümüzde Alp-Himalaya sistemi tarafından kontrol edilen karmaşık bir sıkışma tektoniği altında olsa da, oluşum aşamasında açılma tektoniği etkili olmuştur (Finetti ve diğ., 1988; Robinson ve diğ., 1996; Spadini ve diğ., 1996).

Bu sıkışma tektoniği yapıları, batıda Balkanidler, güneyde Pontidler, kuzeyde Kırım Yayla dağları ve doğuda ise Kafkaslar ile ifade edilir (Maden ve Dondurur, 2012).

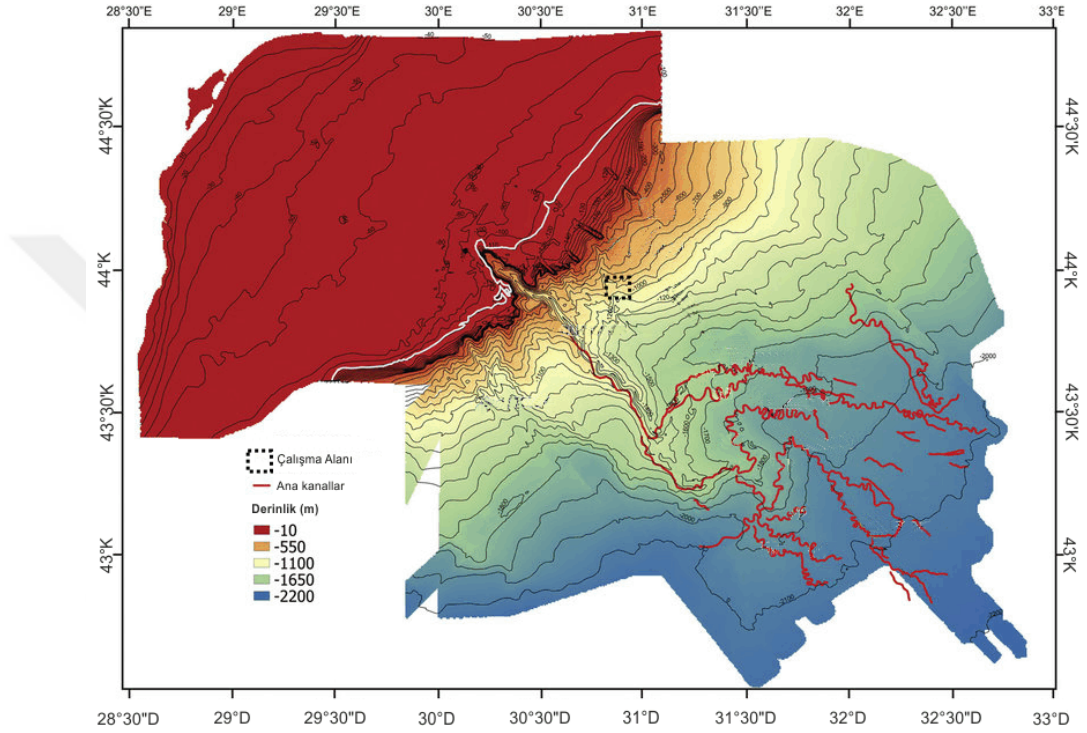
Şekil 1.1’de görüldüğü gibi tektonik olarak Batı Karadeniz Bloğu (BKB) ve Doğu Karadeniz Bloğu (DKB) olarak isimlendirilen iki farklı kökene sahip havzadan oluşmaktadır. Batı Karadeniz Havzası’nın büyük bir kesimi Geç Kretase’de, İstanbul Zonu’nun Odessa şelfinden kopması ile açılmıştır. Batı Karadeniz Havzası’nın açılması, İstanbul Zonu’nun güneydeki Sakarya Zonu ile çarpışması sonucunda erken Eosen’de sona ermiştir. Daha karmaşık bir yapıya sahip olan Doğu Karadeniz Havzası, Doğu Karadeniz Bloğu’nun Kretase ortasında başlayan saat yönünün tersine hareketi sonucunda açılmıştır (Okay ve diğ., 1994). Bu havzalar Orta Karadeniz Sırtı (OKS) olarak isimlendirilen bölgesel bir sırt ile birbirinden ayrılmaktadır. Her iki havza batimetrik olarak 2200 m derinlikte tek bir havzaya birleşmiştir (Wong ve diğ., 1997).

Pliyosen’den bu yana basınç koşullarında litosferin aşağı eğilmesine bağlı olarak havzanın hızlı bir şekilde çökmesi, çoğunlukla kil sedimanları tarafından temsil edilen 2.5- 3.0 kilometre kalınlığında bir birimin birikimine izin vermiştir. Bu birim esas olarak Orta Avrupa’dan Tuna nehri ve Doğu Avrupa’dan ise Dinyeper, Dinyester ve Güney Buh nehirlerinden gelen sediman girişiyle oluşmuştur (Nikishin ve diğ., 2003). Tortu girişi Kuzeybatı Karadeniz kenarının kıyı bölgesinden Tuna Derin Deniz Yelpazesi de dahil olmak üzere büyük derin deniz fanı komplekslerinin oluşturduğu derin havzaya kadar şekillenmesine katkıda bulunmuştur (Popescu ve diğ., 2001).

1.2 Tuna Derin Deniz Yelpazesi

Karadeniz’in kuzeybatı kıta yamacı, sayısız deniz altı kanyonu tarafından kesintiye uğramış bir yapıya sahiptir (Şekil 1.2) . Bu kanyonlar genellikle şelf sınırında –170 ile –140 metre su derinliği arasında sona ermektedir. Ancak Tuna Kanyon’u, bu genel durumdan farklılık göstererek 26 kilometre boyunca içeriye uzanır ve –110 metre su derinliğine kadar şelfi derin bir şekilde keser. Tuna Kanyonu, Karadeniz’in derin kısımlarına ve Tuna Derin Deniz Yelpazesi’ne doğru tortu transferini sağlayan ana bir geçit olarak işlev görür. Bu özelliğiyle Avrupa’nın en gelişmiş derin deniz tortu biriktirme sistemlerinden birinin oluşumuna katkı sağlar (Popescu ve diğ., 2004).

Tuna Derin Deniz Yelpazesi, kıta sahanlığının kırılma hattı aşağısında yaklaşık 150 kilometre boyunca uzanan ve 2200 metre su derinliğine ulaşan ince taneli bir türbidit sistemi olarak tanımlanmaktadır (Popescu ve diğ., 2001). Bu sistem, karbon açısından zengin organik tortuların derin denizlere taşınmasını sağlayarak gaz hidrat oluşumu için gerekli olan metan gazının birikimini destekler.



Şekil 1.2 : Tuna Derin Deniz Yelpazesi batimetrisi ve ana kanalları (Constantinescu vd., 2015'ten değiştirilerek).

Tuna Kanyonu'nun yoğun tortu akışı ve Tuna Derin Deniz Yelpazesi'nin geniş birikim alanı, Karadeniz'in alt tabakalarında gaz hidrat oluşumu için uygun koşulları sağlamaktadır. Karadeniz'in derin sularındaki anoksik ortam, organik maddelerin bozulma süreçlerini yavaşlatarak metan gazı üretiminin sürekliliğini artırır. Bu süreç, düşük sıcaklık ve yüksek basınç koşullarıyla birleşerek gaz hidratların oluşumunu hızlandırır.

Karadeniz'in kendine özgü morfolojik ve sedimantolojik yapısı, gaz hidrat oluşumu için elverişli bir ortam sunar. Bu durum, bölgeyi enerji kaynakları açısından önemli bir potansiyele sahip hale getirmektedir.

Bu bağlamda, Karadeniz'de Tuna Derin Deniz Yelpazesi'nde yer alan gaz hidrat barındıran sedimanların, ANSYS Fluent (2021 R1 Academic) yazılımı kullanılarak

detaylı bir şekilde incelenmesi hedeflenmiştir. Çalışmada, gaz hidratın yeraltı suyuyla kimyasal etkileşimleri ve gaz hidratın fiziksel özelliklerinin yeraltı sistemleri üzerindeki etkilerinin zamana bağlı değişimlerini gerçekçi bir yeryüzü simülasyonu oluşturarak analiz edilmiştir



2. GAZ HİDRATLAR

2.1 Gaz Hidratların Önemi

Gaz hidratlar, enerji, çevresel etkileri ve jeolojik süreçlerdeki kritik rolleri nedeniyle hem bilimsel hem de endüstriyel açıdan büyük önem taşımaktadır.

Enerji boyutunda, gaz hidratlar sahip oldukları metan içeriğinden dolayı geleceğin potansiyel enerji kaynaklarından biri olarak değerlendirilmektedir (Rajput ve Thakur, 2011).

Bununla birlikte, gaz hidratlar çevresel etkileri nedeniyle de dikkat çekmektedir. Hidrat yapılarına hapsolmuş metan, güçlü bir sera gazıdır ve bu rezervlerin kontrolsüz çözünmesi, atmosferik metan seviyelerinde hızlı bir artışa neden olabilir. Bu durum, iklim değişikliğiyle mücadelede gaz hidratların rolünü daha kritik hale getirmektedir (Ruppel ve Kessler, 2017).

Jeolojik açıdan ise gaz hidratlar, deniz tabanında stabiliteyi etkileyen önemli bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Özellikle denizel tortullarda gaz hidratların çözünmesi, denizaltı heyelanlarına veya gaz sızıntılarına neden olabilir ve bu durum hem çevresel risklerin yönetimi hem de denizel jeolojik süreçlerin anlaşılması açısından kritik bir araştırma alanıdır (Maslin ve diğ., 2010). Bu nedenle, gaz hidratlar hem geleceğin enerji kaynağı olarak hem de çevresel ve jeolojik süreçlerin önemli bir parçası olarak değerlendirilmektedir.

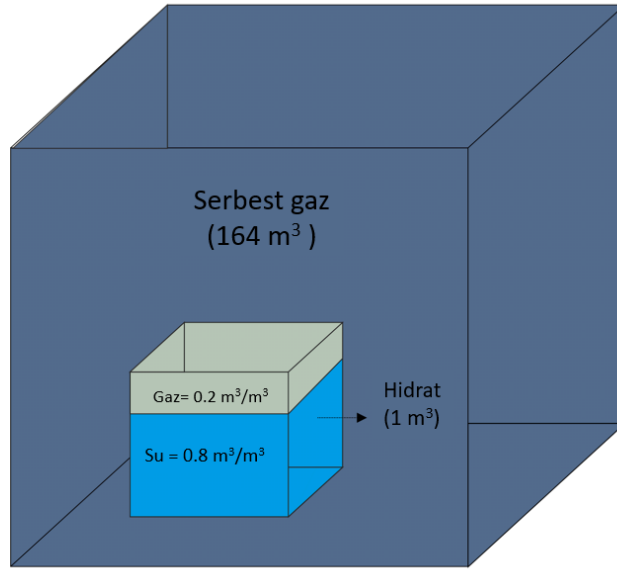
2.2 Gaz Hidratların Tanımı ve Özellikleri

Gaz hidratları, suyun (veya buzun) belirli sıcaklık ve basınç koşullarında küçük moleküllerle etkileşime girdiğinde oluşan kristal bileşiklerdir. Bu bileşikler kimyasal olarak gaz klatrat hidratları olarak adlandırılır.



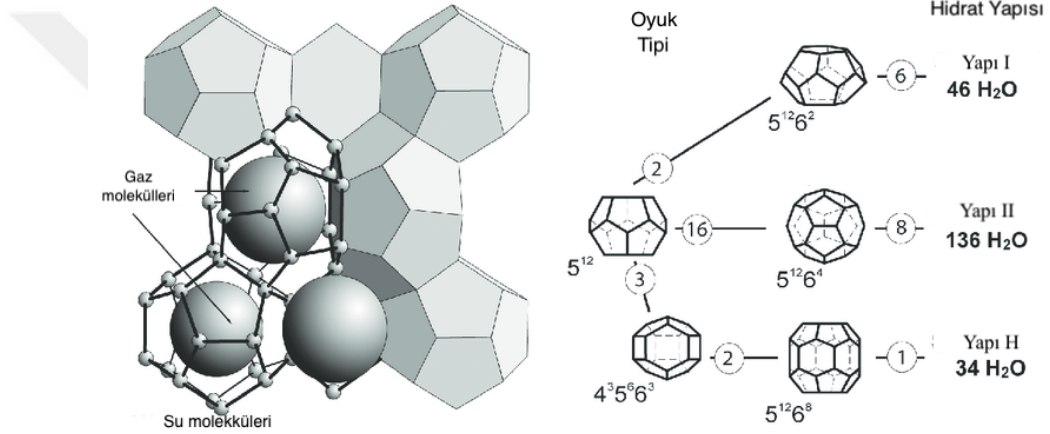
Şekil 2.1 : Çıkarılmış gaz hidrat numunesi (Al-Khatib, 2020).

Gaz klatratlar, tek bir tür molekülün (bu durumda su molekülü) kristal kafesine başka bir tür molekülün dahil olmasıyla oluşan Şekil 2.1’de görüldüğü üzere buz benzeri kristalin katılardır. Bu bileşiklerde, su moleküllerine 'ev sahibi' (host) moleküller denirken, kristali stabilize eden diğer bileşenlere 'misafir' (guest) moleküller adı verilir. Birim hacim başına gaz hidratlar yüksek oranda serbest gaz içermektedirler. Şekil 2.2’de görüldüğü üzere 1 m³ hidrat atmosfer sıcaklığı ve basıncında ayrıışarak, 164 m³ serbest gaz ve 0.8 m³ su oluşturmaktadır (Sloan, 1998).



Şekil 2.2 : Gaz hidrat bileşimi (Makogon, 1966’ dan değiştirilerek).

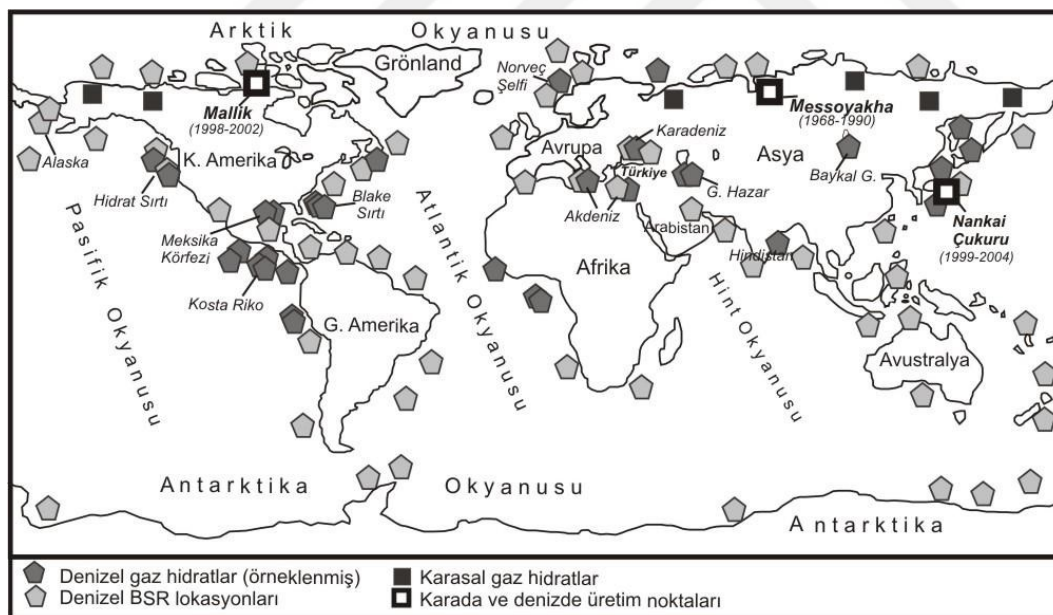
Standart atmosferik basınç altında donma noktasında (0°C) bulunan su molekülleri, hidrojen bağlarıyla birbirine bağlı, kararlı ve altıgen kristal yapıya sahiptir. Ancak yüksek basınç ve düşük sıcaklık koşullarında, su moleküllerinin düzenli altıgen yapısı kaybolur; bunun sonucunda, karmaşık ve kararsız bir kristal kafes yapısı ortaya çıkar. Bu karmaşık yapının içinde, Van der Waals kuvvetleriyle hapsolan misafir moleküllerinin varlığı, kristal yapının denge durumuna gelmesine yardımcı olur. Gaz hidratlarının üç farklı kristal yapı oluşturduğu bilinmektedir: Yapı I (sI), Yapı II (sII) ve Yapı H (sH). Bu yapılar, su moleküllerinin farklı düzenlemelerini temsil eder ve hangi yapının oluşacağı, hidratı oluşturan gaz moleküllerinin büyüklüğüne bağlıdır (Dillon, 2001; Carroll, 2003; Rajput ve Thakur, 2011).



Şekil 2.3 : Kafes yapısı genel bilgileri. Solda: Yapı I kafes yapısı gösterimi; büyük küreler gaz molekülleri, küçük küreler kafes yapısını oluşturan su molekülleridir. Sağda: kafes tipleri ve üç ortak hidrat kristal yapısının kafes sayıları. Daire içindeki sayılar, hidrat yapısını oluşturmak için kullanılan hücre sayısıdır (Bohrmann ve Torres, 2006'dan değiştirilerek).

Yapı I (sI) birim hücre 8 kafesten (2 küçük ve 6 büyük oyuktan) oluşur. Her bir kafesin içinde en fazla 1 konuk molekül bulunabilir. Böylece yapı I, 8 konuk molekül ve 46 su molekülünden oluşur. Yapı II (sII)'nin bir birim hücresi 24 kafesten (16 küçük ve 8 büyük oyuktan) oluşur. Böylece yapı II 24 konuk molekül ve 136 su molekülünden oluşmaktadır. Yapı H (sH) karmaşık bir kristal yapısına sahiptir. 6 kafesten (1 son derece büyük, 2 orta boy ve 3 küçük oyuktan) oluşmaktadır. Böylece yapı 6 konuk molekül ve 34 su molekülünden oluşmaktadır (Şekil 2.3). Yapı II ve yapı H ise yüksek moleküler ağırlıklı hidrokarbon gazlarından oluşan gaz hidrat türleridir (Bohrmann ve Torres, 2006).

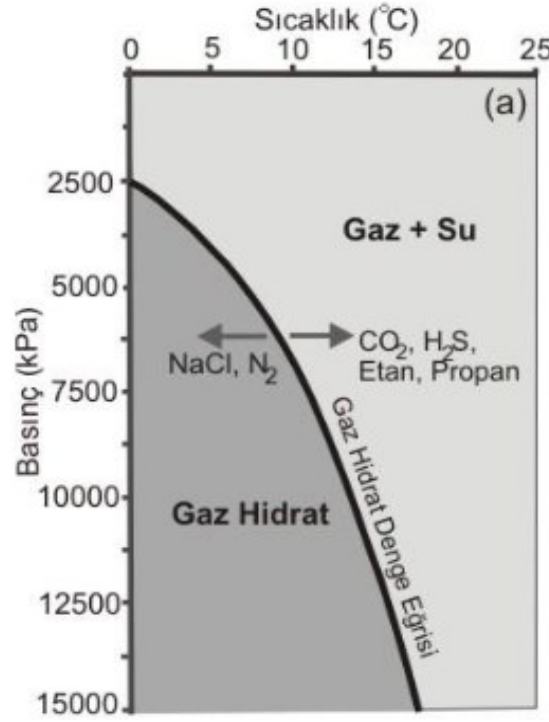
Doğal hidratların oluşum bölgelerini belirlemenin ilk adımı, dünya genelinde gaz hidrat kararlılık zonunda (GHKZ) bulunan alanları tanımlamaktır. Bu bölgeler, hidratların kararlı hale gelmesi için gerekli olan yüksek basınç ve düşük sıcaklık koşullarına sahiptir. Küresel GHKZ'yi tanımlamak, olası doğal hidrat oluşumlarının üst sınırını belirlemeye olanak tanır (Giavarini ve Hester, 2011). Doğal hidratlarda bulunan hidrokarbon gazlarının %99'undan fazlası metandır ve bu gazların oluşum ve kararlılık için gerekli olan düşük sıcaklık ve yüksek basınç koşulları, iki farklı jeolojik ortamda bulunur: donmuş toprak (permafrost) ve derin deniz okyanus sedimanları (Şekil 2.4). Denizel ortamdaki hidrat kararlılık zonu, su derinliği, deniz tabanı sıcaklığı ve jeotermal gradyan gibi faktörlere bağlıdır. Hem yüzeyde hem de hidratın etrafındaki alanlarda sıcaklık ve/veya basınçtaki değişiklikler, kararlılık zonunun kalınlığını etkileyen önemli etkenlerdir. Bununla birlikte, gaz kimyası ve gazın bulunabilirliği gibi diğer faktörler de kararlılık zonunun kalınlığını ve konumunu değiştirebilir (Demirbaş, 2010).



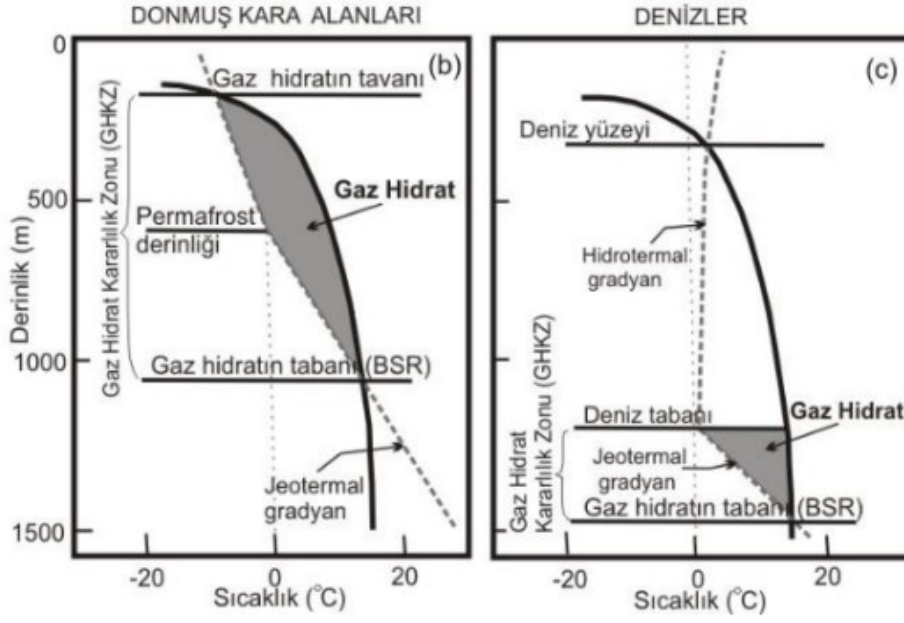
Şekil 2.4 : Dünya gaz hidrat haritası (Ocakoğlu, 2009; USGS, 2004 ve MMS, 2008'den değiştirilerek).

Yeterli gaz ve su temini göz önüne alındığında gaz hidrat oluşumu ve kararlılığı için temel etkenler basınç ve sıcaklıktır. Şekil 2.5'te basınç ve sıcaklığa bağlı gaz hidrat denge eğrisine yer verilmiştir. Bu denge eğrisinde basınç arttıkça, diğer bir söylemle derinlik arttıkça gaz hidratlar daha yüksek sıcaklıklarda oluşabilmektedir. En genel

haliyle basınç değerinin >2500 kPa yüksek olduğu ortamlarda gaz hidrat yapısı oluşmaya başlamaktadır. Denge eğrisi üzerinde basınç değeriindeki değişimler ve/veya sıcaklığın yükselmesi sonucu gaz hidrat yapısı bozulur, metan (CH₄) gazı + su (H₂O) olarak iki faz durumuna geçmektedir. Denge eğrisinin konumunda gaz hidrat içerisindeki metan gazı haricinde bulunan etan, propan, N₂, H₂S ve CO₂ gibi gazlar ve gaz hidratı oluşturan suyun tuzluluğu (NaCl) etkilidir. Etan, propan, H₂S ve CO₂ gazları eğrinin sağa kaymasına neden olurken yani daha yüksek sıcaklık ve düşük basınçlarda gaz hidrat dengeye ulaşır ; gaz hidratı oluşturan suyun tuzluluğunun artması ve N₂ gazı eğrinin sola kaymasına neden olur yani daha düşük sıcaklık ve yüksek basınç değerlerinde gaz hidrat dengeye ulaşır (Ocakoğlu, 2009).



Şekil 2.5 : Gaz hidrat denge eğrisi (Ocakoğlu, 2009; Kvenvolden, 1988'den değiştirilerek).

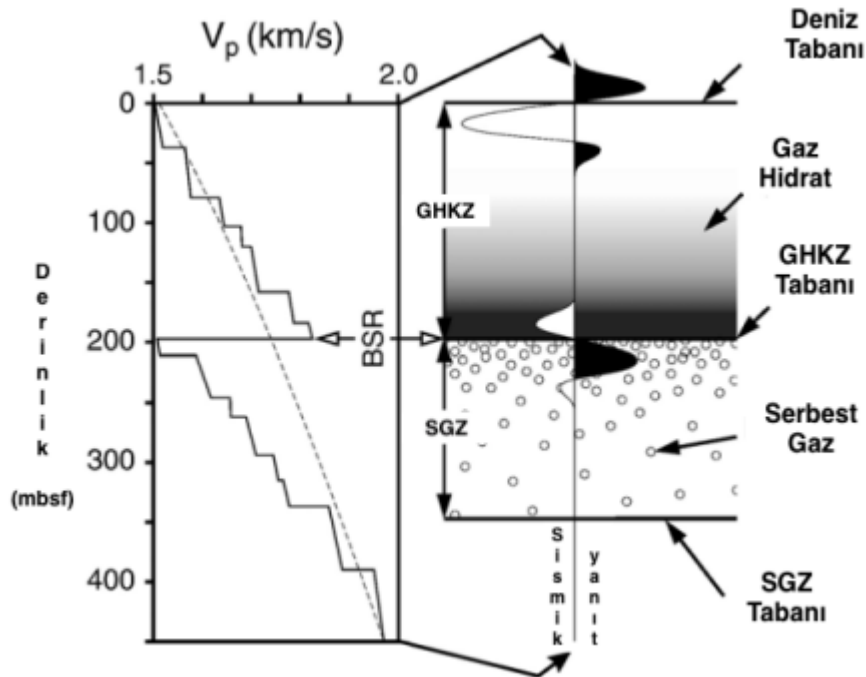


Şekil 2.6 : Donmuş kara alanlarında (permafrost) ve denizlerde gaz hidratın kararlı olduğu zonların gösterimi (Ocakoğlu, 2009 ; Kvenvolden, 1988’den değiştirilerek).

Şekil 2.6’da donmuş kara alanlarında (permafrost) ve denizlerde gaz hidratların kararlı olduğu zonların derinlik ve sıcaklık ilişkisine yer verilmiştir. GHKZ’nin üst sınırı donmuş kara alanında -10°C jeotermal sıcaklıkta birkaç yüz metre derinlikte; permafrost aralığında ya da permafrost tabanının daha da derinlerine uzanmaktadır, alt sınırı ise yaklaşık 15°C jeotermal sıcaklıkta 1 km’yi aşan derinliklerde temsil edilmektedir. Denizlerde ise GHKZ’nin üst sınırı jeotermal sıcaklığın 0°C birkaç derece üzerinde olduğu deniz tabanı, alt sınırı ise jeotermal sıcaklığın 15°C birkaç derece daha fazla olduğu, deniz tabanının altındaki 1,5 km’lik derinliklere karşılık gelmektedir. Derin su ve düşük jeotermal gradyan alanlarında GHKZ deniz tabanının 1000 m altına kadar uzanabilmektedir. Gaz hidratlar için bu maksimum derinlik, sediman yüzeyinin altında aranmakta olan birçok geleneksel hidrokarbona kıyasla sığdır. GHKZ gaz hidrat varlığının muhtemel bulunduğu bölgedir. GHKZ’nun alt sınırı BSR (Bottom Simulating Reflector, Tabana Benzeyen Yansıtıcı) seviyesi olarak isimlendirilir ve bu seviyenin altında jeotermal gradyana bağlı olarak sıcaklık koşullarının gaz hidrat kararlılık koşullarına uygun olmaması nedeniyle hidrat oluşumu gözlenmez; onun yerine çoğunlukla serbest metan gazı bulunur. Yansıma kesitlerinde BSR seviyesinin ayırdığı gaz hidrat ve serbest gaz içeren ortamların yansıma özelliklerinde de farklılıklar görülmektedir (Kvenvolden, 1988; Ocakoğlu, 2009).

2.4 Gaz Hidrat Konsantrasyonu

Gaz hidrat konsantrasyonu, Şekil 2.7’de görüldüğü gibi genellikle gaz hidrat kararlılık zonu boyunca aşağıya doğru artış gösterir. Bu artan konsantrasyon, metanın bu bölgenin altındaki süreçler aracılığıyla sağlandığını ve gazın muhtemelen burada biriktiğini önermektedir. Metan, ya sedimanın daha derinlerinde mikroorganizmalar tarafından üretilerek yukarı doğru yükselmekte ya da metanın suda çözünmesi ile ilgili faktörler nedeniyle yüzeyden geri dönmektedir. Birçok kıtasal kenar ortamında sediman birikimi devam etmektedir. Deniz tabanı seviyesi yükseldikçe, jeotermal gradyan genelde sabit kalır; bu nedenle izotermal yüzeyler, biriken deniz tabanı ile birlikte yükselmek zorundadır. Yüzeyde bulunan sediman tanesi veya gaz hidrat parçası, deniz tabanının yükselmesiyle birlikte gaz hidrat kararlılık bölgesinin üst kısmında kalır. Gaz hidrat parçası deniz tabanının altında yeterince derin bir noktaya ulaşır ve bu da onu gaz hidrat kararlılık bölgesinin tabanının altına yerleştirir; dolayısıyla gaz hidrat kararlılığı aralığının dışında kalır. Ardından gaz hidrat ayrışır ve metanını serbest bırakır; bu metan, gazın düşük yoğunluğu nedeniyle sedimanlar arasında yükselme eğilimindedir ve gaz hidrat kararlılık bölgesinin tabanında birikir. Nihayetinde, metan gaz hidrat kararlılık bölgesine doğru yükselerek burada daha fazla gaz hidrat oluşturur (Dillon, 2001).



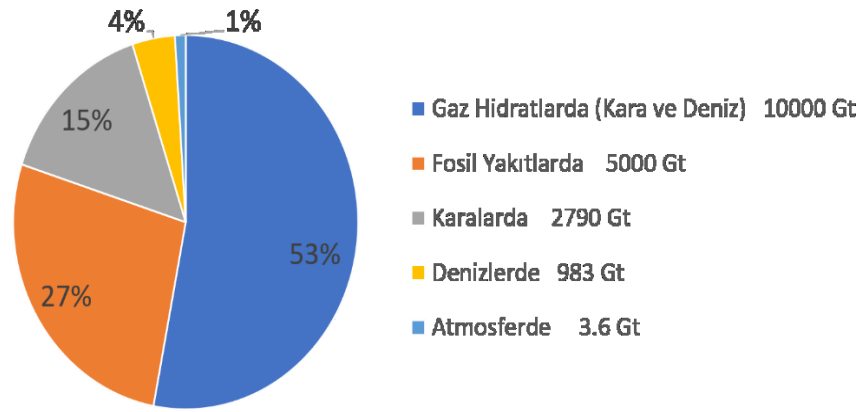
Şekil 2.7 : Gaz hidrat içeren denizaltı sediman bölümünün ve P dalga hızı ile ilişkisinin gösterimi (Haacke ve diğ, 2007'den değiştirilerek).

Zerpa ve Koh (2015), yüksek konsantrasyonda hidrat birikiminin, tortu içerisindeki gözenek alanlarını doldurarak ve taneler arasında bağlayıcı bir yapı oluşturarak bulunduğu sedimanın gözeneklilik değerinin azalmasına yol açtığını varsayar.

Bu tez kapsamında, yüksek konsantrasyonda gaz hidrat birikimi sonucu azalan gözenekliliğin sedimanlar üzerindeki akışkan ve ısı akışı davranışlarına etkisini incelemek amacıyla bir simülasyon modeli üretilmiştir.

2.5 Olası Gaz Hidrat Rezerv Miktarı ve Küresel Isınma

Gaz hidratların içerdiği metan miktarına ilişkin tahminler oldukça değişkenlik göstermektedir. Trofimuk ve diğ. (1979) okyanus bölgelerinin %90'nın gaz hidrat barındırma potansiyeline sahip olduğunu kabulünden yola çıkarak, kıta sahanlığı, eğimi ve derin deniz düzlüklerini kaynak tahminine dahil etmiştir. Bu tahmin, denizaltı gaz hidratlarında $1.135 \times 10^{18} \text{ m}^3$ metan gazı olduğu varsaymıştır. Potansiyel Gaz Komitesi (1981) tarafından yapılan çalışmada, metan karbon miktarının permafrost ve okyanus bölgelerinde en az $1.4 \times 10^{13} / 3.1 \times 10^{15} \text{ m}^3$ (Meyer, 1981) ve en yüksek $3.4 \times 10^{16} / 7.6 \times 10^{18} \text{ m}^3$ (Dobrynin ve diğ., 1981) arasında değişebileceği tahmininde bulunmuştur (Rajput ve Thakur, 2011). Kvenvolden (1988), çalışmasında Kuzey Kutubu Havzası kenarının dünya genelindeki kıtasal kenarların %5'ini oluşturduğunu varsaymış ve bu varsayımıyla küresel metan hacminin $20 \times 10^{15} \text{ m}^3$ olduğunu tahmin etmiştir. Soloviev (2002), gaz hidratın tortul tabakanın 2 km'den daha kalın olduğu bölgelerde oluşabileceğini varsaymıştır ve dünya üzerinde $35.7 \times 10^6 \text{ km}^2$ 'lik bir alan kapladığını varsaymıştır. Bu varsayımdan yola çıkarak küresel metan hacminin 1.8×10^{14} ve $0.2 \times 10^{15} \text{ m}^3$ arasında değişeceğini tahmin etmiştir. Milkov ve diğ. (2003), Black Ridge bölgesine yapılan çalışmadan BSR ve GHSZ derinliklerini kullanarak 3×10^{15} ve $5 \times 10^{15} \text{ m}^3$ arasında değişen küresel metan tahmininde bulunmuşlardır. Dünya genelinde gaz hidrat rezerv miktarı araştırmaları devam etmektedir. Nakicenovic (2002)'e göre mevcut tahminlere dayanarak gaz hidratlardan elde edilebilecek geri kazanılabilir (çıkarılabilir ve kullanılabilir olan) kısmı bile “metan çağına” girmek için yeterli olabilecektir. Gaz hidratların metanındaki tahmini karbon miktarı (10.000 gigaton) bilinen geleneksel gaz yataklarındaki karbon miktarının (5.000 gigaton) yaklaşık olarak iki katıdır (Şekil 2.8). Bu nedenle miktar bazında gaz hidratlar enerji için önemli potansiyel metan kaynağı ve bu özelliği nedeniyle küresel ısınma tehdidi olarak görülmektedir.



Şekil 2.8 : Dünya genelinde organik karbon dağılımı (Oçakoğlu, 2009; Kvenvolden, 1988 ve USGS, 1992’den değiştirilerek).

Metan, atmosferde radyatif olarak aktif bir bileşiktir. Atmosfere salındığında, oksitlenerek karbondioksit dönüşmeden önce güçlü bir sera etkisi oluşturur. Ancak atmosferdeki ömrü kısa (yaklaşık olarak 9 yıl (Fu ve diğ., 2024)) olduğu için bu etki zamanla azalır. Metanın küresel ısınma potansiyeli (Global Warming Potanetial, GWP) 20 yıllık bir süre boyunca karbondioksitten 56 kat daha yüksektir. Fakat atmosferdeki kimyasal reaksiyonlar (özellikle oksidasyon) nedeniyle bu etki zamanla düşer ve 100 yıllık sürede 21 katına iner (Dillon, 2001).

Deniz tabanında veya permafrost bölgelerinde gerçekleşecek büyük bir metan salınımı, küresel ısınmayı hızlandırarak daha fazla metan hidrat çözülmesine yol açabilir. Bu durum pozitif bir geri besleme mekanizması olarak tanımlanır ve iklim değişikliğinin etkilerini artırabilir. Bu geri besleme süreci, özellikle okyanus sığ kısımlarında ve permafrost bölgelerinde daha fazla ısınmaya neden olarak, iklim sisteminde beklenenden daha hızlı değişikliklere yol açabilir (Harvey ve Huang, 1995).

Yüksek metan içeriği ile gaz hidratların, gelecekte enerji ihtiyacının karşılanmasında önemli rol oynayacağı düşünülürken, iklim değişikliğine yol açabilecek metan salınımı riskini de taşımaktadır. Gaz hidratların güvenli ve sürdürülebilir bir şekilde enerji kaynağı olarak kullanılması için çevresel etkilerinin tam olarak anlaşılması gerekmektedir.

2.6 Gaz Hidratlar Nasıl Tespit Edilir?

Enerji kaynağı olarak gaz hidratların potansiyeli, bu doğal yapıların tespit edilmesini önemli kılmaktadır. Bu nedenle, gaz hidrat barındıran sedimanların belirlenmesi enerji üretimi ve sürdürülebilir alternatifler sağlama açısından kritik bir adımdır. Gaz hidrat içeren sedimanların belirlenmesi, jeofiziksel, jeolojik ve jeokimyasal yöntemlerin kullanıldığı çok disiplinli araştırmalar yoluyla gerçekleştirilir. Özellikle jeofiziksel araştırmalar, gaz hidrat ve ilişkili serbest gazın sismik veri setlerinde tanımlanması için temel özellikleri sunar. Gaz hidratların tanımlanmasında en önemli jeofiziksel gösterge olarak BSR sismik izi kabul edilmektedir (Rajput ve Thakur, 2011). Bu jeofiziksel yansıma yorumu, deniz tabanında gaz hidratların varlığını doğrulamak için yaygın olarak kullanılmakta olup, bu tez kapsamında gaz hidrat varlığı bu jeofiziksel yansıma yorumu kullanılarak incelenmiştir.

2.6.1 BSR (Bottom Simulating Reflector, Tabana Benzeyen Yansıtıcı)

Tabana Benzeyen Yansıtıcı (TBY), gaz hidrat kararlılık zonunun tabanını işaret eden güçlü bir yansıma olup, sismik kesitlerde belirgin bir şekilde gözlemlenir. Bu bölgenin hemen altında, serbest gazın stabil olduğu ve gaz hidratın bulunmadığı alanlarda, gözenek boşluklarında biriken serbest gaz kabarcıkları yer alır. Bu kabarcıklar, sedimanların akustik hızını belirgin şekilde azaltır. Buna karşılık, gaz hidrat kararlılık bölgesinde bulunan saf gaz hidrat, daha yüksek akustik hıza sahiptir ve bu durum, sismik dalgaların daha hızlı yayılmasına neden olur (Şekil 2.7)(Dillon, 2001). Akustik empedans farkı, sismik kesitlerde yüksek genlikli ve negatif polariteli yansımalar oluşturur. Bu yansıma, deniz tabanı yansımasına benzer bir görünüm sergilediği için "Tabana Benzeyen Yansıtıcı (BSR)" olarak adlandırılır (Zander, 2017; Ocakoğlu, 2009).

2.7 Gaz Hidrat İçeren Sedimanlarda Akışkan Akışı için Yönetici Denklemler

Gaz hidrat içeren sedimanların tespitinin ardından, bu bölgelerin doğru bir şekilde modellenmesi, gaz hidratların oluşumu, dağılımı ve dinamiklerini anlamak için kritik bir adımdır. Bu modelleme süreci, gaz hidratların fiziksel ve kimyasal özelliklerinin yanı sıra, ortam koşullarını da göz önünde bulundurarak daha kapsamlı analizler yapmayı mümkün kılar. Bu tür modellerin geliştirilmesinde kullanılan yönetici denklemler, gaz hidratların yer altındaki davranışlarını simüle etmeye yönelik temel

araçlardır. Bu denklemler, özellikle gaz hidratın çözünübilirliği, gözeneklilik, sıcaklık ve basınç gibi faktörlerle etkileşimlerini açıklamak için kullanılır.

Gaz hidrat içeren sedimanların akışkan akışı için temel yürütücü denklemler, her bir malzeme için kütle denklemi ve enerji denklemini içerir. Bu denklemler jeolojik katmanın morfolojisine ait parametreler; akışkan ve sediman özelliklerini tanımlayan sistemin başlangıç ve sınır koşullarını, ve denge aşamaları arasındaki kütle ve ısı transferi gibi ana kısıtlamalarla belirlenir (Zerpa ve Koh, 2015).

Gaz hidrat sistemlerinde karşılaşılan iki temel bileşen olan su ve metan için kütle denklemleri kullanılmıştır. Bu denklemler suyun zaman içerisindeki birikimin, sıvı ve gaz fazlarındaki taşınmasını, difüzyonla yayılmasını, dışarıdan gelen ya da sisteme eklenen suyu ve gaz hidrat oluşumu veya çözünmesi nedeniyle gerçekleşen kütle transferini hesaba katar. Bu sayede, sistemdeki suyun davranışı ayrıntılı bir şekilde analiz edebilir (Zerpa ve Koh, 2015).

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\sum_{\beta=A,G,I,H} \phi S_{\beta} \rho_{\beta} X_{\beta}^W \right) = & \nabla \cdot \left[\frac{k k_{rA}}{\mu_A} \rho_A X_A^W (\nabla P_A - \gamma_A \nabla D) \right] \\ & + \nabla \cdot \left[\frac{k k_{rG}}{\mu_G} \rho_G X_G^W (\nabla P_G - \gamma_G \nabla D) \right] \\ & + \nabla \cdot [\phi S_G \tau_G D_G^W \rho_G \nabla X_G^W] \\ & + \sum_{\beta=A,G} X_{\beta}^W + \psi^W \end{aligned} \quad (2.1)$$

Denklem 2.1’de denizel ortamda gaz hidrat, su ve metanın hareketini, taşınımını ve kimyasal reaksiyonlarını detaylı bir şekilde analiz etmektedir. Eşitliğin sol tarafı bir her bir fazın zamana bağlı olarak $\left(\frac{\partial}{\partial t}\right)$ kütle oranlarının nasıl değiştiğini göstermektedir. Her bir fazın (A: sıvı faz, G: gaz faz, H: hidrat faz) doygunluğu (S_{β}), yoğunluğu (ρ_{β}) (kgm^{-3}), metandaki kütle oranı (X_{β}^W) ile gözeneklilik (ϕ) çarpılarak hesaplanır. Eşitliğin sağ tarafında yer alan ifadeler ise suyun ve metanın taşınımını ve üretim/çözünme süreçlerini açıklamaktadır. İlk terim sıvı fazdaki (A) metanın Darcy Kanunu’na göre taşınımını ifade eder. Bu taşınım, sıvı faz geçirgenliği (k) (m^3), sıvı fazın bağıl geçirgenliği (k_{rA}), sıvı viskozitesi (μ_A), sıvı yoğunluğu (ρ_A), suyun sıvı fazdaki kütle oranı (X_A^W) ve sıvı fazın basınç (P_A) gradyanı (∇) ve derinliğe (D)(m) bağlı hidrosatistik basınç (γ_A) gradyanı ile tanımlanır. İkinci terim, gaz fazdaki (G)

metanın benzer şekilde Darcy Kanunu'na göre taşınımını ifade eder. Bu, gaz fazı bağlı geçirgenliği (k_{rG}), gaz fazı viskozitesi (μ_G), gaz fazı yoğunluğu (ρ_G), suyun gaz fazdaki kütle oranı (X_G^W) ve gaz fazdaki basınç (P_G)(Pa) gradyanı (∇) ve gaz fazdaki derinliğe bağlı hidrostatik basınç gradyanını (γ_G) içerir. Üçüncü terim, gaz fazdaki su buharının moleküler difüzyonunu temsil eder. Gaz fazı doygunluğu (S_G), gaz fazı yoğunluğu (ρ_G), gaz fazın difüzyon katsayısı (D_G^W) (m^2s^{-1}), gaz fazındaki tortuoosite (τ_G) ve metanın gaz fazdaki konsantrasyon (X_G^W) gradyanıyla ilişkilidir. Dördüncü terim, fazlar arasında metanın üretimi, tüketimi veya reaksiyonlarından kaynaklanan kütle transferini ifade eder. Burada metanın fazlara bağlı kütle oranları (X_β^W) ve reaksiyon oranı (ψ^W) ($kgm^{-3}s^{-1}$) dikkate alınır (Zerpa ve Koh,2015).

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\sum_{\beta=A,G,I,H} \phi S_\beta \rho_\beta X_\beta^m \right) = & \nabla \cdot \left[\frac{k k_{rA}}{\mu_A} \rho_A X_A^m (\nabla P_A - \gamma_A \nabla D) \right] \\ & + \nabla \cdot \left[\frac{k k_{rG}}{\mu_G} \rho_G X_G^m (\nabla P_G - \gamma_G \nabla D) \right] \\ & + \nabla [\phi S_A \tau_A D_A^m \rho_A \nabla X_A^m] \\ & + \sum_{\beta=A,G} X_\beta^m + \psi^m \end{aligned} \quad (2.2)$$

Kullanılan bir diğer yürütücü denklem, yalnızca metanın hareketini ve difüzyonunu modellemektedir (Denklem 2.2). Yani, sadece metanın farklı fazlar arasında nasıl hareket ettiğini ve faz içindeki dağılımını ele alır. Ancak su içeriği, kimyasal reaksiyonu ve diğer fazlar bu denklemde dikkate alınmamıştır. Bu denklemde diğer yürütücü denklemden farklı olarak, sıvı fazdaki metanın moleküler difüzyonun açıklayan bir terim içermektedir. Bu terim; sıvı fazındaki metanın doygunluğu (S_A), sıvı fazı yoğunluğu (ρ_A), sıvı fazı difüzyon katsayısı (D_A^W) (m^2s^{-1}), sıvı fazındaki tortuoosite (τ_A) ve metanın sıvı fazdaki konsantrasyon (X_A^W) gradyanı ile ilişkilidir (Zerpa ve Koh, 2015).

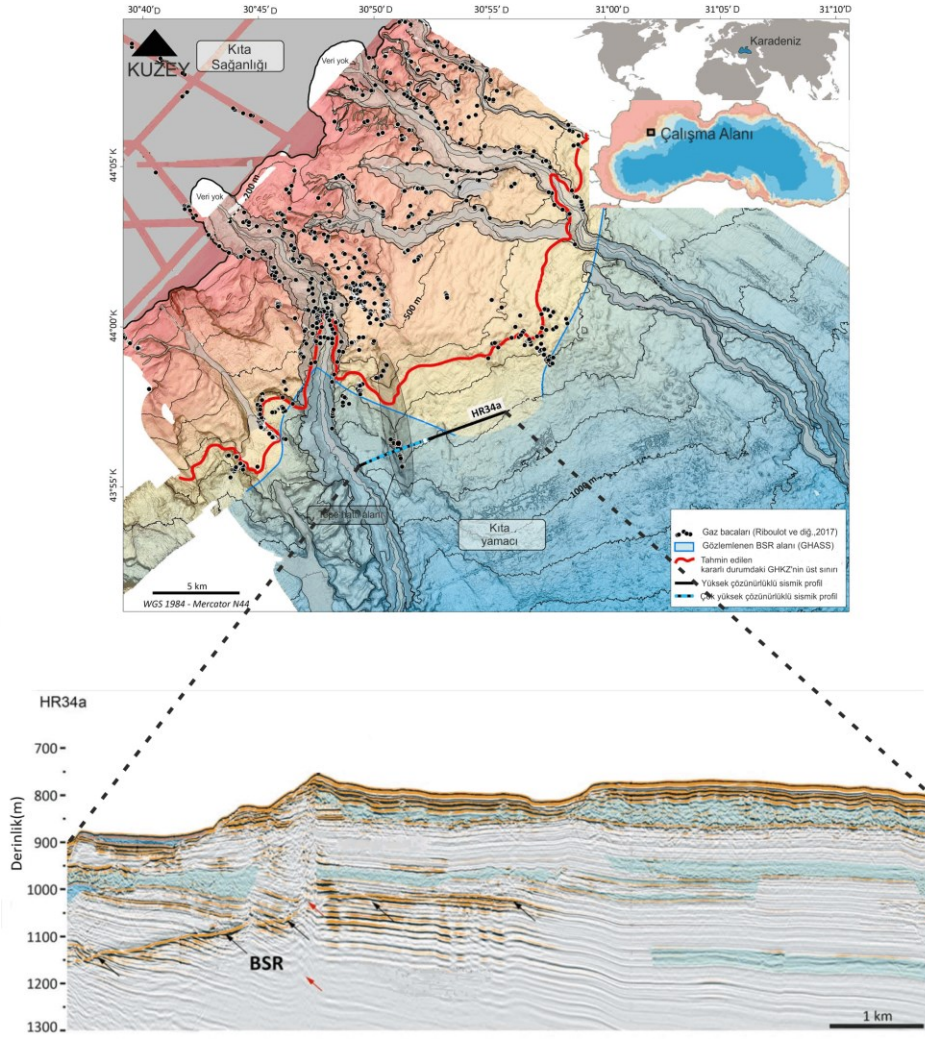
3. YÖNTEM

3.1 Kullanılan ANSYS Fluent Yazılımı

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımı olan ANSYS Fluent, yerbilimlerine özgü çeşitli problemlerin çözümünde kullanılmaktadır (Sarkar ve diğ., 2002; Düşünür Doğan ve Üner, 2019; Türkdoğan, 2019; Üner ve diğ., 2019; Erçetin ve Düşünür Doğan, 2021; Üner ve Düşünür Doğan, 2021; Şen ve Düşünür Doğan, 2021; Düşünür Doğan ve diğ., 2022; Güvem ve diğ., 2023). Yazılımın yerbilimlerine uygunluğunu sağlayan temel faktörlerden biri, gözenekli ortamlar ve fazlar arası akışlar gibi karmaşık sistemleri modelleyebilme kapasitesidir. Yazılım, Darcy Kanunu, moleküler difüzyon ve ısı transferi gibi yerbilimlerinde yaygın olarak kullanılan fiziksel süreçleri detaylı olarak çözümleyebilir. Ayrıca, aktif faylar, yeraltı rezervuarları veya diğer jeolojik yapıların etkilerini simülasyonlara entegre etme olanağı sunarak, jeolojik süreçlerin dinamiklerini ve bu süreçlerin yeraltı sistemleri üzerindeki etkisi analiz etmeyi mümkün kılar. Bu sayede, gaz hidratlar gibi karmaşık yapıları modelleme ve anlamada etkili bir araç haline gelmektedir.

Bu tez kapsamında ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak gaz hidrat ve çevre sedimanlar arasındaki ilişkiyi inceleyen gerçekçi yeryüzü modelleri geliştirilmiştir. İlk model, gaz hidrat içeren deniz sedimanlarındaki ısı akışı, akışkan akışı ve serbest gazın (metan) yeraltı suyu ile olan kimyasal etkileşimini incelemek amacıyla tasarlanmıştır. Bu simülasyon, sıcaklık, basınç ve hız bağımlı kinematik değişimleri ile metanın reaksiyona girenlerinin ve ürünleri CO₂ ve H₂'nin kütle oranlarının zamanla değişiminin gözlemlenmesi amaçlanmaktadır.

Oluşturulan diğer model de ise ortamda serbest gazın bulunmadığı ve rezerv sedimanlarda gaz hidratın çimentolaştığı bir senaryo oluşturulmuştur. Bu model, gaz hidratın çevre sedimanlar üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla geliştirilmiştir. Her iki model de gaz hidratın deniz altı sedimanlarındaki davranışını ve çevresel etkilerini daha iyi anlamamıza olanak tanımaktadır.



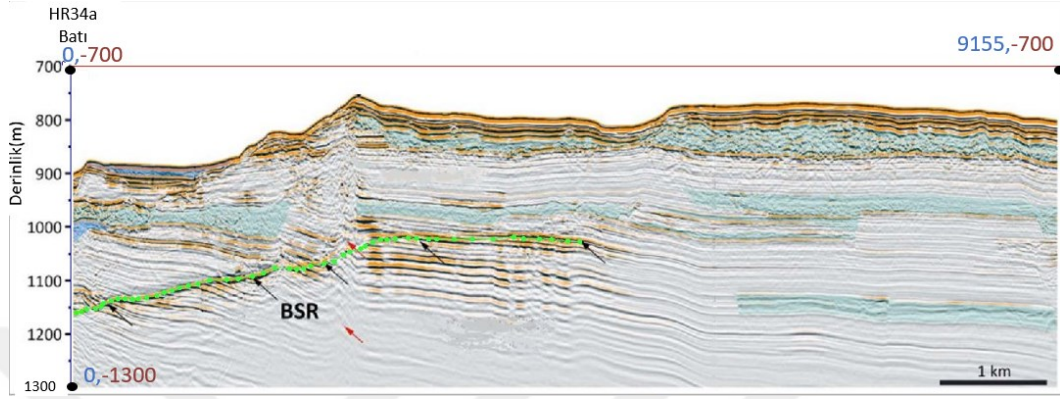
Şekil 3.1 : Çalışma alanının yer bulduru haritası ve modellemesi yapılacak sismik kesitin görüntüsü (Ker ve diğ,2019'dan uyarlanmıştır).

Bu tez kapsamında, Karadeniz'in batısında bulunan Tuna Derin Deniz Yelpazesi'ndeki deniz sedimanlarının ayrıntılı yer modellerinin oluşturulması temel adımlardan biridir. Bu amaçla, Ker ve diğ. (2019) tarafından yayınlanan ve 2015 yılında Batı Karadeniz'de gerçekleştirilen "Gas Hydrates, Fluid Activities, and Sediment Deformations (GHASS)" projesi kapsamında R/V *Pourquoi Pas?* seferi sırasında elde edilen, 2 boyutlu yüksek çözünürlüklü HR34a sismik yansıma kesiti seçilmiştir (Şekil 3.1).

HR34a kesidinin seçilmesinin başlıca nedenleri şunlardır: doğru derinlik bilgisi elde etmek amacıyla derinlik dönüşümünün yapılmış olması, gaz hidrat varlığının önemli göstergelerinden biri olan BSR (Bottom Simulating Reflector) sismik yansıma yorumunu içermesi ve fay yapılarının ısı akışını ve akışkan akışı üzerindeki etkilerinin incelenbilmesine olanak tanınmasıdır.

3.2 Verileri Dijitalleştirme

Grafik üzerinde yer alan noktaların koordinat sistemine manual olarak tanımlandığı ve dijital veri haline getirildiği bir program olan Plot Digitizer, bu tez kapsamında kullanılarak seçilen sismik kesit üzerindeki noktalar dijitalleştirilmiştir.



Şekil 3.2 : Seçilen sismik kesitte, Plot Digitizer programı kullanılarak dijitalleştirilmiş katman örneği.

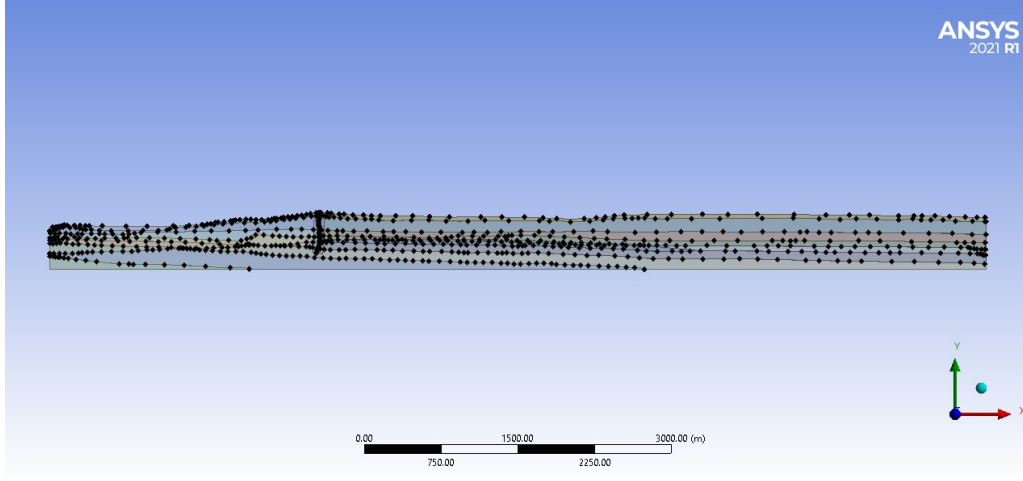
Öncelikli olarak modellenmek üzere seçilen sismik kesitin derinlik (m) değer aralığı 700-1300 metre arasındayken, uzaklık (m) değeri ise sağ alt köşesinde yer alan 1 km'lik ölçek kullanılarak 9155 m olarak hesaplanmıştır.

X (m) ve Y (m) koordinatları kalibre edildikten sonra, sismik kesidin tam modelini oluşturmak için fay dahil olmak üzere 13 katman dijitalleştirilmiş ve 19 ayrı yüzey oluşmuştur (Şekil 3.2) .

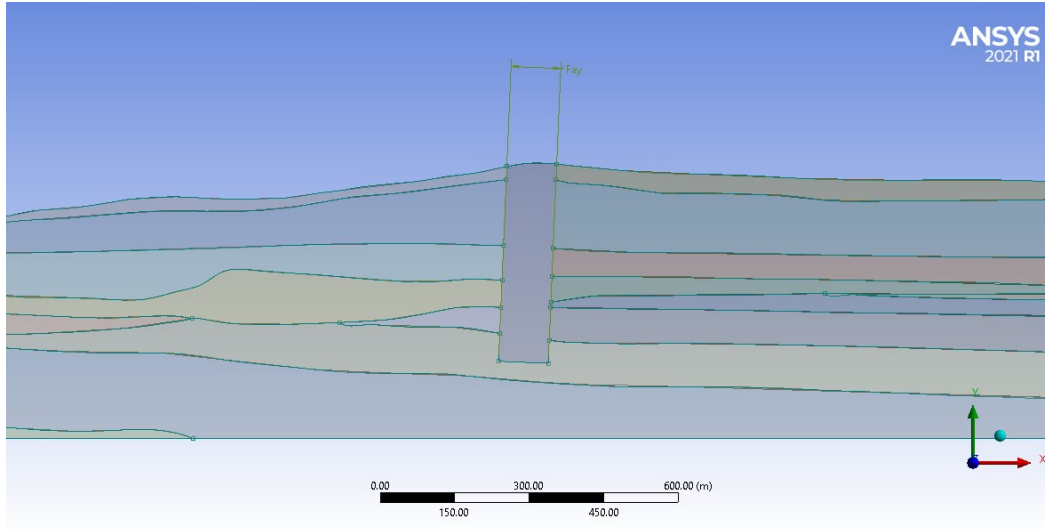
Her bir katmana ait dijitalleştirilen koordinat noktaları ayrı bir .csv dosyası olarak kaydedilir. ANSYS Fluent yazılımında geometrinin doğru şekilde işlenebilmesi için gerekli düzenlemeler yapılır ve dosya .txt formatına dönüştürülür.

3.3 Geometri Yaratma

Geometriyi oluşturma adımı, ANSYS Fluent ortamındaki Design Modeler aracında çizim yapmayı içermektedir. Dijitalleştirilmiş her bir veri noktası programa aktarılır (Şekil 3.3) ve geometri oluşturma sürecine başlanır. Fay bölgesi için, diğer kısımlardan ayrı olarak bir zon oluşturulur ve bu fay zonunun kalınlığı, modelin uzunluğuna uygun şekilde 100 m olarak atanmıştır (Şekil 3.4).

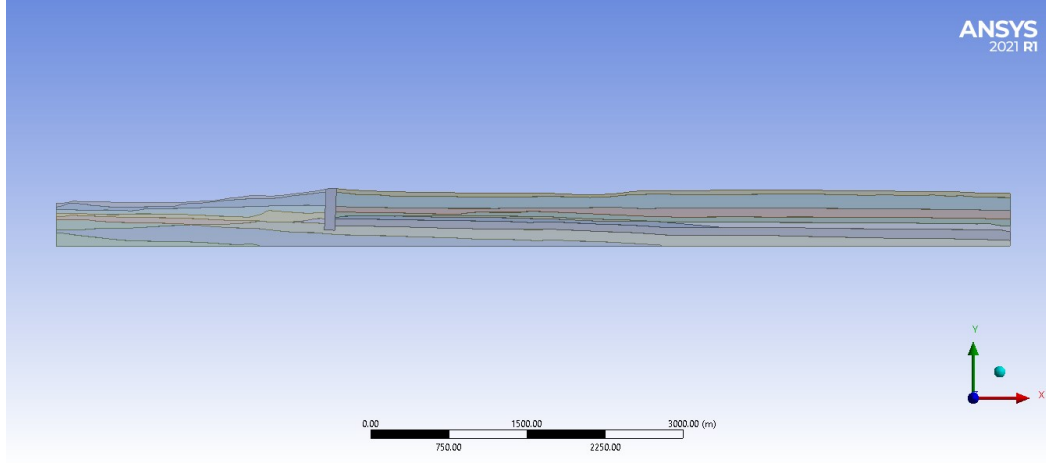


Şekil 3.3 : Dijitalleştirilmiş veri noktalarının Design Modeler arayüzündeki görüntüsü.



Şekil 3.4 : Modellenen kesitte fayın Design Modeler arayüzünde yakın görüntüsü.

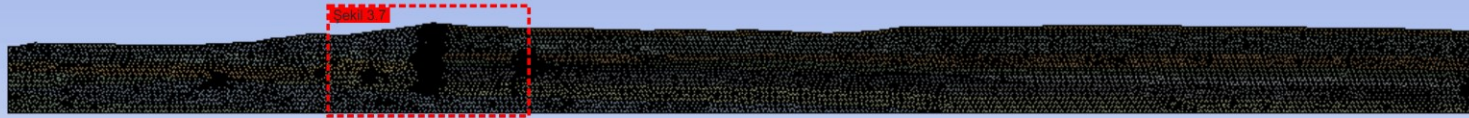
Aktarılan her bir veri noktası ve fay zonu, spline aracı kullanılarak birleştirilir. Bir sonraki adım ise, DesignModeler sekmesindeki *Surfaces from Sketches* seçeneği kullanılarak sismik kesit gövdesi oluşturulmasıdır (Şekil 3.5).



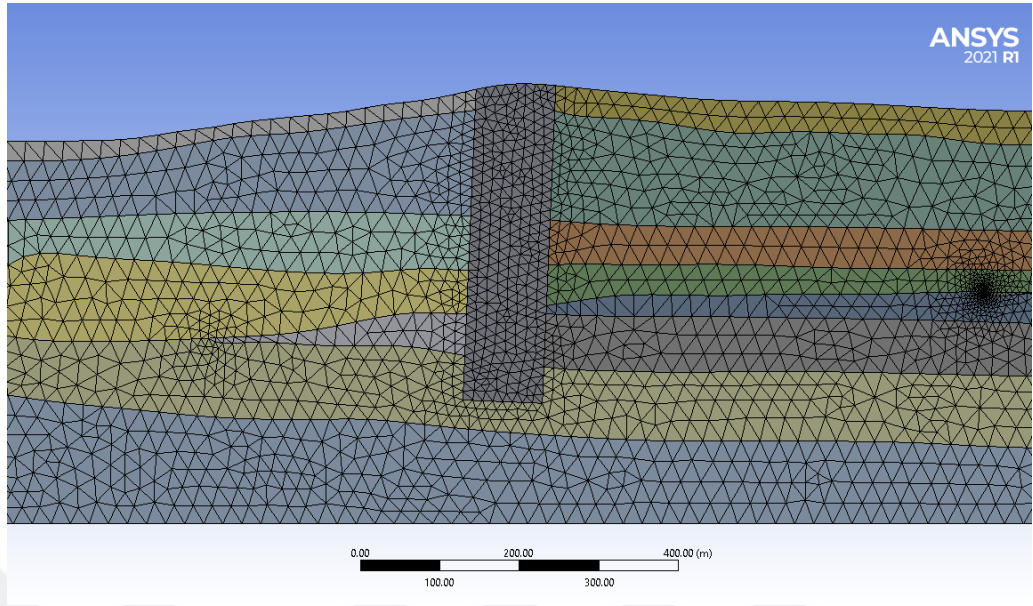
Şekil 3.5 : Design Modeller arayüzünde oluşturulan sismik kesit simülasyonu.

3.4 Ağ Yapısı Oluşturma

Model geometrisi oluşturulduktan sonra, kurulum bölümündeki bir diğer ana adım, sistemin ayrıklaştırılması (meshing) işlemidir. Şekil 3.6’da görüldüğü üzere modelin en uç ve karmaşık bölgelerini dahi eksiksiz şekilde kapsayabilmesi amacıyla, ayrıklaştırma işlemi sırasında üçgen ağ yapısı tercih edilmiştir. Modellenmek istenen denizel sedimanların sahip olduğu heterojen yapı dikkate alındığında, üçgen ağ yapısının her türlü düzensizliği ve detaylı geometriyi başarılı şekilde temsil edebildiği ve modelin genel doğruluğunu artırdığı görülmüştür.



Şekil 3.6 : Tüm modelin ağ yapısı görüntüsü.



Şekil 3.7 : Fay bölgesinin ağ yapısının yakın görüntüsü.

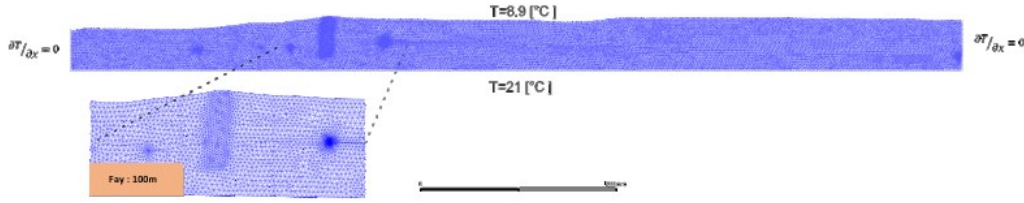
Fay içerisindeki akışların daha ayrıntılı gözlemlenebilmesi amacıyla, Şekil 3.7’de görüldüğü üzere fay bölgesinde daha küçük (12 m), faydan uzaklaştıkça ise daha geniş (24 m) üçgen ağ elemanları tercih edilmiştir. Bu yaklaşım sayesinde sayısal çözümün hem stabilitesi hem de hızı optimum seviyede sağlanmıştır. Modellerde kullanılan üçgen eleman (hücre) ve düğüm noktası sayıları Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Modelin üçgen ağ elemanlarının (hücrelerin) ve düğüm noktalarının sayısı.

	Üçgen Eleman (Hücre)	Düğüm Noktası
Model ağ bilgileri	19314	10064

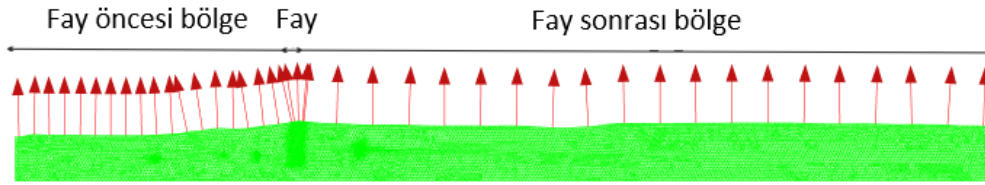
3.5 Sınır Koşulları

Hesaplama işlemlerine başlamadan önce programa sınır koşulları tanımlanmıştır. Modelin yan duvarları, ısı ve madde geçişine izin verilmeyen yalıtımlı duvarlar olarak kabul edilmiştir. Deniz tabanı ve model tabanı ise izotermal denge koşulunda tanımlanmış, yani sıcaklık sabit tutulmuştur. Riboulot ve diğ., (2018) tarafından belirtilen verilere göre bölgenin ortalama deniz tabanı sıcaklığı 8.9°C ve termal gradyan 24.9°C/km’dir. Bu doğrultuda oluşturduğumuz modelde deniz tabanı sıcaklık değerini 8.9°C, deniz tabanı seviyesinden ortalama 553 metre derinde olan model tabanı sıcaklığı ise 21°C olarak tanımlanmıştır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 : Modelin ağ yapısı(mesh) görüntüsü ve tanımlanan sınır koşulları. Şekil içinde fayın ağ görünümü (yakınlaştırılmış).

Tanımlanan bir diğer sınır koşulu, deniz tabanı hidrostatik basınç değeridir. Deniz tabanına yakın bölgelerde yapılan hidrostatik analizlerde, modelin deniz tabanının hemen altında başlaması durumunda, su kolonu basıncı değerinin hesaba katılması büyük önem taşır. Su kolonu basıncı, deniz tabanına dik bir şekilde etki eder ve sediman yapıları üzerinde ilave bir yük oluşturur. Bu basıncın doğru bir şekilde hesaplanarak modele eklenmesi, jeolojik katmanların ve gaz rezervlerinin gerçek basınç koşullarına uygun olarak analiz edilmesine olanak tanır.



Şekil 3.9 : Deniz tabanı üzerinde hidrostatik basınç değerleri tanımlanmış bölgeler.

Şekil 3.9’da görüldüğü üzere deniz tabanı batimetrisinin değişiminden dolayı model içerisinde 3 farklı hidrostatik basınç değeri tanımlanmıştır. Denklem 3.1 kullanılarak hidrostatik basınç değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanma sırasında deniz suyu yoğunluğu (ρ) 1025 g/m³ (Zander ve diğ., 2017) ve yer çekimi ivmesi (g) 9.81 m/s² olarak alınmıştır. Kullanılan derinlik (h (m)) değerleri ve hesaplanan hidrostatik basınç (P (Pa)) değerlerine Çizelge 3.2 ‘de yer verilmiştir.

$$P = \rho gh$$

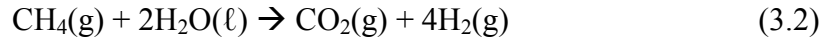
(3.1)

Çizelge 3.2 : Kullanılan derinlik değerlerine karşılık hesaplanan hidrostatik basınç değerleri.

	Kullanılan derinlik (m)	Hidrostatik basınç [Pa]
Fay öncesi bölge	887.83	8927310
Fay	742.5	7456313
Fay sonrası bölge	790.30	7946645

3.6 Kimyasal Reaksiyon

Model-1 için oluşturulan modelin kurulum aşamasındaki en önemli adım, sistem içinde bir kimyasal reaksiyon başlatmaktır. Bu uygulamanın temel amacı, gaz hidratlarla ilişkili serbest gazların (metan) serbest gaz tortusunda gerçekleşen kimyasal etkileşimlerini simüle etmektir. Metan tortusunun altında, serbest gaz tortusu adı verilen bir katman bulunmaktadır. Bu katman, metanın yeraltı suyu ile kimyasal etkileşime girdiği bir bölge olarak işlev görür. Katı gaz hidratlardan salınan metan, serbest gaz formunda bu tortuda birikir ve yeraltı suyuyla reaksiyona girer. Bu kimyasal reaksiyon, metanın su ile birleşmesi sonucunda karbondioksit (CO₂) ve hidrojen (H₂) gazlarının oluşumuna neden olur. Denklem 3.2’de bu kimyasal reaksiyon detaylandırılmış şekilde verilmiştir. Bu süreç, gaz hidratların doğal çevrimleri ve enerji potansiyelleri açısından kritik öneme sahiptir



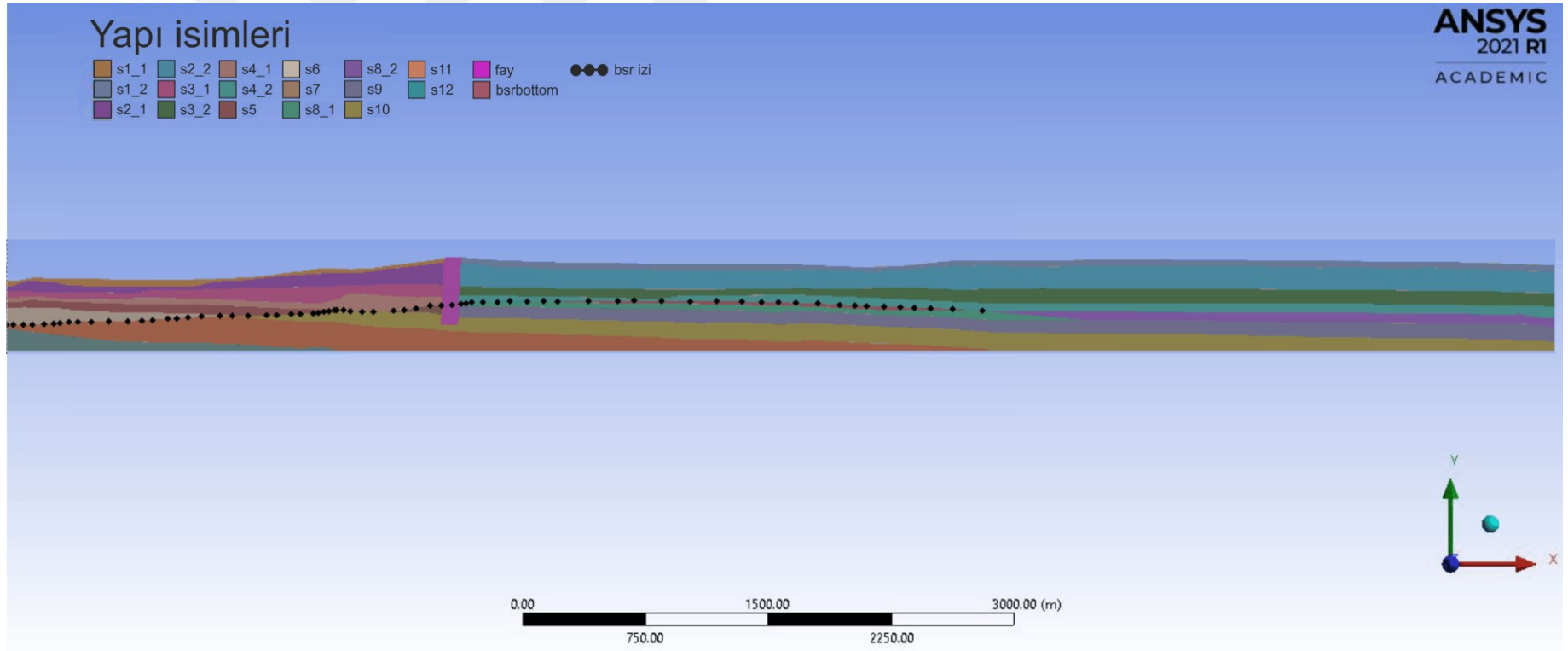
Reaksiyonda kullanılan tüm malzemeler ANSYS Fluent ortamında tanımlanmıştır. Çizelge 3.3’te Model-1 içerisinde kullanılan metan (CH₄), karbondioksit (CO₂) ve hidrojenin (H₂) belirli sıcaklık (K) değerlerindeki özgül ısılarına (Cp) yer verilmiştir. Suyu ait özgül ısı değerleri ise ANSYS Fluent tarafından atanmıştır.

Çizelge 3.3 : Belirli sıcaklık değerlerinde CH₄, CO₂ ve H₂ için tanımlanmış C_p değerleri.

Sıcaklık [K]	CH ₄ 'nin C _p değeri [J/(kg.K)]	CO ₂ 'nin C _p değeri [J/(kg.K)]	H ₂ 'nin C _p değeri [J/(kg .K)]
282.05	2201	826	14254
283.01	2203	827	14257
283.96	2204	828	14260
284.92	2206	829	14263
285.88	2208	830	14266
286.84	2210	831	14269
287.79	2212	832	14272
288.75	2213	833	14275
289.71	2215	834	14278
290.66	2217	835	14281
291.62	2219	836	14284
292.58	2221	837	14287
293.54	2222	839	14290
294.49	2224	840	14293
295.45	2226	841	14296

3.7 Kullanılan Fiziksel Parametreler

ANSYS Fluent ortamında malzemeleri tanımlanmasının ardından, bir sonraki önemli adım, her bir sedimana ait fiziksel parametrelerinin belirlemektir (Şekil 3.10). 2 modelde farklı fiziksel parametreler kullanılmıştır. Üretilen modellerde kullanılan her bir denizel sedimana ait fiziksel parametrelere bir sonraki kısımda yer verilmiştir.



Şekil 3.10 : Model içerisindeki tabakaların isimleri.

3.7.1 Model-1 için kullanılan fiziksel parametreler

Serbest gazın (metan) yeraltı suyu ile olan kimyasal etkileşimini incelemek amacıyla tasarlanmış olan Model-1 kapsamında kullanılan fiziksel parametre değerlerine Çizerge 3.4'te yer verilmiştir.

Çizelge 3.4 : Model-1 kapsamında her bir sediman için tanımlanan fiziksel parametreler.

Ortam	Geçirgenlik (m ²)	Gözeneklilik	Reaksiyon	Katı malzeme
Fay	1e-14	0.20		Ana kaya
s1_1	1e-15	0.36		Ana kaya
s1_2	1e-15	0.37		Ana kaya
s2_1	1e-15	0.36		Ana kaya
s2_2	1e-15	0.36		Ana kaya
s3_1	1e-15	0.35		Ana kaya
s3_2	1e-15	0.35		Ana kaya
s4_1	1e-15	0.35		Ana kaya
s4_2	1e-15	0.35		Ana kaya
s5	1e-15	0.34		Ana kaya
s6	1e-15	0.34		Ana kaya
s7	1e-15	0.34	✓	Ana kaya
s8_1	1e-15	0.34		Ana kaya
s8_2	1e-15	0.34		Ana kaya
s9	1e-15	0.33		Ana kaya
s10	1e-15	0.33		Ana kaya
s11	1e-15	0.33		Ana kaya
s12	1e-15	0.32		Ana kaya
bsrbottom	1e-15	0.35	✓	Ana kaya

Bölgede 60-140 metre derinliğe sahip denizel sedimanlar için ortalama gözeneklilik değeri 0.45 olarak belirtilmiştir (Riedel ve diğ., 2020). Fay harici sedimanlarda gözeneklilik, derinlikle azalan bir eğilim gösterecek şekilde, bölgenin ortalama gözeneklilik değerine uygun olarak atanmıştır. Fay zonlarının ise deformasyon süreçleri sırasında meydana gelen mekanik ve kimyasal değişimler nedeniyle düşük gözenekliliğe sahip olduğu bilinmektedir. Bu bağlamda, fay zonuna ait gözeneklilik değeri (0.20), çevredeki sedimanlara kıyasla daha düşük olacak şekilde seçilmiştir.

Caine ve diğ. (1996) çalışmasında fay zonlarının hasar zonlarında meydana gelen çatlak yoğunluğu nedeniyle çevre sedimanlara göre daha yüksek geçirgenliğe sahip olabileceğini belirtilmiştir. Bu bağlamda oluşturulan modelde fay (1e-14 m²) ve çevre sediman (1e-15 m²) geçirgenlik değerleri, bu bilimsel temele dayanılarak atanmıştır.

Ker ve diğ. (2019) çalışmasına göre, s7 ve bsrbottom bölgelerinde metanın kütle oranı 0.36 olarak belirlenmiştir. Bu değer, metanın serbest gazın bulunduğu sediman hacminin %36'sını oluşturduğunu göstermektedir. Bu bölgelerde, kimyasal reaksiyonların metan varlığına bağlı olarak gerçekleştiği varsayılmaktadır. Modelleme çalışmalarında, metanın bu bölgelerdeki yoğunluğunu temsil etmek amacıyla %36 oranında bir "Patch etkisi" uygulanmıştır. Patch yöntemi, reaksiyonların yalnızca belirli alanlarda sınırlı şekilde meydana gelmesini sağlamak amacıyla, bu konsantrasyon değerinin bölgesel olarak modele entegre edilmesini sağlamıştır. Bu yaklaşım, kimyasal reaksiyonların çevresel koşullara ve metan varlığının yoğunluğuna bağlı olarak modellenmesini mümkün kılmıştır.

Deniz tabanı altında yaygın olarak bulunan bazaltik kayalar, her bir katmanın katı malzemesi olarak modellemeye dahil edilerek jeolojik gerçekliğin doğru bir şekilde temsil edilmesi sağlanmıştır. Bazaltik kayalar, düşük gözeneklilik ve geçirgenlik özellikleri sayesinde, suyun ve diğer akışkanların derin yer altı seviyelerine sınırlı geçiş yapmasını simüle etmek için uygundur. Bu özellikler, modelin mekanik ve hidrojeolojik süreçleri doğru bir şekilde yansıtmaya olanak sağlar.

3.7.2 Model-2 için kullanılan fiziksel parametreler

Rezerv sedimanlarda gaz hidratın çimentolaştığı bir senaryonun incelendiği Model-2'de kullanılan fiziksel parametrelere Çizelge 3.5'te yer verilmiştir.

Çizelge 3.5 : Model-2 kapsamında her bir sediman için tanımlanan fiziksel parametreler.

	Geçirgenlik (m ²)	Gözeneklilik
Fay	1e-14	0.20
s1_1	1e-15	0.36
s1_2	1e-15	0.37
s2_1	1e-15	0.36
s2_2	1e-15	0.36
s3_1	1e-15	0.35
s3_2	1e-15	0.35
s4_1	1e-15	0.35
s4_2	1e-15	0.35
s5	1e-15	0.34
s6	1e-15	0.34
s7	1e-15	0.05
s8_1	1e-15	0.34
s8_2	1e-15	0.34
s9	1e-15	0.33
s10	1e-15	0.33
s11	1e-15	0.33
s12	1e-15	0.32
bsrbottom	1e-15	0.05

Bu modelde, Model-1’de olduğu gibi, fay çevre sedimanlara kıyasla yüksek geçirgenlik ($1e-14 \text{ m}^2$) değerine sahip ve düşük gözenekliliğe (0.20) sahip olacak şekilde değerler atanmıştır. Çevre sedimanların gözeneklilik değerleriyse (s7 ve bsrbottom hariç), derinlikle azalan bir eğilim gösterecek şekilde, bölgenin ortalama gözeneklilik değerine (0.45) uygun olarak atanmıştır. Bununla birlikte, Model-2’nin Model-1’den ayrılan en önemli özelliği, s7 ve bsrbottom bölgelerine çok düşük gözeneklilik (0.05) değerlerinin tanımlanmasıdır. Bu yaklaşım, gaz hidratın fiziksel çevresiyle olan etkileşimlerini modellemek ve bu bölgedeki gaz hidrat birikimlerinin daha ayrıntılı şekilde anlamak amacıyla tercih edilmiştir.

3.8 Hesaplanan Zaman Aralıkları

Kurulum adımları tamamlandıktan sonra, hesaplamalar zamana bağlı (transient) gerçekleştirilmiş ve belirli zaman dilimlerinde koşturulmuştur. Her bir zaman diliminde modellerin çözümü için zaman dilimi boyutu (saniye ve ya yıl) ve zaman adımı sayısı gibi parametreler tanımlanmıştır. Oluşturulan iki farklı modelde de, farklı zaman dilimlerinde koşturularak, zamana bağlı süreçlerin ayrıntılı bir şekilde incelenmesi hedeflenmiştir. Bu yaklaşım, her modelin dinamik süreçler üzerindeki etkisini ve zamanla değişen sistem davranışlarını daha net bir şekilde ortaya koymaktadır.

3.8.1 Model-1 için kullanılan zaman aralıkları

Çalışılan bölgedeki denizaltı sedimanlarında, serbest gaz tortularının yaklaşık %36’sının metan gazından oluştuğu bilinmektedir (Ker ve diğ., 2019). Bu kısıtlı metan kaynağı göz önünde bulundurulduğunda, modeldeki simülasyon süresi, metan kaynağının tükenmesiyle birlikte süreçlerin sona erdiği kısa bir zaman dilimiyle sınırlıdır. Model-1 için belirlenen maksimum zaman dilimi 60 dakikadır. Hesaplamalar, metanın kimyasal reaksiyonlarda bir reaksiyona giren olarak davranışını ve reaksiyon ürünlerinin dinamiklerini gözlemleme amacını taşımaktadır.

Çizelge 3.6 : Model-1’de kullanılan zaman adımları.

Zaman Dilimi Boyutu [saniye]	Zaman Adımı Sayısı	Zaman Aralığı [dakika]
60	1	1
60	3	3
60	5	5
60	20	20
60	60	60

Çizelge 3.6’da görüldüğü üzere Model-1 kapsamında, her biri 60 saniyelik zaman dilimine sahip 5 farklı senaryo çalıştırılmıştır. Bu senaryolarda, zaman adımı sayıları sırasıyla 1, 3, 5, 20 ve 60 olarak belirlenmiştir. Zaman adımı sayısı ile zaman dilimi büyüklüğü çarpıldığında elde edilen toplam zaman aralıkları sırasıyla 1 dakika, 3 dakika, 5 dakika, 20 dakika ve 60 dakika olarak hesaplanmıştır.

3.8.2 Model-2 için kullanılan zaman aralıkları

Zamansal olarak taşınım ve yayılım süreçlerinin dengelenmesi ve fiziksel süreçlerin tamamlanması için yeterli sürelerin sağlanması kritik öneme sahiptir. Özellikle büyük ölçekli ve heterojen yapıya sahip modeller, daha karmaşık fiziksel süreçleri doğru bir şekilde temsil edebilmek için daha uzun sürelerle çalıştırılmaktadır. Model-2’de bu yaklaşımla, taşınım, yayılım ve diğer dinamik süreçlerin tam olarak modellenmesi hedeflenmiş ve sistemin dengesine ulaşması sağlanmıştır. Bu nedenle Model-2 için daha uzun zaman aralıklarında hesaplamalar yapılmıştır. Böylelikle, gaz hidratların çevresel etkileşimleri, oluşum süreçleri ve uzun vadeli davranışlarına yönelik daha doğru ve güvenilir sonuçlar elde edilmesi amaçlanmıştır.

Çizelge 3.7 : Model-2’de kullanılan zaman adımları.

Zaman Dilimi Boyutu [yıl]	Zaman Adımı Sayısı	Zaman Aralığı [yıl]
100	2	200
100	5	500
100	10	1000
100	15	1500
100	27	2700

Çizelge 3.7’de görüldüğü üzere Model-2 kapsamında, her biri 100 yıllık zaman dilimine sahip 5 farklı senaryo çalıştırılmıştır. Bu senaryolarda, zaman adımı sayıları sırasıyla 2, 5, 10, 15 ve 27 olarak belirlenmiştir. Zaman adımı sayısı ile zaman dilimi büyüklüğü çarpıldığında elde edilen toplam zaman aralıkları sırasıyla 200 yıl, 500 yıl, 1000 yıl, 1500 yıl ve 2700 yıl olarak hesaplanmıştır. Model, 2700 yılından sonra kararlı hale ulaşarak zamandan bağımsız duruma geçmiştir.



4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

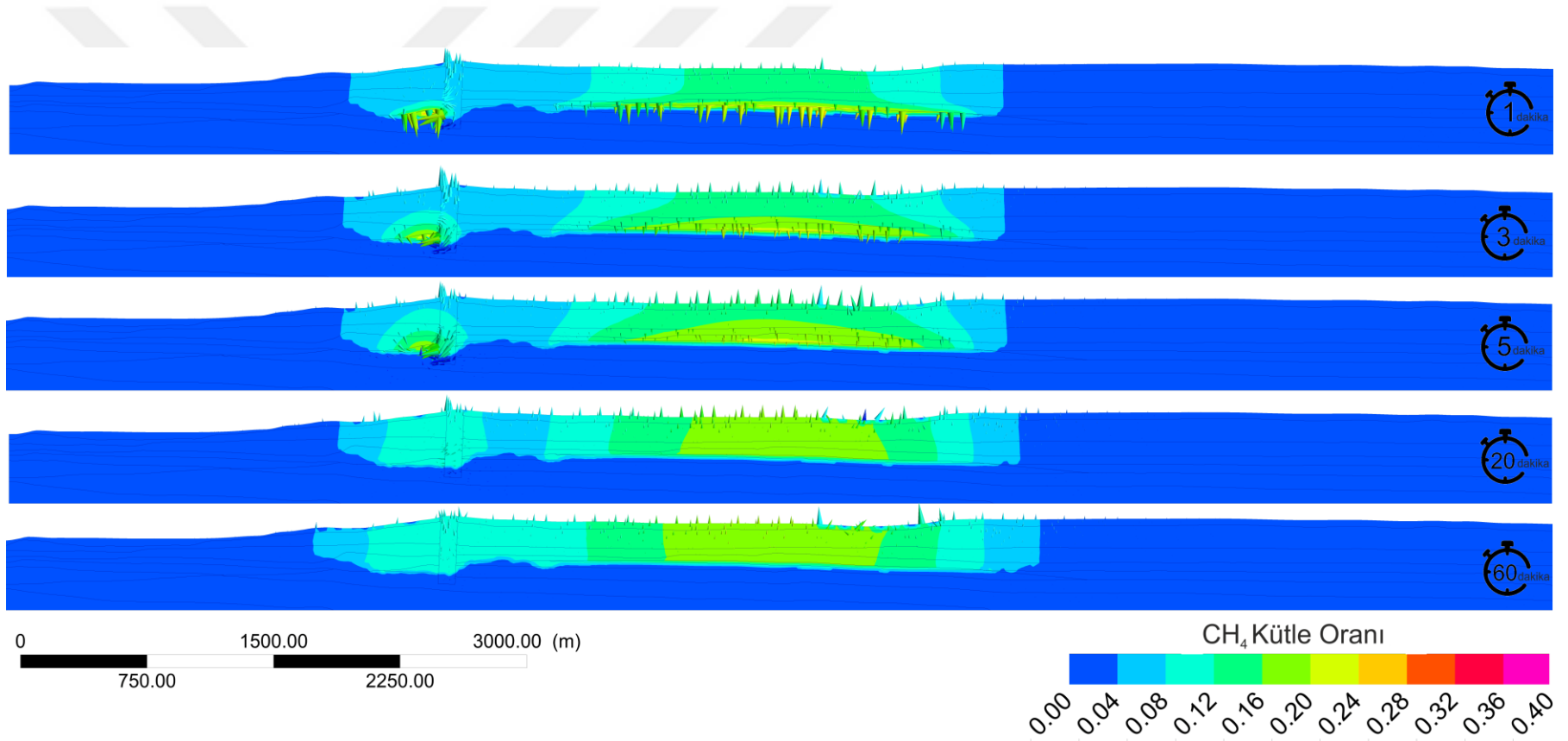
4.1 Sonuçlar

4.1.1 Model-1 sonuçları

4.1.1.1 Metan (CH₄) kütle oranı değişimleri

Şekil 4.1’de yer alan modeller 1 dakikadan 60 dakikaya kadar olan zaman dilimlerinde CH₄ kütle oranı dağılımı ve gaz hidrat kararlılık zonundaki metan gazının yayılım süreçlerini ayrıntılı bir şekilde ortaya koymaktadır.

Modellerde başlangıç metan kütle oranı 0.36 olarak kabul edilmiştir. 1 dakikalık zaman diliminde metan gazının, model sınırları içerisindeki varlığı oldukça sınırlı bir alanda gözlemlenmektedir. Dağılım 0.00-0.24 aralığında değişen düşük metan kütle oranı değerlerine sahiptir ve bu durum metanın ilk andan itibaren hızla tükenmeye başladığını göstermektedir. 3. dakikada metan gazının daha geniş bir alana yayıldığı ve kısmi olarak üst bölgelere doğru hareket ettiği görülmektedir. Bu, metan gazının çevre sedimanlara nüfuz etmeye başladığını göstermektedir. 5 dakikalık zaman diliminde metan gazının kütle oranında belirgin bir artış olduğu ve dağılımın daha geniş bir alana yayıldığı gözlemlenmiştir. Metan gazı homojen bir şekilde hem yatay hem de dikey doğrultuda yayılmaktadır. Benzer şekilde, 20 dakikalık zaman diliminde metan gazı daha da geniş bir alanı kaplamakta ve fay boyunca yüksek kütle oranı değerleri çevre sedimanlara yayılmaktadır. Ancak s7 ve bsrbottom bölgelerinde belirlenmiş olan 0.36 metan kütle oranı, 20. dakikadan itibaren s7 bölgesinde etkisini kaybetmiş ancak bsrbottom bölgesinde etkisi hale görülmektedir. 60. dakikada model içerisindeki metan kütle oranı 0.00-0.20 aralığına düşmüştür. Metan kütle oranındaki bu azalma, serbest gaz sedimanında gerçekleşen kimyasal reaksiyon sonucu metanın tükendiğini göstermektedir. Modellerde taşınım hücreleri gözlemlenmemiştir; bu durum, yayılımın baskın olduğu bir sistemi ifade etmektedir.

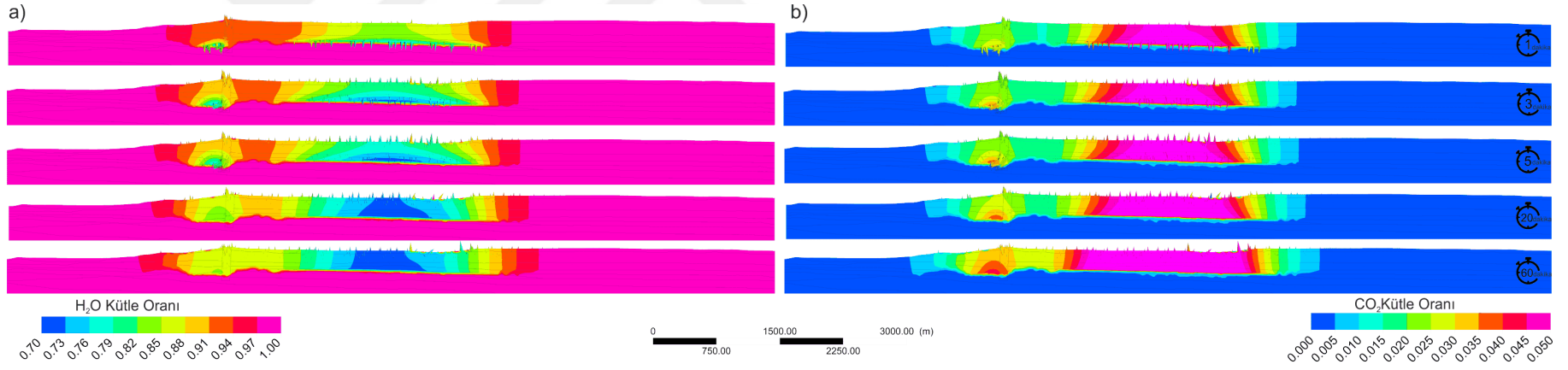


Şekil 4.1 : 1-3-5-20-60 dakikalık zaman aralıklarında metan (CH₄) gazınının kütle oranının değişimi.

Modeldeki fay zonu varlığının akış dağılımına etkisi zaman adımları ilerledikçe daha belirgin hale gelmektedir (5 dakikalık model). Başlangıç durumu olan 1. dakikada fay boyunca belirgin bir gaz yayılımı gözlemlenmemektedir. Gazın büyük kısmı, kimyasal reaksiyonun olduğu bölgelerle sınırlıdır (s7 ve bsrbottom). Yayılım başlangıcı olan 3. dakikada metan, yüksek geçirgenliğe sahip faydan yukarı doğru hareket etmeye başlamıştır ancak henüz çevre sedimanlara yaygın bir etki göstermemiştir. 5. dakikada fay, gaz yayılımı için belirgin bir kanal haline gelmiştir. Metan fay boyunca dikey olarak hareket etmekte ve üst katmanlara nüfuz ederek hızla tükenmektedir. Maksimum fay etkisinin görüldüğü 20. dakikada fay yüksek geçirgenliği nedeniyle, benzer şekilde metan gazını çevre sedimanlara etkili bir şekilde taşımış ve geniş bir alana yayılmıştır. Bu nedenle fay çevresinde daha yüksek gaz konsantrasyonu gözlemlenmiştir. 60. dakikada fay boyunca yayılım durma noktasına gelmiştir. Ancak bsrbottom bölgesinde belirlenmiş olan 0.36 metan konsantrasyonu etkisini hala göstermektedir. Bu durum model içerisinde gaz yayılımı için fayın bir kanal görevi gördüğü düşüncesini desteklemektedir.

4.1.1.2 Su (H₂O) ve karbondioksit (CO₂) kütle oranı değişimleri

Şekil 4.2a'da kimyasal reaksiyon sonucu suyun (H₂O) kütle oranı üzerindeki değişimi gözlemlenmektedir. H₂O reaksiyonda bir tepkime gireni olarak tüketilmektedir ve kütle oranı 0.76-1.00 değer aralığında değişmektedir. Reaksiyon başlangıcından itibaren kütle oranı, özellikle fay boyunca ve reaksiyonun yoğunlaştığı bölgelerde azalma eğilimi göstermektedir. Modelin ilk dakikasında, H₂O kütle oranı 0.82-1.00 değer aralığında olup sediman içerisinde homojen bir dağılım göstermektedir. Reaksiyon henüz başlangıç aşamasında olduğu için suyun tüketimi oldukça sınırlıdır. Fay boyunca belirgin bir değişim gözlenmemektedir. Reaksiyonun ilerlemesiyle 3. ve 5. dakikalarda faya yakın bölgelerde H₂O tüketimi başlamış ve kütle oranı giderek azalmaktadır. 20. dakikada H₂O kütle oranında yaygın bir azalma gözlemlenmektedir. Modelin son aşamasında kütle oranı 0.70-1.00 aralığına kadar düşmüş olup, bu azalma reaksiyon başlangıç noktalarında (s7 ve bsrbottom) daha belirgindir. Fay zonuna yakın olan s7 bölgesinde, bsrbottom bölgesine kıyasla daha hızlı tükenmiştir. 60. dakikaya kadar çevre sedimanlarda H₂O kütle oranı değerleri belirgin şekilde azalmaktadır.



Şekil 4.2 : 1-3-4-20-60 dakikalık zaman aralıklarında a) suyun (H_2O) ve b) karbondioksitin (CO_2) kütle oran değişimi.

Şekil 4.2.b’de, kimyasal reaksiyonun ilk andan itibaren başladığını, reaksiyon sonucunda karbondioksit (CO_2) üretiminin gerçekleştiğini ve kütle oranı değerlerinin ise 0.005 ile 0.05 aralığında değiştiğini ortaya koymaktadır. 1., 3. ve 5. dakikalarda CO_2 üretimi sınırlı bir alanda gerçekleşmekte ve model içerisindeki baskın kütle oranı dağılımı 0.02-0.05 aralığında kalmaktadır. Reaksiyon ilerlemesiyle birlikte, kimyasal reaksiyon başlangıç noktaları olan s7 ve bsrbottom bölgelerinde karbondioksit oluşumu gözlemlenirken, aynı zamanda metanın yeraltı suyu ile daha hızlı temas ettiği fay boyunca kütle oranı değeri hızla artmaktadır. Modelin son aşaması 60. dakikada model içersinden baskın kütle oranı dağılımı 0.03-0.05 gibi daha yüksek değer aralığında değişmektedir.

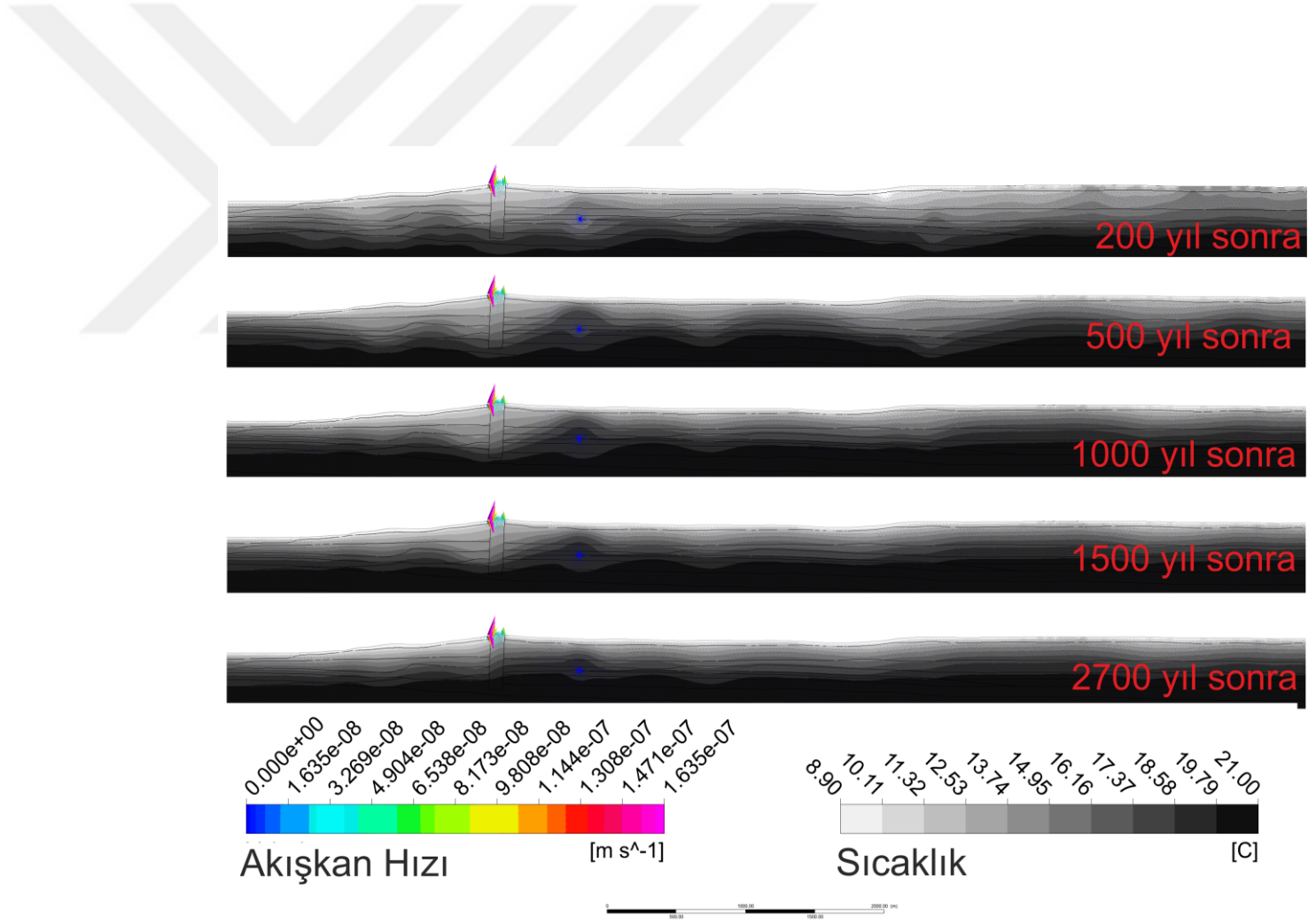
Simülasyonlarda gözlemlenen H_2O ve CO_2 kütle oranlarındaki değişimler, kimyasal reaksiyonun dinamiklerini beklenen şekilde yansıtmaktadır. Reaksiyon denkleminde göre CH_4 ve H_2O tepkimeye giren olarak tüketilirken, CO_2 ve H_2 ürün olarak üretilmektedir. Tepkime ürünleri olan hidrojen (H_2) ve karbondioksit (CO_2) benzer kütle oran dağılımları gösterdiklerinden dolayı bu tez çalışması kapsamında sadece CO_2 kütle oranı modellerine yer verilmiştir. Model sonuçları H_2O ’nun özellikle fay boyunca ve reaksiyonun yoğunlaştığı bölgelerde belirgin bir şekilde azaldığını, CO_2 ’nin ise reaksiyonun başlangıç noktalarında üretilerek yatayda paketler halinde yayıldığını ve fay boyunca biriktiğini göstermektedir. Özellikle H_2O ’nun kütle oranında gözlenen azalma ve CO_2 ’nin kütle oranındaki artış reaksiyonun ilerlemesiyle tutarlı bir şekilde gerçekleşmektedir. Bu durum, modellerin kimyasal reaksiyonun teorik beklentilerine uygun bir şekilde işlediğini göstermektedir. Üretmiş olduğumuz Model-1, metanın çözünme ve yayılma davranışını ile CO_2 ’nin oluşum ve dağılımını açıklamada ilk adımda faydalı bilgiler sunsa da, metanı üreten bir kaynağı içermemektedir. Oysa gerçek koşullarda metanın sürekli olarak mevcut olduğu ve bu durumun basınç koşullarını doğrudan etkileyebileceği bilinmektedir. Bu nedenle, uzun vadeli yayılım modelleri oluşturulurken yüksek konsantrasyonlu metan kaynağının sisteme dahil edilmesi gereklidir. Yüksek konsantrasyonlu metan varlığının, gözenekli ortamlarda çimentolaşma etkisiyle düşük gözenekliliğe sahip alanlar oluşturduğu bilinmektedir (Zerpa ve Koh, 2015). Bu etkiler göz önüne alınarak, Model-2 tasarlanmıştır.

4.1.2 Model-2 sonuçları

Şekil 4.3'te Model-2 sonuçlarına yer verilmiştir. Bu model kapsamında kimyasal tepkime oluşturulmadan, gaz hidratın fiziksel parametrelerinin model üzerindeki etkisi incelenmiştir. Gaz hidrat içeren sedimanların gözeneklilik değeri (0.05), civar kayalarla göre çok daha düşük olarak kabul edilmiştir. Bu durumda, gaz hidratın bu bölgede çimentolaşarak fiziksel olarak daha kararlı hale geldiği ve akışkan akışını zorlaştırdığı varsayılmıştır. Ayrıca bu modelde, fayın geçirimsizlik değeri ($1e-14 \text{ m}^2$) civar kayaların geçirimsizlik değerlerine kıyasla ($1e-15 \text{ m}^2$) yüksek olarak belirlenmiş ve fayın modele etkisi değerlendirilmiştir. Model 100 yıl zaman adımlarıyla, 200 yıl, 500 yıl, 1000 yıl, 1500 yıl ve 2700 yıl koşturulmuştur.

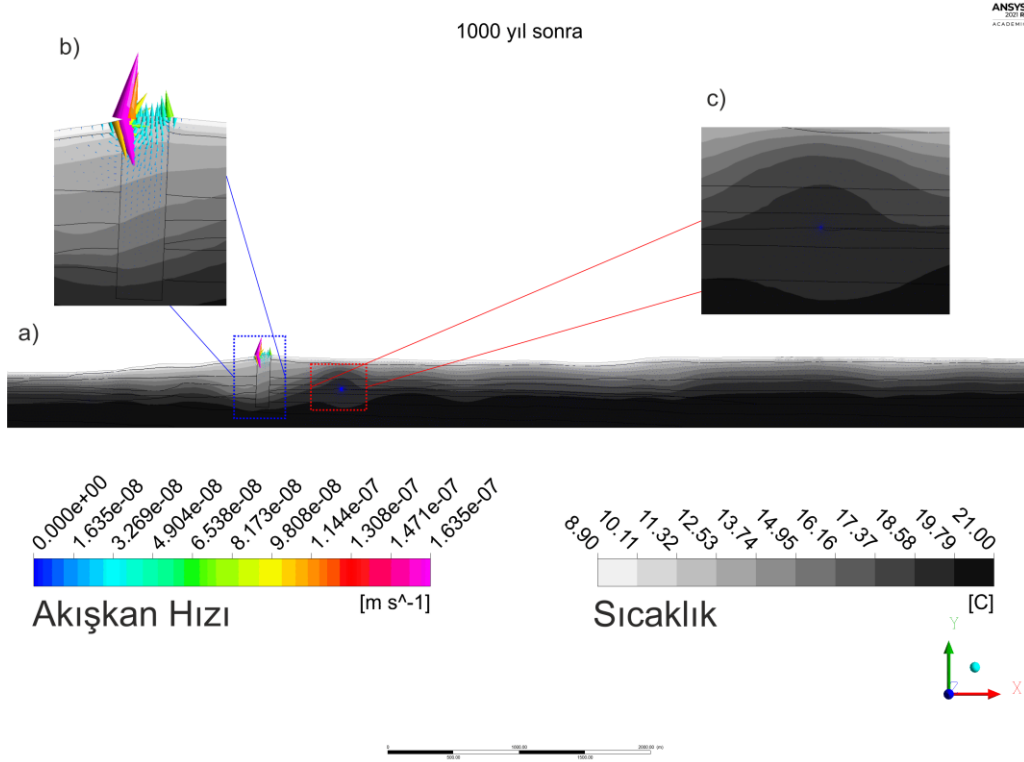
Hesaplama yapılan tüm zamanlara ait modellerde akışkan hızının en yüksek olduğu bölge fay bölgesidir. Model içerisindeki en yüksek $1.63e-07 \text{ (ms}^{-1}\text{)}$ akışkan hızı değeri bu bölgede gözlemlenmektedir. Bunun temel sebebi çevre sedimanlara göre fayın daha yüksek geçirgenlik değerine sahip olmasıdır. Yüksek geçirimsizlik değeri akışkanın hareketini engelleyen faktörleri azaltarak, fay boyunca daha hızlı ilerlemesine olanak tanır. Özellikle, fayın deniz tabanı ile kesişen bölgelerinde en yüksek hız değerleri gözlemlenmektedir. Faylı bölgedeki yüksek hızlı akışkan akışının bir diğer destekleyici nedeniyse fayın bulunduğu kısmın model içerisindeki en düşük hidrostatik basınç değerine sahip olduğu bölge olmasıdır. Bu düşük basınç, akışkanın hareketini fay boyunca daha da hızlandırmaktadır. Basınç farkı, akışkanın fay boyunca hızla hareket etmesine yol açarken, deniz tabanı ile kesişim bölgesinde akışkanın yükselmesini daha da kolaylaştırır ve bu bölgede en yüksek hız değerlerin gözlemlenmesine neden olur. Tüm bu etmenlerin akışkan akışını etkilediğini ve model genelinde fayın akışkanlar için bir kanal görevi gördüğünü söylemek mümkündür.

Modellerde, zamana bağlı sıcaklık değişimi değerlendirildiğinde, akışkanın fay boyunca yukarıya doğru sıcak akışkan taşıırken, çevredeki soğuk akışkan da aşağıya doğru taşıdığını söylemek mümkündür (Şekil 4.4b). Bu, konveksiyonun tipik bir özelliğidir. Konveksiyon nedeniyle, sıcak akışkanlar yükselirken soğuk akışkanlar daha derinlere iner, bu da derinlerdeki sıcaklık birikimini azaltarak fay hattındaki sıcaklık artışını yavaşlatır. Bu mekanizma, fay bölgesinde ısının daha homojen bir şekilde dağılmasına ve çevreye kıyasla daha geç ısınmasına neden olur.



Şekil 4.3 : 200-500-1000-1500-2700 yıllık zaman aralıklarında akışkan akış ve sıcaklık akışının zamana bağlı değişimleri.

Benzer şekilde, s7 ve bsrbottom bölgelerindeki düşük gözeneklilik değerlerinin modele etkisi, tüm simülasyon zamanları boyunca çevre kayalara kıyasla daha geç ısınma şeklinde gözlemlenmiştir. Gözeneklerde biriken gaz hidratlar, çimentolaşma etkisiyle bulundukları sedimanı daha da geçirimsiz hale getirir. Bu durum, hem ısı transferini hem de sıvı ve gazların hareketini kısıtlayarak çevre sedimanlara kıyasla daha geç ısınmaya yol açar.



Şekil 4.4 : (a) 1000 yıllık zaman adımında hesaplanan modelin sonucu. (b) Faylı bölgedeki akışkan akış hızları dağılımının yakın görüntüsü. (c) Fay sonrası bölgedeki akışkan akış hızları dağılımının yakın görüntüsü.

Hesaplanan tüm zaman dilimlerinde fay sonrası bölgede (Şekil 4.4c) düşük hızların yoğunlaştığı bir alan gözlemlenmiştir. Şekil 4.4'te örnek olarak 1000 yıl sonrası modelinin incelendiği bu alanın oluşmasının nedeni, “bsrbottom” olarak adlandırılan sedimana atanmış olan düşük gözeneklilik (0.05) değerinin, çevre sedimanlarla yaratmış olduğu gözeneklilik farkı ve bu bölgenin sahip olduğu geometrik etkidir. Gözeneklilik farkı, ısı ve akışkanın birikim alanlarını etkiler. Daha düşük gözenekliliğe sahip bölgelerde hareket kısıtlanırken, daha yüksek gözenekli bölgelerde akış serbest hale gelir. Bu fark sıcak akışkanın yükselmesine ve soğuk akışkanın aşağı doğru hareket etmesine yol açarak konveksiyon hücresinin oluşmasına neden olur. Benzer şekilde geometrinin değişimi akışkan hızını ve

yönünü etkiler. Düşük hız vektörlerinin yoğunlaştığı bölge (Şekil 4.4c) akışkanın sıkışması, sıcaklık farklarını büyütür ve konveksiyon oluşmasını kolaylaştırır. Gözeneklilik farkı ve geometri etkisiyle oluşan bu konveksiyon hücreleri akışkan ve sıcaklık akışını şekillendirerek bölgenin ısınma hızını artırır ve konveksiyonun hakim bir ısı transfer mekanizması haline gelmesini sağlar.

4.2 Tartışma

Bu çalışmada, üretilmiş olan ilk modelde; gaz hidratlardan salınan metanın serbest gaz tortusunda yeraltı suyuyla kimyasal etkileşimi incelenmiş ve bu süreçlerin metanın yayılım ve reaksiyon dinamiklerine olan etkisini ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmiştir. Modellerden elde edilen bulgular, metanın (CH_4) serbest gaz tortusunda su (H_2O) ile reaksiyona girerek karbondioksit (CO_2) gazını oluşturduğunu ve bu süreçlerin zamanla hem gazların hem de suyun kütle oranlarında belirgin değişimlere yol açtığını ortaya koymuştur.

1 dakikadan 60 dakikaya kadar yapılan simülasyonlarda metanın yayılımının baskın olduğu, reaksiyon başlangıcında metanın hızla tükendiği ve kimyasal dönüşüm sürecinin çevre sedimanlara yayıldığı gözlemlenmiştir. Fay yapısının, metan gazının yukarı yayılımında ve reaksiyon ürünlerinin dağılımında belirleyici bir kanal görevi gördüğü saptanmıştır (Cartwright, 1994; Faulkner ve diğ., 2010; Leifer ve diğ., 2004; Gay et al., 2007). Riboulot ve diğ., (2017) çalışma bölgesine yakın alanlarda 1400'den gaz çıkışı tespit etmiştir. Ürettiğimiz model, metan gazının faylı bölgelerde yoğunlaşarak bu alanlardan modelden uzaklaştığını ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, deniz tabanında gaz çıkışlarının gözlemlenme olasılığı bulunmaktadır.

H_2O 'nun tepkime sırasında tüketildiği ve özellikle fay çevresinde belirgin bir azalma gösterdiği tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra, CO_2 'nin tepkimenin ilerlemesiyle reaksiyonun başlangıç noktalarında üretilerek yatayda ve dikeyde yayıldığı ve fay boyunca yoğunlaştığı belirlenmiştir.

Bu modelin sonuçları, gaz hidrat çözünmesi ve metan yayılım süreçlerini anlamak için önemli bir temel oluşturmuş ve özellikle yeraltı suyu ile gaz tortusu arasındaki karmaşık kimyasal etkileşimleri enerji ve çevresel etkileri üzerindeki rolünü ortaya koymuştur. Metanın yayılımı ve olası gaz çıkışı noktalarının belirlenmesi, hem enerji potansiyellerinin değerlendirilmesi hem de sera gazı etkilerinin daha iyi anlaşılması

açısından büyük önem taşımaktadır. Gelecekteki çalışmalarda, daha ayrıntılı saha verilerinin simülasyon modellerine entegre edilmesi, reaksiyonların gerçek saha koşullarına uygun bir şekilde modellenmesine olanak sağlayarak elde edilen bulguların doğruluğunu artıracaktır.

Bu çalışmada üretilmiş olan ikinci model, gaz hidratların fiziksel özelliklerinin çevre sedimanlar üzerindeki etkilerini anlamak amacıyla tasarlanmıştır. Çalışma kapsamında, serbest gazın bulunmadığı ve gaz hidratın sediman içerisinde çimentolaşma etkisi gösterdiği bir senaryo ele alınmıştır. Elde edilen sonuçlar, gaz hidratın fiziksel parametrelerinin ve fay varlığının bölgesel hidrojeolojik ve termal süreçler üzerindeki belirgin etkilerini ortaya koymuştur.

Model sonuçları, fayın sahip olduğu yüksek geçirgenlik değerinin ve düşük hidrostatik basıncının değerinin, akışkan akışını kolaylaştıran bir kanal görevi görmesine neden olduğunu ortaya koymuştur. Bu sonuçlar fayların yer altındaki sıcaklık ve akışkan akışını kontrol edebilecek (Gudmundsson, 2000; McKenna ve Blackwell, 2004; Simms ve Garven, 2004; Cherubini ve diğ., 2013; Loreto ve diğ., 2019) yapılar oldukları düşüncesini destekler niteliktedir.

Modelde, düşük gözenekliliğe sahip sedimanların, gaz hidratın çimentolaşma etkisiyle geçirimsiz hale geldiğini ve bu durumun akışkan akışı ve sıcaklık akışı hareketlerini kısıtladığı belirlenmiştir. Bu düşük gözeneklilik alanları ile çevre sedimanlar arasında oluşan gözeneklilik farkı ve geometrik etkilerin, konveksiyon hücrelerinin oluşumunu desteklediği ve bu hücrelerin bölgedeki sıcaklık ve akışkan akışını şekillendiren temel mekanizmalar olduğunu ortaya çıkmıştır.

Sonuç olarak, ikinci model kapsamında üretilmiş olan modeller, gaz hidratların fiziksel etkilerinin, sediman özelliklerini ve termal-hidrolojik süreçleri nasıl etkilediğini anlamak için önemli veriler sağlamıştır.

Her iki modelden elde edilen sonuçlar, gaz hidratların enerji potansiyeli ve çevresel risklerinin değerlendirilmesine yönelik yeni simülasyonların oluşturulmasına katkıda bulunabilir. Gazın yükselmesine olanak sağlayacak noktaların konumlanmasına dair öngörülerde bulunmayı ve bu bölgelerde gazın birikimi, metan gazı üretimi ve çıkışına yönelik süreçlerin detaylı incelemesine zemin hazırlayabilir. Özellikle iklim değişikliği ve sera gazı salınımı gibi küresel sorunların modellenmesinde, gaz

hidratın kimyasal tepkimeleri ve fiziksel parametreleri uzun vadeli etkileri daha kapsamlı şekilde incelenebilir.





KAYNAKLAR

- Bohrmann, G., & Torres, M. E.** (2006). Gas hydrates in marine sediments. *In Marine geochemistry* (pp. 481-512). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Caine, J. S., Evans, J. P., & Forster, C. B.** (1996). Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, 24(11), 1025–1028. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1996\)024](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1996)024)
- Carroll, J. J.** (2003). *Natural Gas Hydrates: A Guide for Engineers*. Gulf Professional Publishing.
- Cartwright, J.** (1994). Episodic basin-wide fluid expulsion from geopressured shale sequences in the North Sea basin. *Geology*, 22(5), 447-450, doi:10.1130/0091-7613(1994)0222.3.CO;2.
- Cherubini, Y., Cacace, M., Blöcher, G., & Scheck-Wenderoth, M.** (2013). Impact of single inclined faults on the fluid flow and heat transport: Results from 3-D finite element simulations. *Environmental Earth Sciences*, 70(8), 3603–3618. DOI: 10.1007/s12665-012-2212-z
- Constantinescu, A. M., Toucanne, S., Dennielou, B., Jorjy, S. J., Mulder, T., & Lericolais, G.** (2015). Evolution of the Danube deep-sea fan since the last glacial maximum: new insights into Black Sea water-level fluctuations. *Marine Geology*, 367, 50-68. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2015.05.007>.
- Demirbas, A.** (2010). *Methane Gas Hydrate (Green Energy and Technology)*. Springer Verlag London Limited.
- Dillon, W. P.** (2001). Gas hydrates in the ocean environment. *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, 473-486
- Dobrynin, VM., Korotaiev, Yu P. & Plyushev, DV.** (1981) Gas hydrate, a possible energy resource. In: Meyer RF, Oslen JC (eds) *Long-Term Energy Resources*. Pitman Publishing, Boston
- Düşünür Dogan, D., Ocakoğlu Gökaşan, N., Tinivella, U., Giustiniani, M, Turkdogan, S., Arık, S. & Altan, Z.** (2022). Modeling the time-dependent dissolution of Gas Hydrates in the South Shetland Islands, Antarctica.
- Düşünür Doğan, D., & Üner, S.** (2019). Numerical simulation of groundwater flow and temperature distribution in Aegean Coast of Turkey. *Journal of Earth System Science*, 128(6), 1-12
- Erçetin, E., & Doğan, D.** (2021). Deniz Tabanı Batimetrisinin Hidrotermal Dolaşım Üzerindeki Etkisinin Araştırılması: Lucky Strike Örneği. *İstanbul Yerbilimleri Dergisi*, 2021 (1), 1-10

- Faulkner, D. R., Jackson, C. A. L., Lunn, R. J., Schlische, R. W., Shipton, Z. K., Wibberley, C. A. J., & Withjack, M. O.** (2010). A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones. *Journal of Structural Geology*, 32(11), 1557-1575.
- Finetti, I., Bricchi, G., Del Ben, A., Pipan, M., & Xuan, Z.** (1988). Geophysical study of the Black Sea, *Bolletino Di Geofisica Teorika Ed Applicata*, 30, 197–324.
- Fu, B., Jiang, Y., Chen, G., Lu, M., Lai, Y., Suo, X., & Li, B.** (2024). Unraveling the dynamics of atmospheric methane: the impact of anthropogenic and natural emissions. *Environmental Research Letters*, 19(6), 064001.
- Gay, A., Lopez, M., Berndt, C., and Séranne, M.** (2007). Geological controls on focused fluid flow associated with seafloor seeps in the Lower Congo Basin. *Marine Geology*, 244(1-4), 68-92, doi:10.1016/j.margeo.2007.06.003.
- Giavarini, C., & Hester, K.** (2011). *Gas hydrates: Immense energy potential and environmental challenges*. Springer Science & Business Media.
- Gudmundsson, A.** (2000). Active fault zones and groundwater flow. *Geophysical Research Letters*, 27(18), 2993–2996. DOI: 10.1029/1999GL011266
- Güvem B., Orta D., Üzümlü Y., & Doğan D.** (2023) Jeotermal Sahalarda Fayların Eğiminin Ve Permeabilite Kontrastının Sıcaklık Ve Akış Dağılımına Etkisinin Sayısal Modellenmesi. *Yerbilimleri*, 44(3) 234–249.
- Haacke, R. R., Westbrook, G. K., & Hyndman, R. D.** (2007). Gas hydrate, fluid flow and free gas: Formation of the bottom-simulating reflector. *Earth and Planetary Science Letters*, 261(3-4), 407-420
- Harvey, L. D., & Huang, Z.** (1995). Evaluation of the potential impact of methane clathrate destabilization on future global warming. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 100(D2), 2905-2926.
- Ker, S., Thomas, Y., Riboulot, V., Sultan, N., Bernard, C., Scalabrin, C., Ion, G., & Marsset, B.** (2019). Anomalously deep BSR related to a transient state of the gas hydrate system in the western Black Sea. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20(1), 442-459
- Kvenvolden, K. A.** (1988). Methane hydrate-a major reservoir of carbon in the shallow geosphere? *Chemical Geology*, 71, 41-51
- Leifer, I., Boles, J. R., Luyendyk, B.P., and Clark, J. F.** (2004). Transient discharges from marine hydrocarbon seeps: spatial and temporal variability. *Environmental Geology*, 46, 1038-1052, doi:10.1007/s00254-004-1091-3.
- Loreto, M. F., Düşünür-Doğan, D., Üner, S., İçcan-Alp, Y., Ocakoğlu, N., Cocchi, L., Muccini, F., Giordano, P., & Ligi, M.** (2019). Fault-controlled deep hydrothermal flow in a back-arc tectonic setting, Aegean Tyrrhenian sea. *Scientific Reports*, 9(1). DOI: 10.1038/s41598-019-53696-z

- Maden, N., ve Dondurur, D.** (2012). Orta Karadeniz sırtının tektonik ve kabuk yapısının gravite verileri yardımıyla belirlenmesi. *Jeofizik Dergisi*, 17, 25-37.
- Makogon, Y. F.** (1966). Specialities of exploitation of the natural gas hydrate fields in permafrost conditions. *Vniiegazprom*, 11(4): 1-12.
- Maslin, M., Owen, M., Betts, R., Day, S., Dunkley Jones, T., & Ridgwell, A.** (2010). Gas hydrates: past and future geohazard? *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368(1919), 2369-2393.
- McKenna, J. R., & Blackwell, D. D.** (2004). Numerical modeling of transient Basin and Range extensional geothermal systems. *Geothermics*, 33(4), 457–476. DOI: 10.1016/j.geothermics.2003.10.001
- Meyer, RF.** (1981) Speculations on oil and gas resources in small fields and unconventional deposits. *Energy Resources*, 49-72
- Milkov, A. V., Claypool, G.E., Lee, Y.-J., Dickens, G. R., Xu, W., Borowski, W. S. & the ODP Leg 204 Scientific Party** (2003). In situ methane concentrations at Hydrate Ridge offshore Oregon: new constraints on the global gas hydrate inventory from an active margin. *Geology*, 31(10), 833 – 836.
- Nakicenovic, N.** (2002) Methane as energy source for the 21st century. *International Journal Global Energy Issues*, 18(1),6–22.
- Nikishin, A. M., Korotaev, M. V., Ershov, A. V., & Brunet, M.** (2003). The Black Sea basin: tectonic history and Neogene– Quaternary rapid subsidence modeling, *Sedimentary Geology*, 156(1-4), 149–168.
- Ocakoğlu, N.** (2009). Gaz Hidratlar ve Önemi: Türkiye Çevresi Denizlerde Gaz Hidrat ve Sığ Gaz Aramaları. *İstanbul Yerbilimleri Dergisi*, 22(1), 29-47
- Okay, A. I., Şengör, A. M. C., & Görür, N.** (1994). Kinematic history of the opening of the Black Sea and its effect on the surrounding regions, *Geology*, 22(3), 267–270
- Önal, K. M. ve Demirbağ, E.** (2020). Batı Karadeniz Havzasının Güney Bölümünde Akçakoca-Cide Açıklarında Sıkışmalı Tektonik Rejime Ait Yeni Bulgular. 10.48550/arXiv.2005.08127
- Popescu, I., Lericolais, G., Panin, N., Normand, A., Dinu, C., & Le Drezen, E.** (2004). The Danube submarine canyon (Black Sea): morphology and sedimentary processes. *Marine Geology*, 206(1-4), 249–265.
- Popescu, I., Lericolais, G., Panin, N., Wong, H. K., & Droz, L.** (2001). Late Quaternary channel avulsions on the Danube deep-sea fan, Black Sea. *Marine Geology*, 179(1-2), 25-37.
- Potential Gas Committee** (1981) Potential Supply of Natural Gas in the United States. Potential Gas Agency, Colorado School of Mines, Golden, CO.
- Rajput, S., & Thakur, N. K.** (2011). *Exploration of Gas hydrates: Geophysical techniques*. Springer Berlin Heidelberg.

- Riboulot, V., Ker, S., Sultan, N., Thomas, Y., Marsset, B., Scalabrin, C., Ruffine, L. & Ion, G.** (2018). Freshwater lake to salt-water sea causing widespread hydrate dissociation in the Black Sea. *Nature communications*, 9(1), 117.
- Riedel, M., Freudenthal, T., Bergenthal, M., Haeckel, M., Wallmann, K., Spangenberg, E., ... & Bohrmann, G.** (2020). Physical properties and core-log seismic integration from drilling at the Danube deep-sea fan, Black Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 114, 104192.
- Robinson, A. G., Rudat, J. H., Banks, C. J., & Wiles, R. L. F.** (1996). Petroleum geology of the Black Sea, *Marine and Petroleum Geology*, 13(2), 195-223.
- Ross, D. A., Uchupi, E., Prada, K.E., & MacIlvaine, J.C.** (1974). Bathymetry and microtopography of Black Sea, in Degens, E. T., and Ross, D. D. , eds., *The Black Sea—Geology, chemistry and biology*. American Association of Petroleum Geologists Memoir. 20, p. 1–10.
- Ruppel, C. D., & J. D. Kessler** (2017). The interaction of climate change and methane hydrates, *Reviews of Geophysics*, 55(1), 126-168
- Sarkar, S., Toksöz, M. N. & Burns, D. R.** (2002). *Fluid flow simulation in fractured reservoirs*. Massachusetts Institute of Technology. Earth Resources Laboratory.
- Simms, M. A., & Garven, G.** (2004). Thermal convection in faulted extensional sedimentary basins: Theoretical results from finite-element modeling. *Geofluids*, 4(2), 109–130. DOI: 10.1111/j.1468- 8115.2004.00069.x
- Sloan, E. D.** (1998). *Clathrate Hydrates of Natural Gases*, Second edition, Marcel Dekker Inc., New York.
- Soloviev, V. A.** (2002). Global estimation of gas content in submarine gas hydrate accumulations. *Russian Geology and Geophysics*, 43(7), 609 – 624.
- Spadini, G., Robinson, A. G., & Cloetingh, S. A. P. L.** (1996). Western versus eastern Black Sea tectonic evolution: pre-rift lithospheric controls on basin formation, *Tectonophysics*, 266(1-4), 139-154
- Şen, E., & Doğan, D.** (2021). Finite volume modeling of bathymetry and fault-controlled fluid circulation in the Sea of Marmara. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 30(5), 628-638.
- Trofimuk, AA., Cherskii, NV. & Tsaryov, VP.** (1979) The gas-hydrate sources of hydrocarbons. *Priroda (Nature)*, 1, 18–27
- Türkdoğan, S.** (2019). *Heat flow and fluid flow modeling of gas hydrate bearing sediments in South Shetland Islands, Antarctica* (Master's thesis). Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey.
- Üner, S., & Dogan, D. D.** (2021). An integrated geophysical, hydrological, thermal approach to finite volume modelling of fault-controlled geothermal fluid circulation in Gediz Graben. *Geothermics*, 90, 102004.
- Üner, S., Ağaçoğlu, G. Ö., & Düşünür Doğan, D.** (2019). Hydrogeophysical modelling of Hisarcik (Kütahya) geothermal field, western Turkey. *Geophysical Prospecting*, 67(8), 2176-2195

- Wong, H. K., Winguth, C., Panin, N., Dinu, C., Wollschläger, G. P., Ungureanu, G., Krugliakov, V. V., & Podshuveit, V.** (1997), The Danube and Dniepr fans: morphostructure and evolution, *GeoEcoMarina*, 2, 77–101
- Zander, T.** (2017). *Methane hydrates in Black Sea deep-sea fans: Characteristics, implications, and related geohazards* (Doctoral dissertation) ChristianAlbrechts-Universität zu Kiel,Kiel.
- Zander, T., Haeckel, M., Berndt, C., Chi, W.- C., Klaucke, I., Bialas, J., Klaeschen, D., Koch, S., & Atgin, O.** (2017). On the origin of multiple BSRs in the Danube deep- sea fan, Black Sea. *Earth and Planetary Science Letters*, 462, 15–25. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.01.006>
- Zerpa, L. E., & Koh, C. A.** (2015). New Frontiers: Hydrates in Porous Media. In *Pore Scale Phenomena: Frontiers in Energy and Environment*, 91–113. doi:10.1142/9789814623063_00.
- Url-1**<<https://science.howstuffworks.com/environmental/energy/natural-gas-hydrates.htm>> , erişim tarihi 09.10.2024.
- Url-2**<http://www.mms.gov/offshore/Assets/GasHydrateFiles/hydr_dist_ImapForClathColl.gif> , erişim tarihi 28.04.2008.
- Url-3** <<http://marine.er.usgs.gov/factsheets/gas-hydrates/gas-hydrates-3.gif>> , erişim tarihi 28.04.2008.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Bahar Güvem

ÖĞRENİM DURUMU:

Lisans : 2021, İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2024 – Günümüz Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi Jeofizik Ana Bilim Dalı Araştırma Görevlisi

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Güvem B.**, Orta D., Üzümlü Y., & Doğan D. (2023) Jeotermal Sahalarda Fayların Eğiminin Ve Permeabilite Kontrastının Sıcaklık Ve Akış Dağılımına Etkisinin Sayısal Modellenmesi. *Yerbilimleri* 44 3 234–249.
- **Güvem, B.** and Düşünür Doğan, D. (2024) Numerical Modeling of Fluid Flow in Gas Hydrate Bearing Sediments in Black Sea, Presented at the EGU General Assembly 2024, Vienna, Austria, 14–19 April 2024 (Poster)