



Bu proje Türkiye Cumhuriyeti Devleti ve Avrupa Birliği tarafından ortak finanse edilmektedir.



Düşük Karbonlu Kalkınma için Çözümsel Tabanlı Strateji ve Eylem Geliştirilmesi Teknik Yardım Projesi



AB Karbon Yakalama ve Depolama Direktifi Düzenleyici Etki Analizi Çalışması Bulguları

Mayıs, 2019

Prof Dr Serhat Akın
ODTÜ



TEŞEKKÜRLER

Dr Çağlar Sınayuç

Dr Sevtaç Bülbül

Önder Saraçoğlu

Taylan Akın

Ali Başer

Serhat Küçük

Çağdaş Gültekin

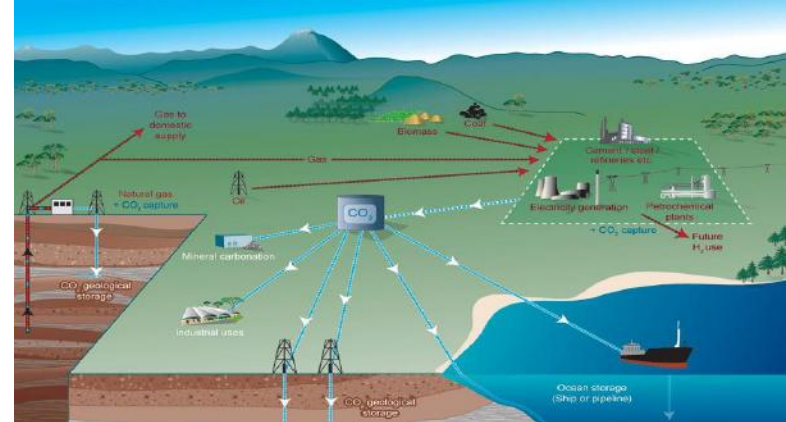
AB Karbon Yakalama ve Depolama Direktifi DEA Çalışması Bulguları

Petrol Sahaları CO₂ Depolama Kapasitesi Hesaplama Çalışması

- Yöntem
- Veri tabanı
- Depolanabilecek Serbest CO₂ Miktarı
- Depolanabilecek Suda Çözülmüş CO₂ Miktarı
- Depolanabilecek Toplam CO₂ Miktarı
- Maliyetler

Jeotermal Uygulamalar

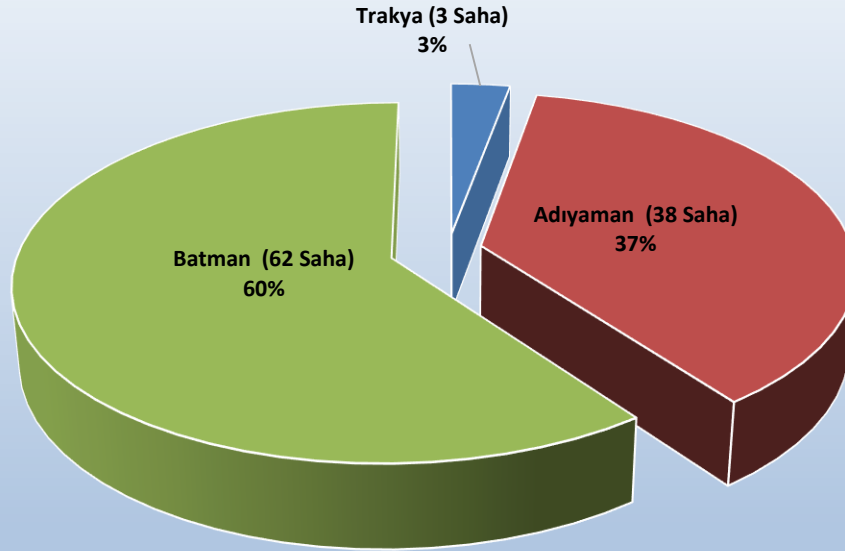
- Aydın Umurlu pilot enjeksiyon
- GECCO - Kızıldere



Veri Tabanı

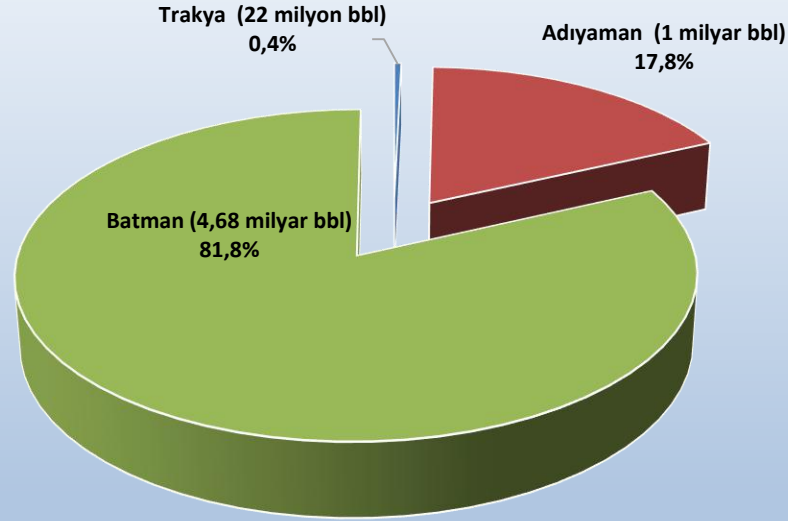
- Yürütülen çalışmada, **Batman, Adıyaman ve Trakya Bölgelerindeki** sahalara ait mevcut Rezervuar Sıcaklığı, Orijinal Rezervuar Basıncı, Formasyon Suyu Tuzluluğu ve Yerinde Petrol Miktarı gibi veriler derlenmiştir

Bölgelere Göre Saha Dağılımı



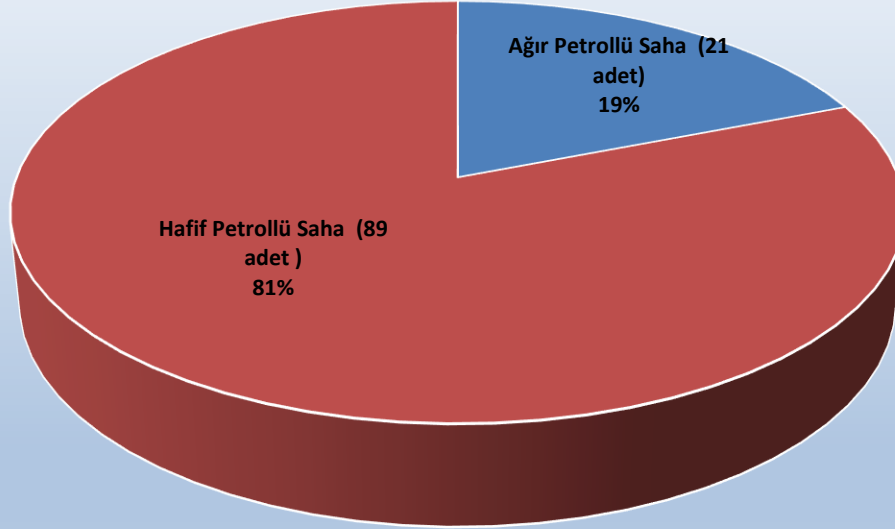
**Toplam Saha
Sayısı 103**

Bölgelere Göre Rezerv Dağılımı

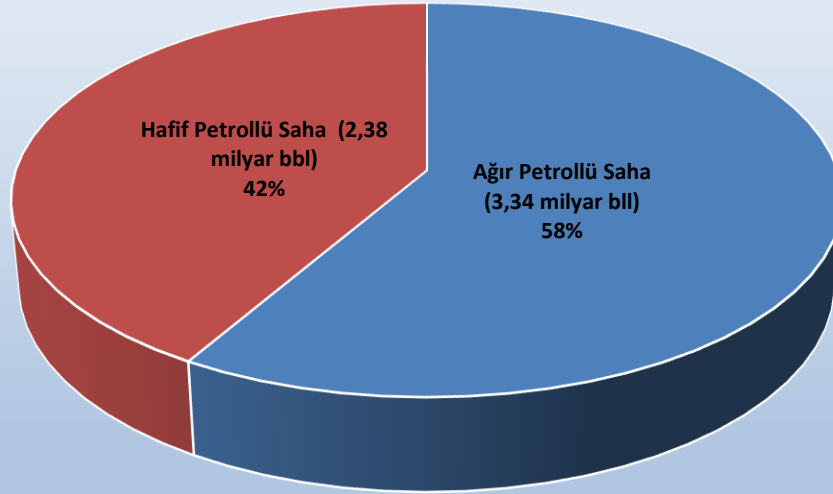


Toplam Rezerv
5,7 milyar bbl

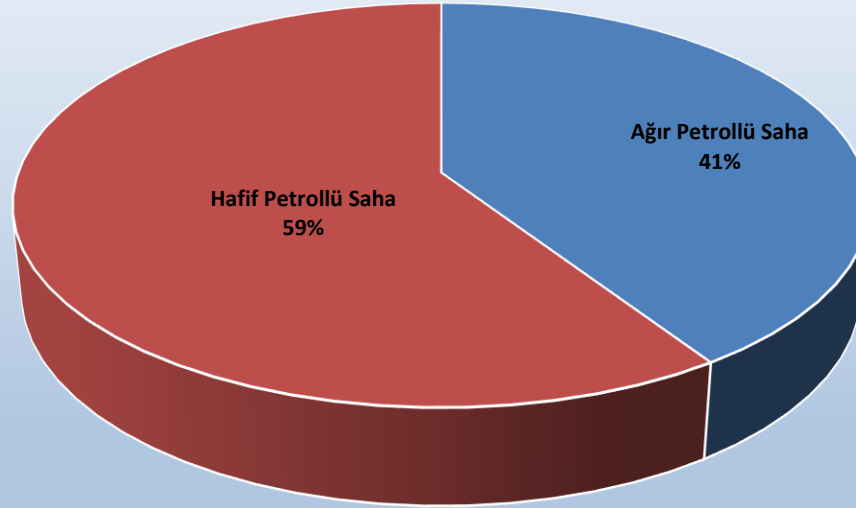
Petrole Göre Saha Sayısı

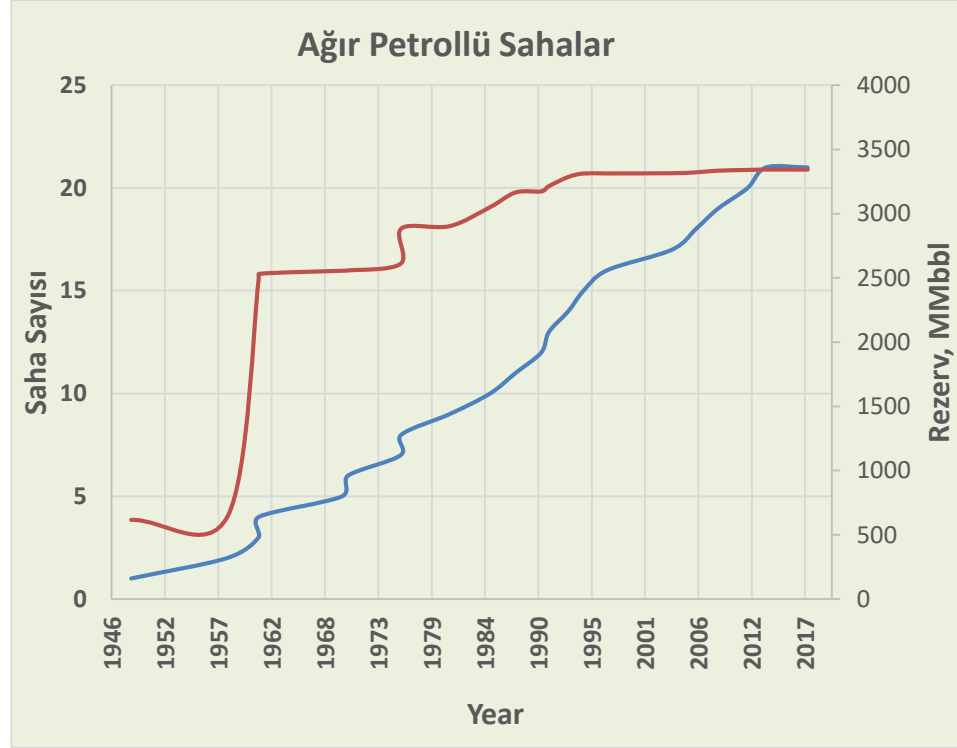


Petrole Göre Rezerv Miktarı



Petrole Göre Üretilabilir Rezerv Miktarı





Veri tabanı

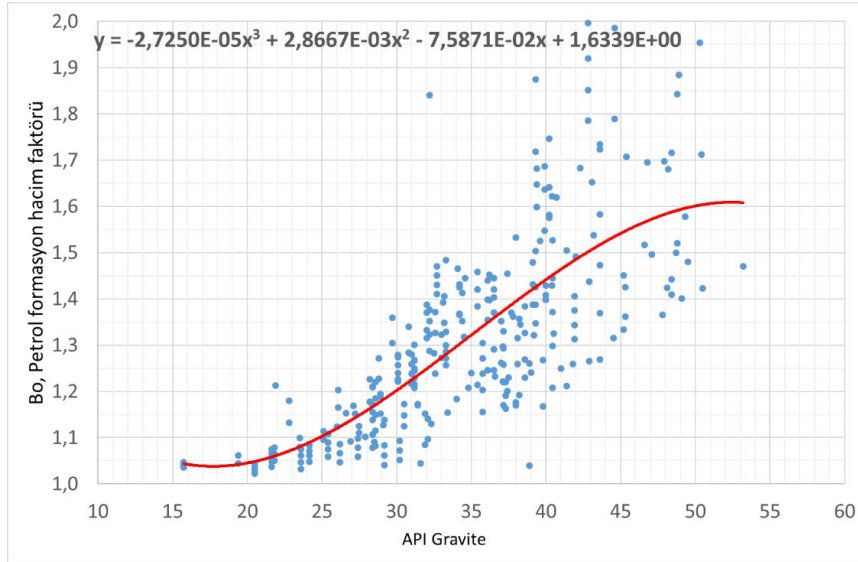
- İl
- Üretime Başlama Tarihi
- Yapı
- Formasyon
- Litoloji
- Üretim Mekanizması
- Sondaj Derinliği, m
- Su/Petrol Kontakı, m
- Orijinal Rezervuar Basıncı, psia
- Rezervuar Sıcaklığı, °F
- Orijinal Rezervuar Basıncı, bar
- Gözeneklilik, %
- Sistem Geçirgenliği, md
- Orijinal Su Doymuşluğu, %
- API Gravitesi
- Viskozite, cp
- Kaynama Noktası Basıncı, psia
- GOR, scf/stb
- Formasyon Suyu Tuzluluğu, ppm
- Formasyon Suyu Tuzluluğu, molal
- Sıkıştırılabilirlik, Kayaç, 1/psi
- Toplam Kalınlık, m
- Net Kalınlık, m
- Yerinde Petrol Miktarı, stb
- Üretilabilir Petrol Miktarı, stb
- Üretebilme Oranı, %
- Çalışan Kuyu Adedi
- Aylık Petrol Üretimi, bbl
- Günlük Su Üretimi, bbl
- Kümülatif Petrol Üretimi, bbl

Serbest CO₂ Kütlesi

Mobil Petrol Hacmi (bbl) = B_o × Üretilme Oranı × Yerinde Petrol Miktarı

Serbest CO₂ Kütlesi (ton)

= CO₂ yoğunluğu (kg/m³) × Mobil Petrol Hacmi (m³)/1000



petrol formasyon hacim faktörü

AI-Marhoun, 1988, Obomanu ve Okpobiri,
1987, Omar ve Todd, 1993

Rezervuar basınç ve sıcaklığındaki CO₂ yoğunluk
değerleri, The National Institute of Standards and
Technology (NIST) Chemistry Web Book veri
tabanından elde edilmiştir.

Suda Çözünmüş CO₂ Kütlesi

$$\text{Gözenek Hacmi (bbl)} = \text{Yerinde Petrol Miktarı} \times B_o / (1 - S_w / 100)$$

$$\text{Su Hacmi (m}^3\text{)} = \text{Gözenek Hacmi (m}^3\text{)} \times S_w / 100$$

$$\begin{aligned} &\text{Suda Çözünmüş CO}_2 \text{ Kütlesi (ton)} \\ &= \left[\text{CO}_2 \text{'nin Sudaki Çözünürlüğü} \left(\frac{\text{mol CO}_2}{\text{kg su}} \right) \times 44 \times 100 / 1000000 \right] \\ &\times \text{Su Hacmi (m}^3\text{)} \end{aligned}$$

CO₂'nin rezervuar basınç ve sıcaklığında sudaki çözünürlüğü, Carnegie Mellon Üniversitesi İnşaat ve Çevre Mühendisliği Bölümü'nün CO₂ Çözünürlük Hesaplama web sayfası ile belirlenmiştir (CO₂ Solubility Calculator, 2018). Yapılan hesaplamalarda, rezervuar basınç, sıcaklık ve formasyon suyu tuzluluğu değerlerine göre farklı çözünürlük modelleri kullanılmıştır (Akinfiyev ve Diamond, 2010, Barta ve Bradley, 1985, Chang ve Coats, 1998, Duan ve Sun, 2006, Enick ve Klara, 1990, Soreide ve Whitson, 1992, Spycher ve Pruess, 2010)

Depolanabilecek Toplam CO₂ Miktarı

- Depolanabilecek toplam CO₂ miktarı, her bir bölge için belirlenen serbest CO₂ miktarı ve suda çözünmüş CO₂ miktarı toplanarak bulunmuştur

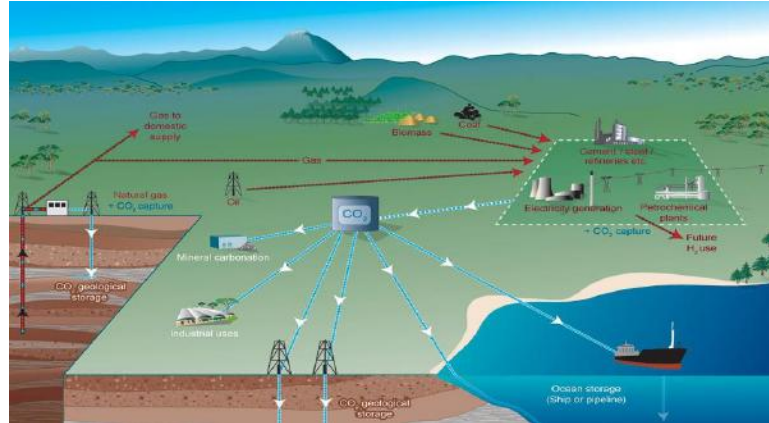
Depolanabilecek Toplam CO₂ Miktarı

	Depolanabilecek CO ₂ Miktarı (ton)
Batman Bölgesi	79.548.418,74
Adıyaman Bölgesi	28.697.172,83
Trakya Bölgesi	473.070,61
Depolanabilecek Toplam CO ₂ Miktarı(ton)	108.718.662,19

Maliyetler

- CO₂ Yakalama
- CO₂ Taşıma
 - Boru hattı
 - Tanker
- CO₂ Depolama
 - Enjeksiyon
 - Takip

- Çaylarbaşı Petrol
- Dodan CO₂
- Midyat Akifer

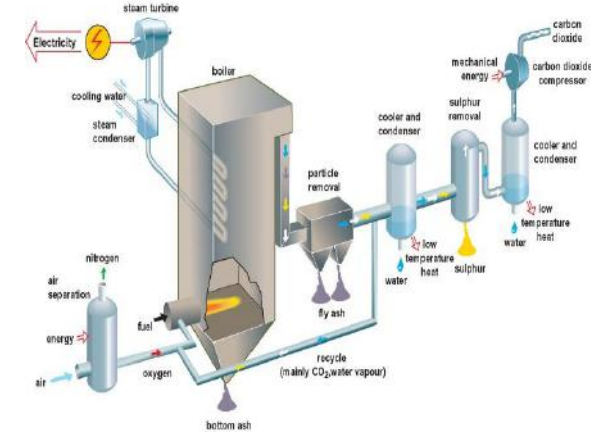


Karbon yakalama maliyetleri

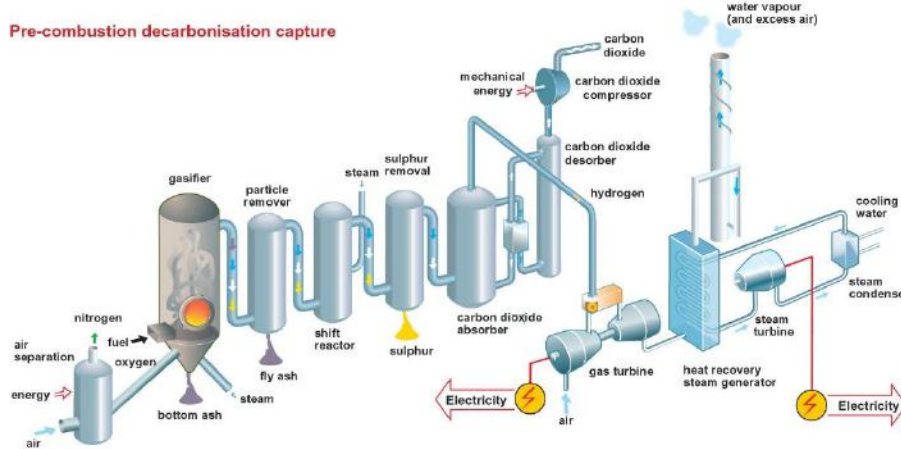
- Yanma öncesi maliyet
- Yatırım maliyeti
- Operasyon giderleri

Yakalama maliyetleri

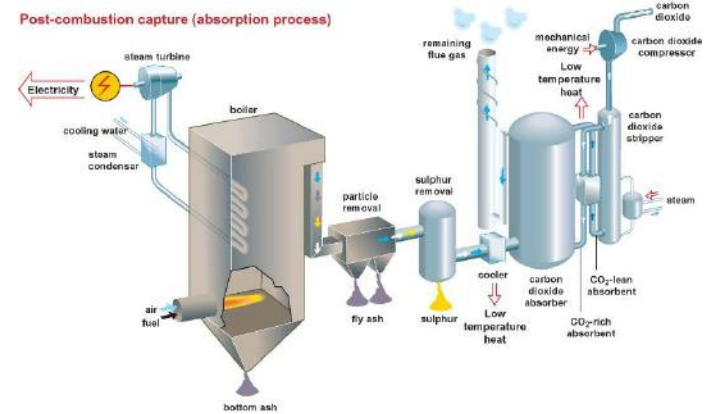
- Santral masrafları
- Yakalama harici toplam yatırım 1286 – 1500 US\$ kW⁻¹
- Yakalama dahil yatırım 2096 – 2853 US\$ kW⁻¹
- Karbon yakalama bedeli 20 – 29 US\$/tCO₂



Pre-combustion decarbonisation capture



Post-combustion capture (absorption process)



Depolama Maliyetleri

- Akifer (Avrupa) 1000 – 3000 m 2.8 US\$/t_{CO₂}
- Terkedilmiş gaz sahası 2.4 US\$/t_{CO₂}
- Terkedilmiş petrol sahası 1.3 US\$/t_{CO₂}
- Takip 0.1 – 0.3 US\$/t_{CO₂}

IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage

Depolama Maliyetleri

Yer			Düşük \$/ton CO ₂	Orta \$/ton CO ₂	Yüksek \$/ton CO ₂	Açıklama	Ortalama
Akifer	Kara	Avustralya	0.2	0.5	5.1	20 saha	Medyan
Akifer	Kara	Avrupa	1.9	2.8	6.2	Tahmini aralık	En olası
Akifer	Kara	ABD	0.4	0.5	4.5	Düşük/Baz/Yüksek	Baz durum
Akifer	Deniz	Avustralya	0.5	3.4	30.2	34 saha	Medyan
Akifer	Deniz	K Denizi	4.7	7.7	12.0	Tahmini aralık	En olası
Tükenmiş Petrol	Kara	ABD	0.5	1.3	4.0	Düşük/Baz/Yüksek	Baz durum
Tükenmiş Gaz	Kara	ABD	0.5	2.4	12.2	Düşük/Baz/Yüksek	Baz durum
Terk Petrol	Kara	Avrupa	1.2	1.7	3.8	Tahmini aralık	En olası
Terk Gaz	Deniz	K Denizi	3.8	6.0	8.1	Düşük/Baz/Yüksek	En olası

Taşıma Maliyetleri

- Boru hattı

$$C_{annual} = C_{total} \times CRF$$

- İnşaat

$$O\&M_{annual} = C_{total} \times O\&M_{factor}$$

- Operasyon ve bakım

$$CRF = 0.15/yr \quad O\&M_{factor} = 0.025$$

- Maliyet modeli

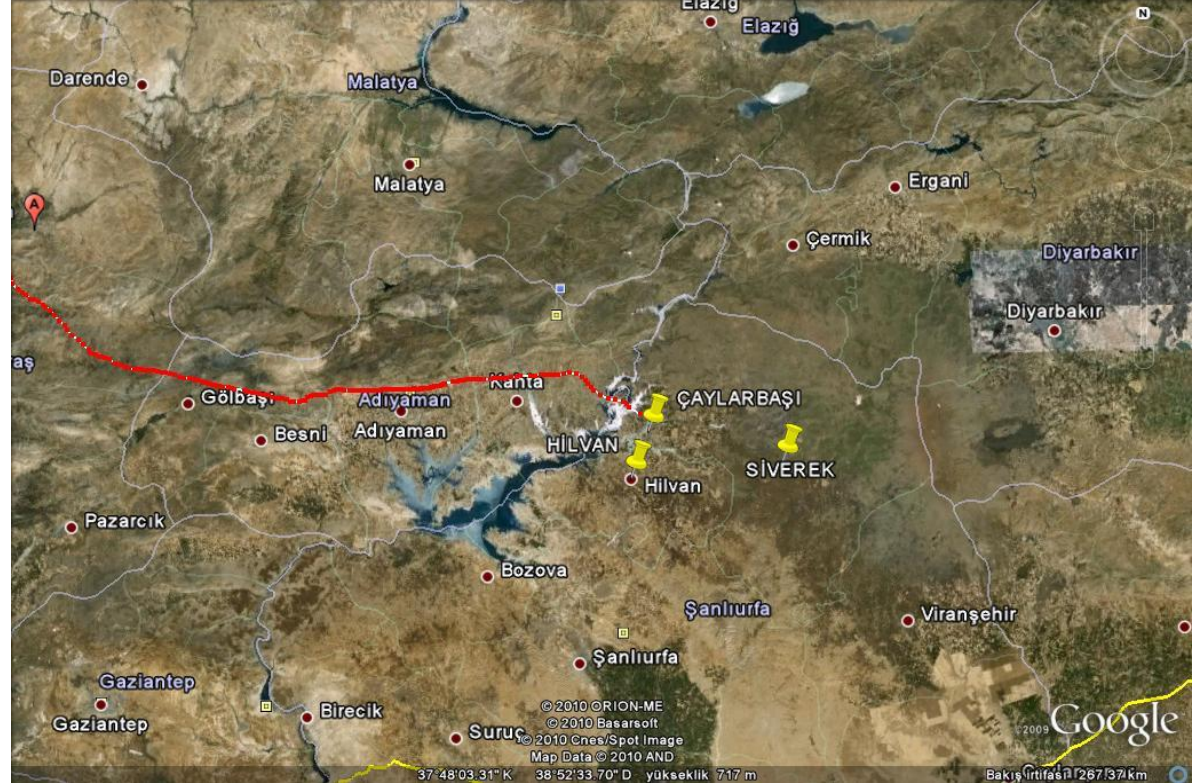
- Ogden, MIT, Ecofys, IEA GHG PH4/6, IEA GHG 2005/2, Parker, McCollum (Birleştirilmiş)

$$Pipeline\ capital\ cost[\$/km] = 9970 \times m^{0.35} \times L^{0.13} \quad C_{total} = F_L \times F_T \times L \times C_{cap}$$

- Tanker

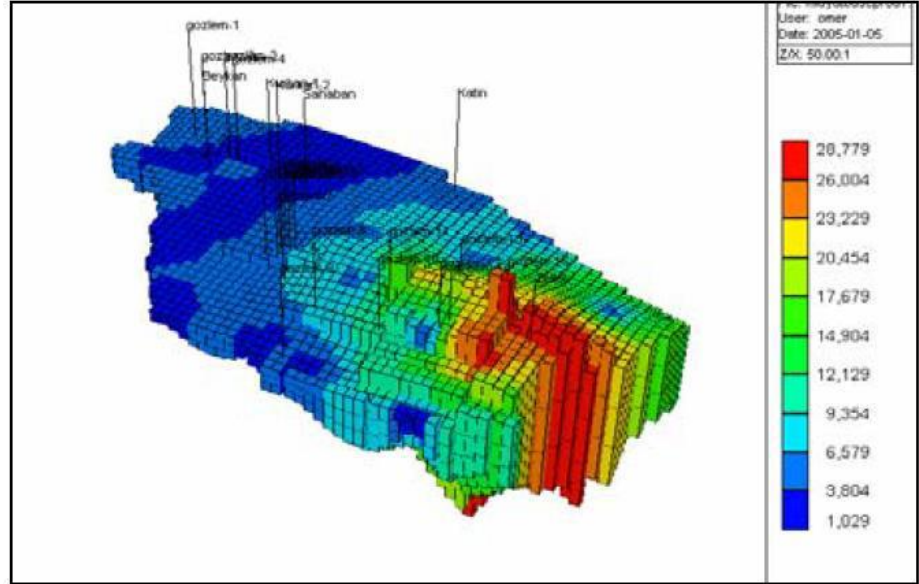
Uygulama – Petrol Sahası

- Çaylarbaşı
- Şanlı Urfa
- Su itimi ve gaz genişmesi
- 11,8 API
- OOIP = 71.200.000 Varil
- 8 kuyu 820 varil/ay
- %1,3 Kurtarım faktörü
- Spycher and Pruess Modeli
- 0.702 mol CO₂/kg su
- 376.063,770 ton su içinde CO₂
- 460.467,385 toplam CO₂



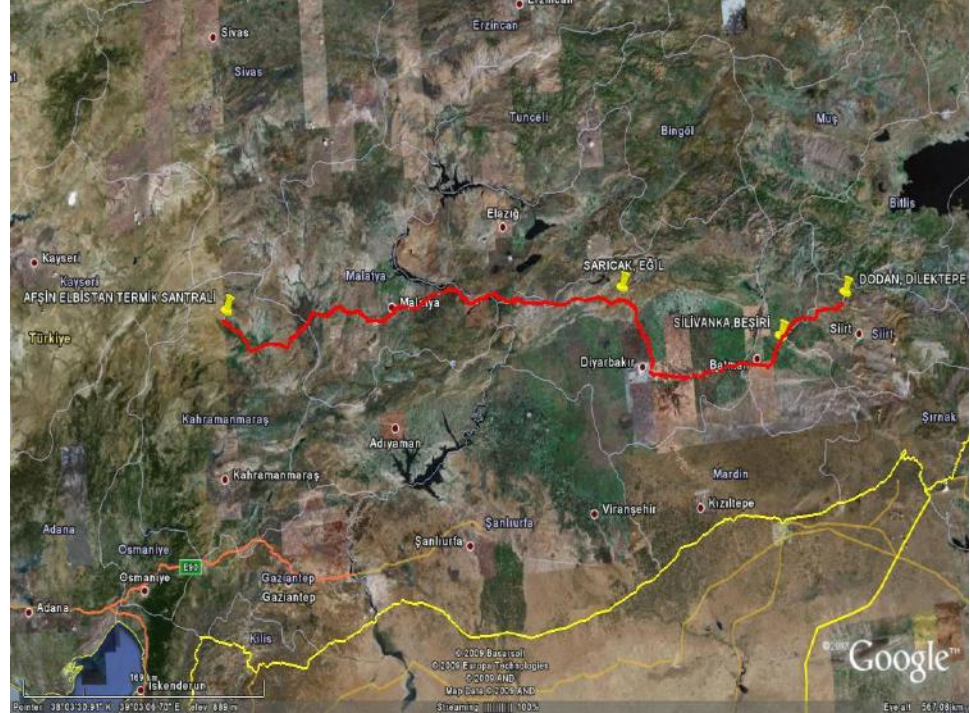
Uygulama – Akifer

- Midyat
- Ortalama derinlik
750-800 m kuzey,
750 m güney,
550 m batı
- 510 m min derinlik
- Ortalama kalınlık 200-350m.
- Toplam alan 19'855 km².
- Reşarj
- 496 mm/yıl Diyarbakır,
450-500 mm/yıl doğu sınır,
700- 750 mm/yıl kuzey-güney sınırlar

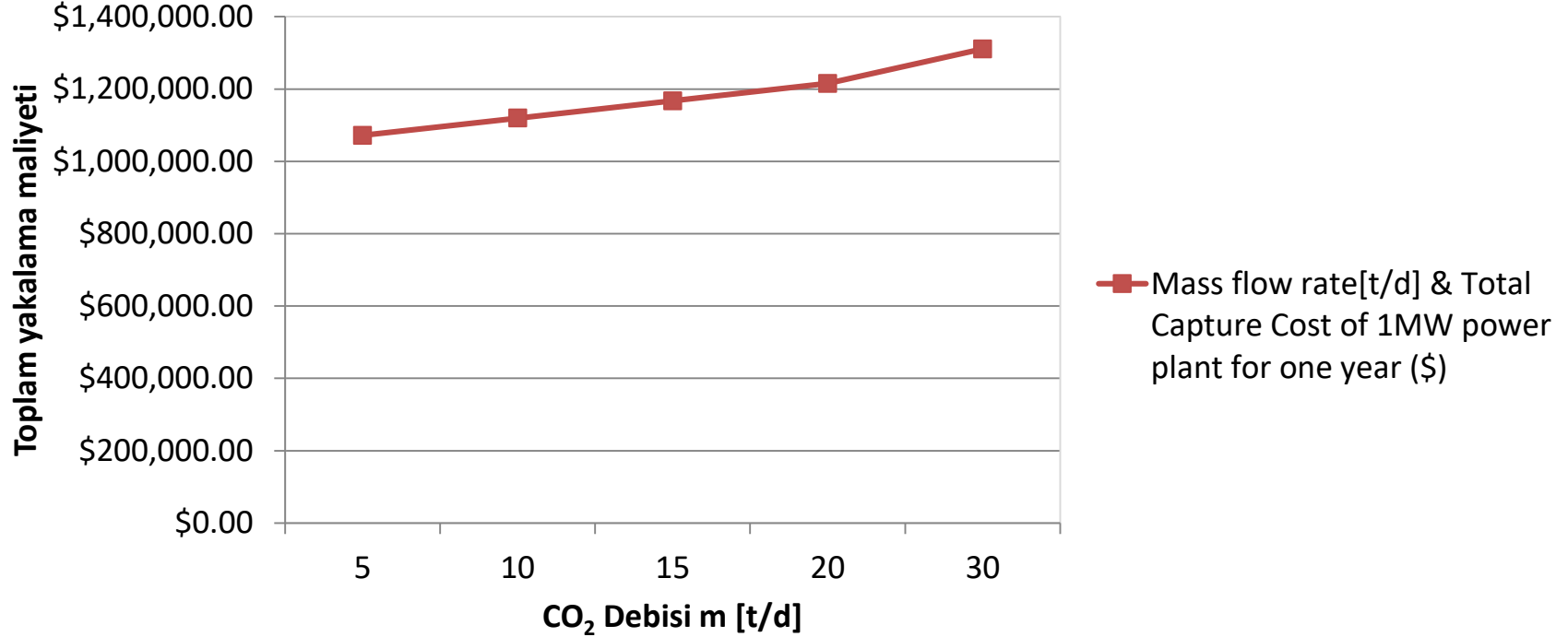


Uygulama – Doğal CO₂ Sahası

- 853 - 2256 m derinlik
- 12 kuyu
- 250 BSCF yerinde gaz
- 1560 to 2400 psig rezervuar basıncı
- 0,35 MMSCFD varsayım



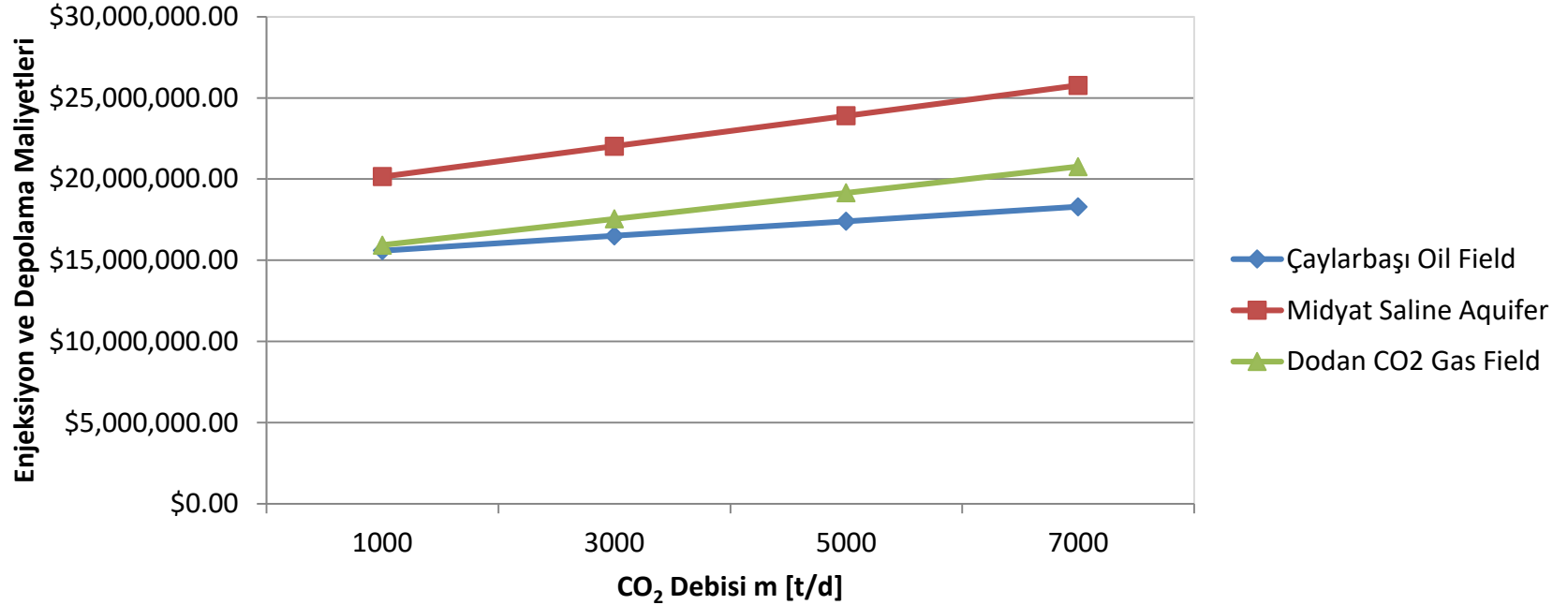
Toplam yakalama maliyeti



Taşıma Maliyetleri

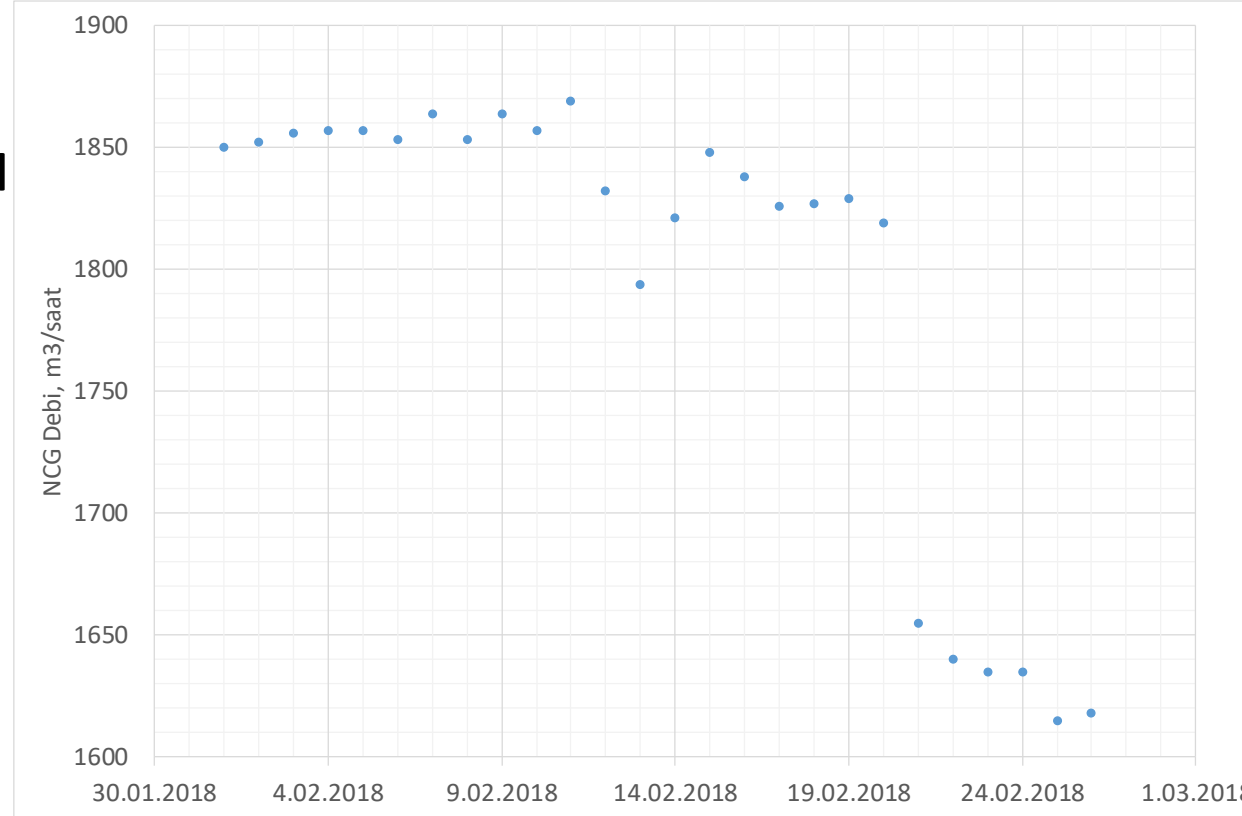
Uygulama	Yıllık Tanker Taşıma Maliyeti (Depolama Tankı dahil), \$	Yıllık Boru hattı Taşıma Maliyeti, 4 Pompa İstasyonu, \$
Petrol Sahası	53.499.776	51.921.118
Akifer	48.362.022	36.427.659
Doğal CO ₂ Sahası	60.692.634	53.265.155,9

Enjeksiyon ve Depolama Maliyetleri

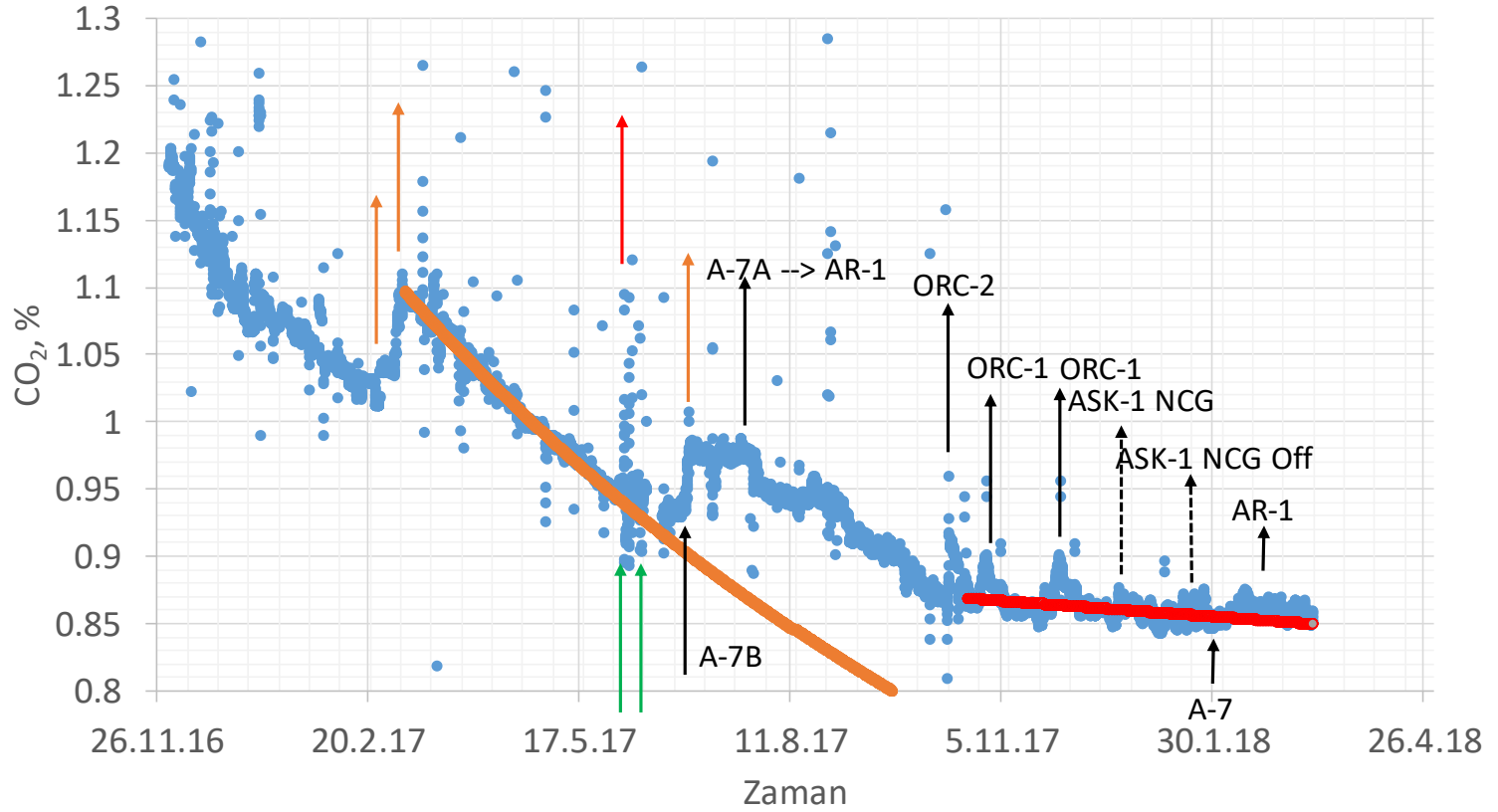


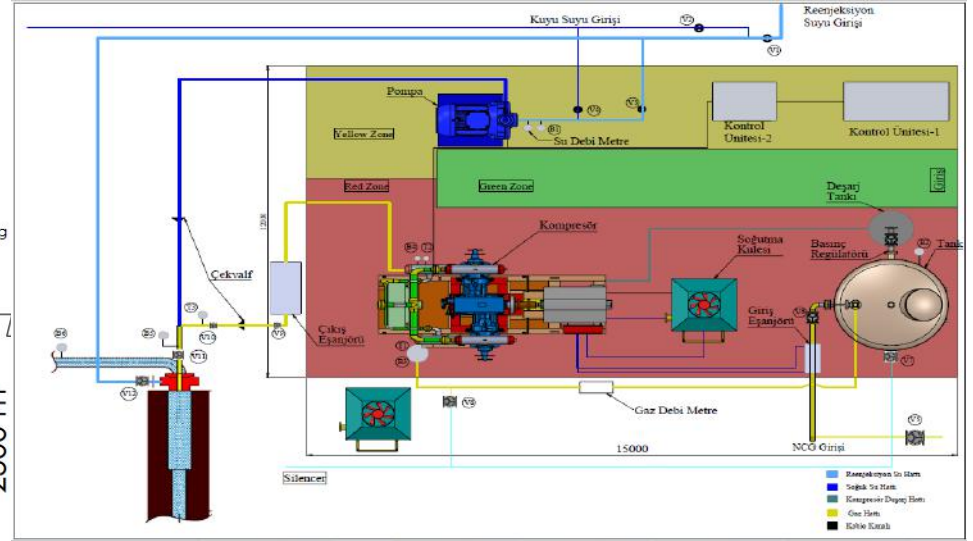
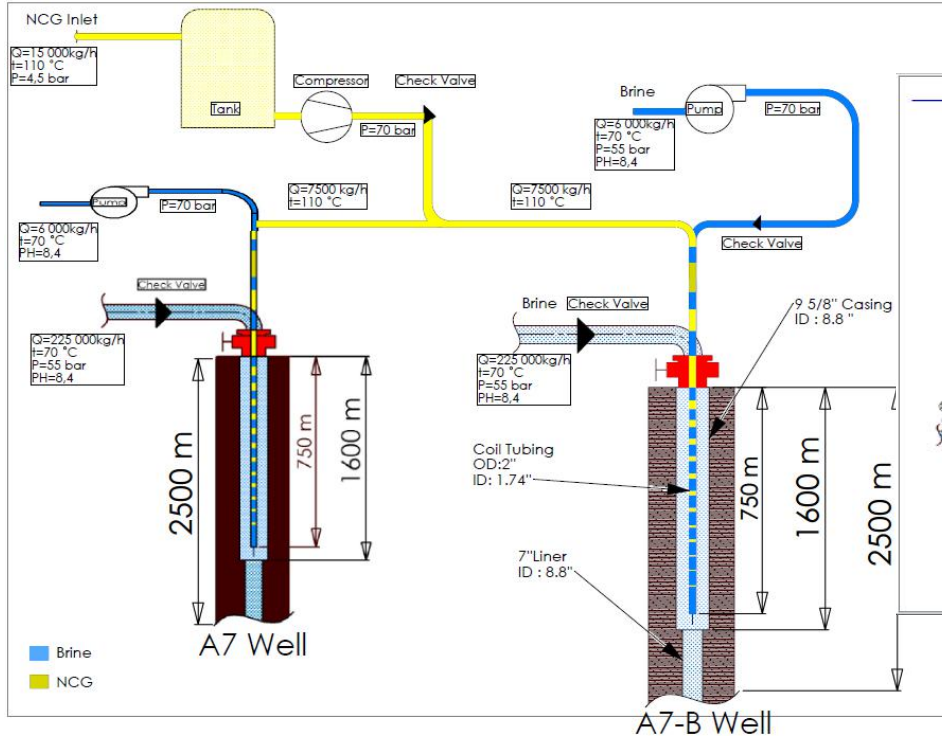
Jeotermal Saha

- Aydın'ın 15 km doğusu Umurlu
- 2x12 MWe
- Çatlaklı mermer
- ASK-1: 2054 m, 154.5°C



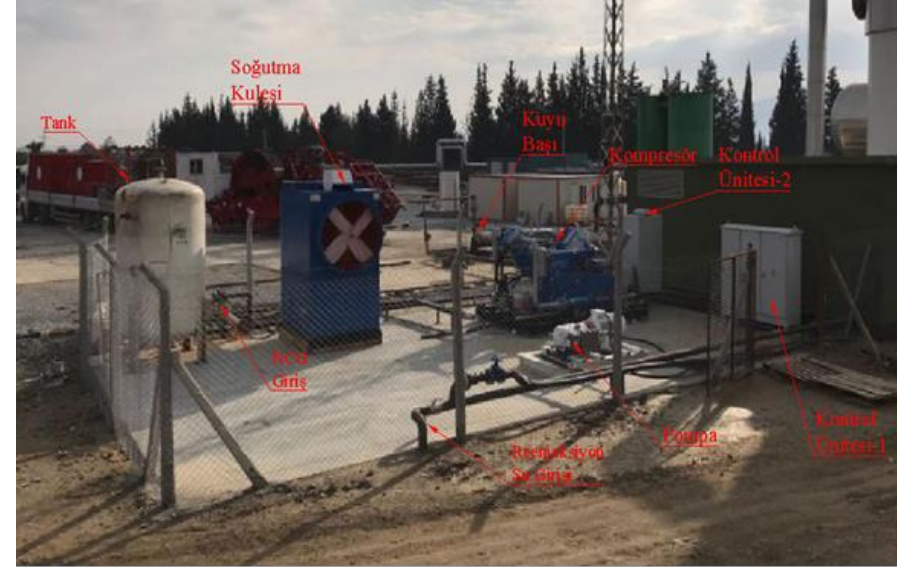
A-1





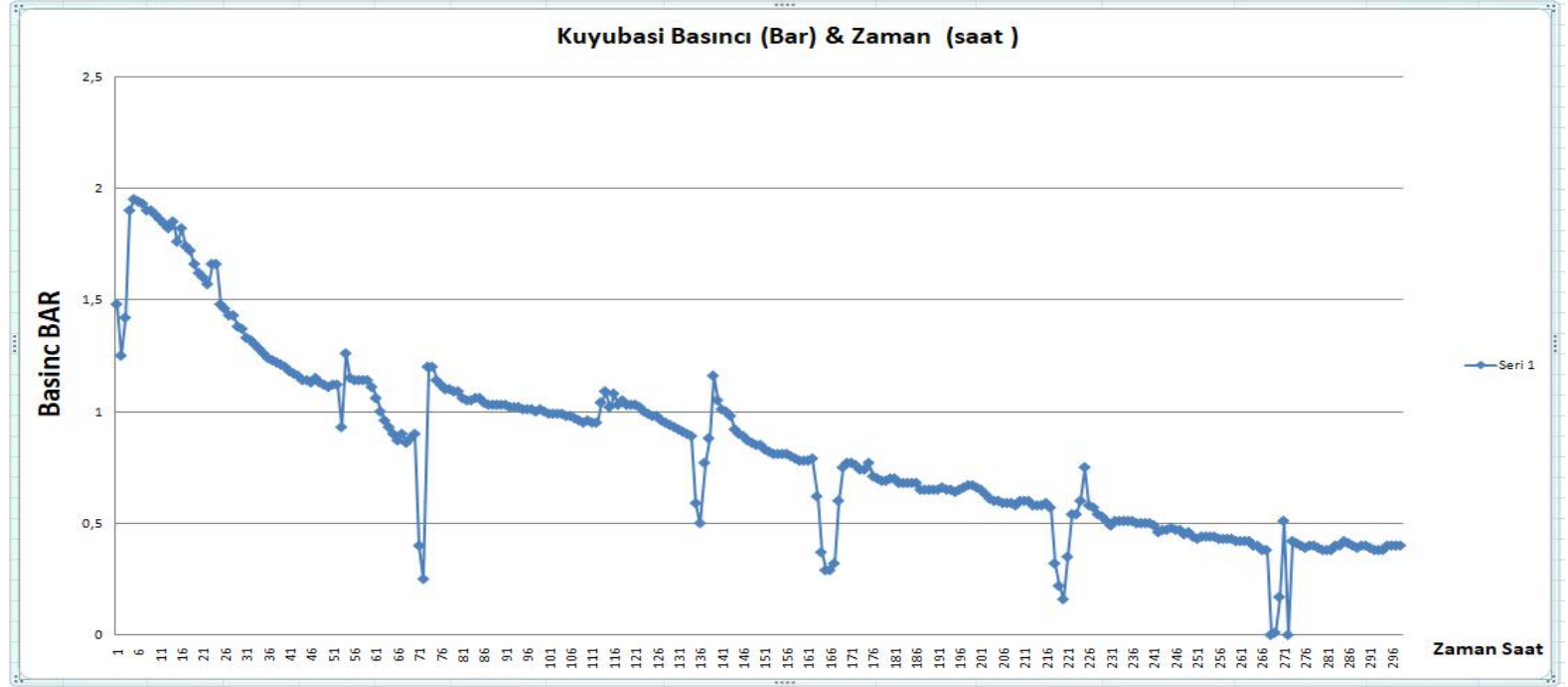
Operasyon maliyeti

- Re-enjeksiyon kuyusunun kapasitesine göre **4 - 10 ton/saat** CO₂ enjeksiyonu için harcama **180-250 KW saat**
- Aydın Umurlu **2.6 ton/saat enjeksiyon** için **160-170 KW**



Pompa Debisi (m3/saat)	Pompa Basıncı (bar)	Pompa Su Sıcaklığı (°C)	CO2 Debi (m3/saat) 280 2.6 Ton/Saat	CO2 Giriş Basıncı (bar)	CO2 Çıkış Basıncı (bar)	CO2 Giriş Sıcaklığı (°C)	CO2 Çıkış Sıcaklığı (°C)	Reenjeksiyon Su Debisi (m3/saat)	Reenjeksiyon Sıcaklığı (°C)	Kuyu Başı Basıncı (bar)
9,5	53	16		2,4	49	42	52	72	64	0,85

- Toplam 30 günde basılan CO₂ miktarı 134.400 metre küp (1248 Ton)



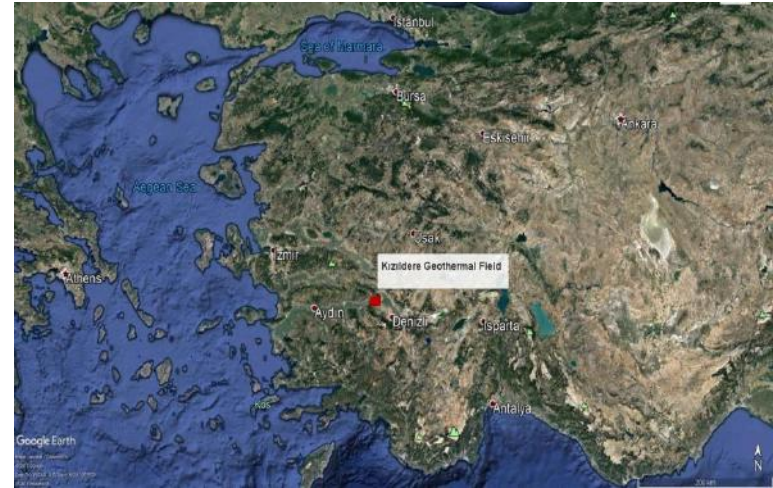
- 3 Kuyuda toplam artış $7+5+8 \sim 20$ Ton/Saat
- Üretilen CO_2 miktarı % 0.67 $\rightarrow$ %0.69
- Kuyu sıcaklıklarında bir değişme olmadı
- CO_2 enjeksiyonuna ara verildiğinde kuyu debileri 5 gün sonra tekrar düşüşe geçti.

Jeotermal Uygulamalar



GEOTHERMAL
EMISSION
CONTROL

- Hedef : Kızıldere 1 – 6 Ton/saat CO₂ enjeksiyonu
- CO₂ toprak ölçümleri
- Kuyulardan üretilen CO₂ ölçümleri
- Modelleme çalışmaları



This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 818169.

Kızıldere Jeotermal

Faz I: 15 MW (1984)

Faz II: 80 MW (2013)

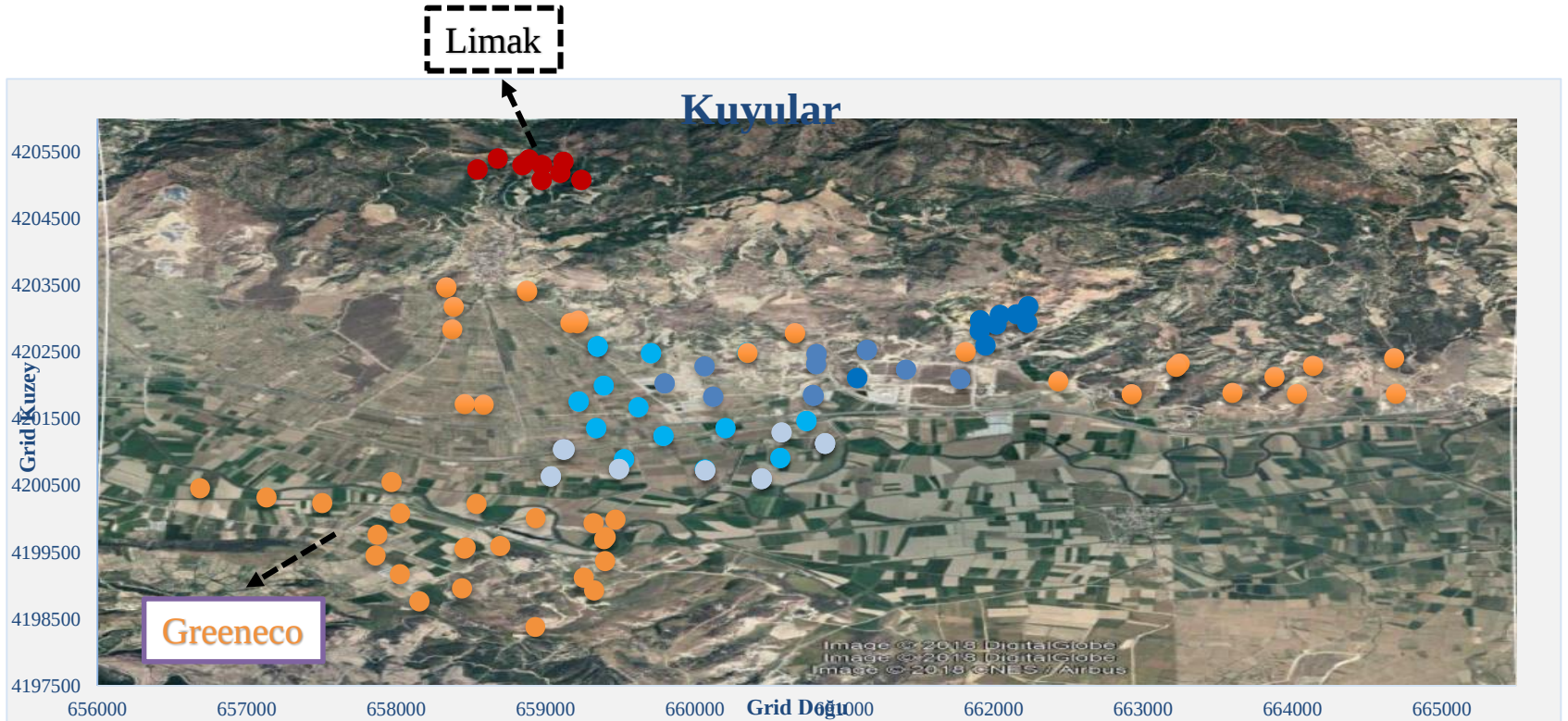
Faz III: 165 MW (2017 & 2018)

Toplam: 260 MW kurulu kapasite



Kızıldere Faz III, Ünite-I (100MW) www.zorluenerji.com.tr

Kuyular

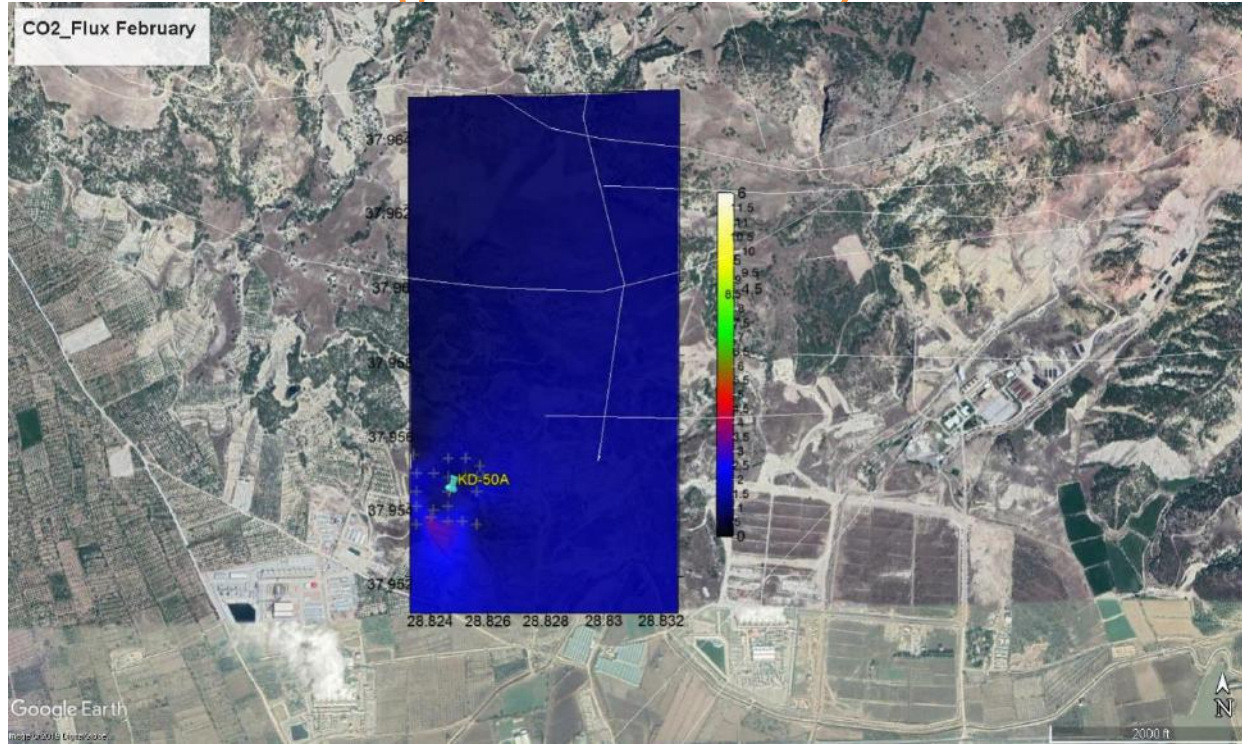


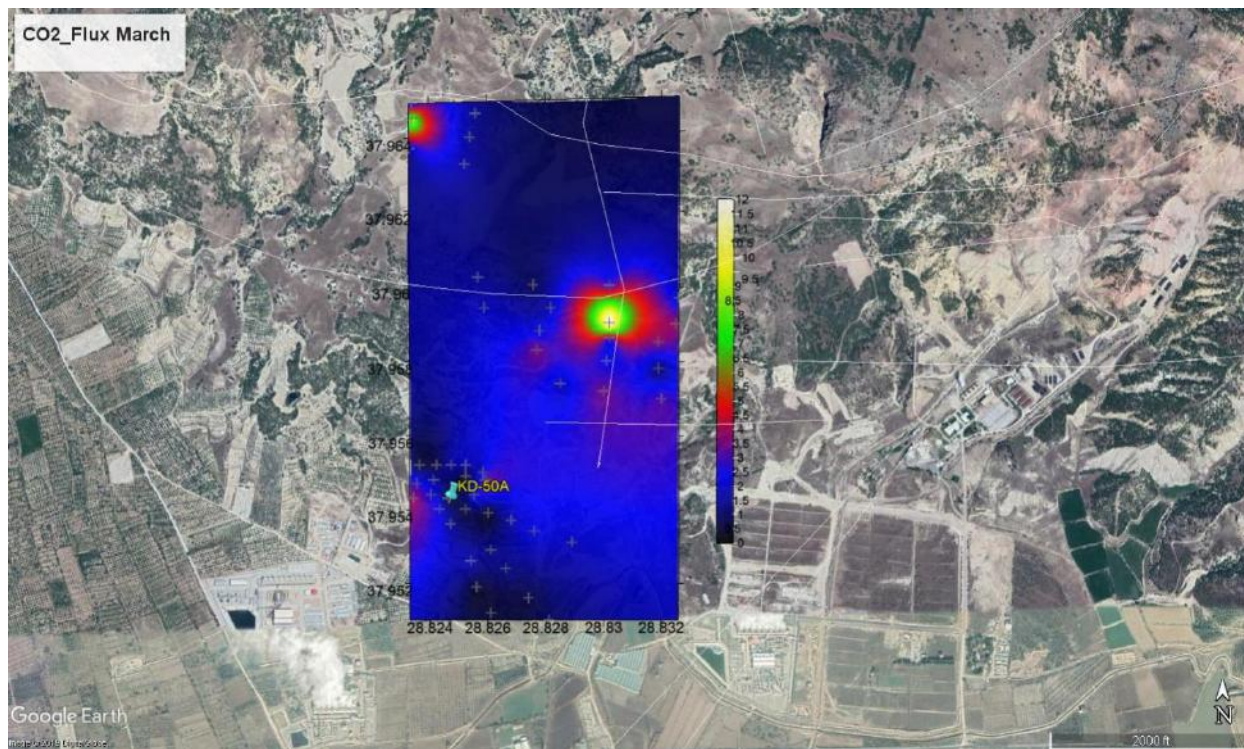


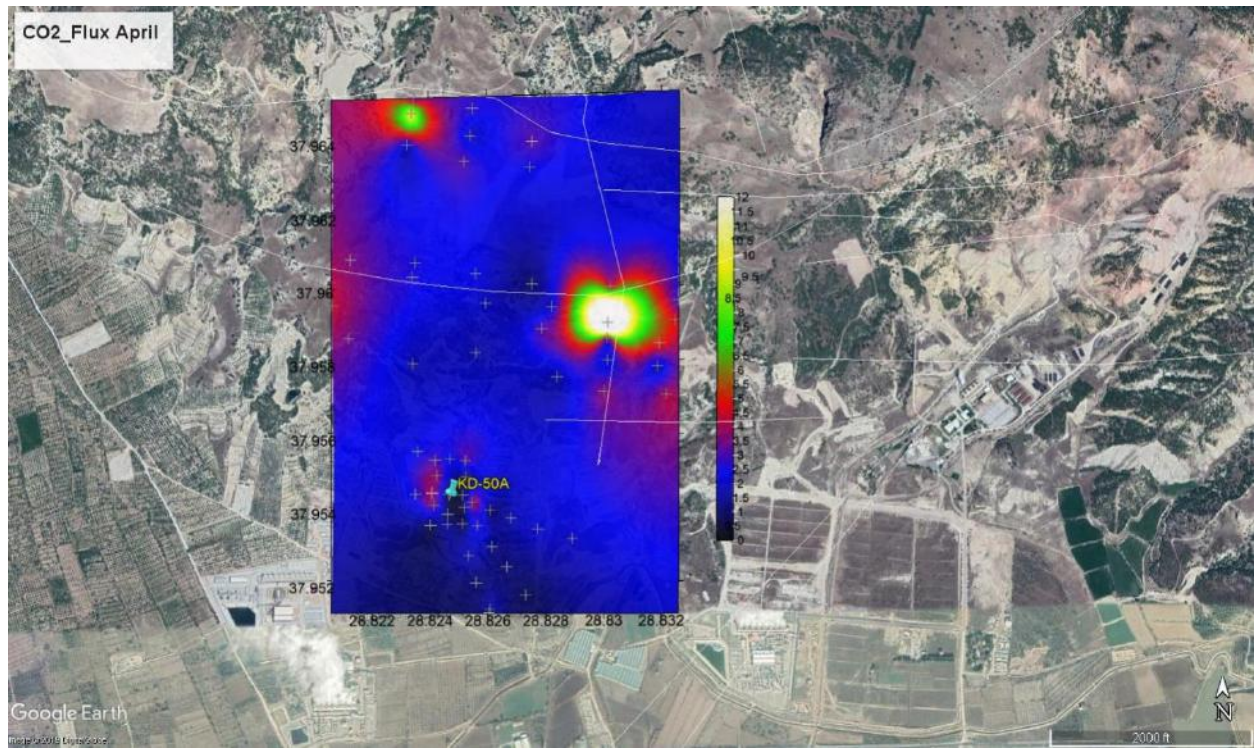
CO₂ Flux Measurements



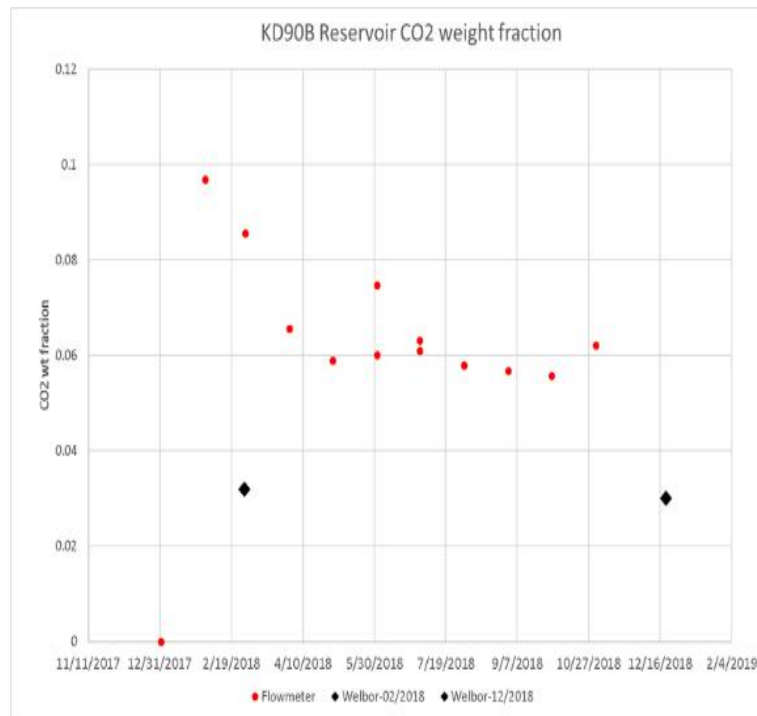
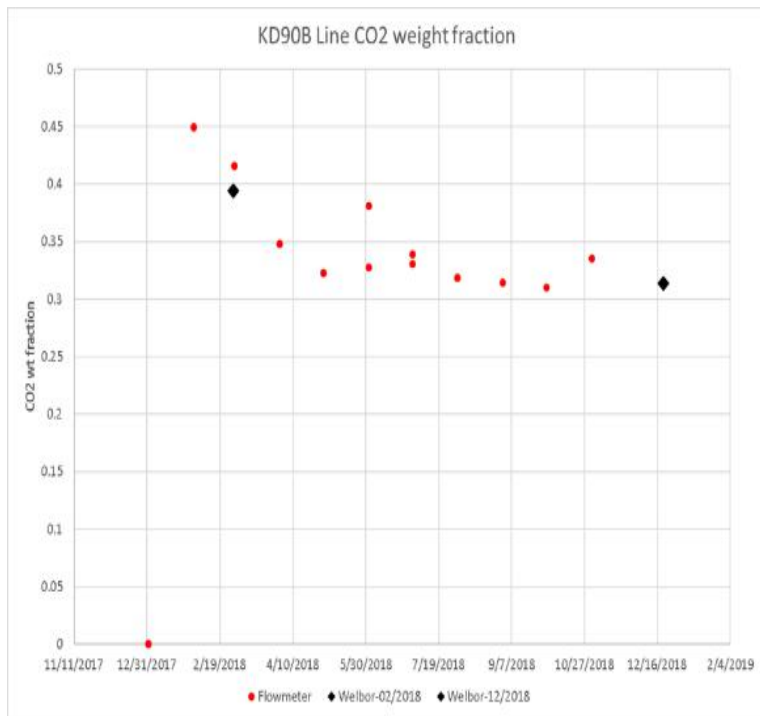
CO₂ toprak ölçümleri ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)



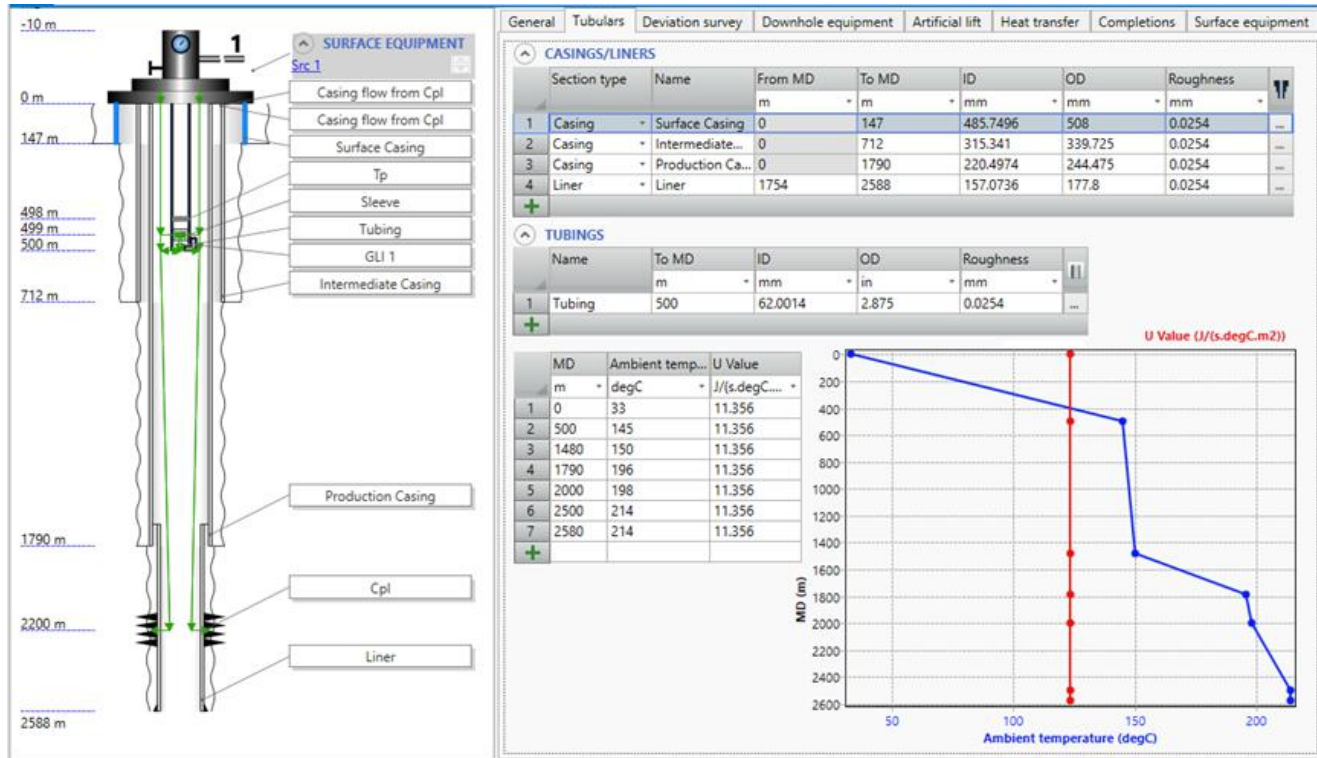


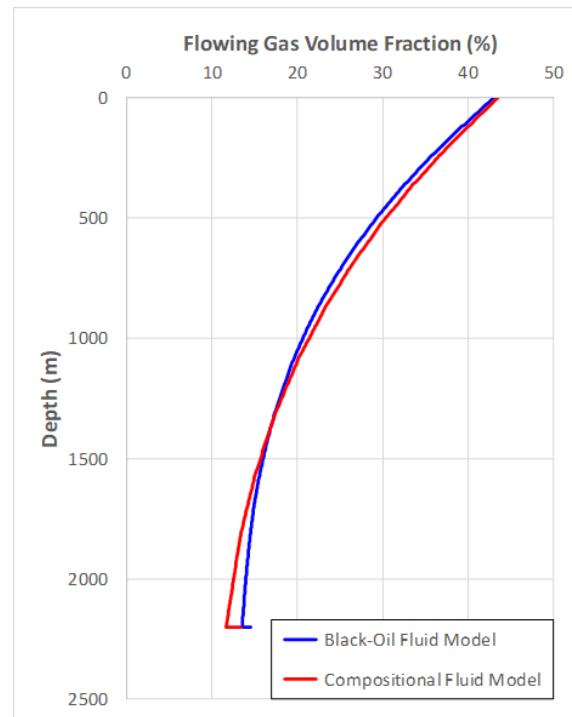
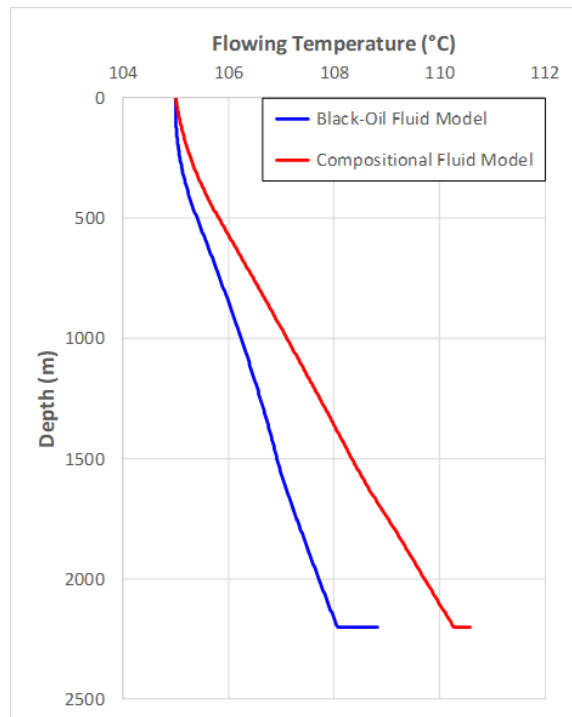
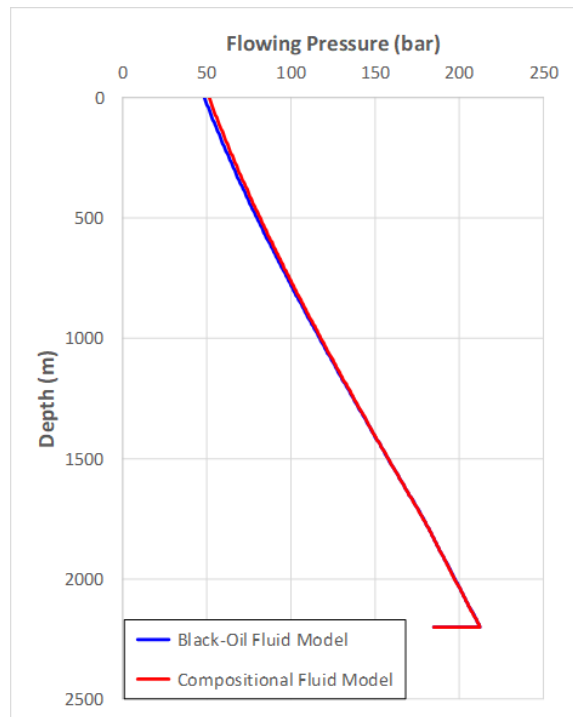


Kuyu CO₂ üretim modelleme

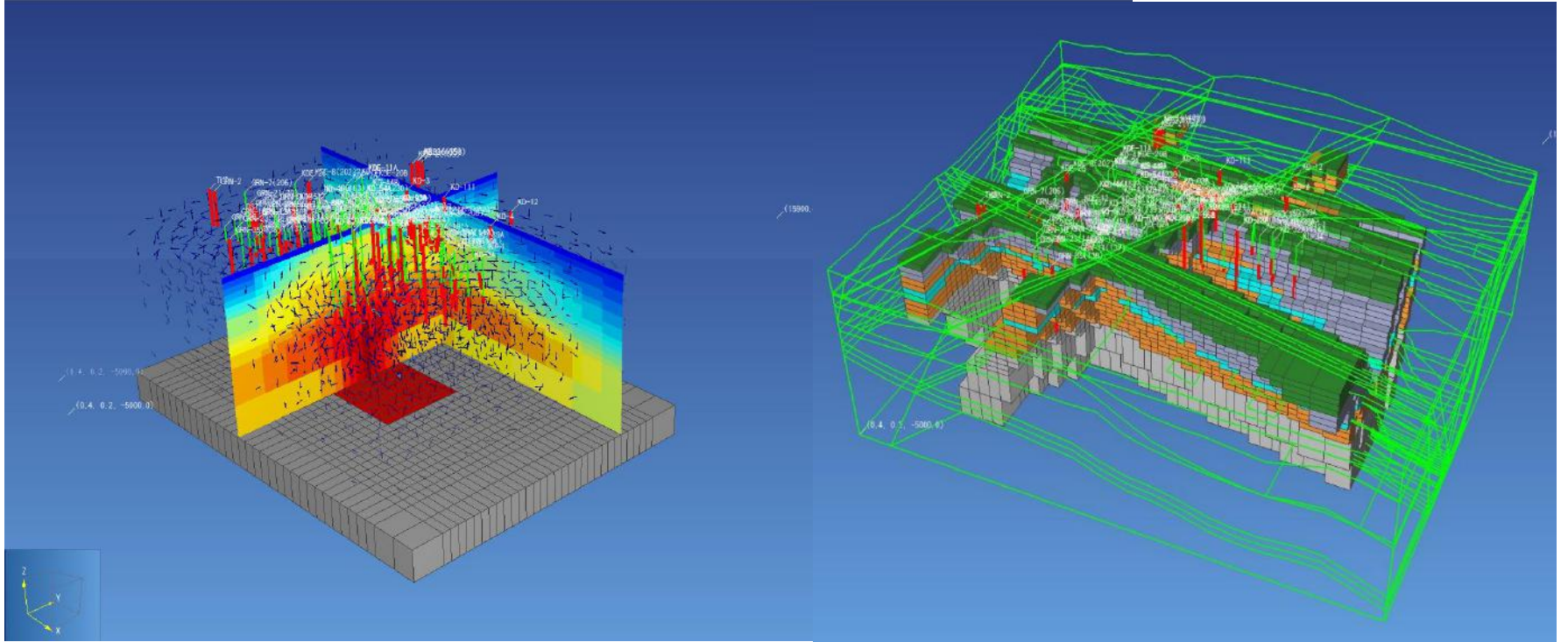


Kuyu CO₂ enjeksiyon modelleme



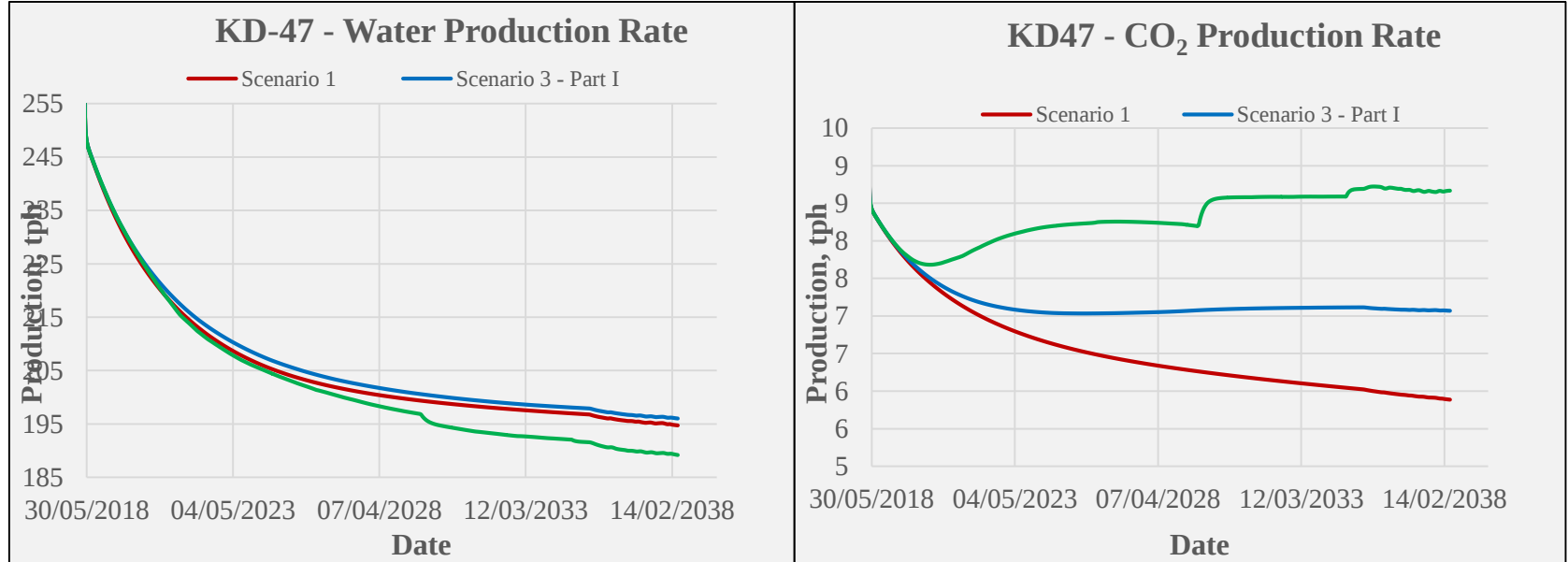


Modelleme Çalışmaları



Senaryo Çalışmaları

- %10 enjeksiyon ~ 91 Milyon ton CO₂





BÖLGESEL ÇEVRE MERKEZİ
REC Türkiye

TEŞEKKÜRLER

Dr Çağlar Sınayuç

Dr Sevtaç Bülbül

Önder Saraçoğlu

Taylan Akın

Ali Başer

Serhat Küçük

Çağdaş Gültekin