

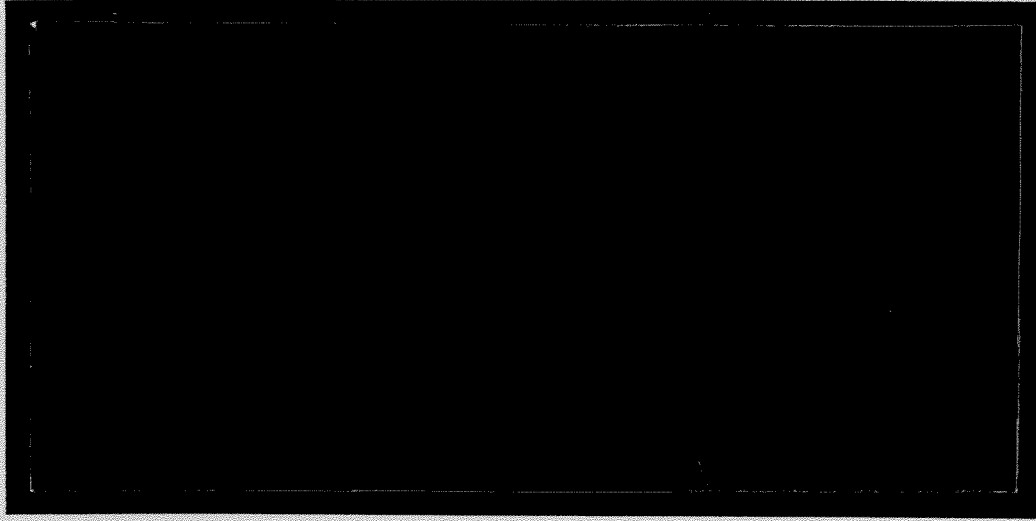


TÜRKİYE BİLİMSEL VE
TEKNİK ARAŞTIRMA KURUMU

THE SCIENTIFIC AND TECHNICAL
RESEARCH COUNCIL OF TURKEY

2003-146

DUP



**Makina, Kimyasal Teknolojiler, Malzeme ve İmalat Sistemleri
Araştırma Grubu**

**Mechanical Engineering, Chemical Technologies, Material
Sciences and Manufacturing Systems Research Grant
Committee**

Application of VAPEX to Carbonate and
Sandstone Reservoirs

MISAG-NSF-1

Doç Dr. Serhat Akın (Proje yürütücüsü)
Prof. Dr. Suat Bağcı
Araş. Gör. Serhat Canbolat

Mayıs 2003

İçindekiler

İçindekiler	ii
Tablolar Listesi	iii
Şekiller Listesi	iv
Sembol ve Kısaltmalar	vii
Abstract	ix
Öz	x
1 Giriş	1
2 Literatür Taraması	3
3 Kapsam	6
4 Yöntem	7
4.1 Deney düzenekleri ve ekipmanlar	7
4.2 Deney Yöntemi	14
5 Ölçeklendirme	16
6 Bulgular ve Tartışma	20
6.1 Buhar Destekli Gravite Drenaj Deneyleri	21
6.2 VAPEX Deneyleri	27
6.3 Buhara n-Bütan Eklentili VAPEX Deneyi	37
6.4 Rezervuarda CO ₂ veya n-bütanın Önceden Bulunduğu Buhar Destekli Gravite Drenaj Deneyleri	41
6.5 Deney Sonrası Asfalt Çökelimi Analizleri	45
6.6 Yatay ve Dikey Enjeksiyon Kuyuları Kullanılan Buhar ve Karbon Dioksit Enjeksiyonu Deneyleri	45
6.7 Kireç Taşı Karotlarla Yapılan CO ₂ veya n-Bütan Eklentili ıslak VAPEX Deneyleri	48
6.8 Kumtaşı kullanılarak yapılan VAPEX Deneyleri	57
6.9 Hele-Shaw VAPEX Deneyleri	66
7 Deneylerin Sayısal ve Analitik Benzetim Sonuçları	70
7.1 Analitik Modelleme Sonuçları	70
7.2 Sayısal Modelleme Sonuçları	79
8 Sonuçlar	92
9 Kaynakça	94
10 Ek A	98
11 Ek B	102
12 Ek C	108

Tablolar Listesi

Tablo	Sayfa
Tablo 1. Deneilerde Kullanılan Karotların Fiziksel Özellikleri.	12
Tablo 2. Karot Denei Koşulları.	13
Tablo 3. Üç Boyutlu Model Denei Koşulları.	13
Tablo 4. Petrolün Ölçülen Yoğunluğu ve Hesaplanan Kinematik Akmazlığı.....	14
Tablo 5. West Sak (Panda ve diğeri, 1989, Goundouin ve Fox, 1991, Sharma ve diğeri, 1989, Forester ve diğeri, 1997), Ugnu (Islam ve diğeri, 1991, Hallam ve diğeri, 1991) ve B.Kozluca (İşsever ve Topkaya, 1998) saha ve petrol özellikleri.	18
Tablo 6. West Sak, Ugnu ve B.Kozluca zaman ve geçirgenlik ölçeklendirme sonuçları.....	19
Tablo 7. Üç Boyutlu Model Denei Sonuçları.	21
Tablo 8. Karot Analiz Sonuçları.....	49
Tablo 9. Hele-Shaw Hücresi Denei Sonuçları.....	67
Tablo 10. Üç boyutlu BDGD deneilerinin analitik modellemesi için $z_d=0.16$ aralığında kullanılan değerler.....	71
Tablo 11. STARS benzetim programında kullanılan dosya.	80
Tablo A-1. Kuyu aralığı $z_d=0.33$ olan normal BDGD deneileri için ölçüm sonuçları.....	98
Tablo A-2. Kuyu aralığı $z_d=0.33$ olan normal BDGD deneileri için üretilen petroldeki asfalt miktarı. 99	
Tablo A-3. Kuyu aralığı $z_d=0.33$ olan normal BDGD deneileri için modelde çökelen asfalt.	100
Tablo A-4. Modelde çökelen asfaltın 2-boyutlu dağılımı.	100
Tablo A-5. Karot Analiz Sonuçları.	101
Tablo C-1. $z_d=0.16$ kuyu aralığındaki normal BDGD deneinin modellenmesi.....	108
Tablo C-2. $z_d=0.16$ kuyu aralığındaki normal BDGD deneinin Butler R.M.'ye göre hesaplanan modelleme eğrileri.....	109

Şekil 34. Dikey kuyu enjeksiyonu buhar ve karbon dioksit enjeksiyonu deneylerinde elde edilen petrol kurtarımı.....	46
Şekil 35. Dikey kuyu enjeksiyonu buhar ve karbon dioksit enjeksiyonu deneylerinde elde edilen petrol/buhar oranı.....	47
Şekil 36. Dikey kuyu enjeksiyonu deneyleri için üretilen petroldeki asfalt miktarı.....	47
Şekil 37. Dikey enjeksiyon yatay üretim ve yatay enjeksiyon yatay üretim (VAPEX) deneylerinde elde edilen petrol kurtarımı.....	48
Şekil 38. Karot Tapalarıyla Yapılan Deneylerde Elde Edilen Toplam Petrol Kurtarımı.....	50
Şekil 39. Karot Tapası ile Yapılan Buhar Enjeksiyonu Sırasında Gözlemlenen Sıcaklık Değişimi.....	51
Şekil 40. Karot Tapası ile Yapılan Islak VAPEX (CO ₂ Enjeksiyonu) Deneyi Sırasında Gözlemlenen Sıcaklık Değişimi.....	52
Şekil 41. Karot Tapası ile Yapılan Islak VAPEX (n-Bütan Enjeksiyonu) Deneyi Sırasında Gözlemlenen Sıcaklık Değişimi.....	52
Şekil 42. Karot Tapası ile Yapılan Buhar Enjeksiyonu Sırasında Gözlemlenen Basınç Değişimi.....	53
Şekil 43. Karot Tapası ile Yapılan Islak VAPEX (CO ₂ Enjeksiyonu) Deneyi Sırasında Gözlemlenen Basınç Değişimi.....	53
Şekil 44. Karot Tapası ile Yapılan Islak VAPEX (n-Bütan Enjeksiyonu) Deneyi Sırasında Gözlemlenen Basınç Değişimi.....	54
Şekil 45. Karot Tapalarıyla Yapılan Deneylerde Gözlemlenen Toplam Su /Petrol Oranı.....	55
Şekil 46. Sadece Buhar Enjekte Edilen Karot Tapalarıyla Yapılan Deneylerde Gözlemlenen Üretilen Petroldeki Asfalt Miktarı.....	56
Şekil 47. Islak VAPEX (CO ₂ ve C ₄ H ₁₀) Karot Tapalarıyla Yapılan Deneylerde Gözlemlenen Üretilen Petroldeki Asfalt Miktarı.....	56
Şekil 48. VAPEX deneylerinde kullanılan Ottawa kum granül dağılımı.....	58
Şekil 49. Sabit basınç ve sabit debi VAPEX deney sonuçları.....	58
Şekil 50. Sabit debi ve sabit basınç deneylerinde üretilen gaz – petrol oranı karşılaştırılması.....	59
Şekil 51. Sabit debi deneylerinde sistem basıncı karşılaştırılması.....	59
Şekil 52. 2.5 psi sabit basınç düşümü VAPEX deneyi: a) 0 dakika; b) 20 dakika; c) 40 dakika; d) 80 dakika. Gri bölgeler CO ₂ , siyah bölgeler petrol.....	60
Şekil 53. 1 psi sabit basınç düşümü VAPEX deneyi: a) 0 dakika; b) 30 dakika; c) 60 dakika; d) 90 dakika; e) 180 dakika; d) 210 dakika. Gri bölgeler CO ₂ , siyah bölgeler petrol.....	61
Şekil 54. 1 psi sabit basınç düşümü VAPEX deneyi: a) 0 dakika; b) 30 dakika; c) 60 dakika; d) 120 dakika; e) 180 dakika; d) 400 dakika. Gri bölgeler CO ₂ , siyah bölgeler petrol.....	62
Şekil 55. 1.25 SCMM sabit debi VAPEX deneyi: a) 0 dakika; b) 30 dakika; c) 60 dakika; d) 120 dakika; e) 180 dakika; d) 300 dakika. Gri bölgeler CO ₂ , siyah bölgeler petrol.....	63
Şekil 56. 1.05 SCMM sabit debi VAPEX deneyi: a) 0 dakika; b) 30 dakika; c) 60 dakika; d) 120 dakika; e) 180 dakika; d) 300 dakika. Gri bölgeler CO ₂ , siyah bölgeler petrol.....	64
Şekil 57. 0.5 psi sabit basınç düşümü VAPEX deneyi: a) 0 dakika; b) 60 dakika; c) 100 dakika; d) 200 dakika; e) 300 dakika; d) 400 dakika. Gri bölgeler CO ₂ , siyah bölgeler petrol.....	65
Şekil 58. 0.6 psi sabit basınç düşümü VAPEX deneyi: a) 0 dakika; b) 60 dakika; c) 120 dakika; d) 240 dakika; e) 360 dakika; d) 480 dakika. Gri bölgeler CO ₂ , siyah bölgeler petrol.....	66
Şekil 59. Propan gazının enjekte edildiği VAPEX deneyleri: üst, Garzan; orta, Raman; alt, B.Raman.....	68
Şekil 60. Bütan gazının enjekte edildiği VAPEX deneyleri: üst, Garzan; orta, Raman; alt, B.Raman.....	69
Şekil 61. Değişik gazların ve yöntemlerin kullanıldığı VAPEX deneyleri.....	70
Şekil 62. Kuyu aralığı $z_d=0.16$ olan normal BDGD deneyinin modellenmesi.....	72
Şekil 63. Kuyu aralığı $z_d=0.33$ olan normal BDGD deneyinin modellenmesi.....	72
Şekil 64. Kuyu aralığı $z_d=0.50$ olan normal BDGD deneyinin modellenmesi.....	73
Şekil 65. Kuyu aralığı $z_d=0.16$ daki buhar/CO ₂ oranı 1:1.29 olan ıslak VAPEX deneyinin modellenmesi.....	74
Şekil 66. Kuyu aralığı $z_d=0.16$ daki buhar/CO ₂ oranı 1:4.41 olan ıslak VAPEX deneyinin modellenmesi.....	74
Şekil 67. Kuyu aralığı $z_d=0.33$ daki buhar/CO ₂ oranı 1:4.41 olan ıslak VAPEX deneyinin modellenmesi.....	75
Şekil 68. Kuyu aralığı $z_d=0.16$ daki buhar/n-C ₄ H ₁₀ oranı 1:1.29 olan ıslak VAPEX deneyinin modellenmesi.....	75
Şekil 69. Önceden n-C ₄ H ₁₀ bulunan modelde $z_d=0.16$ kuyu aralığında yapılan BDGD deneyinin modellenmesi.....	76
Şekil 70. Önceden CO ₂ bulunan modelde $z_d=0.16$ kuyu aralığında yapılan BDGD deneyinin modellenmesi.....	77
Şekil 71. Sadece buhar enjekte edilerek kireçtaşı karotla yapılan deneyin modellenmesi.....	78

v_R	Rezervuar koşullarındaki kinematik akma hızı, m ² /s
ρ_o	Petrol yoğunluğu, kg/m ³
ρ_g	Gaz yoğunluğu, kg/m ³
ξ	Uzaklık, m
α	Termal difüzyivite, m ² /day
θ	Açı
β	Sabit, boyutsuz

Abstract

The objective of this research is to discuss the applicability of VAPEX to carbonate and sandstone heavy oil reservoirs. In order to reach this goal experiments and thermal numerical simulation techniques were used. Different horizontal well combinations, different gases with different injection rates were used in order to create a database that can be used to evaluate pilot and field applications in such fields. The experimental results showed that VAPEX performance is better in homogeneous sandstones compared to heterogeneous carbonates. N-butane injection is somewhat superior to propane and carbon dioxide injection. The experiments were simulated using a thermal numerical simulator where asphaltene deposition is considered. It was observed that asphaltene deposition and the development of vapor chamber is closely related to each other.

1 Giriş

Bilinen petrol rezervlerinin büyük bir bölümünün Türkiye'dekiler gibi düşük gravite (10-13 °API), yüksek akmaçlık (> 600 cp) ve düşük gaz/petrol oranı gibi uygun olmayan petrol özelliklerine sahip olması birincil yöntemler ile üretilebilecek petrol miktarının düşük olmasına neden olmaktadır. Ağır petrollü rezervuarlarda çeşitli yöntemler ile ilave petrol kurtarımı elde etmek mümkündür. Bu metodlar termal ve termal olmayanlar olarak ikiye ayrılabilir. Termal yöntemler, hava ile petrolün yakılması (yerinde yakma) ve devamlı veya döngüsel buhar enjeksiyonu gibi yöntemlerdir (Butler, 1991; Lake, 1989). Son yıllarda yatay kuyu teknolojisinin gelişmesi ile birlikte buhar yardımcı gravite drenajı (SAGD) da popülerlik kazanan bir termal yöntemdir (Ali, 1997). Termal olmayan yöntemler arasında çözücü enjeksiyonu (Wellington ve Vinegar, 1985), karışmayan gaz enjeksiyonu (Lake, 1989) ve yine yatay kuyuların kullanıldığı VAPEX (Butler ve Mokrys, 1991) gibi yöntemler bulunur.

Türkiye'de ve dünyada karışmayan karbon dioksit enjeksiyonu daha önce çeşitli kereler denenmiştir. Örneğin Batı Raman, İkiztepe ve Çamurlu sahalarında yapılan karbon dioksit enjeksiyonu sonucunda belirgin bir artış sağlanabilmiştir (İşsever ve Topkaya, 1998). Amerika Birleşik Devletlerinde, özellikle Alaska ve Kaliforniya'da düşük kurtarım oranlı ağır petrol içeren bir çok saha bulunmaktadır (Godec, 1991; Mahmood ve diğerleri, 1995). Bu çalışmanın amacı VAPEX yönteminin Türkiye'de ve Amerika Birleşik Devletlerinde bulunan bu sahalara uygulanabilirliğini tartışmak, VAPEX yönteminin temel mekanizmalarını anlamaktır. Bu amaca ulaşmak için çeşitli deney düzenekleri kullanılarak deneyler yapılmıştır. Yapılan deneyler CMG STARS (2002) yazılımı kullanılarak geliştirilen bir sayısal model ile karşılaştırılmıştır. Proje sonuçlarının söz konusu sahalarda yapılabilecek pilot ve asıl uygulamalara bir veri tabanı oluşturması için yatay ve dikey enjeksiyon/üretim çiftleri ve enjeksiyon debileri araştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda yatay kuyuların kullanıldığı buhar destekli VAPEX sisteminin sadece karışmayan gaz enjeksiyonu ve dikey kuyuların kullanıldığı buhar ve/veya karışmayan gaz enjeksiyonu sistemlerinden daha avantajlı olduğu görülmüştür.

2 Literatür Taraması

Ağır petrollerin kurtarımında gravite drenajı uygulamaları petrol endüstrisinde oldukça önemlidir. Son yıllarda bu petrollerin akma hızlarının çok yüksek olması nedeniyle buhar destekli gravite drenajı (BDGD) ve döngüsel buhar enjeksiyonu gibi akma hızının ısısal yöntemlerle düşürüldüğü yöntemler oldukça popülerlik kazanmıştır (Chung ve Butler, 1989; Ali, 1997; Butler, 1998; Edmunds; 1998). Döngüsel buhar enjeksiyonunda termal genişleme sonucunda kurtarım artışı sağlanır. Öte yandan iki yatay kuyunun kullanıldığı BDGDde ise üst kuyudan enjekte edilen buhar zamanla bir buhar odası oluşturur. Bu odanın sınırlarına eriştiğinde ise yoğunlaşır ve etrafındaki petrolü ısıtır. Isınan petrol yer çekimi desteğiyle rezervuarın tabanında bulunan yatay üretim kuyusuna doğru akar (Chung ve Butler, 1989). Bu yöntem buhar gereksiniminin çok olmadığı durumlarda ekonomiktir (Ali, 1997). Ancak ısı kayıplarının çok olduğu ince rezervuarlarda ve geçirgenliğin çok düşük olduğu karbonat rezervuarlarda ısı gereksinimi çok artabilir.

Petrolün akma hızını azaltmanın bir diğer yolu da petrolü karbon dioksit, nafta ve hafif yoğunlaşıcı gibi çözücülerle karıştırmaktır. Isı kayıplarının çok olduğu ince rezervuarlarda, alttan su itimli rezervuarlarda ve reaktif minerallerin bulunduğu rezervuarlarda ısısal yöntemlere tercih edilebilir. Çözücü enjeksiyonunda temel üretim mekanizmaları akma hızı düşümü, gravite drenajı, petrol genişmesi ve petrolün yerinde asfalt miktarının azalmasıdır. VAPEX, BDGD yönteminin ısısal olmayan eşdeğeridir. Bu yöntemde de iki yatay kuyunun kullanıldığı gravite drenajı söz konusudur. Üstteki yatay kuyudan enjekte edilen çözücü rezervuarın üstüne doğru genişleyen bir oda yaratır. BDGDde olduğu gibi akma hızı düşen petrol rezervuarın tabanında bulunan yatay üretim kuyusuna akar. Çözücü olarak propan, ethane ve bütan gibi kimyasallar kullanılmıştır. Çözücülerin bir taşıyıcı gazla birlikte de söz konusudur. VAPEX yönteminde kullanılan yatay kuyular arasındaki uzaklık BDGDye oranla daha çoktur.

Bugüne değin yapılan VAPEX çalışmalarının büyük bir bölümünde Hele-Shaw hücreleri kullanılarak yöntemin performansı belirlenmiştir (Butler ve Mokrys, 1989,1991, 1993a, 1993b ve 1993c). Bu çalışmalarda yapılan gözlemler sonucunda

difüzyon katmanı için sabittir. Yukarıda aktarılan model daha sonra Das ve Butler (1998) tarafından geliştirilmiş ve aşağıdaki form elde edilmiştir.

$$q = 2L\sqrt{2kg\phi^{\Omega}\Delta S_oHN} \quad (3)$$

Bu denklemde Ω çimentolaşma faktörüdür. VAPEX parametresi ise aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$a = \sqrt{2kg\phi^{\Omega}\Delta S_oN} \quad (4)$$

Hele-Shaw hücrelerinde yapılan deneylerde gözeneklilik ve doymuşluk farkı sıfır olarak alındığında VAPEX parametresi olarak tanımlanan, a aşağıda belirtilen şekilde bulunur.

$$a = \sqrt{2kgN} \quad (5)$$

Dunn ve diğerlerinin (1989) geliştirdiği VAPEX modelinde ise moleküler difüzyonun konantrasyon bağımlılığı nedeniyle hatalı sonuçlar vermesi olasıdır. Gene aynı modelde kullanılan akma hızı konantrasyon bağıntısı ise her zaman geçerli bir varsayım olmayabilir.

Yukarıda aktarılan modellerin hiçbirinde VAPEX işlemi sonucunda ortaya çıkan asfalt azalması göz önüne alınmamıştır. Ancak çeşitli çalışmalarda (Butler ve Mokrys, 1989,1991, 1993a, 1993b ve 1993c) da belirtildiği gibi VAPEX ile ciddi boyutlarda asfalt düşümü sağlamak olasıdır.

Yukarıdaki modellerden anlaşılan VAPEX işleminin BDGDye oranla daha yavaş petrol kurtarımına neden olacağıdır. İşlemi hızlandırmak için ıslak VAPEX denilen yöntem önerilmiştir (Butler ve Mokrys, 1993a). Bu işlemde 80 °C sıcaklıkta su veya buhar gözenekli ortama çözücü ile birlikte enjekte edilir. Ancak bu yöntemde de kurtarım kuru VAPEX yani sadece çözücü enjeksiyonun yapıldığı yöntem ile aşağı yukarı aynı olmuştur.

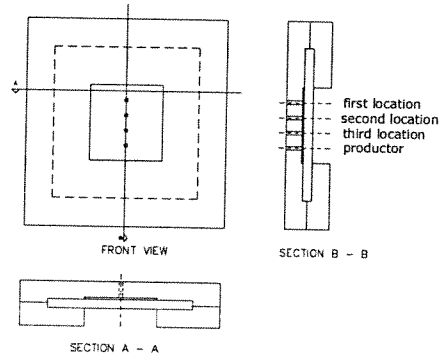
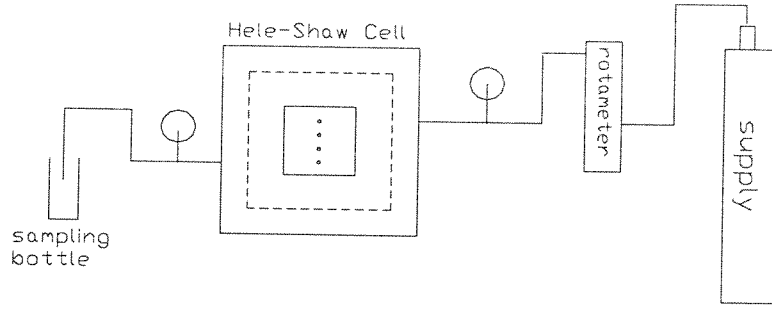
Sonuç olarak VAPEX yönteminin başarısı kütle transferi, kapiler imbibisyon, yüzey yenilenmesi ve çözücü buharı odası yükselimi gibi fiziksel süreçlerin doğru ve başarılı oluşumuna bağımlıdır. VAPEXin temel üstünlüğü sıvı yerine buhar halinde çözücü kullanımında gözlemlenir (Edmunds, 1999). Çözücü buharı yoğunluk farkının büyük olması nedeniyle daha büyük bir süpürme sağlamaktadır. Sistem

4 Yöntem

4.1 Deney düzenekleri ve ekipmanlar

Türk tarafında yapılan deneyler kırılmış kireç taşı ve kireç taşı tapaların kullanıldığı iki ayrı laboratuvar düzeneği ve bir adet Hele-Shaw hücresi imal edilerek yapılmıştır. Her iki gözenekli ortam deney düzeneği de benzer şekilde tasarlanmış ve dört ana bölümden oluşturulmuştur: 1-Enjeksiyon Bölümü, 2-Rezervuar Modeli ve Karot Hücresi, 3-Üretim Bölümü, 4-Veri Toplama ve Kontrol Bölümü. Gözenekli ortam deney düzenekleri ve Hele-Shaw hücresi düzeneği aşağıda belirtilen ekipmanlardan oluşturulmuş ve sırasıyla Şekil 2, 3 ve 4 te verilmiştir.

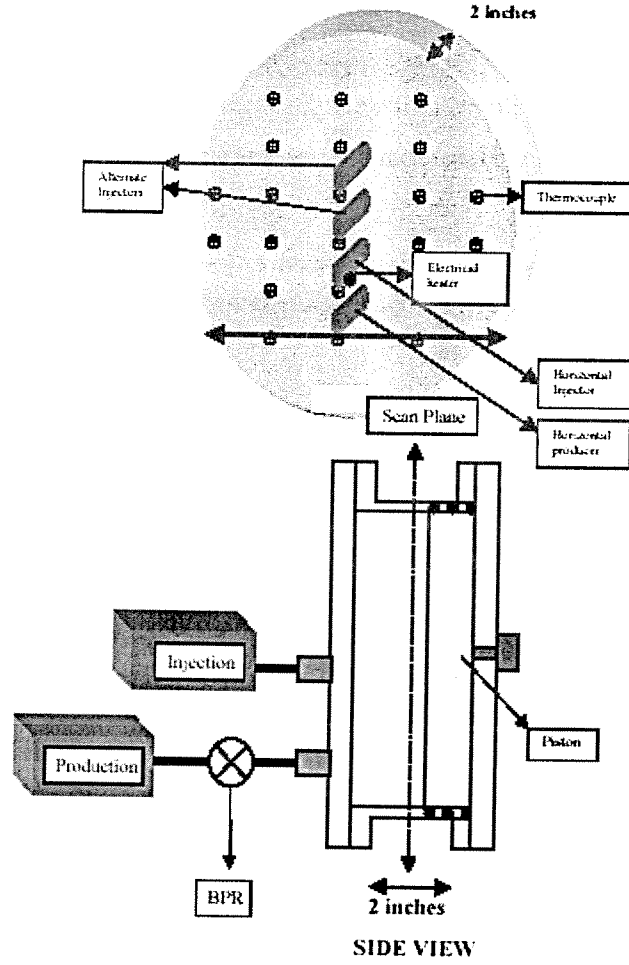
1. Buhar Jeneratörü
2. Enjeksiyon Hattı
3. Akış Ölçer
4. Üretim Hattı
5. Seperatör
6. Toplama Kabı
7. CO₂-C₄H₁₀ Tüpü
8. Termokupl
9. Yatay Enjeksiyon Kuyusu
10. Yatay Üretim Kuyusu
11. Kişisel Bilgisayar
12. Veri Toplayıcı
13. Isıtıcı
14. 3-Boyutlu Model ve Kuyu Lokasyonları
15. Enjeksiyon Kuyusu Lokasyonları
16. Karot Hücresi
17. Vana



Şekil 3-2. Hele-Shaw hücresi deney düzeneği (üst), hücre detay çizimi (alt).

1-Enjeksiyon Bölümü: Bu bölümde buhar jeneratörü, CO_2 , $\text{n-C}_3\text{H}_8$ $\text{n-C}_4\text{H}_{10}$ tüpleri, kütle debisi kontrollü ölçer, vanalar ve bir de basınç transduceri bulunmaktadır. Islak VAPEX deneylerinde buhar yoğuşumunu önlemek için hatları 140 C de tutan bir sıcaklık kontrol cihazı ve bir adet termokupl da gene bu bölümde kullanılmıştır. Hatlar ısı kaybını engellemek amacıyla izolasyon maddesi ile izole edilmiştir.

2-Rezervuar Modeli ve Karot Hücresi: 30x30x7.5 cm ebatlarında demir malzemeden üretilen rezervuar modeli ısı kayıplarını önlemek için perlit doldurulan bir sabit sıcaklık hücresinin içine sığacak şekilde geliştirilmiştir. Model hem yatay hem de dikey kuyuları modelleyebilecek şekilde yapılmıştır. Dikey kuyular modelin



Şekil 4. Amerikan tarafında yapılan deneylerde kullanılan hücre (üst) ve deney düzenneği (alt).

Türk tarafında geliştirilen Hele-Shaw deney düzenneği de benzer şekilde oluşturulmuştur (Şekil 3-2). Bu düzenneğin temel parçaları aşağıda sıralanmıştır.

1. **Enjeksiyon Bölümü:** Bu bölümde buhar jeneratörü, CO₂, propan ve n-bütan enjeksiyon tüpleri ve akış ölçer, vanalar ve bir de basınç ölçer bulunmaktadır. Giriş hatları sabit sıcaklıkta tutan sıcaklık kontrol cihazı ve bir adet termokupl da gene bu bölümde kullanılmaktadır. Hatlar ısı kaybını engellemek amacıyla cam yünü (izocam) kullanarak izole edilmiştir.

Tablo 2. Karot Deney Koşulları.

Deney Türü	Toplam Gözenek Hacmi, cc	Ortalama Buhar Enjeksiyon Basıncı psi	Ortalama Enjeksiyon Sıcaklığı, °C
Buhar	107.54	47.52	140.44
Buhar/CO ₂ 1:1.29	115.49	46.46	142.81
Buhar/n-C ₄ H ₁₀ 1:1.29	119.05	45.47	138.38

Tablo 3. Üç Boyutlu Model Deney Koşulları.

Deney No	Türü	Deney Süresi dakika	Ortalama Enjeksiyon Basıncı psi	Ortalama Enjeksiyon Sıcaklığı °C	Jeneratör buhar üretim debisi cc/dak
1	BDGD z _d =0.16	240	46	139	36.4
2	BDGD z _d =0.33	360	50.67	134	47.34
3	BDGD z _d =0.50	530	47	144	39
4	Yatay CO ₂	500	22,5	50	----
5	Ön. C ₄ H ₁₀ z _d =0.16	215	37	144	22
6	Ön. CO ₂ z _d =0.16	300	50	139	46
7	CO ₂ 1.29 z _d =0.16	300	38	140	24
8	C ₄ H ₁₀ 1.29 z _d =0.16	300	37	141	22
9	CO ₂ 4.41 z _d =0.33	440	46	143	47.34
10	CO ₂ 4.41 z _d =0.16	566	50	140	36.4

petrolü ile doyurulmuş ve daha sonra sırasıyla buhar, buhar-CO₂ ve buhar-nC₄H₁₀ deneyleri model sıcaklığı yaklaşık 50°C civarında seçilerek yapılmıştır.

Hele-Shaw hücresiyle yapılan deneylerde sırasıyla üç değişik gaz (CO₂, bütan ve propan), üç değişik debi (20, 40 ve 80 ml/dakika) ve üç değişik petrol (Garzan, Raman ve B.Raman) kullanılmıştır. Tüm deneylerde önce sistem petrolle doldurulmuş ve sabit debide enjeksiyon yapılmıştır. Deneyler petrol üretimi bitene değin sürdürülmüştür. Üretilen petrolde ve sistemde kalan petroldeki asfalt miktarı Kokal ve diğerlerinin (1992) titrasyon yöntemiyle yapılmıştır.

Üç boyutlu fiziksel model VAPEX deneylerinde jeneratör çıkış basıncı yaklaşık 40 psia (Ek B), sıcaklığı yaklaşık 140 ile 150 °C olarak üretilen buhar, yoğunlaşmayı önlemek için ısıtılan bir hat içinden basılmıştır. Bu hatta daha sonra akış ölçerden geçirilerek daha önceden belirlenmiş debilerde CO₂ veya n-C₄H₁₀ ilave edilmiştir. Islak VAPEX deneylerine buhar/petrol oranı fazlaca yükselip kurtarımın düşmeye başlamasına kadar diğer deneylerde ise kurtarımın iyice azalmasına değin devam edilmiştir. Asfalt ölçümü üretilen petrolden ve deney düzeneğinin 9 ayrı bölümünden alınan kum numunelerine uygulanmış ve kullanılan metodun verimliliği ile model süpürmesi gözlenmeye çalışılmıştır. Bu ölçümler Kokal ve diğerlerinin (1992) titrasyon yöntemiyle yapılmıştır. Modelden alınan 5 gr kumlu petrolün içindeki asfaltın çökmesi sağlandıktan sonra tartılmış, daha sonra toluene ile sadece kum kalana kadar yıkanmış ve sonra tekrar tartılarak petrolün içindeki asfalt miktarı yüzde ağırlık cinsinden hesaplanmıştır. Böylece deney sonrası modelin içinde çökelen asfalt durumu da analiz edilmiştir (Ek A).

Yukarıda geliştirilen ölçeklendirme denklemiyle gaz difüzyonunun bilinmesi durumunda model geçirgenliği saha geçirgenliğine ölçeklendirilebilecektir. Aşağıda verilen Hayduk and Minhas amirik korelasyonun (Reid ve diğerleri, 1987) kullanımıyla model ve saha gaz difüzyonları elde edilebilir.

$$D_{AB} = 13.3 \times 10^{-8} \frac{T^{1.47} \mu_B^\epsilon}{V_A^{0.71}} \quad (13)$$

Bu denklemde D_{AB} B çözücüsünün A çözüleni içindeki düşük konsantrasyonlarda difüzyon değerini, T sıcaklığı, μ_B B çözücüsünün akma viskozitesi, V_A ise A çözüleninin kaynama sıcaklığındaki molar hacimidir. Akma viskozitesi üssü, ϵ ise aşağıdaki denklemden elde edilir.

$$\epsilon = (10.2/V_A) - 0.791 \quad (14)$$

Molar hacim elde etmek için ise Tyn ve Calus yöntemi kullanılmıştır (Reid et al., 1987). Bu yöntemin 32 değişik karışım için kaynama sıcaklığında ölçülen ortalama hatası yaklaşık %2 olarak bilinmektedir.

$$V_A = 0.285 V_C^{1.048} \quad (15)$$

Bu denklemde V_C kritik hacimdir.

West Sak, Ugnu ve Batı Kozluca sahalarında yapılabilecek VAPEX uygulamalarında CO₂ gazı kullanılacağı düşünülürse $V_{C(CO_2)} = 93.9$ (Reid ve diğerleri, 1987) olur ve molar hacim, $V_A = 33.28 \text{ cm}^3/\text{mol}$ olarak hesaplanır. Bu değerle akma viskozitesi üssü ϵ - denklem 14'ten -0.48 olarak elde edilir. Tablo 5'te verilen saha petrol verileri kullanılarak West Sak, Ugnu ve B.Kozluca sahaları için difüzyon değerleri sırasıyla $9.97 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ - $9.39 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, $2.36 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ - $1.92 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ ve $5.53 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ olarak hesaplanmıştır. Türk tarafında yapılan deneylerde sistem sıcaklığı benzetildiği ve B.Kozluca petrolü kullanıldığı için deneysel difüzyon değeri aynen korunmuştur. Ancak Amerikan tarafında yapılan deneylerde deney sıcaklığı 22°C olarak seçilmiş ve akma viskozitesi değeri 0.2 Pa-s olan beyaz mineral yağ kullanılmıştır. Bu sistemde difüzyon değeri $3.2 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ olarak tahmin edilmiştir. Bu difüzyon değerleri kullanılarak Tablo 6'da verilen ölçeklendirme değerleri hesaplanmıştır.

Tablo 6. West Sak, Ugnu ve B.Kozluca zaman ve geçirgenlik ölçeklendirme sonuçları.

	WEST SAK	UGNU	B.KOZLUCA
k/granül çapı	0.239/21	0.002/1.9	-
darcy/micron	7566/3665	437/881	
(t_F / t_M) yıl/saat	0.255-7.22	8.09 - 288	93.4

“Turtuosity” değerinin 2 alınması ile Tablo 6 verilen granül çapları ile fiziksel model koşulları rezervuar koşullarını ölçeklendirilebilir. Batı Kozluca sahası çatlaklı kireçtaşı bir saha olduğu için bu bağlamda ölçeklendirmenin uygun olmayacağı düşünülmüştür.

Son ölçeklendirme koşulu olarak gaz-petrol oranı alınmıştır. Kara petrol modeli kullanılarak kütle dengesi yazıldığında aşağıdaki durum elde edilir (Dake, 1978).

$$\frac{d}{dt} \left(\phi \left[\frac{S_g}{B_g} + \frac{S_o}{B_o} R_s \right] \right) + \bar{\nabla} \left(\frac{R_s}{B_o} \bar{u}_o + \frac{\bar{u}_g}{B_g} \right) = 0 \quad (17)$$

Bu denklemde, B formasyon hacim faktörü, R_s çözünen gaz-petrol oranı ve u akış debisidir. Denlemlerde g , gaz ve o petrolün özelliklerini göstermektedir. Denklemim ilk terimini t/t' , ikinci terimini L/L_c çarpıldığında aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\frac{d}{t' dt_D} \left(\phi \left[\frac{S_g}{B_g} + \frac{S_o}{B_o} R_s \right] \right) + \frac{d}{L dx_D} \left(\frac{R_s}{B_o} \bar{u}_o + \frac{\bar{u}_g}{B_g} \right) = 0 \quad (18)$$

Toplam hız, u_T ilk çözünen gaz-petrol oranı, R_{si} , ve ilk formasyon hacim faktörü, B_{oi} kullanarak denklem yeniden yazılabilir.

$$\frac{d}{t' dt_D} \left(\phi \left[\frac{S_g}{B_g} \frac{B_{oi}}{R_{si}} + \frac{S_o}{B_o} \frac{B_{oi}}{R_{si}} R_s \right] \right) + \frac{\bar{u}_T}{L} \frac{R_{si}}{B_{oi}} \frac{d}{dx_D} \left(\frac{R_s}{R_{si}} \frac{B_{oi}}{B_o} \bar{u}_o + \frac{\bar{u}_g}{B_g} \frac{B_{oi}}{R_{si}} \frac{1}{\bar{u}_T} \right) = 0 \quad (19)$$

Bu denklemde zamana bağımlı olmayan terimler türev dışına alındığında ise aşağıdaki denklem durumuna gelinir.

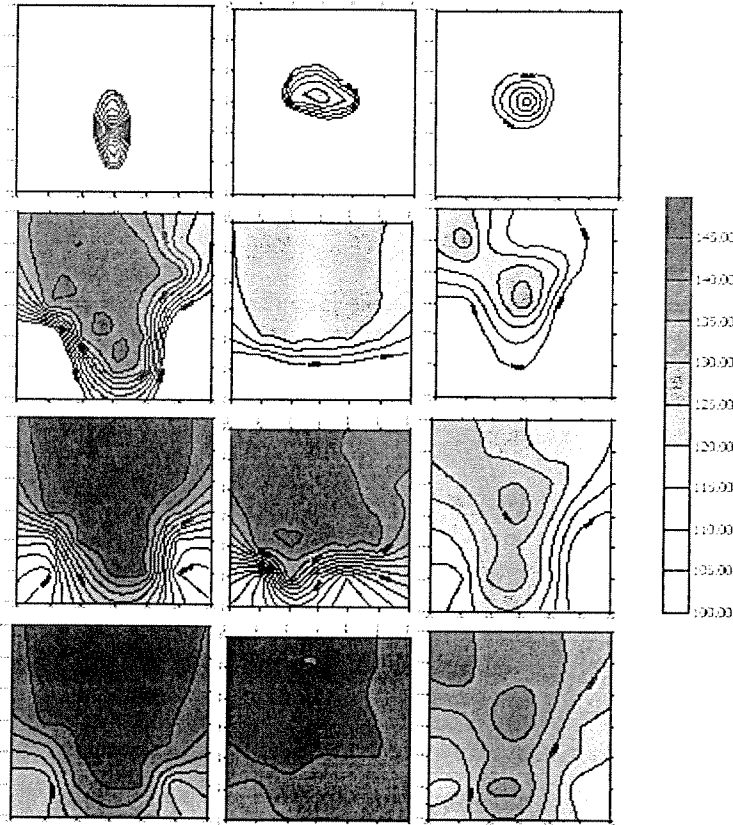
$$\frac{LR_{si}}{U_T B_{oi}} \frac{d}{t' dt_D} \left(\phi \left[\frac{S_g}{B_{gD}} + \frac{S_o}{B_{oD}} R_{sD} \right] \right) + \frac{R_{si}}{B_{oi}} \frac{d}{dx_D} \left(\frac{R_{sD}}{B_{oD}} \bar{u}_{oD} + \frac{\bar{u}_{gD}}{B_{gD}} \frac{1}{R_{si}} \right) = 0 \quad (20)$$

Tablo 7. Üç Boyutlu Model Deney Sonuçları.

Deney Tipi	Deney Süresi dakika	Hacimsel gaz/buhar oranı	Petrol Kurtarımı % OYP	Toplam buhar/petrol oranı sse. cc/cc
BDGD $z_d=0.16$	240	0/1	67.41	1485.13
BDGD $z_d=0.33$	360	0/1	50.67	4130.25
BDGD $z_d=0.50$	530	0/1	59.31	608.75
VAPEX $z_d=0.16$	500	0/1	8.35	-
Önceden CO ₂ bulunan BDGD $z_d=0.16$	300	0/1	54.47	229.02
Önceden C ₄ H ₁₀ bulunan BDGD $z_d=0.16$	215	0/1	58.52	2000.00
Buhar/CO ₂ oranı 1:4.41 olan ıslak VAPEX $z_d=0.33$	440	4.41/1	63.20	1365.09
Buhar/CO ₂ oranı 1:1.29 olan ıslak VAPEX $z_d=0.16$	300	1.29/1	60.74	1669.35
Buhar/CO ₂ oranı 1:4.41 olan ıslak VAPEX $z_d=0.16$	566	4.41/1	49.93	39.51
Buhar/C ₄ H ₁₀ oranı 1:1.29 ıslak VAPEX $z_d=0.16$	300	1.29/1	36.17	270.82

6.1 Buhar Destekli Gravite Drenaj Deneyleri

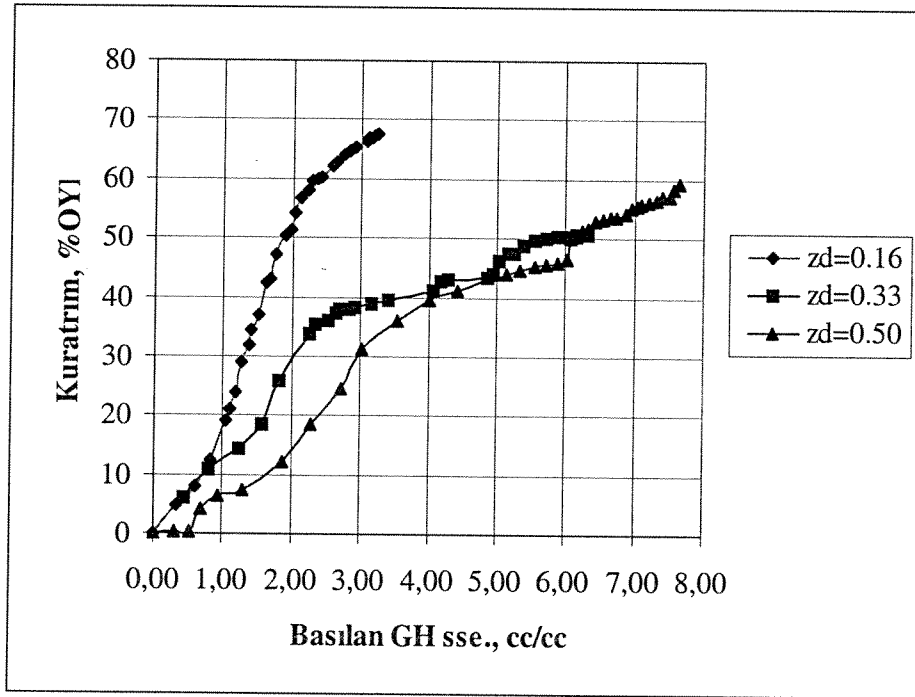
Buhar destekli gravite drenaj deneyleri en uygun üretim-enjeksiyon kuyu aralığının saptandığı deneylerle başlamıştır. BDGD uygulamasına başlandıktan hemen sonra buhar odası rezervuarda büyüyecektir. Butler'a (1991) göre buhar odasının ilk önce yukarı doğru daha sonra yanlara doğru genişlemesi beklenmelidir. Buhar odası sınırında buhar yoğunlaşır ve ısı petrole transfer olur. Sıvılaştıran buhar ve



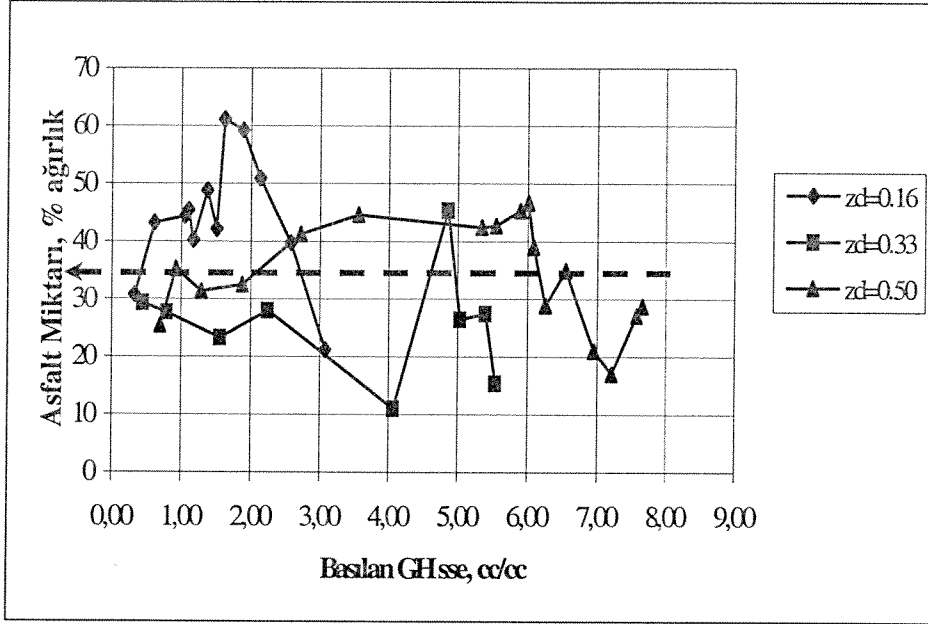
Şekil 5. Farklı kuyu aralıklı normal BDGD deneylerinin basılan gözenek hacmine (GH) göre model sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$) dağılımı: basılan GH 0.32, 0.60, 0.80, 1.2 $z_d=0.16$ (sol), basılan GH 0.43, 0.78, 1.05, 1.25 $z_d=0.33$ (orta), basılan GH 0.50, 0.69, 0.92 ve 1.29 $z_d=0.50$ (sağ).

Kuyu uzaklıkları arasındaki verimi ve buhar odası oluşum hızını ölçmek için boyutsuz buhar odası alanı grafikleri çizilmiştir (Şekil 6). Boyutsuz buhar odası alanı, deney modelinin içinde buharın 100°C üzerinde bulunduğu bölgenin alanının modelin toplam yüzey alanına ($30 \times 30 \text{cm}^2$) bölünmesiyle bulunmuştur. Böylece boyutsuz buhar odası değerinin en çok 1 olması sağlanmıştır. Bütün kuyu uzaklıkları için oda oluşum eğrileri benzerlik göstermekle birlikte düşük zamanlar için oluşumun çok hızlı olduğu gözlemlenmiştir. Buhar odası gelişimi buhar odası modelin tavanına gelene kadar zamanın doğrusal bir fonksiyonu olarak devam etmekte, daha sonra ise buhar odasının modelin önce kenarlarına ve sonrada tabanına ulaşması nedeniyle zamanın üstsüsel bir fonksiyonu haline gelmektedir. En büyük enjeksiyon-üretim kuyu aralığında ($z_d = 0.5$) enjeksiyon kuyusunun deney modelinin

edilen petroldeki asfalt miktarında tüm kuyu aralıkları için erken zamanlarda keskin bir düşüş gözlemlendi.(Şekil 10). Bu düşüş petrolün içindeki asfaltın kayaç matrisinde soğurulduğunu (adsorption) ve petrolün kısmi bir kalite artış trendine girdiğini göstermektedir. Daha sonra buhar odası büyüdükçe üretilen petroldeki asfalt ilk değerine ulaşmadan artmaya devam etmektedir. Bu da asfalt soğurulmasının buhar enjeksiyonu sırasında petrol üretimi sonucunda oluşan yeni bölgelere kayarak devam ettiğini göstermektedir. Buhar odasının büyümeye devam etmesi kayaç matrisinde soğurulan asfaltların çözülmesiyle üretilen asfalt miktarının bir miktar artmasıyla açıklanabilir. Üretilen petroldeki asfalt miktarı soğurulma zamanları boyutsuz kuyu derinliğine bağlı olarak değişen buhar odası oluşum hızıyla artış göstermektedir. Deney sonunda üretilen petrol içindeki asfalt miktarı tüm boyutsuz kuyu derinlikleri için ilk değer yaklaşık üçte ikisi kadar olmaktadır.



Şekil 7. Normal BDGD deneyleri için petrol kurtarım miktarının (%) basılan gözenek hacimine göre değişimi.

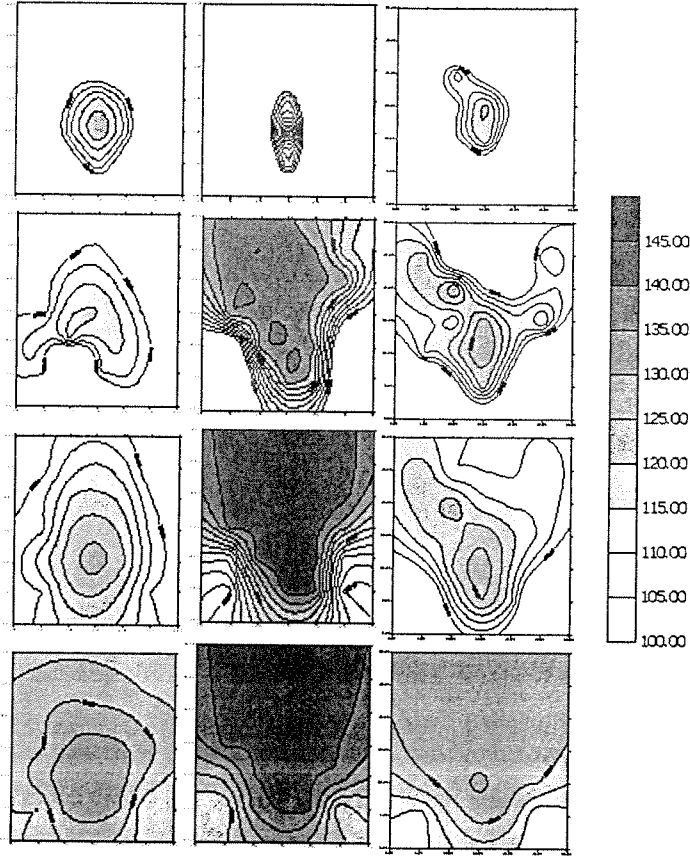


Şekil 10. Normal BDGD deneyleri için değişik boyutsuz kuyu derinliklerinde ($z_d=0.16, 0.33$ ve 0.5) üretilen petroldeki asfalt miktarı.

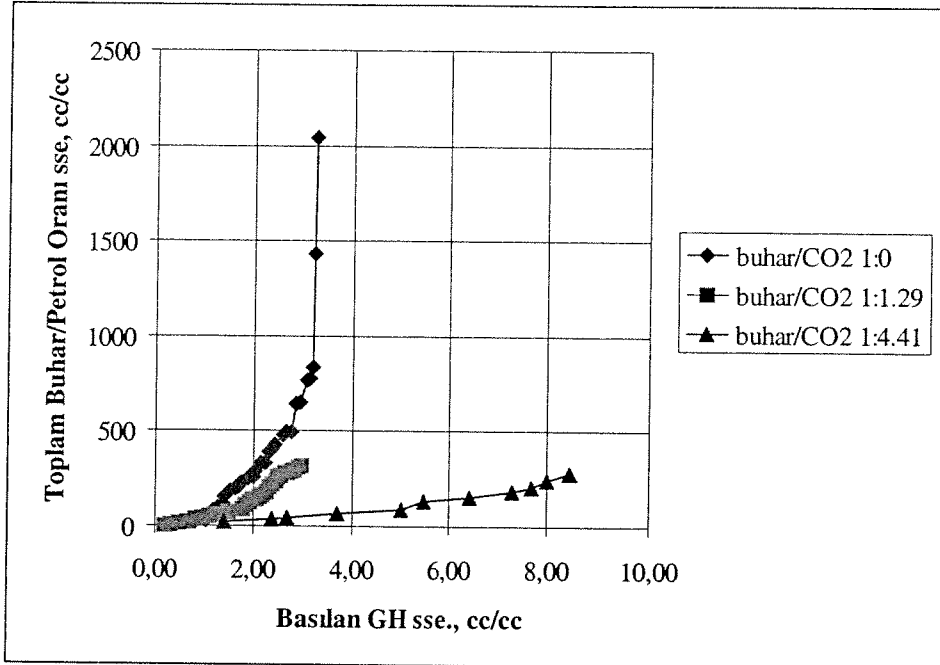
6.2 VAPEX Deneyleri

Normal BDGD uygulamalarında en verimli üretim en düşük boyutsuz enjeksiyon-üretim kuyu aralığında ($z_d=0.16$) saptandığından, VAPEX deneyleri aynı kuyu aralığı kullanılarak buhar/ CO_2 hacimsel oranı 0 (kuru VAPEX) ile 4.41 (ıslak VAPEX) arasında değiştirilerek yapıldı. Böylece hem buharın ısıtma gücünde verimlilik artışı ve ilave gaz ile daha az buhar kullanımı hedeflendi. Literatürde, kumtaşı yapılarında çözücü olarak CO_2 kullanıldığında ağır petrol kurtarımının artırdığı daha önceleri doğrusal deney modellerinde gösterilmiştir (Hornbrook ve diğerleri, 1991). Benzer sonuçlar 3 boyutlu deneysel modellerde de dikey kuyular kullanımıyla elde edilmiştir (Bagci ve Gumrah, 1997). BDGD uygulamalarında yüksek miktardaki buharın maliyeti çok arttırması nedeniyle buhara az miktarda metan gibi çözücü gaz ilavesinin buhar odasında ısısal verimliliği geliştirmesi teorik olarak mümkündür.

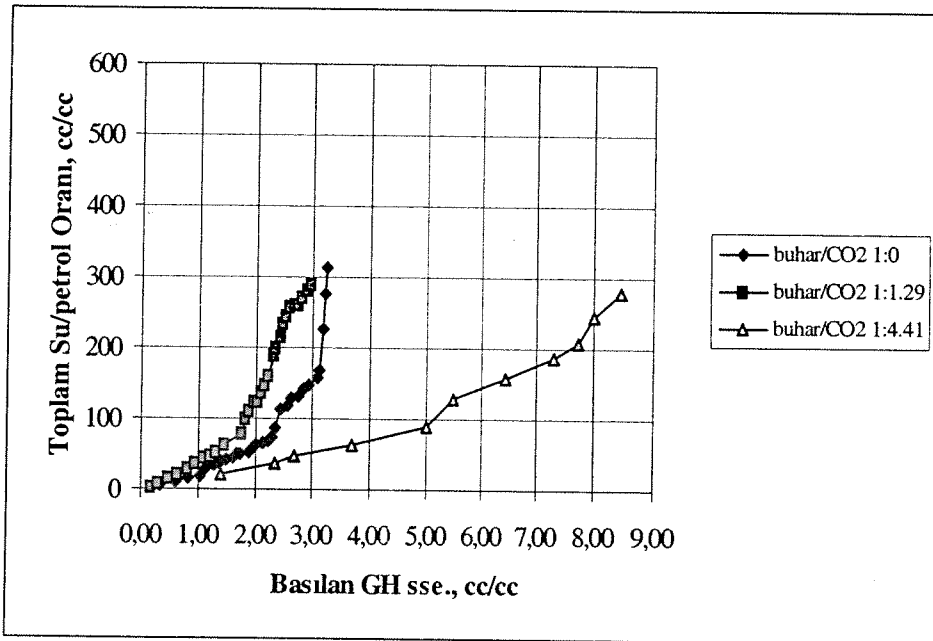
En düşük kuyu aralığında ($z_d=0.16$) iki değişik buhar/ CO_2 hacimsel oranda (1:1.29, 1:4.41) deneyler yapıldı. Buhara katılan CO_2 miktarının artması sistemin



**Şekil 11. Farklı hacim oranlarında VAPEx deneyleri için sıcaklık (°C) dağılımı:
basılan GH 0.32, 0.60, 0.80, 1.20, yalnız buhar (sol), basılan GH 0.38, 0.63, 1.16,
1.65, buhar/CO₂ oranı 1:1.29 (orta) ve basılan GH 0.95, 1.88, 2.52, ve 3.83
buhar/CO₂ oranı 1:4.41 (sağ) zd=0.16**



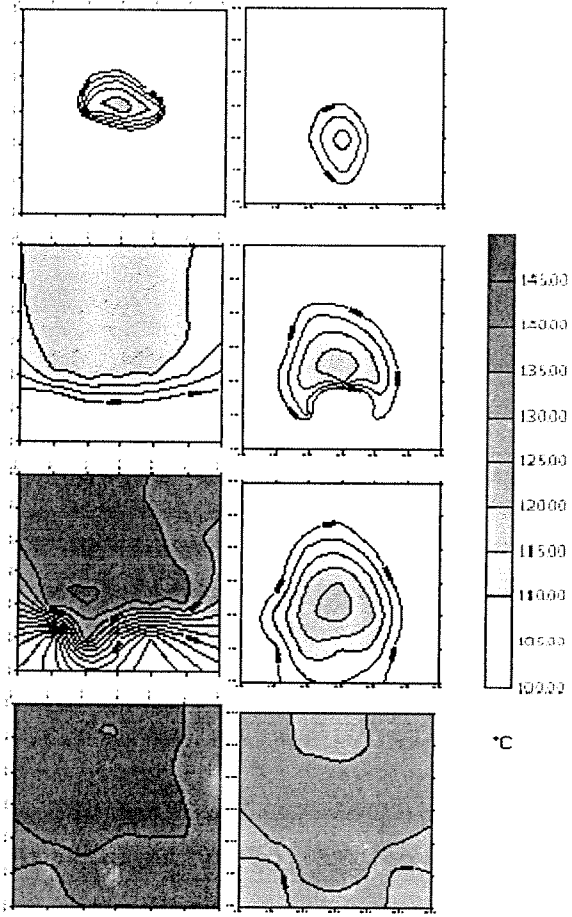
Şekil 14. VAPEX deneyleri için toplam buhar/petrol oranı $z_d=0.16$



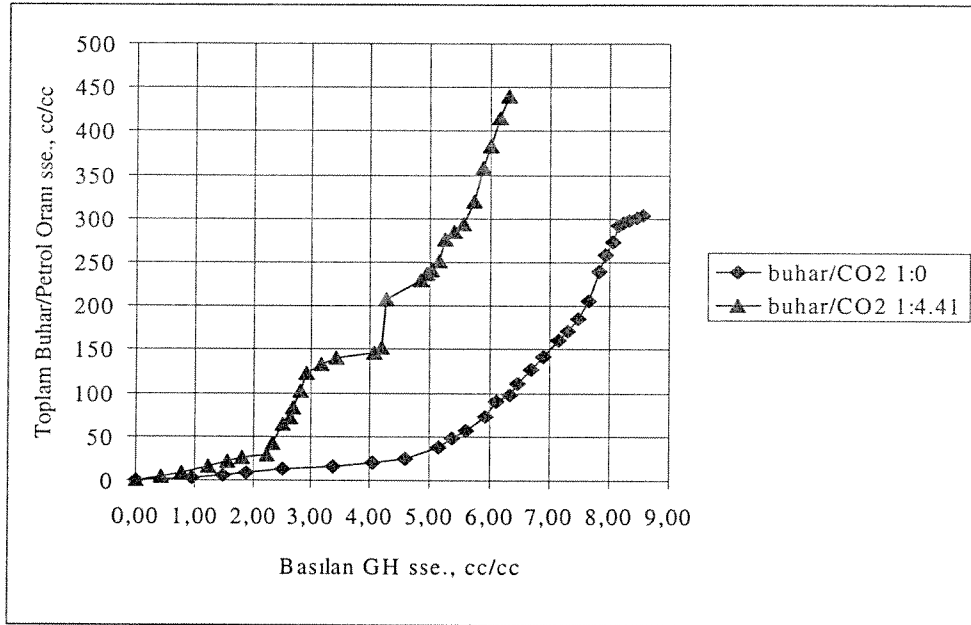
Şekil 15. VAPEX deneyleri için toplam su/petrol oranı $z_d=0.16$

Üretilen petroldeki asfalt miktarı sadece buharlı deney ile buhar/CO₂ oranının (1:1.29) olduğu deneyde ilk zamanlarda benzer bir davranış gösterdiği gözlemlendi

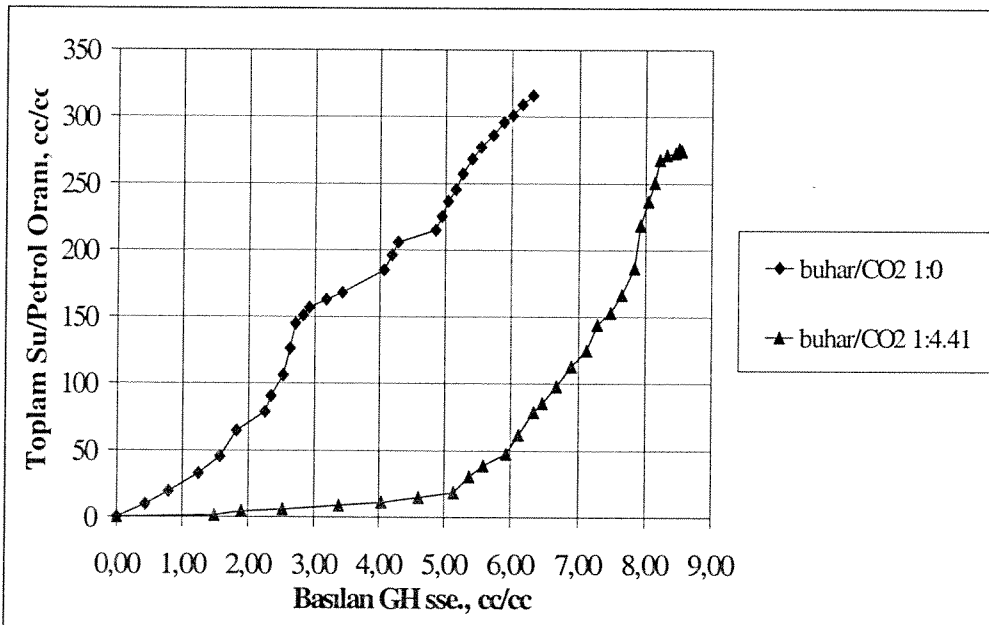
gözlemlenmiştir. Sonuç olarak enjeksiyon-üretim kuyu aralığının artması durumunda sisteme daha fazla CO₂ enjekte edilerek düşük enjeksiyon-üretim kuyu aralığında elde edilen sonuçlara benzer sonuçlar da elde etmek mümkün olmaktadır.



Şekil 17. Farklı hacim oranlarında VAPEx deneyleri için sıcaklık dağılımı: basılan GH 0.43, 0.79, 1.05, 1.25, yalnız buhar (sol) ve basılan GH 0.45, 1.40, 2.36, 2.67 buhar/CO₂ oranı 1:4.41 (sağ) zd=0.33.



Şekil 20. VAPEX deneyleri için toplam buhar/petrol oranı $z_d=0.33$.



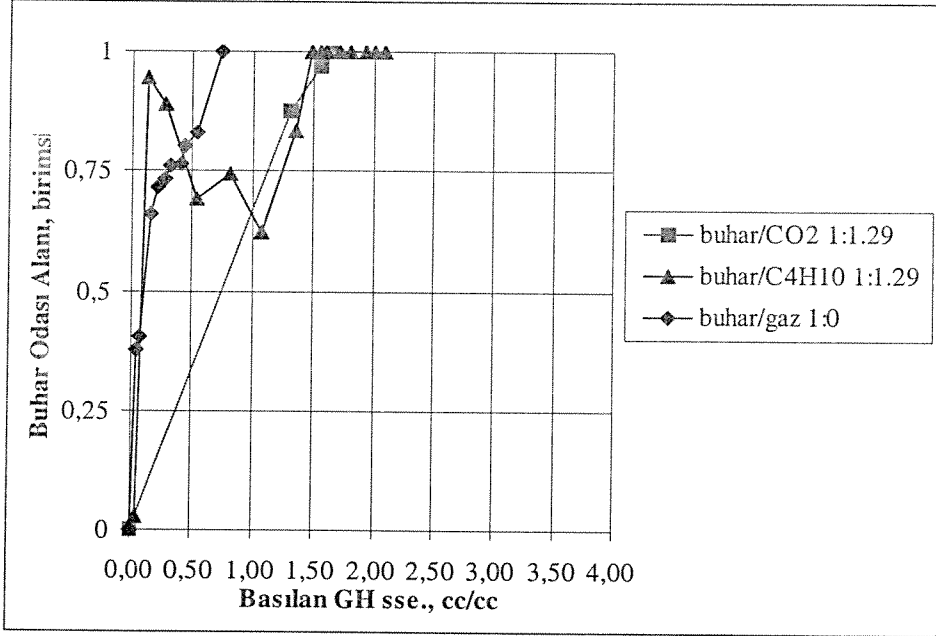
Şekil 21. VAPEX deneyleri için toplam su/petrol oranı $z_d=0.33$

Üretilen petroldeki asfalt miktarı (Şekil 22) bu kuyu aralığı için de sadece buhar enjeksiyonu deneyinde elde edilene benzer bir davranış göstermemektedir.

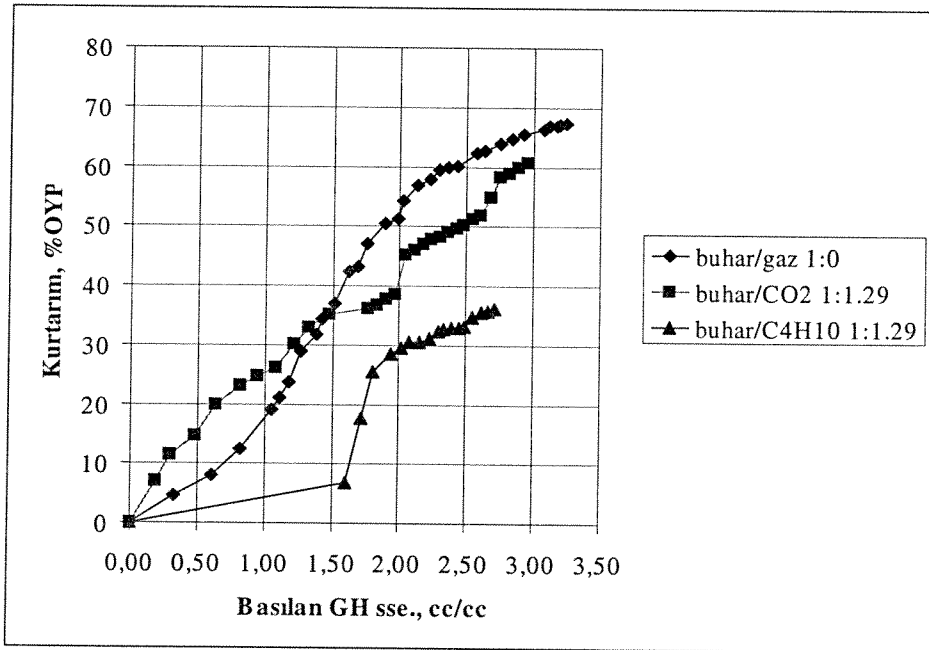
duyulmaktadır. CO₂ ilavesi toplam kurtarımı arttırmamakta ancak buhar gereksinimindeki azalış çok belirgin bir şekilde olmaktadır. Benzer sonuçlar buhar-metan enjeksiyonu durumunda Butler ve diğerleri (2000) tarafından da gözlemlenmiştir.

6.3 Buhara n-Bütan Eklentili VAPEX Deneyi

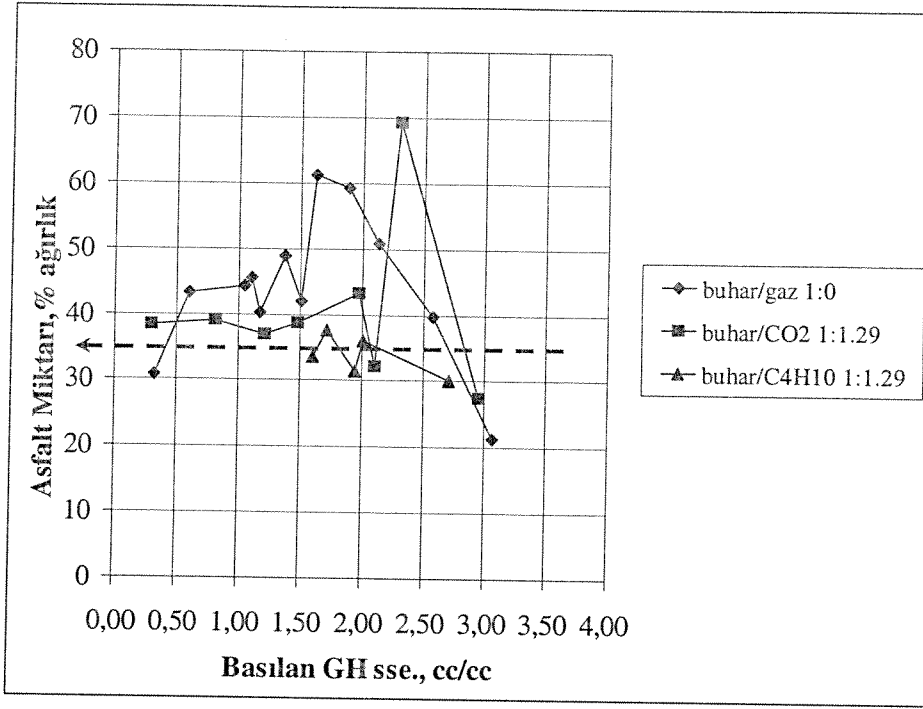
Literatürde buhar gereksinimini azaltmak için metan gibi yoğunlaşmayan hidrokarbon gaz ilavesi de önerilmiştir (Butler ve diğerleri, 2000). Bu çalışmada da CO₂ ilaveli deneylerle karşılaştırmak için $z_d=0.16$ kuyu aralığında buhara deney koşullarında yoğunlaşmayan bir hidrokarbon olan n-bütan (n-C₄H₁₀) enjeksiyonu denendi. Enjeksiyon debisi buhar/CO₂ oranı olan 1:1.29 olan deneylere eşdeğer biçimde seçildi. Şekil 23'te n-bütan (n-C₄H₁₀) enjeksiyonu deneyinde elde edilen sıcaklık dağılımı sadece buhar ve buhar/CO₂ deneyleri için benzer zamanlarda elde edilenlerle karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Buhara n-bütan eklendiğinde elde edilen buhar odası oluşma şekili buhara CO₂ eklenen deneylerdeki görülenlere benzerlik göstermektedir. Buhar odası oluşma hızı (Şekil 24) deney başında sadece buhar kullanılan deneye benzerlik göstermiş ancak deney sonlarında buhar/CO₂ deneyine benzer şekilde olmuştur. Elde edilen petrol üretimi (Şekil 25) ise sadece buharın enjekte edildiği deneyin neredeyse yarısı kadar olmuş buhar/petrol oranı (Şekil 26) ve su/petrol oranı (Şekil 27) ise normal BDGD deneyine göre çok daha az çıkmıştır. Buhara CO₂ eklentisinin n-bütan eklentisine oranla daha iyi bir performans gösterdiği ve bununla CO₂'in daha iyi yalıtım sağlamasından kaynaklandığı söylenebilir. Üretilen petroldeki asfalt miktarındaki değişim (Şekil 28), CO₂ eklentili ve yalnızca buharın enjekte edildiği deneylere oranla oldukça az olmuş ve ilk değerlerin etrafında osilasyonlar yaptığı görülmüştür.



Şekil 24. Buhar/gaz oranı 1:1.29 olan $z_d=0.16$ kuyu aralığında yapılmış deneyler için buhar odası alanı.



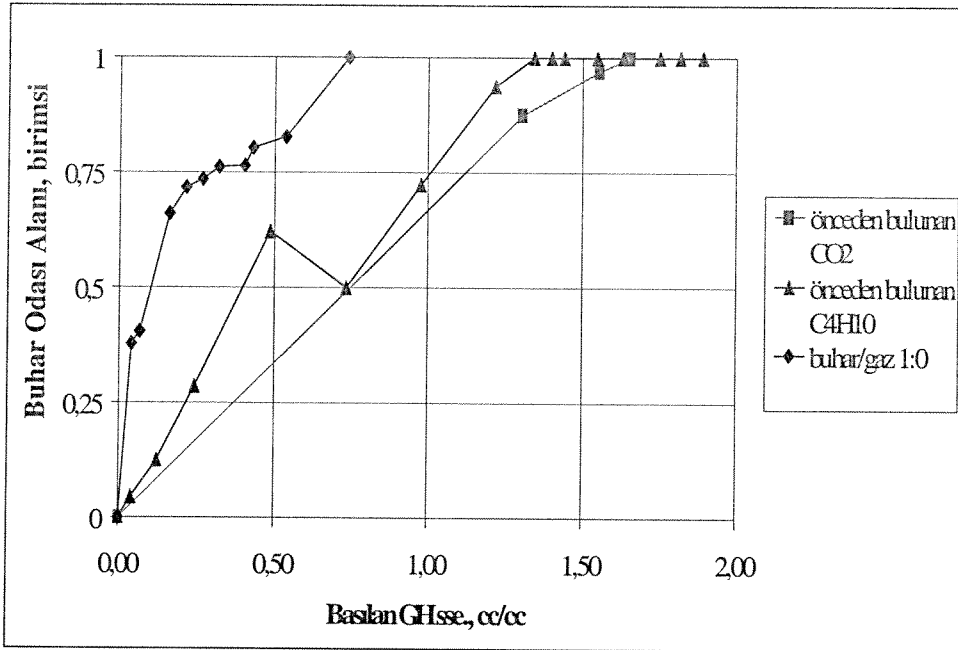
Şekil 25. Buhar/gaz oranı 1:1.29 olan $z_d=0.16$ kuyu aralığında yapılmış deneyler için petrol kurtarım miktarı.



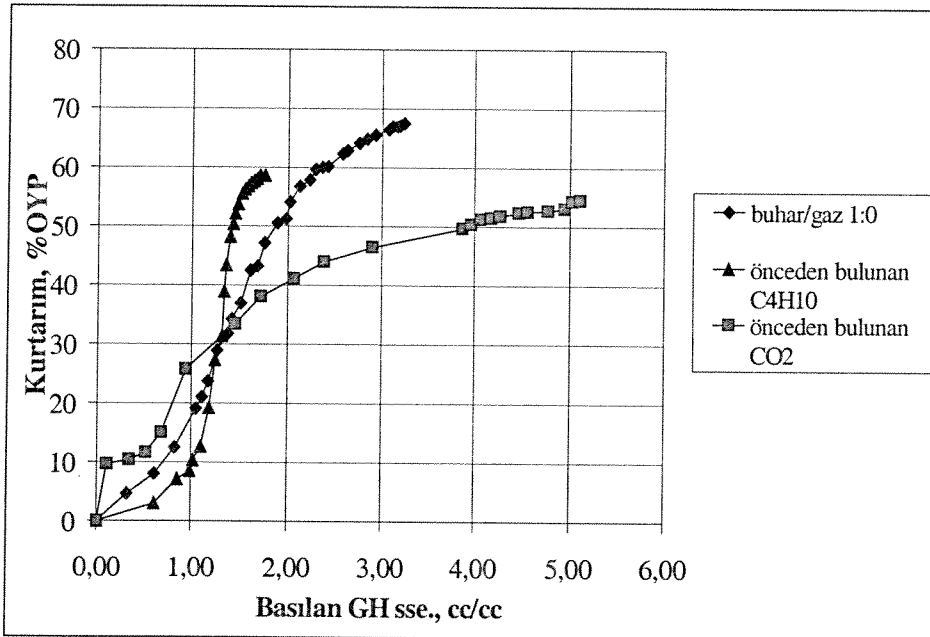
Şekil 28. Buhar/gaz oranı 1:1.29 olan $z_d=0.16$ kuyu aralığında yapılmış deneyler için üretilen asfalt miktarı.

6.4 Rezervuarda CO_2 veya n-bütanın Önceden Bulunduğu Buhar Destekli Gravite Drenaj Deneyleri

Sistemde buharla birlikte basılan gazların rezervuarda önceden bulunması durumu da incelendi. Literatürde gaz sonrası buhar enjeksiyonu olarak bilinen bu seçenek incelenirken rezervuara bir kaç gözenek hacmi CO_2 veya n-bütan gazı enjekte edildi. CO_2 enjeksiyonu için %8.35 ve n-Bütan için %3.0 orijinal yerinde petrol üretildi. Sistem bir tam gün kapalı tutularak CO_2 veya n-Bütan gazının deney düzeneğinde kalması sağlandı. Daha sonra normal BDGD deneylerine geçildi. Daha önceki analizlerde yapıldığı gibi sıcaklık dağılımları, buhar odası alanı oluşumu, petrol kurtarımı ve buhar/petrol oranları sadece buhar enjekte edilen deneyle kıyaslandı. Sistemde daha önceden CO_2 veya n-bütan bulunmasının sisteme buharla birlikte herhangi bir yoğunlaşmayan gaz enjekte edilmesine benzer sonuçlar verdiği gözlemlendi. Her iki durumda da aynı zaman diliminde sistem sıcaklığı (Şekil 29)



Şekil 30. Önceden CO₂ ve n-C₄H₁₀ bulunan modelde $z_d=0.16$ kuyu aralığında yapılan BDGD deneyleri için buhar odası alanı.



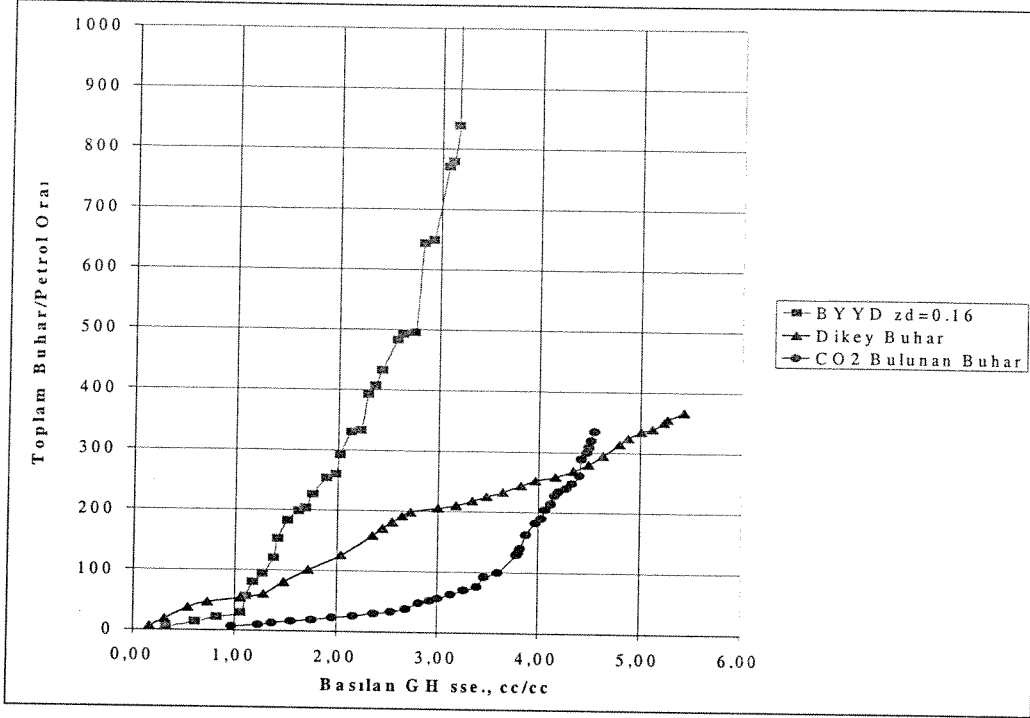
Şekil 31. Önceden CO₂ ve n-C₄H₁₀ bulunan modelde $z_d=0.16$ kuyu aralığında yapılan BDGD deneyleri için % kurtarım.

6.5 Deney Sonrası Asfalt Çökelimi Analizleri

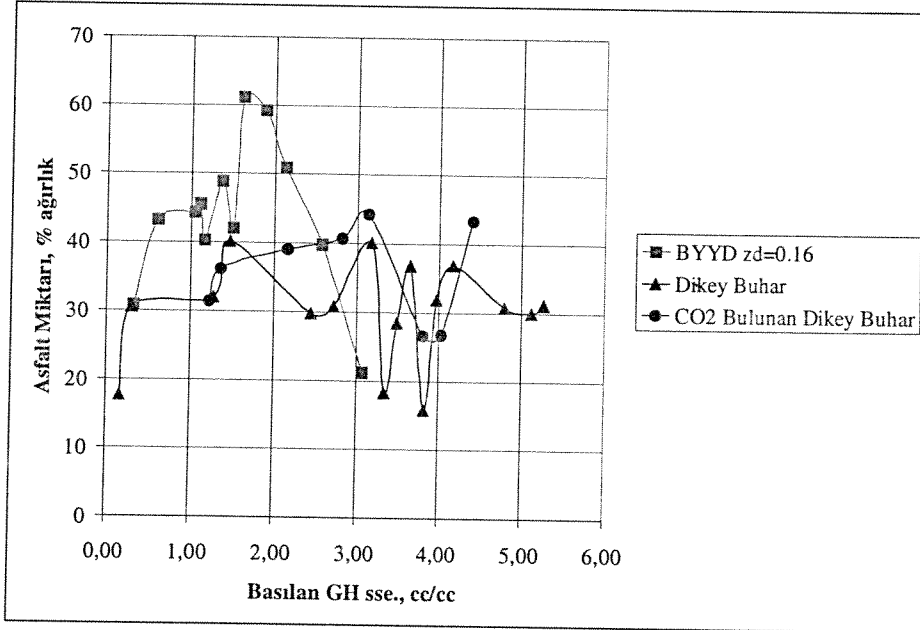
Asfalt ve resinlerin petrol akışkanlarını oluşturan ağır ve polar bileşenler oldukları bilinmektedir. Bu bileşenler yoğunlaşmış poliaromatik yapıda alkil zincirleri ile farklı türde gaz atomları (O,S ve N) ve bazı metaller içermektedir [Ramos ve diğerleri, 1997]. Üretim esnasında rezervuar akışkanlarından kaynaklanan asfalt çökelimi üretim formasyonunun tıkayarak kuyu ve yüzey ekipmanlarında ciddi problemler yaratabilir. Asfalt çökelimi doymamış rezervuarın ilk azalımında yada gaz veya CO₂ enjeksiyonunda üretim esnasında meydana gelebilir. Benzer bir şekilde çözücü (solvent) enjeksiyonu sırasında da oluşabilir. CO₂ veya başka bir çözücü gaz petroldeki asfalt moleküllerinin kararlılığını, pH değerini ve çözünürlük özelliğini değiştirerek bozabilir [Nghiem ve diğerleri, 2000]. Normal BDGD deneylerindeki asfalt çökeliiminin temel nedeni petrolün ısınmasından kaynaklanır. Petrol akmazlığının azalıp petrolün hafif uçlarının tamamıyla süpürülüp üretilmesi, ağır uçların matrikste çökmesine neden olmuştur. Normal BDGD deneyleri için çizilmiş olan sıcaklık dağılımı ve petrol kurtarımı eğrileri bu sonucu desteklemektedir. Buhara CO₂ and n-C₄H₁₀ ilavesi ise petrol moleküllerinin kararlılığını bozarak üretilen petroldeki asfalt miktarını arttırdığından çökme yalnız buharla yapılan deneylerden daha çok olmuştur.

6.6 Yatay ve Dikey Enjeksiyon Kuyuları Kullanılan Buhar ve Karbon Dioksit Enjeksiyonu Deneyleri

Üç boyutlu deneysel model kullanılarak yatay ve dikey enjeksiyon durumları da deneysel olarak çalışıldı. Yatay kuyu enjeksiyonu yatay üretim kuyusu deneyleri buhar destekli gravite drenaj ve VAPEX deneylerinde olduğu gibi model dik pozisyonda tutularak yapıldı. Yatay enjeksiyon dikey üretim ve dikey enjeksiyon dikey üretim deneyleri ise model yatay konumda iken çalışıldı. Yatay ve dikey kuyu enjeksiyon deneylerinde gravite drenaj deneylerinde de olduğu gibi petrol ve su kurtarımları, sıcaklık ölçümleri ve asfalt ölçümleri yapıldı. Dikey kuyu enjeksiyonunda sadece karbon dioksit enjekte edilen deneyde ondan fazla gözenek hacimi karbon dioksit basılmasına rağmen çok az bir petrol kurtarımı (<%5) oldu. Model bir tam gün kapalı tutularak sistem CO₂ ile doyuruldu ve daha sonra buhar



Şekil 35. Dikey kuyu enjeksiyonu buhar ve karbon dioksit enjeksiyonu deneylerinde elde edilen petrol/buhar oranı.



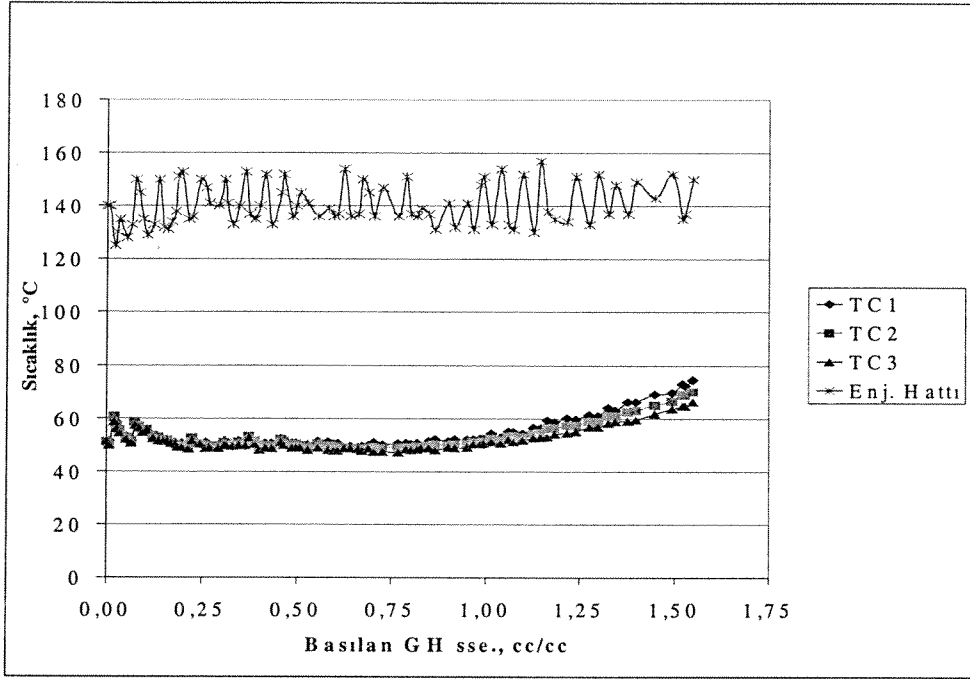
Şekil 36. Dikey kuyu enjeksiyonu deneyleri için üretilen petroldeki asfalt miktarı.

Kozluca sahasının gözenekliliğine (yaklaşık %20) göre fazla olmakla birlikte çatlak ve vugların dağılımı benzer olduğu için tercih edildi. Fiziksel özellikleri Tablo 1 de sunulan karot tapaları Batı Kozluca petrolü kullanılarak yaklaşık bir hafta boyunca doyuruldu. Karot tapalarının mutlak geçirgenliklerinin düşük olması (15 - 25 mD) bu sürenin uzamasına neden oldu. Bir önceki bölümlerde aktarılanlara benzer olarak buhar, buhar-CO₂ ve buhar-C₄H₁₀ enjeksiyonu deneyleri gerçekleştirildi. Deneyler rezervuarın dikey bir kesitini modellemek amacıyla dikey konumda yapıldı. Böylelikle iki yatay kuyu kullanımının benzetilmesi ve aynı zamanda da dikey yönde bir akış durumunda ortaya çıkacak durumun benzetilmesi hedeflendi. Karotlarla yapılan deneylerin sonuçları Tablo 8 de verilmiştir. Deneylerin tekrarlanabilirliğini gözlemlemek için buhar enjeksiyonu deneyi iki kez yapıldı. Şekil 38 de verilen petrol kurtarımı eğrilerinden de görülebileceği gibi sonuçların deneysel hata limitlerinin içinde çıktığı görüldü. Sadece buhar ve buhara n-bütan eklentili deneylerdeki petrol kurtarımının birbirlerine çok yakın olduğu gözlemlendi. Buhara CO₂ ilaveli deneyde ise petrol kurtarımının diğerlerine oranla bir hayli düşük olduğu görüldü.

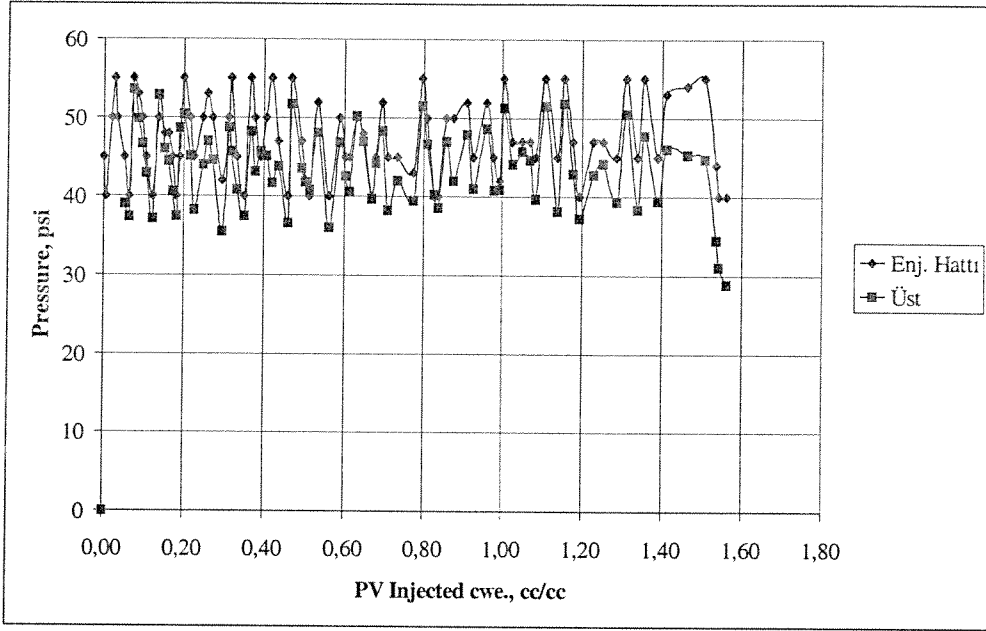
Tablo 8. Karot Analiz Sonuçları.

Deney Türü	Toplam Üretilen Petrol, cc	Petrol Kurtarımı, %	Su Doymuşluğu		Petrol Doymuşluğu
			Üst	Orta	
BDGD 1:0	46.1	41.54	Üst	0.69	0.31
			Orta	0.43	0.57
			Alt	0.18	0.82
VAPEX Buhar/CO ₂ 1:1.29	17	14.46	Üst	0.15	0.85
			Alt	0	1.00
VAPEX Buhar/n-C ₄ H ₁₀ 1:1.29	77.5	62.97	Üst	0.72	0.28
			Orta	0.59	0.41
			Alt	0.47	0.53

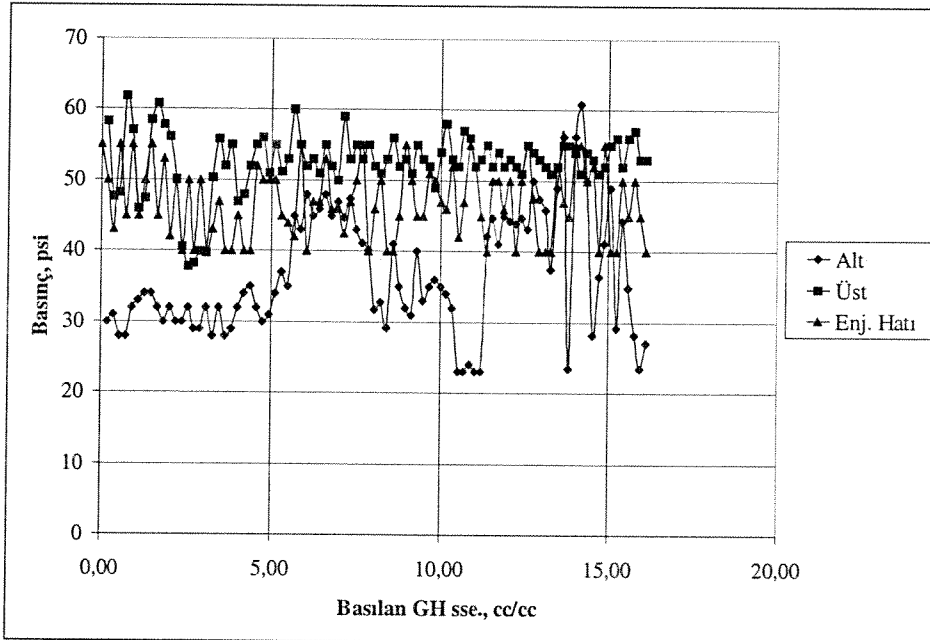
doymuşlukları Soxhlet cihazı ile ölçülmüştür. Yapılan analizlerde su doymuşluğunun karot tapasının üst bölgelerinde yüksek olması yukarıda aktarılan teoriyi desteklemektedir (Tablo 8). Bu teoriyi destekleyen bir başka bulgu ise karot tapaları boyunca gözlemlenen basınç değişimleridir (Şekil 44-44). Tüm deneyler için basınç değişimleri sıcaklık değişimlerine benzer şekilde osilasyonlar yapmış ve yukarıda bahsedilen tampon bölgenin ilerleme hızına bağlı olarak osilasyonların frekansının değiştiği görülmüştür.



Şekil 39. Karot Tapası ile Yapılan Buhar Enjeksiyonu Sırasında Gözlemlenen Sıcaklık Değişimi

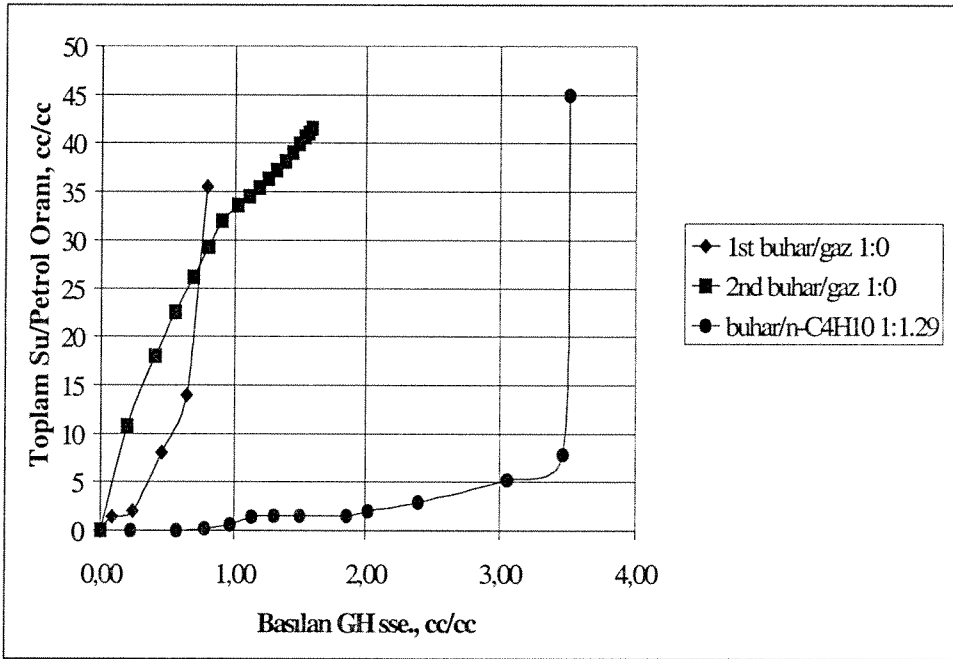


Şekil 42. Karot Tapası ile Yapılan Buhar Enjeksiyonu Sırasında Gözlemlenen Basınç Değişimi



Şekil 43. Karot Tapası ile Yapılan Islak VAPEX (CO₂ Enjeksiyonu) Deneyi Sırasında Gözlemlenen Basınç Değişimi

tapalarında yapılan buhar destekli gravite drenaj deneylerindeki mekanizmanın aynı olduğunu göstermektedir. Karot tapalarında çatlak ve vuğların bulunması sistemin gözeneklilik ve geçirgenlik değerlerini etkilemekte ancak işlemin çalışma mekanizmasını değiştirmemektedir. VAPEX (CO₂ ve n-bütan) deneyleri için ise üretilen petroldeki asfalt miktarı önceleri artış eğilimine girmiş daha sonraları ise azalmıştır. Bu gözlemler sadece buhar enjekte edilen durumla uyumludur. Üç boyutlu modellerde VAPEX (CO₂ ve n-bütan) için elde edilen sonuçlara bir miktar benzerlik gösterse de aynı davranış görülmemiştir. Sonuç olarak karot tapası deneyleri gerçek gözenekli ortama daha yakın olduğu için benzer sonuçların rezervuarda da görülmesi beklenmelidir.

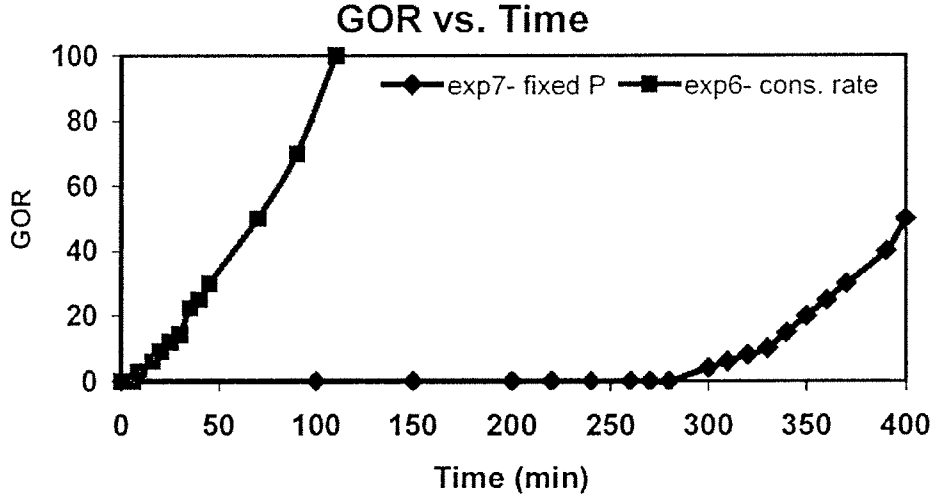


Şekil 45. Karot Tapalarıyla Yapılan Deneylerde Gözlemlenen Toplam Su /Petrol Oranı.

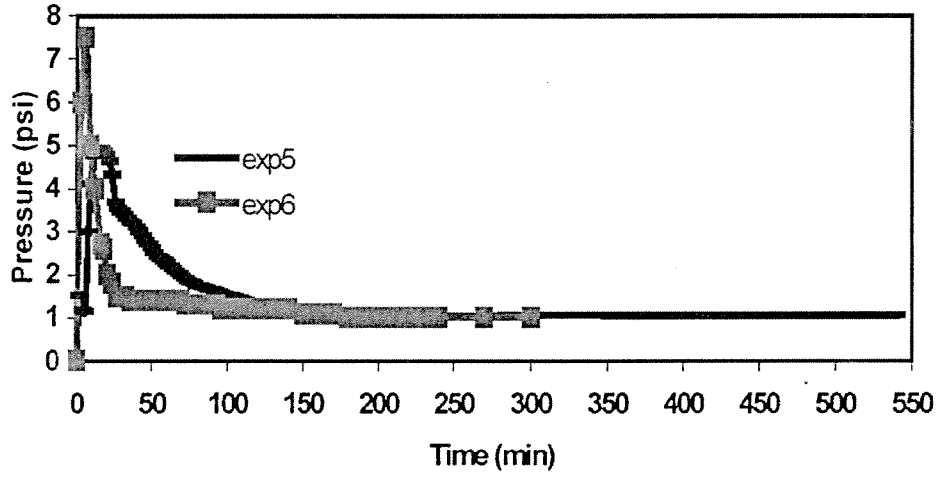
6.8 Kumtaşı kullanılarak yapılan VAPEX Deneyleri

Üç boyutlu modelde yapılan VAPEX deneyleri beşinde 90 meshlik silika bazlı kum diğer deneylerde ise Şekil 48 de verilen kum granülleri kullanılarak yapıldı. Deneylerde değişik üretim stratejileri (sabit basınç ve sabit debi) denendi. Deneyler dijital kamera ve bilgisayarlı tomografi teknolojileri ile görüntülendi. En yüksek petrol kurtarımı basıncın sabit olarak tutulduğu ve diğer deneylere oranla yüksek olduğu 1 ve 2 nolu deneylerde elde edildi (Şekil 49). Kumtaşından elde edilen kumlarla yapılan deneylerde elde edilen kurtarım oranının Tablo 7 ve 8'de verilen kırılmış kireçtaşı ve tapa deneylerinde elde edilen kurtarım ile benzer düzeyde ancak ıslak VAPEX deneylerinde elde edilenden düşük olduğu görülebilir.

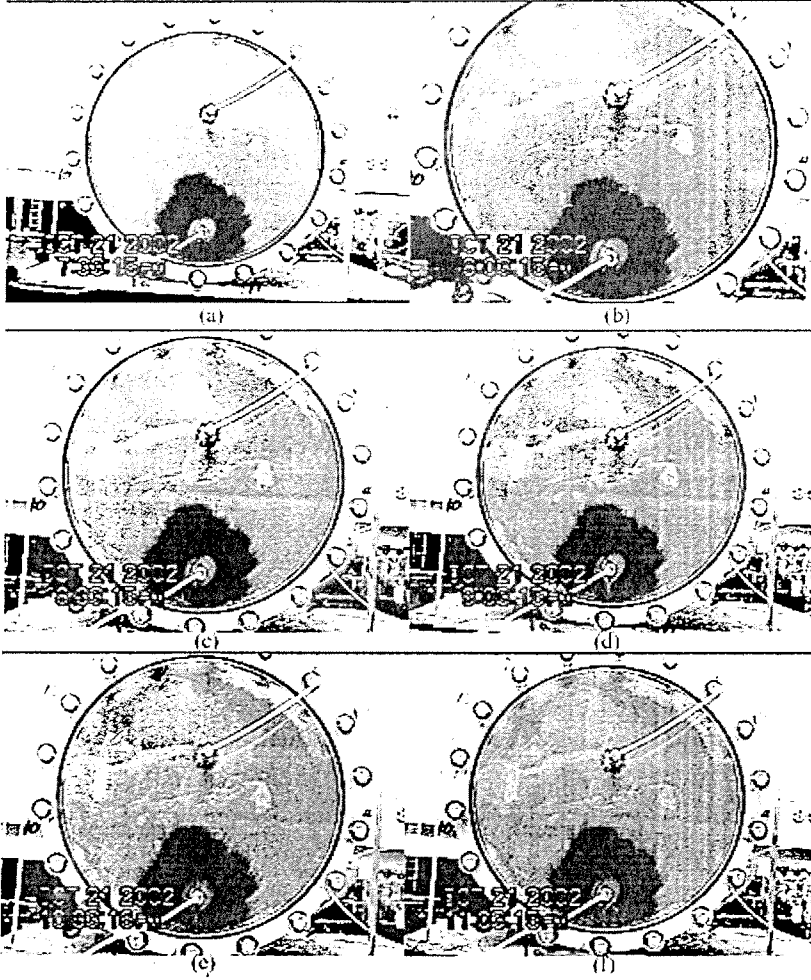
Bu deneylerde elde edilen gaz-petrol oranlarına bakıldığında (Şekil 50) sabit debili sistemde basınç düşümü (Şekil 51) daha fazla olduğu için enjekte edilen gaz üretim kuyusuna prematüre şekilde önceden vardığından etkin bir süpürme sağlanamamaktadır. Bu durum çözücü buharı odasının oluşumunu da etkilemektedir (Şekil 52-58). İlk deneylerde çözücü buharının oluşumunun görsel olarak geliştirilmesi amacıyla petrol fazına fiziksel özelliklerini etkilemeyecek şekilde boya katılmıştır. Ancak boya enjeksiyon ve üretim kuyuları çevarında yoğunlaşmış ve görünümün gelişmesinin aksine daha kötü olmasını sağlamıştır (Şekil 52-55). Boya kullanılmayan deneylerde (Şekil 56-58) çözücü buhar odasının oluşumu daha belirgin olmuştur. Bu deneylerde kullanılan kum (Şekil 48) ince olmasına rağmen çözücü buharı odası oluşumu V şeklinde olmaktan çok kumda değişken bir yapı olarak gerçekleşmiştir.



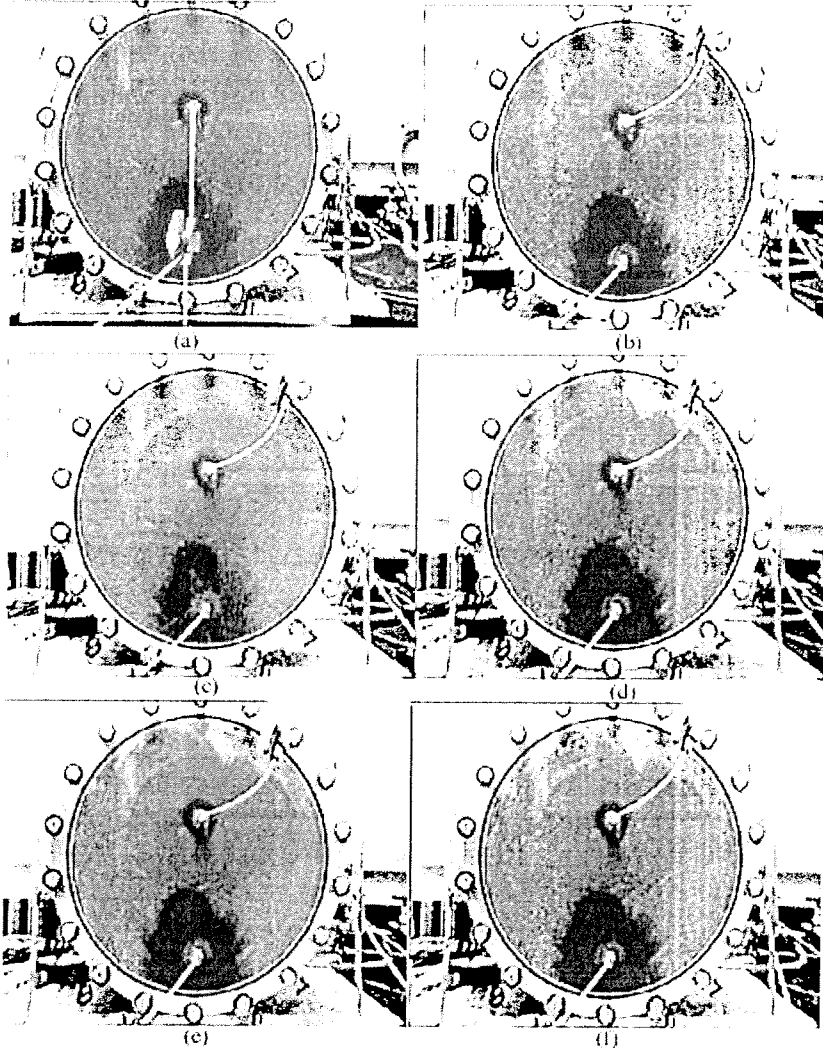
Şekil 50. Sabit debi ve sabit basınç deneylerinde üretilen gaz – petrol oranı karşılaştırılması.



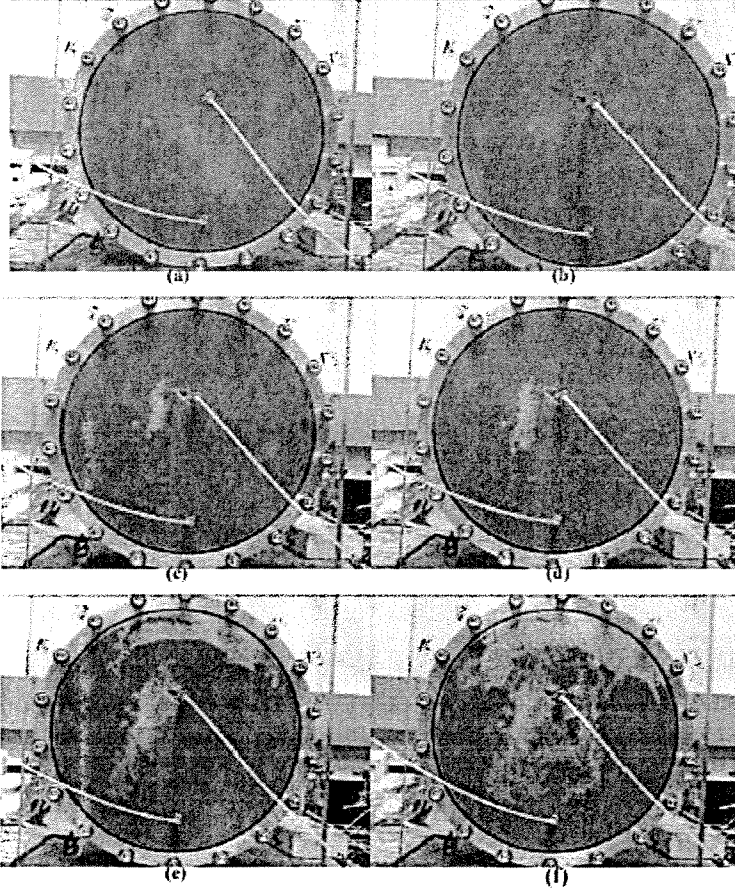
Şekil 51. Sabit debi deneylerinde sistem basıncı karşılaştırılması.



Şekil 53. 1 psi sabit basınç düşümü VAPEx deneyi: a) 0 dakika; b) 30 dakika; c) 60 dakika; d) 90 dakika; e) 180 dakika; d) 210 dakika. Gri bölgeler CO₂, siyah bölgeler petrol.



Şekil 55. 1.25 SCMM sabit debi VAPEx deneyi: a) 0 dakika; b) 30 dakika; c) 60 dakika; d) 120 dakika; e) 180 dakika; d) 300 dakika. Gri bölgeler CO₂, siyah bölgeler petrol.

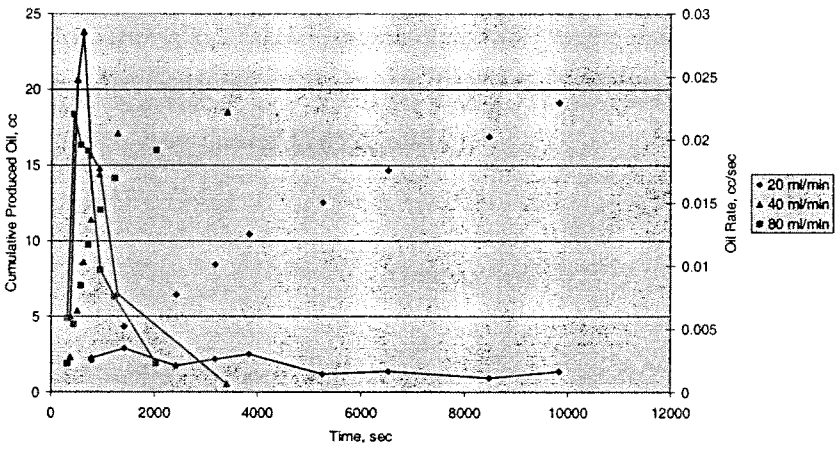
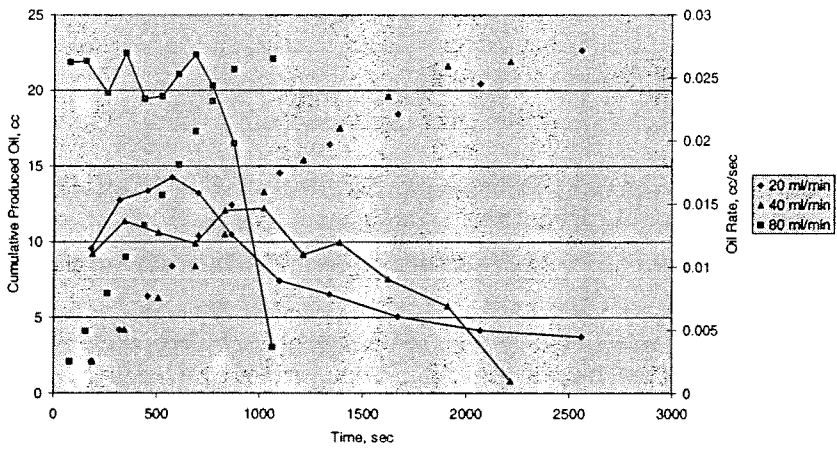
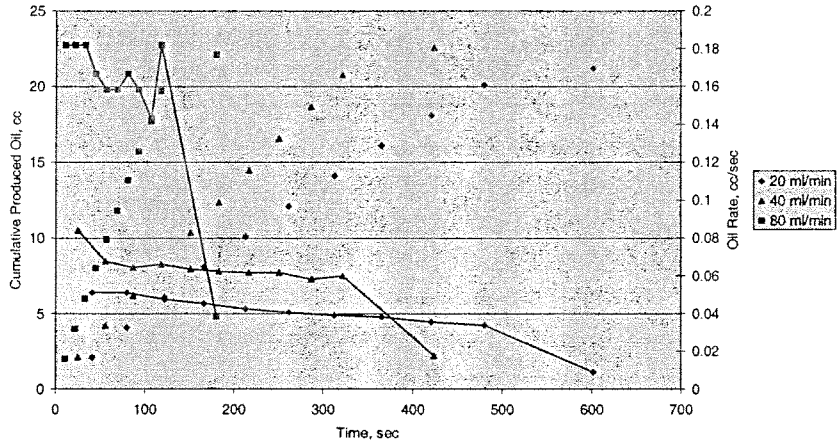


Şekil 57. 0.5 psi sabit basınç düşümü VAPEX deneyi: a) 0 dakika; b) 60 dakika; c) 100 dakika; d) 200 dakika; e) 300 dakika; d) 400 dakika. Gri bölgeler CO₂, siyah bölgeler petrol.

için etken bir işlem olduğu görüldü. Propan gazı bütana orana daha iyi performans gösterdi. Deneylerde elde edilen üretim ve üretim debilerinin karşılaştırmalı sonuçları Şekil 59 – 60 da verilmiştir.

Tablo 9. Hele-Shaw Hücresi Deney Sonuçları.

Gaz	PROPAN								
	Garzan			Raman			Batı Raman		
Petrol	20	40	80	20	40	80	20	40	80
Debi, cc/dakika	20	40	80	20	40	80	20	40	80
Üretilen Hacim, cc	23.40	23.20	21.10	22.50	22.10	19.50	19.55	19.25	17.50
Sistemden Kurtarılan Hacim, cc	2.50	2.60	2.45	1.90	3.40	2.80	4.80	5.40	5.10
Üretilen Miktar, gr	19.850	19.569	18.155	20.286	20.172	17.020	18.440	18.320	16.640
Sistemden Kurtarılan Miktar, gr	2.166	2.286	2.139	1.757	3.156	2.591	4.589	5.167	4.912
Üretilen Asfalt Miktarı, gr	3.871	3.877	2.839	5.230	5.381	4.625	6.964	6.160	6.390
Sistemdeki Asfalt Miktarı, gr	0.617	0.429	0.411	0.468	1.193	0.718	2.311	1.791	1.999
Üretilen Ortalama Yoğunluk gr/cc	0.8469	0.8418	0.8603	0.9016	0.9134	0.8935	0.9453	0.9447	0.9499
Üretilen Ortalama API	35.57	36.58	32.97	25.44	23.42	26.87	18.19	18.28	17.46
Sistem Yoğunluk, gr/cc	0.8664	0.8792	0.8731	0.9247	0.9282	0.9254	0.9560	0.9569	0.9631
Sistemde kalan petrol API	31.82	29.44	30.57	21.52	20.94	21.41	16.51	16.38	15.42
Gaz	BUTAN								
Petrol	Garzan			Raman			Batı Raman		
Debi, cc/dakika	20	40	80	20	40	80	20	40	80
Üretilen Hacim, cc	21.20	22.55	22.10	22.65	21.90	22.10	19.15	18.40	18.40
Sistemden Kurtarılan Hacim, cc	2.30	2.40	2.60	3.15	3.30	3.90	4.00	4.70	6.00
Üretilen Miktar, gr	18.070	19.260	18.910	20.320	19.690	19.740	18.110	17.470	17.460
Sistemden Kurtarılan Miktar, gr	1.869	2.086	2.271	2.915	3.007	3.547	3.812	4.455	5.866
Üretilen Asfalt Miktarı, gr	3.749	3.991	3.686	5.477	5.668	5.598	6.673	5.814	6.109
Sistemdeki Asfalt Miktarı, gr	0.446	0.385	0.361	0.866	0.852	1.189	1.582	1.498	2.994
Üretilen Ortalama Yoğunluk gr/cc	0.8523	0.8544	0.8553	0.8970	0.8959	0.8902	0.9452	0.9452	0.9490
Üretilen Ortalama API	34.52	34.12	33.94	26.25	26.44	27.46	18.20	18.20	17.60
Sistem Yoğunluk, gr/cc	0.8604	0.8692	0.8735	0.9254	0.9112	0.9095	0.9530	0.9479	0.9777
Sistemde kalan petrol API	32.95	31.30	30.50	21.41	23.79	24.08	16.98	17.78	13.23



Şekil 60. Bütan gazının enjekte edildiği VAPEX deneyleri: üst, Garzan; orta, Raman; alt, B.Raman.

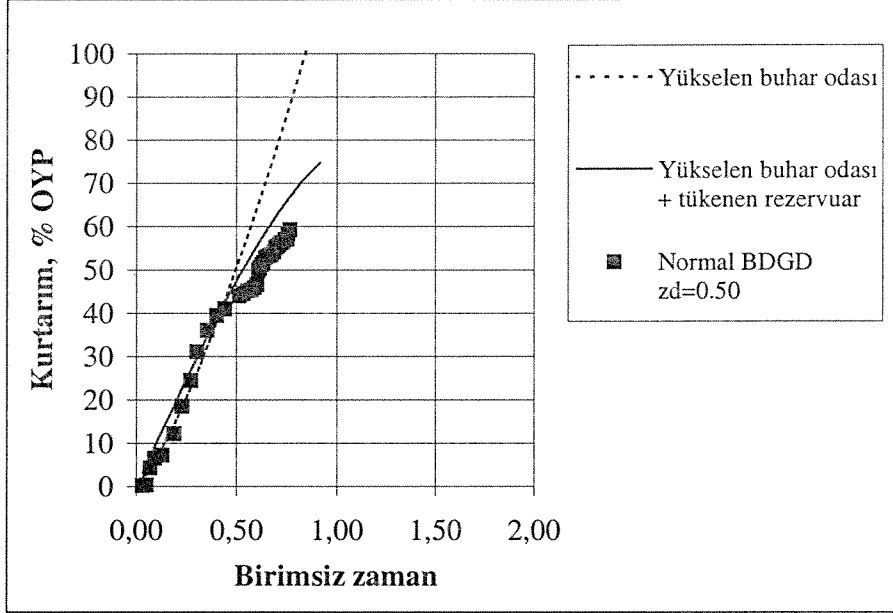
$$q = \sqrt{\frac{1.5\phi\Delta S_o kg \alpha h_w}{mv_s}} \quad (28)$$

$$Q^* = \sqrt{3/2} - t^{*2} \sqrt{2/3} \quad (29)$$

Tablo 10. Üç boyutlu BDGD deneylerinin analitik modellemesi için $z_d=0.16$ aralığında kullanılan değerler.

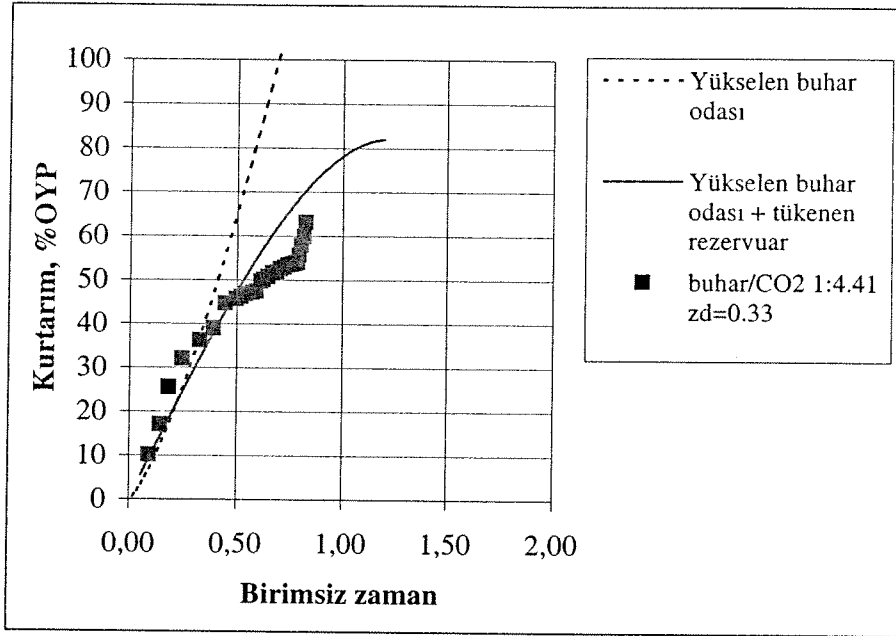
α	8,10E-07 m ² /s
v_s	5,75E-06 m ² /s
ΔS_o	0,5025
ϕ	0,38
k	5E-12 m ²
m	4
g	9,81 m/s ²
PV	2700 cc
w	0,075 m
h	0,3 m

Sadece buharla yapılan bütün BDGD deneylerinde “yükselen buhar odası” davranışı görüldü ve başarıyla modellendi (Şekil 62-64). Yükselen buhar odası döneminin boyutsuz kuyu aralığının (z_d) bir fonksiyonu olduğu görüldü. Enjeksiyon-üretim kuyu aralığı arttıkça “yükselen buhar odası” için ayrılan sürenin arttığı görüldü. Tüm kuyu aralıkları için boyutsuz zaman 0.5 ve petrol kurtarımı yaklaşık %40 orijinal yerinde petrol olduğunda sistemin “tükenen rezervuar” davranışına geçtiği gözlemlendi. Özet olarak elde edilen deneysel sonuçların analitik model sonuçlarına başarıyla benzetilmesi buhar destekli gravite drenaj işleminin kireç taşı sistemlere uygulanabileceğini ve sistem davranışının ideale yakın davranışının 27 ve 29 denklemleriyle tanımlanan analitik bir modelle tanımlanabileceğini gösterdi.

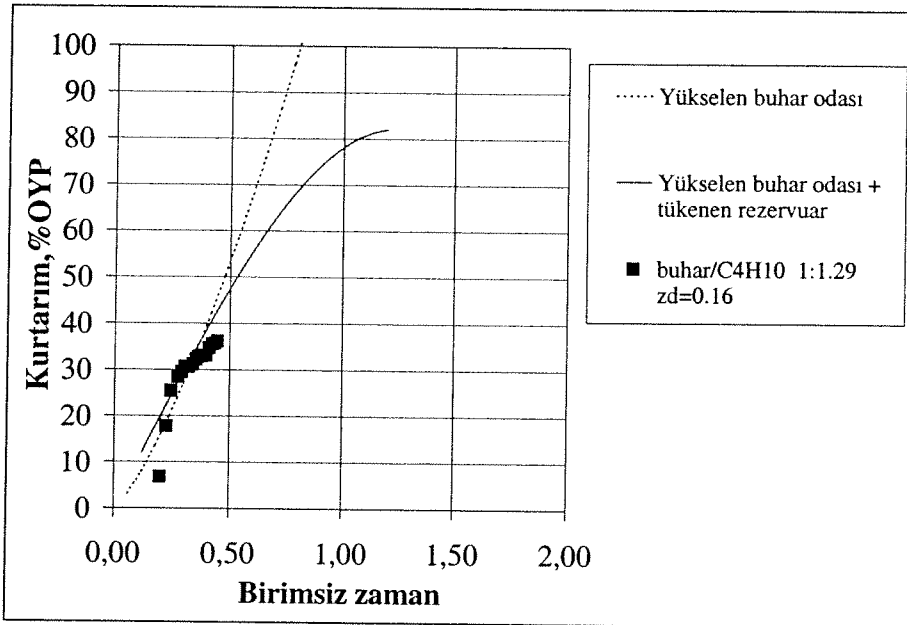


Şekil 64. Kuyu aralığı $z_d=0.50$ olan normal BDGD deneyinin modellenmesi.

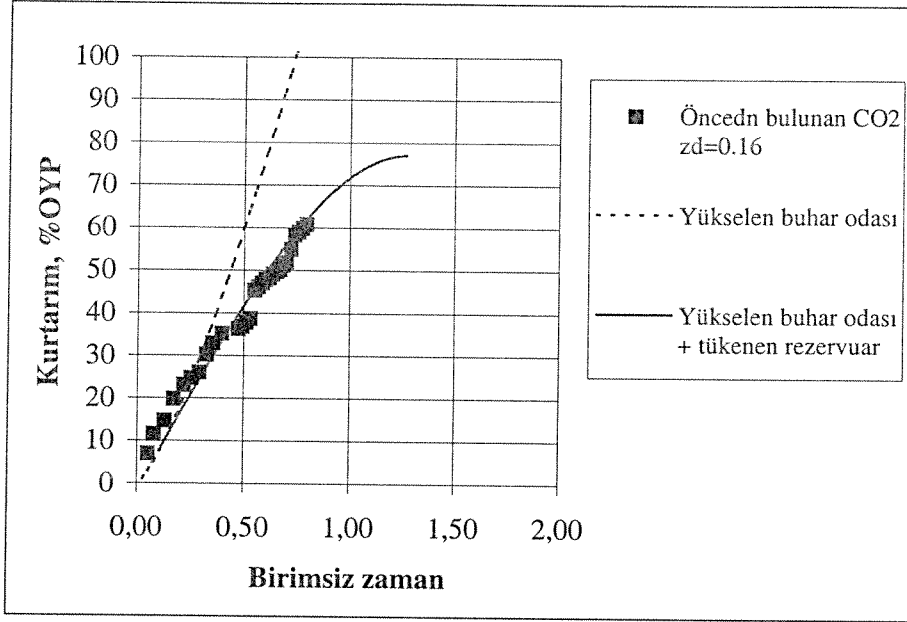
Buhara CO_2 ilave edilen ıslak VAPEX deneyleri modellenmesinde ise “yükselen buhar odası” evresinin üretim-enjeksiyon kuyu aralığı ve basılan CO_2 miktarıyla bir miktar değişmekle birlikte sadece buhar basılan durumlara göre daha erken, boyutsuz zamanın yaklaşık 0.25 ve petrol kurtarımının yaklaşık %25 ile %30 olduğu sıralarda, bittiği görüldü. Deneylerin kalan süresi “tükenen rezervuar” denklemi ile benzetildi (Şekil 65-67). Yukarıdaki bölümlerde de aktarıldığı gibi CO_2 gazının parmaklaşma yaparak buhardan hızlı bir şekilde modelin üst taraflarına çıkarak birikmesi ve modelin üst kısımlarında sunni bir sınır etkisi yapması “tükenen rezervuar” periodunun daha erken devreye girmesine neden olduğu düşünülebilir. Buhara n-bütan ilave edildiği durumda da benzer bir davranış gözlemlendi. “Yükselen buhar odası” evresinin boyutsuz zamanın yaklaşık 0.25 ve petrol kurtarımının yaklaşık %30 olduğu sıralarda, bittiği görüldü. Bu deneyin de kalan süresi “tükenen rezervuar” denklemi ile benzetildi (Şekil 68). Sonuç olarak deney koşullarında yoğunlaşmayan gazlar olan CO_2 ve n-bütanın benzer şekilde davrandıkları görüldü.



Şekil 67. Kuyu aralığı $z_d=0.33$ daki buhar/ CO_2 oranı 1:4.41 olan ıslak VAPEx deneyinin modellenmesi.

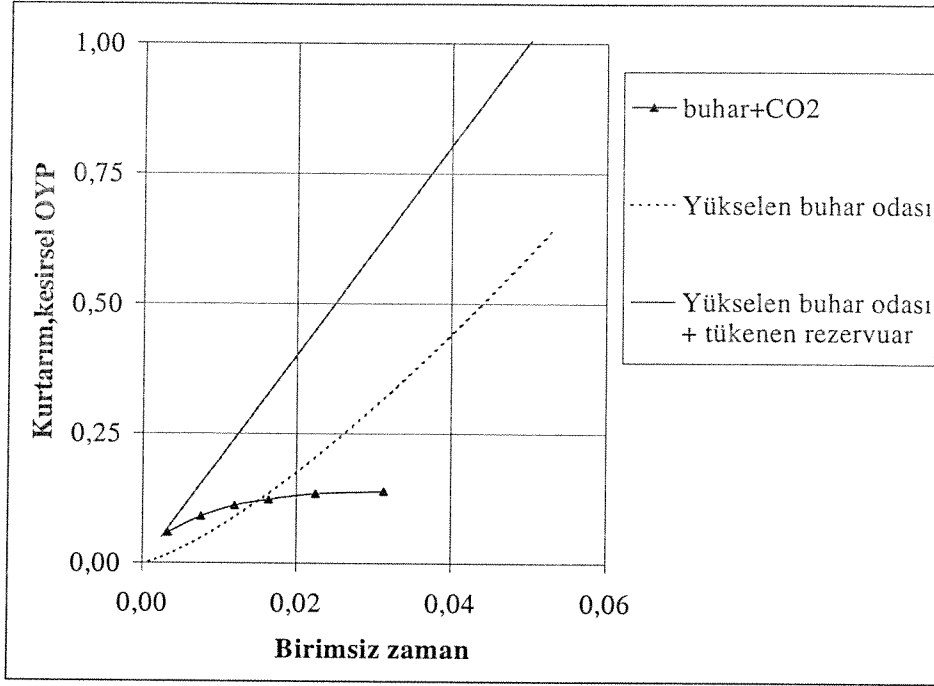


Şekil 68. Kuyu aralığı $z_d=0.16$ daki buhar/ $n-C_4H_{10}$ oranı 1:1.29 olan ıslak VAPEx deneyinin modellenmesi.



Şekil 70. Önceden CO₂ bulunan modelde $z_d=0.16$ kuyu aralığında yapılan BDGD deneyinin modellenmesi.

Karot deneyleri modellenmesinde ise geçirgenlik değerlerinin üç boyutlu modeldekilere oranla çok daha düşük ve buhar enjeksiyon debilerinin aynı olmaları nedeniyle sadece buhar (Şekil 71) ve ıslak VAPEX (buhar/n-bütan enjeksiyonu) (Şekil 72) için boyutsuz zamanın oldukça düşük olduğu bir değere (yaklaşık 0.05) kadar “yükselen buhar odası” mekanizması etkili oldu. Islak VAPEX (Buhar/CO₂) deneyi (Şekil 73) için ise hem üretim mekanizmasının değişme zamanı hem de gözlemlenen fiziksel üretim davranışları tam olarak benzetilemedi. Üç boyutlu model deneylerinde gözlemlenen davranışa benzer bir durum varsayıldığında boyutsuz zamanın sadece buhar için gözlemlenen değerin yarısına yakın bir sürede “tükenen rezervuar” durumuna geçeceği düşünüldükten benzetmeler yapıldı.



Şekil 73. Islak VAPEX (Buhar+CO₂ enjeksiyonu) kireçtaşı karotla yapılan deneyin modellenmesi.

7.2 Sayısal Modelleme Sonuçları

Sayısal modelleme çalışmaları Computer Modelling Group tarafından geliştirilen STARS (CMG, 2001) sayısal termal rezervuar benzetim yazılımı ile gerçekleştirildi. Yazılım sonlu farklar yöntemi kullanılarak geliştirilen STARS üç fazlı çok bileşenli termal ve buhar eklentisi benzetim programıdır. Kullanılan koordinat sistemi Kartezyen, silindirik yada değişken derinlik değişken kalınlıklı olabilir. Bir, iki yada üç boyutlu sistemlerin benzetimi bu koordinat sistemlerinden herhangi biri kullanılarak yapılabilir.

İki boyutlu (15x15) Kartezyen koordinat sistemi kullanılarak deneylerin benzetimi yapıldı. Tablo 1 ve 2 de verilen gözenekli ortam özellikleri ve Tablo 3 de verilen deney koşulları benzetim programında kullanılarak Tablo 11 de verilen benzetim dosyası oluşturuldu.

Tablo 11. STARS benzetim programında kullanılan dosya (Devam).

thtype con 1

** ===== FLUID DEFINITIONS =====

model 3 3 2 ** Components are water and dead oil. Most water
 ** properties are defaulted (=0). Dead oil K values
 ** are zero, and no gas properties are needed.

compname	'Water'	'OIL'	'CO2'
**	-----	-----	-----
cmm	18.02	600	28
massden	0	61.38	
cp	0	5e-6	
ct1	0	3.8e-4	
pcrit	3206.2	0	500
tcrit	705.4	0	-232
cp11	0	300	0
avg	1.13e-5	0	2.1267e-4
bvg	1.075	0	0.702

visctable

**	Temp	
60.0	0	800.0
75.2	0	600.0
122.0	0	400.5
167.0	0	300
212.0	0	250
250	0	200
300	0	150
350	0	120
400	0	80
450	0	60
500	0	45
550	0	30

** Reference conditions
 prsr 14.7 temr 125 psurf 14.7 tsurf 60

** ===== ROCK-FLUID PROPERTIES =====

rockfluid

Tablo 11. STARS benzetim programında kullanılan dosya (Devam).

```
date 2001 6 25.5 dtwell 6.94444e-4

well 1 'CO2 Injector'
well 2 'Steam Injector'
well 3 'Producer'

injector 1
**operate *max bhp 60
operate *max stg 3.62e-2
*GEOMETRY *j 0.025 0.2488 1.0 0.0
*incomp gas 0 0 1

tinjw 284
pinjw 60
*PERF *geo 1
** i j k ff
8 1 5 1.

injector 2
operate *max *bhp 60 ** Start on BHP
**operate *max stw 3.62e-2 ** Minimum water rate
*GEOMETRY *j 0.025 0.2488 1.0 0.0
tinjw 284 qual 1.0
pinjw 60
*PERF *geo 2
** i j k ff
8 1 5 1.

producer 3
operate *min bhp 14.7
*PERF 3
** i j k ff
8 1 2 1.

time 0.005
time 0.01
time 0.0257
time 0.1021
time 0.32
time 0.5

STOP
```

$$\delta_{ij} = 1 - \left(\frac{2v_{ci}^{1/6} v_{cj}^{1/6}}{v_{ci}^{1/3} + v_{cj}^{1/6}} \right)^e \quad (30)$$

Bu denklemde v_{ci} kritik hacim, e ise petrolün çökelen ve çökelmeyen kısımları için değişen bir üstür. Soğurulan asfaltın kütesinin mazgal hacimine oranı aşağıdaki denklem ile hesaplanır..

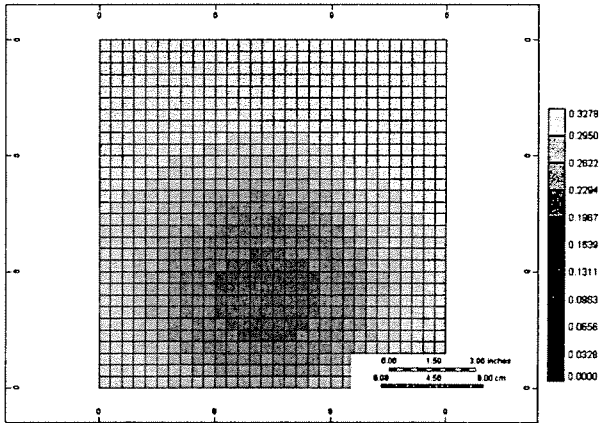
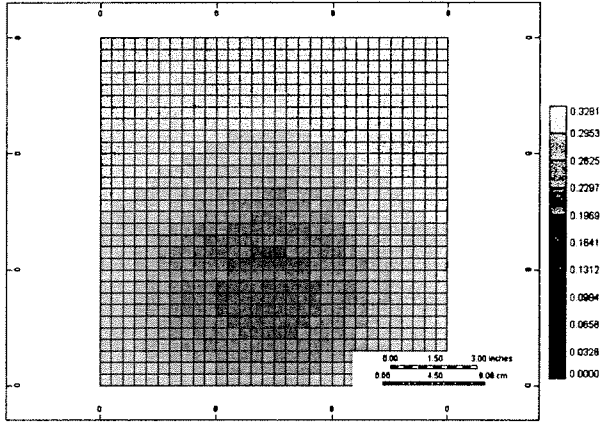
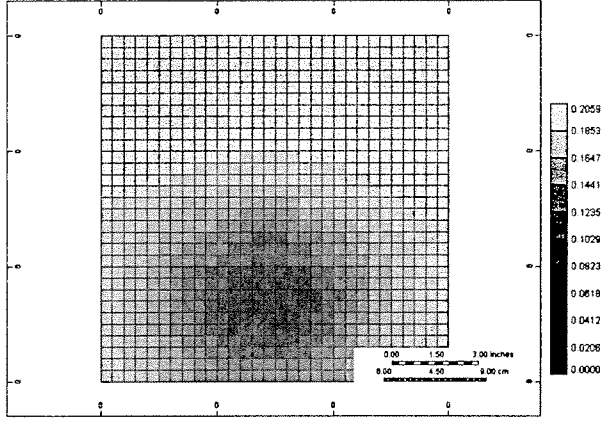
$$w_{sa} = \frac{N_{sa} M_s}{(1 - \phi) \rho_R} \quad (31)$$

Bu denklemde, M_s asfaltın moleküler ağırlığı, ϕ gözeneklilik ve ρ_R kayak yoğunluğudur. Bu model ile toplam mol sayısı bilindiğinde soğurulan katı çökeltinin mol sayısı, N_s , aşağıdaki denklem kullanılarak elde edilebilir.

$$N_s = N_{sa} + N_{sf} \quad (32)$$

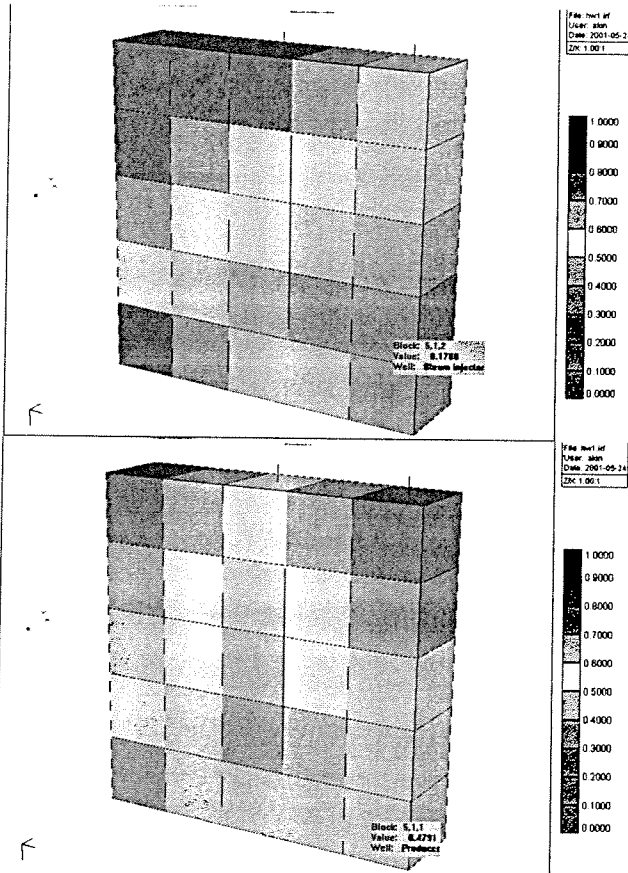
Yukarıda aktarılan model kullanılarak buhar destekli gravite drenaj deneyleri benzetilmiş ve gözlemlenen asfalt çökeli mi deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Şekil 75 te sadece buharın kullanıldığı buhar destekli drenaj deneyleri sonunda elde edilen asfalt çökeli mi verilmiştir.

Bu sonuçlara göre asfalt çökeli mi model sınırları içinde homojen biçimde olarak buhar odasının oluşumunu takip etmekte ve buhar odasının bulunduğu yerlerdeki petrol daha iyi süpürüldüğü için asfalt ökelimi buhar odasının sınırlarının dışında olmaktadır. Enjeksiyon kuyusu lokasyonu model sınırlarına yaklaştığında ise buhar odası diğer enjeksiyon lokasyonlarına oranla daha geç oluştuğu için asfalt çökeli mi daha fazla olmaktadır. Bu sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırıldığında sayısal modelde elde edilen hacim başına düşen gram mol asfalt (gmole/m^3) tüm kuyu aralıkları için uyumlu olduğu görüldü (Şekil 76). Ancak deneysel verilerde gözlemlenen çökeli me konturlarının sayısal modeldekilere göre daha heterojen olduğu ve çökeli me miktarının yüksek kuyu aralığı için modelin üst taraflarında daha çok olduğu, diğer kuyu aralıkları için ise belirli bir trend olmadığı görüldü. Model daha sonra en düşük enjeksiyon/üretim kuyu aralığında buhar/ CO_2 ve buhar/n-bütan enjeksiyonu için kalibre edildi ve Şekil 77 verilen asfalt çökeli m konturları çizildi. Sadece buharın enjekte edildiği benzetimlerde olduğu gibi asfalt çökeli minin buhar odası oluşum ile doğrusal ilişki içerisinde olduğu görüldü. Çökelen asfalt miktarının buhar/ CO_2 enjeksiyonunda daha çok olduğu ve buhar/n-bütan enjeksiyonunda ise CO_2 ilaveli deneyden az olmakla birlikte sadece buhar basılan durumdan daha çok olduğu görüldü. Deneysel verilerle (Şekil 78) karşılaştırıldığında çökeli menin deneysel durumda sayısal benzetimde görülenlere oranla heterojen olduğu görüldü. Çökelen asfalt miktarının deneysel verilerle uyumlu olduğu da görüldü. Deneysel verilerde gözlemlenen heterojenliğin ise literatürde “*worm hole*” (Smith, 1986) olarak bilinen, gözenekli ortamda buharın yüksek geçirgenlikli kanallar yaratması durumu, nedeniyle oluştuğu düşünülebilir.



Şekil 77. Deneysel gözlemlenen asfalt çökeliminin sayısal model benzetimi. Üst sadece buhar, orta VAPEX (buhar/CO₂), alt VAPEX (buhar/n-bütan).

Sayısal model kalibrasyonu yapıldıktan sonra geliştirilen modeller çeşitli üretim enjeksiyon senaryoları için de denendi. Yapılan benzetimler sonucunda ofset olarak da adlandırılabilir üretim ve enjeksiyon kuyularının aynı düzlemde yer almadığı ve rezervuar modelinin köşelerine daha yakın olduğu (Şekil 79) durumlar da incelendi. Tüm benzetimlerde üretim enjeksiyon kuyularının aynı düzlemde olduğu durumlarda daha başarılı sonuçlar elde edildi.



Şekil 79. Deney benzetimlerinden elde edilen petrol doymuşluğu. Üst ofset enjeksiyon alt eş düzlem enjeksiyon.

birlikte enjeksiyonun buhar odası oluşumu ve petrol kurtarımı açısından benzer olduğu bulundu.

6. Tüm BDGD ve VAPEX deneylerinde “yükselen buhar odası” ve “tükenen rezervuar” süreçleri görüldü. Yükselen buhar odası süresi kuyu aralığının ve buhara eklenen CO₂ hacminin artmasıyla kısalmaktadır..
7. Buhar enjeksiyonu deneyleri sonrası enjeksiyon üretim kuyu aralığı arttığında ve ıslak VAPEX (buhara yoğunlaşmayan gaz eklendiğinde) deneylerinde asfalt çökmesinin arttığı görüldü. Sayısal benzetimler sonucunda asfalt çökmesinin buhar odası oluşumunu ve şeklini takip ettiği görüldü.
8. Sayısal benzetimler sonucunda ofset enjeksiyon üretim kuyu çiftlerinin aynı düzlemde bulunanlardan daha iyi sonuç vermediği görüldü.

Computer Modelling Group, "STARS Version 2001 User's Guide", Calgary, Alberta, Canada, 2001.

Cuthiell D, McCarthy C, Frauenfeld T, et al. Investigation of the VAPEX process using CT scanning and numerical simulation J CAN PETROL TECHNOL 42 (2): 41-49 FEB 2003

Dake, L. P., "Fundamentals of Reservoir Engineering," Amsterdam: Elsevier, 1978.

Das S, Bachu S, Haug K VAPEX - A unique Canadian technology J CAN PETROL TECHNOL 41 (8): 32-34 AUG 2002

Das S. K., and Butler, R. M. 1998. Mechanism of the vapor extraction process for heavy oil and bitumen. J. Pet. Sci. Eng., 21 (1-2): 43-59.

Dria, D.E., Pope, G.A., and Sepehrnoori, K.: "Three-Phase Gas/Oil/Brine Relative Permeabilities Measured Under CO₂ Flooding Conditions," SPE Reservoir Engineering, 1993, 143-150.

Dunn S.G., Nenniger, E.H., Rajan, V.S.V. 1989. "A study of bitumen recovery by gravity drainage using low-temperature soluble gas injection" Can. J. Chem. Eng. 67, 978-991.

Edmunds, N., 1999. On the Difficult Birth of SAGD. J. of Canadian Petrol. Tech, 38 (1): 14-17.

Foerster C.P., Lynch K.W., Stramp R.L., Werner M.R., and Thompson R.R., "West Sak Field Development: Analysis of a Marginal Project", SPE 37946, 1997

Gondouin M., and Fox J.M., "The Challenge of West Sak Heavy Oil: Analysis of an innovative Approach", SPE 22077, 1991.

Gülümser R., Turfanda, O., Gözen H.: "B.Kozluca Sahası Ağır Petrolünün Karışmayan CO₂ ile Kurtarımı Laboratuvar Çalışmaları," Türkiye 8. Petrol Kongresi, 207-215, 1990.

Hallam R.J., Piekenbrock E.J., Abou-Sayed A.S., Garon A.M., Putnam T.W., Weggeland M.C., and Webb K.J., "Resource Description and Development Potential of the Ugnu Reservoir, North Slope, Alaska" SPE 21779, 1991

Holm L.W ve Josendal V.A.: "Mechanisms of Oil Displacement by Carbon Dioxide," JPT, 1427, Aralık 1974.

Hornbrook M.W , Dehghani K., Qadeer S., Osterman R.D., Ogbe D.O. 1991. Effects of CO₂ addition to steam on recovery of West Sak crude oil. J. of Canadian Petrol. Tech., 30(8): 278-286.

Raje, M., Asghari, K., Vossoughi, S., Green, D.W., Willhite, G.P.: "Gel Systems for Controlling CO₂ Mobility in Carbon Dioxide Miscible Flooding," SPE 35379 SPE/DOE Tenth Symposium on Improved Oil Recovery, Tulsa, Oklahoma, ABD, 21-24 Nisan, 1996.

Reid R.C., Prausnitz J.M., Poling B.E., "The Properties of Gases & Liquids", Fourth edition, New York: McGraw-Hill, 1987

Sharma A.K., Patil S.L., Kamath V.K., and Sharma G.D., "Miscible Displacement of Heavy West Sak Crude by Solvents in Slim Tube", SPE 18761, 1989 Processes", SPE 37144, 1996

Smith G. E.: "Fluid Flow and Sand Production in Heavy Oil Reservoirs Under Solution Gas Drive," SPE 15094, 56th California Regional Meeting of the SPE, Oakland, CA, ABD, 2-4 Nisan, 1986.

Speight, J.G., "Chemistry and Technology of Petroleum", New York: Marcel Dekker Inc., (2nd edition), 1991, pp. 316

Srivastava R. K., Huang, and Dong M. S. S., 1999. Asphaltene deposition during CO₂ flooding. SPE Production & Facilities, 14 (4): 235-245.

Topgüder N.S.: "CO₂ Mobility Control By Foam at Batı Raman Heavy Oilfield – Laboratory Tests on Mobility Reduction And Oil Recovery," SPE 39651, Proceedings SPE Symposium on Improved Oil Recovery, V 1, p 473-482, 1998.

Wegener, D.C. and Harpole, K.J.: "Determination of Relative Permeability and Trapped Gas Saturation for Predictions of WAG Performance in the South Cowden CO₂ Flood," SPE 35429 SPE/DOE Tenth Symposium on Improved Oil Recovery Tulsa, Oklahoma, ABD, 21-24 April, 1996.

Wellington S.L. and Vinegar, H.J.:" CT Studies of Surfactant-induced CO₂ Mobility Control," SPE 14393 60th Annual Technical Conference and Exhibition held in Las Vegas, NV, 22-25 Eylül 1985.

Werner, M.R., "West Sak and Ugnu Sands; Lower Gravity Oil Zones of the Kuparak River Area, Alaskan North Slope", AAPG Bull., vol. 23, 1985

Tablo A-1. (devam).

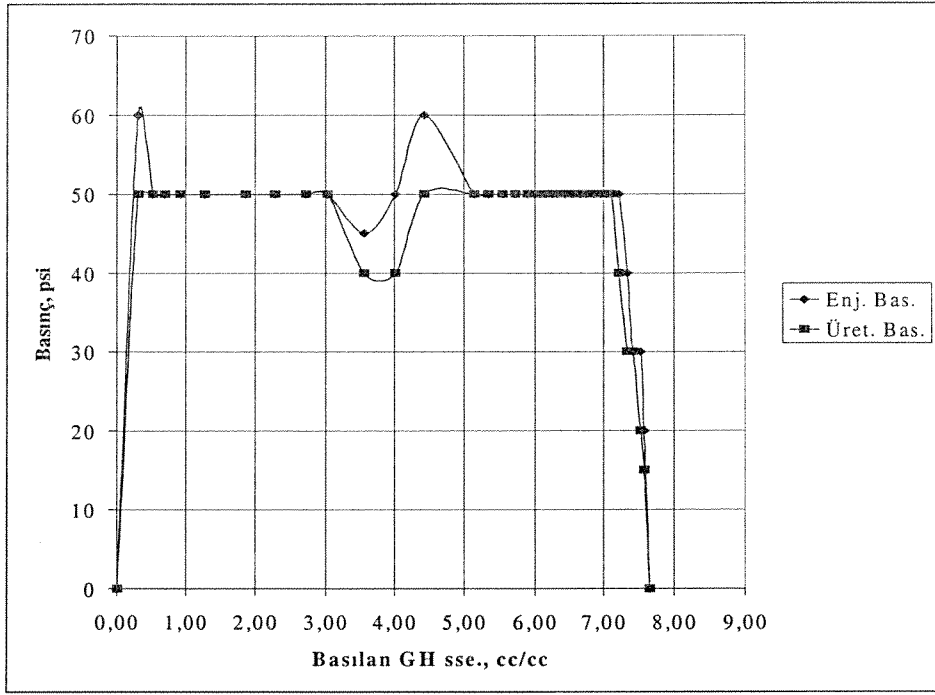
Tüp #	Zaman dakika	Enjeksiyon Basıncı psia	Enjeksiyon Sıcaklığı °C	Üretim Basıncı psia	Su Haline Dönüşen Buhar, cc	Hafif Petrol cc	Normal Su cc	Ağır Petrol cc
24	316	50	140	40	92	4	56	14
25	326	50	141	40	101	3	76	4
26	335	50	137	40	97	3	82	2
27	343	50	136	40	96	4		
28	351	50	139	40	94	3		
29	360	50	140	40	48	2		

Tablo A-2. Kuyu aralığı $z_d=0.33$ olan normal BDGD deneyleri için üretilen petroldeki asfalt miktarı.

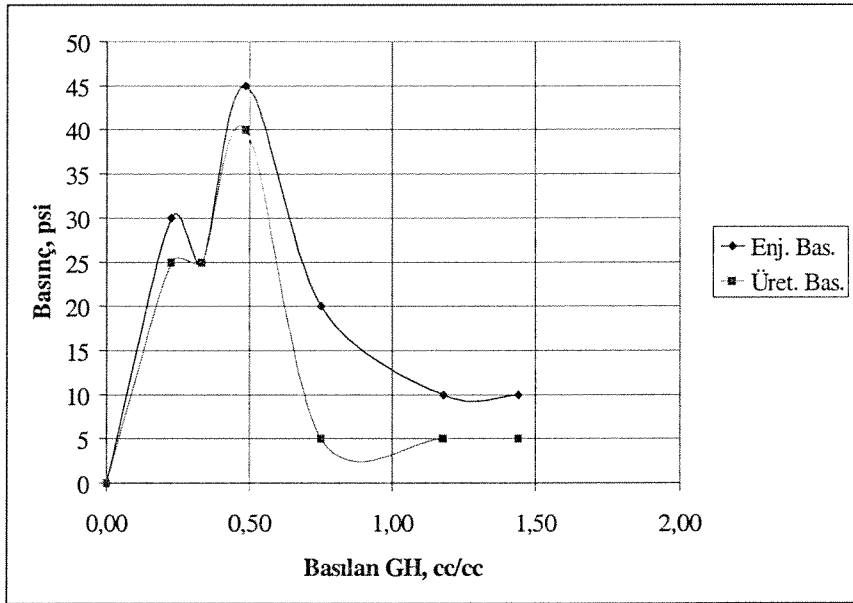
Tüp #	Petrol Ağırlığı, gr	Kağıt Ağırlığı, gr	Hekzan Sonrası Ağırlık	Çökelen Asfalt, %ağırlık
1	1.5	3.04	3.48	29.33
2	1.3	2.97	3.33	27.69
4	2.02	2.96	3.43	23.27
6	1.82	3.01	3.52	28.02
10	1.36	3.12	3.27	11.03
12	1.3	3.06	3.65	45.38
13	1.7	3.05	3.5	26.47
15	1.53	3.01	3.43	27.45
16	1.3	3.01	3.21	15.38

Tablo A-5. Karot Analiz Sonuçları

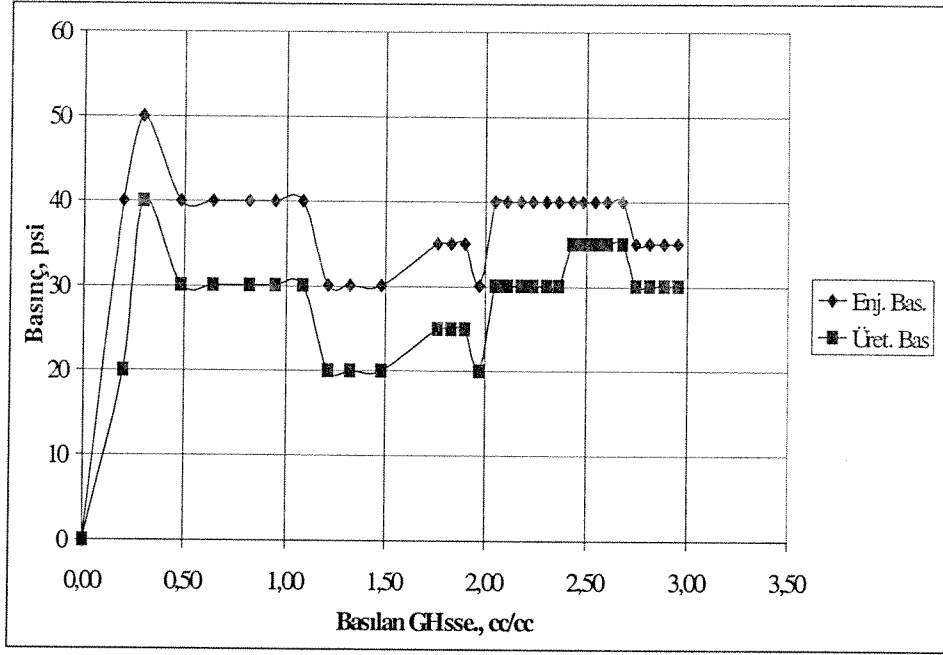
Deney Türü	Doyurma Öncesi Ağırlık gr	Doyurma Sonrası Ağırlık gr	Fark gr	Karottaki Petrol cc	Gözeneklilik %	Karot Parçası	Temizleme Öncesi gr	Temizleme Sonrası gr	Fark gr
Buhar	3480	3575	95	109.20	34	C1	452	395	57
						C2	405	366	39
Buhar	3500	3601	101	110.99	34	C1	328	293	35
						C2	301	270	31
Buhar/CO ₂ 1:1.29	3473	3580	107	117.58	37	C3	231	195	36
						C1	432	389	43
Buhar/n- C ₄ H ₁₀ 1:1.29	3452	3564	112	123.08	37	C2	408	345	63
						C1	264	217	47
						C2	288	248	40
						C3	313	285	28



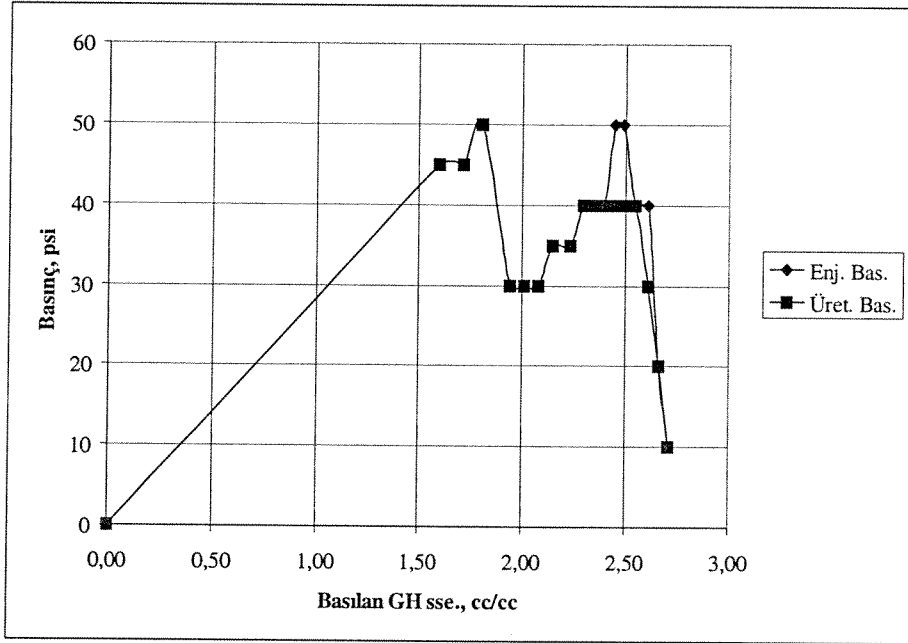
Şekil 82. Kuyu aralığı $z_d=0.50$ olan normal BDGD deneyi için enjeksiyon ve üretim basınçları



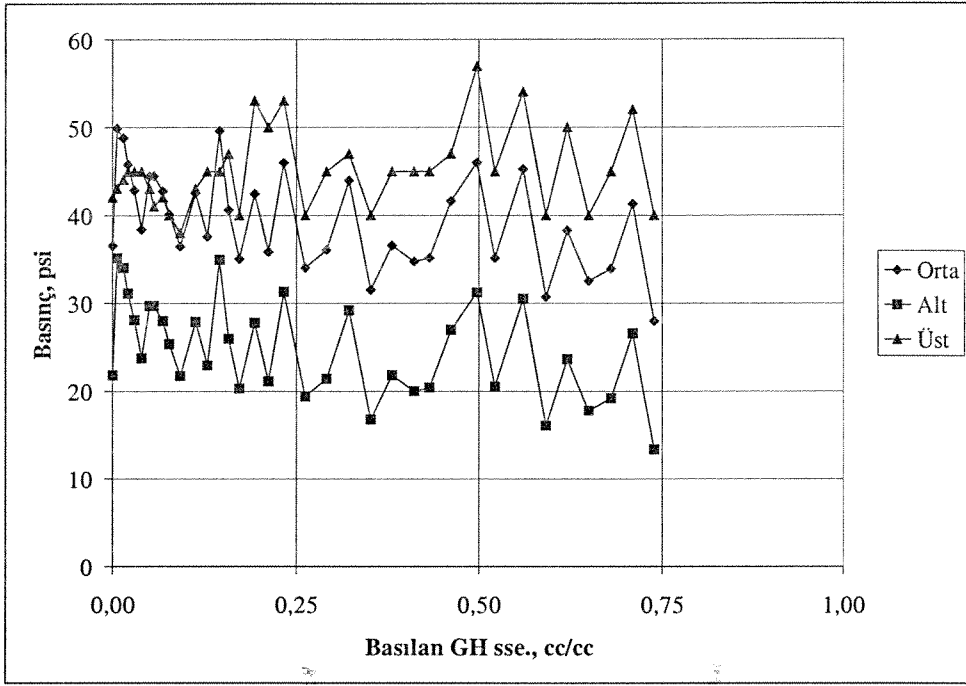
Şekil 83. Kuyu aralığı $z_d=0.16$ olarak VAPEX (CO_2 basılan) deneyi için enjeksiyon ve üretim basınçları



Şekil 86. Kuyu aralığı $z_d=0.161$ olarak buhar/CO₂ oranı 1:1.29 olan VAPEX deneyi için enjeksiyon ve üretim basınçları



Şekil 87. Kuyu aralığı $z_d=0.161$ olarak buhar/C₄OH₁₀ oranı 1:1.29 olan VAPEX deneyi için enjeksiyon ve üretim basınçları



Şekil 90. Birinci karotla sadece buhar enjeksiyonu ile yapılan deneyin basınç dağılımı

Tablo C-2. $z_d=0.16$ kuyu aralığındaki normal BDGD deneyinin Butler R.M.'ye göre hesaplanan modelleme eğrileri.

t, dakika	t*	Q toplam, Cc	Q toplam, cc, tüketim	q toplam,cc yükselen buhar odası + tüketen rezervuar
0	0,0000	0,0000	0,0000	
10	0,0507	3,4951	4,5983	0,0000
20	0,1014	8,8071	9,1809	4,1809
30	0,1521	15,1224	13,7319	8,7319
40	0,2029	22,1925	18,2356	13,2356
50	0,2536	29,8827	22,6762	17,6762
60	0,3043	38,1061	27,0378	22,0378
70	0,3550	46,8012	31,3049	26,3049
80	0,4057	55,9216	35,4614	30,4614
90	0,4564	65,4309	39,4917	34,4917
100	0,5072	75,2997	43,3800	38,3800
110	0,5579	85,5034	47,1106	42,1106
120	0,6086	96,0214	50,6675	45,6675
130	0,6593	106,8360	54,0352	49,0352
140	0,7100	117,9317	57,1977	52,1977
150	0,7607	129,2949	60,1393	55,1393
160	0,8114	140,9136	62,8442	57,8442
170	0,8622	152,7771	65,2967	60,2967
180	0,9129	164,8756	67,4809	62,4809
190	0,9636	177,2003	69,3811	64,3811
200	1,0143	189,7432	70,9816	65,9816
210	1,0650	202,4971	72,2664	67,2664
220	1,1157	215,4550	73,2200	68,2200
230	1,1665	228,6108	73,8263	68,8263
240	1,2172	241,9587	74,0698	69,0698
250	1,2679	255,4934	73,9346	68,9346
260	1,3186	269,2098	73,4050	68,4050
270	1,3693	283,1031	72,4651	67,4651
280	1,4200	297,1691	71,0991	66,0991
290	1,4707	311,4036	69,2914	64,2914
300	1,5215	325,8027	67,0261	62,0261
310	1,5722	340,3627	64,2875	59,2875

BİBLİYOGRAFİK BİLGİ FORMU

1.Proje No: MİSAG-NSF-1

2.Rapor Tarihi : Mayıs, 2003

3.Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri : 17.05.2000 – 17.05.2003

4.Projenin Adı : Application of VAPEX to Carbonate and Sandstone Reservoirs

5.Proje Yürütücüsü : Doç.Dr. Serhat Akın

Araştırmacılar : Prof.Dr. Suat Bağcı, Araş. Gör. Serhat Canbolat

6.Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi : Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü, 06531, Ankara.

7. Destekleyen Kuruluş Adı ve Adresi :

8. Öz: Bu çalışmanın amacı VAPEX yönteminin ağır petrol içeren karbonat ve kumtaşı içeren rezervuarlara uygulanabilirliğini araştırmaktır. Bu amaca ulaşmak için deneyler yapılmış ve sayısal benzetim teknikleri kullanılmıştır. Değişik yatay kuyu sistemleri, değişik gazlar ve değişik debiler kullanılarak saha ve pilot uygulamalar için bir veritabanı oluşturulmuştur. Deneysel sonuçlar VAPEX işleminin homojen kumtaşlarında heterojen karbonatlara oranla daha iyi kurtarım verdiğini ve N-bütan enjeksiyonunun propan ve karbon dioksit oranla daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir. Deneyler asfalt çökeliminin kullanıldığı bir sayısal benzetim programı ile modellendi. Asfalt çökeliminin çözücü odası gelişimi ile doğru orantılı olduğu görüldü.

Anahtar Kelimeler: VAPEX, bütan, propan, CO₂ enjeksiyonu, buhar destekli gravite drenaj, termal benzetim.

9. Proje İle İlgili Yayın Bilgileri : Canbolat, S., Akın, S. ve Kovscek, A.R.: "A Study of Steam Assisted Gravity Drainage Performance in the Presence of Non-Condensable Gases" SPE 75130 SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium, 13-17 Nisan 2002, Tulsa, Oklohama, A.B.D.

10. Bilim Dalı : Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği

Doçentlik Bilim Dalı Kodu : Rezervuar

11. Dağıtım : Sınırsız

12. Raporun Gizlilik Durumu : Gizli Değil