

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DENİZ ULAŞTIRMA İŞLETME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DENİZE DÖKÜLEN HAM PETROLÜN YERİNDE YAKMA YÖNTEMİ İLE  
TEMİZLENMESİNDE DUMANIN AZALTILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Faruk Buğra DEMİREL**

**HAZİRAN 2013**

**TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DENİZ ULAŞTIRMA İŞLETME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DENİZE DÖKÜLEN HAM PETROLÜN YERİNDE YAKMA YÖNTEMİ İLE  
TEMİZLENMESİNDE DUMANIN AZALTILMASI**

**Faruk Buğra DEMİREL**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
“DENİZ ULAŞTIRMA İŞLETME YÜKSEK MÜHENDİSİ”  
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24.05.2013  
Tezin Savunma Tarihi : 17.06.2013**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ersan BAŞAR**

**Trabzon 2013**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**  
**Deniz Ulaştırma İşletme Mühendisliği Anabilim Dalında**  
**Faruk Buğra DEMİREL tarafından hazırlanan**

**DENİZE DÖKÜLEN HAM PETROLÜN YERİNDE YAKMA YÖNTEMİ İLE  
TEMİZLENMESİNDE DUMANIN AZALTILMASI**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 28 / 05 / 2013 gün ve 1507 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**olarak kabul edilmiştir.**

**Jüri Üyeleri**

**Başkan : Prof. Dr. Ercan KÖSE** .....

**Üye : Doç. Dr. Ersan BAŞAR** .....

**Üye : Yrd. Doç. Dr. Özkan UĞURLU** .....

**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ**  
**Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

Günümüzde petrol kullanımı gün geçtikçe daha çok artmakta ve bu talebi karşılamak için petrol çeşitli ulaşım ve lojistik yöntemler ile dünyanın her bölgesine nakledilmektedir. Bu nakil sırasında gerçekleşen kazalar, oldukça kompleks bir kimyasal karışım olan petrol veya türevlerinin doğaya saçılmasına ve çevre felaketlerine yol açmaktadır. Geçmişten günümüze gerçekleşen pek çok büyük kirlilik her zaman basın ve doğal olarak toplumun ilgisini çekmiş ve yakından takip edilmiştir. Petrole bulanmış kuş resmi hemen hemen herkesin bildiği bir çevre kirliliği sembolüdür ve petrol kirliliğinin yarattığı dramatik sonuçları ortaya koyar.

Bu çalışma, petrol kirliliği müdahale yöntemlerinden biri olan, yıllardır kullanılmasına karşın, neden olduğu atmosferik kirlilik kaygıları ile kullanılması hep tartışılmış olay yeri yakma yönteminin, ortaya çıkardığı gaz emisyonlarını azaltmak için farklı bir uygulama modeli içermektedir. Çok büyük miktarlardaki petrolü, kısa zamanda yakarak yok eden bir yöntem olan olay yeri yakımı, yanma esnasında ortaya çıkan siyah ve yüksek kurumlu dumanın azaltılması ile beraber daha etkili ve çevre dostu bir petrol temizleme yöntemi olabilir. Çalışmada, çeşitli deneysel test yakımları gerçekleştirilmiş, ponza taşının patentli bir üretim modelinden geçirilerek üretilen ecopomex® isimli ürün, suyun üzerindeki petrol tabakasına uygulanarak çeşitli gözlemlerde ve ölçümlerde bulunulmuştur.

Hem sahada, hem laboratuvarında bir ekip olarak büyük emekler verilerek yapılan bu testler için Ecopomex S.A.M. firmasına ve AR-GE sorumlusu Bülent BİRDEN'e teşekkür ederim. Yüksek lisans dönemimin her aşamasında verdiği sonsuz destek ve bana duyduğu güven için, çocukluğumdan ve kaptanlık mesleğinden ağabeyim, üniversiteden hocam ve danışmanım Sayın Doç. Dr. Ersan BAŞAR'a, tezin yazılması için çok büyük yardımları olan, çok sevgili dostum Arş. Gör. Ekrem EYÜBOĞLU'na teşekkürü bir borç bilirim.

Faruk Buğra DEMİREL  
Trabzon 2013

## **TEZ BEYANNAMESİ**

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Denize Dökülen Ham Petrolün Temizlenmesinde Yerinde Yakma Yönteminde Dumanın Azaltılması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Ersan BAŞAR ‘ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, deneyleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

24/05/2013

Faruk Buğra DEMİREL

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VII
SUMMARY.....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar (ÇİZELGELER) DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Petrolün Genel Yapısı ve Ürünleri.....	3
1.2.1. Ham Petrol.....	3
1.2.2. Petrol Ürünleri.....	4
1.2.3. Hidrokarbon.....	4
1.2.4. Doymuş Bileşikler / Parafinler.....	5
1.2.5. Olefinler.....	5
1.2.6. Aromatikler.....	5
1.2.7. Çok Halkalı Aromatik Hidrokarbonlar.....	5
1.2.8. Polar Bileşikler.....	6
1.3. Petrol ve Petrol Ürünlerinin Özellikleri.....	7
1.3.1. Viskozite.....	7
1.3.2. Yoğunluk.....	8
1.3.3. Çözünübilirlik.....	9
1.3.4. Parlama Noktası.....	9
1.3.5. Akma Noktası.....	9
1.4. Petrol Kirliliği.....	10
1.4.1. Petrolün Doğadaki Davranışı.....	13
1.4.1.1. Fiziksel ve Kimyasal Ayrışma (Weathering).....	13

1.4.1.2.	Buharlaşma .....	14
1.4.1.3.	Emülsifikasyon (Emulsification) .....	16
1.4.1.4.	Doğal Dispersiyon (Natural Dispersion) .....	19
1.4.1.5.	Çözünme (Dissolution) .....	20
1.4.1.6.	Fotooksidasyon (Photooxidation) .....	20
1.4.1.7.	Sedimentasyon (Sedimentation) .....	21
1.4.1.8.	Biyolojik Bozunma (Biodegregation) .....	21
1.4.1.9.	Katran Toplarının Oluşumu. ....	22
1.4.2.	Petrolün Hareketi. ....	23
1.4.2.1.	Petrolün Yayılımı.....	23
1.4.2.2.	Petrol Tabakasının Hareketi.....	24
1.4.2.3.	Petrol Tabakasının Batması. ....	25
1.5.	Petrolün Su Üzerinde Toplanması. ....	25
1.5.1.	Bariyerlerin Yapısı.....	26
1.5.2.	Bariyer Tipleri.....	27
1.5.3.	Bariyer Karakteristiği.....	29
1.5.4.	Bariyerlerin Kullanım Şekilleri.....	29
1.6.	Petrolün Sudan Temizlenmesi .....	32
1.6.1.	Sıyırıcılar.....	32
1.6.1.1.	Yağ Tutan (Oleophilic) Sıyırıcılar .....	33
1.6.1.2.	Bent (Weir) Sıyırıcılar .....	34
1.6.1.3.	Emici veya Vacum Sıyırıcılar .....	35
1.6.2.	Olay Yeri Yakma. ....	36
1.6.2.1.	Petrolün Ateşlenmesi. ....	38
1.6.2.2.	Coşkulu Yanma.....	40
1.6.2.3.	Yakım İçin Suda Toplama Yöntemleri .....	41
1.6.2.4.	Yanma Verimliliği ve Yanma Oranı.....	43
1.6.2.5.	Yanan Petrolden Kaynaklanan Gaz Emisyonu. ....	44
1.6.2.6.	Partikül Haldeki Madde. ....	45
1.6.2.7.	Gaz Halindeki Duman Ürünleri. ....	47
1.6.2.8.	Dumanın Azaltılması. ....	47
2.	YAPILAN ÇALIşMA .....	49
2.1.	Metot.....	49

2.1.1.	Ecopomex® .....	49
2.1.2.	Petrol Ürünleri. ....	52
2.1.3.	Yakım Alanı.....	52
2.1.4.	Ecopomex®'in Sudan Alınması. ....	52
2.1.5.	Laboratuvar Ekipmanı. ....	53
2.2.	Test Süreçleri .....	54
2.2.1.	Test 1.....	54
2.2.2.	Test 2.....	56
2.2.3.	Test 3.....	58
2.2.4.	Test 4, Test 5 ve Test 6. ....	59
2.3.	Fotoğraf Kareleme ve Puanlama Sistemi.....	59
3.	BULGULAR.....	60
3.1.	Test 1.....	60
3.2.	Test 2.....	61
3.3.	Test 3.....	62
3.4.	Test 4.....	63
3.5.	Test 5.....	64
3.6.	Test 6.....	65
4.	TARTIŞMA VE SONUÇLAR. ....	68
5.	ÖNERİLER.....	71
6.	KAYNAKLAR. ....	73
ÖZGEÇMİŞ		



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

DENİZE DÖKÜLEN HAM PETROLÜN YERİNDE YAKMA YÖNTEMİ İLE  
TEMİZLENMESİNDE DUMANIN AZALTIKMASI

Faruk Buğra DEMİREL

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Deniz Ulaştırma İşletme Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Doç. Dr. Ersan BAŞAR  
2013, 79 Sayfa

Giderek kullanımı artan petrol ve türevlerinin nakliyesi, kullanımı veya çıkarılması sırasında oluşabilecek petrol kirliliği, çeşitli müdahale yöntemleri kullanılarak ortadan kaldırılmaya çalışılır. Yerinde yakma tekniği su yüzeyine dökülen petrolün yakılarak yok edilmesini sağlayan bir petrol temizlik yöntemidir. Bu yöntem, yakım sırasında ortaya çıkan siyah dumanın ve kurum üretiminin atmosferik etkileri ve sağlığa zararları dolayısı ile çok tartışılmaktadır. Bu çalışmada, ecopomex® adlı ürün dumanın azaltılması için suyun üzerindeki petrol tabakasına uygulanarak yakım sırasında ortaya çıkan duman miktarı, klasik yakımlar ile karşılaştırılmıştır. Yakımlar video ile kayıt altına alınmış, dumanın en yoğun olduğu anların fotoğrafları gridlenip puanlanıp her yakım için bir duman yoğunluğu ve opaklık değeri oluşturulmuştur. Yakım sonunda tankta kalan petrol miktarları ölçülerek klasik yakım ve ecopomex®'li yakım arasındaki farklılıklar hesaplanmış olup, yanma verimliliği ve yanma oranları hesaplanarak ürünün yanmaya olan etkileri araştırılmıştır. Fotoğraflama ve gözle yapılan gözlem bu ürünün yakım sırasında duman opaklığı ve yoğunluğunda % 70 civarında azalmaya neden olduğunu göstermiştir. Yanmayan ve aynı zamanda adsorber bir sorbent olan ecopomex® uygulanmış yanmalar sonucunda sudan temizlenen toplam petrol miktarlarında % 10 ila % 50 arasında artış tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler :** Petrol, Petrol Kirliliği, Yerinde Yakma, Petrol Temizliği, Ecopomex®

Master Thesis

SUMMARY

SOOT REDUCTION OF IN-SITU BURNING WHILE CLEANING OF THE SPILLED  
CRUDE OIL FROM SEA

Faruk Buğra DEMİREL

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Maritime Transportation and Management Engineering Graduate Program  
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ersan BAŞAR  
2013, 79 Pages

Oil spills which may occur while the transportation, extraction and the use of oil, can be removed by several oil spill response techniques. In-situ burning is one of these techniques that the spilled oil slick on the water surface burned and removed. Although it is used for decades, decide makers and public still has concerns about the black smoke plume created by burning itself and its hazardous effects to health and to the atmosphere. In this study, 2 classical in-situ burns, totally 6 experiments were conducted on a test tank and the product called ecopomex<sup>®</sup> were applied to oil slicks with two different ways as free pouring and cage system. All the tests has been recorded by video and photography techniques and the photograph of the densest moment of each test separated into grids for evaluation to determine the opacity, blackness and the amount of the smoke plume. The amount of residue oil after the burn had been measured and the difference between classic and ecopomex<sup>®</sup> poured burns were examined. Also burn efficiency and burn rate of tests were calculated to see the effects of the product to burning. The evaluation with the grid method showed that the burns conducted with ecopomex<sup>®</sup> has 70 % less opacity and density compared to classical burn. The total amount of oil which is removed from the water also increased by 10 to 50 % as an incombustible and oleophilic product, ecopomex<sup>®</sup> applied to the burns and recovered.

**Key Words :**Oil, Oil spill, In situ burning, Oil spill cleaning, Ecopomex<sup>®</sup>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Şekil 1. Petroldeki hidrokarbon çeşitlerinin karşılıklı ilişkisi .....	7
Şekil 2. Genel olarak petrol ve türevlerinin 15°C’de zamana göre buharlaşma yüzdelelerini gösteren grafik .....	15
Şekil 3. Çeşitli petrol ve ürünlerinin yayılım hızları .....	24
Şekil 4. Farklı yönlerdeki rüzgar ve akıntının petrol tabakasının hareketine etkisi .....	24
Şekil 5. Bariyerin yapısı ve temel elemanları .....	26
Şekil 6. Genel olarak bariyer tipleri .....	28
Şekil 7. Çeşitli bariyer donatım şekilleri .....	31
Şekil 8. Sırasıyla disk, silindir ve halat skimerlerinin şematik ve gerçek görüntüsü .....	34
Şekil 9. Bent tipi skimerlerin şematik ve gerçek görüntüsü .....	35
Şekil 10. Vakum pompasına bağlı emici uçlu bir sıyırıcı .....	36
Şekil 11. Olay yeri yakımında ısı transferi .....	39
Şekil 12. Etrafa sıçrayan yanar taneciklerin ve yüksek alev boyunun gözlemlendiği coşkulu yanma evresi .....	41
Şekil 13. Yanmaz bariyer çeşitleri ve kısımları .....	42
Şekil 14. Çeşitli boyutlarda ki ecopomex® .....	51
Şekil 15. Çalışmanın yapıldığı tankın şematik olarak boyutları ve şematik olarak bariyer yerleşimi .....	53
Şekil 16. Yakım tankı ve yanmaz metal bariyerlerin görüntüsü .....	53
Şekil 17. Klasik olay yeri yakımı ve ateşleme .....	55
Şekil 18. Yakıcı ecopomex®’in bariyer içindeki petrole serbest yüzecek şekilde uygulanması .....	56
Şekil 19. Serbest halde petrol tabakasına uygulanmış yakıcı ecopomex®’in ateşlemeden birkaç saniye sonraki ve yakım sonrasında toplanmasını gösteren fotoğraf .....	58
Şekil 20. Kafes sistemi ile ecopomex® uygulanmasının görüntüleri .....	58
Şekil 21. Gridlenmiş referans fotoğraf .....	59
Şekil 22. Test 1 için en yoğun duman anının karelenmiş fotoğrafı .....	61
Şekil 23. Test 2 için en yoğun duman anının karelenmiş fotoğrafı .....	62
Şekil 24. Test 3 için en yoğun duman anının karelenmiş fotoğrafı .....	63

Şekil 25. Test 4 için en yoğun duman anının karelenmiş fotoğrafı.....	64
Şekil 26. Test 5 için en yoğun duman anının karelenmiş fotoğrafı.....	65
Şekil 27. Test 6 için en yoğun duman anının karelenmiş fotoğrafı.....	66

## TABLolar DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Tablo 1. Petrolün genel olarak kimyasal içeriği .....	3
Tablo 2. Genel olarak petrol ve ürünlerinin özellikleri .....	10
Tablo 3. 1990-1999 yılları arasında petrolün dünya sularına yıllık olarak .....	11
Tablo 4. Dünya tarihinde kaza sonucu gerçekleşmiş en büyük 25 petrol kirliliği .....	12
Tablo 5. Petrolün su aldığı 5 yol .....	19
Tablo 6. Bazı aromatik petrol bileşenlerinin suda çözünürlükleri .....	20
Tablo 7. Bariyer saptırma açıları ve kritik akıntı hızları .....	30
Tablo 8. Çeşitli petrol ve türevlerinin yanma karakterleri .....	44
Tablo 9. Ecopomex®'in kimyasal bileşimi .....	50
Tablo 10. Ecopomex®'in fiziko-kimyasal özellikleri.....	51
Tablo 11. Test 1, Test 2, Test 3, Test 4, Test 5 ve Test 6'nın değerleri ve sonuçları .....	67

## KISALTMALAR VE SEMBOLLER DİZİNİ

API	: American Petroleum Institute
ASTM	: American Society for Testings and Materials
BE <sub>0</sub>	: Çalışmada yakım için kullanılan ecopomex <sup>®</sup> miktarı (Gram)
BE <sub>1</sub>	: Yakım için kullanılan ecopomex <sup>®</sup> , in yakım sonrası miktarı (Gram)
C	: Karbon
CO	: Karbon monoksit
CO <sub>2</sub>	: Karbon dioksit
E <sub>0</sub>	: Çalışmada adsorber olarak kullanılan ecopomex <sup>®</sup> miktarı (Gram)
E <sub>1</sub>	: Kalıntı petrolü adsorbe etmiş ecopomex <sup>®</sup> miktarı (Gram)
EPA	: Environmental Protection Agency
H	: Hidrojen
HC <sub>0</sub>	: Çalışmada kullanılan ham petrol miktarı (Gram)
HC <sub>B</sub>	: Yakıcı ecopomex <sup>®</sup> , in adsorbe ettiği toplam petrol miktarı (Gram)
HC <sub>R</sub>	: Adsorbe edilen toplam petrol miktarı (Gram)
HB%	: Yakılan Petrol yüzdesi (Ağırlık %)
HH%	: Yakım sırasında adsorbe edilen petrol yüzdesi (Ağırlık %)
HR%	: Sudan temizlenen petrol yüzdesi (Ağırlık %)
ISO	: International Organization for Standardization
ITOPF	: International Tanker Owners Pollution Federation Ltd.
LIDAR	: Light Detection and Ranging
LPG	: Liquefied Petroleum Gas
MARPOL	: International Convention for the Prevention of Pollution from Ships
NRT	: National Response Team
PAH	: Polycyclic Aromatic Hydrocarbon
PPM	: Parts per million
SO <sub>2</sub>	: Sülfür dioksit
U.S.	: United States
VOC	: Volatile Organic Compounds
µm	: Mikrometre

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Petrol, günümüz modern dünyasının şekillenmesinde belki de en büyük etkiyi yapan enerji kaynağıdır. Uğruna savaşlar başlatılmış, kanlar dökülmüş, ülke sınırları değiştirilmiştir. Petrol, ulaşım için, arabalarda, gemilerde, uçaklarda, trenlerde; ısınma için, evlerde, ortak kullanım alanlarında; plastik olarak hemen her endüstriyel üründe; kısacası günlük hayatımızın hemen hemen her alanında kullandığımız ve kullanımını artırarak sürdürdüğümüz bir fosil yakıttır. Her yıl tonlarca kullanılan bu ürünün dünya genelindeki lojistiği ve nakliyesi sırasında oluşan kazalar, bu çok değerli, fakat aynı zamanda sağlık açısından zararlı ürünün çevreye saçılmasına, doğal olarak da maddi ve çevresel zararlara yol açmaktadır.

Dünya petrol trafiğinin büyük bir bölümü, denizler üzerinden sağlandığından, tarih sahnesinde birçok kez petrol tankeri veya platformu faciası yaşanmış; bu kazaların hepsi büyük doğal felaketler ile sonuçlanmıştır. Deniz üzerinde meydana gelen petrol kirliliği oldukça büyük alanlara yayıldığı ve kontrol altına alınması çok zor olduğu için, bu kazalar trajik çevresel etkilere neden olmuşlardır. Dünyanın en büyük petrol kirliliği ile sonuçlanan Körfez Savaşı'nın ardından televizyonlarda ve gazetelerde sıkça gördüğümüz ve petrol kirliliği denilince akla ilk gelen imge olan petrole bulanmış kuş resmi, yalnızca medyanın abartarak bize sunduğu bir duygu sömürsü değil, gerçek bir olgudur.

Petrol kirliliğinin etkileri, insanoğlunun on yıllardır üzerinde çalışarak oluşturduğu bir takım temizleme teknikleri ve kirlilik bölgesine yapılan çeşitli müdahaleler ile en aza indirilmeye çalışılmaktadır. Bu çalışmada, son yıllarda küresel olarak bir temizleme yöntemi olarak kendini daha fazla kabul ettiren bir yöntem olan "Olay yeri yakma" İngilizcesi ile "In Situ Burning" tekniği ile ilgili bir dizi deney gerçekleştirilmiştir.

Olay yeri yakımı, denizde gerçekleşen petrol kirliliği müdahale tekniklerinden yalnızca birisidir, fakat çok büyük miktarlardaki petrolü oldukça kısa zamanda yok ettiği için, özellikle kıyı hatlarından uzak açık deniz kirliliklerinde sıkça tercih edilebilecek bir yakarak yok etme yöntemi halini almıştır. Meksika Körfezi'nde 2010 yılında meydana gelen dünyanın ikinci en büyük petrol kirliliğinde oldukça yoğun olarak kullanılan bu

yöntemin en büyük dezavantajı, yakım anında ortaya çıkan çok yüksek konsantrasyonlu siyah duman sütunudur. Bu siyah duman atmosfere salınan birçok zehirli gaz anlamına gelmekte ve canlı sağlığına tehdit oluşturabilecek birçok madde ihtiva etmektedir. Çoğu zaman kirliliğe müdahale alanındaki operasyonlardan sorumlu karar vericiler, denizde kalan petrolün mü yoksa atmosfere salınacak zehirli gazların mı çevre için daha büyük bir tehdit olduğuna karar vermek zorunda kalmaktadırlar.

Bu çalışmanın birinci bölümünde, denizde meydana gelen petrol kirliliği hakkında genel bilgiler verilmiştir. Petrol ve ürünleri tanıtılmaya ve canlı sağlığı için neden tehlikeli oldukları anlatılmaya çalışılmıştır. Dünyadaki petrol ihtiyacı ve bu ihtiyacın doğurduğu taşıma, nakil ve çıkarılma süreçlerinde gerçekleşen kazaların neden olduğu kirlilik istatistikleri verilmiştir. Doğada bozunabilen bir ürün olan petrolün, çevre şartlarına karışınca uğradığı doğal çözünme/ayırışma (weathering) süreçlerine değinilmiştir. Kirlilik sonrası deniz yüzeyinde yüzer halde bulunan petrol tabakasının bir araya toplanması ve temizlenmesi ile ilgili çeşitli donanımlar ve teknikler anlatılmıştır. Son olarak, olay yeri yakma müdahale yöntemi incelenmiş, bu yöntemin geçmişi, bugünü, özellikleri, uygulama yöntemleri, avantaj ve dezavantajları aktarılmaya çalışılmıştır.

İkinci bölümde, olay yeri yakma tekniğinin en büyük engeli olan yoğun dumanın azaltılması için yapılan bir dizi deney anlatılmıştır. Ecopomex S.A.M. adlı firma tarafından üretilen bir ürün olan ecopomex<sup>®</sup>, çeşitli şekillerde petrol tabakasına uygulanarak, yanma esnasında ortaya çıkan dumanı azaltmak ve daha verimli bir yanma sağlamak için, yakma deneyleri yapılmış ve bu deneylerin yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir.

Çalışmanın amacı, giderek daha yaygın bir kirlilik müdahale yöntemi olarak kabul edilen olay yeri yakımı tekniğinde, yanma sonucu ortaya çıkan ve atmosfere yayılan yoğun duman sütununun azaltılması için, yeni bir ürünün kullanımı ve ortaya çıkan sonuçların değerlendirilmesidir. Çalışmada, yakım sonrası suda kalan petrol miktarları hesaplanmış ve yakma sırasında oluşan duman yoğunlukları gözlemlenmiştir. Ecopomex<sup>®</sup> kullanılmadan ve kullanılarak aynı deneyler yapılmış, ve bu deneyler karşılaştırılarak klasik olay yeri yakımı ile ecopomex<sup>®</sup> uygulanmış yakım arasındaki farklılıklar ortaya konulmaya çalışılmıştır.



## 1.2. Petrolün Genel Yapısı ve Ürünleri

Petrolü, modern dünyada sürekli olarak tüketilen en önemli madde olarak tanımlamak mümkündür. Petrol, günlük hayatımızda kullanılan birçok plastik türü ve diğer maddelerin üretilmesinin yanında, taşıma, ısınma, sanayi gibi enerjiye ihtiyaç duyulan her noktada yakıt olarak kullanılmaktadır (Speight, 2007). Petrol kelimesi, Latince petra ve oleum kelimelerinin birleşiminden türemiştir ve yeraltındaki rezervlerde birikmiş, hidrokarbon zengini birçok gaz, akışkan, yarı akışkan ve katı maddeyi ifade etmek için kullanılan bir terimdir. Petrol, diğer adı ile ham petrol, kaynağının çeşidini yansıtan rengi, kokusu ve akışkanlık özellikleri ile oldukça değişkendir (Speight, 2002).

### 1.2.1. Ham Petrol

Ham petrol, temel olarak karbon ve hidrojenle oluşmakla beraber, az miktarlarda sülfür, oksijen, azot gibi maddelerle birlikte, nikel, vanadyum, demir, krom gibi metalleri de eser miktarlarda ihtiva eder. Oranlar Tablo 1’de gösterilmektedir (ASTM D-4175, 2000). Benzin, motorin, jet-A1 gibi rafine petrol ürünleri, ham petrolün çeşitli şekillerde distilasyonu ile türetilen petrol türevleridir (Wang vd.,1999). Ham petrol, küçük ve uçucu bileşiklerden oluşan hidrokarbon türevleri ile büyük ve uçucu olmayan hidrokarbon türevlerinin bir karışımıdır. Ham petrolün karakteristiği, bulunduğu bölgedeki coğrafi şartlar ile değişkenlik göstermektedir. Bu değişikliklerden birini örneklemek gerekirse, daha ziyade daha büyük hidrokarbon bileşiklerinden oluşan ham petrolün, yoğunluğu ve viskozitesi yüksek olacaktır. Benzin ve motorin gibi petrol ürünleri, ham petrolden üretilen ve daha az bileşikten oluşan karışımlardır ve özellikleri bakımından daha spesifik, daha az değişkendirler (Fingas, 2001).

Tablo 1. Petrolün genel olarak kimyasal içeriği (Speight, 2007)

Madde	Miktar
Karbon	%83,0 - %87,0
Hidrojen	%10,0 - %14,0
Azot	%0,1 - %2,0
Oksijen	%0,05 - %1,5
Sülfür	%0,05 - %6,0
Metaller (Nikel ve Vanadyum)	<1000 ppm

### 1.2.2. Petrol Ürünleri

Petrol ürünleri ve yakıtlar, ham petrolün rafine edilmesiyle üretilen, rafineri gazı, etan, sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG), nafta, benzin, bunker-c, uçak yakıtı, deniz yakıtı, kerosen, motorin, damıtılmış fuel oil, gazyağı, yağlar, gres yağı, balmumu, asfalt, beyaz madeni yağ ve bunlar gibi çoğaltılabilecek birçok ürünü içine alan bir yelpazedir. Petrol ürünleri oldukça karmaşık kimyasallardır ve bu yüzden kimyasal ve fiziksel karakterlerini yüksek hassasiyet ve doğruluk ile tespit etmek hatırı sayılır derecede çalışma gerektirmektedir. Aslında, petrol ürünlerinin analizi, süreçsel problemlerin çözümüne ışık tutabilecek özelliklerin bilinmesinin yanı sıra, hali hazırda kullanılan petrol ürününün performans ve fonksiyonlarını göstermesi açısından da gereklidir. Ham petrol ve türevleri olan ürünler çok çeşitli bileşiklerden oluşurlar ve her zaman olmamakla birlikte genelde hidrokarbon ihtiva ederler. Karbon atomlarının sayısı arttıkça, petrol karışımlarının karmaşıklığı da o oranda artmaktadır (Speight, 2002).

### 1.2.3. Hidrokarbon

Petrolün içerdiği hidrojen ve karbon elementlerinin oranı genel olarak, petrolün cinsine bağlı olmakla beraber %50 ile %97 arasındadır. Petrolün ihtiva ettiği hidrokarbon miktarı alt sınır olan %50 olsa dahi petrol hidrokarbon türevinin tüm neredeyse bütün özelliklerini taşımaktadır. Bu nedenle ham petrolün ve petrol ürünlerinin en büyük ve önemli kısmını hidrokarbonlar oluşturur demek mümkündür (Speight, 2007). Hidrokarbonların sınıflandırılması ise, ayrıştırma teknikleri yardımı ile izole edilebilmelerine bağlıdır ve yapısal olarak birbirinden ayrılır. Speight (2002) kimyasal olarak petrol ürünlerini, parafinler, olefinler, naften ve aromatikler olarak dört fraksiyonel tip olarak alt sınıflara ayırmıştır. Parafin hidrokarbonlar, aynı anda normal ve dallı alkanlardan oluşurken, olefinler tek veya çok çiftli veya üçlü karbon-karbon bağları ihtiva eder. Nafta, petrol endüstrisinde özel bir terimdir ve doymuş halkalı hidrokarbon olarak bilinen sikloalkanların diğer adıdır. Aromatikler, benzen yapısında bir veya daha fazla halka bulunduran hidrokarbonların tümü için kullanılan terimdir.

#### **1.2.4. Doymuş Bileşikler / Parafinler**

Çeşitli ham petrol türlerinde bulunan doymuş bileşikler, her bir karbon atomunun etrafında en fazla sayıda bulunan hidrojen atomlarından meydana gelen alkanlardan oluşmaktadır. “Doymuş” terimi, karbon atomlarının hidrojen atomuna doymasından dolayı kullanılmaktadır. Doymuş bileşik grubuna dâhil olan sikloalkanlar ise, aynı şekilde oluşan hidrokarbon bileşiğindeki karbon atomlarının birbirlerine halkalar halinde bağlanmasıyla oluşur. Yüksek moleküler ağırlıktaki doymuş bileşikler genelde petrol mumu ya da vaks olarak adlandırılmaktadır (National Academy of Sciences, 2003).

#### **1.2.5. Olefinler**

Olefinler ya da diğer adı ile doymamış bileşikler, olabilecek maksimumdan daha az sayıda hidrojen ihtiva ederler. Olefinler, en azından bir adet karbon-karbon çiftli bağ bulundurmalıdır ki bu durum iki hidrojen atomunun yerini alır. Dikkate değer miktarlarda olefin yalnızca rafine petrol ürünlerinde bulunmaktadır (National Academy of Sciences, 2003).

#### **1.2.6. Aromatikler**

Aromatik bileşikler en az bir adet benzen halkası bulundurur. Benzen halkaları sağlam yapıdadır ve doğa etkilerine karşı çok dayanıklı olmaları ile beraber, organizmalar üzerinde ciddi bir toksin etkisi gösterirler. Ham petrolde bulunan daha uçucu monoaromatik (tek halkalı) bileşikler genelde benzen, toluen, etilbenzen, ksilen ya da kısaca BTEX (Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene) olarak adlandırılır (National Academy of Sciences, 2003).

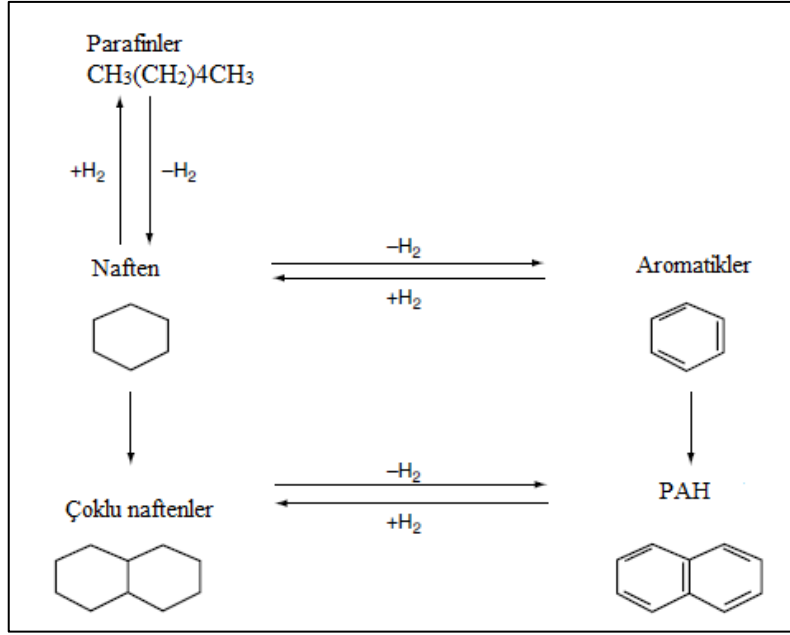
#### **1.2.7. Çok Halkalı Aromatik Hidrokarbonlar (PAH)**

Çok halkalı aromatik hidrokarbonlar (PAH) en az iki adet benzen halkasından oluşurlar. Yanan petrol, kömür ve orman ürünlerinden ortaya çıkabilirler. Özellikle yanma işlemi tamamlanmamış petrol ve kömür gibi ürünler hatırı sayılır miktarlarda PAH

oluşmasına neden olmaktadır. Tipik bir ham petrol %0,7 ile %7 arasında PAH ihtiva edebilir. Çeşitli aromatik bileşikler (içerdikleri sülfür, nitrojen ve oksijen nedeni ile hidrokarbon olarak adlandıramazlar), aynı analitik teknikler ile saptanırlar ve gerçek PAH'lar ile birlikte ortaya çıkabilirler. Bu bileşikler de genel olarak PAH olarak adlandırılır ve gruplandırılır. Petrol ve petrol ürünlerinin içindeki hidrokarbonların arasında PAH, toksin olarak çevreye en büyük ve ciddi tehdidi oluşturmaktadır (National Academy of Sciences, 2003). Dört ile altı arası benzen halkası ihtiva eden PAH'lar, daha az benzen halkasından oluşanlara kıyasla çok daha zehirli ve kanserojendir (U.S Environmental Protection Agency Office of Solid Waste, 1985). Fareler üzerinde yapılan laboratuvar deneyleri, çok halkalı aromatik hidrokarbonların birçoğunun, yemek, solunum veya direk deri teması ile tümör gelişimine, doğum kusurlarına ve bağışıklık sistemi hasarına neden olabileceğini göstermektedir (United States Environmental Protection Agency Office of Solid Waste, 2008).

#### **1.2.8. Polar Bileşikler**

Polar bileşikler, sülfür, azot ve oksijen gibi elementler ile yaptıkları bağlar neticesinde yüklenmiş moleküler bileşiklerdir. Bazı durumlarda, molekülün sahip olduğu polarite, yüklenmemiş bileşiklerden davranışsal olarak farklılıklar göstermesine neden olur. Petrol endüstrisinde, en küçük polar bileşiklere "Resin" adı verilir. Daha büyük polar bileşikler ise "Asfaltenler" olarak adlandırılır ve yol yapımında kullanılan asfalt maddesinin büyük çoğunluğunu oluştururlar (National Academy of Sciences, 2003). Petroldeki hidrokarbonun karşılıklı ilişkisi Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Petroldeki hidrokarbon çeşitlerinin karşılıklı ilişkisi (Speight, 2007)

### 1.3. Petrol ve Petrol Ürünlerinin Özellikleri

Sıvı halde bulunan ham petrolün ve rafine petrol ürünlerinin özelliklerini anlamak, çeşitli nedenlerle doğaya ve suya karışan petrolün davranışlarını anlama ve buna göre bir çözüm planı oluşturmada çok önemlidir.

#### 1.3.1. Viskozite

Viskozite, yani diğer adı ile akma direnci, bir sıvının akmaya karşı gösterdiği dirençtir. Viskozitenin düşük olması demek, akışkanlığın daha fazla olması anlamına gelmektedir (Symon, 1971). Petrol ürünlerinin veya ham petrolün viskozitesi, içeriğinde bulunan ağır veya hafif fraksiyonların miktarı ile doğrudan ilgilidir. Eğer petrol, doymuş bileşikler açısından zengin, asfaltenler açısından fakir ise, viskozitesi de aynı oranlarda düşük olacaktır (National Academy of Sciences, 2003). Petrol ürünlerinin viskozitesi, bu ürünlerin dünyanın herhangi bir yerinden başka bir bölgesine taşınması konusunda çok önemli bir parametredir (Werner vd., 1998). Özellikle boru hatları taşımacılığında, petrol bir borunun içinden akarak yer değiştirdiğinden ötürü, viskozite değerinin doğru

aralıklarda olduğundan emin olunması çok büyük bir önem taşımaktadır (Centeno vd., 2011).

### 1.3.2. Yoğunluk

Yoğunluk, belirli bir hacimdeki petrolün kütlesinin  $\text{gr/cm}^3$  cinsinden ifade edilmesidir. Petrol endüstrisi tarafından ağır ve hafif ham petroleri ifade etmek için kullanılır. Ayrıca yoğunluk, bir petrol ürününün veya ham petrolün suyun üzerinde yüzüp yüzmeyeceğinin bilinmesi açısından da çok önemlidir. Saf suyun yoğunluğu  $15^\circ\text{C}$  sıcaklıkta  $1 \text{ gr/cm}^3$ 'e çok yakındır ( $0.9991026 \text{ gr/cm}^3$ ) (Tanaka vd., 2001). Petrol ürünlerinin yoğunluğu büyük çoğunlukla  $0.7 \text{ gr/cm}^3$  ile  $0.99 \text{ gr/cm}^3$  arasında değişmektedir. Deniz suyunun yoğunluğunun yaklaşık olarak  $1.03 \text{ gr/cm}^3$  olduğunu düşünürsek, en ağır petrol türevlerinin dahi deniz suyu üzerinde yüzeceğini söyleyebiliriz (National Academy of Sciences, 2003). Yoğunluk ayrıca, çevreye karışan petrol ürünlerinin nasıl bir doğal bozunmaya uğrayacağını anlamada da etkilidir. Örnekleme gerekirse; Hafif petrolün içerdiği hidrokarbonlar, mikrobiyolojik bozunma ve buharlaşmaya daha yatkın olurken, ağır petrolün ihtiva ettiği yüksek moleküler ağırlıklı hidrokarbonlar, doğal bozunmalara karşı daha dayanıklı olmaktadır.

Petrol endüstrisi, özellikle ABD'de yoğunluk yerine özgül ağırlık (Specific Gravity) kavramını tercih etmektedir. Amerikan Petrol Enstitüsü (API) tarafından kullanılan gravite birimi, çeşitli ağırlıklardaki ham petrol ve petrol ürününü sınıflandırmada kullanılmaktadır. API özgül ağırlığı formül 1'e göre hesaplanır (National Academy of Sciences, 2003).

$$\text{API Gravitesi} = \frac{141.5}{\text{özgül ağırlık}} - 131.5 \quad (1)$$

Formüle göre, suyun  $15^\circ\text{C}$  sıcaklıktaki özgül ağırlığını  $1 \text{ gr/cm}^3$  kabul eder isek, API gravitesi  $10^\circ\text{API}$  olacaktır. Bu da demektir ki, API gravitesi  $10^\circ\text{C}$ 'den küçük olan petrol ürünleri suda yüzemeyecek ve batacak, API gravitesi  $10^\circ\text{C}$ 'den büyük olan petrol ürünleri ise suyun üzerinde yüzebilecektir.

### 1.3.3. Çözünübilirlik

Bir maddenin suda çözünübilirliği (solubility), o maddenin dış çevrede nasıl bir karakteristik özellik sergileyebileceğinin ve nasıl yayılıp hareket edeceğinin önemli bir göstergesidir (Page vd., 2000). Petrol ürünlerinin suda çözünübilirliği, ne kadar petrolün ya da ürününün belirli bir miktar su içinde moleküler düzeyde bozunduğu ile ölçülür. Bu çözünme, hiçbir zaman buharlaşma kadar büyük miktarlarda olmamaktadır. Genelde, petrolün suda çözünübilirliği 100 ppm'den azdır. Fakat petrolün suda çözünebilen fraksiyonları bazen çok zehirli olabilmektedir. Çözünme ne kadar küçük bir miktar gibi görünse de, bu fraksiyonlar ciddi toksik etkilerde bulunabileceği için önemlidir (National Academy of Sciences, 2003).

### 1.3.4. Parlama Noktası

Parlama noktası, sıvıların alev alma ve patlama tehlikesi karakteristiklerinin belirlenmesinde kullanılan en önemli değişkendir (Liaw vd., 2008). Parlama noktası, yanıcı bir sıvının buhar basıncı ile ilgilidir ve o sıvının buharı ile hava karışımının yanabileceği/patlayabileceği en düşük sıcaklığı ifade eder (Crowl ve Louvar, 2002). Eğer bir sıvının parlama noktası 60°C'den düşük ise bu sıvı yanıcı olarak kabul edilir. Petrol ve petrol ürünlerinin parlama noktaları çok geniş bir yelpaze oluşturmakta ve çoğu petrol ürünü, özellikle taze iken, yanıcı olarak sınıflandırılmaktadır. Benzin, hangi durumda olursa olsun yanıcı haldedir ve kirlilik durumunda ciddi tehlike arz eder. Ham petrol, uçucu bileşenler bakımından oldukça zengindir ve uçucu bileşenlerini halen ihtiva ettiği kirliliğin ilk 24 saatinde oldukça yanıcıdır. Diğer taraftan, Bunker C veya ağır ham petrol genellikle kirlilik esnasında yanıcılık göstermezler (Fingas, 2013).

### 1.3.5. Akma Noktası

Tanım olarak akma noktası (pour point), petrolün veya türevinin uygun şartlar altında müdahale edilmeksizin hareket edebileceği, akabileceği veya dökülebileceği en düşük sıcaklık değeridir (ASTM D97, 2012). Akma noktası, petrolün saklandığı veya bulunduğu ortam sıcaklığı ile birlikte incelendiğinde, petrolün hareket edebilme yeteneğine

dair önemli bilgiler vermektedir. Akma noktası, rezervuarlarda bulunan petrolün hareket ettirilebilmesi veya akışkan hale getirilebilmesi için uygulanacak ısıtma işlemi için ek bir enerji gerekip gerekmediğinin, sonuç olarak üretim verimliliğinin hesaplanması için de kullanılmaktadır (Speight, 2007). Fingas (2013), akma noktası derecesi için, petrolün akışkanlığını tam olarak kaybetmediği, yalnızca çok yavaşladığı nokta olarak belirtmiştir. Genel olarak petrol ve ürünlerinin özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Genel olarak petrol ve ürünlerinin özellikleri (Fingas, 2013)

Özellik	Birim	Benzin	Dizel	Hafif Ham Petrol	Ağır Ham Petrol	Ortalama Fuel Oil	Bunker C
Viskozite	15°C’de mPa·s	0.5	2	5 ila 50	50 ila 50000	1000 ila 15000	10000 ila 50000
Yoğunluk	15°C’de g/mL	0.72	0.84	0.78 ila 0.88	0.88 ila 1.00	0.94 ila 0.99	0.96 ila 1.04
Parlama Noktası	°C	-35	45	-30 ila 30	-30 ila 60	80 ila 100	>100
Suda Çözünürlük	ppm	200	40	10 ila 50	5 ila 30	10 ila 30	1 ila 5
Akma Noktası	°C	N/A	-35 ila -10	-40 ila 30	-40 ila 30	-10 ila 10	5 ila 20
API Yoğunluğu		65	35	30 ila 50	10 ila 30	10 ila 20	5 ila 15

#### 1.4. Petrol Kirliliği

Petrol kirliliği, son yıllarda dünya gündemini oldukça meşgul eden bir konudur. Petrol kirliliğinin yarattığı devasa çevre felaketleri ve bu kirliliklerin temizlenmesi için harcanan para, dünyada bu konuya karşı bir küresel bir bilinçlenmenin ve ilginin oluşmasına yol açmıştır (Fingas, 2001). Denizde kazara gerçekleşen petrol kirliliği, deniz ekosistemi ve kıyı hattının çevresel faktörleri açısından en büyük tehlikelerden biri olmakla birlikte, çok büyük miktarlarda enerjinin yok olması anlamına da gelmektedir (Aghamiri vd., 2005). Tablo 3’te de görüldüğü gibi, 1990 ve 1999 yılları arasında, yıllık olarak dünya sularına sızan toplam petrol miktarının %47’sini, okyanus diplerindeki katmanların doğal hareketleriyle ortaya çıkan petrol sızıntıları oluşturmaktadır. Bu oran ne kadar büyük olursa olsun tamamen doğal bir süreçtir ve sızıntının yavaş ve sabit olması yarattığı çevresel etkilerin sınırlı olmasına ve ekosistemin bir şekilde kirliliğe uyum sağlamasına neden olmaktadır (National Academy of Sciences, 2003). Endüstriyel olarak



petrol tüketiminin doğal sonuçlarından kaynaklanan petrol kirliliği toplamın neredeyse %40'lık bir bölümünü oluşturur. MARPOL sözleşmesinin izin verdiği ölçülerde yapılan petrol atımları ve operasyondan kaynaklanan rutin sızıntılar toplam oranının %21'i civarındadır. Tanker ve petrol platformlarından kazalar sonucu denizlere karışan petrol miktarı da oransal olarak %10'dur. Görece ve miktar olarak daha az olsa da, denizde kazara gerçekleşen kirlilikler diğerlerine nazaran toplumun ve medyanın daha fazla ilgisini çekmektedir (Burgherr, 2007). Dünyada taşınan petrolün %60'ının tankerler tarafından taşınıyor olması ve bu tankerlerin geçiş rotalarının çok zengin ekosistemler üzerinde bulunması, denizde kazara meydana gelen kirliliklerin görünen en büyük dramatik çevresel sonuçlara neden olmasına yol açmaktadır (Andersson, 2002). Ayrıca, denizde kazara meydana gelen kirliliklerin gerek anlık büyük hacimleri gerekse tahmin edilmezliği bakımından çok ciddi çevresel felaketlerle sonuçlandığı da aşikârdır (Kirby ve Law, 2010). Kirliliğinin yarattığı sonuçlar ne kadar kötü olsa dahi, petrol, günümüz yaşam tarzının değişmez bir parçasıdır ve petrole duyulan ihtiyaç her geçen gün biraz daha artmaktadır. 1980 yılından 2011 yılına kadar dünyadaki toplam petrol tüketimi günlük olarak yaklaşık 61 milyon varilden, 87 milyon varile çıkmıştır (URL-1, 2012).

Tablo 3. 1990-1999 yılları arasında petrolün dünya sularına yıllık olarak ortalama karışma miktarları ve yüzdeleri (Burgherr, 2007)

Kaynak	Kiloton/yıl	%
Doğal Sızıntılar	600	47
-Petrol Çıkarılması	38	3
Petrolün Taşınması		
-Boru hatları	12	1
-Tanker gemileri	100	8
-Diğer		
Petrolün Kullanımı		
-Karasal	140	11
-Operasyonel	270	21
-Diğer	67	6

Burgherr (2007), yaptığı çalışmada, dünyadaki artan petrol tüketimine rağmen denizde meydana gelen kirliliklerin çeşitli regülasyonlar ve kanunlar sayesinde yıllar içinde düşüş gösterdiğini vurgulamaktadır. Öte yandan ITOPF (International Tanker Owners Pollution Federation), yıllık olarak yayınladığı istatistiksel raporlarında, denizlerde

gerçekleşen tanker kaynaklı petrol kirliliklerinde ciddi bir azalma olduğunu göstermektedir (ITOPF 2012). Bütün bu bilgilere rağmen, 2010 yılında Meksika Körfezi'nde sondaj yapan BP şirketine ait Deepwater Horizon petrol platformunda meydana gelen patlama sonucu, yaklaşık olarak 795 milyon litre petrol denize karışmıştır (Yapa vd., 2012). Bu miktar, 1991 yılında Kuveyt Körfez Savaşı'nın sonucunda ortaya çıkan yaklaşık 800 bin ton petrol kirliliğinden sonra, dünya tarihinin en büyük ikinci petrol kirliliğidir (Governing Council of the United Nations Environment Programme, 1993). Hükümetlerin ve kuruluşların uyguladığı kanun ve düzenlemeler, petrol endüstrisinin geliştirdiği yeni çalışma ve operasyon prosedürleri, istatistiksel olarak denizlerde gerçekleşen petrol kirliliğinde bir azalma olduğunu gösterse dahi, Deepwater Horizon gibi felaketler, petrol kirliliğinin halen daha çok büyük bir tehdit unsuru olduğunu ve her an gerçekleşebilecek bir risk olduğunu koymaktadır. Dünya tarihinde şu ana kadar gerçekleşmiş olan en büyük 25 petrol kirliliği, gerçekleşme tarihleri ile beraber sızıntı miktarlarına göre sıralanarak Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Dünya tarihinde kaza sonucu gerçekleşmiş en büyük 25 petrol kirliliği (Fingas, 2013)

No	Tarih	Olay/Gemi	Ülke	Bölge	Miktar (x10 <sup>3</sup> t)
1	26.01.1991	Körfez Savaşı	Kuveyt	Deniz Adası	800
2	20.04.2010	Deepwater Horizon	ABD	Meksika Körfezi	500
3	05.06.1979	IXTOC Patlaması	Meksika	Meksika Körfezi	470
4	19.07.1979	Atlantic Empress-Aegean Captain	Tobago	Karayıplar	287
5	02.03.1992	Petrol Kuyusu Patlaması	Özbekistan	Fergana Vadisi	285
6	04.02.1974	Petrol Platformu Patlaması	İran	Nevruz Sahası	270
7	06.08.1983	Castillo de Bellver	GüneyAfrika	Salhanda Koyu	260
8	28.05.1991	ABT Summer	Angola	Atlantik Okyanusu	260
9	16.03.1978	Amoco Cadiz	Fransa	Britany	223
10	11.04.1991	Haven	İtalya	Cenova	144
11	11.08.1980	Petrol Kuyusu Patlaması	Libya	İçbölge	140
12	10.11.1988	Odyssey	Kanada	Kuzay Atlantik	132
13	18.03.1967	Torrey Canyon	İngiltere	Land's End	119
14	19.12.1972	Sea Star	Umman	Umman Körfezi	115
15	20.08.1981	Depo Tankları	Kuveyt	Shuaybah	110
16	07.12.1971	Texaco Denmark	Belçika	Kuzey Denizi	107
17	25.10.1994	Boru hattı Yırılması	Rusya	Usinsk	105
18	12.05.1976	Urqiola	İspanya	La Coruna	100
19	25.05.1978	Boru hattı Yırılması	İran	Ahvazin	100
20	23.02.1980	Irenes Serenade	Yunanistan	Pylos	100
21	11.02.1969	Julius Schindler	Portekiz	Azorlar	95
22	23.02.1977	Hawaiian Patriot	ABD	Hawaii güneyi	95
23	15.11.1979	Independentza	Türkiye	İstanbul Boğazı	95
24	29.01.1975	Jacob Maersk	Portekiz	Oporto	88
25	06.07.1979	Depo Tankları	Nijerya	Forcados	85

### 1.4.1. Petrolün Doğadaki Davranışı

Petrol denize veya karaya döküldüğünde, diğer bir deyiş ile petrol kirliliği gerçekleştiğinde, adına “petrolün davranışı” denilen bir dizi fiziksel ve kimyasal değişim başlar. Ayrıca petrol, kirliliğin gerçekleşmesinden sonra rüzgâr, akıntı vb. gibi çeşitli etkilerle yer değiştirir, hareket eder. Literatür incelendiğinde, petrolün doğaya/çevreye karıştıktan sonra uğradığı fiziksel/kimyasal ayrışma ve yer değiştirme, “kirliliğin kaderi” (Fate of spill) olarak adlandırılmaktadır. Petrolün kaderinin, kirliliğe müdahale edecek olanlar tarafından iyi hesaplanması, uğrayacağı ayrışma ve yer değiştirmenin doğru tahlil edilmesi, petrol kirliliğinin temizlenmesi için de hayati öneme sahiptir. Örnekleme gerekirse, çok çabuk buharlaşan bir petrol ürününün temizleme çalışması çok kısa sürebilmekte ve kolay olabilmekte fakat atmosfere hızlıca karışan hidrokarbon hava kirliliğine daha kolay yol açabilmektedir. Denize dökülmüş bir petrolün yarattığı tabaka, akıntı ve/veya rüzgar ile ekosistemin çok zengin olduğu bir bölgeye doğru hareket ediyor olabilir ya da kendi kendine çözünerek yok olabileceği, görece daha az ekosistemin bulunduğu bir sahaya doğru yönlenebilir. Gerçekte, kirliliğin kaderi tamamen, kirliliğe neden olan petrol cinsine ve kirliliğin olduğu andaki çevresel etkilere bağlı olarak değişim gösterir (Fingas, 2012).

#### 1.4.1.1. Fiziksel ve Kimyasal Ayrışma (Weathering)

Ham petrolün veya herhangi bir petrol türevinin bir kaza sonucu ya da diğer nedenlerle çevreye karışması ile birlikte, fiziksel ve kimyasal karakteristikleri asıl kirliletenden farklı çeşitli maddeler ortaya çıkaracak olan ayrışma/çözünme süreçleri başlar (National Academy of Sciences, 2003). Ayrışma süreci çeşitli hızlarda gerçekleşebilmekte fakat kirlilikten hemen sonra başlamaktadır. Çözünmenin hızı ve şekli, çevresel faktörlerden ziyade petrol veya petrol türevinin cinsi ile çok daha fazla ilgilidir. Ayrışma süreci içinde bulunan olayları önem sırasına göre sıralamak gerekirse; Buharlaşma (evaporation), emülsifikasyon, doğal dispersiyon, çözünme (dissolution), ışılıükselgenim (photooxidation), sedimentasyon, maddelere bağlanma (adhesion to materials), ince taneli mineraller ile etkileşim, biodegregation (biyolojik bozunma) ve katran kürelerinin oluşumudur (Fingas, 2013). Başar (2010) yapmış olduğu çalışmada Marmara Denizi’nde

oluşabilecek petrol dağılıma ve ayrışma süreçlerini zamansal olarak tespit etmiştir. Bu çalışmada ham petrolün ayrışması ile yayılımı arasındaki ilişki belirlenmiştir.

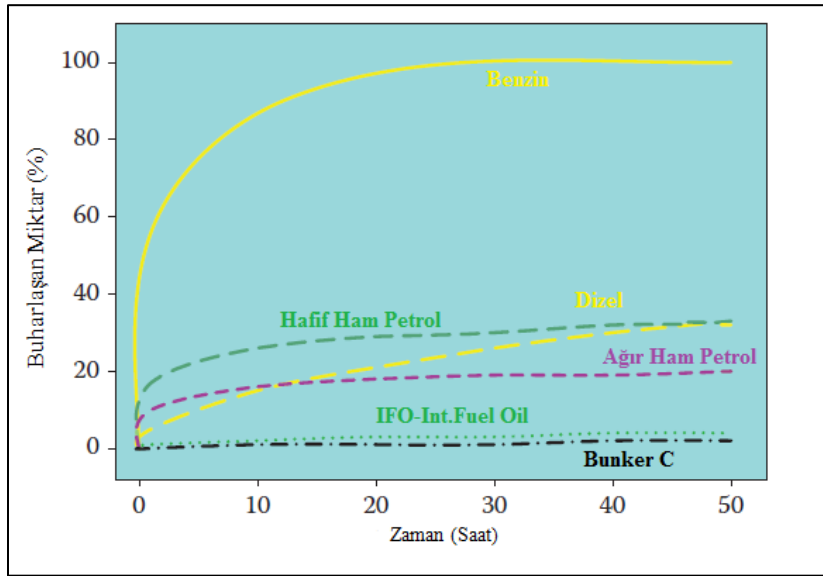
#### **1.4.1.2. Buharlaşma**

Bir sıvının buharlaşması, moleküllerin sıvı yüzeyinin üzerinde doğru buhar/gaz fazına geçmesi olayıdır (Monteith ve Unsworth, 1990). Buharlaşma, kirliliğe neden olan petrolün, doğaya karışmasından sonra uğradığı en önemli süreçtir (Fingas, 1995). Bu sebepten, kirliliğe neden olan petrolün buharlaşma hızını ve özelliklerini bilmek, özellikle kirliliğe yapılacak müdahale için büyük önem taşır. Buharlaşmanın nitelik ve nicelikleri, o anki atmosferik buhar konsantrasyonunu ve doğal olarak çevredekilerce maruz kalınacak olan toksik ortamı da etkilemektedir. Buharlaşma, petrolün fiziksel, kimyasal ve toksik özellikleri ile beraber, yoğunluğunu, viskozitesini ve petrol içindeki daha hafif fraksiyonların oluşumunu değiştirebilir (Stiver ve Mackay, 1984). Kirliliği takip eden birkaç gün içerisinde, hafif ham petroler ilk andaki hacimlerinin yaklaşık olarak %70'ini, orta ağırlıktaki ham petroler ise yaklaşık %40 kadarını buharlaşma sebebiyle kaybederler. Ağır veya atık petrolerde ise buharlaşma yalnızca %10'luk bir kayba yol açmaktadır (National Academy of Sciences, 2003). Buharlaşma süreci her ne kadar basit olsa da, buharlaşmanın miktarının hesaplanabilmesi için kullanılan modellemeler çoğu zaman oldukça zor hesaplanmaktadır. Bunu temel sebebi, petrolün yüzlerce farklı maddeden oluşması ve bu maddelerin özelliklerinin zaman ile çok çabuk değişmesidir. Literatürde kullanılan buharlaşma modellerinin genel olarak suyun buharlaşma ilkelerinin bir çeşit ölçümlemesi şeklinde oluşturulmasının ana sebebi budur (Fingas, 1995; National Academy of Sciences, 2003). Petrolün buharlaşmasının hesaplanması için kullanılan modellemeler ilk olarak, Sutton (1934)'in oluşturduğu gibi suyun buharlaşması için kullanılan eşitlikler ile yapılmıştır. Daha sonraları Stiver ve Mackay (1984), rüzgar hızı, kirlilik alanı, sıvının buhar basıncı, gas içeriği, sıcaklık ve uçucu molar akıntı ile kütle transfer katsayısı arasında bağlantılar üreterek bu modellerin daha ayrıntılı olmasını sağlamıştır. Buharlaşma yüzeyinin üzerindeki hava tabakasına "sınır tabakası" (boundary-layer evaporation) adı verilir ve bütün bu çalışmalarda, petrolün buharlaşma mekanizmasının temeli sınır tabakası regülasyonu varsayılarak oluşturulmuştur (Monteith ve Unsworth, 1990). Ancak bu varsayım deneysel olarak kanıtlanmamıştır. Sonraları Fingas (1995), bu regülasyonun özellikle suyun üzerinde yüzen ince petrol tabakaları için yetersiz olduğunu göstermiştir.

Fingas (1997), buharlaşma karakteristikleri farklı 19 çeşit petrol ve petrol ürününün, belirli sıcaklıklardaki distilasyon miktarlarını kullanmış ve zamana göre ağırlık azalışlarını, deneysel olarak inceleyerek karekök denklem için (2) ve logaritmik denklem için (3) numaralı bağıntıları kurmuştur. Yapılan deneylerde, 180°C'deki distilasyon yüzdelerinin bağıntı parametreleri ile iyi bir uyum sağladığı belirlenmiştir. Deneyde kullanılan üç çeşit hariç (Dizel, FCC Ağır petrol, Bunker C) bütün petrol ve ürünleri logaritmik eğrilere uyum gösterirken, bahsi geçen diğer üç çeşit petrol 5 günlük süre zarfı için karekök eğrilerine uygunluk göstermiştir (Fingas, 2004). Genel olarak petrol ve türevlerinin buharlaşma yüzdeleri Şekil 2'de gösterilmiştir. Denklemlerde, “%D” 180°C’de distile edilen ağırlık yüzdesi, “t” dakika cinsinden zamandır.

$$\text{Buharlaşan yüzdesi} = 0.165(\%D) \ln t \quad (2)$$

$$\text{Buharlaşan yüzdesi} = 0.0254(\%D)\sqrt{t} \quad (3)$$



Şekil 2. Genel olarak petrol ve türevlerinin 15°C’de zamana göre buharlaşma yüzdelerini gösteren grafik (Fingas, 2013)

Benzin gibi hafif petrol ürünleri birkaç gün hatta saat içinde, donma sıcaklığının birazcık üstünde bile neredeyse tamamen buharlaşırlar. Fakat Bunker C gibi ağır petrol türevleri çok uzun süreler yüksek sıcaklıklarda olsalar dahi kayda değer ölçülerde azalmazlar. Petrol ve ürünlerinin buharlaşması birçok şekilde suyun buharlaşma

özelliklerinden ayrılır. Petrol ve ürünleri suya nazaran rüzgâr hızına ve yüzey alanına daha az tabidir. Fakat petrolün buharlaşması kirlilik veya dökülme sonrası yüzeyinde oluşan “Kabuk” sebebiyle yavaşlayabilmektedir. Bu olay genellikle petrolün su ile karışmadığı kara kirliliklerinde daha sık görülür. Eski kirliliklerden alınan petrol örnekleri incelendiğinde, kabuk oluşan petrolerin altında kalan bölgeden buharlaşma olmadığı, kabuk oluşmayan petrolerin ise neredeyse tahta sertliğine ulaşıncaya kadar buharlaştığı görülmüştür (Fingas, 2013).

Petrolün özellikleri de buharlaşmanın büyüklüğüne göre değişiklik gösterir. Yüzde 40’ı buharlaşan bir petrolün viskozitesi bin kat artabilir. Yoğunluğu %10, parlama noktası ise %400 kadar yükselebilir (Fingas, 2013).

#### **1.4.1.3. Emülsifikasyon (Emulsification)**

Emülsiyon, bir sıvının diğerinin içerisinde mikroskobik ya da ultra mikroskobik damlacıklar olarak bulunduğu iki veya daha fazla sıvının oluşturduğu karışımdır (URL-2, 2013). Bir karışımın emülsiyon olarak adlandırılabilmesi için belirli bir dengeye sahip olması gerekir. Aksi halde süreç emülsifikasyon değil su alımı (water-uptake) olarak adlandırılır (Fingas, 2013). Petrol kirliliğinde emülsifikasyon süreci, yağ içinde su emülsiyonlarının oluştuğu süreçtir ve endüstri çalışanları arasında çoğu zaman “Çikolata Köpüğü” (Chocholate mousse) veya sadece “Köpük/Krema” (mousse) olarak isimlendirilir (Fingas ve Fieldhouse, 2003). Bu emülsiyonlar oluştuğunda, petrol kirliliğinin temizliğini oldukça zorlaştırırlar. Bunun nedeni kararlı bir emülsiyonun %60 ila %80 arasında su ihtiva etmesi ve kirliliğe neden olan petrolün hacminin 2 ile 5 kat arasında artmasıdır. Ayrıca, emülsifikasyon süreci sonucunda, petrolün viskozitesi de 500 ile 1000 kat artar. Bu durum ilk başlarda sıvı olan petrolün süreçle beraber yarı katı, ağır bir madde haline gelmesine neden olur. Emülsiyon haldeki petrolün, standart petrol kirliliği araçları ile yeniden elde edilmesi de zordur (Fingas ve Fieldhouse, 2011).

Petrol içinde su emülsiyonlarının oluşumu yıllardır araştırma konularından birisi olmuştur (Berridge, 1968). Birçok araştırmacıya göre, bu emülsiyonları oluşturan ve büyük ihtimalle dengesini sağlayan en önemli faktör petrolün asfaltten bileşenidir. Asfalttenler ham petrolün en kompleks bileşenidir (Mullins vd., 2006) ve çok geniş bir kategoride incelenmelerine rağmen günümüzde yalnızca çökelim özellikleri ile birlikte tanımlanabilirler (Fingas ve Fieldhouse, 2011). Petrol temizliği operasyonlarında çalışmış

olan birçok kişi, petrolün fraksiyonlarındaki asfaltinin emülsiyonun dengesini değiştirdiğini belirtmiştir (Fingas ve Fieldhouse, 2009). Sinerjik etki yaratan “Resin” gibi bileşenlerin azlığında dahi asfaltinler, kararlı emülsiyonlar oluşturabilecek, katı, elastik tabakalar oluşturabilirler (Spiecker vd., 2003). Emülsiyonlar oluşmaya, deniz enerjisinden kaynaklanan kuvvetle beraber 10 ile 25 µm boyutundaki küçük su taneciklerinin petrolün içine girmesi ile başlar. Petrolün içine giren su tanecikleri yavaşça, petrol katmanının dibine doğru çöker. Petrolün içindeki asfaltin ve resin gibi bileşenler su damlacıkları ile etkileşerek onları dengede tutar. İçerikteki asfaltin ve resin miktarı, bir emülsiyonun oluşup oluşmayacağını etkilemektedir. Ayrıca, emülsiyonun oluşması için gerekli ortamın oluşması, petrolün bir miktar buharlaşması sonrasında oluşabilmektedir. Bunun sebebi buharlaşmanın petroldeki düşük moleküler kütleli bileşenleri azaltması ve viskozitenin kritik eşiğe ulaşmasıdır (Fingas, 2013).

Fingas ve Fieldhouse (2003), Suyun dört farklı şekilde petrolün içinde bulunabileceğini belirtmektedir. Bunlara bazı petrol ve türevlerinin içinde % 1 oranında çözülmüş halde bulunan “Çözülmüş Su” (Soluble Water)’da eklenebilir. Petrol içinde çözülmüş olarak bulunan su, petrolün fiziksel veya kimyasal özelliklerini kayda değer şekilde değiştirmez. Diğer dört şekil, sürdürme etkisi, dış görünüş ve reolojik ölçümler ile belirlenmiştir (National Academy of Sciences, 2003).

Kararsız Emülsiyonlar ’da (Unstable Emulsions) su tanecikleri petrol içinde emülsiyon oluşturacak kadar yeterli süre kalamazlar. Bu durum, su taneciklerinin deniz enerjisi ile uygun şekilde petrolün içine girememesi, petrolde yeter kadar resin veya asfaltin olmaması veya petrol viskozitesinin düşüklüğü ile su taneciklerinin petrol dışına çıkmasının engellenememesi dolayısı ile gerçekleşebilir. Bu tip emülsiyonlar deniz etkisinin azalması ile birkaç saat içinde petrol ve su olarak ayrılırlar. Kararsız emülsiyonlar neredeyse başlangıçtaki petrol ile aynı görünüme ve özelliklere sahiptir. Yarı-kararlı emülsiyonların (mesostable emulsions) özellikleri, kararlı emülsiyonlar ile kararsız emülsiyonlar arasında bulunur (National Academy of Sciences, 2003). Su taneciklerinin, petrolün viskozitesi ve asfaltin veya resinlerin uyguladığı arayüzey etkisi ile belli bir düzeyde petrol içinde dengelenebildiği emülsiyonlardır. Bunun gerçekleşebilmesi için petrolün ihtiva ettiği asfaltin/resin oranı, ağırlığın en az % 3’ü olmalıdır. Bu emülsiyonların viskozitesi başlangıç petrolünün 20 ila 80 katıdır. Birkaç gün içinde su-petrol veya su-petrol-emülsiyon döküntüleri olarak parçalanabilen bu emülsiyonlar, akmazdır ve parçalanıncaya kadar kırmızı-kahverengi renktedir. Asfaltin ve resin

miktarlarının yeterli olduğu emülsiyonlara Kararlı emülsiyonlar (Stable Emulsions) adı verilir. Bu emülsiyonların viskoziteleri başlangıç petrolüne göre 800 ila 1000 kat daha fazladır ve aylarca parçalanmadan dengeli ve kararlı şekilde kalabilirler. Kırmızı-kahverengi renkte olan bu emülsiyonlar neredeyse katı halde görünürler ve yüksek viskozitelerinden ötürü yayılma eğilimi göstermeyerek denizin veya sahilin üzerinde öbekler ve katmanlar şeklinde bulunurlar. Resin veya asfaltların kimyasal etkisi olmaksızın, yalnızca petrolün viskozitesine bağılı olarak denizin uyguladığı enerji ile oluşan karışımlara “Hapsolmuş Su” (Entrained Water) adı verilir. Su tanecikleri petrole nüfuz edebilir fakat viskozite etkisi ile çok yavaş hareket ederler ve çökme hızları yavaş olur. Bu durum Petrolün %30 ila %40 su tutmasına neden olacaktır. Ancak bu karışım denizin neden olduğu enerji azalınca biter (Fingas, 2013).

Emülsiyon oluşumu petrol kirliliğinde oldukça önemli bir olaydır. Birinci ve en önemlisi, kirliliğin gerçek hacmini önemli ölçüde artırır. Emülsiyon henüz başlangıçta %50 ila %70 oranında su ihtiva eder. Kararlı hale gelip tam olarak oluşan emülsiyonlar bazı durumlarda kirliliği hacim olarak tam 3 katına çıkarabilirler. Öte yandan, petrolün viskozitesi, oluşan emülsiyon tipine göre 1000 kat artabilir. Fiziksel ve kimyasal bu değişiklikler, bir temizleme operasyonunu oldukça zorlaştırır. Kararlı bir petrol emülsiyonunun dağılması, sıyırıcılar ile toplanması veya yakılması neredeyse imkânsız bir hal alabilir. Emülsiyonlar yakılmak veya sıyırıcılar ile toplanmak için özel kimyasallar yardımı ile parçalanabilirler. Ayrıca emülsiyonlar, oksitlenme, emulsifiye olmayan petroller ile seyreltme, donma-çözülme işlemi ve doğal ayrışma ile su-petrol parçalanmasına uğrayabilirler. Yarı-dengede emülsiyonların parçalanması nispeten daha kolaydır fakat kararlı emülsiyonlar doğal yollar ile parçalanması yıllar alabilir. Emülsiyon oluşumu her yönden petrolün kaderini etkileyen bir süreçtir. Kararlı veya yarı-kararlı emülsiyonlar buharlaşmayı ve biyolojik bozunmayı yavaşlatır. Emülsifikasyon ayrıca, petrolün çözünebilen bileşenlerini de azaltabilir (Fingas, 2013). Petrolün su aldığı 5 yol Tablo 5’de gösterilmektedir.



Tablo 5. Petrolün su aldığı 5 yol (Fingas, 2013)

Şekil	Mekanizma	Başlangıç Özellikleri	Gereklilik	Su alımı sonrası		Viskozite Artışı*	Su Alımı
				Renk	Tipik Ömür		
Çözünmediği	Çözünme	Çoğu Ürün		Aynı	Yıllar	1	<%1
Karasız veya Su almayan	Yok	Pek Çok		Aynı		1	-
Yarı-kararlı	Viskozite ve A/R etkileşimi	Orta Viskozite ve A/R	Deniz Enerjisi	Parçalanana kadar Kırmızımsı	3 ila 6 gün	50	%50 ila 70
Kararlı	Viskozite ve A/R etkileşimi	Orta Viskozite ve A/R	Deniz Enerjisi	Kırmızımsı	Aylar	800 ila 1000	%60 ila 80
Hapsolmuş	Viskozite		Deniz Enerjisi	Petrol Rengi	2 ila 10 gün	2 ila 5	%30 ila 40
Not: A/R Asfaltanlar ve Resinler *Başlangıç petrolüne göre viskozite artışı							

#### 1.4.1.4. Doğal Dispersiyon (Natural Dispersion)

Doğal dispersiyonda, su yüzeyine yayılmış olan petrol, deniz dalgalarının ve türbülansın etkisi ile taneciklere ayrılarak su yüzeyinin altına doğru hareket eder (Delvigne ve Sweeney, 1988). 20µm'den küçük olan petrol tanecikleri görece olarak daha kararlı bir şekilde suda tutunabilirler ve yıllarca aynı halde kalabilirler. Nitekim, 100 µm'den büyük olan tanecikler yüzmeye çok daha fazla meyillidir ve deniz durumunun etkilerine göre yalnızca birkaç saniye suyun altında kalırlar (Fingas, 2013). Doğal dispersiyon, petrolün cinsi ve o anki deniz şartları ile çok etkili bir süreç olabilir. 1993 yılında, İskoçya kıyılarında karaya oturan Braer tankeri, yaklaşık 84000 ton olan yükünün tamamı denize dökülmüştür. Kazanın olduğu tarihte o bölgede etkili olan bir fırtına, ve geminin düşük asfaltan/yüksek aromatik özellikli kargosu sebebiyle kirlilik tamamen doğal dispersiyona uğramıştır (Stagg vd., 1998). Öte yandan, Bunker C veya ağır ham petroler hiçbir şekilde doğal dispersiyona uğramazlar. Dispersiyonun gerçekleşebilmesi için petrolün doymuş ve aromatik bileşenlerinin fazla, asfaltan ve resin bileşenlerinin ise az olması gereklidir. Günümüze kadar olan kirlilik olayları incelendiği zaman, 30 yıldan bu yana doğal dispersiyon süreci her zaman çok hareketli deniz durumlarında gerçekleşmiştir. Dispersiyona uğrayan petrolün uzun süreli kaderi halen daha bilinmemektedir. Petrolün, doymuş bileşenlerinin izin verdiği ölçüde bir miktar bozunmaya uğraması veya deniz dibi ile sedimantasyonu olası senaryolar arasındadır (Fingas, 2013).

#### 1.4.1.5. Çözünme (Dissolution)

Çözünme, bazı petrol bileşenlerinin sudaki kimyasal stabilizasyonudur. Çözünme, kirliliğe neden olan petrolün çok az bir bölümünün yok olmasına sebep olur, fakat suda çözünebilir bileşenler deniz ekosistemi için görece olarak daha zehirli küçük aromatik bileşikler olduğundan, oldukça önemli bir parametredir (National Academy of Sciences, 2003). Kirlilikten sonra yalnızca çok küçük bir miktar suda çözünür. Çözünme süreci petrolün toplam kütlelerini neredeyse değiştirmez. Ancak, kirliliğe neden olan petrolün çok büyük miktarlarda çözünebilir aromatik bileşik içermesi ve kirliliğin kıyı kesimlerde meydana gelmesi, çözünmenin birçok canlı türüne zarar vermesine hatta öldürmesine neden olabilir. Benzin, dizel ve hafif ham petrol gibi aromatik bileşikler içeren petrol türevleri, kirlilikten sonra denizi zehirlemeye daha yatkındırlar. Bazı hidrokarbonların suda ki çözünürlükleri Tablo 6’da verilmiştir (Shiu vd., 1990). Şunu da belirtmek gerekir ki, çözünmeye yatkın olan bileşikler aynı zamanda çok hızlı da buharlaşırlar. Bu sebeplerden ötürü, açık denizlerde oluşan çözünme ekosisteme ve deniz yaşamına ciddi zararlar vermez (Fingas, 2013).

Tablo 6. Bazı aromatik petrol bileşenlerinin suda çözünürlükleri

Bileşik	Çözünürlük (mg/L)
Benzen	1700
Tolüen	530
Etil benzen	170
p-ksilen	150
Naftalen	30

#### 1.4.1.6. Fotooksidasyon (Photooxidation)

Fotooksidasyon petrolün kimyasal özelliklerini değiştirebilen bir süreçtir. Bazı durumlarda, bu sürecin sonucunda oluşan bileşikler başlangıçtaki bileşiklerden daha zehirli olabilmektedir. Bu da süreci çevresel etkileri bakımından önemli kılar (Yordanov vd., 2011). Fotooksidasyon, güneşin neden olduğu radyasyon ile petrol katmanındaki oksijen ve karbonların birleşerek yeni ürünler oluşturması durumudur. Ortaya çıkan yeni bileşikler bazı durumlarda suda çözünür olabilirler (Fingas, 2013). Fotooksidasyonun

gerçekleşebilmesi için radyasyon ve ışığı absorbe eden moleküller diğer adı ile kromoforlar gereklidir (National Academy of Sciences, 2003). Her ne kadar kimyasal açıdan önemli bir süreç olsa da, birçok petrol türevi kirlilik sonrası ne kütleli ne de kimyasal olarak bu süreçten etkilenmez (Fingas, 2013).

#### **1.4.1.7. Sedimentasyon (Sedimentation)**

Sedimentasyon, kirlilik sonrası petrolün herhangi bir su kütesinin veya denizin dibinde birikmesi olayıdır. Geçmişte meydana gelen sedimentasyon olayları, petrolün suda bulunan mineraller ile etkileşerek, petrol taneciklerinin suyun yoğunluğundan daha ağır hale gelmesi ve dibe batması ile oluşmuştur. Deniz dibine serilen petrol bu aşamadan sonra biyolojik bozunmaya maruz kalır ve üzeri çeşitli sedimentler ile örtülmeye başlar. Geçmişte çok iyi incelenmiş olan birkaç kirlilikten elde edilen veriler, %10 gibi ciddi miktarların deniz dibine batabildiğini göstermektedir. Bu miktarlar, denizin dibinde kaçınılmaz bir şekilde petrol ile temas eden biota için çok tehlikeli ve toksik olabilir (Fingas, 2013).

#### **1.4.1.8. Biyolojik Bozunma (Biodegradation)**

Petrol ve ürünlerinde bulunan hidrokarbon, bakteriler ve mantarlar gibi çeşitli mikroorganizmalar tarafından bozunmaya uğrar (Leahy ve Colwell, 1990). Bu süreç, kirliliğe neden olan petrolün deniz ortamından yok olması için en önemli mekanizmalardan biri olarak kabul edilir (National Academy of Sciences, 2003). Birçok bakteri ve mantar, hidrokarbonları bir enerji kaynağı olarak beslenme amaçlı kullanır. Metabolize edilmiş hidrokarbonlar genelde okside olmuş bir bileşiğe dönüşürler (Fingas, 2013). Deniz ortamında, hidrokarbon bozunmasına yol açan en dominant mikroorganizma bakteriler olarak kabul edilmektedir (Leahy ve Colwell, 1990).

Sıcaklık, biyolojik bozunma sürecinde çok ciddi bir rol oynamaktadır. Sıcaklığın artması, viskozitenin düşmesine ve bu sayede dağılımın ve organik bileşiklerin difüzyonunun artmasına neden olacaktır. Ayrıca yüksek sıcaklıklar, bazı hidrokarbonların buharlaşma ve çözünme hızlarını artıracak, bu durum toksin etkisini azaltarak biyolojik dönüşümün daha yüksek konsantrasyonlarda olmasını sağlayacaktır (Margesin ve Shinner,

2001). Sıcaklığın artmasının genel olarak biyolojik bozunma sürecini hızlandırdığı kabul edilse de (Leahy ve Colwell, 1990) düşük sıcaklıkta daha efektif olan mikroorganizmalar da bulunmaktadır. Genel olarak, mikroorganizmalar adapte oldukları bölge şartlarında çok daha iyi bir bozunmaya olanak sağlarlar (Fingas, 2013).

Biyolojik bozunma, 12 ila 20 karbon içeren doymuş (saturates) bileşiklerde çok etkilidir. Aromatiklerin ve yüksek moleküler kütleli asfaltın bozunma süreleri oldukça uzundur. Bu durum yol yapımında kullanılan ve yüksek miktarlarda asfaltın dayanıklılığını da açıklamaktadır. Diğer taraftan, doymuş bileşikler açısından zengin olan dizel yakıtı, oldukça bozunabilirdir. Hafif ham petrol içinde de belli bir seviyeye kadar bozunabilir demek mümkündür. Fakat benzin, her ne kadar bozunabilir bileşenler içerse de, bozunmayı sağlayacak aynı mikroorganizmalar için de oldukça zehirlidir ve bozunmaya uğramadan çok önce buharlaşır. Ağır petroler ve bunker C, biyolojik bozunmaya maruz kalabilecek bileşen ihtiva etmezler (Fingas, 2013).

Biyolojik bozunma aynı zamanda ortamdaki oksijen yeterliliği ile de yakından ilgilidir. Dizel, kara üzerinde oldukça çabuk bozunabilirken, yüzeyin birkaç santimetre altında, oksijen yetersizliğinden çok yavaş bozunur. Örnekleme gerekirse, yaklaşık olarak 1 litre petrolün biyolojik olarak bozunması için, 400000 litre deniz suyunda çözünmüş tüm oksijenin kullanılması gerekir (Fingas, 2013). Oksijen yetersizliği genelde su kolonunun üst bölgeleri için çok sık rastlanmayan bir durumdur. Fakat su dibindeki sedimentler, üzerlerindeki ince bir tabaka haricinde oksijen bakımından fakirdir. Bunların yanında, nitrojen ve fosfor gibi çeşitli besleyici öğeler ve doğal olarak mikroorganizma yeterliliği biyolojik bozunmanın hızını ve karakterini etkilemektedir (Leahy ve Colwell, 1990). Biyolojik bozunmayı etkileyen ve sınırlandıran bütün bu şartlar “Biyoremediasyon” adı verilen ve çevre şartlarının daha uygun hale getirilmesini sağlayan biyosağlatım teknikleri ile değiştirilerek, doğal bozunmanın zararsız ve etkili bir temizleme yöntemi haline getirilmesi sağlanabilir (Margesin ve Shinner, 2001).

#### **1.4.1.9. Katran Toplarının Oluşumu**

Katran topları (Tar balls), ağır petrolün, çapı 10cm’den küçük olmayan kümelenmesi ile oluşmaktadır. Çapı 10 cm ile 1m arasında değişen kümelenmelere katran matı (Tar mats) adı verilir. Oluşumları tam olarak anlaşılmamışsa da, ağır petrol veya bunker c gibi petrolerin artıklarından oluştukları bilinmektedir. Denize dökülen petrolün uğradığı

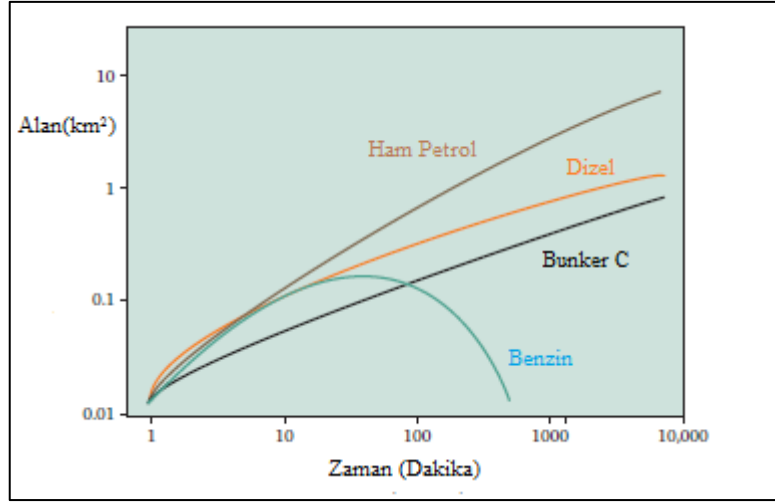
süreçlerin en uç noktası katran küreleridir. Bu küreler genellikle sahiline vurduğu devletlerce yürütülen çalışmalar ile elle veya mekanik olarak toplanarak denizden çıkarılırlar (Fingas, 2013).

### **1.4.2. Petrolün Hareketi**

Petrol denize karışımından sonra çeşitli kuvvetlerin etkisi ile fiziksel olarak hareket eder. Bu hareket, tabaka halindeki petrolün yayılımı, rüzgar veya akıntı gibi etkilerle yer değiştirmesi ve nadiren de olsa batması durumudur.

#### **1.4.2.1. Petrolün Yayılımı**

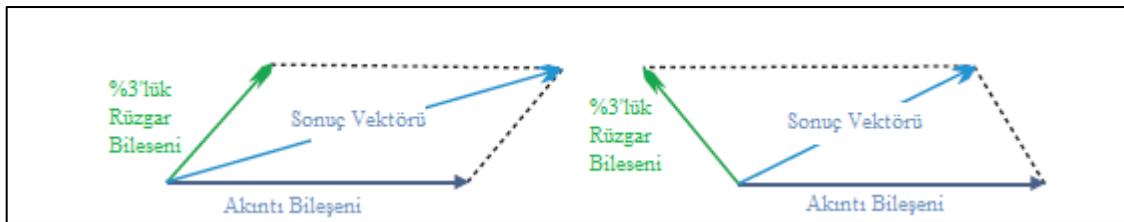
Petrol veya türevleri, suya döküldükten sonra yayılarak bir petrol tabakası oluştururlar. Benzin, dizel ve hafif ham petrolerin oluşturduğu bu tabaka oldukça incedir. Fakat ağır ham petroler ve bunker-c birkaç milimetreyi bulan tabakalar meydana getirebilirler. Aynı zamanda bu tip ağır petroler bazı durularda, katran matları veya küreleri oluştururlar ki bu oluşumlar zamanla incelmeye göstermezler. Çeşitli petrol tiplerinin zaman ve alana göre yaptıkları yayılım Şekil 3'te gösterilmektedir. Petrol, rüzgârın ve akıntının hiç olmadığı durumlarda da yatay olarak yayılım gösterir. Bu yayılım, yerçekimi kuvveti ve su ile petrol arasında ki arayüzey geriliminden meydana gelir (Chebbi, 2000). Viskozite bu olayda ters orantılı olarak çalışır. Zaman ilerledikçe yerçekimi kuvveti zayıflar ancak arayüzey gerilimi petrolün yayılmasına devam etmesini sağlar. Kirliliğin meydana geldiği ilk anda, yayılım hızı görece olarak daha fazladır. Ayrıca tabakanın dış kenarlarının kalınlığı orta bölgelere kıyasla daha incedir. Tabakanın bu haline kırılmış bir yumurta örnek verilebilir. Fakat bu durum birkaç gün içerisinde yok olur. Rüzgâr ve akıntılarda yayılım hızının artmasına sebebiyet verebilmektedir. Petrol tabakası her ne kadar bir kuvvet ile şekil değiştirirse de, rüzgârın veya akıntının hakim yönüne göre şekil olarak uzarlar (Fingas, 2013).



Şekil 3. Çeşitli petrol ve ürünlerinin yayılım hızları (Fingas, 2013)

#### 1.4.2.2. Petrol Tabakasının Hareketi

Petrolün yayılıma gösterdiği doğal yatkınlığın yanında, suyun üzerindeki petrol tabakaları akıntı ve rüzgarın etkisi ile beraber yer değiştirir. Yüzeysel akıntı bu değişimi neredeyse %100 oranında etkilerken, rüzgar hızının yalnızca yaklaşık %3'ü tabakanın hareketine etki etmektedir. Eğer tabaka açık denizde ise ve rüzgar hızı 20 km/h'den yüksek ise rüzgar yönü ve hızı tabakanın hareketinde ağır basabilir. Rüzgar hızı ve yüzeysel akıntı çoğu durumda birlikte düşünülmelidir (Fingas, 2013). Bu tip bir hareket Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Farklı yönlere rüzgar ve akıntının petrol tabakasının hareketine etkisi (Fingas, 2013)

Bir petrol tabakasının hareketi belirlenirken, iki faktör doğruluğa etki etmektedir. Bunlardan ilki ve daha önemli olanı, kirlilik esnasındaki rüzgar ve akıntı hızlarının tam olarak tespit edilememesidir. İkinci ve daha önemsiz olanı ise, dünyanın dönüş yönünden

kaynaklanan Coriolis etkisidir. Bu etki, hareket eden tabakayı çok az miktarlarda, kuzey yarım kürede sağa, güney yarım kürede ise sola doğru saptıracaktır (Fingas, 2013).

#### **1.4.2.3. Petrol Tabakasının Batması**

Batma olayı petrol kümesinin, içinde bulunduğu sudan daha yoğun olması sonucunda, suyun dibine doğru hareket etmesidir. Birçok petrol, sudan yalnızca çok az miktarlarda daha yoğundur ve bu durum petrolün suyun içinde bir denge halinde durmasını ve akıntıların batan petrolü çok fazla etkilemesini sağlar. Petrolün direkt olarak dibe batmaması deniz dibinde ciddi bir birikimin önüne geçer (National Academy of Sciences, 2003). Weems vd. (1997), mississippi nehrinde meydana gelen ağır petrol kirliliğinden sonra nehir dibindeki petrol birikiminin çok az olduğunu ortaya koymuşlardır. Fakat durum akıntının az veya olmadığı durumlarda, petrolün denizin/suyun dibine çökmesi ve burada birikmesi ile sonuçlanacaktır (Hutchinson ve Simonsen, 1979). Her ne kadar mümkün olsa da petrolün suda batması nadir bir olaydır ve gerçekleştiği durumda temizleme operasyonlarını zorlaştırır. Orta çalkantılı denizlerde gerçekleşebilen bir diğer durum ise “Overwashing” olayıdır. Karışık ve çalkantılı denizin petrolü bir miktar batırıp daha sonra tekrar yüzdürmesi olarak tanımlanabilir. Bu olay gerçekleştiğinde petrolün kaderinin belirlenmesi zorlaşacak ve temizleme operasyonu aynı şekilde karışık hale gelecektir. (Fingas, 2012). Sonuç olarak petrolün batması veya su kolonunun içinde yüzer halde kalması temizleme operasyonu açısından zorlaştırıcı ve maliyeti artırıcı bir durumdur (National Academy of Sciences, 2003).

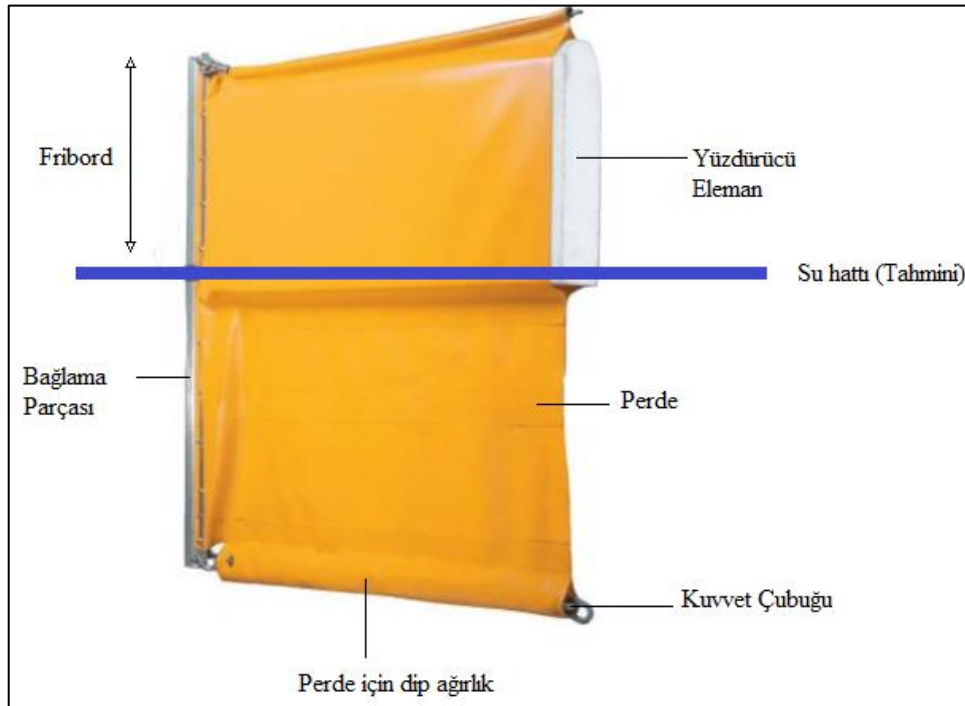
#### **1.5. Petrolün Su Üzerinde Toplanması**

Petrol kirliliğinden sonra, suyun üzerindeki petrolü bir arada tutmanın en yaygın yolu bariyer (boom) kullanmaktır. (Goodman vd., 1997). Petrolün su üzerinde muhafaza edilmesi, kirliliğe neden olmuş olan petrolün diğer alanlara dağılmasını engellemenin yanında, petrolün geri toplanması veya temizlenmesi için bir arada tutulması anlamına da gelir (Wong ve Barin, 2003). Ayrıca su üzerinde çeşitli yöntemler ile hapsedilen petrol daha yoğunlaştırılmış hale geleceğinden yakılması ve toplanması kolaylaşacaktır. Muhafaza bariyerleri (Containment Booms) ya da kısaca bumlar, su üzerindeki petrolü

hapsetmek için kullanılan en temel ekipmanlardır. Olay yeri yakma (In-situ burning) için petrolün bir arada tutulmasını sağlayan bariyerler ısıya dayanıklı malzemelerden üretilirler. (Fingas, 2013).

### 1.5.1. Bariyerlerin Yapısı

Bariyer, suyun üzerinde ki petrolün yayılmasını engelleyen veya yayılma yönünü değiştiren yüzen bir mekanik bariyerdir. Bariyerler, suyun üzerinde ve altında kalacak şekilde dikey bir perde oluştururlar. Ticari olarak piyasada bulunan bariyerler temelde 4 ana bileşenden oluşurlar (U.S. EPA, 1999). Bunlar; bariyeri suyun üzerinde yüzdürecek bir kısım, petrolün bariyerin üzerinden akmasını engelleyecek bir fribord bölümü, suyun altında kalarak kirliliğin alt taraftan akmasını engelleyecek perde benzeri yapı ve tüm bariyerdeki kuvveti taşıyacak bir destek elemanıdır. Bariyerler genellikle, lojistik ve kullanım kolaylığı açısından her bir uçlarında bağlayıcı parçalar olacak şekilde 15-30 m uzunluğunda bölümler olarak üretilirler. Bu bağlayıcı parçalar sayesinde bariyerler uç uca eklenebilir, yedeklenebilir veya demirlenebilirler. Tipik bir bariyerin yapısı Şekil 5'te gösterilmiştir (Fingas, 2013).



Şekil 5. Bariyerin yapısı ve temel elemanları (Fingas, 2013)

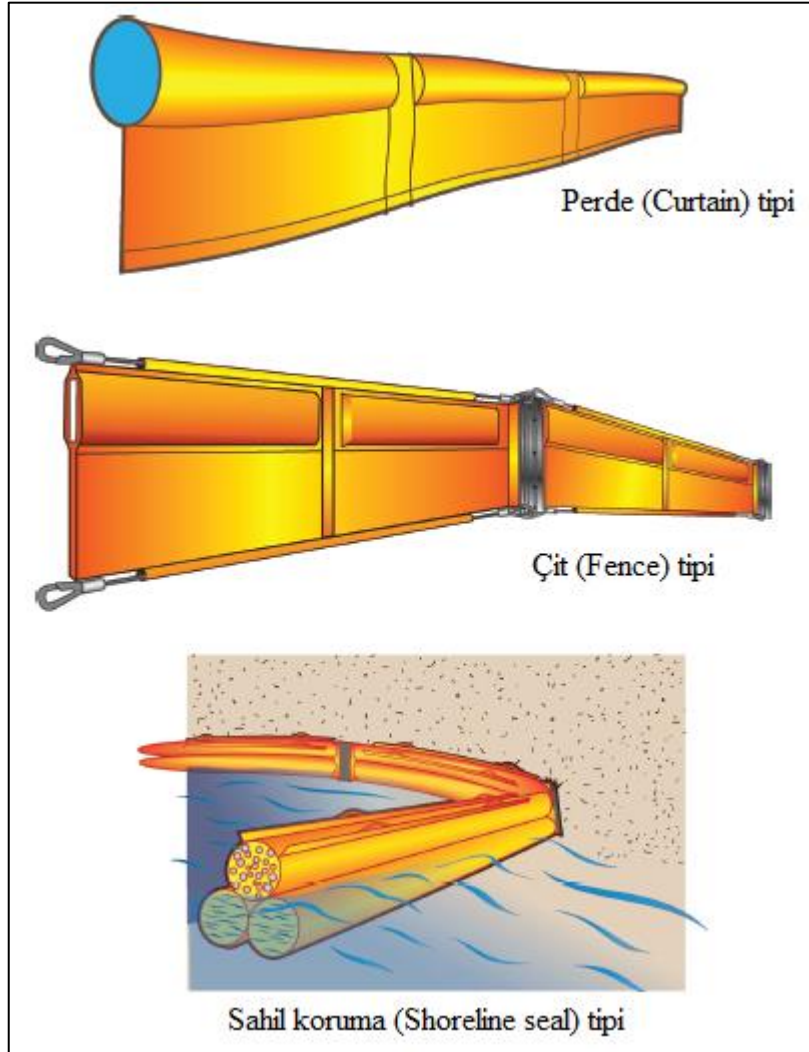


Yüzdürücü (Floating Member) elemanlar bariyerin suyun üzerinde kalabilmesinin sağlarlar. Bazı bariyer tipleri şişirilebilirdir, bu sebeple yüzer özelliktedirler, bazıları ise katı yüzdürücü öğeler ile donatılırlar. Bu katı elemanlar genellikle genişletilmiş poliüretan plastik köpükten üretilirler ve bariyerin deniz dalgalarına karşı hareketli olabilmesi için ya parça parça ya da esnek olarak tasarlanırlar. Şişebilen tipte bariyerler kendi kendine şişebilir özellikte veya başka bir hava kaynağı ile şişirilecek nitelikte olabilir. Daha az yer kaplaması bakımından lojistik anlamda daha avantajlı olsalar bile, dayanıklılık bakımından diğer tip bariyerlere göre daha zayıflardır. Fribord, (Freeboard) kelime anlamı olarak, su hattından üst bölüme kadar olan yüksekliği ifade etmektedir. Bariyerlerde fribord, içeri hapsedilen petrolün, rüzgar ve dalga gibi kuvvetler ile bariyeri aşarak dışarı çıkmasını engellemek amacı ile tasarlanmış üst çıkıntılardır. Perde veya Etek (Skirt) bariyerin su altında kalan kısmında bulunan bölümüdür ve petrolün bariyerin altından geçerek yayılmasını önler. Genellikle yüzdürücü bölümü saran fribord parçası ile aynı bezdir. Bariyer bezleri çeşitli naylon, polyester ve aramid türlerinden veya bunların karışımlarından oluşan liflerden üretilirler. Bu lifler; tuzluluk, güneş ışığı ve aşınma gibi çeşitli operasyon zorluklarına göre tasarlanırlar. Birçok bariyer, genellikle alt tarafına donatılmış bir veya daha çok Gerilim Çubuğu (Tension Member) ihtiva eder. Bu elemanlar bariyer boyunca oluşan yatay gerilimi karşılarlar ve bariyeri dalga-akıntı gibi dış güçlere karşı dayanıklı hale getirirler. Bu gerilim elemanları genellikle çelik zincirler veya kablolardan üretilirler fakat nadiren de olsa naylon veya polyester malzemedende olabilirler. Durgun sular haricince bariyer bezlerinin bu gerilim elemanları olmaksızın uğrayacakları kuvvetlere karşı dayanabilmesi çok zordur. Örnekleme gerekirse, 100 m uzunluğunda bir bariyerin, deniz şartları ve bariyer tasarımına göre, uğrayabileceği kuvvet 10000 kg olabilmektedir. Bu çelik zincirler veya kablolar bazı tip bariyerlerde aynı zamanda dip ağırlık yani Balast (Ballast) ağırlığı özelliği taşırlar ve bariyerin suda dik bir şekilde durabilmesini sağlarlar. Günümüzde üretilen bariyerlerden bazılarında balast için ayrı ağırlık yoktur. Bu bariyerler üst ve alt taraflarındaki kuvvetlerin dengelenmesi sayesinde suda dik durabilirler (Fingas, 2013).

### **1.5.2. Bariyer Tipleri**

Bariyerler üç ana tip olarak üretilmektedirler. Bunlar, Çit tipi (Fence), Perde tipi (Curtain) ve Kıyı koruma tipi (Shoreline Seal) bariyerlerdir. Çit ve perde tipi bariyerler

endüstride en sık rastlanılan modelleridir. Kıyı koruma tipi bariyerler ise görece olarak daha az kullanılırlar. Bariyerler aynı zamanda, açık deniz, kıyı hattı, nehir gibi kullanım yerlerine göre de sınıflandırılabilirler. Çit tipi bariyerler yüzdürücü bölgenin üstünde bir fribord elemanı ile beraber üretilirler ve ucuz olmalarına karşın ağır denizlerde ve şiddetli rüzgarlarda kullanılmaları tavsiye edilmez. Perde tipi bariyerler, yüzdürücü elemanın altında bir etek ile üretilir ve yüzdürücü elemanın kendisi haricinde bir fribord elemanı yoktur. Ağır hava ve deniz durumlarında daha çok tercih edilen bariyer tipidirler. Kıyı hattı koruma bariyerleri genellikle bir tanesi ağırlaştırılmış üç tüp şeklinde üretilirler ve kıyı hattındaki petrolün muhafazası için kullanılırlar. Bariyer tipleri genel olarak Şekil 6'da gösterilmiştir (Fingas, 2013).



Şekil 6. Genel olarak bariyer tipleri (Fingas, 2013)

### 1.5.3. Bariyer Karakteristiği

Bariyerlerin açık denizlerde veya kuvvetli akıntılı bölgelerde kullanılması, bariyerin su üzerindeki stabilitesini etkileyecek ve etkinliğini azaltacaktır. Açık denizlerde meydana gelen dalgalar bariyeri yatay ve dikey olarak çok fazla hareket ettirerek draft kaybına yol açacak, bu durum da bariyerin daha fazla petrol kaçırmaya neden olacaktır (Lee ve Kang, 1997). Deniz şartlarının bu gibi etkilerine karşılık, bariyerler birtakım özelliklere göre üretilir. Yüzerlik-ağırlık oranı ve rezerv yüzerlik (Buoyancy-to-weight ratio ve Reserve buoyancy) bariyerin ağırlığının yüzerliği ile oranlanması ile hesaplanır. Bariyerde bulunan yüzdürücü bölümün, bariyerin stabilitesini, akıntı ve dalga gibi ek kuvvetler bariyeri etkilerken dahi dengede tutarak koruyabilmesi gerekmektedir. Rezerv yüzerlik ne kadar fazla ise, dalga, akıntı veya rüzgar gibi dış kuvvetler bariyeri o kadar az etkileyecek, ve bariyerin su üzerindeki dengesi o kadar stabil olacaktır. Dalga tepkisi (Heave Response) bariyerin rezerv yüzerliği ve esnekliği ile ilgilidir ve bariyerin keskin dalgalara dahi uyum göstermesini sağlar. Dalga tepkisi iyi olan bir bariyer ağır havalarda dahi suyun üzerinde kalarak dalgalarla beraber hareket edecek ve dalganın oluşturduğu güç ile suya batıp çıkmayacaktır. Dönme tepkisi ise bariyerin suda dönmeden suda dik bir şekilde durma yeteneğidir (Fingas, 2013).

### 1.5.4. Bariyerlerin Kullanım Şekilleri

Su üzerindeki petrolü muhafaza için, bariyerlerin çeşitli donatım şekilleri mevcuttur. Genellikle bunlar **U**, **V** ya da **J** konfigürasyonları olarak isimlendirilirler. **U** konfigürasyonu bunlar içinde en çok kullanılanıdır ve bariyerin iki tekne ile beraber yedeklenmesi, bariyerin demirlenmesi veya bu iki tekniğin birleştirilmesi ile beraber uygulanır. **U** şekli yedeklenen bariyerin merkezine uygulanan akıntı sayesinde oluşur. **U** konfigürasyonda en kritik gereklilik, yedekleme sonrasında oluşan **U** şeklinin tepe noktasında meydana gelen akıntının hızının 1 knot eşiğini geçmemesidir ki bu hıza “kritik hız” adı verilir. Bu hızın üzerinde bir akıntıda sular bariyere dik bir şekilde akmayacak ve petrol bariyerin dışına çıkacaktır. Nehirler, körfezler veya boğazlar gibi akıntının daha büyük olduğu bölgelerde saptırma adı verilen bir yöntem uygulanır ve bariyerler çeşitli açılarda yerleştirilerek kritik hızın aşılması önlenir. Bu sayede petrol daha az hassas bölgelere yönlendirilebilir ve mekanik veya yakma yöntemleri ile toplanabilir/yok

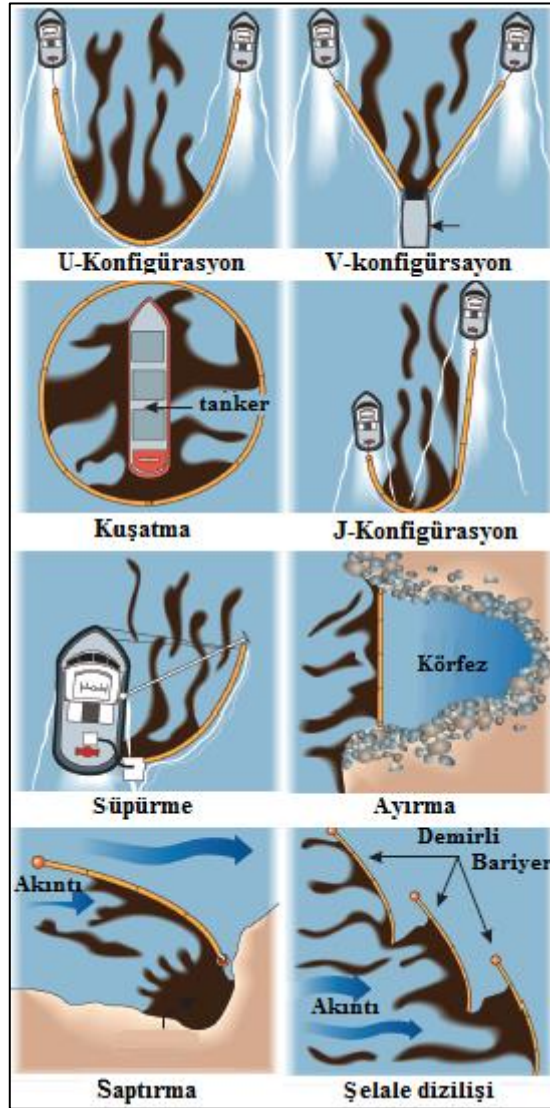
edilebilir. Saptırma açıları ve kritik akıntı hızları arasındaki ilişki Tablo 7’de gösterilmiştir (Fingas, 2013).

Tablo 7. Bariyer saptırma açıları ve kritik akıntı hızları (Fingas, 2013)

Açı	Kritik Hıza ulaşılmadan önceki Dikey Akıntı Hızı*
90	0.5
75	0.5
60	0.6
45	0.7
35	0.9
15	1.9
*Burada verilen hız m/s cinsindedir ve bariyerin akıntıya dik olması durumunda karşılaşılabilecek olan akıntı hızını ifade eder.	

Eğer akıntının gücü çok şiddetli ise birden çok bariyer bir paralel şekilde dizilerek bir “Şelale” görüntüsü elde edilebilir. Bu sayede akıntıyla hareket eden petrol kademeli olarak bir bölgede toplanabilir. Bu teknik genellikle geniş nehirlerde ve tek bir bariyerin dayanamadığı güçlü akıntı bölgelerinde kullanılır. Saptırmanın düzgün bir hat boyunca gerçekleşmesi gereklidir fakat akıntı bariyerin içinde çeşitli kıvrımlara yol açar. Bariyerlerin saptırma için kullanıldığı bölgelerde akıntının bariyere etkisi çok fazladır bu yüzden güçlü bariyerler kullanılmalı ve bariyerler boyu boyunca demirlenmelidir. U konfigürasyon aynı zamanda petrolün hassas ekosistemlerden veya körfezlerden uzak tutulması içinde kullanılabilir. J konfigürasyon U konfigürasyonun bir türevidir ve U konfigürasyonla aynı amaçlar doğrultusunda kullanılabilir. Operasyon esnasında bu iki donatım şekli arasında kolaylıkla geçiş yapmak mümkündür. V konfigürasyon oluşturulurken iki adet bariyerden faydalanılır ve V şeklinin uç noktasına petrolü deniz yüzeyinden toplayan bir sıyırıcı yerleştirilir. Bu sayede hem akıntıya ters bir kuvvet oluşturulur hem de V’nin dip bölgesinde biriken petrol sıyırıcı yardımı ile toplanabilir. Kuşatma, petrol sızıntısı bulunan bir kaynağı ki bu genellikle tankerlerdir, bariyerler ile çevreleyerek petrolün daha fazla yayılmasını engellemek amaçlı yapılan donatma şeklidir. Petrol kayıpları bu durumlarda oldukça sık rastlanır çünkü bariyerin kapasitesi çoğu durumda yetersiz kalır veya akıntılar petrolün bariyerin altından kaçmasını sağlar. Çoğu durumda kuşatma, petrolün daha fazla yayılmasını engellemek için yapılabilecek tek donatım şeklidir. Birçok tanker yükleme/tahliye bölgesinde bir koruma şekli olarak bu yöntem hali hazırda donatılmış olarak bulunur. Bu tip tesislerin genellikle sakin sularda

oldukları düşünüldüğünde, kuşatma tekniği küçük kaçaqlar için oldukça etkili olacaktır. Bazı tesislerde bariyerler temelli olarak yerleştirilmiş halde bulunur ve yıllarca etkinliklerinin yitirene kadar bir koruma tedbiri olarak suyun üzerinde kalırlar. “Süpürme” konfigürasyonu yine aynı şekilde bir U formu oluşturur ancak bunun farkı bir tekneden uzayan sabit bir kol yardımı ile bunu gerçekleştirmesidir. Süpürme konfigürasyonlarında genellikle tekne gövdesine yerleştirilmiş bir skimer bulunur ve aynı zamanda petrolün su üzerinden toplanması sağlanır. Bu amaçla kullanılacak tekneler özel olarak üretilmiştir ve çok yavaş hızlarda dahi manevra yaparak bariyerin etkin olarak işlemlerini sağlarlar (Fingas, 2012). Bariyer donatımına dair çeşitli konfigürasyonlar Şekil 7’de gösterilmiştir.



Şekil 7. Çeşitli bariyer donatım şekilleri (Fingas, 2013)

## 1.6. Petrolün Sudan Temizlenmesi

Petrolün sudan geri kazanımı ve temizleme operasyonlarındaki en büyük amaç, ekonomik ve makul ölçülerde mümkün olduğu sürece en büyük miktardaki petrolü sudan toplamaktır (ITOPF, 2012). Petrolün sudan, çeşitli yöntemler kullanılarak temizlenmesi, genellikle petrolün suda toplanmasından bir sonraki adımdır. Bariyerler ile bir araya getirilen petrol kalınlaşır ve temizlik için daha uygun hale gelir. Aslında, sudaki petrolün temizlenmesi ile muhafazası aynı anda da başlayabilir. Çünkü ilerleyen zaman petrolün yayılmasına ve çözünmesine neden olacak, bu durumda etkili bir temizleme operasyonunu imkânsız kılacaktır (Fingas, 2013). Su üzerindeki petrolün geri kazanımı veya toplanması. Genel olarak dört farklı yöntemle sağlanmaktadır. Mekanik olarak yapılan toplanma işlemi, sıyırıcı (Skimmer) ve sorbentler (Sorbents) adı verilen ekipmanlarla yapılır. Mekanik toplamadan ziyade petrolün su üzerinden yok olmasını sağlamak amacı ile de olay yeri yakımı (in-situ burning) ve dispersant uygulanması yöntemleri kullanılmaktadır (U.S. EPA, 1999). Her metot, kendine göre avantajları ve dezavantajları bünyesinde barındırır. Ayrıca, hangi metodun kullanılması gerektiği, kirliliğin boyutlarına, deniz ve hava koşullarına ve o anki coğrafik konuma göre farklılık gösterir (Fingas, 2013).

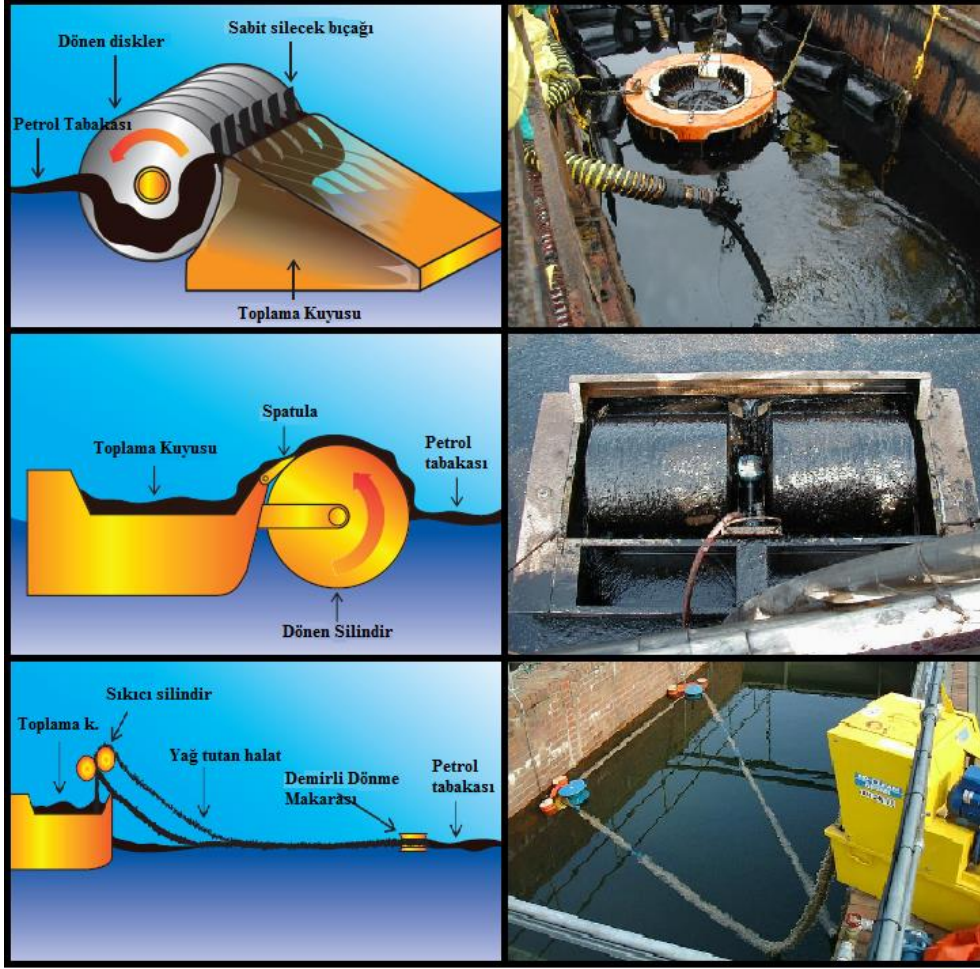
### 1.6.1. Sıyırıcılar

Sıyırıcı, su üzerindeki petrolü mekanik olarak geri toplamak için üretilen bir ekipmandır. Sıyırıcılar kendiliğinden pervaneli olabilirler ya da sahilden veya teknelerden kumanda edilebilirler (U.S. EPA, 1999). Bazı sıyırıcılar bünyelerinde, toplanan petrol için ayrı bir toplama bölmesi bulundururken, bazılarının toplanan petrolü ayrıştırmak için sabit bir seperatörü olabilir. Sıyırıcıların verimliliği ve etkinliği, su üzerinden topladığı petrolün miktarının yanında, bu petrolle beraber ne kadar su topladığı ile de ölçülür. Bunun sebebi, geri toplanmış petrol ile suyu ayrıştırmanın, petrolün sudan ilk anda toplanması ile aynı zorlukta olabilmesidir (Fingas, 2013). Verimliliği etkileyen faktörler arasında, kirliliğe neden olmuş petrolün türü ve cinsi; petrolün viskozite gibi özellikleri; rüzgar, dalgalar ve akıntılar; hava ve deniz sıcaklıkları; petrol tabakası kalınlığı; döküntü ve buz varlığı sayılabilir. Petrol tabakasının kalınlığı bunların içinde en önemli olanıdır ve yeterli kalınlıklarda neredeyse bütün sıyırıcılar verimli çalışabilir. Rüzgar, akıntı ve dalga yaratmadığı takdirde sıyırıcı performansını direkt olarak etkilemez. Genellikle, sakin

denizler sıyırıcı verimliliğini artırır (Schulze, 1998). Bazı durumlarda, aşırı derecede akamaz olan petrol, katran küreleri veya yağlı döküntüler sıyırıcı girişini tıkayabilir ve bu durum sıyırıcının petrolü geri kazanım sistemine pompalamasını engelleyebilir (Fingas, 2013). Sıyırıcılar temel operasyon prensiplerine göre sınıflandırılabilirler. Bunların arasında yağ tutan oleophilic sıyırıcılar, bent (weir) skimerler, emici (suction) veya vakum sıyırıcılar en çok kullanılanlarıdır. Bunların yanında konveyör tipi sıyırıcılar ve su altı paletli sıyırıcılar da endüstride kullanılmaktadırlar. Her sıyırıcının kendine göre birtakım avantajları ve dezavantajları mevcuttur (U.S. EPA, 1999).

#### **1.6.1.1. Yağ Tutan (Oleophilic) Sıyırıcılar**

Bu tip sıyırıcılar, su üzerindeki petrolün yapışacağı bir yüzey kullanarak kirliliğe neden olan petrolün su/deniz yüzeyinden temizlenmesinin sağlarlar. Bu yağ tutan (oleophilic) yüzey; disk, silindir, kemer, fırça veya ip gibi bir yapıda olabilir ve suyun üzerindeki petrolün içinde gezdirilir. Sıyırıcı bir bıçak veya basınçlı bir makara, yüzeye yapışan petrolü ayırarak sıyırıcı yapısında bulunan ayrı bir depolama tankına aktarır. Bu ara bölüme aktarılan petrol, müdahale barçlarına veya sahil istasyonlarına direkt olarak basılabilir. Yağ tutan yüzey çelikten, alüminyumdan, fabrikasyon bezlerden veya polipropilen/polivinil klorid plastiklerden üretilebilmektedir. Bu tip sıyırıcılar temizledikleri petrole oranla oldukça az miktarlarda su toplarlar. Görece olarak daha ince petrol tabakalarında dahi verimli çalışabilirler. Birçok farklı boyutta üretilirler ve genellikle en iyi sonuçları hafif ham petroler ile alırlar fakat üretim modelleri ve kullanılan yüzey maddesine göre çeşitli petroler için de uygundur (Fingas, 2013). Dizel veya kerosen gibi düşük viskoziteye sahip petrol ürünlerinde ise yeterli seviyelerde yapışma olmadığından verimli toplama yapamazlar (ITOPF, 2012). Halat / ip veya zincir gibi modelleri buzun ve döküntünün olduğu bölgelerde iyi sonuçlar verebilmektedir (U.S. EPA, 1999). Yağ tutan çeşitli sıyırıcı tipleri Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. Sırasıyla Disk, Silindir ve Halat skimerlerinin şematik ve gerçek görüntüsü. (Fingas, 2013; URL-3, 2013; URL-4, 2013; URL-5, 2013)

### 1.6.1.2. Bent (Weir) Sıyırıcılar

Bu tip sıyırıcılar su yüzeyindeki petrolü yerçekimi kuvvetini kullanarak suyun altındaki bir toplama tankına iletirler. Bu basit modellerinde, bir bent, bir toplama tankı ve petrolü basmak için dâhili veya harici bir pompa bağlantısı içerirler. En büyük dezavantajları özellikleri çalkantılı denizlerde oldukça fazla su ve hava emebilirler fakat yeni modellerinde uygulanan teknolojiler ile artık bu tip sıyırıcılar yüksekliklerini otomatik olarak ayarlayabilmekte ve su emişini minimuma indirebilmektedir. Rüzgarın neden olduğu dalga veya çalkantı bent sıyırıcıların çalışma verimliliklerini etkilese de, solügan dalgalar operasyon etkinliğine ciddi zararlar vermezler (ITOPF, 2012). En yeni tasarımlarında bent sıyırıcılar, üç veya dört adet yüzer elemanın ortasına yerleştirilir ve bu sayede su-petrol ara yüzeyinde kalarak verimli bir toplama gerçekleştirilir. Ağır petroller



veya katran kürelerinin bulunduğu kirlilikte tercih edilmezler. Sakin ve korunaklı denizlerde, ekonomik ve yüksek kapasitede kullanım özellikleri ile en iyi sonuçları verirler (Fingas, 2013). Bent sıyırıcılar buzlu, döküntülü veya çalkantılı denizlerde verimli çalışmazlar. Döküntü ve buz bu tip sıyırıcıların girişlerini tıkayabilir ve operasyon aksaklığına neden olur (U.S. EPA, 1999). Bent sıyırıcılar şematik ve gerçek olarak Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9. Bent tipi skimerlerin şematik ve gerçek görüntüsü (Fingas, 2013; URL-6, 2013)

### 1.6.1.3. Emici veya Vakum Sıyırıcılar

Bu sıyırıcılar suyun üzerindeki petrolü vakum kuvveti sayesinde emerek toplarlar. Bu ekipmanlar yalnızca emici bir hortum ve bu emici hortum ucunun yüzmesini sağlayan bir yüzdürücüden oluşmaktadır. Genellikle emici olan uç, harici bir vakum pompa sistemine bağlıdır ve çalışma karakteristiği bent sıyırıcılar ile oldukça yakınlık gösterir (ITOPF, 2012). Kullanımda karşılaşılabilecek problemler de bent sıyırıcılar ile ortaktır. Döküntü ve buz, emişin gerçekleştiği delikleri tıkayabilir. Hafif ve orta petroler için kullanımı daha uygundur. Kullanım alanı dar olsa da, küçük boyutları ve derin olmayışı, bu tip sıyırıcıları en ekonomik ve kompakt sıyırıcılar sınıfına sokar (Fingas, 2013). Petrolün bir bariyer yardımı ile toplandığı ve kalınlaştığı bölgelerde en verimli sonuçları verirler (U.S. EPA, 1999). Emici tip bir sıyırıcı Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 10. Vakum pompasına bağlı emici uçlu bir sıyırıcı (ITOPF, 2012)

### 1.6.2. Olay Yeri Yakma

Olay yeri yakımı (In-situ burning) terimi, kirliliğe neden olmuş olan petrolün, kirlilik bölgesindeki suyun üzerinde kontrollü olarak tutuşturulup yakılması anlamına gelmektedir. Petrolün yakılarak yok edilmesi sonucu oluşan ürünler, yakılan petrolün türevine bağlı olmakla beraber, CO<sub>2</sub>, su, kurum ve diğer birtakım maddelerdir. Bu yöntem, doğru şartlar altında oldukça verimlidir ve insan gücüne fazla ihtiyaç duyulmayan, kolay, ekonomik bir metot olarak kabul edilebilir (Rasmussen, 2010). Petrol yakıldıktan sonra geriye kalan ürün, başlangıç ürününe kıyasla yüzdesel olarak oldukça azdır. Yakım işleminden sonra denizde kalan ürün oldukça akmaz, görece küçük bir kalıntı olacağından, toplanması için gerekecek mekanik operasyon daha kolay olacaktır. Olay yeri yakımının dezavantajları ise, duman oluşumu, ikincil yangınlar, kirlilik çalışanları için risk ve yakınlardaki çeşitli yerleşkelerdir. Buna rağmen, petrolün yakılması birçok durumda sahil hattının ve ekosistemin daha az kirlenmesine neden olur (Evans, 1994). Olay yeri yakımı yalnızca denizde su üzerinde kullanılmakla sınırlandırılacak bir yöntem değildir. Açık alanlarda, tundra ve bataklıklarda da kullanılabilir (Majors ve McAdams 2008). Olay yeri yakımının başarılı olabilmesi için bazı şartların sağlanması oldukça önem taşır. Yakılacak petrol katmanının kalınlığı, petrolün uğradığı doğal bozunma süreci, petrolün tipi ve sıcaklık, rüzgar, dalga gibi çevresel faktörler yakım kalitesini ve başarısını etkilerler (Nordvik vd., 2003).

Olay yeri yakımı ilk olarak 1958 yılında Kuzey Kanada'da uygulanmış, boru hattından Mackenzie nehrine yayılan petrol, bariyerler yardımı ile yakılarak başarılı bir yakım uygulanmıştır (McLeod ve McLeod, 1974). Bundan daha sonraları olay yeri yakımının uygulandığı en büyük kirlilik, 1967 yılında İngiltere'de meydana gelen Torrey Canyon kazasıdır. Bu yakım petrolün emulsifikasyonu nedeniyle başarılı olamamıştır (Yoshioka vd., 1999). Kontrollü olay yeri yakımının büyük başarı gösterdiği ilk vaka 1989 yılında Alaska'da meydana gelen, Exxon Valdez adlı petrol tankerinin Prince William Sound'da karaya oturması sonucu 37000 ton petrolün kirliliğe yol açtığı kazadır. Bu kirlilikte 50-100 ton civarındaki petrol yanmaz bariyerler ile muhafaza edilerek yakılmıştır (Mabile, 2012). McKenzie ve Lukin, 1998 yılında yaptıkları çalışmada 1958'den bu yana, 10 tanesinin arktik bölgesinde, toplam 21 olay yeri yakımının gerçekleştiğini, bu durumun da olay yeri yakımının henüz tam olarak bir kirlilik müdahalesi olarak görülmediğini ortaya koymuşlardır. Fingas (1999), yine aynı yıl yaptığı çalışmada, olay yeri yakımı konusunda daha kat edecek çok yol olduğunu belirtmektedir. Fakat 2010 yılında Meksika körfezinde meydana gelen Deepwater Horizon faciası sonrası uygulanan temizleme operasyonları, olay yeri yakımının şartlar uygun olduğu sürece ne denli etkili bir yöntem olabileceğini ortaya koymaktadır. Tarihteki en başarılı yakım örneklerinin bulunduğu bu olayda, 411 kontrollü yakım gerçekleştirilmiş ve bunların 376 tanesi efektif ve başarılı olurken, yaklaşık 40000 ton petrol başarılı bir şekilde yakılmıştır (Allen vd., 2011). Bu miktar, kirliliğin toplam % 5'ine karşılık gelmektedir ve sıyırıcılar tarafından gerçekleştirilen temizlikten daha fazladır (Ramseur, 2010). Bu yakımlar, çok büyük miktarlarda ki petrolün, günümüz teknolojisi ile beraber kolay, güvenli, etkili, hızlı ve çevreye minimum zararı verecek şekilde yakılabileceğini ortaya koymuştur. Ayrıca Deepwater Horizon olayında gerçekleştirilen etkili yakımlar, uygun çevre şartları altında (Rüzgar ve deniz şartları, bölgesel yerleşkeler, petrol cinsi) olay yeri yakımının, artık geleneksel ve öncelikli bir açık deniz müdahale modeli haline gelmesine yol açmıştır. Tarihin en büyük ikinci petrol kirliliği olan bu vakada edinilen tecrübeler, kontrollü olay yeri yakımının, endüstriyel düzenleyiciler ve toplum nazarında daha iyi algılanmasını sağlamış, bu metodun petrol kirliliğinin temizlenmesinde güvenli ve etkili bir potansiyele sahip olduğunun farkına varılmasında etkili olmuştur (Mabile, 2012).

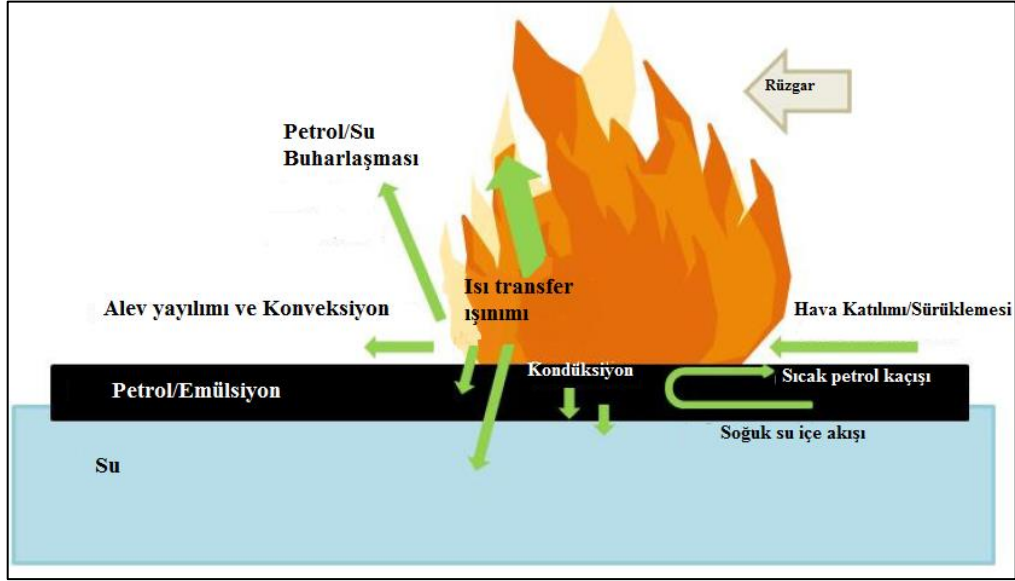
### 1.6.2.1. Petrolün Ateşlenmesi

Suyun üzerindeki petrolün yakılabilmesi için, temel olarak üç şartın sağlanması gereklidir. Bunlar yakıt, oksijen ve ateşlemeyi sağlayacak bir kaynaktır. Yakılacak olan petrol, yeterli miktarda hidrokarbon buharlaştırabilecek ölçüde, belli bir sıcaklığa kadar ısıtılmalıdır. Bilinmelidir ki, yanan madde sıvının kendisi değil, üzerinde gaz halinde bulunan hidrokarbondur. Bir petrolün ateşlenebilmesi hesaplanırken genellikle iki özelliği ön plana çıkar. Bunlar parlama noktası ve yanma noktasıdır. Yanma noktası, parlama noktasının birkaç derece üstünü ifade eder ve bu sıcaklıktaki petrol sürekli olarak buhar üreterek sürekli bir yanma sağlar (Buist, 2003).

Su üzerindeki petrolün ateşlenmesi dış bir kaynakla sağlanır. Ateşleyici tarafından ısıtılan petrol tabakasında, ısınan petrol yatay olarak hareket ederek ateşleyici kaynaktan uzaklaşır. Isınan petrolün altında bulunan soğuk petrol konvektif bir akış ile sıcak petrolün yerini alır. Konvektif akış, petrolün viskozitesi ile ters orantılıdır. Bu sebepten ötürü düşük viskoziteye sahip petroler daha kolay ateşlenirler (Buist vd., 2003). Petrol ateşlendikten sonra, şartların elverdiği ölçüde, alevlerin yayılması gerçekleşir. Wu vd. (2000), sıvı yakıtlar üzerinde alevlerin yayılmasını tam olarak açıklanamayan bir olgu olarak nitelendirmekte, fakat eski çalışmalara atıf yaparak, alevlerin yayılmasını, kapiler hareket dolayısı ile alevlerin önünde oluşan akış yapısına bağlamaktadırlar. Bu sebeple alevler, petrol tabakasının üzerinden dışa doğru bir yayılım gösterir. Alev yayılımı ayrıca, yanma dolayısı ile yayılan radyan ısı ile de desteklenebilir (Buist vd., 2003). Yanmanın başında, alev yayılması yavaştır, ancak yeterli ısı üretimi başladığında yayılma daha hızlı bir hal alır. Genelde, petrolün ayrışması alev yayılımını azaltır. Petrolü çevreleyen su ile petrolün sıcaklık farkı ve parlama noktasındaki yükselme dolayısı ile petrolün ateşlemek için gereken ısı yükselir. Artan petrol tabakası kalınlığı ise alev yayılımını artırır. Bunun temel sebebi kalın petrolün görece soğuk su ile yalıtım sağlamasıdır (Rasmussen, 2010).

Petrol, altındaki soğuk su ile yeterli yalıtımı sağlayacak kadar kalın olduğunda ve yeterli ışınımsal geri beslemeyi sağladığında kendi kendine yanacaktır. Yanma, kendinden kaynaklanan radyant ısı dolayısı ile kendini besler ve buharlaşmayı desteklediği sürece yanma dengeli ve sabit bir şekilde devam eder (Buist vd., 2003; Rasmussen, 2010). Fakat bu alevlerin bu duruma gelebilmesi için zaman gereklidir çünkü yanmanın ilk anlarında ortaya çıkan ısı yalnızca petrolün daha çok buharlaşması için kullanılır (Garo vd.,2006). Petrole geri ışyan ısı ateşin neden olduğu toplam ısının % 1 ila % 3'ü kadardır ve petrolün

üst yüzeyince emilir. Geri kalan ısı ise gazlar tarafından kullanılır (Buist, 2003). Ateşten kaynaklanan enerji konveksiyon ile tekrar petrol tabakasına ulaşabilir. Sıvı fazının ısı iletimi temelde kondüksiyondur. Bir petrol havuzunda gerçekleşen yanmanın yaratabileceği ısı akışı zaman ve alana göre değişiklik gösterir. Olay yeri yakımı esnasında ısı transferini gösteren kavramsal çizim Şekil 11’de verilmiştir.



Şekil 11. Olay yeri yakımında ısı transferi (Rasmussen, 2010)

Petrolün yanması ekzotermik yani ısıveren bir reaksiyondur ve yanma, petrol buharı ile oksijenin karıştığı yerde gerçekleşir (Nordvik vd., 2003). Yanma esnasında alevlerde oluşan osilasyon, ateş ile onu saran hava arasındaki sınır katmanındaki dengesizlikten kaynaklanır ve eksensel simetrik girdap tipi bir yapı oluşturur. Bu girdap tipi yapı ise, taze havanın büyük kısmını emerek ve yanma gazları ile karıştırarak onları soğutur. Yapılan deneylerde görülmüştür ki, çapı 0.03 m’den az olan havuzlarda yapılan yakımlarda alevler laminer, 0.03 m ile 1 m arasındaki havuzlarda laminer ile türbülanslı, 1m’den büyük çaptaki havuzlarda ise alevler türbülanslı oluşmaktadır (Rasmussen, 2010).

Ateşlemeyi sağlayacak olan cihazlar, basit plastik tüplere doldurulmuş olan benzin türevlerinden, sofistike helikopter destekli meşalelere kadar geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır. Bunlardan en ilginç hiç şüphesiz helitorç (helitorch) adı verilen ve bir helikopter yardımı ile aşağı doğru asılarak paketlenmiş jel bir yakıttan 800°C’de 6 dakika yanabilen bir alev çıkaran cihazdır. Ağır petroleri ateşlemek için çok uygun olmayan bu

cihaz, aslen orman endüstrisi için üretilmiştir. Gerçek petrol kirliliklerinde günümüze kadar kullanılmış ateşleme yöntemleri çok daha basit olmuştur. Bazı kirlilikler yalnızca dizel yakıtta bulanmış kâğıt veya yakıt emdirilmiş sorbentler ile ateşlenmiştir. Exxon Valdez kirliliğinde uygulanan ateşleme benzin türevi bir jel ile dolu paketler ile yapılmıştır. Meksika körfezindeki Deepwater Horizon kirliliğinde 400'den fazla yakım işleminde ev yapımı dizel/benzin torbaları ve straforlar oldukça sık kullanılmıştır (Fingas, 2012).

Buist vd. (1999), olay yeri yakımının etkili bir şekilde gerçekleşebilmesi için, su yüzeyindeki petrol tabakası kalınlıklarının, taze ve uçucu ham petroler için en az 1 mm, eskimiş ve uçuculuğunu kısmen yitirmiş ham petroler ve dizel yakıtlar için 3-5 mm, bunker C gibi artık petroler için ise 10 mm civarında olduğunu belirtmektedir. Fingas (2012), ise kitabında genel olarak olay yeri yakımı için 1-3 mm kalınlığı yeterli olarak belirtmiştir. Genellikle yanma petrol tabakası çok incelendiğinde biter. Bunun sebebi ısının çoğunun alt bölgedeki suya geçmesi ve petrol tabakasının sıcaklığının yanma noktasının altına düşmesidir. Buist vd. (2003), 5 cm civarındaki kalın ham petrol tabakaları için kalıntının 3-5 mm, hafif ve orta distile petrol için ise başlangıç kalınlığının önemi olmaksızın yanma sonrası artık kalınlığının 1mm olduğunu ifade etmektedir.

### **1.6.2.2. Coşkulu Yanma**

Coşkulu yanma terimi petrol altında kalan suyun kaynamaya başladığı evreye karşılık gelmektedir (Buist vd., 2003). Bu durum yanmanın kontrol dışı olarak kabul edilebilecek olduğu bir durumdur (Rasmussen, 2010). Petrol tabakası kalınlığını yitirdiğinde ve daha fazla izolasyon sağlayamadığı durumlarda, suyun sıcaklığı kaynama noktasına gelir ve ortaya çıkan güçlü su buharı kalan petrol tabakası ile karışarak küçük ve küçük petrol damlacıklarının alevlere doğru sıçramasına neden olur. Yanma hızı, alev yüksekliği, termal radyasyon çıkışı ve köpüklenme bu aşamada artış gösterir (Buist vd., 1999). Coşkulu yanma, U veya J konfigürasyonda bariyerler ile yapılan yedeklemede görülmez. Bunun sebebi büyük olasılıkla petrol tabakası altındaki suyun uzun zaman süresince aynı yerde kalmaması ve ısınmamasıdır (Rasmussen, 2010). Coşkulu yanmanın yoğunluğu, artan tabaka kalınlığı, düşen havuz çapı ve yükselen petrol kaynama sıcaklığı ile artış gösterir. Kalın tabakalar ve aşırı ısınmış su yüzeyleri, petrol taneciklerine daha güçlü ve hızlı bir itiş gerçekleştirerek, daha patlayıcı ve riskli bir yanmaya neden

olacaklardır (Garo vd., 2004). Yapılan çalışmada gözlemlenen coşkulu yanma periyodu Şekil 12’de gösterilmektedir.

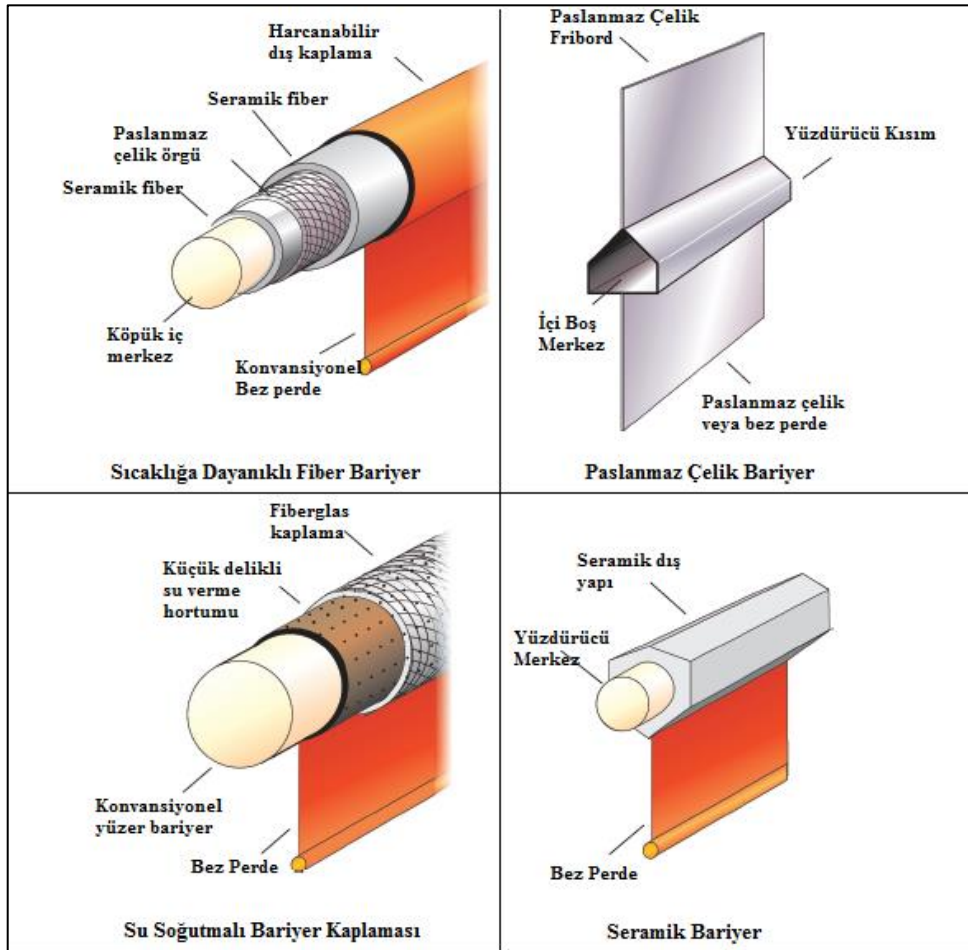


Şekil 12. Etrafa sıçrayan yanar taneciklerin ve yüksek alev boyunun gözlemlendiği coşkulu yanma evresi

### 1.6.2.3. Yakım İçin Suda Toplama Yöntemleri

Yakım için gerekli olan minimum petrol tabakası kalınlığının 2-3 mm olduğu durumlarda denizde herhangi bir muhafaza yapmanın gereği yoktur. Çünkü petrol buna gerek olmaksızın yanabilir. Fakat çoğu ham petrol kirlilikten yalnızca birkaç saat içinde bu kalınlığı yitirir. Çoğu petrol açık denizde, bir denge kalınlığı oluşturuncaya kadar yayılır ki bu kalınlık hafif ham petroller için 0,01 mm ile 0,1 mm arasındadır. Ağır ham petroller için ise 0,05 mm ile 0,5 mm arasında olabilir. Bu tabakalar ateşleme için oldukça incedir ve olay yeri yakımının yapılabilmesi için bariyerler ile muhafaza gerektirirler. Özel olarak üretilmiş olan yangına dayanıklı bariyerler, petrolün suda muhafazası ve olay yerinde yakılabilmesi içindir. Bu bariyerle uzun süreler boyunca yüksek sıcaklıklara maruz kalacaklarından, alev dayanıklılıkları ve bu şartlardaki muhafaza kabiliyetleri sürekli olarak test edilerek, bu test sonuçlarına göre modifiye edilirler. Yangına dayanıklı bariyerler, özel taşıma ve kullanma yöntemleri gerektirirler. Özellikle paslanmaz çelik bariyerler ağırlıklarından dolayı zor taşınırlar. Yangına dayanıklı bariyerler seramik, paslanmaz çelik ve su soğutmalı fiberglas gibi çeşitli malzemelerden üretilirler. Bu alev bariyerleri, olay yerinde petrol yakıldığında; yüksek sıcaklıklara, yüksek ısı akımlarına ve

çevresel mekanik kuvvetlere karşı dayanıklı olmak zorundadır. Bazı durumlarda, belirli yangın bariyerlerinden birçok saat süre ile ve tekrar tekrar operasyonlarda kullanılabilmesi beklenebilir. Meksika körfezinde meydana gelen Deepwater Horizon kirliliğinde ısıya dayanıklı bariyerler yardımı ile 400'ten fazla yakım uygulanmıştır. Bu bariyerler hem petrolün bir araya getirilerek yeterli yakım kalınlığına ulaşması için hem de bazı alanların izolasyonu için kullanılmışlardır. İki yüz metre boyundaki bir yanmaz bariyer yaklaşık olarak 50000 litre petrolü içinde muhafaza edebilir ve bu miktardaki hafif ham petrolün yakılması yaklaşık olarak 45 dakika sürer. Su yüzeyindeki petrolü muhafaza etme, U veya J konfigürasyon ile uzaklaştırma ve yakma neredeyse 3 saatlik bir operasyon demektir. Bu hesaba göre 2 yedekleme gemisi ve bir adet yanmaz bariyerden oluşan bir temizlik ekibi günde 9 saatlik çalışma ile 150000 litre petrolü yakarak temizleyebilir. İki ayrı vardiya şeklinde çalışıldığında bu miktar doğal olarak iki katına çıkacaktır. Çeşitli yanmaz bariyer modelleri Şekil 13'de gösterilmektedir (Fingas, 2013).



Şekil 13. Yanmaz bariyer çeşitleri ve kısımları (Fingas, 2013)



#### 1.6.2.4. Yanma Verimliliği ve Yanma Oranı

Yanma verimliliği (Burning efficiency), petrolün yakım sonrasında yüzdesel olarak ne kadar yok olduğunu ifade eden terimdir. Petrol kirliliği büyüdükçe, yanma verimliliği de aynı anda artmaktadır. Yanma verimliliği ayrıca başlangıçtaki tabaka kalınlığı ile de doğru orantılıdır. Bunun sebebi petrol kalınlığının ne kadar olursa olsun yanma sonrası belli bir kalınlığa kadar düşebilmesidir (Rasmussen, 2010). Örnekleme gerekirse, 2 mm kalınlığındaki bir tabakanın yakıldığında 1 mm'ye düşmesi, % 50'lik bir yanma verimliliği anlamına gelir. Lakin 20 mm kalınlığındaki tabakanın yanma sonrası 1 mm'ye düşmesi, % 95 oranında bir verimlilik ifade eder. Yüksek yanma verimliliği genellikle U veya J konfigürasyonda yedekleme yapılırken uygulanan yakımlarda elde edilir. Bunun sebebi sürekli olarak çekilen petrolün kenara itilmesi böylelikle yanma bölgesine rahatlıkla karışmasıdır. Yakımdan sonra ortaya çıkan kalıntı oldukça yapışkandır ve sıyrıcı gibi mekanik yöntemlerle kolayca sudan toplanabilir (Fingas, 2013). Petrolün sudaki çözünme süreci ise verimliliği çok küçük ölçülerde düşürebilmektedir. Petrolün suya döküldükten hemen sonra yakılması, çözünmenin erken safhalarında müdahale anlamına gelmektedir ve verimliliği artırır (Buist ve Twardus, 1985). Yanma verimliliğinin hesaplanmasında (4) numaralı formülden faydalanılır (S.L. Ross Environmental Research Ltd., 1998).

$$\text{Yanma Verimliliği} = \frac{\text{Kütle}_{\text{Petrol Başlangıç}} - \text{Kütle}_{\text{Petrol Artık}}}{\text{Kütle}_{\text{Petrol Başlangıç}}} \times \%100 \quad (4)$$

Yanma oranı (Burning rate) ise, yanma nedeni ile belirli bir zaman süresinde petrol tabakasının kalınlığında meydana gelen azalmadır. (5) numaralı formül ile hesaplanabilir. (S.L. Ross Environmental Research Ltd., 1998).

$$\text{Yanma Oranı} = \frac{\text{Kütle}_{\text{Petrol Başlangıç}} - \text{Kütle}_{\text{Petrol Artık}}}{\text{Petrol Yoğunluğu} \cdot \text{Alan} \cdot \text{Yanma süresi}} \quad (5)$$

Yanma oranı havuz çapının büyümesi ile beraber büyümektedir. Bunun sebebi daha önce de bahsedildiği gibi yanma karakteristiğinin laminerden girdap tipine geçmesinden ötürüdür (Rasmussen, 2010). Fakat yaklaşık 7m çapından daha büyük yanmalarda, oran sabit bir değere ulaşmaktadır (Mc Grattan vd., 1994). Yanma oranı, ateşin boyutlarının yanında, petrol tabakasının kalınlığı, petrolün tipi ve çevre sıcaklığı ile de ilgilidir. Coşkulu

yanma sürecinde de yanma oranı ciddi ölçülerde artar. Rüzgar hızı ile yanma oranı arasında doğrusal orantı mevcuttur denebilir. Fakat rüzgarın ne kadarının ne şeklinde etki ettiğine dair ve bu etkilerin neden olduğuna dair çelişkili bilgiler de mevcuttur. Rüzgarın yanma oranına etkisi karmaşık ve çelişkilidir fakat dalgalar yanma oranını düşürürler (Buist vd., 2003). Yanmanın sonlarına doğru inceleyen tabaka kalınlığı suya daha fazla ısının kaçmasına neden olacağından yine yanma oranı düşecektir (Rasmussen, 2010). Çeşitli petrol ve türevlerinin yanma karakteristikleri Tablo 8’de gösterilmektedir.

Tablo 8. Çeşitli petrol ve türevlerinin yanma karakterleri (Fingas, 2013)

Petrol veya Türevi	Yanabilirlik	Ateşleme Kolaylığı	Alev yayılımı	Yanma oranı** (mm/min)	Alevin kurumluluğu	Yanma verimi (%)
Benzin	Çok Yüksek	Çok Kolay	Çok hızlı	4	Orta	95-99
Dizel Yakıtı	Yüksek	Kolay	Orta	3.5	Çok yüksek	90-98
Hafif Ham petrol	Yüksek	Kolay	Orta	3.5	Yüksek	85-98
Ağır Ham petrol	Orta	Orta	Orta	3	Orta	75-90
Hafif Fuel-oil	Düşük	Zor*	Yavaş	2.5	Düşük	50-80
Ağır Fuel-oil	Çok düşük	Zor*	Yavaş	2.2	Düşük	40-70
Emülsifiye Petrol	Düşük	Zor*	Yavaş	2	Düşük	30-60
*Ateşleme için primer eklenmeli		** Yalnızca genel oranlar				

### 1.6.2.5. Yanan Petrolden Kaynaklanan Gaz Emisyonu

Petrol yakımının, bir kirliliğe müdahale yöntemi olarak benimsenmesindeki ve yaygınlaşmasındaki en büyük engel, hiç şüphesiz yanan petrolün atmosfere veya suya zehirli emisyonlar salma olasılığıdır (Fingas, 2013). Yanmadan sonra ortaya çıkan siyah dumana maruz kalınması çeşitli sağlık sorunlarına neden olabilmektedir (Buist, 2000). Atmosferik bu endişelerin arasında, duman bulutundan kaynaklanan parçacıklar (Particulate matter), çeşitli egzoz gazları ve yanmamış hidrokarbonlar (Unburned PAHs) bulunur. Her ne kadar duman kurumunun içindeki parçacıklar temel olarak karbondan oluşsa da, bir miktar absorbe/adsorbe halde kimyasal madde de ihtiva ederler. Yanma sonrasında olay yerinde kalan artık petrolde ayrı bir endişe konusudur. Çeşitli su emisyonları batan veya yüzen artık petrol ve çözünabilir organik madde barındırabilir. Birçok yanma oldukça bol miktarda partikül halinde madde üretir. Ateşin ve dumanın

yakınlarında bu parçacıklar ciddi sağlık tehdidi oluştururlar fakat rüzgarın estiği yöne doğru parçacık konsantrasyonu hızlı bir biçimde düşer. En büyük sorun, boyutları 2.5 µm'den küçük olan solunabilen parçacıklardır (Respirable particles). Bu parçacıkların yer seviyesindeki konsantrasyonları, küçük veya büyük fark etmeden, bir ham petrol yakımının 500 m uzağındaki rüzgar altı bölgede dahi sağlık için ciddi seviyelerde olabilmektedir (Fingas, 2012). İdeal bir yanmada ortaya çıkacak olan ürünler CO<sub>2</sub> ve sudur. (U.S. National Response Team, 1995). Yanmadan sonra ortaya çıkan siyah dumanın asıl kaynağı yanmadan sonra oluşan bu partiküllerdir (Buist, 2004). Eğer yanma aç kalırsa bir diğer deyişle tamamlanmazsa ve yeterli miktarlarda hava/oksijen çekemezse ortaya çıkan duman siyah ve yoğun olacaktır. Tipik bir yanma sonrası ortaya çıkacak olan maddeler, % 75 CO<sub>2</sub>, % 12 su, % 10 kurum, % 3 CO ve % 0.2 PAH (Poliaromatik hidrokarbonlar) olarak sıralanabilir. Yanmanın bitiş sürecine doğru gerçekleşen coşkulu yanma, yanma gazlarının ve partikül maddelerin en yoğun olduğu safhadır (Rasmussen, 2010).

Çeşitli çalışmalar ham petrol yakımı sonrasında oluşan duman sütununun 400 ila 550 m arasında bir yüksekliğe ulaşabildiğini göstermektedir (McGrattan vd., 1994). Büyük kirliliklerde yapılan yakımlar sonucunda ise duman daha da büyük olabilir ve bu sebepten partikül haldeki maddeler daha büyük alanlara yayılabilir. Sakin hava şartlarında duman sütunu, sabit ve dengede duran bulut gibi bir yapı oluşturarak dikey ve yatay olarak yavaş bir difüzyon yapar (Rasmussen, 2010). Yakım sahasından rüzgar altı bölgeye doğru minimum güvenli uzaklık, 500 m<sup>2</sup> olan bir ham petrol yakımı için 500 m, dizel yakımı için 650 m'dir (Fingas vd., 2001). Duman sütunun ihtiva ettiği parçacık miktarı, 150 µm/m<sup>3</sup> (US National Ambient Air Quality Standarts) civarına, atmosferik ve coğrafik şartlara göre kaynaktan 1 ila 20 km uzaklıkta ulaşır. Havanın temizlenme süresi tamamen bölgenin atmosferik ve yüzeysel şartlarına bağlıdır.

#### **1.6.2.6. Partikül Haldeki Madde**

Kurum diğer adı ile is, ağırlıklı olarak karbon ihtiva eder lakin büyük ölçekli yakımlardan sonra petrol tanecikleri de bulundurabilir (U.S. National Response Team, 1995). Kurum, yanmanın verimsiz bir şekilde gerçekleşmesi ve yakıttaki karbonun oksijenle yeterli tepkimeye giremeyip okside olamaması sonucunda havaya parçacık halinde yayılması ile oluşur (Barnea vd., 2001). Kurumun oluşması tam olarak anlaşılmaş olan bir süreçtir fakat bariz olan üç adımdan oluştuğu bilinmektedir.

Birincisi, parçacığın oluştuğu ve moleküllerin bağlandığı çekirdeklenmedir. İkinci olarak parçacıklar küre şeklinde kümelenerek 10 ila 50 nm çapına ulaşırlar. Son olarak ta, parçacıklar zincir şeklinde bir araya gelerek birkaç mikrometre boyutuna gelirler. Parçacığın boyutları yanmanın boyutları ile lineerdir. 10  $\mu\text{m}$ 'den küçük olan parçacıklar solunabilir olarak kabul edilir ve sağlık açısından en büyük sorunu teşkil eder (Rasmussen, 2010). Fingas (2013), 2,5  $\mu\text{m}$ 'den küçük parçacıklar için solunabilir ifadesinin kullanırken, Mullins ve Champ (2003), 10  $\mu\text{m}$ 'den küçük parçacıkları solunabilir parçacık olarak kabul etmektedir. Olay yeri yakımlarından oluşan parçacıkların yaklaşık olarak % 90'ı 10  $\mu\text{m}$ 'den küçük boyutlardadır (Brandvik vd., 2006). Bütün bu bilgilerin yanında, parçacıkların oluşturduğu sağlık kaygısı yalnızca yanmaya yakın ve direkt olarak dumanın etkilediği alanlar içindir (Rasmussen, 2010).

Yanma sonrası oluşan partikül maddenin miktarının ölçülmesi için çeşitli metotlar mevcuttur. Bir yöntem yanma esnasında oluşan bütün kurumı toplayıp başlangıçtaki petrol miktarı ile karşılaştırmaktır. Bu yöntemin dezavantajları arasında, anında toplandığı için oksidasyonu yarım kalan parçacıkların da hesaba girmesi ve sonuçların normalden fazla çıkması, ayrıca, yalnızca küçük ölçekli deneyler yapılabilmesidir. Diğer bir yöntem, bir kurum örneği alınıp, örnek kütlenin bütüne ekstrapole edilmesidir. Fakat ekstrapolasyon zor ve kesin değildir. Işığın blokesi üçüncü bir metottur ve genelde bir lazer yardımı ile boru içinden geçen dumanın ışığı geçirgenliği ölçülür. Bu yöntemde de kurum yüzdesinin hesaplanması için çeşitli kalibrasyon problemleri ile karşılaşmaktadır. Dördüncü yöntem ise integrallemedir. Deney sonundaki kurum dumanının boyunun tamamını, duman sütunun altında ve içinde biriken kurum miktarlarını integralleyen birçok modelleme bulunmaktadır (Fingas, 2010). Fingas (2010)'a göre en büyük potansiyeli bu yöntem içermektedir. Yine Fingas (2010), oluşan kurum miktarının orijinal petrol miktarına oranının, ham petroler için % 1-2, dizel yakıtlar için % 5-8 civarında olduğunu, genellemek gerekirse kurum oranının % 1 ile % 16 arasında değiştiğini, yaptığı literatür özeti doğrultusunda belirtmektedir. Oluşan kurum miktarı ile yakılan petrol türevi arasında çok güçlü bir ilişki vardır. Büyük moleküller daha fazla kurum oluşumuna yol açabilirler (Fingas, 2010).

### 1.6.2.7. Gaz Halindeki Duman Ürünleri

Gaz halindeki ürünler genel olarak, PAH (poliaromatik hidrokarbonlar), CO (Karbon monoksit), CO<sub>2</sub> (Karbon dioksit), SO<sub>2</sub> (Sülfür dioksit), VOC (Volatile Organic Compound-Uçucu Organik Bileşik), benzen, tolüen, ksilen ihtiva ederler (Zhang vd., 1996; NRT, 1995). Poliaromatik hidrokarbonlar yanma esnasında büyük ölçülerde tüketilirler, bu yüzden petrolün ilk anda ihtiva ettiği PAH miktarı, dumanındaki miktarlardan daha fazladır. Fakat beş veya daha fazla halkalı poliaromatik hidrokarbonlar, ham petrolün kendisinden çok dumanında bulunabilir (Rasmussen, 2010). Bu durum daha büyük poliaromatik hidrokarbonların yanma sırasında ortaya çıktığını veya yanma tarafından üretildiğini göstermektedir (Fingas vd., 1999).

CO, CO<sub>2</sub> ve SO<sub>2</sub> ve diğer gazlar tehlikeli konsantrasyonlara ulaşmazlar (Fingas vd., 2001). Sülfürik asit konsantrasyonu ise petrolün ihtiva ettiği sülfür miktarı ile doğru orantılıdır (Fingas vd., 1999). Bu gazların emisyonları duman sütununu takip etmezler daha ziyade yanma bölgesinin çevresindeki geniş bir alana yayılırlar (Zhang vd., 1996).

Yanmanın rüzgar altı bölgesindeki benzen, tolüen ve ksilen konsantrasyonları oldukça düşük seviyelerdedirler (Mullin ve Champ, 2003). Genelde uçucu organik bileşiklerin yanma sonrası miktarları insan sağlığı için tehlikeli olabilecek sınırların altında olmaktadır. Ham petrol yandığında bu bileşiklerde yanma ile beraber yok olurlar fakat ateşin yakınlarında yine de konsantrasyonlar yüksek olabilmektedir. Normal olarak bir petrol ürününden buharlaşan bu bileşikler, olay yeri yakımı esnasında ortaya çıkanlardan oldukça fazladır (Fingas vd., 2001; Mullins ve Champ, 2003; Rasmussen, 2010).

### 1.6.2.8. Dumanın Azaltılması

Olay yeri yakımlarından kaynaklanan dumanın azaltılmasının mümkün kılınması için çeşitli deneyler yapılmıştır. Dumanın azaltılmasının verimli olarak yapılabilmesi için en önemli faktörler, petrol çeşidine ve yanma boyutuna göre değişiklik gösteren hidrokarbon oluşumu ve diğer yanma gazları emisyonlarıdır (Moir vd., 1993; Buist vd., 1999). Kurşun ve manganez gibi metalik katkıları duman emisyonunu azaltmada oldukça etkililerdir fakat kendileri hava kirliliğine neden olmaktadır. Bunun yanında ferrosen (Ferrocene), zehirli olmayan, suda çözünmeyen ve yandığı zaman açığa çıkardığı CO ve demir oksit ile oldukça ilgi çekici bir duman azaltıcıdır (Rasmussen, 2010). Ferrosen, turuncu renkte,

kristal katılığında, suda çözünmeyen, fakat hidrokarbonlarda ağırlığının % 2 ila % 4'ü arasında çözünebilen organometalik bir bileşiktir. Ferrosen ticari olarak birçok yakıtta katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Bunların arasında verimli yanma sağlaması için roket yakıtları ve partikül emisyonlarını azaltmak ve regülasyonlara göre düzenlemek için çeşitli dizel yakıtlar ve ısınma yakıtları bulunmaktadır. Ferrosen ile yapılan olay yeri yakımı deneylerinde, ağırlığının % 2 oranında kullanıldığında kurum oluşumunda % 90 ila % 95 arasında azalmalar gerçekleştiği bilinmektedir. Ferrosen tozunun kullanımındaki sorunlar; yüksek maliyeti, petrolün içinde oldukça yavaş çözünmesi ve sudan daha yoğun olmasıdır. Uygulama esnasında eğer petrol tabakası ıskalanırsa toz direkt olarak batmaktadır. Otuzdan fazla miktarda ferrosen türevi bu sorunların üstesinden gelinmesi için denemiştir. Amaç oda sıcaklığında sıvı halde bulunabilen ve petrolde daha iyi çözünen bir ferrosen türevi oluşturmaktır. Yapılan çalışmalar sonucu RMS 9757 adı verilen bir ferrosen hibridi bulunmuş ve bu maddenin, ferrosen dozunun ağırlık olarak % 0,5 denliğinde kullanıldığında kurum oluşumunu % 70 oranında azalttığı, sıvı halde bulunarak petrol tabakasının üzerine püskürtülebilerek uygulanabildiği, ayrıca kolay oldukça kolay çözünebildiği yapılan araştırmalar sonucunda ortaya konmuştur. Ferrosen ile ilgili bütün bu gelecek vaat eden çalışmalar, tekniğin yüksek maliyeti ve ilgi azlığı dolayısı ile uzun zamandır rafa kalkmış durumdadır (Buist vd., 1999).

## 2. YAPILAN ÇALIŞMA

Olay yeri yakımının büyük miktarlarda ki petrol kirliliğini kısa sürede yok ettiği bilinen bir gerçektir. Olay yeri yakımı hakkında yıllardır bilim insanlarının ve kamuoyunun kafasını en çok karıştıran husus, hiç şüphesiz ki yakım sonrasında oluşan yoğun, siyah ve kurumlu dumanın atmosfere ve doğal olarak çevreye yaptığı kirliliktir. Bilinmektedir ki, günümüze kadar bu yöntemin gelişmesinde ve yaygınlaşmasında ki en büyük engellerden biri, yakım sonrasında oluşan duman sütununun yarattığı korkunç ve trajik görüntüdür. Fingas (2013), bu gerçekten bahsetmiş, asıl kaygının atmosfere salınacak zehirli gazlar olduğu bildirilmiştir. Yapılan çalışmada, yakma sonrası ortaya çıkan dumanı en aza indirmek ve petrolün sudan ne miktarda temizlendiğini hesaplayabilmek için, endüstriyel bir ürün olan ve ponza taşının patentli bir işleme sürecinden geçirilmesi ile üretilen ecopomex® adlı ürünün çeşitli kalibrasyonlarda uygulanması ile 6 adet olay yeri yakım deneyi gerçekleştirilmiştir.

### 2.1. Metot

Olay yeri yakma işleminin ortaya çıkardığı duman konsantrasyonunun tespiti ve yakım işleminden sonra suyun üzerinde kalan artık/kalıntı petrolün miktarının hesaplanması için, 4 adeti ecopomex® ile olmak üzere 6 adet test yapılmış ve bu testler sonucu ortaya çıkan duman konsantrasyonları video ve fotoğraf teknikleri ile görüntülenmiştir. Yakım sonrasında test bariyerlerinin içinde kalan artık/kalıntı petrol aynı zamanda iyi bir yağ tutucu sorbent olan ecopomex® ile toplanarak yakımın verimliliği ve oranları hesaplanmıştır. Laboratuvar ölçümleri ile yanan ve deney tankından yok olan toplam petrol miktarları ortaya konulmuştur. Testlerin yapılmasında ecopomex®, sentetik ham petrol, deney tankı ve çeşitli laboratuvar ekipmanından faydalanılmıştır.

#### 2.1.1. Ecopomex®

Ecopomex®, (Patent Başvuru Kodu: US 20120048807 veya WO 2010043785) ponza taşının patentli bir termal işleme sürecinden geçirilerek üretilmesi sonucu ortaya çıkan bir

üründür. ECOPOMEX S.A.M. adlı firma tarafından üretilmektedir. Su üzerinde yüzen sıvıları, özellikle hidrokarbonları, su ile karışmadan adsorbe etme yeteneğine sahiptir. Firma aynı zamanda hidrokarbon adsorbe etmiş ürünü geri dönüştürme hizmeti de verebilmektedir. Bu geri dönüştürme ile ürünün adsorbe ettiği hidrokarbon ve ürünün kendisi de yeniden kullanılabilir. Ürünün kimyasal bileşimi Tablo 9’da, fiziko-kimyasal özellikleri ise Tablo 10’da gösterilmiştir. (URL-7, 2013)

Tablo 9. Ecopomex<sup>®</sup>’in kimyasal bileşimi (URL-7, 2013)

Formül	Kimyasalın Adı	Yüzdesi
SiO <sub>2</sub>	Silikon dioksit	% 60-75
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alüminyum oksit	% 10-20
K <sub>2</sub> O	Dipotasyum oksit	% 1-10
Na <sub>2</sub> O	Disodyum oksit	% 1-10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Demir III oksit	% 1-10
CaO	Kalsiyum Oksit	% 1-10
C	Aktif Karbon	% 2-10

Ecopomex<sup>®</sup>, hidrofob bir üründür ve su üzerinde dört haftadan daha uzun bir süre yüzebilir. Polar çekim ile beraber hidrokarbonları adsorbe etmektedir. Yağ emen (oleophilic) yapısı sayesinde kendi ağırlığına eşit miktarda, hacminin ise %35’ine kadar petrolü adsorbe edebilir. Adsorbe ettiği hidrokarbonlar akmaz ve ecopomex<sup>®</sup>’in yapısını terk etmez. Her şartta depolanabilir, saklanabilir ve taşınabilir. Adsorbe ettiği hidrokarbonlar, termal desorpsiyon veya direkt yakım ile çıkarılabilir. Termal desorpsiyon süreci ile adsorbe ettiği hidrokarbonlar buharlaştırılarak tekrar elde edilebilir. Desorpsiyonu ve geri dönüşümü yapılan ecopomex<sup>®</sup>, sorbent olarak 20 kez tekrar kullanılabilir (URL-7, 2013)



Tablo 10. Ecopomex<sup>®</sup>'in fiziko-kimyasal özellikleri (URL-7, 2013)

Özellik	Değer veya Durum
Fiziksel durumu	Granül halde katı
Renk	Black
Koku	Kokusuz
Viskozite	N/A
Parlayıcılık	Parlayıcı değil
Yanıcılık	N/A
Patlayıcılık	Patlayıcı değil
Sertlik	6 (Mohs Ölçeği)
Erime Sıcaklığı	1205 °C
PH	Nötr
Sudaki çözüne bilirligi	Çözünmez
Görünen yoğunluk	280 kg/m <sup>3</sup>
Toksikoloji	AB 67/548/EEC yönetmeliğince zararlı madde içermez

Ecopomex<sup>®</sup> 4 ila 50 mm arasında değişen boyutlarda üretilebilmektedir. Yapılan çalışmada kullanılan ürün iki farklı boyut aralığında kullanılmıştır. Olay yeri yakımı testleri için kullanılan ürünün boyutları 30-50 mm arasında, adsorbe etmesi için kullanılan ürünün boyutları ise 4-16 mm arasında tercih edilmiştir. Ürüne ait fotoğraflar Şekil 14'de gösterilmektedir.

Şekil 14. Çeşitli boyutlarda ki ecopomex<sup>®</sup> (URL-7, 2013)

### 2.1.2. Petrol Ürünleri

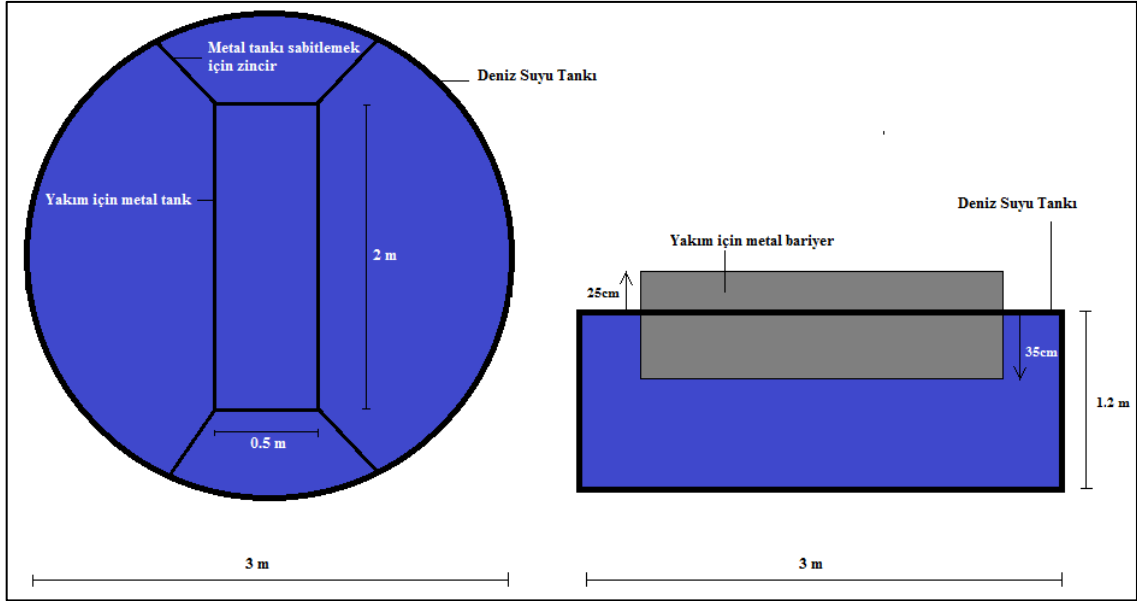
Yapılan çalışmada yoğunluğu  $0,89 \text{ gr/cm}^3$  olan sentetik ham petrol kullanılmıştır. Ürün, % 36 Fuel-oil 6, % 40 Fuel-oil 4, % 16 Dizel ve % 8 oranında benzin karıştırılarak oluşturulmuştur. Su üzerine dökülen ham petrolün ateşlenmesi için % 67 oranında benzin ile % 33 oranında dizel içeren karışım kullanılmıştır. Karışım, kendinden tüplü gazlı torç yardımı ile ateşlemiştir. Ham petrolün miktar ve hacminin doğru uygulanması için litre ölçekli bidonlardan faydalanılmıştır.

### 2.1.3. Yakım Alanı ve Kullanılan Deniz Suyunun Özellikleri

Çalışma, 3 metre çapında fiberglas bir deniz suyu tankının içine yerleştirilmiş, 0,5 x 2 metre boyutlarındaki ısıya ve aleve dayanıklı metal bariyer sisteminin içinde gerçekleştirilmiştir. Tank içindeki deniz suyunun sürekli olarak sirkülasyonu sağlanarak, su sıcaklığının  $12^\circ\text{C}$ 'de kalması sağlanmıştır. O anki şartlarda kullanılan deniz suyunun yoğunluğu bomemetre ile  $1018 \text{ gr/litre}$  olarak ölçülmüştür. Yakım ekipmanlarının şematik görüntüsü ve boyutları Şekil 15'te verilmiştir. Yakım alanının resmi Şekil 16'da gösterilmektedir. Üç ve altı numaralı testler için kullanılacak olan kafes, ısıya dayanıklı paslanmaz çelik malzemedir, boyutları  $50 \text{ cm} \times 35 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$  olarak üretilmiştir. Aynı testlerde kafesin içine ecopomex<sup>®</sup> doldurularak yakım yapılmıştır.

### 2.1.4. Ecopomex<sup>®</sup>'in Sudan Alınması

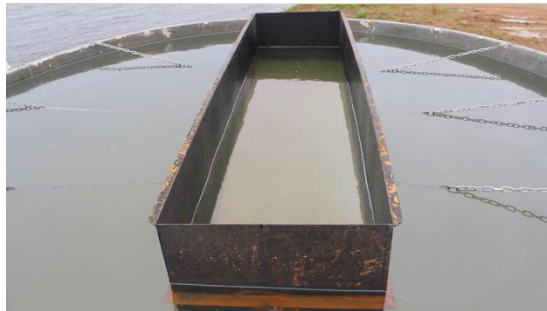
Yakım sonrasında bariyerlerin içinde kalan ürünün toplanması için standart paslanmaz çelik 20 cm çapında süzgeç kullanılmıştır. Bariyerin içinden alınan ürün geri dönüşüm için plastik kaplara aktarılmış, örnek olarak laboratuvara gönderilecek ürün ise metal örnekleme kaşıkları ile  $600 \text{ ml}$ 'lik cam beherlere alınmıştır.



Şekil 15. Çalışmanın yapıldığı tankın şematik olarak boyutları ve şematik olarak bariyer yerleşimi

### 2.1.5. Laboratuvar Ekipmanı

Yakım sonrası sudan çıkarılan ürünün her tartılma aşaması için 0,1 gr hassasiyetinde ve ISO standartlarında hassas terazi kullanılmıştır. Laboratuvara kurutma ve tekrar yakım için gönderilen numune ürün 0,001 gr hassaslığında laboratuvar terazisi ile tartılmıştır. Ürünün sudan arındırılması için, 60°C ile 230°C arasında sıcaklık ayarlı, zaman ayarı 0-120 dakika arasına ayarlanabilen, hidrolik mekanik termostatlı etüv kullanılmıştır. Etüvden sonra ürünün tekrar yakılması için, 5 litre hacminde ve en yüksek sıcaklığı 1300°C'ye ayarlanabilen laboratuvar yüksek sıcaklık fırınından faydalanılmıştır. Ürün, kurutma fırınına cam petripler içinde, yüksek sıcaklık fırınına ise seramik kaplarda yerleştirilmiştir.



Şekil 16. Yakım tankı ve yanmaz metal bariyerlerin görüntüsü

## 2.2. Test Süreçleri

Ürünün değerlendirilmesi ve yakmaların gözlemlenmesi için 2 farklı petrol miktarı ile 3'er adet toplamda 6 adet test uygulanmıştır. Bu testler; petrolün klasik olay yeri yakımı, ecopomex®'in serbest olarak petrol tabakasına uygulanması ve ecopomex®'in kafes sistemi içerisinde petrol tabakasına uygulanması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Testlerin sonucunda yanan ve suda kalan petrol miktarları ve yanma oranlarının hesaplanması için SL Ross Environmental Research Ltd. şirketinin 1999 yılının kasımında hazırladığı "Laboratory Testing to Determine In Situ Burning Parameters for Six Additional U.S. OCS Crude Oils," isimli rapordan faydalanılmıştır. Her testin yanma süreci video ve fotoğraf teknikleri ile tamamen kayıt altına alınmıştır. Yakma esnasında dumanın en yoğun olduğu anın fotoğrafı karelere bölünmüş her karenin içindeki duman yoğunluğu azdan çoğa 1 ile 5 arasında puanlanarak duman yoğunluğu belirlenmeye çalışılmıştır.

### 2.2.1. Test 1

Bu testte ince tabakalı ham petrol klasik olay yeri yakım tekniği kullanılarak yakılmıştır. Deniz suyu havuzunda bulunan metal bariyerin içerisine, tabaka kalınlığı 1,5 mm olacak şekilde 1,5 litre ham petrol dökülmüştür. Yakımın ateşlenmesine yardımcı olmak amacıyla 300 ml %66 benzin %33 dizel karışımı ham petrolün üzerine uygulanmıştır. Ürün torç yardımı ile ateşlenmiş ve zaman kaydedilmiştir. Ayrışma (weathering) sürecinden en az etkilenilmesi için yanma durduktan hemen sonra, 20 litre (yaklaşık 6 kg) 4 ila 16 mm boyutlarındaki adsorber ecopomex®, yüksek viskozite ham petrol kalıntısını adsorbe etmesi amacı ile bariyerin içine dökülmüştür. Adsorbe işleminin tamamlanması için 5 dakika beklenmiştir. Toplanan ürünün içinden basit rastgele örnekleme için 100 gr numune ürün alınmıştır. Yüzdesel su içeriğinin hesaplanabilmesi için tartıldıktan sonra 105°C'de ayarlı etüvde 3 saat süre ile üründe kalan bütün suyun buharlaşması beklenmiştir. Kurutulan ürün soğuması beklendikten sonra tekrar tartılarak, 20 dakika boyunca 550°C'de kül fırınında yakılmıştır. Petrolün klasik olay yeri yakımı şeklinde yakıldığı bu test için ateşlemenin yapıldığı resim Şekil 17'de gösterilmektedir.

Hesaplamalar için, operasyon öncesinde kullanılacak olan adsorber ürünün ağırlığı ( $E_0$ ) ve yakım öncesinde yanmaz bariyerler içine konulan petrolün ağırlığı ( $HC_0$ ) yazılmıştır. Yakım gerçekleştirildikten sonra adsorber ecopomex<sup>®</sup> tartılarak ağırlığı ( $E_1$ ) hesaplanmıştır. Numune 100 gr adsorber ecopomex<sup>®</sup> etüvde bekletildikten sonra tartılmıştır ve yüzdesel su miktarı (%W) bulunmuştur. Yakım sonrası tankta kalan kalıntı petrolün ağırlığının ( $HC_R$ ) hesaplanabilmesi için (6) numaralı formül uygulanmıştır.

$$HC_R = (E_1 \times (1 - \%W)) - E_0 \quad (6)$$

Yakım sonrasında tanktan kaldırılan petrol yüzdesinin ( $HR_{\%}$ ) hesaplanabilmesi için (7) numaralı formülden faydalanılmıştır (S.L. Ross Environmental Research Limited, 1998)

$$HR_{\%} = \left( \frac{HC_0 - HC_R}{HC_0} \right) \times 100 \quad (7)$$

Yakım esnasında bariyerin içerisinde yakılan petrol yüzdesinin ( $HB_{\%}$ ) hesaplanması için (8) numaralı formül kullanılmıştır.

$$HB_{\%} = HR_{\%} \quad (8)$$

Yanma oranı için formül (9) uygulanmıştır. Formülde Ağırlıklar gram, yoğunluk  $gr/mm^3$ , yakım alanı  $mm^2$  ve yanma süresi dakika olarak alınmıştır (S.L. Ross, 1999).

$$\text{Yanma Oranı} = \frac{HC_0 - HC_R}{\text{Petrol Yoğunluğu} \cdot \text{Yakım alanı} \cdot \text{Yanma süresi}} \quad (9)$$



Şekil 17. Klasik olay yeri yakımı ve ateşleme

### 2.2.2. Test 2

İnce petrol tabakası serbest ecopomex<sup>®</sup> uygulaması ile yakılmıştır. Metal bariyerlerin içerisine kalınlığı 1,5 mm olacak şekilde 1,5 litre sentetik ham petrol dökülmüştür. Daha sonra 30-50 mm boyutlarındaki yakıcı ecopomex<sup>®</sup> tartıldıktan sonra olay yeri yakımı için serbest yüzecek halde bariyerin içindeki petrol tabakasına bırakılmıştır. Ateşleme için 300 ml % 67 benzin ve % 33 dizel karışımı kullanılmıştır. Uygulamanın fotoğrafı Şekil 18’de gösterilmektedir. Daha sonra karışım ateşlenmiş ve zaman kaydedilmiştir. Yanma bittikten hemen sonra, bariyerin içinde serbest halde yüzen yakıcı ürün toplanmış ve hiç vakit kaybedilmeden 4 ila 16 mm boyutlarında 20 litre adsorber ürün bariyerin içinde kalan kalıntı petrolü adsorbe etmesi için tankın içine dökülmüştür. Yakıcı ecopomex<sup>®</sup> üzerinden rastgele örnekleme için 100 gr numune alınmıştır. Adsorber ürünün kalıntı petrolü emmesi için 5 dakika beklenilmiş ve ürün toplandıktan sonra tartılarak rastgele örnekleme için 100 gr ürün ayrılmıştır. Yakım için kullanılan yakıcı ecopomex<sup>®</sup> ve Adsorbe için kullanılan adsorber ecopomex<sup>®</sup>’ten alınan 100’er gramlık numuneler, ihtiva ettikleri suyun tamamen buharlaştırılması için etüvde 105°C’de 3 saat bekletilmişlerdir. Üç saat sonunda fırından çıkarılan ürün, soğuması beklenerek tartılmıştır. Aynı örnekler daha sonra ihtiva ettikleri hidrokarbonun tamamen yakılabilmesi için 20 dakika boyunca 550°C’lik kül fırınında yakılmıştır. Bariyer içinde serbest halde yüzen yakıcı ürünün ateşlenmesi ve yakımdan sonra toplanması Şekil 19’da gösterilmiştir.



Şekil 18. Yakıcı ecopomex<sup>®</sup>’in bariyer içindeki petrole serbest yüzecek şekilde uygulanması.

Hesaplamalar için, kullanılacak olan adsorber ecopomex<sup>®</sup> (E<sub>0</sub>) yakımdan önce tartılmıştır. Yanmaz bariyerlerin içine dökülen petrolün ağırlığı (HC<sub>0</sub>) yazılmıştır. Operasyondan sonra adsorber ecopomex<sup>®</sup> (E<sub>1</sub>) tekrar tartılmıştır. Aynı ürünün içinden rastgele 100 gr numune alınıp, tuttuğu su miktarının (%W) hesaplanabilmesi için etüvde kurutulmuştur. Yakım sonrası tankta kalan artık petrolün miktarı için (10) numaralı formülden kullanılmıştır.

$$HC_R = (E_1 \times (1 - \%W)) - E_0 \quad (10)$$

Yakım sonrasında tanktan yok olan petrol yüzdesi için (11) numaralı formülden faydalanılmıştır (S.L. Ross, 1998).

$$HR_{\%} = \left( \frac{HC_0 - HC_R}{HC_0} \right) \times 100\% \quad (11)$$

Yakım için kullanılan ecopomex<sup>®</sup> de bir miktar kalıntı petrol adsorbe edeceği için, yakıcı ecopomex<sup>®</sup> (BE<sub>0</sub>) de operasyon öncesinde tartılmıştır. Yakımdan sonra tekrar tartılarak ağırlığı (BE<sub>1</sub>) yazılmıştır. İçindeki su yüzdesinin (%W) hesaplanabilmesi için rastgele alınan 100 gr ürün etüvde 105°C'de 3 saat süre ile kurutulmuştur. Yakım için kullanılan ecopomex<sup>®</sup>'teki petrol miktarı için (12) numaralı formül uygulanmıştır.

$$HC_B = (BE_1 \times (1 - \%W)) - BE_0 \quad (12)$$

Yakıcı ecopomex<sup>®</sup>'in yakım sonunda ihtiva ettiği petrol yüzdesi (HH<sub>%</sub>) için (13) numaralı formülden faydalanılmıştır.

$$HH_{\%} = \left( \frac{HC_B}{HC_0} \right) \times 100 \quad (13)$$

Bariyerlerin içinde yanan toplam petrol miktarı için (14) numaralı formül uygulanmıştır.

$$HB_{\%} = HR_{\%} - HH_{\%} \quad (14)$$

Yanma oranının tespiti için (15) numaralı formül kullanılmıştır. Formülde Ağırlıklar gram, yoğunluk  $\text{gr/mm}^3$ , yakım alanı  $\text{mm}^2$  ve yanma süresi dakika olarak alınacaktır (S.L. Ross, 1998)

$$\text{Yanma Oranı} = \frac{\text{HC}_0 - \text{HC}_R - \text{HC}_B}{\text{Petrol Yoğunluğu} \cdot \text{Yakım alanı} \cdot \text{Yanma süresi}} \quad (15)$$



Şekil 19. Serbest halde petrol tabakasına uygulanmış yakıcı ecopomex®'in ateşlemeden birkaç saniye sonraki ve yakım sonrasında toplanmasını gösteren fotoğraf.

### 2.2.3. Test 3

Bu deneyde ince tabaka petrol üzerine kafes sistemi ile birlikte ecopomex® uygulanmıştır. Boyutları 500 mm x 350 mm x 150 mm olan paslanmaz çelik, ısıya dayanıklı tel kafes içerisine hacminin % 66 kadarını dolduracak şekilde 30 ila 50 mm boyutlarındaki yakıcı ecopomex® doldurularak kafes bariyerin içine yerleştirilmiştir. Hesaplamalar için uygulanan yöntem ve formüller Test 2 ile aynıdır. Uygulamanın fotoğrafı Şekil 20'de gösterilmektedir.



Şekil 20. Kafes sistemi ile ecopomex® uygulanmasının görüntüleri

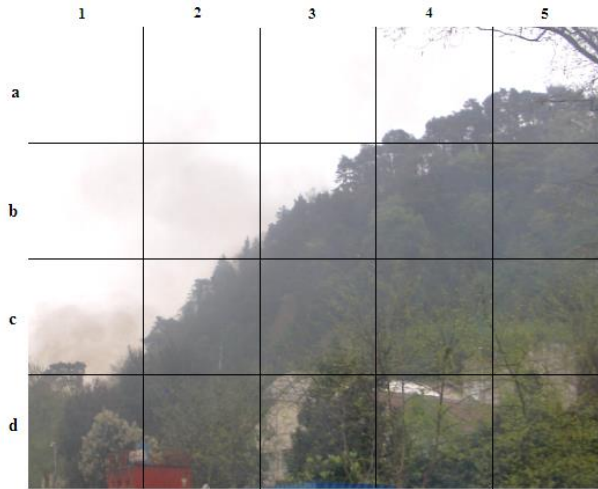


### 2.2.4. Test-4, Test-5 ve Test-6

Bu testlerde kalın tabakalı ham petrol yakılma işlemi gerçekleştirilmiştir. Test 1, Test 2 ve Test 3 ile aynı şekilde gerçekleştirilen bu testlerin tek farkları kullanılan sentetik ham petrol miktarıdır. Test 4, Test 5 ve Test 6 sırası ile klasik olay yeri yakımı, yakıcı ecopomex<sup>®</sup>'in serbest yüzer halde uygulanması ve kafes sistemi kullanımınıdır. Bu testlerde yaklaşık olarak 5 litre petrol kullanılarak petrol tabakası kalınlığı 5 mm'ye çıkarılmıştır. Testlerin uygulanmasında kullanılan bütün formüller, yöntemler ve hesaplama şekilleri Test-1,2 ve 3 ile aynıdır.

### 2.3. Fotoğraf Kareleme ve Puanlama Sistemi

Bu sistem yakımlar sonucunda ortaya çıkan dumanın yoğunluk ve renk olarak değerlendirilmesi amacı taşımaktadır. Her yakım için duman yoğunluğunun en çok olduğu an, aynı mesafeden fotoğraflanarak 500 x 400 piksellik fotoğraflar haline getirilmiş ve bu fotoğraflar 20 eşit kareye bölünerek gridlere ayrılmıştır. Her kare içindeki duman yoğunluğuna ve açık renkten koyu renge göre azdan çoğa 0 ile 5 arası puanlandırılmış ve bu puanlar toplanarak o yakım için bir duman yoğunluğu puanı oluşturulmaya çalışılmıştır. Satırlara yukarıdan aşağıya a, b, c ve d harfleri, sütunlara ise soldan sağa 1, 2, 3, 4 ve 5 rakamları verilerek kareler, a<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>, c<sub>5</sub> gibi şekillerde isimlendirilmiştir. Gridlere bölünmüş referans fotoğraf ve gridlerin isimlendirme sistemi Şekil 21'de gösterilmiştir.



Şekil 21. Gridlenmiş referans fotoğraf

### 3. BULGULAR

Yaklaşık 40 yıllık bir geçmişi olan olay yeri yakımı tekniği son yıllarda özellikle Meksika körfezinde meydana gelen platform faciasından sonra dünyada daha fazla kabul gören bir petrol kirliliği müdahale yöntemi haline gelmiştir. Bu tekniğin önündeki en büyük problemlerden biri yakım esnasında ortaya çıkan siyah duman ve bu dumanın ihtiva ettiği sağlığa ve atmosfere zararlı maddelerdir. Yapılan çalışmada, uygulanan testlerde kullanılan ecopomex® ürününü, yakma esnasında açığa çıkan duman yoğunluğuna olan etkisinin yanında, yakma sonrasında suda kalan ve yakma esnasında yok olan petrol miktarı araştırılmıştır. Ayrıca, bu ürünle yapılan yakma deneylerinde ortaya çıkan yanma verimlilikleri ve yanma oranları ortaya konulmaya çalışılmıştır.

#### 3.1. Test 1

Kalıntı petrolün tespiti için (6) numaralı formülde yerlerine  $E_1 = 7446$  gr,  $(1 - \%W) = 0,9421$ ,  $E_0 = 6000$  gr koyulduğunda yanma sonrasındaki artık petrol miktarı  $HC_R = 1015$  gr bulunmuştur. (7) numaralı formülde,  $HC_0 = 1335$  gr,  $HC_R = 1015$  gr yerlerine konularak yok olan petrol yüzdesi için  $HR_{\%} = \% 23.97$  sonucuna ulaşılmıştır. Aynı sonuç (8) numaralı formüle uygulanmış ve Test 1 esnasında yanan petrol yüzdesi ile bariyerin içinden yok olan petrol yüzdesi başlangıca göre  $\% 23.97$  olarak hesaplanmıştır.

Yanma oranının bulunması için (9) numaralı formülde,  $HC_0 = 1335$  gr,  $HC_R = 1015$  gr, ateşleme anındaki petrol yoğunluğu  $890$  gr/  $1000000$  mm<sup>3</sup>, alan  $1000000$  mm<sup>2</sup> ve yanma süresi  $2,18$  dakika olarak alındığında ve sonuç  $0.16$  mm/dakika olarak hesaplanmıştır. Test 1 sonucunda hesaplanan değerler, diğer testler ile Tablo 11'de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

Yanma sırasında genel olarak yüksek yoğunlukta duman gözlenmiş, coşkulu yanma sırasında duman en yoğun halini almıştır. Fotoğraf puanlaması;  $a_1=0$ ,  $a_2=3$ ,  $a_3=5$ ,  $a_4=5$ ,  $a_5=4$ ,  $b_1=0$ ,  $b_2=3$ ,  $b_3=5$ ,  $b_4=5$ ,  $b_5=2$   $c_1=1$ ,  $c_2=2$ ,  $c_3=4$ ,  $c_4=5$ ,  $c_5=3$   $d_1=4$ ,  $d_2=5$ ,  $d_3=5$ ,  $d_4=4$  ve  $d_5=2$  şeklindedir. Puanlama toplamının sonucu  $70$ 'dir. Test 1 sırasındaki en yoğun dumanının  $20$  eşit kareye bölüdüğü  $500 \times 400$  piksel fotoğrafı Şekil 22'de gösterilmiştir.



Şekil 22. Test 1 için en yoğun duman anının karelenmiş fotoğrafı

### 3.2. Test 2

Kalıntı petrolün miktarı için (10) numaralı formülde,  $E_1 = 5441$  gr,  $(1-\%W) = 0,898$ ,  $E_0 = 4500$  gr yazılarak sonuç  $HC_R = 386$  gr olarak bulunmuştur. (11) numaralı formülde,  $HC_0 = 1335$  gr,  $HC_R = 386$  gr yerlerine konulduğunda bariyerden yok olan petrol yüzdesi  $HR_{\%} = \% 71,10$  olarak hesaplanmıştır. Yakım için kullanılan ecopomex®'in adsorbe ettiği petrol miktarı, (12) numaralı formülde,  $BE_1 = 17374$  gr,  $BE_0 = 15000$  gr ve  $(1-\%W) = 0.896$  alındığında,  $HC_B = 567$  gr olarak bulunmuştur. Yüzdesele olarak yakıcı ecopomex®'in ihtiva ettiği petrol (13) numaralı denklemde  $HC_B = 567$  gr,  $HC_0 = 1335$  gr yerine konulduğunda  $HH_{\%} = \% 42,47$ , testte yakılan toplam petrol miktarı için ise (14) numaralı bağıntıda yerlerine  $HR_{\%} = \% 71,10$  ve  $HH_{\%} = \% 42,47$  koyulduğunda  $HB_{\%} = \% 28,63$  olarak hesaplanmıştır.

Bu testte petrolün yanma oranı, (15) numaralı denklemde,  $HC_0 = 1335$  gr,  $HC_R = 386$  gr,  $HC_B = 567$  gr, ateşleme anındaki petrol yoğunluğu  $890$  gr/  $1000000$  mm<sup>3</sup>, alan  $1000000$  mm<sup>2</sup> ve yanma süresi  $11,85$  dakika olarak alındığında,  $0.04$  mm/dakika olarak hesaplanmıştır. Test 2 sonucunda ortaya çıkan değerler diğer testler ile beraber Tablo 11'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Yanma sırasında gözlemlenen genel duman yoğunluğu orta seviyedir. Yakım esnasında coşkulu yanma gözlemlenmemiştir. Fotoğraf puanlaması;  $a_1=0$ ,  $a_2=3$ ,  $a_3=3$ ,  $a_4=3$ ,  $a_5=4$ ,  $b_1=0$ ,  $b_2=2$ ,  $b_3=4$ ,  $b_4=4$ ,  $b_5=2$   $c_1=1$ ,  $c_2=4$ ,  $c_3=4$ ,  $c_4=3$ ,  $c_5=2$   $d_1=3$ ,  $d_2=5$ ,  $d_3=3$ ,  $d_4=4$  ve  $d_5=5$  şeklindedir. Puanlama toplamının sonucu  $59$ 'dur. Test 2 sırasındaki en yoğun duman anının  $20$  eşit kareye bölündüğü  $500 \times 400$  piksel fotoğrafı Şekil 23'de gösterilmiştir.



Şekil 23. Test 2 için en yoğun duman anının karelenmiş fotoğrafı

### 3.3. Test 3

Artık petrolün bulunması için (10) numaralı formülde,  $E_1 = 5608$  gr,  $(1-\%W) = 0,893$ ,  $E_0 = 4500$  gr alınmış ve  $HC_R = 507$  gr olarak hesaplanmıştır. Test sonunda yok olan petrol yüzdesi için (11) numaralı denklemde yerlerine  $HC_0 = 1335$  gr ve  $HC_R = 507$  gr koyularak oran  $HR_{\%} = \% 62$  bulunmuştur. Yakıcı ecopomex<sup>®</sup>'in adsorbe ettiği petrol miktarının tespiti için, (12) numaralı formülde  $BE_1 = 6239$  gr,  $(1-\%W) = 0,894$  ve  $BE_0 = 5000$  gr olarak yerlerine konularak  $HC_B = 577$  gr olarak hesaplanmıştır. Yakıcı ecopomex<sup>®</sup>'in tuttuğu petrol yüzdesi ise (13) numaralı bağıntı ile  $HC_B = 577$  gr ve  $HC_0 = 1335$  gr değerleri yerlerine konulduğunda  $HH_{\%} = \% 43,22$  olarak saptanmıştır. Deney sırasında yanarak yok olan petrol yüzdesi (14) numaralı formülde  $HR_{\%} = \% 62$  ve  $HH_{\%} = \% 43,22$  değerleri ile  $HB_{\%} = 18,78$  olarak bulunmuştur.

Yanma oranının hesaplanması için (15) numaralı formülde,  $HC_0 = 1335$  gr,  $HC_R = 507$  gr,  $HC_B = 577$  gr, ateşleme anındaki petrol yoğunluğu  $890$  gr/  $1000000$  mm<sup>3</sup>, alan  $1000000$  mm<sup>2</sup> ve yanma süresi  $12,6$  dakika değerleri yerlerine konulmuş ve  $0,02$  mm/dakika sonucuna ulaşılmıştır. Test 3 sonucunda bulunan değerler, diğer test sonuçları ile Tablo 11'de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

Yanma sırasında gözlemlenen genel duman yoğunluğu orta seviyedir. Yakım esnasında coşkulu yanma gözlemlenmemiştir. Fotoğraf puanlaması;  $a_1=0$ ,  $a_2=0$ ,  $a_3=3$ ,  $a_4=4$ ,  $a_5=4$ ,  $b_1=0$ ,  $b_2=0$ ,  $b_3=3$ ,  $b_4=4$ ,  $b_5=3$   $c_1=0$ ,  $c_2=3$ ,  $c_3=5$ ,  $c_4=3$ ,  $c_5=2$   $d_1=3$ ,  $d_2=4$ ,  $d_3=3$ ,  $d_4=3$  ve

$d_5=1$  şeklindedir. Puanlama toplamının sonucu 48'dir. Test 3 sırasındaki en yoğun duman anının 20 eşit kareye bölündüğü 500 x 400 piksel fotoğrafı Şekil 24'te gösterilmiştir.



Şekil 24. Test 3 için en yoğun duman anının karelenmiş fotoğrafı

### 3.4. Test 4

Kalıntı petrol miktarı için (6) numaralı denklemde  $E_1= 7984$  gr,  $(1-\%W) = 0,896$ ,  $E_0= 6000$  gr, değerleri yerlerine konularak  $HC_R = 1154$  gr değerine ulaşılmıştır. Deneyde yok olan petrolün yüzdesi için (7) numaralı formülde,  $HC_0= 4450$  gr,  $HC_R= 1154$  gr yerlerine konularak  $HR_{\%} = \% 74,07$  sonucuna ulaşılmıştır.  $HR_{\%}$ , (8) numaralı formüle uygulanarak Test 4 için yanan petrol yüzdesi ile bariyerin içinden yok olan petrol yüzdesi başlangıç petrol durumuna göre  $\% 74,07$  olarak hesaplanmıştır.

Yanma oranının bulunması için (9) numaralı formülde,  $HC_0= 4450$  gr,  $HC_R= 1154$  gr, ateşleme anındaki petrol yoğunluğu  $890$  gr/  $1000000$  mm<sup>3</sup>, alan  $1000000$  mm<sup>2</sup> ve yanma süresi 2,93 dakika olarak alınmışa sonuç  $1,26$  mm/dakika olarak hesaplanmıştır. Test 4 sonucunda ortaya çıkan sonuçlar, diğer test sonuçları ile Tablo 11'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Yanma sırasında genel olarak yüksek yoğunlukta duman gözlenmiş, coşkulu yanma sırasında duman en yoğun halini almıştır. Fotoğraf puanlaması;  $a_1=2$ ,  $a_2=4$ ,  $a_3=5$ ,  $a_4=5$ ,  $a_5=4$ ,  $b_1=1$ ,  $b_2=4$ ,  $b_3=5$ ,  $b_4=5$ ,  $b_5=4$   $c_1=4$ ,  $c_2=5$ ,  $c_3=5$ ,  $c_4=5$ ,  $c_5=3$   $d_1=5$ ,  $d_2=5$ ,  $d_3=5$ ,  $d_4=4$  ve  $d_5=1$  şeklindedir. Puanlama toplamının sonucu 81'dir. Test 4 sırasındaki en yoğun duman anının 20 eşit kareye bölündüğü 500 x 400 piksel fotoğrafı Şekil 25'de gösterilmiştir.



Şekil 25. Test 4 için en yoğun duman anının karelenmiş fotoğrafı

### 3.5. Test 5

Kalıntı petrolün miktarı (10) numaralı formülde,  $E_1 = 7248$  gr,  $(1-\%W) = 0,908$  ve  $E_0 = 6000$  gr alındığında,  $HC_R = 591$  gr olarak hesaplanmıştır. Bariyerden yok olan petrol yüzdesi için (11) numaralı formülde,  $HC_0 = 4450$  gr,  $HC_R = 591$  gr yerlerine konulduğunda  $HR_{\%} = \% 86,72$  sonucu ortaya çıkmıştır. Yakıcı ecopomex<sup>®</sup>'in adsorbe ettiği petrol miktarı için, (12) numaralı formülde,  $BE_1 = 15859$  gr,  $BE_0 = 12000$  gr ve  $(1-\%W) = 0.902$  yerlerine konulduğunda sonuç  $HC_B = 2305$  gr olarak bulunmuştur. Yüzesel olarak yakıcı ecopomex<sup>®</sup>'in ihtiva ettiği petrol, (13) numaralı bağıntıda  $HC_B = 2305$  gr,  $HC_0 = 4450$  gr alınmış,  $HH_{\%} = \% 51,80$  olarak hesaplanmıştır. Testte yakılan toplam petrol miktarı için (14) numaralı formülde yerlerine  $HR_{\%} = \% 86,72$  ve  $HH_{\%} = \% 51,80$  koyulmuş ve sonuç  $HB_{\%} = \% 34,92$  olarak bulunmuştur.

Test 5'te petrolün yanma oranı, (15) numaralı bağıntıda,  $HC_0 = 4450$  gr,  $HC_R = 591$  gr,  $HC_B = 2305$  gr, ateşleme anındaki petrol yoğunluğu  $890$  gr/  $1000000$  mm<sup>3</sup>, alan  $1000000$  mm<sup>2</sup> ve yanma süresi  $7,83$  dakika olarak yazılmış, sonuç  $0,22$  mm/dakika olarak hesaplanmıştır. Test 5 sonucunda bulunan değerler, diğer test sonuçları ile Tablo 11'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Yanma sırasında gözlemlenen genel duman yoğunluğu orta-yüksek seviyedir. Yakım esnasında coşkulu yanma gözlemlenmemiştir. Fotoğraf puanlaması;  $a_1=0$ ,  $a_2=0$ ,  $a_3=3$ ,  $a_4=4$ ,  $a_5=5$ ,  $b_1=0$ ,  $b_2=2$ ,  $b_3=4$ ,  $b_4=4$ ,  $b_5=5$   $c_1=0$ ,  $c_2=4$ ,  $c_3=4$ ,  $c_4=4$ ,  $c_5=5$   $d_1=0$ ,  $d_2=4$ ,  $d_3=5$ ,  $d_4=5$  ve

$d_5=4$  şeklindedir. Puanlama toplamının sonucu 62'dir. Test 5 sırasındaki en yoğun duman anının 20 eşit kareye bölündüğü 500 x 400 piksel fotoğrafı Şekil 26'te gösterilmiştir.



Şekil 26. Test 5 için en yoğun duman anının karelenmiş fotoğrafı

### 3.6. Test 6

Artık petrolün hesaplanması için (10) numaralı denklemde,  $E_1= 7299$  gr,  $(1-\%W)= 0,907$ ,  $E_0= 6000$  gr alınmış ve  $HC_R= 623$  gr olarak bulunmuştur. Deney bitiminde yok olan petrol yüzdesi için (11) numaralı denklemde yerlerine  $HC_0= 4450$  gr ve  $HC_R= 623$  gr yazılarak sonuç  $HR_\%= \% 86,00$  bulunmuştur. Yakıcı ecopomex<sup>®</sup>'in adsorbe ettiği petrol miktarı için, (12) numaralı formülde  $BE_1= 9146$  gr,  $(1-\%W)= 0,906$  ve  $BE_0= 6000$  gr olarak yerlerine konularak  $HC_B= 2286$  gr bulunmuştur. Yakıcı ecopomex<sup>®</sup>'in ihtiva ettiği petrolün yüzdesi ise (13) numaralı bağıntı ile  $HC_B= 2286$  gr ve  $HC_0= 4450$  gr değerleri yerlerine konulduğunda  $HH_\%= \% 51,37$  olarak hesaplanmıştır. Test sırasında yanarak yok olan petrol yüzdesi, (14) numaralı formülde  $HR_\%= \% 86,00$  ve  $HH_\%= \% 51,37$  değerleri yerlerine yazılarak  $HB_\%= \% 34,63$  bulunmuştur.

Yanma oranının hesaplanması için (15) numaralı formülde,  $HC_0= 4450$  gr,  $HC_R= 623$  gr,  $HC_B= 2286$  gr, ateşleme anındaki petrol yoğunluğu  $890$  gr/  $1000000$  mm<sup>3</sup>, alan  $1000000$  mm<sup>2</sup> ve yanma süresi 5,83 dakika değerleri yerlerine konulmuş ve 0,3 mm/dakika sonucuna ulaşılmıştır. Test 6 sonucunda bulunan değerler, diğer test sonuçları ile Tablo 11'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Yanma sırasında gözlemlenen genel duman yoğunluğu orta seviyedir. Yakım esnasında coşkulu yanma gözlemlenmemiştir. Fotoğraf puanlaması;  $a_1=0$ ,  $a_2=1$ ,  $a_3=4$ ,  $a_4=4$ ,  $a_5=5$ ,  $b_1=0$ ,  $b_2=3$ ,  $b_3=4$ ,  $b_4=5$ ,  $b_5=4$ ,  $c_1=0$ ,  $c_2=3$ ,  $c_3=5$ ,  $c_4=5$ ,  $c_5=3$ ,  $d_1=2$ ,  $d_2=4$ ,  $d_3=5$ ,  $d_4=5$  ve  $d_5=3$  şeklindedir. Puanlama toplamının sonucu 65'dir. Test 6 sırasındaki en yoğun duman anının 20 eşit kareye bölündüğü 500 x 400 piksel fotoğrafı Şekil 27'da gösterilmiştir.



Şekil 27. Test 6 için en yoğun duman anının karelenmiş fotoğrafı



Tablo 11. Test 1, Test 2, Test 3, Test 4, Test 5 ve Test 6'nın değerleri ve sonuçları

Veriler	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6
Deney Alanı (m <sup>2</sup> )	1	1	1	1	1	1
Ham Petrol Yoğunluğu (gram/litre)	890	890	890	890	890	890
Kullanılan Ham Petrol (litre)	1.5	1.5	1.5	5	5	5
HC <sub>0</sub> : Kullanılan ham petrol (gram)	1335	1335	1335	4450	4450	4450
Yakım için kullanılan Ecopomex <sup>®</sup> (litre)	N/A	50	16,7	N/A	40	20
BE <sub>0</sub> : Yakım için kullanılan Ecopomex <sup>®</sup> (gram)	N/A	15000	5000	N/A	12000	6000
Testin Yanma süresi	02'11''	11'51''	12'35''	02'56''	07'50''	05'50''
Adsorber Ecopomex <sup>®</sup> (litre)	20	15	15	20	20	20
E <sub>0</sub> : Adsorber Ecopomex <sup>®</sup> (gram)	6000	4500	4500	6000	6000	6000
E <sub>1</sub> : Adsorbe etmiş Adsorber Ecopomex <sup>®</sup> (gram)	7446	5441	5608	7984	7248	7299
Adsorber Ecopomex <sup>®</sup> su yüzdesi (%)	5,79	12,2	10,71	10,40	9,06	9,26
E <sub>1</sub> ×(1-%W): Kuru haldeki Adsorber Ecopomex <sup>®</sup> (gram)	7015	4886	5007	7154	6591	6623
HC <sub>R</sub> : {E <sub>1</sub> ×(1-%W)}-E <sub>0</sub> Adsorbe edilen toplam petrol (Adsorber Ecopomex <sup>®</sup> ) (gram)	1015	386	507	1154	591	623
BE <sub>1</sub> : Yakım için kullanılan Ecopomex <sup>®</sup> 'in yakım sonrası miktarı (gram)	N/A	17374	6239	N/A	15859	9146
Yakıcı Ecopomex <sup>®</sup> su yüzdesi (%)	N/A	10,43	10,61	N/A	9,83	9,44
BE <sub>1</sub> ×(1-%W): Kuru haldeki yakım Ecopomex <sup>®</sup> 'i (gram)	N/A	15567	5577	N/A	14305	8286
HC <sub>B</sub> : BE <sub>1</sub> ×(1-%W)-BE <sub>0</sub> Adsorbe edilen toplam petrol (Yakıcı Ecopomex <sup>®</sup> ) (gram)	N/A	567	577	N/A	2305	2286
Yanma oranı (mm/dakika)	0.16	0.04	0.02	1,26	0,22	0,3
Yakım sonrası suda kalan petrol (Ağırlık %)	%76,03	%28,90	%38,00	%25,93	%13,28	%14,00
HR <sub>%</sub> : Sudan temizlenen petrol (Ağırlık %)	%23,97	%71,10	%62,00	%74,07	%86,72	%86,00
HH <sub>%</sub> : Yakım sırasında adsorbe edilen petrol (Ağırlık %)	N/A	%42,47	%43,22	N/A	%51,80	%51,34
HB <sub>%</sub> : Yakılan petrol (Ağırlık %)	%23,97	%28,63	%18,78	%74,07	%34,92	%34,63
Duman Yoğunluk Puanı	70	59	48	81	62	65

#### 4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Gerçekleştirilen yakma deneylerinde, ortaya çıkan dumanın opaklığı ve yoğunluğu, ecopomex® kullanılan testlerde gözle görülür şekilde azalmaktadır. Yapılan gözlem ve uygulanan fotoğraf kareleme yöntemi ile dumanın en yoğun olduğu an puanlanmış ve klasik yakımlara göre % 70'e varan yoğunluk azalışı gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmada, yakma sırasında ortaya çıkan dumanın kimyasal içeriğine dair bir çalışma gerçekleştirilmemiştir. Fingas (2010), yaptığı çalışmada, yanma sonrası oluşan kurum miktarının doğru tespitinin tek yolunun ortaya çıkan bütün kurumu toplaması ve ölçülmesi olduğunu ifade etmektedir. Bu yöntem yalnızca çok küçük ölçekli yakımlar için mümkündür ve sonuçlar duman seyrelmesine izin verilmeden toplandığı için oldukça yüksek çıkmaktadır. Kurumdan yapılan rastgele örnekleme, integralleme veya ışık bloklama gibi ölçüm teknikleri homojen olmayan duman yapısından ötürü doğru sonuçlar vermemektedir. Bunların yanında yeni bir ölçümleme şekli olan LIDAR (Light Detection and Ranging; veya Laser Imaging Detection and Ranging) tekniği havadan yapılan lazer ölçümü ile geniş ölçekli ve gerçek boyutlu yakımların duman miktarlarının tespitinde umut veren sonuçlar vaat etmektedir (Fingas, 2010).

Ecopomex® kullanılan 4 adet deneyde, Garo'nun (1999) belirttiği gibi kontrolsüz derecede hızlı ve etrafa yanan tanecikler saçılan coşkulu yanma gözlenmemiştir. Bunun sebebinin, ecopomex® ürününün su ile petrol tabakası arasında izolasyon sağlayan bir katman görevi görmesi ve yanma ısısının suyu, kaynama noktası sıcaklığına taşıyamaması olduğu düşünülmektedir. Fingas'a (1993) göre, yanma gazları ve sağlığa zararlı solunabilir parçacıklar en büyük oranda coşkulu yanma evresi sırasında oluşmaktadır. Bu durum, ecopomex® kullanımının, suyun aşırı ısınmasını engellemesinin yanında, izolasyon yeteneği sayesinde soğuk suyun da petrolü soğutarak yakım hızının düşmesini engelleyebileceği anlamına gelmektedir (Rasmussen, 2010).

Nordvik vd. (1995) yaptığı çalışmada yanma alanına iki farklı teknik uygulayarak hava pompalamış ve artan hava girişinin yanma sonucu ortaya çıkan duman sütununa etkilerini incelemiştir. Yanma ortamına verilen hava yanma oranını artırarak, duman opaklığını ve yoğunluğunu azaltmıştır. Bu durum yanma kalitesinin duman yoğunluğunu

iyi yönde etkilediğini ortaya koymaktadır. Yapılan çalışmada uygulanan testlerde, ecopomex® kullanımının tam tersi olarak yanma oranını düşürdüğü gözlemlenmiştir. Yanma oranının düşmesine rağmen duman yoğunluğunun azalması, aynı zamanda bir adsorber olan ecopomex®'in sudan adsorbe ettiği petrolü, oluşturduğu katmanın üstündeki yanma bölgesine yavaşça servis etmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Üzerinde hiçbir tabaka bulunmayan petrolün daha fazla hava emerek verimli ve hızlı yanması, ayrıca daha az duman konsantrasyonu oluşturması normaldir. Fakat, yanmayan bir adsorber olan ecopomex® ile, petrol yüzeye daha yavaş iletilerek, ortamdaki mevcut hava miktarının katman üzerindeki petrolü verimli olarak yakabilmesi sağlanabilecektir.

Buist vd. (1999), ferrosen ve bir çeşit hibridi olan RMS 9757 adlı ürünün petrol yakımlarından çıkan kurum miktarını azalttığını belirtmektedir. Ferrosen sudan daha yoğun bir maddedir ve bu sebepten suyun üzerindeki petrol tabakalarına uygulanması çok ciddi pratik sorunlar taşımaktadır. Ferrosenin çeşitli süreçlerden geçirilmesiyle üretilen RMS 9757 adlı ürün ise sudan daha az yoğundur ve sıvı halde petrol tabakasına püskürtülerek uygulanabilmektedir. RMS 9757 yakım sırasında oluşan kurum miktarını ciddi ölçülerde azaltsa da, üretim maliyetleri çok yüksektir ve genel bir teknik olarak kabul görmemiştir. Ecopomex®, görece olarak çok daha ucuzdur ve 20 kez geri dönüşümü yapılabildiğinden tekrar tekrar olay yeri yakım operasyonlarında kullanılabilir. Bu durum, ferrosen ve bir çeşit hibridi olan RMS 9757 adlı ürünün petrol yakımlarından çıkan kurum miktarını azalttığını belirtmektedir. Ferrosen sudan daha yoğun bir maddedir ve bu sebepten suyun üzerindeki petrol tabakalarına uygulanması çok ciddi pratik sorunlar taşımaktadır. Ferrosenin çeşitli süreçlerden geçirilmesiyle üretilen RMS 9757 adlı ürün ise sudan daha az yoğundur ve sıvı halde petrol tabakasına püskürtülerek uygulanabilmektedir. RMS 9757 yakım sırasında oluşan kurum miktarını ciddi ölçülerde azaltsa da, üretim maliyetleri çok yüksektir ve genel bir teknik olarak kabul görmemiştir. Ecopomex®, görece olarak çok daha ucuzdur ve 20 kez geri dönüşümü yapılabildiğinden tekrar tekrar olay yeri yakım operasyonlarında kullanılabilir.

Bütün test sonuçları incelendiğinde, klasik yakımlar sonucunda tankta kalan kalıntı petrol miktarının, ecopomex® kullanılan testlere nazaran daha fazla olduğu görülmektedir. Ecopomex®'in serbest olarak uygulandığı Test 2 ve Test 5 sonucunda %71 ve %87 oranında petrol sudan temizlenmiştir. Kafes sistemi ile yapılan Test 3 ve Test 6'daki temizleme oranlarının %62 ve %86 olduğu görülmektedir. Kafes sisteminin serbest uygulama kadar iyi sonuçlar vermemesinin sebebinin, serbest uygulamada ürünün petrole temas ettiği yüzey alanının daha fazla olması olduğu düşünülmektedir. Klasik yakımların yapıldığı testler ile kıyaslandığında, ecopomex® ile yapılan deneylerde yanarak yok olan petrol miktarı daha azdır. Bu durum kendisi bir adsorber olan ecopomex®'in yakım süresince bir miktar petrolü adsorbe etmesinden kaynaklanmaktadır. Hesaplamalardan görülebileceği gibi, Test 2, Test 3, Test 5 ve Test 6 sonucunda yanarak yok olan petrol miktarı diğer testlere göre daha azdır. Bu durum miktar olarak daha az petrolün yandığını, sonuç olarak zehirli gaz emisyonunun ve sera gazlarının atmosfere daha az karıştığı anlamına gelmektedir. Fakat aynı zamanda yakım için kullanılan ecopomex®'in operasyon bölgesinden toplanılması gibi bir zorunluluk yaratmaktadır. Toplanan ecopomex® çeşitli

geri dönüşüm yöntemleri ile ihtiva ettiği ham petrolden arındırılabilir. Bu durum ham petrolün geri dönüşümünün sağlanmasına ve ecopomex®'in tekrar kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır.

Fotoğraf gridleme ile ulaşılan sonuçlarda görülmektedir ki, kalın tabakalı petrolün klasik yakımı (Test 4) 81 puan ile en yoğun duman sütununu oluşturmuştur. Bu yoğunluğu ince tabakalı petrolün klasik yakımı (Test 1) 70 puan ile takip etmektedir. Ecopomex® kullanılan bütün testlerde (Test 2, Test 3, Test 5 ve Test 6) klasik yakımlara (Test 1 ve Test 4) oranla daha az duman yoğunluğu ve opaklığı gözlemlenmiştir. İnce tabaka yakımlarında kafes sistemli ecopomex® uygulamasının (48 puan) serbest uygulamaya (59 puan) göre daha az yoğun duman oluşturduğu görülmektedir. Kalın tabaka yakımlarda ise bu durum tam tersidir. Test 5 ve 6 karşılaştırıldığında, kafes sistemi uygulaması 65 puan, serbest uygulama 62 puan olarak değerlendirilmiştir. Tabaka kalınlığındaki artış serbest ecopomex® uygulanmasın kafes sistemine oranla daha az yoğun duman oluşturmaya neden olmuştur. Genel olarak, ecopomex® uygulanan yakımların ortaya çıkardığı duman sütunu, klasik yakımlara göre daha az yoğunlukta ve opaklıktadır.

Olay yeri yakma tekniği uzun yıllardır, petrol kirliliklerine karşı bir müdahale yöntemi olarak çeşitli durumlarda kullanılmıştır. Ancak, yakım sırasında meydana getirdiği korkunç duman sütunu, atmosferik kirlilik ve çevreye etkileri dolayısı ile desteklenmemiş ve çok tartışılmıştır. Meksika Körfezi'nde 2010 yılında gerçekleşen ve dünya tarihinin en büyük ikinci petrol kirliliği olan çevre felaketinde, birçok başarılı olay yeri yakım operasyonunun gerçekleştirilerek çok büyük miktarlardaki petrolün kısa sürede yakılması, uygun şartlar altında bu yöntemin ne denli etkili olabileceğini göstermiş ve tekniğin dünyada daha fazla kabul görmesine neden olmuştur. Ancak, olay yeri yakımından kaynaklanan gaz emisyonlarının ve kurum içeriğinin atmosfere ve sağlığa etkileri halen daha bu yöntemin önündeki en büyük engellerdir. Ecopomex®, yanmalar sonucu ortaya çıkan kurum miktarını azaltabilir ve tekniğin daha kullanılabilir ve çevre dostu hale getirilmesini sağlayabilir.

## 5. ÖNERİLER

Olay yeri yakma tekniği çok büyük miktarlardaki petrolü kısa sürede yakarak yok edebildiğinden giderek daha fazla kabul görmeye başlayan bir kirlilik müdahale yöntemidir. Olay yeri yakımı sırasında ortaya çıkan siyah duman bulutu, atmosfere saldığı zehirli gazlar ve insan sağlığına olan etkileri sebebi ile, bu tekniğin gelişmesinin ve yaygınlaşmasının önündeki en büyük engeldir. Geçmişte, siyah duman sütununun ve içerdığı kurumun azaltılması için çeşitli çalışmalar yapılmış, her ne kadar başarılı yöntemler geliştirildiyse de, uygulama zorlukları veya yüksek maliyetleri nedeniyle kabul görmemişlerdir. Yapılan çalışmada görülmüştür ki, ecopomex® uygulanarak yapılan yakımlar ortaya çıkan duman yoğunluğunu ve opaklığını azaltmaktadır.

Deneyle göstermiştir ki, kendisi de bir sorbent olan ecopomex®, yakım sonrasında operasyon sahasından toplandığı takdirde, su yüzeyini klasik yakımlara oranlara daha iyi temizlemekte, yakım sonrası artık olarak denizde kalan viskozitesi yüksek petrol tabakasını sudan çıkarmaktadır. Adsorbe ettiği petrolün geri dönüşüm ile tekrar kullanılabilmesinin yanında, kendisinin de tekrar tekrar kullanılabilir olması, yakım uygulamasından sonra ecopomex®'in su yüzeyinden toplanmasını gerekli kılmaktadır. Küçük ölçekli yakımlarda toplama işlemi kolay olsa da, büyük ölçekli gerçek yakımlar için operasyonel kullanım kolaylığı sağlayan uygulama ve toplama yöntemleri geliştirilmesi gerekmektedir.

Ecopomex® uygulandığında gözle görünen ölçülerde azalan duman yoğunluğunun kimyasal içeriğine dair çalışmalar yapılmalıdır. Klasik yakımlar ile karşılaştırmalı olarak kurum miktarları, literatürde bulunan çeşitli bilimsel metotlar ile ölçülmeli ve yanma sonunda ortaya çıkan toplam kurum miktarının yanında, PAH ve solunabilen parçacık konsantrasyonları tespit edilmelidir.

Ecopomex® uygulanan yakımlarda yanarak yok olan petrolün, klasik yanmalara göre daha az olduğu yapılan çalışma ile gösterilmiştir. Farklı uygulama teknikleri ve ürünün boyutlarında yapılacak değişimler ile bu oranlar değişim gösterebilir. Farklı boyutlarda ecopomex® uygulanması daha verimli veya daha kaliteli yanma sağlayabilir.

Klasik olay yeri yakımından sonra denizde kalan yüksek viskoziteye sahip petrol tabakası ile, ecopomex® ile yapılan yakımdan sonra yüzeyde kalan petrol tabakası kimyasal olarak incelenmeli ve ecopomex® ile yakımların deniz yüzeyinde bıraktığı kalıntının kimyasal içeriğine dair bilimsel veri elde edilmelidir.

Denize dökülen petrolün bertaraf edilmesi için gerekli durumlarda olay yeri yakma yöntemi kullanılabilir. Yakım sırasında ortaya çıkan koyu dumanın ve yoğun gaz çıkışının en aza indirilmesi için gelecekte bu konuda çalışmaların yapılması deniz çevresinin korunması açısından önemli olacaktır.

## 6. KAYNAKLAR

- Aghamiri, S., F., Bayat, A., Moheb, A. ve Vakili-Nezhaad G.,R., 2005. Oil Spill Cleanup from Sea Water by Sorbent Materials, Chemical Engineering Technology, 28, 1525-1528.
- Allan, A., Mabile, N., Jaeger, D. ve Costanzo D., 2011. The Use of Controlled Burning during the Gulf of Mexico Deepwater Horizon MC-252 Oil Spill Response, International Oil Spill Conference, 1-13.
- Anderson, A., G., 2002. The Media Politics of Oil Spills, Spill Science & Technology Bulletin, 7, 7-15.
- ASTM D-4175, 2000. Standard Terminology Relating to Petroleum, Petroleum Products and Lubricants, American Society for Testing and Materials, Conshohocken, PA, 53 s.
- ASTM D-97, 2012. Standard Test Method for Pour Point of Petroleum Products, American Society for Testing and Materials, Conshohocken, PA, 5 s.
- Badre, S., Goncalves, C., C., Norinaga, K., Gustavson, G. ve Mullins, O., C., 2006. Molecular size and weight of asphaltene and asphaltene solubility fractions from coals, crude oils and bitumen, Fuel, 85, 1-11.
- Barnea, N., Holloway, C., Kirn, L. ve Orme, P., 2001. A case study in public health risk assessment and communication during the New Carissa in situ burning, International Oil Spill Conference, 79-83.
- Başar, E., 2010. Weathering and Oil Spill Simulation in the Aftermath of Tanker Accidents at the Junction Points in the Marmara Sea, Fresenius Environmental Bulletin, 19, 2, 260-265.
- Berridge, S.A., Dean, R.A., Fallows, R.G. ve Fish, A., 1968. The properties of persistent oils at sea, J. Instit. of Petr., 300-309.
- Brandvik, J., Sorheim, K., R., Singaas, I. ve Reed, M., 2006. Short state-of-the-art report on oil spills in ice-infested waters, SINTEF Materials and Chemistry, Norveç, 63 s.
- Buist, I. ve Twardus, E., M., 1984. In situ burning of uncontained oil slicks, Proceedings of the Seventh Arctic and Marine Oilspill Program Technical Seminar, June 12-14, Edmonton, Alberta. Environment Canada, Ottawa, Ontario, 128-154.
- Buist, I., 2000. In situ burning of oil spills in ice and snow. Alaska Clean Seas, International Oil and Ice workshop, Anchorage and Prudhoe Bay, 38 s.

- Buist, I., 2003. Window-of-opportunity for In Situ Burning. Spill Science & Technology Bulletin, 8,4, 341-346.
- Buist, I., 2004. In Situ Burning for Oil Spills in Ice-Covered Waters, Interspill, 469, 24 s.
- Buist, I., Majors L., Linderman, K., Dickins, D., Mullin, J. ve Owens, C., 2003. Tests to determine the limits to in situ burning of thin oil slicks in brash and frazil ice, SL Ross Environmental Research, Ottawa, 20 s.
- Buist, I., McCourt, J., Potter, S., Ross, S. ve Trudel, K., 1999. In-Situ Burning, Pure and Applied Chemistry, 71, 45-56.
- Burgherr, P., 2007. In-depth analysis of accidental oil spills from tankers in the context of global spill trends from all sources, Journal of Hazardous Materials, 140, 245-256.
- Centeno, G., Sanchez-Reyna, G., Ancheyta, J., Munoz, J., A., D. ve Cardona, N., 2011. Testing various mixing rules for calculation of viscosity of petroleum blends, Fuel, 90, 3561-3570.
- Chebbi, R., 2000. Inertia-gravity spreading of oil on water. Chemical Engineering Science, 55, 4953-4960.
- Crowl, D., A. ve Louvar, J., F., 2002. Chemical Process Safety, 2<sup>nd</sup> Edition, Prentice Hall PTR, New Jersey. 625 s.
- Delvigne, G., A., L. ve Sweeney, C., E., 1988. Natural Dispersion of Oil, Oil&Chemical Pollution, 4, 281-310.
- Evans, D., D., 1994. In situ burning of oil spills: Smoke production and plume behavior, National Institute of Standards and Technology NIST SP 867, 29-37.
- Fingas, M. ve Fieldhouse, B., 2003. Studies of the formation process of water-in-oil emulsions, Marine Pollution Bulletin, 47, 369-396.
- Fingas, M. ve Fieldhouse, B., 2009. Studies on crude oil and petroleum product emulsions: Water resolution and rheology, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 333, 67-81.
- Fingas, M. ve Fieldhouse, B., 2012. Studies on water-in-oil products from crude oils and petroleum products, Marine Pollution Bulletin, 64, 272-283.
- Fingas, M., 1999. In situ burning of oil spills: A historical perspective, In Situ Burning of Oil Spills Workshop Proceedings, 55-62.
- Fingas, M., 2001. The Basics of Oil Spill Cleanup, 2<sup>nd</sup> Edition, CRC Press, Florida, 256 s.
- Fingas, M., 2011. Soot Production From In-Situ Oil Fires, International Oil Spill Conference Proceedings, 8 s.



- Fingas, M., 2013. *The Basics of Oil Spill Cleanup*, 3<sup>rd</sup> Edition, CRC Press, Florida, 266 s.
- Fingas, M., F., 1995. A literature review of the physics and predictive modeling of oil spill evaporation, Journal of Hazardous Materials, 42, 157-175.
- Fingas, M., F., 2004. Modeling evaporation using models that are not boundary-layer regulated, Journal of Hazardous Materials, 107, 27-36.
- Fingas, M., Lambert, P., Li, K., Wang, Z., Ackerman, F., Whitticar, S., Goldthorp, M., Schutz, S., Morganti, M., Turpin, R., Nadeau, R., Campagna, P. ve Hiltabrand, R., 2001. Studies of emissions from oil fires, International Oil Spill Conference, 539-544.
- Garo, J., P., Gilliard, P., Vantelon, J., P. ve Fernandez-Pello, A., C., 1999. Combustion of liquid fuels spilled on water. Prediction of time to start of boilover, Combustion Science and Technology, 147, 39-59.
- Garo, J., P., Vantelon, J., P. ve Hoseki, H., 2006. Thin Layer Boilover: Prediction of its onset and intensity, Combust. Sci. and Tech., 178, 1217-1235.
- Garo, J., P., Vantelon, J., P., Souil, J. ve Breillat, C., 2004. Burning of weathering and emulsified oil spills, Experimental Thermal and Fluid Science, 28, 753-761.
- Goodman, R., H., Brown, H., M., An, C. ve Rowe, R., D., 1997. Dynamic Modelling of Oil Boom Failure Using Computational Fluid Dynamics, Spill Science & Technology Bulletin, 3, 213, 216.
- Governing Council of the United Nations Environment Programme, 1993. United Nations, Nairobi, 17 s.
- Hutchison J., H. ve Simonsen B., L., 1979. Cleanup operations after the 1976 SS Sansinena Explosion- An industrial Perspective, International Oil Spill Conference, 429-434.
- ITOPF, 2012. Oil Tanker Spill Statistics, The International Tanker Owners Pollution Federation, UK, 12 s.
- ITOPF, 2012. Use of Skimmers in Oil Pollution Response, The International Tanker Owners Pollution Federation, UK, 15 s.
- Kirby, M., F. ve Law R., J., 2010. Accidental spills at sea – Risk, impact, mitigation and the need for co-ordinated post-incident monitoring, Marine Pollution Bulletin, 60, 797-803.
- Leahy, J., G. ve Colwell, R., R., 1990. Microbial degradation of hydrocarbons in the environment, Microbiological Reviews, 54, 305-315.
- Lee, M., C. ve Kang, K., H., 1997. Prediction of oil boom performance in currents and waves, Spill Science & Technology Bulletin, 4, 257-266.

- Liaw, H., Lu, W., Gerbaud, V. ve Chen, C., 2008. Flash-point prediction for binary partially miscible mixtures of flammable solvents, Journal of Hazardous Materials, 153, 1165-1175.
- Mabile, N., 2012. Coming of Age of Controlled In-Situ Burning, BP America, 35 s.
- Majors, L. ve McAdams, F., 2008. Responding To Spills in an Arctic Oil Field- Lessons Learned, International Oil Spill Conference, 689-693.
- Margesin, R. ve Shinner, F., 2001. Biodegradation and bioremediation of hydrocarbons in extreme environments, Applied Microbiologic Biotechnology, 56, 650-663.
- McGrattan, K., B., Walton, W., D., Putorti, A., D., Twilley, W., H., McElroy, J. ve Evans, D., D., 1995. Smoke Plume Trajectory from In Situ Burning of Crude Oil in Alaska: Field Experiments, U.S. Department of Commerce, ABD, 40 s.
- McKenzie, B. ve Lukin, J., 1999. Preparedness for in situ burning operations: an Alaskan perspective, In Situ Burning of Oil Spills Workshop Proceedings, 47-54.
- McLeod W., R. ve McLeod D., L., 1974. Measures To Combat Arctic and Subarctic Oil Spills, Journal of Petroleum Technology, 26, 269-278.
- Moir, M., E., Charbonneau, S. ve Mitchell J., B., A., 1993. Soot reduction chemicals for in-situ burning. Proceedings of the 1993 Oil Spill Conference, API Publication No. 4580, American Petroleum Institute, Washington, D.C., 761-763 s.
- Monteith, J., L. ve Unsworth, M., H., 1990. Principles of Environmental Physics, Hodder and Stoughton, London, 440 s.
- Mullin, J., V. ve Champ, M., A., 2003. Introduction/Overview to In Situ Burning of Oil Spills, Spill Science & Technology Bulletin, 8, 323-330.
- National Academy of Sciences, 1999. Spills of Nonfloating Oils, National Academy Press, Washington D.C., 75 s.
- National Academy of Sciences, 2003. Oil in the Sea III, National Academies Press, Washington, 265 s.
- Nordvik, A., B., Champ, M., A. ve Bittings., K., R., 2003. Estimating Time Windows for Burning Oil at Sea: Processes and Factors, Spill Science & Technology Bulletin, 8, 347-359.
- Nordvik, A., B., Simmons, J., L., Burkes, J., Buist, I., Blersch, D., M. ve Reed, M., 1995. Mesoscale in situ burn aeration tests, Marine Spill Response Corporation, MSRC Technical Report Series 95-017, Washington, D.C., 116 s.
- Page, C., A., Bonner, J., S., Sumner, P., L. ve Autenrieth, R., L., 2000. Solubility of petroleum hydrocarbons in oil/water systems, Marine Chemistry, 70, 79-87.

- Ramseur, J., 2010. Deepwater Horizon Oil Spill: The Fate of the Oil, Congressional Research Service, ABD, 20 s.
- Rasmussen J., F., 2010. In Situ burning of Arctic marine oil spills: Ignitability of various oil types weathered at different ice conditions. A combined laboratory and field study, Doktora Tezi, DTU Civil Engineering, Danimarka.
- S.L. Ross Environmental Research Limited, 1998. Laboratory Testing to Determine Operational Parameter for In-Situ Burning of Six U.S. Outer Continental Shelf Crude Oils, S.L. Ross Environmental Research Limited, Ottawa, 63 s.
- S.L. Ross Environmental Research Limited, 1999. Laboratory Testing to Determine In-Situ Burning Parameters for Six Additional U.S. Outer Continental Shelf Crude Oils, S.L. Ross Environmental Research Limited, Ottawa, 41 s.
- Schulze, R., 1998. Oil Spill Response Performance Review of Skimmers, ASTM Manual Series, Conshohocken – PA, 160 s.
- Shiu, W., Y., Bobra, M., Bobra, A., M., Maijanen, A., Suntio, L. ve Mackay, D., 1990. The water solubility of crude oils and petroleum products. Oil and Chemical Pollution, 54, 57-84.
- Speight, J., G., 2002. Handbook of Petroleum Product Analysis, John Wiley and Sons Inc., ABD, 454 s.
- Speight, J., G., 2007. The Chemistry and Technology of Petroleum, 4<sup>th</sup> Edition, CRC Press, Florida, 952 s.
- Spiecker, P., M., Gawrys, K., L. ve Kilpatrick, P., K., 2003. Aggregation and solubility behavior of asphaltenes and their subfractions. Journal of Colloid and Interface Science, 267, 178-193.
- Stagg, R., M., Robinson, C., McIntosh, A., M., Moffat, C., F. ve Bruno, D., W., 1998. The Effects of the 'Braer' Oil Spill, Shetland Isles, Scotland, on P4501A in Farmed Atlantic Salmon (*Sulmo salar*) and the Common Dab (*Limanda limanda*), Marine Environmental Research, 46, 1-5.
- Stiver, W. ve Mackay, D., 1984. Evaporation rate of spills of hydrocarbons and petroleum mixtures, Environmental Science and Technology, 18, 834-840.
- Sutton, O. G., 1934. Wind structure and evaporation in a turbulent atmosphere. Proc. Roy. Soc. London, Ser. A, 146, 701–722.
- Symon, K., R., 1971. Mechanics, 3<sup>rd</sup> Edition, Addison-Wesley, ABD, 639 s.
- Tanaka, M., Girard, G., Davis, R., Peuto, A. ve Bignell, N., 2001. Recommended table for the density of water between 0°C and 40°C based on recent experimental reports, Metrologia, 38, 301-309.

- U.S. Environmental Protection Agency Office of Solid Waste, 1985. Study of Polynuclear Aromatic Hydrocarbons, Washington DC, 13 s.
- U.S. Environmental Protection Agency Office of Solid Waste, 1998. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Washington DC, 3 s.
- U.S. Environmental Protection Agency, 1999. Understanding Oil Spills and Oil Spill Response, s 48.
- U.S. National Response Team, 1995. Aeration Techniques for in Situ Burning of Oil, NRT Science & Technology Committee, ABD, 5 s.
- URL-1, <http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm?tid=5&pid=5&aid=2&cid=regions&syid=1980&eyid=2012&unit=TBPD>, International Energy Statistics, 29 Aralık 2012.
- URL-2, <http://global.britannica.com/EBchecked/topic/186307/emulsion>, Britannica Ansiklopedisi 03 Ocak 2013.
- URL-3, <http://www.eoearth.org/article/Skimmers?topic=50366>, Encyclopedia of Earth, 05 Mart 2013.
- URL-4, <http://www.skimoil.com>, Marine & Industrial Pollution Control Equipments & Systems, 05 Mart 2013.
- URL-5, <http://www.cleanupoil.com/mopskimmer.htm>, 05 Mart 2013.
- URL-6, [http://ecology.arguslimited.com/category/oil\\_spill\\_response/recovery\\_systems/weir\\_skimmer](http://ecology.arguslimited.com/category/oil_spill_response/recovery_systems/weir_skimmer), 05 Mart 2013.
- URL-7, <http://www.ecopomex.com>, S.A.M. Resmi sitesi, 20 Nisan 2013.
- Wang, Z., Fingas, M. ve Page, D., P., 1999. Oil Spill Identification, Journal of Chromatography A, 843, 369-411.
- Weems, L., H., Byron, I., Brien, J., O., Oge, D., W. ve Lanier, R., 1997. Recovery of lapio from the bottom of the lower mississippi river, International Oil Spill Conference, 773-775.
- Werner, A., de Hemptinne, J., C., Behar, F., Behar, E. ve Boned, C., 1998. A new viscosity model for petroleum fluids with high asphaltenes content, Fluid Phase Equilibria, 147, 319-341.
- Wong, K., V. ve Barin, E., 2003. Oil Spill Containment by a Flexible Boom System, Spill Science & Technology Bulletin, 8, 509-520.
- Wu, N., Kold, G. ve Torero, J., L., 2000. The Effect of Weathering on the Flammability of a Slick of Crude Oil on a Water Bed, Combust. Sci. and Tech., 161, 269-308.

- Yapa, P., D., Wimalaratne, M., R., Dissanayake, A., L. ve DeGraff Jr., J., A., 2012. How does oil and gas behave when released in deepwater, Journal of Hydro-environment Research, xx, 1-11.
- Yordanov, D., Tsonev, Z., Dimitrov, A. ve Petkov, P., 2011. Photooxidation and photochemical impact on crude petroleum and structural estimation of photoproducts, Petroleum and Coal, 53, 183-187.
- Yoshioka, G., Wong, E., Grossman, B., Drake, W., Urban, B. ve Hudon, T., 1999. Past in situ Burning Possibilities, Spill Science & Technology Bulletin, 5, 349-351.
- Zhang J., Zhong Q., H., Wu N., L., Wang J., W., Zhao, J., Guo, S., T., Ying, C., T., Fingas, M., F., Li. K., Ackerman, F., Campagna, P., R., Turpin, R., D., Getty, S.,J., Soleki, M., F., Trespalacios, M., J., Wang, Z., Pare, J., Belanger, J., Bissonette, M., Mullin J. ve Tennyson E., J., 1996. Emissions from Mesoscale in situ oil fires: the Mobile 1991 Experiments, Spill Science & Technology Bulletin, 3, 123-137.

## ÖZGEÇMİŞ

Faruk Buğra DEMİREL, 12.01.1987 tarihinde Trabzon'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Trabzon'da tamamladı. 2004 yılında Trabzon Kanuni Anadolu Lisesi'nden mezun oldu.

2004-2005 Eğitim-Öğretim yılında, İstanbul Teknik Üniversitesi Deniz Ulaştırma ve İşletme Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. Lisans eğitimi süresinde 12 aylık staj süresini tamamlayarak 2009 yılında Uzakyol Vardiya Zabiti unvanını aldı. Aynı yıl lisans eğitimini tamamlayarak mezun oldu. 2009-2010 yılları arasında çeşitli tanker gemilerinde Uzakyol Vardiya Zabiti olarak görev yaptı. 2010 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Sürmene Deniz Bilimleri Fakültesi, Deniz Ulaştırma İşletme Mühendisliği Bölümü'ne araştırma görevlisi olarak atandı. 2012 yılında YÖK'ün yüksek lisans yurtdışı araştırma bursundan faydalanarak 3 ay süre ile İsveç Malmö'de World Maritime University bünyesinde araştırma yaptı.

DEMİREL, çok iyi derecede İngilizce bilmektedir.