T.C.
DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
DENİZ ULAŞTIRMA VE İŞLETME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
DENİZCİLİKTE EMNİYET, GÜVENLİK VE ÇEVRE YÖNETİMİ
DOKTORA PROGRAMI
DOKTORA TEZİ

PETROL KİRLİLİĞİNE ACİL MÜDAHALE TESİSİ İÇİN KONUM OPTİMİZASYONU: ÇANAKKALE BOĞAZI'NDA BİR UYGULAMA

Ozan BAYAZİT

Danışman
Doç. Dr. Ali Cemal TÖZ

2021

YEMİN METNİ

Doktora tezi olarak sunduğum “Petrol Kirliliğine Acil Müdahale Tesisi İçin Konum Optimizasyonu: Çanakkale Boğazı’nda Bir Uygulama” adlı çalışmanın, tarafımdan, akademik kurallara ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını ve yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, bunlara atıf yapılarak yararlanılmış olduğunu belirtir ve bunu onurumla doğrularım.

Tarih

…/…/……

Ozan BAYAZİT

İmza

ÖZET

Doktora Tezi

Petrol Kirliliğine Acil Müdahale Tesisi için Konum Optimizasyonu: Çanakkale Boğazı'nda Bir Uygulama

Ozan BAYAZİT

Dokuz Eylül Üniversitesi
Sosyal Bilimler Enstitüsü
Deniz Ulaştırma İşletme Mühendisliği Anabilim Dalı
Denizcilikte Emniyet, Güvenlik ve Çevre Yönetimi Doktora Programı

Küresel ekonominin yarattığı taşımacılık yükü nedeniyle artan deniz trafik yoğunluğunun getirdiği tehlikeler ve riskler, canlı hayatını ve ekolojik dengeyi tehdit etmektedir. Özellikle tanker gemilerinden kaynaklı denizde petrol kirliliği riski, önlem alınması ve müdahale için her an hazırlıklı olunması gereken ciddi bir risktir. Denizde petrol kirliliğine müdahale, çok çeşitli kararların hızlı ve doğru bir biçimde alınmasını gerektirmektedir. Bu da ancak, bir plan dahilinde ve önceden, yeterli sayıda ve uygun ekipmanı, minimum gecikmeyle seferber edebilmek için doğru yerlere konumlandırmakla mümkündür. Dolayısıyla denizde petrol kirliliğine müdahale tesisinin sayı ve konum olarak optimizasyonu, müdahale operasyonunun başarısı için büyük önem taşımaktadır.

Bu tez çalışmasında, Türk boğazlar sisteminin ve dünya denizyolu taşımacılığının stratejik bir parçası olan Çanakkale Boğazı'nda meydana gelebilecek petrol kirliliği olaylarına acil müdahale için yerleştirilecek tesisin sayısı ve konumu optimize edilmiştir. Bunun için öncelikle, Çanakkale Boğazı'nda tanker gemilerinden kaynaklı olarak gerçekleşmesi olası hipotetik petrol kirliliği senaryoları geliştirilmiş ve bu senaryolar döküntü simülasyonunda çalıştırılmıştır. Simülasyondan elde edilen veriler üzerine matematiksel optimizasyon modeli kurularak çözüme ulaşılmıştır. İki kısımdan oluşan tam sayılı doğrusal programlama modelinin ilk kısmında küme kaplama yaklaşımıyla yerleştirilecek optimum sayıdaki tesis bulunmuş, ikinci kısmında ise maksimum

kaplama yaklaşımıyla yerleştirilecek tesisin optimum konumu elde edilmiştir. Sonuçta, Çanakkale Boğazı'nda yaşanabilecek olası bir denizde petrol kirliliğe olayına maksimum çevresel fayda çerçevesinde müdahale edebilecek acil müdahale tesisinin sayısı ve konumunun optimize edilmesinin ilgili otoritenin stratejik planlama aşamasındaki karar verme sürecine yarar sağlayacağı düşünülmektedir. Ayrıca, oluşturulan optimizasyon modelinin, denizde petrol kirliliğine müdahalede tesis yeri seçim problemlerinin çözümü için dünya genelindeki diğer coğrafyalarda da kullanılabileceği öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Denizde Petrol Sızıntısına Müdahale, Afet Yardım Lojistiği, Tesis Konumlandırma, Mekansal Optimizasyon, Tam Sayılı Doğrusal Programlama.

ABSTRACT

Doctoral Thesis

Doctor of Philosophy (PhD)

Location Optimization for Oil Spill Emergency Response Facility: An Application in Çanakkale Strait

Ozan BAYAZİT

Dokuz Eylül University

Graduate School of Social Sciences

Department of Marine Transportation Engineering

Maritime Safety, Security and Environmental Management Program

The dangers and risks brought about by the increased marine traffic density due to the transportation burden created by the global economy threaten the life and ecological balance. Especially, the risk of oil pollution in the sea stem from tanker ships is a serious risk that needs to be taken precautions and to be prepared for emergency response at any time. Responding to oil pollution at sea requires a wide variety of decisions to be taken quickly and accurately. This is only possible by locating a sufficient number of suitable equipment in the right places to be able to mobilize with minimum delay, within a plan, and in advance. For this reason, the optimization of the emergency response facility for oil pollution in the sea in terms of number and location is of great importance for the success of the response operation.

In this thesis, the number and location of the facility to be placed for an emergency response to oil pollution incidents that may occur in the Çanakkale Strait, which is a strategic part of the Turkish Straits System and world maritime transport, has been optimized. For this purpose, first of all, hypothetical oil spill scenarios that may occur due to tanker ships in the Çanakkale Strait were developed and these scenarios were run in the oil spill simulation. The solution was reached by building a mathematical optimization model based on the data obtained from the simulation. In the first part of the integer linear programming model consisting of two parts, the optimum number of facilities to be placed was

found by the set covering approach, and in the second part, the optimum location of the facility to be placed was obtained by the maximal covering approach. As a result, it is thought that optimizing the number and location of emergency response facilities that can respond to a possible oil pollution incident at sea in the Çanakkale Strait within the framework of maximum environmental benefit will be helpful for the authority in the decision-making process of the strategic planning stage. In addition, it is predicted that the built optimization model can be used in other geographies around the world to solve facility location problems for response to oil pollution at sea.

Keywords: Oil Spill Response at Sea, Disaster Relief Logistics, Facility Location, Spatial Optimization, Integer Linear Programming.

PETROL KİRLİLİĞİNE ACİL MÜDAHALE TESİSİ İÇİN KONUM OPTİMİZASYONU: ÇANAKKALE BOĞAZI'NDA BİR UYGULAMA

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI ii
YEMİN METNİ iii
ÖZET iv
ABSTRACT vi
İÇİNDEKİLER viii
KISALTMALAR xii
TABLOLAR LİSTESİ xiv
ŞEKİLLER LİSTESİ xvi
EKLER LİSTESİ xix

GİRİŞ 1

BİRİNCİ BÖLÜM
PETROL TÜRLERİ, ÖZELLİKLERİ VE RAFİNASYONU

1.1. PETROLÜN KÖKENİ VE OLUŞUMU 4
1.2. PETROLÜN KİMYASAL BİLEŞENLERİ VE KOMPOZİSYONU 5
1.2.1. Hidrokarbonlar 8
1.2.1.1. Parafinler (Alkanlar) 9
1.2.1.2. Naftenler (Sikloalkanlar) 10
1.2.1.3. Olefinler (Alkenler) 10
1.2.1.4. Aromatikler 11
1.2.2. Heteroatomik Bileşikler (Hidrokarbon Olmayanlar) 11
1.2.2.1. Sülfür Bileşeni 12
1.2.2.2. Oksijen Bileşeni 13
1.2.2.3. Nitrojen Bileşeni 13
1.2.2.4. Metal Bileşeni 14

1.2.3. Reçineler 15
1.2.4. Asfaltenler 15
1.3. PETROLÜN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ: ÖLÇÜMLER VE KORELASYONLAR 17
1.3.1. Moleküler Ağırlık 18
1.3.2. Yoğunluk, Spesifik Gravite ve °API Gravitesi 18
1.3.3. Viskozite 19
1.3.4. Yüzey ve Ara Yüzey Gerilimi 19
1.3.5. Buhar Basıncı 20
1.3.6. Parlama Noktası 21
1.3.7. Akma Noktası 22
1.4. PETROL RAFİNASYONU 22
1.4.1. Damıtma 26
1.4.2. Çözücü Çıkarma 27
1.4.3. Hidro İyileştirme 28
1.4.4. Termal/Buhar Çatlama 28
1.4.5. Viskozite Kırma 28
1.4.6. Hidro Çatlama 29
1.4.7. Katalitik Çatlama 29
1.4.8. Kok Yapma 29
1.4.9. Katalitik Reform 30
1.4.10. İzomerizasyon 31
1.4.11. Alkilasyon 31
1.4.12. Polimerizasyon (Oligomerizasyon) 32

İKİNCİ BÖLÜM
DENİZDE PETROL KİRLİLİĞİ

2.1. DENİZDE PETROL KİRLİLİĞİNE GENEL BİR BAKIŞ 34
2.2. DENİZDE PETROL KİRLİLİĞİNİ ÖNLEMEYE YÖNELİK ULUSAL VE ULUSLARARASI DÜZENLEMELER 42
2.3. PETROLÜN DENİZ ÇEVRESİNDEKİ DAVRANIŞI 46

2.3.1. Petrol Sızıntısının Denizdeki Hareket ve Taşınma Süreçleri 47
2.3.1.1. Yayılma 48
2.3.1.2. Doğal Dağılma 53
2.3.1.3. Yatay Taşınma 59
2.3.1.4. Tortulaşma ve Çökelme 61
2.3.2. Petrolün Sızıntısının Denizdeki Bozunma Süreçleri 63
2.3.2.1. Buharlaşma 64
2.3.2.2. Emülsiyonlaşma 67
2.3.2.3. Çözünme 71
2.3.2.4. Foto Oksitlenme 72
2.3.2.5. Biyolojik İndirgenme 73
2.4. DENİZDE PETROL KİRLİLİĞİNE MÜDAHALE YÖNTEMLERİ 76
2.4.1. Mekanik Müdahale 80
2.4.1.1. Bariyerler 80
2.4.1.2. Sıyırıcılar 86
2.4.1.3. Sorbentler 92
2.4.1.4. Pompalar ve Geçici Depolama Tankları 95
2.4.2. Kimyasal Müdahale: Dağıtıcılar (Dispersantlar) 98
2.4.3. Termal Müdahale: Yerinde Yakma 102
2.4.4. Biyolojik Müdahale: Biyoiyileştirme 105

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM
PETROL KİRLİLİĞİNE ACİL MÜDAHALE TESİSİ İÇİN KONUM OPTİMİZASYONU: ÇANAKKALE BOĞAZI'NDA BİR UYGULAMA

3.1. ARAŞTIRMANIN KONUSU 108
3.2. ARAŞTIRMANIN AMACI VE ÖNEMİ 108
3.3. ARAŞTIRMANIN KAPSAMI VE KISITLARI 109
3.4. ARAŞTIRMANIN SÜRECİ 111
3.5. ARAŞTIRMANIN YÖNTEMİ 116
3.5.1. Tesis Yeri Konum Optimizasyonu Problemleri 120

3.5.2. Medyan, Merkez ve Kaplama Modelleri 121
3.5.3. Tam Sayılı Doğrusal Programlama 124
3.6. VERİLERİN TOPLANMASI VE ANALİZİ 131
3.6.1. Denizde Petrol Kirliliği Senaryoları İçin Gereken Veriler 131
3.6.1.1. Çanakkale Boğazı'nda 2007-2018 Yılları Arasında Gerçekleşen Gemi Kazalarına İlişkin Veriler 132
3.6.1.2. Dünyada 1957-2018 Yılları Arasında Denizde Petrol Kirliliği Yaratmış Tanker Kazalarına İlişkin Veriler 137
3.6.1.3. Türkiye'nin 2007-2019 Yılları Arasındaki Petrol İthalatına İlişkin Veriler 152
3.6.1.4. Çanakkale Boğazı'na Ait Oşinografik ve Meteorolojik Veriler 153
3.6.2. Denizde Petrol Kirliliği Senaryolarının Simülasyonu 155
3.6.3. Optimizasyon Modelinin Kurulmasına İlişkin Veriler 168
3.7. BULGULAR 172
3.7.1. Optimizasyon Modeli 172
3.7.2. Optimizasyon Modelinin Çözümü 174
3.7.3. Duyarlılık Analizleri 176
3.8. TARTIŞMA 179

SONUÇ 182
KAYNAKÇA 188
EKLER 224

KISALTMALAR

AAKKM	Ana Arama Kurtarma Koordinasyon Merkezi
ANN	Artificial Neural Network
API	American Petroleum Soceity
ASTM	American Soceity for Testing and Materials
BTEX	Benzene, Toluene, Ethylene, Xylene
CART	Classification and Regression Tree
CBS	Coğrafi Bilgi Sistemleri
CEDRE	Center for Documentation, Research and Experimantation on Accidental Water Pollution
CLC	International Convention on Civil Liability for Oil Pollution Damage
cP	Sentipols
cSt	Sentistok
Da	Dalton (1 g/mol)
DDE	Dikloro Difenil Dikloroetilen
DWT	Deadweight Tonnage
EMSA	European Maritime Safety Agency
EPA	Environmental Protection Agency
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
ERV	Emergency Response Vessel
GAMS	General Algebraic Modeling System
GESAMP	Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection
GRT	Gross Tonnage
HNS	The Hazardous and Noxious Subtances Convention
IMO	International Maritime Organization
INTERVENTION	International Convention Relating to Intervention on the High Seas in Cases of Oil Pollution Casualties
IOGP	International Association of Oil&Gas Procedures
IOPC	International Oil Pollution Compensation Funds

IPIECA	International Petroleum Industry Environmental Conservation Association
ITOPF	International Tanker Owners Pollution Federation Limited
MARPOL	The International Convention for the Prevention of Pollution from Ships
NEBA	Net Environmental Benefit Analysis
NRC	National Research Council
OILPOL	International Convention for the Prevention of Pollution of Sea by Oil
OPA	Oil Pollution Act
OPRC	International Convention on Oil Pollution Preparedness, Response and Co-operation
PAH	Policyclic Aromatic Hydrocarbons
PBT	Persistant, Bioaccumulative and Toxic Substance
PISCES	Potential Incident Simulation Control and Evaluation System
POP	Persistant Organic Pollutants
psig	Pound Per Square Inch
REMPEC	Regional Marine Pollution Emergency Response Centre for the Mediterranean Sea
RF	Random Forest
SARA	Saturates, Aromatics, Resins, Asphaltenes
SVM	Support Vector Machine
ULCC	Ultra Large Crude Carrier
UNCLOS	United Nations Convention on the Law of the Sea
UNEP	United Nations Environment Programme
USCG	United States Coast Guard
VLCC	Very Large Crude Carrier

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1:	Ham Petroldeki Hidrokarbon ve Heteroatomik Tipler	6
Tablo 2:	Tipik SARA İçeriği ve Belirli Bileşiklerin Kompozisyonları	7
Tablo 3:	Bazı Petrol ve Petrol Ürünlerinin Kompozisyonu	8
Tablo 4:	Tipik Petrol ve Yakıtların 15˚C Özellikleri	17
Tablo 5:	Deniz Kirleticileri	35
Tablo 6:	Kaynak Bazında Tahmini Petrol Sızıntıları	36
Tablo 7:	Tanker Kazaları Sonucu Oluşan Büyük Petrol Kirliliği Olayları	38
Tablo 8:	Önemli Tanker Kazaları ve Müteakip Düzenlemeler	44
Tablo 9:	Bariyer Seçme Matrisi	82
Tablo 10:	Sıyırıcı Seçim Matrisi	87
Tablo 11:	Sorbent Seçim Matrisi	93
Tablo 12:	Sorbentlerin Kıyaslanması	94
Tablo 13:	Pompa Seçim Matrisi	96
Tablo 14:	Geçici Depoloma Seçim Kılavuzu	97
Tablo 15:	Dispersant Kullanımının Fayda ve Sakıncaları	100
Tablo 16:	Tipik Dispersant Etkinliği	102
Tablo 17:	Yerinde Yakma Tekniğinin Avantaj ve Dezavantajları	104
Tablo 18:	Yöneylem Araştırnasının Metotları	117
Tablo 19:	Kirlilik Miktarı Dağılımının Normallik Testi	149
Tablo 20:	Logaritmik Kirlilik Miktarının (logkm) Normallik Testi	150
Tablo 21:	Random Forest Algoritmasının Petrol Kirliliği Miktarı Tahminleri	151
Tablo 22:	Denizde Petrol Kirliliği Senaryoları	154
Tablo 23:	Kirlilik Talep ve Aday Müdahale Tesisi Noktalarının Koordinatları	169
Tablo 24:	Talep ve Aday Tesis Noktaları Arasındaki Mesafelerin Matrisi (km.)	170
Tablo 25:	Aday Tesis Noktasından Talep Noktasına Varma Süresi Matrisi (saat)	170
Tablo 26:	Aday Tesisin Talep Noktasına Hizmet Edebilme Durumu Matrisi	171

Tablo 27: Aday Tesisin Talep Noktasını Kapsama Uygunluk Değeri Matrisi 171

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1:	Petrolün Oluşumu ve Petrol Sistemi	5
Şekil 2:	Hidrokarbonların Sınıflandırılması	9
Şekil 3:	Heteroatomik Bileşenlerin Moleküler Yapıları	12
Şekil 4:	Asfalten Formunun Ortalama Moleküler Yapıları	16
Şekil 5:	Modern Petrol Rafinerisi ve Ham Petrol İşleme Süreci	24
Şekil 6:	Atmosferik Damıtma Kulesi	27
Şekil 7:	Temel Petrol Ürünleri ve Karbon Atom Numaraları	33
Şekil 8:	Denizde Petrol Kirliliğinin Kaynakları	37
Şekil 9:	Tanker Kaynaklı Sızıntı ile Taşınan Petrol Miktarının İlişkisi	39
Şekil 10:	1970'ten 2019'a Tanker Kaynaklı Petrol Sızıntı Sayısı (>7 ton)	40
Şekil 11:	1970-2019 Arası Tanker Kaynaklı Dökülen Petrol (>7 ton)	41
Şekil 12:	Petrolün Deniz Çevresindeki Hareketi ve Bozunma Süreci	46
Şekil 13:	Petrolün Denizdeki Hareket ve Bozunma Süreçlerinin Evrimi	47
Şekil 14:	Langmuir Sirkülasyonu	49
Şekil 15:	Petrol Sızıntısının Yayılımının 3 Safhası	50
Şekil 16:	Çeşitli Petrol Türlerinin Denizdeki Yayılımı	53
Şekil 17:	Bazı Petrol Türleri için Buharlaşma Eğrileri	64
Şekil 18:	Denizde Petrol kirliliğine Müdahale Yöntemleri	79
Şekil 19:	Temel Bariyer Yapısı	81
Şekil 20:	Bariyer Kullanma Yöntemleri	83
Şekil 21:	Bariyer Kullanımında Oluşabilen Arızalar	84
Şekil 22:	Oleofilik Sıyırıcı Türleri	88
Şekil 23:	Kendinden Ayarlı Savak Sıyırıcı	89
Şekil 24:	Vakum Sıyırıcı	90
Şekil 25:	Palet Kemer Sıyırıcı	90
Şekil 26:	Batırma Sıyırıcısı	91
Şekil 27:	Dispersantın Çalışma Mekanizması	99
Şekil 28:	Etkili Bir Dispersant Uygulaması	101
Şekil 29:	Dispersant Uygulama Platformları	101
Şekil 30:	Tipik Yerinde Yakma Operasyonu	103

Şekil 31: Denize Dökülen Petrolün Tipik Biyolojik Bozunması 106
Şekil 32: Çanakkale Boğazı Gemi Trafik Sektörleri 109
Şekil 33: Araştırmanın Süreci 115
Şekil 34: Optimizasyon Problemlerinin Sınıflandırılması 118
Şekil 35: Optimizasyon Algoritmalarının Sınıflandırılması 119
Şekil 36: Çanakkale Boğazı'ndaki Kazaların Haritadaki Dağılımı 132
Şekil 37: Kazaların Gemi Türlerine Göre Dağılımı 133
Şekil 38: Koordinat Düzlemindeki Kazaların Gemi Tipine Göre Dağılımı 133
Şekil 39: Kaza Türlerinin Gemi Trafik Sektörlerine Göre Dağılımı 134
Şekil 40: Kooridanat Düzlemindeki Kazaların Türüne Göre Dağılımı 134
Şekil 41: Kaza Türlerinin Gemi Türlerine Göre Dağılımı 135
Şekil 42: Koordinat Düzlemindeki Kazaların Sebeplerine Göre Dağılımı 135
Şekil 43: Kaza Türlerinin Sebeplerine Göre Dağılımı 136
Şekil 44: Çanakkale Boğazı Kaza Tehlike Haritası 136
Şekil 45: Denetimli Öğrenmenin İki Adımı: Öğrenmek ve Tahmin Etmek 140
Şekil 46: Örnek Karar Ağacı Modeli 142
Şekil 47: Bir Rassal Ormanın Genel Mimarisi 144
Şekil 48: Rassal Orman (Random Forest) Algoritması 145
Şekil 49: Kaza Türlerinin Tanker Boyutlarına Göre Dağılımı 147
Şekil 50: Kaza Türlerinin Yaş Gruplarına Göre Dağılımı 148
Şekil 51: Kirlilik Miktarı Aralığının Kaza ve Gövde Türüne Göre Dağılımı 148
Şekil 52: 2007-2018 Döneminde En Çok Petrol İthal Edilen Ülkeler 152
Şekil 53: Modelleme Süreci 157
Şekil 54: 1 Numaralı Senaryonun Simülasyon Çıktısı 160
Şekil 55: 2 Numaralı Senaryonun Simülasyon Çıktısı 161
Şekil 56: 3 Numaralı Senaryonun Simülasyon Çıktısı 161
Şekil 57: 4 Numaralı Senaryonun Simülasyon Çıktısı 162
Şekil 58: 5 Numaralı Senaryonun Simülasyon Çıktısı 162
Şekil 59: 6 Numaralı Senaryonun Simülasyon Çıktısı 163
Şekil 60: 7 Numaralı Senaryonun Simülasyon Çıktısı 163
Şekil 61: 8 Numaralı Senaryonun Simülasyon Çıktısı 164
Şekil 62: 9 Numaralı Senaryonun Simülasyon Çıktısı 164

Şekil 63: 10 Numaralı Senaryonun Simülasyon Çıktısı 165
Şekil 64: 11 Numaralı Senaryonun Simülasyon Çıktısı 165
Şekil 65: 12 Numaralı Senaryonun Simülasyon Çıktısı 166
Şekil 66: 13 Numaralı Senaryonun Simülasyon Çıktısı 166
Şekil 67: 14 Numaralı Senaryonun Simülasyon Çıktısı 167
Şekil 68: 15 Numaralı Senaryonun Simülasyon Çıktısı 167
Şekil 69: Kirlilik Talep ve Aday Müdahale Tesisi Noktaları 169
Şekil 70: Optimizasyon Modelinin Çözümü 175
Şekil 71: Müdahale Tesisinin Optimum Konumu: Tesis A12 176
Şekil 72: Alternatif Optimum Tesis Yeri A15 177
Şekil 73: Alternatif Optimum Tesis Yeri A5 177
Şekil 74: Alternatif Optimum Tesis Yeri A14 177
Şekil 75: Duyarlılık Analizleri Sonucu Saptanan Optimum Tesis Yerleri 178

EKLER LİSTESİ

EK 1: Optimizasyon Modelinin GAMS Yazılımından Çıkan Çözümü ek s.1

GİRİŞ

Sanayi devrimiyle birlikte insan hayatının her alanında artan makineleşme, üretimi ve enerji tüketimini hızla artırmış, böylece beraberinde büyük bir enerji ihtiyacı doğurmuştur. Geçmişte, ortaya çıkan bu enerji ihtiyacını karşılamada en çok kullanılan kaynak ise kömür ve petrol gibi fosil yakıtlar olmuştur. Günümüzde, sürdürülebilir bir gelecek için insanlığın fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltılmaya çalışılsa da hızla gelişen ve değişen dünyada petrol, her geçen gün artan enerji ihtiyacını karşılayabilmek için en yaygın kullanılan enerji kaynağı olma hüviyetini devam ettirmektedir.

Dünyanın belirli coğrafyalarında bulunan ve çıkarılan petrolün küresel talebi karşılaması için tanker gemileri vasıtasıyla denizyoluyla taşınması gerekmektedir. Bu durum, denizde petrol kirliliği gibi, ekolojik ve sosyo-ekonomik açıdan felaket boyutlarına varabilecek sonuçları olabilen bir risk yaratmaktadır. Gemilerden kaynaklanan denizde petrol kirliliği riski ne zaman, nerede ve ne şekilde gerçekleşeceği bilinemeyen ve bu nedenle müdahale için her an tedbirli olunmasını zorunlu kılan bir durumdur. Bunun için hazırlanan acil durum eylem planlarında, denizde petrol kirliliğine müdahale tesis ve ekipmanlarının, gerçekleşmesi muhtemel senaryolar dahilinde kirliliğe, çevresel ve ekonomik hasarı en aza indirebilmek için en kısa sürede yanıt verebilecek şekilde konuşlandırılmaları sağlanmaktadır.

Bu doktora tezinde, dünya denizyolu ticaretinin en önemli rotalarından ve Türk Boğazlar Sistemi gibi stratejik önemi yüksek bir bölgenin parçası olan Çanakkale Boğazı için gemi kaynaklı denizde petrol kirliliğine acil durum müdahale tesisinin konum optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Tezin birinci bölümünde denizde kirliliğe neden olan petrolün yapısının ve çevre ile olan etkileşiminin daha iyi anlaşılabilmesi için petrol türleri, özellikleri ve rafinasyonu başlığı altında petrolün kökeni ve oluşumu, petrolün kimyasal bileşenleri ve kompozisyonu, petrolün fiziksel özellikleri ve son olarak petrolün rafinasyon safhalarına değinilmiştir.

İkinci bölümde ise denizde petrol kirliliği kaynaklarından ve istatistiklerinden bahsedilmiş ve denizde petrol kirliliğini önlemeye yönelik ulusal ve uluslararası düzenlemeler anlatılmıştır. Ardından petrolün denizdeki bozunma ve hareket süreçleri

açıklanmıştır. İkinci bölümün son kısmında ise denizde petrol kirliliğine müdahale teknikleri mekanik, kimyasal, termal ve biyolojik müdahale teknikleri şeklinde detaylandırılmıştır.

Tez çalışmasının üçüncü ve son bölümünde ise araştırmanın konusu, amacı, önemi, kapsamı, kısıtları, süreci, yöntemi, verilerin toplanması, verilerin analizi, bulgular, tartışma ve sonuç kısımlarına yer verilmiştir. Çalışmanın denizde petrol kirliliğine hazırlıklı olma ve etkili şekilde müdahale konularında karar vericilere, ilgili coğrafi bölge özelinde ve dünyanın diğer coğrafyalarında, sunulan tesis yeri belirleme modeliyle katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

BİRİNCİ BÖLÜM
PETROL TÜRLERİ, ÖZELLİKLERİ VE RAFİNASYONU

"Petroleum" yani petrol kelime olarak latince kökenli petra (kaya) ve oleum (yağ) kelimelerinin birleşiminden meydana gelmiştir ve anlamı kaya yağıdır (McLeroy ve diğerleri, 2018: 1; Speight, 2014: 3). Tarihsel olarak petrol ve türevleri binlerce yıldır bilinmekte ve kullanılmaktadır. Antik çağlardaki işçiler, petrolün asfalt gibi belirli türevlerinin sivil ve dekoratif amaçlar için kullanılabileceğini, nafta gibi diğerlerinin ise savaşta belirli avantajlar sağlayabileceğini fark etmişlerdir (Speight ve Özüm, 2001: 1). Bilimsel olarak petrol, ağırlıkla organik karbon ve hidrojen bileşenlerinin doğal yollarla bir araya gelmesiyle yerkürenin altında oluşan karmaşık yapıya sahip bir karışımdır. Aynı zamanda, önemli miktarda azot, kükürt ve oksijenle birlikte az miktarda nikel, vanadyum gibi diğer metal elementleri de içermektedir. Petrol çeşitli formlar halinde doğada katı, sıvı ve gaz halde bulunabilmektedir (Barker, 1985: 11). Ham petrol, çeşitli organik maddelerden oluşan bir karışımdır ve bugünün organik endüstrisinin yapı taşları olan metan, etan, propan, bütan, pentan ve çeşitli diğer parafinik, naftik ve aromatik hidrokarbonlar gibi hidrokarbonların kaynağıdır. Gaz ve sıvı yakıtlar, yağlama yağı, solventler, asfaltlar, mumlar ve kok gibi çeşitli petrol ürünleri ham petrolün rafine edilmesinden elde edilir. Daha hafif hidrokarbonlar ve diğer organik kimyasallar, bu hidrokarbonların termal ve katalitik işlemleri ile sentezlenir (Chaudhuri, 2010: 1). Farklı tipteki birçok ham petrol, yüzlerce ana bileşen ve binlerce alt bileşenden oluşmaktadır. Bileşimleri değiştikçe, her tür petrol veya petrol ürününün kendine özgü özellikleri ortaya çıkmaktadır. Bu özellikler, yağın çevreyle teması halinde davranış şeklini etkilemekte ve petrolün dış çevrede izlediği yolu ve etkilerini belirlemektedir. Bu özellikler ayrıca petrolün çevreden temizlenmesi işlemlerinin verimliliğini de etkilemektedir (Fingas, 2011: 51).

Bu bölümde sırasıyla ham petrolün kökeni ve oluşumu, kimyasal bileşenleri ve kompozisyonu, karakterize edici özelliklerine ait ölçümleri ve korelasyonları ve rafine edilme süreçleri anlatılmaktadır. Böylece araştırmaya konu olan petrolün daha iyi tanınması ve anlaşılması hedeflenmektedir.

1.1. PETROLÜN KÖKENİ VE OLUŞUMU

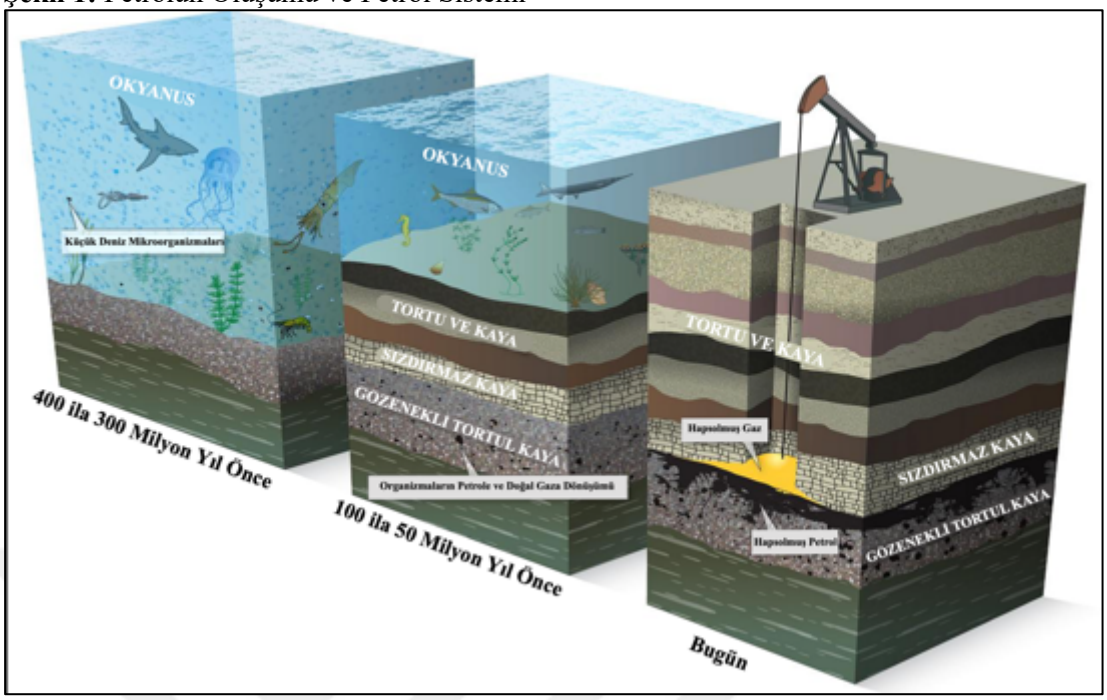
Geçmişten bu yana petrolün kökeni ve oluşumuna dair teoriler biyojenik ve abiyojenik olmak üzere iki temel grupta toplanmıştır (Walters, 2017: 360).

Abiyojenik teoriler ilk olarak 16. yüzyılda ortaya atılmış ve azınlıkta kalan bir grup bilim adamı tarafından 20. yüzyılın ortalarına kadar dile getirilmiştir ve günümüzde hala bazı savunucuları bulunmaktadır. Abiyojenik teoriye göre hidrokarbonların diğer gezegenlerde ve diğer güneş sistemlerinde de bolca bulunduğu, dünyadaki petrol kaynağının başlangıçta var olan büyük derinliklerdeki limitsiz bir havuzdan sağlandığı ve buradan gelen karbon taşıyıcı akışkanın yerkürenin mantosundan geçen yukarı yönlü hareketi sonucu sondaj aletlerinin temas ettikleri kuyuları dolduğu savunulmuştur (Kutcherov, 2013).

Günümüzde genel kabul gören biyojenik teoriye göre ise petrolün, plankton ve alg gibi ölümlerinden sonra tam oksitlenmeye maruz kalmamış ve kum, kil, tuz ve diğer materyallerin yanında eski denizlerin, göllerin ve alçak arazilerin tabanlarında birikmiş eski canlı mikroorganizmalardan meydana geldiği düşünülmektedir (Hsu ve Robinson, 2017: 18). Bu teoriye göre zamanla tektonik hareketler, basınç ve ısı derinlerde gömülü olan katmanları diyajenez ve katajenez yoluyla tortul kayalara (sedimentary rocks) dönüştürmektedir. Tortul kayalar, milyonlarca yıl sonunda organik maddelerin yüksek sıcaklık ve yüksek basınç altında yağa ve gaza dönüştüğü kaya şeklindeki katmanlardır. Kaynak kaya (source rock) olarak bilinen bu yapılardan petrol ve gaz, kendisini depolamaya elverişli alanlara veya tuzaklara göç etmektedir (migration). Bu tuzaklar, yağ ve gazı sızdırmaz kayalarla kaplı gözenekli kaya alanlarında ihtiva eden genellikle antiklinal veya kubbeli bölgelerdir. Bu bölgeler rezervuar veya havza olarak adlandırılmaktadır ve sondaj aletlerinin petrole ulaştıkları alanlardır (Tissot ve Welte, 1984; Chaudri, 2010: 8; Speight, 2014: 49).

Petrolün oluşumuna imkan tanıyan düzenek bir petrol sistemini oluşturmaktadır. Önceki paragraftan anlaşılacağı üzere her petrol sistemi organik madde açısından zengin en az bir tortul tabaka oluşumundan, bir göç yolundan, petrolü biriktirebilmek için yeterli gözenek ve geçirgenliğe sahip rezervuar kayalarından ve bu rezervuarı mühürleyebilecek bir kaya tabakasından meydana gelmektedir (Walters, 2017: 361).

Şekil 1: Petrolün Oluşumu ve Petrol Sistemi



Kaynak: (Timmeko, 2010).

Şekil 1'de petrolün oluşum süreci ve bir petrol sistemi yukarıda tarif edildiği gibi gösterilmektedir. Şekilde de görüldüğü üzere milyonlarca yıllık bir süreç sonucu denizlerde yaşamış canlıların kalıntılarının denizin çekilmesiyle kaya formlarının içinde sıkışıp biyolojik bozunma, yüksek sıcaklık ve yüksek basınç altında yağ ve gaz haline dönüştüğü görülmektedir.

Organik maddenin kökeni, çökelme ortamı, tortul birikintisinin yaşı ve biyolojik bozunmaya maruz kalmak gibi değişimler maddenin kömür, kerojen, zift, ağır yağ, petrol veya doğal gaz olup olamayacağına karar vermektedir (Hsu ve Robinson, 2017: 18).

1.2. PETROLÜN KİMYASAL BİLEŞENLERİ VE KOMPOZİSYONU

Kompozisyon, petrolü oluşturan kimyasal bileşiklerin kendilerine özgü karışımını ifade etmektedir. Bu malzemelerin bileşimi, hidrokarbonları üreten organik materyalin doğası ve karışımı ile ilgilidir. Kompozisyon ayrıca, göç (petrolün kaynak kayadan rezervuar kayaya hareketi), biyolojik bozunma (mikropların etkisiyle değişim) ve suyla yıkanma (alt yüzeyde akan suyla temas) gibi doğal süreçlerin

etkisine de tabidir. Bu nedenle petrol, doğal bir ürünün metamorfozunun bir sonucu olup, belirli bir konumdaki egemen koşulların sağladığı kimyasal ve fiziksel değişimlerin bir sonucudur. Aynı zamanda üretim şekline ve kuyu veya haznenin yaşamında ulaşılan aşamaya da bağlıdır. Böylece, petrol, bir petrol sahasından diğerine, aynı alandaki bir kuyudan diğerine ve hatta aynı kuyudaki bir seviyeden diğerine bile bileşimde değişebilmektedir. Bu varyasyon hem moleküler ağırlık bazında hem de petroldeki moleküller tipinde olabilir. Petrol, geniş bir moleküler ağırlık dağılımı içindeki geniş bir moleküler tip dağılımından elde edilen organik moleküllerin bir karışımı olarak tanımlanabilir. (Speight, 2014: 34).

Ham petrol, hidrokarbonlardan ve diğer elementlerle kombine olmuş, küçük ve uçucu veya büyük ve uçucu olmayan mahiyette hidrokarbonlardan meydana gelen karmaşık bir karışımdır (Kinghorn, 1983). Ham petroldeki bileşikler esas olarak, %85-90 oranında karbon ve %10-14 oranında hidrojen içeren hidrokarbonlar ve ikame hidrokarbonlardır. Hidrokarbonlardan geriye kalan kısım ise hidrokarbon olmayan sülfür (%0,2-3), nitrojen (%0,1-2) ve oksijen (%1-1,5) ile birlikte nikel, arsenik, vanadyum, kurşun ve diğer metallerin heteroatomik bileşikleridir (Chaudri, 2010: 1). Ham petrol, farklı boyutlarda ve farklı sınıflarda birçok bileşik içerir. Analistler, şimdiye kadar petrolde 17.500 kadar farklı bileşik tespit etmişlerdir ve bu sayının gelecekte artması beklenmektedir (Fingas, 2011: 52). Tablo 1'de yukarıda belirtildiği gibi ham petrol içindeki bileşiklerin gruplandırılmış haldeki listesi verilmektedir.

Tablo 1: Ham Petroldeki Hidrokarbon ve Heteroatomik Tipler

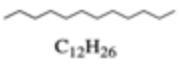
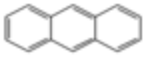
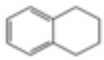
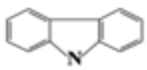
Sınıf	**Bileşik Türleri**
Doymuş Hidrokarbonlar	*n*-Parafinler
	iso-Parafinler ve diğer dallı parafinler
	Sikloparafinler (naftenler)
	Yoğunlaşmış Sikloparafinler (steranlar ve hopanlar dahil)
	Halka sistemlerindeki alkil yan zincirler
Doymamış Hidrokarbonlar	Petrol için yabancı olefinler; Benzen sistemlerinin termal reaksiyonlarının ürünleri
Aromatik Hidrokarbonlar	Yoğunlaşmış aromatik sistemler
	Yoğunlaşmış sikloalkil aromatik sistemler
	Halka sistemlerindeki alkil yan zincirler
	Alkil sülfitler
Doymuş Heteroatomik Sistemler	Sikloalkil sülfitler
	Halka sistemlerindeki alkil yan zincirler
	Furanlar (tek halkalı ve çok halkalı sistemler)
Aromatik Heteroatomik Sistemler	Tiyofenler (tek halkalı ve çok halkalı sistemler)
	Piroller (tek halkalı ve çok halkalı sistemler)
	Piridinler (tek halkalı ve çok halkalı sistemler)
	Karışık heteroatomik sistemler
	Amfoterik (asit-baz) sistemler
	Halka sistemlerindeki alkil yan zincirler

Kaynak: (Speight, 2014: 191).

Ham petrol, belirlenmiş birtakım yöntemler ile içerdiği bileşimler açısından karakterize edilebilmektedir. Ham petrolün sınıflandırma biçimlerinden en eski ve yaygın olanı "SARA" (Saturates, Aromatics, Resins, Aspahltenes) olarak adlandırılan sınıflandırma biçimidir. SARA yöntemi, petrolün çökelme ve ardından ağırlık ile tanımlandığı genel bir analitik yöntemdir (Fingas, 2015: 54). SARA fraksiyonları tipik olarak yer çekimi ölçümüne dayalı (gravimetrik) yöntemler kullanılarak belirlenmektedir. Ancak günümüzde alev iyonizasyon tespiti (TLC–FID) ile birleştirilen ince tabaka kromatografisi, önemli bir nicel araç haline gelmiştir. TLC–FID tekniği, bir çözücüyle ayrılabilen petrol organiklerini silika kaplı kuvars çubuklar üzerinde doymuş, aromatik ve polar bileşenlere ayırmakta ve bir alev iyonizasyon detektörü kullanıp bir bütün olarak her hidrokarbon grubunu tespit etmektedir (Dunn ve diğerleri, 2000: 313).

Tablo 2' de "SARA" sınıflandırma biçim gösterilmektedir. "Saturate" olarak adlandırılan doymuş bileşikler diğerlerinin arasında en çok hidrojen ihtiva eden hidrokarbonlardır. Aromatikler ise en az bir benzen halkasına sahip hidrokarbonlardır. Reçine ve asfalt (polar bileşikler) ise yüksek oranda karbon ve hidrojen içermekle birlikte oksijen, sülfür, nitrojen ve metal de içeren en büyük hidrokarbon bileşikleridir (Fingas, 2015: 54).

Tablo 2: Tipik SARA İçeriği ve Belirli Bileşiklerin Kompozisyonları

Gruplama	**Örnek sınıflar, isimler, ve bileşikler**			
	Kimyasal Sınıf	**Alternatif İsim**	**Açıklama**	**Örnek Bileşik**
Doymuşlar	Alkanlar	Parafinler		Dodekan $C_{12}H_{26}$ 
	Sikloalkanlar	Naftenler		Dekalin 
	Balmumları		n-alkanlar C_{18}–C_{80}	
Aromatikler	BTEX		Benzen, Toluen, Etilbenzen, Ksilen	Benzen
	PAH			Antrasen 
	Naften Aromatiklari		Aromatiklerin ve Sikloalkanların Kombinasyonu	Tetralin 
Reçineler	Bazen oksijen, nitrojen, sülfür ve metaller içeren çoğunlukla anormal polar bileşikler sınıfı			Karbazol 
Asfaltenler	Bazen oksijen, nitrojen, sülfür ve metaller içeren büyük anormal bileşikler sınıfı			Bilinmeyen Yapılar

Kaynak: **(**Fingas, 2015: 54).

Tablo 3 incelendiğinde, hidrokarbon ve heteroatomik bileşiklerin ürün bazında sırasıyla benzin, dizel, hafif ve ağır ham petrol, ara akaryakıt ve bunker C deki yüzdelik oranları gösterilmektedir.

Tablo 3: Bazı Petrol ve Petrol Ürünlerinin Kompozisyonu

		(%- metaller hariç)					
Grup	Bileşik Sınıfı	Benzin	Dizel	Hafif Ham Petrol	Ağır Ham Petrol	IFO	Bunker C
Doymuş		50–60	65–95	55–90	25–80	25–35	20–30
	Alkanlar	45–55	35–45	40–85	20–60	10–25	10–20
	Sikloalkanlar	5	25–50	5–35	0–10	0–5	0–5
Olefin		5–10	0–10				
Aromatik		25–40	5–25	10–35	15–40	40–60	30–50
	BTEX	15–25	0.5–2.0	0.1–2.5	0.01–2.0	0.05–1.0	0.00–1.0
	PAHs		0–5	10–35	15–40	30–50	30–50
Polar Bileşik			0–2	1–15	5–40	15–25	10–30
	Reçine		0–2	0–10	2–25	10–15	10–20
	Asfalt			0–10	0–20	5–10	5–20
Sülfür		0.02	0.1–0.5	0–2	0–5	0.5–2.0	2–4
Metal (milyondaki parça-ppm)				30–250	100–500	100–1000	100–2000

IFO: Ara fuel oil, dizel fraksiyonlarla seyriltilen kalıntı fraksiyondur.

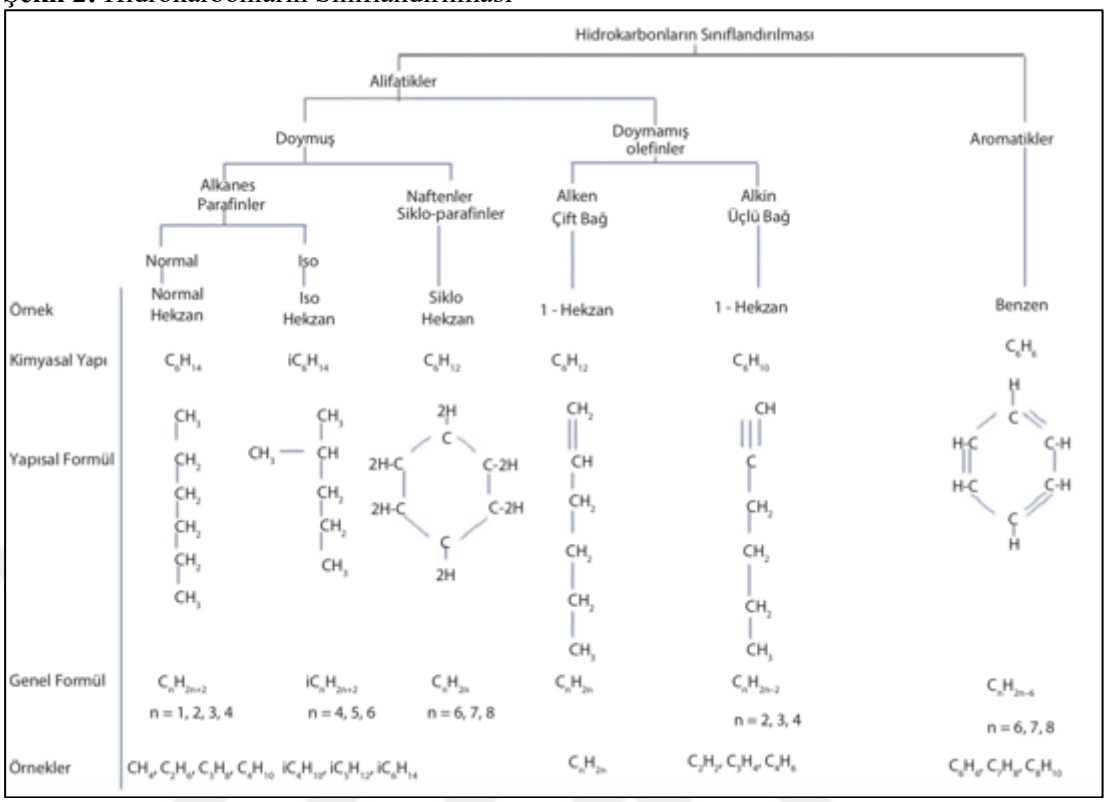
Kaynak: **(**Fingas, 2015: 54)

Yukarıdaki ifadelerden de anlaşılacağı üzere ham petrolü oluşturan bileşen ve bileşikleri SARA grubu, sülfür, oksijen, nitrojen ve diğer metaller olmak üzere sınıflandırmak mümkündür. Devam eden bölümde bu gruplar detaylı bir biçimde anlatılmaktadır.

1.2.1. Hidrokarbonlar

Sadece karbon ve hidrojenden oluşan bileşiklere hidrokarbonlar denmektedir. Hidrokarbonlar parafinler (alkan), naftenler (sikloalkan), aromatikler ve olefinler (alken) olarak gruplandırılmaktadır. Ham petrol bu hidrokarbonları, bazı rafinasyon işlemleri sırasında üretilen olefinler hariç, farklı oranlarda içermektedir (Chaudhuri, 2010: 1). Parafin ve naftenler aynı zamanda "saturated" yani hidrojence doymuş bileşikler olarak, olefinler ise "unsaturated" hidrojence doymamış bileşikler olarak da anılmaktadır. Şekil 2' de ham petrolde bulunan hidrokarbonların sınıflandırılması yapılmakta ve genel kimyasal formülleri verilmektedir.

Şekil 2: Hidrokarbonların Sınıflandırılması



Kaynak: (Coker, 2018: 9)

1.2.1.1. Parafinler (Alkanlar)

Alkanlar olarak da bilinen parafinler, karbon atomlarının sayısı "n" olan ve genel kimyasal formülü C_nH_{2n+2} şeklinde ifade edilen doymuş bileşiklerdir. En basit parafin, aynı zamanda C1 olarak temsil edilen metandır (CH4) (Fahim ve diğerleri, 2010: 12). Parafinler, ham petrolde ve dizel ve benzin gibi çoğu yakıtta en bol bulunan bileşiklerdir. Ham petrollerin çoğu, %10-%30 arasında parafin içermektedir. Parafinler tipik olarak, petrol üreticileri tarafından aranan hedef bileşiklerdir. Bununla birlikte, balmumu (C18) olarak adlandırılan daha büyük parafinlerin ise bazen bir petrol üreticisinin bakış açısından daha az arzu edildiği belirtilmelidir (Fingas, 2015: 55).

Parafinler hem normal hem de izo-parafinler olmak üzere iki biçimde bulunmaktadırlar. Normal parafinler (n-parafinler), düz zincirli bileşiklerdir. İzo-parafinler ise dallanmış zincirli yapıdaki bileşiklerdir. Normal ve izo-parafinler aynı formüle (yani, aynı sayıda karbon ve hidrojen atomuna) sahiptir, ancak izomerizm nedeniyle fiziksel ve kimyasal özelliklerinde büyük ölçüde farklılık göstermektedirler.

Normal parafinlerin izomer sayısı, parafin içindeki karbon atomlarının sayısı ile artar. Örneğin, beş, altı ve sekizli karbon sayılarına sahip parafinler, sırasıyla üç, beş ve on sekizden oluşan izo-parafinlere sahip olacaktır. Normal parafinler, termal veya katalitik süreçlerle izo-parafinlere dönüştürülebilmektedir. Bu izomerizasyon reaksiyonu olarak bilinmektedir (Chaudhuri, 2010: 1).

1.2.1.2. Naftenler (Sikloalkanlar)

Sikloalkanlar olarak da bilinen naftenler, en az bir karbon atomu halkasına sahip ve C_nH_{2n} genel kimyasal formülüyle ifade edilen doymuş hidrokarbonlardır (Fahim ve diğerleri, 2010: 14). Doymuş halkalı hidrokarbonlar, ham petrolde oransal olarak %30-%60 aralığında bulunan başlıca bileşenlerdir. C5 ve daha yüksek seviyelerdeki tüm fraksiyonlarda bulunurlar, fakat normal veya dallanmış alkanlara göre çeşitli kaynama noktası aralıklarında daha az değişkenlik göstermektedirler (Barker, 1985: 32). Petroldeki hemen hemen tüm sikloalkanlar, siklopentan veya sikloheksandan türetilmektedir (Schobert, 2013: 175).

1.2.1.3. Olefinler (Alkenler)

Alkenler olarak da bilinen olefinler, karbon-karbon çift bağları içeren doymamış hidrokarbonlardır. Karbon-karbon üçlü bağları içeren bileşikler asetilenler olarak bilinmekte ve ayrıca biyo-olefinler veya alkinler olarak da ifade edilmektedirler. Olefinler ve asetilenlerin genel kimyasal formülleri, sırasıyla C_nH_{2n} ve C_NH_{2N-2} şeklinde gösterilmektedir. Doymamış bileşikler, birden fazla çift veya üçlü bağa sahip olabilmektedir. İki çift bağ mevcutsa, bileşikler alkadienler veya daha yaygın olarak dienler olarak adlandırılmaktadırlar. Ayrıca, trienler, tetraenler ve hatta polienler de mevcut olabilmektedir. Olefinler ham petrolde doğal olarak bulunmamakta fakat dönüştürme işlemleri sırasında oluşmaktadırlar. Olefinler parafinlerden daha reaktiflerdir. En hafif alkenler, petrokimya endüstrisi için önemli hammaddeler olan etilen (C_2H_4) ve propilendir (C_3H_6). En hafif alkin asetilendir (Fahim ve diğerleri, 2010: 14, Chaudhuri, 2010: 1, Fingas, 2015: 55).

1.2.1.4. Aromatikler

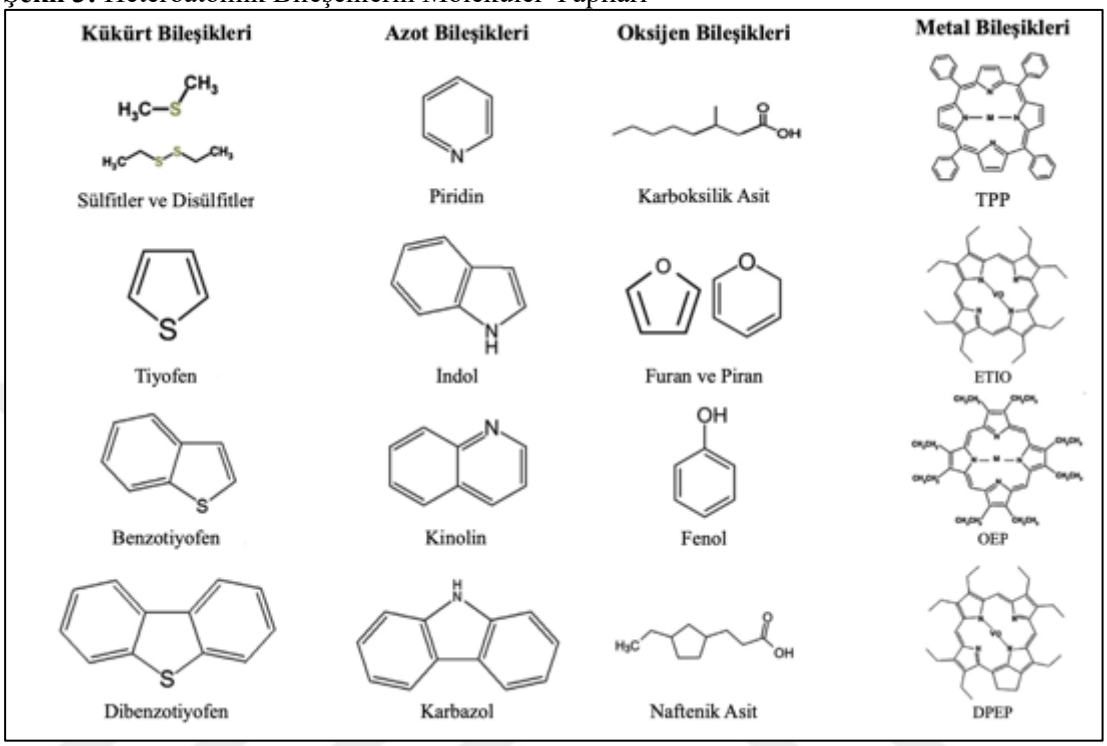
Aromatikler, bir veya daha fazla benzen halkasından oluşan doymamış halkalı bileşiklerdir. Benzen halkası, kendisini oldukça stabil hale getiren eşsiz elektron düzenlemelerine sahip üç çift bağa sahiptir (Fahim ve diğerleri, 2010: 14). Aromatik bileşikler C_nH_{2n-6r} genel kimyasal formülüne sahiptir ki burada r, halka sayısını ifade etmektedir. Ham petrolde bulunan en yaygın küçük aromatik bileşikler sıklıkla BTEX olarak anılan benzen, tolüen, etilbenzen ve ksilendir (Fingas, 2015: 58). Petroldeki aromatik içerik aralığı yaklaşık %10-%50 arasındadır. Polinükleer aromatik bileşikler (PNA) olarak da bilinen polihalkalı aromatik hidrokarbonlar (PAH), birbirine kaynaşmış iki veya daha fazla aromatik halka içermektedir. Ailenin ilk bileşiği naftalendir. Petrol içinde meydana gelebilecek diğer polihalkalı aromatik hidrokarbonlar antrasen, fenantren, piren ve bunların alkillenmiş türevlerini de içermektedir. Terfenil gibi yoğunlaştırılmamış çok tabakalı aromatik bileşikler petrolde nadiren gözlenmektedir. Daha büyük polihalkalı bileşikler, pentan içindeki çözünürlüklerine göre iki sınıfa ayrılmaktadır. Pentan içinde çözünen bileşenler reçineler, pentan içinde çözünmeyen bileşenler ise asfaltenler olarak gruplandırılmaktadır (Schobert, 2013: 177).

1.2.2. Heteroatomik Bileşikler (Hidrokarbon Olmayanlar)

Ham petrol, başlıcaları sülfür, azot ve oksijen ihtivalı bileşikler olmak üzere kayda değer miktarda hidrokarbon olmayan bileşenleri, daha küçük miktarlarda ve çözelti halinde organometalik bileşikleri ve kolloid süspansiyondaki inorganik tuzları içermektedir. Bu bileşenler, ham petrolün tüm kaynama aralığı boyunca görünmekte fakat esas olarak daha ağır fraksiyonlarda ve uçucu olmayan tortularda konsantre olma eğilimi göstermektedirler (Speight, 2014: 196). Çoğu ham petrolde bulunan heteroatomik bileşikler toplam hacmin %10'unu oluşturmakta ancak aşırı durumlarda bu oran çok daha yüksek hacimlerde olabilmektedir. Heteroatomik bileşiklerin petrolde bulunma yüzdesi genellikle sığ ve bozulmuş, bir diğer deyişle "olgunlaşmamış" ham petrolde, derin ve olgun ham petrollerde olandan daha yüksektir

(Barker, 1985: 35). Şekil 3'te heteroatomik bileşenlerin moleküler yapıları gösterilmektedir.

Şekil 3: Heteroatomik Bileşenlerin Moleküler Yapıları



Kaynak: **(**Ramirez-Corredores, 2017: 3)

1.2.2.1. Sülfür Bileşeni

Sülfür bileşenleri petrol ürünlerinde istenmeyen bir kirletici olarak bulunmakla birlikte bazı ham petrollerin önemli bir yüzdesini oluşturmaktadır (Neuman ve diğerleri, 1981). Petrolde bulunan sülfür bileşikleri genellikle merkaptan veya tiyol, sülfit, tiyofen ve asfalten gibi yapıların bir parçası olabilecek biçimde dört grupta görünebilmektedir. Petroldeki çoğu sülfür bileşiği kötü kokulu ve aşındırıcıdır. Bu bileşiklerin mevcudiyeti saflığı bozduğundan dolayı ham yağların fiyatını düşürmektedir. Sülfür bileşikleri rafine edilmeden önce ya da rafinasyon sırasında çıkarılmalıdır. Son yıllarda, yakıtların kükürt içeriğinin azaltılması için standartlar yükseltilmiş ve arıtma masrafları artmıştır (Fingas, 2015: 58).

1.2.2.2. Oksijen Bileşeni

Organik bileşiklerdeki oksijen, çeşitli formlarda ($R-OH, Ar-OH, R-O-R, R-CO_2H, AR-CO_2H, R-CO_2R, Ar-CO_2R, R_2C=O$ ve ayrıca halkalı furan türevleri, R ve R alkil gruplar, Ar aromatik gruplar) doğada meydana gelebilmektedir. Bu yüzden oksijen ihtivalı bileşiklerin petrolde daha yaygın olarak meydana gelmesi şaşırtıcı değildir. Ham petrolün toplam oksijen muhteviyatı, daha büyük miktarlar rapor edilmiş olmasına rağmen, genellikle %2'den daha azdır. Oksijen içeriği olağanüstü yüksek olduğunda petrolün üretim sırasında ya da sonrasında muhtemelen atmosfere uzun süre maruz kalmış olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte, petrolün oksijen içeriği kaynama noktası yüksek fraksiyonlara gidildikçe artmakta ve hatta uçucu olmayan kalıntılarda %8'e kadar oksijen içeriğine rastlanabilmektedir (Speight, 2014: 199). Oksijen petrolde fenoller, karboksilik asitler ve muhtemelen alkoller, esterler ve ketonlar olarak ortaya çıkmaktadır. Karboksilik asitler yağlı asitleri, daha kısa zincirli alkil karboksilik asitleri ve naftenik asitleri içermektedir. Basit tek-halkalı asitlerden 1000 Da'ya (1 Dalton=1 g/mol) yaklaşan moleküler ağırlıklara sahip kompleks yapılara kadar sayısız bileşiğin bir ailesi olan naftenik asitler, en yaygın oksijen bileşiği formlarından biri gibi görünmektedir (Schobert, 2013: 179).

1.2.2.3. Nitrojen Bileşeni

Ham petrol çok düşük oranlarda nitrojen içermektedir. Hidrokarbonlardaki azot bileşenleri genellikle ham petrolün daha ağır kısımlarında bulunmaktadır. Bunlar, renk ve renk kararsızlığından ve belirli katalizörlerin zehirlenmesinden sorumludur. Petrol yakıtlarındaki nitrojen, atmosferin güçlü kirleticileri olan nitrojen oksitlerin (NO_x) oluşmasına neden olmaktadır. Nitrojen petrol ürünlerinden katalitik hidrojenasyon ile elimine edilebilmektedir. Sülfür gibi, petrolün daha ağır kısımlarındaki nitrojen, ciddi çatlama veya hidrojenasyon reaksiyonları olmaksızın uzaklaştırılamamaktadır. Ham petroldeki azot bileşikleri, temel veya temel olmayanlar olarak sınıflandırılabilmektedir. Temel nitrojen bileşikleri, piridinlerden oluşmaktadır. Ham petrolde nitrojenin büyük kısmı, genellikle pirol tipi olan temel olmayan nitrojen bileşikleridir. Piridinler, bir nitrojen atomu içeren altı üyeli heteroaromatik

bileşiklerdir. Benzen halkaları ile kaynaştırıldığında piridinler çok halkalı heteroaromatik bileşiklere, kinolinler ve izokinolinlere dönüştürülmektedir. Bazik olmayan nitrojen bileşiklerinde, piroller bir nitrojen atomu içeren beş üyeli heteroaromatik bileşiklerdir. Benzen halkası ile kaynaştırıldığında pirol, polisolik heteroaromatik bileşiklere indol ve karbazole dönüştürülmektedir (Chaudhuri, 2010: 5, Fahim ve diğerleri, 2010: 18, Speight, 2014: 199).

1.2.2.4. Metal Bileşeni

Tüm ham petrol türlerinde metalik bileşenler çok az miktarda bulunmaktadır. Petrol işleme sürecinde yaratacağı problemlerden kaçınmak ve rafine ürünleri kirletmelerini önlemek için metal bileşenlerin konsantrasyonlarının azaltılması gerekmektedir. Metaller birçok yükseltme sürecini etkilemektedir. Metal bileşenleri ayrıca hidro işlem süreci ve çatlama süreci için kullanılan katalizörlerde zehirlenmeye neden olmaktadır. Katalitik çatlatıcı için ham maddedeki metallerin (demir, nikel ve vanadyum) eser miktarlardaki varlığı bile katalizörün aktivitesini etkilemekte, gaz ve kok oluşumunun artmasına ve benzin verimliliğinin azalmasına neden olmaktadır. Yüksek sıcaklıklı güç jeneratörleri için kullanılan yakıtta vanadyumun bulunması türbin kanatlarında kül birikmesine, şiddetli korozyona ve refrakter fırın kaplamalarının bozulmasına neden olabilmektedir (Speight, 2014: 201, Fahim ve diğerleri, 2010: 19). Metaller, ham petrolde inorganik tuzlar, metal sabunlar, organik metal-kompleks bileşikler ve asfaltinlere bağlanmış biçimlerinden biri şeklinde bulunmaktadırlar (Fingas, 2015: 69). Ham petrolün metalik bileşenlerinin bir kısmı ağırlıklı olarak sodyumun, potasyumun, magnezyumun ve kalsiyumun sülfatları ve kloridleri olmak üzere inorganik, suda çözünebilir tuzlar olarak var olmaktadır. Bu bileşikler tuzdan arındırma işlemleri sırasında giderilmektedirler. Bunlardan öte daha önemlisi, petrolde çözünen organometalik bileşikler şeklinde mevcut olan metallerdir. Çinko, titanyum, kalsiyum ve magnezyum organometalik sabunlar şeklinde görünmektedir. Bununla birlikte, vanadyum, nikel, bakır ve demir, pirol bileşikleriyle kompleks oluşturabilen, petrolde çözünebilir maddeler olarak bulunmaktadır (Fahim ve diğerleri, 2010: 19).

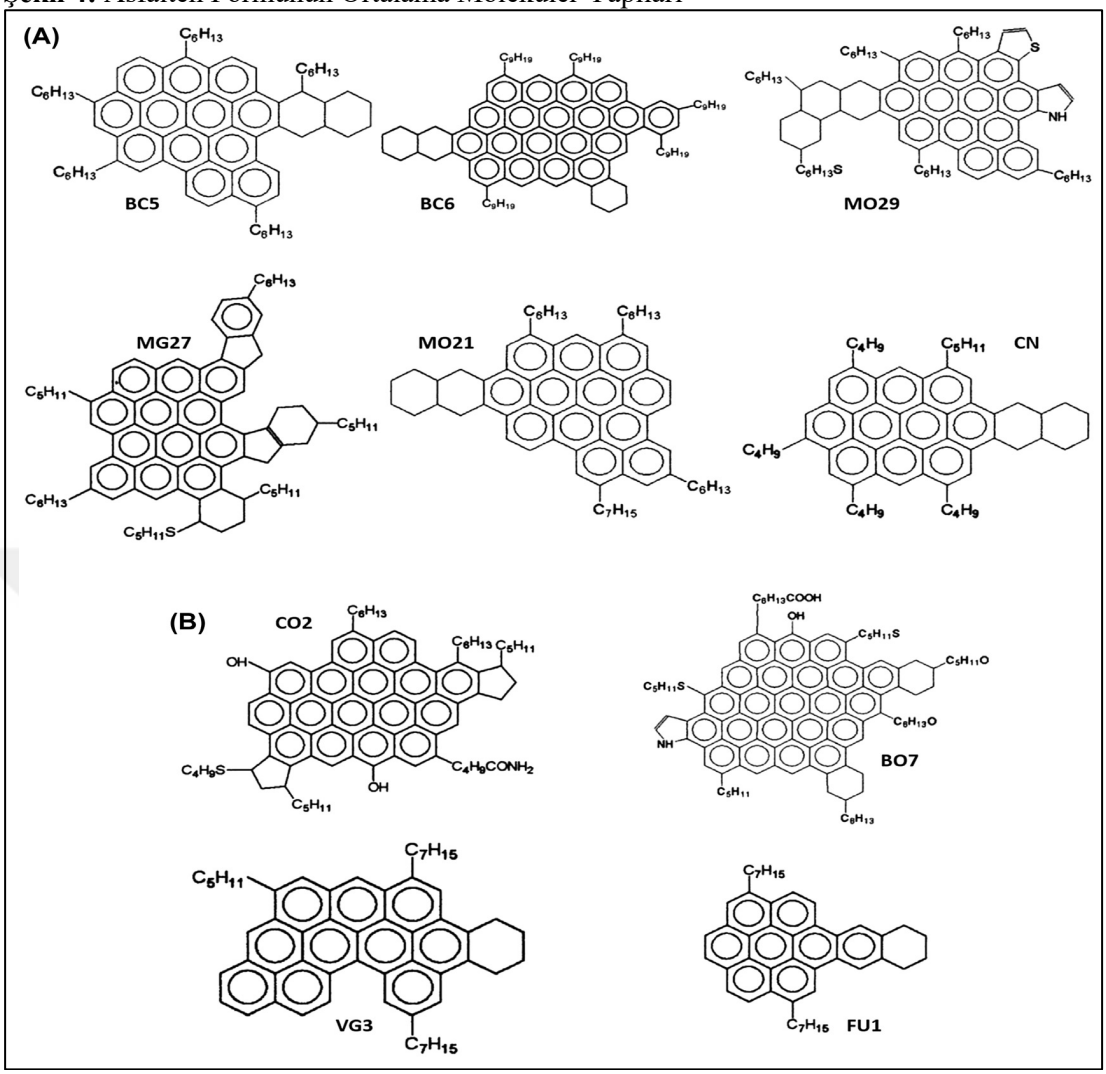
1.2.3. Reçineler

Reçineler, çöktürme veya açık kolon kromatografisi ile tanımlanan, moleküler ağırlıkları 500-1000 g/mol aralığında değişen polar bileşiklerdir. Reçinelerin bileşimi büyük ölçüde bilinmemektedir (Fingas, 2015: 69, Fahim ve diğerleri, 2010: 21). Reçineler çok daha düşük molekül ağırlığına sahip daha küçük asfalten benzerleri olarak kabul edilmektedirler. Bu nedenle, reçinelerin kütlesi, jel geçirgenlik kromatografisi ve santrifüj ince tabaka kromatografisi ile preparatif olarak ayrılabilmektedir. Reçineler, uzun alkillerle ikame edilmiş aromatik bileşikler ve asfaltenden daha yüksek sayıda halkalara eklenmiş yan zincir içermektedir. Reçinelerin doymuş ve aromatik özelliklerinin kombinasyonu, petrol ortamındaki asfaltenlerin kolloid yapısını stabilize etmektedir (Yen, 1998: 7).

1.2.4. Asfaltenler

Asfaltenler, belirli bir erime noktasına sahip olmayan ve genellikle ısıtıldığında karbonlu kalıntı bırakan koyu kahverengi kıvamlı katılardır. Moleküler ağırlıkları birkaç yüz ila birkaç milyon g/mol arasında geniş bir yelpazeye yayılmaktadır (Fahim ve diğerleri, 2010: 20). İlk olarak 1837'de bitümün damıtma artıklarını göstermek için asfalten terimi kullanılmıştır. Kompleks aromatik moleküler karışım olan asfaltenler, ham petrol, petrol ve kömür işleme kalıntılarında yaygın olarak bulunmaktadır. (Ramirez-Corredores, 2017: 41). Asfaltenler kimyasal kompozisyon bakımından tek tip değillerdir. Aromatik moleküllerinde heteroatomlar ve metallerle birlikte hidrojen ve karbon da ihtiva etmektedirler. Kesin ve belirli bir moleküler yapıları yoktur. Her bir örnek farklı bir moleküler yapıda olabilmektedir. Kütle spektrometresi, kromatografi, nükleer manyetik rezonans spektroskopisi, kızılötesi spektroskopisi, roma spektroskopisi, floresan spektroskopisi, x-ışını kırınım analizi ve küçük açılı saçılma teknikleri gibi pek çok teknik asfaltenin kimyasal bileşimleri ve temel yapılarının bazı değerli açıklamalarını ortaya çıkarabilmektedir (Qu ve diğerleri, 2018: 187).

Şekil 4: Asfalten Formunun Ortalama Moleküler Yapıları



Kaynak: **(**Rogel ve Carbognani, 2003: 380)

Şekil 4'te asfalten moleküllerinin ortalama moleküler yapıları gösterilmektedir. Şekilde A grubu kararlı, B grubu ise kararsız asfalten örneklerini ifade etmektedir. Asfalten grubu bileşikler çok sayıda ve farklı oranlarda bileşenlerden meydana geldiğinden moleküler yapıları da birbirinden farklılık göstermektedir.

Asfaltenler düşük kaynama noktalı nafta, petrol eteri, pentan, izopentan ve heksan gibi polar olmayan çözücüler içinde çökeltme ile elde edilmektedirler. Piridin, karbon disülfür ve karbon tetraklorür gibi yüksek yüzey gerilimli sıvılarda da çözünebilmekte fakat çökeltildikleri metan, etan ve propan gibi petrol gazlarında çözünmemektedirler. Ticari olarak, propan, diğer asfalt kalıntılarından asfaltenleri ayırmak için kullanılmaktadır (Yen, 1998: 6).

1.3. PETROLÜN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ: ÖLÇÜMLER VE KORELASYONLAR

Herhangi bir petrol sızıntısı olayı sırasında, dökülen petrolün özellikleri, petrol faz bileşimi ve hava koşullarına bağlı olarak petrol bileşimindeki değişiklikler de dahil olmak üzere ideal olarak hemen bilinebilmekte ve böylece modeller, döküntünün veya çeşitli müdahale ve iyileştirme alternatiflerinin çevresel etkilerini tahmin etmek için kullanılabilmektedir. Petrol üreticileri ve rafinerileri tarafından rutin olarak ölçülen özellikler, olay yerinde müdahaleyi komuta edenlerin en acil olarak bilmesi gerekenler değildir. Petrol üreticileri ve rafinerileri tipik olarak, petrolün ne ölçüde veya ne oranda buharlaşacağını, petrolün ayrıntılı kimyasal bileşimini ve zaman içindeki diferansiyel kompozisyon değişikliklerini, bu değişikliklerin petrolün çevre üzerindeki davranışını ve kaderini nasıl etkilediğini, petrolün buharlaştığı ortam sıcaklığındaki viskozitesini, petrolün batması veya batması muhtemel ise kimyasal dağıtıcıların kullanımının dağılmayı arttırabileceğini, emülsiyonların oluşacağını, temizlik sırasında personel için yaratacağı tehlikeyi veya deniz ve su organizmalarına karşı petrolün zehirliliğini bilmemektedir (Wang ve diğerleri, 2003: 1). Neredeyse sınırsız çeşitlilikteki ham petrolün fiziksel özellikleri genellikle kimyasal bileşiminin yönleriyle ilişkilidir. Ortamdaki petrol ve petrol ürünlerinin akıbeti ve davranışlarını belirleyen bu önemli özelliklerden bazıları, moleküler ağırlık, yoğunluk, spesifik gravite (suya göre yoğunluk), API gravitesi, viskozite, yüzey ve ara yüzey gerilmesi, buhar basıncı, parlama noktası ve akma noktasıdır (Hollebone, 2015: 39).

Tablo 4'te petrol türlerine ait bazı tipik özellikler görülmektedir. İlerleyen bölümlerde bu kavramlar detaylı şekilde anlatılmaktadır.

Tablo 4: Tipik Petrol ve Yakıtların 15°C Özellikleri

Özellik	Birim	Benzin	Dizel	Hafif Ham P.	Ağır Ham P.	IFO	Bunker C	Ham Petrol Emülsiyonu
Viskozite	mPa·s	0.5	2	5–50	50–50,000	1,000–15,000	5,000–50,000	200,000–1,000,000
Yoğunluk	g/ml	0.72	0.84	0.78–0.88	0.88–1.00	0.94–0.99	0.96–1.04	0.95–1.0
API gravitesi		50–65	35–40	30–50	10–30	10–20	5–15	10–15
Arayüz Gerilimi	mN/m	27	27	10–30	15–30	25–30	25–35	N/A
Parlama Noktası	°C	−35	55–65	−30 to 30	−30 to 60	80–100	>100	>80
Akma Noktası	°C	N/A	−60	−55 to 0	−30 to 30	−10 to 10	5–20	>50

Kaynak: **(**Hollebone, 2015: 40)

1.3.1. Moleküler Ağırlık

Saf bir bileşiğin moleküler ağırlığı veya molar kütlesi, kimyasal formülünden ve elementlerinin atom ağırlıklarından belirlenmektedir. Bir petrol sıvısında bulunan elementlerin atomik ağırlıkları, C=12.011, H=1.008, S=32.065, O=16.0 ve N=14.01'dir. Örnek olarak metanın (CH_4) moleküler ağırlığı 12.011 + 4 x 1.008 = 16.043 kg/kmol veya 16.043 g/mol (0.01604 kg/mol) veya 16.043 lb/lbmol olarak hesaplanmaktadır. Moleküler ağırlık hidrokarbonlar için karakterize edici parametrelerden biridir (Riazi, 2005: 31).

1.3.2. Yoğunluk, Spesifik Gravite ve °API Gravitesi

Yoğunluk, bir maddenin birim hacmi başına düşen kütlesidir. Petrol için sıklıkla birim olarak g/ml veya g/cm^3 ve daha az sıklıkla kg/m^3 şeklinde rapor edilmektedir. Yoğunluk sıcaklık ve basınca bağlıdır ve petrol ve petrol ürünlerinin önemli bir özelliğidir. Araştırmacılar, denizde meydana gelen bir petrol sızıntısında kirletici maddelerin su üzerinde yüzüp yüzemeyeceğine dair kanaate bu özellik vasıtasıyla varmaktadır (Speight, 2015: 27).

Spesifik gravite ve API (American Petroleum Institute) gravitesi, petrol ve petrol ürünleri için sıklıkla kullanılan, yoğunlukla ilgili iki özellik ve kavramdır. Spesifik gravite (SG), belirli bir sıcaklıktaki petrol yoğunluğunun saf suyun yoğunluğuna oranıdır. API gravitesi, petrol yoğunluğunun diğer bir ifadesidir ve SG ile ilişkilendirilerek hesaplanmaktadır. Aksi belirtilmedikçe API gravitesi 15,6°C (60°F)'deki yoğunluğa atıfta bulunmaktadır. API gravitesi aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır (Jones, 2006: 7).

$$°API = [141{,}5/(SG\ at\ 15°C) - 131{,}5]$$

API ölçeği ticari açıdan petrolün kalitesini belirlemek için önemlidir. Petrol türleri ağırlıkları bakımından incelendiğinde °API değerlerinin: Bitümen <10°API, ağır petrol <20°API, orta ağırlıktaki petrol 20-35°API, hafif petrol 35-45°API, sıvı petrol ürünleri ≤ 65°API, aralığında oldukları bilinmektedir. Buradan da anlaşılacağı üzere °API gravitesi yükseldikçe petrolün yüksek saflıkta ve ticari olarak daha kıymetli olduğu anlaşılmaktadır (Schobert, 2013: 181).

1.3.3. Viskozite

Viskozite, bir akışkanın akmaya karşı gösterdiği dirençtir. Viskozite, viskometre adı verilen küçük kılcal bir borudan yer çekimi kuvveti ile akış yaratılması prensibine göre ölçülmektedir. Bu ölçüm ile kinematik viskozite elde edilmektedir ve birimi sentistoktur (cSt). Çoğu viskozite belirleme işlemi, ASTM (American Society for testing and Measurements) D445 kılavuzuna göre yapılmaktadır (Watt ve diğerleri, 2006: 110). Kinematik viskozite newton akışkanları için geçerli bir terimdir. Newton akışkanları, akışkana uygulanan kuvvet değiştikçe değişmeyen bir viskoziteye sahiptir. Newton akışkanı olmayan akışkanlar, üzerlerine uygulanan kuvvete bağlı olarak viskozitelerinde geniş çeşitlilik sergilemektedirler. Bu tür akışkanlarda dinamik viskozite terimi kullanılmaktadır ve burada viskozite dönebilen viskometreler ile ölçülmektedir. Dinamik viskozitenin birimi sentipolstur (cP) (Hollebone, 2015: 41).

Kinematik viskozite υ, aynı sıcaklıktaki mutlak(dinamik) viskozite μ'nün mutlak yoğunluk ρ'ye oranı [$\upsilon = \mu/\rho$] ile tanımlanmaktadır. Saf sıvı hidrokarbonlar için kinematik viskozite değerleri genellikle iki referans sıcaklık olan 38°C (100°F) ve 99°C (210°F)'de cSt biriminde ölçülmekte ve bildirilmektedir. Bununla birlikte diğer referans sıcaklıkları olan 40°C (104°F), 50° (122°F) ve 60°C (122°F) de petrol fraksiyonlarının kinematik viskozitelerini rapor etmek için kullanılmaktadır (Riazi, 2005: 33).

Petrolün diğer fiziksel özelliklerinde olduğu gibi viskozite de sıcaklıktan etkilenmektedir ve daha düşük sıcaklıklar daha yüksek viskoziteler vermektedir. Çoğu petrol için, viskozite yaklaşık olarak üstel bir biçimde sıcaklıkla değişmektedir. Yüksek sıcaklıkta kolayca akan yağlar, düşük sıcaklıkta yavaş hareket eden, viskoz bir kütleye dönüşebilmektedir. Petrol sızıntısı temizliği açısından viskoz yağlar hızla yayılmamakta, toprağa kolayca nüfuz etmemekte ve pompaların ve sıyırıcıların petrolü işleme kabiliyetlerini etkilemektedir (Hollebone, 2015: 40).

1.3.4. Yüzey ve Ara Yüzey Gerilimi

Ara yüzey gerilimi, iki akışkanın ara yüzündeki moleküller arasındaki çekim gücüdür. Hava/sıvı ara yüzünde, bu kuvvet genellikle yüzey gerilimi olarak

adlandırılmaktadır. Ara yüzey gerilimi için SI birimi metre başına milinewtondur (mN/ m). Petrolün veya petrol ürününün yüzey gerilimi viskozitesi ile birlikte bir petrol sızıntısının yayılma hızını etkilemektedir. Petrolün yayılma eğilimine dair bir gösterge veren yayılma katsayısını hesaplamak için hava/petrol ve petrol/su ara yüzey gerilimleri kullanılabilmektedir.

$$Yayılma\ Katsayısı = S_{WA} - S_{OA} - S_{WO}$$

Petrolün yayılma katsayısının hesaplandığı yukarıdaki formülde S_{WA} su/hava ara yüzey gerilimini, S_{OA} petrol/hava yüzey gerilimini S_{WO} ise su/petrol yüzey gerilimini ifade etmektedir. Ara yüzey gerilimi, sıcaklık ve buharlaşma derecesine bağlı olarak bir değişim göstermemektedir (Speight, 2015: 30).

Yüzey ve ara yüzey gerilimleri, mN/m cinsinden, normal olarak iki yöntemden biri ile belirlenmektedir. De Noüy halkası, birçok laboratuvar tarafından kullanılan ve ASTM D971 yöntemi olarak kodlanmış olan yaygın bir tekniktir. Bir platin halkasının ayrılmadan önce bir sıvının yüzeyi üzerinde uygulayabileceği maksimum kuvvetin doğru ölçümüne bağlıdır (ASTM, 2009). Geliştirilmiş hız ve doğruluk için çok fazla umut veren ikinci bir teknik, havada ya da suda bulunan bir petrol damlacığının şekil hesaplamalarına dayanan asılı/ yükselen damla yöntemidir (Song ve diğerleri, 1996).

1.3.5. Buhar Basıncı

Buhar basıncı hem sıvı hem de buhar fazları mevcut olduğunda, belirli bir sıcaklıkta saf bir bileşenin uyguladığı basınç olarak tanımlanabilmektedir. Yalnızca sıcaklığa bağlıdır. Saf bir bileşenin buharı ve sıvısı dengede ise, o zaman denge basıncı buhar basıncı olarak bilinmektedir (Coker, 2018: 74). Kapalı bir kapta saf bir bileşiğin buhar basıncı, sıvının buharlaştırılmış kısmı tarafından duvarların birim alanı başına uygulanan kuvvettir. Buhar basıncı aynı zamanda doyma basıncı olarak da adlandırılmaktadır ve buna karşılık gelen sıcaklığa doyma sıcaklığı denmektedir. Atmosferik basınç altında açık bir havada, kaynama noktasının altındaki herhangi bir sıcaklıktaki bir sıvı, 1 atmosferden (atm) daha az olan kendi buhar basıncına sahiptir. Buhar basıncı 1 atm'ye ulaştığında doyma sıcaklığı normal kaynama noktası haline gelmektedir. Buhar basıncı, sıcaklıkla artar ve bir madde için en yüksek buhar basıncı değeri kritik sıcaklıktaki kritik basınç değeridir (Riazi, 2005: 33). Buhar basıncı,

herhangi bir madde için çok önemli olan termodinamik bir özelliktir ve bir akışkanın uçuculuğunun bir ölçüsüdür. Daha uçucu bileşikler, daha düşük kaynama noktalarına sahip olan ve hafif bileşikler olarak adlandırılan bileşiklerdir. Her ne kadar bazı izomerik bileşikler için geçerli olmasa da genel olarak daha uçucu bileşikler, daha az uçucu olanlara göre daha yüksek kritik basınç, daha düşük kritik sıcaklık, daha düşük kaynama noktası ve daha düşük yoğunluk değerlerine sahiptir (Riazi, 2005: 33).

Reid buhar basıncı (RVP) metodu, petrol fraksiyonları için buhar basıncını API tarafından belirlenen referans sıcaklık olan 100°F(38°C) ölçmeye yarayan bir tekniktir. Ölçüm ASTM D323 kılavuzuna göre gerçekleştirilmektedir. Normalde benzin için kullanılan bir yöntem olmakla birlikte görece olarak yüksek API'ye sahip ham petrol için de kullanılmaktadır. Birimi inç kare başına pounddur (psi) (Watt ve diğerleri, 2006: 109).

1.3.6. Parlama Noktası

Petrol veya petrol ürünlerinin parlama noktası, sıvı yakıtın, belirlenen test koşulları altında, açık bir kıvılcım veya aleve maruz kaldığında tutuşabilir buhar/hava karışımı üretebilmesi için ısıtılması gereken sıcaklıktır (Speight, 2015: 29). Parlama noktası 60°C'nin altında olan sıvılar parlayıcı olarak tanımlanmaktadır (Wang ve diğerleri, 2003: 5). Yüksek buhar basınçlarına sahip hidrokarbonlar (daha hafif bileşikler) daha düşük parlama noktalarına sahiptir. Genellikle parlama noktası, kaynama noktasındaki bir artışla artmaktadır. Parlama noktası, özellikle yüksek sıcaklıktaki bir ortamda uçucu petrol ürünlerinin (LPG, hafif nafta, benzin v.b.) depolanması ve taşınması sırasında güvenlik hususları için önemli bir parametredir. Bu tip maddelerin depolandığı tank etrafındaki çevre sıcaklığı, parlama olasılığını önlemek için her zaman yakıtın parlama noktasından daha az olmalıdır. Parlama noktası, bir petrol ürününün yangın ve patlama potansiyelinin bir göstergesi olarak kullanılmaktadır (Riazi, 2005: 34). Parlama noktalarını ölçmek için birkaç ASTM yöntemi vardır. Bunlardan en yaygın olarak kullanılanları ASTM D56, ASTM D93 ve IP 34'tür. Saptanabilen en düşük parlama noktası 10°C (50°F)'dir (Speight, 2015: 29). Parlama noktası, alevle ateşlendikten sonra hidrokarbonun en az 5 saniye boyunca

yanmaya devam edeceği minimum sıcaklık olarak tanımlanan yanma noktası ile karıştırılmamalıdır (Riazi, 2005: 34).

1.3.7. Akma Noktası

Bir petrol bileşiğinin, ortam basıncının altında beş saniyelik bir süre boyunca akabileceği en düşük sıcaklık akma noktası olarak belirtilmektedir. Ham petrol bileşiklerinin dökülme noktası genellikle -60°C ila 30°C arasında değişmektedir. Düşük viskoziteye sahip hafif yağlar genellikle daha düşük akma noktalarına sahiptir (Wang ve diğerleri, 2003: 6). Bir petrol numunesinin akma noktası santigrat derece olarak petrol ürünleri için ASTM D97 yöntemi ve ham petrol için ise ASTM D5853 ölçüm metotları takip edilerek belirlenebilmektedir (ASTM, 2009). Akma noktası petrolün içindeki wax (balmumu) oranını belirlemek için kullanılmaktadır. Petrolün parafinik veya bal mumu olma ölçüsünü ve aynı zamanda pompalanabilme özelliğini de göstermektedir. Mumsu bir ham petrolün yüksek bir akma noktası vardır. Bu tip petroller oda sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda katılaşır. Tersine, düşük akma noktası parafinik bileşiklerin yokluğunu veya aromatik bileşiklerin varlığını ifade etmektedir. Zira aromatik bileşikler akma noktasını düşürmektedir (Coker, 2018: 36).

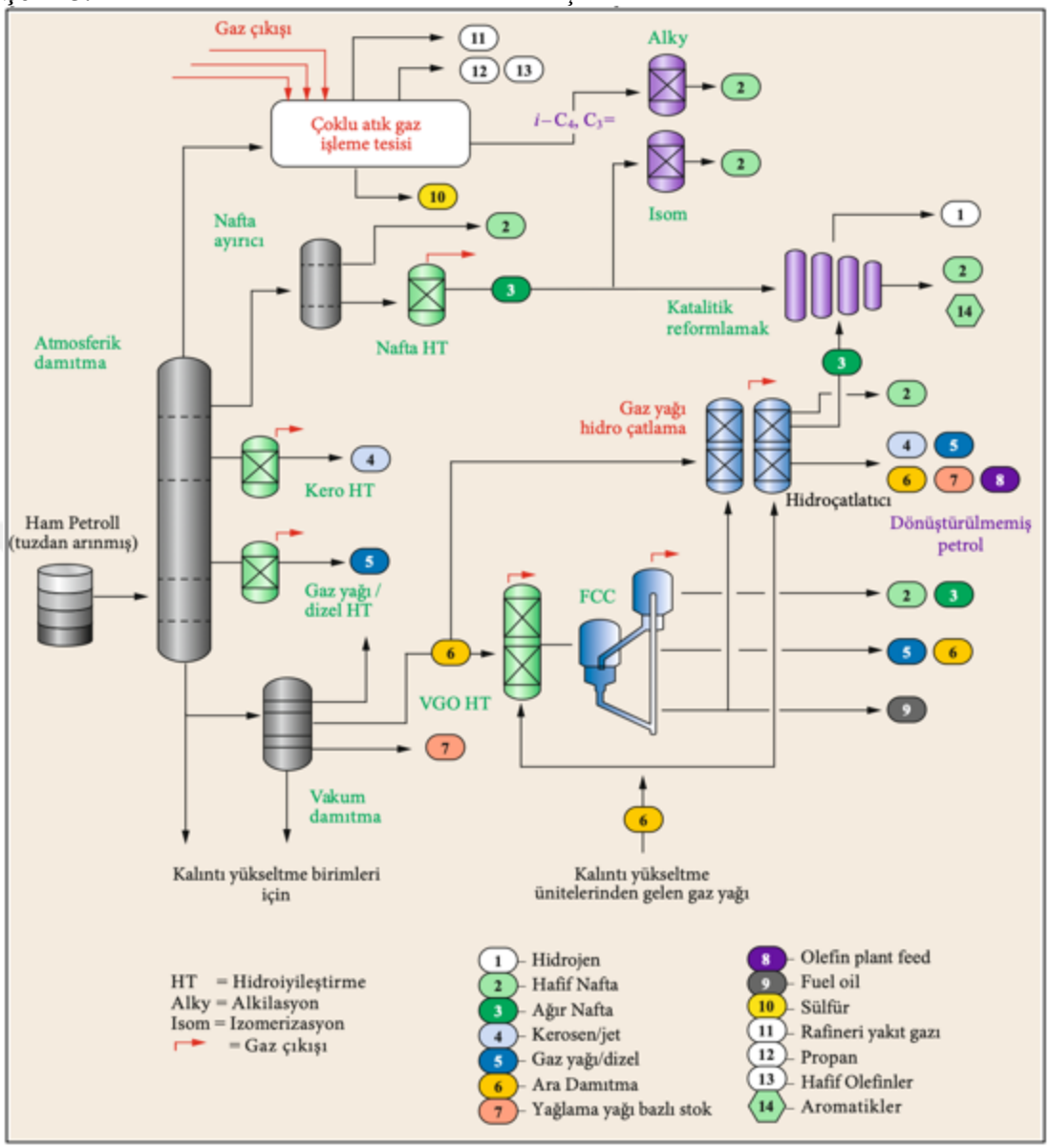
1.4. PETROL RAFİNASYONU

Petrol endüstrisindeki ham madde, esas olarak, farklı sayıda hidrojen ve karbon atomu içeren hidrokarbonlar ve ikame edilmiş hidrokarbonların değişken ve karmaşık bir karışımını içeren ham petroldür (Coker, 2018: 111). Ham petrolün doğal haliyle tüketici için değeri yoktur ve pazarda kullanılabilecek ürünlere dönüştürülmeli yani rafine edilmeli bir başka deyimle arıtılmalıdır. Arıtma işlemlerinde çeşitli fiziksel ve kimyasal yöntemler kullanılmaktadır. Isı, basınç, katalizörler ve kimyasallar, ham petrol ve diğer hidrokarbonları petrol ürünlerine dönüştürmek için çok çeşitli süreç tasarımları, çalışma koşulları ve kimyasal reaksiyonlar altında uygulanmaktadır (Gary ve diğerleri, 2007: 2). Genel anlamda petrol arıtımı, asfalt materyallerin ve yağların doğal sızıntının oluştuğu alanlardan izole edildiği zamanlara yani 5000 yıldan öncesine kadar gözlenebilmektedir fakat bildiğimiz anlamda petrol arıtımı yirminci

yüzyılda birçok gelişimin ve yeniliğin sahnelendiği güncel bir bilimdir (Speight, 2016: 143). Ham petrol, petrol rafinerilerinde benzin, dizel, jet yakıtı ve kimya endüstrisinde hammadde veya enerji kaynağı olarak kullanılabilecek diğer hidrokarbon ürünlerine dönüştürülmektedir (Ierapetritou, 2011: 1).

Petrol rafinerisi, üretilen ürün çeşitliliğinin sayıca çok olduğu bir grup üretim tesisidir (Speight, 2016: 143). İlk rafineri 1860 yılında 15.000 dolara Titusville, Pensilvanya'da kurulmuştur. İlk rafineriler (birinci nesil) o zamanların ışık kaynağı olan ve balina yağına göre daha iyi ve ucuz olan gaz yağını (kerosen) ve yan ürün olarak nafta ve katranı atmosferik damıtma yoluyla üretmişlerdir. Bu, kerosen üretimini maksimize etmek amacıyla ham petrolün toplu ya da yığın halinde damıtılmasını içeriyordu. Zaman içerisinde ışık kaynağı olarak elektriğin yaygınlaşması ve motor teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte özellikle içten yanmalı motorların icadı, kerosene olan talebi azaltmış, benzin ve dizel yakıtlara olan ihtiyacı arttırmıştır. Ayrıca uçak ve uçak motorlarının icadı ile 1910'larda hızla gelişen havacılık endüstrisi, yüksek oktanlı, temiz ve istikrarlı yakıtlara olan ihtiyacı yaratmıştır. Bütün bu gelişmelerin dahilinde ikinci nesil petrol rafinerileri, dönüştürme işlemi ile karakterize olarak doğmuştur. Dönüştürme süreçleri, ham petrol türevli ürünlerin kalitesini ve bunların kaynama aralığını değiştirebilmiştir. Bu süreçte, hidro-işlem, izomerizasyon, oligomerizasyon, çatlama ve alkilasyon gibi birçok önemli rafinasyon teknolojisi geliştirilmiştir. İkinci nesilden üçüncü nesil petrol rafinerilere geçiş, esas olarak vakum damıtmanın ve kalıntı yükseltme kapasitesinin dahil edilmesi ile ilgilidir. Bu değişim, ham petrol endüstrisindeki en önemli tarihsel olaylardan biri olan 1970'lerdeki "Petrol Krizi" tarafından gerçekleştirilmiştir. Dördüncü nesil rafinerilerin gelişimi ise taşıt emisyon kontrol standartlarının doğrudan bir sonucu olmuştur (de Klerk, 2011: 21; Speight, 2016: 143,146; Al-Qahtani ve diğerleri, 2010: 3). Şekil 5'te modern bir petrol rafinerisinin kısımları ve aynı zamanda ham petrolün işleme süreci gösterilmektedir.

Şekil 5: Modern Petrol Rafinerisi ve Ham Petrol İşleme Süreci



Kaynak: (Robinson ve diğerleri 2017: 31).

Rafinerilerin amacı ham petrolü farklı fraksiyonlara ve satılabilir bileşenlere ayırmak, müşterilerin talebini karşılamak için orijinal bileşen oranını ve özelliklerini değiştirmek ve ürün kalitesi için zararlı olan kirleticileri uzaklaştırmaktır (Coker, 2018: 111). Bu amaçlara ulaşabilmek için modern petrol rafineleri bir takım yükseltme süreçleri içermektedir. Bunlar aşağıdaki gibidir (Rabinson ve diğerleri, 2017: 30):

1. Hammadde Seçimi ve Harmanlama
2. Ayırma (Seperation)

- Damıtma (Distillation)
- Çözücü Çıkarma (Solvent Extraction)

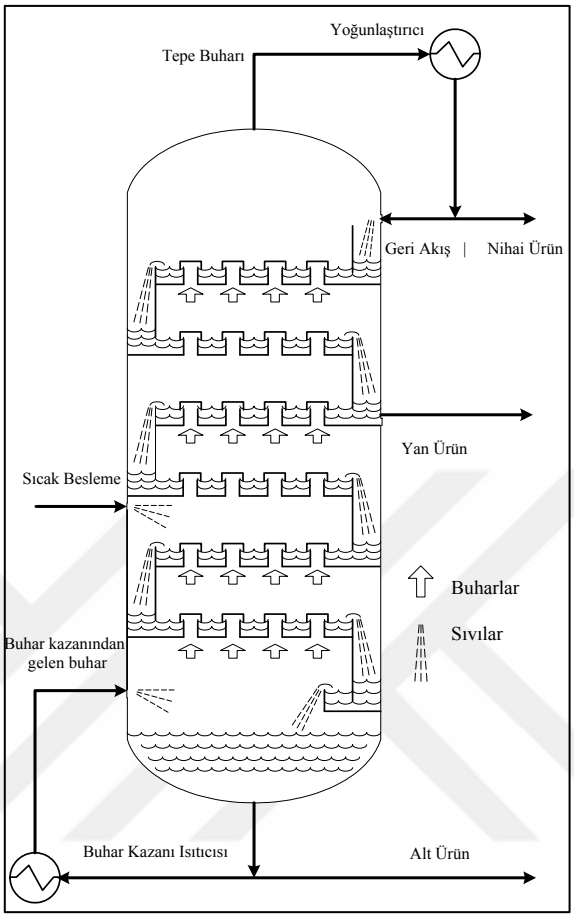
3. İyileştirme (Treating)
    - Tuzdan Arındırma (Desalting)
    - Hidro İyileştirme (Hydro Treating)
    - Merkaptan Oksidasyonu
    - Çözücü Fırçalama
    - Viskozite Kırma (Visbreaking)
4. Dönüştürme (Conversion)
    - Termal/ Buhar Çatlama (Thermal/Steam Cracking)
    - Termal Hidro Çatlama (Thermal Hydrocracking)
    - Katalitik Çatlama (Catalytic Cracking)
    - Katalitik Hidro Çatlama (Catalytic Hydrocracking)
    - Kok Yapma (Coking)
5. Katalitik Reform ve İzomerizasyon
6. Hafif Ara Bağların Yeniden Kombinasyonu
    - Alkilasyon (Alyklation)
    - C_3 ve C_4 Olefinlerin Oligomerizasyonu
7. Ürün İyileştirme ve Harmanlama
8. Çevreyi Koruma
    - Gaz İyileştirmesi
    - Sülfür İyileştirmesi
    - SO_x ve NO_x Azaltımı
    - Atık Arıtma
9. İlgili Diğer İşlemler
    - Asfalt Üretimi
    - Yağlayıcı Bazlı Yağ Üretimi
    - Mum Üretimi
    - Hidrojen Üretimi
    - Hidrojen Geri Kazanımı ve Saflaştırması
    - Petrokimyasalların Üretimi

Yukarıdan da görüleceği gibi petrol rafine etme süreci birçok fiziksel ve kimyasal reaksiyonu içermektedir. Devam eden bölümde bu reaksiyonlardan önemli bazıları anlatılmakta ve böylece bahsedilen sürecin daha iyi anlaşılması amaçlanmaktadır.

1.4.1. Damıtma

Damıtma ünitesi rafinerinin kalbi ve en büyük ünitesidir. Damıtma, ham petrolü kaynama noktalarındaki farklılıklardan faydalanarak fraksiyonlara ayırmaktır. Damıtma öncesinde, ham petrol, ilk olarak, bir veya birden fazla tuzdan arındırma birimi kullanılarak tuz içeriğini uzaklaştırmak üzere işlemden geçirilmektedir. Bu, aşağı doğru ısıtma trenlerinde ve damıtma kolonlarında korozyon ve kirlenmeyi en aza indirmek için gereklidir. Damıtma, fraksiyonlara ayırmanın başarıldığı basınca göre atmosferik ve vakum damıtma olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Bu, daha düşük bir maliyetle daha yüksek ayırma verimi elde etmek için yapılmaktadır. Damıtma, kaynama noktasına yakın ısıtılmış ham petrolün, içi birçok tepsiyle yatay olarak ayrılmış ve ısıtıcı sistemle donatılmış damıtma kulesine orta bölümün hemen altından girmesiyle başlamaktadır. Kuleye giren petrolün çoğu hemen buharlaşmaya başlamaktadır. Buharlaşmayan asfalt ve benzeri kalıntılar dipte birikmekte ve buradan çekilmektedir. Kulenin içinde damıtma tepsileri boyunca yükselen buhar tepede yoğunlaştırıcıyla karşılandıktan sonra sıvı halde bir boru yardımıyla kuleden ayrılarak bekleme tanklarına alınmakta veya bir sonraki sürece direkt aktarılmaktadır. Atmosferik damıtma kulesinden elde edilen yaygın ürünler arasında sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG), nafta, kerosen, gaz yağları ve ağır tortular bulunmaktadır (Al-Qahtani ve diğerleri, 2010: 7, Robinson, 2006: 16). Atmosferik damıtmadan elde edilen dip kalıntıları vakum damıtma kulesine aktarılır. Burada düşük sıcaklıklarda istenmeyen kimyasal reaksiyonlardan kaçınılarak asfalt gibi ağır materyaller damıtılır. Vakum damıtmanın amacı enerji tüketimini azaltarak değerli damıtılmış sıvıların geri kazanımını maksimize etmektir (Ancheyta, 2011: 13). Şekil 6'da yukarıda anlatılan damıtma sürecinin gerçekleştiği atmosferik damıtma kulesi örneği gösterilmektedir.

Şekil 6: Atmosferik Damıtma Kulesi



Kaynak: **(**Robinson, 2006: 17)

1.4.2. Çözücü Çıkarma

Damıtma, petrol ürünlerini yalnızca kaynama noktası aralıkları ile ayırdığı için, sülfür ve nitrojen gibi saflığı bozan heteroatomlar damıtılan petrolün içinde kalmaktadır. Çözücü çıkarma işlemleri, genellikle bu istenmeyen maddeleri ara rafinasyon aşamalarında veya ürünü depolamaya göndermeden önce çıkarmaktadır**.** Çözücü çıkarma işlemleri, esas olarak, kullanımdaki ürünün performansı üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olan bileşenlerin çözülmesi ya da çökeltilmesi ile ortadan kaldırılmasıdır (Ancheyta, 2011: 14).

1.4.3. Hidro İyileştirme

Hidro iyileştirme, olefinleri parafine çevirmek ya da ürünlerden veya ham maddelerden istenmeyen elementleri hidrojenle reaksiyona sokarak arındırmak yoluyla petrol ürünlerini stabilize eden bir süreçtir. Stabilizasyon genellikle olefinler ve zamk oluşturan kararsız diolefinler gibi doymamış hidrokarbonların parafinlere dönüştürülmesini içermektedir. Hidro iyileştirme ile uzaklaştırılan sakıncalı elementler arasında kükürt, azot, oksijen, halojenürler ve eser metaller bulunmaktadır. İşlem özellikle kükürt giderme için kullanıldığında, genellikle hidrodesülfürizasyon olarak adlandırılır (Gary, 2007: 195).

1.4.4. Termal/Buhar Çatlama

1913 yılında geliştirilen termal çatlama veya buhar çatlama süreci petrolde bulunan yüksek kaynama noktasına ve moleküler ağırlığa sahip bileşenlerin sıcaklığının 350°C'nin üzerine yükseltilmesi yoluyla daha düşük kaynama noktalı ve düşük moleküler ağırlığa sahip bileşenlere dönüştürülmesi olarak bilinmektedir. Bu yöntem rafinerilerde kullanılan en eski ve en basit bileşen dönüştürme sürecidir. Termal çatlama, serbest radikal zincir reaksiyonudur. Serbest radikal (bir atom veya eşlenmemiş bir elektrona sahip olan atomlar grubu) çok reaktiftir (çoğu zaman kontrol edilmesi zordur) ve termal parçalama sırasında ürün dağılımını belirleyen serbest radikallerin reaksiyonu modudur (örneğin, katalitik olmayan termal bozunma). Viskozite kırma en basit termal çatlama sürecidir (Speight, 2016: 183).

1.4.5. Viskozite Kırma

Viskozite kırma, 1940'ların sonuna doğru geliştirilmiş atmosferik veya vakum damıtma kalıntılarının gaz, nafta, damıtılmış sıvı ve katranlara dönüştüren iyi kurulmuş bir katalitik olmayan termal işlemdir. Bu kalıntıların dönüştürülmesi, kalıntı malzemesinin bir fırında yüksek sıcaklığa ısıtılmasıyla sağlanmaktadır (Coker, 2018: 177). Viskozite kırma işleminde akaryakıt yağı dışarıdan ateşlenen tüplerden geçirilmekte ve sıvı fazda çatlama reaksiyonları oluşmaktadır. Bu da daha hafif

akaryakıt bileşenlerinin oluşmasına neden olmaktadır. Petrolün viskozitesi böylece azalmakta ve bazı gazlar, esas olarak hidrojen, metan ve etan ortaya çıkmaktadır (Speight, 2017: 601).

1.4.6. Hidro Çatlama

Hidro çatlama, yüksek moleküler ağırlıklı besleme stoklarının yüksek hidrojen varlığında hidrojenlendiği ve daha düşük molekül ağırlıklı ürünlere dönüştürüldüğü katalitik hidrojenleme süreci ile yüksek kaliteli kerosen ve dizel yağının yapıldığı bir işlemdir. İşlemde kullanılan katalizör, hidrojenasyonu destekleyen metalik kısım ve çatlamayı destekleyen asitsel kısımdan oluşmaktadır. Hidrojenasyon saflığı bozan sülfür, nitrojen ve ağır metalleri uzaklaştırıken, çatlama süreci bağları kırmakta ve sonuçta ürünler kararlı bileşiklere hidrojene olmaktadır. Hidro çatlama süreci yüksek basınç gerektiren bir süreçtir. Bu durum işlemi oldukça maliyetli hale getirmektedir ve dolayısıyla endüstride, sıvı katalitik çatlama ünitesine (FCC) ve termal çatlamaya kıyasla önemini olumsuz etkilemektedir. Bununla birlikte pek çok hammaddeyi işleyebildiğinden çok esnektir (Coker, 2018: 187).

1.4.7. Katalitik Çatlama

Katalitik çatlama, büyük, ağır ve karmaşık hidrokarbon moleküllerinin ısı aksiyonu ve hidrojen ilavesiz katalizör yardımıyla daha küçük, hafif ve basit moleküllere yıkılması sürecidir. Atmosferik ve vakum damıtma ünitelerinin çıktıları olan gaz yağları ve kok gaz yağları katalitik çatlama sürecinin hammaddeleridir. Ağır yağlar bu sürecin sonunda daha hafif ürenler olan LPG, benzin ve orta damıtılmış sıvı bileşenlerin dönüştürülmektedir. Akışkan katalitik çatlama (FCC) en yaygın olarak kullanılan ikincil dönüştürme süreci teknolojisidir (Gary, 2007: 33).

1.4.8. Kok Yapma

Kok yapma işlemi bir termal çatlama sürecidir ve en ağır fraksiyonlar olan zift ve katranın çok kullanışlı ürünlere dönüştürülmesinden dolayı sıklıkla rafine etme

işleminin son safhası olarak düşünülmektedir (Coker, 2018: 157). Sürecin hammaddeleri atmosferik damıtma kalıntısı, vakum damıtma kalıntısı veya çatlama süreci kalıntısı olabilmekte ve çıktılar gazlar, nafta, akaryakıt, gaz yağı ve kok olmaktadır (Speight, 2016: 315). Bir kalıntının termal çatlaması başladığında ve ürün daha uzun bir süre için 450-500°C arasında bir sıcaklıkta tutulduğunda, hidrojenle zenginleştirilmiş hafif ürünleri ve bir aromatik kok üretmektedir. Koklama bir karbon çıkarma sürecidir ve burada amaç iki yönlüdür. Kaynama aralığındaki ürünler süreci besleyen hammaddelere göre daha yüksek hidrojen/karbon oranı üretmektedir. Aynı zamanda karbon ve heteroatomlar kok olarak dışarı çıkmakta ve rafinerinin H_2 gereksinimi böylelikle azalmaktadır (de Klark, 2011: 326).

Kok yapma süreci gecikmeli kok yapma ve akışkan kok yapma olarak iki temel formda yapılabilmektedir. Gecikmeli kok yapma sürecinde vakum kalıntıları 487 ila 520°C'ye kadar ısıtılmakta ve geniş bir kok tamburuna gönderilmektedir. Burada çatlama derhal başlamakta ve kok ve çatlamış, buharlaşmış ürün üretilmektedir. Buhar tepeye yükselip ürün ayırıcıya akarken kok tamburun arkasında kalmaktadır. Sürekli kok yapma olarak da adlandırılan akışkan kok yapma, çalışma sıcaklığının gecikmeli kok yapma için kullanılan sıcaklıklardan daha yüksek olduğu hareketli bir yatak işlemidir. Sürekli kok yapmada, geri dönüştürülmüş sıcak kok parçacıkları, yaklaşık 50 psig' de (446 kPa) bir radyal karıştırıcıda (reaktör) sıvı beslemeyle birleştirilmektedir. Buharlar reaktörden alınmakta, herhangi bir başka reaksiyonu başlatmamaları için dindirilmekte ve fraksiyonlara ayrılmaktadır. Nihayetinde kok, önce taşıma tamburuna ve sonra büyük parçacıklarının ürün olarak çıkarıldığı bir sınıflandırıcıya gitmektedir. Kok yapma hem reaktörde hem de taşıma tamburunda meydana gelmektedir (Robinson, 2006: 24).

1.4.9. Katalitik Reform

İlk olarak 1950 yılında Universal Oil Products tarafından ticarileştirilen bir süreç olan katalitik reform, alifatik veya sikloalifatik bileşikleri aromatiklere dönüştürmektedir. Nafta ile gerçekleştirilen sürecin amacı, benzin fraksiyonunun oktan sayısını arttırmaktır. Ayrıca süreç Amerika Birleşik Devletleri'nde benzen, tolüen ve ksilenler (BTX) gibi ana aromatiklerin kaynağı olmuştur. Katalitik reform,

dehidrojenasyon, izomerizasyon ve hidrojenoliz olmak üzere üç temel reaksiyondan oluşmaktadır. Dehidrojenasyon, bir alkanın dehidrosiklizasyonu ve bir alisiklik bileşiğin aromatik bir maddeye dehidrojenasyonu ile örneklendirilmektedir. İzomerizasyon, metilpentanın sikloheksana moleküler yeniden düzenlenmesiyle gösterilmektedir. Hidrojenoliz, ağır moleküllerin propan, izobütan ve n-bütan gibi daha hafif olanlara kırıldığı katalitik reform sırasında gerçekleşen bir hidro çatlama reaksiyonudur. Bu reaksiyonların amacı, beslemede bulunan hammaddelerdeki bazı molekülleri daha karmaşık moleküler şekillere sahip, daha yüksek oktanlı hidrokarbonlu ürünler üretmek için yeniden yapılandırmak ve kırmaktır. Yüksek oktanlı benzin üretmenin yanı sıra, katalitik reform, katalizör reaksiyonu sırasında açığa çıkan ve rafinerideki diğer süreçlerde kullanılan bir yan ürün olarak çok önemli miktarda hidrojen gazı da üretmektedir (Witcoff ve diğerleri, 2013: 119, Ancheyta, 2011: 18).

1.4.10. İzomerizasyon

İzomerizasyon, ikinci dünya savaşı sırasında yüksek oktanlı havacılık benzini bileşenlerini ve alkilasyon ünitelerinin ek hammaddelerini yapmak için kullanılan bir başka 20. yüzyıl yeniliğidir. İzomerizasyon işlemi, düz zincirli molekülleri dallanmış moleküller halinde yeniden düzenlemek için kullanılmaktadır. Petrol rafinerilerinde bu işlemin birincil kullanımı n-bütanı izobütana dönüştürmek ve hafif benzin içindeki C_5/C_6 normal parafinleri kendilerine karşılık gelen izoparafinlere dönüştürmektir. Dönüşüm bir katalizör (hidroklorik asit ile aktive edilmiş alüminyum klorür) varlığında elde edilmektedir. Bu süreçte çatlama ve olefin oluşumu gibi yan reaksiyonları engellemek esastır (Coker, 2018: 329; Speight, 2016: 167; Witcoff ve diğerleri, 2013: 128).

1.4.11. Alkilasyon

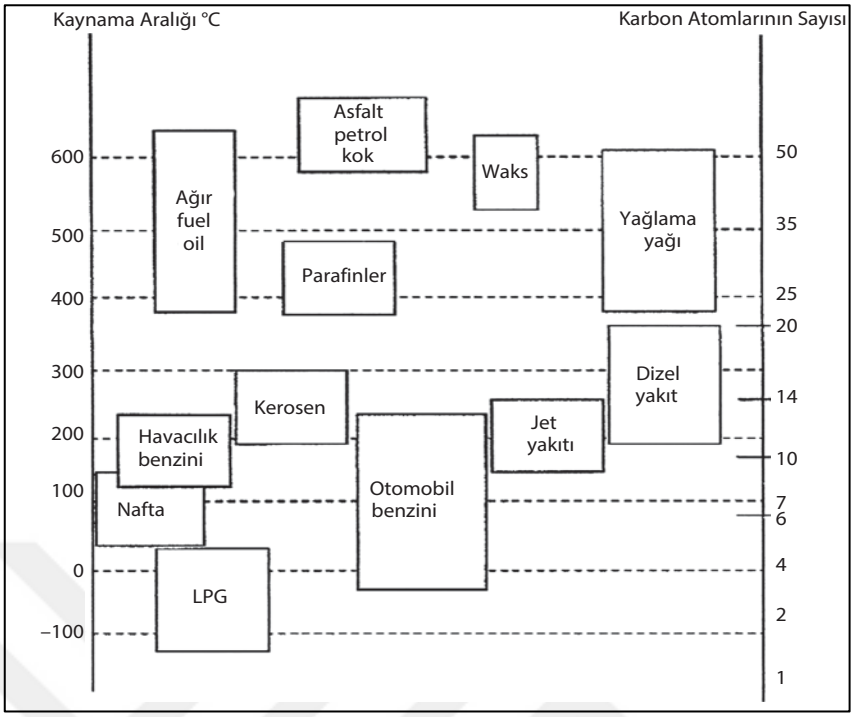
Alkilasyon teknolojisi, öncelikle yüksek oktanlı havacılık yakıtı talebini karşılamak için 1930'larda geliştirilmiştir. Daha yüksek moleküler ağırlığa sahip izoparafin oluşturmak için parafinlerle olefinlerin kombinasyonu, alkilasyon olarak

adlandırılmaktadır. Bu süreçte bir alkilleme işlemi, izobütan (iC_4) ve bir propilen (C_3H_6) ve bütilen (C_4H_8) karışımı olan düşük moleküler ağırlıklı alkenleri bir dallanmış zincirli parafinik yakıt alkilatı içerisinde çalıştırmaktadır. Tüm rafineri süreçleri arasında alkilasyon, yüksek oktanlı benzinin verimini artıran çok önemli bir süreçtir. Reaksiyon, oldukça asidik bir sıvı katalizör (HF-Hidroflorik Asit veya H_2SO_4-Sülfirik Asit) varlığında gerçekleştirilmektedir. En önemli reaksiyon değişkenleri reaksiyon sıcaklığı, asit gücü, izobüten konsantrasyonu ve olefin alan hızıdır. Bu değişkenlerdeki değişiklikler hem ürün kalitesini hem de verimi etkilemektedir (Coker, 2018: 339; Speight, 2016: 169; Ancheyta, 2011: 19; Gary, 2007: 234).

1.4.12. Polimerizasyon (Oligomerizasyon)

Petrol endüstrisinde uygulandığı şekliyle polimerizasyon (daha doğrusu oligomerizasyon), ticari ölçekte katalizörlerin tarihsel olarak en önce kullanıldığı iddia edilen süreçtir. Katalitik polimerizasyon 1930'larda kullanıma girmiş ve petrol endüstrisinde kullanılan ilk katalitik süreç olmuştur. Petrol endüstrisinde polimerizasyon, olefin gazların, benzin ve diğer sıvı yakıtlar elde etmek için uygun olabilecek sıvı yoğuşma ürünlerine dönüştürüldüğü kontrollü bir süreçtir. Bir polimerizasyon ünitesinin amacı, hafif olefinler propilen ve bütileni, moleküler ağırlıklarının iki veya üç katı moleküllere birleştirmek veya polimerize etmektir. Bu süreci besleyen hammaddeler katalitik çatlama ile üretilen hafif gaz halindeki ve yüksek oranda doymamış olan hidrokarbonlardır (C_2 ve C_4). Polimerizasyon reaksiyonu, karbon-karbon bağı oluşumunun meydana geldiği fosforik asit destekli katalizör içeren bir reaktörün içinden yüksek oranda olefin içeren C_3-C_4 hidrokarbon akışının geçmesinden meydana gelmektedir (Speight, 2016: 573; Ancheyta, 2011: 23).

Şekil 7: Temel Petrol Ürünleri ve Karbon Atom Numaraları



Kaynak: (Coker, 2018: 26).

Şekil 7'de rafinerilerde ham petrolden damıtılan çeşitli petrol ürünlerinin kaynama sıcaklıkları ve molekül başına ihtiva ettikleri karbon atomu sayıları gösterilmektedir. Burada gösterilen kaynama noktaları o petrol türevinin buharlaşmaya ve dolayısıyla diğer petrol ürünlerinden ayrışmaya başladığı sıcaklığı göstermektedir. Düşük kaynama noktasına sahip petrol türevleri olan LPG, nafta, kerosen, benzin gibi petrol ürünlerinin daha düşük karbon atom sayılarına sahip olduğu ve daha saf ürünler oldukları söylenebilmektedir. Bu ürünler petrol rafinelerindeki damıtma kulesinde en erken elde edilen petrol ürünleridir. Ağır fuel oil, asfalt, bal mumu ve yağlama yağı gibi yüksek kaynama aralığına sahip petrol ürünleri ise daha yüksek karbon atomu sayısına sahiptir ve daha viskoz ürünlerdir.

Bu bölümde çalışmaya konu olan ve denizde yarattığı kirliliğe müdahale stratejisinin araştırıldığı petrolün oluşumu, fiziksel ve kimyasal özellikleri ve rafine etme süreçleri üzerinde durulmuştur. Takip eden bölümde ise denizde meydana gelen petrol kirliliğinin kaynaklarına değinilip, tanker kaynaklı petrol kirliliğiyle ilgili çeşitli istatistiklere yer verilmekte ve yıllar içerisinde oluşturulan ulusal ve uluslararası mevzuat anlatılmaktadır.

İKİNCİ BÖLÜM
DENİZDE PETROL KİRLİLİĞİ

2.1. DENİZDE PETROL KİRLİLİĞİNE GENEL BİR BAKIŞ

Dünya genelinde kıyı ve deniz ekosistemleri kirlilik sorunları nedeniyle sürekli tehdit altındadır (Adams, 2005: 649). Birleşmiş Milletler Deniz Hukuku Sözleşmesi (UNCLOS) ve Deniz Kirliliğinin Bilimsel Yönleri Üzerine Müşterek Uzman Grup (GESAMP) deniz kirliliğini madde ya da enerjinin insan vasıtasıyla deniz çevresine direkt veyahut da dolaylı olarak, yaşam kaynaklarına zarar verecek, insan sağlığına tehlike yaratacak, balıkçılık dahil denizcilik faaliyetlerine engel olacak, deniz suyu kalitesini bozacak ve kullanım imkanlarını azaltacak sonuçları doğuracak şekilde sokulması olarak tanımlamaktadır (UN, 1982: 26; GESAMP, 2015: 52). Kıyı ve deniz ortamlarındaki kirlilik yükünün yaklaşık %80'i endüstriyel, tarımsal, kentsel/kırsal ve diğer kara kökenli antropojenik faaliyetlerden kaynaklanmaktadır (Hildering ve diğerleri, 2009: 80). Kirletici maddeler, ötrofikasyon, hipoksi (oksijen yetmezliği), asidifikasyon, bulanıklık, askıdaki çökeltiler, değişen habitat ve hidrolojik rejim gibi çoklu stres faktörleri deniz ekosistemini tek başına, kümalatif veya sinerjik süreçlerle olumsuz yönde etkilemektedir (Adams, 2005: 649). Deniz kirleticileri temel olarak kalıcı organik maddeler, ağır metaller, petrol ve petrol bileşikleri, radyoaktivite, kanalizasyon, katı atıklar ve çöp, gıda maddeleri, enkazlar ve gürültü şeklinde gruplanmaktadır (Foyn, 1997: 515).

Tablo 5 deniz kirleticilerini gruplar halinde göstermekte ve onları oluşum şekilleri, insan etkisinde hangi derecede ortama sokuldukları, etkilerinin gözlemlenebilirliği, artış/azalış trendleri ve zararlılık seviyeleri ölçeğinde değerlendirmektedir. Buna göre çoğu kirleticinin doğal yollarla oluşumu da mümkünken enkaz, kalıcı organik kirleticilerin (POP)/ kalıcı biyobirikimli ve zehirli maddelerin (PBT) ve diklorodifenildikloroetilenin (DDE) ise yalnız insan eliyle oluşabildiği anlaşılmaktadır. Tabloya bakıldığında radyoaktivitenin ve fosforun deniz ortamında insan girdisi olarak bulunma derecesinin diğer kirlilik faktörlerine nazaran en az olduğu görülmektedir.

Tablo 5: Deniz Kirleticileri

Konu	Doğal Oluşum	İnsan Girdisi	Gösterilebilir Etkiler (İnsan girdileri)	Eğilim/Yük	Tehlike olarak yüksek durum ?
Petrol	E	E ++	E	→	E
Enkaz	H	E ++	E	↗	E
Radyoaktivite	E	E +	H	→	H
Karbon					
CO_2/okyanus asitlenmesi	E	E +++	E	↗	E
POPs/PBTs	H	E +++	E	↗	E
DDE	H	E +++	E	↓	H
Yapı maddeleri/metaller					
N	E	E +++	E	↗	E
P	E	E +	H	↗	H
Fe (çözünür)	E	E ++	H	↗	E
Pb	E	E ++	H	↘	H
Cu	E	E ++	E	↗	E
Diğer metaller	E	E ++	H	↗	
Civa	E	E +++	E	↗	E
Gürültü	E	E +++	E	↗	E

Evet/Hayır + düşük, ++ orta, +++ yüksek

Güven Seviyeleri		
YÜKSEK	ORTA	DÜŞÜK

Kaynak: (GESAMP, 2015: 8)

Yine tablo 5'ten bazı kirleticilerin insan kaynaklı olması halinde etkilerinin gösterilememekte olduğu ve petrolün durağan-yüksek trendde aynı zamanda da yüksek zararlılık derecesinde olduğu söylenebilmektedir.

Stratejik öneme sahip bir enerji kaynağı olan petrol ulusal ve küresel ölçekte politik ve ekonomik düzeni etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Küresel ekonomideki hızlı büyüme petrole olan talebi arttırmakta, talep ile arzın dünya üzerinde eşit dağılmamasından dolayı ise petrol ticareti ve denizyolu taşımacılığı hacmi pozitif yönde hızla gelişmektedir (Chen ve diğerleri, 2019: 21-22). Talepte ve ticarette meydana gelen bu gelişmeler denizde petrol çıkarma ve tanker taşımacılığı faaliyetlerini ve neticede denizde petrol kirliliği riskini yükseltmektedir.

Petrolün denizde sızıntı ve kirlilik yaratmasına neden olan kaynaklar doğal kaynaklar, petrol çıkarma faaliyetleri, petrolün taşınması işlemleri ve petrolün tüketimi olmak üzere dört ana grupta etkin bir biçimde sınıflandırılmaktadır. Dünya denizlerinde her yıl bu kaynaklardan meydana gelen petrol sızıntısının 1.300.000 tonun (380.000.000 galon) üzerinde olduğu tahmin edilmektedir (NRC, 2003: 2). Doğal kaynaklardan meydana gelen sızıntılar, deniz çevresine miktar bakımından en çok petrol bırakan sızıntı kaynaklarıdır. Doğal sızıntılar dünya genelinde deniz çevresine sızan petrolün %47'sine ve Kuzey Amerika sularında sızan petrolün ise

%60'ına tek başına neden olmaktadır. Petrol çıkarma ve taşıma faaliyetlerinden kaynaklanan sızıntılar insan faaliyetinden kaynaklanan (antropojenik) sızıntıların %10'undan azını temsil ederken petrol tüketiminden kaynaklanan sızıntılar antropojenik sızıntıların %85'ini oluşturmaktadır (Awal, 2010: 13). Şekil 7'de bu kaynaklar ve oranlar gösterilmektedir.

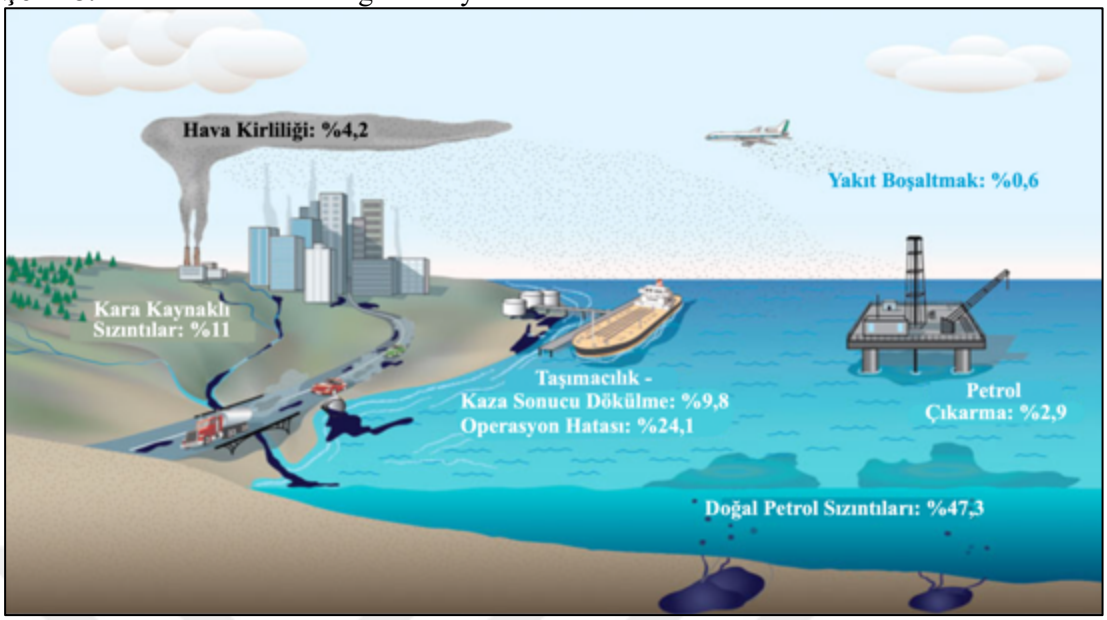
Tablo 6: Kaynak Bazında Tahmini Petrol Sızıntıları

	Petrol Girdi Tahminleri (Ton)						
Kaynak	**1973**	**1979**	**1981**	**1981**	**1990**	**1997**	**2000**
Doğal Sızıntılar	600,000	600,000	300,000	200,000	258,500	600,000	600,000
Belediye/ Endüstriyel	2,700,000	2,250,000	1,480,000	1,230,000	1,175,000	114,900	156,900
Kentsel akış	2,500,000	2,100,000	1,430,000	1,080,000	–	n/a	140,000
Kıyı rafinerileri	200,000	–	–	100,000	–	112,500	4,900
Diğer kıyısal	–	150,000	50,000	50,000	–	2,400	12,000
Ulaştırma	2,130,000	1,100,000	1,440,000	1,420,000	564,000	389,000	413,100
Tanker Kazaları	300,000	300,000	390,000	400,000	–	157,900	100,000
Diğer nakliye	750,000	200,000	340,000	320,000	–	586,500	7,100
Operasyonel	1,080,000	600,000	710,000	700,000	–	225,800	306,000
Atmosferik	600,000	600,000	300,000	300,000	305,000	68,000	24,700
Açık deniz arama/üretim	80,000	60,000	50,000	50,000	47,000	19,750	38,000
TOPLAM	10,940,000	7,960,000	6,490,000	5,850,000	2,349,500	2,246,750	1,802,700

Kaynak: (Fingas, 2011: 18)

Tablo 6 incelendiğinde yıllar içinde antropojenik temelli petrol kirliliğinde büyük oranda azalma olduğu anlaşılmaktadır. Daha yaşanılabilir bir dünya için her alanda sürdürülebilir politikalar yürütmeye başlayan devletlerin bu çerçevede enerji ve taşıma sektörlerinde uygulamaya başladığı petrol kirliliğini önleyici yeni düzenlemeler bu azalmanın en büyük sebebi olarak gösterilebilmektedir.

Şekil 8: Denizde Petrol Kirliliğinin Kaynakları



Kaynak: (Cook, 2011)

Şekil 8'den de görüleceği üzere petrol kirliliği, petrol arama ve çıkarma, gemilerle, boru hatlarıyla, demiryoluyla veya karayoluyla taşıma, rafine etme, depolama, üretim ve tüketim veya atık bertaraf etmek gibi petrol hayat döngüsünün herhangi bir noktasında meydana gelebilmektedir.

Denizde petrol kirliliği düşünüldüğünde büyük tanker gemilerinin kötü hava ve deniz koşullarında rotasından çıkıp bir kayalığa ya da mercan resifine oturduğu ve taşıdığı petrolün devasa boyutlarda denize döküldüğü Exxon Waldez, Hebei Spirit veya Prestige gibi gemi kazaları ve devamında petrol ile kaplanmış sahiller, ölü kuşlar, sinirli balıkçılar ve geniş çaplı temizlik çalışmaları genelde zihinlerde canlandırılan felaket tablosudur. Seyrek de olsa bu tip yıkıcı kazalar gerçekleşmektedir fakat petrol kirliliği herhangi bir günde dünya genelindeki değişik deniz çevrelerinde daha küçük ölçeklerde sıklıkla meydana gelmektedir (Fingas, 2011: 7). Sık gerçekleşen küçük ölçekteki vakalar çeşitli müdahale yöntemleriyle kolaylıkla bertaraf edilebilirken günümüzde nadir gerçekleşen büyük ölçekteki vakalar çevresel ve ekonomik açıdan telafisi bir hayli zor hasarlara neden olmaktadır.

Tarihte yaşanmış en büyük denizde petrol kirliliği vakalarının ilk üç sırasında 818.000-1.091.000 ton ile 1991 Körfez Savaşı, 560.000-585.000 ton ile 2010 Deep Water Horizon ve 454.000-480.000 ton ile 1979 Ixtoc I vakaları yer almaktadır (Rafferty, 2020). Meksika Körfezi'nde 10 Nisan 2010 tarihinde Deep Water Horizon

petrol kulesindeki patlama sonucu 1522 metre derinlikte meydana gelen petrol sızıntısının çevresel açıdan felaket boyutunda yıkıcı etkileri olmuştur. 87 gün sonra kapatılan sızıntı kaynağı sonucu 112.000 km^2'den fazla deniz yüzey alanı petrolle kaplanmış, 2100 km'den uzun kıyı şeridi petrole bulanmıştır. Neticede deniz ekosistemi büyük bir hasara uğramıştır (Beyer ve diğerleri, 2016: 29).

Bu çalışmanın da kısıtlarından biri olan tanker kazaları, deniz kirliliğine sebep olan faktörler arasında en tehlikelilerinden biri olma özelliğini taşımaktadır. 1970-2020 arasındaki 50 yılda 100'den fazla ülkenin raporladığı tanker kazalarında 5,86 milyon ton petrol denize dökülmüştür. Bu kazalardan %80'i kıyıdan 10 deniz miline kadar olan mesafedeki deniz alanlarının içerisinde gerçekleşmiştir ki bu da deniz ve kıyı alanlarını çoğu kez kirlilik riskiyle karşı karşıya bırakmıştır (ITOPF, 2020: 5). Tablo 7'de tanker kazaları sonucu meydana gelen en büyük petrol kirliliği olayları gösterilmektedir.

Tablo 7: Tanker Kazaları Sonucu Oluşan Büyük Petrol Kirliliği Olayları

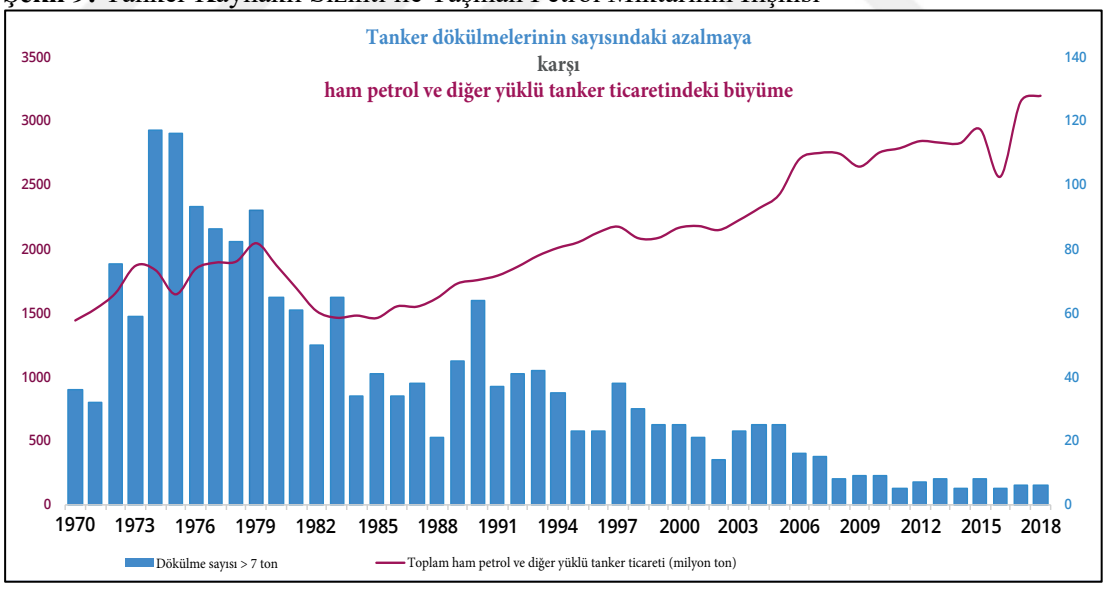
	Yıl	Tanker Adı	Dökülen Petrol Miktarı (Ton)
1	1979	Atlantic Empress	287.000
2	1991	ABT Summer	260.000
3	1983	Castillo de Bellver	252.000
4	1978	Amoco Cadiz	223.000
5	1991	Haven	144.000
6	1988	Odyssey	132.000
7	1967	Torrey Canyon	119.000
8	1972	Sea Star	115.000
9	2018	Sanchi	113.000
10	1970	Texaco Denmark	107.000
11	1980	Irenes Serenade	100.000
12	1976	Urquiola	100.000
13	1975	Nassia	95.000
14	1977	Hawaiian Patriot	95.000
15	1979	Independenta	95.000
16	1975	Jakob Maersk	88.000
17	1993	Braer	85.000
18	1969	Othello	80.000
19	1992	Aegean Sea	74.000
20	1996	Sea Empress	72.000
21	1989	Khark 5	70.000
22	1985	Nova	70.000
23	1992	Katina P	70.000
24	2002	Prestige	63.000
25	1970	Andros Patria	60.000
26	1965	Epic Colocotronis	58.000
27	1964	Assimi	54.000

28	1960	Yuyo Maru 10	52.000
29	1968	Metula	50.000
30	1955	Sinclair Petrolore	50.000
31	1964	Heimvard	50.000
32	1967	Pericles GC	48.000
33	1964	Ennerdale	47.000
34	1954	World Glory	45.000
35	1972	Tadotsu	45.000
36	1958	British Ambassador	43.000
37	1958	Mandoil II	40.000
38	1968	Betelgeuse	40.000
39	1975	Juan A. Lavalleja	39.000
40	1986	Exxon Valdez	38.000

Kaynak: (Fingas, 2012: 10; ITOPF, 2020: 6).

Tablo 7 incelendiğinde meydana gelen kazaların sadece iki tanesinin 2000 yılından sonra gerçekleştiği görülmektedir. Bunun sebebinin yıllar boyunca ilgili uluslararası örgütlerin tanker kazalarını ve bunlardan kaynaklı olumsuz etkileri sonlandırmak veya en aza indirmek maksadıyla yaptığı düzenlemelerin sonucu olduğu düşünülmektedir.

Şekil 9: Tanker Kaynaklı Sızıntı ile Taşınan Petrol Miktarının İlişkisi



Kaynak: (ITOPF, 2020: 13).

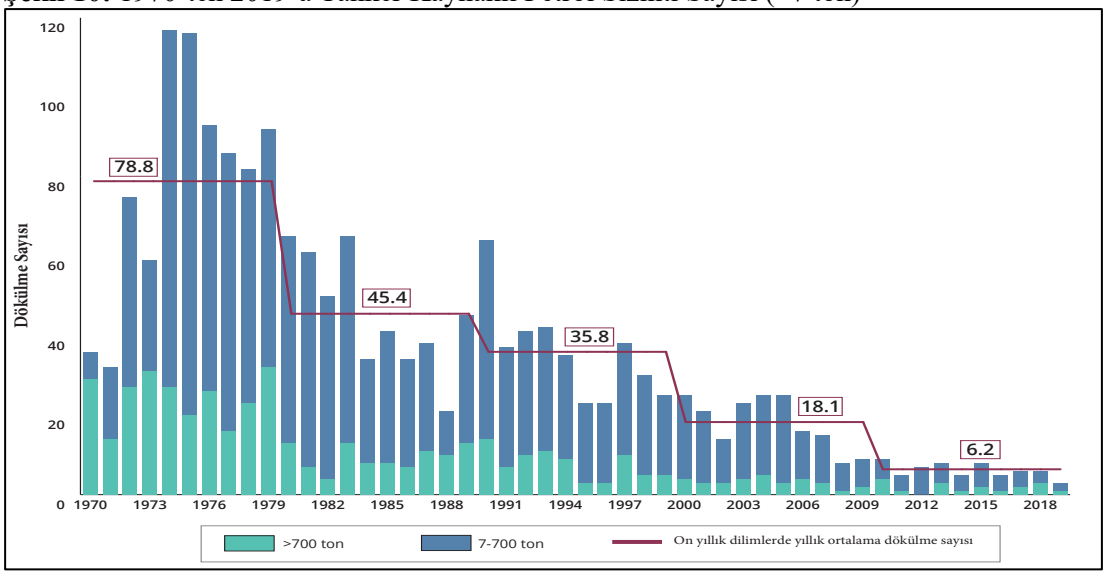
Denizyoluyla taşınan petrol miktarı ile tanker kazalarından kaynaklı petrol kirliliği vaka sayısı arasında 1970-2019 yılları arasındaki 50 yıllık zaman diliminde ters yönlü bir ilişkinin oluştuğu istatistiksel anlamda şekil 9'da ortaya konmaktadır.

Şekil 9 incelendiğinde 1973-1976, 1980'lerin başı ve 2016 dönemlerindeki dramatik düşüşler hariç deniz yoluyla taşınan petrol ve petrol ürünü miktarının 1970'te 1,5 milyar tondan 2019'da 3 milyar tonun üzerine sürekli bir biçimde artarak yükseldiği görülmektedir. Artan petrol taşıma miktarı tanker hareketliliğini ve dolayısıyla tanker kazası riskini artırmış olmasına rağmen bu 50 yıllık süreçte yine belirli yıllar hariç yıllık gerçekleşen 7 ton üzeri tanker kaynaklı petrol sızıntılarında önemli bir düşüş olduğu anlaşılmaktadır.

Tanker kaynaklı petrol sızıntıları yukarıda belirtilen 50 yıllık periyotta kaza sayısı bazında %80 oranında, sızan petrol miktarı bazında ise %95 oranında azalmıştır. 1970'lerde yılda ortalama 79 sızıntı gerçekleşirken bu sayı 2010'larda yılda ortalama 6 sızıntıya düşmüş, yine 1970'lerde yılda ortalama 319.500 ton olan sızan petrol miktarı 2010'larda yılda ortalama 16.000 tona gerilemiştir (ITOPF, 2020: 5).

ITOPF denizde petrol kirliliği vakalarını sızan petrolün miktarına göre küçük (<7 ton), orta (7<x<700 ton) ve büyük (x<700 ton) ölçekli olmak üzere 3 gruba ayırmaktadır. Şekil 9'da 10 yıllık ortalamalar bazında 1970'ten 2019'a orta ve büyük ölçekli tanker kaynaklı petrol sızıntısı olaylarında meydana gelen değişim gösterilmektedir.

Şekil 10: 1970'ten 2019'a Tanker Kaynaklı Petrol Sızıntı Sayısı (>7 ton)

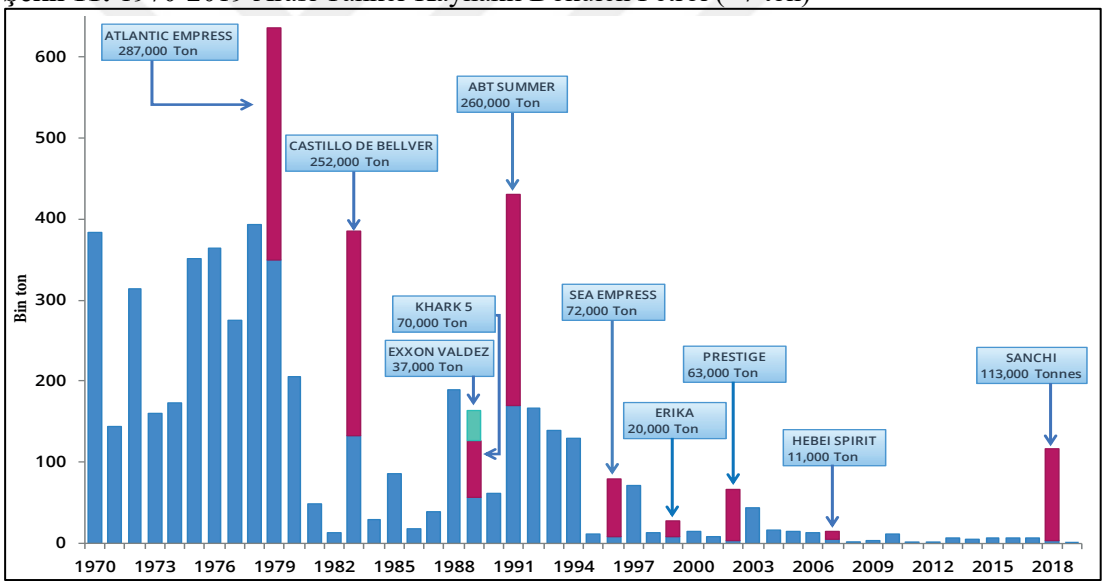


Kaynak: (ITOPF, 2020: 7)

Şekil 10'a bakıldığında 10 yıllık ortalamalar bazında tanker sızıntı sayısındaki azalışın azalan oranlarda sürekli olarak 2010'ların sonuna kadar devam ettiği

görülmektedir. 1970'li yıllarda toplam 788 kaza gerçekleşirken 2010'lu yıllarda bu sayı 62'ye düşmüştür. Kaza sayılarının bu şekilde azalması alınan tedbirlerin ve yapılan iyileştirmelerin etkili olduğunu göstermektedir. Her ne kadar kazaların sayıları yıllık ortalamalar bazında giderek azalmış olsa da büyük tonajlı bir tankerin bütün yükünü denize dökebilme ihtimali günümüzde hala çevre ve insan sağlığını tehdit edebilmektedir. Nitekim şekil 10'da yıllar bazında denize dökülen petrol miktarlarına bakıldığında bazı yıllarda özellik yüksek tonajlı tankerlerde meydana gelen yıkıcı kazalar tek başlarına o yılı döküntü miktarı bazında önceki yıllara göre öne çıkarabilmiştir. Günümüzde bu durum alınan bütün önlemlere rağmen geçerliliğini korumaya devam etmektedir. Tek bir tanker dahi bir deniz ekosistemi veya kıyı şeridi için müdahale ve telafi edilmesi güç durumlara yol açabilmektedir.

Şekil 11: 1970-2019 Arası Tanker Kaynaklı Dökülen Petrol (>7 ton)



Kaynak: (ITOPF, 2020: 13).

Şekil 11'den anlaşılacağı üzere pek çok büyük ölçekli kaza, gerçekleştiği yıl bazında kendisinden önce meydana gelen bütün kazaların döktüğü toplam petrol miktarından daha fazla petrolü bir kerede denize dökebilmiştir. 1980'lerde 454 kazada denize dökülen 1.175.000 ton petrolün %71'ini 10 kaza, 1990'larda 358 kazada denize dökülen 1.134.000 ton petrolün %73'ünü 10 kaza, 2000'lerde 181 kazada denize dökülen 196.000 ton petrolün %75'ini 10 kaza ve 2010'larda 62 kazada denize dökülen 164.000 ton petrolün %80'ini 10 kaza oluşturmaktadır (Chen ve diğerleri, 2019: 29).

1970-2019 yılları arasında 466'sı büyük ölçekli 1377'si orta ölçekli olmak üzere toplam 1843 tane tanker kaynaklı petrol kirliliği vakası rapor edilmiştir. Bu kazaların meydana gelme şekillerine ve operasyon safhalarına bakıldığında büyük ölçekli kazaların %32'sinin oturma, %30'unun çatma/çatışma, %13'ünün gövde arızası, %11'inin yangın/patlama, %4'ünün ekipman arızası ve %10'unun diğer/bilinmeyen şekillerde meydana geldiği; aynı kazaların %50'sinin açık denizde seyir halindeyken, %17'sinin iç veya dar suyollarında seyir halindeyken, %9'unun yükleme/tahliye yapılırken, %6'sının demirdeyken ve %19'unun diğer/bilinmeyen nedenlerle meydana geldiği tespit edilmiştir. Orta ölçekli kazalarda ise %27 ile çatma/çatışmanın ilk sırada yer aldığı ve takip edenlerin %20 ile oturma, %15 ile ekipman arızası, %7 ile gövde arızası, %3 ile yangın/patlama ve %28 ile diğer/bilinmeyen şeklinde sıralandığı; yine orta ölçekli kazaların %29'unun yükleme/tahliye, %2'sinin yakıt alma ve %69'unun diğer/bilinmeyen operasyonlar esnasında meydana geldiği anlaşılmıştır (ITOPF, 2020: 1415).

Günümüzde kazalar hala meydana gelmektedir fakat denizyoluyla taşınan petrolün %99'u varış noktasına emniyetli bir biçimde ulaşmaktadır. Hükümetler ve denizcilik endüstrisi denizde emniyeti ve operasyon standartlarını geliştirmek adına birlikte çalışmaya devam etmektedir (ITOPF, 2020: 5).

2.2. DENİDE PETROL KİRLİLİĞİNİ ÖNLEMEYE YÖNELİK ULUSAL VE ULUSLARARASI DÜZENLEMELER

Denizde petrol kirliliğinin önlenmesi ve petrol kirliliğinin olması durumunda sorumluluğun belirlenmesi için Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO), Avrupa Birliği (AB) ve Amerika Birleşik Devletleri (ABD) çeşitli ulusal ve uluslararası konvansiyonlar düzenlemişlerdir. İlk tankerlerin 19. yüzyılın sonlarına doğru hizmete girmesiyle birlikte tanker kaynaklı petrol kirliliğinin deniz ekolojisi, turizmi ve ekonomisinde yaratabileceği yıkıcı etkilerin önüne geçilebilmesi için bu düzenlemelerin yapılması gereklilik arz etmiştir (Chen ve diğerleri, 2019: 24). 1954 yılında Birleşik Krallık hükümeti tarafından düzenlenen konferansta Denizlerin Petrol Yoluyla Kirlenmesinin Önlenmesine İlişkin Uluslararası Sözleşme (OILPOL 54) benimsenmiş ve 1958 yılında yürürlüğe girmiştir. Bu sözleşme ile tank yıkama

işlemleri sonucu oluşan petrollü/yağlı atık suyun denize basılması ile ilgili koşullar belirlenmiş, kıyıdan belirli mesafelere kadar ve çevresel hassasiyetin olduğu alanlarda bu atığın denize basılması yasaklanmıştır (IMO, 2020a).

Dünya ekonomisinin büyümesi, petrol ticaretinin gelişmesi ve ölçek ekonomisi yaratmak nedeniyle 1950'lerden günümüze tanker boyutlarının artması kirlilik riskini de beraberinde artırmıştır. İngiliz kanalında 1967 yılında gerçekleşen "Torrey Canyon" tanker kazasında 120.000 ton petrolün denize dökülmesi sonucu yaşanan kirlilik bu tür kazaları engellemek adına alınan önlemlerin yetersiz olduğu düşüncesini doğurmuş ve IMO 1973 yılında Gemilerden Kaynaklanan Kirliliğin Önlenmesine İlişkin Uluslararası Sözleşmeyi (MARPOL) kabul etmiştir. Sözleşme henüz yürürlüğe girmeden 1976-1977 yıllarında meydana gelen birçok tanker kazası nedeniyle bu sözleşmeyi benimseyen 1978 protokolü düzenlenmiş ve bu iki enstrüman 1983 yılında yürürlüğe girmiştir. MARPOL 73/78 sırasıyla petrol, dökme halde taşınan zehirli sıvılar, paketlenmiş zararlı maddeler, lağım, çöp-plastik ve SO_x-NO_x gibi çeşitli kirletici gruplarını konu alan 6 teknik ekten oluşmaktadır. Yıllar içerisinde çeşitli güncellemelerle kapsayıcılığını ve ihtiyaca cevap verebilirliğini koruyan sözleşmenin birinci teknik eki 1992 yılında halihazırda bulunan ve yeni inşa edilecek 5000 dwt ve üzeri tankerlere çift gövde zorunluluğunu getiren bir düzenlemeyi kabul etmiş ve Temmuz 1993'te yürürlüğe koymuştur (IMO, 2020b).

Torrey Canyon kazasının yıkıcı etkileri sonrası bu tür petrol kirliliği kazalarının önlenmesine ve meydana gelmesi halinde ise hukuki ve ekonomik sorumluluğun belirlenmesine ilişkin düzenlenen diğer sözleşmeler "Açık Denizde Petrol Kirliliğine Müdahaleye İlişkin Uluslararası Sözleşme (INTERVENTION 1969)", "Petrol Kirliliği Zararlarının Hukuki Sorumluluğuna İlişkin Uluslararası Sözleşme (CLC 69)" ve "Petrol Kirliliği Zararının Tazminatına Yönelik Fon Kurulmasına İlişkin Uluslararası Sözleşme (FUND 1971)" şeklindedir.

Denizde petrol kirliliği ile mücadelede bir yanıyla ulusal fakat kapsayıcılığıyla uluslararası nitelik taşıyan bir başka düzenleme ABD'nin 1989'da Alaska'da gerçekleşen "Exxon Valdez" tanker kazasında 1.264.115 varil petrolün denize dökülmesinin yansıması olarak 1990'da hazırlanan "Petrol Kirliliği Yasası'dır" (OPA 90). Bu yasa ile ABD, limanlarına gelecek bütün gemilerin çift gövdeli olmasını zorunlu kılmıştır (USCG, 2020).

Bir diğer önemli uluslararası sözleşme ise yine 1990 yılında kabul edilen ve 1995 yılında yürürlüğe giren "Petrol Kirliliğine Hazırlıklı Olma, Müdahale ve İş birliği Uluslararası Sözleşmesi'dir" (OPRC). Bu sözleşme ile taraf ülkelerin petrol kirliliği ile mücadelede ulusal veya diğer ülkelerle iş birliğine dayalı olabilecek şekilde tedbirleri oluşturması istenmiştir. Ayrıca gemilerde ve açık deniz platformlarında acil durum eylem planı taşınması gerekli kılınmıştır. Yine taraf ülkelerden petrol kirliliğine müdahale için kapsamlı müdahale planlarının oluşturulması, müdahale ekipmanlarının stratejik konumlara stoklanması ve müdahale tatbikatlarının yapılması sözleşme kapsamında talep edilmiştir (IMO, 2020b).

Denizde petrol kirliliğine bakış açısını değiştiren tanker kazaları ve bunların yarattığı etkiler sonucunda düzenlenen uluslararası sözleşmeler tablo 8'de gösterilmektedir.

Tablo 8: Önemli Tanker Kazaları ve Müteakip Düzenlemeler

Yıl	Gemi Adı	Kaza Konumu	Sızıntı (ton)	İlgili Yasalar ve Düzenlemeler	Düzenleyen
1967	Torrey Canyon	İngiliz Kanalı	119.000	Açık Denizde Petrol Kirliliğine Müdahaleye İlişkin Uluslararası Sözleşme (INTERVENTION 1969); Petrol Kirliliği Zararlarının Hukuki Sorumluluğuna İlişkin Uluslararası Sözleşme (CLC 69); Petrol Kirliliği Zararının Tazminatına Yönelik Fon Kurulmasına İlişkin Uluslararası Sözleşme (FUND 1971); MARPOL 73/78.	IMO
1978	Amoco Cadiz	İngiliz Kanalı	223.000	Liman Devleti Kontrolüne İlişkin Paris Mutabakat Muhtırası (Paris MoU)	AB
1989	Exxon Valdez	Prens William Suları, Alaska	37.000	Petrol Kirliliği Yasası (OPA 90);	ABD
				Petrol Kirliliğine Hazırlık, Müdahale ve İş Birliği Uluslararası Sözleşmesi (OPRC)	IMO
1999	Erika	Kuzeybatı Fransa	20.000	Erika I ve II Paketleri	AB
2002	Prestige	Kuzeybatı İspanya	63.000	3. Deniz Emniyet Paketi: MSP3	AB
				Tehlikeli ve Zehirli Maddelerin Denizyoluyla Taşınmasında Hasar Sorumluluğu ve Tazminatına İlişkin Uluslararası Sözleşme (HNS 1996)	IMO

Kaynak: (Chen ve diğerleri, 2019: 25).

Türkiye'nin denizlerinde petrol kirliliği ile mücadelesine ilişkin uluslararası arenada dahil olduğu anlaşmalar ve ulusal kapsamda oluşturduğu yasalar mevcuttur. Türkiye 10.10.1990 tarihinde MARPOL Ek-1'e, 05.03.2013 tarihinde CLC-FUND 2003'e, 03.09.2013 tarihinde OPRC-HNS 2000'e, 12.09.2013 tarihinde "Bunker Petrol Kirliliği Zararlarının Hukuki Sorumluluğuna İlişkin Uluslararası Sözleşme'ye" (BUNKER 2001) taraf olmuştur ve katılma belgesi tevdi edilmiştir (Deniz Hukuku Araştırma Merkezi, 2020). Bunların yanında "Akdeniz'in Deniz Ortamı ve Kıyı Bölgesinin Korunması Sözleşmesi" (Barselona Sözleşmesi) ve "Karadeniz'in Kirlenmeye Karşı Korunması Sözleşmesi" (Bükreş Sözleşmesi) Türkiye'nin taraf olduğu deniz çevresinin kirlilikten korunmasına ilişkin uluslararası anlaşmalardır (T.C. Dışişleri Bakanlığı, 2020).

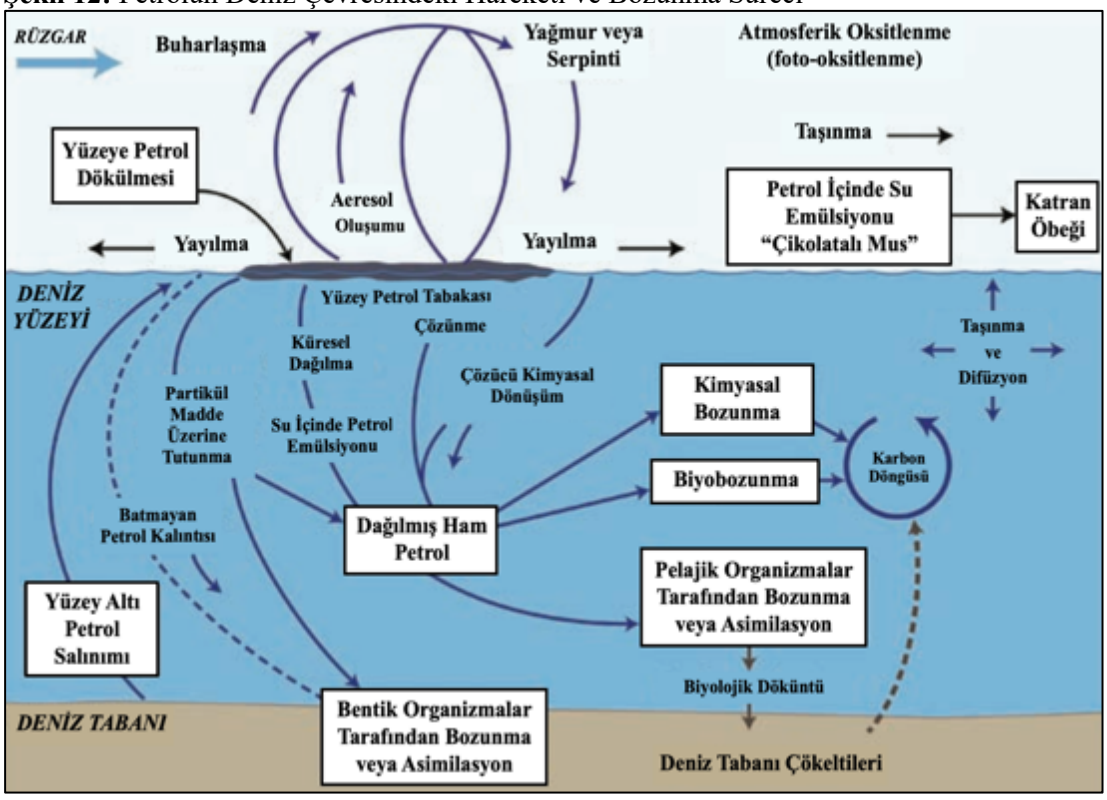
Türkiye tarafından kabul edilen yukarıdaki uluslararası sözleşmeler Türk Anayasası'nın 90. maddesi gereğince iç hukuk bakımından kanun özelliği taşımaktadır. Ulusal mevzuatın taraf olduğu uluslararası anlaşmalarla uyumlu hale gelebilmesi için Türkiye 2005 yılında 5312 numaralı "deniz çevresinin petrol ve diğer zararlı maddelerle kirlenmesine ilişkin acil durumlarda müdahale ve zararların tazmininin esasları" başlıklı kanunu ve bu kanuna ilişkin uygulama yönetmeliğini çıkarmıştır. 2006 yılında ise 1983 tarihli ve 2872 numaralı Çevre Kanunu'nda yaptığı güncellemeler ile deniz çevresinde petrol kirliliğiyle ilgili hususlar düzenlenmiştir (Abdullahzade, 2009: 699-700).

Bu kısımda deniz kirliliği ve deniz kirleticileri, denizde petrol kirliliği ve tanker kaynaklı deniz petrol kirliliği konularına değinilmiş, genel çerçeve çizilerek istatistiksel bağlamda geçmişten günümüze tanker kaynaklı deniz petrol kirliliğinin seyri aktarılmıştır. Ayrıca bu tür kazaların önlenmesine ve tazminine ilişkin ulusal ve uluslararası mevzuatı oluşturan sözleşmeler ve kanunlar belirtilmiştir. Takip eden kısımda ise petrolün denize sızdıktan sonra fiziksel ve kimyasal açıdan ne tür süreçlere tabi olduğu bir başka ifadeyle deniz çevresindeki davranışı anlatılmaktadır.

2.3. PETROLÜN DENİZ ÇEVRESİNDEKİ DAVRANIŞI

Petrol sızıntısı ister su ister kara ortamında olsun, gerçekleştiğinde, "petrolün davranışı" olarak adlandırılan bir dizi dönüşüm süreci meydana gelmektedir. Petrol sızıntısının nihai akıbeti ve etkileri, sızan petrolün özellikleri ile sızıntının gerçekleştiği andaki çevresel koşullarca belirlenen "davranış süreçleri" tarafından tayin edilmektedir. Bu süreçler sızıntı gerçekleşir gerçekleşmez derhal başlayan "petrolün hareketi" ve "petrolün bozunması" süreçleridir. Sızıntı modelleri bu iki süreçten elde edilen bilgileri kombine ederek, petrol sızıntısıyla ilgili olan kimselere sızan petrolün gelecekteki yeri ve durumu hakkında bilgi vermektedir. Bu durum, petrol kirliliğinin tüm etkilerinin minimize edilmesi için çok önemlidir (Fingas, 2015: 287). Petrolün denizde hareket ve bozunma süreçleri yayılma, adveksiyon, dağılma, sedimentasyon, buharlaşma, emülsifikasyon, çözülme, foto-oksidasyon ve biyolojik bozunma olmak üzere 9 grupta incelenmektedir (Spaulding, 1988: 40; Daniel, 2010: 371; NRC, 2003: 90). Şekil 12'de petrol sızıntısının denizdeki hareket ve bozunma süreçleri gösterilmektedir.

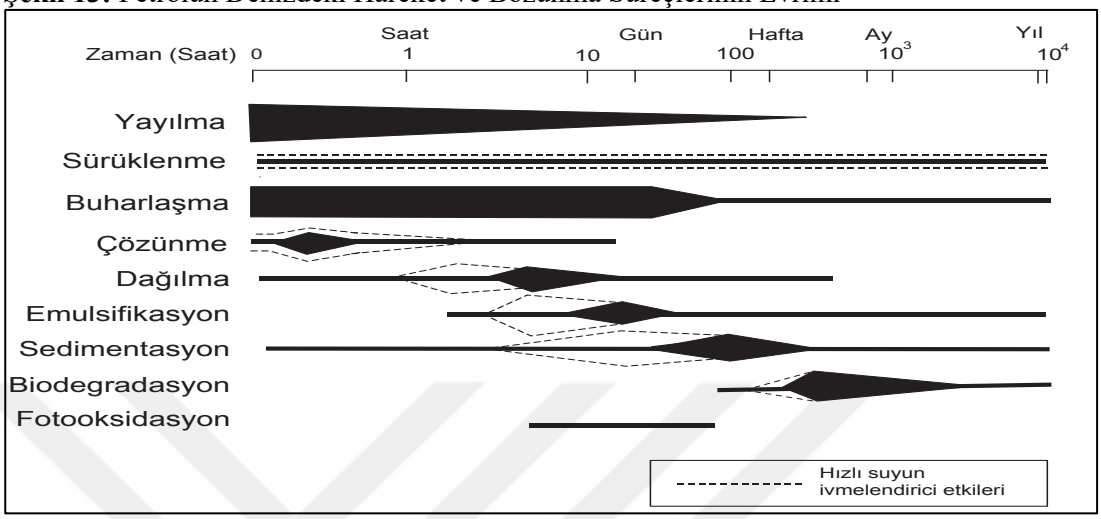
Şekil 12: Petrolün Deniz Çevresindeki Hareketi ve Bozunma Süreci



Kaynak: (Farrington, 2014: 17)

Şekil 13'te hareket ve bozunma süreçlerinin zaman içerisinde başlama, devam etme ve son bulma evreleri gösterilmektedir.

Şekil 13: Petrolün Denizdeki Hareket ve Bozunma Süreçlerinin Evrimi



Kaynak: (Fingas, 2017: 456)

Şekil 13'e göre sızıntının gerçekleştiği andan itibaren sürüklenme ve yayılmanın, buharlaşmanın, çözülmenin ve dağılmanın ilk birkaç saat içerisinde yüksek oranlarda başladığı ve giderek azalan oranlarda yıllarca devam ettiği anlaşılmaktadır. Takip eden ilk günden itibaren emülsifikasyonların başladığı ve aylar geçtikten sonra en yüksek değerlerine ulaştığı, foto-oksidasyon, biyolojik bozunma ve sedimentasyonun ise ilk 10 günün içinde başlayıp dengeli oranlarda yıllarca devam ettiği gözlemlenmektedir. Kapsüllenme sürecinin buzla kaplı deniz ortamlarında meydana geldiği ve birkaç saat ile onlarca haftalık zaman dilimi arasında başlayıp sona erdiği bilinmektedir.

2.3.1. Petrol Sızıntısının Denizdeki Hareket ve Taşınma Süreçleri

Kendi tabiatında var olan yayılma eğilimine ek olarak denizdeki petrol birikintisi, öncelikle ve esasen yüzey akıntıları ve rüzgarlar tarafından hareket ettirilmektedir. Karaya yakın mesafelerde ve rüzgar hızının 10 km/s' den az olduğu durumlarda petrol birikintisinin hareketi üzerinde yüzey akıntılarının %100'ü ve rüzgarların %3'ü etkili olurken, açık denizde ve rüzgar hızının 20 km/s dolaylarında olduğu durumlarda harekete rüzgar hakim olmaktadır (Fingas, 2017: 450).

Petrol sızıntısının deniz çevresindeki hareketi yayılma, adveksiyon, dağılma ve sedimentasyon yoluyla gerçekleşmektedir. Kapsüllenme buzla kaplı sularda diğer 4 taşınma şekline ek olarak görülmektedir (Afenyo ve diğerleri, 2015: 234).

2.3.1.1. Yayılma

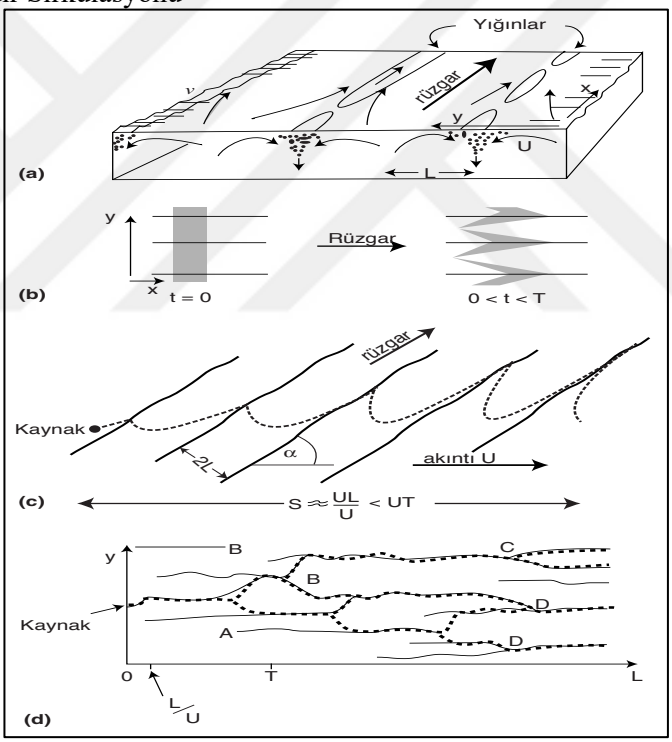
Ham petrolün veya petrol ürünlerinin suyun yüzeyinde ince ve nihayetinde mono moleküler bir tabaka oluşturmak üzere hareket etmesi sürecine yayılma denmektedir (Robotham ve Gill, 1989: 44). Petrolün denize salınımından sonraki ilk anlardan itibaren, akma noktasının ortam sıcaklığından düşük olması kaydıyla, davranışını etkileyen ana süreç yayılmadır. Bu süreç petrol sızıntısının tüm yüzey alanını arttırırken, kalınlığını, sakin sularda devamlı olarak dairesel bir biçimde sonunda 10^{-2}- 10^{-3} cm.' ye kadar azaltmaktadır (Doerffer, 1992: 27). Petrol denize sızmasından hemen sonra yayılmaya başlamakta fakat düzgün dağılmamaktadır. Yüzey akıntısındaki herhangi bir kesinti gerilmeye sebep olmakta ve hafif bir rüzgar bile petrol birikintisinin rüzgar yönünde kalınlaşmasına neden olmaktadır. Çoğu petrol sızıntısı hızlıca, siyah küçük bölgenin daha büyük pırıltılı ve değişen renklerde olabilen bölge tarafından takip edildiği kuyruklu yıldız şeklini oluşturmaktadır (Lehr, 2001: 12). Yayılma sadece petrol kirliliğinin alanını öngördüğü için değil aynı zamanda diğer dönüşüm süreçlerini de etkilediği için önemli bir süreçtir. Yayılma, buharlaşma ve çözünme nedeniyle kütle transferini arttırmaktadır (Daniel, 2010: 372).

Rüzgar ve akıntının yokluğunda dahi petrol, deniz yüzeyinde yayılmaktadır. Bu yayılım, su ve petrol arasındaki yüzey gerilimi ile yer çekimi kuvveti nedeniyledir. Petrolün viskozitesi ise bu kuvvetlere karşı yönde tepki vermektedir. Zamanla yer çekiminin petrol üzerindeki etkisi azalmakta fakat yüzey gerilimi petrolü yaymaya devam etmektedir. Rüzgar ve akıntının varlığı ise yayılmayı hızlandırmaktadır (Fingas, 2015: 297).

Rüzgar ve akıntı varlığında ortaya çıkan Langmuir Sirkülasyonu (LS) petrolün denizde yayılmasını etkileyen bir fenomendir. Genellikle rüzgar dizileri olarak ifade edilen Langmuir hücreleri, LS neticesinde denizde yaygın görülen bir özelliktir ve yüzey dalgalarından kaynaklı ortalama Lagranj hareketi (Stoke kayması) ile kombine olmuş rüzgarla çalışan bir kesme kararsızlığı tarafından üretilmektedir. LS' yi

oluşturan sözde hücreler, dakika cinsinden zaman ölçeklerine ve onlarca metre uzunluğa sahiptir. LS, deniz yüzeyinde rüzgar vektörüne paralel çalışan yakınsama ve ıraksama bölgeleri oluşturmaktadır. Dikey olarak LS, petrol gibi yüzey kirletici maddelerini su kolonunda aşağıya doğru sürükleyebilen yerel bölgelere neden olmaktadır. İlk olarak 1927 yılında Irwing Langmuir tarafından Sargasso Denizi'nde gözlemlenen ve bundan sonra LS olarak ifade edilen bütün bu dikey ve yatay hareketlerin birleşimi olan fenomen yüzeydeki petrolün kalınlığını etkilemekte, petrol birikintisinin su yüzeyindeki hareketini ve petrol damlacıklarının dikey dağılımını arttırmaktadır. (NRC, 2003: 98). Şekil 14'te Langmuir sirkülasyonu diyagramı gösterilmektedir.

Şekil 14: Langmuir Sirkülasyonu



Kaynak: (Thorpe, 2000: 215)

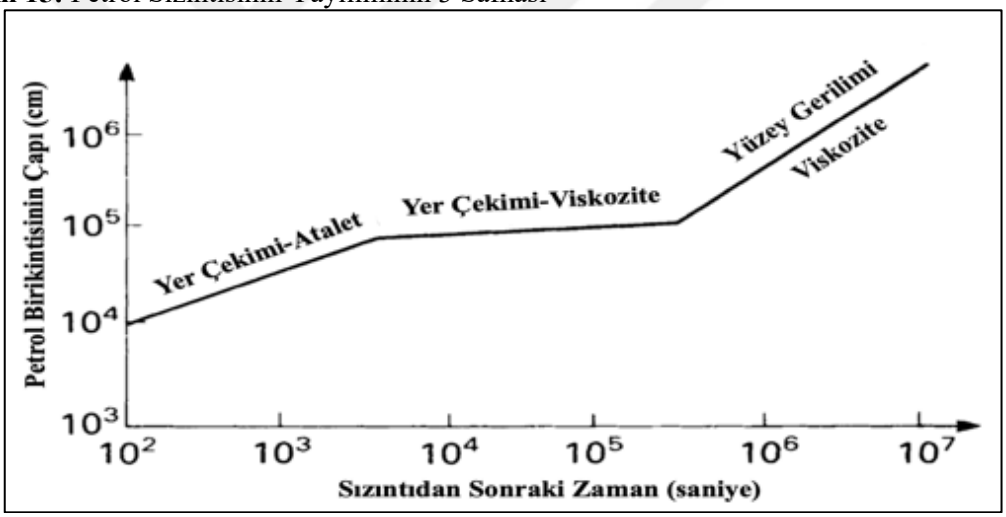
Şekil 14'te 3 boyutlu bir deniz kesitinde Langmuir sirkülasyonunun işleyişi ve deniz yüzeyindeki petrolün yayılımına olan etkisi gösterilmiştir. Şeklin a kısmında rüzgar dizileri aynı zamanda yakınsama bölgeleridir. Yüzeydeki yakınsama bölgeleri ve hücrelerin karakteristik uzunluk ölçüleri L'dir. Yüzen parçacıklar ve kabarcıklar rüzgar dizilerinin altında birikebilmektedir. B kısmında yüzen parçaların LS ile boyuna dağılmasının ve adveksiyonunun zaman içindeki gelişimi verilmiştir. C

kısmında rüzgar ve akıntı α açısı yaptığında bir kaynaktan yayılan yüzer parçacıkların advektif dağılımı görülmektedir. D kısmında ise ayrılan ve kararsızlaşan parçacıkların dağılımlarının şekli gösterilmiştir.

Petrolün denizde yayılma hareketi eylemsizlik, yer çekimi, viskozite ve ara yüzey gerilimi olmak üzere 4 mekanik kuvvet tarafından kontrol edilmektedir. Şekil 15'te de gösterildiği üzere bu 4 kuvvet ikili kombinasyonlar şeklinde birbirini takip eden 3 safha boyunca sırasıyla aşağıdaki gibi yayılmayı etkilemektedir (Fay, 1969; Fay, 1971).

- Safha 1: Eylemsizlik ve Yer Çekimi
- Safha 2: Yer Çekimi ve Viskozite
- Safha 3: Viskozite ve Yüzey Gerilimi

Şekil 15: Petrol Sızıntısının Yayılımının 3 Safhası



Kaynak: (Doerffer, 1992: 28)

Şekil 15'teki grafikten anlaşılacağı üzere petrol sızıntısının başlangıç periyodunda sızan petrolün miktarı, yer çekimi kuvvetinin bu periyotta baskın olması dolayısıyla yayılma oranı üzerinde direkt etkiye sahiptir. Sonuç olarak başlangıç periyodunda hacim bakımından büyük petrol sızıntıları küçüklerine oranla daha hızlı yayılmaktadır. Yüzey gerilimi baskın kuvvet haline geldiğinde ise yayılma hızı düşmekte ve böylece sızıntının hacmi yayılma oranı üzerindeki etkisini kaybetmektedir.

Yayılmanın hesaplandığı yaygın algoritma Fay formülleri tarafından sunulmuştur (Fingas, 2017: 449). Yer çekimi – viskozite yayılmasını hesaplayan formül aşağıdaki gibidir (Fay, 1969; Fay, 1971):

$$Başlangıç\ Alanı\ A_0 = \pi \frac{k_1^4}{k_2^2}\left(\frac{V_0^5 g \Delta_\rho}{\upsilon_w^2}\right)^{\frac{1}{6}}$$

$$\Delta_\rho = \frac{\rho_w - \rho_0}{\rho_w}$$

Burada ρ_w suyun yoğunluğunu, ρ_0 petrolün yoğunluğunu, k_1 ve k_2 yayılma sabitini (tipik olarak 1,52 ve 1,21), g yer çekimi ivmesini, V_0 sızan petrolün hacmini, υ_w suyun viskozitesini ifade etmektedir.

Zamanın bir fonksiyonu olarak başlangıçtan sonra t anındaki yayılma alanı ise aşağıdaki gibidir:

$$A_t = \pi k_2^2 \left(\frac{V_0^2 g \Delta_\rho t^{1,5}}{\upsilon_w^{0,5}}\right)^{\frac{1}{3}}$$

Ancak, Fay (1971) tarafından sunulan modeller petrolün viskozitesini hesaba katmamıştır ve daha çok sakin ya da durgun sular için geçerlidir. Daha yakın zamanda, Werluzel ve Benque (1981) ve Maroihi (1992) tarafından sunulan ortalama katmana dayalı Navier–Stokes formülü yayılma sürecini aşağıdaki gibi tanımlamıştır (Goeury ve diğerleri, 2014: 40):

$$S - arctan(aS) = 4\pi\mu t$$

$$\mu = \frac{\sigma_{wa} - \sigma_{oa} - \sigma_{ow}}{K} \quad ve \quad a = \frac{2}{3V_0}\sqrt{\frac{2\mu K}{\Delta\rho_o g}}$$

Burada σ_{wa} su-hava yüzey gerilimini, σ_{oa} petrol-hava yüzey gerilimini, σ_{ow} petrol-su yüzey gerilimini, K petrol ve su yüzeyleri arasındaki sürtünme katsayısını, V_o dökülen petrolün hacmini, g yer çekimi ivmesini, Δ petrol ve suyun yoğunluklarıyla ilgili parametreyi (sırasıyla ρ_o, ρ_w; $\Delta = (\rho_w - \rho_o)/\rho_w$) ifade etmektedir.

Fay' in formülleri petrol birikintisinin büyümesini büyük oranda az hesapladığı için Lehr (1984) toplam birikinti alanını hesaplayan ve birikintiyi kalın "siyah petrol" rejimi ve ince "parlak petrol" rejimi şeklinde iki büyük rejime ayıran bir formül geliştirmiştir (Sebastiao ve Guedes Soares, 1995: 123):

$$A = 2270\left[\frac{\Delta_\rho}{\rho_o}\right]^{\frac{2}{3}} V^{\frac{2}{3}}t^{\frac{2}{3}} + 40\left[\frac{\Delta_\rho}{\rho_o}\right]^{\frac{1}{3}} V^{\frac{1}{3}}W^{\frac{1}{3}}t$$

Burada A birikinti alanını (m^2), W rüzgar hızını (knot), V döküntü miktarını (varil), t zamanı (dk.), ρ_o petrolün yoğunluğunu ve Δ_ρ ise su ile petrol arasındaki yoğunluk farkını ifade etmektedir.

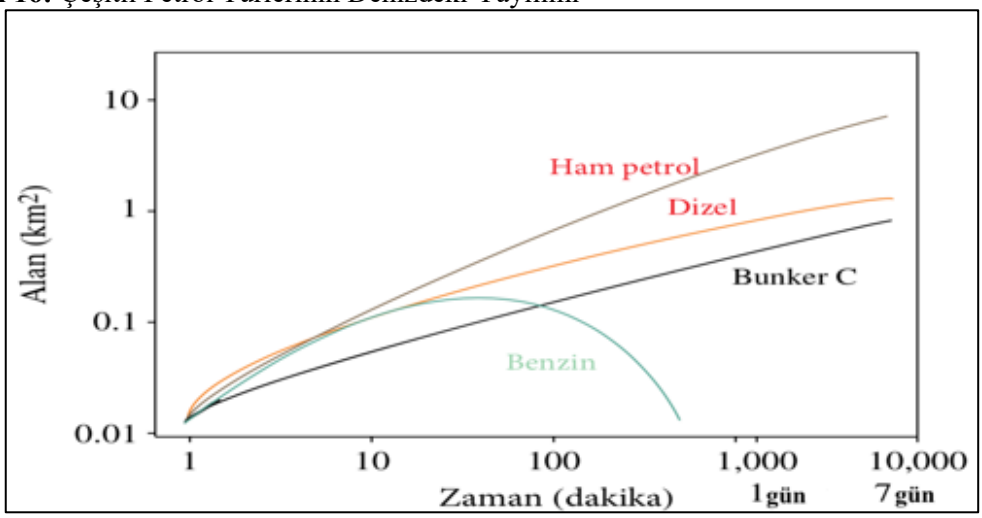
Mackay (1980), Fay (1969)' in ve Hoult (1972)' un yer çekimi – viskozite formüllerine dayanan ve Reed (1989) ve Spaulding ve diğerleri (1992) tarafından kullanılan yayılan petrol alanının değişme oranını hesaplayan formülü aşağıdaki gibi geliştirmiştir (Afenyo ve diğerleri, 2016: 236):

$$\frac{dA}{dt} = KA^{\frac{1}{3}}\left[\frac{V_m}{A}\right]^{\frac{4}{3}}$$

Burada A birikinti alanını (m^2), V_m döküntü miktarını (m^3), K, 150^{-1} değerinde bir sabiti ve t zamanı (sn.) ifade etmektedir.

Galt ve Overstreet (2011), sürüklenmenin petrolü deniz yüzeyinden uzaklaştırdığı ve yüzey altına taşınan dağılmış petrolün bir kısmının yükselen petrol damlacıklarının yüzebilme özelliği vasıtasıyla deniz yüzeyine geri döndüğü gözlemine dayanan alternatif bir çözüm geliştirmişlerdir. Bu çözüm, Dalvigne ve Sweeney (1988)'in sürüklenme (su sütununda dikey dağılma oranı) ve deneysel temelli petrol damlacığı boyut dağılımı formüllerini kullanarak klasik yayılma formüllerine bir düzenleme olarak geliştirilmiştir. Bu yaklaşımda, deniz yüzeyinde bulanan petrol, dalga kırılmaları vasıtasıyla petrol damlacıkları olarak dalga yüksekliğinin yaklaşık 1,5 katına eş değer bir derinliğe kadar su sütununda dağılmaktadır. Petrol damlacıklarının boyut dağılımları, petrolün viskozitesine ve dalga kırılmalarının enerjisine bağlıdır. Su sütununda dağılan petrol damlacıkları zamanla, büyük boyutluların küçüklerine göre daha hızlı olduğu bir biçimde su yüzeyine geri dönmektedir. Su yüzeyine yakın petrol damlacıkları rüzgar yönüne doğru en hızlı şekilde, derinlerdeki damlacıklar ise en yavaş şekilde hareket etmektedir. Bu süreç döküntünün ön kenarında kalınlaşmaya arka kenarında ise incelmeye neden olmaktadır. Bu çözümde petrol damlacıklarının su sütununa nüfuz etme derinliği, petrol birikintisinin kalınlaşma ve incelme derecesini öngörmede anahtar olan su kolonuna çekilme formülü için önemlidir (Spaulding, 2017:11).

Şekil 16: Çeşitli Petrol Türlerinin Denizdeki Yayılımı



Kaynak: (Fingas, 2015: 297)

Şekil 16' daki grafikte görüldüğü üzere benzin düşük viskozitesi nedeniyle çok hızlı bir şekilde yayılırken kısa zamanda yayılma alanı yavaşlamakta ve buharlaşmadan dolayı daralmaktadır. Ham petrol başlangıçtan itibaren neredeyse düzgün doğrusal bir artışla yayılma alanını genişletmektedir. Benzer şekilde dizel ve bunker C de sırasıyla birinci günün sonunda 1 km^2'nin altında kalacak şekilde düzgün doğrusal orana yakın bir artışla yayılmaktadır.

2.3.1.2. Doğal Dağılma

Doğal dağılma, su yüzeyinde bütünleşik olarak yayılan petrol birikintisinin, sudaki moleküler çözünürlüğünün oldukça düşük olduğu durumlarda, dalga kırılmalarının ve türbülansın etkisiyle farklı boyutlardaki petrol damlacıklarına ayrılarak su sütununa nüfuz etmesi ve yayılması sürecidir (ASCE, 1996: 599, Lehr ve diğerleri, 2002: 194). Süreç incelendiğinde, küçük boyutlu petrol damlacıklarının (20 µm veya 0,02 mm' den daha küçük) bir şekilde su sütununda kalıcı olduğu, büyük boyutlu petrol damlacıklarının su yüzeyine geri yükselme eğilimi gösterdiği ve daha büyük petrol damlacıklarının (50 µm' den büyük) su sütununda birkaç saniyeden çok kalmadığı görülmektedir (Fingas, 2017: 439). Yüzeye geri dönen petrol damlacıkları tekrar kaynaşarak yeniden petrol birikintisi formuna gelmekte ve ince bir film halinde yüzeyde yayılmaktadır. Bu süreç biyolojik bozunma, çözünme ve sedimentasyon süreçlerini hızlandırmaktadır (Afenyo ve diğerleri, 2016: 240).

Dağılma süreci, buharlaşma sürecinin yanında, petrolü su yüzeyinden uzaklaştıran kritik bir faktör olması nedeniyle önemli bir süreçtir (Glug ve Was, 2018: 400). Doğal dağılma oranı dalga enerjisi, denizin o anki durumu gibi çevresel faktörlerin yanı sıra petrol birikintisinin kalınlığı, viskozitesi, yoğunluğu, yüzey gerilimi gibi fiziksel ve kimyasal özelliklerine de bağlıdır. Petrol sızıntısının deniz ortamındaki ömrünün değerlendirilebilmesi için doğal dağılmanın hesaplanması gerekmektedir. (Reed ve diğerleri, 1999: 8).

Yukarıda bahsi geçen hareket ve bozunma süreçlerine etkisi bakımından ve aynı zamanda dağılma sürecinin anlaşılıp çözümlenebilmesi için petrolün su sütunundaki dağılma oranı, su sütunundaki petrol konsantrasyonu ve petrol damlacık boyutu dağılımı bilinmelidir (Delvigne ve Sweeney, 1988: 282).

Akışkanlar mekaniğinin konusu olan doğal dağılma süreci, adeta bir bayrak yarışı gibi zaman içerisinde farklı araştırmacıların katkılarıyla birçok gelişmeye ve ilerlemeye sahne olmuştur. Bu gelişmelere, takip eden paragraflarda değinilmektedir.

Doğal dağılma sürecini tarif eden en basit yöntem, zamanın ve deniz durumunun bir fonksiyonu olarak dağılmanın çizelgelerini kullanmaktır (Spaulding, 1988: 43). Hinze (1955) çalışmasında türbülans enerji spektrumu ve petrolün damlacıklara ayırılması arasındaki ilişkiyi göstermiştir. Forrester (1971) petrol birikintisi altındaki petrol damlacıklarını 20 metreyi aşan derinlikte gözlemlediği çalışmasında petrol parçasının türbülans ve akıntılarla su sütununa taşınan bireysel damlacıklar olarak düşünülebileceğini ispatlamıştır. Blaikely ve diğerleri (1977) dağılma oranını günlük sabit bir miktarda olmak üzere petrol birikintisinin %10- 60'ı arasında değişen oranlarda deniz durumuna bağlı olarak belirlemişlerdir. Audunson (1979) dağılma katsayısının veya oranının rüzgar hızının karesiyle değiştiği deneye dayalı bir hesaplama geliştirmiştir. Bu hesaplama petrolün önemli özelliklerini göz önünde bulundurmamış ve doğal dağılmayı büyük ölçüde abartılı olarak hesaplamıştır. Mackay ve diğerleri (1980) dağılma nedeniyle yüzeydeki petrolde meydana gelen kaybı, kalıcı olarak dağılabilecek damlacıklar içeren su kolonuna çekilmiş petrol parçasının (F_B) tahmini ile desteklenen ve birim zaman başına dağılmaya konu olan deniz yüzeyi parçasının (F) hesabına dayalı olarak ifade etmişlerdir. Buna göre toplam su kolonuna nüfuz etme oranı (entrainment rate), F'nin petrol birikintisi kalınlığıyla çarpılmasıyla elde edilir ve kalıcı dağılma oranı buradan gelen çıktı ile F_B'nin

çarpılması sonucu saptanır. F, rüzgar hızının karesiyle orantılı olarak artarken, F_B petrol filminin kalınlığına ve petrolün özelliklerine bağlıdır. Aramavadun ve diğerleri (1982), dağılma oranını, petrol birikintisinin kalınlığının, petrol-su yüzey geriliminin, deniz durumunun ve özellikle denizin dalga kırılmaları ile kaplı bölümünün bir fonksiyonu olarak göstermişlerdir. Kendisinden sonra gelen modellere temel olan bu yaklaşım, dağılma oranını hesaplamasının yanında damlacık boyut dağılımını da öngörmüştür. Johansen (1982) petrolün su kolonundaki dağılma oranını, rüzgar hızının doğrusal fonksiyonu olarak hesap edilen "köpüklü dalga alanı" parametresi ile ölçeklendirmiştir. Dağılmayı, rüzgar sürüklenmesinden kaynaklı adveksiyonun ve dalga kırılmalarından kaynaklı dikey difüzyonun bir kombinasyonu olarak modellemiştir. Elliott (1986) denizde petrol sızıntısını üç boyutlu dinamik bir fenomen olarak değerlendiren ve modelleyen öncülerden olmuştur. Rastgele yürüyüş tekniğini kullanarak petrol damlacıklarının her birinin su sütunundaki hareketini takip etmiştir.

Reed (1989), Mackay (1980)'den esinlenerek geliştirmiş olduğu yaklaşımında yüzeydeki petrolün su kolonundaki dağılma oranını aşağıdaki gibi hesaplamıştır (Reed, 1989: 108).

$$D = D_a D_b$$

$$D_a = 0{,}11(W+1)^2 \text{ ve } D_b = \left(1 + 50\mu^{\frac{1}{2}}\delta s_t\right)^{-1}$$

Burada D_a bir saatte dağılmaya maruz kalan deniz yüzey parçasını, D_b yüzeydeki petrol birikintisine geri dönmeyen, kalıcı olarak dağılan parçayı, W rüzgarın bir saniyede metre cinsinden aldığı yolu, μ viskoziteyi (centipoise – g/m.s), δ petrol birikintisinin kalınlığını metre cinsinden, s_t petrol-su ara yüzey gerilimini ifade etmektedir.

Dalvigne ve Sweeney (1988) deniz yüzeyinden su kolonuna petrolün çekilme oranını hesaplayan ve daha sonraları DS1988 olarak anılacak gözleme dayalı deneysel algoritmayı geliştirmişlerdir. Günümüzde bu algoritma, deniz yüzeyindeki petrolün hareket ve bozunma süreçlerini simüle eden birçok modelde doğal dağılmayı ifade etmek için kullanılan en yaygın algoritmadır. Algoritma, dalga kırılması enerji yitim oranına, petrol ve dalga kırılmalarıyla kaplı deniz yüzeyi bölümüne ve petrolün türüne ve emülsifikasyon durumuna dayanan deneysel bir katsayıya bağlı olarak ifade edilmektedir. Yazarlar ayrıca, su kolonuna çekilen petrolün damlacık boyutu dağılımını öngörmek için gereken ilişkileri, aynı parametrelerin bir fonksiyonu olarak

belirlemişlerdir (Reed ve diğerleri, 1999: 9; Johansen ve diğerleri, 2015: 21; Spaulding, 2017: 12). DS1988'e göre birim deniz yüzeyi alanı başına petrolün su kolonuna çekilme oranı (kg/m^2/s) (Delvigne and Sweeney, 1988: 304):

$$Q_r(d_o) = C_o D_{ba}^{0,57} S_{cov} F_{wc} d_o^{0,7} (\Delta d)$$

Burada, $Q_r(d_o)$ birim yüzey alanı başına petrol damlacıklarının su kolonuna dağılma oranını (kg/m^2/s), C_O petrolün türüne ve bozunma sürecine bağlı deneysel katsayını, D_{ba} birim yüzey alanı başına dalga kırılması yitim enerjisini (J/m^2), S_{cov} petrol ile kaplı yüzey alanını $(0 \leq S \leq 1)$, F_{wc} birim zaman başına dalga kırılmasına (köpüklü dalga) maruz kalan yüzey alanını (m^2/s), d_o petrol damlacığı çapını (m) ve Δd petrol damlacığı çap aralığını (m) ifade etmektedir.

Tkalich ve Chan (2002) yaptıkları çalışmada, dalga kırılmaları sonucu petrol damlacıklarının dikey karışımını gösteren teorik, birinci dereceden kinetik bir model geliştirmişlerdir. Model, petrolün su kolonundaki karışma oranını boyutsuz bir karışma faktörü kullanarak hesaplamaktadır. Dikey olarak aşağı yönlü doğrudan karıştırma ve yukarı yönlü damlacıkların yüzme hareketinin etkileri, petrol birikintisi ve su kolonu arasındaki petrol damlacığı kütle değişimini hesaplamak için aşağıdaki gibi kombine edilmiştir (Tkalich ve Chan, 2002: 1223):

$$\frac{dm_e}{d_t} = \pm K(\Lambda m_s - m_e)$$

$$\Lambda = \frac{\Psi_{ow}}{\Psi_{wo} B_1} = \frac{k_b L_{wo} \zeta \omega H_s}{16\, \alpha L_{wo} u_1 B_1}\,, K = \frac{(\Psi_{ow} + \Psi_{wo})\Psi_{wo} B_1}{\Psi_{ow} + \Psi_{wo} B_1}, B_1 = \frac{r_{max}^{3-\delta} - r_c^{3-\delta}}{r_{max}^{3-\delta} - r_{min}^{3-\delta}}$$

Burada m_e birim karışma katmanındaki petrol kütlesini (kg/m^2), m_s birim petrol birikintisi başına petrol kütlesini (kg/m^2) ifade eder. K ve karıştırma faktörü Λ, petrolün su kolonuna çekilme oranına Ψ_{ow} ve petrolün yüzeye geri dönme oranına Ψ_{wo} dayanılarak hesap edilir. Ayrıca L_{wo} dikey uzunluk ölçeğini (m.), ω dalga frekansını (Hertz), H_s önemli dalga yüksekliğini (m.), k_b dalga enerjisi yitimini (0,3~0,5), ζ deniz durumuna bağlı sönümleme katsayısını, α deniz durumuna bağlı boyutsuz ölçeklendirme faktörünü, r_{max} ve r_{min} damlacık yarıçapı değerlerini, r_c damlacık boyut eşiğini ve δ deneysel bir katsayıyı ifade etmektedir.

Reed ve diğerleri (2009) gerçekleştirdikleri deneysel çalışmalarda viskozitenin, petrolün su kolonuna çekilme oranı üzerindeki etkisini, Delvigne ve Sweeney'in çalışmalarını parametrik düzeyde yüksek viskoziteye ve Newton tipi

olmayan bölgeye taşıyarak değerlendirmeye çalışmışlardır. Geliştirdikleri deneysel korelasyon algoritması, petrol damlacık boyut dağılımını petrol filmi kalınlığının, dalga şiddetinin, petrol viskozitesinin ve petrol-su ara yüzey geriliminin bir fonksiyonu olarak öngörmüştür. Deneysel gözlemler sonucu, damlacık boyut sayıları dağılımının log-normal (normal dağılıma uyan logaritmik bir fonksiyon) dağılımla uyumlu olduğu tespit edilmiştir (Reed ve diğerleri, 2009: 60, 61).

Johansen ve diğerleri (2013), SINTEF tarafından gerçekleştirilen petrol damlacık kopma deneylerinden elde ettikleri verilerle su altında meydana gelen sızıntılarda kimyasal dağıtıcı müdahalesi olsun veya olmasın petrol damlacık boyut dağılımını tutarlı olarak öngören bir metot geliştirmişlerdir. Metot ile öncelikle d_{50} ile ifade edilen ve sızıntı noktasındaki yağın akış hacmine, gaz boşluğu oranına ve çıkış çapına bağlı olan damlacık boyutunun ortanca değeri hesap edilmektedir. Bulunan bu değere dayanarak, $k = 0{,}693\ ve\ \propto = 1{,}8$ parametreleri ile ve Rosin-Rammler dağılımına uyduğu düşünülerek petrolün damlacık boyut dağılımı elde edilmektedir. Masutani ve diğerlerinin (2000, 2003) gerçekleştirdiği petrolün bölünme rejiminin tam aralığını araştıran Hawai Üniversitesi deneyleri (UH) olarak da bilinen deneylerden gözlemlenen sonuçlar, sudaki petrolün ayrılma rejiminin boyutsuz Reynolds (Re) ve Weber (We) sayıları ile sınırlandırılabileceğini göstermiştir. Bu nedenle, çıkış ağzı çapı, çıkış hızı, ara yüzey gerilimi, yoğunluk ve viskozite değişkenleri arasındaki ilişkiyle türetilen Re ve We sayıları çözüm için geliştirilen formülde kullanılmıştır (Johansen ve diğerleri, 2013: 328, 333).

Johansen ve diğerleri (2015), dalga kırılmalarından kaynaklı petrol damlacığı boyut dağılımını modelleyen çalışmada, SINTEF tarafından 2007-2008 yıllarında gerçekleştirilen deneylerden elde edilen verileri kullanmış ve DS1988'deki bazı eksiklikleri gidermiştir. Sunulan yeni model, DS1988'in değerlendirmeye aldığı viskozite aralığını genişleterek daha yüksek bir aralığa taşımıştır (5-200 cP'den 50-6000 cP'ye). Dahası yeni model, ara yüzey gerilimini petrolün bir özelliği olarak içermekte ve bu durum modeli, kimyasal dağıtıcı uygulanan durumları simüle etmek için kullanışlı hale getirmektedir.

Li ve diğerleri (2017a), kimyasal dağıtıcı uygulansın veya uygulanmasın ve ister yüzey dalga kırılmaları ister denizaltı kusma salınımları sonucu meydana gelmiş olsun, dağılma sürecindeki petrolün damlacık boyutunu, 3 tane boyutsuz değişken

[boyutsuz çap (vd_{50}/d_0), Ohnesorge (Oh) ve We sayıları] grubunu içeren bir formül geliştirerek hesaplamıştır. Sonuçta, ölçüm verilerinin kapsamlı analizine dayanarak, petrol damlacık boyut dağılımı fonksiyonunun, sabit bir geometrik standart sapma ile log-normal dağılıma uyduğu tespit edilmiştir (Li ve diğerleri, 2017a: 255). Li ve diğerleri (2017b) ise kimyasal dağıtıcı uygulansın veya uygulanmasın, yüzey dalga kırılmaları sonucu su kolonuna çekilen petrol miktarını (entrainment rate) hesaplayan bir model geliştirmiştir. İyi bilinen boyutsal analiz hesabına dayanan ve iki tane boyutsuz grup (Oh ve We sayıları) kullanan model, güncel petrol kirliliği modellerine entegre edilmek üzere yapılandırılmıştır. Model ayrıca, petrolün nüfuz etme derinliğini belirleyen metotları ve damlacıkların tekrar yüzeye dönmesi konusundaki sınırları da içermektedir. Geliştirilen modeller, laboratuvar sonuçlarıyla kalibre edilmiş ve önemli derecede benzer sonuçlar elde edilmesi neticesinde geçerli kılınmıştır. Bahsi geçen modeller aşağıdaki formüllerde ifade edilmektedir (Li ve diğerleri, 2017b: 147, 149, 151).

$$Q_o = aWe^b Oh^c \implies Q_o = \frac{Q}{F_{bw}} = \frac{Q_e}{\rho_o h_o F_{bw}}$$

Burada Q_o boyutsuz akış oranını, Q su kolonuna çekilen petrolün kısmi oranını (s^{-1}), Q_e petrolün su kolonuna çekilen kütle akışını ($kgm^{-2}s^{-1}$), F_{bw} verilen rüzgar hızı için dalga kırılmalarına maruz kalan deniz yüzeyi parçasını (s^{-1}), ρ_o petrolün yoğunluğunu (kg/m^3), h_o petrol birikintisinin kalınlığını (m), a,b,c ise laboratuvar ve saha gözlemlerine uyan deneysel sabitleri ifade etmektedir.

We, yıkıcı hidrodinamik momentumun, yapıcı ara yüzey gerilimine oranıdır ve deniz suyu yoğunluğunun, yer çekiminin, dalga yüksekliğinin, petrol-su ara yüzey geriliminin ve Reyleigh-Taylor(R-T) kararsızlığına dayalı askıdaki kararlı petrol damlacığının maksimum çapının (d_o) fonksiyonudur.

$$d_o = 4\left[\frac{\sigma_{o-w}}{\Delta_\rho g}\right]^{0,5}, We = \frac{\rho_w g H_s d_o}{\sigma_{o-w}}, Oh = \frac{\mu_o}{\sqrt{\rho_o \sigma_{o-w} d_o}}$$

Nihayet petrol damlacık boyutunun çapının ortanca değerinin ve petrol damlacık boyut log-normal dağılımının ifade edildiği formül aşağıdaki gibi gösterilmiştir.

$$\left(\frac{vd_{50}}{d_o}\right) = rOh^p We^q \quad ve \quad df = \frac{1}{\sqrt{2\pi} d_p \ln \sigma_g} exp\left(-\frac{\left(\ln d_p - \ln d_g\right)^2}{2\left(\ln \sigma_g\right)^2}\right) dd_p$$

Burada petrol damlacığının boyut (d_p) frekans dağılımı, f, logaritmik geometrik ortalama ($\ln d_g$) ve logaritmik geometrik standart sapma ($\ln \sigma_g$) ile karakterize edilmiştir.

Yukarıda detaylıca anlatıldığı üzere yıllar içerisinde petrolün denizde dağılma süreci üzerine bazı önemli gelişmeler yaşanmıştır. Hem deneysel hem de teorik çalışmalar gerçekleştirilerek, petrolün su kolonuna çekilip karışma oranının ve petrol damlacık boyut dağılımının hesaplanmasına katkıda bulunulmuştur. Damlacık dinamiği modelleri damlacık boyut dağılımı hesaplamalarına farklı bir boyut kazandırırken, geleneksel modeller de iyileştirilmiştir. Böylelikle petrolün denizde dağılma sürecinin çözümlenmesinde kimyasal dağıtıcıların ve yüksek viskoziteye sahip petrol türlerinin de denklemin içine çekilmesi mümkün kılınmıştır.

2.3.1.3. Yatay Taşınma

Adveksiyon, bir maddenin, bir sıvı tarafından o sıvının kütle hareketi nedeniyle taşınması mekanizmasıdır (Glug ve Was, 2018: 398). Denizde petrol sızıntısı söz konusu olduğunda adveksiyon, petrolün akıntı, rüzgar ve dalga nedeniyle deniz yüzeyinde ve su kolonunda sürüklenmesi olarak tanımlanmaktadır (ASCE, 1996: 595, Guo ve Wang, 2009: 727). Denizdeki petrol sızıntısının nihai durumu üzerindeki sürekli ve baskın etkisinden dolayı adveksiyon süreci neredeyse bütün petrol kirliliği modellerine dahil edilmektedir. Adveksiyon süreci yüzey ve yüzey altı adveksiyonu olmak üzere iki gruba ayrılabilmektedir fakat bu alandaki çalışmaların büyük bir kısmı petrol damlacıklarının yüzebilme özelliklerinden ötürü yüzey adveksiyonuna odaklanırken azınlık bir kısım çalışma yüzey altı adveksiyona odaklanmıştır (Huang, 1983: 313).

Bir akışkan taşıyıcı tarafından parçacık taşınması, endüstriyel süreçlerde ve birçok bilimsel alanda sık sık karşılaşılmasından dolayı büyük ilgi çeken bir fenomen olmuştur. Akışkan taşıyıcı tarafından parçacık taşınmasının sayısal simülasyonu sürekli fazın (akışkan), ayrık fazın (parçacık) ve her ikisi arasındaki etkileşimin modellenmesini gerektirmektedir. Sıvı ya da gaz olsun sürekli faz Euler formülleri ile modellenirken ayrık faz Euler ya da Lagrange formüllerinden herhangi biriyle yapılabilmektedir. Bu durum Euler-Eular ve Euler-Lagrange diye adlandırılan iki ayrı

stratejinin oluşmasını sağlamaktadır. Kütle taşınma sürecinin Euler formülünde parçacığın izlediği yol, bir diğer söylemle yörünge hesaplanmamaktadır. Bunun yerine parçacıkların kütle konsantrasyonu zamanın ve uzayın bir fonksiyonu olarak hesap edilmektedir (Hryb ve diğerleri, 2009: 451).

Denizde petrol sızıntısı modellerinde standart yaklaşım, adveksiyon-difuzyon denkleminin Lagrange ayrık parçacık metoduyla (Method of Lagrangian Discrete Particle or Lagrangian Elements), difüzyonun ise rastgele yürüyüş (random walk) ile modellenmesidir (Nordam ve diğerleri, 2019: 632).

Lagrange ayrık parçacık yaklaşımında petrol birikintisi, ortamın düzenli hareketinin etkisi altında çok sayıda eşit kütleye sahip sanal, küçük petrol parçacıkları olarak düşünülmekte ve her bir parçacığın ayrık yolu ve kütlesi zamanın bir fonksiyonu olarak takip edilerek kaydedilmektedir (Wang ve diğerleri, 2005: 1557; Xu ve diğerleri, 2012: 208). Ortamın hız bileşenleri ($[u(x,y,z,t)]$, $[v(x,y,z,t)]$ ve $[w(x,y,z,t)]$) ile düzenli hareketinin, petrol damlacıklarının batıp tekrar yüzeye çıkma hızının u_L ve türbülanslı çalkalanmaların ($[u'(x,y,z,t)]$, $[v'(x,y,z,t)]$ ve $[w'(x,y,z,t)]$) etkisi altındaki parçacıkların konumu (X, Y, Z) aşağıdaki gibi bulunmaktadır (Wang ve diğerleri, 2008: 504):

$$\frac{dX}{dt} = (u) + u' \,, \qquad \frac{dY}{dt} = (v) + v' \,, \qquad \frac{dZ}{dt} = (w) + w' + u_L$$

Burada u, v ve w, su yüzeyinde ve su kolonunda rüzgar, akıntı ve dalganın kombine etkisiyle sürüklenmeyi temsil eden petrol parçacığının sürüklenme hızını; u', v' ve w', petrol damlacıklarının türbülanslı difüzyonunu simüle eden hızın türbülanslı çalkalanmalarını ifade etmektedir.

Çoğu petrol sızıntısı modeli, yüzey petrolünün taşınmasını modellemek için rastgele yürüyüş tekniğini kullanmaktadır. Bu yaklaşımda, petrolü temsil eden Langrange elementleri, yüzey akıntı sahası tarafından yatay olarak hareket ettirilirken yatay/dikey dağılmayı temsil eden rastgele yürüyüş süreci tarafından ise dağılmaya maruz bırakılmaktadır (Spaulding, 2017: 10). Rastgele yürüyüş, petrol parçacıklarının hareketinin belirsizliğini tanımlamaktadır (Yu ve diğerleri, 2016: 365).

Parçacık temelli yaklaşımda petrol sızıntısının hareketi, adveksiyon ve türbülanslı difüzyon tarafından yönlendirilen taşınmaya göre hesaplanmaktadır. Buradan hareketle bir petrol parçacığının adveksiyon hızı, ona etki eden faktörleriin hızlarının vektörel toplamıdır ve aşağıdaki gibidir (Guo ve diğerleri, 2018: 387):

$$U_a = C_{cr}\vec{U}_{cr} + C_{wind}D_{wind}\vec{U}_{wind} + C_{wave}\vec{U}_{wave}$$

Burada $\vec{U}_{cr}$ suyun akıntı hızını, $\vec{U}_{wind}$ suyun yüzeyinden 10 m. yukarıdaki rüzgarın hızını, C_{wind} rüzgarın sürükleme faktörünü, D_{wind} rüzgarın sapma açısını hesaplamak için kullanılan dönüşüm matrisini, $\vec{U}_{wave}$ hesaplanmış dalga Stokes kaymasını ve C_{wave} dalga sürükleme faktörünü simgelemektedir.

Türbülans, akışkan bir ortamda maddenin dağılması ve ısının, momentumun ve çözünen materyalin transferi ile neticelenen enerjik, dönmeye dayalı, girdap formunda olan baskın bir fiziksel hareket sürecidir ve dalga kırılmaları sonucu meydana gelmektedir (Thorpe, 2007: 1, 11). Türbülanslı difüzyon genellikle rastgele yürüyüş süreci kullanılarak modellenmektedir. Türbülanslı difüzyon, Fischer ve diğerleri (1979)'nin çalışmalarında geliştirdikleri formüle göre aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Fischer ve diğerleri, 1979).

$$\vec{V}_t = R_n e^{-i\theta}\sqrt{\frac{4(D_e + D_T)}{\Delta t}}$$

Burada Δt zaman aralığını, R_n ortalama değeri 0 ve standart sapması 1 olan normal dağılmış rastgele sayıyı, θ 0 ile π arasında eşit olarak dağılmış rastgele açıyı, D_e mekanik yayılmadan kaynaklı dağılma katsayısını, D_T difüzyon katsayını temsil etmektedir.

Adveksiyon-difüzyon süreci petrolün deniz yüzeyindeki ve su kolonundaki hareketini belirleyen önemli süreçlerdendir. Bu süreci etkileyen rüzgar, akıntı ve dalga gibi etkenler birbirinden bağımsız karakterde olduğundan aynı veya farklı yönlerde bu süreçlere etki edebilmektedirler.

2.3.1.4. Tortulaşma ve Çökelme

Sedimentasyon, bazı bozunma süreçlerinin (buharlaşma, emülsifikasyon) etkisiyle deniz yüzeyindeki petrolün özgül ağırlığının (spesific gravity) suyun özgül ağırlığından büyük hale gelmesi sonucu, petrolün su kolonundaki tortular tarafından emilerek veya tortulara yapışarak su kolonuna yerleşmesi ve bir süre sonra deniz tabanında birikmesi süreci olarak tanımlanmaktadır (Huang, 1983: 320; Korotenko ve diğerleri, 2000: 330; NRC, 2003: 100). Sedimentasyonun fiziksel süreci oldukça

karmaşıktır. Her ne kadar süreçteki önemli parametreler anlaşılamamışsa da süreçle ilgili bazı kesin bilgiler elde edilebilmiştir (Lehr, 2002: 195; Fingas, 2017: 445). Birçok laboratuvar çalışması göstermiştir ki su kolonunda askıdaki tortunun miktarı, tipi ve boyutu, deniz suyunun tuzluluk oranı, petrolün sülfür ve organik madde bileşenleri oranı, deniz suyunun çalkalanma derecesi ve petrol damlacık boyutu sedimentasyon sürecinde önemli bir rol oynamaktadır (Huang, 1983: 320; Lehr, 2001: 24).

Sedimentasyonun dinamik sürecini açıklayan modellerden bir tanesi Payne ve diğerlerinin (1987) yaptıkları çalışmadır. Çalışmada sunulan formül sedimentasyon oranını petrolün yapışkanlığı, petrol damlacık konsantrasyonu, tortu (sediment) konsantrasyonu ve su yüzeyi için enerji yitim oranı ile ilişkilendirmiştir. Petrol birikintisinin her bir birim alanı için toplam sedimentasyon oranı (Q_{sed}) ve birim zamanda birim su hacmindeki petrol kütlesi kaybı (q_{sed}) aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Payne ve diğerleri, 1987).

$$Q_{sed} = \int_0^{1,5H} q_{sed}\, dz\ , \qquad q_{sed} = k_a \sqrt{\frac{\varepsilon}{V_w}} C_{oil} C_{sed}$$

Burada H su derinliğini, ϵ dalga kırılmalarından kaynaklı enerji yitimini, k_a partikül tipi ve boyutuna bağlı yapışma parametresini, C_{oil} su kolonuna sürüklenen petrol hacmi konsantrasyonunu, C_{sed} askıdaki sediment hacmi konsantrasyonunu simgelemektedir.

Bir diğer çalışmada ise Kolpack ve diğerleri (1977) deneysel sonuçlardan yola çıkarak petrol-sediment yapışma sürecinden kaynaklanan petrol kaybı oranını ($dA_d/dt\,, m^3/s$) aşağıdaki formülde olduğu gibi göstermişlerdir.

$$\frac{dA_t}{dt} = 1{,}4 \times 10^{-12} S_L (1 - 0{,}023 S_a)$$

Burada S_L sediment miktarı (gm/m^3), S_a deniz suyunun tuzluluğunu ifade etmektedir.

Petrol sızıntının başlangıç safhasında, yani kısa vadede, pek çok petrol türünün yoğunluğu suyun yoğunluğundan az olduğundan sedimentasyon süreci önemsiz görülmektedir (Chen ve diğerleri, 2019: 416). Sızıntının uzun vadeli etkilerinin en önemli belirleyicisinin ise petrolün çözünme derecesinin ve petrol parçacıklarının askıdaki ve deniz tabanındaki sedimentlerle olan etkileşiminin olduğu düşünülmektedir (Mackay ve diğerleri, 1983: 334). İyi analiz edilmiş birkaç petrol

sızıntısında gösterilmiştir ki, sızıntı miktarının %10'u gibi önemli oranda petrol, sedimentasyon süreci ile deniz tabanına çökelebilmektedir (Chanton ve diğerleri, 2015: 847). Bu miktarlar deniz dibinde bunlarla temasa geçen deniz biyotası için çok zararlı olabilmekte dolayısıyla deniz ekosistemini olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Fingas, 2017: 445).

Yukarıda bahsedildiği gibi yayılma, doğal dağılma, adveksiyon ve sedimentasyon süreçleri petrol sızıntısının denizdeki hareket ve taşınım mekanizmasını açıklayan süreçler olarak değerlendirilmektedir. Petrol denize sızar sızmaz yayılma ve adveksiyon yoluyla deniz yüzeyinde kapladığı alanı genişletmekte ve aynı zamanda taşınmaktadır. Bir süre sonra petrol rüzgar, dalga, akıntı ve türbülans etkisiyle su kolonunda doğal olarak veya çeşitli kimyasallar yardımıyla dağılma sürecine girmektedir. Dağılma sürecinde su kolonuna çekilen çeşitli boyutlardaki petrol damlacıklarından yeterince küçük boyutlu olanlar su kolonuna kalıcı olarak yerleşmekte diğerleri ise tekrar yüzeye geri dönüp buradaki petrol birikintisine tekrar yapışarak yayılmaya ve adveksiyona devam etmektedir. Su kolununda kalan petrol damlacıkları daha sonra buradaki sedimentlere yapışarak deniz tabanına çökmekte ve burada birikmektedir.

Takip eden bölümde petrol sızıntısının denizdeki bozunma süreçlerini (weathering process) oluşturan buharlaşma, emülsifikasyon, çözünme, foto-oksidasyon ve biyolojik bozunma süreçleri anlatılmaktadır.

2.3.2. Petrol Sızıntısının Denizdeki Bozunma Süreçleri

Petrol denize döküldüğünde veya saçıldığında bir dizi dönüşüm sürecine maruz kalmaktadır. Bu dönüşüm süreçlerini genel olarak bozunma ve hareket şeklinde iki genel gruba ayırmak mümkündür. Bozunma ve hareket süreçleri üst üste binen süreçlerdir ve bozunma hareketin nasıl olacağını etkileyebilirken bunun tam tersi de aynı anda mümkündür (Fingas, 2017:201).

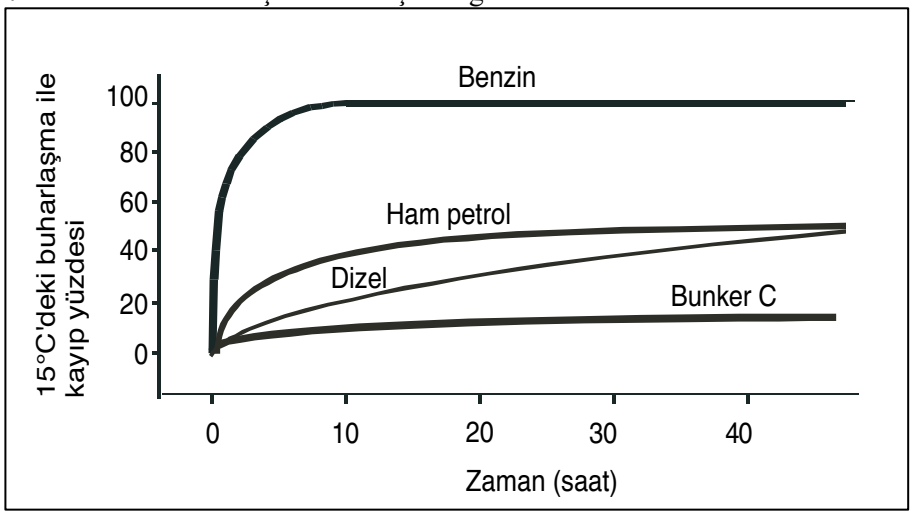
Bozunma petrolün denize saçılmasından bir süre sonra fiziksel ve kimyasal kompozisyonunun değişmesidir. Bozunma süreci buharlaşma, emülsifikasyon, çözünme, foto-oksidasyon ve biyolojik bozunma aşamalarını içine alan bir süreçtir (Afenyo ve diğerleri, 2016: 234, 241).

2.3.2.1. Buharlaşma

Buharlaşma, petrolün denize dökülmesinden hemen sonra başlayıp kısa süre sonra son bulan en önemli bozunma mekanizmalarından bir tanesidir (Töz ve Köseoğlu: 2018: 219). Buharlaşma petrol sızıntısının başladığı andan sonraki ilk 48 saatte petrol birikintisinde hacim bakımından en çok kayba sebep olan süreçtir. Çevresel koşullara ve petrol tipine bağlı olmak kaydıyla ve özellikle hafif petroller için buharlaşma tek başına yaklaşık bir hesapla petrol kütlesinin %25'i ila %40'ı arasındaki bir parçasını deniz yüzeyinden uzaklaştırabilmektedir (Azavedo ve diğerleri, 2014: 135).

Petrolün denize dökülmesinin hemen ardından çok yüksek ve hızlı olan buharlaşma oranı sonrasında önemli ölçüde yavaşlamaktadır. Çoğu petrol türünün buharlaşma oranı zaman içerisinde logaritmik bir eğriyi takip etmekle birlikte bazı petrol türleri zamanın karekökü ile bağlantılı bir şekilde buharlaşmaktadır. Buharlaşma derecesine bağlı olarak petrolün viskozite ve yoğunluk gibi bazı özellikleri önemli ölçüde değişebilmektedir. Ağırlığının %40'ı buharlaşan bir petrolün viskozitesi bin kat artabilmekte, yoğunluğu %10 ve parlama noktası %400 yükselebilmektedir (Fingas, 2017: 422).

Şekil 17: Bazı Petrol Türleri için Buharlaşma Eğrileri



Kaynak: (Fingas, 2017: 421)

Petrol ve petrol ürünleri kompozisyon bakımından binlerce bileşen ihtiva ettiklerinden dolayı buharlaşmaya maruz kaldıkça kimyasal yapıları değişmektedir.

Bunun nedeni buharlaşma noktası düşük ve farklı olan hafif bileşenlerin yüksek olan ağır bileşenlere göre ortamdan daha hızlı buharlaşarak çekilmesidir (Lehr, 2001: 40). Saf ve kaynama noktası yüksek sıvıların buharlaşma süreçlerinde etkili olan hava sınır katmanlı buharlaşma prensibi, petrol gibi karmaşık yapıya, düşük ve farklı kaynama noktalı bileşenlere sahip karışımların buharlaşma süreçlerini açıklamak için yeterli değildir. Onun yerine difüzyon kontrollü buharlaşma mekanizması ve bunun hava sınır katmanlı mekanizma ile kombinasyonu petrol karışımının buharlaşma sürecini açıklamak için daha uygundur (Fingas, 2015: 207, 208).

Ham petrol gibi karmaşık yapılara sahip petrol karışımlarının buharlaşma süreçlerini modellemek meydan okuyucu zorlu bir iştir ve sürecin arkasındaki mekanizmayı anlamayı gerektirmektedir. Petrol birikintisinin buharlaşmasını modellemek amacıyla yapılan çalışmalar teorik modeller ve deneysel korelasyonlar olmak üzere iki ana kategoride toplanmaktadır. Geçmişte geliştirilen teorik modellerin çoğu hava sınır katmanlı yaklaşım kavramını adapte ederek suyun buharlaşmasını modelleyen matematiksel formülleri kullanmışlardır (Kotzakoulakis ve George, 2018: 443). Blokker (1964), petrolü sözde tek bir bileşenden (pseudo-companent) ibaret bir akışkanmış gibi düşünerek denizdeki petrol birikintisinin buharlaşmasına has ayrı formülleri geliştiren ilk çalışma olmuştur (ASCE, 1996: 597; Fingas, 2011: 205). Stiver ve Mackay (1984) Mackay ve Matsugu (1973)'ya dayanan çalışmada analitik yaklaşımla buharlaşma oranını hakim rüzgar hızındaki kütle transfer katsayısının, birikinti alanının, akışkanın buhar basıncının, gaz sabitinin ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak formüle etmiştir. Bu formül petrol birikintisinin buharlaşmasının modellenmesinde zaman içerisinde en sık kullanılan formül olmuştur (ASCE, 1996: 598; Afenyo ve diğerleri, 2016: 241; Kotzakoulakis ve George, 2018: 443). Bahse konu formül aşağıdaki gibidir (Stiver ve Mackay, 1984: 834):

$$N = \frac{k.A.P}{R.T} \Longrightarrow \frac{dF_v}{dt} = \frac{k.A.P_v}{(V_0.R.T)}$$

Burada N buharlaşan molar akışını (mol/s), k hakim rüzgar şartlarındaki kütle transfer katsayısını (m/s), A birikinti alanını (m^2), P akışkanın buhar basıncını, R evrensel gaz sabitini, T Kelvin cinsinden sıcaklığı, F_v buharlaşan kısmın hacmini (m^3), t zamanı (s), v sıvının molar hacmini (m^3/mol), V_0 dökülen sıvının başlangıç hacmini (m^3) ifade etmektedir.

Diğer bazı araştırmacılar petrolün birden çok sayıda pseudo-companent bileşeninden ibaret olduğunu düşünmüş ve bunların her biri için farklı buharlaşma oranları atayan bir yaklaşım geliştirmiştir fakat hava sınır katmanının buharlaşmayı kontrol eden tek mekanizma olduğunu ve sıvı fazın buharlaşma süresi boyunca homojen kaldığını varsaymışlardır (Kotzakoulakis ve George, 2018: 443). Payne ve diğerleri (1984) ve Payne ve McNabb (1985) pseudo-companent yaklaşımıyla geliştirdikleri yöntemde atmosfere doğru olan buharlaşma akışının bileşenin molar hacmine, buhar basıncına ve moleküler ağırlığına bağlı olduğu bir buharlaşma algoritması ortaya koymuşlardır. Jones (1997) kullanılan bileşenin kaynama noktasına vurgu yapan ve molar hacim, buhar basıncı ve moleküler ağırlıkla ilgili basitleştirilmiş bir pseudo-companent modeli geliştirmiştir. Burada oluşturulan modelin işleyebilmesi için bileşenlerin kaynama noktalarının ve başlangıçtaki hacim fraksiyonlarının belirlenmesi gerekli ve yeterli kılınmıştır. Ayrıca bu çalışmada petrolün deniz yüzeyindeki buharlaşma oranını hesaplayan analitik, pseudo-companent ve deneysel yöntemler mukayese edilmiş ve pseudo-companent yönteminin en güvenilir ve esnek yöntem olduğu, Stiver ve Mackay'ın (1984) analitik yönteminin ise buharlaşma oranını abartılı bir biçimde fazla hesapladığı tespit edilmiştir (Reed, 1999: 8).

Fingas (1996, 1997, 1998, 1999, 2004) gerçekleştirdiği çalışmalarında damıtma verilerine, sıcaklığa ve zamana dayalı, birikinti alanının ve kalınlığının, rüzgarın ve türbülansın etkilerini göz ardı eden deneysel bir formül elde etmiştir. (Azavedo ve diğerleri, 2014: 135; Spaulding, 2017: 11). Sırasıyla 1996 yılındaki ilk çalışmasında 19 farklı petrol türü üzerine gerçekleştirdiği deneyler sonucu zamana bağlı buharlaşmayla meydana gelen kayıp yüzdesi ve mutlak ağırlık kaybı için en uygun denklem parametrelerini belirlemiştir. Gözlemlenen 16 petrol türünün buharlaşma oranlarının logaritmik eğriye uyduğunu 3 tanesinin ise zamanın karekökü ilişkisiyle gerçekleştiğini tespit etmiştir (Fingas, 1996: 191). 1997 yılındaki çalışmada buharlaşmanın zamana bağlılığı yine birkaç ham petrol ve petrol ürünü için deneylerle test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar 1996 yılındaki çalışmayla uyumluluk göstermiştir. (Fingas, 1997: 227). Fingas petrolün buharlaşmasının hava katmanlı tabakanın doyumu ile düzenlenip düzenlenmediğini ve aynı zamanda rüzgarın buharlaşma üzerindeki etkisini 1998 yılında gerçekleştirdiği deneylerle izlemiştir. Elde ettiği sonuçlar hava katmanlı tabaka mekanizmasının petrol için buharlaşmayı düzenlemede

baskın mekanizma olmadığını ve buharlaşma oranının bütün rüzgar durumları için benzer olduğunu fakat rüzgarsız durumlarda azaldığını göstermiştir (Fingas, 1998: 41). 1999 yılında Fingas gerçekleştirdiği deneylerle bu kez petrol birikintisi alanının ve kalınlığının ve ayrıca türbülansın buharlaşma oranı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı sonucuna ulaşmıştır. Petrolün buharlaşması için önemli bulunan faktörlerin sıcaklık ve zaman olduğunu ifade etmiştir. Basit bir denklem formunun petrolün buharlaşmasını tanımlamaya yeterli olacağını belirtmiştir (Fingas, 1999: 281). Bahsi edilen denklem formları petrol kompozisyonuna, özellikle eş zamanlı buharlaşan bileşik sayısına, 180ºC'deki damıtılma oranına $(\%D)$, suyun sıcaklığına (T) ve dökülmeden sonra geçen zamana (t) bağlı olarak iki şekilde aşağıdaki gibi gösterilmektedir. (Fingas, 2004: 27):

$$Buharlaşma\ oranı = \begin{cases} [0{,}0254(\%D) + 0{,}01(T-15)]\sqrt{t}\ ;\ 3 \leq bileşen \leq 7 \\ [0{,}165(\%D) + 0{,}045(T-15)]ln(t)\ ;7 < bileşen \end{cases}$$

Aynı anda buharlaşan 7 taneden fazla sayıdaki bileşenli petrol türleri logaritmik denklemler ile, aynı anda buharlaşan 3-7 arasında bileşenli petrol türleri ise zamanın karekökü ile ilişkili denklemlerle modellenebilmektedir (Fingas, 1997: 227).

Petrol çok sayıda bileşenden oluşan karmaşık bir karışım olduğu için onun buharlaşma sürecini açıklamak su gibi homojen sıvıların buharlaşma sürecini açıklamaktan biraz daha farklıdır. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki hava sınır katmanlı mekanizma petrolün buharlaşmasını açıklamaya tek başına yeterli değildir. Petrolün buharlaşması esnasında uçucu bileşenlerin erken buharlaşmasından dolayı geride kalan sıvı fazın fiziksel ve kimyasal özellikleri değişmektedir. Dolayısıyla geride kalan sıvı fazdaki difüzyon oranının petrolün buharlaşmasını düzenleyen ana mekanizma olduğu düşünülmektedir. Günümüzde hala tam olarak anlaşılamayan petrolün denizde buharlaşma süreci için gelecekte yapılan çalışmaların difüzyon kontrollü mekanizma üzerine olması tavsiye edilmektedir.

2.3.2.2. Emülsiyonlaşma

Bir sıvının başka bir sıvının içerisinde küçük damlacıklar halinde dağılmasıyla gelişen süreç emülsiyon süreci olarak tanımlanmaktadır. Petrol denize döküldüğünde,

belirli koşullar altında petrolün içine yerleşen su damlacıkları onun fiziksel ve kimyasal özelliklerinde değişime yol açarak tamamen farklı bir materyal oluşturmakta ve böylece su içeren petrol emülsiyon formu meydana gelmektedir. Yoğun bir köpük veya krema şekline benzeyen bu form genellikle "mus" veya "çikolatalı mus" olarak adlandırılmaktadır (Huang, 1983: 318; Spaulding, 1988: 43; ASCE, 1996: 600; Fingas ve Fieldhouse, 2004: 37).

Emülsiyon oluşum mekanizması henüz tam olarak anlaşılmamış olmasına rağmen bu süreç muhtemelen denizin rüzgar, akıntı, dalga ve türbülansından kaynaklı enerjisi nedeniyle 10-25 μm (0,01-0,025 mm) boyutundaki küçük su damlacıklarının petrolün içine girmeye zorlanmasıyla başlamaktadır. Su damlacıkları yüksek viskoziteye sahip petrolün içine önem arz eden bir derecede girememektedir fakat petrol hafif bir viskoziteye sahipse su damlacıkları petrolün içine girmekte ve buradan hızlıca ayrılmamaktadır. Petrolün içine giren su damlacıkları petrol katmanının dibine doğru çekilmektedir. Asfalt ve reçine buradaki su damlacıkları ile etkileşime girerek onları kararlı hale getirmektedir. Böylece asfalt ve reçine miktarına bağlı olarak emülsiyon oluşabilmektedir (Fingas, 2017: 432). Herhangi bir kararlılık derecesinde emülsiyon oluşabilmesi için gereken koşullara sadece bir buharlaşma periyodundan sonra ulaşılabilmektedir. Bunun sebebi buharlaşmanın viskoziteyi kritik noktaya taşıması ve petrolün içindeki asfalt ve reçine oranını yüzdece arttırmasıdır (Fingas, 2015: 290).

Suyun petrolün içine girmesiyle oluşan emülsiyonlar kararlılık derecelerine göre 5 gruba ayrılmaktadır. Birinci gruptaki emülsiyon formları suyun petrolün içinde %1 oranında çözünebildiği ve petrolde fiziksel ve kimyasal olarak herhangi bir değişikliğe yol açmadığı formlardır. İkinci gruptaki emülsiyonlar nüfuz eden (entrainment) olarak adlandırılan ve petrolün viskozitesi sayesinde onun içinde tutularak kararsız bir karışım oluşturmaktadır. Bu tür emülsiyonlar denizin dalga etkisi nedeniyle petrolle birleşmektedir ve yeterli asfalt ve reçine ortamda bulunmamaktadır (Fingas ve Fieldhouse, 2004: 37; Fingas, 2015: 290; Afenyo ve diğerleri, 2016: 242). Üçüncü emülsiyon tipi kararsız emülsiyonlardır. Bunlar denizin enerjisi azaldığında dakikalar veya birkaç saat içinde su ve petrole ayrışan formlardır. Özellikleri ve görünüşleri açısından kararsız emülsiyonlar başlangıçtaki petrolle neredeyse aynıdır. Dördüncü grubu oluşturan yarı kararlı (mesostable) emülsiyonlar, petrolün

viskozitesinin asfalt ve reçine ara yüzey hareketiyle kombinasyonu sonucu küçük su damlacıklarının belirli bir dereceye kadar kararlı hale gelmesiyle oluşmaktadır. Yarı kararlı emülsiyonlar kırmızımsı bir kahverengiye sahip viskoz sıvılardır ve birkaç gün içinde su, petrol ve kararlı kalıntılara geri ayrışmaktadırlar. Beşinci grup kararlı emülsiyonlardır. Kararlı emülsiyonlar yarı kararlı olanlarla aynı şekilde oluşmakla birlikte ortamda yeterli derecede asfalt ve reçine bulunmasından dolayı geri ayrışmamak üzere kararlı hale gelmektedirler. Kararlı emülsiyonlar başlangıçtaki petrolden fiziksel ve kimyasal olarak farklılaşmaktadır. %70 civarında su içeren petrol emülsiyonları petrol birikintisinin hacmini üç katına çıkarmaktadır. Daha da önemlisi emülsiyon tipine bağlı olarak petrolün viskozitesi 1000 kat artabilmektedir (Fingas ve diğerleri, 1999: 82; Fingas ve Fieldhouse, 2004: 37).

Yukarıdan da anlaşılacağı üzere deniz enerjisi, yoğunluk, viskozite, asfalt ve reçine oranı emülsiyon oluşma sürecini etkileyen faktörlerdir. Emülsiyon oluşma süreci buharlaşma, biyolojik bozunma ve çözünme süreçlerini yavaşlatmaktadır. Aynı zamanda emülsiyonlar petrolün denizden temizlenmesi çalışmalarını da oldukça güçleştirmektedir.

Petrolün denizde emülsiyon haline gelme mekanizmasını ve dinamiğini detaylıca açıklayan ilk çalışma Berridge ve diğerleri (1968) olmuştur. Bu çalışmada emülsiyon oluşma süreci tanımlanmış ve emülsiyonlarla ilgili çeşitli fiziksel özellikler ölçülmüştür. Emülsiyon oluşumu asfalt ve reçine varlığına bağlı işleyen bir süreç olarak tespit edilmiştir. Heagh ve Ellingsen (1977) ve Wang ve Huang (1979) emülsiyon oluşumunun öncelikle artan türbülans ve karışım enerjisi sonucu meydana geldiği kanaatine varmışlardır. Bridie ve diğerleri (1980) asfalt ve reçinenin emülsiyonları kararlı hale getirdiğini ortaya koymuşlardır. Mackay ve diğerleri (1980b) geliştirdikleri modelde emülsiyon oluşumunu rüzgar hızına, petrolde bulunan su hacmine ve petrolün tipine bağlı oran sabitine göre formüle etmişlerdir. Formül aşağıdaki gibidir (Mackay ve diğerleri, 1980b):

$$\frac{dF_{emul}}{dt} = K_{emul}(1 + U_{10})^2 \left(1 - \frac{F_{emul}}{F_{emul}^{final}}\right)$$

Burada, F_{emul} kısmi su içeriğini, F_{emul}^{final} emülsiyonda bulunan en son su hacmini, U_{10} rüzgar hızını (m/s), K_{emul} deneysel ve boyutsuz sabiti, t zamanı (s) ifade etmektedir. Bu formül petrol kirliliği modellerinde emülsiyon mekanizmasını ifade etmek için en

yaygın olarak kullanılan formül olmuştur ve bazı araştırmacılar tarafından çeşitli modifikasyonları türetilerek de kullanılmıştır (Xie ve diğerleri, 2007: 491).

Takip eden yıllarda Mackay ve Zagorski (1982) emülsiyon kararlılığının, su damlacıklarının birleşmesine direnç gösteren petrol üzerindeki bir film tabakası formundan kaynaklandığı hipotezini savunmuşlardır. Bu ince film tabakasının doğasında aynı bileşiklerin birikmesi olduğu düşünülmüş ve bu bileşiklerin daha sonra asfalt ve reçine olduğu anlaşılmıştır. Daling ve Brandvik (1988) bir dizi emülsiyon üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmada petrolün içine su alma kinetiğinin logaritmik bir forma yaklaştığını ve çoğu petrolün maksimum miktardaki suyu yaklaşık 10 saat içinde aldığını gözlemlemişlerdir. Bobra (1992) yapmış olduğu deneyleri anlattığı çalışmasında emülsiyon formunun yüzey aktif madde gibi davranan asfalt ve polar bileşiklerin bir sonucu olduğunu göstermiştir. Ayrıca elde ettiği veriler diğer araştırmacıların sunduğu önceki çalışmalardaki bilgileri desteklemiştir. Asfalt ve polar bileşikleri çözebilecek yeterince aromatik bileşik olmayan bir petrol birikintisinde asfalt ve polar bileşiklerin çökerek su damlacıklarını kararlı hale getirdiğini gözlemlemiş ve bir emülsiyonu kararlı kılabilecek minimum asfalt veya reçine oranını %3 olarak tespit etmiştir.

Fingas ve Fieldhouse (2009, 2011) sayıca 300'den fazla ham petrol ve petrol ürünü üzerine gerçekleştirdikleri çalışmalarda bir petrolün emülsiyon oluşturup oluşturmama durumunu belirleyebilmek için regresyon denklemlerine dayanan ve yoğunluk, viskozite, petrolün asfalt ve reçine içeriğine bağlı olan bir kararlılık dizini (KD) geliştirmişlerdir. KD tahminleri oluşacak emülsiyon tipini belirlemede kullanılabilmektedir. Ayrıca emülsiyondaki su içeriğini, emülsiyon formlarının viskozitesini ve belirli dalga çevresine maruz kalma koşullarında emülsiyon formu oluşma zamanını hesaplayan bir öngörü şeması da sunulmuştur. Sunulan modelin %90 oranında doğru sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Emülsiyon oluşumunun modellenmesi bir şekilde zor olmakla birlikte şu an için deneysel, bulanık mantık ve regresyon modeli yaklaşımları olmak üzere 3 farklı yöntemle gerçekleştirilebilmektedir. Uygulama kısmında çeşitli zorluklar yaratsa da bunların arasından en doğru sonuçları veren yöntem deneysel yöntem, en kötü sonuçları veren ise regresyon yöntemidir (Fingas, 2017:435).

2.3.2.3. Çözünme

Çözünme, çoğu aromatik ve düşük moleküler ağırlıklı bileşiklerden ibaret suda çözünebilen hidrokarbonların yüzey birikintisinden suya çekilip suyla karışması ve böylece homojen bir karışım oluşturması sürecidir (Afenyo ve diğerleri, 2016: 243; Spaulding, 2017: 11). Uçucu bileşiklerin aynı zamanda çözünebilir de olması nedeniyle buharlaşma sürecinin etkilediği hidrokarbonların bir kısmını etkileyen çözünme petrolün denize dökülmesinden hemen sonra en aktif haliyle etkili olmakta ve bu andan itibaren oransal olarak hızlıca azalmaktadır (Spaulding, 1988: 42). Çözünme buharlaşmaya göre çok daha az bir oranda yüzeydeki petrol birikintisinden kayba sebep olmaktadır (Harrison ve diğerleri, 1975: 233). Genellikle deniz yüzeyindeki petrol birikintisinin %1 civarındaki bir miktarı çözünmeye maruz kalmaktadır ve çözünme süreci bu nedenle her petrol kirliliği modelinde hesaba katılmamaktadır (ASCE, 1996: 598). Dolayısıyla çözünme petrol birikintisinin kütle dengesi üzerinde kayda değer bir etkide bulunamamakta ve bu açıdan önem arz etmemektedir (Lehr, 2001: 21). Çözünme sürecinin önemi suda çözünebilen özellikle küçük aromatik bileşiklerin deniz ekolojisi için zehirli olmasından ileri gelmektedir (Liu ve Shang, 2014: 152). Benzin, mazot ve hafif ham petroller deniz suyunu zehirleme ihtimali en yüksek olan petrol ve petrol ürünleridir (Fingas, 2017: 444).

Literatürde yapılmış çalışmalar petrolün denizde çözünme sürecini petrolü 3 farklı yaklaşımla ele alarak açıklamaya çalışmıştır. Bazı araştırmacılar petrolü kütle dengesi mümkün dökme sıvı özelliklerine sahip homojen tek bir sıvı gibi, bazıları yine kütle dengesi mümkün ve sınırlı sayıda sözde sanal bileşen grubundan (pseudo-companents) oluşan bir karışım gibi ve son olarak bazıları da kütle dengesi mümkün olmayan ve bileşene özgü özelliklere sahip belirli bileşenlerden oluşan karmaşık bir karışım olarak düşünmüşlerdir (ASCE, 1996: 599). Çözünmeyi hesaplayabilmek için geliştirilen birçok teknik olsa da iyi ve sürekliliği olan bir model şu an için bulunmamaktadır (Fingas, 2017: 444). Bununla birlikte Cohen ve diğerleri (1980) ile Huang ve Monastero'nun (1982) geliştirdikleri yöntem petrol kirliliği modellerinde çözünme süreci için kullanılmaktadır ve aşağıdaki formülle gösterilmektedir (Cohen ve diğerleri, 1980: 574; Janeiro, 2008: 654; Qiao ve diğerleri, 2019: 859).

$$\frac{dm_{diss}}{dt} = K_d A_d S_0 e^{-0,1t}$$

Burada m_{diss} çözünme nedeniyle kaybedilen kütleyi (kg), K_d çözünme kütle transfer katsayısını (0,01 m/h), A_d su altındaki petrol damlacıkları veya yüzeydeki petrol birikintisi için yüzey alanını (m2), S_0 petrolün başlangıçtaki çözünürlüğünü ve t zamanı ifade etmektedir.

2.3.2.4. Foto Oksitlenme

Foto oksitlenme, güneş ışınlarından kaynaklı radyoaktif enerjiye maruz kalan petrol birikintisindeki aromatik bileşiklerin oksitlenerek polar, suda çözünebilir ve oksijenli bileşiklere dönüşmesi sürecidir (Payne ve Phillips, 1985; Spaulding, 1988: 44; Afenyo ve diğerleri, 2016: 243). Başka bir deyişle foto oksitlenme, petrol hidrokarbonlarındaki indirgenmiş karbonun oksitlendiği ve burada ışığın katalizör görevi gördüğü bir reaksiyondur (Shankar ve diğerleri, 2020: 2). Petrol birikintisinde meydana gelen foto oksitlenme reaksiyonu homojen değildir ve iklimsel koşullara (Fernandez-Varela ve diğerleri, 2006: 410), güneş ışığına maruz kalma oranına ve petrol birikintisinin kalınlığına bağlıdır (Fingas, 2017: 295). Özellikle dalga boyu 300 nanometreden küçük güneş ışınları alifatik ve aromatik bileşikleri fotokimyasal olarak oksitleyerek onları ketonlar, aldehitler, karboksilik asitler ve esterler gibi daha polar bileşiklere dönüştürmektedir (Jacquat ve diğerleri, 1996: 671; NRC, 2003: 95; Fingas, 2017: 295). Foto oksitlenme petrolün fiziksel özelliklerini ve kompozisyonunu değiştirmekte, emülsiyon durumunu, çözünürlüğünü, dağılmasını ve biyolojik bozunma sürecini arttırmaktadır (Nicodem ve diğerleri, 1997: 124; Lehr, 2001: 27).

Foto oksitlenmenin kimyasal mekanizması doğrudan fotolizi ve güneş radyasyonu tarafından üretilen reaktif oksijen türlerinin reaksiyonunu içermektedir (Fernandez-Varela ve diğerleri, 2006: 410). Bununla birlikte bu sürecin petrol birikintisini nasıl etkilediğine dair kesin mekanizması ise tam olarak iyi anlaşılmamıştır (Fingas, 2017: 445). Foto oksitlenmeden sorumlu güneş ışını spektrumu ultraviyole ışınlarıdır ve %5 UV-B ile %95 UV-A'dan oluşmaktadır (Lee, 2003: 157). Foto oksitlenmenin bir petrol birikintisine uyguladığı ana etkiler karbonil grubunun miktarının artması ve özellikle karboksil grubunun oluşması, sülfonid grubunda sülfoksit oksitlenmesi, alkil zincirlerin ve aromatik halkaların oksitlenmesi olarak sıralanmaktadır (Boukir ve diğerleri, 2001: 279).

Foto oksitlenme süreci petrolün denize sızmasından sonraki ilk bir hafta etki göstermemekte fakat uzun vadede ham ve ağır petrol türlerinin deniz çevresindeki bozunma süreçlerinin üzerine önemli bir rol oynamaktadır (Garret, 1998, Prince ve diğerleri, 2003: 154). Huang (1983) hariç çoğu petrol kirliliği modelinde foto oksitlenme süreci modele dahil edilmemiştir. Huang (1983) ise foto oksitlenme sürecini aşağıdaki formül ile ifade etmektedir (Huang, 1983: 319).

$$\frac{dP}{dt} = \left(\frac{B}{70}\right)(1 - C)Y$$

Burada, B petrol birikintisinin yüzeyi ile güneşin radyasyon ışıması arasındaki açıyı, C bulut örtüsü parçasını, Y petrol birikintisi kalınlığına bağlı katsayıyı ve t zamanı ifade etmektedir.

2.3.2.5. Biyolojik İndirgenme

Biyolojik indirgenme (ayrışma veya bozunma), denizde yaşayan mikroorganizmalar tarafından çeşitli enzimler kullanılarak petrolde bulunan hidrokarbon moleküllerinin ara ürünlere ve sonra karbondioksit ve su gibi nihai ürünlere dönüştürüldüğü bir dizi kimyasal reaksiyondur (Atlas, 1995: 178; Socolofsky ve diğerleri, 2019: 205). Deniz çevresindeki petrolün biyolojik bozunma süreci büyük oranda çeşitli bakteri popülasyonlarınca gerçekleştirilmektedir. Ayrıca mantarlar, algler, siyanobakteriler ve mayalar da biyolojik bozunma sürecinde rol alan diğer mikroorganizmalardır (Xue ve diğerleri, 2015: 221). Toplamda 200'den fazla tür bakterinin ve 160'tan fazla tür mantarın hidrokarbonları ayrıştırabildiği tespit edilmiştir. (Prince ve Walter, 2016: 870). Bunlardan bazıları alifatikleri, bazıları mono veya poli aromatikleri bazıları ise reçineyi indirgeyebilme yeteneğine sahiptir (Varjani, 2017: 280). Dünya denizlerinde ve okyanuslarında biyolojik bozunmayı gerçekleştiren bu mikroorganizmalar geniş bir biçimde ve aynı zamanda her yerde bulunacak şekilde yayılmıştır (Atlas, 1995: 178).

Biyolojik indirgenme reaksiyonu mikroorganizmaların kullandıkları mekanizmaya göre kemotrofik-aerobik, kemotrofik-anaerobik ve fototrofik-anoksijenik olmak üzere 3 farklı yolla gerçekleşebilmektedir (Varjani, 2017: 282). Petrol hidrokarbonları biyolojik olarak çoğunlukla aerobik koşullar altında indirgenebilir olsa da anaerobik koşullarda da daha yavaş bozunma oranlarında

hidrokarbonlar indirgenebilmektedir (Atlas ve Hazen, 2011: 6709). Biyolojik indirgenme hızı ve oranı petrolün konsantrasyonuna, kompozisyonuna, moleküler yapısına ve ortamda bulunma şekline, ortam sıcaklığına ve basıncına, ortamdaki çözünmüş oksijen, nitrojen, fosfor ve demir oranına, biyolojik komünitenin yapısına ve bolluğuna, mevsime ve son olarak petrol-su ara yüzeyinin yüzey alanına bağlıdır (Socolofsky ve diğerleri, 2019: 205).

Hidrokarbonların biyolojik bozunma oranları arasında genel bir hiyerarşi mevcuttur. Doymuş bileşikler aromatik bileşiklere ve asfalta göre daha çabuk ayrışmaktadır. Özellikle 12-20 arasında karbon atomu ihtiva eden doymuş bileşikler en yüksek biyolojik ayrışma oranına sahiptir. Doymuş alkanlar aromatik bileşiklere göre biyolojik olarak daha çabuk ayrışırken, daha küçük moleküler yapılı aromatikler de dallanmış alkanlardan, çoklu halkalı ve ikame edilmiş aromatiklerden ve halkalı diğer bileşiklerden biyolojik olarak daha önce bozunmaktadır. Sülfür ve nitrojen içeren polar bileşiklerse mikrobiyal bozunmaya en dirençli olan bileşiklerdir (NRC, 2003: 97; Afenyo ve diğerleri, 2016: 243; Fingas, 2017: 446).

Biyolojik indirgenme organik kirleticiler için uygun bir biyolojik arıtma teknolojisidir. Biyolojik arıtmanın amacı, organik kirleticileri zararsız metabolitlere veya karbondioksit ve suya mineralize etmektir (Seo ve diğerleri, 2009: 279). Petrolün deniz çevresinden uzaklaştırılmasında biyolojik arıtma süreci çevre dostu olması, fayda-maliyet oranının yüksek olması ve etkili ve yerinde müdahaleye uygun bir metot olması nedeniyle petrol kirliliği vakalarında kullanılan önemli bir teknik haline gelmiştir (Xue, 2015: 221; Varjani, 2017: 277).

Geliştirilen modellerde hidrokarbon bileşenlerinin biyolojik ayrışmalarını öngören iki yaklaşım benimsenmiştir. Bunlar birinci dereceden bozunma ve yüzey alanına bağlı bozunma yaklaşımlarıdır. Birinci dereceden bozunma yaklaşımında petrol suda çözünen ve çözünmeyen sıvı olarak iki ayrı safhada değerlendirilmiştir (Socolofsky ve diğerleri, 2019: 205,206). Çözünen hidrokarbonun biyolojik ayrışması aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$C_i(t) = C_{i0}\ exp.(-\lambda_i{}'t)$$

Burada C_i, i hidrokarbonunun konsantrasyonunu (birim hacim başına kütle veya mol), t zamanı,C_{i0} başlangıçtaki hidrokarbon konsantrasyonunu, λ_i biyoloji bozunma oranı katsayısını ifade etmektedir.

Çözünmeyen, damlacık veya birikinti olarak sıvı halde denizde bulunan hidrokarbonun biyolojik ayrışması ise aşağıdaki gibidir.

$$m_i(t) = m_{i0}\, exp.(-\lambda_i t)$$

Burada m_{i0}, i hidrokarbonunun denizde bulunan sıvı haldeki çözünmemiş petrolün başlangıçtaki kütlesini ifade etmektedir. Bu iki denklem de sistemdeki i hidrokarbonunun ayrışmasını zamana göre üstel olarak hesaplamaktadır.

Yüzey alanına bağlı biyolojik bozunma yaklaşımı için önerilen hesaplama Thrift-Viveros ve diğerleri (2015) tarafından sunulmuştur ve aşağıdaki gibidir.

$$\frac{dm_i}{dt} = -\left(\frac{Ak_i}{M}\right) m_i$$

Burada A petrol/su ara yüzeyinin yüzey alanını, $M = \sum m_i$ sıvı petrol birikintisi veya damlasının toplam kütlesini ve k_i oran katsayısını ($k\ddot{u}tle/(birim\ alan \cdot zaman)$) ifade etmektedir.

Bu kısımda petrolün deniz çevresindeki hareketi ve bozunma süreçleri anlatılmıştır. Kirliliğe sebep ilgili petrol türü özelinde yukarıdaki süreçlerin işleyişinin bilinmesi, petrol kirliliğine müdahale konusunda stratejik, taktik ve operasyonel planlamalar yapan ve yürüten yetkililerin karar alma aşamalarında faydalarına olacaktır. Sonraki kısımda denizde petrol kirliliğine müdahalede acil durum eylem planı ve müdahale teknikleri anlatılmaktadır.

2.4. DENİZDE PETROL KİRLİLİĞİNE MÜDAHALE YÖNTEMLERİ

Petrol günümüz endüstriyel dünyasının en önemli enerji kaynaklarından ve hammaddelerinden biridir (Azizian ve Khosravi, 2019: 283). Küresel ekonomideki hızlı büyüme, çeşitli ülkelerin petrole olan talebini yükseltmekte ve bu durum da petrol üzerinden dönen ticaretin ve dolayısıyla denizyolu taşımacılığının hacmini önemli derecede arttırmaktadır (Chen ve diğerleri, 2019: 21). Bu sebeple ham petrolün ve türevlerinin dünya genelinde dağıtımı ve kullanımı deniz çevresi için potansiyel bir tehdit yaratmaktadır (Prendergast ve Gschwend, 2014: 233). Deniz çevresinde petrol kirliliği dünya genelinde sık sık meydana gelen ve petrolün sondajı, üretimi ve taşınması devam ettikçe gelecekte de gerçekleşmesi beklenen bir olaydır (Wang ve diğerleri, 2018: 251; Jorgensen ve diğerleri, 2019: 31). Petrol kirliliği ekolojik, ekonomik ve sosyolojik gibi birçok perspektiften çevreye uzun süreli negatif etkileri olan bir felakettir (Li ve diğerleri, 2016: 7). Örneğin yapılan tahminlere göre 1989 yılından meydana gelen Exxon Valdez tanker kazası sonucu yaşanan deniz petrol kirliliği nedeniyle 250.000 deniz kuşunun öldüğü ve 2010 yılında gerçekleşen Deepwater Horizon petrol kuyusu kazasının 61 milyar dolar maddi zarara neden olduğu düşünülmektedir (Mapelli ve diğerleri, 2017: 860).

Zaman içerisinde meydana gelen ve felakete yol açan yıkıcı petrol kirliliği vakaları bu tür kazalara yönelik etkin müdahale yönetiminin gerekliliğini bizlere göstermiştir (Srinivasa ve Wilhelm, 1997: 554). Petrol kirliliği ile mücadelede her şeyden önce amaç önleyici yasalar, düzenlemeler ve eğitimler ile kirliliğe sebep olabilecek muhtemel kazaların en aza indirgenmesini ve mümkünse hiç olmamasını sağlamaktır. Fakat her şeye rağmen petrol kirliliği gerçekleştiğinde ve müdahale eylemini tetiklediğinde, zamanında ve sağlam kararlar almak hayati bir önem arz etmektedir. Bunun için geliştirilen petrol kirliliğine müdahale karar destek sistemleri erken uyarı, sızıntı modelleme, hassasiyet ve risk analizi, müdahale süreci simülasyonu ve kontrolü, sistem optimizasyonu ve sonuç görüntüleme gibi süreçlere dinamik ve interaktif olarak entegre olmalıdır (Chen ve diğerleri, 2019: 407).

Anthony (1965) tarafından sunulan iş sistemlerinin analizi için hiyerarşik çerçeve dikkate alındığında petrol kirliliğine müdahaleye karar verme sürecinin stratejik, taktik ve operasyonel olmak üzere 3 hiyerarşik seviyeye bölünmesi

mümkündür. Stratejik seviyede, gelecekte olası petrol kirliliğine müdahale için stoklanacak müdahale ekipmanın miktarına, türüne ve konumuna, taktik seviyede petrol kirliliği türüne göre müdahale yöntemi, gönderilecek ekipmanın türü ve olay yerinde kalma süresi gibi toplam müdahale aksiyonuna ve operasyonel seviyede ise petrol kirliliği sahasında müdahale esnasında taktik seviyede belirlenmiş ekipmanın kullanılması ile ilgili detaylara karar verilmektedir (Psaraftis ve Ziogas, 1985: 1477). Taktik ve operasyonel seviyede müdahale karmaşıktır ve büyük ölçüde dökülme bölgesine yakın olan kaynakların stoğuna bağlıdır. Dolayısıyla etkili bir müdahale planlamanın ve kurmanın en mantıklı ilk adımı müdahale kaynaklarının mekânsal dağılımının en stratejik şekilde belirlenmesidir. Stratejik seviyede karar verme süreci acil durum eylem analizini ve akabinde acil durum eylem planını gerçekleştirmeyi gerekli kılmaktadır (Grubesic, ve diğerleri, 2019: 2).

Petrol kirliliği kazalarına karşı oluşturulan herhangi bir müdahale stratejisinin amacı petrol kirliliğinin çevre üzerindeki bütün etkisini en aza indiren etkili ve verimli önlemleri seçmektir (Farooq ve diğerleri, 2018: 119). Bir yönetim stratejisi veya acil durum eylem planı, beklenmeyen bir durumun oluşmasından önce, gerçekleşmesi sırasında ve sonrasında atılması gereken adımları ana hatlarıyla çizen bir talimatlar kümesidir (EPA, 1999: 27; Li ve diğerleri, 2016: 9). Acil durum eylem planının amacı petrol kirliliğine müdahalenin bütün yönlerini koordine etmektir. Bu durum, petrol sızıntısının akışını kesmeyi, sızan petrolü kontrol altına almayı ve onu temizlemeyi içermektedir. Petrol kirliliği tıpkı diğer çevresel felaketler gibi öngörülemezdir ve herhangi bir zamanda ve hava koşulunda meydana gelebilmektedir. Bu sebeple etkili bir müdahalenin anahtarı beklenmedik duruma hazır olmak ve en kötü senaryoya göre karşı önlemleri planlamaktır (Fingas, 2012: 19). Geçmişte yaşanmış petrol kirliliği vakaları incelendiğinde yapılan müdahalelerin ekipman ve özelleşmiş müdahale tekniklerinin eksikliğinden kaynaklı olarak kısıtlanmasının yanında acil durumlarla mücadelede organizasyon ve uzmanlık eksikliği ile de kısıtlandığı anlaşılmıştır. Bir acil durum eylem planı herhangi bir petrol kirliliği vakası ile ilgili önceden yanlış gidebilecek bütün faktörlerin ihtimallerini hesaba katmakta ve kirliliğe müdahaleye yardımcı olacak stratejileri, kaynakları ve temasları dahil ederek gerçekleşme potansiyeli olabilecek olayları düşünmektedir. Deniz petrol kirliliğinin karmaşık yapısına rağmen iyi tasarlanmış acil durum eylem planı kolay uygulanabilir olmalıdır

ve genellikle hasar tespiti, hassasiyet ve kırılganlık analizi, risk değerlendirmesi ve müdahale aksiyonunu içermelidir. Planın geliştirilmesi ve uygulanması müdahale topluluğunun bir ekip olarak birlikte çalışmasını ve ayrıca sorunsuz ve işlevsel bir müdahalenin güvencesi için kişiler arası ilişkiler kurmayı sağlamaktadır (EPA, 1999: 27; Chen ve diğerleri, 2019: 422). Şehirler, bölgeler ve ülkeler için acil durum eylem planları belirli bir müdahale aksiyonundan ziyade roller ile sorumlulukları belirlemeyi ve müdahale organizasyonları arasında iş birliğini gerçekleştirmek için bir temel sağlamayı amaçlamaktadır. Çoğu acil durum eylem planı aşağıdaki prosedürleri içermektedir (Fingas, 2012: 20)

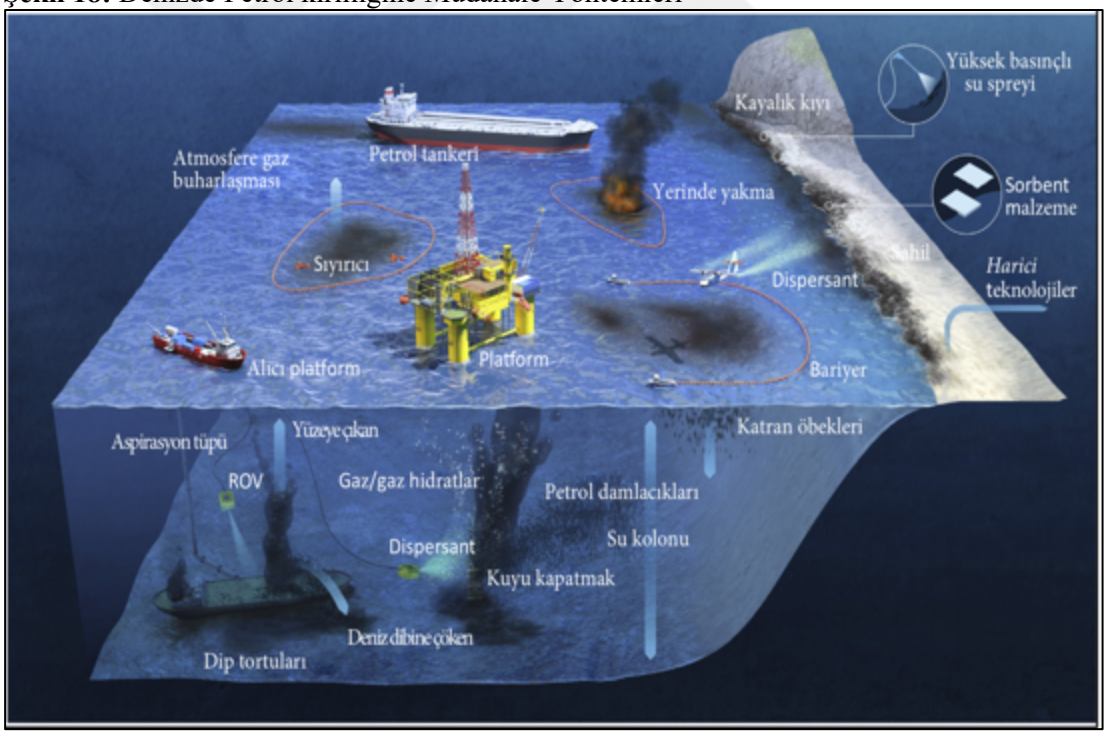
- Bir petrol dökülmesi gerçekleştikten hemen sonra bunun bildirilmesi gereken kişilerin ve kurumların listesi
- Sorumlu kişilerin ve sorumluluklarının listelendiği bir organizasyon şemasının yanı sıra olay gerçekleştikten birkaç saat sonra onların uygulamaları gereken aksiyonların listesi
- Alana özel eylem planları
- Müdahalenin, ekip arasında koordinasyonla yürütülmesini sağlayacak iletişim ağı
- Öncelikli koruma alanları
- Kirliliği kontrol altına alma ve temizleme için operasyon prosedürleri
- Alan hakkında teknik bilgi içeren referans kaynakları
- Halkı bilgilendirme ve kayıt tutma prosedürleri
- Mevcut ekipmanların, sarf malzemelerinin ve diğer kaynakların türü ve konumunun envanteri
- Tipik dökülmeler için senaryoları ve belirli müdahale eylemlerine karar vermek için karar ağaçları

Yukarıda bahsedilen ifadelerin ışığı altında petrol kirliliği acil durum eylem planının en temel amacı ise uygulanabilir ekonomik ve politik kısıtlamalara tabi olarak müdahale süresini minimize etmektir (Iakovou ve diğerleri, 1994: 458). Dolayısıyla acil durum eylem planı, denizde petrol kirliliğinin verdiği hasarı en aza indirmede çok önemli bir yere sahiptir (Ventikos ve diğerleri, 2004: 53).

Petrol kirliliğine müdahale eylemi aşırı kompleks ve zorlayıcı olan disiplinler arası bir tecrübedir. Operasyonel karar verme sürecinde müdahale eylemi dökülen

materyalin doğası, bozunma ve biyolojik indirgenme süreci, çevresel koşullar, etkilenen doğal kaynakların hassasiyeti, müdahale teknolojisinin seçimi ve etkililiği gibi çok çeşitli hususları ve eylemleri birleştirmektedir (Ornitz ve Champ, 2002: xv). Kullanılacak olan müdahale stratejisi ve teknolojisi için kirliliğe sebep olan petrolün türü ve miktarı, kaza alanının coğrafik, ekolojik, politik ve ekonomik özellikleri, hava ve deniz koşulları ve kazanın gerçekleşme zamanı belirleyici faktörler olmaktadır (Ivshina ve diğerleri, 2015: 2; Azizian ve Khosravi, 2019: 283). Denizde petrol kirliliğine müdahale yöntemleri halihazırda mekanik, kimyasal, termal ve biyolojik olmak üzere 4 ana grupta toplanmaktadır (Nordvik, 1995: 18; Ornitz ve Champ, 2002: xv; Ventikos, 2004: 53; Dave ve Gahly, 2011: 426; Li ve diğerleri, 2016: 15). Şekil 18 denizde petrol kirliliğinin antropojenik nedenlerini ve buna müdahale yöntemlerini göstermektedir.

Şekil 18: Denizde Petrol kirliliğine Müdahale Yöntemleri



Kaynak: (Mapelli ve diğerleri, 2017: 861)

Şekil 18 deniz yüzeyinde petrol tankerleri ve petrol sondaj platformlarının, yüzey altında ise gemi enkazlarının ve petrol kuyusu kaçaklarının denizde petrol kirliliğine sebep olduğunu göstermektedir. Petrol kirliliği meydana geldiğinde ise mekanik olarak bariyerler, sıyırıcılar ve kirlilik sahile vurduğunda emici materyallerle

birlikte kayalık yapıya sahip kıyılarda yüksek basınçlı su püskürtülmesiyle, kimyasal olarak dağıtıcı maddelerin ortama dahil edilmesiyle, termal olarak yerinde yakma eylemiyle petrol kirliliğine müdahale edildiği görülmektedir.

Müteakip kısımda denizde petrol kirliliğine müdahale tekniklerine ve bu kapsamda kullanılan müdahale ekipmanlarına ayrıntılı olarak değinilmektedir.

2.4.1. Mekanik Müdahale

Bariyerler, sıyırıcılar, pompalar, depolama üniteleri ve emici maddeler vasıtasıyla petrolün denizde yayılımını belirli hassas alanlara gelmeden engellemek için onu sınırlama ve yüzeyden toplama şeklinde gerçekleştirilen müdahale yöntemi mekanik müdahale olarak tanımlanmaktadır (Dave ve Gahly, 2011: 426). Mekanik müdahale metodu petrolün türüne ve çevre koşullarına bağlı olarak etkili olabilmektedir. Petrolün deniz yüzeyinden direkt uzaklaştırılmasından ve bu sırada çevreye herhangi bir termal ve kimyasal etkide bulunmamasından dolayı en çevre dostu müdahale yöntemi olarak düşünülmektedir. Bu nedenle mekanik müdahale yöntemleri yüksek sermaye yatırımları ve karmaşık işletim durumlarına rağmen en yaygın müdahale yöntemleri olarak kullanılmaktadır (Ventikos, 2004: 53; Wang ve diğerleri, 2018: 251). Mekanik müdahale yöntemi petrolün su yüzeyinde yüzebildiği ve dağılma sürecinin henüz başlamadığı sürece uygulanabilir bir yöntemdir ve bu nedenle çoğu petrol türü için mekanik müdahale petrolün denize dökülmesinden hemen sonra derhal başlamalıdır (Doerffer, 1992: 133).

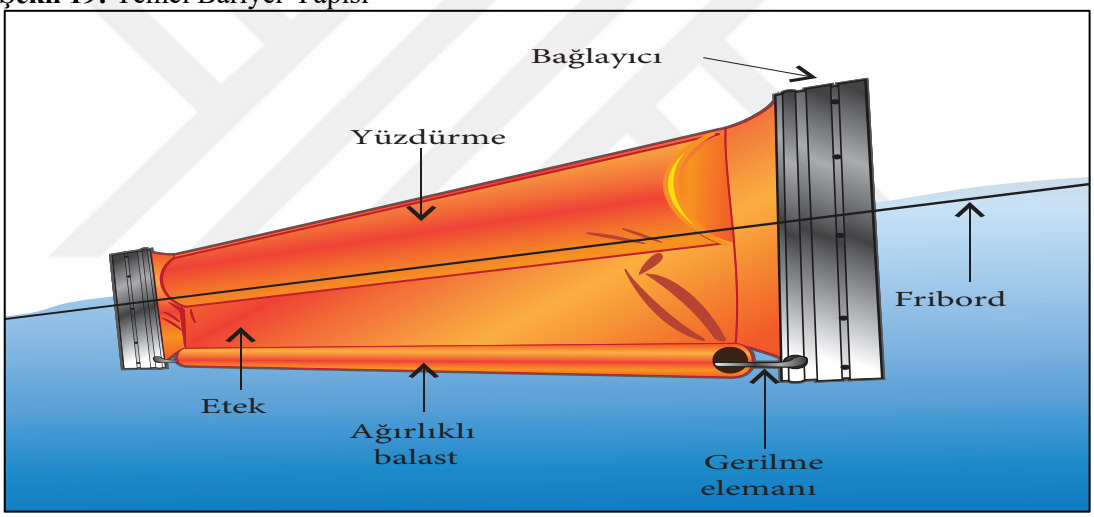
Mekanik müdahale ekipmanları, özel olarak dizayn edilmiş ve donatılmış petrol kirliliği müdahale gemileriyle petrol kirliliğinin gerçekleştiği deniz sahalarına ulaştırılmaktadır. Bariyerler, sıyırıcılar, pompalar, depolama üniteleri ve emici materyaller mekanik müdahale ekipmanları olarak sıralanabilmektedir (BOEM, 2019: 30).

2.4.1.1. Bariyerler

Bariyerler, petrol gibi deniz yüzeyinde yüzen maddelerin hareketini ve yayılmasını kontrol altına alarak engelleyen kuşatıcı yapılardır (Ventikos, 2004: 53).

Bu yapılar müdahale operasyonu için kirlilik sahasına en önce yerleştirilen yapılardır. Görevleri sıyırıcılar veya yakma işlemi için petrolü toplamak, petrolü toplama alanına ve hassas alanlardan uzağa yönlendirmek, emici materyallerin etkili olması için petrolü belli bir alanda yoğunlaştırmak ve kıyı şeridini korumaktır (Exxon Mobil, 2014: 88). Bariyerlerin bölümleri su hattının altında ve üstünde uzanan dikey perdelere benzemektedir. Bu bölümler petrolün bariyerin altından ve üstünden geçmesini engellemekle birlikte onun yüzmesini ve gergin bir şekilde durmasını sağlamaktadır. Bariyerler her iki ucunda birbirine kenetlenmeye, çekilmeye veya demirlemeye yarayan bağlantı noktaları olacak şekilde 15 veya 30 metre uzunluğunda, farklı uygulamalar için çeşitli dizaynlarda, boyutlarda ve materyallerle üretilmektedir (Fingas, 2012: 79).

Şekil 19: Temel Bariyer Yapısı



Kaynak: Fingas, 2012: 80

Şekil 19'da görüldüğü üzere bir bariyer onun yüzmesini sağlayan şişirilebilir veya köpükle dolu deniz yüzeyinin üstünde yer alan yüzdürme kısmından, yüzeyin altında gergin ve dik durmasını sağlayan etek, ağırlık balastı ve gerilme elemanından ve diğer bariyerlerle birleşmesine olanak veren her iki yandaki bağlantı noktalarından oluşmaktadır.

Kullanım koşulları ve yapıları dikkate alındığında bariyerleri perde bariyerler, çit bariyerler, kıyı sızdırmaz bariyerler ve yangın dirençli bariyerler olmak üzere 4 gruba ayırmak mümkündür. Perde bariyerler güçlü akıntılar ve dalgaların olduğu koşullarda, çit bariyerler rüzgar, dalga ve akıntının zayıf olduğu koşullarda, kıyı

sızdırmaz bariyerler gelgit bölgelerinde kıyıları korumak amaçlı ve yangın dirençli bariyerler yerinde yakma müdahalesi uygulanacağı durumlarda kullanılmaktadır (Ventikos, 2004: 53; Fingas, 2012: 82). Perde bariyerler de yüzdürme elemanlarının yapısına göre dahili köpüklü, kendi şişen ve basınçla şişen olmak üzere 3 gruba ayrılmaktadır. Perde ve çit bariyerler yaygın kullanıma sahip bariyerlerdir. Kıyı sızdırmaz bariyerler, yangına dayanıklı, emici materyallerle üretilmiş bariyerler ve denizaltında hava kabarcığı kullanarak yönlendirici duvar yaratan bariyerler ise özel bariyerlerdir (Exxon Mobil, 2014: 97).

Tablo 9: Bariyer Seçme Matrisi

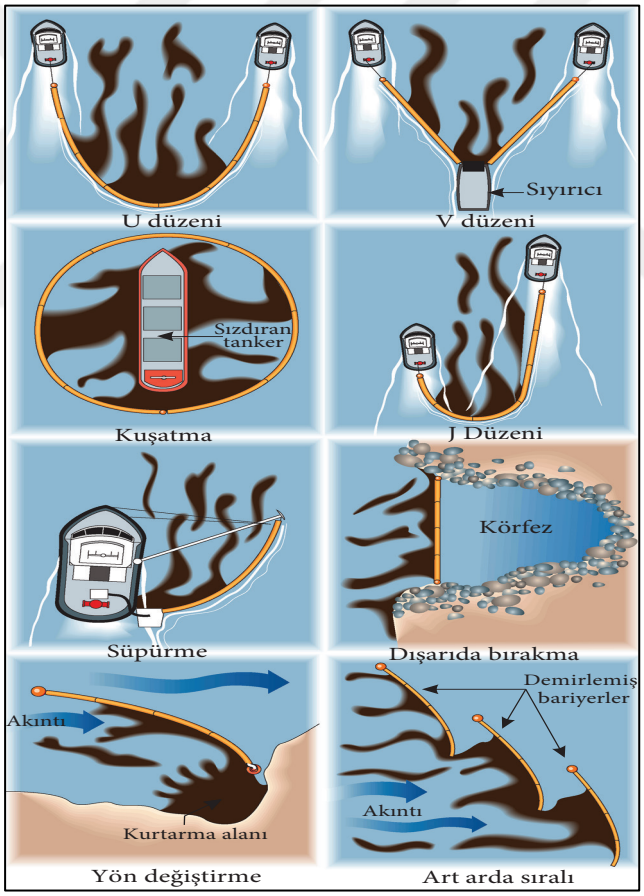
		Bariyer Tipi			
		Dahili Köpüklü	Kendi Şişen	Basınçla Şişen	Çit
Çevresel Koşullar	Açık Deniz (dalga yüks.>0,91m, akıntı <1knot)	Makul	Makul	İyi	Kötü
	Korunaklı Sular (dalga yüks. 0,3-0,9m., akınıtı <1knot)	İyi	İyi	İyi	Makul
	Sakin Sular (dalga yüks. <0,3m., akıntı<0,5 knot)	İyi	İyi	İyi	İyi
	Yüksek Akıntı (>1 knot)	Makul	Kötü	Makul	Kötü
	Sığ Sular (<0,3 m.)	İyi	Makul	Makul	Kötü
Performans Özellikleri	Enkazda Operasyon	İyi	Kötü	Makul	Makul
	Aşırı Yüzme	Makul	İyi	İyi	Kötü
	Dalgaya Tepki	Makul	Makul	İyi	Kötü
	Dayanıklılık	Makul	Kötü	İyi	İyi
	Petrol Tutma Kabiliyeti (0-2m.)	Makul	İyi	Makul	İyi
Kolaylık Özellikleri	Kurulum	İyi	İyi	Makul	İyi
	Taşıma Kolaylığı	Makul	İyi	Makul	Makul
	Temizleme Kolaylığı	İyi	İyi	İyi	İyi
	Kompakt Olma	Kötü	İyi	İyi	Kötü

Kaynak: (Exxon Mobil, 2014: 98)

Tablo 9'da görülen bariyer seçim matrisinden en faydalı bariyeri seçebilmek için ilk olarak bariyerin kullanılacağı en olası çevre koşulları saptanmalı ve kabul edilebilir bir dereceye (iyi veya makul) sahip olanlara dikkat edilmelidir. Sonra amaçlanan müdahale için en çok ihtiyaç duyulan performans özellikleri tanımlanmalıdır. İlk adımda belirlenen bariyer tipinden iyi veya makul derecede performanslı olan bariyer seçilmelidir. En sonunda kolaylık özelliklerinden en arzulanan bariyer belirlenmeli ve 1. ve 2. adımlarda seçilen bariyer tipinden iyi veya makul derecede kolaylık özelliği olan seçilmelidir (Exxon Mobil, 2014: 99).

Her ne kadar bariyerler sakin sularda, açık denizlerde ve bazı hızlı sularda kullanılabilse de bariyerlerin etkili operasyon aralığı, güçlü akıntıları ve dalga kırılmalarını tetikleyen sert ve rüzgarlı havalarda sınırlanmaktadır (Chen, 2019: 412). Çoğu bariyer sakin sularda en iyi performansını sergilemektedir. Dalga yüksekliğinin 1-1,5 metreyi ve akıntının saatte 1 knotu aştığı durumlarda ise bariyerlerin performansı azalmaktadır. Sert denizler için geliştirilen yeni tasarımlar ile 3 knot akıntı ve 3 metre dalga yüksekliğinde etkili olabilecek bariyerler üretilebileceği düşünülmektedir. Aynı zamanda 0,7-1 knot olan bariyerlerin verimli çekilme hızlarının da son gelişmelerle birlikte özellikle kuzey denizi gibi sert ortamlarda 5 knota kadar çıkabileceği düşünülmektedir (Ivshina ve diğerleri, 2015: 8).

Şekil 20: Bariyer Kullanma Yöntemleri

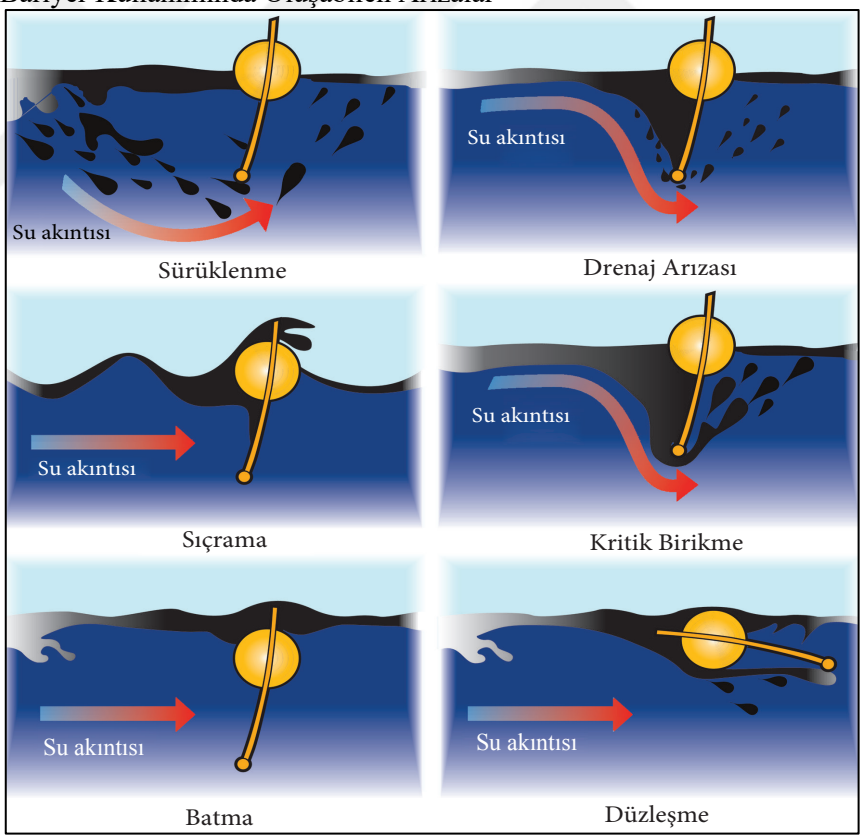


Kaynak: (Fingas, 2012: 86)

Şekil 20'de gösterildiği gibi bariyerler petrol kirliliğini kuşatma ve yönlendirme amacıyla çeşitli yerleştirme planlarında kullanılmaktadır. Kuşatma amaçlı olarak açık denizde kullanıldıklarında U, V ve J biçim düzenlerinde çekme

botları tarafından iki ucundan saatte 1 knotun altında çekilerek kullanılabilmektedirler. Buradaki amaç petrol sızıntısını sıyırıcılar için bir yerde toplamak ve bunun için sızıntının yönünü sıyırıcıya doğru yöneltmektir (Exxon Mobil, 2014: 110). Ayrıca saptırma amaçlı olarak kıyı bölgelerine yakın yerlerde çemberleme, süpürme, dışarda bırakma, yön değiştirme ve ardışık sıralanma formasyonlarında da dizilebilmektedirler (Doerferr, 1992: 141; Cormack, 1999: 177; Fingas, 2012: 85). Bariyerler, ardışık form geniş nehirler ve güçlü akıntıların tek bir bariyeri yetersiz kıldığı durumlarda, çemberleme formu sızan petrolün alanını kısıtlamak için sızıntı kaynağının etrafında, liman, dok, koy ve benzeri alanları petrol sızıntısından uzak tutmak için buraların giriş yerlerinde kapatıcı olarak ve süpürme formunda sızıntının yönünü değiştirmek veya gemi bordasına sabitlenen sıyırıcı ile alınması için toplanmak üzere yerlerini almaktadır (Fingas, 2012:85).

Şekil 21: Bariyer Kullanımında Oluşabilen Arızalar



Kaynak: (Fingas, 2012: 87)

Bariyerler akıntı, dalga ve rüzgar etkisinin tek başına veya kombine bir biçimde aktif olduğu durumlarda petrol sızıntısını kuşatmada veya yönlendirmede bazı arızalar

şeklinde başarısız olmakta ve tuttuğu petrolde kayıplara uğramaktadır. Şekil 21 bariyerlerde meydana gelen bu arızaları göstermektedir. Bariyerlerde çevre koşulları ve petrol türü dolayısıyla gerçekleşen bu arızalar sürüklenme arızası, drenaj arızası, kritik birikme, sıçrama, batma arızası ve yatay konumlanma olarak 6 farklı biçimde gerçekleşebilmektedir (Violeau ve diğerleri, 2007: 896; Shi ve diğerleri, 2017: 38).

Sürüklenme arızası genellikle akıntı hızının 0,7 ile 1 knot arasında olduğu durumlarda oluşan türbülans neticesinde petrol damlacıklarının bariyer eteğinin altından kaçması sonucu meydana gelmektedir. Bu arızayı engellemek adına bariyer 90° derecenin altında akıntı hızının bir fonksiyonu olarak 1 knotta 45°-90°, 2 knotta 20°-30°, 3 knotta 15°-20°, 4 knotta 10°-15° açısal değer aralıklarında olacak şekilde yerleştirilebilmektedir (Exxon Mobil, 2014: 93). Sürükleme arızasına benzer şekilde drenaj arızasında da yine akıntı hızıyla alakalı olarak kritik hızı ulaşıldığında fakat bu kez büyük bir miktarda petrol bariyer eteğinin altından akıp gitmektedir. Sürüklenme ve drenaj arızaları genelde hafif petrollerle ilgili uygulamalarda karşılaşılan sorunlardır (Fingas, 2012: 88). Kritik birikme, bariyerce tutulan viskozitesi yüksek petrol birikintisinin akıntının belirli bir kritik hız sınırını aştığı durumlarda son derece küçük bir uzunluğa dengesizce indirgenmesi ve bu durumun petrol birikintisinin bariyerin altından geçmesine sebep olması durumudur (Delvigne, 1989: 143). Sıçrama sert ve kabarmış denizlerde dalgaların bariyerin su üstündeki alanından daha büyük olduğu durumlarda petrolün bariyerin üzerinden sıçraması şeklinde meydana gelmektedir. Ayrıca dalga boyunun dalga yüksekliğine oranının düşük olduğu durumlarda gerçekleşmektedir (Violeau ve diğerleri, 2007: 896). Bariyerin kuvvetli akıntılarda demirlenmesi veya yüksek hızlarda çekilmesi sonucu yüzme özelliğinin kaybolması sonucu batma durumu meydana gelmekte ve petrol birikintisi bariyerin üzerinden akıp gitmektedir. Genellikle diğer arızalar daha evvel vuku bulduğundan karşılaşılması yaygın olmayan bir arızadır (Exxon Mobil, 2014: 95). Gerdirme ve balast elemanlarının hatalı tasarlanması veya kritik hızın üzerindeki hızlarda çekilmesinin sonucu bariyerin deniz yüzeyine dikey konumunu koruyamayarak yüzeyle paralel konuma gelmesi ve bu nedenle üzerinden ve altından petrolün kaçması durumu ise son arıza tipimiz olan yatay konumlanmayı tanımlamaktadır (Fingas, 2012: 89).

Bariyer teknolojilerinin kullanımının fırsat pencerelerinin yani en etkili olduğu durumların çekme operasyonları, çevresel koşullar, bariyerin özellikleri ve petrol özellikleri ile ilgili olduğu anlaşılmıştır. Bariyerlerin dalga uygunluğunu etkileyen hayati özellikleri yapıldığı malzemenin esnekliği, denge ağırlığı, boyuna kuvvetlerinin dağılımı, gövdenin yatay ve dikey esnekliği ve kaldırma kuvvetinin ağırlığına oranıdır (Ornitz ve Champ, 2002: 304).

2.4.1.2. Sıyırıcılar

Petrol sızıntısını bariyerler ile kuşatıp sınırladıktan sonraki adım onu deniz yüzeyinden kaldırmaktır (Doerffer, 1992: 159). Sıyırıcılar genellikle bariyerler ile birlikte kullanılan, petrol ve petrol-su karışımlarını onların fiziksel veya kimyasal özelliklerinde bir değişime yol açmadan su yüzeyinden toplayıp müdahale gemisi üzerindeki depolama tankına aktaran özelleşmiş mekanik araçlardır (Zhong ve You, 2011: 1619; Chen ve diğerleri, 2019: 412). Sıyırıcıların performansını etkileyen faktörler petrol türü, rüzgar, dalga, akıntı, hava ve deniz suyu sıcaklığı, birikinti kalınlığı ve enkaz varlığı olarak sıralanmaktadır. Çoğu sıyırıcı orta viskozite aralığındaki petrol türleri üzerinde en etkili şekilde çalışırken düşük ve yüksek viskozite değerlerinde performans kayıpları yaşamaktadır. Bazı sıyırıcılar ise düşük viskoziteye sahip petrol türleri üzerinde hiç etkili olamamakta ve sadece yüksek viskozite aralığında çalışabilmektedir. Rüzgarlar akıntı ve dalga yaratmadıkça sıyırıcı performansı üzerinde etkili olmamaktadır. Akıntı ve dalga varlığı ise sıyırıcı performansını düşürmektedir. Petrol birikintisinin kalınlığı sıyırıcı sistemlerin etkililiğini belirleyen en önemli faktördür. Neredeyse bütün sıyırıcılar yeterince kalın bir petrol birikintisi üzerinde etkili olmaktadır. Kalınlık azaldığında petrol sıyırma miktarı ve verimliliği de azalmaktadır. Enkaz veya moloz varlığı ise sıyırıcıların çalışma sahasını ve performansını engelleyen bir faktör olabilmektedir. Dolayısıyla sıyırıcı seçiminde sıyırıcının enkaz hassasiyeti dikkate alınması gereken bir faktör olabilmektedir (Schulze, 1998: 2-4; Fingas, 2012: 98).

Sıyırıcılar temel çalışma prensiplerine göre oleofilik veya sorbent sıyırıcılar, savak sıyırıcılar, vakum sıyırıcılar, yükseltici sıyırıcılar ve batırma sıyırıcıları olmak üzere 5 grupta toplanmaktadır (Doerffer, 1992: 160; Azizian ve Khosravi, 2019: 304).

Tablo 10'da bu 5 gruba ait alt sıyırıcı türleri ve bu sıyırıcıların çeşitli çalışma ortamı, viskozite, performans özellikleri ve birtakım imkanlara elverişli olmaları bakımından tercih edilme durumları bir matris aracılığıyla sunulmuştur.

Tablo 10: Sıyırıcı Seçim Matrisi

		Sıyırıcılar																
		Savak					Oleofilik								Hidrodinamik			
		Basit Savak	Kendinden Ayarlı	Arşimet Vidalı	İlerleyen Savak	Savak Bariyer	Tambur	Disk	Yivli Tambur/Disk	Kumaş Kaplı Tambur/Disk	Halat Paspas	Sıfır Bağıl Hız Halat Paspas	Sorbent Kaldırma Kemeri	Fırça	Su Jeti	Daldırma Düzlemi/Kayışı	Döner Kanat	Palet Kemer
Çalışma Ortamı	Açık Deniz	●	●	●	◑	◑	◑	◑	◑	◑	○	○	○	◑	●	●	◑	●
	Korunaklı Su	◑	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	◑	◑	○	○
	Sakin Su	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Yüksek Akıntı > 1knot	●	●	◑	○	◑	●	●	●	●	◑	●	◑	◑	◑	◑	◑	●
	Sığ Su < 0,3m.	○	◑	●	●	●	◑	◑	◑	◑	○	●	●	◑	●	◑	◑	○
	Molozlu ve Buzlu Su	●	●	○	◑	●	◑	◑	◑	◑	○	○	○	○	◑	◑	◑	○
Viskozite	Yüksek Viskozite	●	●	◑	●	●	◑	●	◑	◑	●	●	○	○	○	◑	◑	○
	Orta Viskozite	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Düşük Viskozite	○	○	◑	○	○	◑	◑	○	○	◑	◑	●	●	○	◑	○	◑
Sıyırıcı Özelliği	Petrol/Su Alma Yüzdesi	●	◑	◑	◑	◑	○	○	○	○	○	○	◑	◑	◑	◑	◑	○
	Kurtarma Oranı	◑	●	●	◑	○	◑	◑	○	○	●	◑	◑	◑	●	◑	◑	◑
	Kullanım Kolaylığı	○	○	◑	◑	●	○	○	○	○	◑	○	○	○	◑	●	◑	◑
Sıyırıcının Tekneye Bağlanma İmkanı		✔	✔	✔		✔	✔	✔	✔	✔	✔		✔	✔			✔	✔
Geliştirilebilirlik					✔	✔			✔			✔	✔	✔	✔	✔		✔
Depolama İmkanı					✔	✔	✔	✔	✔	✔		✔	✔	✔	✔	✔		✔

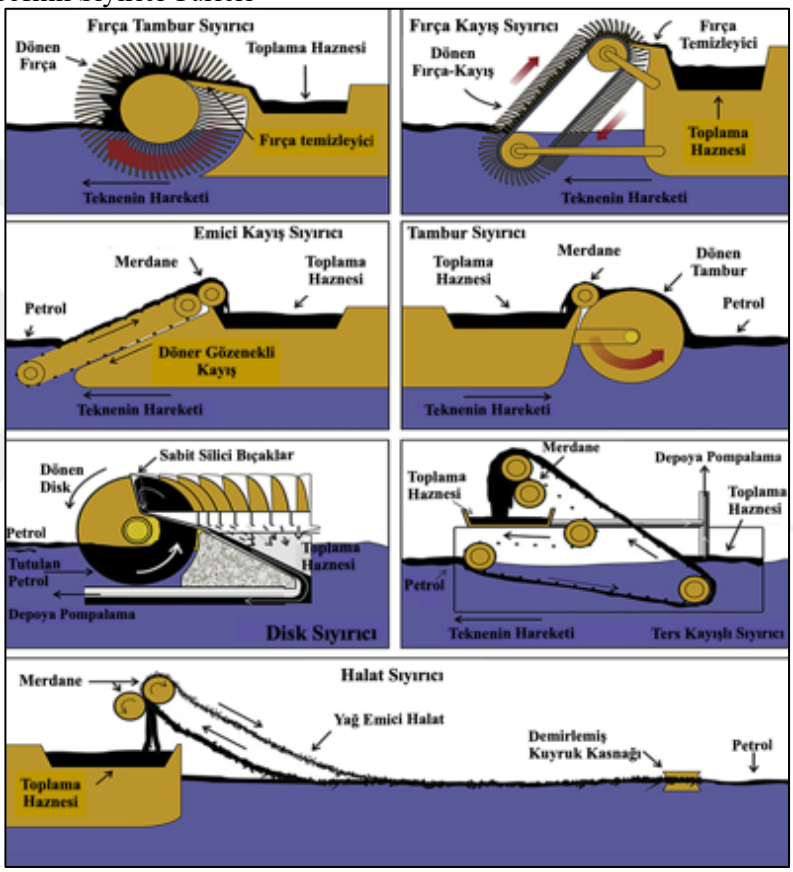
Semboller: ○ İyi, ◑ Makul, ● Kötü, ✔ Evet

Kaynak: (Exxon Mobil, 2014: 169)

Oleofilik veya sorbent yüzeyli sıyırıcılar en yaygın mekanik temizleme ekipmanlarından biridir. Mekanizmaları, oleofilik yani petrol emen aparatların su yüzeyinde dönmesiyle petrolün bu aparatlara yapışması sonucu sudan uzaklaştırılması ve bir silici bıçak ağzının oleofilik yüzeye yapışmış petrolü buradan kazıyarak depolama ünitesine aktarması şeklinde çalışmaktadır. Bu oleofilik aparatlar disk, tambur, kayış, fırça ve halat şeklinde ve çelik, alüminyum, kumaş ve plastik

materyalden ibaret olabilmektedir. Petrolle birlikte çektikleri su miktarı az olduğundan petrol-su kurtarma oranları yüksektir. Buz ve enkaz bulunan ortamlardan etkilenmemekle birlikte en etkili çalıştıkları petrol türü hafif ham petrollerdir. Bunun yanında sıyırıcının tasarımı ve oleofilik yüzeyin tipi diğer petrol türleriyle olan uyumlu ve performanslı çalışma kabiliyetlerini belirlemektedir (Fingas, 2012: 99; Farooq ve diğerleri, 2018: 119).

Şekil 22: Oleofilik Sıyırıcı Türleri

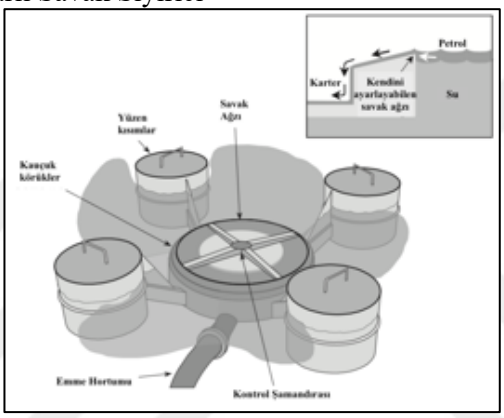


Kaynak: (Azizian ve Khosravi, 2019: 305)

Savak sıyırıcılar petrol sızıntısını deniz yüzeyinden yerçekimi etkisiyle temizleyen sıyırıcılardır (Dave ve Gahly, 2011: 427). Bu tip sıyırıcılar petrol-su ara yüzeyine hizalanmış bir bent veya savak yardımıyla yüzeydeki petrolün sıyırıcı içerisindeki hazneye akmasını sağlamakta ve burada biriken petrol pompalarla harici depolama ünitesine aktarılmaktadır (Doerffer, 1992: 161). Savak sıyırıcılar harici pompa kullananlar, Arşimet vidası şeklinde dahili pompa kullananlar ve indüklenmiş akış etkisiyle petrolün hazneye dolmasını sağlayan sıyırıcılar olmak üzere 3 grupta

sınıflanmaktadır (Schulze, 1998: 94). Aynı zamanda kendinden yükseltilebilir ve ayarlanabilir bentlere sahip savak sıyırıcılar da mevcuttur. Yüksekliği ayarlanabilen bentler petrol-su ara yüzeyine hassas bir şekilde denk getirilerek petrolün yanında hazneye alınan su miktarını önemli derecede azaltabilmektedir (Exxon Mobil, 2014: 174). Buzlu, molozlu ve sert deniz ortamlarında, çok ağır petrol türleri ve tarbal oluşumlarının bulunduğu ortamlarda performansları düşmektedir (Fingas, 2012: 106). Sakin, korunaklı sularda, düşük ve orta viskoziteye sahip kalın petrol birikintileri üzerinde etkili bir biçimde çalışabilmektedirler (Schulze, 1998: 94).

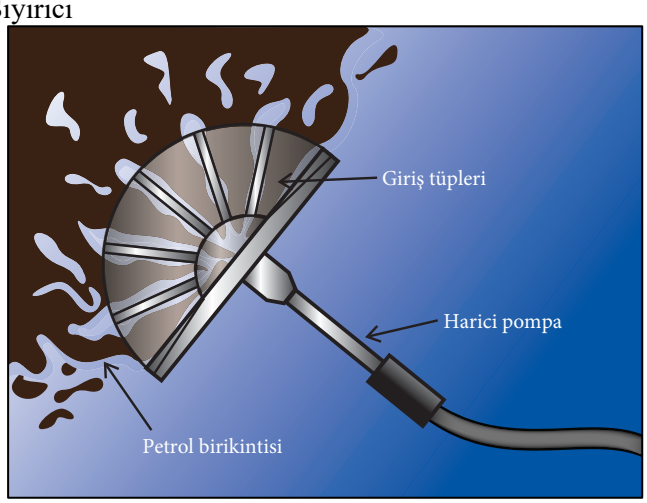
Şekil 23: Kendinden Ayarlı Savak Sıyırıcı



Kaynak: (Exxon Mobil, 2014: 174)

Vakum sıyırıcılar, bir vakum pompası tarafından üretilen hava emiş gücünün su yüzeyinde yüzen geniş ağızlı başlık vasıtasıyla petrol birikintisini çekip depolama tankına transfer etmesi prensibiyle çalışan sıyırıcılardır (Dave ve Gahly, 2011: 427). Vakum sıyırıcılar sığ sular dahil herhangi bir su derinliğinde, geniş petrol viskozitesi değer aralığında, enkaz veya molozun emişi engellemediği durumlarda, sakin sularda ve bariyerler vasıtasıyla bir alanda yoğunlaştırılmış kalın petrol birikintisi üzerinde etkili bir biçimde çalışmaktadır. Bu tip sıyırıcılar dalgalı denizlerde ve emme ağzının tıkanabildiği moloz-döküntülü ortamlarda performans kaybına uğrayabilmektedir (Schulze, 1998: 85). Vakum sıyırıcıların performansını belirleyen asıl faktörler ise emme ağzının genişliği, aktarma hortumunun boyutu ve vakum pompasının kapasitesidir (Deorffer, 1992: 175). Petrol-su ara yüzeyine hassas bir biçimde konumlandırılmaları nedeniyle savak sıyırıcılara benzeyen bu tip sıyırıcılar, kuşatılmış alanlarda ve sığ sularda kullanışlı olmasını sağlayan tasarımlarıyla diğer sıyırıcılar arasında en ekonomik olanlarıdır (Fingas, 2012: 108).

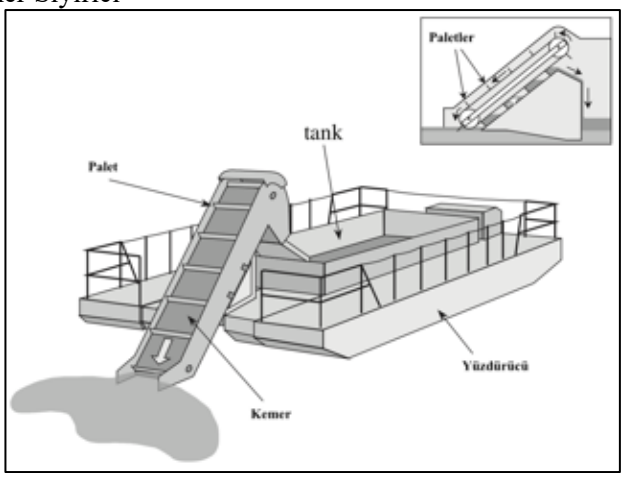
Şekil 24: Vakum Sıyırıcı



Kaynak: (Fingas, 2012: 107)

Yükseltici sıyırıcılar petrolü su yüzeyinden kaldırıp depolama alanına aktarmak için konveyör kullanan araçlardır (Azizian ve Khosravi, 2019: 304). Kullanımı sırasında bir palet kemeri veya tekerleği veya konveyör kemeri su yüzeyine ayarlanarak petrol hareketli bir başka kemer veya plaka üzerinde kurtarma aracına doğru kaldırılmaktadır (Fingas, 2012: 108).

Şekil 25: Palet Kemer Sıyırıcı



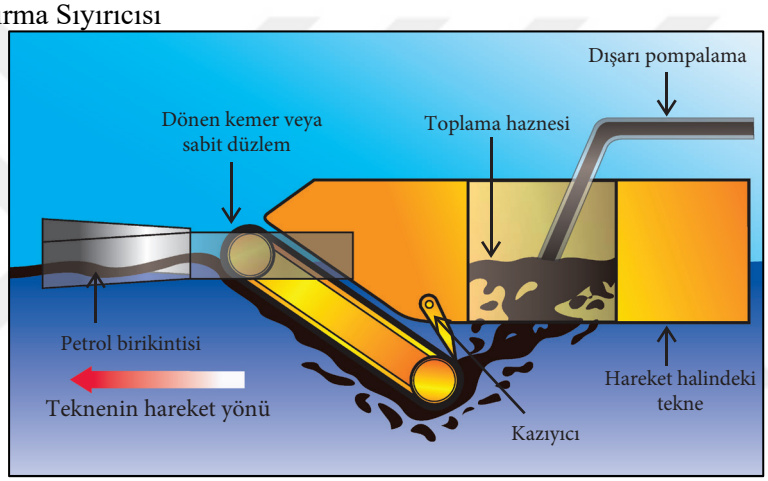
Kaynak: (Exxon Mobil, 2014: 204)

Şekil 25'te gösterilen palet kemer sıyırıcı en sık kullanılan yükseltici sıyırıcılardandır. Bu tür sıyırıcılar orta-yüksek viskoziteye sahip petrol türleri üzerinde, moloz ve enkazın olmadığı ortamlarda, sakin ve korunaklı sularda, düşük akıntıda verimli ve etkili bir biçimde çalışmaktadır. Performansları rampa genişliği ve

uzunluğuna, kemerin hızına, petrol viskozitesine ve akıntı ve dalga değerlerine bağlı olarak değişmektedir (Schulze, 1998: 42).

Batırma sıyırıcıları petrol birikintisine doğru hareket eden bir gemiye şekil 26'da gösterildiği gibi su yüzeyinden aşağıya doğru bir eğimle monte edilen ve petrol-su ara yüzeyine denk getirilen sabit bir panelin veya dönen bir konveyörün ya da kayışın petrol birikintisini suyun altına doğru yönlendirdiği, oradan petrolün yüzme özelliği nedeniyle yükselip toplama havuzunda toplandığı ve buradan pompalarla depolama ünitelerine aktarıldığı sıyırıcı sistemleridir (Exxon Mobil, 2014: 200; Schulze, 1998: 78; Doerffer, 1992: 173).

Şekil 26: Batırma Sıyırıcısı



Kaynak: (Fingas, 2012: 108)

Bu tip sıyırıcılar diğer sıyırıcılara nazaran daha hızlı hareket edebildiklerinden daha geniş alanları kapsayabilmektedirler ve bu nedenle büyük petrol sızıntıları için daha kullanışlı olabilmektedirler. Düşük viskoziteye sahip hafif petrollerde ve görece ince petrol birikintilerinde en iyi performanslarını vermektedirler. Saatte 1 deniz mili hızından büyük akıntılı ve dalgalı sularda aksaklık yaşamadan çalışmaktadırlar. Molozlu ortamlarda sabit platformlu tipleri performans kaybı yaşamakta, hareketli konveyöre sahip olanları ise birçok moloz tipini işleyebilmektedir (Fingas, 2012: 109; Schulze, 1998: 78).

Sıyırıcıların işlevsel kapasitelerini ve etkililiklerini optimize etmek için sıyırıcıları ve bariyerleri entegre bir sistemde beraber kullanmak gerekmektedir. Sıyırıcıların belirli durumlarda verimli çalışabilmesi aynı anda petrolün özellikleriyle, seçilen sıyırıcı tipi ve tasarımı ile, seçilen bariyer tipi ile, çevresel şartlarla ve

kullanıcıların yetenekleriyle bağlantılıdır. Sıyırıcıların kullanılmasında fırsat penceresi petrolün buharlaşma oranına, emülsiyon haline gelme durumuna ve bu nedenlerle viskozitesinde meydana gelen ardışık artışlara göre değişmektedir (Nordvik, 1995: 35).

2.4.1.3. Sorbentler

Petrolü emme ya da yüzeyinde tutma veyahut da her ikisinin kombinasyonu yoluyla deniz yüzeyinden uzaklaştıran materyal sınıfına sorbent denmektedir. Sorbentler petrol kirliliğine müdahalede hem muhafaza edici (pasif) hem de su yüzeyinden uzaklaştırıcı (aktif) özelliklerinden dolayı hibrit mekanik müdahale sistemi olarak bilinmektedir (Bhardwaj ve Bhaskarwar, 2018: 1759). Düşük maliyetlerle ve çevreye verdikleri minimum hasarla sorbentler deniz yüzeyinden kayda değer ölçülerde petrol toplayabilmektedir (Bayat ve diğerleri, 2005: 1525; Al-Majed ve diğerleri, 2012: 214). Petrol sızıntı sahasına uygulanan sorbentler emme veya tutma yoluyla sıvı haldeki petrolün yarı katı faza gelmesini hızlandırmakta ve bu değişim gerçekleştiğinde petrolün sorbentler aracılığıyla deniz yüzeyinden toplanması daha kolay hale gelmektedir (Adebajo ve diğerleri, 2003: 159). Sorbent materyaler aynı zamanda karada meydana gelen veya sahile vuran petrol kirliliği vakalarında en etkili müdahale yöntemlerinden biri olarak bilinmektedir (Carmody ve diğerleri, 2007: 18). Genellikle deniz yüzeyinde ve karada petrol temizleme faaliyetlerinin son safhalarında arta kalanları temizlemek için, ince film tabakası şeklindeki petrol birikintilerinde, küçük boyutlu petrol kirliliklerinde birincil temizleme opsiyonu olarak, sorbent bariyerlerde pasif temizleme aracı şeklinde ve diğer temizleme tekniklerinin hasar verebileceği deniz kaplumbağası yumurtlama alanları gibi hassas deniz ekosistemlerinde kullanılmaktadırlar (Doerffer, 1992: 92; Fingas, 2012: 111; Exxon Mobil, 2014: 208). Petrol kirliliğine müdahalede bütün sorbent materyaller için gerekli şart viskozitenin petrolün emilimine olanak vermeyeceği noktaya ulaşmasından önce sorbentlerin petrol birikintisinin üzerine uygulanmasıdır (Al-Majed ve diğerleri, 2012: 219). Bununla birlikte sorbentlerin deniz yüzeyine uygulanması ve geri toplanması lojistik, atık yönetimi ve bertaraf etme açısından

yoğun iş gücü ve zaman gerektiren bir yöntem olabilmekte ve bunlar kullanımını sınırlandırabilmektedir (Nordvik, 1995: 39).

Denizde petrol kirliliği vakalarında kullanılmak istenen sorbentlerin etkili olabilmeleri için aynı anda hem petrol emici hem de su itici özelliğe sahip olmaları gerekmektedir (EPA, 1999: 11). Petrolün viskozitesi, yapışkanlığı, sertliği ve tutunma özellikleri sorbent materyallerin etkililiğini belirleyen en önemli faktörler olarak düşünülmektedir (Nordvik, 1995: 39). Sorbent materyallerin etkinliğini belirleyen parametreler ise petrol emme ve tutma kapasitesi ve hızı, yüzme özelliği, tekrar kullanılabilirliği, erişim kolaylığı, biyolojik çözünürlüğü, bertaraf edilebilme özelliği şeklinde sıralanmaktadır (Adebajo ve diğerleri, 2003: 159; Al-Majed ve diğerleri, 2012: 219). Sorbentin petrol tutma performansı yüzey alanının büyüklüğünün, petrol emme performansı ise materyalin gözenekli yapısının bir fonksiyonudur (Ornitz ve Champ, 2002: 306).

Tablo 11: Sorbent Seçim Matrisi

Sorbent Türü	**Tipik Materyaller**	**Kullanım Koşulları**
Sentetik	- Polietilen/ Poliüretan Ped ve Köpük - Polipropilen Kumaş, Ağ ve Şerit - Naylo Kumaş ve Şerit - Polyester/ Pamuk Kumaş	- Genellikle en etkili tür (kendi ağırlıklarının 25 katına kadar petrol emme, yüksek yağ emici ve su itici) - Birçok formda mevcut - Biyolojik olarak çözünemez - Çoğu çevresel açıdan emniyetli - Viskoz petroller için uygun - Bazıları yeniden kullanılabilir
Organik	- Saman - Turba Yosunu - Talaş - Hindistan Cevizi Lifi - Tavuk Tüyü - Mantar - Selüloz Elyaf - Biyobozunur Sünger - Öğütülmüş Mısır Koçanı - Yün	- Kendi ağırlıklarının 5-10 katı emicilik - Biyobozunur - Doğal hayatı korumak için hassas alanlarda petrolü sabitler - Petrolü emdiğinde batar - Genellikle geri dönüştürülmesi zor yumuşak maddeler - Bazı ürünlerin yağ emicilikleri çeşitli yöntemlerle arttırılabilir
İnorganik	- Perlit - Vermikülit - Cam Yünü - Volkanik Kaya - Zeolit - OrganoKil - Silika Aerojel	- Kendi ağırlıklarının 3-6 katı emicilik - Nispeten ucuz - Zor ve tehlikeli uygulama - Bazıları batar ve geri kazanılamaz

Kaynak: (Exxon Mobil, 2014: 211).

Tablo 11 sorbent türlerini, türlerin örneklerini ve kullanımlarına has durumları göstermektedir. Buna göre sorbentler üretildikleri malzemenin türüne göre doğal organik maddeler, sentetik organik maddeler, doğal inorganik mineraller ve bu üç grubun karışımı şeklinde sınıflanmaktadır (Carmody ve diğerleri, 2007: 18). Sorbent materyaller fiziksel formları bakımından ise silindirik bariyer, ped, yastık, ponpon, rulo, battaniye, toz ve tanecik gibi çeşitli biçimlerde bulunabilmekte ve uygulanabilmektedir. Toz, tanecik, yığın ve küp biçimindeki sorbentler gevşek formlarda genellikle torbaların, ağların ve çorapların içinde olacak biçimde kullanılmaktadır (Fingas, 2012: 112; Bhardwaj ve Bhaskarwar, 2018: 1759). Tablo 12 çeşitli sorbent türlerinin belirli petrol türleri üzerindeki emme-tutma kabiliyetlerini ve diğer bazı özelliklerini göstermektedir.

Tablo 12: Sorbentlerin Kıyaslanması

Sorbent Tipi		**Sorbent Yapısı**	**Petrol Tipi**	**Emme Kpasitesi**	**Tekrar Kullanılırlık**	**Çevreye Etkisi**
İnorganik	Organokil	Granül	Dizel	5,2-7,2x	Yok	Zararlı
			Hidrolik Yağı	2,2-3,6x		
			Motor Yağı	2,1-3,6x		
	Cf3-Silika Aerojel	Toz	Ham Petrol	237x	En az 2 kere	Zararsız
	Genişletilmiş Perlit	Granül	Hafif Ham Petrol	3,5x	-	Zararsız
			Ağır Ham Petrol	3,25x		
	Pul Formlu Grafit	Cihaz	Ağır Ham Petrol	86x	Var	Zararsız
Sentetik	Poliüretan Köpük	Köpük	Ham Petrol	100x	Var	Zararlı
	Polipropilen	Lif	Hafif Ham Petrol	10-16x	30 kere	Zararlı
Doğal Organik	İpek İpli Lif	Lif	Ham Petrol	85x	-	Zararsız
	Ham Pamuk	Lif	Ham Petrol	30-40x	3 kere	Zararsız
	Atık Odun Lifleri	Sünger	Ham Petrol	7x	-	Zararsız
	İpekböceği Kozası	-	Motor Yağı	42-52x	5 kere	Zararsız
			Bitkisel Yağ	37-60x		
	Pirinç Kabuğu	Rendelenmiş Lifli	Ağır Petrol	4,6-6,7x	-	Zararsız
			Ham Petrol	3-6x		
			Dizel	2,8-5x		
	Selüloz	Cihaz	Ham Petrol	18-22x	-	Zararsız
	Manyetik CNT Süngeri	Köpük	Dizel	56x	1000 kere	Zararsız
x: sorbentin gramı başına toplayabildiği petrolün gramı; g/g						

Kaynak: (Al-Majed ve diğerleri, 2012: 221; Bhardwaj ve Bhaskarwar, 2018: 1761)

Sorbentler petrol kirliliği sahasında kullanılırken sıyırıcı ve pompaların çalışmalarını engelleyebilecek özellikle granül ve partikül formundaki materyallerin aşırı kullanımından kaçınılmalı, deniz dibine batan sorbentler çevreye verecekleri zararlar nedeniyle tercih edilmemeli ve kullanılan sorbentlerin petrolü hapsettikten sonra müdahale sahasından uzaklaştırılıp imha edilene kadar petrolü tutmaya devam etmesine dikkat edilmelidir (Fingas, 2012: 112).

Sorbent materyallerin kullanımları için fırsat penceresi müdahaleye konu petrolün bozunma sürecindeki viskozite değerlerinden tahmin edilebilmektedir. Bir sorbent materyalin etkili olarak kullanabileceği viskozite üst sınırı 15000 cP'dir. Bu viskozite değeri ve ötesinde sorbentlerin petrol tutma kabiliyeti yoktur (Nordvik, 1995: 40).

2.4.1.4. Pompalar ve Geçici Depolama Tankları

Pompalar, petrol kirliliğine müdahale esnasında deniz yüzeyinden kaldırılan petrolün, suyun, emülsiyonların ve dağıtıcı kimyasalların sıyırıcılardan geçici depolama tanklarına, geçici depolama tanklarından nakliye gemisine ve nakliye gemisinden nihai depolama ve bertaraf etme tesisine aktarılması sırasında kullanımına gerek duyulan sistemlerdir (Exxon Mobil, 2014: 218). Petrol kirliliğine müdahalede çok önemli bir rolü olan pompalar çok viskoz petrol türlerini pompalayabilmeli ve hava, su ve moloz gibi faktörlerle baş edebilmelidir. Santrifüj pompalar, vakum sistemleri ve pozitif yer değiştirme pompaları uygulamada kullanılan 3 temel pompa türüdür ve bunlar da kendi içinde çeşitli tiplere ayrılmaktadır (Fingas, 2012: 120). Tablo 13 çeşitli pompaların petrol türüne, ortamdaki enkaz ve moloz toleransına ve diğer bazı özelliklerine göre performansını göstermektedir. Buna göre tablodan ilgili koşullar altında en etkili çalışabilecek pompanın kademeli bir yaklaşımla tespit edilmesi ve müdahale operasyonu sırasında kullanılabilmesi mümkündür. Örneğin yüksek viskoziteye sahip bozunmuş bir petrol birikintisinin bataklık bir ortamdan alınması söz konusu olduğunda toz ve çeşitli enkaz parçalarının istemeden de olsa petrol ile birlikte ortamdan alınacaktır. Söz konusu şartlar altında seçilecek pompanın öncelikle viskoz petrolde iyi çalışması ve bataklık ortamda taşınabilir olması gerekmektedir. Dolayısıyla tablo 13'ten bakıldığında lob, dişli, bağlantı vidalı,

Arşimet vidalı, kademeli oyuk ve pistonlu pompa türleri viskoz petrol için iyi bir seçim olacaktır. Vakum kamyon ise büyük boyutları ve sahaya erişim zorlukları düşünüldüğünde devre dışı kalacaktır. Toz ve kum şartlarında "iyi" transfer oranına sahip pompalar ise mevcut seçenekler arasından Arşimet vidalı ve kademeli oyuk pompa olarak görünmektedir. Aynı zamanda bölgede çakıl gibi molozların da bulunması durumunda Arşimet vidalı pompanın seçiminin en uygun olacağı ortaya çıkacaktır.

Tablo 13: Pompa Seçim Matrisi

Pompa Türü	Transfer Sisteminin Özellikleri														
	Akışkanın Türü			Moloz Toleransı			Diğer Kriterler								
	Yüksek Viskozite	Orta Viskozite	Düşük Viskozite	Toz/ Kum	Çakıl/ Partikül	Deniz Yosunu/ Lifli Malzeme	Transfer Oranı	Düşük Emülsifikasyon Eğilimi	Kuru Çalışma Yeteneği	Sürekli Çalışma Yeteneği	Kendinden Emişlilik	Emme Başlığı	Arka Basınç Başlığı	Taşınabilirlik	Onarım Kolaylığı
Santrifüj	●	◑	○	○	○	●	○	●	○	○	●	●	●	○	○
Lob	○	○	●	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	○	◑	◑
Dişli	○	○	●	●	●	◑	●	◑	◑	◑	◑	◑	○	◑	●
Bağlantı Vidalı	○	○	●	●	●	◑	●	◑	●	◑	◑	◑	○	◑	◑
Döner Kanatlı	◑	◑	◑	●	●	●	◑	◑	●	◑	◑	◑	◑	◑	◑
Esnek Pervane	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	◑	●	◑	○	◑	◑	◑	◑
Arşimet Vidalı	○	○	●	○	○	●	●	○	◑	◑	●	●	◑	◑	◑
Kademeli Oyuk	○	○	◑	○	◑	◑	◑	○	●	◑	○	○	○	◑	◑
Pistonlu	○	○	◑	◑	◑	◑	◑	◑	○	◑	◑	○	○	◑	◑
Diyafram	◑	◑	◑	○	◑	◑	◑	◑	○	◑	◑	◑	◑	◑	○
Peristaltik	◑	○	○	○	○	◑	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Halkalı Enjeksiyon	○	○	○	○	○	●	○	○	N	●	N	N	N	○	○
Vakum kamyon	○	○	○	○	○	○	◑	○	○	◑	○	○	N	◑	◑
Hava Konveyörü	○	○	○	○	○	○	◑	○	○	◑	○	○	N	◑	◑
Semboller: ○İyi; ◑Makul; ●Kötü; N: Uygulanamaz															

Kaynak: (Exxon Mobil, 2014: 221).

Bir pompa sisteminin performansı genellikle birim zaman başına belirli bir viskozite değerinde emme ve basınç kafasında yer değiştiren hacim olarak ölçülmektedir (Fingas, 2012: 123).

Denizde petrol kirliliği müdahale operasyonu büyük miktarlarda atığın depolanıp bertaraf edilmesini gerektiren meşakkatli bir faaliyettir. Deniz yüzeyinden temizlenen petrol atığının kalıcı olarak depolanacağı tesislere aktarılmadan önce müdahale faaliyetini kesintiye uğratmaması için operasyon sırasında geçici olarak depolanıp kirlilik alanından uzaklaştırılması gerekmektedir. Uygulamada bu gereksinimi karşılamak üzere geliştirilen ve kullanılan birçok geçici depolama ekipmanı mevcuttur. Tablo 14 bazı geçici depolama tanklarını ve bunların kullanılma koşullarıyla ilgili bilgileri içermektedir. Tablodan ilgili koşullar altında en uygun geçici depolama ünitesi seçilip petrol kirliliği müdahale eyleminde kullanılmaktadır.

Tablo 14: Geçici Depoloma Seçim Kılavuzu

Geçici Depolama									
Tür	Sızıntı Miktarı			Petrol Enkazı			Petrol Türü		Süre
	Küçük	Orta	Büyük	Küçük Hafif	Büyük Ağır	Kum veya Çakıl	Bozunmamış	Bozunmuş	
Güverte Tanklı Mavna	✔	✔	✔				✔	✔	Haftalar
Bidon (55 galon)	✔			✔		✔	✔	✔	Günler
Esnek Çekilebilir Tank	✔	✔	✔				✔		Günler
Üstü Açık Mavna		✔	✔					✔	Haftalar
Sıyırıcı Gemisi	✔			✔			✔	✔	Günler
Tanklı Tedarik Gemisi	✔	✔	✔	✔		✔	✔	✔	Haftalar
Tank Mavna		✔	✔				✔	✔	Aylar
Tanker			✔				✔	✔	Aylar
Yastık Tanklar	✔						✔		Günler
Plastik yüzer Havuz	✔	✔						✔	Günler
Bariyerler	✔	✔		✔	✔		✔	✔	Günler
FRAC Tank	✔	✔		✔	✔		✔	✔	Günler
Tank Kamyon	✔	✔					✔		Haftalar
Küçük <100 varil (<16 m^3); Orta 100-1000 varil (16-160 m^3); Büyük >1000 varil (>160 m^3)									

Kaynak: (Exxon Mobil, 2014: 311).

Uygun geçici depolama ünitesi seçilirken depolamanın yapılacağı bölgeye (açık deniz, karaya yakın deniz veya kara), gereken depolama kapasitesine, depolanacak petrolün emülsiyon veya bozunmuş olup olmamasına ve moloz barındırıp

barındırmamasına, depolama süresine, depolama bölgesine erişim imkanına, çevresel hassasiyete sahip alanlara uygun olmasına ve uygulanması beklenen bertaraf etme metoduna dikkat edilmesi gerekmektedir (Exxon Mobil, 2014: 307).

2.4.2. Kimyasal Müdahale: Dağıtıcılar (Dispersantlar)

Denizde petrol kirliliğine müdahale yöntemlerinden biri olan kimyasal müdahale yöntemi genellikle mekanik müdahale yöntemiyle bir kombinasyon şeklinde, petrol kirliliğinin yayılımını kısıtlayarak kıyı şeritlerinin ve hassas deniz habitatlarının korunmasına yardımcı olmak amacıyla kullanılmaktadır (Dave ve Gahly, 2011: 428). Kimyasal müdahale yönteminde çeşitli kimyasallar kullanılarak denize sızan petrol birikintisinin fiziksel ve kimyasal özellikleri değiştirilmektedir. Kimyasal müdahale yönteminde kullanılan başlıca kimyasal madde grupları dağıtıcılar (dispersants), katılaştırıcılar (solidifiers), emülsiyon kırıcılar, jelleştirici ajanlar, biyolojik bozunma hızlandırıcılar, yakıcı ajanlar, nötrleştirici ajanlar ve batırıcı ajanlardır (Ventikos, 2004: 53). Devam eden kısımda kimyasal müdahale için en sık ve yaygın olarak başvurulan kimyasal madde grubu olan dağıtıcılar (dispersantlar) hakkında daha detaylı bilgilere yer verilmektedir.

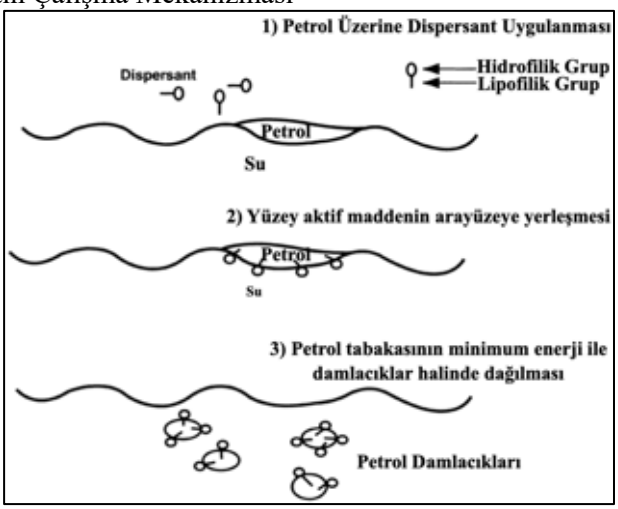
Dağıtıcılar, petrol birikintisi üzerine püskürtülerek petrolü deniz yüzeyinden uzaklaştırıp su sütununda çok düşük konsantrasyonlarda dağılmasını sağlayan deterjan benzeri ürünlerdir (Lessard ve Demarco, 2000: 60). Modern dağıtıcılar, su ve petrol arasındaki ara yüzey gerilimini düşürerek petrolün minimal dalga ve türbülans etkisiyle su sütununda 70 mikrometreden küçük petrol damlacıklarına dağılmasını sağlayan hidrokarbon çözücülerinin içerisindeki anyonik ve nötr yüzey aktif maddelerin karmaşık karışımlarıdır (Prince, 2015: 6377).

1960'lı yıllardan itibaren denizde petrol kirliliği vakalarında kullanılan dispersantlar bilimsel çalışmalarda çevresel fayda ve zarar ekseninde geçen tartışmalar ile birlikte değerlendirilirken günümüze değin kullanılmaya devam edilmiştir. 1967 yılında Torrey Canyon petrol kirliliği kazasında müdahale amaçlı muazzam miktarlarda kullanılan dispersant yüksek zehirliliği nedeniyle deniz ekosistemine büyük hasarlar vermiştir (Guodong, 2015: 246). 2010 yılında gerçekleşen "Deepwater

Horizon" kazasında ise yaklaşık olarak 2,1 milyon galon dispersant müdahale amaçlı olarak kullanılmıştır (Kujawinski, 2011: 1298).

Dispersantlar sırasıyla bir hayli zehirli anyonik yüzey aktiflerden üretilen 1. nesil, noniyonik yüzey aktifler, anyonik yüzey aktif dioktil sodyum sülfosüksinat (DOSS) ve organik çözücüden oluşan ve "COREXIT" olarak da bilinen 2. nesil ve ilk iki nesle oranla hem iyi emülsifiye etme oranına hem de düşük zehirliliğe sahip, bitkisel yağ, şeker pancarı ve diğer doğal ham materyallerden elde edilen 3. nesil şeklinde olmak üzere 1960'lardan bu yana üretilip kullanılmıştır (Jin ve diğerleri, 2019: 242). Yıllar içerisinde kimyasal formülleri üzerine meydana gelen iyileştirmeler dispersantların çevresel zehirlilik oranlarını azaltırken sağladıkları fayda açısından verimliliklerini arttırmıştır (Jafarinejad, 2017: 134). Günümüzde kullanımı yaygın olan COREXIT dispersantlar kapsamlı bir şekilde bilimsel çalışmalarca araştırılmış ve dünya genelinde bir dizi envanterde bulundurulmaktadır. Bunların yanında "Finasol OSR 52" ve "Dasic Slickgone NS" gibi dispersantlar da "Oil Spill Response Ltd. (OSRL)" gibi petrol kirliliğiyle mücadelede uzman kuruluşlar tarafından acil erişime uygun olarak çeşitli bölgelerde stoklanmaktadır (Exxon Mobil, 2014: 136).

Şekil 27: Dispersantın Çalışma Mekanizması



Kaynak: (Lessard ve Demarco, 2000: 60)

Şekil 27 bir dispersantın deniz yüzeyinde bulunan petrol birikintisine etkime mekanizmasını göstermektedir. Dispersantların içerisindeki yüzey aktif maddelerin yağ çeken (lipophilic) ve su emen (hydrophilic) kısımlardan oluştuğu görülmektedir. Birinci aşamada petrol henüz su ile karışmamaktadır. İkinci aşamada dispersant petrol-

su ara yüzeyine nüfuz ederek yerleşmekte, üçüncü aşamada ise yerleştikleri ara yüzeyde gerilimi azaltarak petrolün küçük damlacıklara dağılmasını sağlamaktadırlar.

Dispersant kullanımı doğal dağılma sürecini hızlandırırken petrol birikintisinin seyreltilmesini sağlamakta, biyolojik bozunma sürecini artırmakta ve böylece petrol kirliliğinin olumsuz sosyoekonomik ve çevresel etkilerini azaltabilmektedir (Chapman ve diğerleri, 2007: 827). Dispersant kullanımının fayda ve zararları tablo 15'te daha detaylı olarak gösterilmektedir.

Tablo 15: Dispersant Kullanımının Fayda ve Sakıncaları

Faydalar	Sakıncalar
-Diğer müdahale tekniklerinden hızlıdır ve daha çok petrole ulaşarak etki eder	-Petrolü deniz çevresinden uzaklaştırmaz su kolonuna dağıtır.
-Çok çeşitli hava şartlarında uygulanabilir. Yüksek akıntı ve dalga v.b.	-Normalde petrole maruz kalmayacak deniz organizmalarını olumsuz etkileyebilir.
-Biyolojik bozunmayı artırarak petrolün su kolonundan uzaklaşmasını hızlandırır.	-Bütün petrol türleri ve deniz durumları için etkili değildir. Yüksek viskozite-soğuk su.
-Petrolün kıyıya sürüklenmesini önleyerek ekolojik ve sosyoekonomik riski azaltır.	-Petrol sızıntısını takiben kullanımı için sınırlı bir "fırsat penceresi" vardır.
-Dökülmenin yakınında zararlı buhar oluşuma şansını azaltır.	-Dağılma başarılı olamazsa, diğer müdahale tekniklerinin verimliliğini azaltabilir.
-Emülsiyon oluşumunu engeller.	-Balıkçılık pazarına ve deniz ürünlerinin tüketimine olan güveni olumsuz etkiler.
-Petrolün yapışma özelliğini azaltır.	
-Kıyı şeridi temizleme operasyonlarına olan ihtiyacı ortadan kaldırır.	
-Büyük ölçekli atık oluşumunu önler.	

Kaynak: (IPIECA ve IOGP, 2015: 42; IMO/UNEP, 1995).

Dispersantların verimlilikleri petrolün türüne veya kompozisyonuna, petrolün bozunma safhasına, ortam sıcaklığına, deniz-dalga durumuna, deniz suyu tuzluluğuna, uygulama tekniğine ve petrol/dispersant oranına bağlıdır. Dispersantlar düşük viskozitede, sıcaklığın uygun olduğu ortamlarda, dalga enerjisinin yüksek olduğu deniz durumlarında yüksek performans göstermektedir. Tatlı veya az tuzlu su ortamlarında ve düşük sıcaklıklarda daha az verimli oldukları tespit edilmiştir (Grote ve diğerleri, 2018: 624). Ayrıca deniz yüzeyindeki petrol birikintisinin belirli bir kalınlık değerinden ince bir tabaka olması halinde uygulanan dispersant petrol ile değil su ile reaksiyona girecek ve dağılma gerçekleşmeyecektir. Bir dispersantın etkinliği su sütununa ittiği petrol miktarının yüzeyde kalan petrol miktarına mukayesesi ile ölçülmektedir. Dispersant uygulanmasından yarım saat sonra su sütununda dağılan

kahverenginde bulutsu yağ tabakasının görünmesi o dispersantın işe yaradığının bir göstergesidir (Fingas; 2012: 131-132). Şekil 28'deki fotoğraf etkili olan bir dispersant uygulaması sonrası suda oluşan kahverengi bulutsu yağ tabakalarını göstermektedir.

Şekil 28: Etkili Bir Dispersant Uygulaması



Kaynak: (Fingas, 2012: 136)

Dispersantlar gemiler, uçaklar ve helikopterlerden geniş bir alana yayılmış olan petrol sızıntısı üzerine yeterli bir operasyonel destekle başarılı bir şekilde uygulanabilmektedir (EMSA, 2004: 38). Uçaklarla yapılan uygulamada sızıntı sahasına çok çabuk erişim ve kısa sürede çok geniş bir alana uygulama yapmak mümkünken, helikopter uygulamalarında daha çok nokta hedef esaslı sızıntılarda etkili olunabilmektedir. Gemilerle yapılan dispersant uygulamalarında ise çok miktarda dispersant taşınabilmekte ve uygulama sonrası dispersant etkinliği iyi bir şekilde gözlenebilmektedir. Uygulama esnasında dispersant/petrol oranının 1:20-25 olması önerilmektedir (IPIECA ve IOGP, 2015: 43-44).

Şekil 29: Dispersant Uygulama Platformları



Kaynak: (IPIECA ve IOGP, 2015: 43).

Şekil 29'da görüldüğü üzere platformlara eklenen püskürtücü aparatlarla dispersantların daha etkili bir şekilde petrol kirliliğinin yüzeyine serpilmesi sağlanmaktadır.

Bazı petrol türlerinin dispersant uygulamalarında düşük ve yüksek deniz enerjisinin olduğu ortamlarda su kolonunda dağılma yüzdelerinin verildiği dispersant etkinliğini gösterir tablo 16 aşağıdaki gibidir.

Tablo 16: Tipik Dispersant Etkinliği

	Başlangıçtaki Dispersant Etkinliği	
	Düşük Deniz Enerjisi	**Yüksek Deniz Enerjisi**
Petrol	**(Su Kolonundaki Petrolün Yüzdesi)**	
Dizel	60	95
Hafif Ham Petrol	40	80
Orta Ham Petrol	10	60
IFO 180	5	10
Bunker C	1	1

Kaynak: (Fingas, 2012: 133)

Tablodan da görüldüğü üzere dispersantlar düşük viskoziteye sahip petrol ve petrol ürünlerinde daha yüksek bir etkinlik gösterirken bunker C gibi viskoz yakıtlarda neredeyse hiç etkinlik gösterememektedir. Düşük ve yüksek deniz enerjilerine sahip denizlerdeki duruma bakıldığında ise dispersantın etkinliğinin yüksek enerjili deniz ortamlarında yüksek yüzdelerde arttığı fakat bunker C'de bir değişimin olmadığı anlaşılmaktadır.

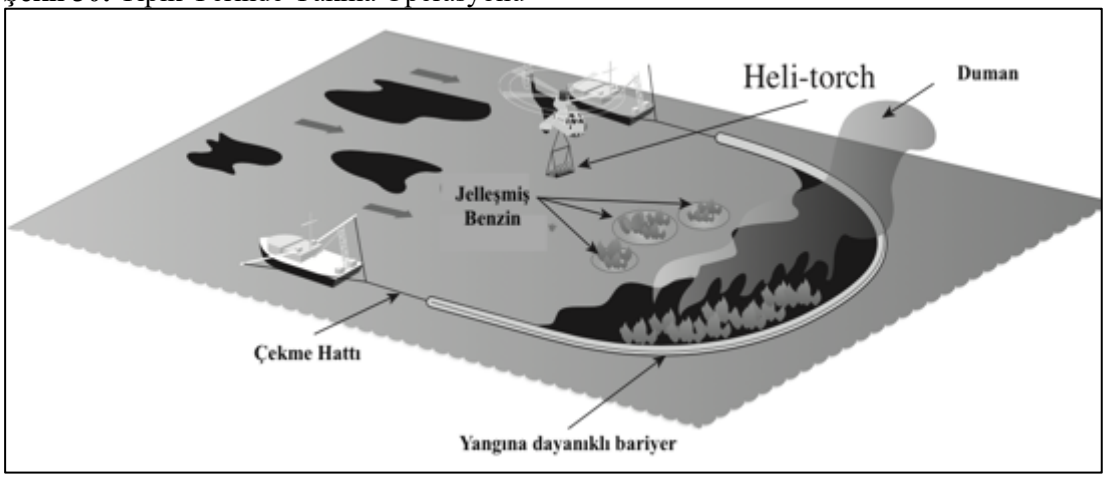
Yukarıdaki bilgilerin doğrultusunda herhangi bir petrol kirliliği olayında dispersant kullanıp kullanmama kararını vermek için denize sızan petrolün türüne, miktarına, kıyıya olan yakınlığına ve deniz çevresinin ekolojik açıdan herhangi bir hassasiyet içerip içermediğine bakılması gerekmektedir. Bütün bu faktörlerin ışığında deniz yüzeyindeki petrolün dağılmış ya da dağılmamış olması hallerindeki neticeler "Net Çevresel Fayda Analizi (NEBA)" vasıtasıyla değerlendirilerek bir karara varılması yerinde olacaktır.

2.4.3. Termal Müdahale: Yerinde Yakma

Denizde petrol kirliliğine termal müdahale denince anlaşılan yöntem, petrol birikintisinin yangına dayanıklı bariyerler ve tutuşturucular gibi minimum özelleşmiş

ekipmanla yüksek verimlilik oranlarında deniz yüzeyinden uzaklaştırılmasını sağlayan yerinde yakma tekniğidir (Dave ve Gahly, 2011: 430). Yerinde yakma, petrol birikintisinin su yüzeyindeki dökülme yerinde veya yakınında kontrollü bir biçimde ateşlenmesini ve yakılmasını içeren bir petrol kirliliğine müdahale tekniğidir (Mullin ve Champ, 2003: 323). Prensip olarak bir yanma reaksiyonuyla aynı olan bu tekniğin uygulanabilmesi için gerekenler yakıt, oksijen ve tutuşturucudur. Buradaki yakıt sıvı haldeki petrol değil üzerindeki hidrokarbon buharı olduğundan, yanmanın gerçekleşebilmesi için petrol birikintisinin, üzerindeki havada yeterli miktarda hidrokarbon buharı oluşacak sıcaklığa kadar ısıtılması gerekmektedir (Buist, 2003: 341). Çok çeşitli çevresel koşullarda ve birçok farklı petrol türü üzerinde yapılan kapsamlı deneyler sonucunda yerinde yakma işleminin gerçekleştirilebilmesi için petrol birikintisinin kalınlığının 2-3 mm. veya daha fazla, rüzgarın 20 knot hızdan daha az, dalgaların 132 cm'den daha küçük, akıntının yangın bariyerine göre hızının 0,75 knot hızdan az ve petrol-su emülsiyonları içerisindeki su oranının %25'den az olması gerekmektedir (Mullin ve Champ, 2003: 326). Yanmanın aynı oranda devam edebilmesi için birikintinin yangına dayanıklı bariyerlerle kuşatılıp çekilerek kalınlığının gereken düzeyde kalması sağlanmaktadır. Bariyerlerin bulunmadığı durumlarda "herder" denilen kimyasallar yine petrol birikintisinin yanabilmesi için onu yeterli kalınlıkta tutmak amacıyla kullanılmaktadır (Fingas, 2012: 153; Exxon Mobil, 2014: 157).

Şekil 30: Tipik Yerinde Yakma Operasyonu



Kaynak: (Exxon Mobil, 2014: 160).

Şekil 30'dan da görüleceği üzere su yüzeyinde yerinde yakma işlemi uygulanacak olan petrol birikintisi yangına dayanıklı bariyerlerle kuşatılıp iki tekne tarafından çekilerek istenilen birikinti kalınlığına getirilmekte, tutuşmayı sağlamak için "heli-torch" denilen tutuşturucu helikopterle ortama dahil edilmekte ve kontrollü yanma sağlanmaktadır. Yanma sonucu su yüzeyinde kalıntılar ve atmosferde duman oluşmaktadır. Yeterli kalınlığa sahip bir yerinde yakma operasyonunun denizden petrol uzaklaştırma verimliliği %90 oranlarını kolaylıkla aşabilmektedir. Ayrıca 100 metre çapındaki dairesel bir alanda yapılan yakma işlemi ile saatte 2000 m^3 petrol uzaklaştırma kapasitesine ulaşılabilmektedir (Buist, 2003: 341).

Yerinde yakma müdahale tekniğinin en önemli avantajı büyük miktarda petrolü çok çabuk bir şekilde deniz ortamından uzaklaştırma kapasitesidir. En belirgin dezavantajı ise yanma sonucu oluşan kara, koyu dumanın emisyon konusunda kamuoyunda yarattığı endişedir (IPIECA ve IOGP, 2016: 5). Bu tekniğin diğer avantaj ve dezavantajları tablo 17'de gösterildiği gibidir.

Tablo 17: Yerinde Yakma Tekniğinin Avantaj ve Dezavantajları

Avantaj	Dezavantaj
Hızla, büyük miktarda petrol uzaklaştırma	Kara, koyu dumanın salınımı
Minimal ekipman ve iş gücü gereksinimi	Yangının sıçrama ve kontrolden çıkma riski
Yüksek verimlilik oranları	Yanma sonrası su yüzeyindeki kalıntılar
Bertaraf için azalan atık yağ hacmi	Bozunmuş veya emülsiyon olmuş petrolün tutuşma zorluğu
Çoğu petrolde, pek çok habitatta uygulama	

Kaynak: (IPIECA ve IOGP, 2016: 5; Exxon Mobil, 2014: 153)

Yerinde yakma potansiyel olarak değerli bir petrol kirliliğine müdahale tekniğidir. Diğer müdahale tekniklerinin etkisiz veya çevre için daha zararlı olduğu durumlarda özellikle de buzullarla kaplı kutup bölgelerinde tek müdahale seçeneği olabilmektedir. Uygun şekilde kullanıldığında müdahale stratejisinin bütününe önemli bir katkı yapabilmektedir (Mullin ve Champ, 2003: 329; Buist, 2003: 345). Bu yaklaşımın, emniyet endişeleri, deniz koşulları ve yanmayı tutuşturacak ve sürdürecek yeterli miktarda petrolü tutacak özelleşmiş ekipmanın mevcudiyeti dahil olmak üzere çeşitli faktörler nedeniyle gemi kaynaklı petrol kirliliği vakaları için uygun olma olasılığı çok düşüktür (EMSA, 2004: 39).

2.4.4. Biyolojik Müdahale: Biyoiyileştirme

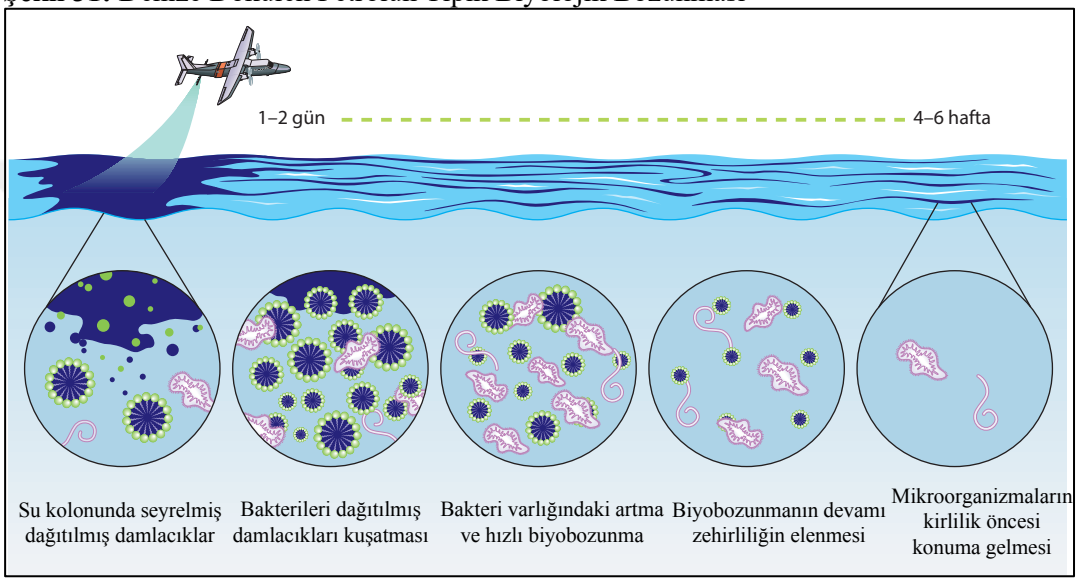
Deniz çevresinde petrol kirliliğine müdahale tekniği olarak biyoiyileştirme, kirlenmiş sularda petrolün biyolojik bozunma veya indirgenme sürecini hızlandırmak amacıyla ortama besin (nitrojen ve fosfor), oksijen veya mikroorganizma eklemek olarak tanımlanmaktadır (ABD Kongresi Teknoloji Değerlendirme Ofisi- OTA, 1991: 2; Prendergast ve Gschwend, 2014: 234). Bir başka ifadeyle biyoiyileştrime, metabolizmaları ve büyümeleri için karbon ve enerji kaynağı olarak hidrokarbonları kullanan mikroorganizmaların katabolik yeteneklerinden faydalanmaktır (Mapelli ve diğerleri, 2017: 862).

Biyoiyileştirme teknikleri, kirlilik sahasında uygulama (in-situ) ve kirlilik sahasının dışında uygulama (ex-situ) olmak üzere iki genel yaklaşıma ayrılmaktadır. Ex-situ uygulamalarda kirliliğe sebep olan atık kirlilik sahasından fiziksel olarak biyoremediasyon için uzaklaştırılmaktayken in-situ uygulamalar olay yerinde gerçekleştirilmektedir (Pal ve diğerleri, 2020: 228). Kara çiftçiliği, organik gübreleme, biyoreaktörler, biyohavalandırma, biyofiltreler, biyoagmentasyon, biyostimülasyon, biyopiller, içsel biyoremediasyon ve pompala-tedavi et bu iki yaklaşım içerisinde konumlanan bazı biyoremediasyon teknikleridir (Fuentes ve diğerleri, 2014: 4787; Boopathy, 2000: 63-64). Bunlardan "bioaugmentation" ve "biostimulation" petrol kirliliği vakalarında en sık kullanılan iki yöntemdir (Macaya ve diğerleri, 2019: 2). "Bioaugmentation" metabolik süreci artırmak için kirlilik sahasına özel metabolik kapasitelere sahip mikroorganizmalar eklenmesi iken "biostimulation" ise yerli hidrokarbon ayrıştırıcı mikroorganizmaların aktivitelerini harekete geçirebilmek için gerekli ve yeterli miktarda besin ve aktive edici diğer maddelerin kirlilik ortamına dahil edilmesidir (Zhu ve diğerleri, 2001: 6).

Biyoremediasyon fiziksel ve kimyasal koşullardan etkilenebilmektedir. Ortamın sıcaklığı ve basıncı, petrolün yüzey alanı, deniz enerjisi biyoremediasyonu etkileyen fiziksel parametrelerken, ortamın oksijen ve besin içeriği, pH değeri, tuzluluk oranı ve petrolün kompozisyonu bu süreci etkileyen kimyasal parametrelerdir. Biyoremediasyon sıcaklığın azalmasıyla birlikte genellikle azalmaktadır. Deniz suyunda bu süreç için en uygun sıcaklık aralığı 15-20°C iken bu aralık tatlı su ortamında 20-30°C ve toprakta 30-40°C'dir. Basınç ve viskozite ile ters

orantılı bir ilişki sergileyen bu müdahale tekniği petrol yüzey alanı ve deniz enerjisi ile ise doğru orantılıdır. Kimyasal parametreler ile arasındaki ilişkiye bakıldığında ise biyoremediasyonun oksijen, fosfor, nitrojen ve demir varlığında yükseldiği, pH değeri ile doğru orantılı ve optimum ayrışmanın hafif alkalik(bazik) ortamlarda olduğu, aşırı tuzlu ortamların ise bu süreci yavaşlattığı bilinmektedir (Jafarinejad, 2017: 140-141; Zhu ve diğerleri, 2001: 9-46; OTA, 1991: 11).

Şekil 31: Denize Dökülen Petrolün Tipik Biyolojik Bozunması



Kaynak: (IPIECA ve IOGP, 2015: 24)

Şekilde görüldüğü üzere dağılma sürecine maruz kalan petrol su kolonunda damlacıklara parçalanarak seyreltik bir hal almaktadır. Bir iki gün içerisinde mikroorganizmalar petrol damlacıklarının etrafını sararak onları ayrıştırmaya başlamaktadır. Kısa süre sonra artan mikroorganizma varlığı biyolojik bozunma sürecini hızlandırmakta ve 4-6 hafta içerisinde kirletici deniz çevresinden elemine edilmektedir.

Biyoremediasyon diğer müdahale tekniklerine oranla ekonomik olması, çevre dostu olması ve gelişmiş yetkinliği gibi avantajlara sahip gelişmekte olan ve yenilikçi bir tekniktir (Singh ve diğerleri, 2020: 2). Bunun yanında birçok petrol türü için etkinliğinin belirsiz olması, sonuç vermesinin uzun zamanlar alması, her bir kirlenmiş alan için özel olarak tasarlanmasının gerekmesi onun acil durumlar için uygulanabilirliğinin önündeki önemli dezavantajlar olarak durmaktadır (OTA, 1991:

12). Öte yandan sadece bu yöntem ile petrolün %100'ünün deniz çevresinden yok edilmesi beklenmemelidir (Atlas ve Hazen, 2011: 6714). Biyoremediasyon diğer konvansiyonel müdahale tekniklerinin uygulanmasından sonra ya da onların uygulanmasının mümkün olmadığı durumlarda nihai müdahale tekniği olarak kullanılmaktadır. Hafif yüzey veya yüzey altı kirliliği için ön işlem gerektirmeden uygulanabilmesi mümkündür. Bir yerde havuzlanmış veya köpük haline gelmiş petrol veya katran bulunması durumlarında biyoremediasyon uygulanmadan önce mekanik müdahale ile bu oluşumlar ortamdan uzaklaştırılmalıdır (Exxon Mobil, 2014: 28).

Denizde petrol kirliliğine müdahalede kullanılan tekniklerin sahip olduğu dezavantajlar sürdürülebilir yeni teknolojilerin gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Yağ çekici ve su itici özelliğe sahip nanoteknolojik kaplamalarla üretilen özel süngerler, manyetik nanomateryaller ve uzaktan kontrol edilebilen robot teknolojileri birçok araştırmacı tarafından petrol kirliliğine müdahalenin geleceği olarak görülmektedir. Bu geri dönüştürülebilir-tekrar kullanılabilir yeni teknolojilerle petrol kirliliği ile mücadelenin geleneksel yöntemlere nazaran daha ekonomik ve çevre dostu olabileceği yapılan çalışmalarla ortaya konulmaktadır (Piperopoulos ve diğerleri, 2020; Singh, ve diğerleri., 2020; Wang ve diğerleri; 2019).

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM
PETROL KİRLİLİĞİNE ACİL MÜDAHALE TESİSİ İÇİN KONUM OPTİMİZASYONU: ÇANAKKALE BOĞAZI'NDA BİR UYGULAMA

Bu bölümde araştırmanın konusu, amacı ve önemi, kapsamı ve kısıtları, süreci, metodu, veri toplama safhaları, bulguları, tartışma ve sonuç kısımları alt başlıklar halinde sırasıyla anlatılmaktadır.

3.1. ARAŞTIRMANIN KONUSU

Bu araştırmanın konusunu tesis yeri belirleme problemi oluşturmaktadır. Bu konu başlığı altında deprem, sel, fırtına, yangın, nükleer ve kimyasal kazalar, çevre kirliliği gibi doğal ve doğal olmayan afetlerde, arama-kurtarma, ilk yardım, barınma-korunma ve yardım malzemesi dağıtma faaliyetleri için acil durum müdahale istasyonu, sığınak, toplanma alanı, dağıtım deposu, arama-kurtarma aracı, ambulans gibi sabit veya hareketli tesislerin çevre ve insan sağlığı açısından yaşanacak hasarı en aza indirecek biçimde konumlandırılması hedeflenmektedir. Buradan hareketle başta deniz ekolojisi ve insan hayatı açısından yarattığı yıkıcı sonuçlar nedeniyle afet kategorisine girebilecek denizde petrol kirliliği olaylarına müdahale edecek tesisin optimum konumunun belirlenmesi bu tezin konusu olarak ele alınmaktadır.

3.2. ARAŞTIRMANIN AMACI VE ÖNEMİ

Bu çalışmada, Çanakkale Boğazı'nda meydana gelebilecek olası bir petrol kirliliğinin çevresel boyutlar bakımından yaratacağı hasarı minimum seviyede tutabilmek için kurulması gereken denizde petrol kirliliğine acil müdahale tesisinin optimumum konumunun belirlenmesi amaçlanmaktadır.

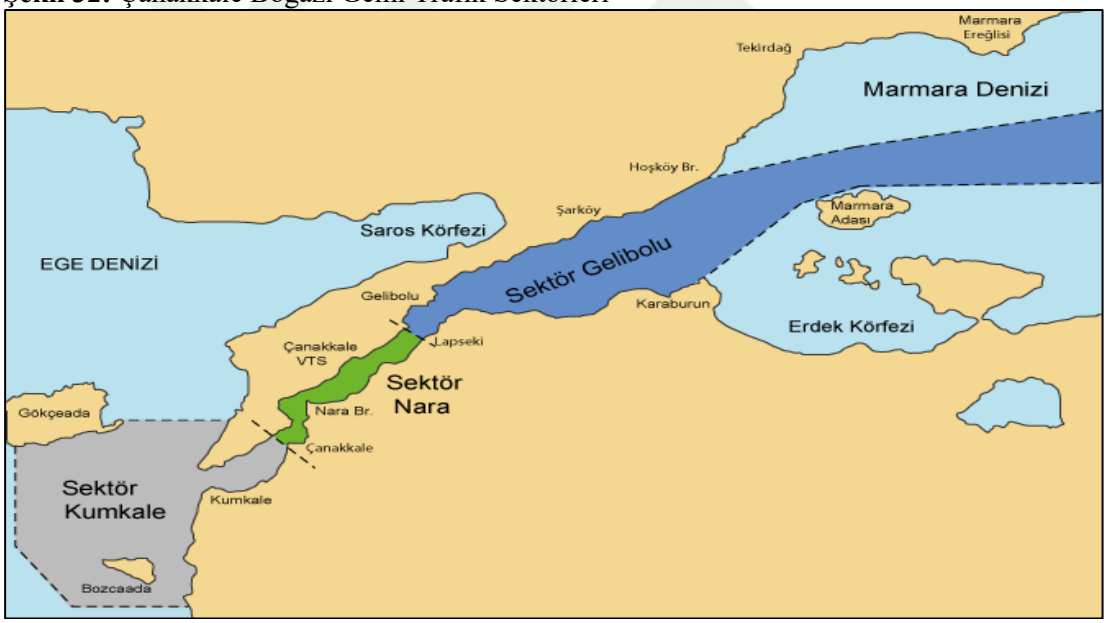
Çanakkale Boğazı Türk Boğazlar Sistemi içerisinde İstanbul Boğazı ile birlikte deniz ticareti açısından küresel öneme sahip stratejik bir su yoludur. Yılda ortalama 46.000 gemi geçişinin gerçekleştiği Çanakkale Boğazı dar yapısı ve kuvvetli akıntısı ile birlikte kazaların yaşanabileceği tehlikeli bir deniz sahası olma özelliğini taşımaktadır. Hem deniz çevresinin hem de deniz ticaretinin olumsuz etkilenmesinin

önüne geçilebilmesi adına, bu bölgede gerçekleşebilecek bir deniz kazası sonucu yaşanabilecek petrol kirliliğine ivedi bir müdahalenin gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle bu çalışmanın sonuçları, denizde petrol kirliliğine müdahale acil durum eylem planını oluşturan yetkililerin stratejik, taktik ve operasyonel anlamda karar almalarına fayda sağlaması bakımından önem arz etmektedir.

3.3. ARAŞTIRMANIN KAPSAMI VE KISITLARI

Bu çalışma Çanakkale Boğazı'nın deniz trafik alanlarını oluşturan Kumkale-Nara-Gelibolu sektörlerini ve yaklaşma sularını içeren deniz sahası özelinde yapılmıştır. Şekil 32'de araştırma sahası gri, yeşil ve koyu mavi renklerle belirtilen deniz sahası olarak gösterilmektedir.

Şekil 32: Çanakkale Boğazı Gemi Trafik Sektörleri



Kaynak: (Kıyı Emniyeti Genel Müdürlüğü, 2020: 8).

Çanakkale Boğazı deniz trafik sahasının sınırları kuzeyde 40°37'.670 K/ 27°10'.740 D ile 40°27'.081 K/ 27°09'.263 D, güneyde ise 40°05'.021 K/ 26°11'.394 D, 40°01'.940 K/ 25°54'.970 D, 39°49'.940 K/ 25°52'.970 D, 39°43'.940 K/ 25°54'.970 D, 39°43'.940 K/ 26°09'.129 D noktalarını birleştiren hattın arasında kalan deniz alanı olarak tanımlanmaktadır (Cumhurbaşkanlığı Kararı, 2019: 13). Çanakkale Boğazı Biga ve Gelibolu yarımadaları arasında kuzeydoğu-güneybatı hattında yer almaktadır.

Boğazın uzunluğu 61 km., eni en geniş yerinde 8,2 km. en dar yerinde ise 1,2 km.'dir (Ilgar, 2015: 1). Çanakkale Boğazının Asya Kıtası kıyılarının uzunluğu 94 km. iken Avrupa kıtasında bulunan kıyılarının uzunluğu 78 km.'dir. Kuzeyinde ortalama 55 m. derinliğe sahip olan Çanakkale Boğazı en derin yeri olan Nara geçişinde 113m. ile en büyük derinliğe ulaşmakta ve güneyinde ortalama 60 ila 70 m. derinlik ile Ege Denizi'ne açılmaktadır (Alpar ve diğerleri, 2018: 71). Çanakkale Boğazı yüzeyde Marmara Denizi'nden Ege Denizi'ne ve dipte ise tam tersi istikamette olmak üzere iki katmanlı akıntı sistemine sahiptir. Yüzeydeki akıntı 20-25 m. derinliğe kadar etkili olmakta ve 1.5-2 knot ila Ege çıkışı dolaylarında 3,5-4 knot arasındaki değişen değerlerde olabilmektedir (Başar, 2010: 6; Alpar, ve diğerleri, 2018: 72). Araştırmanın kısıtları aşağıda sırasıyla belirtilmektedir.

Araştırmanın konusunu tanker tipi gemiler ve bunların karıştığı gemi kazaları oluşturmaktadır. Diğer gemi tiplerinin neden olduğu gemi kazaları araştırmanın yan çıktısı olan Çanakkale Boğazı gemi kazaları kaynaklı tehlike haritasının çıkarılmasında kullanılmış ancak nihai sonuçlarının elde edilmesinde kullanılmamıştır.

Çalışmada kullanılan Potansiyel Olay Simülasyonu, Kontrol ve Değerlendirme Sistemi 2 (PISCES II) denizde petrol kirliliği simülasyon programı için geliştirilen senaryolar makul en kötü durum senaryo (credible worst case scenario) kavramı çerçevesinde geliştirilmiştir. Bir tanker kazası sonucu oluşabilecek en kötü durum (worst case) taşınan bütün yükün denize dökülmesidir. Geçmişte meydana gelen Torrey Canyon (1967), Amoco Cadiz (1978), Atlantic Empress (1979), Castillo de Bellver (1983). ABT Summer (1991), Prestige (2002) ve Sanchi (2018) gibi tanker kazaları buna örnektir. Riskin daha iyi yönetilmesi için yıllar içerisinde belirlenen ve uygulanması zorunlu kılınan çift cidar uygulaması gibi standartlar ve denizde petrol kirliliğini önlemek için yapılan uluslararası sözleşmeler neticesinde bu tür kazaların olma olasılıkları azalmıştır. Riski azaltmak adına alınan önlemlere rağmen gerçekleşebilme ihtimali yüksek kazalar arasında şiddeti en yüksek olanlar makul en kötü durum senaryosu olarak sınıflandırılmaktadırlar (Australian Maritime Safety Authority, 2015: 17).

Bu çalışma maksimum çevresel faydanın sağlanması amacı gözetilerek gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle denize dökülen petrole mümkün olan en kısa sürede

müdahale ya da kritik müdahale süresi denilen kıyı şeridine vurma süresinden önce müdahale edilmesi en önemli kısıt olarak alınmıştır. Optimum konumu verecek olan amaç fonksiyonu oluşturulurken maliyetler dikkate alınmamıştır.

Bu çalışmada yeni bir petrol kirliliği müdahale tesisi dizayn edilmemiş olup, kıyı emniyeti genel müdürlüğünün envanterinde yer alan ve Türkiye'nin denizde petrol kirliliğine müdahale gemisi olarak 2015 yılında inşa edilen ERV NENE HATUN gemisi örnek alınmıştır.

3.4. ARAŞTIRMANIN SÜRECİ

Araştırmada kalitatif ve kantitatif araştırma süreçleri izlenmiştir. Bu kapsamda araştırma boşluğunun ve problemin tespit edilmesini müteakip literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Bunun ardından problemin çözümünde izlenecek yola dair uzman görüşü alındıktan sonra veri toplama sürecine geçilmiştir. Veri toplama sürecinde, denizde petrol kirliliği simülasyonunda çalıştırılacak senaryoların oluşturulması için gereken konum, döküntü miktarı, döküntü türü, oşinografik ve meteorolojik parametreleri belirlemek için birinci aşamada 2007-2018 yılları arasında Çanakkale Boğazı'nda yaşanmış gemi kazası istatistikleri, ikinci aşamada makine öğrenmesi uygulamasında kullanmak üzere 1957-2018 yılları arasında dünya genelinde denizde petrol kirliliğine yol açmış tanker kazası istatistikleri, üçüncü aşamada Enerji Piyasası Düzenleme Kurumunun (EPDK) 2007-2019 yılları arasındaki petrol piyasası sektör raporları ve oşinografik-meteorolojik veriler elde edilmiştir. Bu veriler ışığında oluşturulan petrol kirliliği senaryolarının simülasyonda çalıştırılması sonucu elde edilen çıktılar problemin çözümü için geliştirilen optimizasyon modelinin kurulmasında veri olarak kullanılmıştır. Optimizasyon modeli, probleme ait değişkenler, amaç ve kısıt fonksiyonları ve belirlenen parametreler çerçevesinde kurulmuş ve bilgisayara kodlanarak çözülmüştür. Tartışma ve sonuç kısımları yazılarak çalışma neticelendirilmiştir.

Problem belirlenirken, denizde petrol kirliliğiyle ilgili modelleme, uzaktan algılama, müdahale ve risk değerlendirme gibi alt konu başlıkları incelenerek literatür taraması yapılmıştır. Gemi kaynaklı petrol kirliliği riski ve modellemesi ile ilgili genelde İstanbul Boğazı'yla ilgili yapılmış çalışmaların bulunduğu (Başar, 2003; Can,

2007; Ertürk Bozkurtoğlu, 2017) fakat Türk Boğazlar Sistemini oluşturan bir diğer önemli su yolu olan Çanakkale Boğazı'nın İstanbul Boğazı kadar araştırılmadığı keşfedilmiştir. Bu nedenle Çanakkale Boğazı'nda gerçekleşebilecek deniz petrol kirliliğinin yaratacağı sonuçları öngörebilmek ve meydana getireceği olumsuz etkileri proaktif bir yaklaşımla engelleyebilecek önlemleri belirlemek çalışmanın problemi olarak belirlenmiştir.

Problem belirlendikten sonra problemin çözümü ile ilgili izlenecek yol hakkında Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Fakültesi Bilgisayar Bilimleri Bölümü Anabilim Dalından akademik yardım alınarak uzman görüşüne başvurulmuştur. Alınan görüş itibariyle Çanakkale Boğazı'nda varsa önceden gerçekleşmiş gemi kaynaklı petrol kirliliği kazalarına ilişkin verilerin toplanması ve analizlerin bu veriler üzerinden yapılması, eğer yoksa Çanakkale Boğazı'nda gerçekleşmiş ama kirliliğe neden olmamış fakat potansiyel olarak neden olabileceği düşünülen kazaların verileri üzerinden çözümün araştırılması görüşü alınmıştır.

Alınan görüş üzerine Türkiye Cumhuriyeti Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Kıyı Emniyeti Genel Müdürlüğü, Türkiye Cumhuriyeti İçişleri Bakanlığı Sahil Güvenlik Komutanlığı ve Türkiye Cumhuriyeti Çevre ve Şehircilik Bakanlığı ile iletişime geçilmiş ve resmi yazı yolu ile bu kurumlardan Çanakkale Boğazı özelinde yaşanmış denizde petrol kirliliği kaza verileri istenmiştir. Resmi yazılar ile alınan yanıtlar neticesinde Çanakkale Boğazı'nda 2005 yılında bir konteyner gemisi ile bir dökme yük gemisinin çatışması sonucu 20 ton yakıtın, 2015 yılında ise bir tanker ile yolcu gemisinin çatışması sonucu 2500 ton naftanın denize dökülmesi kazalarının gerçekleştiği öğrenilmiştir. Bu iki kaza haricinde yaşanmış gemi kaynaklı petrol kirliliği olayı olmadığından Kıyı Emniyeti Genel Müdürlüğü'nden 2007-2018 yılları arasında gerçekleşmiş gemi kaza verileri istenmiştir ve toplamda 162 kaza verisine ulaşılmıştır.

Elde edilen 162 gemi kazası verisi Microsoft Office Excel programında tasnif edilmiş ve tanımlayıcı analizlere tabi tutulmuştur. Ardından bir coğrafi bilgi sistemleri (CBS) yazılımı olan MapInfo 8 Pro bilgisayar programı kullanılarak bu kazaların Çanakkale Boğazı'ndaki coğrafi konumları itibari ile dağılımları gerçekleştirilerek boğaza ait tehlike haritası çıkarılmıştır.

Bundan sonraki adımda çalışma, tanker kazaları özeline indirgenmiş ve 15 tanker kazasının her biri için PISCES II'de yürütülecek 15 denizde petrol kirliliği senaryosu geliştirilmiştir. Senaryoların oluşturulmaları kapsamında denize dökülmesi muhtemel petrolün miktarı ve türü gibi bilgilerin yanında Çanakkale Boğazı'na ait akıntı, rüzgar, sıcaklık, su yoğunluğu, deniz durumu ve bulutluluk gibi oşinografik ve meteorolojik verilere ihtiyaç duyulmuştur. Oşinografik ve meteorolojik veriler Seyir Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı tarafından yayınlanan Türk Boğazları Oşinografi Atlası ile "Poseidon System" adlı meteorolojik ve oşinografik tahminler yapan sitenin arşivinden elde edilmiştir. Denize dökülen petrolün miktarını "worst credible scenario" kapsamında tahmin edebilmek için dünya genelinde 1957-2018 yılları arasında meydana gelmiş ve petrol kirliliğine neden olmuş tanker kazalarına ilişkin veriler toplanmıştır. Bu veriler Uluslararası Tanker Sahipleri Kirlilik Federasyonu (ITOPF), Uluslararası Petrol Kirliliği Tazminat Fonları (IOPC), Kaza Sonucu Oluşan Su Kirliliğine İlişkin Belgeleme, Araştırma ve Deney Merkezi (CEDRE) ve Akdeniz için Bölgesel Deniz Kirliliği Acil Müdahale Merkezi (REMPEC) gibi kuruluşlara ait internet sitelerinden ve "Basics of Oil Spill Clean up" ve "Tanker Tromedy" adlı kitap kaynaklarından elde edilmiştir. Toplamda 351 tanker kazası verisi tankerlerin tonajı, yaşı, kaza tipi, gövde tipi, dökülen petrolün türü, gerçekleşen petrol kirliliği miktarı gruplarında derlenmiş ve Çanakkale Boğazı'nda gerçekleşen 15 tanker kazası sonucu eğer kirlilik yaşansaydı bunun miktarı ne olurdu sorusuna yanıt verebilmek için makine öğrenmesi sürecine tabi tutulmuştur. "Rapid Miner" bilgisayar programında denenen çeşitli makine öğrenmesi algoritmaları neticesinde en düşük hata oranıyla tahminleri gerçekleştiren "random forest algoritmasının" ürettiği tahmini kirlilik miktarları senaryolarda kullanılmıştır. Senaryolarda döküntüsü gerçekleşecek petrol türü ise yine öngörülebilir en kötü senaryo çerçevesinde Enerji Piyasası Denetleme Kurumunun (EPDK) yıllık yayınladığı raporlardan saptanan Türkiye'nin 2007 ile 2019 yılları arasında en çok ham petrol ithal ettiği ülkelere göre ve gemi tonajlarının boyutlarına göre rastgele atanmıştır.

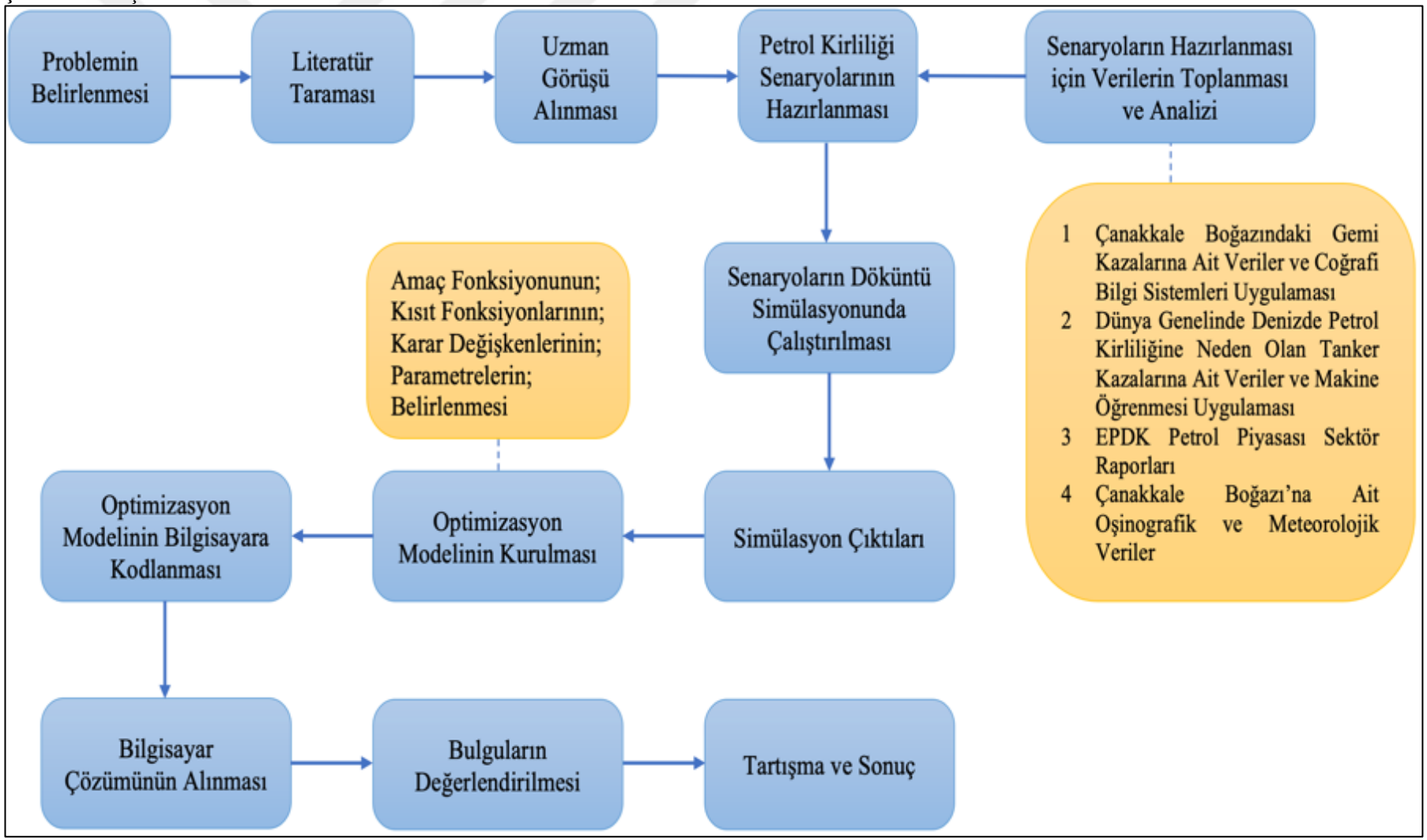
Geliştirilen senaryoların PISCES II simülasyon programında yürütülebilmesi için Çanakkale Boğazı deniz trafik alanlarını gösterir haritalar simülasyon programının geliştiricisi kuruluşla iletişime geçilerek satın alınmıştır. Bundan sonra

senaryoların her biri ayrı ayrı simüle edilmiş ve deniz yüzeyinde yayılım süreçlerine, kıyıya vurma sürelerine, bozunma süreçlerine ait bilgiler ortaya çıkarılmıştır.

Çözümü araştırılan problemin yöneylem araştırması sahasına giren bir problem türü olmasından dolayı 2019-2020 akademik yılı güz döneminde Dokuz Eylül Üniversitesi Endüstri Mühendisliği bölümünde misafir öğrenci vasfıyla Yöneylem Araştırması dersi takip edilmiştir.

Simülasyonlardan edinilen bilgiler acil durum müdahale tesisinin optimizasyonu için kurulacak amaç fonksiyonundaki değişkenlerin alacağı değerlerin kümelerini ve kısıt fonksiyonlarını oluşturmada veri olarak kullanılmıştır. Kirliliğe aday 15 nokta için 15 potansiyel tesis düşünülmüş ve bu 15 potansiyel tesis içerisinden olası bir kirlilik durumunda Çanakkale Boğazı deniz trafik alanına optimum şekilde hizmet verebilecek tesis veya tesisler amaç ve kısıt fonksiyonlarından oluşan matematiksel modelin bilgisayara kodlanıp çözülmesi yoluyla tespit edilerek çalışma sonlandırılmıştır. Yukarıda detaylıca anlatılan araştırmanın sürecini özetleyen şema özet olarak şekil 33'te gösterildiği gibidir.

Şekil 33: Araştırmanın Süreci



Kaynak: Yazar tarafında oluşturulmuştur.

3.5. ARAŞTIRMANIN YÖNTEMİ

Bu araştırmanın konusu tesis yeri seçim problemleri kapsamında denizde petrol kirliliğine müdahale tesisinin optimum konumunun tespit edilmesi olduğundan, problemin çözümünde, yöneylem araştırmaları kapsamında kullanılan optimizasyon tekniklerinden tam sayılı doğrusal programlama yoluyla matematiksel modelleme yöntemi kullanılmıştır. Kullanılan bu yöntem takip eden kısımda anlatılmaktadır.

Yöneylem araştırması (Operations Research), bilimsel yöntem ve tekniklerin karar verme problemlerine uygulanmasıyla ve en iyi veya en uygun çözümlerin oluşturulmasıyla ilgilenen matematik dalıdır (Rao, 2020: 1). Bu terim ikinci dünya savaşının erken dönemlerinde ortaya çıkmış ve ilk uygulamaları savaş sırasında askeri operasyonlarla ilgili stratejik ve taktik kararları etkin biçimde alıp yürütmek için yapılmıştır. Savaş sonrası endüstriyel büyümedeki patlama neticesinde karar verme süreçlerindeki karmaşıklığın sebep olduğu problemler yöneylem araştırmasına sivil işletme, endüstri ve hükümetler nezdinde duyulan ihtiyacı ortaya çıkarmıştır ve böylece yöneylem araştırmaları büyük bir ivme yakalamıştır. Bu alandaki ilk matematiksel teknik olan ve doğrusal programlama problemlerin çözümünde kullanılan "simplex metot" 1947 yılında George Dantzig tarafından geliştirilmiştir. Bilgisayar devrimiyle birlikte hesap yapma kabiliyeti ve hızının yüksek oranlarda artması da bu sahadaki tekniklerin çok daha yaygın olarak kullanılmasını sağlamıştır.

Tablo 18'de yöneylem araştırmaları sahasında kullanılan çeşitli matematiksel programlama teknikleri ve meta-sezgisel teknikler listelenmektedir. Matematiksel programlama teknikleri, önceden belirlenmiş bir dizi kısıt altında birkaç değişkenli fonksiyonun minimum ya da maksimum değerini bulmada kullanışlıdır. Stokastik süreç teknikleri olasılık dağılımları bilinen rastgele değişkenlerce tanımlanan problemleri analiz etmede; istatistiksel yöntemler ise fiziksel durumun en doğru temsilini elde etmek için deneysel veriyi analiz etmede ve deneysel modeller oluşturmada faydalıdır (Rao, 2020: 3).

Tablo 18: Yöneylem Araştırmasının Metotları

Matematiksel Programlama veya Optimizasyon Teknikleri	Stokastik Süreç Teknikleri	İstatistiksel Metotlar
- Kalkülüs Metotları - Varyasyon Hesapları - Doğrusal Olmayan Programlama - Geometrik Programlama - Kuadratik Programlama - Doğrusal Programlama - Dinamik Programlama - Tamsayılı Programlama - Stokastik Programlama - Ayrılabilir Programlama - Çok amaçlı Programlama - Ağ Yöntemleri: CPM, PERT - Oyun Teorisi	- İstatistiksel Karar Teorisi - Markov Süreçleri - Kuyruk Teorisi - Yenileme Teorisi - Simülasyon Metotları - Güvenilirlik Teorisi	-Regresyon Analizi -Kümeleme Analizi -Faktör Analizi
Modern Optimizasyon Teknikleri		
- Genetik Algoritma - Benzetimli Tavlama - Karınca Kolonisi Optimizasyonu - Parçacık Sürü Optimizasyonu - Tabu Arama Metodu	- Yarasa Algoritması - Bal Arısı Algoritması - Ateşböceği Algoritması - Harmoni Arama Algoritması - Öğretme-Öğrenme Algoritması - Meyve Sineği Algoritması	- Salp Sürü Algoritması - Guguk Kuşu Algoritması - Su Buharlaşma Algoritması - Geçen Araç Arama Algoritması - Koşucu-kök Algoritması - Yapay Bağışıklık Sistemi Algoritması - Sinir Ağı Tabanlı Optimizasyon -Bulanık Optimizasyon

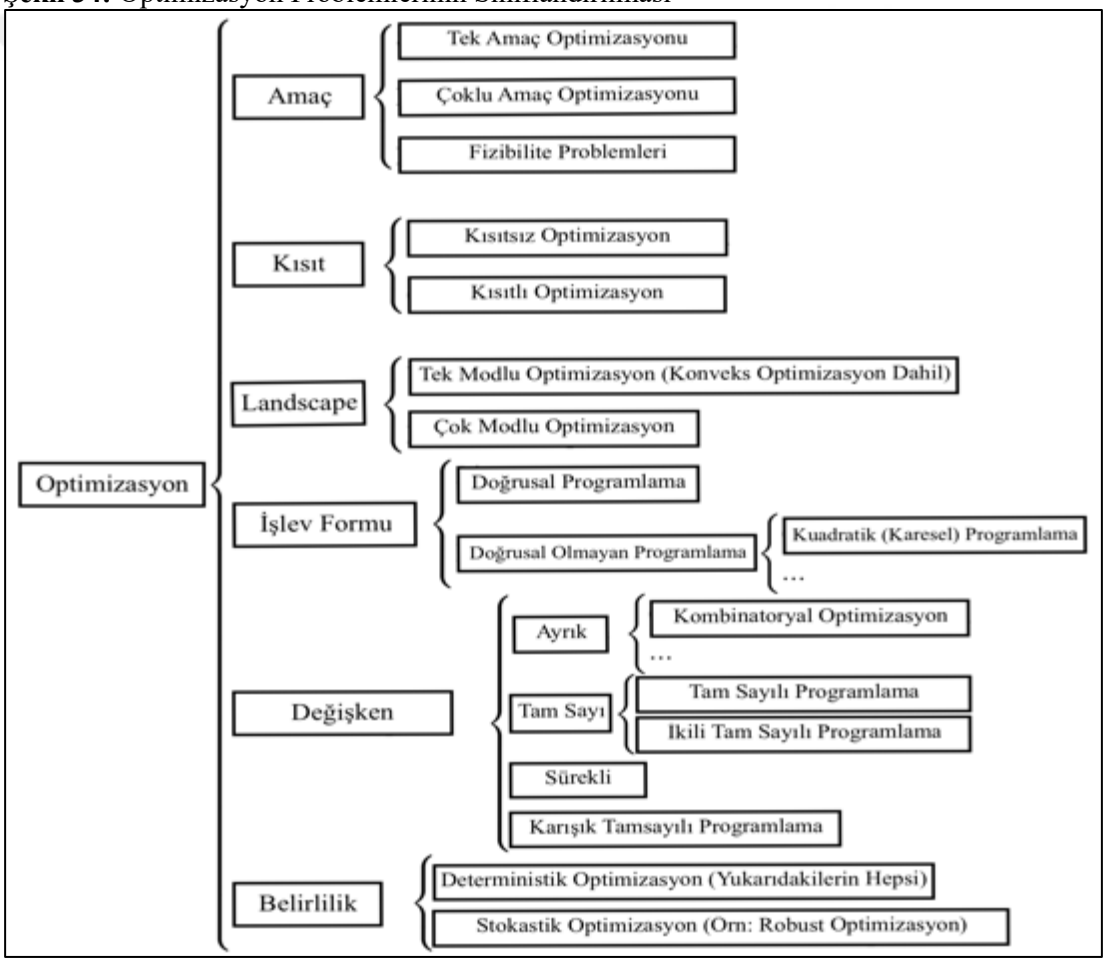
Kaynak: (Rao, 2020: 3).

Bir yöneylem araştırmasının süreci aşağıda sıralanan ana fazlardan oluşmaktadır (Hillier ve Liberman, 2001: 1-2; Bhunia ve diğerleri, 2019: 2):

1. Problemi belirlemek ve gereken verileri toplamak
2. Problemi temsil eden matematiksel bir model formüle etmek
3. Modelin problem için çözümünü üreten bilgisayar temelli bir prosedür geliştirmek.
4. Modeli test etmek ve gerekiyorsa geliştirmek
5. Çözümü uygulamak

Optimizasyon, bir amaç fonksiyonuna göre performansları ölçülen mümkün alternatif çözümler içerisinden en iyisini bulmayı amaçlayan metodolojidir (Butenko ve Pardalos, 2014: 161). Optimizasyon karar verme biliminde ve fiziksel bir sistemin analizinde kullanılan önemli bir araçtır. Optimizasyon uygulamasının işleyebilmesi için amaç, değişkenler ve kısıtlar şeklinde 3 temel bileşene ihtiyaç vardır ve bunların belirlenmesi sürecine modelleme yahut programlama denilmektedir (Nocedal ve Wright, 2006: 2). Optimizasyon problemleri amaç, kısıt, fonksiyon formu, değişken türü, belirlilik durumu şeklinde aşağıdaki gibi sınıflandırılabilmektedir (Yang, 2018: xxviii):

Şekil 34: Optimizasyon Problemlerinin Sınıflandırılması

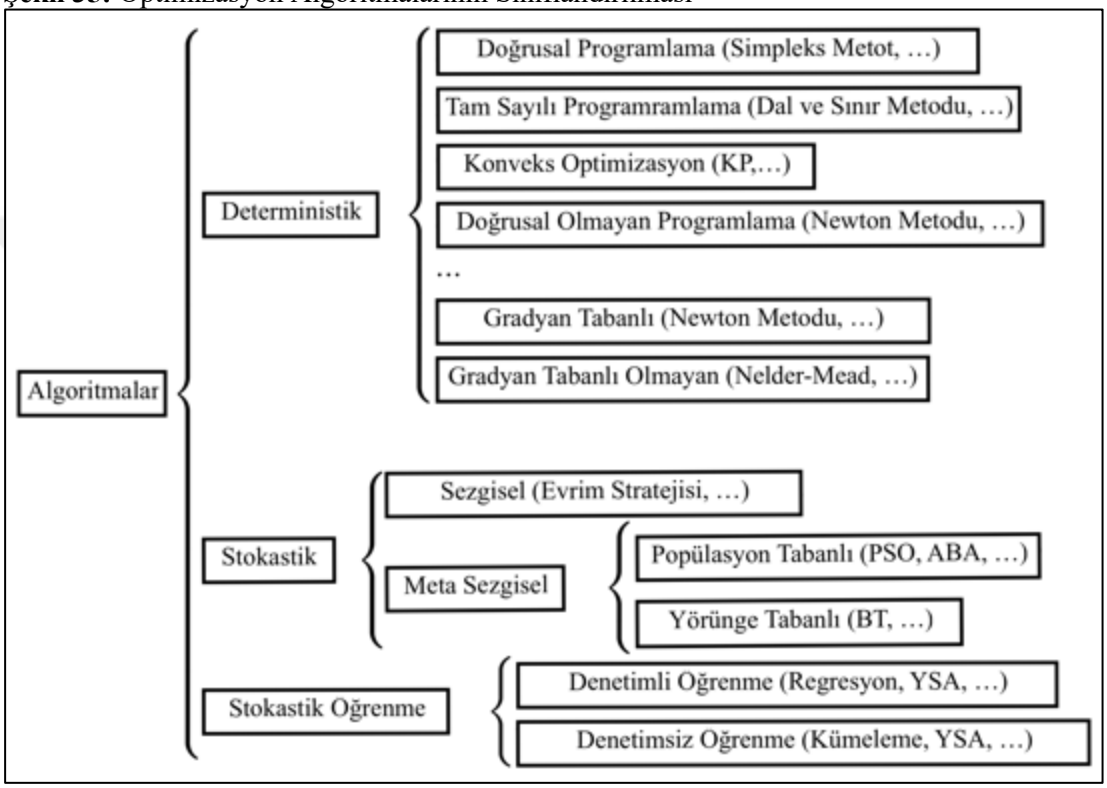


Kaynak: (Yang, 2018: xxviii)

Optimizasyon problemlerinin çözümlerinde kullanılan algoritmalar çok çeşitlidir ve farklı algoritmalar çözüm için farklı gerekliliklere ve farklı etkinlik düzeylerine sahip olabilmektedir. Bir algoritma bir problem türü için çok iyi

çalışabilirken farklı bir problem türü için işlevsiz kalabilmektedir. Bu algoritmalar yinelemeli-tekrarlı (iteratif) olma eğilimindedir ve sonuçta amaç fonksiyonunun yüzlerce, binlerce ve hatta milyonlarca kere olacak biçimde çoklu değerlendirilmesi gerekmektedir. Optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan algoritmaların sınıflandırılması aşağıdaki gibidir (Yang, 2018: xxix):

Şekil 35: Optimizasyon Algoritmalarının Sınıflandırılması



Kaynak: (Yang, 2018: xxx).

Bu çalışmada tesis yerinin optimum konumunun belirlenmesi için oluşturulan amaç fonksiyonunu temsil eden matematiksel model tam sayılı doğrusal programlama modelidir. Tesis yeri seçim problemleri ise yöneylem araştırmaları kapsamında çözümü aranan bir problem türüdür. Bu nedenle yöneylem araştırmaları ve optimizasyon konularında yapmış olduğumuz açıklamalardan sonra tesis yeri konum optimizasyonu problemleri ve tam sayılı doğrusal programlamadan bahsetmek yerinde olacaktır.

3.5.1. Tesis Yeri Konum Optimizasyonu Problemleri

Tesis yeri konum optimizasyonu modellemesi problemleri afet öncesi ve sonrası operasyonları için bir stratejik planlama tasarımı yaklaşımıdır ve etkili ve verimli bir afet yönetimi planlaması için önemlidir. NP-Zor (deterministik olmayan polinom zaman zorluğu) kategorisinde olan bu tür problemlerin çözümünde, tam olarak optimum çözümü vermeyen fakat makul bir çözüme polinom süresi içerisinde ulaşabilen sezgisel algoritmalar kullanılsa da, üretilen çözümün sağlamasını yapabilmesi ve bazı gerçek vakalarda problemi çözebilmesi açısından kesin algoritma kullanılması da önemli ve kaçınılmazdır (Boonmee ve diğerleri, 2017: 486). Tesis konum optimizasyon modelleri genellikle ikili (binary 0,1) değer alan konum değişkeni ile kurulan karışık tamsayılı doğrusal programlamaya dayanmaktadır ve bu modellerin çoğu tek seviyeli iken bazıları iki seviyeli olabilmektedir (Caunhye ve diğerleri, 2012: 6).

Genel bakış açısından tesis yeri konum problemleri uzay ve zaman olmak üzere iki unsurca tanımlanmaktadır. Uzay ile tesisin kurulacağı alana, zaman ile yeni bir tesis geliştirmek veya var olanı modifiye etmek için gereken zamana atıfta bulunulmaktadır. Bu iki element ayrık ve sürekli olarak analiz edilebilmektedir ve bunun sonucu olarak da problemler ayrık-sürekli ve statik-dinamik olarak sınıflandırılabilmektedir (Arabani ve Farahani, 2012: 408). Tesis yeri konum optimizasyonu modellerini sınıflandırmayı etkileyen 8 yaygın kriter aşağıdaki gibidir (Jia ve diğerleri, 2007: 42; Klose ve Drexl, 2005: 5):

- Topoloji: Sürekli Konum, Ayrık-Ağ Konum, Hub Bağlantı Modelleri
- Amaç: P-Medyan, Kaplama, P-Merkez Problemleri
- Çözüm Yöntemi: Matematiksel, Simülasyon, Yapay Zeka, Kombine
- Tesisin Özelliği
- Talep Modeli: Elastik, Sabit
- Tedarik Zinciri Tipi: Tek Aşamlı, Çok Aşamalı
- Zaman: Statik, Dinamik
- Girdi Parametreleri: Deterministik, Stokastik

Bu çalışma kapsamında ele alınan problem için oluşturulan optimizasyon modeli statik ve deterministik, ayrık konumlu, kaplama problemi modeli olarak

nitelendirilmektedir (Owen ve Daskin, 1998: 425-427; Arabani ve Farahani, 2012: 410-411; Boonmee ve diğerleri, 2017: 487-488).

Statik modellerde girdiler zamana bağlı değildir ve tipik olarak tek bir temsili girdi seti kullanılarak sorun tek bir temsili periyot için çözülmektedir (Daskin, 2013: 15). Deterministik modellerde ise bütün girdi paramatreleri bilinmekte ve zamanla sabit kaldığı varsayılmaktadır. Deterministik modeller dinamik, stokastik ve güçlü (robust) modellerin temelini oluşturmaktadır (Boonmee ve diğerleri, 2017: 487). Ayrık modellerde talep veya aday tesis, belirli bir coğrafik koordinatta yani noktada oluşmaktadır. Sürekli modellerde ise talep veya aday tesisin yeri çalışma yapılan düzlemin herhangi bir noktasında belirebilmektedir. Ayrıca ayrık modellerde düğümler arasındaki mesafe keyfidir ve bu sebeple ayrık modeller ağ modellerine göre daha geniş yelpazede problemin modellenmesinde kullanılabilmektedir (Arabani ve Farhani, 2012: 410; Daskin, 2013: 12). Ayrık konum modellerinde ayrık talep seti *I* ve ayrık aday tesis seti *J* olduğu varsayılmaktadır. Ayrık konum modelleri çoğu kez tam sayılı veya karışık tam sayılı programlama problemleri olarak formüle edilmektedir ve P-Medyan, P-Merkez ve Kaplama modelleri yöneylem araştırmalarında en yaygın olarak kullanılan ayrık modelleme türleridir (ReVelle ve diğerleri, 2008: 818).

3.5.2. Medyan, Merkez ve Kaplama Modelleri

İlk defa Hakimi 1967 tarafından ortaya konulan P-medyan (minisum) modellerinde amaç P tane tesis yerleştirerek talep noktaları ile seçilen tesisler arasındaki toplam talep ağırlıklı ulaşım mesafesini (toplam ulaşım zamanını veya toplam ulaşım maliyetini) minimize etmektir (Owen ve Daskin, 1998: 425).

P-merkez (minimax) modelleri ile herhangi bir talep noktasıyla ona en yakın tesis arasındaki maksimum mesafenin minimize edilmesi hedeflenmektedir. Bu tür problemlerde bütün talep noktalarının karşılanması gerekmekte, fakat verilen sayıdaki tesisin kapsama mesafesini minimize edecek şekilde konumlandırılması istenmektedir. Bir başka deyişle minimax problemler, en kötü sistem performansını P sayıdaki tesis ile minimize etmek girişimidir. Girdi olarak "S" kapsama mesafesi alınmamakta, P sayıdaki tesisin konumlandırılmasıyla ilişkili minimum kapsama mesafesi belirlenmektedir (Daskin, 2013: 193, Boonmee, 2017: 489).

Kaplama modelleri acil durum müdahale tesisi konum problemleri için en yaygın kullanılan konum modelleridir. Kaplama problemlerinde amaç bir zaman veya mesafe limiti içerisinde talep noktalarının kapsanmasıdır. Bir talep noktası ancak belirlenen mesafe ve zaman limiti içerisinde hizmet alabiliyorsa kapsanmış demektir (Jia ve diğerleri, 2007: 43). Kaplama modelleri ile ilgili literatür "küme kaplama" ve "maksimum kaplama" olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır (Schilling ve diğerleri, 1993; Marianov ve Serra, 2002: 4; Farahani ve diğerleri, 2012: 368).

Toregas ve diğerleri (1971) tarafından ilk kez ortaya konulan küme kaplama modelinde amaç tesis sayısını minimize ederek talep noktalarının tamamını kapsamaktır (Current ve diğerleri, 2002: 86, Li ve diğerleri, 2010: 3). Bir başka ifade ile küme kaplama modelinin amacı, sınırlı sayıdaki potansiyel-aday tesis seti arasından minimum maliyetli tesisleri, her talep noktasının en az bir tesis tarafından kapsanmasını sağlamak koşuluyla bulmaktır (Daskin 2013: 125). Küme kaplama modeli matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (Farahani ve diğerleri, 2012: 370):

Girdiler:

I: i talep noktalarından oluşan talep kümesi: I={1…m}
J: j aday tesis noktalarından oluşan aday tesis kümesi: J={1…n}
X_j: j noktasında bir tesisin kurulma durumunu belirten {0,1} ikili değerini alabilen karar değişkeni: kurulursa 1, kurulmazsa 0.
S: maksimum kabul edilebilir servis mesafesi ya da zamanı
C_j: j noktasında tesis konumlandırmanın sabit maliyeti
a_{ij}: j aday tesisinden i talep noktasına olan mesafe veya zamanın S değerine göre durumunu belirten {0,1] ikili değerini alan parametre: küçükse 1, büyükse 0.

Amaç Fonksiyonu:

$$Minimize \sum_{j=1}^{n} C_j X_j \tag{1}$$

Kısıtlar:

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij} X_j \geq 1, \qquad \forall i \in I \tag{2}$$

$$X_j \in \{0,1\}, \qquad \forall j \in J \tag{3}$$

Burada amaç fonksiyonu (1) konumlandırılacak tesisler sonucu oluşacak toplam sabit maliyeti veya her bir aday noktada kurulabilecek tesislerin sabit maliyetleri birbirine eşit kabul edilirse konumlandırılan toplam tesis sayısını en aza indirmektedir. Kısıt fonksiyonu (2) her bir talebin en az bir kere kapsanması şartını sağlamakta ve eşitliğin sol tarafı i∈I talebini kapsayan konumlandırılmış tesislerin sayısını vermektedir. Kısıt fonksiyonu (3) ise potansiyel tesis konum noktalarının {0,1} şeklinde ikili değer alabileceğimi ifade etmektedir.

Küme kaplama modeli yaklaşımıyla çözülen tesis konumlandırma problemlerinde bütün talep noktalarının aynı yoğunlukta olduğunun varsayılması ve modelin çözümü olarak ortaya çıkan, tüm talepleri kapsayabilecek tesis sayısının gerçek dünyada bütçe açısından inşa edilmesi mümkün olan tesis sayısını aşması küme kaplama modellerini sınırlandırmaktadır (Jia ve diğerleri, 2007: 43; ReVelle ve diğerleri, 2008: 838). Church ve ReVelle (1974) bu sınırlamaları elemek amacıyla maksimum kaplama konum modelini geliştirmiştir. Maksimum kaplama konum modelinin amacı, önceden belirlenmiş "P" sayıdaki tesisi, kapsanan talebi maksimum yapacak şekilde konumlandırmaktır. Maksimum kaplama modeli tüm talep noktalarını kapsayacak yeterli sayıda tesis olmadığını varsaymakta ve tüm talepler karşılanamıyorsa, kabul edilebilir hizmet mesafesi veya zamanı "S" içerisinde en çok talebi karşılayabilecek tesis konumlandırma şemasını aramaktadır (Current ve diğerleri, 2002: 88; Marianov ve Serra, 2002: 6-7). Maksimum kaplama modelinin matematiksel ifadesi aşağıdaki gibidir (Farahani ve diğerleri, 2012: 375):

Girdiler:

I: i talep noktalarından oluşan talep kümesi: I={1…m}
J: j aday tesis noktalarından oluşan aday tesis kümesi: J={1…n}
h_i:i noktasındaki talebin yoğunluğu (popülasyon v.b.)
S: sunulan hizmet için zaman veya mesafe standardı
P: konumlandırılması gereken toplam tesis
a_{ij}: j aday tesisinden i talep noktasına olan mesafe veya zamanın S değerine göre durumunu belirten {0,1] ikili değerini alan parametre: küçükse 1, büyükse 0.
X_j: j noktasında bir tesisin kurulma durumunu belirten {0,1} ikili değerini alabilen değişken: kurulursa 1, kurulmazsa 0.
Z_i: i talep noktasının kapsanma durumunu belirten {0,1} ikili değerini alabilen karar değişkeni: kapsanıyorsa 1, kapsanmıyorsa 0

Amaç Fonksiyonu:

$$Maksimize \sum_{i} h_i Z_i \quad (1)$$

Kısıtlar:

$$Z_i \leq \sum_{j \in J} a_{ij} X_j \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} X_j \leq P \quad (3)$$

$$X_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (4)$$

$$Z_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in I \quad (5)$$

Burada amaç fonksiyonu (1) kapsanan talebin sayısını maksimize etmektedir. Kısıt (2) fonksiyonu kapsama ile konum arasındaki ilişkiyi ortaya koymakla birlikte i∈I talebinin, i talep noktasını kapsayan aday tesislerden en az birinin seçilmemesi halinde kapsanamayacağını ifade etmektedir. Ayrıca kısıt (2) fonksiyonunun sağ tarafı i talebini kapsayabilen tesislerin sayısını vermektedir. Kısıt (3) fonksiyonu "P" tesis sayısından fazla sayıda tesis konumlandırılamayacağını sağlamaktadır. Kısıt (4) ve (5) ise karar değişkenlerinin alabileceği değerleri göstermektedir.

Hem küme kaplama modelleri hem de maksimum kaplama modelleri tam sayılı doğrusal programlama modelleridir (Boonmee ve diğerleri, 2017: 488).

3.5.3. Tam Sayılı Doğrusal Programlama

Bir fonksiyon, karar değişkenlerinin sabit-ağırlıklı toplamlarına eşitse doğrusaldır (Rardin, 2015: 49). Bir kısıtlı optimizasyon modeli türü olan doğrusal programlama, eşitlik veya eşitsizlik halindeki doğrusal kısıt fonksiyonlarının sınırları altında, "z" doğrusal amaç fonksiyonunu minimize veya maksimize edecek sürekli karar değişkenleri için bir dizi değerler arayan bir matematiksel programlama sınıfıdır ve matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (Chen ve diğerleri, 2010: 3):

$$Maksimize\ z = \sum_{j} c_j x_j$$

$$Kısıtlar: \sum_j a_{ij}\, x_j \leq b_i \quad (i = 1,2,3,\dots,m)$$
$$x_j \geq 0 \qquad (j = 1,2,3,\dots,n)$$

Bir doğrusal programlama modelinin sahip olması gereken özellikler olan orantılılık, toplanabilirlik, bölünebilirlik, negatif değer almamak, belirlilik-kesinlik varsayımlarını yerine getirebilmek için amaç fonksiyonunun ve kısıtların doğrusal, karar değişkenlerinin sürekli ve pozitif değerli, ve model parametrelerinin deterministik olması gerekmektedir (Favero ve Belfiore, 2019: 712).

Tam sayılı doğrusal optimizasyon modelleri, karar değişkenlerinden en az birinin alabileceği değerlerin tam sayılarla sınırlandırıldığı doğrusal optimizasyon modelleridir (Sierksma ve Zwols, 2015: 279). Bütün karar değişkenlerinin tam sayılarla sınırlandırıldığı modeller saf tam sayılı doğrusal, karar değişkenlerinin bir kısmının ayrık bir kısmının sürekli değerler alabildiği modeller karma tam sayılı doğrusal, karar değişkenlerinin {0,1} gibi ikili ve ayrık değer aldığı modeller ise ikili tam sayılı doğrusal modeller olarak anılmaktadır (Wolsey, 2021: 3). İş atama problemleri, en kısa yol problemleri, sırt çantası (knapsack) problemleri, sermaye bütçeleme problemleri, üretim planlama problemleri, gezgin satıcı problemleri, araç rotalama problemleri, telekominikasyon problemleri, organ nakli problemleri ve tesis konumlandırma problemleri gibi pek çok alandan çeşitli problemlerin çözümü için tam sayılı doğrusal programlama kullanılmaktadır (Yang, 2018: 156). Tam sayılı doğrusal veya ikili tam sayılı doğrusal programlama modelinin matematiksel gösterimi aşağıdaki gibidir (Favero ve Belfiore, 2019: 888):

$$max.veya\ min.z = f(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_1x_1 + c_2x_2 + \cdots + c_nx_n$$

Kısıtlar:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n\{\leq, =, \geq\}b_1$$
$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n\{\leq, =, \geq\}b_2$$
$$\dots\dots\ \dots\dots + \dots\dots\ \dots\dots + \cdots + \dots\dots\ \dots\dots\ \{\leq, =, \geq\}\ \dots\dots$$
$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \cdots + a_{mn}x_n\{\leq, =, \geq\}b_m$$

$$x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0$$
$$x_1, x_2, \dots, x_n\ tam\ sayı\ ya\ da\ ikili$$

Dal ve sınır algoritması, kesme düzlemi algoritmaları, dal ve kesme algoritmaları tam sayılı ve ikili tamsayılı doğrusal programlama modellerinin kesin çözümü için kullanılan en yaygın yöntemlerdir. Bununla beraber bu kategorideki bir çok problem NP-tamdır, yani yüksek hesaplama karmaşıklığı nedeniyle polinom zamanda çözülememektedir. Bu nedenle optimuma çözüme yaklaşık çözümler veren sezgisel ve meta-sezgisel yöntemler kesin çözüm yöntemlerine alternatif olmaktadır (Favero ve Belfiore, 2019: 887).

Doğrusal programlama problemleri grafik metot ve bir analitik yöntem olan simplex metot ile çözülebildiği gibi el ile hesaplamalar yapmak ve grafikler oluşturmak zorunda kalmadan bilgisayar yazılımları kullanılarak da çok daha zahmetsiz ve kısa sürelerde çözülmektedir. Bu çalışmada tesis yeri konumunu optimize eden tam sayılı doğrusal programlama problemi "Genel Cebirsel Modelleme Sistemi (GAMS) 24.2.2" ve "CPLEX 12.6." optimizasyon paket programları kullanılarak çözülmüştür.

GAMS karmaşık ve büyük ölçekli doğrusal, doğrusal olmayan ve tam sayılı programlama problemlerini çözmek için kullanılan üst düzey bir cebirsel modelleme sistemidir. GAMS, CPLEX gibi çeşitli optimizasyon paketlerine bağlanmasını sağlayan bir ara yüze sahiptir. CPLEX, büyük ölçekli doğrusal, doğrusal olmayan ve tam sayılı programlama problemlerinin çözümünde geniş ölçüde yaygın olarak kullanılan bir optimize edici yazılımdır. CPLEX, doğrusal programlama problemleri için en uygun çözümü belirlemede simplex ve iç noktalar yöntemlerini kullanmaktadır (Favero ve Belfiore, 2019: 774).

Literatürde denizde petrol kirliliğine acil müdahale tesislerinin konum ve kapasitelerinin belirlenmesi için matematiksel programlama modeli yaklaşımıyla gerçekleştirilmiş çalışmalar yer almaktadır. Bu çalışmalar aşağıdaki gibi sıralanmaktadır.

Belardo ve diğerleri (1974) denizde petrol kirliliğine müdahale ekipmanının konumlandırılması problemini çok amaçlı tam sayılı doğrusal programlama temelinde kısmi küme kaplama modeli yaklaşımıyla analiz etmişlerdir. Çalışma kapsamında New York eyaletinin Long Island bölgesinin deniz sahasında meydana gelebilecek 72 farklı petrol sızıntısı senaryosu tasarlanmış ve çözüm modelinde bu senaryoların içinden çeşitli petrol sızıntılarının olma olasılıkları ve çevresel etkileri

değerlendirmeye katılmıştır. Sonuçta çok amaçlı yaklaşımla sunulan farklı çözüm alternatifleri, karar alıcıların müdahale için çeşitli stratejileri değerlendirebilmesini sağlamıştır.

Psaraftis ve diğerleri (1986) potansiyel petrol kirliliği vakalarına müdahale için uygun ve yeterli ekipmanın nereye yerleştirilmesi gerektiği problemine stratejik kapsamda yaklaşmışlardır. Bu amaçla problemin çözümü için karma tam sayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir ve New England bölgesi için uygulanmıştır. Geliştirilen model sızıntı gerçekleşme sıklığını, sızıntı miktarındaki çeşitliliği, farklı müdahale tekniklerini, ekipman verimliliği ve çalışabilirliğini, tesis kurulmasının sabit maliyetini, ekipman edinme, ulaştırma ve işletme maliyetlerini ve kirliliğin yarattığı hasarın maliyetini hesaba katmıştır. Sonuçta incelenen senaryolar kapsamında, 50.000 galon ve altındaki petrol sızıntıları için müdahale ekipmanına yatırım yapmanın bu değerin üzerindeki sızıntılar için seyrek kullanılacak büyük ölçekli ekipmanlara yatırım yapmaya nazaran daha maliyet-etkin olduğu tespit edilmiştir.

Iakovou ve diğerleri (1996) stratejik ve taktik çerçeveden petrol kirliliği müdahale tesislerinin sayısını, konumunu ve buralarda stoklanacak müdahale ekipman miktarının dağılımını optimum olarak ortaya koyabilmek için tam sayılı doğrusal programlama temelli bir model geliştirmişlerdir. Model Florida yarımadası bölgesi için iki farklı örnek bazında çözülmüştür. Problemin çözümünde tarihsel veriler kullanılmıştır.

Wilhelm ve Srinivasa (1996) petrol kirliliği müdahale operasyonlarının stratejik ve genel geçer bir acil durum eylem planlaması için genel bir tam sayılı doğrusal programlama modeli geliştirmişlerdir. Model, yeni tesis inşası, var olan tesisin genişletilmesi, yeni ekipman alımı ve bunların paylaşımı için toplam maliyetlerin minimize edilmesi amacı üzerine kurulmuş ve Galveston Körfezi örneği özelinde uygulanmıştır. Sonuç olarak geliştirilen modelin farklı deniz alanları için uygulanabilir olduğu vurgulanmıştır.

Wilhelm ve Srinivasa (1997) denizde petrol kirliliğine müdahalenin taktik karar verme sürecini ele alan bir tam sayılı doğrusal programlama modeli ortaya koymuşlardır. Model müdahale sisteminin performansının zamanla azalabileceğini varsayarak, temizleme gereksinimlerinin bütün kritik zaman noktalarında karşılandığı

zaman fazlı müdahaleyi önermiştir. Model iki farklı sezgisel yaklaşımla çözülerek yaklaşık en iyi sonuçlar karşılaştırılmıştır. Srinivasa ve Wilhelm (1997) ise aynı tam sayılı doğrusal programlama modelini kesme düzlemi yöntemiyle çözerek orta-büyük ölçekli petrol kirliliğiyle ilgili sorunlara yanıt aramışlardır.

Gkonis ve diğerleri (2008) petrol kirliliğine müdahalede taktiksel karar verme için deniz yüzeyindeki petrol birikintisinin bozunma süreciyle ilgili bilgilere dayalı entegre bir yaklaşım önermişlerdir. Optimizasyon problemi, müdahalenin petrol birikintisiyle temas ettiği andaki petrol birikintisinin durumu hakkında tahmin veren dinamik matematiksel model ile birleştirilmiştir. Taktiksel problemin çözümü için toplam müdahale maliyetini minimize eden tam sayılı programlama modeli geliştirilmiştir.

Zhong ve You (2011) petrol kirliliği müdahalesinin optimal planlamasını toplam maliyet ve toplam müdahale süresinin uzunluğu kriterleri vasıtasıyla, birikinti alanının ve petrol hacminin zamansal yörüngesini, müdahale kaynaklarının taşınma ve kullanım seviyesini, temizleme çizelgesini ve kıyı koruma planını eş zamanlı olarak öngören iki kriterli, çok dönemli karma tam sayılı doğrusal programlama modeli ile göstermişlerdir. Bu model bir petrol bozunma modeli ile entegre edilmiştir. Çok amaçlı optimizasyon modeli Meksika körfezi ve New England bölgeleri için uygulanmış ve epsilon-kısıtlama yöntemiyle çözülmüştür.

You ve Leyffer (2011) petrol kirliliğine toplam müdahale maliyetini minimize edecek karma tam sayılı dinamik programlama modeli geliştirmişlerdir. Dinamik model karma tam sayılı doğrusal olmayan programlama modeline dönüştürülerek yeniden formüle edilmiş ve bu doğrusal olmayan modelin çözümünün başlatılabilmesi için de yaklaşık bir karma tam sayılı programlama modeli geliştirilmiştir. Sonuçta müdahale planına petrol taşınma ve bozunma modelinin entegre edilmesinin önemi ortaya konulmuştur.

Verma ve diğerleri (2013) petrol kirliliği acil müdahale tesisi için konum ve stok kapasitesini belirleyen iki aşamalı stokastik programlama ortaya koymuşlardır. Model, kamu erişimine açık tarihsel gerçekçi veriler ile test edilmiştir. Newfoundland deniz bölgesi için oluşturulan senaryoların çözümü sonucu bütün senaryolar için 2 müdahale tesisinin konumlandırılması neticesine ulaşılmıştır.

Li ve diğerleri (2014) denizde petrol kirliliğine hızlı, dinamik ve maliyet etkin bir biçimde müdahale operasyonu gerçekleştirmede ve ekipman dağıtımında sağlam kararlar sağlamak için Monte-Carlo simülasyonu tabanlı karma tam sayılı doğrusal olmayan programlama modeli yaklaşımını sunmuşlardır. Vaka bazında uygulaması yapılan modelden dinamik ve belirsiz durumlar altında daha etkili ve verimli müdahale eylemleri sağladığı tespit edilmiştir.

Xu ve diğerleri (2016) petrol kirliliğine müdahale için gerekli olan ekipmanların depolandığı tesislerin sayısını ve müdahale süresini minimize eden çok amaçlı optimizasyon modeli ve çözüm algoritması ortaya koymuşlardır. Modelin, örnek uygulama neticesinde makul ve pratik olduğu doğrulanmıştır.

Grubesic ve diğerleri (2017) denizde petrol kirliliği müdahalesi için ekipman ve ekiplerin dağıtımını mekânsal olarak optimize edecek bir matematiksel program ile kombine edilmiş gelişmiş petrol kirliliği modelleme tekniklerinin uygulamasını göstermişlerdir. Çalışmada, müdahale ekipmanının gönderim maliyeti/ zamanını minimize ederken aynı zamanda hedeflenen müdahale seviyesini de karşılayan taktik bir matematiksel programlama modeli sunulmuştur. Bu modelin girdileri ise denizde petrol kirliliğini modelleyen BLOSOM simülasyon programının senaryo bazındaki çıktıları olmuştur.

Garrett ve diğerleri (2017) kuzey kutbunda yapılan enerji keşiflerini desteklemek için gelişen petrol kirliliği müdahale yeteneklerinin dinamik ağ genişleme problemini modellemek için karma tam sayılı doğrusal programlama modeli oluşturmuşlardır. Modelin amacı, potansiyel petrol kirliliği vakaları için toplam ağırlıklı müdahale zamanını minimize etmektir. Sonuç olarak kuzey kutbu petrol kirliliği müdahalesinde karar vericiler için kritik noktalardaki seçimlerin daha doğru yapılmasına olanak sağlayan çıktılar elde edilmiştir.

Li ve diğerleri (2018) Bohai Denizi için petrol kirliliği noktaları ve müdahale sahası arasındaki ilişkiye dayalı çok amaçlı konum optimizasyon modeli kurmuşlardır. Optimizasyon modelini çözmek ve acil durum müdahale ekipmanlarının tahsis oranı belirlemek için genetik algoritma kullanılmıştır.

Lazuga ve diğerleri (2018) karma tam sayılı doğrusal programlama modeli geliştirerek Polonya'nın Baltık Denizi kıyısında meydana gelebilecek petrol kirliliği vakalarına en kısa zamanda müdahale edecek şekilde müdahale gemilerinin

konumlandırılması problemini ele almışlardır. Problemin çözümü için genetik algoritma ve PISCES II simülasyon programı kullanılmıştır. Uygulama sonucu elde edilen çözüm modelin farklı deniz coğrafyalarında uygulanabilir olduğunu göstermiştir.

Grubesic ve diğerleri (2019) matematiksel programlama ve coğrafi bilgi sistemleri (CBS) kombinasyonunu kullanarak, Alabama, Mississippi ve Florida kıyıları için çevresel hassasiyet bölgelerine olan genel yakınlığı iyileştirmeye çalışarak, petrol kirliliği müdahale kaynaklarının bir dizi alternatif coğrafik düzenlenme biçimlerini araştırmışlardır. Çalışmada maksimum kaplama modeli kullanılmıştır. Neticede çevresel hassasiyeti olan kıyı şeritlerinin petrol kirliliğinden korunması için yenilikçi bir stratejik yaklaşım sunulmuştur.

Sarhadi ve diğerleri (2020) petrol sızıntısının yerinde, boyutunda ve türündeki belirsizliği göz önünde bulundurarak denizde petrol kirliliği için acil müdahale ağlarının dizaynına karma tam sayılı sağlam optimizasyon programı modeli ile bir çözüm önermişlerdir. Bu bağlamda, petrol kirliliğine müdahale ekipmanının tahsisini ve dağıtımını optimize edecek iki sağlam (robust) model (gama ve elipsoidal) geliştirilmiş ve hesaplama performansını iyileştirmek için dal-kesme algoritması dizayn edilmiştir.

Yukarıda sıralanan çalışmalar incelendiğinde, denizde petrol kirliliği acil durumuna müdahale edecek tesislerin sayısının ve konumunun belirlenmesi ve ayrıca müdahale ekipmanının hangi noktalarda ne miktarda depolanacağının hesaplanması probleminin stratejik ve taktik planlama kapsamında olduğu anlaşılmaktadır. Problemin çözümünde kaplama modelleri, tam sayılı ve karma tam sayılı doğrusal, dinamik, stokastik ve sağlam (robust) programlama teknikleri kullanılmaktadır. Bazı çözüm yaklaşımlarında ise matematiksel modelleme tekniklerinin petrolün denizde bozunma ve hareket süreçlerini hesaplayan modellerle entegre edilerek daha detaylı bir yaklaşım sergilenmektedir. Ayrıca coğrafi bilgi sistemleri kullanılarak bu yaklaşımların desteklendiği görülmektedir.

3.6. VERİLERİN TOPLANMASI VE ANALİZİ

3.6.1. Denizde Petrol Kirliliği Senaryoları İçin Gereken Veriler

Çalışma kapsamında, optimizasyon probleminin çözümünde kullanmak için Çanakkale Boğazı'nda geçmişte gerçekleşmiş yeterli sayıda gemi kaynaklı petrol kirliliği ile sonuçlanmış kaza olmadığından, hipotetik petrol kirliliği senaryoları oluşturularak bu senaryoların petrol kirliliği simülatöründe (PISCES II) çalıştırılmasından elde edilen verilerin üzerine optimizasyon modeli kurulmuş ve sonuca ulaşılmıştır.

Senaryoların, denizde petrol kirliliği simülasyonunda (PISCES II) çalıştırılabilmesi için ihtiva etmeleri gereken bilgiler sırasıyla denizde petrol döküntüsünün gerçekleştiği konum, döküntü miktarı, döküntü türü, oşinografik veriler ve meteorolojik verilerdir.

Bu kapsamda oluşturulan senaryolarda, petrol döküntülerinin gerçekleşeceği konumların tanker kazalarının gerçekleştiği konumlar oldukları düşünülmüş ve bu konumlar Çanakkale Boğazı'nda 2007-2018 yılları arasında gerçekleşen kazaların içinden belirlenmiştir.

Petrol döküntülerinin miktarının belirlenmesi için dünya genelinden 1957-2018 yılları arasında denizde petrol kirliliği yaratmış tanker kazalarına ait veriler toplanmış ve makine öğrenmesi tekniklerinden rassal orman (random forest) algoritması bu verilere uygulanarak tahmini döküntü miktarları belirlenmiştir.

Petrol döküntülerinin türü Enerji Piyasası Düzenleme Kurumunun 2007-2019 yılları arasındaki raporlarından elde edilen yıllık petrol ithalatı verilerinden ve tankerlerin tonajlarına istinaden belirlenmiştir.

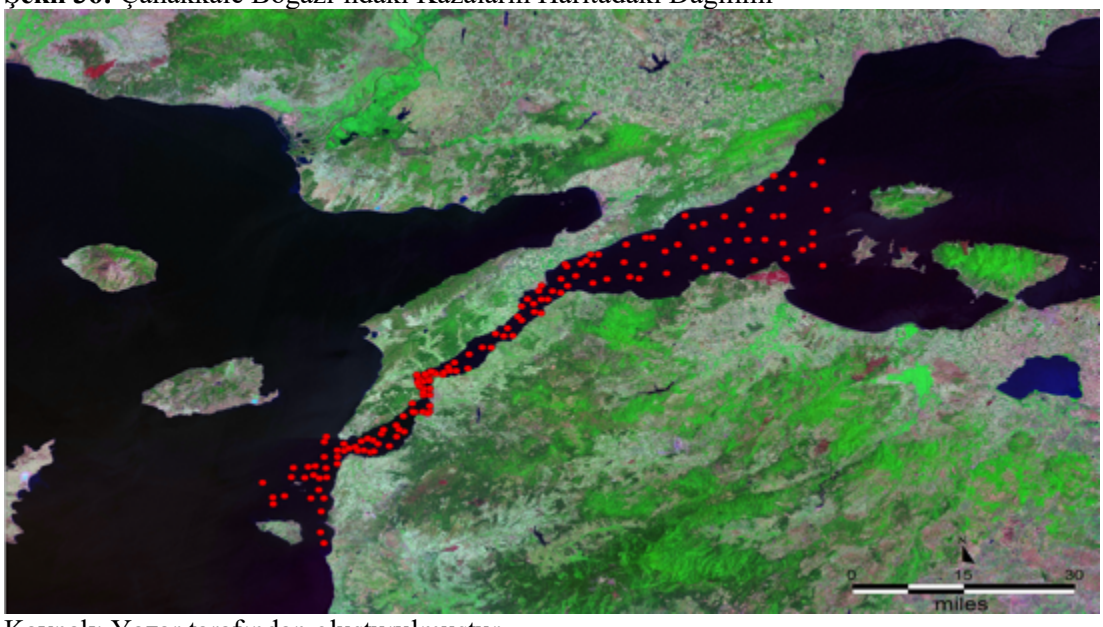
Oşinografik ve meteorolojik veriler ise Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı'nın yayınladığı Türk Boğazları Oşinografi Atlası'ndan ve "Poseidon System" adlı internet sitesinin arşivinden elde edilmiştir.

Takip eden kısımlarda senaryoların oluşturulması sürecinde ihtiyaç duyulan verilerin yani sırasıyla denizde petrol döküntülerinin konumlarının, miktarlarının, türlerinin, oşinografik ve metetorolojik verilerinin toplanması ve analiz edilmesi süreçleri anlatılmaktadır.

3.6.1.1. Çanakkale Boğazı'nda 2007-2018 Yılları Arasında Gerçekleşen Gemi Kazalarına İlişkin Veriler

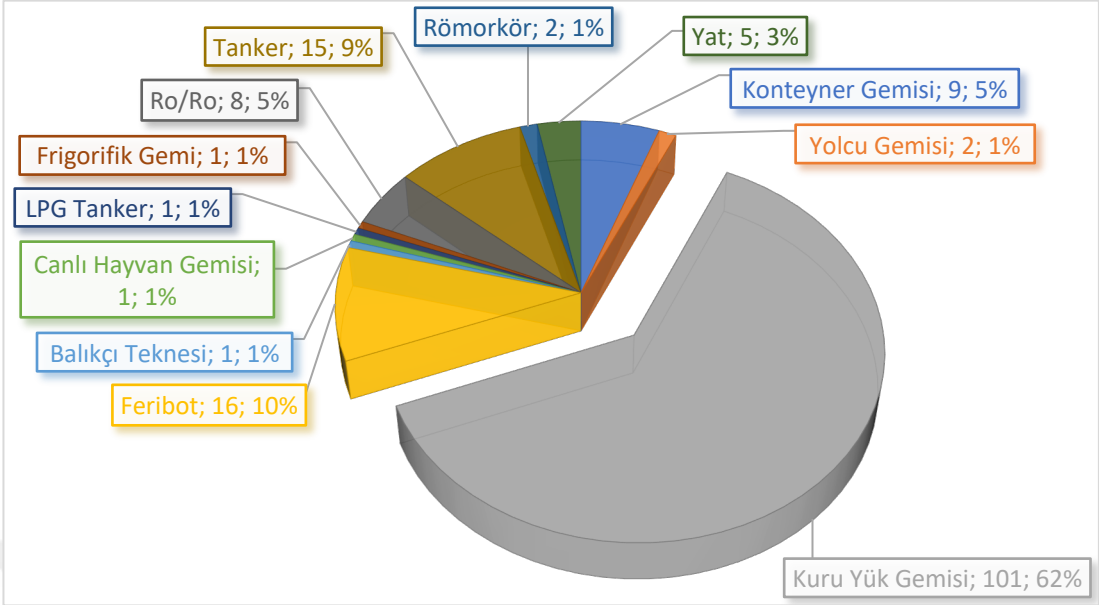
Çalışma sürecinin başında, problem belirlendikten ve problemin çözümü için izlenecek yola ilişkin uzman görüşü alındıktan sonra, bu görüş doğrultusunda Çanakkale Boğazı deniz alanında gerçekleşmiş gemi kaynaklı petrol kirliliği kazaları araştırılmış ve petrol kirliliğiyle neticelenen 2 tane kazanın olduğu, bu sayının da analiz yapabilmek için yeterli olmadığı tespiti yapılmıştır. Buradan hareketle, yine uzman görüş doğrultusunda, araştırma sahasında gerçekleşen fakat potansiyel olarak kirliliğe sebep olabileceği düşünülen gemi kaynaklı kaza verileri araştırılmış; Kıyı Emniyeti Genel Müdürlüğü ve Ana Arama Kurtarma Koordinasyon Merkezi'nden (AAKKM) elde edilen istatistiklere göre 2007-2018 yılları arasında gerçekleşen 162 adet gemi kazası değerlendirmeye alınmıştır. Bu kazalar bir coğrafi bilgi sistemi yazılımı olan MapInfo pro v.8 bilgisayar programı kullanılarak Çanakkale Boğazı boyunca koordinat düzlemi üzerinde kaza yoğunluk, kaza türü, gemi türü, kaza nedeni ve tahlike haritası temaları çerçevesinde haritalandırılmış ve tanımlayıcı analizleri MS Excel ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 36'daki her bir kırmızı nokta 2007-2018 yılları arasında meydana gelen 162 kazanın her birini temsil etmektedir.

Şekil 36: Çanakkale Boğazı'ndaki Kazaların Haritadaki Dağılımı



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

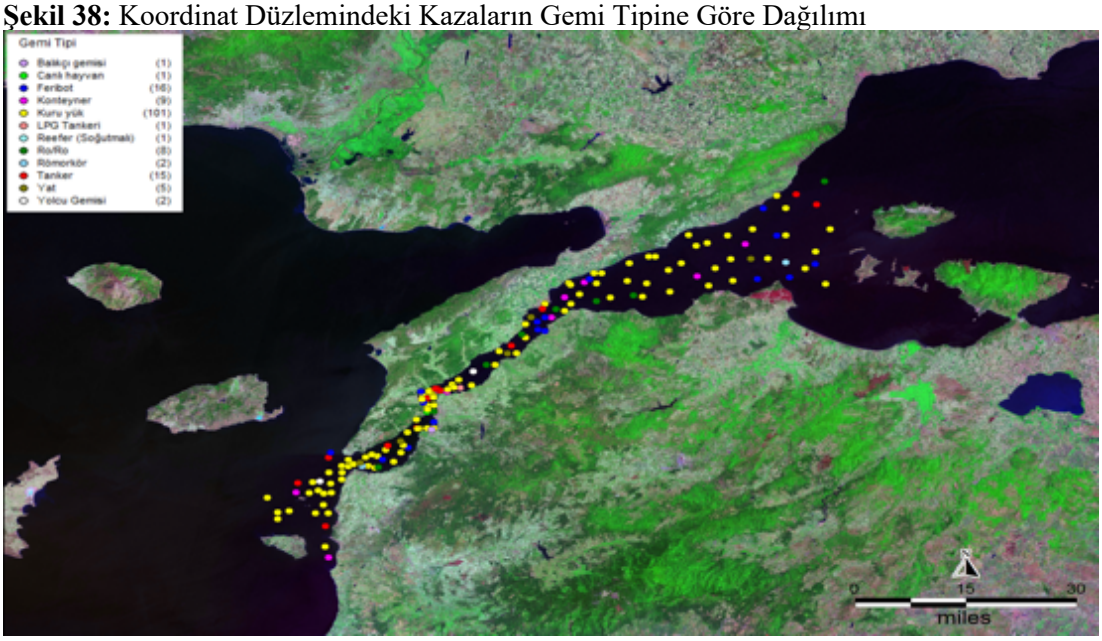
Şekil 37: Kazaların Gemi Türlerine Göre Dağılımı



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

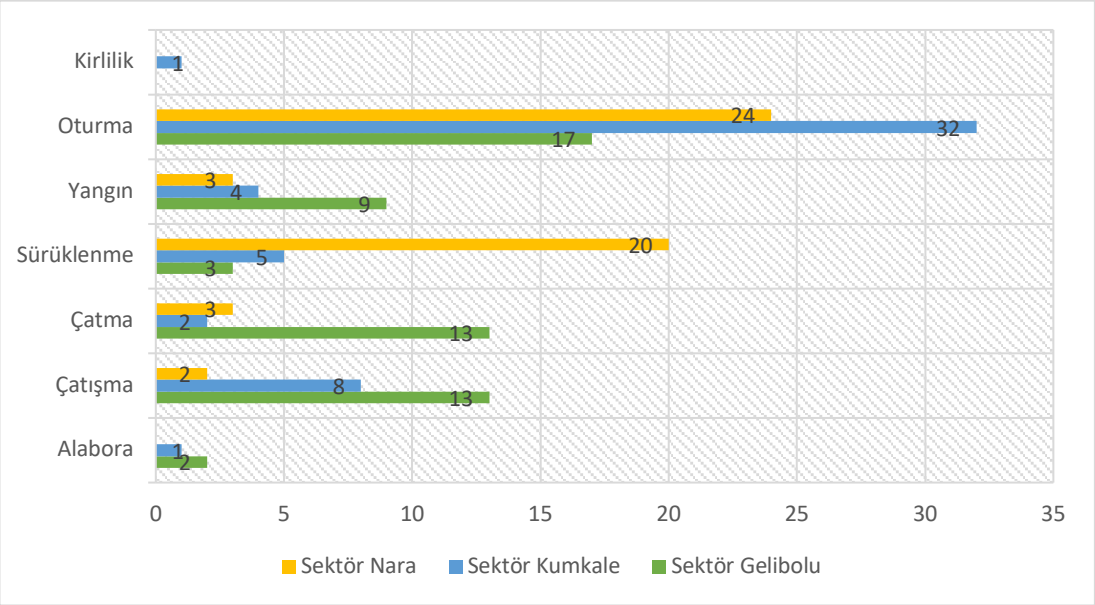
Şekil 37 sayı bakımından kazalara karışan gemi türlerinin dağılımını, Şekil 41 ise bu gemi tiplerinin konumlarının dağılımını göstermektedir. Kuru yük gemilerinin 101 (%62) adet kaza ile en çok kazaya karışan gemi tipi olduğu, ikinci sırada feribotların 16 (%10) adet kaza ile ve üçüncü sırada tankerlerin 15 (%9) adet kaza ile takip ettiği tespit edilmiştir.

Şekil 38: Koordinat Düzlemindeki Kazaların Gemi Tipine Göre Dağılımı



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

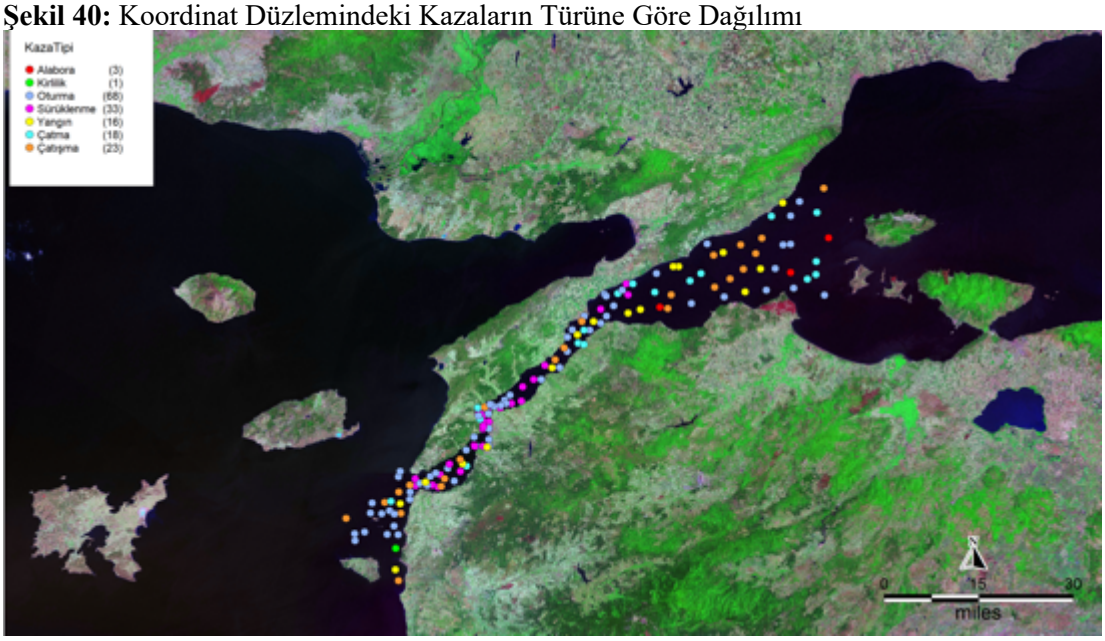
Şekil 39: Kaza Türlerinin Gemi Trafik Sektörlerine Göre Dağılımı



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

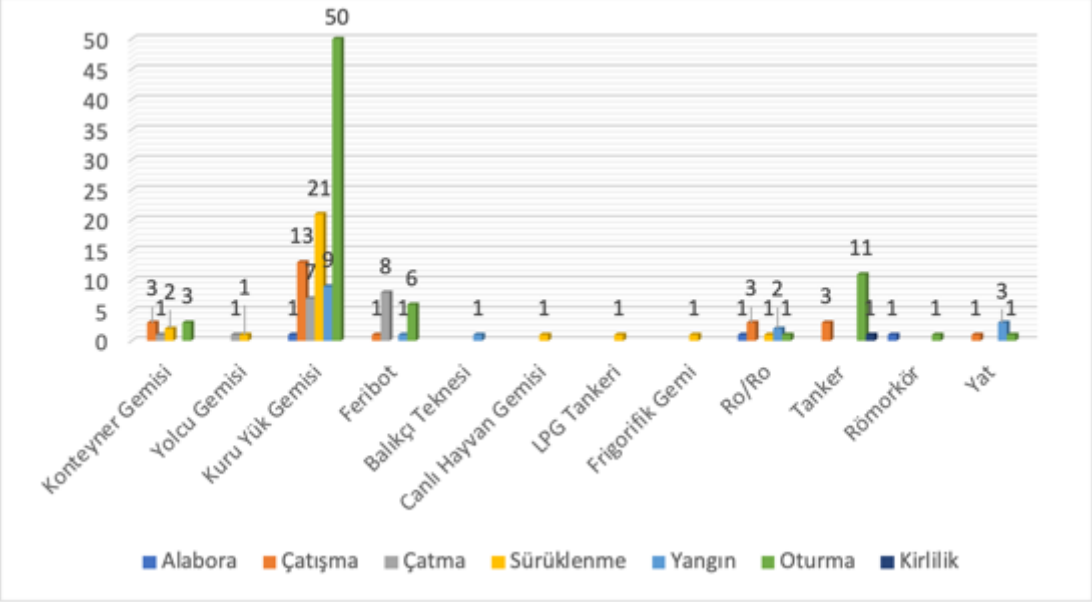
Şekil 39 gemi kazası türlerinin Çanakkale Boğazı deniz trafik sektörlerine göre dağılımını göstermektedir. Buna göre Gelibolu sektöründe 57, Nara sektöründe 52 ve Kumkale sektöründe ise 53 kaza meydana gelmiştir. Oturmanın her bir sektörde en çok meydana gelen kaza türü olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 40 ise gemi kaza türlerinin Çanakkale Boğazı boyunca konumsal dağılımını yansıtmaktadır.

Şekil 40: Koordinat Düzlemindeki Kazaların Türüne Göre Dağılımı



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur

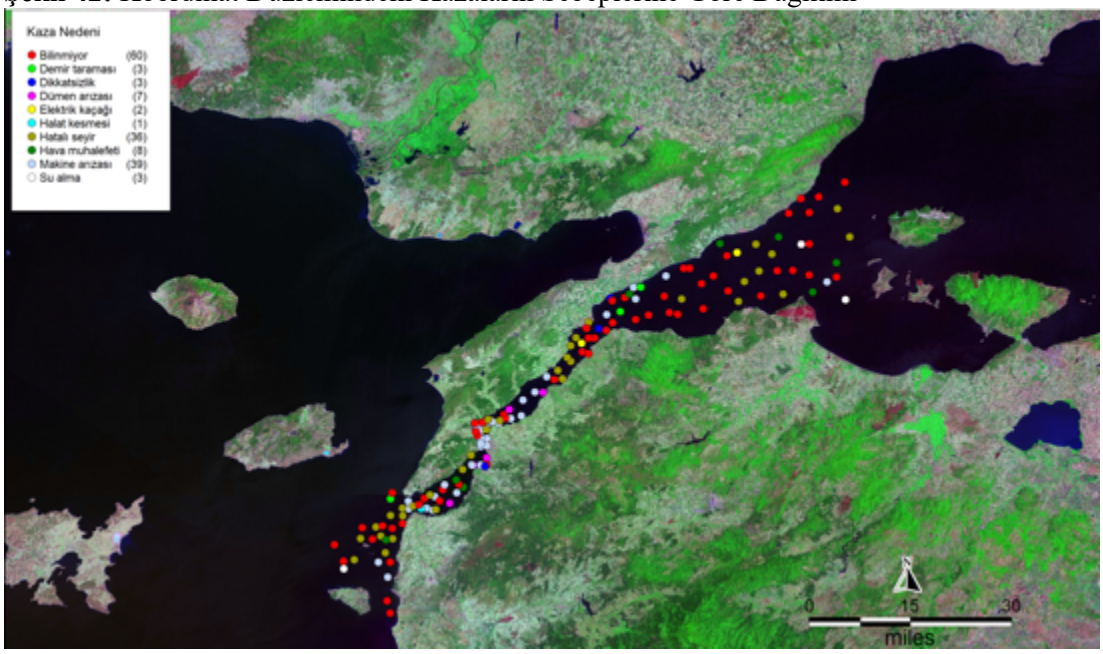
Şekil 41: Kaza Türlerinin Gemi Türlerine Göre Dağılımı



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

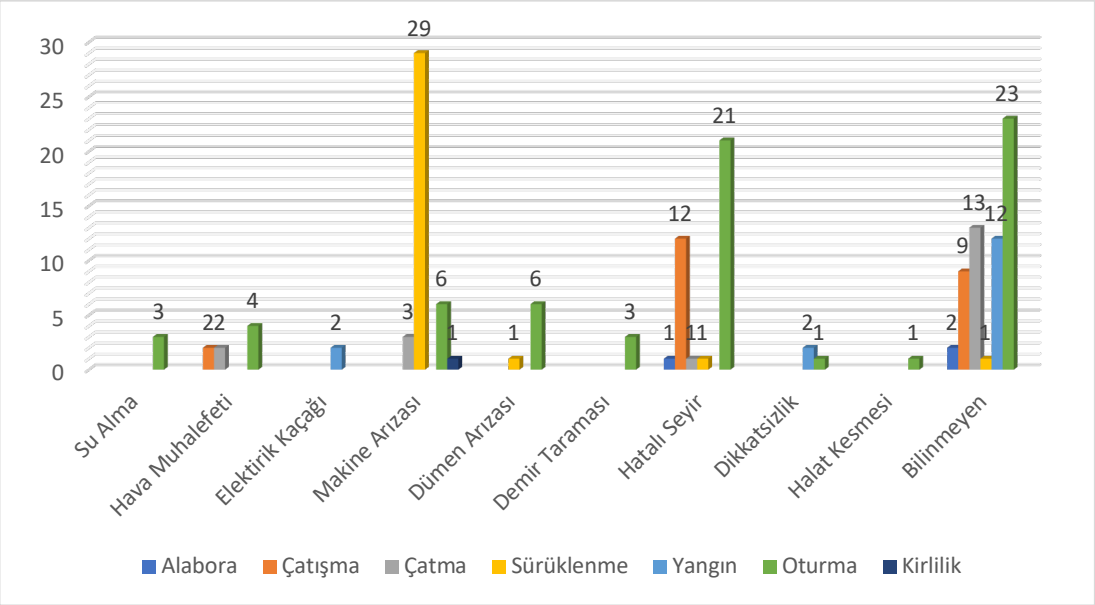
Kaza türlerinin gemi türlerine göre dağılımının verildiği Şekil 41'e bakıldığında kuru yük gemilerinde en çok görülen kaza türünün oturma (50), sürüklenme (21) ve çatışma (13), feribotlarda çatma (8) ve oturma (6) ve tankerlerde oturma (11) olduğu ortaya çıkarılmıştır. Şekil 42 kaza sebeplerinin konumsal dağılımını göstermektedir.

Şekil 42: Koordinat Düzlemindeki Kazaların Sebeplerine Göre Dağılımı



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

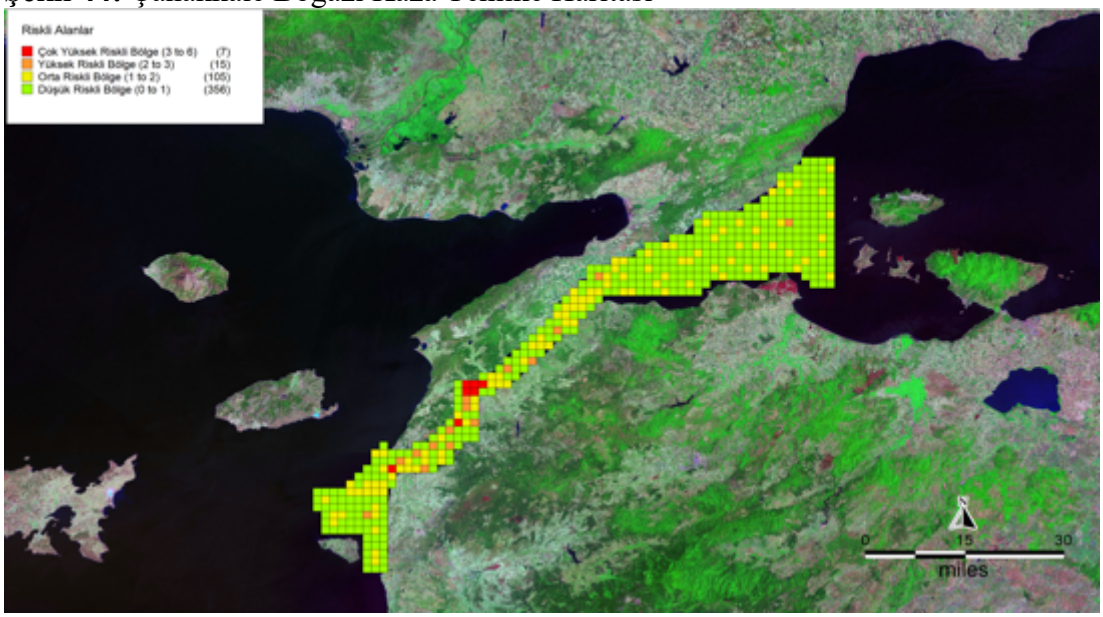
Şekil 43: Kaza Türlerinin Sebeplerine Göre Dağılımı



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 43 incelendiğinde bilinmeyen sebepler (60) haricinde kazalara en çok neden olan faktörlerin sırasıyla makine arızası (39), hatalı seyir (36), hava muhalefeti (8), dümen arızası (7), su alma (3), demir taraması (3), dikkatsizlik (3), elektrik kaçağı (2) ve halat kesmesi (1) olduğu tespit edilmiştir. Makine arızası en çok sürüklenmeye (29) ve oturmaya (6), hatalı seyir en çok oturmaya (21) ve çatışmaya (12), hava muhalefeti en çok oturmaya (4) ve dümen arızası en çok oturmaya (6) sebep vermiştir.

Şekil 44: Çanakkale Boğazı Kaza Tehlike Haritası



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 44, söz konusu kazaların analizi sonucunda, her bir kutunun 2x2 km'lik bir alanı temsil ettiği Çanakkale Boğazı tehlike haritasını ortaya koymaktadır. Haritada çok yüksek tehlike 4-6 arasında sayıda kazanın gerçekleştiği bölgeleri, yüksek tehlike 2-3 arasında sayıda kazanın gerçekleştiği bölgeleri, orta tehlike 1 tane kazanın gerçekleştiği bölgeleri ve düşük tehlike kaza gerçekleşmeyen bölgeleri ifade etmektedir. Harita incelendiğinde çok yüksek tehlikeli 7 alanın, yüksek tehlikeli 15 alanın, orta tehlikeli 105 alanın ve düşük tehlikeli 356 alanın olduğu tespit edilmiştir.

3.6.1.2. Dünyada 1957-2018 Yılları Arasında Denizde Petrol Kirliliği Yaratmış Tanker Kazalarına İlişkin Veriler

Çanakkale Boğazı'na ilişkin gemi kaza verilerinin istatistiksel ve konumsal analizleri gerçekleştirildikten sonra yapılan değerlendirme sonucu çalışmaya tanker kazaları özelinde devam edilmesi belirlenmiştir. 162 kaza için ayrı ayrı senaryo oluşturmanın ve bunları simüle etmenin getireceği ağır işlem yükü ve gereken zamanın uzunluğu bunun en önemli sebebi olarak düşünülmüştür. Dolayısıyla çalışmaya 15 tanker kazası ve bunlar için oluşturulacak 15 petrol kirliliği senaryosuyla devam edilmiştir.

Pisces II simülatörü için denizde petrol kirliliği senaryolarının oluşturulmasında kirliliğin gerçekleşeceği konumun, kirlilik miktarının ve kirliliğe neden olan petrol türünün belirlenmesinin yanında deniz ve hava durumuna ilişkin oşinografik ve meteorolojik verilere ihtiyaç olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada kirliliğin gerçekleşeceği konum, tanker kazalarının her birinin meydana geldiği konum olarak belirlenmiş ve yukarıda anlatılan konumsal analiz sonucu elde edilmiştir.

Kirlilik miktarı, bir kazanın yaratacağı riski tayin eden ve kirliliğe müdahale tesisinin sayısının ve kapasitesinin belirlenmesinde rol oynayan en önemli bileşenlerden biridir. Bu çalışmada 15 tanker kazasının her biri için tahmini kirlilik miktarlarının belirlenmesi gerekmiştir. Çanakkale Boğazı özelinde tarihte petrol kirliliği ile sonuçlanan 2 kaza harici kaza olmadığı için bu konuda tarihsel verilerden hareketle frekans analizine ve olasılık yoğunluk dağılımına dayalı bir çözüm geliştirilememiştir. Bu nedenle makine öğrenmesi teknikleri kapsamındaki rassal orman (random forest) algoritmasından yararlanılarak tahmini kirlilik miktarları elde

edilmesi işlemi yürütülmüştür. Takip eden kısımda makine öğrenmesi ve rassal orman algoritması teknikleri açıklanmakta ve bunu takiben dünya genelinde 1957-2018 yılları arasında meydana gelmiş ve denizde petrol kirliliği ile sonuçlanmış tanker kazalarının analizine yer verilmektedir.

Bir yapay zeka uygulaması olan makine öğrenmesi, bilgisayar programlama ile dizayn edilmiş, öğrenen ve adapte olabilen bir algoritma vasıtasıyla geçmiş deneyimlere ait bir veri setini analiz ederek bu veri setinin değişkenleri arasındaki örüntüyü ya da ilişkiyi temsil eden bir model ortaya çıkarmak ve elde edilen bu bilgiyle benzer deneyimler için geleceğe yönelik tahmin yapmak süreci olarak tanımlanmaktadır (Alpaydın, 2004: 1-3). Örneğin, bir evin oda sayısına, metrekaresine ve arsa büyüklüğüne bakarak fiyatı hakkında tahminde bulunmak istenirse önceden var olan ve satılan her bir evin fiyatının bilindiği emlak satış veri kümesinden belirtilen kriterlerle fiyat arasındaki ilişki makine öğrenmesi algoritmaları ile keşfedilerek fiyatı bilinmeyen ev hakkında fiyat tahmininde bulunmak mümkün olabilmektedir (Gutierrez, 2015: 25). Makine öğrenmesi istatistik, yapay zeka ve bilgisayar bilimlerinin kesişim noktasında yer alan bir araştırma sahasıdır ve tahmine dayalı analitik veya istatistiksel öğrenme olarak da adlandırılmaktadır (Muller ve Guido, 2016: 1). Makine öğrenmesi teknikleri metin veya belge sınıflandırma, doğal dil işleme, istatistiksel ayrıştırma, konuşma tanıma, optik karakter tanıma, biyoinformatik, bilgi güvenliği, bilgisayar oyunları, robotik uygulamalar ve otomasyon, tıbbi teşhis, arama motorları, borsa analizi gibi çok çeşitli alanlarda uygulanmaktadır ve potansiyel uygulama alanları kümesi neredeyse sınırsızdır (Mohri ve diğerleri, 2012: 1-2; Stamp, 2018: 1).

Mevcut verilerin türüne bağlı olarak makine öğrenimi denetimli öğrenme, denetimsiz öğrenme ve pekiştirmeli öğrenme olmak üzere genel olarak 3 sınıfta kategorize edilebilmektedir (Sugiyama, 2016: 3).

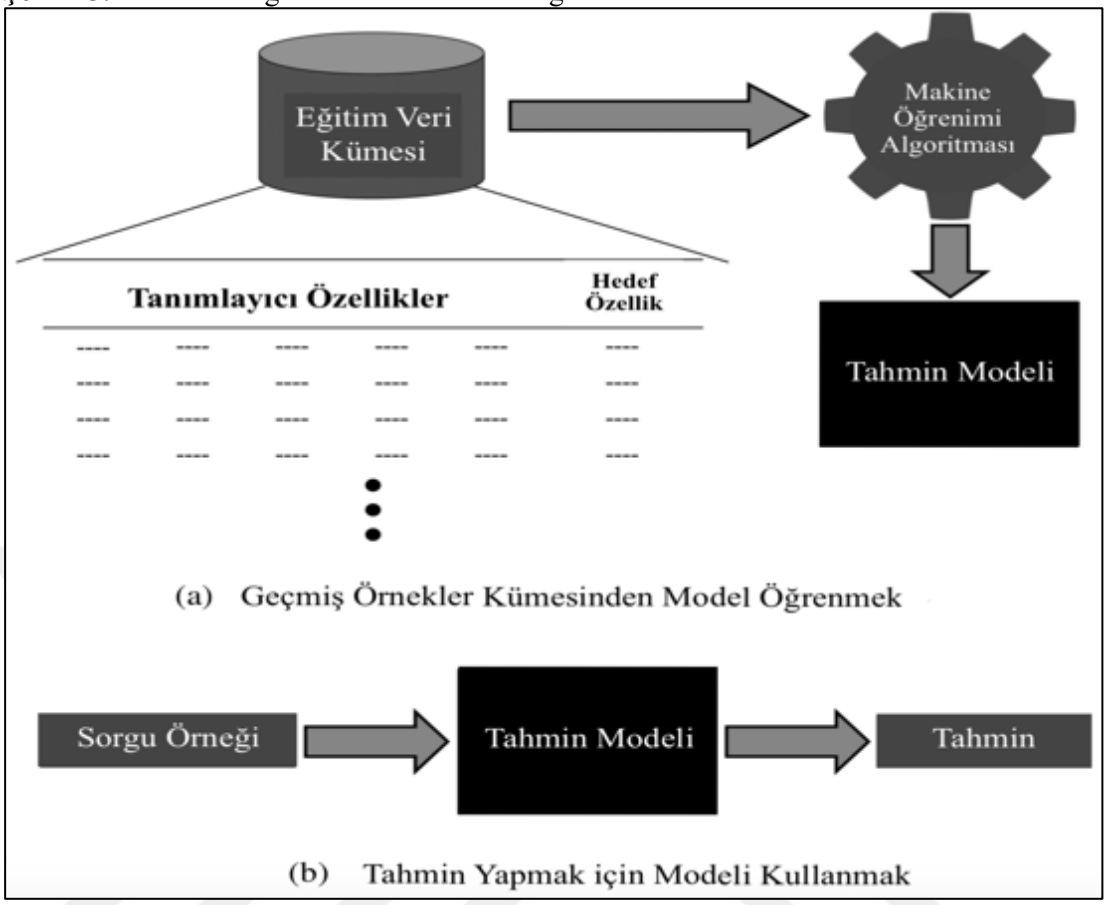
Pekiştirmeli öğrenme, hedeflerine ulaşmak adına optimal eylemleri seçmek için kendi çevresinde hareket eden ve algılayan bir otonom bir ajanı yani algoritmayı öğretme problemiyle ilgilenmektedir. Bu otonom öğrenme ajanı, ortamdaki durumla ilgili bilgiler almakta ve bu durumu değiştirmek için eylemler gerçekleştirmektedir. Otonom ajan, gerçekleştirdiği her bir eylem için ödül ya da ceza alarak pekiştirilmekte ve gerçekleştirdiği eylemi devam ettirmesi veya kesmesi sağlanmaktadır. “Q

Öğrenme" pekiştirmeli öğrenmede kullanılan yaygın bir yaklaşımdır. Bu yaklaşımda yinelemeli bir biçimde durumları ve eylemleri değerlendiren bir fonksiyon öğrenmektedir. Pekiştirmeli öğrenme robot kontrol, vinç kontrol gibi dinamik sistemleri kontrol etmek, çeşitli optimizasyon problemlerini çözmek ve bilgisayar oyunları gibi alanlarda sık sık kullanılmaktadır (Kononenko ve Kukar, 2007: 14, Neapolitan ve Jiang, 2018: 333; Sugiyama, 2016: 4).

Denetimsiz öğrenme, daha önceden etiketlenmemiş veya bir başka deyişle tanımlayıcı özellikleri bakımından tasnifi yapılmamış verilerdeki değişkenler arasında bulunan gizli yapıyı ortaya çıkarmakla ilgilenen öğrenme tekniğidir (Neapolitan ve Jiang, 2018: 331; Simeone, 2018: 130). Bu teknikte uygulanan algoritma verideki değişkenlerin birbirleri arasındaki benzerlik eğilimlerini belirlemeye çalışmaktadır (Rebala ve diğerleri, 2019: 21). Denetimsiz öğrenmede verilere ait sadece girdi değerlerine ait bilgiler mevcuttur ve bunlarla ilgili bir çıktı değeri veya bağımlı değişken ya da bir başka deyişle hedef özellik bulunmamaktadır (Alpaydın, 2004: 10; Clarke ve diğerleri, 2009: 405). Denetimsiz öğrenme teknikleri ile orijinal veri seti, insan ya da diğer makine algoritması teknikleri tarafından daha kolay anlaşılabileceği yeni bir temsili forma dönüştürülmektedir. Bu teknikteki en büyük zorluk ise uygulanan algoritmanın kullanışlı bir şey öğrenip öğrenemediğini değerlendirmektir (Muller ve Guido, 2016: 131-132). Kümeleme, birliktelik kuralı, boyutsal indirgeme, yoğunluk tahmini, özellik çıkarma ve yeni numune oluşturma denetimsiz öğrenme tekniği örnekleridir (Simeone, 2018: 131-132; Lantz, 2015: 21).

Denetimli öğrenme tekniklerinde genel prensip olarak, bir dizi tarihsel örneği içeren veri setindeki bir dizi açıklayıcı özellik ile bir hedef özellik arasındaki ilişkinin bir modeli algoritmalar tarafından otomatik olarak öğrenilmekte ve daha sonra öğrenilen bu model yeni örnekler için tahminler yapmakta kullanılabilmektedir (Kelleher ve diğerleri, 2020: 5). Şekil 34 denetimli öğrenme sürecini göstermektedir.

Şekil 45: Denetimli Öğrenmenin İki Adımı: Öğrenmek ve Tahmin Etmek



Kaynak: (Kelleher ve diğerleri, 2020: 5)

Şekilde görüldüğü üzere kullanılan öğrenme algoritması, önceden etiketlenerek tasnif edilmiş eğitim veri seti girdisi ile beslenerek tanımlayıcı özellikler ile hedef özellik arasındaki korelasyona uyan bir model kurmak için eğitilmektedir. Bu işlem sonucu elde edilen model test veri setine uygulanarak gerçek çıktılara olan uygunluğu araştırıldıktan sonra hata oranı yeterli görüldüğünde sorgu örneği üzerine uygulanarak istenilen tahminlere ulaşılmaktadır.

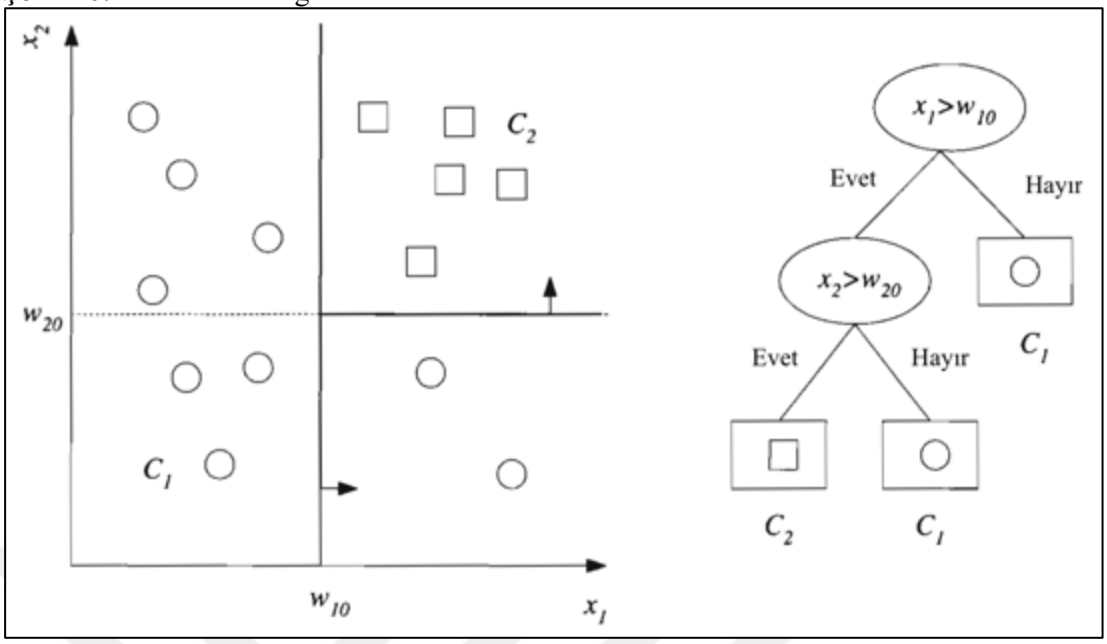
Denetimli öğrenme, girdi/çıktı ilişkilerini içeren hesaplama kurallarının otomatik olarak öğrenilmesini ifade etmektedir. Çok çeşitli durumlar ve veri türleri için uygulanabilir olan bu tekniğin alanına giren problemler sınıflandırma ve regresyon problemleri olmak üzere iki biçimdedir (Watt ve diğerleri, 2020: 7). Hem sınıflandırma hem de regresyon problemleri birer tahminleme problemidir. Birini diğerinden ayıran fark ise sınıflandırma problemlerinde kategorik ya da kesikli değişkenlerle, regresyon problemlerinde ise numerik ya da sürekli değişkenlerle çalışılmasıdır (Bramer, 2016: 7; Watt ve diğerleri, 2020: 10). K-en yakın komşu (k-

NN), Naive Bayes, Destek Vektör Makinesi (SVM), Karar Ağaçları, Sınıflandırma Kuralları, Doğrusal Regresyon, Polinom Regresyon, Lojistik Regresyon, Regresyon Ağaçları, Sinir Ağları, Model Ağaçları, Random Forest (Rassal Orman) algoritmaları denetimli öğrenme tekniklerinde yaygın olarak kullanılan algoritmalardır (Lantz, 2015: 21; IBM, 2020). Bu çalışmada tanker kazaları sonucu oluşabilecek döküntü miktarının tahmini için "Rapid Miner" bilgisayar programındaki regresyon algoritmalarından teker teker uygulanmış ve Random Forest algoritmasının en küçük hata oranıyla tahmin verdiği tespit edilmiştir ve Random Forest algoritmasının verdiği sonuçlar çalışmada kullanılmıştır.

Breiman (2001) tarafından geliştirilen Random Forest (RF) algoritması, bir veri setinin rastgele seçilen alt uzaylarında büyüyen bir dizi karar ağacı topluluğu ile sınıflandırma ve regresyon problemlerinin çözümünde tahmin geliştirmeyi amaçlayan bir denetimli makine öğrenmesi algoritmasıdır (Biau, 2012: 1063; Qiu ve diğerleri, 2017: 251). Burada Random Forest algoritmasının daha iyi anlaşılması için karar ağacı uygulamasını açıklamak yerinde olacaktır.

Karar ağacı, kökten yaprağa giden bir yolu veya diğerini takip etmek için verideki değişkenlerin değerlerine dayalı bir dizi karar kullanarak inşa edilen bir makine öğrenmesi modelidir (Rebala ve diğerleri, 2019: 77). Bir karar ağacı, dal denilen yollarla birbirine bağlanan kök düğüm (başlangıç düğümü), iç düğümler ve yaprak düğümlerinden (terminal düğümleri) oluşmaktadır (Kelleher ve diğerleri, 2020: 121). Karar ağacında kök düğüm en tepede yer almakta, her iç düğüm bir öznitelik (attribute) üzerinde bir testi ifade etmekte, her dal bu testin bir sonucunu temsil etmekte ve her yaprak düğüm de bir sınıf etiketi veya çıktının tahminini tutmaktadır (Han ve diğerleri, 2012: 330). Karar ağacı, "böl ve yönet" stratejisini uygulayan hiyerarşik bir veri yapısıdır. Hem sınıflandırma hem de regresyon için kullanılabilen parametrik olmayan verimli bir yöntemdir (Alpaydın, 2004: 173). Karar ağacı esas olarak, bir karara yol açan "if/else" sorularının hiyerarşisini öğrenmektedir (Muller ve Guido, 2016: 70).

Şekil 46: Örnek Karar Ağacı Modeli



Kaynak: (Alpaydın, 2004: 174)

Şekilde bir veri seti ve buna ait karar ağacı görülmektedir. Oval şekiller karar düğümlerini, dikdörtgen şekiller ise yaprak düğümlerini göstermektedir. İlk karar düğümünde x_1 değişkeni w_{10} değerinden küçükse C_1, aksi halde x_2 değişkeninin w_{20} değerinden büyük olması durumu değerlendirilmektedir. İkinci karar düğümünde x_2, w_{20}' den büyükse C_2, aksi halde C_1 olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. İlk bölünmeden sonra $\{x| x_1 < w_{10}\}$ saftır ve daha fazla bölünmez.

Karar ağacının amacı, hedef değişkenin sınıfını veya değerini tahmin etmek için karar kurallarını öğrenmek yoluyla eğitim veri setinden bir model yaratmaktır (Rebala ve diğerleri, 2019: 78). Karar ağacı inşası, her bölünmenin mümkün olabildiği kadar saf yani aynı sınıfa ait örnekleri içerdiği optimal bölünmeyi bulana kadar veya önceden belirlenmiş bir eşik değere ulaşmaya yetecek kadar derin olana değin devam etmelidir. Karar ağacı inşa ederken dikkat edilmesi gereken en mühim adım bölme kuralına karar vermektir (Xue ve diğerleri, 2021: 3). Öznitelik Seçme Ölçeği (Attribute Selection Measure) olarak da bilinen bölme kuralı, her bir düğümdeki eğitim veri demetinin nasıl bölüneceğine karar vermektedir. Öznitelik seçme ölçeği, eğitim veri demetini tanımlayan öznitelikler için bir sıralama sağlamaktadır. Ölçek için en iyi puana sahip öznitelik, bölme özelliği ya da kuralı olarak seçilmekte ve eğitim veri demetini bölmektedir. Bilgi kazanma (information gain), kazanma oranı (gain ratio)

ve Gini indeksi uygulamada kullanılan popüler öznitelik seçim ölçekleridir (Han ve diğerleri, 2012: 336).

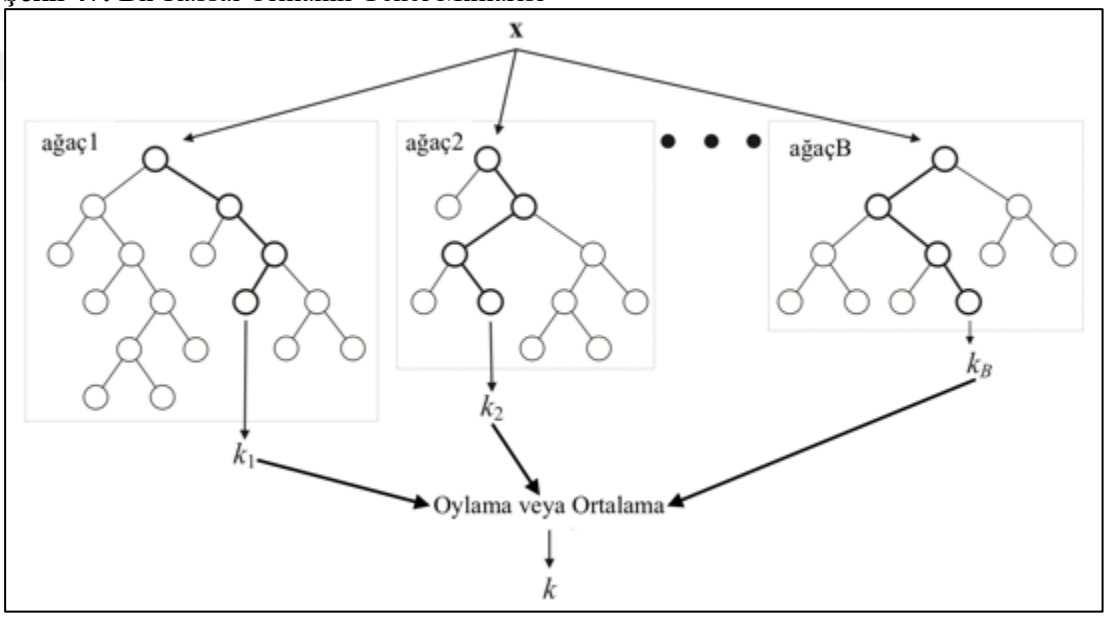
Rassal ormanlar, her bir ağacın, ormandaki bütün ağaçlar için aynı dağılıma sahip ve bağımsız olarak örneklenen rastgele bir vektörün değerlerine bağlı olduğu, ağaç yapısındaki tahmin edicilerin bir kombinasyonudur (Breiman, 2001: 5). Random Forest algoritması, algoritmanın eğitim safhasında, orijinal veri setinden elde edilen eğitim veri setinin yer değiştirme (bootstrapping sampling) yoluyla rastgele biçimde oluşturulan birbirinden bağımsız versiyonlarının her biri üzerinden bir ağacı eğitmek üzere bir dizi karar ağacı oluşturarak çalışan ve sınıflandırma için ağaçların her birinin nihai tahminlerinde en çok tekrarlanan sınıf etiketini, regresyon için ise ağaçların her birinin tahminlerinin toplamının ortalamasını çıktı olarak veren bir topluluk öğrenme algoritmasıdır (Breiman, 2001: 11; Feng ve diğerleri, 2015: 5075; Scornet, 2016: 1475; Athey ve diğerleri, 2019: 1152, Xue ve diğerleri, 2021: 3). Topluluk öğrenme fikri, daha basit temel modellerden oluşan bir topluluğun güçlü yönlerini birleştirerek bir tahmin modeli oluşturmaktır. Topluluk öğrenmenin amacı, eğitim verileri üzerinden temel öğrenicilerden oluşan bir popülasyon geliştirmek ve daha sonra bunları bileşik tahminleme modelini oluşturmak için birleştirmek (Hastie ve diğerleri, 2009: 605). Bir topluluk öğrenme algoritması, onu oluşturan temel öğrenicilerden daha doğru tahminler verme eğilimindedir. Bagging (Torbalama), Boosting (Güçlendirme), Random Forest, Stacking (İstifleme) ve parametrik olmayan regresyon için Bayes Metodu topluluk öğrenme yöntemlerine örnek olarak verilmektedir (Han ve diğerleri, 2012: 378, Hastie ve diğerleri, 2009: 605).

Random Forest algoritması, sınıflandırma ve regresyon ağacının (Classification and Regression Tree-CART) her düğümünde, düğümün bölünmesinde kullanılacak rastgele özelliği (attribute) seçmek koşuluyla rastgele alt uzay yöntemini ve torbalama yöntemini birleştirmektedir (Qui ve diğerleri, 2017: 251). Torbalama (Bagging veya Bootstrapping toplamı) yönteminde, her eğitimi seti orijinal eğitim setinin bir bootstrap kopyasının oluşturulmasıyla inşa edilmektedir. Daha açık bir ifadeyle, N sayıda örnekten oluşan bir T eğitim setinden yeni bir eğitim seti, N sayıda örneklerinin eşit oranda ve yer değiştirerek çekilmesiyle oluşturulmaktadır. Bu şekilde oluşturulan birçok yeni eğitim veri setinin her biri üzerinden eğitilen birbirinden bağımsız CART karar ağaçlarının ortak tahminleri kullanılmakta; sonuçta

tahminlerdeki tarafsızlık artmakta ve tahmin değerlerinin varyansı azalmaktadır (Dietterich, 2000: 139; Xue ve diğerleri, 2021: 3).

Bootstrap metodu, belirli bir veri kümesinden, yaklaşık olarak aynı örnekleme dağılımına sahip yeni veri kümeleri oluşturmak için uygulanan bir yöntemdir. N boyutundaki bir veri kümesinin bootstrap örneği, veri kümesinin N kez değiştirilmesiyle örneklenerek elde edilmektedir. $\{(x_1,y_1), (x_2,y_2), (x_3,y_3), (x_4,y_4), (x_5,y_5), (x_6,y_6)\}$ şeklindeki bir veri kümesinin bootstrap örneği $\{(x_2,y_2), (x_4,y_4), (x_4,y_4), (x_5,y_5), (x_6,y_6), (x_6,y_6)\}$ şeklinde olmaktadır (Knox, 2018: 112).

Şekil 47: Bir Rassal Ormanın Genel Mimarisi



Kaynak: (Verikas ve diğerleri, 2011: 331).

Şekilde bir rassal ormanın (random forest) genel yapısı gösterilmektedir. Burada B ormandaki ağaç sayısını, k_1, k_2 ve k_B her bir ağacın tahmini ve k ise bu ağaçların sunduğu tahminin ortak değerini ifade etmektedir. Sınıflandırma problemlerinde ortak tahmini çıktı yani sınıf etiketi, topluluktaki her bir karar ağacının verdiği nihai sonuçların toplamında en çok tekrarlanan sınıf etiketi olurken, regresyon problemlerinde ortak tahmin, her bir karar ağacının vermiş olduğu tahminlerin toplamının ortalaması ile hesaplanmaktadır.

Şekil 48: Rassal Orman (Random Forest) Algoritması

```
for i ← 1 to B do
    Eğitim verilerinden N boyutlu bootstrap örneği çek;
    while düğüm boyutu != minimum düğüm boyutu do
        p'nin tamamından m tahmin edici değişkenlerin alt kümesini rastgele seç;
        for j ← 1 to m do
            if j. tahmin edici, bölme kriterini optimize eder then
                iç düğümü iki alt düğüme böl;
                break;
            end
        end
    end
end
return tüm B alt ağaçlarından oluşan topluluk ağacına;
```

Kaynak: (Schonlau ve Zou, 2020: 6; Hastie ve diğerleri, 2009: 588).

Şekilde bir random forest algoritmasının hangi komutlarla hangi basamakları kat ederek çalıştığı gösterilmektedir. Buna göre elimizde N sayıda gözlem içeren p tane girdi değişkeni olan N x p boyutlu bir X eğitim veri seti ve Nx1 boyutlu bir hedef değişken Y olduğu varsayılmaktadır. Rassal ormandaki her bir karar ağacı i ve karar ağaçlarının sayısı B ile gösterilmektedir. Birinci adımda rassal ormandaki her bir i ağacı için, N boyutlu T_i eğitim veri setleri bootstrap örnekleme ile üretilmektedir. İkinci adımda ağaçtaki her bir düğüm için rastgele seçilen m sayıda değişken (öz nitelik veya attribute) i ağacı için en iyi bölünme kriterini hesaplamada kullanılmaktadır. Bu adım i ağacı tamamen büyüyünceye kadar tekrar edilmektedir. Son adımda ise i karar ağaçlarının tahminleri nihai sonuca ulaşmak için toplanmaktadır.

Random Forest metodunda rastgele seçimler algoritmanın iki özelliğiyle ilgilidir. Birincisi, her bir CART ağacını eğitmek için bootstrap örneklemesiyle T tüm eğitim veri setinden T_i (i=1, …, B) eğitim setlerinin rastgele seçilmesidir. İkincisi ise p girdi değişkenlerinden m değişkenlerin (m<p) rastgele seçilmesidir ve CART ağaçları bu iki rastgele seçilen değer üzerinde hesaplanır (Su ve diğerleri, 2015: 1411). Elde edilen ağaç topluluğu $\{\phi_{T_i,m} | i = 1, \dots, B\}$ şeklinde ifade edildiğinde regresyon problemlerinde tahmin sonucunun değeri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Xue ve diğerleri, 2021: 3):

$$\hat{Y} = \phi_{T,p}(X) = \frac{1}{B}\sum_{i=1}^{B} \phi_{T_i,m}(X)$$

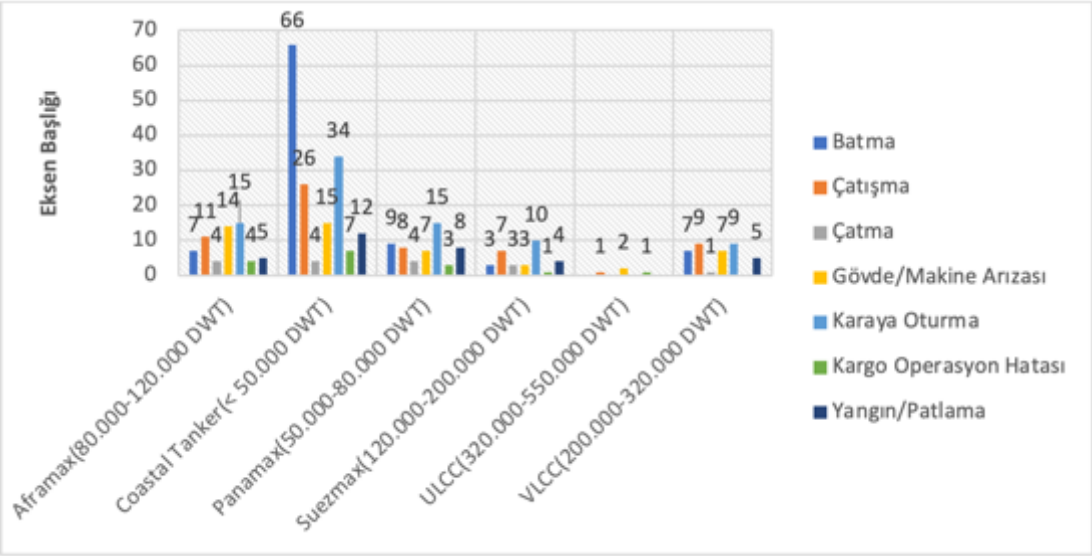
Random forest algoritmasının performans değerlendirmesi veya tahminlerdeki hata oranı, eğitim süreci sırasında torba dışı (out-of-bag-OOB) yöntemiyle hesaplanmaktadır (Schonlou ve Zou, 2020: 6). Bu yöntemle, random forest prosedürünün doğruluğu içsel veya dahili olarak tahmin edilmektedir. Bu yönteme göre, rassal ormandaki her bir ağaç bootstrap örnekleme ile oluşturulurken orijinal verilerin 2/3'ü kullanılmakta, 1/3'ü ise dışarıda bırakılarak (out-of-bag) eğtim veri setiyle bağlantısız bir test seti elde edilmektedir (Biau ve Scornet, 2016: 205). Eğitim veri seti üzerinde öğrenen algoritmanın verdiği tahmin modeli test veri seti (OOB) üzerinde denenerek, regresyon problemlerinde kullanılan bazı performans veya hata ölçekleri çerçevesinde tahminlerin doğruluğu veya algoritmanın performansı hakkında bilgiye ulaşılmaktadır. Performans ölçekleri, çeşitli alanlarda yapılan çalışmaların değerlendirme çerçevelerinin hayati bileşenleridir. Regresyon problemlerinde kullanılan en yaygın performans ölçeklerinin, 25 yıllık bir zaman diliminde yapılan bağımsız çalışmalar değerlendirildiğinde, ortalama kare hatası (MSE), kök ortalama kare hatası (RMSE), ortalama mutlak hata (MAE), ortalama mutlak yüzde hatası (MAPE) olduğu tespit edilmiştir (Botchkarev, 2019: 47).

Bu doktora tezinde, tanker kazaları sonucu denize dökülecek petrol miktarını tahmin edebilmek için bir makine öğrenmesi platformu olan "RapidMiner Studio v9.6" bilgisayar programında yapay sinir ağları (ANN), destek vektör makinesi (SVM) ve random forest algoritması uygulanmış ve yukarıda belirtilen performans ölçekleri dahilinde en iyi sonuçları veren random forest algoritmasının tahminleri kullanılmıştır.

Yukarıda araştırmanın süreci kısmında belirtilen kaynaklardan dünya genelinde 1957-2018 yılları arasından gerçeklemiş toplamda 425 tane tanker kaynaklı denizde petrol kirliliği vakasına ilişkin veriler toplanmıştır. Oluşturulan veri seti kazanın gerçekleştiği tarih, tankerin adı ve inşa yılı, tankerin yaşı, tankerin büyüklüğü (DWT-GRT), tankerin gövde tipi, taşıdığı yükün türü ve gerçekleşen kirliliğin miktarı başlıkları altında derlenmiştir. Toplanan 425 kazadan 74 tanesi uç örnekler olması nedeniyle verilerin dağılımını dolayısıyla da sağlıklı tahminler geliştirmeyi olumsuz etkilediğinden değerlendirmeye tabi tutulmamıştır. Neticede 351 veri istatistiksel analize ve makine öğrenmesi süreçlerine sokulmuştur.

İstatistiksel analiz sürecinde 351 tanker kazasına ait veriler SPSS Statistics v.23 bilgisayar programında analiz edilmiştir. İstatistiksel analizler sonucu veri setini oluşturan değişken gruplarının her birinin kendi içindeki dağılımları ve birbirleri arasındaki ilişkilerin varlığı üzerine bulgulara ulaşılmıştır. Bu bulgular aşağıdaki grafik ve tablolarda gösterilmektedir.

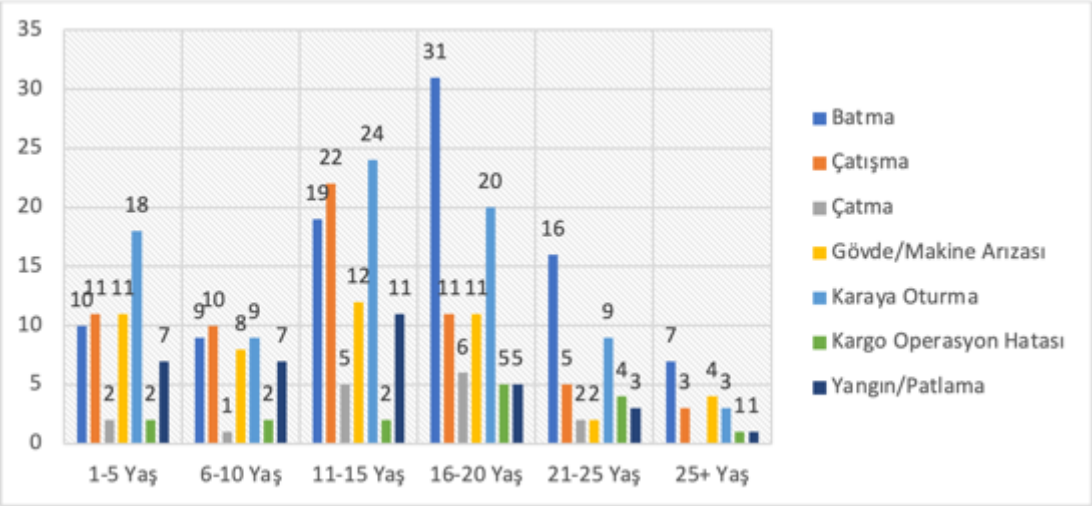
Şekil 49: Kaza Türlerinin Tanker Boyutlarına Göre Dağılımı



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 49 incelendiğinde en çok kaza yapan tanker türünün 164 kaza ile "coastal tankerler" olduğu ve bu grupta en sık karşılaşılan kaza türünün batma olduğu anlaşılmaktadır. "Aframax" grubu tankerler 60 kaza ve en sık görülen karaya oturma kaza türü ile ikinci sırada, 54 kaza ve en sık görülen karaya oturma kaza türü ile "Panamax" grubu tankerler üçüncü sırada yer almışlardır. Bütün tanker türleri toplamında bakıldığında ise batma (92), karaya oturma (83) ve çatışma (62) kaza türlerinin en sık karşılaşılan kazalar oldukları tespit edilmiştir.

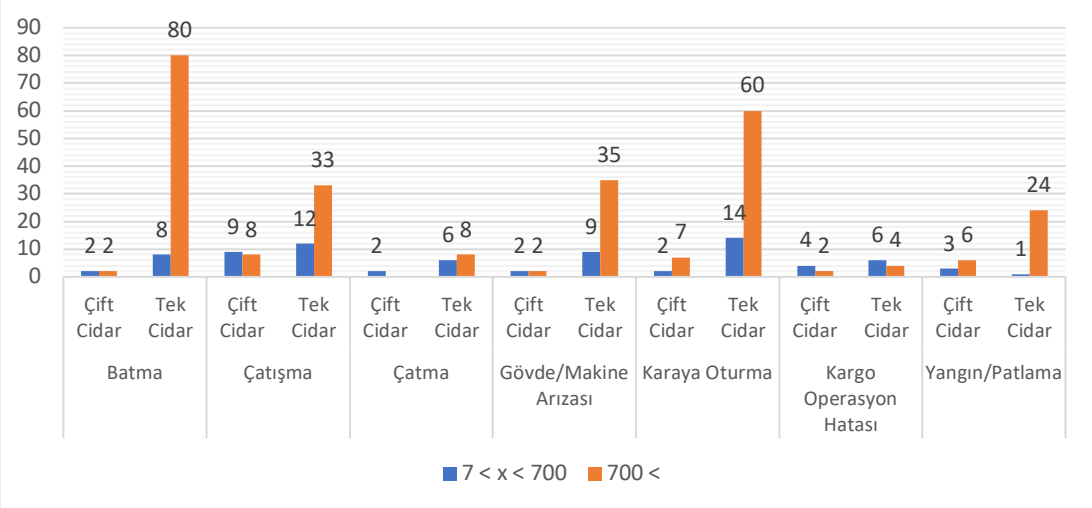
Şekil 50: Kaza Türlerinin Yaş Gruplarına Göre Dağılımı



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Kaza türlerinin tankerlerin yaş gruplarına göre dağılımına bakıldığında en çok kazanın 95 kaza ile 11-15 yaş grubu tankerlerinde görüldüğü ve bu grupta en çok yaşanan kaza türünün karaya oturma olduğu anlaşılmaktadır. 16-20 yaş grubu tankerler 89 kaza ile ikinci, 1-5 yaş grubu tankerler ise 61 kaza ile üçüncü sırada yer almışlardır. Batma türü kazaların 16 yaşından büyük tankerlerde en çok karşılaşılan kaza türü olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 51: Kirlilik Miktarı Aralığının Kaza ve Gövde Türüne Göre Dağılımı



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 51'de ise gemi gövde tipine göre meydana gelen kirlilik miktarı aralığının dağılımı gösterilmektedir. Genel toplama bakıldığında 51 çift cidarlı tankerin 24

(%47,1) tanesinde 7 ila 700 ton arasında, 27 (%52,9) tanesinde ise 700 tondan büyük petrol sızıntısı gerçekleşirken, 300 tek cidarlı tankerin 244 (%81,3) tanesinde 700 tondan büyük, 56 (%18,7) tanesinde 7 ila 700 ton arasında petrol sızıntısı gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Yukarıda frekans analizine tabi tutulan dünya genelinde meydana gelmiş 351 tanker kazası veri setinin değişken sınıflarının birbirleri arasındaki ilişkilerine dair parametrik testler uygulanmıştır. Parametrik testlerden anowa ve t testlerinin yapılabilmesi için "kirlilik miktarı" değişkeninin aldığı değerlerin normal dağılıma uygunluğu şartı araştırılmıştır. Çarpıklık (skewness) ve basıklık (kurtosis) değerleri bir değişkenin normal dağılıma uyup uymadığını gösteren en önemli değerlerdir. Değişkenin dağılımına ait çarpıklık ve basıklık değerlerinin [-1, +1] aralığında olması değişkenin normal dağılıma uygunluğunu ve dolayısıyla parametrik testlerin uygulanabilirliğini göstermektedir (Hair ve diğerleri, 2014). Tablo 19 kirlilik miktarı değişkenin normal dağılıma uymadığını göstermektedir.

Tablo 19: Kirlilik Miktarı Dağılımının Normallik Testi

			Statistic	Std. Error
Kirlilik Miktarı (ton)	Mean		16871,45	1784,166
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	13362,41	
		Upper Bound	20380,48	
	5% Trimmed Mean		11279,49	
	Median		5000,00	
	Variance		1117319955,974	
	Std. Deviation		33426,336	
	Minimum		40	
	Maximum		276000	
	Range		275960	
	Interquartile Range		16238	
	Skewness (Çarpıklık)		4,419	,130
	Kurtosis (Basıklık)		24,934	,260

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tabloya bakıldığında kirlilik miktarı değişkeninin çarpıklık ve basıklık değerlerinin [-1, +1] aralığında olmadığı anlaşılmaktadır. İstatistik biliminde üzerinde analiz yapılmak istenen değişkene ait dağılımın normal dağılıma uygun hale getirilebilmesi için araştırmacı veri dönüştürme işlemlerine başvurabilmekte ve en iyi

sonucu veren dönüştürme işlemi sonucunu kullanabilmektedir (Hair ve diğerleri, 2014: 76). Bu değişkene ait dağılımın normal dağılıma uygun hale getirilebilmesi için istatistik biliminde kullanılan veri dönüştürme işlemlerinden logaritmik veri dönüştürme işlemine başvurulmuştur. Bu işlem esnasında kirlilik miktarı değişkenine ait sayıların 10 tabanına göre logaritmaları alınmış ve normallik testi yeniden uygulanarak Tablo 20'deki değerlere ulaşılmıştır.

Tablo 20: Logaritmik Kirlilik Miktarının (logkm) Normallik Testi

			Statistic	Std. Error
logkm	Mean		3,6132	,04376
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	3,5272	
		Upper Bound	3,6993	
	5% Trimmed Mean		3,6175	
	Median		3,6990	
	Variance		,672	
	Std. Deviation		,81991	
	Minimum		1,60	
	Maximum		5,44	
	Range		3,84	
	Interquartile Range		1,24	
	Skewness (Çarpıklık)		-,146	,130
	Kurtosis (Basıklık)		-,816	,260

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablodan anlaşılacağı üzere, logaritmik veri dönüştürme işlemi sonucu çarpıklık ve basıklık değerleri [-1, +1] aralığına yerleşmiştir ve bu ifadeye göre logaritmik kirlilik miktarı (logkm) değerleri normal dağılıma uyduğu çıkarımına varılabilmektedir.

Normal dağılıma uygunluk şartı sağlandıktan sonra 351 tanker kazasına ait ki kare, t test ve anowa testleri uygulanmıştır. Sırasıyla ki kare testleri kaza tipi-tanker boyutu, kaza tipi-yaş grubu, kaza tipi-kirlilik miktarı aralığı, tanker boyutu-kirlilik miktarı aralığı, tanker gövde tipi-kirlilik miktarı aralığı, yaş grubu-kirlilik miktarı aralığı değişkenleri arasında; t testi gövde tipi-logaritmik kirlilik miktarı arasında; anowa testleri ise kaza tipi-logaritmik kirlilik miktarı, tanker boyutu-logaritmik kirlilik

miktarı, yaş grubu-logaritmik kirlilik miktarı değişkenleri arasındaki ilişkileri belirlemek için uygulanmıştır. Yapılan testler sonucu kaza tipi-kirlilik miktarı aralığı, tanker boyutu-kirlilik miktarı aralığı, tanker gövde tipi-kirlilik miktarı aralığı ve yaş grubu-kirlilik miktarı aralığı değişkenleri arasında anlamlı bir ilişkinin olduğu tespit edilmiştir. Anowa ve t testleri sonucu ise kaza tipi, tanker boyutu ve tanker gövde tipi değişkenlerinin ortalamalarının kirlilik miktarı değişkeninin üzerinde anlamlı bir farklılığa yol açtığı anlaşılmıştır.

PISCES II petrol kirliliği simülasyonunda çalıştırışlacak senaryoları oluşturumak için, Rapid Miner Studio 9.6 bilgisayar programında 351 tanker kazasından oluşan verinin üzerinde random forest algoritması uygulanarak elde edilen petrol kirliliği miktarı tahminleri ise tablo 21'de gösterilmektedir.

Tablo 21: Random Forest Algoritmasının Petrol Kirliliği Miktarı Tahminleri

Gemi	DWT	Yaş	Kaza Tipi	Tahmini Petrol Kirliliği (ton)
Tanker 1	105.344	6	Oturma	2.571
Tanker 2	152.146	4	Oturma	7.430
Tanker 3	16.631	8	Oturma	3.601
Tanker 4	6.974	1	Oturma	1.102
Tanker 5	3.228	29	Oturma	893
Tanker 6	1.115	7	Oturma	537
Tanker 7	159.959	10	Çatışma	2.316
Tanker 8	6.237	25	Oturma	1.075
Tanker 9	40.045	4	Oturma	9.760
Tanker 10	11.796	5	Çatışma	1.299
Tanker 11	38.734	1	Çatışma	3.516
Tanker 12	3.857	22	Oturma	929
Tanker 13	163.750	11	Çatışma	2.328
Tanker 14	47.045	15	Oturma	12.259
Tanker 15	45.614	12	Oturma	7.660

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tabloda gösterilen random forest algoritmasının tahminlerine ilişkin performansı değerlendirmeye yarayan ölçekler ortalama mutlak hatanın 3,72 ton, ortalama kare hatanın 3,16 ton ve kök ortalama kare hatanın 5 tondur.

Bir makine öğrenmesi modelinin test veri setine göre ortalama mutlak hatası, modelin tahmin ettiği değerlerin test setindeki gerçek değerlere olan uzaklığının ya da farkının mutlak değerlerinin ortalamasıdır (Sammut, 2011). Ortalama kara hata ise

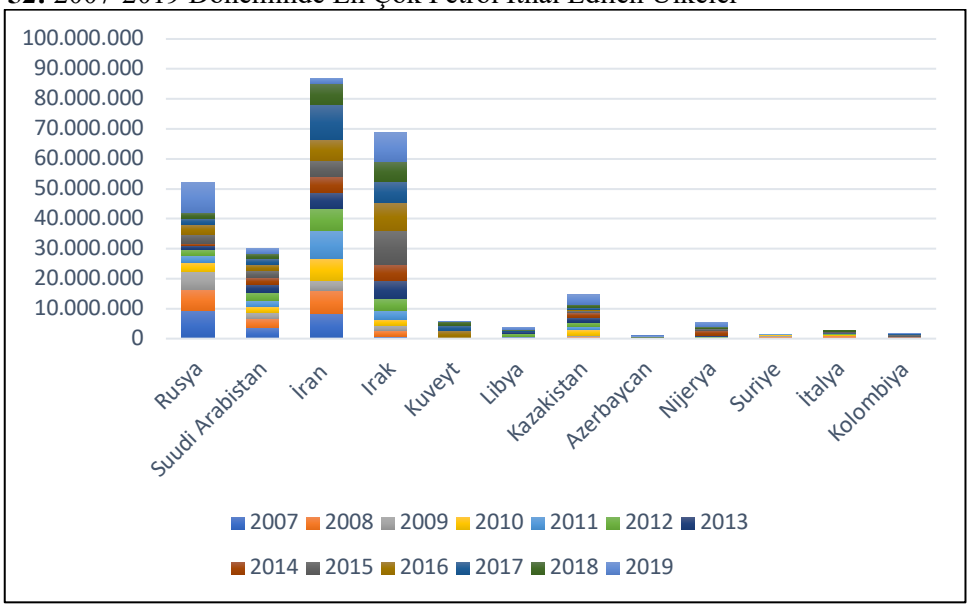
temel olarak tahmini ve gerçek değerler arasındaki farkın karesini alır ve ardından bunların ortalamasını hesaplar. Çoğu işlemle ilişkili içsel rastgelelik ve gürültü nedeniyle, ortalama kara hata genellikle pozitiftir ve sıfır değildir. Kök ortalama kare hata ise tüm hataların karelerinin ortalamasının kareköküdür. Kök ortalama kare hata, hedef değişkenle aynı birimde bir hata ölçümü sağlar. Bahsedilen performans metriklerinin sıfıra yakın olması, modelin tahminde yaptığı hatanın düşük olduğu anlamına gelmektedir (Zucarelli, 2020).

3.6.1.3. Türkiye'nin 2007-2019 Yılları Arasındaki Petrol İthalatına İlişkin Veriler

Döküntü türü belirlenirken Enerji Piyasası Düzenleme Kurulunun (EPDK) yıllık petrol piyasası sektör raporlarından Türkiye'nin 2007-2019 yıllları arasında en çok petrol ithal ettiği ülkeler tespit edilmiş ve belirli bir deadweightin (dwt) üzerindeki tankerlerin ham petrol tankeri, altındakilerin ise yakıt tankeri olduğu kabul edilerek yük türleri ilgili tankerlere rastgele atanmıştır.

Şekil 52'de EPDK'nın 2007 ile 2019 yılları arasındaki petrol piyasası sektör raporlarına göre Türkiye'nin en çok petrol ithal ettiği ülkeler sıralanmaktadır.

Şekil 52: 2007-2019 Döneminde En Çok Petrol İthal Edilen Ülkeler



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Yukarıdaki grafikte görüldüğü üzere Türkiye 2007 ile 2019 yılları arasında sırasıyla en çok petrolü İran, Irak, Rusya, Suudi Arabistan, Kazakistan, Kuveyt, Nijerya, Libya, İtalya, Kolombiya, Suriye ve Azerbaycan'dan ithal etmiştir. Grafikte ithal edilen petrolün miktarı ton cinsinden verilmektedir.

Senaryolar oluşturulurken döküntü türünü belirlemede elimizdeki 15 tankerin dwt'sine göre, 17.000 dwt aşağısındaki gemilerin yakıt tankeri olabileceği ve bu tankerlere dolayısıyla döküntü türü olarak ağır fuel oil (HFO), orta fuel oil 180 ve 300 (IFO 180-IFO 300) atanabileceği, 38.000 dwt nin üzerindeki tankerlerin ise ham petrol tankeri olabileceği ve bu tankerlere ise en çok petrol ithal edilen ülkeden başlayarak rastgele atamaların yapılabileceği düşünülmüştür.

3.6.1.4. Çanakkale Boğazı'na Ait Oşinografik ve Meteorolojik Veriler

Oşinografik ve meteorolojik veriler Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı'nın yayınladığı Türk Boğazları Oşinografi Atlasından ve "Poseidon System" adlı deniz ve hava durumu görüntüleme, tahminleme ve bilgilendirme hizmetlerini sunan internet sitesi arşivinden elde edilmiştir. Oşinografik ve meteorolojik veriler sırasıyla deniz suyu akıntısı hızı, akıntı yönü, rüzgar hızı, rüzgar yönü, hava sıcaklığı, deniz suyu sıcaklığı, su yoğunluğu, deniz durumu ve bulutluluk başlıkları altında toplanmıştır.

Yukarıda sırasıyla anlatılan hipotetik denizde petrol kirliliği döküntü senaryosu oluşturma süreci sonucu oluşan senaryolar aşağıda gösterilen tablo 22'deki gibi şekillenmiştir. Takip eden kısımda bu senaryoların döküntü simülasyonunda çalıştırılmaları sonucu elde edilen çıktılara yer verilmektedir.

Tablo 22: Denizde Petrol Kirliliği Senaryoları

Gemi Adı	DWT	Kaza Tipi	Tahmini Kirlilik Miktarı	Tahmini Yük Türü	Akıntı Hızı	Akıntı Yönü	Rüzgar Hızı	Rüzgar Yönü	Hava Sıcaklığı	Su Sıcaklığı	Su Yoğunluğu	Deniz Durumu	Bulutluluk
Tanker 1	105.344	Oturma	2.571 ton	Kuveyt Ham Petrolü	2,2 knot	210	11 knot	055	9°C	14°C	18,5 kg/m³	0,5	10
Tanker 2	152.146	Oturma	7.430 ton	Arabistan Ham Pet.	1,7 knot	230	10 knot	055	20°C	16°C	18 kg/m³	0,4	6
Tanker 3	16.631	Oturma	3.601 ton	HFO	1,6 knot	210	16 knot	030	30°C	26°C	15 kg/m³	0,5	0
Tanker 4	6.974	Oturma	1.102 ton	IFO 180	1,4 knot	220	21 knot	270	8°C	14°C	22,5 kg/m³	0,7	0
Tanker 5	3.228	Oturma	893 ton	IFO 300	1,4 knot	200	13 knot	000	9°C	13°C	20,5 kg/m³	0,4	5
Tanker 6	1.115	Oturma	537 ton	IFO 180	0,7 knot	260	7 knot	080	3°C	7°C	20 kg/m³	0,6	7
Tanker 7	159.959	Çatışma	2.316 ton	Nijerya Ham Petrolü	2 knot	200	11 knot	010	17°C	15°C	22 kg/m³	2,5	10
Tanker 8	6.237	Oturma	1.075 ton	HFO	1,8 knot	250	17 knot	000	28°C	22°C	17 kg/m³	0,4	4
Tanker 9	40.045	Oturma	9.760 ton	Irak Ham Petrolü	1,8 knot	215	13,5 knot	010	30°C	23°C	24 kg/m³	0,5	0
Tanker 10	11.796	Çatışma	1.299 ton	HFO	0,8 knot	230	24,5 knot	000	25°C	19°C	19 kg/m³	0,3	10
Tanker 11	38.734	Çatışma	3.516 ton	Kazak Ham Petrolü	1 knot	227	15 knot	010	18°C	21°C	17 kg/m³	0,3	4
Tanker 12	3.857	Oturma	929 ton	IFO 300	1,5 knot	205	10 knot	060	25°C	19°C	17 kg/m³	0	0
Tanker 13	163.750	Çatışma	2.328 ton	Libya Ham Petrolü	0,8 knot	225	25 knot	000	12°C	12°C	18,5 kg/m³	1,3	0
Tanker 14	47.045	Oturma	12.259 ton	İran Ham Petrolü	1,7 knot	225	17 knot	020	27°C	25°C	15 kg/m³	0,4	7
Tanker 15	45.614	Oturma	7.660 ton	Rus Ham Petrolü	1,8 knot	225	11 knot	030	10°C	7°C	20 kg/m³	0,3	5

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

3.6.2. Denizde Petrol Kirliliği Senaryolarının Simülasyonu

Bu çalışma kapsamında, denizde petrol kirliliğine müdahale tesisinin konum optimizasyonu probleminin çözümünde kullanılan optimizasyon modelinin kurulabilmesi için gerekli olan veriler, hipotetik olarak geliştirilen ve 15 tanker kazası sonucu Çanakkale Boğazı'nda denizde petrol kirliliğine neden olduğu varsayılan senaryoların PISCES II simülasyonunda çalıştırılması sonucu elde edilmiştir. Bu nedenle takip eden kısımda "simülasyon ve modelleme" teknikleri kavramlarına değinilmekte ve ardından oluşturulan senaryolar ve bunların PISCES II simülasyon çıktılarına yer verilmektedir.

Simülasyon, bir model vasıtasıyla gerçek bir sistemin davranışını kopyalamamıza olanak sağlayan ve bilgisayarlarda kullanılan belirli matematiksel tekniklerden faydalanmaya dayanmaktadır (Favero ve Belfiore, 2019: 919). Buradan hareketle simülasyonu anlayabilmek için sistem ve model kavramlarını tanımlamak gerekmektedir.

Sistem, mantıklı ve amaca yönelik bir sonuca ulaşmak için birlikte çalışan ve organize bir biçimde ilişkili bileşenlerin toplamı veya koleksiyonudur (Wu, 1992: 31). Bir başka ifadeyle sistem, belirli bir zaman aralığı boyunca gözlemlenebilen bir davranış formu üreten etkileşim halindeki varlıkların toplamıdır (Birta ve Arbez, 2019: 3). Sistemi oluşturan birbiriyle ilişkili parçaların kombine olmuş davranışları, birleşik bir varlığın davranışı olarak görülebilmektedir (Gray, 2010: 2). Ulaştırma sistemleri, güç üreten sistemler, üretim sistemleri, veri iletişim sistemleri, sağlık sistemleri ve ekonomik sistemler çeşitli sistem türlerine örnek olarak verilebilmektedir. Doğaları gereği karmaşık yapılar olan sistemlerin davranışlarına ilişkin kavrayış kazanmanın yollarını sağlamak adına modelleme ve simülasyon araçlarına ihtiyaç duyulmaktadır (Birta ve Artez, 2019: 3).

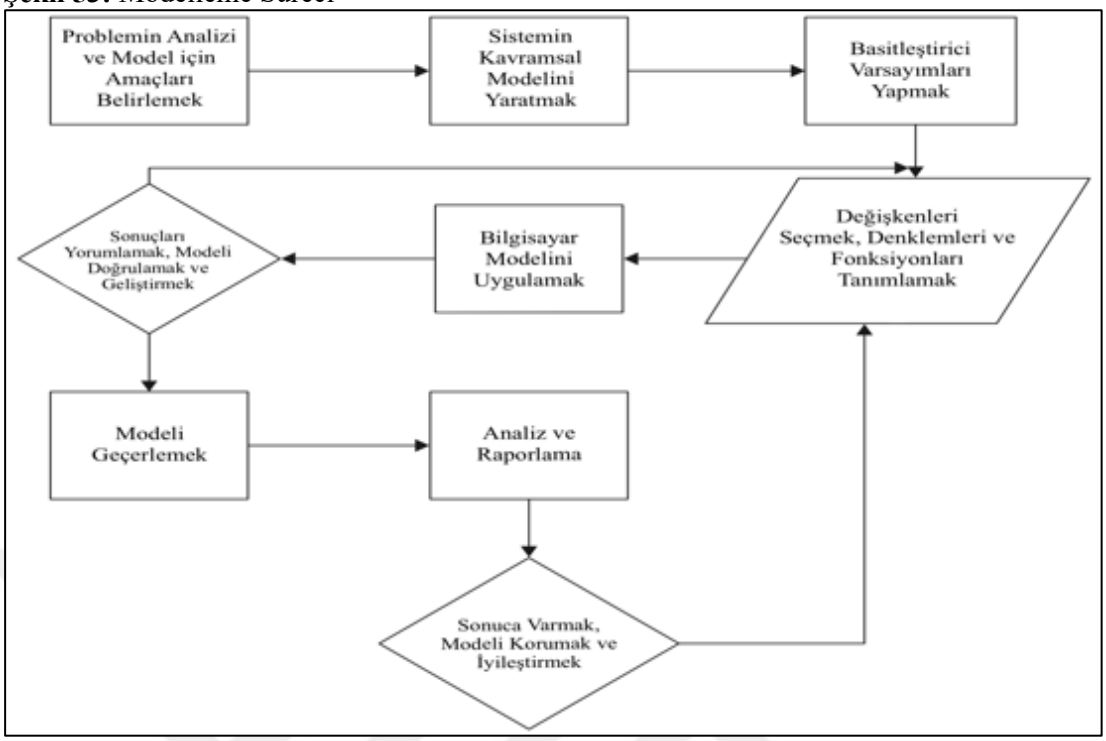
Model, karmaşık bir sistemin durumu veya davranışı hakkında iç görü kazanmamıza yardım eden gerçek dünyadaki bir olgu veya nesnenin basitleştirilmesi veya soyutlamasıdır (Gordon ve Guilfoos, 2017: 9). Modeller, gerçek sistemlerin araştırılmasının pahalı, yavaş, rahatsız edici, emniyetsiz veya yasadışı olması gibi pratik olmayan ve engelleyici durumlarda kullanılmaktadır (White ve Ingalls, 2016:

38). Modelin amaçlarından biri, gerçek sistem üzerindeki değişikliklerin etkilerini tahmin etmektir (Maria, 1997: 7).

Var olan birçok model genellikle fiziksel, matematiksel ve bilgisayar modelleri olmak üzere 3 ana grupta toplanmaktadır. Fiziksel modeller gerçek sistemlerin bir ölçek dahilinde küçültülmüş veya farklı malzemelerden gerçek boyutlarda yapılmış halleriyken, matematiksel modeller, teori ve deneyler vasıtasıyla oluşturulan ve fiziksel durumları temsil eden mantıksal kurgulardır. Bilgisayar modelleri ise matematiksel modellerin yazılım dilleri aracılığıyla bilgisayar kodlarına dönüştürülmesidir (Kelton ve diğerleri, 2014: 4). Yeterince basit olan matematiksel modellerin çözümünde kuyruk teorisi, diferansiyel denklemler yöntemi veya doğrusal programlama gibi geleneksel matematiksel araçlarla çözüme ulaşılabilirken, çoğu modelin olduğu gibi karmaşık modellerde simülasyon (benzetim) devreye girmektedir (Kelton ve diğerleri, 2014: 5).

Şekil 53 bir modelleme sürecinde izlenmesi gereken adımları göstermektedir. Buna göre bir modelleme sürecine başlanırken yapılması gereken ilk şey problemi belirlemek, analiz etmek ve sonuçta ulaşılması beklenen amacı belirlemektir. Ardından kavramsal olarak sistemin sahip olduğu özellikleri tanımlayıp bazı basitleştirici varsayımlar yapıldıktan sonra amaç fonksiyonları, değişkenler ve kısıtların belirlenmesi gelmektedir. Sonrasında hesaplama işlemleri için bilgisayara kodlanan matematiksel modelin bilgisayar yardımıyla çözümünden alınan sonuçlar yorumlanmakta ve modelin duyarlılık testleri yapılarak geçerliliği ve güvenilirliği sınanmaktadır. Bu sınama sonucu ihtiyaç varsa model yeniden düzenlenmekte ve geliştirilmektedir.

Şekil 53: Modelleme Süreci



Kaynak: (Gordon ve Guilfoos, 2017: 11)

Simülasyon, gerçek dünya sistemlerinin veya süreçlerinin uygun bir model üzerinden bir zaman boyunca taklit edilmesidir. Simülasyon, sistemin davranışını tanımlamada ve analiz etmede, sistem üzerinde çeşitli varsayımsal durumların uygulanmasının sonuçlarını elde etmede ve gerçek bir sistemin dizaynında yardımcı olarak kullanılmaktadır. Hem var olan sistemler hem de kavramsal sistemler simülasyon ile modellenebilmektedir (Banks, 1998: 3-4).

Simülasyon uygulamaları sivil ve askeri birçok alan için eğitim ve öğretimde, mühendislik tasarımında, karar ve eylem seçeneklerinin değerlendirilmesinde, dönüşüm veya değişim için stratejilerin değerlendirilmesinde, tahminde bulunmada, performans değerlendirmede, prototip ve konsept değerlendirmede, risk/emniyet değerlendirmede, duyarlılık analizinde, satın alma ve tedarik kararlarında, karar verme süreçlerinde belirsizliğin azaltılmasında ve kontrol politikası seçeneklerinin mukayesesinde kullanılmaktadır (Birta ve Arbez, 2019: 5).

Bir simülasyon modelinin çalışma şekli, seçilen modelleme tekniğine bağlıdır. Bu aynı zamanda simülasyon modellerini sınıflandırmada kullanılan bir yöntemdir. Buna göre simülasyon modelleri statik-dinamik, deterministik-stokastik, sürekli-ayrık olay odaklı, nicel-nitel ve hibrid olmak üzere 5 ana grupta sınıflandırılmaktadır. Statik

simülasyon modelleri zaman içinde tek bir noktada model parametrelerinin değişimini yakalarken, dinamik simülasyon modelleri belirli bir zaman periyodu boyunca model parametrelerinin davranışını yakalamaktadır (Müller ve Pfahl, 2008: 122-123). Sürekli simülasyon modelleri dinamik bir sistemin davranışını, tipik olarak diferansiyel denklemler içeren bir dizi denkleme göre zaman boyunca sürekli izlerken, ayrık olay odaklı simülasyon modelinde dinamik sistemin işleyişi, olayların kronolojik bir dizisi olarak zamanın ayrık anlarında temsil edilmektedir (Choi ve Kang, 2013: 9). Deterministik simülasyon modellerinde modeldeki değişkenler olasılık değerlerine bağlı olan rassal veya rastgele değerler almazken, stokastik simülayon modellerinde en az bir değişken olasılık yoğunluk ya da olasılık dağılım fonksiyonlarına göre rassal veya rastgele değerler almaktadır (Kelton ve diğerleri, 2014: 8).

Yarattığı avantajlar tarafından bakılacak olursa simülasyon uygulaması, gerçek sistem üzerinde yapılacak herhangi bir uygulamaya nazaran maliyet ve zaman tasarrufu sağlamada, sistemle ilgili alternatif kararların değerlendirilmesini kolaylaştırmada, henüz var olmayan bir sistemle ilgili modeller yardımıyla öngörüler geliştirmede, sistemin işleyişinde oluşabilecek potansiyel problemleri tespit etmede, sistemin gelecekteki değişikliklere karşı uyum sağlamasında gerekli ihtiyaçları belirlemede ve yatırımların akıllıca yapılmasında ve çalışanların eğitiminde önemli faydalar sunmaktadır. Ancak bununla birlikte simülasyon uygulaması için gerekli bazı bilgisayar yazılımlarının pahalı olması, bazı simülasyon süreçlerinin uzun süreler alması, simülasyon modellerinin büyük miktarda, pek çok verinin elde edilmesine ihtiyaç duyması, uzmanlık eğitimi gerektirmesi ve simülasyondan elde edilen sonuçlara aşırı güvenilmesi bu yöntemin sahip olduğu dezavantajlar arasında gösterilebilmektedir (Robinson, 2014: 13-16; Banks, 1998: 10-12).

Bir problemin çözümünde simülasyon uygulaması için izlenen genel yol sırasıyla problemin belirlenmesi ve formüle edilmesi, gerçek sisteme ait verinin toplanıp işlenmesi, modelin geliştirilmesi, modelin geçerli kılınması, simülasyon senaryolarının hazırlanması, simülasyon oynatımlarının yapılması, sonuçların yorumlanması ve gelecek aksiyonlar için önerilerin sunulması şeklindedir (Maria, 1997: 8; Allen, 2011: 4; Rossetti, 2016: 10).

Bu çalışmada denize dökülen petrolün su yüzeyindeki bozunma ve hareket süreçlerini modellemek için PISCES II simülasyon programı kullanılmıştır.

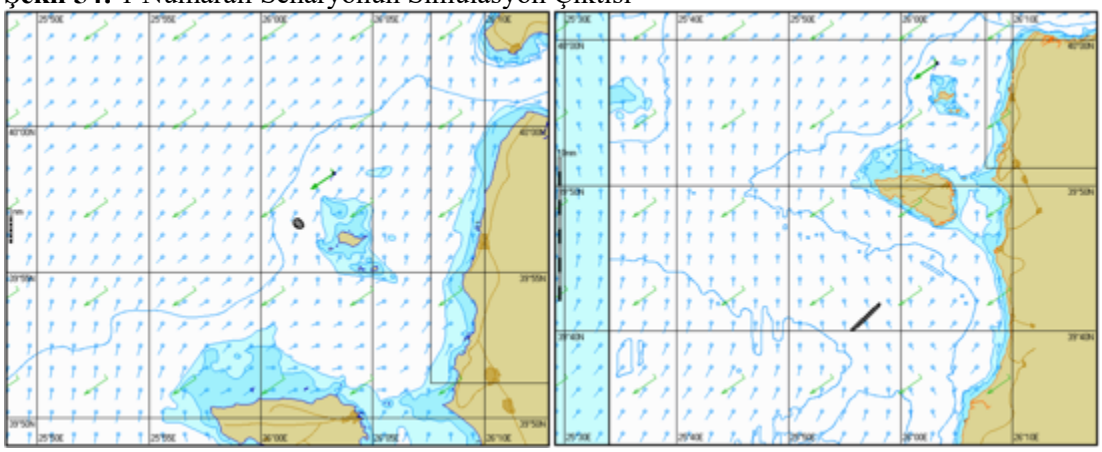
Amerikan Sahil Güvenliğinin Müdahale Tatbikatı Programına Hazırlığı (PREP) için TRANSAS tarafından üretilen ve OPA 1990 gerekliliklerini karşılayan Potansiyel Olay Simülasyonu, Kontrol ve Değerlendirme Sistemi (PISCES) bir petrol kirliliği simülatörü olarak deniz kazaları sonucu oluşan petrol kirliliğine müdahaleyi planlamak için tasarlanmıştır. Bu kapsamda PISCES II hem deniz yüzeyindeki petrolün bozunma sürecini ve hareketini makul bir doğrulukla tahmin etmekte hem de çeşitli tipteki olay ve çevre koşulları için müdahale stratejileri geliştirmeyi mümkün kılmaktadır (Juszkiewicz ve diğerleri, 2018: 133; Delgado ve diğerleri, 2006: 279-280). PISCES II, deniz yüzeyindeki petrolün rüzgar ve akıntıyla yer değiştirmesini, yayılmasını, buharlaşmasını, dağılmasını, emülsiye olmasını, viskozite değişimlerini, kıyıya vurmasını ve çeşitli müdahale tekniklerinin uygulanmasını simüle edebilmektedir (Lazuga ve diğerleri, 2013: 111). Kıyı şeridi, akıntı sahası, rüzgar, hava sıcaklığı, su sıcaklığı, dalga yüksekliği ve su yoğunluğu gibi çevresel parametreler; özgül ağırlık, yüzey gerilimi, damıtma eğrisi ve emülsifikasyon özellikleri gibi dökülen petrolün fiziksel özellikleri; sızıntı kaynağının özellikleri ve müdahale aksiyonu gibi faktörler PISCES II simülasyonunun matematiksel modelinde dikkate alınmaktadır (Gucma ve diğerleri, 2012: 491). PISCES II deniz yüzeyindeki petrol birikintisini Lagrangian yaklaşımıyla tanımlamakta ve buna göre petrol birikintisi akıntı ve rüzgar etkisi altında hareket eden noktalar halindeki parçacıklar topluluğu olarak temsil edilmekte ve değerlendirilmektedir (Perkovich ve diğerleri, 2008a: 468). PISCES II modelinde petrol birikintisinin hareketi adveksiyon, yayılma ve stokastik difüzyon kaynaklı olmak üzere iki boyutlu olarak düşünülmekte ve Fay (1971)'in sunduğu yaklaşıma Lehr ve diğerleri (1984)' ün getirdiği düzeltmeler ile formüle edilmektedir. Buharlaşma süreci ise Mackay ve diğerlerinin (1980) ve Stiver ve Mackay (1984) tarafından sunulan formüller ile sözde bileşen (pseudo-companent) yaklaşımı kullanılarak simüle edilmektedir (Perkovich ve diğerleri, 2008b: 242). Ayrıca modelde dağılma ve emülsiye olma süreçleri Mackay ve diğerleri (1980)'e göre hesaplanmaktadır. Viskozite değişiminde ise emülsifikasyon ve buharlaşma etkili olduğundan, emülsifikasyon bileşeni için Mooney (1955) ile buharlaşma bileşeni için Mackay ve diğerleri (1980) kombine edilerek hesaplama yapılmaktadır (Delgado ve diğerleri, 2006: 284). Bahsi geçen çalışmaların ortaya koyduğu formüller bu çalışmanın daha önceki bölümünde detaylı olarak anlatılmaktadır. PISCES II

simülasyonunun sonuçları yapılan çeşitli çalışmalar yoluyla uluslararası seviyede ve ayrıca Lübnan Krizi sırasında uydu görüntülerinden elde edilen sonuçlarla sürekli karşılaştırmalar neticesinde geniş ölçüde geçerli kılınmış ve onaylanmıştır (Töz ve Köseoğlu; 2018: 221; Aşan ve diğerleri, 2020: 3).

PISCES II denizde petrol kirliliği simülasyon programında çalıştırılmak üzere 15 tanker kazasının her biri için petrol döküntü senaryoları geliştirilmiştir. Bunun yapılmasındaki amaç, optimizasyon modelinde kullanılacak değişkenler ve parametreler için veri sağlanmasıdır. Senaryoların oluşturulabilmesi için PISCES II'nin ihtiyaç duyduğu veriler döküntü yerinin koordinatları, döküntünün miktarı, döküntünün türü, olayın gerçekleştiği zaman dilimindeki oşinografik ve meteorolojik veriler şeklinde sıralanmaktadır. Döküntü yerinin koordinatları ve döküntü miktarı yukarıda belirtildiği gibi elde edilmiştir

Tablo 22'deki gibi oluşan Çanakkale Boğazı'nda 2007-2018 yılları arasındaki 15 tanker kazasına ait hipotetik petrol kirliliği senaryoları PISCES II simülasyon programında çalıştırılmış ve aşağıdaki şekillerde gösterilen çıktılar elde edilmiştir. Şekillerde, simülasyonlar gerçekleştirilen denizde petrol kirliliğinin ilk yarım saatindeki ve karaya vurduğu andaki konum ve durumları sırasıyla soldaki ve sağdaki resimde gösterilmektedir.

Şekil 54: 1 Numaralı Senaryonun Simülasyon Çıktısı

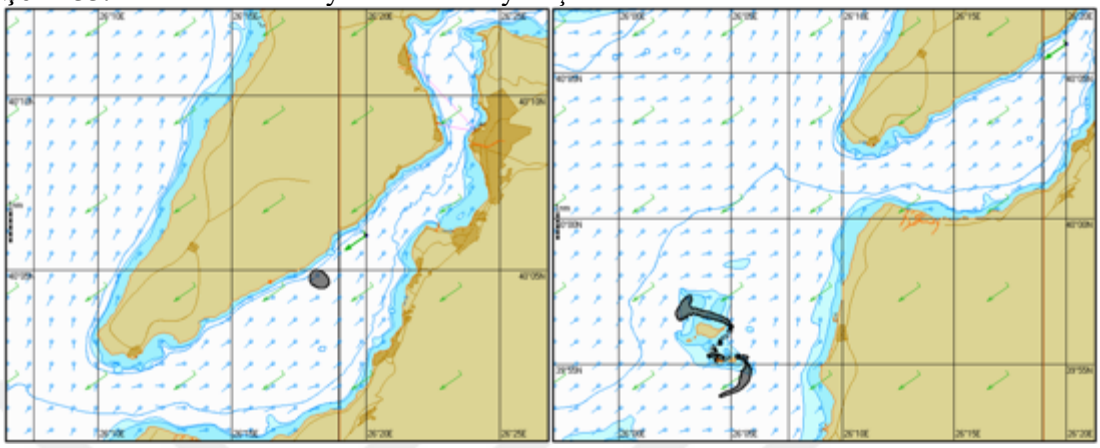


Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 54'te 1 numaralı senaryonun seyri gösterilmektedir. Simülasyonda, 2.571 ton ham petrolün yayılması sonucu oluşan kirlilik karaya vurmamıştır. Deniz yüzeyindeki petrol birikintisi 1,4 km^2 alana yayılarak 3,7 cm kalınlığa ulaşmıştır.

Denize dökülen petrolün 154 tonu buharlaşmış, 6,3 tonu doğal dağılmaya maruz kalmış ve geriye kalan kısım 20.134 ton emülsiyon oluşturmuştur.

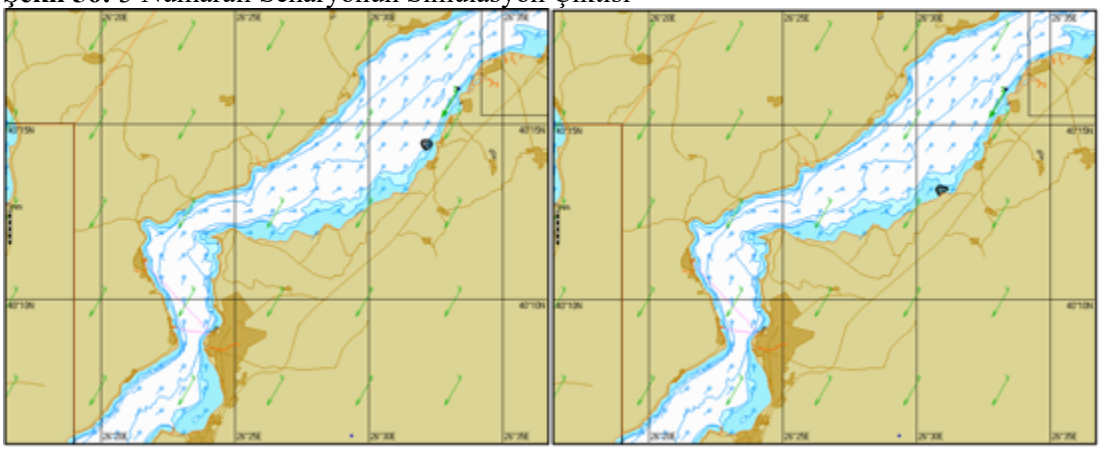
Şekil 55: 2 Numaralı Senaryonun Simülasyon Çıktısı



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 55'te 2 numaralı senaryonun seyri gösterilmektedir. Simülasyonda, 7.430 ton ham petrolün yayılması sonucu oluşan kirliliğin 10,4 tonu 6,96 saat sonra kayalık bir kıyıya vurmuştur. Deniz yüzeyindeki birikinti 2,7 km^2 alana yayılmış ve 4,47 cm kalınlığa ulaşmıştır. Denize dökülen petrolün 164 tonu buharlaşmış, 10,5 tonu doğal dağılmaya maruz kalmış ve kirlilik sonucu 29.732 ton emülsiyon oluşmuştur.

Şekil 56: 3 Numaralı Senaryonun Simülasyon Çıktısı

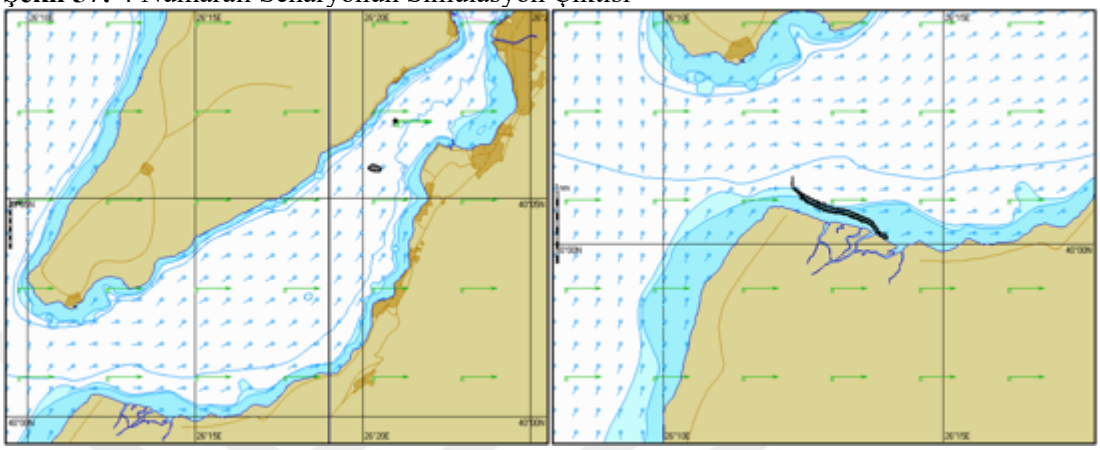


Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 56'da 3 numaralı senaryonun seyri gösterilmektedir. Simülasyonda, 3.601 ton HFO nedeniyle oluşan kirliliğin 27 tonu 0,96 saatte kum ve kayalıktan oluşan kıyı şeridine vurmuştur. Deniz yüzeyindeki petrol birikintisi 0,09 km^2 alan

yayılmış ve 29 cm kalınlığa ulaşmıştır. Denize dökülen petrolün 1 tonu buharlaşmış, 1,3 tonu doğal dağılmaya maruz kalmış ve geriye kalan kısım 4.684 ton emülsiyon oluşturmuştur.

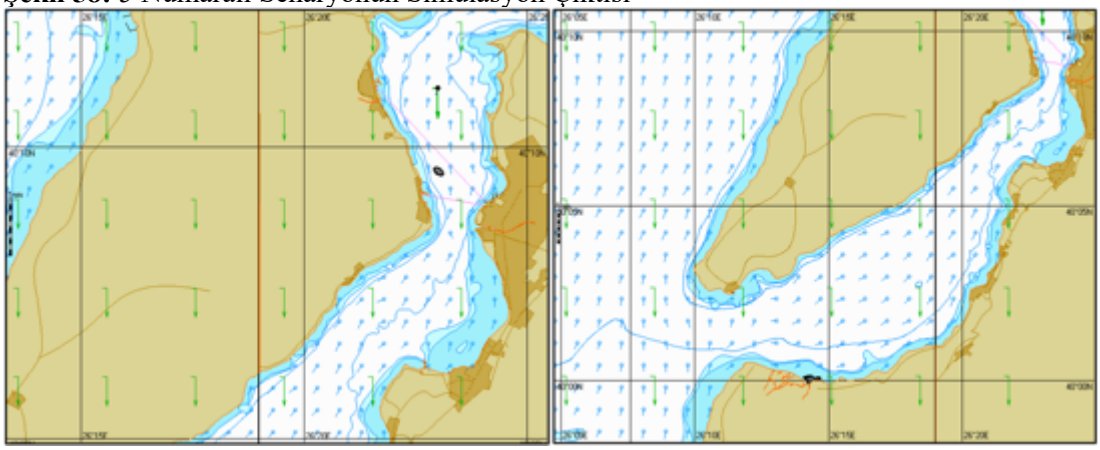
Şekil 57: 4 Numaralı Senaryonun Simülasyon Çıktısı



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 57'de 4 numaralı senaryonun seyri gösterilmektedir. Simülasyonda, 1.102 ton IFO 180 nedeniyle oluşan kirliliğin 1,4 tonu 10,73 saat sonunda kum ve kayadan oluşan kıyı şeridine vurmuştur. Deniz yüzeyindeki petrol birikintisi 0,16 km^2 alana yayılmış ve 9,5 cm kalınlığa ulaşmıştır. Denize dökülen petrolün 4,6 tonu buharlaşmış, 56,2 tonu doğal dağılma sürecine girmiş ve geriye kalan kısım 1.406 ton emülsiyon oluşturmuştur.

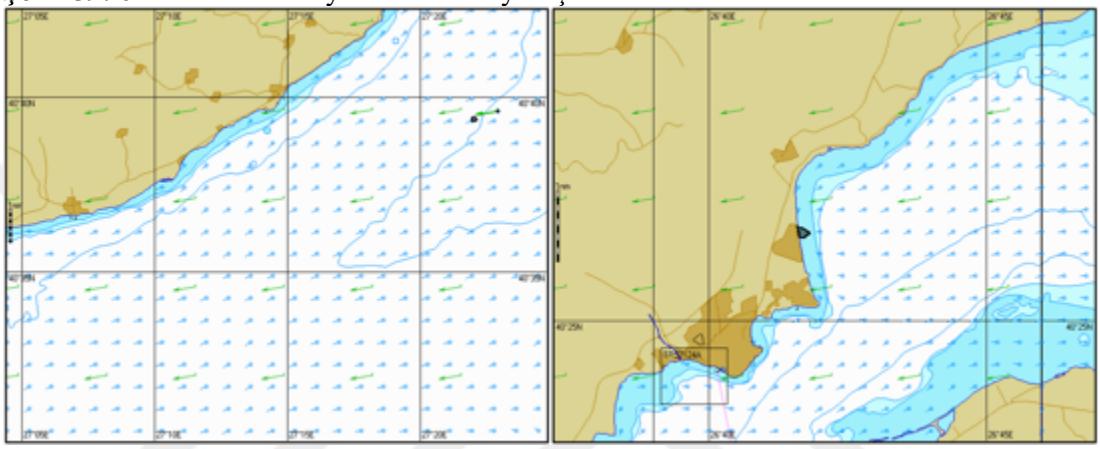
Şekil 58: 5 Numaralı Senaryonun Simülasyon Çıktısı



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 58'de 5 numaralı senaryonun seyri gösterilmektedir. Simülasyonda, 893 ton IFO 300 nedeniyle oluşan kirliliğin 7,3 tonu 6,03 saat sonundan kum ve kayadan oluşan kıyı şeridine temas vurmuştur. Deniz yüzeyindeki petrol birikintisi 0,14 km^2 alana yayılmış ve 4,5 cm kalınlığa ulaşmıştır. Denize dökülen petrolün 1,4 tonu buharlaşmış, 0,6 tonu doğal dağılma sürecine girmiş ve geriye kalan kısım 1.188 ton emülsiyon oluşturmuştur.

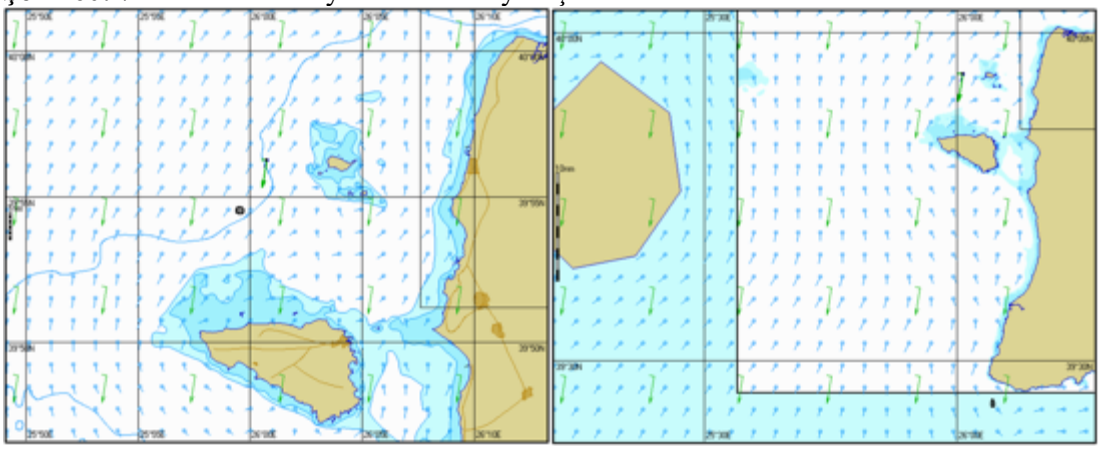
Şekil 59: 6 Numaralı Senaryonun Simülasyon Çıktısı



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 59'da 6 numaralı senaryonun seyri gösterilmektedir. Simülasyonda, 537 ton IFO 180 nedeniyle oluşan kirliliğin 4,6 tonu 25,43 saat sonunda kumsal kıyı şeridine vurmuştur. Deniz yüzeyindeki petrol birikintisi 0,08 km^2 alana yayılmış ve 3 cm kalınlığa ulaşmıştır. Denize dökülen petrolün 1,8 tonu buharlaşmış, 0,4 tonu doğal dağılma sürecine girmiş ve geriye kalan kısım 723 ton emülsiyon oluşturmuştur.

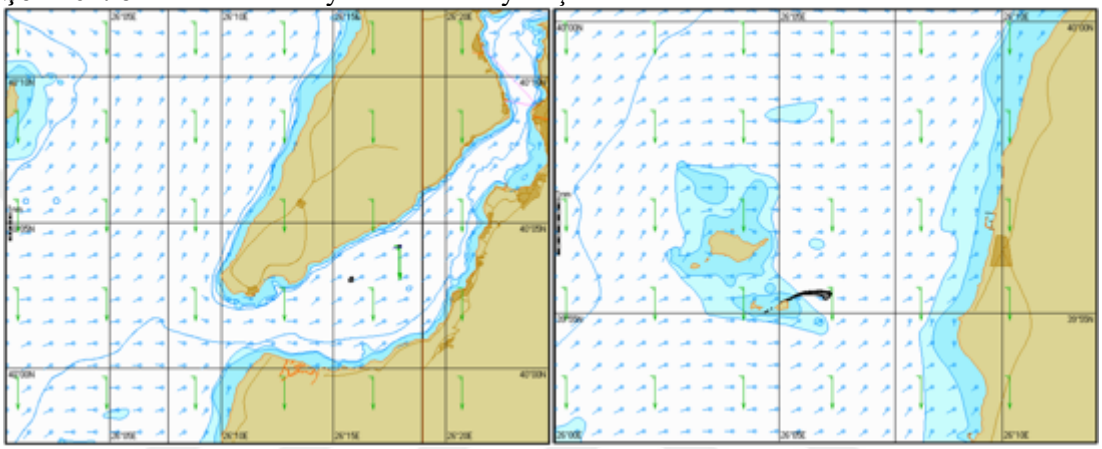
Şekil 60: 7 Numaralı Senaryonun Simülasyon Çıktısı



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 60'ta 7 numaralı senaryonun seyri gösterilmektedir. Simülasyonda, 2.316 ton ham petrol nedeniyle oluşan kirlilik karaya vurmamıştır. Deniz yüzeyindeki petrol birikintisi 0,5 km^2 alana yayılmış ve 5,3 cm kalınlığa ulaşmıştır. Denize dökülen petrolün 134 tonu buharlaşmış, 0,9 tonu doğal dağılmaya maruz kalmış ve geriye kalan kısım 8.759 ton emülsiyon oluşturmuştur.

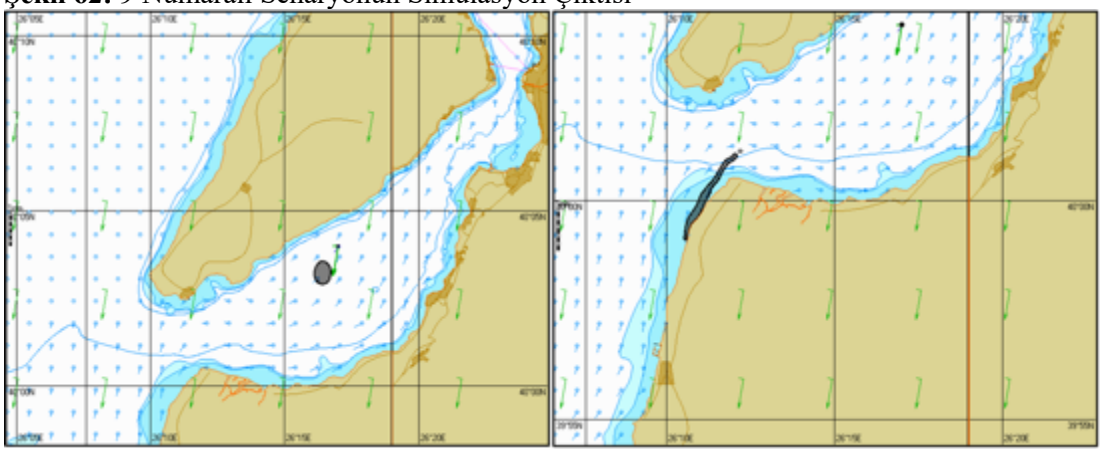
Şekil 61: 8 Numaralı Senaryonun Simülasyon Çıktısı



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 61'de 8 numaralı senaryonun seyri gösterilmektedir. Simülasyonda, 1.075 ton HFO nedeniyle oluşan kirliliğin 4,9 tonu 6,65 saat sonunda kayalık bir kıyı şeridine vurmuştur. Denize yüzeyindeki petrol birikintisi 0,2 km^2 alana yayılmış ve 5 cm kalınlığa ulaşmıştır. Denize dökülen petrolün 2,7 tonu buharlaşmış, 3,6 tonu doğal dağılmaya uğramış, 29 tonu batmış ve geriye kalan kısmı 1.381 ton emülsiyon oluşturmuştur.

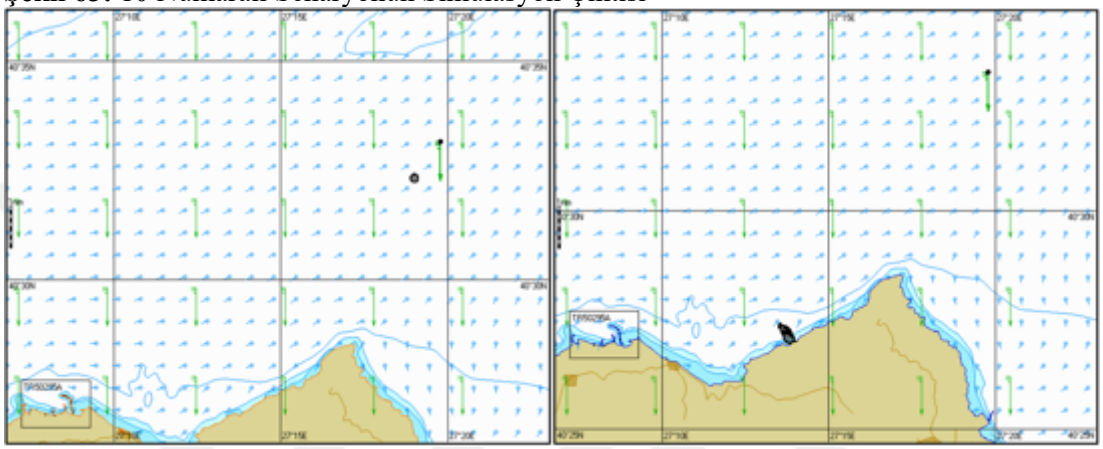
Şekil 62: 9 Numaralı Senaryonun Simülasyon Çıktısı



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 62'de 9 numaralı senaryonun seyri gösterilmektedir. Simülasyonda, 9.760 ton ham petrol nedeniyle oluşan kirliliğin 6 tonu 4,26 saat sonunda kum ve kayadan oluşan kıyı şeridine vurmuştur. Deniz yüzeyindeki petrol birikintisi 0,9 km^2 alana yayılmış ve 16 cm kalınlığa ulaşmıştır. Denize dökülen petrolün 912 tonu buharlaşmış, 28,6 tonu doğal dağılmaya uğramış ve geriye kalan kısım 27.990 ton emülsiyon oluşturmuştur.

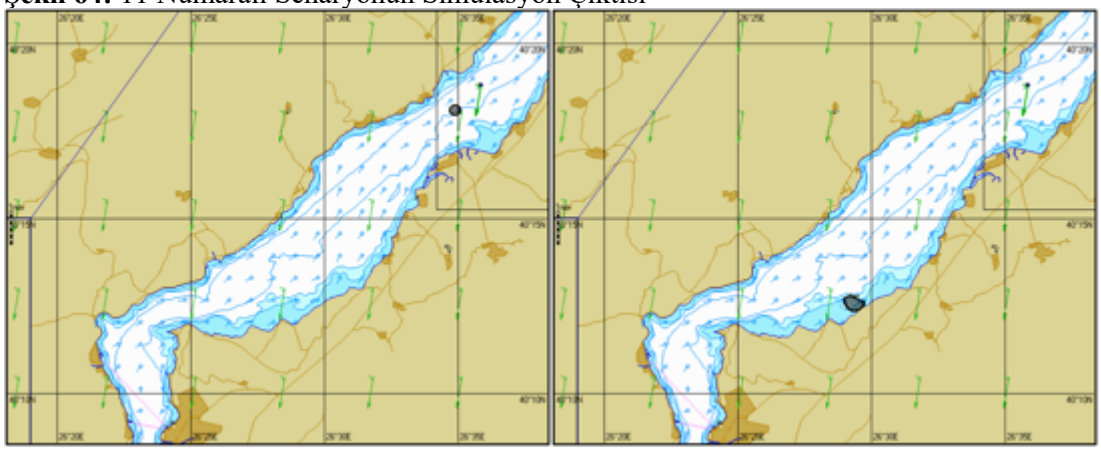
Şekil 63: 10 Numaralı Senaryonun Simülasyon Çıktısı



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 63'te 10 numaralı senaryonun seyri gösterilmektedir. Simülasyonda, 1.299 ton HFO nedeniyle oluşan kirliliğin 8,9 tonu 3,95 saat sonunda kum ve kayadan oluşan bir kıyı şeridine vurmuştur. Deniz yüzeyindeki petrol birikintisi 0,16 km^2 alana yayılmış ve 10 cm kalınlığa ulaşmıştır. Denize dökülen petrolün 2,5 tonu buharlaşmış, 14,4 tonu doğal dağılmaya maruz kalmış ve geriye kalan kısım 1.699 ton emülsiyon oluşturmuştur.

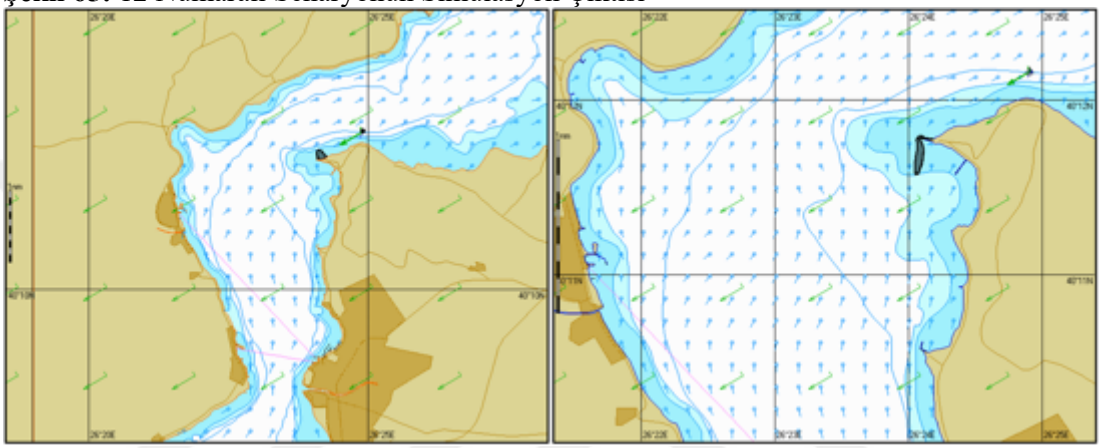
Şekil 64: 11 Numaralı Senaryonun Simülasyon Çıktısı



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 64'te 11 numaralı senaryonun seyri gösterilmektedir. Simülasyonda, 3.516 ton ham petrol nedeniyle oluşan kirliliğin 16,2 tonu 3,75 saat sonunda kum ve kayadan oluşan kıyı şeridine vurmuştur. Deniz yüzeyindeki petrol birikintisi 0,6 km^2 alana yayılmış ve 3,6 cm kalınlığa ulaşmıştır. Denize dökülen petrolün 95,2 tonu buharlaşmış, 303 tonu doğal dağılmaya uğramış ve geriye kalan kısım 3.101 ton emülsiyon oluşturmuştur.

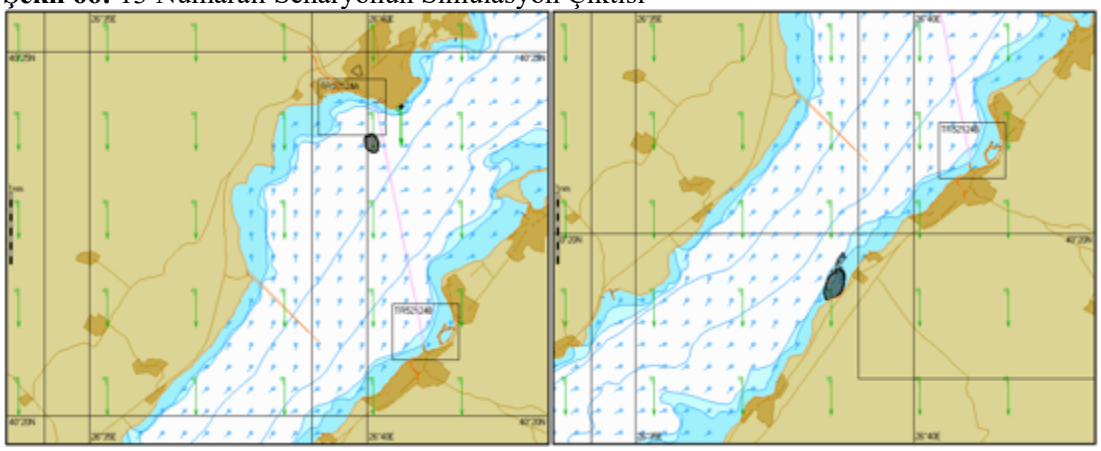
Şekil 65: 12 Numaralı Senaryonun Simülasyon Çıktısı



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 65'te 12 numaralı senaryonun seyri gösterilmektedir. Simülasyonda, 929 ton IFO 300 nedeniyle oluşan kirliliğin 1,5 tonu 0,3 saat içerisinde kum ve kayadan oluşan kıyı şeridine vurmuştur. Deniz yüzeyindeki petrol birikintisi 0,2 km^2 alana yayılmış ve 7,7 cm kalınlığa ulaşmıştır. Denize dökülen petrolün 0,1 tonu buharlaşmış ve geriye kalan kısım 1.117 ton emülsiyon oluşturmuştur.

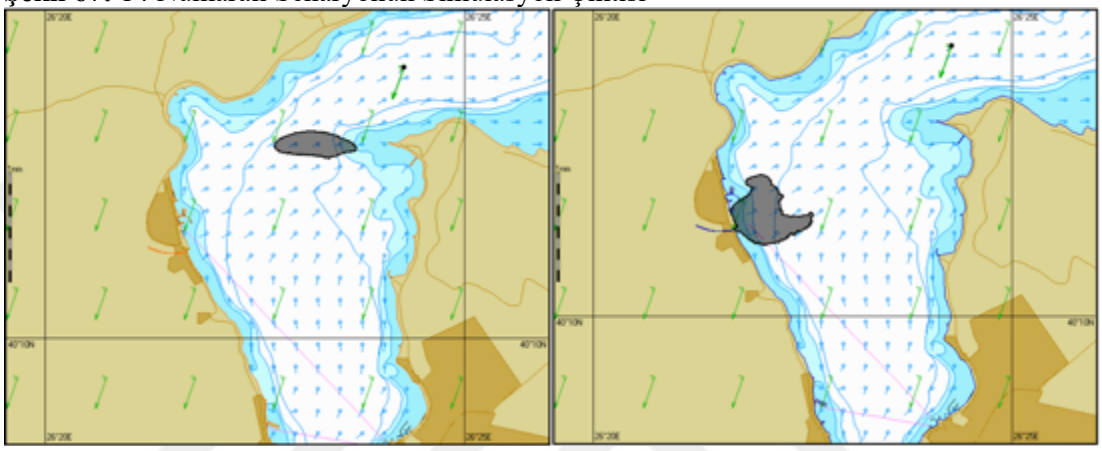
Şekil 66: 13 Numaralı Senaryonun Simülasyon Çıktısı



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 66'da 13 numaralı senaryonun seyri gösterilmektedir. Simülasyonda, 2.328 ton ham petrol nedeniyle oluşan kirliliğin 33,3 tonu 3,21 saat sonunda kumsal kıyı şeridine vurmuştur. Deniz yüzeyindeki petrol birikintisi 0,1 km^2 alana yayılmış ve 2,8 cm kalınlığa ulaşmıştır. Denize dökülen petrolün 164 tonu buharlaşmış, 239 tonu doğal dağılmaya uğramış ve geriye kalan kısım 7.190 ton emülsiyon oluşturmuştur.

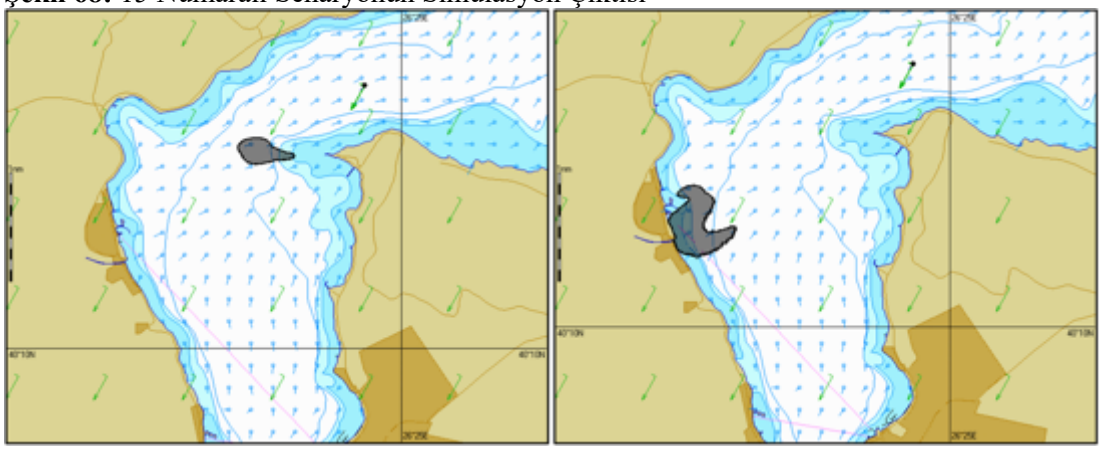
Şekil 67: 14 Numaralı Senaryonun Simülasyon Çıktısı



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 67'de 14 numaralı senaryonun seyri gösterilmektedir. Simülasyonda, 12.259 ton ham petrol nedeniyle oluşan kirliliğin 28 tonu 1,16 saat sonunda kum, kaya ve yapay malzemeden oluşan kıyı şeridine vurmuştur. Deniz yüzeyindeki petrol birikintisi 0,8 km^2 alana yayılmış ve 22,3 cm kalınlığa ulaşmıştır. Denize dökülen petrolün 110 tonu buharlaşmış, 43,1 tonu doğal dağılmaya maruz kalmış ve geriye kalan kısım 33.210 ton emülsiyon oluşturmuştur.

Şekil 68: 15 Numaralı Senaryonun Simülasyon Çıktısı



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 68'de 15 numaralı senaryonun seyri gösterilmektedir. Simülasyonda, 7.660 ton ham petrol nedeniyle oluşan kirliliğin 30,5 tonu 1,41 saat sonunda kum, kaya ve yapay malzemeden oluşan kıyı şeridine vurmuştur. Deniz yüzeyindeki petrol birikintisi 0,6 km^2 alana yayılmış ve 30 cm kalınlığa ulaşmıştır. Denize dökülen petrolün 33,6 tonu buharlaşmış, 4,4 tonu doğal dağılmaya maruz kalmış ve geriye kalan kısım 15.335 ton emülsiyon oluşturmuştur.

Simülasyon çıktılarından elde edilen, her bir senaryo için deniz yüzeyindeki petrolün karaya vurma süresi optimizasyon modelinin bir girdisi ve kısıdı olan kritik müdahale süresini belirlemiştir. Ayrıca denize dökülen petrolün ilk yarım saat sonunda hareketinden ve yayılmasından elde edilen konum bilgileri optimizasyon probleminin çözümü için gerekli olan talep noktalarını ve müdahale tesisinin potansiyel aday noktalarını ortaya koymuştur. Optimizasyon modeli bu veriler ışığında oluşturulmuş ve çözülmüştür.

3.6.3. Optimizasyon Modelinin Kurulmasına İlişkin Veriler

Bu çalışmada çözümü aranan optimizasyon problemi, Çanakkale Boğazı deniz sahasında meydana gelebilecek tanker kaynaklı petrol kirliliğine en kısa sürede müdahale edebilecek tesis için optimum sayının ve konumun belirlenmesidir. Bu bölgede önceki zamanlarda gerçekleşmiş ve problemin çözümü için yeterli olacak sayıda petrol kirliliği ile neticelenmiş kaza olmadığından, optimizasyon modelinin oluşturulması ve çözümü için yukarıda anlatılan veri toplama ve analiz süreci uygulanmıştır.

Veri toplama ve analiz süreci sonunda petrol kirliliğinin karaya vurma süresi yani optimizasyon modelindeki ifadesiyle kritik müdahale süresi, kirliliğin meydana geldiği talep noktalarının ve müdahale tesisi için potansiyel aday noktalarının koordinatları, talep noktalarıyla potansiyel aday noktalar arasındaki mesafelerin matrisi, her bir potansiyel tesisin her bir talep noktasına hizmet verebilme durumunu gösteren matris ve her bir potansiyel aday tesisin her bir talep noktasına atama uygunluk değerini gösteren matris elde edilmiştir. Elde edilen matrisler aşağıda verilmiştir.

Tablo 23: Kirlilik Talep ve Aday Müdahale Tesisi Noktalarının Koordinatları

	Talep (Kirlilik) Koordinatları			Aday (Tesis) Koordinatları	
	Enlem	Boylam	Mesafe	Enlem	Boylam
Tanker 1 (T1-A1)	39°56'48,9'' K	26°01'47,58'' D	2,6 km	39°56'15,3'' K	26°03'26,64'' D
Tanker 2 (T2-A2)	40°04'51,18'' K	26°18'25,2'' D	1 km	40°05'8,4'' K	26°17'49,38'' D
Tanker 3 (T3-A3)	40°14'27,84'' K	26°32'13,74'' D	0,4 km	40°14'27,78'' K	26°32'30,54'' D
Tanker 4 (T4-A4)	40°05'45,6'' K	26°20'22,08'' D	1,5 km	40°06'20,76'' K	26°19'38,1'' D
Tanker 5 (T5-A5)	40°09'54,06'' K	26°22'58,56'' D	0,81 km	40°09'46,38'' K	26°22'26'' D
Tanker 6 (T6-A6)	40°39'22,2'' K	27°22'5,46'' D	7,2 km	40°42'13,02'' K	27°18'33,6'' D
Tanker 7 (T7-A7)	39°54'32,94'' K	25°59'37,44'' D	6,2 km	39°56'11,28'' K	26°03'27'' D
Tanker 8 (T8-A8)	40°03'7,2'' K	26°15'51,9'' D	2 km	40°03'53,28'' K	26°14'50,52'' D
Tanker 9 (T9-A9)	40°02'49,44'' K	26°15'10,02'' D	1,9 km	40°03'47'' K	26°14'39,6'' D
Tanker 10 (T10-A10)	40°32'19,2'' K	27°19'0,18'' D	7,5 km	40°28'32,16'' K	27°17'7,68'' D
Tanker 11 (T11-A11)	40°18'7,2'' K	26°34'53,22'' D	1,4 km	40°18'27,66'' K	26°34'1,44'' D
Tanker 12 (T12-A12)	40°11'51,6'' K	26°24'9,6'' D	0,16 km	40°11'46,56'' K	26°24'9,6'' D
Tanker 13 (T13-A13)	40°23'37,2'' K	26°40'3,78'' D	1,2 km	40°24'12,78'' K	26°40'27,96'' D
Tanker 14 (T14-A14)	40°11'44,52'' K	26°23'2,28'' D	1,2 km	40°12'14,1'' K	26°22'29,34'' D
Tanker 15 (T15-A15)	40°11'51,06'' K	26°23'13,44'' D	1,2 km	40°11'46,8'' K	26°24'5,88'' D

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tabloda koordinatları görülen talep ve aday tesis noktalarının Google Earth kullanılarak oluşturulmuş harita üzerindeki mevkileri şekil 67'de aşağıdaki gibi gösterilmektedir.

Şekil 69: Kirlilik Talep ve Aday Müdahale Tesisi Noktaları



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 23 ve şekil 69'da gösterilen talep noktaları 15 tanker kazasının gerçekleştiği noktalardan başlayan petrol kirliliklerinin ilk yarım saat sonunda petrol birikintisinin ulaştığı alanın merkezi olarak tespit edilmiştir. Tespit edilen bu noktalara

Öklid mesafesi olarak en yakın kara noktaları ise her bir talep noktası için potansiyel aday tesis noktası olarak belirlenmiştir.

Tablo 24: Talep ve Aday Tesis Noktaları Arasındaki Mesafelerin Matrisi (km)

Mesafe	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15
A1	2,6	26,2	60,8	30,2	39,1	140,8	6,2	21,4	20,1	133,7	63	42,7	75	43,8	43,2
A2	27,5	1	31,1	4	13,2	115,1	32,5	4,7	6	107	36,7	18,1	50,5	16,8	16,9
A3	58,3	30,6	0,4	27,6	18,1	86,3	64,3	35,4	36,5	78	8	12,7	20,7	14,3	14
A4	33,6	3,4	27	1,5	9,4	113,7	39,8	8	9,1	103,8	34,3	13,5	47,2	13,3	13,4
A5	40,8	12,6	17,8	9,7	0,81	102,7	48,2	17,8	18,9	94,4	24,7	4,6	37,1	3,7	4
A6	144,5	116,6	87,7	113,4	103,7	7,2	149,5	121,4	122,6	18,3	80	99	68	100,5	100,2
A7	2,6	28,1	58,1	31,3	40,7	142,1	6,2	23,2	22,1	133,7	64,5	44,7	76,3	44,1	44,3
A8	22,8	5,4	35,2	8,7	18,3	122,3	28,1	2	2	112,3	42,3	22,2	54,8	21,6	21,9
A9	22,7	5,7	36,1	8,9	18,6	110,7	27,5	2,1	1,9	102,4	42,7	22,5	55,4	22	22,2
A10	129,6	101,9	73,9	98,7	89,7	21,3	134,9	106,7	107,9	7,5	66,2	85,3	53,7	86,7	86,4
A11	65,1	36,4	7,8	33,2	23,7	80,5	70	41,4	42,6	71	1,4	18,5	13,3	19,9	19,6
A12	45,5	16,2	12,4	13	4	98,6	50,7	21	22,2	88,7	19,1	0,16	31,7	1,6	1,1
A13	79,2	49,9	21,5	46,8	37,5	66,4	84,3	54,7	55,9	57	13,8	32,9	1,2	34,3	34
A14	46,4	16,9	14,4	13,7	4,4	102	51,2	21,6	22,8	91,5	21,2	2,5	33,7	1,2	1,3
A15	44,3	15,9	12,8	12,3	4,1	100,5	49,4	20,6	21,7	89,8	19,5	0,18	32,1	1,5	1,2

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 24'teki her bir mesafe her bir aday tesis noktasından her bir talep noktasına olan mesafelerin ölçülmesi ile elde edilmiştir. Bu mesafelerin elde edilmesi ve örnek müdahale tesisi olarak kabul edilen "ERV Nene Hatun" petrol kirliliği müdahale gemisinin azami sürati 18 knot (33,3 km/s) bilindiğinden, müdahale gemisinin her bir aday tesis noktasından her bir talep noktasına ulaşma süreleri matrisine ulaşılmıştır.

Tablo 25: Aday Tesis Noktasında Talep Noktasına Varma Süresi Matrisi (saat)

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15
A1	0,08	0,79	1,82	0,91	1,17	4,22	0,19	0,64	0,60	4,01	1,89	1,28	2,25	1,31	1,30
A2	0,82	0,03	0,93	0,12	0,40	3,45	0,97	0,14	0,18	3,21	1,10	0,54	1,51	0,50	0,51
A3	1,75	0,92	0,01	0,83	0,54	2,59	1,93	1,06	1,09	2,34	0,24	0,38	0,62	0,43	0,42
A4	1,01	0,10	0,81	0,04	0,28	3,41	1,19	0,24	0,27	3,11	1,03	0,40	1,42	0,40	0,40
A5	1,22	0,38	0,53	0,29	0,02	3,08	1,45	0,53	0,57	2,83	0,74	0,14	1,11	0,11	0,12
A6	4,33	3,50	2,63	3,40	3,11	0,22	4,48	3,64	3,68	0,55	2,40	2,97	2,04	3,01	3,01
A7	0,08	0,84	1,74	0,94	1,22	4,26	0,19	0,70	0,66	4,01	1,93	1,34	2,29	1,32	1,33
A8	0,68	0,16	1,06	0,26	0,55	3,67	0,84	0,06	0,06	3,37	1,27	0,67	1,64	0,65	0,66
A9	0,68	0,17	1,08	0,27	0,56	3,32	0,82	0,06	0,06	3,07	1,28	0,67	1,66	0,66	0,67
A10	3,89	3,06	2,22	2,96	2,69	0,64	4,05	3,20	3,24	0,22	1,99	2,56	1,61	2,60	2,59
A11	1,95	1,09	0,23	1,00	0,71	2,41	2,10	1,24	1,28	2,13	0,04	0,55	0,40	0,60	0,59
A12	1,36	0,49	0,37	0,39	0,12	2,96	1,52	0,63	0,67	2,66	0,57	0,004	0,95	0,05	0,03
A13	2,38	1,50	0,64	1,40	1,12	1,99	2,53	1,64	1,68	1,71	0,41	0,99	0,04	1,03	1,02
A14	1,39	0,51	0,43	0,41	0,13	3,06	1,54	0,65	0,68	2,74	0,64	0,07	1,01	0,04	0,04
A15	1,33	0,48	0,38	0,37	0,12	3,01	1,48	0,62	0,65	2,69	0,58	0,01	0,96	0,04	0,04
K.M.S.	-	6,96	0,96	10,73	6,03	25,43	-	6,65	4,26	3,95	3,75	0,3	3,21	1,16	1,41

K.M.S: Kritik Müdahale Süresi

Kaynak: Yazar tarafında oluşturulmuştur.

Tablo 25'te görüldüğü üzere her bir aday tesisten yola çıkan müdahale gemisi hesaplanan sürelerde talep noktalarına ulaşmaktadır. Kritik müdahale süresi her bir kirlilik olayının karaya vurma süresi olarak PISCES II simülasyon çıktılarından elde edilmişti. Aday tesisin kritik müdahale süresi içerisinde talep noktasına hizmet verebilme durumu tablo 25'ten hareketle tablo 26'daki gibi olmuştur.

Tablo 26: Aday Tesisin Talep Noktasına Hizmet Edebilme Durumu Matrisi

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15
A1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1
A2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
A3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
A4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
A5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
A6	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0
A7	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1
A8	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
A9	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
A10	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0
A11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
A12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
A13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
A14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
A15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Hizmet edebilir: **1**; Hizmet edemez: **0**

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 26'da her bir aday noktasının her bir talep noktasına hizmet edip edememe durumu 0 ve 1 değerlerini alan ikili değişken ile gösterilmektedir. Kritik müdahale süresi içerisinde talep noktasına varamayan aday tesis, o talep noktasına hizmet edememekte ve 0 değerini almakta, kritik müdahale süresi içerisinde varabilen aday tesis ise o talep noktasına hizmet edebilmekte ve 1 değerini almaktadır. Hizmet edebilme durumlarının hangi derecede veya etkililik düzeyinde olduğu ise atama uygunluk değeri şeklinde tablo 27'de gösterilmektedir.

Tablo 27: Aday Tesisin Talep Noktasını Kapsama Uygunluk Değeri Matrisi

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15
A1	10	9	7	9	8	2	10	9	9	2	7	8	6	8	8
A2	9	10	9	10	10	4	9	10	10	4	8	9	7	10	9
A3	7	9	10	9	9	5	7	8	8	6	10	10	9	10	10
A4	8	10	9	10	10	4	8	10	10	4	8	10	8	10	10
A5	8	10	9	10	10	4	8	9	9	5	9	10	8	10	10
A6	2	4	5	4	4	10	2	3	3	9	6	5	6	4	4
A7	10	9	7	9	8	2	10	9	9	2	7	8	6	8	8
A8	9	10	8	10	9	3	9	10	10	4	8	9	7	9	9
A9	9	10	8	10	9	4	9	10	10	4	8	9	7	9	9
A10	3	4	6	5	5	9	2	4	4	10	7	5	7	5	5
A11	7	8	10	9	9	6	6	8	8	6	10	9	10	9	9
A12	8	10	10	10	10	5	7	9	9	5	9	10	9	10	10
A13	6	8	9	8	8	7	5	7	7	7	10	9	10	8	8
A14	8	9	10	10	10	4	7	9	9	5	9	10	8	10	10
A15	8	10	10	10	10	4	8	9	9	5	9	10	9	10	10

0-0,5 s.: **10**; 0,51-1 s.: **9**; 1,01-1,5 s.: **8**; 1,51-2 s.: **7**; 2,01-2,5 s.: **6**; 2,51-3 s.: **5**; 3,01-3,5 s.: **4**; 3,51-4 s.: **3**; 4,01-4,5 s.: **2**; 4,51-5 s.: **1**

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 27'de görüldüğü üzere kapsama ya da atanma uygunluk değeri bir aday tesisin bir talep noktasına hangi derecede hizmet verebildiğini gösteren bir katsayıdır. Bu katsayı yarım saatlik aralıklara göre puanlanan 10'lu bir ölçeğe göre belirlenmektedir. 10 en etkili veya yüksek derecede hizmet verebilme durumunu temsil ederken 1 ise bunun tam tersini yani en zayıf durumu ifade etmektedir.

Denizde petrol kirliliği vakalarında, petrol birikintisi, deniz yüzeyinde kapladığı alanı genişletmeden ya da en önemlisi, karaya vurmadan mümkün olan en kısa sürede uygun ekipman kullanılarak kuşatılıp deniz yüzeyinden kaldırılmalıdır. Bunun en önemli sebebi, petrol tarafından kirletilen kıyıların temizlenmesi için gereken maliyetin ve emeğin petrolün henüz deniz yüzeyindeyken kaldırılması için gereken maliyet ve emekten çok daha fazla olmasıdır. Mümkün olan en kısa sürede petrol kirliliğini kontrol altına almak çevresel faydayı maksimize ederken, maliyet ve emekten de tasarruf edilmesini sağlayacaktır.

Çalışmaya konu olan problem ele alınırken bazı varsayımlarda bulunulmuştur. Buna göre, problemin çözümü için geliştirilen optimizasyon modelinde veya matematiksel modelde maliyet kalemi (sabit maliyetler, kurulum maliyeti, işletim maliyeti, ekipman kullanım ve sarfiyat maliyetleri, çevresel hasarın yarattığı maliyet) hesaba katılmamıştır. Bunun sebebi ise toplam çevresel faydayı maksimize etmektir. Dolayısıyla kurulacak tesis sayısı ve belirlenecek konumun en kısa sürede petrol kirliliğinin denizden uzaklaştırılması amacıyla bulunması hedeflenmiştir. Talep noktaları sadece tek aday tesisin sorumluluğuna bırakılmamış, ilgili talep noktasının kapsayabilen bütün aday tesislerinin ortak sorumluluğunda olduğu kabul edilmiştir. Nihayetinde asgari sayıda tesis ile talep noktalarının tamamının kapsanması amaçlanmıştır.

3.7. BULGULAR

3.7.1. Optimizasyon Modeli

Problemin çözümü için geliştirilen matematiksel model tam sayılı doğrusal programlama şeklinde kurulmuştur. Modele ait kümeler, parametreler, karar değişkenleri, amaç ve kısıt fonksiyonları aşağıdaki gibidir**.**

Kümeler/Parametreler:

I: Olası aday tesis yerlerinin seti, "i" ile indeksli

J: Olası talep (kirlilik) bölgelerinin seti, "j" ile indeksli

N: Kurulabilecek maksimum tesis adedi

C_{ij}: i aday tesis noktası ile j talep noktası arasındaki kapsama uygunluk değeri

$D_{ij}: \begin{cases} 1, eğer\ i\ aday\ tesisi\ j\ talebine\ hizmet\ edebilecek\ mesafede\ ise \\ 0, aksi\ halde \end{cases}$

Karar Değişkenleri:

$x_i = \begin{cases} 1, eğer\ i\ aday\ noktasına\ tesis\ ataması\ yapıldı\ ise; \\ 0, aksi\ halde \end{cases}$

$y_{ij} = \begin{cases} 1, eğer\ i\ aday\ noktasındaki\ tesis\ j\ talep\ noktasına\ hizmet\ ediyor\ ise; \\ 0, aksi\ halde \end{cases}$

Model 1: Minimum Tesis Sayısının Bulunması (Küme Kaplama Modeli)

$$\boldsymbol{Min} \sum_{\boldsymbol{i \in I}} \boldsymbol{x_i} \qquad (\mathbf{1.1})$$

Kısıtlar:

$$\sum_{\boldsymbol{i \in I}} \boldsymbol{D_{ij} x_i} \geq \mathbf{1}\ ,\ \ \forall \boldsymbol{j} \in \boldsymbol{J},\ \ \forall\ \boldsymbol{i} \in \boldsymbol{I} \qquad (\mathbf{1.2})$$

$$\boldsymbol{x_i} \in (\mathbf{0}, \mathbf{1})\ ,\ \ \forall \boldsymbol{i} \in \boldsymbol{I} \qquad (\mathbf{1.3})$$

Burada amaç fonksiyonu (1.1), minimum sayıda aday (tesis) noktasının belirlenmesini yani asgari tesisin kurulmasını hedeflemektedir. Kısıt fonksiyonu (1.2.), talep noktalarının aday noktaları tarafından en az 1 defa kaplanmasını, kısıt fonksiyonu (1.3) ise aday noktalarının 0 veya 1 değerini almasını sağlamaktadır.

Model 2: Çözümü Sağlayan Aday Noktalarının İçinden En Uygun Tesisin Seçilmesi (Maksimum kaplama modeli)

$$max \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} y_{ij} C_{ij} \qquad (2.1)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{i \in I} x_i \leq N \qquad (2.2)$$

$$y_{ij} \leq x_i D_{ij}\,, \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J \qquad (2.3)$$

$$\sum_{\text{İ} \in I} y_{ij} \geq 1\,, \quad \forall i \in I \qquad (2.4)$$

$$x_i\,, y_{ij} \in (0,1)\,, \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J \qquad (2.5)$$

Burada amaç fonksiyonu (2.1), kaplama uygunluk değeri göz önünde tutularak optimum kaplamayı hedefleyen amaç fonksiyonudur. Kısıt fonksiyonu (2.2), aday noktalarına atanacak tesislerin bir önceki modelde belirlenen sayıdan büyük olmamasını sağlayan kısıttır. Kısıt fonksiyonu (2.3), "j" talep noktasının "i" aday noktasından hizmet alabilmesi için bu aday noktasına kaplama sağlayabilecek mesafede tesis kurulmasını sağlayan kısıttır. Kısıt fonksiyonu (2.4), "j" talep noktasının en az 1 defa "i" aday noktası tarafından kaplanmasını sağlayan kısıttır. Kısıt fonksiyonu (2.5), karar değişkenlerinin 0 veya 1 değerlerini almasını belirleyen kısıttır.

3.7.2. Optimizasyon Modelinin Çözümü

Yukarıda anlatıldığı gibi modellenen tesis yeri seçimini gerçekleştiren tam sayılı doğrusal programlama modeli "Genel Cebirsel Modelleme Sistemi (GAMS) 24.2.2" ve "CPLEX 12.6." optimizasyon paket programları kullanılarak dal-kesme algoritması ile çözülmüştür.

Model 1'in çözümü yani minimum tesis sayısı 1 adet olarak bulunmuştur. Buna göre Çanakkale Boğazı'nda kurulacak 1 adet tesis ile talep noktalarının hepsi kaplanabilecektir sonucuna ulaşılmaktadır. Model-2'nin çözümü yani talep noktalarını

en etkili şekilde ya da maksimum düzeyde kaplayan tesis ise "A12" numaralı tesis olarak tespit edilmiştir. Çözümü gösteren program çıktıları eklerde sunulmuştur.

Şekil 70: Optimizasyon Modelinin Çözümü



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

A12 numaralı tesis kirlilik talep noktalarının tamamına hizmet verebilmekte ve onları diğer aday müdahale tesis noktalarına nazaran optimum şekilde kaplamaktadır. A12 aday müdahale tesis noktasından hareket edecek bir petrol kirliliği müdahale gemisinin kendisine en uzak olan T6 noktasına (98,6 km.) ulaşma süresi 2,96 saat ve bu nokta için atanma uygunluk değeri 5 iken, karaya vurma süresi en kısa olan T6 noktasına mesafesi 0,16 km. ve atanma uygunluk değeri ise 10'dur. A12 noktası, diğer aday noktalar arasında atanma uygunluk değerleri bakımından toplamda en yüksek skora sahiptir. Ayrıca A12 noktası, çalışmanın bir yan çıktısı olarak elde edilen Çanakkale Boğazı tehlike haritasının ortaya koyduğu boğaz trafiği açısından en riskli bölge olan Nara Burnu dönüş noktası mevkiinde yer almaktadır. Bu açıdan bakıldığında, petrol kirliliğine acil durum müdahale tesisinin optimum olarak Çanakkale Boğazı'nın en riskli bölümünde yer alması gerektiğinin ortaya konulması, çalışmanın içsel tutarlılığı açısından bir gösterge olarak değerlendirilmektedir. Şekil 70, A12 noktasının konumsal olarak denk geldiği noktanın daha detaylı bir görünümünü sunmaktadır.

Şekil 71: Müdahale Tesisinin Optimum Konumu: Tesis A12



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

3.7.3. Duyarlılık Analizleri

Matematiksel modellerin duyarlılık analizi yapılırken, modelde yer alan parametrelerden birinin aldığı değerler değiştirilirken diğerlerinin aldığı değerler olduğu gibi tutularak optimum çözümde meydana gelen değişimlerin gözlenmesi amaçlanmaktadır.

Gerçekleştirilen duyarlılık analizlerinde A12 noktasının herhangi bir durumda talep noktalarından herhangi birine hizmet edememesi durumunda optimum çözümün ne şekilde değişeceği araştırılmıştır. Modeldeki D_{ij} parametresi üzerinde yapılan bir değişiklikle A12 noktasının herhangi bir kirlilik talep noktasını kapsayamaması durumu yaratıldığında optimum çözümün yine 1 adet tesis olduğu ve onun da A15 noktası olarak değiştiği tespit edilmiştir. Sırasıyla gerçekleştirilen diğer duyarlılık analizlerinde, A15 noktasının herhangi bir kirlilik talep noktasını kapsayamadığı durumda A5 noktasının optimum çözüm olduğu, A5 noktasının herhangi bir kirlilik talep noktasına hizmet verememesi durumunda ise A14 noktasının optimum çözüm olarak model tarafından sunulduğu görülmüştür. Belirlenen alternatif optimum tesis yerlerini gösteren haritalar şekil 72, şekil 73 ve şekil 74'te sunulmaktadır.

Şekil 72: Alternatif Optimum Tesis Yeri A15



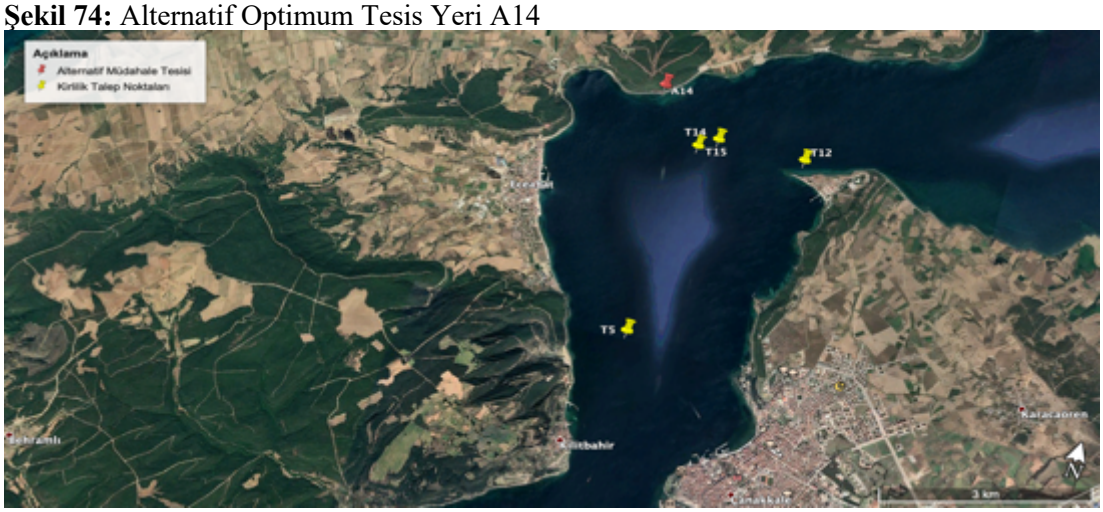
Kaynak: Yazar tarafından Oluşturulmuştur.

Şekil 73: Alternatif Optimum Tesis Yeri A5



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 74: Alternatif Optimum Tesis Yeri A14



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 75’te duyarlılık analizleri sonucu tespit edilen alternatif çözümlere ait noktaların konumları birlikte gösterilmektedir.

Şekil 75: Duyarlık Analizleri Sonucu Saptanan Alternatif Optimum Tesis Yerleri



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Duyarlılık analizleri sonucu elde edilen bulgulara bakıldığında, modelin mantıklı ve makul olarak çözümü, 2 veya daha çok aday nokta üzerinden değil 1 aday nokta üzerinden verdiği görülmektedir. Bu noktaların da, yine boğaz trafiği bakımından en tehlikeli bölüm olan Nara Burnu dönüş noktası mevkiinde yer aldıkları anlaşılmaktadır. Çözümü oluşturan alternatif noktaların, boğazın en çok kaza gerçekleşen en tehlikeli bölümünde yer almasının, denizde petrol kirliliğine müdahale açısından avantaj sağlayacağı düşünülmektedir.

3.8. TARTIŞMA

Ülkelerin büyük çevresel felaketler olarak nitelendirdiği denizde petrol kirliliği vakaları, denizlerdeki yaşamı tehlikeye atmakta ve ciddi maddi zararlara neden olmaktadır. Denizde petrol kirliliğinin yaratabileceği olumsuz etkileri en aza indirmek adına geçmişte yapılan çalışmalar, kirliliğe müdahalenin stratejik ve taktik karar alma safhalarıyla ilgili yapılmış ve bu kapsamda denizde petrol kirliliğine müdahale tesis ve ekipmanlarının konumlandırılacağı en uygun yerler tespit edilmiştir. Çalışmalarda, araştırmanın kapsamındaki coğrafi alanın büyüklüğü, kullanılan optimizasyon modeli, optimizasyon amacına ulaşmak için belirlenen amaç fonksiyonu, karar değişkenleri, kısıtlar ve parametreleri oluşturmak için kullanılan veriler önem arz etmektedir.

Yapılan çalışmalara bakıldığında coğrafi alan olarak Belardo ve diğerleri (1984) Long Island deniz sahasını, Psaraftis ve diğerleri (1986) New England deniz sahasını, Iakovou ve diğerleri (1996) Florida Yarımadası deniz sahasını, Wilhelm ve Srinivasa (1996) Galveston Körfezini, Zhong ve You (2011) Meksika Körfezini, Verma ve diğerleri (2013) NewFoundland deniz sahasını, Li ve diğerleri (2018) Bohai Denizini, Lazuga ve diğerleri (2018) Baltık Denizini, Grubesic ve diğerleri (2019) Alabama, Mississippi ve Florida kıyılarını örnek almışlardır. İncelendiğinde bu deniz alanlarının genellikle geniş açık deniz alanları oldukları görülmektedir. Bu çalışmada konu edilen Çanakkale Boğazı deniz alanı ise geçmişte yapılan çalışmalardan farklı olarak coğrafi açıdan dar, keskin dönüşleri zorunlu kılan, deniz suyu akıntısının kuvvetli olduğu ve deniz trafiğinin çok yoğun olduğu bir bölgedir. Dolayısıyla yaşanabilecek bir denizde petrol kirliliği vakası geniş deniz sahalarına nazaran Çanakkale Boğazı kıyılarının maruz kaldığı riski büyütmektedir.

Petrol kirliliğine müdahale tesislerinin optimum konumlandırılması probleminin çözümü için geliştirilen optimizasyon modellerinin tam sayılı doğrusal programlama (Belardo ve diğerleri, 1984; Iakovou ve diğerleri, 1996; Wilhelm ve Srinivasa, 1996; Wilhelm ve Srinivasa, 1997, 1998; Gkonis ve diğerleri, 2007) ve karma tam sayılı doğrusal programlama (Psaraftis ve diğerleri, 1986; Zhong ve You, 2011; You ve Leyffer, 2011; Verma ve diğerleri, 2013; Li ve diğerleri, 2014; Garrett ve diğerleri, 2017; Grubesic ve diğerleri, 2017, 2019; Lazuga ve diğerleri, 2018; Serhadi ve diğerleri, 2020) kullanılarak geliştirildiği tespit edilmiştir. Çalışmada, karar

değişkeni olan petrol kirliliğine acil müdahale tesisi kesikli aralıkta değerler alan bir değişken olduğundan ve gerek amaç gerekse kısıt fonksiyonlarında sürekli aralıkta değerler alan bir değişken bulunmadığından, tam sayılı doğrusal programlama yaklaşımı benimsenmiştir.

Geçmişte yapılan çalışmalar incelendiğinde, petrol kirliliğine acil müdahale tesisinin konumunun optimizasyonu için geliştirilen modellerde amaç fonksiyonunun iki biçimde oluşturulduğu görülmektedir. Birinci grupta, tesis kurulum sabit maliyetinin, ekipman satın alma maliyetinin, ekipman işletme maliyetinin, ekipmanın kirliliğe müdahale alanına ulaştırılması maliyetinin ve kirliliğin çevreye vereceği zararın maliyetinin toplamını minimize eden yaklaşım sergilenirken (Psaraftis ve diğerleri, 1986; Iakovou ve diğerleri, 1996; Gkonis ve diğerleri, 2007; You ve Leyffer, 2011; Verma ve diğerleri, 2013; Grubesic ve diğerleri, 2017 ve Serhadi ve diğerleri, 2020), ikinci grupta kirliliğe toplam müdahale zamanını ve çevresel etkiyi minimize etmek amaçlanmaktadır (Belardo ve diğerleri, 1984; Srinivasa ve Wilhelm, 1997; Wilhelm ve Srinivasa, 1997; Li ve diğerleri 2014, Xu ve diğerleri, 2016, Garrett ve diğerleri, 2017 ve Grubesic ve diğerleri, 2019). Çevresel hasarı minimize edecek en kısa sürede kirliliğe müdahaleyi amaçlayan çalışmalarda maliyet bir kısıt olarak dahil edilmemektedir. Bu çalışmada geliştirilen optimizasyon modeli ile de çevresel hasarı minimize edecek biçimde, denizde petrol kirliliğine müdahaleyi en kısa sürede mümkün kılacak tesisin konumlandırılması amaçlanmaktadır. Bu nedenle maliyet bir kısıt olarak değerlendirilmemiştir.

Tesis yeri seçim problemlerinde kurulacak tesisin yerini belirlemede, ihtiyacın konumu, yoğunluğu ve sıklığı, karar değişkenlerinin ve kısıt fonksiyonlarının alacağı değerlerin kümelerini oluşturmada kullanılmakta ve nihayetinde çözümü belirlemektedir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, optimizasyon modeli oluşturulurken tarihsel verilerden yararlanıldığı tespit edilmiştir. Buna göre araştırmanın yapıldığı coğrafi alanda önceden gerçekleşmiş denizde petrol kirliliği vakaları incelenerek petrol kirliliği vakalarının yıllık bazda yaşanma sıklığı, konumları, kirliliğin miktarı ve kirliliğe sebep olan petrolün türü belirlenmektedir. Buradan hareketle olasılığa dayalı hesaplamalar ile kirlilik konumu, miktarı ve türüne ait profiller belirlenip senaryolar hazırlanarak bu senaryolar dahilinde optimizasyon modelleri çözülmektedir. Bu çalışmanın gerçekleştirildiği coğrafi alanda,

optimizasyon modelinin çözümü için yeterli sayıda petrol kirliliği vakası yaşanmadığından, yukarıda belirtilenden farklı bir yol izlenmiştir. Bu kapsamda bölgede gerçekleşen tanker kazaları esas alınarak, döküntü simülasyonunda çalıştırılmak üzere tanker kazaları için hipotetik senaryolar geliştirilmiştir. Bu senaryolar geliştirilirken petrol kirliliğinin miktarının belirlenmesinde kullanılan makine öğrenmesi tekniği bu alanda yapılmış önceki çalışmalarda görülmeyen yeni bir yaklaşımdır. Döküntü simülasyonundan elde edilen senaryolara ait çıktılar ile optimizasyon modeli çözülmüştür.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda, petrol kirliliğine acil müdahale tesisinin konumu belirlenirken ilgili coğrafi alanla ilgili deniz trafiğinin, petrol ticaretinin ve yaratacağı hareketliliğin talep tahmini yapılarak yaratacağı risklerin belirlenmesi ve bunun optimizasyon modelinin çözümünde parametre olarak kullanılması, stratejik ve uzun vadeli bir karar olan petrol kirliliği acil müdahale tesisinin konumlandırılmasını olumlu yönde etkileyecektir.

Bu çalışmada çevresel fayda maksimize edilmek istenmiştir ve bu çerçevede denizde petrol kirliliğine müdahalede maliyetler dahil edilmemiştir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda maliyet kaleminin dahil edilmesiyle oluşturulacak optimizasyon modeli ile çevresel faydayı maksimize edecek optimizasyon modeli aynı coğrafi alan için geliştirilip çözülerek fayda-maliyet analizleri gerçekleştirilmek yoluyla tesis yerinin belirlenmesi mümkün olabilir. Bunun yanında çalışmanın gerçekleştirileceği bölgeye ilişkin altyapı ile ilgili, coğrafi ve çevresel kısıtlar da hesaba katılarak daha özel amaca yönelik uygulamalar gerçekleştirilebilir. Örneğin tesisin kurulacağı aday noktaların, tesisin kurulmasına alt yapısal imkanlar bakımından maddi kolaylık sağlayacak yakın noktalara kaydırılması, coğrafi olarak deniz suyunun, tesisin yerleştirileceği kıyıdaki derinliğinin uygunluğu veya çevresel hassasiyet indeksi bakımından bölgedeki diğer kısımlara nazaran hassas olan yerlerin önem katsayılarının yüksek olarak ağırlıklandırılıp hesaplamalara katılması gibi yaklaşımlar göz önünde tutulabilir.

Ayrıca petrol kirliliğine müdahale tesisinin optimum kapasitesinin belirlenmesine ve birden çok tesisin kurulmasına karar verilen coğrafi alanlar için bu kapasitenin tesisler arasında optimum şekilde bölüştürülmesine yönelik uygulamalar gelecekte yapılacak çalışmaların kapsamında değerlendirilebilir.

SONUÇ

Bu tez çalışmasında, denizde petrol kirliliğine müdahale için oluşturulan acil durum eylem planlarının stratejik ve taktik planlama basamaklarında yer alan müdahale tesisinin optimum konumunun belirlenmesi problemi ele alınmıştır. Denizde petrol kirliliği vakalarının yarattığı ekonomik ve ekolojik hasarların önüne geçilmesi veya en aza indirilmesi bakımından bu tür olaylara etkin, etkili ve verimli bir biçimde müdahale bir hayli önem arz etmektedir. Bunun sağlanabilmesi için müdahale tesislerinin en uygun yerlere yerleştirilmesi, bu tesislerde uygun ve yeterli sayıda ekipman barındırılması ve müdahale sahasındaki operasyon sırasında ekipmanın uzman kişiler tarafından doğru kullanılması gerekmektedir.

Gemi kaynaklı denizde petrol kirliliği vakalarının nerede, ne zaman, ne büyüklükte ve ne türde meydana geleceği bilinemediğinden tesis ve ekipman konumlandırma kararları çözülmesi zor bir problem halini almaktadır. Bu tür problemleri çözebilmek için müdahale tesisinin konumlandırılması düşünülen coğrafi alanın büyüklüğü ve fiziksel yapısı, ekolojik özellikleri ve çevresel hassasiyeti, deniz sahasının oşinografik ve meteorolojik özellikleri, deniz trafik yoğunluğu ve gemilerin izlediği rotalar, maliyet açısından çevrede bulunan alt yapı imkanları gibi bileşenler dikkate alınmalıdır. Ayrıca denize dökülen ve kirliliğe neden olan petrolün türüne ve miktarına bağlı olarak deniz yüzeyinde ve kolonunda maruz kalacağı bozunma ve hareket süreçleri, müdahale yöntemini ve ekipman kapasitesini dolayısıyla da müdahale operasyonunun yaratacağı iş gücü ve maliyet gereksinimlerini etkileyeceğinden, dikkate alınması gereken bir başka husus olarak ortaya çıkmaktadır.

Problemi ve çözümü etkileyen bütün bu bileşenlerin çerçevesinde, acil durum eylem planı hazırlayan otoriteler ve karar vericiler optimum sayıda tesisin optimum kapasite ile yaşanabilecek herhangi bir kirlilik durumunda çevresel ve maddi hasarı en aza indirecek biçimde konumlandırılmasını istemektedirler. Yapılan çalışmalar incelendiğinde bu problemin iki şekilde çözüme ulaştırıldığı görülmektedir. Bunlardan birisi minimum maliyet yaklaşımıyken diğeri minimum müdahale süresini tespit etmeyi amaçlayan maksimum çevresel fayda yaklaşımıdır. Bu konuda araştırma yapan bilim insanları minimum maliyet yaklaşımında müdahale tesisinin kurulma, ekipman satın alma, işletme ve operasyon maliyetlerini petrol kirliliğinin yaratacağı çevresel ve

ticari hasarın maliyeti ile mukayese ederek bir çözüme ulaşmayı amaçlamaktadır. Ancak bir petrol kirliliğinin ekolojik denge üzerinde uzun vadede yaratacağı olumsuz etkilerin maliyetinin hayli yüksek ve büyüklüğünün hesaplanmasının çok güç olacağı düşünülmektedir. Ayrıca bu çalışmanın yapıldığı Çanakkale Boğazı deniz sahasının dünya deniz ticareti açısından çok önemli ve dar bir su yolu olması nedeniyle herhangi bir sebeple deniz trafiğine kapanmasının yaratacağı maddi hasarın boyutu yine çok yüksek olacaktır. Bu nedenlerle bu çalışmada çevresel faydayı maksimum kılacak şekilde bütün talep noktalarına minimum müdahale süresinde yanıt verebilecek optimum sayıda ve konumda tesisin yerleştirilmesi amacıyla hareket edilmiştir.

Çevresel faydayı maksimum kılacak şekilde Çanakkale Boğazı'na denizde petrol kirliliği müdahale tesisi konumlandırmak için tam sayılı doğrusal programlama yaklaşımıyla bir optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Bu model iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda küme kaplama modeli yaklaşımıyla Çanakkale Boğazı'nda kurulması gerekli optimum sayıdaki müdahale tesisinin sayısı bulunmuştur. Bu sayı, bilgisayar destekli hesaplamalar neticesinde 1 adet müdahale tesisi olarak bulunmuştur. Birinci kısımla bağlantılı olacak şekilde ikinci kısımda ise, müdahale tesisinin her bir petrol kirliliği talep noktasını toplamda minimum müdahale süresi içerisinde yani maksimum seviyede kaplamasını sağlayacak olan maksimum kaplama modeli yaklaşımıyla bu tesisin 40°11'46,56'' Kuzey enlemi ile 26°24'9,6'' Doğu boylamının kesişimindeki "A12" noktasında konumlandırılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Çanakkale Boğazı'nda tarihte vuku bulmuş gemi kaynaklı denizde petrol kirliliği vakası yeterli sayıda olmadığından (2 adet), optimizasyon modelindeki karar değişkenlerinin alacağı değerleri ve parametreleri belirlemek için denizde petrol kirliliği döküntü simülasyonu uygulanmıştır. Senaryo tabanlı çalışan döküntü simülasyonu için Çanakkale Boğazı deniz sahasında hipotetik petrol sızıntısı senaryoları geliştirilmiştir. Senaryoları oluşturmak için gerekli olan konum, petrol sızıntısı miktarı, petrol sızıntısı türü, oşinografik ve meteorolojik veriler toplanmıştır.

Hipotetik senaryoları oluşturmak için ilk olarak Çanakkale Boğazı'nda gerçekleşmiş gemi kazalarına ait verilere ulaşılmıştır. Çanakkale Boğazı'nda 2007-2018 yılları arasında gerçekleşen 162 adet gemi kazası elde edilmiş ve bu kazalar betimsel ve konumsal analizlere tabi tutulmuşlardır. Analizler sonucunda belirtilen

veri seti kapsamında Çanakkale Boğazı'nda en çok yaşanan kaza türünün karaya oturma (73 kaza) olduğu, en çok kazaya karışan gemilerin kuru yük gemileri olduğu (101 kaza) ve bu gemi türünde en çok gerçekleşen kaza türünün oturma (50 kaza) kazaları olduğu anlaşılmıştır. Feribot (16 kaza) ve tanker (15 kaza) ile kuru yük gemilerini takip etmiştir. Kazalara neden olan faktörlere bakıldığında ise makine arızası (39 kaza), hatalı seyir (36 kaza) ve dümen arızasının (6 kaza) ilk üç sırada yer aldığı tespit edilmiştir. Çanakkale Boğazı gibi fiziki coğrafya olarak dar ve deniz suyu akıntısı yüksek olan bir deniz sahasında bu gibi faktörlerin, sürüklenmeye bağlı olarak oturma ve çatışma kazalarını da beraberinde getirdiği beklenen ve veri setinin de doğruladığı bir çıktı olmuştur. Nitekim Çanakkale Boğazı gemi trafik sektörleri bazında kazaların dağılımlarına bakıldığında en çok yaşanan kazaların Gelibolu sektöründe oturma (17 kaza), çatışma (13 kaza) ve çatma (13 kaza), Nara sektöründe oturma (24 kaza), sürüklenme (20 kaza) ve Kumkale sektöründe oturma (32 kaza) ve çatışma (8 kaza) oldukları görülmüştür.

Betimsel analizleri yukarıdaki gibi olan bu kazaların koordinatları MapInfo coğrafi bilgi sistemi programına girilerek konumsal dağılımları gerçekleştirilmiştir. Konumsal dağılım yapıldıktan sonra, Çanakkale Boğazı deniz alanının 2x2 km. boyutlarındaki karelere bölünmesiyle bu karelere düşen kaza sayıları hesaplanmış ve böylece Çanakkale Boğazı Gemi Kazaları Tehlike Haritası çıkarılarak boğazın gemi trafiği açısından tehlikeli bölgeleri ortaya konulmuştur. Çok yüksek tehlike (4-6 kaza), yüksek tehlike (2-3 kaza), orta tehlike (1 kaza) ve düşük tehlike (0 kaza) ölçeğinde değerlendirilen 2x2 km.'lik alanlardan 7 tanesi çok yüksek tehlikeli, 16 tanesi yüksek tehlikeli, 105 tanesi orta tehlikeli ve 356 tanesi düşük tehlikeli olarak tespit edilmiştir. Çok yüksek tehlikeli alanlardan 5 tanesinin bulunduğu Nara Burnu dönüş noktasının Çanakkale Boğazı genelinde gemi trafiği açısından en tehlikeli bölge olduğu görülmüştür.

Çanakkale Boğazı'nda gerçekleşen kazalar yukarıda belirtildiği şekilde değerlendirilmiş ve bu kazaların içinden çalışmanın bir kısıtı olarak tanker kazaları döküntü simülasyonu senaryolarında kullanılmak üzere seçilmiştir. Tanker kazalarının gerçekleştiği koordinatlar, döküntü simülasyonu senaryolarının konum bilgilerini oluşturmuştur.

Döküntü simülasyonu senaryolarının oluşturulmasında ihtiyaç duyulan bir diğer bilgi döküntü miktarıdır. Bu çalışmada, Çanakkale Boğazı'nda geçmişte yaşanmış gemi kazalarından kaynaklı petrol sızıntısı verisi olmadığı için makine öğrenmesi yöntemi uygulanarak petrol sızıntı miktarları tahmin edilmiştir. Bunun için dünya genelinde 1957-2018 yılları arasında gerçekleşmiş 351 tanker kaynaklı denizde petrol kirliliği kazası kullanılmış ve döküntü senaryosu oluşturulmak istenen 15 tanker kazasına ait DWT, GRT, yaş ve kaza türü şeklindeki değişkenlerle tahmini petrol sızıntı miktarı belirlenmiştir.

Bu veri seti incelendiğinde petrol kirliliğine neden olan kazaların en çok gerçekleştiği tanker türünün "Coastal Tanker"(164 kaza), en az gerçekleştiği tanker türünün ise ULCC (4 kaza) tankerler olduğu tespit edilmiştir. Tankerlerde petrol kirliliğine en çok sebep olan 3 kaza türünün sırasıyla batma (92 kaza), karaya oturma (83 kaza) ve çatışma (62 kaza) olduğu anlaşılmıştır. "Coastal tankerlerde" petrol kirliliğiyle sonuçlanan kazaların en çok batma (66 kaza) kaza türünde meydana geldiği görülmüştür. Onu karaya oturma (34 kaza) ve çatışma (26 kaza) izlemiştir. Çatma (4 kaza) ise "coastal tankerlerde" en az kirliliğe neden olan kaza türü olmuştur. Tankerlerin yaş grubu dikkate alındığında ise petrol kirliliği meydana getiren tankerlerin en çoğunun 11-15 yaş grubunda (95 kaza) ve bu yaş grubundaki en sık görülen kaza türünün karaya oturma (24 kaza), en seyrek kaza türünün ise kargo operasyon hatası (2 kaza) olduğu belirlenmiştir. Ayrıca tek cidarlı tekne gövdesine sahip tankerlerin 244 tanesinde (%81,3) 700 tondan büyük petrol sızıntısı, 56 tanesinde (%18,7) ise 7 ile 700 ton arasında petrol sızıntısı yaşandığı görülmüştür. Bu oran çift cidarlı tekne gövdesine sahip tankerlere bakıldığında ise 24 tanesinde (%47,1) 7 ile 700 ton arasında, 27 tanesinde (%52,9) ise 700 tondan büyük petrol sızıntısı şeklinde gerçekleşmiştir. Dolayısıyla çift cidarlı tankerlerin, petrol sızıntı miktarlarının üzerinde anlamlı bir farklılık yarattığı anlaşılmıştır.

Yukarıdaki gibi istatistiksel analize tabi tutulan veri setine denetimli makine öğrenmesi tekniklerinden rassal orman (random forest) algoritması uygulanarak Çanakkale Boğazı'nda kaza yapan 15 tankerin tahmini petrol sızıntı miktarları Tanker1- 2.571 ton, Tanker2- 7.430 ton, Tanker3- 3.601 ton, Tanker4- 1.102 ton, Tanker5- 893 ton, Tanker6- 537 ton, Tanker7- 2.316 ton, Tanker8- 1.075 ton, Tanker9-

9.760 ton, Tanker10- 1.299 ton, Tanker11- 3.516 ton, Tanker12- 929 ton, Tanker13- 2.328 ton, Tanker14- 12.259 ton ve Tanker15- 7.660 ton olarak belirlenmiştir.

Oluşturulan senaryolarda potansiyel yakıt türü belirlenirken, "olası en kötü durum" anlayışı çerçevesinde bölgeden geçiş yapan tankerlerden belirli tonajın altındakilerin yakıt (bu çalışma özelinde 17.000 DWT altındakiler) ve yine belirli tonajın üzerindekilerin ham petrol (bu çalışma özelinde 38.000 DWT üstündekiler) tankerleri oldukları varsayılmıştır. Bu varsayımdan hareketle petrol sızıntı türlerinin hem petrol, ağır fuel oil (HFO), orta fuel oil 180 ve orta fuel oil 300 (IFO 180, IFO 300) oldukları kabul edilmiştir. Ham petrol türleri EPDK'nın petrol piyasası sektör raporlarında Türkiye'nin en çok petrol ithal ettiği ülkeler baz alınarak belirlenmiştir. Belirlenen petrol sızıntı türleri tankerlere ilgili varsayımlar çerçevesinde rastgele atanmıştır.

Yukarıda belirtildiği şekilde oluşturulan senaryoların döküntü simülasyonunda oynatılması sonucu deniz yüzeyine sızan petrolün hareket ve bozunma süreçlerine ait bilgilere ulaşılmıştır. Buna göre 13 senaryoda denize dökülen petrol kıyıya vurmuş 2 senaryoda (Tanker1 ve Tanker7) ise kıyıya temas gerçekleşmemiştir. Kıyıya vurma sürelerine bakıldığında denize dökülen petrolün kısa süreler içerisinde kıyıya vurma ihtimalinin olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca denize dökülen petrolün yine kısa süreler içerisinde emülsiye olarak yüksek hacimlere ulaştığı gözlemlenmiştir. Kısa sürede müdahale edilemeyen petrol sızıntısının deniz yüzeyinde yayıldığı alanı ve etkilediği kıyı şeridi uzunluğunu hızla genişlettiği görülmüştür. Fiziksel olarak dar bir yapıya ve şiddetli deniz akıntılarına sahip Çanakkale Boğazı'nın gemi kaynaklı petrol sızıntısı sonucu maruz kalacağı riskin yüksek olacağı anlaşılmıştır.

Denizde petrol kirliliğine müdahalede en önemli husus, denize dökülen petrole mümkün olan en kısa sürede müdahaleyi gerçekleştirmek ve onu, denizde yayıldığı alanı daha fazla genişletmeden ve kıyıya temasına olanak vermeden deniz yüzeyinden uzaklaştırmaktır. Simülasyon çıktılarından elde edilen kıyıya vurma süreleri problemin çözümü için geliştirilen optimizasyon modelinde kritik müdahale süreleri olarak belirlenmiştir. Buna göre optimum şekilde konumlandırılacak olan müdahale tesisinin bu kritik süre içerisinde talep noktasına ulaşabilmesi o tesisin o talep noktasına atanabilmesi için birinci şart iken, ulaşma süresinin minimum düzeyde tutulması o tesisin o talep noktası için ne kadar iyi olduğunun derecesini vermiş ve

optimizasyon modelin atama uygunluk değeri olarak 1-10 aralığında ölçeklenmiştir. Yine simülasyon çıktılarından elde edilen petrol kirliliği talep noktaları petrolün denize sızmasından yarım saat sonraki anda yayıldığı deniz alanının merkez koordinatları olarak belirlenirken, bu merkeze karada en yakın öklit mesafesindeki noktalar ise aday tesis noktaları olarak belirlenmiştir. Her bir talep noktasının aday tesis tarafından en az bir kere kaplanması gerektiği kısıt olarak düşünülmüş ve minimum sayıda tesisle (küme kaplama) bütün talep noktalarının kaplanması (maksimum kaplama) amaç olarak belirlenmiştir. Optimizasyon modeli bu noktalar arasında hizmet edebilme durumu ve atama uygunluk değeri kısıtları çerçevesinde sonuç vermiştir.

Bu tez çalışmasında, Çanakkale Boğazı'nın tankerlerden kaynaklı petrol kirliliği riskine yönelik olarak denizde petrol kirliliğine müdahale tesisinin sayısı ve konumu, tam sayılı doğrusal programlama temelinde küme kaplama ve maksimum kaplama yaklaşımlarıyla oluşturulan iki aşamalı optimizasyon modeli çerçevesinde çözülmüş ve belirlenmiştir. Oluşturulan modelin, dünyanın farklı bölgelerinde, minimum müdahale süresi ve maksimum çevresel fayda amacıyla kurulacak petrol kirliliği müdahale tesisleri için sayı ve konum belirlemede kullanılabileceği düşünülmektedir. Dolayısıyla, Çanakkale Boğazı özelinde tavsiye edilen petrol kirliliğine müdahale tesisinin konumu ve sayısının, petrol kirliliğine acil müdahale kapsamında Türkiye Cumhuriyeti'ndeki ilgili otoritelere, ortaya konulan modelin ise dünya genelinde bu konuda acil durum eylem planı hazırlayan karar alıcılara fayda sağlayacağı öngörülmektedir.

KAYNAKÇA

Abdullahzade, C. (2009). Gemilerden Kaynaklanan Petrol Kirliliği: Türk Hukukundaki Son Gelişmelerin Değerlendirilmesi. *Ankara Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi*. 58(4): 693-710.

Adams, S.M. (2005). Assessing Cause and Effect of Multiple Stressors on Marine Systems. *Marine Pollution Bulletin.* 51(8-12): 649-657.

Adebajo, M.O., Frost, R.L., Kloprogge, J.T., Carmody, O., Kokot, S. (2003). Porous Materials for Oil Spill Cleanup: A Review of Synthesis and Absorbing Properties. *Journal of Porous Materials.* 10: 159-170.

Afenyo, M., Veitch, B., Khan, F. (2015). A State-of-the-Art Review of Fate and Transport of Oil Spills in Open and Ice-Covered Water. *Ocean Engineering.* 119: 233-248.

Al-Majed, A.A., Adebayo, A.R., Hossain, M.E. (2012). A Sustainable Approach to Controlling Oil Spills. *Journal of Environmental Management.* 113: 213-227.

Al-Qahtani, K. Y., Elkamel, A. (2010). Planing and Integration of Rafinery and Petrochemical Operations. WILEY-VCH.

Allen T.T. (2011). Introduction to Discrete Event Simulation and Agent-Based Modeling. UK: Springer.

Alpar, B., Usluer, H.B., Aydın, Ş. (2018). Geographic and Batyhmetric Restrictions Along the Turkish Straits Sea Area. *Oil Spill Along the Turkish straits Sea Area; Accidents, Environmental Pollution, Socio-Economic Impacts and Protection.* (pp. 61-78). Editors Selam Ünlü, Bedri Alpar, Bayram Öztürk. Turkish Marine Research Foundation (TUDAV), Publication No: 47: İstanbul.

Alpaydın, E. (2004). Introduction to Machine Learning. USA: MIT Press.

American Society for Testing and Materials - ASTM (2009). ASTM D 97 - Standard Test Method of Pour Point of Petroleum Oils. West Conshohocken: ASTM.

American Society for Testing and Materials - ASTM (2009). ASTM D 971 - Standard Test Method for Interfacial Tension of Oil Against Water by the Ring Method. West Conshohocken: ASTM.

Ancheyta, J. (2011). Modeling and Simulation of Catalytic Reactors for Petroleum Refining. USA: WILEY.

Anthony, R.N. (1965). *Planning and Control Systems: A Framework for Analysis*. Boston: Harvard Business Review Press.

Arabani, A. B., Farahani, R.Z. (2012). Facility Location Dynamics: An Overview of Classifications and Applications. *Computers & Industrial Engineering*. 62(1): 408-420.

Aravamudan K., Raj, P., Ostlund, J., Newman, E., Tucker, W. (1982). Break Up of Oil on Rough Seas: Simplified Models and Step by Step Calculations. *Report No: CG-D-28-82*. US Coast Guard: Washington, DC.

ASCE Task Comittee (1996). State of the Art Rewiev of Modeling Transport and Fate of Oil Spills. *Journal of Hydraulic Engineering*. 122(11): 594-609.

Aşan, C., Özsoy, B., Şıhmantepe, A. Solmaz, M.S. (2020). A Case Study on Oil Pollution in İstanbul Strait: Revisiting 1994 Nassia Tanker Accident by Utilising Potential Incident Simulation Control and Evaluation System (PISCES-II) Simulation. What would be different in terms of response If Nassia Accident Happened Today? *Marine Pollution Bulletin*. 151: 1-10.

Athey, S., Tibshirani, J., Wager, S. (2019). Generalized Random Forests. *The Annal of Statistics*. 47(2): 1148-1178.

Atlas, R.M. (1995). Petroleum Biodegradation and Oil Spill Remediation. *Marine Pollution Bulletin.* 31(4-12): 178-182.

Atlas, R.M., Hazen, T.C. (2011). Oil Biodegradation and Bioremediation: A Tale of the Two Worst Spills in U.S. History. *Environmental Science & Technology*. 45: 6709-6715.

Audunson, T. (1979). Fate of Oil Spills on the Norwegian Continental Shelf. *Proceedings of the Oil Spill Conference* (pp. 675). American Petroleum Institute. Los Angeles. 1979.

Australian Maritime Safety Authority. (2015). Technical Guidelines for Preparing Contingency Plans for Marine and Coastal Facilities.

Awal, M.R. (2010). Environmentally Conscious Petroleum Engineering. Environmentally Conscious Fossil Energy (pp.2-86). Editors Myer Kutz and Ali Elkamel. USA: WILEY.

Azevedo, A., Oliveira, A., Fortunato, A.B., Zhang, J., Baptista, A.M. (2014). A Cross-Scale Numerical Modeling System for Management Support of Oil. *Marine Pollution Bulletin*. 80: 132-147.

Azizian, S., Khosravi, M. (2019). Advanced Oil Spill Decontamination Techiques. Advanced Low-Cost Separation Techniques in Interface Science (pp. 283-332). Editors George K. Zyzas and Athanasios C. Mitropoulos. United Kingdom: Academic Press.

Banks, J. (1998). Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Prectice. USA: John Wiley & Sons.

Barker, C. (1985). Origin, Composition and Properties of Petroleum. Enhanced Oil Recovery 1, Fundamentals Analyses (11-45). California: Elsevier Science.

Başar, E. (2003). *İstanbul Boğazı'nda Tanker Kazaları ile Oluşabilecek Petrol Dağılımının Simülasyonu.* (Yayınlanmamış Doktora Tezi). Trabzon: Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Başar, E. (2010). Investigation into Marine Traffic and a Risky Area in the Turkish Strait System: Çanakkale Strait. *Transport*. 25(1): 5-10.

Bayat, A., Aghamiri, S.F., Vakili-Nezhaad, G.R. (2005). Oil Spill Cleanup from Sea Water by Sorbent Materials. *Chemical Engineering & Technology.* 28(12): 1525-1528.

Belardo, S., Harrald, J., Wallace, W.A., Ward, J. (1984). A Partial Covering Approach to Sitting Response Resources for Major Maritime Oil Spills. *Management Science*. 30(10): 1184-1196.

Berridge, S.A., Dean, R.A., Fallows, R.G., Fish, A. (1968). The Properties of Persistent Oils at Sea. *Journal of the Institute of Petroleum*. 54: 300-309.

Beyer, J., Trannum, H.C., Bakke, T.B., Hodson, P.V., Collier, T.K. (2016). Environmental Effects of Deep Water Horizon Oil Spill: A Review. *Marine Pollution Bulletin*. 110(1): 28-51.

Bhardwaj, N., Bhaskarwar, A.N. (2018). A Review on Sorbent Devices for Oil-Spill Control. *Environmental Pollution.* 243: 1758-1771.

Bhunia, A.K., Sahoo, L., Shaikh, A.A. (2019). Advanced Optimization and Operations Research. Singapore: Springer.

Biau, G. (2012). Analysis of a Random Forest Model. *Journal of Machine Learning Research*. 13: 1063-1095.

Biau, G., Scornet, E. (2016). A Random Forest Guided Tour. *TEST*. 25: 197-227.

Birta, L.G., Arbez, G. (2019). Modelling and Simulation: Exploring Dynamic System Behaviour. Switzerland: Springer.

Blaikely, D. R., Dietzel, G. F. L., Glass, A. W., van Kleef, P.J. (1977). Sliktrak – A Computer Simulation of Offshore Oil Spills, Cleanup, Effects and Associated Costs. *Proceedings of the Oil Spill Conference* (pp.45-53*)*, American Petroleum Institute. Washington, DC. 1977.

Blokker, P.C. (1964). Spreading and Evaporation of Petroleum Products on Water. *Proceedings of 4th. International Harbour Conference* (pp.911-919). Antwerp, Belgium.

Bobra, M. (1992). A Study of Water-in-Oil Emulsification. Report EE-32. Environment Protection Center: Canada.

Boonmee, C., Arimura, M., Asada, T. (2017). Facility Location Optimization Model for Emergency Humanitarian Logistics. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 24: 485-498.

Boopathy, R. (2000). Factors Limiting Bioremediation Technologies. Bioresource Technology. 74: 63-67.

Botchkarev, A. (2019). Performance Metrics (Error Measures) in Machine Learning Regression, Forecasting and Prognostics: Properties and Typology. *Interdisciplinary Journal of Information, Knowledge, and Management*. 14: 45-79.

Boukir, A., Aries, E., Guiliano, M., Asia, L., Doumenq, P., Mille, G. (2001). Subfractionation, Characterization and Photooxidation of Crude Oil Resins. *Chemosphere*. 43: 279-286.

Bramer, M. (2016). Principles of Data Mining. UK: Springer.

Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning.* 45: 5-32.

Bridie, A.L., Wanders, T.H., Zegveld, W., Van Der Heijde, H.B. (1980). Formation, Prevention and Breaking of Sea Water in Crude Oil Emulsions "Chocolate Mousses". *Marine Pollution Bulletin*. 11(12): 343-348.

Buist, I. (2003). Window-of-Opportunity for In Situ Burning. *Spill Science & Pollution Bulletin.* 8(4): 341-346.

Butenko, S., Pardalos, P.M. (2014). Numerical Methods and Optimization: An Introduction. USA: CRC Press.

Can, S. (2007). *Tanker Kazaları Sonrası İstanbul Boğazı'ndaki Yakıt Kirliliği Simülasyonu.* (Yayınlanmamış Doktora Tezi). İstanbul. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Carmody, O., Frost, R., Xi, Y., Kokot, S. (2007). Adsorption of Hydrocarbons on Organo-Clays – Implications for Oil Spill Remediation. *Journal of Colloid and Interface Science.* 305(1): 17-24.

Caunhye, A.M., Nie, X., Pokharel, S. Optimization Models in Emergency Logistics: A Literature review. *Socio-Economic Planing Sciences*. 46(1): 4-13.

Chanton, J., Zhao, T., Rosenheim, B.E., Joye, S., Bosman, S., Brunner, C., Yeager, K.M., Diercks, A.R., Hollander, D. (2015). Using Natural Abundance Radiocarbon to

Trace the Flux of Petrocarbon to the Seafloor Following the Deepwater Horizon Oil Spill. *Environmental Science & Technology*. 49: 847-854.

Chapman, H., Purnell, K., Law, R.J., Kirby, M.F. (2007). The Use of Chemical Dispersants to Combat Oil Spills at Sea: A review of Practice and Research Needs in Europe. *Marine Pollution Bulletin*. 54: 827-838.

Chaudhuri, U. R. (2011). Fundamental of Petroleum and Petrochemical Engineering. Florida: CRC Press.

Chen, B., Ye, X., Zhang, B., Jing, L., Lee, K. (2019). Marine Oil Spills- Preparedness and Countermeasures. World Seas: Environmental Evaluation (pp. 407-426). Editor Charles Sheppard. United Kingdom: Academic Press.

Chen, D., Batson, R.G., Dang, Y. (2010). Applied Integer Programming: Modeling and Solution. USA: WILEY.

Chen, J., Zhang, W., Wan, Z., Li, S., Huang, T., Fei, Y. (2019). Oil Spill from Global Tankers: Status Review and Future Governance. *Journal of Cleaner Production.* 221: 20-32.

Choi, B.K., Kang, D. (2013). Modeling and Simulation of Discrete-Event Systems. USA: WILEY.

Church, R., ReVelle, C. (1974). The Maximal Covering Location Problem. *Papers of the Regional Science Association.* 32: 101-118.

Clerke, B., Fokoue, E., Zhang, H.H. (2009). Principles and Theory for Data Mining and Machine Learning. USA: Springer.

Cohen, Y., Mackay, D., Shiu, W.Y. (1980). Mass Transfer Rates Between Oil Slicks and Water. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 58: 569-575.

Coker, A. K. (2018). Petroleum Refining Design and Applications Handbook. USA: WILEY.

Congress of The United States Office of Technology Assessment (OTA). (1991). *Bioremediation of Marine Oil Spills- Background Paper, OTA-BP-O-70*. Washington DC: U.S. Government Printing Office.

Cook, J. (2011). *Oil in the Ocean: A Complex Mix.* https://www.whoi.edu/oil/main, (24.09.2020).

Cormack, D. (1999). *Response to Marine Oil Pollution – Review and Assessment*. United Kingdom: Springer-Science + Business Media, B.V.

Cumhurbaşkanlığı Kararı. (2019). Türk Boğazları Deniz Trafik Düzeni Yönetmeliği. *T.C. Resmi Gazete.* Sayı: 30859.

Current, J.R., Daskin, M., Schilling, D. (2002). Discrete Network Location Problems. *Location: Applications and Theory*. (pp.119-143). Editors Zvi Drezner and Horst W. Hamacher. USA: Springer.

Dailing, S., Brandvik, J., Mackay, D., Johansen, O. (1990). Characterization of Crude Oils for Environmental Purposes. *Oil & Chemical Pollution.* 7: 199-224.

Daling, P.S., Brandvik, P.J. (1988). A Study of the Formation and Stability of Water-in-Oil Emulsion. *Proceedings of 11th. Arctic Marine Oil Spill Program (AMOP) Technical Seminar* (pp.153-170). Environment Canada: Ottowa.

Daniel, P. (2010). Oil Spill Models. Environmental Hydraulics Volume II: Mathematical Models (371-380). United Kingdom: ISTE-WILEY.

Daskin, M.S. (2013). Network and Discrete Locations: Models, Algorithms, and Applications. USA: WILEY.

Dave, D., Ghaly, A.E. (2011). Remediation Technologies for Marine Oil Spills: A Critical Review and Comparative Analysis. *American Journal of Environmental Sciences.* 7(5): 423-440.

De Klark, A. (2011). Fischer-Tropsch Refining. Singapore: WILEY-VCH.

Delgado, L., Kumzerova, E., Martynov, M. (2006). Simulation of Oil Spill Behaviour and Response Operations in PISCES. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 88: 279-292.

Delvigne, G.A.L. (1989). Barrier Failure by Critical Accumulation of Viscous Oil. *Proceedings of International Oil Spill Conference* (pp. 143-148). American Petroleum Institute. USA. 1989.

Delvigne, G.A.L. ve Sweeney, C.E. (1988). Natural Dispersion of Oil. *Oil and Chemical Pollution*. 4(4): 281-310.

Deniz Hukuku Araştırma Merkezi (2020). *Türkiye'nin Taraf Olduğu IMO Sözleşmeleri.*https://denizhukuku.bilgi.edu.tr/media/document/2020/04/28/imo_sozlesmeleri_2020.pdf, (12.10.2020).

Dietterich, T.G. (2000). An Experimental Comparison of Three Methods for Constructing Ensembles of Decision Trees: Bagging, Boosting, and Randomization. *Machine Learning*. 40: 139-157.

Doerffer, J.W. (1992). Oil Spill Response in the Marine Environment. Great Britain: Pergamon Press.

Dunn, K., Chilingarian, G. V., Lian, H., Wang, Y.Y., Yen, T.F. (2000). Analysis of Asphalt and Its Components by Thin-Layer Chromatograpy. Asphaltenes and Asphalts, 2 (305-317). Amsterdam: Elsevier Science.

Elliott, A. J. (1986). Shear Diffusion and the Spread of Oil in the Surface Layers of the North Sea. *Deutsche Hydrografische Zeitschrift*. 39(3): 113-137.

Environmental Protection Agency (EPA). (1999). Understanding Oil Spill and Oil Spill Response.

Ertürk Bozkurtoğlu, Ş.N. (2007). Modeling Oil Spill Trajectory in Bosphorus for Contingency Planning. *Marine Pollution Bulletin*. 125(1-2): 57-72.

European Maritime Safety Agency (EMSA). (2004). Action Plan for Oil Pollution Preparedness and Response.

Exxon Mobil (2014). *Oil Spill Response Field Manuel*. USA: HBP.

Fahim, M. A., Alsahhaf, T. A., Etkilani, A. (2010). Fundamentals of Petroleum Refining. United Kingdom: Elsevier Science.

Farahani, R.Z., Asgari, N., Heidari, N., Hosseininia, M., Goh, M. (2012). Covering Problems in Facility Location: A Review. *Computers & Industrial Engineering*. 62(1): 368-407.

Farooq, U., Taban, I.C., Daling, P.S. (2018). Study of the Oil Interaction Towards Oil Spill Recovery Skimmer Material: Effect of the Oil Weathering and Emulsification Properties. *Marine Pollution Bulletin.* 135: 119-128.

Farrington, W.J. (2014). Oil Pollution in the Marine Environment II: Fates and Effects of Oil Spills. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*. 56(4): 16-31.

Favero, L.P., Belfiore, P. (2019). Data Science for Businnes and Decision Making. UK: Academic Press.

Fay, J.A. (1969). The Spread of Oil Slicks on a Calm Sea. Oil on the Sea (pp. 53-63). Editor Hoult D.P. Ocean Technology. Boston: Springer.

Fay, J.A. (1971). Physical Processes in the Spread of Oil on a Water Surface. *International Oil Spill Conference Proceedings* (pp. 463-467). USA.

Feng, Z., Mo, L., Li, M. (2015). A Random Forest-Based Ensemble Method for Activity Recognition. 3*7th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*.pp. 5074-5077. 25-29 August 2015. Milan, Italy.

Fernandez-Varela, R., Gomez-Carracedo, M.P., Fresco-Rivera, P., Andrade, J.M., Muniategui, S., Prada, D. (2006). Monitoring Photooxidation of the Prestige's Oil Spill by Attenuated Reflactance Infrared Spectroscopy.*Talanta*. 69(2): 409-417.

Fingas, M. (1996). The Evaporation of Oil Spills: Prediction of Equations Using Distillation Data. *Spill Science & Technology Bullletin*. 3(4): 191-192.

Fingas, M. (1997). Studies on the Evaporation of Crude Oil and Petroleum Products: I. The Relationship Between Evaporation Rate and Time. *Journal of Hazardous Materials*. 56: 227-236.

Fingas, M. (1997). The Evaporation of Oil Spills: Development and Implementation of New Prediction Methodology. Proceedings of International Oil Spill Conference (pp.281-287).

Fingas, M. (1998). Studies on the Evaporation of Crude Oil and Petroleum Products: II. Boundary Layer Regulation. *Journal of Hazardous Materials*. 57: 41-48.

Fingas, M. (2004). Modeling Evaporation Using Models That are not Boundary-Layered Regulated. *Journal of Hazardous Materials*. 107: 27-36.

Fingas, M. (2011). Oil Spill Science and Technology. USA: Gulf Professional Publishing.

Fingas, M. (2012). *The Basics of Oil Spill Cleanup*. USA: CRC Press.

Fingas, M. (2015). Handbook of Oil Spill Science and Technology. USA: WILEY.

Fingas, M. (2017). Introduction to Spill Modelling. *Oil Spill Science and Technology* (pp.419-451). USA: Gulf Professional Publishing.

Fingas, M., Fieldhouse, B. (2004). Formation of Water-in-Oil Emulsions and Application to Oil Spill Modelling. *Journal of Hazardous Materials*. 107(1-2): 37-50.

Fingas, M., Fieldhouse, B. (2009). Studies on Crude Oil and PEtroleum Product Emulsions: Water Resolution and Rheology. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 333(1-3): 67-81.

Fingas, M., Fieldhouse, B. (2011). Water-in-Oil Emulsions: Formation and Prediction. *Proceedings of the 34th Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar* (pp. 460-510). Canada.

Fingas, M., Fieldhouse, B. Mullin, J. (1999). Water-in-Oil Emulsions Results of Formation Studies and Applicability to Oil Spill Modelling. *Spill Science & Technology Bulletin*. 5(1): 81-91.

Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J., Brooks, N.H. (1979). Mixing in Inland and Coastal Waters. USA: Academic Press.

Forrester, W.D. (1971). Distribution of Suspended Oil Particles Following the Grounding of the Tanker Arrow. *Journal of Marine Research*. 29: 151-170.

Foyn, L. (1997). Marine Pollution. The Global Environment: Science, Technology and Management (pp.515-530). Germany: VCH.

Fuentes, S., Mendez, V., Aguila, P. (2014). Bioremediation of Petroleum Hydrocarbons: Catabolic Genes, Microbial Communities, and Applications. *Applied Microbiology and Technology.* 98: 4781-4794.

Galt, J.A., Overstreet, O. (2011). Development of Spreading Algorithms for the Response Options Calculator (ROC). *Genwest Technical Publications*.

Garrett, R.A., Sharkey, T.C., Grabowski, M., Wallace, W.A. (2017). Dynamic Resource Allocation to Support Oil Spill Response Planning for Energy Exploration in the Arctic. *European Journal of Operational Research*. 257(1): 272-286.

Garrett, R.M., Pickering, I.J., Haith, C.E., Prince, R.C. (1998). Photooxidation of Crude Oils. *Environmental Science & Technology*. 32: 3719-3723.

Gary, J. H., Handwerk, G. E., Kaiser, M. J. (2007). Petroleum RefiningTechnology and Economics. USA: CRC Press.

GESAMP, (2015). Pollution in the Open Oceans 2009-2013.

Gkonis, K.G., Kakalis, N.M.P., Ventikos, N.P., Ventikos, Y. Psaraftis, H.N. (2008). A Model-Based Approach for Tactical Decision Making in Oil Spill Response. *2nd International Symposium on Ship Operations, Management and Economics (SNAME)*. Greece.

Glug, M., Was, J. (2018). Modelling of Oil Spill Spreading Disaster Using Combination of Langrangian Discrete Particle Algorithm with Cellular Automata Approach. *Ocean Engineerig.* 156: 396-405.

Goeury, C., Hervouet, J.M., Baudin-Bizien, I., Thouvenel, F. (2014). A Lagrangian-Eularian Oil Spill Model for Continental Waters. *Journal of Hydraulic Research.* 52(1): 36-48.

Gordon, S.I., Guifoos, B. (2017). Introduction to Modeling Simulation with Matlab and Python. USA: Chapman & Hall/ CRC Press.

Gray, M.A. (2010). Introduction to the Simulation of Dynamics Using Simulink. USA: Chapman & Hall/ CRC Press.

Grote, M., van Bernem, C., Böhme, B., Callies, U. Calvez, I. (2018). The Potantial for Dispersant Use As a Maritime Oil Spill Response Measure in German Waters. *Marine Pollution Bulletin*. 129: 623-632.

Grubesic, T.H., Nelson, J.R., Wei, R. (2019). A Strategic Planning Approach for Protecting Environmentally Sensitive Coastlines from Oil Spills: Allocating Response Resources on a Limited Budget. *Marine Policy.* 108: 1-10.

Grubesic, T.H., Wei, R. Nelson, J. (2017). Optimizing Oil Spill Cleanup Efforts: A Tactical Approach and Evaluation Framework. *Marine Pollution Bulletin*. 125(1-2): 318-329.

Gucma, L., Juszkiewicz, W., Lazuga, K. (2012). The Method of Optimal Allocation of Oil Spill Response in the Region of Baltic Sea. *International Journal on Maritime Navigation and Safety of Sea Transportation*. 6(4): 489-493.

Guo, W., Jiang, M., Li, X., Ren, B. (2018). Using a Genetic Algorithm to Improve Oil Spill Prediction. *Marine Pollution Bulletin*. 135: 386-397.

Guo, W.J., Wang, Y.X. (2009). A Numerical Oil Spill Model Based on a Hybrid Method. *Marine Pollution Bulletin*. 58(5): 726-734.

Guodong, Q., Yupeng, Z., Xuhe, R., Jie, C. (2015). Research on Development and Effectiveness Evaluation Technelogy of New Environment-friendly Oil Spill Dispersant. *Aquatic Procedia.* 3: 245-253.

Gutierrez, D.D. (2015). Machine Learning and Data Science: An Introduction to Statistical Learning Methods with R. USA: Techincs Publications.

Hair, J.F., Black, W.C., Babin, B.J., Anderson, R.E., Tatham, R.L. (2014). Multivariate Data Analysis. USA: PEARSON.

Hakimi, S.L. (1964). Optimum Locations of Switching Centers and the Absolute Centers and Medians of a Graph. Operations Research. 12(3): 450-459.

Han, J., Kamber, M., Pei, J. (2012). Data Mining: Concepts and Techniques. USA: Morgan Kaufmann.

Harrison, W., Winnik, A.M., Kwong, P.T.Y., Mackay, D. (1975). Dissappearance of Aromatic and Aliphatic Components from Small Sea-Surface Slicks. *Environmental Science &Technology*. 9(3): 231-234.

Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J. (2009). The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. USA: Springer.

Heagh, T., Ellingsen, T. (1977). The Effect of Breaking Waves on Oil Spills: Emulsification of Crude Oil at Sea. Norway: SINTEF.

Hilderin, A., Keesen, A.M., van Rijswick, H.F.M.W. (2009). Tackling Pollution of Mediterranean Sea from Land-Based Sources by an Integrated Ecosystem Approach and the Use of the Combined International and European Legal Regimes. *Utrecth Law Review*. 5:80-100.

Hillier, F.S., Lieberman, G.J. (2001). Introduction to Operations Research. USA: McGraw-Hill.

Hinze, J. O. (1955). Fundamental of the Hydrodynamics Mechanism of Splitting in Dispersion Process. *AIChE Journal*. 1(3): 289-295.

Hollebone, B. P. (2015). Oil Physical Properties: Measurement and Correlation. Handbook of Oil Spill Science and Technology (pp.39-50). New Jersey: WILEY.

Hoult, D.P. (1972). Oil Spreading on the Sea. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 4(1):341-368.

Hryb, D., Cardozo, M., Ferro, S., Goldschmit, M. (2009). Particle Transport in Turbulent Flow Using Both Lagrangian and Eulerian Formulations. *International Communications in Heat and Mass Transfer.* 36(5): 451-457.

Hsu, C.S., Robinson, P.R. (2017). Introduction to Petroleum Technology. Springer Handbook of Petroleum Technology (pp.1-81). Germany: Springer.

Huang, J.C. (1983). A Review of the State-of-the-Art of Oil Spill Fate/ Behaviour Models. *Proceedings of the Oil Spill Conference* (pp. 313-322), American Petroleum Institute. San Antonio. 1983.

Huang, J.C., Monastero, F.C. (1982). Review of the State-of-the-Art of Oil Spill Simulation Models. Final Report Submitted to the American Petroleum Institute. Raytheon Ocean Systems Company.

Iakovou, E., Douligeris, C., Korde, A. (1994). A Synthesis of Decision Models for Analysis, Assessment and Contingency Planning for Oil Spill Incidents. *Omega.* 22(5): 457-470.

Iakovou, E., Ip, C.M., Douligeris, C., Korde, A. (1996). Optimal Location and Capacity of Emergency Cleanup Equipment for Oil Spill Response. *European Journal of Operational Research.* 96(1): 72-80.

IBM. (2020). *Supervised Learning*. https://www.ibm.com/cloud/learn/supervised-learning, (26/12/2020).

Ierapetritou, G., Nikisha, S. K., Li, Z. (2011). Petroleum Refining Operations: Key Issues, Advances and Oppurtunities. *Industrial & Engineering Chemistry Research.* 50(3): 1161-1170.

Ilgar, R. (2015). Çanakkale Boğazındaki Gemi Hareketliliği ve Kaza Risk Haritasının Belirlenmesi. *Türk Coğrafya Dergisi*. 65: 1-10.

International Maritime Organization (IMO), United Nation Environment Programme (UNEP). (1995). Guidelines on Oil Spill Dispersant Application Including Environment Considerations.

International Maritime Organization (IMO). (2020a). *Oil Pollution Background.* http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/OilPollution/Pages/Background.aspx, (10.10.2020).

International Maritime Organization (IMO). (2020b). *International Convention on Oil Pollution Preparedness, Response and Co-operation (OPRC).* http://www.imo.org/en/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-on-Oil-Pollution-Preparedness,-Response-and-Co-operation-(OPRC).aspx, (10.10.2020).

International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF). (2020). Oil Tanker Spill Statistics 2019.

Ivshina, I.B., Kuyukina, M.S., Krivoruvhko, A.V., Elkin, A.A. (2015). Oil Spill Problems and Sustainable Response Through New Technologies. *Environmental Science, Process and Impacts.* 17(7): 1201-1219.

Jacquot, F., Guiliano, P., Doumenq, P., Munoz, D., Mille, G. (1996). In Vitro Photooxidation of Crude Oil Maltenic Fractions: Evolutıon of Fossil Biomarkers and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. *Chemosphere.* 33(4): 671-681.

Jafarinejad, S. (2017). *Petroleum Waste Treatment and Pollution Control*. United Kingdom: Butterworth-Heinemann.

Janeiro, J., Fernandes, E., Martins, F., Fernandes, R. (2008). Wind and Freshwater Influence Over Hydrocarbon Dispersal on Patos Lagoon, Brasil. *Marine Pollution Bullletin*. 56: 650-665.

Jia, H., Ordonez, F., Dessouky, M. (2007). A Modeling Framework for Facility Location of Medical Services for Large-Scale Emergencies. *IEE Transactions*. 39(1): 41-55.

Jin, J., Wang, H., Jing, Y., Liu, M., Wang, D., Li, Y., Bao, M. (2019). An Efficient and Environmental-friendly Dispersant Based on the Synergy of Amphiphilic Surfactants for Oil Spill Remediation. *Chemosphere.* 215: 241-247.

Johansen, O., Brandvik, P. J., Farooq, U. (2013). Droplet Breakup in Subsea Release – Part 2: Prediction of Droplet Size Distributions with and without Injection of Chemical Dispersants. *Marine Pollution Bulletin*. 73(1): 327-335.

Johansen, O., Reed, M., Bodsberg, N. R. (2015). Natural Dispersion Revisited. *Marine Pollution Bulletin*. 93(1-2): 20-26.

Johansen, O. (1982). Dispersion of Oil from Drifting Slicks. *Spill Technology Newsletter*. November-December: 134-149.

Jones, D. S. J. (2006). An Introduction to Crude Oil and Its Processing. Handbook of Petroleum Processing (1-45). Holland: Springer.

Jones, R.K. (1972). A Simplified Pseudo-Companent of Evaporation Model. *Proceedings of the 20th. Arctic and Marine Oil Spill Program (AMOP) Technical Seminar* (pp. 43-61). Environment Canada.

Jorgensen, K.S., Kreutzer, A., Lehtonen, K.K. (2019). The EU Horizon 2020 Project GRACE: Intagrated Oil Spill Response Actions and Environmental Effects. *Environmental Science Europe.* 31(44): 1-10.

Juszkiewicz, W., Gucma, L., Perkovic, M. (2018). Determination of the Potential Pollution of the Port of Swinoujscie After Collision of Ships on the Approach Track. *Scientific Journals of Maritime University of Szczecin*. 53(125): 131-137.

Kelleher, J.D., Namee, B.M., D'arcy, A. (2020). Fundamentals of Machine Learning for Predictive Data Analytics: Algorithms, Worked Examples, and Case Studies. USA: MIT Press.

Kelton, W.D., Sadowski, R.P., Zupick, N.B. (2014). Simulation with Arena. USA: McGraw Hill.

Kinghorn, R. R. F. (1983). An Intoduction to the Physics and Chemistry of Petroleum. New York: WILEY.

Klose, A., Drexl, A. (2005). Facility Location Models for Distribution System Design. *European Journal of Operational Research*. 162(1): 4-29.

Knox, S.W. (2018). Machine Learning: A Concise Introduction. USA: WILEY.

Kolpack, R.L., Plutchak, N.B., Stearns, R.W. (1977). Fate of Oil in Water Environment- Phase II: A Dynamic Model of the Mass Balance for Released Oil. Washington, DC: American Petroleum Enstitute.

Kononenko, I., Kukar, M. (2007). Machine Learning and Data Mining: Introduction to Principles and Algorithms. UK: Horwood Publishing.

Korotenko, K.A., Mamedov, R.M., Mooers, C.N.K. (2000). Prediction of the Dispersal of Oil Transport in the Caspian Sea Resulting from a Continuous Release. *Spill Science & Technology Bulletin*. 6(5-6): 323-339.

Kotzakoulakis, K., George, S.C. (2018). Predicting the Weathering of Fuel and Oil Spills: A Diffusion-Limited Evaporation Model. Chemosphere. 190: 442-453.

Kujawinski, E.B., Kido Soule M.C., Valentine, D.L., Boysen, A.K., Longnecker, K., Redmond, M.C. (2011). Fate of Dispersants Associated with the Deepwater Horizon Oil Spill. *Environmental Science & Technology.* 45(4): 1298-1306.

Kutcherov, G.V. (2013). Abiogenic Deep Origin of Hydrocarbons and Oil and gas Deposits Formation. *Hydrocarbon* (pp. 1-28). IntechOpen.

Lantz, B. (2015). Machine Learning with R. UK: Packt Publishing.

Lazuga, K., Gucma, L., Perkovic, M. (2013). M/t "Baltic Carrier" Accident: The Reconstruction of Oil Spill with PISCES II Simulator Application. *Scientific Journals of Maritime University of Szczecin*. 36(108): 110-115.

Lazuga, K., Gucma, L., Perkovic, M. (2018). The Model of Optimal Allocation of Maritime Oil Spill Combat Ship. *Sustainability*. 10(7): 2321-2350.

Lee, R.F. (2003). Photo-oxidation and Photo-toxicity of Crude and Refined Oils. Spill *Science & Technology Bulletin*. 8(2): 157-162.

Lehr, W., Jones, R., Evans, M., Simecek-Beatty, D., Overstreet, R. (2002). Revisions of the ADIOS Oil Spill Model. *Environmental Modelling and Software*. 17: 191-199.

Lehr, W.J. (2001). Review of modeling procedures for oil: oil spill modeling and processes. In: Brebbia, C.A. (Ed.), Review of Modeling Procedures for Oil: Oil Spill Modeling and Processes. Southampton, UK.: WIT Press.

Lehr, W.J., Fraga, R.J., Belen, M.S., Cekirge, H.M. (1984). A New Technique to Estimate Initial Spill Size Using a Modified Fay-type Spreading Formula. *Marine Pollution Bulletin*. 15(9): 326-329.

Lessard, R.R., Demarco, G. (2000). The Significance of Oil Spill Dispersants. *Spill Science & Technology Bulletin*. 6(1):59-68.

Li, P., Cai, Q., Lin, W., Chen, B., Zhang, B. (2016). Offshore Oil Spill Response Practices and Emerging Challenges. *Marine Pollution Bulletin.* 110: 6-27.

Li, P., Chen, B., Zhang, B., Jing, L., Zheng, J. (2014). Monte Carlo Simulation-Based Dynamic Mixed-Integer Nonlinear Programming for Supporting Oil Recovery and Devices Allocation During Offshore Oil Spill Responses. *Ocean & Coastal Management*. 89: 58-70.

Li, X., Zhao, Z., Zhu, X., Wyatt, T. (2011). Covering Models and Optimization Techniques for Emergency Facility Location and Planning: A Review. Mathematical Research of Operations Research. 74: 281-310.

Li, Y., Liu, J., Wei, W., Wu, W. (2018). Site Selection and Resource Allocation of Oil Spill Emergency Base for Offshore Oil Facilities. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Volume: 113. Harbin, China.

Li, Z., Spaulding, M. L., French McCay, D., Crowley, D., Payne, J. R. (2017a). Development of a Unified Oil Droplet Size Distribution Model with Application to

Surface Breaking Waves and Subsea Blowout Releases Considering Dispersant Effects. *Marine Pollution Bulletin*. 114(1): 247-257.

Li, Z., Spaulding, M. L., French-McCay, D. (2017b). An Algorithm for Modeling Entrainment and Naturally and Chemically Dispersed Oil Droplet Size Distribution under Surface Breaking Wave Conditions. *Marine Pollution Bulletin*. 119(1): 145-152.

Liu, T., Sheng, P. (2014). Three Dimensional Simulation of Transport and Fate of Oil Spill under Wave Induced Circulation. *Marine Pollution Bulletin*. 80(1-2): 148-159.

Macaya, C.C., Duren, R.E., Hernandez, L., Rodriguez-Castro, L., Barra-Samhuezza, B., Dorochesi, F., Seeger, M. (2019). Bioremediation of Petroleum. *Reference Module in Life Sciences*.

Mackay, D., Buist, L., Mascarenhas, R., Peterson, S. (1980). Oil Spill Process and Models. Environmental Protection Sevice Enviroment Canada. *Arctic.* 28(1): 9-22.

Mackay, D., Matsugu, M.S. (1973). Evaporation of Liquid Hydrocarbon Spills on Land and Water. The Canadian journal of Chemical Engineering. 51(4): 434-479.

Mackay, D., Paterson, S., Trudel, K. (1980b). A Mathematical Model of Oil Spill Behavior. Report EE-7. Environmental Protection Center: Canada.

Mackay, D., Stiver, W., Tebeau, P.A. (1983). Testing of Crude Oils and Petroleum Products for Environmental Purposes. *Proceedings of the International Oil Spill Conference* (pp. 331-337). American Petroleum Enstitute. San Antonio. 1983.

Mackay, D., Zagorski, W. (1982). Water-in-Oil Emulsions. Report EE-34. E. Environmentn Protection Center: Canada.

Mapelli, F., Scoma, A., Michoud, G., Aulenta, F., Boon, N., Borin, S., Kalegorakis, N., Daffonchio, D. (2017). Biotechnologies for Marine Oil Spill Cleanup: Indissolubale Ties with Microorganisms. *Trends in Biotechnology.* 35(9): 860-870.

Maria, A. (1997). Introduction to Modeling and Simulation. *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference* (pp. 7-13).

Marianov, V., Serra, D. (2002). Location Problems in the Public Sectors. *Facility Location: Applications and Theory*. (pp.119-143). Editors Zvi Drezner and Horst W. Hamacher. USA: Springer.

Masutani, S. M., Adams, E. E. (2000). Experimental Study of Multiphase Plumes and Application to Deep Ocean Oil Spills. *Final Report to the US DOI Minerals Management Service Contract No: 1435-01-98-CT-30946.* University of Hawaii: Honolulu.

Masutani, S. M., Tang, L. (2003). Laminar to Turbulent Flow Liquid-Liquid Jet Instability and Breakup. *Proceeding of the Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference* (pp. 317-324). Hawaii, USA.

McLeroy, G. P., Riva, J. P., Atwater, G.I. (2018). Petroleum. Encyclopedia Britanicca.

Mohri, M., Rostamizadeh, A., Talwalkar, A. (2012). Foundation of Machine Learning. USA: MIT Press.

Mooney, M. (1951). The viscosity of a Concentrated Suspension of Spherical Particles. *Journal of Colloid Science*. 6(1): 162-170.

Muller, A.C., Guido, S. (2016). Introduction to Machine Learning with Python. USA: O'REILLY.

Mullin, J.V., Champ, M.A. (2003). Introduction/Overview to In Situ Burning of Oil Spills. *Spill Science & Pollution Bulletin*. 8(4): 323-330.

Müller, M., Pfahl, D. (2008). Simulation Methods. *Guide to Advanced Empirical Software Engineering* (pp. 117-152). Editors: Forrest Shull, Janice Singer ve Dag I.K. Sjoberg. UK: Springer.

National Research Council – (NRC), (2003). Oil in the Sea III: Inputs, Fates and Effects. USA: National Academies Press.

Neapolitan, R.E., Jiang, X. (2018). Artificial Intelligence: With an Introduction to Machine Learning. USA: CRC Press.

Neuman, H. J., Paczynska-Lahme, B., Severin, D. (1981). Composition and Properties of Petroleum. New York: Halsted Press.

Nicodem, D.E., Fernandez, M.C.Z., Guedes, C.L.B., Correa, R.J. (1997). Photochemical Processes and the Environmental Impact of Petroleum Spills. *Biogeochemistry*. 39: 121-138.

Nocedal, J., Wright, S.J. (2006). Numerical Optimization. USA: Springer.

Nordam, T., Nepstad, R., Litzler, R., Röhrs, J. (2019). On the Use of Random Walk Schemes in Oil Spill Modelling. *Marine Pollution Bulletin*. 146: 631-638.

Nordvik, A.B. (1995). The Technology Windows of Opportunity for Marine Oil Spill Response as Related to Oil Weathering and Operations. *Spill Science & Technology Bulletin.* 2(1): 17-46.

Ornitz, B.E., Champ, M.A. (2002). *Oil Spills First Principles: Prevention and Best Response.* Netherlands: Elsevier.

Owen, S.H., Daskin, M.S. (1998). Strategic Facility Location: A Review. *European Journal of Operational Research*. 111(3): 423-447.

Pal, A.K., Singh, J., Soni, R., Tripathi, P., Kamle, M., Tripathi, V., Kumar, P. (2020). The Role of Mcroorganism in Bioremediation for Sustainable Environment Management. *Bioremediation of Pollutant: From Genetic Engineering to Genome Engineering. (pp. 227-249).* Editors Vimal Chandra Pandey and Vijai Singh. Oxford: Elsevier.

Payne, J.R., Kirsten, B.E., Clayton, J.R., Clary, C., Redding, R. (1987). Integration of Suspended Particulate Matter and Oil Transportation Study. *Technical Report*. USA: Science Application International Corporation.

Payne, J.R., Kirsten, B.E., McNabb, G.D., Lambach, J.L., Redding, R., Jordon, R.E., Horn, W., Oliveira, C., Smith, G.S., Baxter, D.M., Geagel, R. (1984). Multivariate Analysisof Petroleum Weathering in the Marine Environment-Subarctic: Vol I and II. Evironmental Assessment of the Alaskan Continental Shelf, Final Report to Principal Investigators, US Department of Commerce, NOAA/OCSEAP Report 21 and 22.

Payne, J.R., McNabb, G.D. (1985). Weathering of Petroleum in the Marine Environment. *Marine Technology Society Journal*. 18(3): 24-42.

Payne, J.R., Phillips, C.R. (1985). Photochemistry of Petroleum in Water. *Environmental Science & Technology*. 19(7): 569-579.

Perkovic, M., Harsch, R., Suban, V., Vidmar, P. Nemec, D., Muellenhoff, O., Delgado, L. (2008a). The Use of Integrated Maritime Simulation for Education in Real Time. *16th Conference on Maritime Education and Training*. 14-17 October. İzmir. Turkey.

Perkovich, M., Delgado, L., David, M., Petelin, S., Harsh, R. (2008b). The Necessity of Applying SAR Imagery to Oil Spill Modeling of Data Obfuscation. *Oil Spill*

Response: A Global Perspective (pp. 237-256). Editors: W.F. Davidson, K. Lee, A. Cogswell. Springer Science & Business Media.

Piperopoulos, E., Calabrase, L., Mastronardo, E., Milone, C., Preverbio, E. (2020). Carbon-Based Sponges for Oil Spill Recovery. *Carbon Nanomaterials for Agri-Food and Environmental Applications. (pp. 155-175).* Editors Kamel A. Abd-Elsalam. Elsevier.

Prendergast, D.P., Gschwend, P.M. (2014). Assessing the Performance and Cost of Oil Spill Remediation Technologies. *Journal of Cleaner Production*. 78: 233-242.

Prince, R.C. (2015). Oil Spill Dispersants: Boon or Bane? *Environmental Science & Technology.* 49(11): 6376-6384.

Prince, R.C., Garrett, R.M., Bare, R.E., Grossman, M.J., Townsend, T., Suflita, J.M., Lee, K., Owens, E.H., Sergey, G.A., Braddocks, J.F., Lindstorm, J.E., Lessard, R.R. (2003). The Roles of Photooxidation and Biodegradation in Long-term Weathering of Crude and Heavy Fuel Oils. *Spill Science & Technology Bulletin*. 8(2): 145-156.

Prince, R.C., Walters, C.C. (2016). Biodegradation of Oil Hydrocarbons and Its Implications for Source Identification. Standard Handbook Oil Spill Environmental Forensics (pp. 869-916). Editors Scott A. Stout and Zhendi Wang. USA: Academic Press.

Psaraftis, H.N., Tharakan, G.G., Ceder, A. (1986). Optimal Response to Oil Spills: The Strategic Decision Case. *Operations Research*. 34(2): 203-217.

Psaraftis, H.N., Ziogas, B.O. (1985). A Tactical Decision Algorithm for the Optimal Dispatching of Oil Spill Cleanup Equipment. *Management Science.* 31(12): 1475-1491.

Qiao, F., Wang, G., Yin, L., Zeng, K., Zhang, Y., Zhang, M., Xiao, B., Jiang, S., Chen, H., Chen, G. (2019). Modeling of Trajectories and Potentially Contaminated Areas from the Sanchi Oil Spill. *Science of the Total Environment*. 685: 856-866.

Qu, S., Shen, W., Zuo, P. (2018). Asphaltenes: Separations, Structural Analysis and Applications. *Journal of Energy Chemistry*. 34(186-207).

Qui, X., Zhang, L., Suganthan, P.N., Amaratunga, A.J. (2017). Oblique Random Forest Ensemble via Least Square Estimation for Time Series Forecasting. *Information Sciences*. 420: 249-262.

Rabala, G., Ravi, A., Churiwala, S. (2019). An Introduction to Machine Learning. Switzerland: Springer.

Rafferty, J.P. (2020). *9 of the Biggest Oil Spill in History.* https://www.britannica.com/list/9-of-the-biggest-oil-spills-in-history, (04.10.2020).

Ramirez-Corredores, M. M. (2017). Asphaltenes. The Science and Technology of Unconventional Oils. (41-222). New York: Academic Press.

Rao, S.S. (2020). Engineering Optimization: Theory and Practice. USA: WILEY.

Rardin, R.L. (2015). Optimization in Operations Research. USA: Pearson.

Reed, M. (1989). The Physical Fate Companent of the Natural Resource Damage Assessment Model System. *Oil and Chemical Pollution.* 5(2-3): 99-123.

Reed, M., Johansen, O., Brandvik, P. J., Daling, P., Lewis, A., Fiacco, R., Mackay, D., Prentki, R. (1999). Oil Spill Modelling Towards to Close of the 20th Century: Overwiec of the State of the Art. *Spill Sciene & Technology Bulletin*. 5(1): 3-16.

Reed, M., Johansen, O., Leirvik, F., Brors, B. (2009). Numerical Algorithm to Compute the Effects of Breaking Waves on Surface Oil Spill at Sea. SINTEF: Norway.

ReVelle, C.S., Eiselt, H.A., Daskin, M.S. (2008). A Bibliography for Some Fundamental Problem Categories in Discrete Location Science. *European Journal of Operational Research*. 184(3): 817-848.

Riazi, M. R. (2005). Characterization and Properties of Petroleum Fractions. USA: American Society for Testing and Measurement (ASTM).

Robinson, P.R. (2006). Petroleum Processing Overview. Practical Advances in Petroleum Processing, Volume 1 (pp.1-76). USA: Springer.

Robinson, S. (2014). The Practice of Model Development and Use. USA: PALGRAVE MACMILLAN.

Robotham, P.W.J., Gill, R.A. (1989). Input, Behaviour and Fates of Petroleum Hydrocarbons. The Fate and Effects of Oil in Freshwater (pp.41-81). England: Elsevier.

Rogel, E., Carbognani, L. (2003). Density Estimation of Asphaltenes Using Molecular Dynamics Simulations. *Energy & Fuels*. 17(2): (378-386).

Rosetti, M.D. (2016). Simulation Modeling and Arena. USA: WILEY.

Sammut, C. (2011). Mean Absolute Error. *Encyclopedia of Machine Learning (Editor Webb, G.I.)*. Springer: Boston.

Sarhadi, H., Naoum-Sawaya, J., Verma, M. (2020). A Robust Optimization Approach to Locating and Stockpiling Marine Oil-Spill Response Facilities. *Transportation Research Part E*. 141: 1-19.

Schilling, D.A., Javaraman, V., Barkhi, R. (1993). A Review of Covering Problems in Facility Location. Location Science. 1(1): 25-55.

Schobert, H.H. (2013). Chemistry of Fossil Fuels and Biofuels. United Kingdom: Cambridge University Press.

Schonlau, M., Zou, R.Y. (2020). The Random Forest Algorithm for Statistical Learning. *Tha Stata Journal*. 20(1): 3-29.

Schulze, R. (1998). *Oil Spill Response Performance Review of Skimmers*. USA: ASTM.

Scornet, E. (2016). Random Forests and Kernel Methods. *IEEE Transaction on Information Theory*. 62(3): 1485-1500.

Sebastiao, P. ve Guedes Soares, C. (1995). Modeling the Fate of Oil Spills at Sea. Spill Science and Technology Bulletin. 2(2/3): 121-131.

Seo, J.S., Keum, Y.S., Li, Q.X. (2009). Bacterial Degradation of Aromatic Compounds. International Journal of Environmental Research and Public Health. 6: 278-309.

Shankar, R., Jung, J.H., Loh, A., An, J.G., Ha, S.Y., Yim, U.H. (2020). Environmental Significance of Lubricant Oil: A systematic Study of Photooxidation and İts Consequences. *Water Research*. 168: 1-11.

Shi, Y., Li, S., Zhang, H., Peng, S., Chen, H. Experimental Studies on Performance of Flexible Floating Oil Booms in Coupled Wave-Current Flow. *Applied Ocean Research.* 69: 38-52.

Sierksma, G., Zwols, Y. (2015). Linear and Integer Optimiation: Theory and Practice. USA: CRC Press.

Simeone, O. (2018). A Brief Introduction to Machine Learning for Engineers. UK: Now Publishers.

Singh, H., Bhardwaj, N., Arya, S.K., Khatri, M. (2020). Environmental Impacts of Oil Spill and Their Remediation by Magnetic Nanomaterials. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management.* 14: 1-23.

Singh, P., Singh, V.K., Singh, R., Borthakur, A. Madhav, S., Ahamad, A. (2020). Bioremediation: A Sustainable Approach for Management of Environmental Contaminants*. Abatement of Environmental Pollutants. (pp. 1-23).* Editors Pardeep Singh, Ajay Kumar, Anwesha Borthakur. Elsevier.

Socolofsky, S.A., Gros, J., North, E., Boufadel, M.C., Parkerton, T.F., Adams, E.E. (2019). The Treatment of Biodegradation in Models of Subsurface Oil Spills: A Review and Sensitivity Study. *Marine Pollution Bulletin*. 143: 204-219.

Song, B., Springer, J. (1996). Determination of İnterfacial Tension from the Profile of a Pendant Drop Using Computer-Aided Image Processing. *Journal of Colloid and Interface Science*. 184(1): 64-76.

Spaulding, M. L. (2017). State of Art Review and future Directions in Oil Spill Modelling. *Marine Pollution Bulletin*. 115(1-2): 7-19.

Spaulding, M.L. (1988). A State of the Art Rewiev of Oil Spill Trajectory and Fate Modeling. *Oil & Chemical Pollution*. 4: 39-55.

Spaulding, P.L., Odula, A., Kollluru, V.S. (1992). A Hybrid Model to Predict the Entrainment and Subsurface Transport of Oil. *Proceedings of 15th Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar* (pp. 67-92). Environment Canada.

Speight, J. G. (2014). The Chemistry and Technology of Petroleum. Florida: CRC Press.

Speight, J. G. (2015). Handbook of Petroleum Product Analysis. USA: WILEY.

Speight, J. G. (2016). Handbook of Petroleum Refining. USA: CRC Press.

Speight, J. G. (2017). Rules of Thumb for Petroleum Engineers. USA: Scrivener.

Speight, J. G., Özüm, B. (2001). Petroleum Refining Process. USA: CRC Press.

Srinivasa, A.V., Wilhelm, W.E. (1997). A Procedure for Optimizing Tactical Response in Oil Spill Clean up Operations. *European Journal of Operational Research.* 102(3): 554-574.

Stamp, M. (2018). Introduction to Machine Learning with Applications in Information Security. USA: CRC Press.

Stiver, W., Mackay, D. (1984). Evaporation Rate of Spills of Hydrocarbon and Petroleum Mixtures. *Environmental Science & Technology*. 18: 834-840.

Su, C., Ju, S., Liu, Y., Yu, Z. (2015). Improving Random Forest and Rotation Forest for Highly Imbalanced Datasets. *Intelligent Data Analysis*. 19(6): 1409-1432.

Sugiyama, M. (2016). Introduction to Statistical Machine Learning. USA: Morgan Kaufmann.

T.C. Dışişleri Bakanlığı (2020). *Türkiye'nin Taraf Olduğu Başlıca Çevre Anlaşmaları*. http://www.mfa.gov.tr/data/DISPOLITIKA/Anlasmalar.pdf, (12.10.2020).

The Global Oil and Gas Industry Association for Environmental and Social Issues (IPIECA), International Association of Oil & Gas Producers (IOGP). (2015). Dispersants: Surface Applications.

The Global Oil and Gas Industry Association for Environmental and Social Issues (IPIECA), International Association of Oil & Gas Producers (IOGP). (2016). Controlled In Situ Burning of Spilled Oil.

Thorpe, S.A. (2007). An Introduction to Ocean Turbulence. New York, USA: Cambridge University Press.

Thorpe, S.A., (2001). Langmuir Circulation and the Dispersion of the Oil Spills in Shallow Seas. *Spill Science and Technology Bulletin.* 6: 213-223.

Thrift-Viveros, D.L., Jones, R., Boufadel, M. (2015). Development of a New Oil Biodegradation Algorithm for NOAA^s Oil Spill Modeling Suite (GNOME/ADIOS). *Proceedings of 38th. AMOP Technical Seminar (pp. 143-152).* Environment Canada. Ottowa.

Timmeko. (2010). *Oil and Natural Gas Formation*. https://www.flickr.com/photos/timmeko/5147614068/in/photostream/, (16/01/2021).

Tissot, B.P., Welte, D. H. (1984). Petroleum Formation and Occurance. Germany: Springer- Verlag.

Tkalich, P., Chan, E. S. (2002). Vertical Mixing of Oil Droplets by Breaking Waves. *Marine Pollution Bulletin*. 44(11): 1219-1229.

Toregas, C., Swain, R, ReVelle, C., Bergman L. (1971). The Location of Emergency Service Facility. *Operations Research*. 19(6): 1363-1373.

Töz, A.C., Köseoğlu, B. (2018). Trajectory Prediction of Oil Spill with Pisces 2 Around Bay of İzmir, Turkey. *Marine Pollution Bulletin*. 126: 215-227.

United Nations (UN). (1982). United Nations Convention on the Law of the Sea.

United States Coast Guard (USCG). (2020). *Oil Pollution Act of 1990.* https://www.uscg.mil/Mariners/National-Pollution-Funds-Center/About_NPFC/opa/, (10.10.2020).

USDOI, Bureau of Ocean Energy Management (BOEM). (2019). Oil Spill Preparedness, Prevention and Response on the Alaska OCS. OCS Report BOEM 2019-006. Anchorage, AK: USDOI, BOEM. pp.41.

Varjani, S.J. (2017). Microbial Degradation of Petroleum Hydrocarbons. *Bioresource Technology*. 223: 277-286.

Ventikos, N.P., Vergetis, E., Psaraftis, H.N., Triantafyllou, G. (2004). A High-Level Synthesis of Oil Spill Response Equipment and Countermeasures. *Journal of Hazardous Materials.* 107(1-2): 51-58.

Verikas, A., Gelzinis, A., Bacauskiene, M. (2011). Mining Data with Random Forests: A Survey and Results of New Tests. *Pattern Recognition*. 44(2): 330-349.

Verma, M., Gendreau, M., Laporte, G. (2013). Optimal Location and Capability of Oil-Spill Response Facilities fort he South Coast of Newfoundland. *Omega*. 41(5): 856-867.

Violeau, D., Buvat, C., Abed-Meraim, K., de Nanteuil, E. (2007). Numerical Modelling of Boom and Oil Spill with SPH. *Coastal Engineering.* 54(12): 895-913.

Walters, C.C. (2017). Origin of Petroleum. *Handbook of Petroleum Technology* (pp. 360-375). Editors Chang Samuel Hsu and Paul R. Robinson. Germany: Springer.

Wang, H., Huang, C.P. (1979). The Effect of Turbulence on Oil Emulsification. *Proceedings of Workshop on The Physical Behavior of Oil in the Marine Environment* (pp.81-100). Princeton University: New Jersey.

Wang, N., Deng, Z. (2019). Synthesis of Magnetic, Durable and Superhydrophobic Carbon Sponges for Oil/Water Separation. *Materials Research Bulletin*. 115: 19-26.

Wang, S.D., Shen, Y.M., Guo, Y.K., Tang, J. (2008). Three-Dimensional Numerical Simulation for Transport of Oil Spills in Seas. *Ocean Engineering*. 35(5-6): 503-510.

Wang, S.D., Shen, Y.M., Zheng, Y.H. (2005). Two-Dimensional Numerical Simulation for Transport and Fate of Oil Spills in Seas. *Ocean Engineering*. 32(13): 1556-1571.

Wang, Y., Liu, X., Yu, X., Zheng, X. (2018). Assessing Response Capabilities for Responding to Ship-Related Oil Spills in the Chinese Bohai Sea. *Internationa Journal of Disaster Risk Reduction.* 28: 251-257.

Wang, Z., Hollebone, B. P., Fingas, M., Fieldhouse, B. (2003). Characteristics of Spilled Oils, Fuels and Petroleum Products. North Carolina: EPA.

Watt, J., Borhani, R., Katsaggelos, A.K. (2020). Machine Learning Refined: Foundations, Algorithms, and Applications. UK: Cambridge University Press.

Watt, M. R., Roussis, S. G. (2006). Crude Assay. Practicle Advances in Petroleum Processing, Volume 1 (103-115). USA: Springer.

White, K.P., Ingalls, R.G. (2016). The Basics of Simulation. *Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference* (pp. 38-52).

Wilhelm, W.E., Srinivasa, A.V. (1996). A Strategic, Area-Wide Contingency Planning Model for Oil Spill Cleanup Operations with Application Demonstrated to the Galveston Bay. *Decision Sciences*. 27(4): 767-799.

Wilhelm, W.E., Srinivasa, A.V. (1997). Prescribing Tactical Response for Oil Spill Clean Up Operations. *Management Sciences*. 43(3): 386-402.

Witcoff, H. A., Reuben, B. G., Plotkin, J. S. (2013). Industrial Organic Chemicals. USA: WILEY.

Wolsey, L.A. (2020). Integer Programming. USA: WILEY.

Wu, B. (1992). Manufacturing Systems Design and Analysis. UK: Chapman & Hall.

Xie, H., Yapa, P.D., Nakata, K. (2007). Modeling Emulsification After an Oil Spill in the Sea. *Journal of Marine Systems*. 68(3-4): 489-506.

Xu, H.L., Chen, J.N., Wang, S.D., Liu, Y. (2012). Oil Spill Forecast Model Based on Uncertainty Analysis: A Case Study of Dalian Oil Spill. *Ocean Engineering*. 54: 206-212.

Xu, S., Xu, Z., Liu, Y. (2016). Optimal Dispatch of Oil Spill Resources Considering Resource Priority. *IEEE International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE).* Singapore, pp. 75-79.

Xue, J., Yu, Y., Bai, Y., Wang, L., Wu, Y. (2015). Marine Oil-Degrading Microorganisms and Biodegradation Process of Petroleum Hydrocarbon in Marine Environements: A Review. *Current Microbiology*. 71: 220-228.

Xue, L., Liu, Y., Xiong, Y., Liu, Y., Cui, X., Lei, G. (2021). A Data-Driven Shale Gas Production Forecasting Method Based on the Multi-Objective Random Forest Regression. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 196: 1-13.

Yang, X.S. (2018). Optimization Techniques and Applications with Examples. USA: WILEY.

Yen, T. F. (1998). Asphaltenes: Types and Sources. Structures and Dynamics of Asphaltenes (1-20). Boston: Springer.

You, F., Leyffer, S. (2011). Mixed-Integer Dynamic Optimization fot Oil-Spill Response Planning with Integration of a Dynamic Oil Weathering Model. *AIChE Journal*. 57(12): 3555-3564.

Yu, F., Li, J., Cui, S., Zhao, Y., Feng, Q., Chen, G. (2016). A Hindcast Method to Simulate Oil Spill Trajectories for the Bohai Sea. *Ocean Engineering*, 124: 363-370.

Zhong, Z., You, F. (2011). Oil Spill Response Planning with Consideration of Physicochemical Evolution of the Oil Slick: A Multiobjective Optimization Approach. *Computers and Chemical Engineering.* 35(8): 1614-1630.

Zhu, X., Venosa, A.D., Suidan, M.T., Lee, K. (2001). Guidelines for The Bioremediation of Marine Shorelines and Freshwater Wetlands. U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development National Risk Management Research Laboratory. Land Remediation and Pollution Control Division.

Zucarelli, E. (2021). Performance Metrics in Machine Learning-Part 2: Regression. https://towardsdatascience.com/performance-metrics-in-machine-learning-part-2-regression-c60608f3ef6a. (03/01/2021).

EKLER

EK 1: Optimizasyon Modelinin GAMS Yazılımından Çıkan Çözümü

Model-1: Küme Kaplama Probleminin Çözümü

G e n e r a l A l g e b r a i c M o d e l i n g S y s t e m
C o m p i l a t i o n

COMPILATION TIME = 0.001 SECONDS 3 MB 32.2.0 rc62c018 LEX-LEG
GAMS 32.2.0 rc62c018 Released Aug 26, 2020 LEX-LEG x86 64bit/Linux-09/27/20 13:29:07 Page 2
G e n e r a l A l g e b r a i c M o d e l i n g S y s t e m
Model Statistics SOLVE model1 Using MIP From line 51

MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS	2	SINGLE EQUATIONS	16
BLOCKS OF VARIABLES	2	SINGLE VARIABLES	16
NON ZERO ELEMENTS	216	DISCRETE VARIABLES	15

GENERATION TIME = 0.003 SECONDS 4 MB 32.2.0 rc62c018 LEX-LEG
GAMS 32.2.0 rc62c018 Released Aug 26, 2020 LEX-LEG x86 64bit/Linux-09/27/20 13:29:07 Page 3
G e n e r a l A l g e b r a i c M o d e l i n g S y s t e m
Solution Report SOLVE model1 Using MIP From line 51

S O L V E S U M M A R Y

MODEL	model1	OBJECTIVE	z
TYPE	MIP	DIRECTION	MINIMIZE

```
     SOLVER CPLEX             FROM LINE  51

**** SOLVER STATUS     1 Normal Completion
**** MODEL STATUS      1 Optimal
**** OBJECTIVE VALUE                1.0000

 RESOURCE USAGE, LIMIT          0.020      7200.000
 ITERATION COUNT, LIMIT         0    2147483647

IBM ILOG CPLEX   32.2.0 rc62c018 Released Aug 26, 2020 LEG x86 64bit/Linux
--- GAMS/Cplex licensed for continuous and discrete problems.
Cplex 12.10.0.0

Space for names approximately 0.00 Mb
Use option 'names no' to turn use of names off
MIP status(101): integer optimal solution
Cplex Time: 0.00sec (det. 0.05 ticks)
Fixing integer variables, and solving final LP...
Fixed MIP status(1): optimal
Cplex Time: 0.00sec (det. 0.02 ticks)
Proven optimal solution.

MIP Solution:          1.000000    (0 iterations, 0 nodes)
Final Solve:           1.000000    (0 iterations)

Best possible:         1.000000
Absolute gap:          0.000000
Relative gap:          0.000000

                    LOWER     LEVEL     UPPER    MARGINAL

---- EQU amac           .         .         .        1.000
```

---- EQU Kaplanma

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
1	1.000	1.000	+INF	.
2	1.000	1.000	+INF	.
3	1.000	1.000	+INF	.
4	1.000	1.000	+INF	.
5	1.000	1.000	+INF	.
6	1.000	1.000	+INF	.
7	1.000	1.000	+INF	.
8	1.000	1.000	+INF	.
9	1.000	1.000	+INF	.
10	1.000	1.000	+INF	.
11	1.000	1.000	+INF	.
12	1.000	1.000	+INF	.
13	1.000	1.000	+INF	.
14	1.000	1.000	+INF	.
15	1.000	1.000	+INF	.

---- VAR x j aday istasyon mevkine istasyon kurulması

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
1	.	1.000	1.000	
2	.	1.000	1.000	
3	.	1.000	1.000	
4	.	1.000	1.000	
5	.	1.000	1.000	1.000
6	.	1.000	1.000	
7	.	1.000	1.000	
8	.	1.000	1.000	

9 . . 1.000 1.000

10 . . 1.000 1.000

11 . . 1.000 1.000

12 . . 1.000 1.000

13 . . 1.000 1.000

14 . . 1.000 1.000

15 . . 1.000 1.000

LOWER LEVEL UPPER MARGINAL

---- VAR z -INF 1.000 +INF .

z amaç fonksiyonu değeri

**** REPORT SUMMARY: 0 NONOPT

0 INFEASIBLE

0 UNBOUNDED

GAMS 32.2.0 rc62c018 Released Aug 26, 2020 LEX-LEG x86 64bit/Linux-09/27/20 13:29:07 Page 4

G e n e r a l A l g e b r a i c M o d e l i n g S y s t e m

E x e c u t i o n

---- 53 VARIABLE x.L j aday istasyon mevkine istasyon kurulması

5 1.000

EXECUTION TIME = 0.080 SECONDS 4 MB 32.2.0 rc62c018 LEX-LEG

Model-2: Maksimum Kaplama Probleminin Çözümü

**** REPORT SUMMARY : 0 NONOPT
0 INFEASIBLE
0 UNBOUNDED

GAMS 24.2.2 r44857 Released Mar 4, 2014 WEX-WEI x86_64/MS Windows 01/10/21 15:49:20 Page 6
G e n e r a l A l g e b r a i c M o d e l i n g S y s t e m
E x e c u t i o n
---- 78 VARIABLE x.L j aday istasyon mevkine istasyon kurulması
12 1.000
---- 78 VARIABLE y.L j aday istasyon tarafından i talep noktasına hizmet edilmesi
12
1 1.000
2 1.000
3 1.000
4 1.000
5 1.000
6 1.000
7 1.000
8 1.000
9 1.000
10 1.000
11 1.000
12 1.000
13 1.000
14 1.000
15 1.000
---- 78 VARIABLE z.L = 131.000 amaç fonksiyonu değeri

EXECUTION TIME = 0.046 SECONDS 3 MB 24.2.2 r44857 WEX-WEI