

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOĞU AKDENİZ'DE PETROL KİRLİLİĞİNİN MODELLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhittin Güneş ONAY

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Bilimleri ve Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2016

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOĞU AKDENİZ'DE PETROL KİRLİLİĞİNİN MODELLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Muhittin Güneş ONAY
(501121727)**

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Bilimleri ve Mühendisliği Programı

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Elif PEHLİVANOĞLU MANTAŞ
Eş Danışman: Doç. Dr. Flavio MARTINS**

HAZİRAN 2016

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501121727 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Muhittin Güneş ONAY, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “DOĞU AKDENİZ'DE PETROL KİRLİLİĞİNİN MODELLENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Elif PEHLİVANOĞLU MANTAŞ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Eş Danışman : **Doç. Dr. Flavio MARTINS**
Universidade Do Algarve

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Melike GÜREL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Alpaslan EKDAL
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ali ERTÜRK
İstanbul Üniversitesi

Teslim Tarihi : 02 Mayıs 2016
Savunma Tarihi : 08 Haziran 2016





Aileme,



ÖNSÖZ

Birlikte çalışmaktan büyük onur ve mutluluk duyduğum sevgili hocam Doç. Dr. Elif PEHLİVANOĞLU MANTAŞ'a,

Modelleme konusundaki bilgi ve tecrübesiyle çalışmalarına öncülük eden Doç. Dr. Flavio MARTINS'e,

Tezime değerli yorumları ile katkıda bulunan Prof. Dr. Melike GÜREL, Doç. Dr. Alpaslan EKDAL ve Doç. Dr. Ali ERTÜRK'e

Bana yüksek lisans yapma imkânı tanıyan Sahil Güvenlik Komutanlığı'nın değerli mensuplarına,

Modelleme konusundaki bilgisiyle tezime önemli katkıda bulunan Dr. Joao JANEIRO'ya,

Portekiz'deki laboratuvar çalışmalarım esnasında bana destek olan, Hidrotec ailesinin değerli üyeleri Lukes ISECHAL ve Filipe VERISSIMO'ya,

Tez çalışmalarım esnasında bana destek olan arkadaşlarım; Ertuğ FIRATLI, Barış YEGEN, Sinem KOCABAŞ, Nilay BİLGİN, Gökşin ÖZYILDIZ, Çisil ERİŞ ve Servet AYOK'a,

Hayatım boyunca yaptığım her işte yanımda olduklarını hissettiğim aileme,

Sevgi, saygı ve teşekkürlerimi büyük bir minnetle sunarım.

Haziran 2016

Muhittin Güneş ONAY
(Deniz Subayı)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
KISALTMALAR.....	xi
SEMBOLLER.....	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY.....	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1.Amaç.....	3
1.2.Kapsam.....	3
2.LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
2.1.Deniz Suyunun Özellikleri	5
2.1.1.Deniz suyunun fiziksel özellikleri	5
2.1.1.1.Sıcaklık.....	5
2.1.1.2.Yoğunluk	6
2.1.1.3.Bulanıklık.....	6
2.1.2.Deniz suyunun kimyasal özellikleri	7
2.1.2.1.Tuzluluk.....	7
2.1.2.2.pH.....	8
2.1.2.3.Çözünmüş gazlar.....	9
2.2.Gemi Kaynaklı Deniz Kirliliği	10
2.2.1.Sintine suyu.....	10
2.2.2.Balast suyu.....	11
2.2.3.Evsel atıksu	12
2.2.4.Kaza sonucu oluşan kirlilik	13
2.2.4.1.Petrol ve özellikleri.....	13
2.2.4.2.Tarihteki önemli tanker kazaları	15
2.2.4.3.Petrol kirliliği risk metodolojisi	18
2.3.Petrolün Denizdeki Akıbeti ve Taşınımı	19
2.3.1.Adveksiyon.....	20
2.3.2.Yayıma	22
2.3.3.Buharlaşıma	22
2.3.4.Dağılım ve karışma	23
2.3.5.Çözünme.....	24
2.3.6.Emülsiyon.....	25
2.3.7.Sedimentasyon ve kıyı çizgisinde birikim.....	26
2.3.8.Fotooksidasyon	26
2.3.9.Biyolojik Bozunma	27
2.4.Petrol Kirliliği ile İlgili Modeller	28
2.4.1.İki boyutlu modeller ile ilgili çalışmalar	29
2.4.2.Üç boyutlu modeller ile ilgili çalışmalar	30
2.4.3.Türkiye’de yapılan çalışmalar	31
2.5.Çalışma Bölgesi	32
2.6.Akdeniz’de Akıntılar	34
2.7.Lagrange ve Euler Yaklaşımı	35
3.METODOLOJİ	37

3.1.MOHID Modelleme Sistemi.....	37
3.1.1.Hidrodinamik modül	39
3.1.2.Su özellikleri modülü	40
3.1.3.Lagrange modülü	41
3.1.4.Geometri modülü	43
3.1.5.Asimilasyon modülü	44
3.2.MOHID Modelleme Sisteminin Avantaj ve Dezavantajları	44
3.3.Model Kurulumu.....	46
3.3.1.Batimetri oluşturma	46
3.3.2.Atmosferik koşullar	48
3.3.3.Sınır koşulları	49
3.3.4.Gel-git	49
3.3.5.Dikey geometri	49
3.3.6.Model yapısı	49
3.3.7.Isınma periyodu	50
3.3.8.Model validasyonu	50
3.4.Senaryolar ve Uygulamaları.....	52
3.4.1.Senaryo tanımları.....	52
3.4.2.Yaz koşulları için simülasyon	55
3.4.3.Kış koşulları için simülasyon	64
4.SONUÇ VE ÖNERİLER.....	75
KAYNAKLAR	79
ÖZGEÇMİŞ	83

KISALTMALAR

IMO	: Uluslararası Denizcilik Örgütü
PAH	: Polisiklik Aromatik Hidrokarbonlar
WHO	: Dünya Sağlık Örgütü
EPA	: Çevre Koruma Ajansı
EMSA	: Avrupa Deniz Güvenliği Ajansı





SEMBOLLER

S	: Tuzluluk
u, v, w	: Hız vektörünün x, y, z yönlerindeki bileşenleri
f	: Coriolis parametresi
v_H	: Yatay türbülans viskozitesi
v_t	: Dikey türbülans viskozitesi
v	: Moleküler kinematik viskosite
p	: Basınç
g	: Yerçekimi
ρ	: Yoğunluk
v'_H	: Yatay eddy difüzyonu
v'_t	: Dikey eddy difüzyonu
v'_A	: Moleküler difüzyon
η	: Serbest su yüksekliği
T	: Sıcaklık



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1: Dünya genelinde ortalama yıllık petrol kirliliği	2
Çizelge 2.1: Deniz suyunda bulunan iyonların yüzde olarak miktarları.	7
Çizelge 2.2: Büyük petrol kirliliği kazaları.....	16
Çizelge 2.3: 10 yıllık periyotlar ile kaza dağılımı....	17
Çizelge 2.4: Bazı aromatik petrol bileşiklerinin çözünürlükleri.....	25
Çizelge 3.1: MOHID modülleri.....	38
Çizelge 3.2: MOHID modelleme sisteminin ve diğer modellerin içerdiği modüller...	45
Çizelge 3.3: Şamandıra verileri ve model sonuçları (konum ve aradaki mesafe)....	51



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	: Derinlik ile sıcaklığın dönemsel değişimi.....	5
Şekil 2.2	: CO ₂ dönüşüm sistemi.....	8
Şekil 2.3	: İnorganik karbon türlerinin pH'a bağlı olarak değişimi.....	9
Şekil 2.4	: Balast suyu değişimi.....	12
Şekil 2.5	: İsoprenin yapısı.....	13
Şekil 2.6	: Benzen.....	15
Şekil 2.7	: Kaza mevkileri.....	16
Şekil 2.8	: Yıllara göre petrol kirliliği ile sonuçlanan kaza sayısı.....	17
Şekil 2.9	: Deniz yolu ile yapılan ticaret ve 7 tondan büyük petrol kirlilikleri.....	18
Şekil 2.10	: Petrolün akıbeti ve taşınımı.....	20
Şekil 2.11	: Denize dökülen petrol ürünlerinin akıbeti.....	20
Şekil 2.12	: Adveksiyon mekanizması.....	21
Şekil 2.13	: Farklı petrol ürünlerinin 15°C'deki buharlaşma hızları.....	23
Şekil 2.14	: İskenderun Körfezi'ndeki tesisler	33
Şekil 2.15	: Mersin kıyı bölgesindeki 9 adet petrol boru hattı.....	34
Şekil 3.1	: Rastgele hareket (eddylerin partiküllerden büyük olduğu durum).....	42
Şekil 3.2	: Rastgele hareket (eddylerin partiküllerden küçük olduğu durum).....	42
Şekil 3.3	: 4 tabakalı sigma.....	43
Şekil 3.4	: 4 tabakalı kartezyen (traşlanmış hücreler).....	44
Şekil 3.5	: Su kolonunda kartezyen (altta) ve sigma (üstte).....	44
Şekil 3.6	: XYZ noktaları.....	46
Şekil 3.7	: MOHID'de oluşturulan gridler.....	47
Şekil 3.8	: Poligonlar	47
Şekil 3.9	: Batimetri haritası.....	48
Şekil 3.10	: Şamandıra.....	51
Şekil 3.11	: Şamandıra ve petrol tabakasının hareketi	52
Şekil 3.12	: Gemi trafiği risk haritası.....	53
Şekil 3.13	: Kaza noktaları	54
Şekil 3.14	: Kaza noktası 1'deki rüzgâr gülü (10-14 Mart 2014).....	55
Şekil 3.15	: Kaza noktası 2'deki rüzgar gülü (10-14 Mart 2014).....	56
Şekil 3.16	: Kaza noktası 3'teki rüzgar gülü (10-14 Mart 2014).....	56
Şekil 3.17	: Kaza noktası 1'deki akıntı hızı ve yönü (10-14 Mart 2014).....	57
Şekil 3.18	: Kaza noktası 2'deki akıntı hızı ve yönü (10-14 Mart 2014).....	57
Şekil 3.19	: Kaza noktası 3'teki akıntı hızı ve yönü (10-14 Mart 2014).....	58
Şekil 3.20	: Kaza noktası 1 ve 2'deki 12 saat sonraki durum.....	59
Şekil 3.21	: Kaza noktası 1 ve 2'deki 24 saat sonraki durum.....	59
Şekil 3.22	: Kaza noktası 1 ve 2'deki 48 saat sonraki durum.....	60
Şekil 3.23	: Kaza noktası 1 ve 2'deki 72 saat sonraki durum.....	60
Şekil 3.24	: Kaza noktası 1 ve 2'deki 96 saat sonraki durum.....	61
Şekil 3.25	: Kaza noktası 3'teki 12 saat sonraki durum.....	61
Şekil 3.26	: Kaza noktası 3'teki 24 saat sonraki durum.....	62
Şekil 3.27	: Kaza noktası 3'teki 48 saat sonraki durum	62
Şekil 3.28	: Kaza noktası 3'teki 72 saat sonraki durum	63
Şekil 3.29	: Kaza noktası 3'teki 96 saat sonraki durum.....	63
Şekil 3.30	: Kaza noktası 1'deki rüzgar gülü (27-31 Mart 2014).....	64

Şekil 3.31 : Kaza noktası 2'deki rüzgâr gülü (27-31 Mart 2014).....	65
Şekil 3.32 : Kaza noktası 3'teki rüzgar gülü (27-31 Mart 2014).....	65
Şekil 3.33 : Kaza noktası 1'deki akıntı hızı ve yönü (27-31 Mart 2014).....	66
Şekil 3.34 : Kaza noktası 2'deki akıntı hızı ve yönü (27-31 Mart 2014).....	66
Şekil 3.35 : Kaza noktası 3'teki akıntı hızı ve yönü (27-31 Mart 2014).....	67
Şekil 3.36 : Kaza noktası 1 ve 2'deki 12 saat sonraki durum	68
Şekil 3.37 : Kaza noktası 1 ve 2'deki 24 saat sonraki durum	68
Şekil 3.38 : Kaza noktası 1 ve 2'deki 48 saat sonraki durum	69
Şekil 3.39 : Kaza noktası 1 ve 2'deki 72 saat sonraki durum	69
Şekil 3.40 : Kaza noktası 1 ve 2'deki 96 saat sonraki durum	70
Şekil 3.41 : Kaza noktası 3'teki 12 saat sonraki durum.....	70
Şekil 3.42 : Kaza noktası 3'teki 24 saat sonraki durum.....	71
Şekil 3.43 : Kaza noktası 3'teki 48 saat sonraki durum.....	71
Şekil 3.44 : Kaza noktası 3'teki 72 saat sonraki durum.....	72
Şekil 3.45 : Kaza noktası 3'teki 96 saat sonraki durum.....	72
Şekil 3.46 : Tüm kaza noktaları için 4 gün sonundaki durum (Yaz koşulları).	73
Şekil 3.47 : Tüm kaza noktaları için 4 gün sonundaki durum (Kış koşulları).	73



DOĞU AKDENİZ'DE PETROL KİRLİLİĞİNİN MODELLENMESİ

ÖZET

Globalleşmenin etkisi, enerji gereksiniminin artması ve ticaret hacminin büyümesi ile daha az maliyetli olan deniz yolu taşımacılığına olan talep artmıştır. Bu taşıma süresince gittikçe artan bir şekilde deniz kazaları oluşmakta ve deniz ortamı bu kazalar sonucunda denize dökülen petrol ürünlerinden ciddi boyutlarda kirlenmektedir. Bu kirlilik, ekonomik ve çevresel faktörler ile meydana geldiği bölgeyi olumsuz yönde etkilemektedir.

Bu çalışmada üç boyutlu hidrodinamik ve taşıma modeli olan MOHID kullanılarak petrol kirliliğinin yayılımı incelenmiştir. Çalışma bölgesi olarak Türkiye için stratejik önemi haiz petrol rafinerilerinin ve dolum istasyonlarının yoğun olduğu Doğu Akdeniz bölgesi seçilmiştir. Doğu Akdeniz jeopolitik konumu ile Türkiye'nin önemli deniz ticaret yollarını ve limanlarını içine almaktadır. Doğu Akdeniz'de gemi trafik akışının yoğun olduğu, Mersin önleri ve İskenderun Körfezi için kaza senaryoları üretilmiştir. Bölgedeki olası gemi kazası sonrası yakıt kirliliği simülasyonu yapılarak, bölgedeki yakıt dağılımı sonlu hacimler yöntemi ile hesaplanmıştır. Model, her bir zaman adımında petrolün alansal dağılımını vermektedir. Model, petrol dağılımını atmosferik koşullara, tanımlanmış başlangıç ve sınır koşullarına göre hesaplamaktadır.

Model validasyonu, Coriolis projesi kapsamında Mart 2014'de Mersin önlerinde denize bırakılan şamandıranın topladığı verilerin, model verileri ile karşılaştırılması ile yapılmıştır. Model bu tarihlerde çalıştırılmış olup, şamandıra verilerine benzer sonuçlar vermiştir.

Simülasyona başlamadan önce modelin stabil olmasını sağlamak için model ısınma periyodunda çalıştırılmıştır. Isınma periyodu iki aşamada gerçekleşmiştir. İlk olarak birincil çalıştırma, müteakiben ikincil çalıştırma yapılmıştır. Birincil çalıştırmada veriler anlık olarak değil belli bir zamana yayılarak uygulanmıştır. Bu şekilde modelin hata vermesi engellenmiştir. İkincil çalıştırma, hesaplamalarına birincil çalıştırmadan elde edilen verileri başlangıç noktası olarak devam etmiştir.

Model yaz ve kış mevsiminde meydana gelecek kirlilik senaryoları için dört gün boyunca çalıştırılmıştır. Yaz mevsimi simülasyon sonuçları incelendiğinde, kirliliğin İskenderun Körfezi'nde, İskenderun ve Dört Yol ilçesi kıyılarını etkileyeceği, Mersin bölgesinde ise Kazanlı kıyılarını etkileyeceği beklenmektedir. Kış mevsimi simülasyon sonuçları incelendiğinde ise, İskenderun Körfezi'nde uzunca bir sahil şeridinin kirliliğe maruz kalacağı, Mersin bölgesinde de kirliliğin kıyıya paralel olarak hareket edeceği beklenmektedir.



OIL SPILL MODELING IN EAST MEDITERRANEAN

SUMMARY

Energy demand of the world has increased significantly with the industrial development. However, the development of industries and technology has led to an increase of environmental risks all over the world. With the increasing demand for oil, oil exploration and transportation have also increased to meet the demand, leading to an increase in the risk of oil spill accidents

Although seaway transportation is cheaper than other types of transportation, it is the riskiest way considering the possible accidents and their widespread effects. Many factors may lead to accidents in the sea and cause irrecoverable man-made disasters. Due to inadequate training of officers and crew, faulty construction of ships, lack of proper equipment, overloading and lack of attention, inevitable ship accidents may occur. Ship accidents negatively affect the region where it takes place by the means of economics and environmental aspects.

In the present, main source for energy is oil and transportation of oil is generally done via sea transportation due to relatively low costs. Although increased tanker traffic is the biggest risk for the oil pollution in the seas, it is not the only one. Dry cargo or container carrying ships also can cause oil spill to the sea in the case of any breakdown or accident in their fuel tanks. In addition to these, illegal discharges to the sea such as bilge or ballast water discharges may cause oil spill to the sea.

Oil pollution is one of the most serious environmental problems worldwide, since oil spills are causing significant, long-term impacts on the affected area environmentally, ecologically, and socio-economically. Fresh water and marine environments are seriously affected by oil spill. Besides the point that it affects the natural resources negatively, it also affects a wide range of organisms through the complex food chain and these impacts can even reach to human food resources. Damages after an oil spill can be in different ways in the environment. It can directly affect the environment and wildlife physically, or oil can cause toxicity to the exposed organisms. These impacts depend on several factors, including the physical and chemical properties of the spilled oil, and the fate of it.

In this study, three dimensional hydrodynamic and transportation model MOHID was used to simulate oil spill. MOHID software lets the user to build a tree of one-way nested models without limitations on the numerous of nesting levels. In this work, modeling studies performed using two models: one for the whole system (main model), and the other one for the study area (submodel) with a more detailed grid. One-way downscaling scheme (nested models) was used to join these two models. To define the hydrodynamic and water properties, the main model which consisted of a less detailed grid was used and boundary conditions are supplied for the submodel. The connection between the main model and the submodel was provided by the assimilation of the relaxed solutions in a band of cells of the main model by the submodel. The information transfer was maintained as one-way direction, from the main model to the submodel. So, the submodel was enforced to use the boundary conditions acquired from the main model.

At the first run of each new simulation, cold start was done for stability purposes. The wind is the main factor affecting hydrodynamic fields. The hydrodynamic fields are used to force a Lagrangean oil spill model to simulate a hypothetical oil spill in potentially risky areas. A finite volume methodology with a generic vertical coordinate system is used in this model. The wind data was slowly imposed to the model over a period of time. This way, the model does not accept any previous results as a starting point. The second run was done after this cold start as a continuous run of the first. This hot start accepted the data from the cold start as the starting point.

East Mediterranean contains important sea trade ways and ports because of its important geopolitic location. Therefore, Mersin and İskenderun areas in Turkey was selected as the study area, due to the fact that the area is strategically very important with the refineries and filling stations. Ship accident scenarios were created for the locations where vessel traffic is heavy. Oil spill pollution after possible tanker accidents in the region, were simulated and oil spill was calculated by using finite volumes. Three dimensional developed model provides area distribution in every time step. The model calculates the spread of the oil spill based on the current conditions and predetermined boundary conditions. In the model, constantly changing wind speed and direction were used which were taken from SKIRON forecast system which is a full physics atmospheric model with several unique capabilities that make it appropriate for regional/mesoscale simulations in regions with highly variable physiographic characteristics. Sea water temperature, salinity, water level and current data are initial and boundary conditions. They were obtained from MERCATOR Ocean which is the French Center for analysis and forecasting of the global ocean, as service provider of ocean information in real and delayed time.

In the model, different scenarios were created for different coordinates with high accident risks as well as for summer and winter conditions. In March 2014, a drifter was released the cost of Mersin in scope of Coriolis Project and the data were published as an open source. For validating the model results, the time period was selected as March 2014 and model data were compared with real data obtained from the drifter. Also, meteorological and atmospherical data for March 2014 were used. Unlike previous studies, constantly changing wind speed and wind direction data were used instead of constant wind data to get more reliable results from the modeling study.

In East Mediterranean, the prevailing wind blows from south west for summer and north and north east for winter. The model was run for the summer and winter separately; the prevailing wind was configured as south west for the summer and north and north east for the winter to obtain a realistic view of pollution in case of any real accident.

According to model outputs, in case of an accident off the cost of BOTAŞ in summer conditions, Dörtyol district will be exposed to oil pollution. The pollution reaches to the shore after 43 hours. In winter conditions, a possible pollution in the area would proceed parallel to shore area, and if no precaution is taken, the pollution will reach to the off the cost of baymouth.

According to the model outputs, in summer conditions, in case of an accident off the cost of İskenderun, North İskenderun area as well as the iron and steel factory shore area will be exposed to oil pollution. The pollution will reach to the shore after 24 hours. At the end of four days, the pollution would expand towards the coast line, and reach off the cost of Dörtyol district. In winter conditions, a possible pollution will reach to the shore after 24 hours similar to summer conditions. If no precaution is taken, the pollution would affect a long coast line through İskenderun.

According to the model outputs, in summer conditions, in case of an accident off the coast of Mersin, Kazanlı coastal area will be exposed to oil pollution. The pollution reaches to the shore after 36 hours. At the end of four days, all the oil would be accumulated in the coastline. In winter conditions, a possible pollution in the area, will distribute parallel to the coast line and at the end of four days, the pollution will reach Erdemli district. In summer and winter conditions, applying a barrier set before oil pollution during emergency situations may prevent the spread of pollution over larger areas.



1. GİRİŞ

Dünyada deniz kirliliği, toplumların deniz kıyısında veya denizlere dökülen suların yakınlarında yerleşmeleriyle başlamıştır. Dünya nüfusunun azlığı ve endüstrinin henüz oluşmamış olması, deniz kirliliğinin 20.yy başına kadar ihmal edilebilir bir seviyede kalmasını ve zamanla doğanın tekrar dengesini tesis etmesini sağlamıştır. Denizlerin büyük ölçüde kirlenmeye başlaması, özellikle nüfus artışı ve endüstriyel gelişme ile meydana gelmiştir. Denizlerdeki ve denizlere akan su kaynaklarındaki kirlilik, büyük ölçüde endüstriyel atıklar, evsel atıklar, gemilerden boşaltılan atıklar ve deniz kazalarından kaynaklanmaktadır.

Literatürde birden çok deniz kirliliği tanımına rastlamak mümkündür. Bu tanımlar içinde oldukça kapsamlı bilimsel bir deniz kirliliği tanımı, 1970 yılında Birleşmiş Milletler Örgütü'nce gerçekleştirilen çevre kirliliği ile ilgili toplantıda yapılmıştır. Bu tanıma göre deniz kirliliği; haliçleri de kapsayacak şekilde deniz ortamına ve biyolojik kaynaklara zarar verecek, insan sağlığına tehlike yaratacak, su ürünleri üretimini de içeren denizden ekonomik yararlanma olanaklarını kısıtlayacak ve denizin dinlence amacı ile kullanılmasını, suyun kalitesini bozarak engelleyecek şekilde, insanoğlu tarafından doğrudan doğruya ya da dolaylı olarak madde ya da enerji bırakılması olayıdır. Denizde petrol kirliliği; tankerlerden, deniz yatağında yapılan petrol arama ve çıkarma çalışmalarından, rafinerilerden, gemi kazalarından (karaya oturma, çatışma, batma, yan yatma) ve endüstrilerden kaynaklanmaktadır. Dünyada yaklaşık 1 milyon ton/yıl petrol ve petrol türevlerinin denizlere karıştığı tahmin edilmektedir. Bu karışma sonucu sudan hafif olan petrol yüzeyde ince bir film tabakası meydana getirmekte, hızlı bir şekilde yayılmakta ve böylece geniş bir alanı etkileyebilmektedir.

Sürekli gelişen endüstri ve artan dünya nüfusu, enerji ihtiyacını önemli şekilde artırmaktadır. Ana enerji kaynağı petroldür ve nakliyesi, maliyeti az olması sebebiyle deniz yolu ile yapılmaktadır. Artan tanker trafiği ile birlikte petrol kirliliği riski de artmaktadır. Fakat bu risk sadece tankerlerden kaynaklanmamaktadır. Kuru yük veya konteyner taşıyan herhangi bir gemi kaza yaptığında denize yakıt tanklarından petrol sızabilmektedir. Ayrıca sintine suyu, balast suyu ve diğer gemi operasyonlarından kaynaklanan illegal deşarjlar ile de denize petrol karışabilmektedir. Çizelge 1.1'de yıllık ortalama petrol kirliliği miktarı ve kaynakları verilmiştir (Ulusal Araştırma Konseyi

Raporu, 2002). Kaza sonucu, kasten veya bilinçsizce denize ulaşan petrol ve petrol türevleri, deniz yüzeyinin film tabakası şeklinde kaplanmasına, katran yumrularının oluşumuna plajların kirlenmesine, sucul ortamda yaşayan canlıların zarar görmesine vb. olaylara yol açmaktadır.

Çizelge 1.1: Dünya genelinde ortalama yıllık petrol kirliliği.

Kaynak	Kapsam	Petrol (ton)
Doğal sızıntılar	Deniz tabanının altından jeolojik formasyondan kaynaklanan doğal petrol sızıntısı	600 000
Taşıyım	Tankerler, konteyner ve kuru yük taşıyan gemiler ve diğer gemiler	150 000
Üretim	Platformlardan, işlenmiş sulardan, boru hatlarından kaynaklanan sızıntılar	38 000
Diğer	Nehirler, noktasal olmayan kaynaklar, yüzeysel akış, atmosferik deposizyon	480 000
Toplam		1 268 000

5312 sayılı Deniz Çevresinin Petrol ve Diğer Zararlı Maddelerle Kirlenmesinde Acil Durumlarda Müdahale ve Zararların Tazmini Esaslarına Dair Kanun ve bu kanunun uygulama yönetmeliği; acil durumlarda gemilerden ve kıyı tesislerindeki faaliyetlerden kaynaklanan kirlenme tehlikesini ortadan kaldırmak veya kirlenmeyi azaltmak, sınırlamak ve gidermek üzere uygulanacak müdahale ve hazırlıklı olma esaslarını içerir. Bu kanunda kirlenme; olay sonucunda, petrol ve diğer zararlı maddelerin; canlı kaynaklara ve deniz yaşamına zarar verecek, insan sağlığı için tehlike oluşturacak, balıkçılık ve denizlerin diğer yasal amaçlarla kullanımı da dahil olmak üzere, denizcilik faaliyetlerini engelleme, deniz suyunun niteliğini değiştirme ve ekolojik dengeyi bozma gibi zararlı etkiler yaratacak şekilde deniz çevresine karışması şeklinde tanımlanmıştır. Müdahale; bir olayın meydana gelmesinden sonra ortaya çıkan kirliliğin neden olacağı zararı azaltmak, gidermek, sınırlandırmak amacıyla icra edilen faaliyetleri veya koruyucu önlemlerin uygulanmasını, Acil müdahale plânı ise müdahale faaliyetleri kapsamında teşkilâtlanmayı, yetki, görev ve sorumlulukları, yapılacak işlemleri, hazırlıklı olma, müdahale imkân ve kabiliyetleri ile diğer hususları içeren ulusal, bölgesel ve yerel düzeydeki plânları içerir.

Üç boyutlu geliştirilen model acil müdahale planları için kirlilik hakkında veri oluşturur. Üç boyutlu hidrodinamik ve taşıyım modeli olan MOHID, çalışma bölgesinin hidrodinamik özelliklerini ve petrol hareketlerini simüle etmek için kullanılmıştır. MOHID sonlu hacimler yöntemini dikey koordinat sistemi ile kullanılır. Model petrol dağılımını atmosferik koşullara ve tanımlanmış sınır koşullarına göre

hesaplamaktadır. Hidrodinamik alanlar, Lagrange petrol dağılım modelini baz alarak potansiyel kaza riski olan bölgelerde petrol dağılımını simüle etmek için kullanılmıştır.

1.1. Amaç

Bu çalışmanın amacı, Doğu Akdeniz'de olası gemi kazalarında petrol kirliliğinin simülasyonunu yaparak, petrol kirliliğinin yayılımına dair tahminde bulunmak ve bu kapsamda veri oluşturularak karar verici makamların acil müdahale planları için ön tedbirlerin (temizleme, bariyer çekme, dispersant kullanma) alınmasına olanak sağlamaktır.

Bu amaç doğrultusunda üç boyutlu olarak geliştirilen model sonlu hacimler yaklaşımını kullanarak her bir zaman adımında petrolün alansal dağılımını vermektedir. Daha gerçekçi bir modelleme çalışması için, daha önceki çalışmalardan farklı olarak modelde, sabit rüzgar verisi yerine, anlık yönü ve şiddeti değişen rüzgar verisi kullanılmıştır.

Çalışma bölgesi olarak Doğu Akdeniz'in seçilmesinin amacı ise ülkemiz açısından jeopolitik konumu ile stratejik önemi haiz olması, gemi trafiğinin yoğun olması, rafineri ve petrol dolum istasyonlarının bu bölgede yoğun olarak konuşlandırılmasıdır.

1.2. Kapsam

Mersin önleri ve İskenderun Körfezi'nde kaza riski olan çeşitli koordinatlar belirlenerek, petrol kirliliğinin dağılımı simüle edilmiştir. Çalışmada Mart 2014 ayının meteorolojik ve atmosferik verileri kullanılmıştır. Belirtilen ayda Fransızlar tarafından Coriolis projesi kapsamında Mersin önlerine bir adet şamandıra atılmış ve elde edilen veriler açık kaynak olarak yayınlanmıştır. Kurulan modeli doğrulamak için bu ay seçilmiş ve modelin sonuçları ile şamandıranın kaydettiği gerçek veriler karşılaştırılmıştır.

Yapılan çalışmada üç farklı kaza noktası belirlenmiştir. Mersin önlerinde petrol boru hatlarına yakın bir koordinat, kaza noktası olarak belirlenmiştir. Mersin'de ATAŞ rafinerisinin yanısıra çeşitli firmalara ait dokuz adet petrol dolum istasyonu mevcuttur. Bu dolum istasyonlarına farklı limanlardan gelen gemiler limana yanaşmadan, açıkta, petrol boru hatları vasıtası ile petrol transferi yapmaktadır.

İskenderun Körfezi'nde ise biri BOTAŞ önleri diğeri de İskenderun Liman önleri olmak üzere iki koordinat belirlenmiştir. Bakü-Tiflis-Ceyhan boru hattının son durağı olan BOTAŞ tanker trafiğinin yoğun olduğu stratejik önemi haiz bir noktadadır. İskenderun

Limanı ve çevresindeki on üç liman ile birlikte demiryolu ve karayolu bağlantıları sayesinde deniz yolu taşımacılığı açısından önemli ve yoğun bir karaktere sahiptir.

Bu üç noktadan hareketle yapılan modelleme çalışmaları için mevsimsel hakim rüzgar yönleri incelenmiştir. Buna göre Doğu Akdeniz’de hakim rüzgar yaz mevsimi için güneybatıdan, kış mevsimi için kuzey ve kuzeydoğudan esmektedir. Model, hakim rüzgar yönünün yaz mevsimi için lodos, kış mevsimi için yıldız/poyraz olduğu durum için ayrı ayrı çalıştırılmıştır. Gerçek bir kirliliğin yaz mevsiminde veya kış mevsiminde meydana gelmesi durumunda model sonuçlarına bakılarak petrolün dağılımı hakkında fikir sahibi olunabilecektir.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

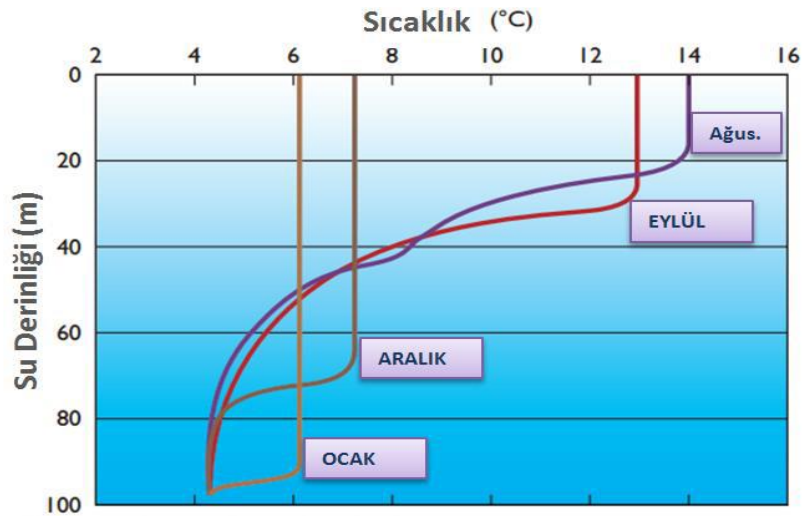
2.1. Deniz Suyunun Özellikleri

Deniz suyunun özellikleri fiziksel ve kimyasal özellikler olmak üzere iki başlık altında incelenir. Kirlenen deniz suyunun fiziksel ve kimyasal özelliklerinde birtakım değişiklikler meydana gelir. Bu yüzden deniz suyunun özelliklerinin iyi bilinmesi ve analiz edilmesi gereklidir.

2.1.1. Deniz suyunun fiziksel özellikleri

2.1.1.1. Sıcaklık

Sıcaklık konuma ve mevsime bağlı olarak değişir. Deniz ortamında sıcaklık değişimini etkileyen esas faktörler güneş radyasyonu ve atmosferle olan ısı alışverişidir. Su yüzeyine yakın bölgelerde ve deniz tabanına yakın bölgelerde su sıcaklığı önemli bir değişiklik göstermez. Su yüzeyine yakın bölgedeki sıcaklığın nispeten uniform olması bu bölgenin rüzgar etkisi ile daha iyi karışmasından ileri gelmektedir. Deniz yüzeyi ile deniz tabanı arasında sıcaklığın derinliğe göre diğer kısımlara nazaran çok daha hızlı değiştiği bölgeye termoklin tabaka denir. Şekil 2.1'de bu sıcaklık değişimi görülmektedir (Başaran, 2015). Genel olarak sıcaklık değişimini gösteren bu grafik, bulunulan konuma göre değişiklik göstermektedir. Örnek olarak orta enlemlerde yaz mevsiminde deniz yüzeyinden 10-15 m seviyelerde termoklin tabakası oluşmaktadır.



Şekil 2.1: Derinlik ile sıcaklığın dönemsel değişimi.

Denizler ısıyı bünyesinde hapseder. Bu yüzden denizler yüksek miktarda termal kapasiteye sahiptir. Dünya yüzeyi, denizler de dâhil bir bütün olarak düşünüldüğünde sıcaklığı tamponlamaktadır. Güneş ışınları, deniz yüzeyinden 100 m derinliğe kadar iner. Fakat güneş ışınlarının çoğu 10 m’de absorblanır. Suyun çok düşük ısı iletim özelliğinden dolayı oluşan ısıнын denizin derinlerine doğru transferi karışım yoluyla gerçekleşir. Rüzgarlar, dalgalar, akıntılar ve diğer etmenler ile gerçekleşen bu karışım deniz yüzeyinden 200 ila 300 m arasındaki bir derinliğe kadar gerçekleşebilir. Termoklin tabakasının altında deniz suyu sıcaklığı 5° C’ye kadar düşer. Daha derin bölgelerde kademeli olarak 0 ila 3° C’ye kadar düşmektedir (Başaran, 2015).

2.1.1.2. Yoğunluk

Yoğunluk; deniz suyunda tabakalaşmaya, türbülansa, suyun dikey doğrultudaki hareketlerine, akıntıların oluşmasına etki eden önemli bir faktördür. Deniz suyunun yoğunluğu; basınca, derinliğe, tuzluluğa ve su sıcaklığına bağlı olarak değişmekte olup ve 4° C’deki yoğunluğu 1,0 g/cm³ olan saf sudan biraz büyüktür. 0° C’deki deniz suyunun yoğunluğu 1,027 g/cm³ iken 10° C’deki deniz suyunun yoğunluğu 1,02588 g/cm³ ve 30° C’deki deniz suyunun yoğunluğu 1.0207 g/cm³’dür. Deniz suyunun yoğunluğu sıcaklık arttıkça düşmektedir.

Deniz suyunda yoğunluk derinliğe bağlı olarak değişim gösterir. Bu değişim yüzey tabakasında çok az, dipte sabite yakındır. Denizlerde, genellikle az yoğun bir üst tabaka ve tabanda yoğun bir alt tabaka mevcuttur. Bu iki tabaka arasında yoğunluğun derinliğe göre hızla değiştiği bölgeye piknoklin tabakası adı verilir.

Dipten derin deniz deşarjı edilen atıksuların yoğunluğu deniz suyuna göre genel olarak daha düşük olduğundan bu sular yüzeye doğru yükselir ve deniz suyu ile karışarak seyrelir. Atıksular mevcut tabakalaşmaya göre yüzeye çıkar ya da belli bir derinlikte kalır. Termoklin, haloklin ve piknoklin tabakaları genellikle birbiri ile çakışır. Bu tabakalar derin deniz deşarjı olan bölgelerde atıksu tarlasının konumu hakkında fikir verir. Yoğunluk tabakalaşması olan bölgelerde, batmış atıksu tarlası oluşur. Uniform yoğunluklu alanlarda ise atıksu tarlası su yüzeyine kadar çıkar (Öğüt, 1999).

2.1.1.3. Bulanıklık

Güneş ışınları deniz suyunun içinde hem absorbsiyon hem de dağılma yoluyla kayba uğrar. Bu nedenle, ancak belli derinliklere kadar güneş ışığı inebilmektedir. Bu derinlik güneş ışığının şiddetine, suyun bulanıklığına, alg ve benzeri mikroorganizmaların varlığına bağlı olarak değişir.

Deniz suyu çeşitli yapı ve boyutta inorganik ve organik katı maddeler ile çözünmüş maddeleri ihtiva eder. Deniz suyunun bulanıklığı plankton yoğunluğundan etkilenmektedir. Plankton yoğunluğuna bağlı olarak mevsimsel suyun renginde değişiklikler meydana gelir.

Bulanıklık laboratuarda turbidimetre ile ölçülür. Okyanuslar ve denizler gibi büyük su kütlelerinde bulanıklık seki diski ile ölçülür. Daire şeklindeki siyah ve beyaz renkteki disk gözden koybolacağı derinliğe kadar suya batırılır. Seki diskinin gözden kaybolduğu derinlik bulanıklığın başladığı derinliktir (Samsunlu, 2005). Ayrıca sıcaklığın, tuzluluğun ve bulanıklığın derinlik ile değişim profilleri tek bir cihaz yardımı (CTD probu) ile ölçülmektedir.

2.1.2. Deniz suyunun kimyasal özellikleri

2.1.2.1. Tuzluluk

Deniz suyu; çeşitli organik tuzları, organik maddeleri ve çözünmüş gazları içerir. Deniz suyunun tuzluluğunu oluşturan ana iyonlar sırasıyla Cl^- , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ 'dur. Deniz suyunda bulunan iyonların yüzde olarak miktarları Çizelge 2.1'de verilmektedir (Berkes, 1983). Deniz suyunda en yoğun olarak bulunan iyon %55 ile klorürdür. Denizlerde ve okyanuslarda tuzluluk ‰28 ile ‰40 arasında değişkenlik göstermektedir. Denizlerde ağırlık olarak ortalama tuzluluk ‰35'dir. Akdeniz'de de bu değer ‰35 civarlarındadır.

Çizelge 2.1: Deniz suyunda bulunan iyonların yüzde olarak miktarları.

İyonlar	Bulunma miktarı (%)
Cl^-	55,04
Na^+	30,61
SO_4^{2-}	7,68
Mg^{2+}	3,69
Ca^{2+}	1,16
K^+	1,1

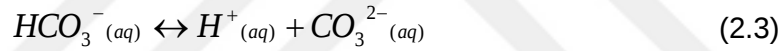
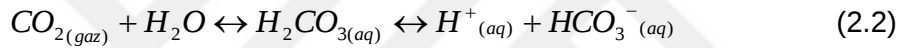
Tuzluluk; buzların erimesi, yağışlar ve akarsularla gelen tatlı suların deniz suyuna karışması sonucu azalırken, buharlaşma ve buzlanma ile tuzluluk artar. Tuzluluk su yüzeyinde sabit ya da derinlikle çok az değişen ve nispeten düşük tuzluluk oranına sahip bir yüzey tabakası, derinlerde ise değişim göstermeyen fakat yüksek tuz oranına sahip bir tabaka bulunur. Tuzluluğun derinlikle ani olarak değiştiği ara bir bölge vardır. Bu bölgeye haloklin tabakası adı verilir. Tuzluluğun gravimetrik yöntem

ile belirlenmesi, bazı tuzlarda sıcaklık ile yapısal değişiklikler meydana geldiğinden oldukça zordur. Genel olarak ölçüm metodu titrasyon ile klorürün ölçümüne bağlıdır. Deniz suyundaki klorür genel olarak tuzluluktan bağımsız olarak sabit bir oranda kaldığı için tuzluluğun belirlenmesinde kullanılır. Ölçülen klorür miktarından aşağıdaki ampirik ifade ile tuzluluğun miktarı hesaplanmaktadır (Başaran, 2015).

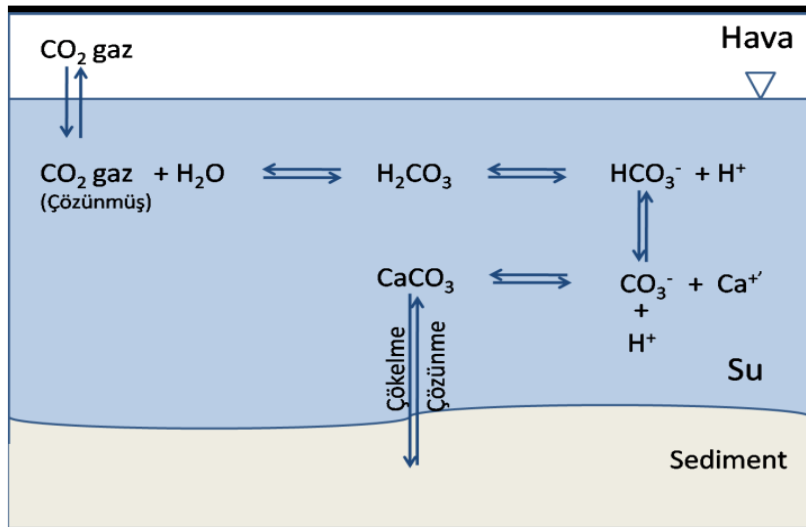
$$S = 1,80655 \text{ Cl}^- \quad (2.1)$$

2.1.2.2. pH

Doğal mineralizasyon içeriği olan sularda olduğu gibi pH, deniz suyunda da denklem 2.2 ve 2.3'teki CO₂ dönüşüm sistemine bağlıdır. Suda çözünen CO₂ ile atmosferdeki CO₂ arasında bir denge vardır. Deniz suyunun normal pH değeri 7,8-8,2 arasındadır. Bu değeri sudaki çözünmüş tuz ve CO₂ konsantrasyonu etkiler. Sudaki CO₂ konsantrasyonu arttığında suyun pH'ı düşmektedir. Bu yüzden gündüzleri fotosentez ile pH artmakta, geceleri ise pH düşmektedir.

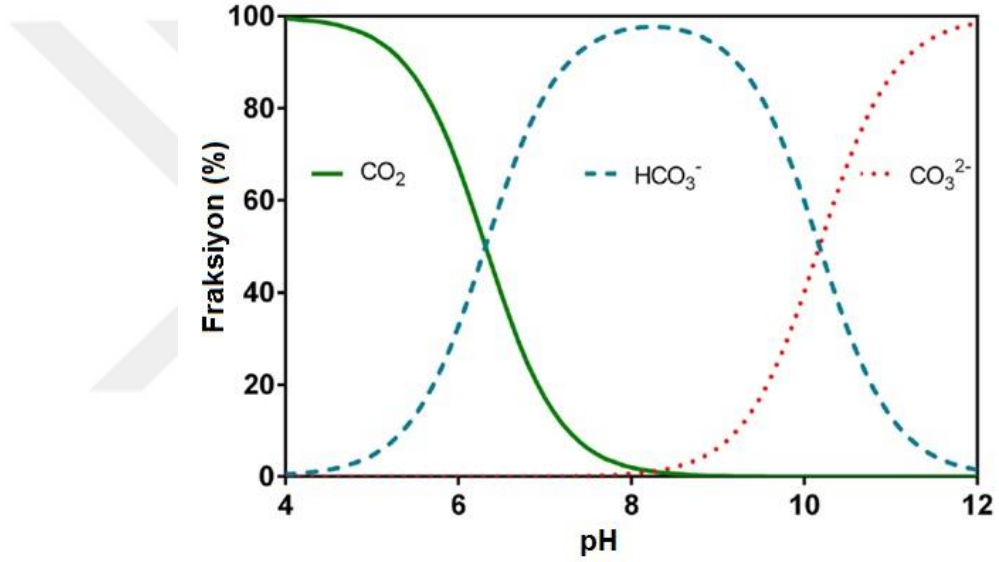


Sudaki HCO₃⁻, CO₃²⁻ ve H₂CO₃ oranı suyun pH'sına bağlı olarak değişmektedir. Deniz suyu hafif bazik karakterde olduğundan çözünen CO₂'nin çoğu HCO₃⁻ ve CO₃²⁻ şeklinde olup %88,9 oranında HCO₃²⁻ bulunur. Şekil 2.2'de CO₂ dönüşüm sistemi ifade edilmektedir (Başaran, 2015).



Şekil 2.2: CO₂ dönüşüm sistemi.

Denizde bulunan organizmaların çoğu, pH değişimlerine duyarlılık göstermektedir. CO_2 'in hızlı bir şekilde suda çözünbilme özelliği pH değerinin geniş aralıklarda dalgalanmasını önlemekte ve deniz suyu pH'ını 7,5-8,5 arasında tamponlanmaktadır. Reaksiyonlar sonucu, üretilecek veya tüketilecek H^+ iyonları deniz suyu pH'ında önemli bir değişime sebep olmamaktadır. Deniz suyunda H^+ iyonlarının azalmasıyla, pH artar. H_2CO_3 ortama H^+ iyonu vererek bazik hale gelecek suyu dengeler. Tam tersi olarak, deniz suyundaki H^+ iyonlarının artmasıyla, pH azalır ve denklem 2.2 ve 2.3'te verilen denge eşitliği sol tarafa doğru hareket eder. HCO_3^- iyonları H^+ iyonları ile birleşir ve tampon bir çözelti olan H_2CO_3 'e dönüşür. H_2CO_3 , suyun pH'sını normal seviyelerinde tamponlar (Başaran, 2015). İnorganik karbon türlerinin pH değerine bağlı olarak değişimi Şekil 2.3'de verilmektedir.



Şekil 2.3: İnorganik karbon türlerinin pH'a bağlı olarak değişimi.

2.1.2.3. Çözünmüş gazlar

Deniz suyunda gazların çözünürlüğü, tuzluluk ve sıcaklık ile azalır, basınç ile artar. Gazların deniz yüzeyinde dağılımı sıcaklık değişimi, dalgalar ve difüzyon gibi mekanizmalar ile sağlanır. Denizin derin bölgelerinde ise difüzyondan daha çok akıntı ve türbülanslar ile gazların dağılımı sağlanmaktadır. Deniz suyunda çözünen gazların başlıcaları O_2 , CO_2 , N_2 ve H_2S 'dir.

Bu gazların en önemlisi oksijen, suda serbest halde veya bileşik halinde bulunabilir. Canlılar için gerekli serbest oksijen deniz suyuna iki yolla girmektedir. İlk yol, doygunluğa bağlı olarak, havalandırma ile su yüzeyindeki oksijen transferidir. Dalgaların oluşturduğu köpükler ile çözünen oksijen, su kolonu içinde dağılır. İkinci

yol ise deniz suyunda bulunan fitoplankton, alg gibi canlıların güneş ışığı ile fotosentez yaparak oksijen üretmesidir.

H₂S, hareketsiz dip sularının bulunduğu denizlerde, organik maddenin deniz ortamında anaerobik çürümesi sonucu meydana çıkar (Samsunlu, 1995).

2.2. Gemi Kaynaklı Deniz Kirliliği

Gemi kökenli deniz kirliliği, oluşum durumuna göre rutin kirlenme ve kaza sonucu kirlenme olmak üzere iki ayrı grupta incelenebilir. Kaza sonucu kirlenme, gemilerin karaya oturması, çarpışması gibi kazalar sonucu oluşan deniz kirliliğine denilmektedir (Yiğit, 2006). Denizlerde oluşan rutin gemi kaynaklı kirlilik ise, sintine, kirli balast veya ambar/tank yıkama sularının denize boşaltılması, çöp ve katı atıkların denize atılması, güverte yıkanması sonucu oluşan yağ ve atıklar ile yıkamada kullanılan deterjanlı suyun denize basılması, gemi bordasında, denizi kirletecek ölçüde ve dikkatsiz şekilde raspa ve boya işlerinin yapılması, yük atıklarının denize dökülmesi, yakıt alımı, transferi ya da kargo yükleme-boşaltma transferi esnasında kazara ya da hata nedeniyle yakıtın taşma, sızma ya da devre patlaması sonucu yakıtın denize karışması, gemi makinesinin soğutma suyuna yağ karışarak soğutma suyuyla beraber denize deşarj olması, shaft sızdırmazlık yağının denize sızması, kapalı denizlerde, 15 ppm'in üstündeki sintine suyunun denize basılması, yaşam yerlerindeki kirli suların arıtılmaksızın denize verilmesi gibi nedenlerle ve diğer atıkların denize akması/düşmesi gibi nedenlerden oluşmaktadır (Çevik, 2004).

Gemilerde oluşan atıksular sintine, balast ve evsel nitelikli sular olmak üzere üç başlık altında incelenebilir. Gemilerde oluşan sintine, balast ve evsel atıklar özelliklerine göre sintine tankı, balast tankı ve pissu tankı olarak adlandırılan farklı tanklarda toplanır. Bu tanklar gemi içerisinde özel bölümler halinde, geminin alt kısmına ve birbirleriyle hiçbir bağlantısı olmayacak şekilde inşaa edilir. Bu düzen farklı karakterlere sahip üç tip atıksuyun birbirlerine karışmadan kendi karakterlerini koruyarak gemi içinde taşınmalarına olanak sağlar. İdeal bir durumda birbiriyle karışmayan bu atıksular, tanklarda meydana gelen sızıntılar veya gemi kazası meydana geldiği durumlarda birbiriyle karışabilir.

2.2.1. Sintine suyu

Gemilerde çalışan makine ve pompalardan sızan yağlar, temizlik suları geminin en alt kısmında bulunan sintine tankında biriktirilir. Sintine suları içerdiği yüksek yağ

konsantrasyonu nedeniyle önemli bir kirleticidir. Gemilerde oluşan sintine suyunun miktarı ve karakteri geminin yaşına, tonajına ve bakımına bağlıdır.

Sintine suyu, petrol, yağ, antifiriz, solvent ve tanklardan sızabilecek olan ham atıksu içerebilir. Atıksu pompaları, kinistin (geminin su altında kalan kısmında, deniz suyu almaya yarayan valfler), borulardaki çatlaklar ve sızıntılardan dolayı sintineye tuzlu su girişi de olabilir. Ayrıca gemide kullanılan deterjan, sintine temizleyicisi, boya gibi çeşitli maddeler de sintine suyu oluşumuna katkıda bulunur. Dolayısıyla yüksek kirlilik içeren bu atıksuyun yasal çerçevede uygun biçimde gemilerden alınması veya arıtma işlemini takiben deşarj edilmesi gerekmektedir.

Makine dairesinin sahip olduğu sıcaklık ve hava koşulları, sintine suyunun buharlaşmasını ve beraberinde yüksek nemi getirir. Bu durum makine ve parçalarının zamanla paslanmasına ve korozyona neden olur. Bu haliyle de zarara neden olan sintine suyu ivedilikle ortamdan uzaklaştırılmalıdır (Samsunlu, 1995).

Sintine suları, yüksek yağ konsantrasyonu sebebiyle deniz çevresine etkileri açısından çok önemli bir kirleticidir. Deniz suyunun yoğunluğu, yağın yoğunluğundan daha yüksektir. Bu sebeple yağ, deniz yüzeyinde bir film tabakası oluşturur. Bu film tabakası, deniz canlılarının ihtiyacı olan oksijenin su içine geçişine engel olmaktadır. Oksijen yetersizliği, duyarlı deniz canlıların varlığını sınırlandırmakta ve bu durum deniz ekosisteminin dengesini bozmaktadır. Su yüzeyini kaplayan yağ tabakası aynı zamanda güneş ışığının geçişine de engel olmaktadır. Fotosentez için gerekli güneş ışığını alamayan canlılar, besin üretimi yapamamakta ve bu durum deniz ekosistemi üzerinde olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. Fotosentezin gerçekleşmemesi ile de oksijen seviyesi düşük konsantrasyonlarda kalmaktadır (Öğüt, 1999).

Yağ tabakasının yarattığı bir diğer etki de, yağın deniz canlıların solungaçlarına yapışıp, onların solunum yapmalarını engellemesidir. Deniz kuşlarının tüylerine yapışıp uçmalarını engellemesi de canlıları etkileyen bir diğer faktördür (Öğüt, 1999).

2.2.2. Balast suyu

Balast suları, geminin dengesini sağlamak üzere denizden çekilen ve yine dengesini sağlamak üzere denize basılan sulardır. Gemiler, yüksüz oldukları zamanlarda, ağır olmadıkları için dalgadan ve rüzgardan daha fazla etkilenir. Bunun için, gemiler pervanenin daha çok suya girmesi, geminin suya biraz daha batırılarak, su altında kalan kısmının artırılması ile dengesinin sağlanması ve gemi yapı elemanlarına binen stresin azaltılması gibi amaçlar ile balast suyu taşır.

Gemiler balast suyunu dip kısmındaki ve yan taraflardaki tanklara alır. Yükünü boşaltan gemi, ağırlık kazanmak için pompalar ile denizden çektiği deniz suyunu tanklarına doldurur. Seyir sonunda gittiği limanda yükleme yaparken de taşıdığı deniz suyunu denize basar. İki liman arasındaki mesafe bazen binlerce mil olabilir. Ortalama olarak 200 bin tonluk bir gemi, her seferinde yaklaşık 60 bin ton balast suyu taşır.

Bir geminin kıyısız sulardan balast tanklarına aldığı deniz suyu çeşitli bakteriler, virüsler, patojenler, plankton türleri, küçük omurgasızlar, sporlar, yumurtalar, daha büyük türlerin larvaları ve yabancı türler içerebilir. Yabancı türler doğal yollar dışında, balast suları ile yeni ekosistemlere taşınmaktadır. Yabancı türler yeni girdiği ekosistemlerde uygun koşullar bulması durumunda (ışık, besin vb.) ekosistem dengesini olumsuz yönde etkileyerek yayılcı özellik göstermektedir (Öztürk ve diğ., 2001).

Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO), her yıl 50 milyar ton balast suyunun taşındığını tahmin etmektedir. Bu sularla birlikte bir günde 3000 kadar yabancı türün taşınmakta olduğu hesaplanmaktadır. Bu problemin çözümü için en iyi yöntem balast suyunun arıtılması veya kıyılardan alınan balast suyunun açık denizde değiştirilmesidir (Yönsel, 2014).



Şekil 2.4: Balast suyu değişimi.

2.2.3. Evsel atıksu

Evsel atıksular organik madde, besi maddeleri, askıda katı maddeler ve koliformca zengin olup, denize arıtılmadan deşarj edildiklerinde deniz ekosisteminde olumsuz etki yaratırlar. Organik maddenin ayrışması için oksijen kullanılır ve deniz canlıları için gerekli olan oksijen tüketilir. Askıda katı maddeler bulanıklığa sebep olur. Besi maddelerinin (N ve P) artması sonucu, özellikle su sirkülasyonunun az olduğu kıyısız sularda ötrofikasyon problemi ortaya çıkar. Yukarıda sayılan problemler özellikle limanlar, marinalar, koylar gibi yarı kapalı ekosistemlerde denizdeki tür sayılarının azalmalarına, zehirli alglerin oluşumuna neden olur. Bu alanların turistik ve

rekreasyonel kullanımları düşünüldüğünde konu daha da önem kazanmaktadır (Öğüt, 1999).

2.2.4. Kaza sonucu oluşan kirlilik

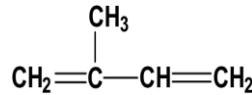
Sanayi devriminden sonra, birçok alanda kullanılan petrol, çıkarılmasından kullanılmasına kadar geçen her süreçte dünya yüzeyinde önemli çevre kirlenmelerine neden olmaktadır. Her yıl binlerce ton petrol, ihmallere, kazalar ve savaşlar sonucunda denize dökülür ve canlılarının hayatını olumsuz etkiler. Gemi kazaları, deniz yüzeyinde film tabakalarının oluşmasına sebep olur. Bu ham petrol ve türevleri deniz canlıları üzerinde toksik etki gösterir (Demiray, 2006).

2.2.4.1. Petrol ve özellikleri

Petroleum latince petr (taş) ve oleum (yağ) kelimesinden gelir. Yeraltında poroz ve poroz olmayan kayalar arasında bulunur. Petrol yapısında başlıca C,H ve eser miktarda N, O, S bulunur. Özgül ağırlığı kimyasal bileşimine ve viskozitesine göre değişir. Petrol endüstrisinde petrol özgül ağırlığı yerine API gravite derecesi kullanılır. API, petrolü viskozitelerine göre sınıflandıran uluslararası bir sistemdir. API gravite derecesi ile petrolün özgül ağırlığı ile arasında ters bir orantı vardır. Gravite arttıkça özgül ağırlığı azalmakta ve petrolün kalitesi yükselmektedir. Gravite küçüldükçe özgül ağırlık artmakta ve petrolün kalitesi düşmektedir (Millî Eğitim Bakanlığı, 2012).

$$API = \frac{141.5}{\text{Spesifik Gravite (60/60}^{\circ}F)} - 131.5 \quad (2.4)$$

Burada spesifik gravite petrolün 60° F'deki (15.5° C) yoğunluğunu ifade etmektedir. Petrol hidrokarbonları alifatik ve aromatik olmak üzere iki başlık altında incelenir. Bu bileşiklerin temel maddesi ise isoprenidir.



Şekil 2.5: İsoprenin yapısı.

Ham petrolün ise organik ve inorganik bileşiklerden oluşan karmaşık bir yapısı vardır. %80 ila %98 arasında sadece karbon ve hidrojenle oluşan hidrokarbonları içerir. Hidrokarbonlu olmayan kısım (heterosiklik) nikel ve vanadyum gibi ağır metalleri ve

azot, kükürt, oksijen içeren organik bileşikler içerir. Ham petrol çevresel etkisine ve akıbetine göre üç başlık altında incelenir.

Hafif ham petrol; bu hidrokarbon bileşikler en fazla 10 karbon atomu içerir. Kaynama noktaları 150°C'ye kadardır. Ilık koşullarda bir günde buharlaşır. %95'den fazlası suda çözünür. Toksik ve çözünen monoaromatik hidrokarbonları (benzen, tolüen, ksilen) içerirler. Buharlaştıkları için biyoakümüülasyon riskleri yoktur.

Orta ağırlıkta ham petrol; bu hidrokarbon bileşikler 10 ila 22 karbon atomu içerir. Kaynama noktaları 150-400°C arasındadır. Buharlaşmaları günler sürer. Ortam sıcaklığında bazı bileşikler buharlaşmaz. Suda az çözünür. İki aromatik halkaları vardır. Kolayca bozunabilen alkanları içerir. Alkanlar yüksek toksisite içerdikleri için organizmalar için büyük çevresel risk oluşturur.

Ağır ham petrol; 20'den fazla karbon atomu içerir. Yüksek kaynama noktası nedeniyle buharlaşmaz. Suda çözünmez. Potansiyel kronik toksisite içeren Polisiklik Aromatik Hidrokarbonları (PAH) içerirler. Sedimentte adsorpsiyon ile biyoakümüüle olur. Bozunma hızları çok düşüktür. Bundan dolayı kalıcıdır ve sedimentte en çok ağır ham petrol bileşikler bulunur (Dietrich ve diğ, 2014).

Kirlilik meydana geldikten sonra bütün petrol bileşikler arasında ekolojik olarak en toksik olanları kolayca dağılılabilenler, suda çözünenler ve uçucu olmayan bileşiklerdir.

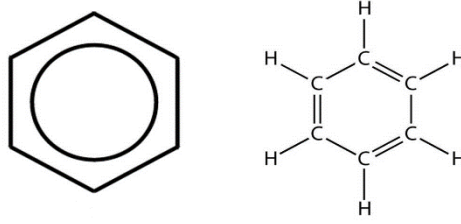
Alifatik grup petrol bileşikler

Bu grupta alkanlar ve alkenler yer alır. Alkanlar doymuş karbon hidrojen bileşikleridir. Bu grup tek karbonlu metan iki karbonlu etandan, 60 veya daha fazla karbon atomlu bileşiklere kadar uzanır. Bu bileşikler düz zincir veya dallanmış bir karbon yapısına sahiptir. Petrol yapısında düz zincirli bileşikler diğerlerine oranla daha çok bulunur. Düz zincirli grup, Metan, Etan, Propan, Bütan, Pentan, Hekzan, Oktan gibi bileşikler içerirler (Öztürk ve diğ, 2005).

Aromatik grup petrol bileşikler

Bunlar bir ve çok halkalı olabilir. Aromatik hidrokarbonlar bir veya daha çok benzen halkası ihtiva eder. Benzenin moleküler formülü C_6H_6 'dır. Benzene eklenen gruplar ile tolüen, ksilen ve naftalen gibi bileşikler elde edilir.

Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO) PAH'ın kontaminasyonu için suda tanıdığı limit, 0,2 µg/L'dir. PAH'lar genel olarak yüksek erime ve kaynama noktası, düşük buhar basıncı ve düşük çözünürlüğe sahiptir.



Şekil 2.6: Benzen.

PAH'lara örnek olarak; Naftalen, 1 ve 2 metil naftalen, 3.6 dimetil naftalen, 2.3.5 trimetil naftalen, asenaftilen, asenaften, fluoren, fenantren, metil fenantren, antrasen, metil antrasen, fluoranten, piren, benzo(a), krisen, benzo(b) ve benzo (k) fluoranten, benzo(e) ve (a) piren, perilen, dibenz (antrasen) antrasen, indenol (1.2.3 cd) piren, benzo (ghi) perilen verilebilir (Öztürk ve diğ, 2005). Bu bileşikler içinde en tehlikeli olanı benzo(a)pirendir ($C_{20}H_{12}$). Bu bileşiğin Toksisite Eşdeğer Faktörü (TEF) 1'dir. Benzo(a)pirenin TEF değeri 1 olduğu için, bu bileşik referans bileşik olarak kullanılır.

2.2.4.2. Tarihteki önemli tanker kazaları

'TORREY CANYON' isimli petrol tankerinin 1967 yılında Scilly Adaları'nda karaya oturması ve yaklaşık 120000 ton petrolün denize karışması insanoğlunun petrol kazalarına olan ilgisinin artmasına sebep olmuştur. Bu kazadan sonra MARPOL 1973 (Denizlerin Gemiler Tarafından Kirletilmesinin Önlenmesine Ait Uluslararası Konvansiyon) gündeme gelmiş ve CLC 1969 (Petrol Kirliliğinden Doğan Zararın Hukuki Sorumluluğu ile ilgili Uluslararası Sözleşme) gibi yeni kurallar oluşturulmuştur.

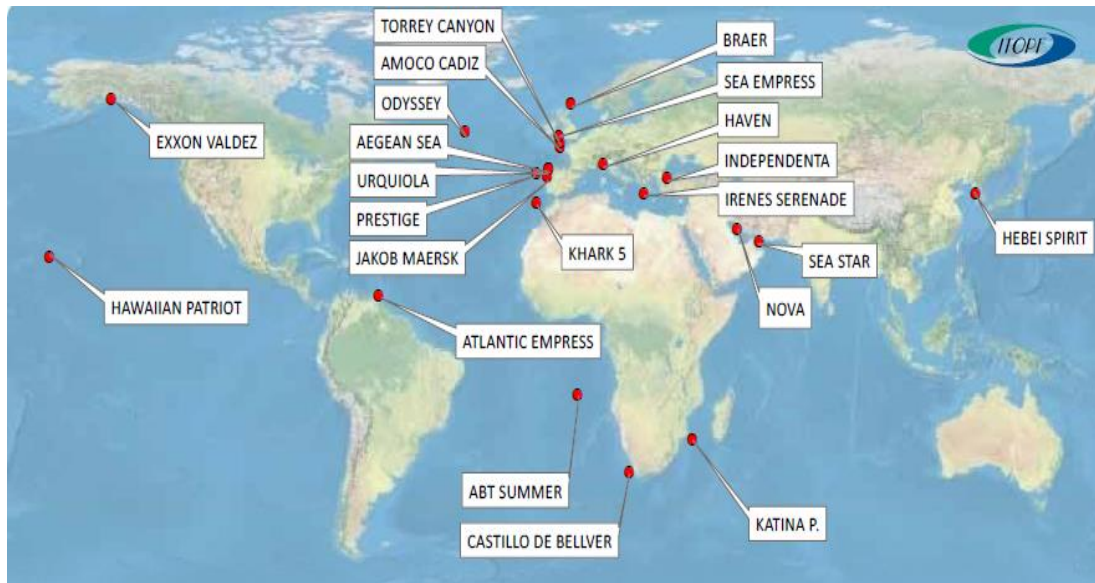
Çizelge 2.2'de kazaların kirlilik boyutuna göre sıralaması, meydana geldiği yıl ve bölge bilgileri, Şekil 2.7'de ise dünya haritasında kaza mevkileri verilmiştir (Uluslararası Tanker Sahipleri Kirlilik Federasyonu, 2015). Çizelgeden de anlaşılacağı üzere 20 kazanın 19'u 2000 yılından önce meydana gelmiştir. Bu kazaların çoğu büyük çaplı olmasına rağmen kıyıdan açıkta meydana geldiği için, çevreye ve kıyılara etkisi düşük seviyede olmuştur. EXXON VALDEZ ve HEBEI SPIRIT genel listede 35. ve 131. sırada olmalarına rağmen, etkileri ve kamuoyu tarafından bilinen kazalar olması sebebi ile gruba dahil edilmişlerdir. Çünkü bu iki kaza kıyıya çok yakın meydana geldiği için etkileri büyük olmuştur (Uluslararası Tanker Sahipleri Kirlilik Federasyonu, 2015).

Çizelge 2.3'de 1970 yılından 2009 yılına kadar kaza sayıları ve yüzdeleri verilmiştir. Çizelge hazırlanırken kirlilik boyutu 700 tondan fazla olan kazalar dikkate alınmıştır (Uluslararası Tanker Sahipleri Kirlilik Federasyonu, 2015). Çizelgeye göre 1970'li yıllarda %54 olan kaza yüzdesi, her on yılda azalarak 2000'li yıllarda %8 e düşmüştür. Kazaların azalmasına, navigasyon sistemlerinin gelişmesi, uygulamaya konulan

yasalar ve denizcilere verilen eğitim kalitesinin iyi seviyelerde olması sebep olarak gösterilebilir.

Çizelge 2.2: Büyük petrol kirliliği kazaları.

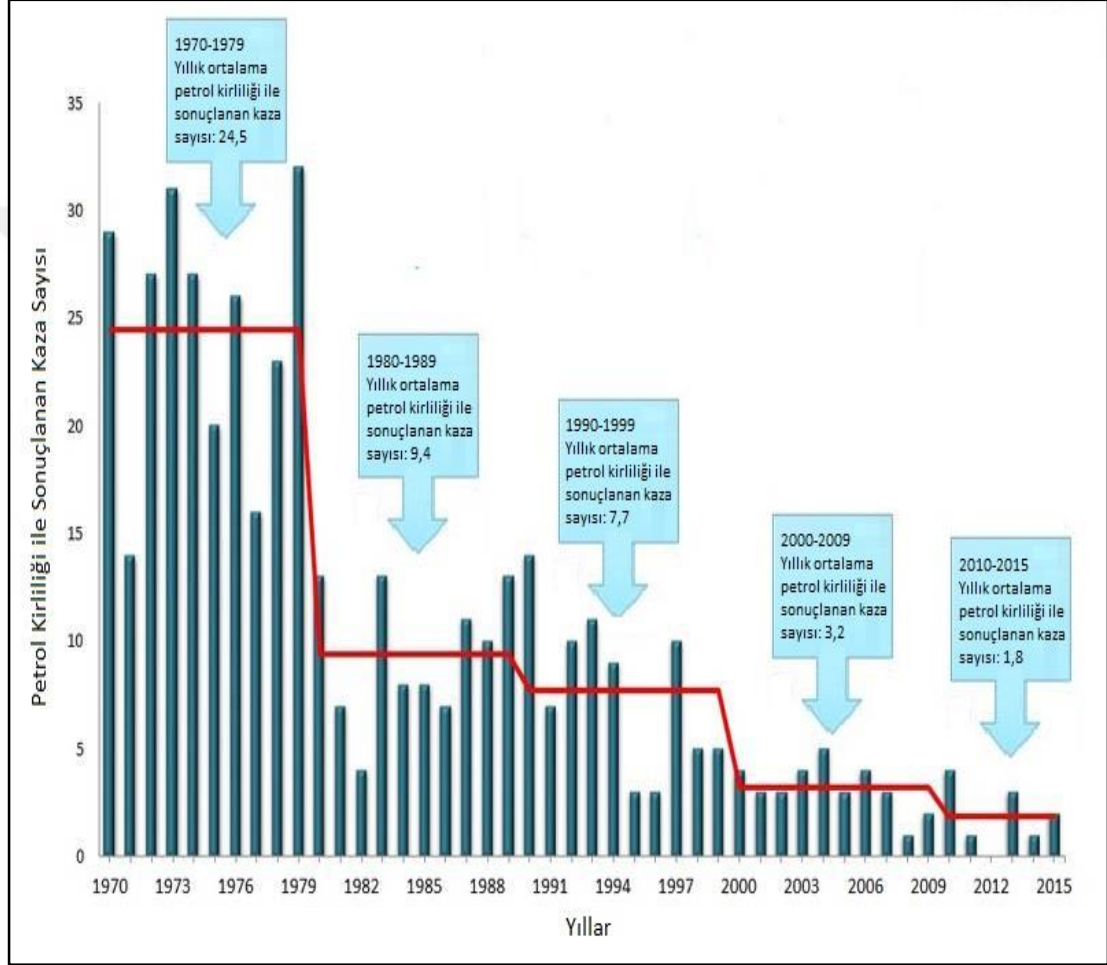
Sıra No	Gemi ismi	Yıl	Mevki	Miktar (ton)
1	ATLANTIC EMPRESS	1979	Tobago, Karayipler	287 000
2	ABT SUMMER	1991	Angola'nın 700 deniz mili açığı	260 000
3	CAST. DE BELLVER	1983	Saldanha Körfezi, Güney Afrika	252 000
4	AMOCO CADIZ	1978	Brittany, Fransa	223 000
5	HAVEN	1991	Cenova, İtalya	144 000
6	ODYSSEY	1988	Nova Scotia 700 mil açıkları, Kanada	132 000
7	TORREY CANYON	1967	Scilly Adaları, Birleşik Krallık	119 000
8	SEA STAR	1972	Umman Körfezi	115 000
9	IRENES SERENADE	1980	Mora Yarımadası, Yunanistan	100 000
10	URQUIOLA	1976	La Coruna, İspanya	100 000
11	HAWAIIAN PATRIOT	1977	Honolulu 300 deniz mili açığı	95 000
12	INDEPENDENTA	1979	İstanbul Boğazı, Türkiye	94 000
13	JAKOB MAERSK	1975	Porto, Portekiz	88 000
14	BRAER	1993	Shetland Adaları, Birleşik Krallık	85 000
15	AEGEAN SEA	1992	La Coruna, İspanya	74 000
16	SEA EMPRESS	1996	Milford Haven, Birleşik Krallık	72 000
17	KHARK 5	1989	Fas'ın 120 deniz mil açığı	70 000
18	NOVA	1985	Hark Adası, İran	70 000
19	KATINA P	1992	Maputo açıkları, Mozambik	67 000
20	PRESTIGE	2002	Galiçya açıkları, İspanya	63 000
35	EXXON VALDEZ	1989	Alaska, ABD	37 000
131	HEBEI SPIRIT	2007	Tae'an, Güney Kore	11 000



Şekil 2.7: Kaza mevkileri.

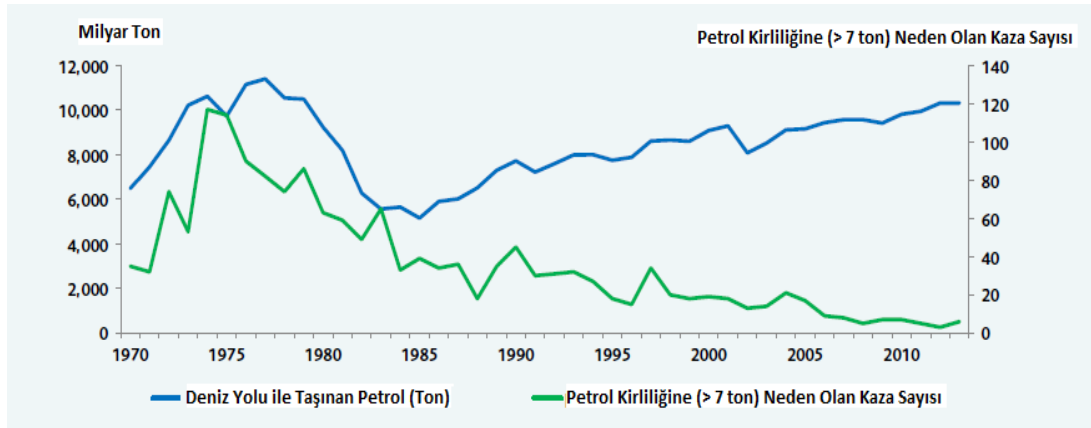
Çizelge 2.3: 10 yıllık periyotlar ile kaza dağılımı.

Tarih Aralığı	Kaza Sayısı	Kaza Sayısı %	Kirlilik Miktarı
1970-1979	245	%54	%56,0
1980-1989	94	%21	%20,6
1990-1999	77	%17	%19,8
2000-2009	35	%8	%3,6



Şekil 2.8: Yıllara göre petrol kirliliği ile sonuçlanan kaza sayısı.

Deniz yolu ile taşınan petrol miktarı artan enerji ihtiyacı ile birlikte 1985 yılından sonra artan bir eğilim göstermiştir (Şekil 2.9). Bu tarihten önce yaşanan petrol kirliliği sayısı (7 tondan büyük kirlilikler) ile taşınan petrol miktarı paralellik göstermiş, bu tarihten sonra ise taşınan petrol miktarı artmış, kaza sayısında ise düşüş meydana gelmiştir (Uluslararası Tanker Sahipleri Kirlilik Federasyonu, 2015).



Şekil 2.9: Deniz yolu ile yapılan ticaret ve 7 tondan büyük petrol kirlilikleri.

2.2.4.3. Petrol kirliliği risk metodolojisi

PAH'lar ve alifatik hidrokarbonlar genel olarak hidrokarbon kaynaklarını belirlemede kullanılır. Bu bileşikler petrol kirliliği meydana geldiğinde kirlilik tespiti için parmakizi analizinde belirteçlerdir. Aynı zamanda hidrokarbon kontaminasyonu ve petrol kirliliği bozunması hakkında bilgi verir.

Petrol hidrokarbonlarının birincil kaynağı antropojenik aktivitelerdir. PAH'lar ve alifatik hidrokarbonlar endüstriyel atıksu, kanalizasyon, yüzeysel akış, liman aktiviteleri, gemi trafiği ve petrol kirliliği ile deniz ortamına karışır. Çevre Koruma Ajansı (EPA) 16 adet PAH bileşiğini atıksuda birincil kirlenici olarak listelemiştir. Toprakta, yeraltı suyunda, tehlikeli katı atıklarda, sedimentte ise 24 adet PAH birincil kirlenici olarak belirlenmiştir. PAH'lar petrojenik, pirolitik veya biyojenik orjinli olabilir. Alifatik hidrokarbonlar ise petrojenik veya biyojenik orjinli olabilir. Alifatik hidrokarbonlar n-alkanlar, dallı alkanlar, izopreneoidler ve siklik bileşikler içerir (Nemr ve diğ, 2013).

Bu bileşikler direkt maruz kalma ve biyoakümülyasyon sonucu sucul canlıları ve insan sağlığını tehdit eder. PAH'lar suda az çözünür (yüksek oktanol su ayrılma katsayısı). Bu bileşikler askıda katı maddelere adsorbe olma ve sedimentte çökme eğilimindedir. Ayrıca anoksik koşullarda mikrobiyal bozunmaya karşı da direnç gösterir. Sedimentte çöken PAH'lar askıdaki sedimentlere bağlanırlar ve sedimentteki organizmalar için uygun hale gelir. Organizmalar (midye ve yumuşakça) tarafından alınan bileşikler biyoakümüle olur. Kontamine olmuş organizmaların insanlar tarafından tüketilmesiyle, PAH'lar insan vücudunda birikir (Sany ve diğ, 2014).

PAH'ların ekotoksikolojik potansiyel riski, denklem 2.5 ile hesaplanır.

$$RQ = C_{PAHs} / C \quad (2.5)$$

Bu denklemde C_{PAHS} ortamdaki PAH konsantrasyonunu C ise PAH'ların o ortamdaki referans değerini temsil eder. $RQ < 1$ olduğu durumlarda risk yoktur. $RQ > 1$ riskin olduğu durumu işaret eder.

Risk değerlendirmesinde bir diğer yaklaşım TEL (eşik düzeyi etkisi) ve PEL (olası etki düzeyi) yaklaşımıdır. TEL değerinin altındaki konsantrasyonlarda yan etkinin düşük olasılıkla meydana gelmesi beklenmektedir. PEL değerinin üstündeki konsantrasyonlarda ise sıklıkla yan etkinin oluşacağı beklenmektedir (MacDonald ve diğ, 2000).

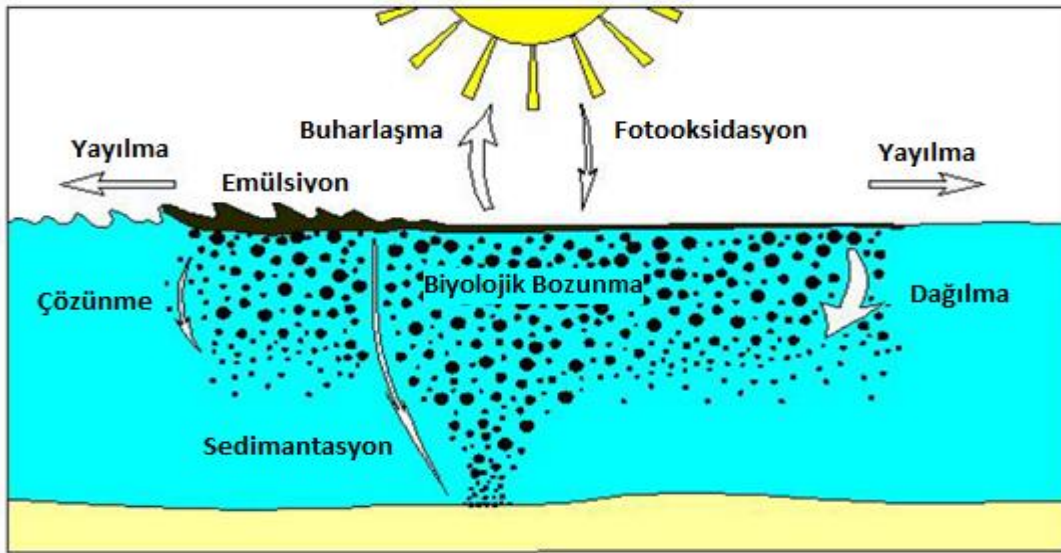
Kıyısularda petrol kirliliğinin risk değerlendirmesini yapmak oldukça zordur. Çünkü bu alanlar noktasal olmayan kaynaklardan, gemi aktivitelerinden, karasal deşarjlardan yoğun olarak etkilenirler. Diğer bir sınırlama ise bazı kıyısulardaki güçlü akıntılardır.

2.3. Petrolün Denizdeki Akıbeti ve Taşınımı

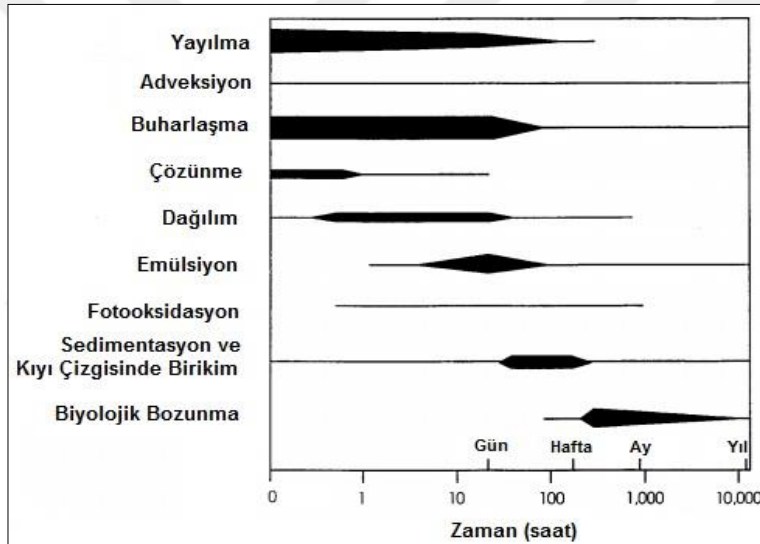
Petrol ve petrol türevleri genellikle deniz suyundan daha az yoğundur ve denize döküldükten sonra deniz yüzeyinde yayılarak bir film tabakası oluşturur ve rüzgar ve akıntı etkisi ile uzak mesafelere dağılır.

Genellikle petrol ve petrol türevi kirleticilerin kıyısul alanlarındaki akıbeti ve taşınımı, petrol özelliklerine, hidrodinamik koşullara ve çevresel koşullara bağlıdır. Esas olarak dağılım fiziksel, kimyasal ve biyolojik olayların etkisi altında gerçekleşir. Bu olaylar buharlaşma, yayılma, dağılma, oksidasyon, çözünme, biyolojik bozunma, emülsifikasyon ve sedimentasyondur. Petrol kirliliğinin başlamasından çok uzun bir zaman sonra kimyasal ve biyolojik olaylar meydana gelmektedir. Kırılan dalgaların ve su derinliğinin yüzey tabakalarındaki türbülansın etkisi altında petrol kirlilik bulutu küçük parçalara bölünür ve daha sonra su derinliği boyunca ve alansal olarak ilerleyerek dağılır ve yayılır. Petrol parçacıkları su kolonu içinde uzun süre kalabilir ve yüzey sularından daha derindeki su tabakalarını da kirlitebilir (İnan, 2011).

Kirlilik ister su yüzeyinde ister su kolonunda olsun, yüzeyde yüzen bir film tabakası ile su kolonunda askıdaki petrol parçacıkları arasında sürekli bir geçiş vardır. Denizde petrolün akıbeti ve taşınımını; rüzgar ve akıntıdan dolayı adveksiyon, türbülans, eylemsizlik, viskoz ve yüzey gerilme kuvvetlerinden dolayı yatay yayılım, kütle transferi, bozunma prosesleri ve fizikokimyasal özelliklerde değişimlerden dolayı emülsiyonlaşma kontrol eder.



Şekil 2.10: Petrolün akıbeti ve taşınımı.



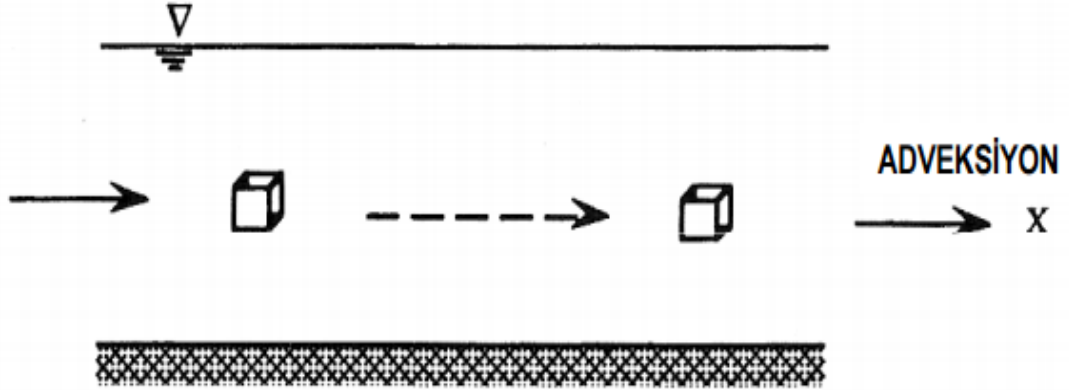
Şekil 2.11: Denize dökülen petrol ürünlerinin akıbeti (Scholz ve diğ., 1999).

2.3.1. Adveksiyon

Adveksiyon, bir maddenin hareket eden bir akışkan ile taşınma mekanizmasıdır. Adveksiyon maddeyi bir noktadan başka bir noktaya taşır. Adveksiyondaki akışkan matematiksel olarak bir vektör alanını, taşınan cisim ise maddenin skaler bir konsantrasyonunu temsil eder. Adveksiyon akımdan kaynaklanır ve taşınan maddenin içeriğini değiştirmez.

Adveksiyon; yüzeydeki ve yüzeyaltındaki petrolün sürüklenmesini içeren fiziksel bir süreçtir. Petrol dökülmesinden sonra petrolün konumunu yöneten ana mekanizmadır. Yüzeydeki petrolün adveksiyonu, petrol üzerindeki yüzey akıntıları ve rüzgar sürütmesi etkilerinden kaynaklanır. Yüzey akıntıları büyük ölçüde rüzgar

şartlarından etkilenir. Askıdaki petrol parçacıkları, su kolonundaki su akıntılarından dolayı sürüklenir.



Şekil 2.12: Adveksiyon mekanizması.

Petrol döküldükten sonra ilk olarak su yüzeyinde yüzer ve taşınımı yüzey akıntıları, rüzgar ve dalga alanları ile kontrol edilir. Rüzgar, akıntı ve dalga arasındaki etkileşim dikkate alındığında su akıntılarının yapısı kompleks ve üç boyutludur. Çoğu petrol kirliliği modelinde basitleştirilmiş süperpozisyon tekniği kullanılarak kirlilik hareketi yaklaşımı hesaplanmaktadır. Bu yaklaşımda petrol tabakası için taşınım hızı; ortalama debi, gelgit, rüzgar, dalgalar ve türbülans difüzyonu tarafından endükte edilen taşınım vektörlerinin toplamının kullanılması tarafından temsil edilir. Ortalama akış ve gelgitsel akıntı bilgileri gözlemlerden veya ilgili bölgenin hidrodinamik modelinden hesaplanır. Rüzgar ve dalgalar tarafından oluşturulan akıntılar normalde birlikte toplanır ve ampirik temele dayanan sürüklenme faktörü, rüzgar hızı ve yönüne bağlı olan sapma açısı ile temsil edilir.

Petrol deniz çevresinde yatay olarak rüzgar, dalga ve akıntı kuvvetlerinin etkisinde hareket eder. Petrol, akışkan olması ve kısmen sudan daha yoğun olmasından dolayı çeşitli damlacık boyutu formlarında su kolonunda dikey olarak taşınır. Denizdeki petrolün net hareketinde yatay ve dikey akıntılar önemli bir faktördür.

Yüksek güçlü hesaplama araç imkanlarının artmasıyla, araştırmacılar sofistike üç boyutlu modeller kullanarak petrol kirliliğinin modellenmesi için akıntı alanlarını tanımlamışlardır. Bu yaklaşımda ortalama, gelgitsel ve rüzgar tarafından endüklenen akıntı bir hidrodinamik model kullanılarak eş zamanlı olarak tahmin edilmektedir. Bu yaklaşımın avantajı, çeşitli akış bileşenleri arasındaki etkileşimi doğru olarak resmedilebilmesidir. Bu modeller aynı zamanda akış alanının uzamsal ve zamansal yapısını doğru bir şekilde resmetme kabiliyetine sahiptir (Akan, 2007).

2.3.2. Yayılma

Yayılma, petrol film tabakasının yatay düzlemde yerçekimi, eylemsizlik, viskozite, arayüzey gerilimi gibi mekanik kuvvetlerle ilerlemesidir. Yayılma, kirliliğin başlangıç evrelerinde film tabakasının taşınımında önemli bir prosestir. Film tabakasının kütle ve fizikokimyasal özelliklerini değiştirme eğiliminde olan bozunma proseslerinden, yayılma prosesi etkilenir. Serbest yüzey koşullarında petrol film tabakası alanı, buharlaşma ve çözünme gibi bozunma proseslerinden kuvvetli bir şekilde etkilenir. Bundan dolayı bu tabakanın alanı ve kalınlığı, petrol bozunumu ve taşınımında anahtar değişkenlerdir (ASCE, 1996).

Yayılmada en çok kullanılan modeli Fay (1969) önermiştir. Yayılma en iyi üç fazda tanımlanabilir. Bunlar viskozite, eylemsizlik ve yüzey gerilmesidir. Eylemsizlik fazını yerçekimi kuvvetleri, viskoz fazını yerçekimi ve viskozite kuvvetleri ve yüzey gerilme fazını yüzey gerilme yayılımı yönetir.

Deneyisel çalışmalar, viskoz petrolün daha az viskoz olan petrole göre daha yavaş yayıldığını göstermiştir. Doğal koşullar altında petrolün yayılması, terminal tabaka kalınlığına ulaşıldığında durmayacaktır. Bu noktada petrol film tabakası, dalga ve akıntı hareketinden dolayı küçük parçalara ayrılma eğiliminde olacaktır. Bu küçük parçalar okyanus türbülansından dolayı yayılacaktır (Reed ve diğ, 1999).

Petrol kaynağından belli bir mesafeye rüzgâr sonucu oluşan akıntı ile taşınacaktır. Kaynaktan belli bir mesafeye kadar yayılımı, yanal yayılım kuvvetleri kontrol eder. Film tabakası ekseni boyunca olan yayılım kuvvetleri ise ihmal edilir.

2.3.3. Buharlaşma

Çoğu petrol kirliliğinde buharlaşma, kütle dengesi açısından önemli proseslerden biridir. Denize karışan petrolün 12 veya daha az karbon atomu içeren hidrokarbonları yüzeye yayılmış film tabakasından hızlı bir buharlaşmaya uğrarlar. Kirliliği takip eden birkaç gün içinde hafif ham petrolün başlangıç hacminin %75'i, orta ağırlıktaki ham petrolün %40'ı buharlaşabilir. Ağır ham petrolün ise %10'undan fazlası buharlaşmaz. Önemli bir proses olmasına rağmen, petrol kirliliğindeki buharlaşmanın temel fizik ve kimyasıyla ilgili çok az çalışma yapılmıştır. Çünkü petrol yüzlerce bileşiğin karışımıdır ve bu karışım kaynaktan kaynağa hatta zamanla değişmektedir (Fingas, 2004). Buharlaşma su hareketlerine bağlıdır. Kuvvetli su hareketleri ile buharlaşma artar. Oluşan petrol kabarcıklarının patlaması sonucunda yüzey alanı artar ve buna bağlı olarak buharlaşma hızı da artar.

Ham petrol buharlaşmasının tanımı, kütle transfer katsayılarının, rüzgar hızının ve kirlilik alanının bir fonksiyonu olarak alınması ile yapılabilir (Mackay ve Stiver, 1984). Bu tanımlama daha da geliştirilerek uçucu molar akı, rüzgar hızındaki kütle transfer katsayısı, kirlilik alanı, buhar basıncı, gaz sabiti ve sıcaklık arasındaki ilişki dahil edilmiştir.

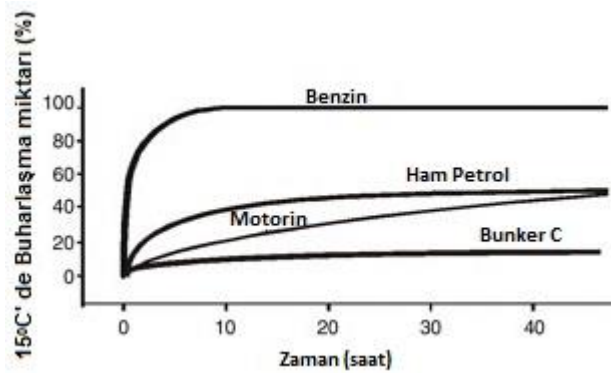
Daha önceki çalışmalarda sınır tabakası düzenlemesi, petrolün buharlaşması için birincil mekanizma varsayılmıştır. Bu varsayım deneysel olarak hiç test edilmemiştir. Sonra Fingas (1995) bu sınır tabakası düzenlemesinin yüzey film tabakasında ince katmanda petrol buharlaşması için ihmal edilebilir seviyede olduğunu göstermiştir. Buharlaşma modellerinde basit bir denklem kullanılabilir:

$$\text{Buharlaşan yüzde} = C (T) \ln (t) \quad (2.6)$$

C bir sabit olup temel damıtma verisinden, ampirik olarak hesaplanır veya tahmin edilebilir. T sıcaklık verisi olup, t ise zamanı temsil eder. Çoğu petrol ürünü için ampirik denklemler hesaplanmıştır ve denklem parametreleri buharlaşan petrol için deneysel olarak bulunmuştur.

$$\text{Buharlaşan yüzde} = 0.165 (\text{Yüzde D}) \ln (t) \quad (2.7)$$

Yüzde D ağırlık olarak 180°C'de damıtılan petrolün yüzdesini ve t dakika olarak zamanı temsil eder. Bu denklem petrol buharlaşması için kullanılabilir. Şekil 2.13'de farklı petrol ürünlerinin kontrollü şartlarda deneysel olarak elde edilen buharlaşma oranları verilmektedir (Fingas, 2000).



Şekil 2.13: Farklı petrol ürünlerinin 15°C'deki buharlaşma hızları.

2.3.4. Dağılım ve karışma

Yüzey petrolünün dağılımı, yapışık halde bulunan petrol tabakasının küçük damlacıklara ayrılması ve damlacıkların su kolonuna difüzyonunu tanımlar. Dağılım,

100 μm 'den küçük petrol damlacıklarının su kolonu içine hareketini içerir. Büyük damlacıklar ise su yüzeyine hızlı bir şekilde yükselirler. Dağılımın hızı deniz durumu gibi çevresel faktörlere, petrol film tabakasının kalınlığına ve petrolün özelliklerine (yoğunluk, yüzey gerilim ve viskozite) bağlıdır (Reed ve diğ, 1999).

Küçük ölçekli türbülans eddyleri, petrolün küçük damlacıklar içine dağılmasından sorumludur. Dağılan petrolün damlacık boyutu dağılımı, petrolün akıbetini etkiler. Çünkü dağılımın stabilitesi, biyolojik bozunma ve çözünme proseslerinde açıklanacağı gibi damlacık boyutuna bağlıdır. (ASCE, 1996).

Delvigne (1993), su kolonunda dağılma için farklı kanal testlerine, tank testlerine ve deniz ölçümlerine dayanan bir seri model geliştirmiştir. Bu modeller ampirik olarak kullanılmaktadır. Bu modeller dalga enerjisinin kırılmasına, petrol tipine, sıcaklığa ve film tabakası kalınlığına dayanmaktadır. Çeşitli koşullar altında model başarıyla uygulanmıştır.

Tkalich ve Chan (2002), petrol damlacık karışımının matematiksel bir modelini geliştirmişlerdir. Su kolonu ve film tabakası arayüzeyindeki dikey değişimi tanımlamak için kırılan dalgaların kinetik yaklaşımını kullanmışlar ve katsayıların ve parametrelerin çoğu tek bir 'karışma faktörü' olarak birleştirilmiştir.

2.3.5. Çözünme

Çözünme, petrol bileşiklerindeki moleküllerin su fazına geçişini temsil eder. Petrol ve türevlerinin molekül ağırlığı azaldıkça ve polaritesi arttıkça suda çözünürlüğü artar. Çözünme olayı sayısal modellerde genellikle hesaba katılmaz. Çünkü petrol bileşiklerinin su yüzeyinde çözünmesinin, kütle dengesindeki etkisine bakıldığında % 1'den daha az seviyelerde olduğu bilinmektedir. Buna karşın bu yüzde toksikolojik etki açısından yüksek bir yüzdendir. Çünkü en çok çözünen bileşikler genelde en çok toksik olanlardır.

Çözünmenin fiziksel süreci iyi bilinmektedir, fakat petrol kirliliğinde bu süreci tanımlamak, petrol kompozisyonunun yüzlerce bileşik içermesinden ve tek bir bileşiğin çözünmesini spesifik-bileşik parametrelerle tanımlama gerekliliğinden dolayı oldukça zordur (ASCE, 1996).

Çözünmenin modellenmesi, su kolonundaki çözülmüş bileşiklerin konsantrasyonunu tahmin etmeye dayalıdır. Fakat bazı modeller dağılım ve çözünmeyi ayırma da başarısız olur. Petrol kirliliği modellerinde çözünmenin genellikle hemen meydana geldiği varsayılır (Hibbs ve diğ, 1999). Bazı modeller, su kolonundaki petrol partikül

büyükülüğünün etkisini hesaba katar ve modelin kinetik hareketini oluşturmak için bu parametreyi kullanır (Mackay ve diğ, 1991).

Brookman ve diğ. (1985) suda çözünen petrol bileşiklerini tanımlamışlardır. Sudaki petrol bileşiklerinin çözünürlüğü petrolün kompozisyonuna bağlı olarak değişmektedir. Çizelge 2.4'te ham petrolde yaygın olarak bulunan aromatik hidrokarbon bileşiklerinin çözünürlüğü verilmektedir.

Çizelge 2.4: Bazı aromatik petrol bileşiklerinin çözünürlükleri.

Bileşik	Çözünürlük (mg/L)
Benzen	1700
Toluen	530
Etilbenzen	170
Ksilen	150
Naftalin	30
1-Metil Naftalin	28
1.3-Dimetil Naftalin	8
1,3,6-Trimetil Naftalin	2
Fenantren	1
Fluoren	2
Dibenzotiyofen	1,1
Krizen	0,002

2.3.6. Emülsiyon

Denize karşı petrol hidrokarbonları su içerisinde bulunan yüzey aktif maddelerinin yardımı ile iki tip emülsiyon oluşturur. Bunlar su içerisinde petrol emülsiyonu veya petrol içerisinde su emülsiyonu olabilir. Türbülans enerjisi, küçük su damlacıklarının petrolün içine karışmasını sağlayabilir.

Emülsiyon, dökülen petrolün özelliklerini ve karakterini büyük ölçüde değiştirir. Stabil emülsiyonlar ortalama olarak %60 ila %85 oranında su içerir. Bunun anlamı dökülen petrolün hacminin üç ila beş kat oranında artması demektir. Viskozite büyük ölçüde emülsiyon ile artar. Bu artış sıvı petrol ürünlerinin daha ağır ve yarı-katı materyale dönüşmesine sebep olur (Ulusal Araştırma Konseyi Raporu, 2002).

Emülsiyonun sonucunda, buharlaşma yavaşlar, petrolün su kolonundaki hareketi yavaşlar ve rüzgara karşı farklı sürtünme kuvveti gösterir.

Stabilite, petrol içindeki su emülsiyonlarında önemli bir karakterdir. Emülsiyonun stabil olup olmadığı diğer özellikler hesaba katılmadan önce karakterize edilmelidir. Çünkü özellikler her bir tip emülsiyon türü için değişmektedir. Dört tip emülsiyon stabilite tipi

mevcuttur. Bunlar stabil, yarı stabil, stabil olmayan ve hapsolmuş sudur (Ulusal Araştırma Konseyi Raporu, 2002).

Fingas ve diğ. (1999) emülsiyon modellerinde ampirik verilerin kullanılmasını önermiştir. SINTEF petrol bozunma modelinde uygun viskozite kullanılarak, dağılım hesaplanır.

2.3.7. Sedimentasyon ve kıyı çizgisinde birikim

Deniz suyu yoğunluğundan daha düşük yoğunluğa sahip petrol ve türevlerinin deniz yüzeyine yayılması ile katran yumruları, emülsiyon veya çökelti oluşur. Petrol ve türevleri çözünme ve buharlaşma olayları ile düşük molekül ağırlıktaki bileşikler kaybederler ve yeni mineral maddelerle birleşirler. Yüzeyine yeni mineral maddeler alan petrol ve türevleri yoğunluğu artar ve buna bağlı olarak da dibe doğru çöker.

Çözünme, ayrışma, buharlaşma ve oksidasyon olayları sonucunda oluşan yeni ürünlerin yaklaşık olarak yarısı katran yumrularıdır. Bu katran yumruları ise su yüzeyinde taşınır. Oluşan katran yumrularının daha ileri seviyede bozunması sonucu yoğunluğu büyük olan ve boyutu küçük olan bileşikler meydana gelir. Bu bileşikler de sudan daha yoğun oldukları için dibe doğru çöker (Ulusal Araştırma Konseyi Raporu, 2002).

Kıyı kesimlerdeki suyun türbülansı dipteki sediman tortularını süspansiyon ile tekrar su kolonuna çıkmasını sağlayabilir. Bu tortuların petrol partikülleri ile birleşmesi ve yapışması sonucu petrol-sediman kütlesi oluşur ve bu kütle tekrar dibe çöker.

Kaza meydana geldikten sonra petrol, kıyı çizgisinde yığılarak birikebilir. Bu biriken petrol sedimentasyona uğrayan petrol hacminde artışa yol açar. Kıyı çizgisinde birikimi, kirliliğin meydana geldiği noktanın kıyıya uzaklığı, akıntı kuvveti, dalga hareketi ve petrolün kararlılığı etkiler. Kıyıya doğru esen rüzgar petrol film tabakasını kıyıya doğru hareket etmesine neden olur.

2.3.8. Fotooksidasyon

Yüzeydeki petrol ve petrol türevleri oksijen ve güneş ışığı ile oksidasyon reaksiyonları ile bozunur. Fotooksidasyon 300 nm'den küçük kısa dalga boylu ışık altında hızlı gerçekleşir. Bu reaksiyonlar doğrudan ve dolaylı fotooksidasyon reaksiyonlarını içerir. Doğrudan fotooksidasyonda tepkimeye giren madde doğrudan ışık enerjisini absorblarken, dolaylı fotooksidasyonda çözelti içindeki diğer kimyasal türler ışık enerjisini absorblar. Fotooksidasyon için radyasyon ve ışık absorblayıcı moleküller (kromosfer) gereklidir. Çok az petrol hidrokarbonları güneş ışığını absorblayabilir. Bu nedenle fotooksidasyon genellikle dolaylı olarak gerçekleşir. PAH'ların

fotooksidasyonu, PAH'lardan moleküler oksijene elektron transferi ile olur (Sigman, 1998). Hümik ve fülvik asitler, PAH'ların dolaylı fotooksidasyonunda önemli bir rol oynayabilirler. Bu asitler ışık enerjisini yakalayarak hidroforik PAH'ları konsantre ederler.

Fotooksidasyon sonucu oluşan ürünler, tepkimeye giren ürünlerden daha toksik olabilir. Buna karşın fotooksidasyon çözünmüş petrol hidrokarbonların giderilmesinde önemli bir rol oynar. Alifatik ve aromatik petrol bileşikleri güneş ışığı ile oksidasyon sonucu daha polar olan ketonlara, aldehitlere, karboksil asitlere ve esterlere dönüşürler. Bu ürünler suda daha çok çözünür. Bu çözünmüş ürünler dolaylı veya doğrudan fotooksidasyon ile tekrar reaksiyona girebilir. Tersine, fotooksidasyon yüksek moleküler ağırlıklı ürünlerin oluşumuna da sebep olabilir. Peroksit ara ürünlerinin yoğunlaşması ürün olarak katran ve zift tortularının oluşmasına neden olur (Ulusal Araştırma Konseyi Raporu, 2002).

Fotooksidasyon; maruz kalınan güneş ışığı şiddetine ve spektrumuna, petrol hidrokarbonları ve diğer partikül ve çözünmüş maddeleri ile modifiye olmuş yüzey suyunun optik özelliklerine, hidrokarbonların optik özelliklerine bağlıdır. Petrol hidrokarbonlarının fotooksidasyonun modellenmesi oldukça komplekstir. Çünkü yüzey filmi, etkiyen güneş ışığı şiddetini ve spektrumunu değiştirir (Ulusal Araştırma Konseyi Raporu, 2002).

2.3.9. Biyolojik Bozunma

Deniz ortamında genel olarak iki biyolojik ayrışma prosesi vardır. Bu iki ayrışmanın metabolik yolları aynı olup, son noktaları farklıdır. Birinci proseste enerji üretmek için hidrokarbonlardaki karbon kullanılır. Bu proseslerden, mantarlar, bakteriler ve heterotrof planktonlar sorumludur. Bu proses oksidatif fosforilasyon veya solunum olarak anılır ve enerji üretmek için en çok tercih edilen prosestir.

Diğer metabolik proses ise detoksifikasyondur. Petrol ve petrol türevlerine maruz kalan organizma, hidrokarbonu daha suda çözülebilir bir forma metabolizma yolu ile dönüştürerek boşaltım yapar.

Alkanlar ve siklik hidrokarbonların degradasyonu sonucu CO₂ ve H₂O üretilir. Dallı alkanlar ve çoklu siklik (polisiklik aromatik ve alifatik) gibi daha kompleks hidrokarbonların degradasyonu çoklu bakteriyel metabolik süreç gerektirir (Sugiura ve diğ, 1997). Kükürt ve azot içeren polar petrol bileşikleri biyolojik bozunmaya karşı en çok direnç gösteren ürünlerdir (Prince, 1993). Çünkü bu bileşiklerin suda çözünme oranları yüksektir.

Biyolojik bozunmanın hızı organizmaların petrol ve türevleri ile etkileşimlerine ve metabolizmalarına bağlıdır. Oksijen konsantrasyonu, besi maddeleri, ışık, sıcaklık, tuzluluk ve basınç gibi çevresel faktörler, petrolün fiziksel özellikleri ve çevrenin enerji düzeyi gibi etmenler biyolojik bozunmanın hızını etkiler. Düşük sıcaklıklarda petrolün vizkozitesi ve suda çözünürlüğü artar bu da mikrobiyal bağlanmayı sınırlar. Ek olarak toksik-kısa zincirli hidrokarbonların uçuculuğu azalır ve bu mikroorganizmalar için zararlı olabilir. Aynı zamanda sıcaklık enzimatik aktiviteyi de etkiler. Her 10°C’de enzimatik aktivite yaklaşık olarak iki kat azalır ya da artar (Ulusal Araştırma Konseyi Raporu, 2002).

2.4. Petrol Kirliliği ile İlgili Modeller

Gemi kazaları sonucu denize yayılan petrolün hareketini tahmin etmek çevresel açıdan çok önemlidir. Petrol tabakasının hareketine istinaden yapılacak etkin ve doğru müdahale çalışmaları ile çevresel risklerin en aza indirilmesi deniz ekosistemi açısından kuşkusuz yararlı olacaktır. Bu kapsamda kaza sonrası denize karışan petrolün hareketini tahmin etmek için birçok model geliştirilmiştir.

Bu modeller iki boyutlu veya üç boyutlu olabilmektedir. Çoğu modeller kullanıcı dostu arayüze sahiptir. Bu modeller son teknoloji algoritmalarla petrol kirliliği prosesleri fizikini tanımlarlar. Buna karşın fiziksel süreçler tam olarak anlaşılamamıştır ve bu süreçler birçok bilimsel ve sayısal sınırlamaya tabidir. Bu sebeple deneyimli personel sonuçları yorumlamalıdır. Hesaplamalı modellerin her zaman petrolün akıbeti ve taşınımını doğru olarak simüle edemeyeceği gerçeğine rağmen, petrol kirliliği ile ilgili acil müdahale planlarında önemli yardımları vardır (Akan, 2007).

İki boyutlu olarak geliştirilen modeller sadece petrolün su yüzeyindeki hareketini simüle etmektedir. Üç boyutlu modeller ise petrolün su kolonu içinde geçirdiği süreçlere de yer vermektedir. Bazı modellerde, dağılım modelleri hidrodinamik alt modellerle birleştirilmiştir. Bu tür modeller, petrol hareketinin sayısal benzeşimi prosesine daha fazla parametreyi dahil etmekte ve daha detaylı sonuçlar vermektedir.

Petrol dağılımı modellemesi konusuyla ilgili yapılan çalışmalarda ağırlıklı olarak Lagrange yaklaşımı kullanılmaktadır. Lagrange ayrık alan algoritması yaklaşımına göre denize dökülen petrol miktarı çok sayıdaki küçük parçacıklara ayrılmaktadır. Bu parçacıkların hareketleri zamanın bir fonksiyonu olarak izlenmektedir. Fakat, Euler yaklaşımıyla geliştirilen modellere de literatürde rastlamak mümkündür. Euler yaklaşımında akışkanın basınç, yoğunluk, hız gibi özellikleri, zamanın ve sabit bir

alanın fonksiyonu olarak ifade edilir. Lagrange ve Euler yaklaşımı Bölüm 2.5'te detaylı olarak açıklanacaktır.

2.4.1. İki boyutlu modeller ile ilgili çalışmalar

Önceki petrol kirliliği modellerinde tipik olarak iki boyutlu yüzey modelleri kullanılmıştır. Bu modeller sabit veya değişken parametreler kullanarak rüzgar ve akıntı hızlarını yüzey petrol tabakası hızına bağlar. Rüzgar, akıntıları oluşturur ve akıntılar petrol yayılımını belirler. Rüzgar petrol yayılımına bu şekilde dolaylı olarak etki eder. Hafif rüzgarda, rüzgar yönündeki rüzgar hızının %3,5'inin direkt olarak hesaba katılması, açık denizlerde petrol film tabakasının hareketi için iyi simülasyon sonuçları verir. Rüzgar hızı arttıkça petrol su kolonu içine hareket edecek ve akıntı daha önemli hale gelecek ve rüzgar direkt olarak hesaba katılmayacaktır.

Petrol kirliliğinin meydana geldiği ilk evrelerde petrolün taşınımı, yayılma (yerçekimi, eylemsizlik, viskozite ve yüzey gerilimi kuvvetleri etkisi altında), adveksiyon ve türbülans difüzyonu (akıntı ve rüzgar etkisi altında), çözünme, buharlaşma ve dağılma başlıkları altında incelenir. Eğer petrol film tabakası adalara veya sahil şeridine doğru hareket ederse, sahil şeridi birikimi de dikkate alınır (Akan, 2007).

Yapa ve diğ. (1994) tarafından yapılan çalışmada iki katmanlı iki boyutlu ROSS3 modeli kullanılmıştır. Model kompleks nehir-göl sistemleri için geliştirilmiştir. Bu modelde adveksiyon, kıyı birikimi, buharlaşma, çözünme, karışma ve yayılma simüle edilebilir. Dökülen petrol, yüzeyde film tabakası şeklinde veya askıda damlacık şeklinde olabilir. ROSS3 modeli, nehir ve göl sularının herhangi bir noktadaki akıntı hız bileşenlerini hesap edebilmektedir. Bu model genel olarak göl-nehir sistemlerinde petrol kirliliğinin modellenmesinde kullanılsa da, kıyısularda petrol kirliliğinin modellenmesi çalışmalarında da çoğu kez referans gösterilmiştir.

Wang ve diğ. (2005) tarafından yapılan çalışmada iki boyutlu model partikül yaklaşımına dayandırılmaktadır. Denize deşarj edilen petrol bireysel hareket eden çok sayıda parçacığa ayrılır. Bu parçacıklar rüzgar tarafından endüklenen akıntı etkisiyle hareket eder. Bu model adveksiyon, yüzey yayılması, buharlaşma, çözünme, emülsiyon, türbülans difüzyonu, petrol tabakasının sahil şeridi ile etkileşimi ve sedimentasyon gibi süreçleri içerir.

Sayed ve diğ. (2008) yaptıkları çalışmada ayrık alan metodu kullanarak bir dağılım modeli geliştirmişlerdir. Model karar verici makamlara acil müdahale planı için ve temizlik operasyonları için veri sağlar. Model St. Lawrence nehrine uygulanmış, kaza meydana geldiğinde petrolün hareketleri tahmin edilmeye çalışılmıştır. Geliştirilen model, nehir hidrodinamiği, rüzgar tahminleri ve coğrafi bilgi sistemi verileri ile

bağlantı kurmaktadır. Model yayılma, dağılma, bozunma ve sahil şeridi ile etkileşim süreçlerini içerir.

Aghajanloo ve diğ. (2013) tarafından geliştirilen iki boyutlu modelde Euler yaklaşımı kullanılmıştır. Bu matematiksel model çeşitli alt modeller içermektedir. Bu alt modeller hidrodinamik model, film tabakası dinamik modeli ve bozunma modelidir. Petrolün yüzeydeki taşınımı adveksiyon-difüzyon modeli ile simüle edilmiştir. Petrolün akıbeti ve bunun petrol özelliklerinde meydana getirdiği değişimler petrol bozunma modeli ile simüle edilmiştir. Model Basra Körfezi'ne başarılı bir şekilde uygulanmıştır.

2.4.2. Üç boyutlu modeller ile ilgili çalışmalar

Su kolonunda petrol partiküllerinin dağılımını simüle etmek için üç boyutlu modeller geliştirilmiştir. Bu modeller sayesinde deşarj ister su yüzeyinde ister su yüzeyinin altında olsun, petrol partiküllerinin dağılımı daha doğru ve gerçeğe yakın bir şekilde hesaplanabilmektedir. Aynı zamanda deniz dibinde bulunan petrol kuyularında meydana gelecek sızıntılar da (2010 yılında Meksika Körfezi'nde olduğu gibi) simüle edilebilmektedir.

Wang ve diğ. (2008) tarafından iki boyutlu bir model üç boyutlu olarak geliştirilmiştir. Üç boyutlu modelde, petrol ve türevlerinin denize döküldükten sonra geçirdiği adveksiyon, çözünme, yüzey dağılması, türbülans difüzyonu, sedimentasyon, parçacıkların kıyı ile etkileşimi, buharlaşma, petrol viskozitesinin ısı değişimleri gibi temel süreçlerin yanı sıra fotooksidasyon, biyolojik bozunma ve hidroliz gibi süreçler de incelenmektedir. Geliştirilen modelde, Lagrange ayrık alan algoritması, petrolün taşınımını ve akıbetini simüle etmek için kullanılmıştır. Bohai Denizi'nde iki geminin çarpışmasıyla meydana gelen kazaya ilişkin gerçek veriler kullanılarak model çalıştırılmış ve modelin çıktıları tartışılmıştır. Model sonuçları ile gerçek kaza sonuçları karşılaştırılmış, rüzgar verisinin yetersiz olmasına rağmen petrol yayılımının benzer olduğu görülmüştür. Çevresel verilerin daha doğru bir şekilde sağlanması ile modelin daha iyi sonuçlar vereceği sonucuna ulaşılmıştır.

Elhakeem ve diğ. (2007) tarafından Birleşik Arap Emirliği kıyılarında uygulanmak üzere üç boyutlu bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen model, hidrodinamik alt modellerle birleştirilmiştir. Üç boyutlu model petrol tabakasının yerçekiminden kaynaklanan hareket merkezini doğru olarak tahmin edebilmektedir. Fakat model, sabit bir yayılma hızı dikkate aldığı için, sudaki petrole ilişkin bağıl yoğunluk ve kinematik viskozite değişikliklerini tahmin edememektedir. Model daha önce yapılan çalışmalarla karşılaştırılmış ve gerçeğe yakın başarılı sonuçlar vermiştir.

Sugioka ve diğ. (1999) tarafından Tokyo Körfezi'nde meydana gelen kazadan sonra üç boyutlu bir model geliştirilmiştir. Model Lagrange ayırık alan metoduna dayanmaktadır. Bu model, hidrodinamik bir alt modelle birleştirilmiştir. Model adveksiyon, difüzyon, yayılma, buharlaşma, çözünme süreçlerini petrol tabakasının hareketi için simüle etmektedir. Model, farklı dalga yüksekliği ve periyotları için çalıştırılmıştır. Gerçek kaza uydu görüntüleri ile model çıktılarının uyduğu gözlemlenmiştir.

Skognes ve Johansen (2004), tarafından üç boyutlu STATMAP modeli petrol dağılımı simülasyonu için kullanılmıştır. Model petrol dağılımını, yayılımını ve bozunma proseslerini deniz yüzeyindeki etkilerine, olası kıyı şeridindeki etkilerine göre ve su kolonundaki petrol konsantrasyonlarına göre karşılaştırmıştır. Model, Norveç suları için daha önceden tanımlanmış 27 yılı içeren rüzgar verisini kullanmıştır. STATMAP modeli çıktı olarak su kolonundaki hidrokarbon konsantrasyonunu vermiştir.

Dietrich ve diğ. (2014) tarafından 2010 yılında Meksika Körfezi'nde meydana gelen 'Deepwater Horizon' petrol sızıntısı modellenmiştir. Çalışmada DieCAST okyanus modeli kullanılmıştır. Bu model Lagrange partikül izleme metodunu kullanır. Petrol kirliliğinin dağılımı iki süreç halinde ele alınmıştır. İlk süreçte model kullanılarak akıntı, sıcaklık ve tuzluluk hesap edilmiştir. Sonra bu sonuçlar her bir petrol partikülüne uygulanmıştır. Modelde petrol kuyusundan yükselen partiküller simüle edilmiştir. Bu yükselen partiküllerin yayılma, adveksiyon, difüzyon, çözünme, buharlaşma, emülsiyon süreçleri eş zamanlı hesap edilmiştir. 1200 metre derinlikten dağılan petrolün, saha incelemeleri ile model sonuçları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçların saha gözlemleri ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

2.4.3. Türkiye'de yapılan çalışmalar

Can (2007) yaptığı çalışmada, İstanbul Boğazı'ndaki olası tanker kazaları sonrası yakıt kirliliği simülasyonu yaparak, boğazdaki yakıt dağılımını hesaplamıştır. Çalışmada üç boyutlu FLUENT modeli kullanılmıştır. FLUENT sonlu hacimler yöntemini kullanan bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımıdır. Akışkanlar mekaniği ve ısı transferi problemleri çözümünde kullanılır. FLUENT sahip olduğu ileri çözücü teknolojisi ve bünyesinde barındırdığı değişik fiziksel modeller sayesinde laminar, geçişsel ve türbülanslı akışlara, iletim, taşınım ve radyasyon ile ısı geçişini içeren problemlere, kimyasal tepkimeleri içeren problemlere, yakıt pilleri, akustik, akış kaynaklı gürültü, çok fazlı akışları içeren problemlere hızlı ve güvenilir çözümler üretir. Akıntı hızı ve rüzgâr hızı modele veri olarak girilmiştir. Rüzgar hızı su yüzeyi için tanımlanan sınır koşulunda yüzey gerilimi olarak etkilmiştir. İstanbul Boğazı'nda

kaza riski yüksek dört farklı bölge için seneryolar oluşturulmuş ve kaza sonucu yakıt kirliliğinin hareketi simüle edilmiştir.

Başar (2003) yaptığı çalışmada İstanbul Boğazı'nda meydana gelebilecek tanker kazaları sonrası oluşacak yakıt kirliliğinin dağılımı simülasyonunu yapmıştır. Yakıt kirliliğinde en önemli çevresel etkilerden biri olan akıntı "Princeton Ocean Model" (POM) modeli kullanılarak modellenmiştir. Elde edilen bu akıntı verileri, petrol dağılım modeli olan "General NOAA Oil Modeling Environment" (GNOME) benzetim modelinin akıntı veri tabanını oluşturmuştur. GNOME modeli çalıştırılarak yakıt kirliliğinin zamansal ve alansal dağılımları sabit rüzgar hızları için hesaplanmıştır. Model İstanbul Boğazı'nda istatistiki olarak gemi kazalarının yoğun olduğu dört bölgeye uygulanmıştır.

Aydın (2009) kıyusal sularda su yüzeyinde oluşan petrol kirliliği dağılımını iki boyutlu HİDROTAM3 modelini kullanarak simüle etmiştir. Modelde iki boyutlu ilerlemeli yayılım denklemi kullanılmıştır. Yayılım denklemi sonlu farklar yöntemi ile çözülmüştür. Denklemin çözümü sırasında, adveksiyon ve difüzyon prosesleri için merkez diferansiyel yaklaşım izlenmiştir. Model, her bir zaman adımında petrolün su yüzeyindeki konsantrasyon dağılımını vermektedir. Modelde sabit rüzgar hızları için akıntı düzenleri oluşturulmuştur. Model, farklı API derecelerine sahip iki petrol türünün elde edilen akıntı düzenleri için sonuçlar vermiştir. Model Mersin kıyı bölgesine uygulanmıştır.

Akan (2007) tarafından yapılan çalışmada iki boyutlu nümerik model kullanılarak, petrol yayılımı incelenmiştir. MATLAB programı kullanılarak deniz yüzeyinde petrol yayılımı ampirik formüller yardımıyla simüle edilmiştir. Yüzey akıntısı ADAM modeli kullanılarak oluşturulmuş ve petrolün yayılımı iki boyutlu olarak, sabit rüzgar hızında hesaplanmıştır. İstanbul Boğazı'nda meydana gelecek olası tanker kazası için simülasyon yapılmıştır.

Türkiye'de yapılan çalışmalarda rüzgar şiddeti ve yönü sabit alınarak simülasyon yapılmıştır. Bu çalışmada ise atmosferik koşullara göre, hızı ve yönü anlık değişen rüzgar verisi kullanılmıştır.

2.5. Çalışma Bölgesi

İskenderun Körfezi, Doğu Akdeniz'in kuzeydoğusunda yer almakta olup, Hatay ve Adana illeri arasında bulunmaktadır. Bölge zirai, ticari ve endüstriyel açıdan büyük bir öneme sahiptir. Kerkük Yumurtalık ve Bakü Ceyhan Tiflis gibi stratejik önemi büyük olan iki boru hattının son durağıdır.

İskenderun Körfezi'nde toplam 14 adet liman bulunmaktadır. Bu limanlar; Botaş, İsdemir Limanı, Petrol Ofisi Limanı, Aygaz Limanı, Limak Port, Sasa Terminal, Yazıcı Limanı, İkinci Limanı, Assan Limanı, MMK Metalurji Limanı, Delta Terminal, Toros Terminal, Ceyhan Marine Terminal ve İsen Limanıdır. Körfez'deki liman sayısının fazla olması gemi trafiğinde artışa neden olmaktadır.



Şekil 2.14: İskenderun Körfezi'ndeki tesisler (İnan, 2011).

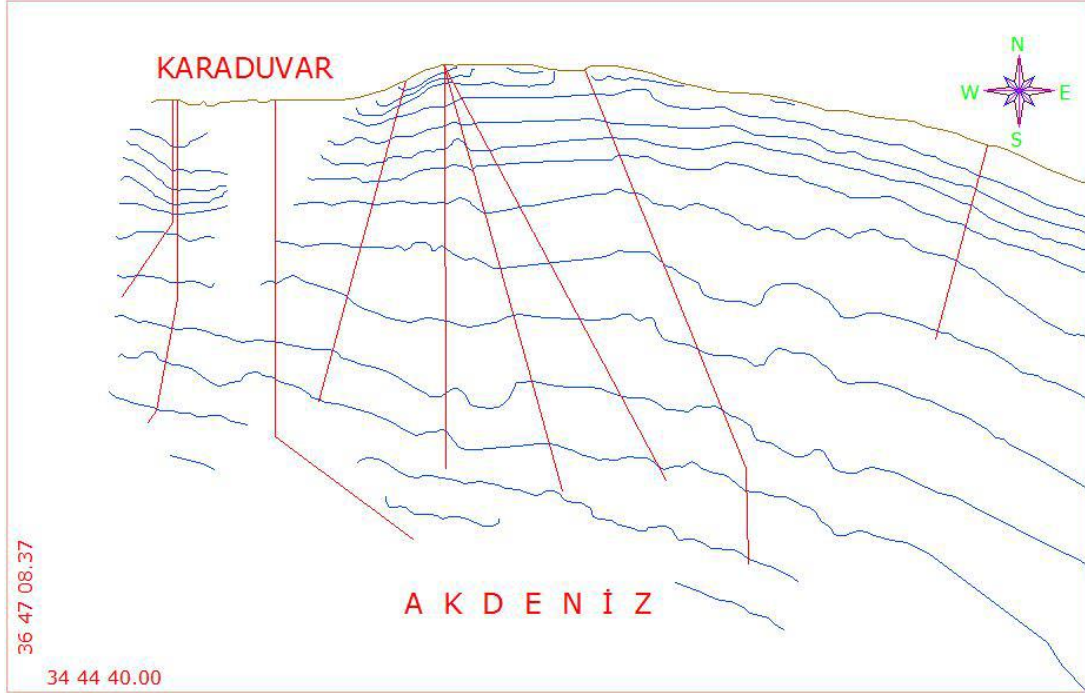
Bu limanlardan en yoğunu Ceyhan'daki Botaş Limanı'dır. Limanda tankerlere ham petrol yüklemeye 2 Haziran 2006'da başlanmıştır. On yıllık süreçte 3200 tanker ile 2435 milyon varil ham petrol sevk edilmiştir (Url-1).

Mersin Uluslararası Limanı, Ankara, Gaziantep, Kayseri, Kahramanmaraş, Konya gibi Türkiye'nin sanayileşmiş kentleri ile Suriye, Irak ve İran gibi sınır komşusu olduğumuz ülkelere, demiryolu ve karayoluyla bağlıdır. Bu bağlantılar, bölgeyi en yoğun deniz ticaret hatlarından biri haline getirmiştir. Ticaretin artmasına paralel olarak da Mersin Limanı'na gelen gemi sayısı artmaktadır.

Ayrıca Mersin kıyı bölgesinde çeşitli şirketlere ait Şekil 2.15'te gösterilen dokuz adet petrol hattı bulunmaktadır. Bu hatlar limanın dışında ve doğu tarafında bulunmaktadır. Petrol tankerleri limana girmeden, boru hatları vasıtası ile sahilde bulunan dolum tesislerine petrol transferi yapmaktadır.

2006 yılında Lübnan krizinde İsrail jetleri Beyrut'a 30 km mesafedeki Doğu Akdeniz'e kıyısı olan Jiyeh istasyonunu hedef almış ve petrol tankları zarar görmüştür. Yaklaşık 30000 ton petrol Doğu Akdeniz sularına sızmıştır. İsrail'in bombalama operasyonları dört hafta boyunca devam ettiği için kirliliğe müdahale edilememiş, 10 km

genişliğindeki petrol film tabakası 170 km kıyı boyunca yayılmıştır. Kirlilik Kıbrıs ve Türkiye'yi de etkilemiştir.



Şekil 2.15: Mersin kıyı bölgesindeki 9 adet petrol boru hattı (Aydın, 2009).

Petrol rafinerilerinin, dolum istasyonlarının ve petrol boru hatlarının yoğun olduğu Mersin ve İskenderun Körfezleri stratejik önemi haizdir. Herhangi bir terör saldırısı sonucunda Lübnan saldırısında olduğu gibi tonlarca petrol denize karışacaktır. Bu petrolün yayılımını tahmin etmek, acil müdahale planları için karar verici makamlara kılavuz olacaktır. Bu nedenlerden dolayı çalışma bölgesi olarak stratejik önemi haiz, petrol rafinerilerinin, dolum tesislerinin ve gemi trafiğinin yoğun olduğu Mersin önleri ve İskenderun Körfezi seçilmiştir.

2.6. Akdeniz’de Akıntılar

Denizlerde akıntılar, temelde iki çeşittir: Rüzgarların neden olduğu akıntılar ve sıcaklık-tuzluluk farklılıklarının neden olduğu termohalin akıntılardır. Akdeniz’in derin havzalarında oluşan yoğun sular, Atlantik’le su alışverişinin batı-doğu yönünde olmasına sebep olur. Cebelitarık’tan giren Atlantik suyu Afrika kıyıları boyunca doğuya doğru hareket halindedir. Bu şekilde Akdeniz’in doğu ucuna kadar ulaşır. En büyük akıntı hızı 70 cm/s ile kıydan 50-60 deniz mili açıkta görülür. Yaz mevsiminde suyun hareketi kışa göre daha yavaştır. Akdeniz’in doğu ucuna erişen akıntı sistemi, kıyıyı takiben kuzeye yönelir ve sonra Güney Anadolu kıyılarını takip eder. Güney Anadolu kıyılarını takip eden su Ege’ye girer ve kuzeye yönelir. Çanakkale

Boğazı'nda Karadeniz'den gelen daha az yoğun suların altından geçerek Marmara Denizi ve İstanbul Boğazı yolu ile Karadeniz'e ulaşır. Buna karşılık Çanakkale Boğazı'ndan çıkan az yoğun sular Ege kıyıları boyunca güneye iner. Doğu Akdeniz'de Levantin ve Adriyatik Havzaları'nın suları Batı Akdeniz'in derin suları (yoğun sular) ile birlikte batıya doğru hareket halindedir. Bu yoğun sular Cebelitarık Boğazı altından Atlantik'e çıkan ters yönlü bir dolaşım sistemi oluşturur (Kurter, 1977).

2.7. Lagrange ve Euler Yaklaşımı

Kıyasal ve okyanus prosesleri ile ilgili olan tüm modeller hareket eden suda maddenin adveksiyon ve difüzyon ile taşınması temel prensibiyle ilgilenir. Bu taşınmayı iki farklı yaklaşım tanımlar. Bunlar Lagrange ve Euler yaklaşımlarıdır.

Lagrange yaklaşımı bir akışkan partikülünün hareketi esas alınarak belirli bir anda belirli bir konumda olan akışkan partiküllerinin zamanla olan hareketlerini inceler. Bu metotta akışkanın izlediği yörünge, yörünge boyunca akışkanın hızı, basıncı ve diğer özellikleri tanımlanır.

Herhangi bir p partikülünün $r_1(t_1)$ noktasından $r_2(t_2)$ noktasına hareket ettiği varsayımı ile;

$$V_p = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{r_2 - r_1}{t_2 - t_1} = \frac{dx}{dt} i + \frac{dy}{dt} j + \frac{dz}{dt} k \quad (2.8)$$

$$V_p = u_p i + v_p j + w_p k \quad (2.9)$$

Euler yaklaşımında herhangi bir akışkan partikülünün hareketini incelemek yerine, akışkan akımı içindeki sabit bir nokta esas alınarak bu noktadaki hız ve basıncın zamanla değişimi incelenir. Özet olarak tek bir x, y, z koordinatındaki zamana bağlı olarak hız veya basınç değişimi incelenir. Bu metot yardımı ile bir akımın uzayda sabitlenmiş bir noktadan geçerken özelliklerinde meydana gelen değişimler hakkında bilgi edinilir (Url-2).

$$u = u(x, y, z, t) \quad v = v(x, y, z, t) \quad w = w(x, y, z, t) \quad (2.10)$$

Hız bileşenleri olmak üzere;

$$x = xi + yj + zk \quad (2.11)$$

$$V = V(x, t) = ui + vj + wk \quad (2.12)$$



3. METODOLOJİ

Bu çalışmada, MOHID Modelleme sistemi kullanılarak Doğu Akdeniz’de meydana gelebilecek petrol kirliliği atmosferik koşullara ve tanımlanmış sınır koşullarına göre üç boyutlu olarak simüle edilmiştir.

3.1. MOHID Modelleme Sistemi

MOHID modelleme sistemi Lizbon Teknik Üniversitesi (IST)/Portekiz tarafından geliştirilen üç boyutlu su modelleme sistemidir. MOHID, ANSI FORTRAN 95 programlama dili ile yazılmıştır. MOHID, su kolonu için baroklinik hidrodinamik modülü içeren bir modelleme sistemidir.

MOHID Water modelleme sistemi, nesne tabanlı programlama stratejisi kullanılarak yazılmış olup ön işlem ve son işlem için kullanıcı arayüzünü desteklemektedir. MOHID açık kaynak kodlu modüler bir sistemdir. MOHID Water yüzey su kütlelerini simüle etmek için kullanılan sayısal bir programdır. MOHID Land hidrografi havzalarını simüle etmek için kullanılmaktadır ve başka modülleri de mevcuttur. MOHID Water modülü, sonlu hacimler yöntemini kullanarak sıg su denklemlerini çözer, bu denklemleri kullanarak yüzey su kütlelerindeki akıntı ve su özelliklerini simüle eder.

MOHID’in geliştirilmesi 1985 yılına dayanmaktadır. Birçok araştırma ve mühendislik projelerinde kullanıldığı için güncellenme ve geliştirilmesi sürekli olarak devam etmiştir. Başlangıçta MOHID Neves (1985) tarafından geliştirilen iki boyutlu bir gelgitsel modeldi. Neves bu modeli, klasik sonlu farklar yaklaşımını kullanarak haliç ve kıyısız alanlara uygulamıştır.

İlerleyen yıllarda iki boyutlu Euler ve Lagrange taşınım modülleri modele eklenmiştir. Modelin ilk üç boyutlu versiyonu Santos (1995) tarafından geliştirilmiştir. Bu versiyonda dikey çift Sigma koordinatı kullanılmıştır.

Çift Sigma koordinatındaki kısıtlamalar nedeniyle Martins (1999) Mesh 3D versiyonunu geliştirmiştir. Burada sonlu hacimler konsepti uygulanmıştır. Bu konseptte kullanıcı çalışma alanındaki ana proseslere bağlı olarak çeşitli koordinat sistemleri arasından birini seçme imkanına sahiptir. Mesh 3D modeli aynı zamanda, 3D Euler Taşınım Modeli, 3D Lagrange Taşınım Modeli ve boyutsuz su kalitesi modelini içerir.

Gelişen modelin giderek karmaşılaşması ile beraber, MOHID modelinin bilgilerini organize etmek için yeni bir yol bulmak gerekliliği ortaya çıkmıştır. 1998 yılında bütün kod yeniden yapılandırılmıştır. Buradaki ana amaç daha sağlam ve daha güvenilir bir model oluşturarak ve modelin yapısını istenmeyen programlama hatalarından koruyarak daha kolay 'geliştirilebilen' bir model üretmektir. Bu hedefi başarmak için nesne tabanlı programlama kullanılarak MOHID, FORTRAN 95 programlama dilinde yazılmıştır.

Modelin yeni felsefesi modelin bütün boyutlarda (bir boyutlu, iki boyutlu, üç boyutlu) kullanılmasına olanak sağlamıştır. Bütün model ANSI FORTRAN 95 dilinde nesne tabanlı programlama kullanılarak oluşturulmuştur. Her bir modül belirli bir bilgiyi yönetmekten sorumludur.

MOHID Water modelleme sistemi, hiyerarşik modüler bir yapıya sahip olup halihazırda 60'dan fazla modül ve 300 000 civarında kod satırından oluşmaktadır. Çizelge 3.1'de listelenen her bir modül belirli bir fonksiyon veya prosesi işleyen bilgiyi yönetmekten sorumludur. Ana modüller aşağıda detaylı olarak anlatılmıştır.

Çizelge 3.1: MOHID modülleri.

Model	Hidrodinamik modül ile taşınım modülleri arasındaki bilgi akışını ve iç içe modeller arasındaki iletişimi kontrol eder.
Hidrodinamik	Üç boyutlu baroklinik hidrodinamik serbest yüzey modelidir. Su seviyesi, akıntı ve su hızlarını hesaplar.
Su özellikleri	Euler taşınım modelini kullanır. Euler yaklaşımını kullanarak su özelliklerindeki değişimleri kontrol eder (sıcaklık, tuzluluk, oksijen, vs.).
Lagrange	Lagrange Taşınım modelini kullanılır. Su özellikleri modülü ile aynı parametreleri kontrol eder, fakat Euler taşınım modeli yerine Lagrange taşınım modeli kullanır. Ayrıca petrol yayılımını da simüle etmek için kullanılır.
Su Kalitesi	Boyutsuz su kalitesi modelidir. Oksijen, Azot ve Fosfor döngülerini simüle eder. Euler ve Lagrange Taşınım modelleri tarafından kullanılır.
Petrol Dağılımı	Petrol dağılım modülüdür. Buharlaşıma, emülsiyon, dağılım, çözünme ve sedimentasyon gibi dahili petrol proseslerini ve kalınlık değişimi nedeniyle oluşan petrol yayılımını simüle eder.
Türbülans	Düşeyde tek boyutlu türbülans modelidir. GOTM modelindeki formülleri kullanır.
Geometri	Sonlu hacimler hakkındaki bilgileri saklar ve günceller.

3.1.1. Hidrodinamik modül

Model, üç boyutlu sıkıştırılamayan birincil denklemleri çözer. Boussinesq ve Reynolds yaklaşımlarının yanı sıra Hidrostatik denge varsayılmıştır. Ortalama akış hızları için olan momentum denge denklemleri Kartezyen formda aşağıda verilmiştir:

$$\partial_t u = -\partial_x(uu) - \partial_x(uv) - \partial_x(uw) + fv - \frac{1}{\rho_0} \partial_x \rho + \partial_x((v_H + v)\partial_x u) + \partial_y((v_H + v)\partial_y u) + \partial_z((v_t + v)\partial_z u) \quad (3.1)$$

$$\partial_t v = -\partial_x(vu) - \partial_y(vv) - \partial_z(vw) - fu - \frac{1}{\rho_0} \partial_y \rho + \partial_x((v_H + v)\partial_x v) + \partial_y((v_H + v)\partial_y v) + \partial_z((v_t + v)\partial_z v) \quad (3.2)$$

u, v ve w hız vektörünün x, y, z yönlerindeki bileşenleri, f coriolis parametresi, v_H ve v_t yatay ve dikey türbülans viskoziteleri, ν moleküler kinematik viskoziteyi ($1.3 \times 10^6 \text{m}^2 \text{s}^{-1}$), ρ basıncı temsil eder. Geçici hız değişimi (eşitliğin sol tarafı); öteleme taşınım dengesi (eşitliğin sağ tarafındaki ilk üç terim), Coriolis kuvveti (dördüncü terim), basınç gradyanı (sonraki üç terim) ve türbülans difüzyonunun toplamına eşittir.

Dikey hızlar, sıkıştırılamaz süreklilik denkleminin (kütle dengesi denklemi), dipten herhangi bir derinliğe kadar integral alınarak hesaplanır.

$$\partial_x u + \partial_y v + \partial_z w = 0 \quad (3.3)$$

$$w(z) = \partial_x \int_{-h}^z u dx + \partial_y \int_{-h}^z v dy \quad (3.4)$$

Serbest yüzey eşitliği, süreklilik denkleminin bütün su kolonu boyunca integrali alınmasıyla elde edilir (serbest su yüksekliği $\eta(x,y)$ ve dip arasında $-h$).

$$\partial_t \eta = -\partial_x \int_{-h}^{\eta} u dz - \partial_y \int_{-h}^{\eta} v dz \quad (3.5)$$

Hidrostatik yaklaşım g yerçekimi ve ρ yoğunluk olmak üzere aşağıdaki gibi varsayılır.

$$\partial_z \rho + g\rho = 0 \quad (3.6)$$

Basınç aşağıdaki denklemde verildiği üzere hesaplanır.

$$\rho(z) = \rho_{atm} + g\rho_0(\eta - z) + g \int_z \eta \rho' dz \quad (3.7)$$

Denklem 3.7, deniz yüzeyindeki atmosferik basıncı, herhangi bir derinlikteki basıncı, deniz seviyesi ve o seviye ile deniz seviyesi arasında integrali alınmış düzensiz basıncı ilişkilendirir. Bu ifade ve Boussinesq yaklaşımı kullanılarak, x_i eksenindeki yatay basınç değişimleri üç bileşenden oluşur.

$$\partial_{x_i} \rho = \partial_{x_i} \rho_{atm} - g \rho_0 \partial_{x_i} \eta - g \int_z \eta \partial_{x_i} \rho' dz \quad (3.8)$$

Toplam basınç değişimi, atmosferik basınç değişimi, deniz yüzeyi yüksekliği (barotropik basınç gradyeni) ve yoğunluk dağılımının (baroklinik basınç gradyeni) toplamlarından oluşur.

3.1.2. Su özellikleri modülü

Su özellikleri modülü, su kolonundaki su özelliklerinin değişimini Euler yaklaşımını kullanarak hesaplar. Bu hesaplama işlemi, öteleme ve difüzyon akılardan dolayı oluşan taşınımı, nehirlerden veya antropojenik kaynaklardan deşarj edilen suları, dip ve yüzey ile değişim, partiküllerin sedimentasyonunu ve içsel yutak ve kaynakları içerir.

MOHID 24 farklı su özelliğini simüle edebilir. Bunlar; sıcaklık, tuzluluk, fitoplankton, zooplankton, partiküler haldeki organik fosfor, zor parçalanabilir (refrakter) çözünmüş organik fosfor, parçalanabilir çözünmüş organik fosfor, inorganik fosfor, partiküler haldeki organik azot, zor parçalanabilir (refrakter) organik azot, parçalanabilir organik azot, amonyak, nitrat, nitrit, BOİ, oksijen, kohezyonlu sediment, siliatlar, partiküler haldeki arsenik, çözünmüş arsenik, larva ve fekal koliformdur. Ayrıca su kalitesi modülünde, oksijen, azot ve fosfor döngüleri, yutak ve kaynakları simüle edebilir.

Model sıcaklık ve tuzluluk için taşınım eşitliklerini çözer.

$$\partial_t S = -\partial_x (uS) - \partial_y (vS) - \partial_z (wS) + \partial_x (v'_H \partial_x S) + \partial_y (v'_H \partial_y S) + \partial_z ((v'_t + v'_T) \partial_z S) + F_S \quad (3.9)$$

$$\partial_t T = -\partial_x (uT) - \partial_y (vT) - \partial_z (wT) + \partial_x (v'_H \partial_x T) + \partial_y (v'_H \partial_y T) + \partial_z ((v'_t + v'_S) \partial_z T) + F_T \quad (3.10)$$

v'_H ve v'_t tuzluluk ve sıcaklığın yatay ve dikey eddy difüzyonu (birbirine eşit olduğu kabul edilir), v'_T ($1.1 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) ve v'_S ($1.4 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) tuzluluk ve sıcaklığın moleküler difüzyonunu temsil eder.

Verilen bir A özelliğinin, öteleme ve difüzyon akısından dolayı oluşan taşınımı, aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$\partial_t A = -\partial_x (uA) - \partial_y (vA) - \partial_z (wA) + \partial_x (v'_H \partial_x A) + \partial_y (v'_H \partial_y A) + \partial_z ((v'_t + v'_A) \partial_z A) \quad (3.11)$$

u, v ve w ; x, y , ve z yönlerindeki hız, ve v'_A moleküler difüzyondur.

Yoğunluk (ρ); sıcaklık ve tuzluluğun bir fonksiyonu olarak aşağıdaki basitleştirilmiş denklem kullanılarak hesaplanır (Leendertsee ve Liu, 1978).

$$\rho = \frac{5890 + 38T^2 + 3S}{(1779.5 + 11.25T - 0.0745T^2) - (3.8 + 0.01T)S + 0.689(5890 + 38T - 0.375T^2 + 3S)} \quad (3.12)$$

3.1.3. Lagrange modülü

Model, petrol dağılımı için Lagrange partikül izleme metodunu temel almıştır. Bu yaklaşımda, denize dökülen petrol miktarı çok sayıdaki küçük partiküllere ayrılır. Partiküllerin hareketi hidrodinamik alanlardan etkilenir. Partiküllerin hareketleri zamanın fonksiyonu olarak izlenmektedir.

MOHID Lagrange Modülü, iz madde konseptini kullanır. İz maddenin en önemli özelliği konumudur (x,y,z). İz madde, bir fizikçi için bir suyun kütlesi, bir jeolog için sediment partikülü, bir kimyacı için ise molekül veya molekül grubu olabilir. Bu model geniş spektrumlu prosesleri simüle edebilir.

İz maddelerin hareketi, hidrodinamik modülün hız alanından, yüzey modülünün rüzgarından, petrol dağılım modülünün yayılım hızından ve rastgele hızdan etkilenebilir.

İz maddeleri, uzamsal koordinatlar, hacim ve birtakım özellikler (her bir özellik konsantrasyonu ile verilir) ile karakterize edilir. Her iz madde rastgele hareketini, kendine ayrılmış belirli bir zaman aralığında yapar. İz maddeler orijinde doğar. Aynı orijine sahip olan iz maddeler aynı özelliklere sahiptir ve rastgele hareket, koliform parçalanması vs. için aynı parametreleri kullanır. Orijinler iz maddeleri yayma yöntemlerine göre birbirlerinden ayrılırlar. Uzaydaki orijinleri tanımlamak için 3 farklı yol vardır:

- 'Nokta orijinler' iz maddeleri verilen bir noktada yayar,
- 'Kutu orijinler' iz maddeleri verilen bir alan üzerinde yayar,
- 'Kaza orijinleri' iz maddeleri bir nokta etrafında dairesel şekilde yayar.

Orijinlerin, iz maddeleri zaman adımıyla yayabilmeleri için iki farklı yol bulunmaktadır:

- 'Sürekli orijinler' iz maddeleri belirli bir süre boyunca yayar.
- 'Anlık orijinler' iz maddeleri anlık olarak yayar.

Aynı gruba dahil olan orijinler çıktı dosyasında beraber gruplanır, böylelikle sonuçları analiz etmek daha kolay olur.

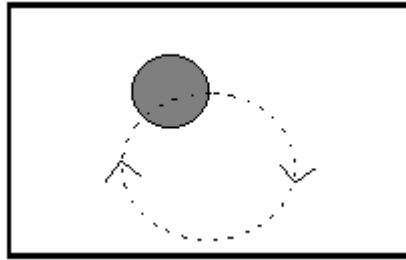
Bir iz maddenin en önemli özelliği konumudur (x,y,z). Partikül hareketinden sorumlu olan ana faktör genellikle ortalama akıntı hızıdır. Uzamsal koordinatlar hızın tanımı ile verilir.

$$\frac{dx_i}{dt} = u_i(x_i, t) \quad (3.13)$$

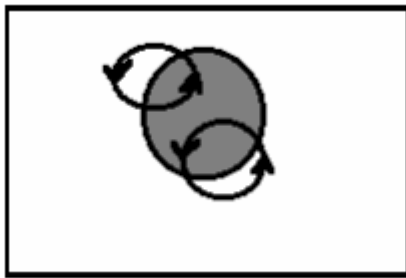
$$X_i^{t+\Delta t} = X_i^t + \Delta t \cdot u_i^t \quad (3.14)$$

u ortalama hız ve x ise partikül konumudur. Uzayda herhangi bir noktadaki hız, hidrodinamik model gridindeki noktalar arasında lineer interpolasyon yapılarak hesaplanır. Lagrange Modülü, iz maddelerin yörüngelerinin hesaplanmasını hidrodinamik zaman adımlarının alt adımlarına bölmeye izin verir.

Türbülans taşınımı dağılımdan sorumludur. Eddylerin partiküller üzerindeki etkisi, eddy ve partikül boyutu oranına bağlıdır. Partiküllerden daha büyük olan eddyler partiküllerin rastgele bir hareket yapmasına neden olur (Şekil 3.1). Partiküllerden daha küçük olan eddyler, maddelerin partikül içine karışmasına ve çevresel konsantrasyona bağlı olarak hacminin ve kütlesinin artmasına sebep olur (Şekil 3.2).



Şekil 3.1: Rastgele hareket (eddylerin partiküllerden büyük olduğu durum).



Şekil 3.2: Rastgele hareket (eddylerin partiküllerden küçük olduğu durum).

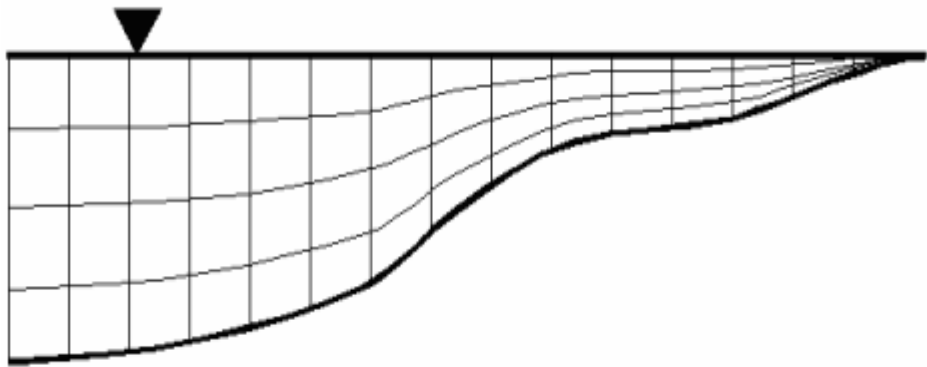
Rastgele yer değiştirme, karışma mesafesi ve türbülans hız bileşeninin standart sapması kullanılarak hesaplanır. Partiküller bu hızı rastgele hareketi gerçekleştirmek için gerekli olan zaman boyunca korur. Bu da yerel türbülans karışma mesafesine bağlıdır. Hacimdeki artış küçük ölçekli türbülans ile ilişkilidir ve bunun isotropik (modelin özelliklerinin yönden bağımsız olması durumu) olduğunu varsaymak

mantıksaldır. Bu koşullarda, küçük partiküller başlangıç formlarını korur ve hacimlerindeki artış kendi hacimlerinin bir fonksiyonudur.

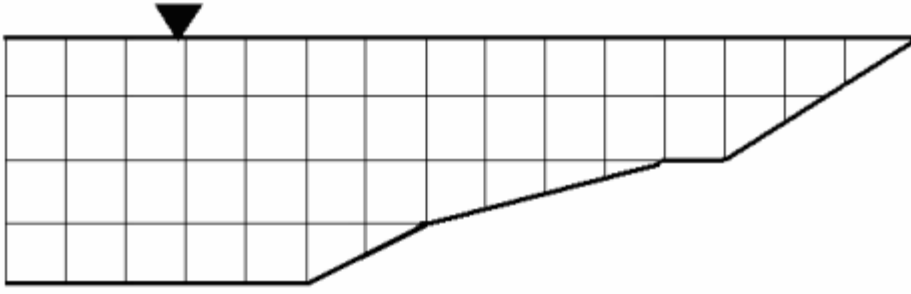
3.1.4. Geometri modülü

Geometri modülü, yüzey yükseltisi ve derinlik verisine bağlı olarak, sonlu hacmin yan alan ve yan hacimlerini hesaplar. Aslında, Geometri modülü, su kolonunu değişik dikey koordinatlara ayırır. Bunlar; sigma, kartezyen, lagrange, (sigma veya kartezyene bağlı olarak), “sabit aralıklı” ve birleşik koordinat sistemidir. Su kolonunun alt bölümlere ayrılması değişik alanlar için mümkündür. Sigma ve kartezyen koordinatları klasik olanlardır. Kartezyen koordinatı “traşlanmış hücreler” ile veya bu hücreler olmadan kullanılabilir. Lagrange koordinatı yukarı ve aşağı yüzeyleri dikey akış hızıyla birlikte hareket ettirir. “Sabit aralıklı” koordinat kullanıcıya dibe yakın akıntıları çalışma imkânı verir. Birleşik koordinat kartezyen koordinat gibi çalışır. Bu koordinat, rezervuarları simüle etmek için geometri modülünde uygulanmıştır.

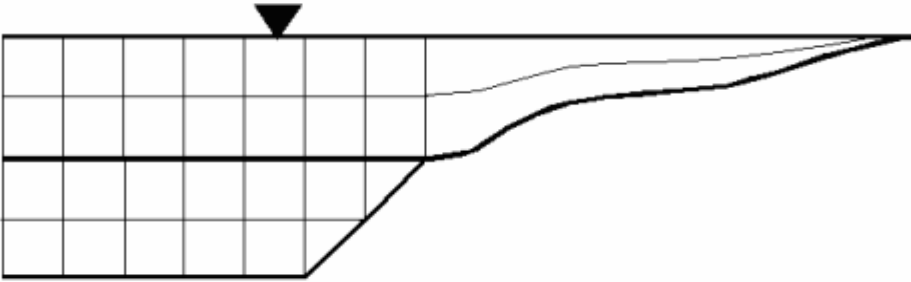
Bu koordinatlardan en çok kullanılanı sigma ve kartezyen koordinat sistemidir. Sigma koordinat sistemi kıyusal alanları simüle etmek için oldukça kullanışlıdır. Kıyıya doğru azalan derinlik ile beraber tabakalar da eğime uygun olarak kıyıya ulaşır ve kıyıda bir noktada birleşir. Kartezyen koordinat sistemi derin alanlarda daha kullanışlıdır ve kıyusal alana yaklaşıldığında bu hücreler traşlanır. Fakat derin alanlar ve kıyusal bölgeler ile beraber çalışılmak istenildiğinde en uygun koordinat sistemi Şekil 3.5'deki gibi kartezyen ve sigmanın beraber kullanıldığı sistemdir. Derin alanlarda kartezyen koordinat sistemini kullanmak, derinlik 100 metre civarına düşen yerlerde ise sigma koordinat sistemini tercih etmek su kolonu için uygun ve gerçeğe yakın olacaktır.



Şekil 3.3: 4 tabakalı sigma.



Şekil 3.4: 4 tabakalı kartezyen (traşlanmış hücreler).



Şekil 3.5: Su kolonunda kartezyen (altta) ve sigma (üstte).

3.1.5. Asimilasyon modülü

Asimilasyon modülü, gevşetme uygulamasında kullanılan bilginin işlenmesinden sorumludur. Genellikle referans alanları okur ve gevşetme katsayıları alanları, referans çözümlere rahat çözümler sunmak için kullanılır. Standart gevşetme uygulaması MOHID'de aşağıdaki denklem kullanılarak uygulanır.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\phi_{ref} - \phi}{\partial_T} \quad (3.15)$$

Burada, ϕ model tarafından hesaplanan gevşetilmiş değişkeni temsil ederken, ϕ_{ref} referans çözümü ve T ise gevşetme katsayısını temsil eder.

Hidrodinamik modül ve Su Özellikleri modülü bilgi okumak ve hazırlamak için bu modülü kullanırlar. Gevşetme algoritmaları aslında Hidrodinamik ve Su Özellikleri modüllerinde programlanmış olup, Asimilasyon Modülünü "okunur" modül haline getirirler. Bu tip yaklaşım normalde modelleri iç içe getirirken veya klimatolojik referans çözümleri kullanırken uygulanır.

3.2. MOHID Modelleme Sisteminin Avantaj ve Dezavantajları

Son yıllardaki bilgisayar sistemlerindeki, operasyonel oşinografi ve meteorolojideki gelişmeler petrol kirliliği tahmin modellerinin gelişmesine katkı sağlamıştır. Birçok

model, petrol şirketleri, mühendislik firmaları, araştırma merkezleri, üniversiteler ve devlet birimleri tarafından yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

MOHID modelleme sistemi kullanıcılara bir bütünleşik modelleme sistemini kullanmaya olanak sağlar. MOHID, sadece fiziksel ve biyokimyasal prosesleri değil, aynı zamanda farklı sistemleri (haliçler ve havzalar) ve içiçe geçmiş modelleri (ana ve alt modeller) simüle etmesi ile kullanıcılara avantaj sağlar. MOHID bu avantajları, çeşitli dikey koordinat sistemleri, güvenilir ve sağlam tasarım yapısı ile bu tip modeller arasındaki en ayrıntılı modellerden biri olarak kabul edilir.

Bazı modeller petrol damlacıklarının dikey hareketini ve üç boyutlu hidrodinamik alanları simüle edemez ve sadece bir tabaka kullanırlar. MOHID üç boyutlu olarak hidrodinamik alanları simüle edebilir ve çoklu tabaka kullanılabilir. MOHID, dikey koordinat sisteminde sigma ve kartezyen gibi sistemlerin kullanılmasına olanak sağlar. Örnek olarak bu çalışmada su kolonunu simüle etmek için 50 tabakalı kartezyen koordinat sistemi kullanılmıştır.

MOHID'in bir diğer avantajı ise geri izleme modülünü içermesidir. Bu sayede kirliliğin meydana geldiği yerin bilinmediği durumlarda, kirlilik kaynağının yeri tespit edilir. MOHID'in içerdiği modüller ile diğer modelleme sistemlerinin içerdiği modüllerin karşılaştırılması Çizelge 3.2'de verilmiştir (Fernandes ve diğ, 2014).

Çizelge 3.2: MOHID modelleme sisteminin ve diğer modellerin içerdiği modüller.

	ADIOS	GNOME	OILMAP/SARMAP/OILMAPWEB	OSCAR	MOTHY	POSEIDON OSM	MEDSLICK	MEDSLIK II	SEATRACK WEB	OILTRANS	BSHmod.L	SLROSM	OD3D+LEEWAY	Gulfspill	MOHID
Proses/Model															
Adveksiyon	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Difüzyon	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Rüzgar Akıntısı	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Stokes Akıntısı	-	-	-	+	+	+	-	+	+	+	+	-	+	-	+
Yüzen Nesneler	-	-	+	-	+	-	+	+	+	-	+	-	+	-	+
Geri İzleme	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	-	-	-	-	+
Kıyıda Birikim	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Yayılma	+	-	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	-	+	+
Buharlaşma	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Emülsiyon	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Doğal Dağılım	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Dikey Hareket	-	-	+	+	+	+	-	-	+	-	+	+	+	-	+
Çözünme	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+
Sedimentasyon	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	+	-	-	-	+

Bazı modeller de sadece belirlenmiş özel alanlar için geliştirilmiştir. Bu amaçla özel alanların batimetrisi ve hidrodinamik özellikleri ayrıntılı bir şekilde çıkartılmıştır. MOHID’de ise özel alanlar için ayrı bir arayüz yoktur. MOHID aynı simülasyonda farklı bölgeler için farklı meteorolojik ve oşinografik tahminleri entegre edemez.

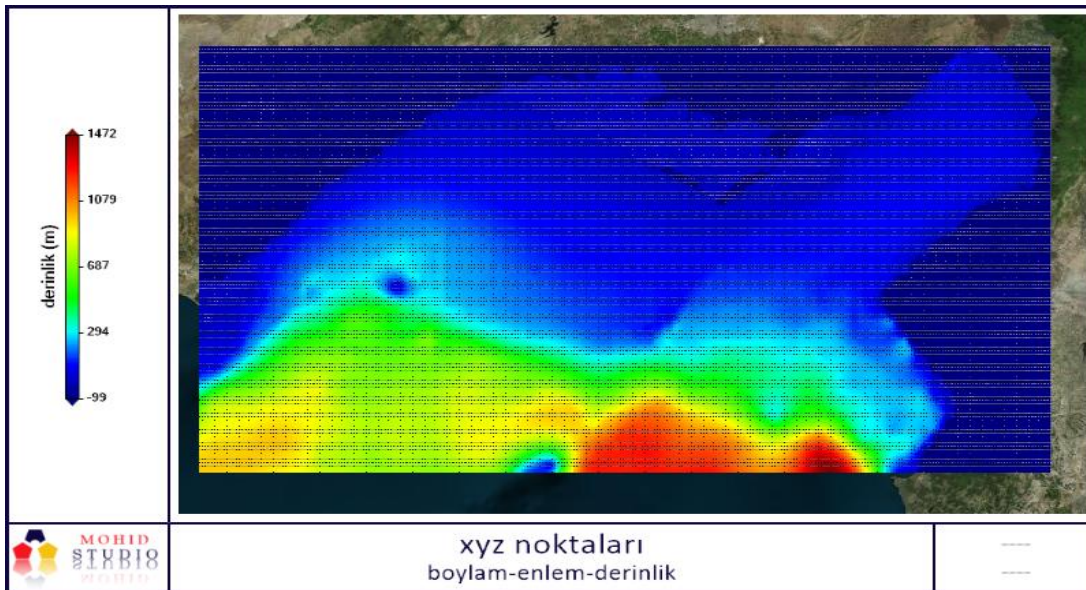
Genel olarak ticari olmayan Çizelge 3.2’de verilen modeller, resmi makamlar tarafından kirlilik dağılımını tahmin etme, kirliliği önleme ve bertaraf etme çözümlerinde kullanılır.

MOHID kullanıcılar tarafından gelen geri dönüşler ile sürekli olarak iyileştirilmekte ve geliştirilmektedir. MOHID, veri değişimine olanak sağlar ve basitleştirilmiş kod yapısı ile kolaylıkla modifikasyonu yapılabilir.

3.3. Model Kurulumu

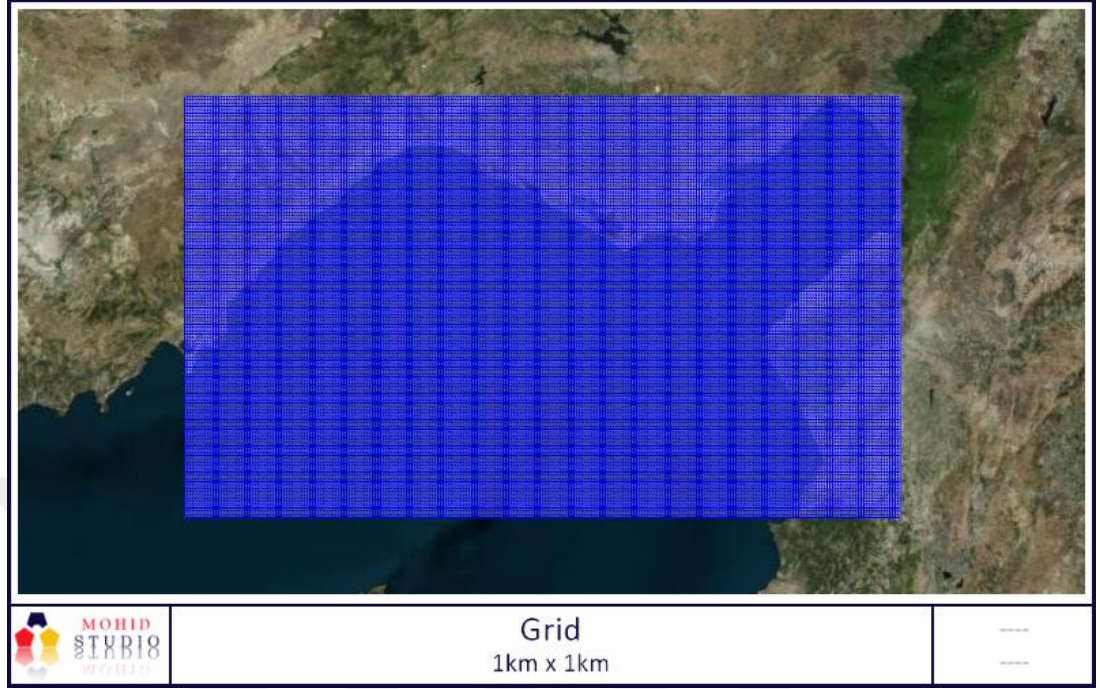
3.3.1. Batimetri oluşturma

Çalışılacak bölge için derinlik haritası ASCII formatında 1 km x 1 km çözünürlüğünde indirilmiştir (Url-3). İndirilen formatta derinlikler negatif değerlerde, deniz seviyesinin üstündeki değerler (kara parçaları) pozitif değerlerdedir. MOHID programlama dilinin derinlikleri pozitif olarak okuyabilmesi için tüm değerler Excel programında -1 ile çarpılmıştır. Çarpım sonucunda pozitif değerler deniz seviyesinin altı, negatif değerler ise kara olarak elde edilmiştir. Çarpım sonucunda elde edilen negatif değerler -99’a dönüştürülmüştür. Böylece, kara parçası olan yerlerde MOHID hesaplama yapmayacaktır. Excel formatındaki veriler notepad formatına dönüştürülerek xyz (boylam, enlem, derinlik noktaları) oluşturulmuştur.



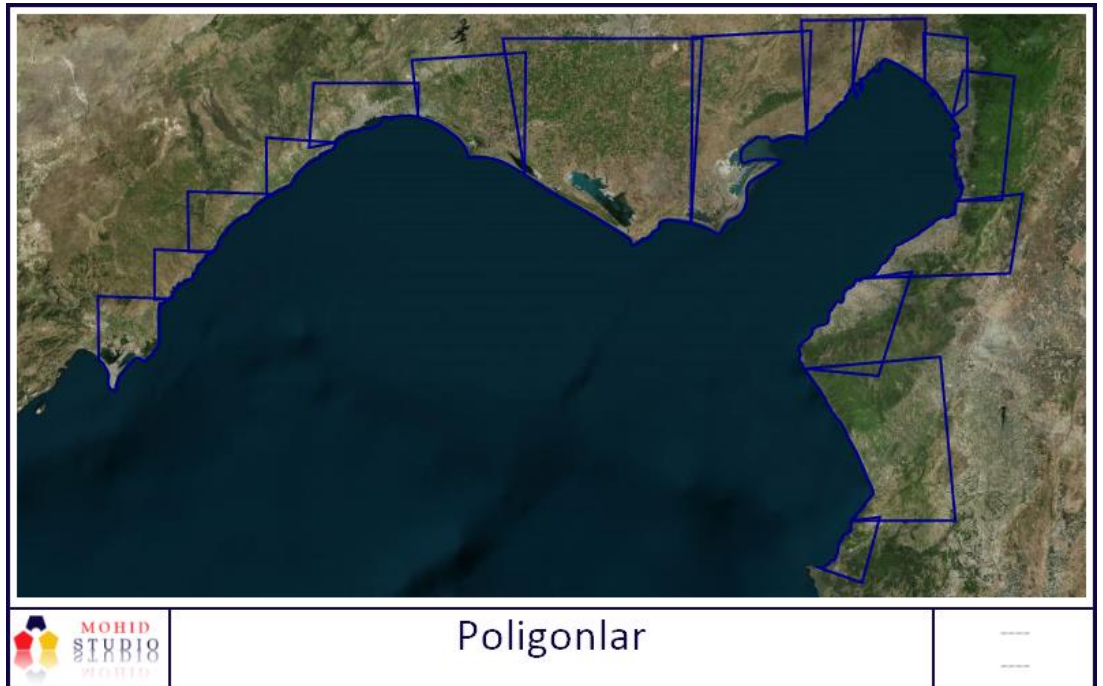
Şekil 3.6: XYZ noktaları.

MOHID kullanılarak, oluşturulan xyz noktaları ile 1km x 1km çözünürlükte gridler oluşturulmuştur.



Şekil 3.7: MOHID'de oluşturulan gridler.

Poligonlar, MOHID'de hesap yapılmayacak bölgeler (kara parçaları) olarak adlandırılır.

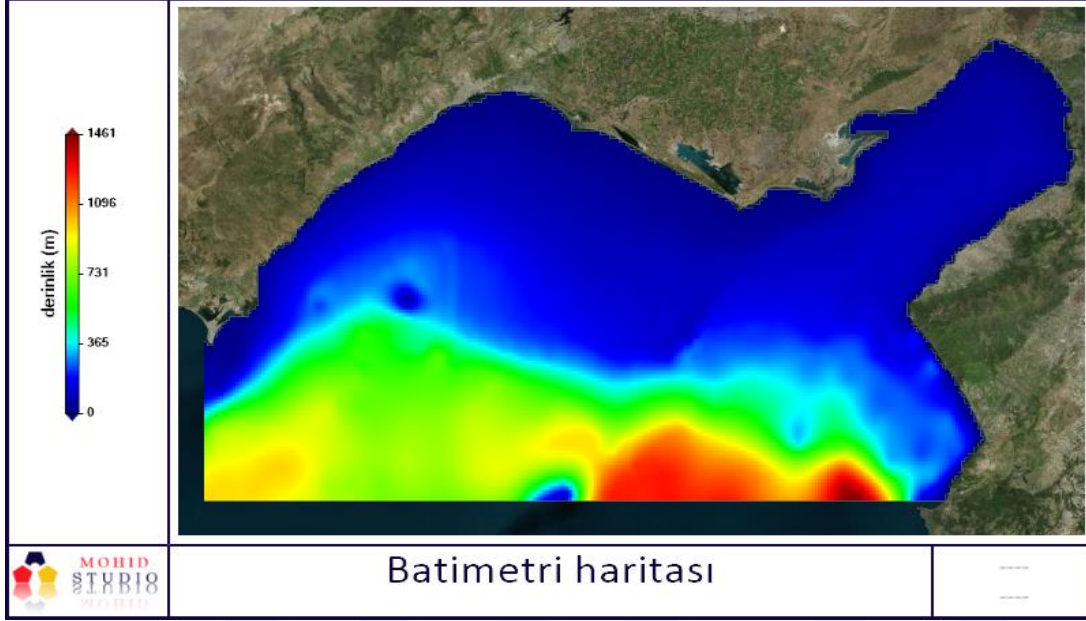


Şekil 3.8: Poligonlar.

Batimetri haritasını oluşturmak için 3 adet veri seti hazırlanmıştır.

- xyz noktaları
- Gridler
- Poligonlar

Bu üç veri seti modelde enterpolasyon yapılarak derinlik haritası oluşturulmuştur.



Şekil 3.9: Batimetri haritası.

3.3.2. Atmosferik koşullar

Atmosferik veriler SKIRON tahmin modelleme sisteminden elde edilmiştir. SKIRON Atina Üniversitesi ve Aristo Üniversitesi tarafından geliştirilen bir modelleme sistemidir.

SKIRON bütünüyle fiziksel atmosferik bir modeldir. SKIRON değişken fizyografik özellikleri ile bölgesel ve orta ölçekli simülasyonlar için uygundur.

SKIRON hava sıcaklığı, atmosferik basınç, bulutluluk, uzun dalga radyasyonu, buharlaşma, gizli ısı, yağış, bağıl nem, duyulur ısı, özgül nem ve rüzgar hızı verilerini içerir.

SKIRON grid çözünürlüğü 6 km x 6 km'dir.

Modelde SKIRON hava tahmin sisteminden alınan yönü ve şiddeti anlık değişen rüzgar verisi kullanılmıştır. Rüzgar hidrodinamik alanları etkileyen ana faktördür. Hidrodinamik alanlar, Lagrange petrol dağılım modelini baz alarak petrol yayılımı simüle edilmiştir.

Verileri internet ortamında indirmek için MATLAB programı kullanılmıştır. Veriler GRIB formatında indirilmiş, daha sonra MATLAB kullanılarak HDF5 formatına dönüştürülmüştür.

3.3.3. Sınır koşulları

MERCATOR Ocean, Fransız operasyonel oşinografi merkezi olup, operasyonel sistemleri geliştirerek ve çalıştırarak, deniz dibinden yüzeye kadar üç boyutlu olarak tanımlama, tahmin etme ve izleme yapar.

MERCATOR akıntı, deniz seviyesi yüksekliği, tuzluluk ve sıcaklık verilerini içermektedir. MERCATOR çözünürlüğü 9 km x 9 km'dir. Mart 2014 verileri NetCDF formatında internet ortamında indirilmiştir ve MATLAB programı kullanılarak HDF5 formatına dönüştürülmüştür.

Sınır koşulları ve başlangıç koşulları olarak MERCATOR'dan elde edilen deniz suyu sıcaklığı, tuzluluk, su seviyesi ve akıntı verileri kullanılmıştır.

3.3.4. Gel-git

Gel-git (med-cezir), ayın ve güneşin konumuna bağlı olarak kütle çekimlerinde meydana gelen değişiklikler nedeniyle deniz seviyesindeki yükselme ve alçalmalardır. Bu yükselme ve alçalmalar günlük olarak oluşur ve denizin kıyı sınırının karaya ilerlemesine ve denize doğru çekilmesine sebep olur. Kıyısız bölgelerde su sirkülasyonunun ana nedenlerinden biri gel-gitlerdir.

Genel olarak Akdeniz'de gel-git olayı düşük seviyelerde gerçekleşmesine rağmen, deniz suyu sirkülasyonunda önemli bir yere sahiptir.

FES (Finite Element Solution), tüm dünyada yaygın olarak kullanılan gelgitsel bileşenleri içeren gelgit modelidir. Modelde FES 2004 versiyonu kullanılmış olup, ana modelde uygulanmıştır.

3.3.5. Dikey geometri

Modelde dikey geometri olarak, MERCATOR Ocean'ın kullandığı geometri ile aynı 50 tabakalı kartezyen koordinat sistemi kullanılmıştır.

3.3.6. Model yapısı

MOHID yazılım kısmındaki içiçe geçme tabakaları sayısında bir kısıtlama olmaksızın, kullanıcıya tek yön içiçe geçmiş model ağacını oluşturmaya olanak sağlar. Modelleme çalışmaları iki model kullanılarak gerçekleştirilmiştir: İlki bütün sistem üzerinde (ana

model) ve diğeri daha fazla grid çözünürlüğüyle çalışma alanı üzerinde kurulan alt modeldir.

İki model arasındaki bağlantı tek-yönlü ölçek küçültme yöntemi (içiçe modeller) kullanılarak sağlanmıştır.

Daha az çözünürlükteki gridlerle çalıştırılan ana model, hidrodinamik ve su özellikleri için temel olarak kullanılmıştır. Böylece, alt model için gerekli olan sınır koşulları belirlenmiştir.

Ana ve alt modeller arasındaki iletişim, alt model tarafından özümlenen, ana modeldeki hücre gruplarının çözümlerinin gevşetilmesiyle gerçekleşir. Bilgi değişimi yalnızca tek bir yöne, ana modelden alt modele doğru yapılır.

Böylece, model ana modelden alınan sınır koşullarını kullanmaya zorlanır. Komutlar MOHID'e yazılım tarafından kullanılan çeşitli modüller ile girilir.

3.3.7. Isınma periyodu

Simülasyona başlamadan önce modelin stabil olmasını sağlamak için model ısınma periyodunda çalıştırılmıştır. Isınma periyodu iki aşamada gerçekleşmiştir. Her yeni simülasyonun ilk çalıştırılması öncelikle birincil çalıştırma (başlangıç hızları olmadan, sıfırdan başlayarak, stabilizasyon için) ile yapılmıştır ve veriler anlık olarak değil belli bir zamana yayılarak uygulanır. Birincil çalıştırma, modelin herhangi bir önceki sonuç olmadan başlangıç noktasındaki gibi çalıştığını işaret eder. İkincil çalıştırma ilkinin sürekli hali şeklinde yapılır. Bu çalıştırma hesaplamalarına birincil çalıştırmadan elde edilen verileri başlangıç noktası olarak devam eder.

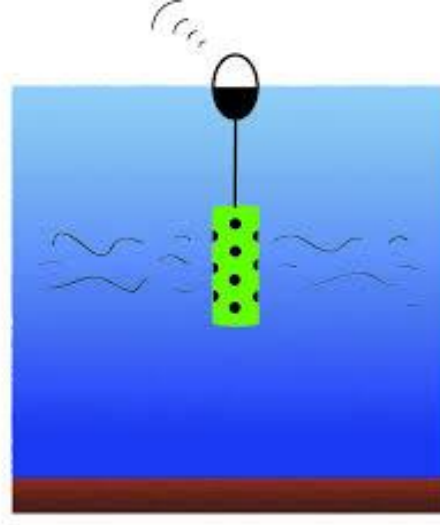
Her bir çalışma periyodundan önce iki günlük ısınma periyotları modeli stabilize etmek için simüle edilir.

3.3.8. Model validasyonu

23-30 Mart 2014 tarihleri arasında Mersin önlerine bir adet şamandıra Coriolis projesi kapsamında denize bırakılmıştır. Şamandıra Şekil 3.10'da gösterilmiş olup, üç saat aralıklarla deniz suyu sıcaklığı ve konum bilgilerini GPS bağlantısı yoluyla ana merkeze ulaştırmıştır.

Söz konusu tarihlerde model çalıştırılmış, model sonuçları ile şamandıranın hareketleri incelenmiştir. Başlangıç noktaları aynı olan şamandıra ile modeldeki petrol tabakasının aynı yöne doğru hareket ettiği gözlemlenmiştir. MATLAB programında zamana bağlı şamandıranın konumu ile petrol tabakasının merkez noktası karşılaştırılmış ve aradaki mesafe program yardımıyla hesaplanmıştır. 24 saat

sonunda aradaki mesafenin 2,5 km civarında olduğu hesap edilmiştir. Aşağıdaki çizelgede üç saat aralıklarla şamandıranın konumu, petrol tabakasının kütle merkez noktasının konumu ve bu konumlar arası mesafeler kilometre cinsinden verilmiştir.



Şekil 3.10: Şamandıra.

Model ile şamandıranın aynı yöne hareket etmesi ve aradaki mesafenin 2,5 km civarında olması nedeniyle modelin gerçeğe yakın sonuçlar verdiği çıkarımı yapılabilir.

Çizelge 3.3: Şamandıra verileri ve model sonuçları (konum ve aradaki mesafe).

Saatler	Boylam Şamandıra	Enlem Şamandıra	Boylam Model	Enlem Model	Mesafe model- şamandıra (km)
0	34.604	36.71	34.604	36.71	0,00
3	34.601	36.709	34.603	36.713	0,47
6	34.596	36.71	34.604	36.717	1,04
9	34.589	36.711	34.604	36.715	1,39
12	34.585	36.71	34.598	36.71	1,13
15	34.572	36.711	34.591	36.706	1,77
18	34.563	36.708	34.579	36.702	1,57
21	34.547	36.707	34.558	36.692	1,97
24	34.533	36.706	34.538	36.684	2,51



Şekil 3.11: Şamandıra ve petrol tabakasının hareketi

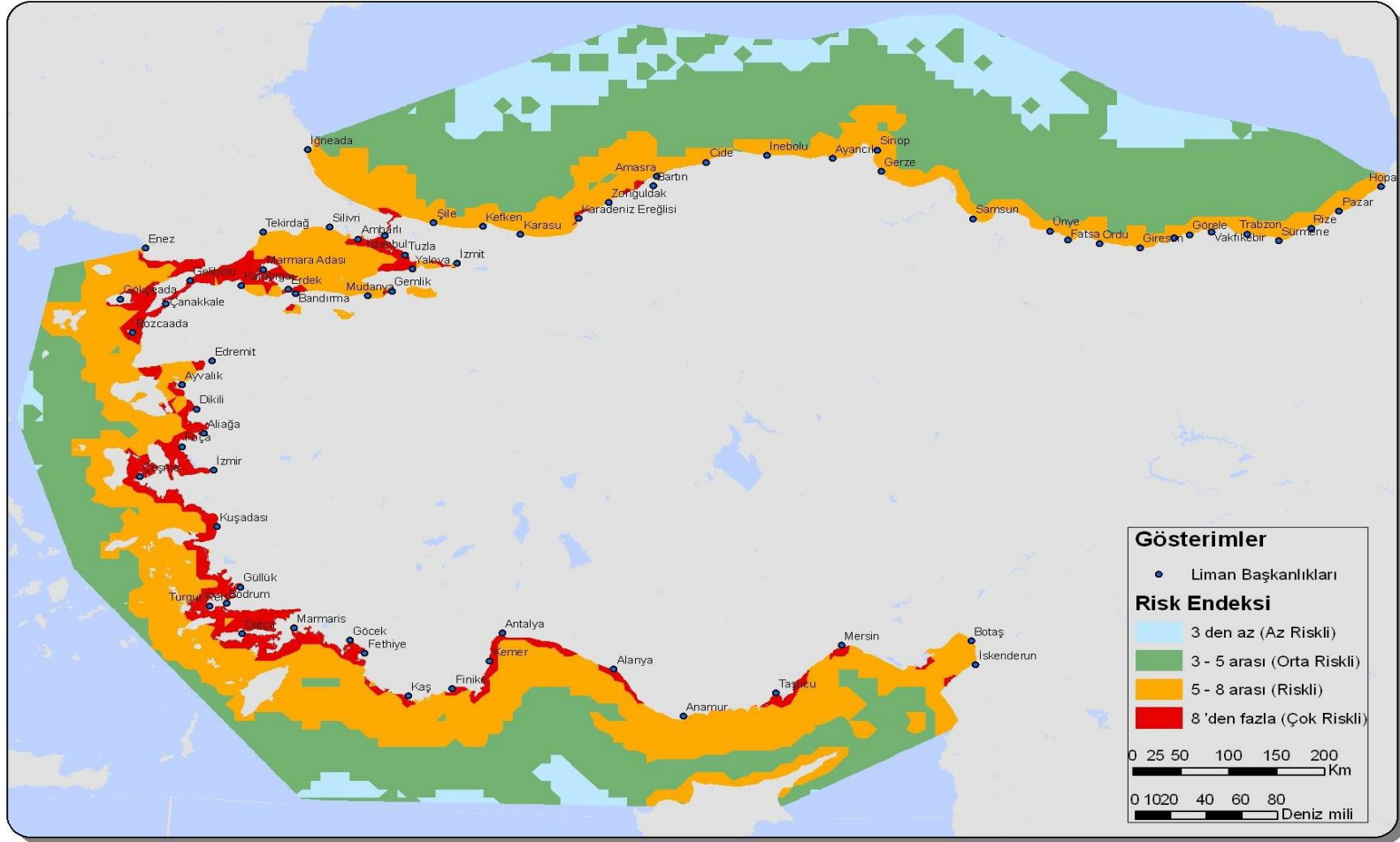
3.4. Senaryolar ve Uygulamaları

3.4.1. Senaryo tanımları

Senaryo gereği 8000 ton petrolün kaza sonucu yayıldığı varsayılmıştır. 8000 ton literatürdeki deniz kazalarına göre çok düşük bir miktar olarak görülmesine rağmen, nispeten daha küçük kazalar sonucunda denize dökülebilecek miktarı temsil ettiği için istatistiksel olarak daha sık rastlanabilecek bir durumu temsil etmektedir. Literatürdeki petrol kirliliği modelleme çalışmalarında yayılan petrol miktarı genel olarak 8000 ton olarak alınmıştır.

23-30 Mart 2014 tarihleri arasında Coriolis Projesi kapsamında, Mersin önlerine bir adet şamandıra bırakılmıştır. Modelin bu şamandıradan alınan verilerle validasyonunu yapmak için, model bu tarihlerde çalıştırılmıştır. Bu kapsamda atmosferik veriler, başlangıç koşulları ve sınır koşulları verileri Mart 2014 ayı için, açık kaynaklardan indirilmiştir.

Veriler indirildikten sonra senaryo gereği Doğu Akdeniz'de gemi kazasının meydana gelebileceği muhtemel koordinatlar için çalışma yapılmıştır. Bu kapsamda Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı tarafından hazırlanan 2014-2023 Deniz Kirliliğine Neden Olan Kazalar Yol Haritası Belgesi'nde Türkiye'yi çevreleyen denizlerdeki kaza risk haritası (Şekil 3.12) incelenmiştir.



Şekil 3.12: Gemi trafiği risk haritası.

Risk haritasına istinaden Seyir Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı ile yapılan koordinasyon neticesinde Doğu Akdeniz’de meydana gelebilecek muhtemel kaza noktaları belirlenmiştir. Rafinerilerin ve petrol dolum istasyonlarının yoğun olduğu bu bölgede, Mersin önlerinde bir kaza noktası, İskenderun Körfezi’nde ise iki kaza noktası belirlenmiştir. Risk haritasına göre seçilen bu koordinatlar, Mersin önlerinde seçilen nokta için ‘çok riskli’, İskenderun Körfezi’ndeki iki nokta için ise ‘riskli’ kategorisine girmektedir.



Şekil 3.13: Kaza noktaları.

Kaza noktaları belirlendikten sonra, bölgedeki hakim rüzgar verileri Seyir Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı’ndan alınmıştır. Alınan verilere göre kış dönemi hakim rüzgar yönü kuzey ve kuzeydoğudan, ortalama hızı 10 knots (5,14 m/s), yaz dönemi hakim rüzgar yönü güneybatıdan, ortalama hızı 8,5 knots (4,37 m/s)’dir.

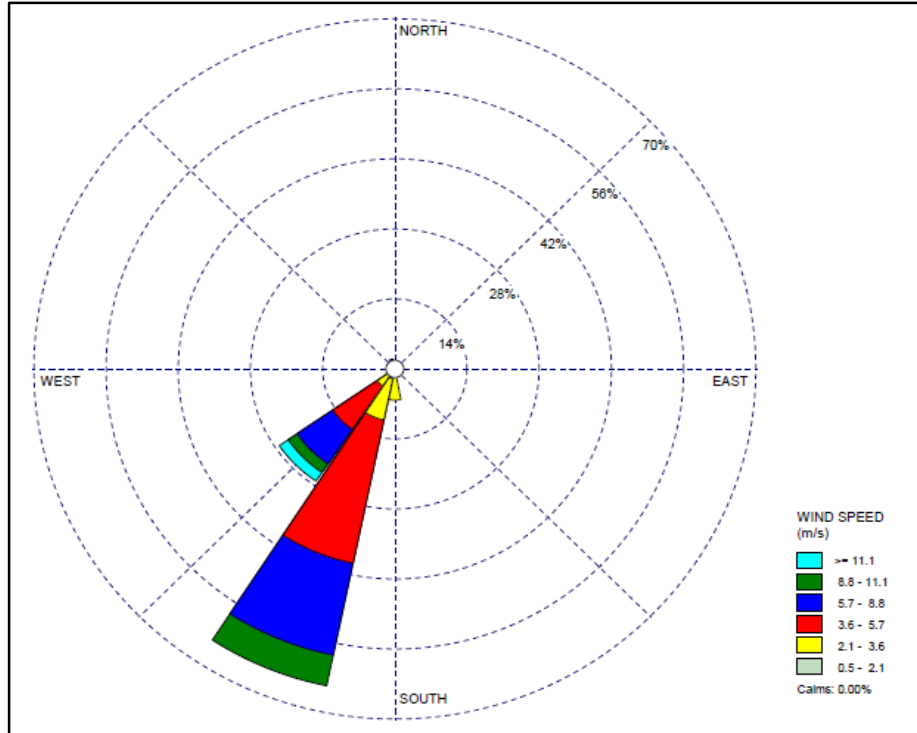
Simülasyon için model ısınma periyodu (4 gün) bittikten sonra 4 gün boyunca çalıştırılmıştır. Mart 2014 verileri incelenmiş, rüzgar şiddetinin ortalama 5 m/s ve hakim rüzgarın güneybatıdan olduğu durum (yaz mevsimi), 10-12 Mart 2014 (48 saat) tarihleri arasında tespit edilmiştir. 12-14 Mart 2014 tarihleri arasında ise rüzgar hızı azalmış ve yönü değişmiştir. Yaz koşullarını 4 gün boyunca simüle edebilmek için 10-12 Mart 2014 tarihlerindeki rüzgar verileri alınarak, 12-14 Mart 2014 tarihlerine kopyalanmıştır. Bu şekilde petrol kirliliğinin yayılımı (senaryo gereği yaz mevsiminde meydana geldiği durum için) 10-14 Mart 2014 tarihleri arasında 4 gün boyunca simüle edilmiştir.

Kış mevsiminde meydana gelecek petrol kirliliğini simüle edebilmek için Mart 2014 rüzgar verileri incelenmiştir. Rüzgar şiddetinin ortalama 5 m/s ve hakim rüzgar yönünün kuzey ve kuzeydoğudan olduğu durum (kış dönemi), 29-31 Mart 2014 (48 saat) tarihleri arasında tespit edilmiştir. 27-29 Mart 2014 tarihleri arasında ise rüzgar hızı azalmış ve yönü değişmiştir. Kış koşullarını 4 gün boyunca simüle edebilmek için 29-31 Mart 2014 tarihlerindeki rüzgar verileri alınarak, 27-29 Mart 2014 tarihlerine kopyalanmıştır. Bu şekilde petrol kirliliğinin dağılımı (senaryo gereği kış mevsiminde meydana geldiği durum için) 27-31 Mart 2014 tarihleri arasında 4 gün boyunca simüle edilmiştir.

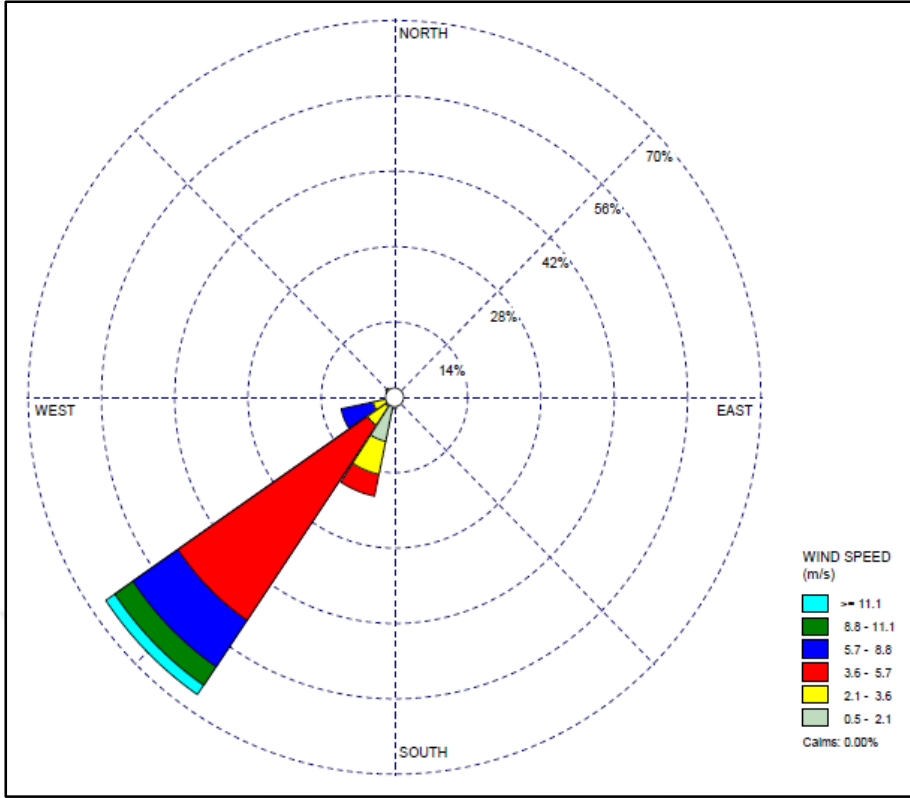
3.4.2. Yaz koşulları için simülasyon

Yaz koşullarını simüle edebilmek için 06-08 Mart 2014 tarihleri arasında birincil çalıştırma, 08-10 Mart 2014 tarihleri arasında ise ikincil çalıştırma yapılmıştır. Isınma periyodunu kapsayan bu iki çalıştırma bittikten sonra model stabil hale gelmiştir. Daha sonra model çalışmaya devam etmiş 10-14 Mart 2014 tarihlerinde petrol kirliliğinin yayılımının yaz koşullarında meydana geldiği durum için simüle edilmiştir.

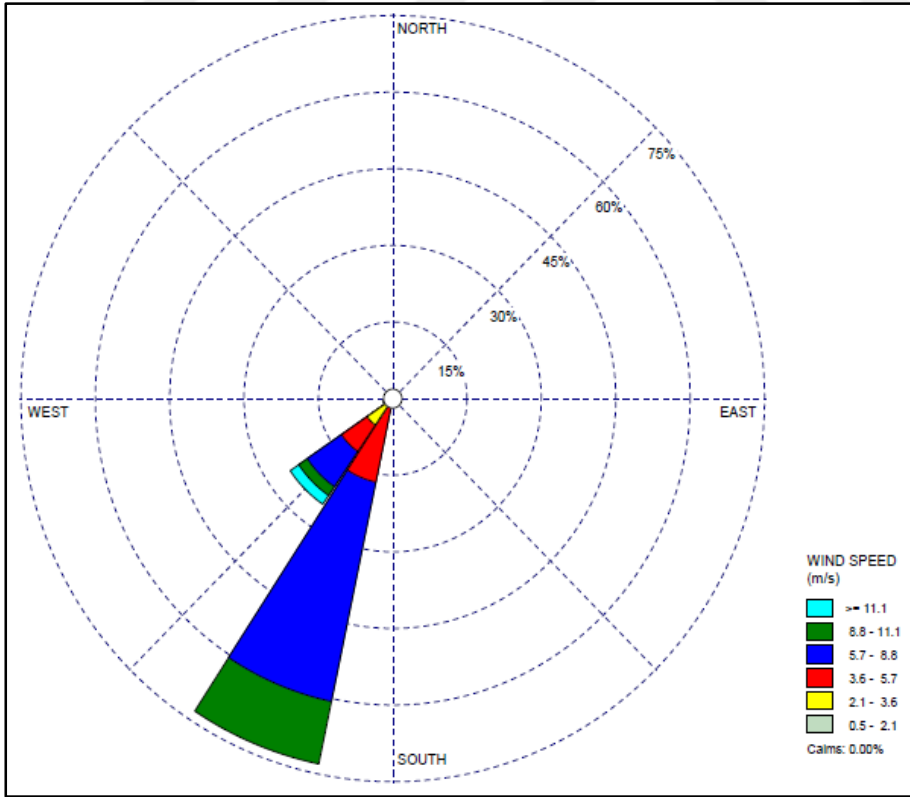
Yaz koşulları için hakim rüzgar yönü güneybatıdır. Çalışılan bölgede her noktada rüzgar hızı ve yönü farklıdır. Kaza noktalarındaki rüzgar hızı ve yönü aşağıdaki rüzgar gülü şekillerinde verilmiştir (Şekil 3.14-16).



Şekil 3.14: Kaza noktası 1'deki rüzgâr gülü (10-14 Mart 2014).

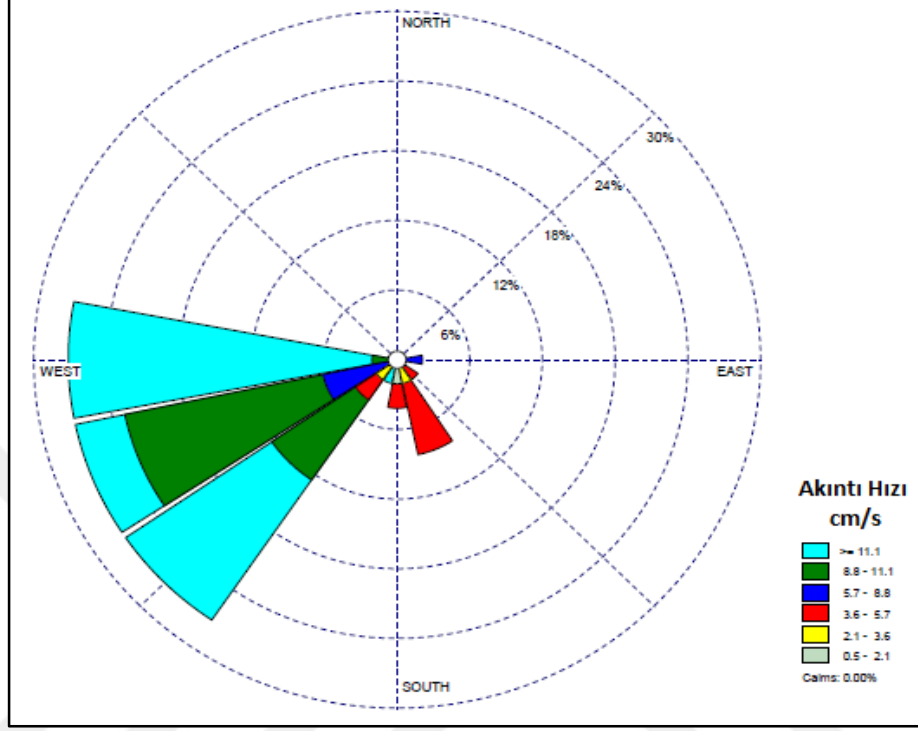


Şekil 3.15: Kaza noktası 2'deki rüzgar gülü (10-14 Mart 2014).

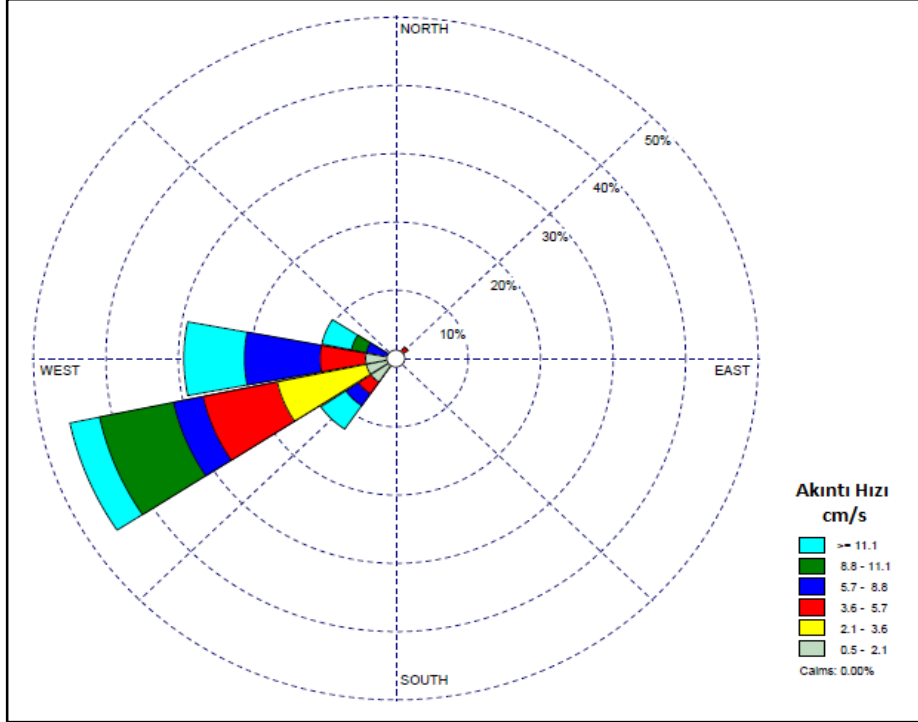


Şekil 3.16: Kaza noktası 3'teki rüzgar gülü (10-14 Mart 2014).

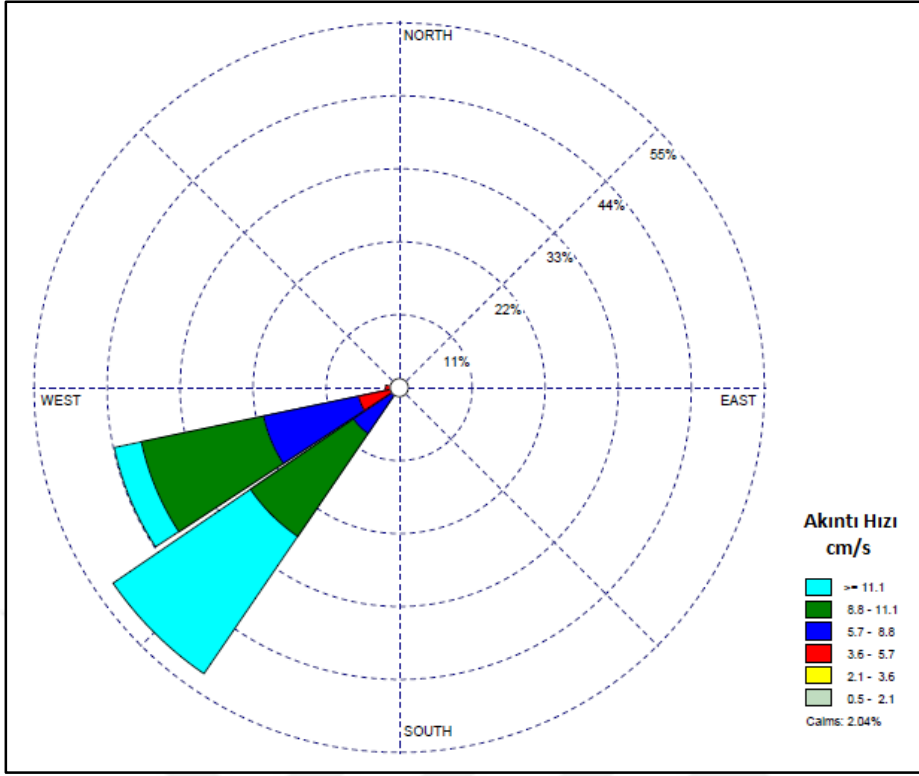
Rüzgar petrol partiküllerinin hareketini doğrudan değil, dolaylı olarak etkiler. Rüzgar hidrodinamik alanları belirleyen ana faktördür ve petrol partiküllerinin hareketini bu hidrodinamik alanlar belirler. Bu hidrodinamik alanlardaki akıntı hızları ve yönleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir (Şekil 3.17-19).



Şekil 3.17: Kaza noktası 1'deki akıntı hızı ve yönü (10-14 Mart 2014).

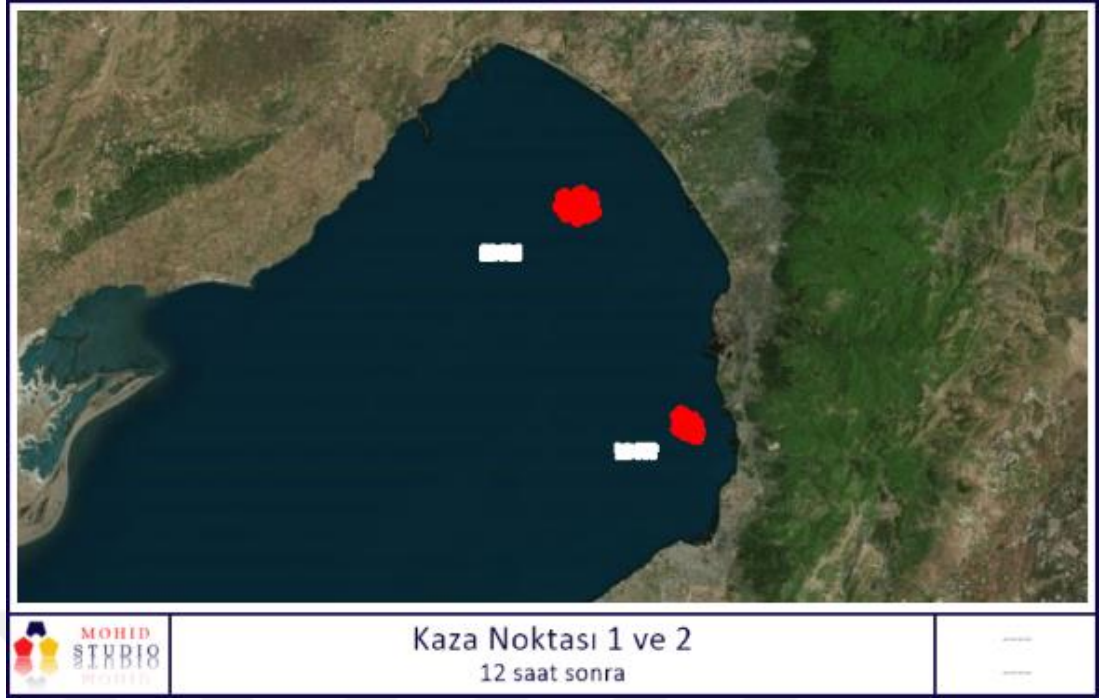


Şekil 3.18: Kaza noktası 2'deki akıntı hızı ve yönü (10-14 Mart 2014).

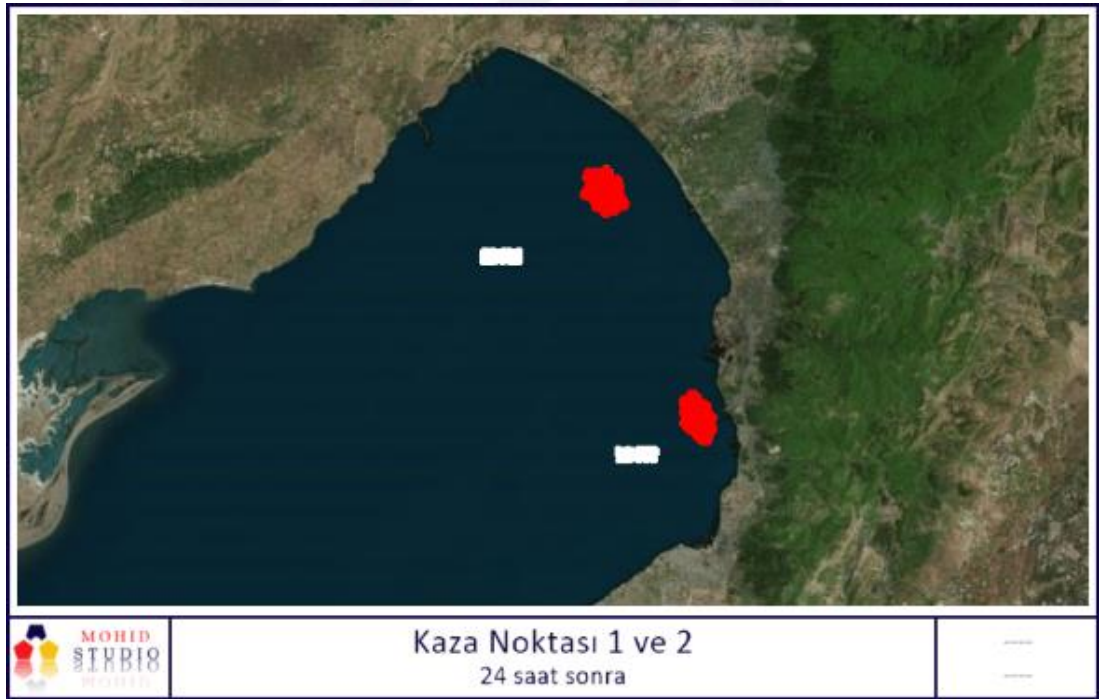


Şekil 3.19: Kaza noktası 3'teki akıntı hızı ve yönü (10-14 Mart 2014).

Aşağıdaki şekillerde petrol tabakasının hareketi verilmiştir (Şekil 3.20-29). Senaryo gereği kaza meydana geldikten bir süre sonra, Sahil Güvenlik uçağı ile kirlilik tespit edilmiştir. Beyaz renk ile gösterilen yerler kaza noktaları olup, kırmızı renk ise petrolün hareketini temsil etmektedir. Model girilen zaman adımına göre 2 saniyeye kadar petrolün yayılım hareketini vermektedir. Bu çalışmada zaman adımı olarak 1 saat girilmiştir. Model her saat için kirlilik hareketini simüle etmektedir. Şekillerde ise örnek olarak kirlilik meydana geldikten sonra 12. 24. 48. 72. ve 96. saatlerde petrolün yayılımı verilmektedir. Şekil 3.20-24 kaza noktası 1 ve kaza noktası 2 için petrolün yayılımını vermektedir.

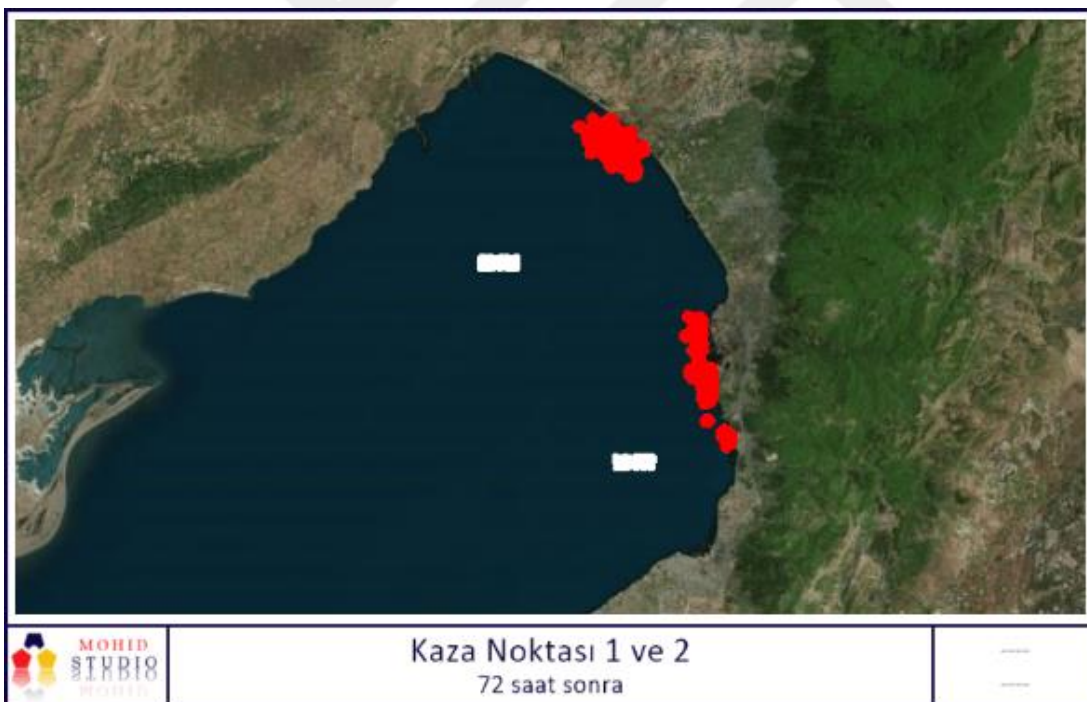
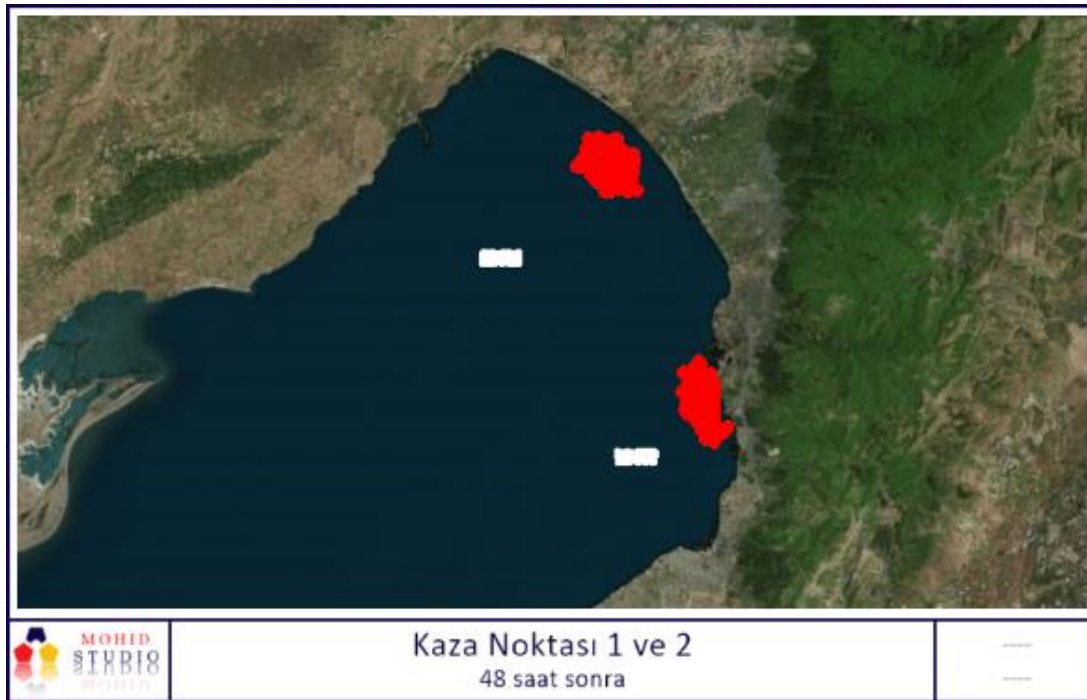


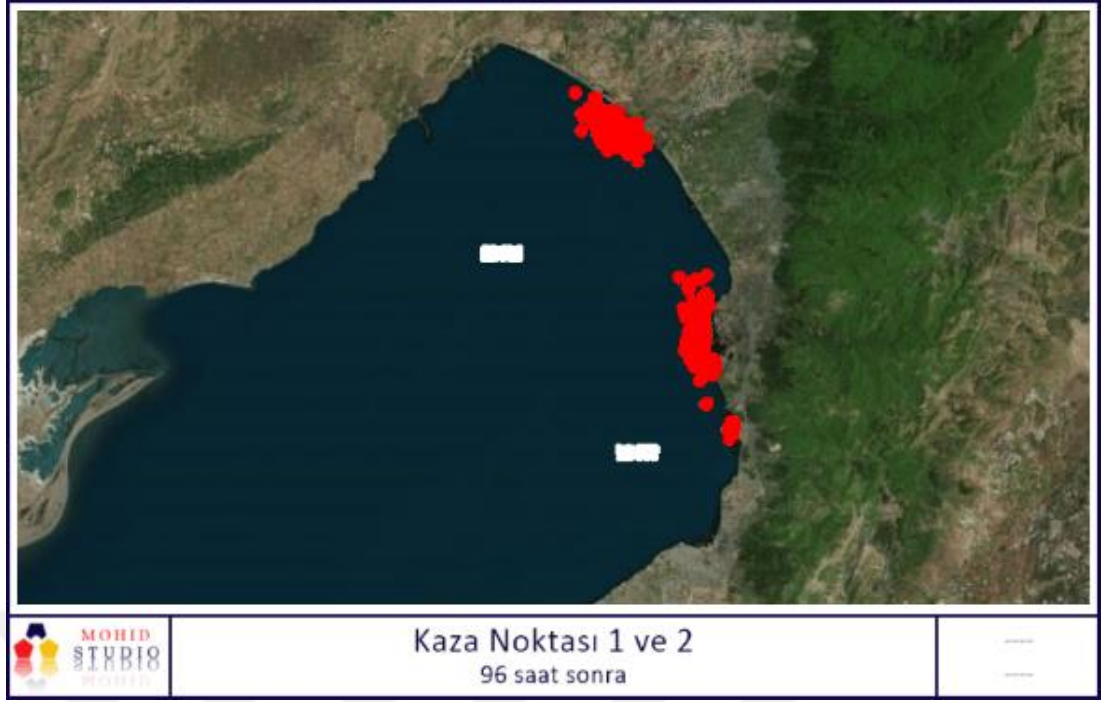
Şekil 3.20: Kaza noktası 1 ve 2'deki 12 saat sonraki durum.



Şekil 3.21: Kaza noktası 1 ve 2'deki 24 saat sonraki durum.

Her iki kaza noktasında kirlilik kıyıya doğru ilerlemektedir. Kirlilik, kaza noktası 1 için Dört Yol bölgesini, kaza noktası 2 için İskenderun ilçesi kuzey bölgesini tehdit etmektedir.





Şekil 3.24: Kaza noktası 1 ve 2'deki 96 saat sonraki durum.

Şekil 3.25-29 kaza noktası 3 için petrolün yayılımını vermektedir.



Şekil 3.25: Kaza noktası 3'teki 12 saat sonraki durum.



Şekil 3.26: Kaza noktası 3'teki 24 saat sonraki durum.

Kirlilik, kaza noktası 1 ve 2'de olduğu gibi kıyıya doğru ilerlemektedir. Kirlilik Kazanlı kıyı bölgesini tehdit etmektedir.



Şekil 3.27: Kaza noktası 3'teki 48 saat sonraki durum.



Şekil 3.28: Kaza noktası 3'teki 72 saat sonraki durum.

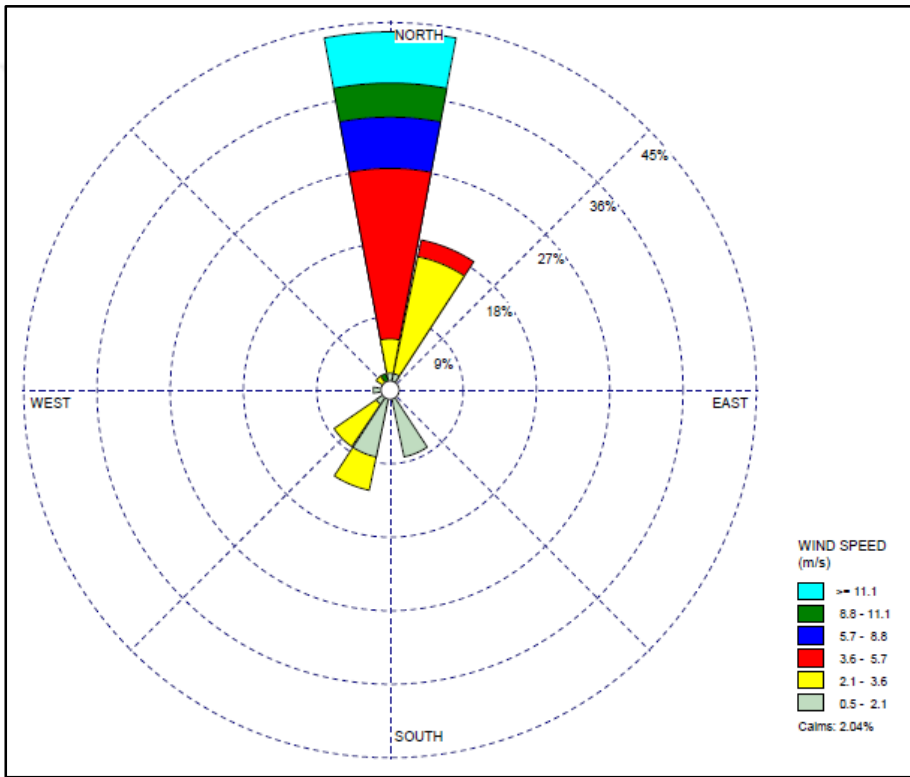


Şekil 3.29: Kaza noktası 3'teki 96 saat sonraki durum.

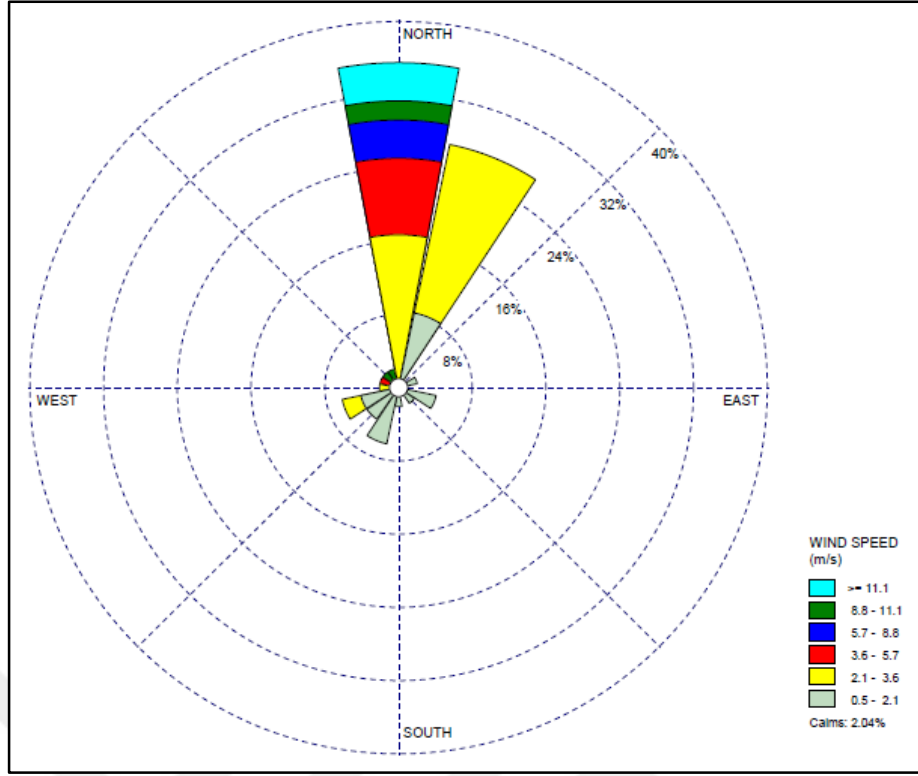
3.4.3. Kış koşulları için simülasyon

Kış koşullarını simüle edebilmek için 23-25 Mart 2014 tarihleri arasında birincil çalıştırma, 25-27 Mart 2014 tarihleri arasında ise ikincil çalıştırma yapılmıştır. Isınma periyodunu kapsayan bu iki çalıştırma bittikten sonra model stabil hale gelmiştir. Daha sonra model çalışmaya devam etmiş 27-31 Mart 2014 tarihlerinde petrol kirliliğinin yayılımının kış koşullarında meydana geldiği durum için simüle edilmiştir.

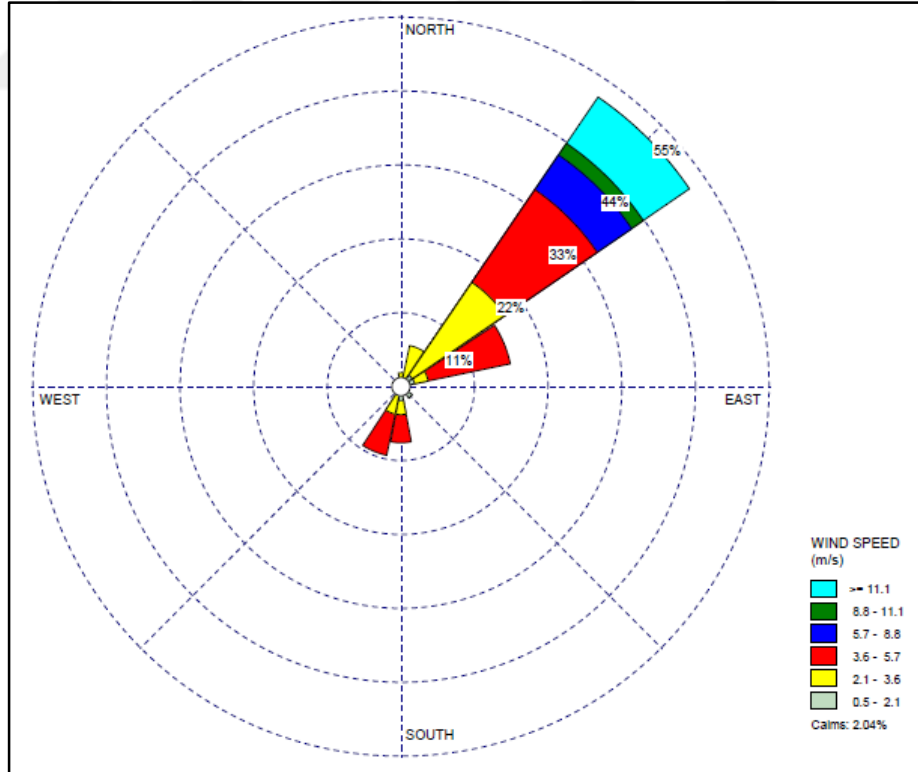
Kış koşulları için hakim rüzgar yönü kuzey ve kuzeydoğudur. Çalışılan bölgede her noktada rüzgar hızı ve yönü farklıdır. Kaza noktalarındaki rüzgar hızı ve yönü aşağıdaki rüzgar gülü şekillerinde verilmiştir (Şekil 3.30-32).



Şekil 3.30: Kaza noktası 1'deki rüzgar gülü (27-31 Mart 2014).

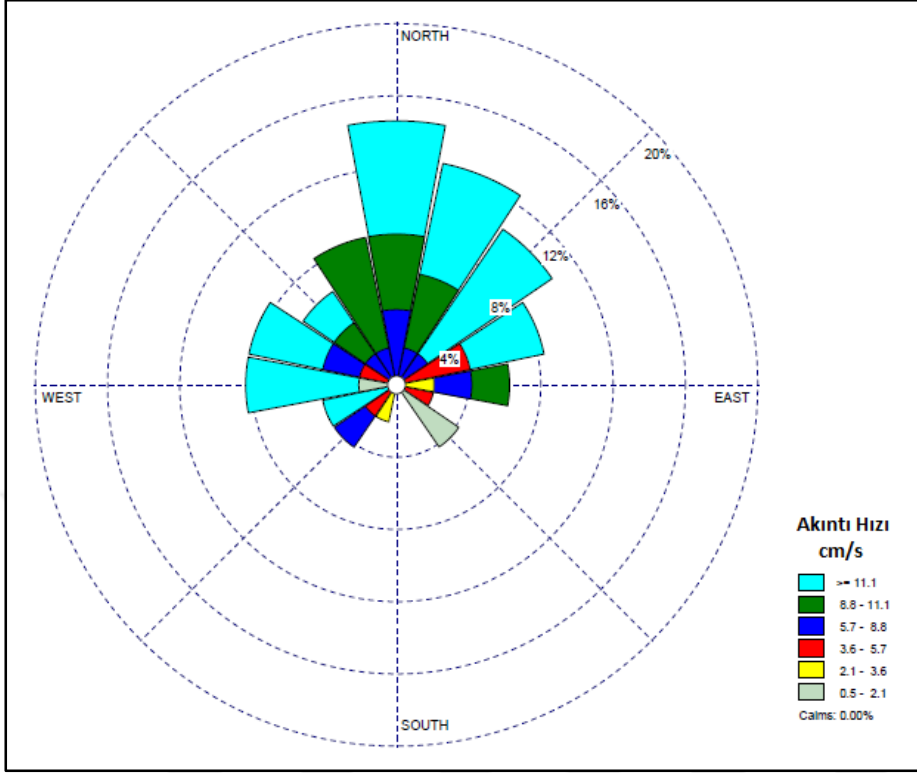


Şekil 3.31: Kaza noktası 2'deki rüzgâr gülü (27-31 Mart 2014).

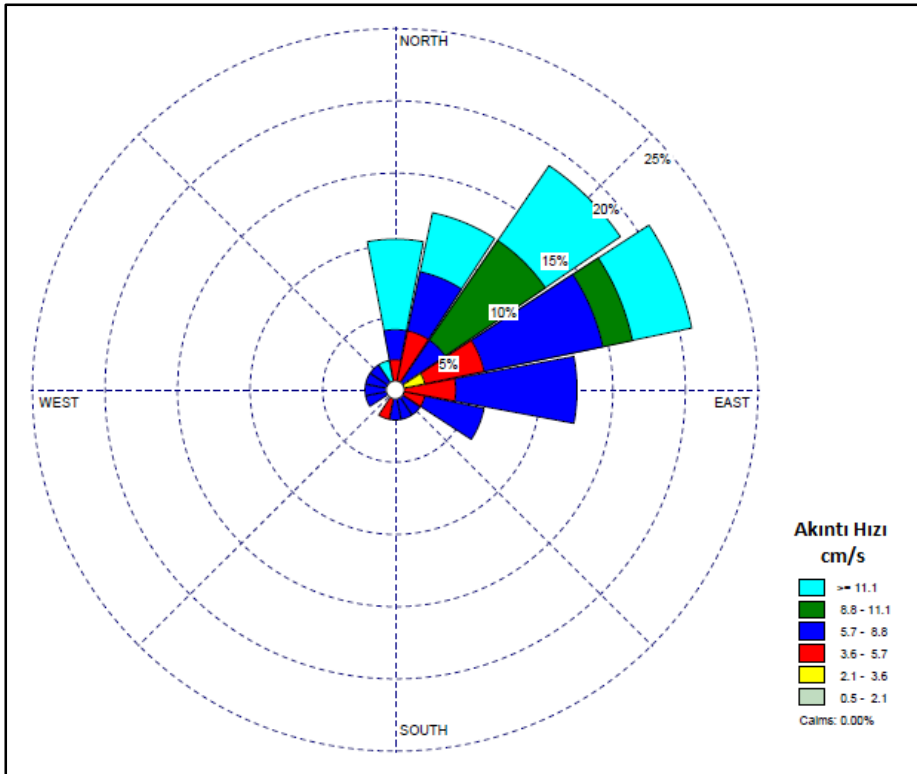


Şekil 3.32: Kaza noktası 3'teki rüzgar gülü (27-31 Mart 2014).

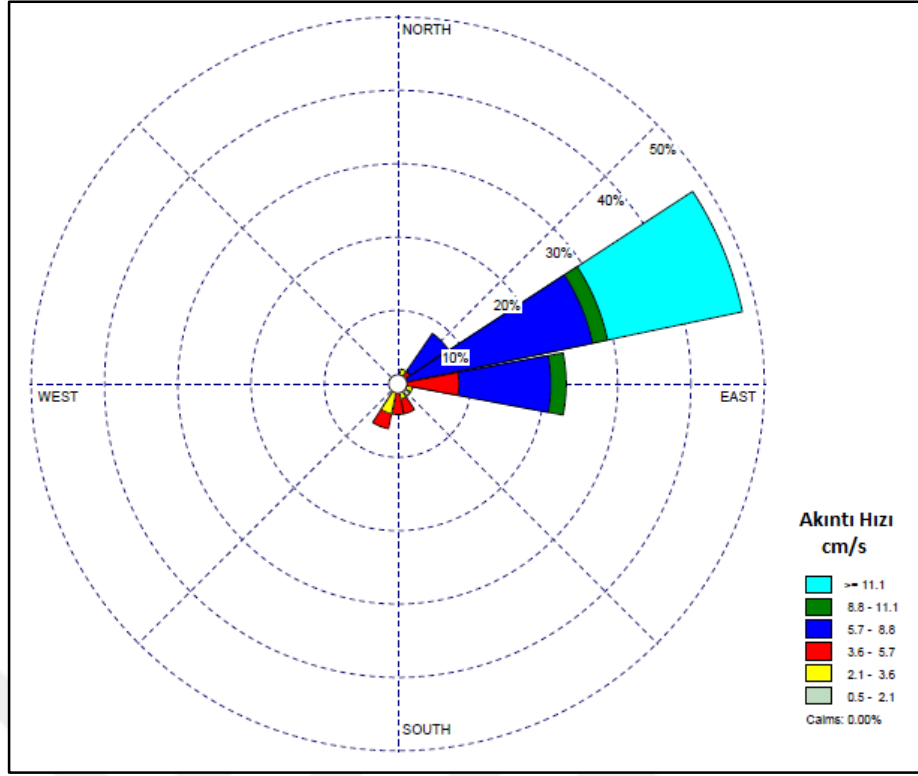
Petrol partiküllerinin hareketini hidrodinamik alanlar belirler. Bu hidrodinamik alanlardaki akıntı hızları ve yönleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir (Şekil 3.33-35).



Şekil 3.33: Kaza noktası 1'deki akıntı hızı ve yönü (27-31 Mart 2014).



Şekil 3.34: Kaza noktası 2'deki akıntı hızı ve yönü (27-31 Mart 2014).

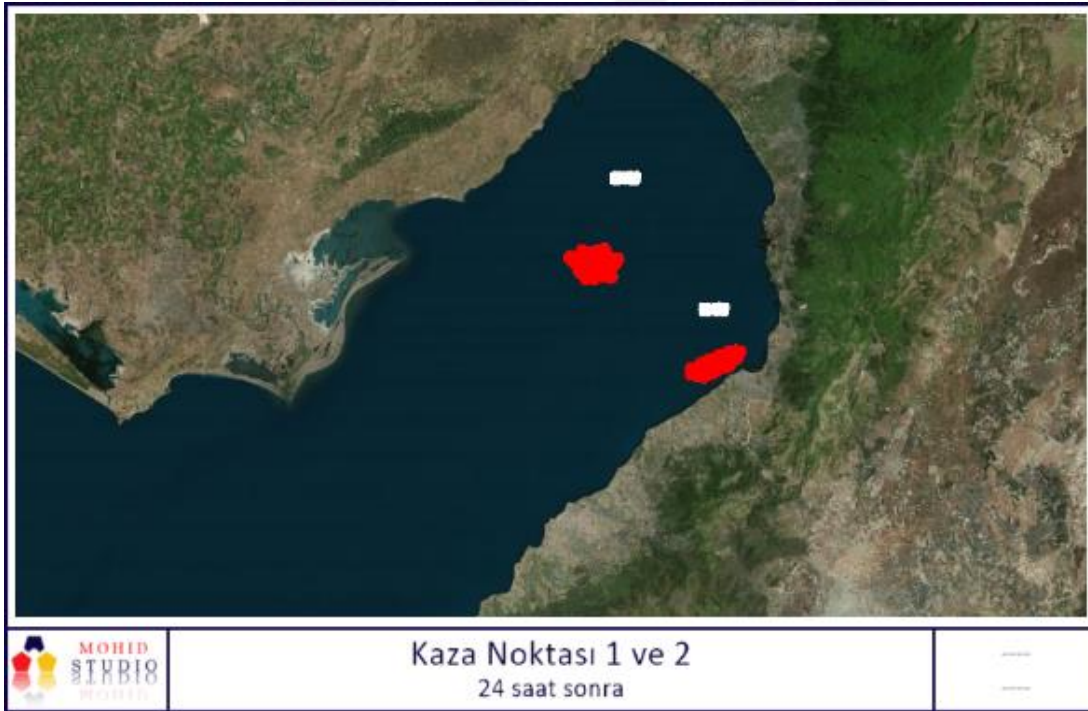


Şekil 3.35: Kaza noktası 3'teki akıntı hızı ve yönü (27-31 Mart 2014).

Aşağıdaki şekillerde petrol tabakasının hareketi verilmiştir. Senaryo gereği kaza meydana geldikten bir süre sonra, Sahil Güvenlik uçağı ile kirlilik tespit edilmiştir. Beyaz renk ile gösterilen yerler kaza noktaları olup, kırmızı renk ise petrolün hareketini temsil etmektedir. Model girilen zaman adımına göre 2 saniyeye kadar petrolün yayılım hareketini vermektedir. Bu çalışmada zaman adımı olarak 1 saat girilmiştir. Model her saat için kirlilik hareketini simüle etmektedir. Şekillerde örnek olarak, kirlilik meydana geldikten sonra 12. 24. 48. 72. ve 96. saatlerde petrolün yayılımı verilmektedir. Şekil 3.36-40 kaza noktası 1 ve kaza noktası 2 için petrolün yayılımını vermektedir.

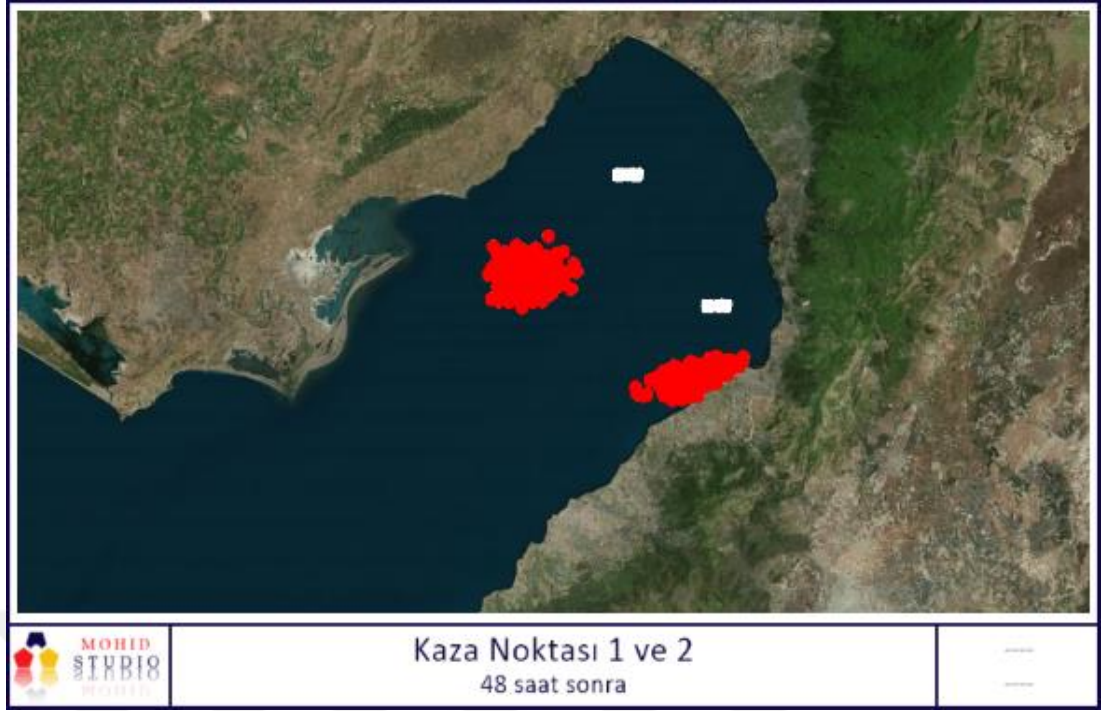


Şekil 3.36: Kaza noktası 1 ve 2'deki 12 saat sonraki durum.

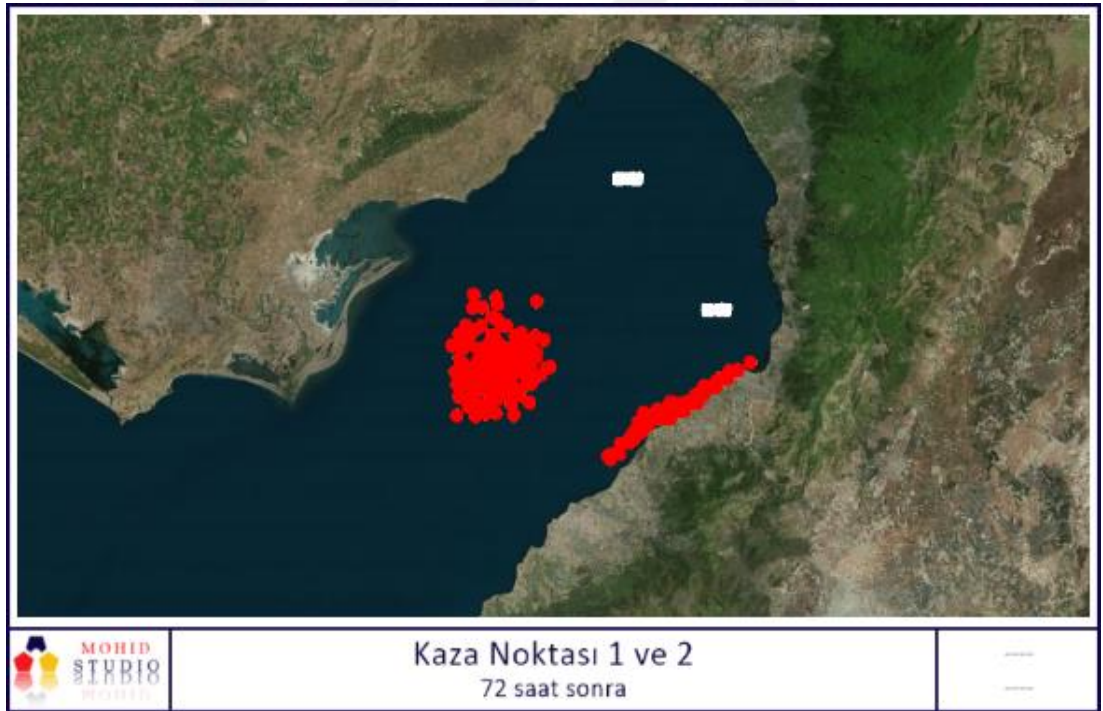


Şekil 3.37: Kaza noktası 1 ve 2'deki 24 saat sonraki durum.

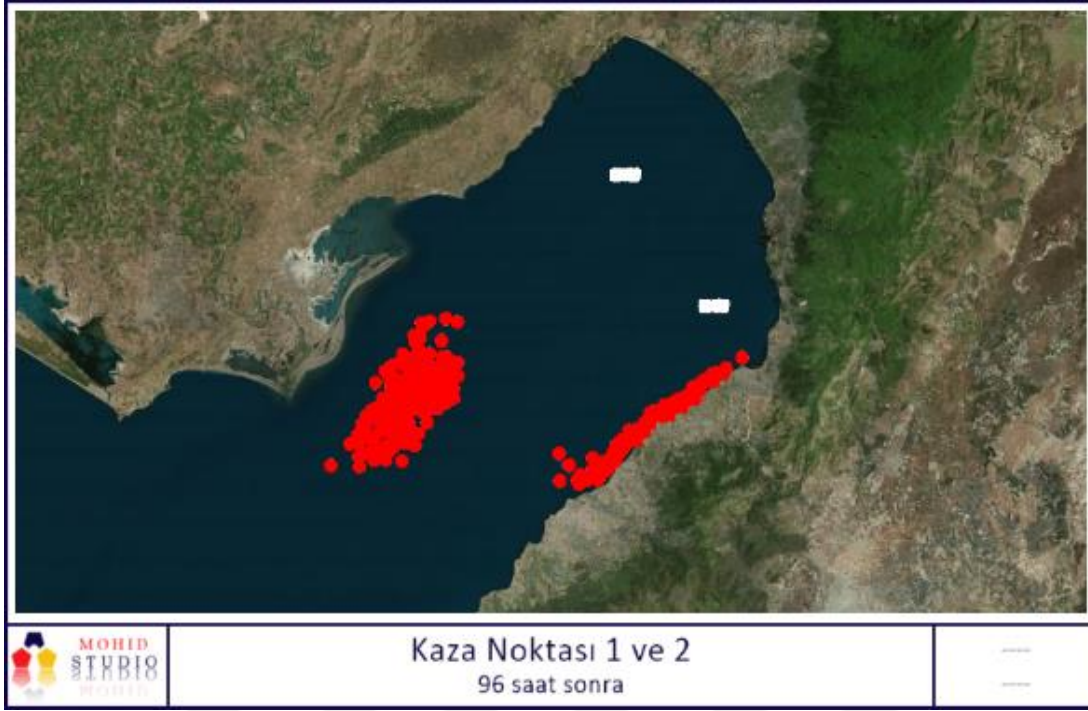
Kirlilik 12. saatten sonra hızlı bir şekilde yayılmaya başlamıştır. Kaza Noktası 2 için kirlilik İskenderun bölgesini tehdit etmektedir.



Şekil 3.38: Kaza noktası 1 ve 2'deki 48 saat sonraki durum.



Şekil 3.39: Kaza noktası 1 ve 2'deki 72 saat sonraki durum.



Şekil 3.40: Kaza noktası 1 ve 2'deki 96 saat sonraki durum.

Şekil 3.41-45 kaza noktası 3 için petrolün yayılımını vermektedir.



Şekil 3.41: Kaza noktası 3'teki 12 saat sonraki durum.



Şekil 3.42: Kaza noktası 3'teki 24 saat sonraki durum.

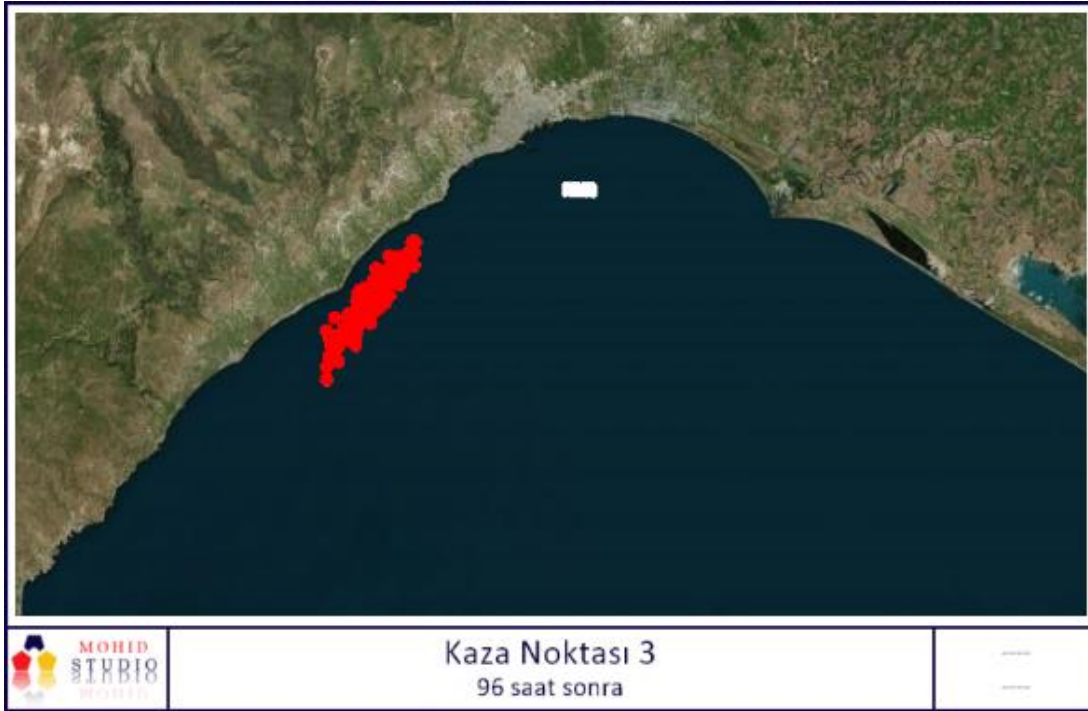
Kirlilik, kıyıya paralel olarak ilerlemektedir. Petrol kirliliği Erdemli bölgesini tehdit etmektedir.



Şekil 3.43: Kaza noktası 3'teki 48 saat sonraki durum.



Şekil 3.44: Kaza noktası 3'teki 72 saat sonraki durum.



Şekil 3.45: Kaza noktası 3'teki 96 saat sonraki durum.

Şekil 3.46 ve Şekil 3.47'de yaz ve kış koşulları için tüm kaza noktalarında 4 gün sonundaki kirliliğin son durumu verilmektedir.



Şekil 3.46: Tüm kaza noktaları için 4 gün sonundaki durum (Yaz koşulları).



Şekil 3.47: Tüm kaza noktaları için 4 gün sonundaki durum (Kış koşulları).

Dört günü kapsayan petrol kirliliği simülasyon sonuçları dördüncü bölümde değerlendirilmiştir.



4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Doğu Akdeniz sahip olduğu limanları, rafinerileri, petrol transfer dokları, LPG tesisleri, gübre fabrikaları, demirçelik fabrikası gibi tesislerin varlığı ile ticari, endüstriyel, tarımsal ve stratejik açıdan büyük bir öneme sahiptir. Bu sebeple, bu bölgede meydana gelecek petrol kirliliği kıyıya ulaştığında risk teşkil edecektir.

Çalışma kapsamında Doğu Akdeniz’de meydana gelebilecek petrol kirliliği MOHID modelleme programı ile üç boyutlu olarak atmosferik koşullara ve tanımlanmış sınır koşullarına göre yaz ve kış koşulları için simüle edilmiştir.

Çalışmada Doğu Akdeniz’in hidrodinamik alan haritası çıkarılmıştır. Model, her bir zaman adımında su yüzeyindeki petrol damlacıklarının hareketini hesaplamaktadır.

Kaza riski yüksek üç farklı koordinat için oluşturulan senaryolarda birinci bölge olarak BOTAŞ önleri, ikinci bölge olarak İskenderun Liman önleri, üçüncü bölge olarak Mersin önleri seçilmiştir. Kazada denize döküldüğü varsayılan petrol miktarı 8000 ton olarak seçilmiştir. Bu miktar, küçük bir kaza ya da tek tanktan sızma sonucunda denize dökülecek petrolü resmetmektedir. Her ne kadar daha büyük petrol kazalarının yayılımları farklı olacak olsa da, seçilen miktar istatistiksel olarak daha sık rastlanabilecek bir durumu temsil etmektedir.

Model sonuçlarına göre yaz koşullarında BOTAŞ önlerinde meydana gelebilecek petrol kirliliğinde Dört Yol ilçesi kıyı bölgesi kirliliğe maruz kalmaktadır. Kirlilik kıyıya yaklaşık 43 saat sonra ulaşabilmektedir. Kirliliğin kıyıya ulaşmasını engellemek için kullanılacak bariyerin, bu zaman dilimi içinde çekilmesi gerekliliği görülmektedir. Kış koşullarında ise bu bölgede meydana gelebilecek bir kirlilik Ceyhan kıyı bölgesine paralel olarak ilerleyecek, önlem alınmazsa dört gün sonunda ise körfez ağzı çıkışına kadar ulaşmış olacaktır.

Model sonuçlarına göre yaz koşullarında İskenderun önlerinde meydana gelebilecek petrol kirliliğinde İskenderun’un kuzeyi ve demirçelik fabrikasının kıyı bölgesi kirliliğe maruz kalmaktadır. Kirlilik kıyıya yaklaşık 24 saat sonra ulaşabilmektedir. Dört gün sonunda kirlilik kıyı şeridi boyunca daha da yayılmakta, Dört Yol ilçesi kıyılarına da ulaşmaktadır. Bu nedenden dolayı kirlilik meydana geldikten hemen sonra bariyer çekmek körfez sahil şeridinin kirlenmesini engelleyebilir. Kış koşullarında bu bölgede meydana gelebilecek bir kirlilik yaz koşullarına benzer bir şekilde yaklaşık 24 saatte

kıyıya ulaşacaktır. Kirliliğe müdahale edilmezse petrol, İskenderun kıyı bölgesinde uzunca bir sahil şeridini etkisi altına alacaktır.

Model sonuçlarına göre yaz koşullarında Mersin önlerinde meydana gelebilecek petrol kirliliğinde Kazanlı kıyı bölgesi kirliliğe maruz kalmaktadır. Kirlilik kıyıya yaklaşık 36 saat sonra ulaşabilmektedir. Dört gün sonunda tüm petrol, kıyı şeridinde birikmektedir. Kış koşullarında bu bölgede meydana gelebilecek petrol kirliliğinde ise kirlilik kıyı bölgesine paralel olarak yayılım gösterecek olup, dört gün sonunda Erdemli ilçesine kadar ilerleyecektir. Yaz ve kış koşulları için zamanında acil müdahale yapılarak bariyer çekilmesi kirliliğinin daha geniş alanlara yayılmasını önleyecektir.

Şekil 3.46 ve Şekil 3.47 incelendiğinde, yaz ve kış koşulları için kirlilik noktaları ve yayılan petrolün miktarı aynı olmasına rağmen, petrolün yayılımı bu iki mevsim için tamamen farklı olacaktır. Yaz koşullarında tüm kaza noktalarında kirlilik kıyıya ulaşırken, kış koşullarında sadece İskenderun önlerinde meydana gelecek kazada kirlilik kıyıya ulaşacaktır. En kötü kirlilik senaryosu ise kış koşullarında İskenderun önlerinde meydana gelebilecek kaza sonucunda yaşanacaktır. Bu kaza sonucunda kirlilik, uzunca bir sahil şeridi boyunca yayılacaktır.

Kirliliğe müdahale için bariyer çekmenin yanısıra doğal ya da sentetik malzemelerden üretilen yastık, keçe, pad gibi sorbentler de kullanılabilir. Yağ sıyırıcılar (skimmer) ile de kirliliğe müdahale edilebilir. Bu makineler ile petrolün sudan ayrılarak geri kazanımı da sağlanabilir.

Kimyasal deterjanlar ve seyrelticiler (dispersant) ise su ve petrol arasındaki kimyasal ve fiziksel bağın bozulmasını hızlandırmakta kullanılabilir. Böylece, petrol küçük damlacıklara dönüştürülerek balıklar, kuşlar ve deniz memelileri üzerindeki zehirlilik etkileri en aza indirilebilir.

Model sonuçları incelendiğinde kirliliğe en geç 24 saat içinde müdahale edilmesi çevre açısından önem arz etmektedir. Kirliliğe 48 saat sonra müdahale etmek geç olabilir. Bu müdahaleleri zamanında yapabilmek için kirliliği zamanında tespit etmek gerekir. Kirliliği tespit etmek için EMSA (Avrupa Deniz Güvenliği Ajansı) uydularından yararlanılabilir. Bu uydular petrol kirliliğini 30 dakika içerisinde tespit edebilmektedir. Bu kirlilik mesajının alınmasına müteakip daha önceden ulusal ve bölgesel bazda hazırlanmış petrol kirliliği modelleri vasıtası ile kirliliğe müdahale edilebilir. Önceden ulusal ve bölgesel bazda hazırlanacak modeller için, belirli bölgelerden geçen gemi rotaları ile gemi tip ve yüklerinin bilinmesi gerekecektir.

Petrol kirliliği risk değerlendirmesi yapabilmek için verilerin petrolün geçirdiği kimyasal, biyolojik ve fiziksel süreçleri kapsamasa ve güvenilir olması gerekmektedir. Ayrıca yapılacak saha çalışması ile karasal kaynaklı deşarjlar ve diğer gemi aktivitelerinden kaynaklanan deşarjlar hesap edilmelidir. Bu çalışmada sadece petrolün fiziksel taşınımı ele alınmış olup, model geliştirilerek diğer biyolojik ve kimyasal süreçler de dâhil edilebilir. Ancak tüm süreçler hesaba katıldıktan sonra ve veriler elde edildikten sonra çalışılan bölge için sağlıklı bir petrol kirliliği risk değerlendirmesi yapılabilir.

Doğu Akdeniz jeopolitik konumu nedeniyle stratejik önemi haiz bir denizdir. Rafineri, boru hatları, dolum istasyonları gibi tesislerin yoğun olduğu bu bölge, 2006 yılında Lübnan krizinde olduğu gibi bir saldırıya uğrayabilir. Kıyıda olan bu tesislerden denize yayılacak petrol, bölgeyi olumsuz etkileyecektir. Bu kapsamda gelecekte yapılacak çalışmaların, sadece denizden gelecek petrol kirliliğini değil, kıyıdan gelecek petrol yayılımını da simüle etmesinin yararlı olacağı düşünülmektedir.

Gelecekte yapılacak petrol kirliliği modelleme çalışmalarının gerçeğe daha yakın ve hassas sonuçlar vermesi için sadece hidrodinamik faktörler yerine, daha detaylı olarak petrolün akıbeti de çalışmaya dahil edilmelidir. Buharlaşma, znme, emülsiyon, biyobozunma, sedimantasyon, fotooksidasyon gibi petrolün maruz kalacağı prosesler de dikkate alınırsa, daha gerçekçi bir simülasyon yapılabilir.



KAYNAKLAR

- Aghajanloo, K., Pirooz, M. D. & Namin, M. M. (2013). *Numerical Simulation of Oil Spill Behavior in the Persian Gulf*, International Journal of Environmental Research, 9: 81-96.
- Akan, Ç. (2007). *Numerical Modeling of Oil Spreading Over The Sea Surface*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- ASCE Task Committee on Modeling of Oil Spills of the Water Resources Engineering Division. (1996). *State-of-the-art review of modeling transport and fate of oil spills*. Journal of Hydraulic Engineering 122 (11). pp. 594– 609.
- Aydın, O. (2009). *Kıyılarda Petrol Kirliliği Dağılımının Sayısal Modellenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Başar, E. (2003). *İstanbul Boğazı'nda tanker kazaları ile oluşabilecek petrol dağılımının simülasyonu*, (Doktora Tezi) Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Başaran, Y. (2015). *Türkiye'de Deniz Suyundan İçme Suyu Üretiminin Maliyet Değerlendirmesi*. (Uzmanlık Tezi). Ankara.
- Berkes, F. (1983). *Temel Deniz Bilimi ve Deniz çevresinin korunması*, İstanbul.
- Brookman, G. T., Flanagan, M. & Kebe, J. O. (1985). *Literature survey: Hydrocarbon Solubilities and Attenuation Mechanism*. American Petroleum Institute, Yayın No 4414 Washington DC.
- Can, S. (2007). *Tanker kazaları sonrası İstanbul Boğazı'ndaki yakıt kirliliği simülasyonu*, (Doktora Tezi) İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Chao, X., Shankar, N. J. & Cheong H. F. (2000). *Two and three dimensional oil spill model for coastal waters*, Ocean Engineering, 28: 1557-1573.
- Çevik, Ü. (2004). *Uluslararası Denizcilik Sözleşmeleri*, Birsan Yayınları, İstanbul.
- Delvigne, G., A. (1993). *Natural dispersion of oil by different sources of turbulence. Proceedings of the 1993 International Oil Spill Conference*. American Petroleum Institute, Washington DC, pp 415-419.
- Demiray, N. (2006). *Sintine Sularından Kaynaklanabilecek Deniz Kirliliğinin Değerlendirilmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Dietrich, D. E., Bowman, M. J., Korotenko, K. A., & Bowman, M. H. (2014). *Oil Spill Risk Management, Modeling Gulf of Mexico Circulation and Dispersion*. New Jersey.
- Elhakeem, A. A., Elshorbagy, W. & Chebbi, R. (2007). *Oil spill simulation and validation in the Arabian (Persian) Gulf with special reference to the UAE Coast*, Water Air Soil Pollution, 184: 243-254.

- Fay, J. A.** (1969). *The spread of oil slicks on a calm sea-oil on the sea*. Plenum, New York. Pp 53-64.
- Fernandes, R., Neves, R. & Viegas, F.** (2014). *Integration of an Oil and Inert Spill Model in a Framework for Risk Management of Spills at Sea-A Case Study for the Atlantic Area*, Hidromod, Lisbon.
- Fingas, M.** (1995). *A literature review of the physics and predictive modeling of oil spill evaporation*, Journal of Hazardous Materials, 42:157-175.
- Fingas, M., Fieldhouse, B., & Mullin, J.V.** (1999). *Water-in-oil emulsions: results of formation studies and applicability to oil spill modelling*. Spill Science and Technology Bulletin 5(1). pp. 81-91.
- Fingas, M.** (2000). *Basics of oil spill cleanup*, second edition, CRC Press,LLC, Boca Raton, FL.
- Fingas, M.** (2004). *Modeling evaporation using models that are not boundary-layer regulated*. Journal of Hazardous Materials, 107. pp. 27-36
- Hibbs, D. E., Gulliver J. S., Voller, V. R. & Chen, Y. H.** (1999). *An Aqueous Concentration Model for Riverine Spills*. Journal of Hazardous Materials, Vol A 64:37-53.
- İnan, A.** (2010). *İskenderun Körfezi'nde Petrol Kirliliğinin Modellenmesi*, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 26, No 2, 471-478.
- Kurter, A.** (1977). *Oseanografya Kimyasal, Fiziksel, Dinamik*. İstanbul Üniversitesi Coğrafya Enstitüsü.
- Leendertsee, J. J. & Liu, S. K.** (1978). *A three-dimensional turbulent energy model for non-homogeneous estuaries and coastal sea systems*. *Hydrodynamics of Estuaries and Fjords*, J.C.J. Nihoul Ed. Elsevier Publ. Co., Amsterdam. pp. 387-405.
- Macdonald, D. D, Carr, R. S., Calder, F. D., Long, E. R. & Ingersoll, C. G.** (1996). *Development and evaluation of sediment quality guidelines for Florida coastal waters*. Ecotoxicol 5:253-278
- MacDonald, D.D., Ingeroll, C.G., & Berger, T.A.** (2000). *Development and evaluation of consensus based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems*. Arch. Environ. Contam. Toxicol. 39 (1), 20-23.
- Mackay, D., Shiu, W. Y. & Feenstra, S.** (1991). *Dissolution of non-aqueous phase liquids in groundwater*. Journal of Contaminant Hydrology 8:23-42.
- Martins, F.** (1999). *Modelação Matemática Tridimensional de Escoamentos Costeiros e Estuarinos usando uma Abordagem de Coordenada Vertical Genérica*. (Doktora Tezi) Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico.
- Millî Eğitim Bakanlığı.** (2012). *Ham Petrolün Destilasyonu*, Ankara.
- Nemr, A., El-Sadaawy, M. M., Khaled, A. & El-Sikaily, A.** (2014). *Distribution patterns and risks posed of polycyclic aromatic hydrocarbons contaminated in the surface sediment of the Red Sea coast (Egypt)*, Desalination and Water Treatment, 52:40-42, 7964-7982.
- Neves, R.** (1985). *Étude Experimentale et Modélisation des Circulations Trasitoire et Résiduelle dans l'Estuaire du Sado*, (Doktora Tezi), Univ. Liège
- Öğüt, A. A.** (1999). *Denizlerin Gemi Kaynaklı Kirlenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Özdemir, Ü. (2012). *Türkiye’de gemilerden kaynaklı deniz kirliliğinin incelenmesi, Batman Üniversitesi Uluslararası Katılımlı Bilim ve Kültür Sempozyumu*, (s. 373-384). Batman.
- Öztürk B., Öztürk A.A., & Algan N. (2001). *Ship Originated Pollution in The Turkish Straits System. Proceeding Of The International Symposium On The Problems Of Regional Seas Ataköy Marina, İstanbul.*
- Öztürk, B. & Güven K. C. (2005). *Deniz Kirliliği*. Tüdev Yayınları No:21, İstanbul.
- Prince R. C. (1993). *Petroleum spill bioremediation in marine environments*. Critical Reviews in Microbiology 19:217-239.
- Reed, M., Johansen, Ø., Brandvik, P.J., Daling, P., Lewis, A., Ficco, R., Mackay, D., & Prentki, R. (1999). *Oil spill modelling towards the close of the 20th century: overview of the state of the art*. Spill Science & Technology Bulletin, 5 (1). pp. 3–16.
- Samsunlu, A. (1995). *Deniz Kirliliği ve Kontrolü*, İstanbul Teknik Üniversitesi Rektörlüğü sayı:1555.
- Santos, A. J. (1995). *Modelo Hidrodinâmico Tridimensional de Circulação Oceânica e Estuarina*. (Doktora Tezi) Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico.
- Sany, S. B. T., Hashim, R., Salleh, A., Safari, O., Mehdinia, A. & Rezayi, M. (2013). *Risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the West Port semi-enclosed basin (Malaysia)*, Environ Earth Science 71:4319–4332.
- Sayed, M., Serrer, M. & Mansard, E. (2008). *Oil spill drift and fate model*, Springer Science, 205-219.
- Scholz, D. K., Kuklick, J. H., Pond, R., Walker, R. H., Bastrom, A. & Fischbeck, P. (1999). *Fate of spilled oil in marine waters*, Health and environmental science department, Virginia 4691.
- Sigman, M. E., Schuler, P. F., Gosh, M. M. & Dabestani, R. T. (1998). *Mechanism of Pyrene Photochemical Oxidation in Aqueous and Surfactant Solutions*, Environmental Science and Technology 32:3980-3985.
- Skognes, K., & Johansen, O. (2004). *Statmap 3-dimensional model for oil spill risk assessment*. Environmental Modelling & Software, 19:727- 737.
- Stiver W. & Mackay, D. (1984). *Evaporation rate of spills of hydrocarbons and petroleum mixtures*. Environmental Science and Technology, 18(11). pp. 834-840.
- Sugioka, S. I., Kojima, T., Nakata, K. & Horiguchi, F. (1999). *A numerical simulation of an oil spill in Tokyo bay*, Spill Science & Technology Bulletin, 5: 51-61.
- Sugiura, K., Ishihara, M. & Schimauchi, T. (1997). *Physiological properties and biodegradability of crude oil*. Environmental Science and Technology 31(1):45:51.
- Tkalich, P. & Chan, E.S. (2002). *Vertical mixing of oil droplets by breaking waves*. Marine Pollution Bulletin, 44. pp. 1219-1229.
- Ulusal Araştırma Konseyi Raporu. (2002). *Committee on Oil in the Sea: Inputs, Fates, and Effects*, NAS Report, Washington.
- Uluslararası Tanker Sahipleri Kirlilik Federasyonu. (2015). *Oil Tanker Spill Statistics*, Londra.

- Wang, S. D., Shen, Y. M. & Zheng Y. G.** (2005). *Two-dimensional numerical simulation for transport and fate of oil spills in seas*. Ocean Engineering.
- Wang, S. D., Shen, Y. M. Guo. & Tang, J.** (2008). *Three dimesional numerical simulation for transport of oil spills in seas*, Ocean Engineering, 35: 503-510.
- Yapa, P. D., Shen, H. H. & Angammana, K. S.** (1994). *Modelling oil spills in a river-lake system*, Journal of Marine Systems, 4: 453-471.
- Yigit, F.** (2006). *Gemi Kaynaklı Kirleticiler ve Trabzon Limanına Gelen Bazı Gemilerin Atıksularının İncelenmesi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Yönsel, F.** (2014). *Gemi Kaynaklı Deniz Kirliliği Ders Notları*, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Url-1** <<http://www.botasint.com/default.aspx>>, erişim tarihi 25.02.2016.
- Url-2** <http://www.yildiz.edu.tr/~alipnrbs/Dersler/Akiskanlar_all_concepts.pdf>, erişim tarihi 01.03.2016.
- Url-3** <http://www.gebco.net/data_and_products>, erişim tarihi 11.09.2015.
- 5312 Sayılı Deniz Çevresinin Petrol Ve Diğer Zararlı Maddelerle Kirlenmesinde Acil Durumlarda Müdahale Ve Zararların Tazmini Esaslarına Dair Kanun.** (2005). T.C. Resmi Gazete, 25752, 03 Mart 2005.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Muhittin Güneş ONAY

Doğum Tarihi ve Yeri : 1985 Aydın

E-posta : onaymuh@itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2008, Deniz Harp Okulu, Elektrik-Elektronik Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2009-2013 Yılları arasında Sahil Güvenlik Komutanlığı bağlısı gemilerde II.Komutanlık görevinde bulunmuştur.