

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İSTANBUL BOĞAZI'NDAKİ GEMİ KAYNAKLI KİRLİLİĞİN
SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

Gemi İnş. ve Gemi Mak. Müh. Ali DOĞRUL

**FBE Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Fahri ÇELİK

İSTANBUL, 2010

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ	1
1.1 İstanbul Boğazı İle İlgili Önceki Çalışmalar	1
1.2 Çalışmanın Kapsamı	2
2. İSTANBUL BOĞAZI	4
2.1 İstanbul Boğazı'nın Coğrafi Konumu	4
2.2 İstanbul Boğazı'nın İklimi	5
2.3 İstanbul Boğazı'nın Akıntı ve Tuzluluk Özellikleri	6
2.4 İstanbul Boğazı'nda Kirlilik	7
2.4.1 İstanbul Boğazı'nda Petrol Kaynaklı Kirlilik	7
2.4.2 İstanbul Boğazı'nda Gemi Emisyonu Kaynaklı Kirlilik	8
2.5 İstanbul Boğazı'nın Deniz Trafiği	9
2.5.1 İstanbul Boğazı'nda Tanker Trafiği ve Tanker Kazaları	13
3. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD)	15
3.1 Sonlu Hacimler Yöntemi (FVM)	15
3.2 Matematik Alt Yapı	16
3.2.1 Akışkanlar Mekaniğindeki Temel Diferansiyel Denklemler	16
3.2.2 Kütlelerin Korunumunun Diferansiyel Denklemi	16
3.2.3 Momentumun Korunumunun Diferansiyel Denklemi	16
3.2.4 Navier-Stokes Denklemleri	17
3.2.5 Akışkanlar Mekaniğinin Temel Denklemlerinin Kapalı Formu	18
3.2.6 Kullanılacak Türbülans Modelinin Seçimi	19
3.2.6.1 Standart k-ε Modeli	20
3.2.6.2 RNG/k-ε Modeli	22
3.2.6.3 Realizable/ k-ε Modeli	22
3.2.6.4 Standart k-ω Modeli	22
3.2.6.5 Reynolds Stress Modeli	22
3.2.7 Çözüm Algoritması	22
3.2.8 Çok Fazlı Akış İçin Kullanılan Model	24
3.2.8.1 "Mixture" için süreklilik denklemi	24

3.2.8.2	“Mixture” için momentum denklemi.....	24
3.3	Su yüzeyindeki rüzgar kesme kuvvetinin hesabı.....	25
3.3.1	Van Dorn Formülü.....	25
3.3.2	Neumann & Pierson Formülü.....	25
3.3.3	Smith & Banke Formülü.....	26
3.3.4	Heaps Formülü.....	26
3.3.5	Rüzgar Kesme Kuvveti Formüllerinin Karşılaştırılması	26
4.	İKİ FAZLI AKIM ANALİZİ.....	27
4.1	İki Fazlı Akım İçin HAD Yönteminin Doğrulanması	27
4.2	Çözüm Ağı Bağımsızlığı	29
4.3	Sınır Koşulları.....	31
5.	YAKIT SIZINTI ANALİZİ.....	38
5.1	Sınır Koşulları.....	38
5.2	Sayısal Değerlendirme.....	48
6.	GEMİ EMİSYONU ANALİZİ.....	49
6.1	Sınır Koşulları.....	49
6.2	Zamandan Bağımsız Analizler	58
6.2.1	1. Senaryo Analizleri	59
6.2.2	2. Senaryo Analizleri	61
6.2.3	3. Senaryo Analizleri	64
6.3	Sayısal Değerlendirme.....	67
7.	SONUÇLAR.....	68
	KAYNAKLAR.....	69
	İNTERNET KAYNAKLARI.....	73
	ÖZGEÇMİŞ.....	74

SİMGE LİSTESİ

ρ	Yoğunluk
t	Zaman
u, v, w	Hız vektör bileşenleri
τ	Kayma gerilmesi
μ	Viskozite
p'	Düzeltilme basınç alanı
p^*	Başlangıç basınç alanı
u^*	Başlangıç hız alanı
$H(u)$	Momentum matrisi
F	Akım
u_p	Hız alanı
S_{Mx}, S_{My}, S_{Mz}	Kütle kuvvetleri
k	Türbülans kinetik enerjisi
ε	Türbülans kinetik enerjisi kayıp oranı
ω	Türbülans kinetik enerjisi kayıp oranı
ω	Türbülans kinetik enerjisi kayıp oranı
G_k	Ortalama hız gradyanlarından dolayı türbülans kinetik enerjisi üretimi
G_b	Sıcaklık farklarından dolayı oluşan yoğunluk değişimlerine bağlı olarak türbülans kinetik enerjisi üretimi
$C_{I\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_\mu$	Kapama katsayıları
g_i	i- yönündeki yerçekimi vektörü
μ_t	Eddy viskozitesi
Pr_t	Enerji için türbülans Prandtl sayısı
β	Termal genişleme katsayısı
σ_k, σ_w	Türbülans Prandtl sayısı
$\tau_{ij, türbülans}$	Serbest Reynolds gerilme tensörü
n	Faz sayısı
α	Hacmin bir parçası
c	Kütlenin bir parçası
m	Karışım
W	Rüzgar hızı
τ_w	Rüzgar gerilme kuvveti
c_d	Sürüklenme katsayısı

KISALTMA LİSTESİ

CFD	Computational Fluid Dynamics
DNS	Direct Numerical Solution
FVM	Finite Volume Method
GNOME	General NOAA Oil Modeling Environment
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
IMO	International Maritime Organization
KEGM	Kıyı Emniyeti Genel Müdürlüğü
KKD	Kılavuz Kaptanlar Derneği
MARPOL	Marine Pollution
NOAA	National Oceanic & Atmospheric Administration
PISO	Pressure Implicit with Splitting of Operators
POM	Princeton Ocean Model
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
SHODB	Seyir Hidrografi Oşinografi Daire Başkanlığı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 İstanbul Boğazı'nın yakıt sızıntısı için incelenen kısmı	3
Şekil 2.1 İstanbul Boğazı'nın uydu görüntüsü [2].....	4
Şekil 2.2 İstanbul Boğazı'nda tabakalı akış [1].....	6
Şekil 2.3 İstanbul Boğazı'nda tabakaların tuzluluk oranları (Can, 2007)	7
Şekil 4.1 Deney seti (Vallée vd., 2008).....	27
Şekil 4.2 Başlangıç koşulları	28
Şekil 4.3 Deneysel (Vallée vd., 2008) ve sayısal sonuçların karşılaştırılması	28
Şekil 4.4 Çözüm ağı bağımsızlığı.....	29
Şekil 4.5 Rumeli Kavağı 3 Boyutlu Model	30
Şekil 4.6 Çözüm ağı yapısı	31
Şekil 4.7 İki Fazlı Akım Sınır Koşulları.....	32
Şekil 4.8 325 s' deki yüzeydeki hız dağılımı	33
Şekil 4.9 325 s' deki girdap oluşumu (İstinye burnu).....	33
Şekil 4.10 325 s' deki girdap oluşumu (Beykoz).....	34
Şekil 4.11 100 s' deki iki tabaka arasındaki etkileşim	34
Şekil 4.12 150 s' deki iki tabaka arasındaki etkileşim	35
Şekil 4.13 200 s' deki iki tabaka arasındaki etkileşim	35
Şekil 4.14 250 s' deki iki tabaka arasındaki etkileşim	36
Şekil 4.15 300 s' deki iki tabaka arasındaki etkileşim	36
Şekil 4.16 325 s' deki iki tabaka arasındaki etkileşim	37
Şekil 5.1 500 s' deki yakıt dağılımı	39
Şekil 5.2 1000 s' deki yakıt dağılımı	40
Şekil 5.3 1600 s' deki yakıt dağılımı	40
Şekil 5.4 2000 s' deki yakıt dağılımı	41
Şekil 5.5 5000 s' deki yakıt dağılımı	41
Şekil 5.6 10000 s' deki yakıt dağılımı	42
Şekil 5.7 15000 s' deki yakıt dağılımı	42
Şekil 5.8 20000 s' deki yakıt dağılımı	43
Şekil 5.9 25000 s' deki yakıt dağılımı	43
Şekil 5.10 30000 s' deki yakıt dağılımı	44
Şekil 5.11 35000 s' deki yakıt dağılımı	44
Şekil 5.12 40000 s' deki yakıt dağılımı	45
Şekil 5.13 45000 s' deki yakıt dağılımı	45

Şekil 5.14 50000 s' deki yakıt dağılımı	46
Şekil 5.15 55000 s' deki yakıt dağılımı	46
Şekil 5.16 60000 s' deki yakıt dağılımı	47
Şekil 5.17 70000 s' deki yakıt dağılımı	47
Şekil 6.1 İstanbul Boğazı 3 Boyutlu Model	50
Şekil 6.2 İstanbul Boğazı ağ yapısı (Beykoz bölgesi)	51
Şekil 6.3 3600 s' deki emisyon dağılımı	52
Şekil 6.4 7200 s' deki emisyon dağılımı	52
Şekil 6.5 10800 s' deki emisyon dağılımı	53
Şekil 6.6 14400 s' deki emisyon dağılımı	53
Şekil 6.7 18000 s' deki emisyon dağılımı	54
Şekil 6.8 21600 s' deki emisyon dağılımı	54
Şekil 6.9 25200 s' deki emisyon dağılımı	55
Şekil 6.10 28800 s' deki emisyon dağılımı	55
Şekil 6.11 32400 s' deki emisyon dağılımı	56
Şekil 6.12 36000 s' deki emisyon dağılımı	56
Şekil 6.13 39600 s' deki emisyon dağılımı	57
Şekil 6.14 43200 s' deki emisyon dağılımı	57
Şekil 6.15 10 m' deki emisyon dağılımı	59
Şekil 6.16 50 m' deki emisyon dağılımı	60
Şekil 6.17 100 m' deki emisyon dağılımı	60
Şekil 6.18 10 m için Avrupa yakasındaki emisyon değerleri	61
Şekil 6.19 10 m için Anadolu yakasındaki emisyon değerleri	61
Şekil 6.20 10 m' deki emisyon dağılımı	62
Şekil 6.21 50 m' deki emisyon dağılımı	62
Şekil 6.22 100 m' deki emisyon dağılımı	63
Şekil 6.23 10 m için Avrupa yakasındaki emisyon değerleri	63
Şekil 6.24 10 m için Anadolu yakasındaki emisyon değerleri	64
Şekil 6.25 10 m' deki emisyon dağılımı	64
Şekil 6.26 50 m' deki emisyon dağılımı	65
Şekil 6.27 100 m' deki emisyon dağılımı	65
Şekil 6.28 10 m için Avrupa yakasındaki emisyon değerleri	66
Şekil 6.29 10 m için Anadolu yakasındaki emisyon değerleri	66

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 İstanbul Boğazı boyunca rüzgar – üst akıntı ilişkisi (Mengöl, 1950)	5
Çizelge 2.2 İstanbul Boğazı'ndaki gemi emisyonlarının dağılımı (Deniz, Durmuşoğlu, 2008). 9	
Çizelge 2.3 İstanbul Boğazı'ndan geçen gemilerin dağılımı [3].....	10
Çizelge 2.4 İstanbul Boğazı'ndan geçen gemilerin tip ve aylara göre dağılımı [3].....	11
Çizelge 2.5 İstanbul Boğazı'ndan geçen tanker dağılımı [3]	12
Çizelge 2.6 İstanbul Boğazı'ndan geçen gemilerin aylara göre dağılımı [3].....	13
Çizelge 2.7 İstanbul Boğazı'ndan geçen gemilerin yıllara göre dağılımı [3]	14
Çizelge 2.8 İstanbul Boğazı'ndan gerçekleşen tanker kazaları, (Örs ve Yılmaz, 2003).....	14
Çizelge 4.1 İki fazlı akım analizi için sınır koşulları.....	32
Çizelge 5.1 Yakıt giriş hızı ve zamanı.....	38
Çizelge 5.2 Yakıt analizi için sınır koşulları	39
Çizelge 6.1 Gemi emisyonu analizi için sınır koşulları.....	49
Çizelge 6.2 1. Senaryo için sınır koşulları.....	58
Çizelge 6.3 2. Senaryo için sınır koşulları.....	58
Çizelge 6.4 3. Senaryo için sınır koşulları.....	59

ÖNSÖZ

Bu çalışmada İstanbul Boğazı'nın bir kısmı için tabakalı akış modellenmiştir ve yakıt sızıntı simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Ayrıca tüm boğaz için hava kirliliği simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Yüksek lisans tez danışmanlığımı üstlenerek hiçbir zaman yardımını esirgemeyip bana yol gösteren değerli hocam Doç. Dr. Fahri Çelik'e, değerli hocam ve anabilim dalı başkanım Prof. Dr. Mesut Güner'e, verdiği istatistiki bilgilerle bu çalışmaya katkı sağlayan Araş. Gör. Yalçın Durmuşoğlu'na teşekkür ederim. Tez çalışmam sırasında benimle mesleki tecrübelerini paylaşan ve beni daima destekleyen sevgili mesai arkadaşım ve değerli hocam Araş.Gör. Yavuz Hakan Özdemir'e ve her zaman yanımda olan ve manevi desteklerini esirgemeyen Ahmet Çağatay Talayhan'a, anneme ve babama sonsuz şükranlarımı sunarım.

Bu çalışmanın Türk bilim dünyasına hayırlı olması temennisiyle saygılarımı sunarım.

Mayıs, 2010

Ali DOĞRUL
Beşiktaş, İstanbul

ÖZET

İstanbul Boğazı, iki kıtayı birbirine bağlayan küresel öneme sahip bir iç su bölgesidir. Malaka Boğazı'ndan sonra gemi trafiği açısından en yoğun ve en tehlikeli boğazdır. İstanbul Boğazı uluslararası deniz trafiğine açık olduğundan trafik yoğunluğu Süveyş Kanalı'nın 3, Panama Kanalı'nın 4 katıdır ve bu yoğunluk her geçen gün artmaktadır. Bu tehlikenin en aza indirilmesi için boğazdaki akımın günümüz imkânları da kullanılarak gerçekçi bir yaklaşımla incelenmesi gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında İstanbul Boğazı'nın bir kısmı ticari bir HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) akışkanlar mekaniği programında modellenmiş ve sayısal olarak incelenmiştir. Kullanılan HAD programı sonlu hacimler yöntemini temel almaktadır. Bu programda boğaz modellendikten sonra sınır şartları girilerek uygun bir çözümleme modeli seçilmiş ve 3 boyutlu geometri için çift fazlı akım analizi yapılmıştır. Bu analiz sırasında boğazdaki akıntılar ve rüzgârın neden olduğu kuvvetler de hesaba katılmıştır. Ayrıca aynı model için yakıt kirliliği problemi de incelenmiştir. Gemi emisyonu için simülasyonlar boğazın bir kısmı yerine tümü için yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: İstanbul Boğazı, iki fazlı akım, yakıt sızıntısı, gemi emisyonu

ABSTRACT

Istanbul Strait is a globally important inland sea region which is connecting two continents. It is the most crowded and dangerous strait coming after Strait of Malacca. Strait of Istanbul's traffic density is 3 times of Suez Canal, 4 times of Panama Canal because of international sea traffic and this density is increasing every day. To decrease this danger, the flow in the strait must be investigated in a realistic way by using present opportunities.

In this thesis work, a part of Istanbul Strait is modeled by a commercial CFD code and is investigated numerically. This CFD code is based on finite volume method (FVM). In this program, after the strait is modeled, boundary conditions are given and the analyses are made with the appropriate solution algorithm for 3-dimensional geometry and multiphase flow. During the analyses, the currents in the strait and the shear force caused by the wind are taken into account. Also oil spill simulation is made for the same model. Exhaust emission simulations are made for the whole strait instead of a part of the strait.

Keywords: İstanbul Strait, two phase flow, oil spill, ship emission

1. GİRİŞ

1.1 İstanbul Boğazı İle İlgili Önceki Çalışmalar

Dünya nüfusunun giderek artması, tüketimi de artırmaktadır. Dolayısıyla üretilen ürünler kendi bölgesiyle sınırlı kalmayıp dünyanın dört bir yanına ulaştırılmaktadır. Bu sayede uluslararası ticaret gelişmekte, buna paralel olarak da deniz taşımacılığı artmaktadır. Deniz taşımacılığındaki artış ülkelerin deniz ticaret filolarını büyütmesine neden olmaktadır. Bu gelişme, bütün dünya denizlerinde olduğu gibi dünyanın en önemli su yolları arasında bulunan İstanbul Boğazı'nda da deniz trafiğini artırmaktadır.

Asya kıtasını Avrupa kıtasından ayıran İstanbul Boğazı, Karadeniz'in tek çıkış seçeneği olarak Karadeniz'e kıyısı olan ülkeler tarafından kullanılmaktadır. Ayrıca kışın Kuzey Denizi'nin donması da Rusya ve Kafkas ülkeleri için İstanbul Boğazı'nı tek seçenek kılmaktadır (Oğuzülgen, 1995).

Deniz trafiği çok yoğun olan İstanbul Boğazı'nda pek çok su yolunda olduğu gibi deniz yolu ile tehlikeli madde taşımacılığı yapılmakta olup bu taşımacılığın neden olabileceği ekolojik ve ekonomik riskler mevcuttur. Milyonlarca insanın yaşadığı bir mega kent olan İstanbul'da olası bir tanker kazası çevresel bir felakete yol açabilir (Can vd., 2007).

Karadeniz'e kıyısı olan ülkelerde yüksek miktarda petrol üretilmektedir. Ayrıca Orta Asya kaynaklı petrolün de boru hatlarıyla Gürcistan ve Rusya limanlarına ulaştırılarak tankerler vasıtasıyla Akdeniz'e ulaştırılması fikri İstanbul Boğazı'nı dünya petrol taşımacılığının en önemli merkezlerinden birisi yapmaktadır (Plant, 2000). Bu durum yılda yaklaşık 15000 tankerin geçtiği İstanbul Boğazı'nda tanker kazaları ve deniz kirliliği riskini artırmaktadır (Can vd., 2007).

Boğazlarda ve iç denizlerde yakıt sızıntı simülasyonları ile ilgili olarak literatürde çok sayıda çalışma yer almaktadır. Bu çerçevede Sugioka ve arkadaşları (1999), Japon tankeri "Diamond Grace" kazasının oluşturduğu yakıt kirliliğini "Lagrangian discrete parcel" yöntemini kullanarak incelemişlerdir. Skognes ve Johansen (2004) ise belirli bir bölgenin rüzgar istatistiğini içeren StatMap modeli yardımıyla bir noktadan verilen yakıtın dağılımını çözmüşlerdir.

Elliott ve Jones (2000), Liverpool körfezindeki yakıt dağılımını üç boyutlu olarak "particle-tracking" modeli ile simüle etmişlerdir. Hansen ve Ditlevsen (2003), tanker kazaları sonrası oluşan yakıt dağılımını GRACAT programı ile çözmüştür. Wang ve arkadaşları (2005)

tarafından yapılan yakıt dağılımı çalışmasında ise iki boyutlu kabulü ile parçacık yöntemi kullanılmıştır. Sebastião ve Soares (2007) ise yeni bir yöntem geliştirerek yakıt dağılımı tahminindeki belirsizlikleri hesaplamaya çalışmıştır.

İstanbul Boğazı için de çeşitli yakıt sızıntı simülasyonu çalışmaları yapılmıştır. Örs ve Yılmaz (2003), İstanbul boğazındaki yakıt dağılımı problemi için sayısal bir model geliştirmiştir. Bu model ile sığ su denklemleri sonlu elemanlar yöntemi ile çözülmektedir. Başar (2003) ise POM yardımıyla boğazın akıntı modelini çıkartmış, daha sonra GNOME ile yakıt sızıntısını zamana bağlı olarak incelemiştir. Can (2007), İstanbul boğazı için yakıt dağılımı simülasyonu yapmış ve kritik bölgeleri tespit etmiştir. Ertürk ve Yonsel (2002), ADAM modeli kullanarak Dirichlet sınır koşullarında yakıt dağılımını incelemiştir.

Gemi emisyonlarının neden olduğu kirlilik ile ilgili olarak yapılmış çeşitli çalışmalar mevcuttur. Deniz ve Durmuşoğlu (2008), Marmara Denizi çevresindeki NO_x ve SO_x kaynaklı kirliliği istatistiksel olarak incelemişlerdir. Saxea ve Larsena (2004), araçların neden olduğu NO_x emisyonlarının ciddi bir boyuta ulaştığını tespit etmiştir. Kesgin ve Vardar (2001) ise Türk boğazlarındaki gemi emisyonlarının tahmininde bulunmuşlardır.

1.2 Çalışmanın Kapsamı

Bu tez çalışması kapsamında İstanbul Boğazı'nın Rumeli Kavağı - Beykoz kısmı için 3 boyutlu, çift fazlı akış kabulü ile rüzgarlı durum için yakıt sızıntısının simülasyonu amaçlanmıştır. Ayrıca tüm boğaz modeli için gemi emisyonu nedeniyle oluşan hava kirliliği de incelenmiştir.

Bu kapsamda çalışma içerisinde yer alan ikinci bölümde İstanbul boğazı ile ilgili coğrafi bilgiler, boğazın iklimsel özellikleri ile akıntı ve tuzluluk bilgileri yer almaktadır. Ayrıca yine ikinci bölümde boğazdaki deniz trafiği ile yakıt ve hava kirliliğinden bahsedilmiştir.

3. bölümde hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile ilgili bilgiler verilerek analizler için kullanılan programın çözdüğü matematiksel denklemlere ayrıntılı olarak değinilmiştir.

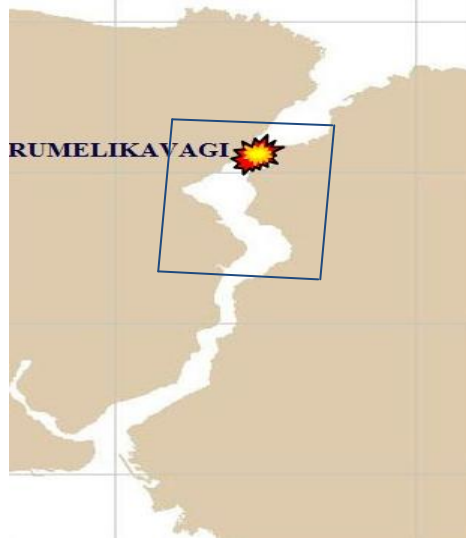
4. bölümde İstanbul Boğazı'nın bir kısmı için tek fazlı akım analizleri yapılarak en uygun ağ sayısının bulunması ve iki fazlı akım için aynı modelle yapılan analizlerden bahsedilmiştir.

5. bölümde bir önceki bölümde bahsedilen modele bir noktadan yakıt verilerek yakıtın model boyunca davranışı incelenmiştir.

6. bölümde ise İstanbul Boğazı'nın tamamı için gemi emisyonlarının havaya salınımı

incelenmiştir. Bu kapsamda gemi emisyon kaynağı olarak SO₂ gazı kullanılmıştır.

Son olarak 7. bölümde yakıt ve baca gazı analizleri hakkında bazı sonuçlara varılmıştır.



Şekil 1.1 İstanbul Boğazı'nın yakıt sızıntısı için incelenen kısmı

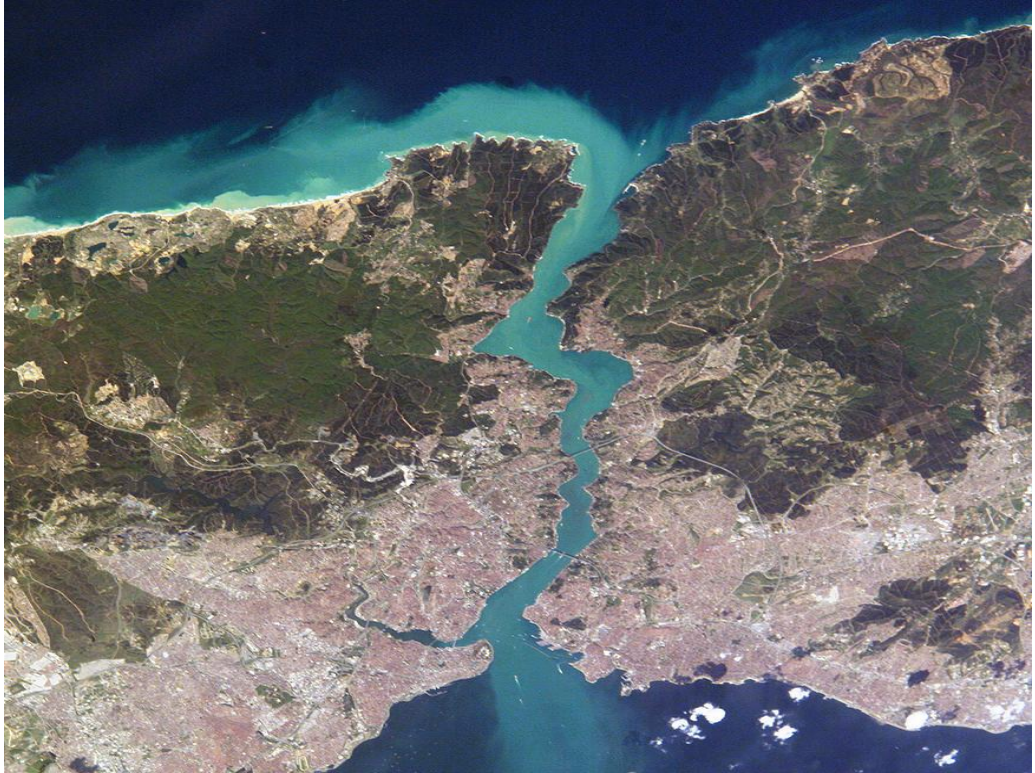
2. İSTANBUL BOĞAZI

2.1 İstanbul Boğazı'nın Coğrafi Konumu

İstanbul Boğazı 31 km uzunluğa sahiptir. İstanbul Boğazı'ndaki trafik yoğunluğu her yıl artmaktadır. Montrö Sözleşmesi'nin imzalandığı 1936 yılında, yılda ortalama 4500 gemi geçerken, günümüzde 23000'i uğraksız olmak üzere 50000 civarında gemi geçiş yapmaktadır. İstanbul Boğazı'nda, yılda 700000 üzerinde deniz aracı düzensiz sefer yapmaktadır (Anonim, 2001).

İstanbul Boğazı kuzeyde $41^{\circ}15'00''$ N ve güneyde $40^{\circ}59'30''$ N enlemleri ile $28^{\circ}57'35''$ E ile $29^{\circ}11'00''$ E boylamları arasındadır. Kıvrımlı yapısı nedeniyle deniz trafiği olumsuz etkilenmektedir. İstanbul Boğazı, kuzeyde Anadolu ve Türkeli fenerlerini birleştiren hat ile güneyde Ahırkapı fenerini Kadıköy İnciburnu Mendirek fenerine birleştiren hat arasında kalmaktadır. Genişliği, Karadeniz girişinde 4.7 km ve Marmara girişinde 2.5 km kadardır (The Admiralty, 1990). İstanbul Boğazı'nın uydu görüntüsü Şekil 2.1'de verilmiştir.

İstanbul Boğazı'nın ortalama derinliği 35.8 m civarındadır. Boğazın en sığ yeri 15 m ile Üsküdar açıkları iken en derin yeri 110 m ile Kandilli açıklarıdır (Degens ve Ross, 1974).



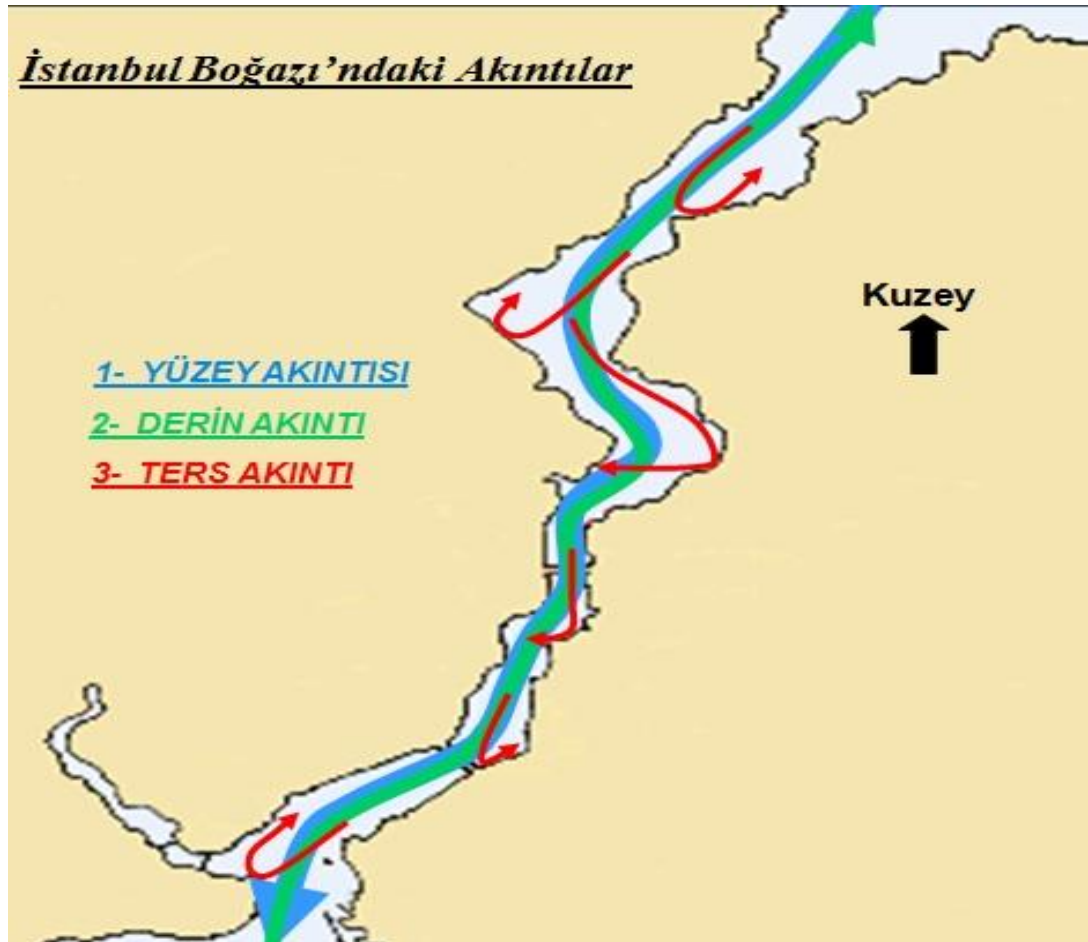
Şekil 2.1 İstanbul Boğazı'nın uydu görüntüsü [2]

Mevki	Rüzgarın		Üst Akıntının		Rüzgarın		Üst Akıntının	
	Yönü	Şiddeti (Knot)	Yönü	Şiddeti (Knot)	Yönü	Şiddeti (Knot)	Yönü	Şiddeti (Knot)
Rumeli Feneri	Lodos	4	Güney	0.4	Poyraz	1	Güney	0.7
Anadolu Feneri								
Büyükdere	Lodos	2	Güney	0.8	Karayel	2	Güney	1.3
Umuryeri								
Akıntı Burnu	Lodos	3-4	Güney	0.4	Yıldız Poyraz	4-5	Güney	2.2
Vaniköy								
Kuruçeşme	-	-	Güney	1.0	Yıldız Poyraz	3-4	Güney	2.4
Çengelköy								
Dolmabahçe	Lodos	2	Güney	1.2	Poyraz Gündoğusu	6-7	Güney	4.1
Üsküdar								
Sarayburnu	Kible Lodos	8	Güney	0.2	-	-	Güney	2.2
Üsküdar								

2.3 İstanbul Boğazı'nın Akıntı ve Tuzluluk Özellikleri

Karadeniz'in fazla beslenip az buharlaşmasından dolayı Karadeniz ile Marmara Denizi arasında bir seviye farkı oluşmaktadır. Bu sebeple İstanbul Boğazı'nda, Karadeniz'den Marmara Denizi'ne doğru bir üst akıntı ve Marmara Denizi'nden Karadeniz'e doğru bir alt akıntı mevcuttur. Bu seviye farkı basınç farkına neden olur. Basınç farkından dolayı Karadeniz'den Marmara Denizi'ne doğru bir akıntı oluşur. Alt akıntı oluşmasının nedeni ise, aynı düzlemde bulunan akışkanlar arasında yoğunluk farkı bulunmasıdır (Can, 1988). Şekil 2.2'de İstanbul Boğazı'ndaki tabakalı akış gösterilmiştir.

Karadeniz'den Marmara'ya geçişte ara yüzey derinliği kuzey rüzgarlarının da etkisiyle artmaktadır. Fakat güney rüzgarları da etkin olduğundan kuzeyden güneye doğru ara yüzey derinliği düşmektedir (Latif vd., 1991). Şekil 2.3'te İstanbul Boğazı'ndaki tabakaların tuzluluk oranları verilmiştir.



Şekil 2.2 İstanbul Boğazı'nda tabakalı akış [1]



Şekil 2.3 İstanbul Boğazı'nda tabakaların tuzluluk oranları (Can, 2007)

2.4 İstanbul Boğazı'nda Kirlilik

İstanbul Boğazı, Karadeniz'in tek çıkış noktası olduğundan Orta Avrupa'dan nehirler vasıtasıyla gelen evsel ve endüstriyel atıklar Karadeniz'e, ardından İstanbul Boğazı'na ulaşmaktadır. Ayrıca gemilerin karinalarına deniz canlılarının tutunmasını önlemek amacıyla kullanılan TBT içerikli zehirli boyalar da deniz canlıları için bir kirlilik ve risk teşkil etmektedir. Bununla ilgili olarak da IMO tarafından TBT içerikli boya kullanımına 2003 yılından itibaren yasak getirilmiştir. Gemilerden çıkan baca gazlarının hava kirliliğine etkisini düzenlemek amacıyla IMO tarafından MARPOL 73/78 Annex 6 yönetmeliği hazırlanmıştır. İstanbul Boğazı'ndan yılda ortalama 50000 gemi geçtiği düşünüldüğünde boğaz ve çevresi için hava kirliliği daha fazla önem kazanmaktadır. Boğazdan geçen gemilerden kaynaklanan akustik kirlilik de deniz canlılarını olumsuz etkilemektedir.

2.4.1 İstanbul Boğazı'nda Petrol Kaynaklı Kirlilik

Petrol kaynaklı kirliliğin etkileri bilinmekle birlikte deniz kirliliği için de petrol en önemli etkidir. Ham petrol içeriğinde çok çeşitli maddeler vardır ve bunların bazılarının denizde çözünme özelliği vardır. Denizlerde meydana gelen petrol kaynaklı kirliliğin sebepleri

şunlardır: tanker balast sularının denize boşaltılması, tanker kazaları, denizde yakıt üretimi, rafineriler (Güven vd., 1998).

Ülkelerin çok hızlı gelişmesi ve enerji ihtiyacının artması sonucu deniz üzerinden yüksek miktarlarda petrol taşımacılığı yapma zorunluluğu doğmuştur. Dolayısıyla tanker kazaları nedeniyle oluşan deniz kirliliği artmaktadır. Tanker kazaları sonucu denize sızan yakıt miktarı denize dökülen toplam yakıt miktarının % 5'ine karşılık gelmektedir (Clark, 1997).

2.4.2 İstanbul Boğazı'nda Gemi Emisyonu Kaynaklı Kirlilik

Gemi emisyonları küresel anlamda büyük bir hızla artmaktadır ve deniz ile karadaki hava kalitesine dikkate değer etki etmektedir. Bu emisyonlar ciddi sağlık sorunları ve çevresel etkilere neden olmaktadır. Kara suları, iç denizler ve limanlar gemi emisyonlarından en çok etkilenen alanlardır. Bir iç deniz olarak Marmara Denizi çok fazla gemi trafiği olan bir bölgedir. Marmara bölgesi hızla şehirleşmeye başladığından beri gemi kaynaklı emisyonlar insan sağlığını ve bütün çevreyi etkilemektedir.

Bölgedeki gemi emisyonları Türkiye'deki ilgili toplam emisyonlar içinde % 11 NO_x, % 0,1 CO ve % 0,12 PM olarak gerçekleşmektedir. Gemi kaynaklı emisyonlar Türkiye'deki yol trafiği emisyonları içinde ise % 46 NO_x, % 25 PM ve % 1,5 CO olarak gerçekleşmektedir ve Türkiye'deki demir yolu ve hava yolu emisyonlarına göre daha yüksek bir seviyede seyretmektedir (Deniz, Durmuşoğlu, 2008).

Hava kirliliği için NO_x ve SO_x emisyonları özellikle önem arz etmektedir çünkü yeryüzündeki ozon seviyesine etki etmektedir ve asitlenmeye yol açmaktadır (Skjolsvik vd., 2000).

İstanbul Boğazı'ndaki gemi emisyonlarının yıllara göre dağılımı Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2 İstanbul Boğazı'ndaki gemi emisyonlarının dağılımı (Deniz, Durmuşoğlu, 2008)

	Yıllar			
(ton/yıl)	2009	2008	2007	2006
NO _x	7093	7107	7347	7635
SO ₂	5973	5896	6090	6291

(kg/saat)	2009	2008	2007	2006
NO _x	810	811	839	872
SO ₂	682	673	695	718

2.5 İstanbul Boğazı'nın Deniz Trafiği

Asya kıtası ile Avrupa kıtasını birbirine bağlayan, Karadeniz'in Akdeniz'e bağlantısı durumunda olan İstanbul Boğazı deniz taşımacılığının artmasıyla beraber daha da önem kazanmaktadır. Bununla beraber boğazın deniz trafiği de her geçen gün artmaktadır. Ancak boğazın coğrafi ve batimetrik özellikleri deniz trafiğini tehlikeye sokmaktadır.

Uzunluğu 31 km olan İstanbul Boğazı, ortalama 35 m derinliği ve yine ortalama 1.5 km genişliği ile kıvrımlı, yer yer sık bölgelere sahip bir boğazdır. Boğazın sahip olduğu geometriden kaynaklanan darlıklar, kıvrımlı ve sık kısımlar deniz trafiğini etkilemekte ve gemilerin seyrini zorlaştırmaktadır (SHODB, 1994).

İstanbul Boğazı'nda deniz trafiğini oluşturan iki unsur vardır. Birisi boğazdan transit olarak geçen gemiler, diğeri ise boğaz içerisinde toplu taşıma için kullanılan gemilerdir. Boğazdan transit olarak geçen gemiler ise Marmara Denizi'ndeki herhangi bir limana uğrayan ve uğramayan olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. İstanbul Boğazı'ndan geçen gemilerin dağılımı Çizelge 2.3'de verilmiştir. Çizelge 2.3, 2.4 ve 2.5'deki bilgiler 2008 yılına aittir. . Çizelge 2.6'daki bilgiler 2009 yılına aittir.

Çizelge 2.3 İstanbul Boğazı'ndan geçen gemilerin dağılımı [3]

AYLAR	TOPLAM GEMİ	TOPLAM GT	KILAVUZ ALAN	SP-1 VEREN	UĞRAKSIZ GEMİ	200 M'DEN		500 GT 'DEN		TANKER SAYISI			YEDEKLİ GEÇİŞ
						KÜÇÜK	BÜYÜK	KÜÇÜK	BÜYÜK	TTA	LPG-LNG	TCH	
OCAK	3949	36,435,114	1970	3812	2149	3657	292	170	3779	482	75	156	5
ŞUBAT	4029	36,594,659	2081	3955	2239	3758	271	124	3905	478	63	178	5
MART	4904	42,905,410	2478	4826	2636	4584	320	142	4762	582	75	190	15
NİSAN	4890	43,233,610	2458	4806	2671	4561	329	155	4735	556	65	157	13
MAYIS	5014	44,366,542	2493	4888	2726	4682	332	193	4821	573	72	171	7
HAZİRAN	4909	42,625,497	2395	4834	2761	4590	319	147	4762	576	59	187	6
TEMMUZ	5064	46,119,645	2449	4927	2975	4734	330	193	4871	588	66	186	12
AĞUSTOS	4988	46,415,009	2346	4893	3140	4648	340	158	4830	549	55	164	13
EYLÜL	4570	43,710,510	2245	4452	2812	4246	324	144	4426	508	55	138	10
EKİM	4479	47,154,955	2250	4394	2798	4113	366	143	4336	575	61	140	12
KASIM	3816	41,245,600	1975	3740	2367	3488	328	121	3695	518	62	157	12
ARALIK	3784	42,829,063	1887	3705	2488	3424	360	110	3674	579	56	151	
TOPLAM	54396	513,635,614	27027	53232	31762	50485	3911	1800	52596	6564	764	1975	110

Çizelge 2.4 İstanbul Boğazı'ndan geçen gemilerin tip ve aylara göre dağılımı [3]

TİPİ	OCAK	ŞUBAT	MART	NİSAN	MAYIS	HAZİRAN	TEMMUZ	AĞUSTOS	EYLÜL	EKİM	KASIM	ARALIK	TOPLAM
BBU(B/C)	378	386	409	430	475	472	570	639	572	602	504	534	5971
MVC	10	10	13	16	15	19	17	15	22	23	20	9	189
CHS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FFS	2	2	3	2	1	0	1	1	4	3	0	1	20
GGC(K/Y)	2393	2445	3083	3117	3170	3079	3054	2993	2723	2503	2099	2045	32704
GRF(REEF.)	76	80	95	75	66	71	54	57	56	63	41	62	796
LPG	75	63	75	65	72	59	66	55	55	61	62	56	764
MLV(L-S)	3	2	6	4	6	7	3	7	2	8	15	7	70
MPR(YOLCU)	71	97	103	97	107	96	107	124	126	123	63	33	1147
NAV	9	10	11	16	12	1	39	23	44	13	16	6	200
OTH	10	11	16	20	20	18	18	14	15	23	7	13	185
RRE	1	2	2	2	0	0	0	0	0	3	0	3	13
TCH (C/T)	156	178	190	157	171	187	186	164	138	140	157	151	1975
TTA (M/T)	482	478	582	556	573	576	588	549	508	575	518	579	6564
UCC(KONT.)	225	207	243	238	245	234	250	232	211	239	227	222	2773
URC(RO-RO)	38	31	41	60	58	62	70	71	68	67	49	45	660
XTG(T/B)	16	20	29	30	17	24	32	37	22	31	34	15	307
DDR	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	3
OFY	0	0	3	0	0	0	0	1	1	0	0	0	5
OBO/OBA	4	7	0	5	5	3	9	1	2	2	3	3	44
ORP	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	4
OSY	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	2
TOPLAM	3949	4029	4904	4890	5014	4909	5064	4988	4570	4479	3816	3784	54396

Çizelge 2.5 İstanbul Boğazı'ndan geçen tanker dağılımı [3]

AYLAR	GENEL GEMİ SAYISI	TEH. YÜK TAŞ. GEMİ SAY.	%	Toplam Yük Miktarı	BOYU 250-300	%	Taşınan Yük Miktarı	BOYU 200-250	%	Taşınan Yük Miktarı	BOYU 150-200	%	Taşınan Yük Miktarı	BOYU 100-150	%	Taşınan Yük Miktarı	BOY <100	%	Taşınan Yük Miktarı
OCAK	3949	713	18%	10,847,296	40	6%	2,910,849	114	16%	4,403,760	214	30%	2,986,425	180	25%	405,736	165	23%	140,526
ŞUBAT	4029	719	18%	9,883,706	37	5%	2,432,852	115	16%	4,082,662	199	28%	2,825,406	188	26%	394,069	180	25%	148,717
MART	4904	847	17%	13,079,933	41	5%	2,747,658	147	17%	6,172,342	235	28%	3,430,017	224	26%	535,038	200	24%	194,878
NİSAN	4890	778	16%	12,751,394	43	6%	3,096,396	142	18%	5,461,926	234	30%	3,627,852	173	22%	382,120	186	24%	183,100
MAYIS	5014	816	16%	12,173,850	49	6%	3,134,842	137	17%	5,247,590	226	28%	3,080,148	194	24%	494,878	210	26%	216,392
HAZİRAN	4909	822	17%	12,381,103	53	6%	3,857,631	120	15%	4,554,066	222	27%	3,272,516	229	28%	544,104	198	24%	152,786
TEMMUZ	5064	840	17%	12,021,333	54	6%	3,586,840	120	14%	4,497,688	226	27%	3,158,994	222	26%	553,214	218	26%	224,597
AĞUSTOS	4988	768	15%	11,095,771	44	6%	2,900,318	124	16%	4,458,136	192	25%	3,062,563	219	29%	486,875	189	25%	187,879
EYLÜL	4570	701	15%	10,391,956	43	6%	2,895,644	115	16%	4,293,327	172	25%	2,567,234	208	30%	480,758	163	23%	154,993
EKİM	4479	776	15%	11,883,284	50	6%	3,423,561	136	18%	4,855,466	203	26%	2,944,726	212	27%	493,862	175	23%	165,669
KASIM	3816	737	19%	10,990,717	41	6%	2,566,066	113	15%	4,537,084	222	30%	3,357,648	188	26%	387,705	173	23%	142,214
ARALIK	3784	786	21%	12,856,888	57	7%	3,966,597	135	17%	5,017,880	222	28%	3,260,002	238	30%	495,405	134	17%	117,005
G.TOPLAM	54396	9303	17%	140,357,231	552	6%	37,519,254	1518	16%	57,581,927	2567	28%	37,573,531	2475	27%	5,653,764	2191	24%	2,028,756

Çizelge 2.6 İstanbul Boğazı'ndan geçen gemilerin aylara göre dağılımı [3]

AYLAR	TOPLAM GEMİ	TOPLAM GT	KILAVUZ ALAN	SP-1 VEREN	UĞRAKSIZ GEMİ	200 M'DEN		500 GT 'DEN		TANKER SAYISI			YEDEKLİ GEÇİŞ
						KÜÇÜK	BÜYÜK	KÜÇÜK	BÜYÜK	TTA	LPG-LNG	TCH	
OCAK	3624	40,995,337	1755	3560	2442	3302	322	80	3544	535	51	154	2
ŞUBAT	3407	38,265,962	1603	3376	2310	3083	324	43	3364	502	55	140	6
MART	4381	43,847,326	2002	4287	2927	4023	358	129	4252	552	83	177	10
NİSAN	4486	43,759,290	2145	4388	2808	4118	368	127	4359	524	78	145	13
MAYIS	4382	43,172,384	2137	4328	2727	4041	341	89	4293	567	78	175	16
HAZİRAN	4378	41,439,056	2069	4295	2616	4064	314	121	4257	569	68	156	7
TEMMUZ	4462	42,820,169	2090	4405	2725	4142	320	97	4365	570	67	146	16
AĞUSTOS	4650	44,103,265	2243	4594	2850	4331	319	93	4557	576	73	150	13
EYLÜL	4431	43,595,643	2257	4381	2686	4116	315	92	4339	528	75	140	15
EKİM	4706	46,016,269	2398	4655	2846	4383	323	108	4598	520	77	179	8
KASIM	4185	42,606,016	2102	4147	2664	3912	273	77	4108	525	71	157	6
ARALIK	4330	44,035,729	2176	4296	2696	4036	294	72	4258	589	90	157	8
TOPLAM	51422	514,656,446	24977	50712	32297	47551	3871	1128	50294	6557	866	1876	120

2.5.1 İstanbul Boğazı'nda Tanker Trafik ve Tanker Kazaları

İstanbul Boğazı'ndaki deniz trafiği yoğunluğu deniz kirliliği riskini de artırmaktadır. Deniz kirliliği açısından ise boğazdaki tanker trafiği önem arz etmektedir. Çünkü olası bir tanker kazasının boğazda deniz kirliliğine katkısı olacaktır. İstanbul Boğazı'ndan geçen tanker dağılımı Çizelge 2.5'te verilmiştir.

Nitekim İstanbul Boğazı'nda geçmiş yıllarda bir çok kaza meydana gelmiştir. Bu kazalar içerisinde ise özellikle tanker kazalarının İstanbul Boğazı'na etkisi olmuştur. 1995 – 2001 yılları arasında meydana gelen tanker kazaları Çizelge 2.8'de verilmiştir. Meydana gelen bu kazalar sonucu binlerce ton yakıt İstanbul Boğazı'na sızmış, bir o kadarı yanarak havaya karışmıştır. Kazalar hem deniz kirliliğine hem de hava kirliliğine yol açmıştır. Geçmişte olan bu kazaların çok çeşitli nedenleri vardır: yoğun deniz trafiği, rüzgar, akıntı, diğer olumsuz hava koşulları, boğazın coğrafik yapısı, gemilerin teknik eksiklikleri vb (Can, 2007).

İstanbul Boğazı'nda meydana gelen kazalar; çarpışma, karaya oturma ve karaya çarpma şeklinde görülmüştür. Bu kazalara özellikle Karadeniz'den Marmara'ya doğru seyreden

gemiler neden olmuştur. Çünkü boğazdaki üst akıntı Karadeniz'den Marmara'ya doğrudur ve bu da gemilerin hızını daha da artırmakta ve kazalara neden olmaktadır.

Çizelge 2.7 İstanbul Boğazı'ndan geçen gemilerin yıllara göre dağılımı [3]

YILLAR	TOPLAM GEMİ	KILAVUZ ALAN	SP-1 VEREN	UĞRAKSIZ GEMİ	200 M'DEN		500 GT 'DEN		TANKER SAYISI			YEDEKLİ GEÇİŞ
					KÜÇÜK	BÜYÜK	KÜÇÜK	BÜYÜK	TTA	LPG-LNG	TCH	
1995	46954	1772	9571	24325	40463	6491	6230	40724				
1996	49952	20317	12777	23755	42716	7236	5316	44636				
1997	50942	19753	15525	24270	44455	6487	5087	45855	4303	438	628	138
1998	49304	18881	24432	24561	47361	1943	4475	44829	4100	445	597	108
1999	47906	18424	30619	26323	45738	2168	3552	44354	4134	475	577	60
2000	48079	19209	38574	26858	45876	2203	3345	44734	4937	474	682	53
2001	42637	17767	38940	26113	40184	2453	2155	40482	5188	546	782	111
2002	47283	19905	44726	29398	44170	3113	1932	45350	6022	545	860	118
2003	46939	21175	45340	28951	44016	2923	1782	45157	6571	598	928	127
2004	54564	22318	54564	34256	51512	3052	2107	52457	7470	634	1295	110
2005	54794	24494	54686	34111	51291	3503	1610	53184	7577	681	1769	81
2006	54880	26589	23324	31880	51227	3653	2176	52704	7659	814	1680	111
2007	56606	26685	55132	31826	52953	3653	2138	54468	7204	800	2050	105
2008	54396	27001	52232	31732	50485	3911	1800	52596	6564	764	1975	110
2009	51422	24977	50715	32297	47551	3871	1128	50294	6557	866	1876	120

Çizelge 2.8 İstanbul Boğazı'ndan gerçekleşen tanker kazaları, (Örs ve Yılmaz, 2003)

YILLAR	TOPLAM GEÇİŞ	TANKER SAYISI	ÇARPIŞMA	YANGIN	OTURMA	TOPLAM
1995	46954		4	0	0	4
1996	49952	4248	2	0	5	7
1997	50942	4303	2	0	9	11
1998	49304	5142	3	0	8	11
1999	47906	4452	4	3	6	13
2000	48079	4937	5	0	4	9
2001	42637	5188	15	0	5	20

3. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD)

Sıvılar için hidrodinamik, gazlar için aerodinamik adını alan akışkanlar dinamiği, hareket halindeki akışkanın davranışını ve çevresi ile olan etkileşimini teorik, deneysel ve sayısal olarak incelemektedir. Teorik çalışmalar çeşitli kabullerle kısıtlı problemler için yapılabildiğinden daha çok sayısal çalışmalar yapılmaktadır. Deneysel çalışmalar da sayısal çalışmaları doğrulamada etkin bir şekilde kullanılmaktadır. İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra büyük bir hızla gelişen bilgisayar teknolojisi sayesinde sayısal çalışmalarda bilgisayarların kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu sayede analitik olarak çözülmesi imkansız akışkanlar dinamiği problemleri sayısal olarak çözülebilmektedir. Akışkanlar dinamiği ile ilgili denklemlerin bilgisayar yardımıyla çözülmesi, İngilizce 'Computational Fluid Dynamics (CFD)' olarak bilinen 'Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)' adıyla anılan yeni bir çalışma alanının doğmasına neden olmuştur. HAD kullanılarak tasarım zamanı kısaltmakta ve deneysel olarak oluşturulamayan akış koşulları modellenebilmektedir. Dolayısıyla günümüzde akışkanlar dinamiği problemlerinde HAD tekniği, teorik ve deneysel tekniklere göre yaygın olarak kullanılmaktadır. HAD yardımıyla ısı transferi, kütle transferi, faz değişimi, yanma, çok fazlı akış ile ilgili problemler modellenebilmektedir.

HAD tekniği ile analiz için izlenmesi gereken adımlar şunlardır:

- Geometrik modelleme
- Problemin tanımlanması (akışkan özellikleri ile sınır koşullarının girilmesi)
- Çözüm algoritmasının seçilmesi
- Akışkan tipinin seçilmesi
- Sayısal metodun seçilmesi
- Sonuçların değerlendirilmesi

3.1 Sonlu Hacimler Yöntemi (FVM)

Sonlu hacimler yöntemi kısmi diferansiyel denklemlerin çözümünde kullanılan sayısal bir yöntemdir. Çözüm sonucunda korunumla değişkenlerin değerleri kontrol hacmi üzerinde hesaplanır. Sonlu hacimler yönteminde kısmi diferansiyel denklem kontrol hacmi üzerinde integre edilir. Bu hacim integrasyonundaki diverjans içeren terimler diverjans teoremi ile yüzey integrallarına dönüştürülür. Daha sonra bu terimler her bir sonlu hacmin yüzeyindeki akılar olarak değerlendirilir. Bir hacme giren akı miktarı ona komşu hacimden çıkan akı miktarına eşit olduğundan yöntem korunumlu bir yöntemdir. Yapısal çözüm ağlarında olduğu kadar yapısal olmayan çözüm ağlarında da başarılı sonuçlar vermesi bu yöntemin avantajlarından (Özdemir, 2007).

3.2 Matematik Alt Yapı

3.2.1 Akışkanlar Mekaniğindeki Temel Diferansiyel Denklemler

Hareket denklemlerinin diferansiyel olarak çözümü oldukça zordur. Buna rağmen bazı yaklaşımlarla problemler çözülebilir. Bu amaçla ilk olarak denklemler çözülemese bile akışkana ait hareket denklemleri boyutsuzlaştırılarak bazı parametreler elde edilebilir. Ayrıca daimi akış ve sıkıştırılamaz akış kabulleri yapılarak çok sayıda çözüm elde edilebilir. Son olarak sürtünmesiz akış kabulü ile ciddi bir basitleştirme yapılarak Bernoulli denklemi geçerli kılınır ve ideal akışkan için çözüm sağlanır.

3.2.2 Kütlenin Korunumunun Diferansiyel Denklemi

Tüm temel diferansiyel denklemler ya elemansal denetim hacmi ya da elemansal sistem düşünülerek türetilebilir. Burada diferansiyel denklemin türetilmesi anlatılmadan doğrudan verilecektir. Kütlenin korunumunun diferansiyel denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (3.1)$$

Sonsuz küçük bir denetim hacmi için kütlenin korunumu, yoğunluk ve hızın sürekli fonksiyonlar olması dışında başka bir kabul gerektirmediği için sıklıkla süreklilik denklemi olarak adlandırılır. Yani akış daimi ya da daimi olmayan, sürtünmeli ya da sürtünmesiz, sıkıştırılabilir ya da sıkıştırılamaz olabilir. Süreklilik denklemini aşağıdaki şekilde daha açık bir formda yazabiliriz:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (3.2)$$

Yukarıda verilen denklemler kütlenin korunumu için en genel haldeki denklemlerdir. Bu çalışmada incelenen problemler sıkıştırılamaz akış olduğu için bu denklemlerin sol tarafındaki ilk terim sıfır olacaktır.

3.2.3 Momentumun Korunumunun Diferansiyel Denklemi

Akışkanlar mekaniğinde diferansiyel momentumun denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\begin{aligned}\rho \frac{Du}{Dt} &= \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{zx})}{\partial z} + S_{M_x} \\ \rho \frac{Dv}{Dt} &= \frac{\partial(\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{zy})}{\partial z} + S_{M_y}\end{aligned}\quad (3.3)$$

$$\begin{aligned}\rho \frac{Dw}{Dt} &= \frac{\partial(\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + S_{M_z} \\ \frac{Du}{Dt} &= \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{Dv}{Dt} &= \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}\end{aligned}\quad (3.4)$$

$$\frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z}$$

Momentum denkleminin tüm bileşenleri tam olarak yazılacak olursa:

$$\begin{aligned}\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= S_{M_x} - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{zx})}{\partial z} \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= S_{M_y} - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{zy})}{\partial z} \\ \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= S_{M_z} - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial(\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{zz})}{\partial z}\end{aligned}\quad (3.5)$$

Yukarıdaki momentum denklemleri herhangi bir akışkanın genel hareketi için geçerli olup özel akışkanlar, özel viskoz gerilme terimleri ile karakterize edilirler.

3.2.4 Navier-Stokes Denklemleri

Newton tipi akışkan için viskoz gerilmeler elemanın şekil değiştirme hızları ve katsayısı ile orantılıdır. Viskoz gerilmeler şu şekilde ifade edilir:

$$\begin{aligned}\tau_{xx} &= 2\mu \frac{\partial u}{\partial x}; \tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y}; \tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \\ \tau_{xy} = \tau_{yx} &= \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right); \tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right);\end{aligned}\quad (3.6)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)$$

Yukarıdaki bağıntılarda yer alan μ viskozite katsayısıdır. Bu ifadelerin denklem 3.5'e yerleştirilmesi halinde sabit yoğunluk ve viskoziteli Newton tipi bir akışkan için diferansiyel momentum denklemi elde edilir. Burada S_{M_x} , S_{M_y} , S_{M_z} kütle kuvvetleri olup yer çekimi, manyetizma, elektrik potansiyel gibi dış alanlar nedeniyle oluşur ve elemanın içindeki kütlenin tamamına etki ederler.

$$\begin{aligned} S_{M_x} - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) &= \rho \frac{du}{dt} \\ S_{M_y} - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) &= \rho \frac{dv}{dt} \\ S_{M_z} - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) &= \rho \frac{dw}{dt} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Bu denklemler C. L. M. H. Navier (1785-1836) ve Sir George Stokes (1819-1903)'a atfen Navier – Stokes denklemleri olarak adlandırılır.

3.2.5 Akışkanlar Mekanizminin Temel Denklemlerinin Kapalı Formu

Elde edilen bütün denklemler aşağıdaki şekilde kapalı formda yazılabilir:

Kütlenin korunumu diferansiyel denklemi:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (3.8)$$

X yönünde momentumun korunumunun diferansiyel denklemi:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{gradu}) + S_{M_x} \quad (3.9)$$

Y yönünde momentumun korunumunun diferansiyel denklemi:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad}v) + S_{M_y} \quad (3.10)$$

Z yönünde momentumun korunumunun diferansiyel denklemi:

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad} w) + S_{M_z} \quad (3.11)$$

3.2.6 Kullanılacak Türbülans Modelinin Seçimi

En genel anlamda akışkan hareketleri Navier-Stokes denklemleri ile ifade edilir. Ancak bu denklemlerin belli kabuller yapılmadan çözümü hem analitik hem sayısal olarak oldukça zordur. Akışın karakteristiği boyutsuz Reynolds sayısına bağlıdır. Reynolds sayısı ise akışkanın fiziksel özelliği olan viskozite, akış hızı ile akış ortamını ifade eden karakteristik uzunluğa bağlıdır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile laminar akış kolayca çözümlenebilirken, uygulamadaki türbülanslı akışları türbülans modelleri kullanmaksızın çözmek imkansızdır (Çengel, Cimbala, 2007). Akış hareketi, türbülanslı olduğu takdirde Navier-Stokes denklemleri zaman ortalaması alınmış Navier-Stokes denklemlerine dönüştürülür. Bu denklemleri çözmek için ise çeşitli türbülans modellerine başvurulur. Türbülans modeli seçimi, akışın kapsadığı geometri, deneysel verilere ve tecrübelerle dayanan sınırlamalar, mevcut hesaplama imkanları ve zaman gibi birçok parametreye bağlıdır. Günümüzde kullanılan türbülans modelleri genel olarak aşağıdaki gibidir:

1) Cebirsel Modeller:

Baldwin-Lomax, Cebeci-Smith

2) Tek Denklem Modelleri:

Spalart-Allmaras, Baldwin-Barth

3) İki Denklem Modelleri:

k-ε, k-ω

4) Stres Taşınım Modelleri:

Launder-Reece-Rodi, Wilcox-Stress- ω

Tek başına hiçbir türbülans modeli bütün problemler için kullanılabilir değildir. Türbülans modellerinin geçerliliği ve güvenilirliği için elde edilen deneysel ve sayısal sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Yukarıdaki bölümlerde verilen tam çözüm için bütün Navier – Stokes denklemleridir. Bu denklemlerle çözüm doğrudan sayısal simülasyon ile mümkündür. Ancak Reynolds sayıları

büyüdükçe problem içerisinde en büyük girdap ile en küçük girdap arasındaki mertebe farkı büyür. Bu durum problemin bu denklemlerle ve DNS ile çözümünü zorlaştırır. Günümüz bilgisayarlarında yüksek Reynolds sayılı türbülanslı akışlar için DNS çözümü mümkün değildir. Bu yüzden yüksek Reynolds sayılı türbülanslı akışlar için basitleştirilmiş Navier – Stokes denklemleri geliştirilmiştir. Bu sayede problemler yaklaşık olarak çözülebilmektedir. Bu amaçla bir türbülans modeli kullanılırken daimi Navier-Stokes denklemi (3.12) yerine Reynolds-ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemi (3.13) kullanılır. Bu kabul, sıkıştırılamaz ve türbülanslı akış için geçerlidir.

$$(\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} P' + \nu \nabla^2 \vec{V} \quad (3.12)$$

$$(\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} P' + \nu \nabla^2 \vec{V} + \vec{\nabla} \cdot (\tau_{ij, \text{türbülans}}) \quad (3.13)$$

$$\tau_{ij, \text{türbülans}} = -\begin{pmatrix} \overline{u'^2} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{u'v'} & \overline{v'^2} & \overline{v'w'} \\ \overline{u'w'} & \overline{v'w'} & \overline{w'^2} \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

Türbülans modellerinin, denklemlerin çözülebilmesi için birer tamamlayıcı denklem oldukları ve bunların büyük ölçüde deneysel sabitlere dayalı yaklaşımlar olduğu unutulmamalıdır. (Çengel, Cimbala, 2007).

Bu tez çalışmasında incelenen problem için Reynolds sayısı yüksek olduğundan türbülans modelinin kullanılması uygun görülmüştür.

3.2.6.1 Standart k-ε Modeli

Şu ana kadar üretilen türbülans modelleri arasında en yaygın kullanılanı k-ε türbülans modelidir. Harlow ve Nakayama (1968) tarafından yapılan çalışmalar bu modele ilişkin yapılan ilk çalışmalardandır. Kullanımı çok yaygın olduğu için Standart k-ε olarak adlandırılmıştır. Launder ve Sharma (1974) modele ait kapama katsayılarını düzeltmişlerdir ve bu haliyle model çoğu araştırmacı tarafından kabul görmüştür. Aşağıda denklemleri verilen k-ε türbülans modeli için k türbülans kinetik enerjisi, ε ise türbülans kinetik enerjisi kayıp oranı olarak tanımlanmıştır.

Türbülans kinetik enerjisi:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (3.15)$$

Kayıp oranı:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.16)$$

Yukarıdaki denklemlerde geçen G_k ortalama hız gradyenlerinden dolayı türbülans kinetik enerji üretimini, G_b de sıcaklık farklarından dolayı oluşan yoğunluk değişimlerine bağlı olarak türbülans kinetik enerji üretimini göstermektedir. Eddy viskozitesi olan μ_t aşağıdaki formülle hesaplanır:

Eddy viskozitesi:

$$\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon \quad (3.17)$$

Kapama katsayıları:

$$C_{1\varepsilon} = 1.44; C_{2\varepsilon} = 1.92; C_\mu = 0.09; \sigma_k = 1.0; \sigma_\varepsilon = 1.3 \quad (3.18)$$

$$G_k = -\overline{\rho u_i u_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (3.19)$$

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (3.20)$$

Bu denklemde Pr_t enerji için türbülans Prandtl sayısı, g_i i-yönündeki yerçekimi vektör bileşenidir. Standart k-ε ve Realizable k-ε türbülans modellerinde Prandtl sayısının değeri sabit olup 0.85'tir. RNG k-ε türbülans modelinde Pr_t sabit alınmayıp aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$Pr_t = \frac{1}{\alpha} \quad (3.21)$$

Termal genişleme katsayısı:

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right) \quad (3.22)$$

3.2.6.2 RNG/k- ϵ Modeli

RNG (Renormalization Group Theory) k- ϵ modeli kullanılan istatistiksel tekniklerden üretilmiştir. Standart k- ϵ modeli ile benzerlik gösterir. RNG teorisine göre Prandtl sayısı sabit alınmaz, hesaplanır. RNG k- ϵ modeli, standart k- ϵ modelinden farklı olarak düşük Reynolds sayısı etkilerini hesaplamak için kullanılan efektif viskozite için türetilmiş diferansiyel denklemler içermektedir.

3.2.6.3 Realizable/ k- ϵ Modeli

Realizable k- ϵ modeli (Shih vd., 1995) diğer k- ϵ modelleri ile benzerlik göstermekle birlikte daha yeni bir modeldir ve diğerlerinden farklı iki özelliği vardır:

- Model, türbülans viskozitesi için yeni bir formül içerir.
- ϵ için yeni bir taşıyım denklemi içerir.

3.2.6.4 Standart k- ω Modeli

İlk k- ω modeli çalışmaları Kolmogorov (1942) tarafından yapılmış olup Saffman (1970) tarafından da geliştirilmiştir. Standart k- ω türbülans modeli D. C. Wilcox (1994) tarafından geliştirilmiş olan düşük Reynolds sayısı etkileri, sıkıştırılabilirlik ve kayma akım iyileştirilmelerini içeren k- ω modeline dayanmaktadır. Bu türbülans modeli, kesikli akış, radyal jet ve duvar sınırlı akım problemlerinde ölçülmüş verilerle iyi uyum sağladığından bu problemler için tavsiye edilmektedir. Bu modelde kullanılan ω parametresi k ile benzerlik gösteren bir diferansiyel denklemdir.

3.2.6.5 Reynolds Stress Modeli

Reynolds Stress Model (RSM) FLUENT'te bulunan en ayrıntılı türbülans modelidir. RSM, RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) denklemlerini çözmek için sönmleme hızı (dissipation) denklemleri ile birlikte transport denklemlerinden yararlanır. Bu da üç boyutlu bir problem için ek olarak yedi denklemin daha çözülmesini gerektirir. RSM dahilinde Reynolds gerilmelerinin sayısal değerleri görülebilmektedir.

3.2.7 Çözüm Algoritması

Momentum denklemlerinin lineer olmaması ve denklemler arasındaki bağlantıdan kaynaklanan problemler iteratif bir çözüm yöntemi kullanmayı gerektirmektedir. Bu tez çalışmasında PISO iteratif çözüm algoritması kullanılmıştır.

- PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators) algoritması zamana bağlı sıkıştırılabilir akışların iteratif olmayan hesaplamaları için geliştirilmiş basınç-hız hesaplama prosedürüdür.
- Bu algoritma daimi akış problemlerinin iteratif çözümü için başarılı bir şekilde adapte edilmiştir.
- PISO bir öngörme adımı ile iki düzeltme adımı içerir ve ikinci düzeltme adımından dolayı SIMPLE algoritmasının genişletilmiş hali olarak düşünülebilir.
- SIMPLE algoritması, öngörme adımında momentumun uygun basınç alanı kullanılarak çözüleceğini kabul eder.
- İlk momentum çözümünden sonraki hız alanı tahmini bir basınç alanı kullanıldığından ıraksak değildir.
- Ancak, ilk basınç öngörme adımından sonra basınç alanı iki kısım içerecektir:
 - Bütün akış alanı ile uyumlu bir fiziksel basınç
 - İlk basınç tahmininde hatayı dengeleyen ve sürekliliği sağlayan bir basınç düzeltme elemanı
- SIMPLE’da bu işlem basınç rahatlatma olarak ele alınır.

Rahatlatma ve PISO

PISO algoritmasının mantığı şöyledir:

- Basınç-hız sistemi iki kompleks bağlantı terimi içerir:
 - Lineer olmayan konveksiyon terimi
 - Lineer basınç-hız bağlantısı
- Düşük zaman aralıklı problemlerde basınç hız bağlantısı lineer olmayan bağlantıya göre daha güçlüdür.

PISO Algoritması

PISO, geçici doğruluğun önemli olduğu ve zaman adımının dışarıdan kontrol edildiği simülasyon türleri için oldukça kullanışlıdır.

İşlem sırası:

1. Uygun basınç alanı olarak bir önceki düzeltici adımdaki veya zaman adımındaki p^* ’yi kullan.
2. Momentum denklemini uygun akış alanı ile ayırıştır.
3. Tahmini basınç değeri ile momentum denklemini çöz. Bu adıma momentum öngörme adımı denir.

$$\alpha_p^u u_p = H(u) - \nabla p^* \quad (3.23)$$

4. Hız alanındaki yeni basıncı hesapla. Buna basınç düzeltme adımı denir.

$$\nabla \cdot \left[\left(\alpha_p^u \right)^{-1} \nabla p \right] = \nabla \cdot \left(\left(\alpha_p^u \right)^{-1} H(u) \right) \quad (3.24)$$

5. Basınç çözümüne dayanarak konservatif yüzey akışını (F) ekle.

$$F = s_f \cdot H(u) - \alpha_N^p (p_N - p_p) \quad (3.25)$$

6. Açık yöntemle eklenmiş momentum katsayılarıyla hücre merkezli hız alanını güncelle.

$$u_p = \left(\alpha_p^u \right)^{-1} \left(H(u) - \nabla p \right) \quad (3.26)$$

7. Yakınsama olmadıysa 4. adıma geri dön.

8. Yeni bir zaman adımı için 1. adımdan itibaren aynı yolu izle.

3.2.8 Çok Fazlı Akış İçin Kullanılan Model

Çok fazlı akışta birden fazla akışkan vardır ve fazlardan biri sürekli akışkan olarak nitelendirilir. Diğer akışkanlar ise bu birincil akışkan içerisinde parçacık, kabarcık veya damlacık şeklinde dağılım gösterir. “Mixture” modeli bu tür problemlerin çözümü için alternatif bir yöntemdir. Bu yöntemde süreklilik ve momentum denklemleri karışımı oluşturan sürekli akışkan ile yayılmış fazlar için yazılır. Ayrıca, her bir yayılmış faz için süreklilik denklemleri ile parçacık yoğunlukları da hesaplanır. Yayılan fazlar için momentum denklemleri cebirsel denklemler ile yaklaşık olarak çözülür.

“Mixture” model denklemleri çeşitli yöntemler uygulanarak türetilmiş ve literatürdeki yerini almıştır (Ishii 1975, Ungarish 1993, Gidaspow 1994).

3.2.8.1 “Mixture” için süreklilik denklemi

$$\frac{\partial}{\partial x} \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k u_k) = 0 \quad (3.27)$$

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m u_m) = 0 \quad (3.28)$$

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k) \quad (3.29)$$

$$u_m = \frac{1}{\rho_m} \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k u_k) = \sum_{k=1}^n (c_k u_k) \quad (3.30)$$

$$c_k = \frac{\alpha_k \rho_k}{\rho_m} \quad (3.31)$$

3.2.8.2 “Mixture” için momentum denklemi

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_m u_m + \nabla \cdot (\rho_m u_m u_m) = -\nabla p_m + \nabla \cdot (\tau_m + \tau_{Tm}) + \nabla \cdot \tau_{Dm} + \rho_m g + M_m \quad (3.32)$$

Üç gerilme tensörü ise şöyle ifade edilmiştir:

$$\tau_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \tau_k \quad (3.33)$$

$$\tau_{Tm} = - \sum_{k=1}^n \alpha_k \overline{\rho_{lk} u_{Fk} u_{Fk}} \quad (3.34)$$

$$\tau_{Dm} = - \sum_{k=1}^n \alpha_k \tau_k u_{Mk} u_{Mk} \quad (3.35)$$

3.3 Su yüzeyindeki rüzgar kesme kuvvetinin hesabı

Aşağıda rüzgar kuvvetlerinin bulunması için önerilen bazı formüller yer almaktadır:

3.3.1 Van Dorn Formülü

X ve Y yönündeki rüzgar kuvveti bileşenleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\tau_{wx} = \rho K W W_x \quad (3.36)$$

$$\tau_{wy} = \rho K W W_y \quad (3.37)$$

Burada W su yüzeyinden 10 m yüksekteki rüzgar hızını m/s cinsinden temsil etmektedir. K ise rüzgar hızı büyüklüğüne bağlı olarak rüzgar kuvveti katsayısını göstermektedir.

$$K = K_1 \quad W \leq W_{cr} \text{ için} \quad (3.38)$$

$$K = K_1 + K_2 \left(1 - \frac{W_{cr}}{W} \right)^2 \quad W > W_{cr} \text{ için} \quad (3.39)$$

Kritik rüzgar hızı $W_{cr} = 7.2$ m/s olduğu durumda;

$K_1 = 1.1 \times 10^{-6}$, $K_2 = 2.5 \times 10^{-6}$ olarak alınır.

3.3.2 Neumann & Pierson Formülü

$$\tau_{wx} = \rho_a C^* W W_x \quad (3.40)$$

$$\tau_{wy} = \rho_a C^* W W_y \quad (3.41)$$

Yukarıdaki bağıntılarda verilen C^* , hava ile su ara yüzeyindeki rüzgar hızına bağlı direnç katsayısıdır.

$$C^* = 9.0 \times 10^{-3} W^{-1/2} \quad (3.42)$$

3.3.3 Smith & Banke Formülü

Bir önceki formülün farklı bir direnç katsayısı için geliştirilmiş halidir.

$$C^* = (0.63 + 0.066W) \times 10^{-3} \quad (3.43)$$

$$\tau_{wx} = \rho_a (0.63W + 0.066W^2) \times 10^{-3} W_x \quad (3.44)$$

$$\tau_{wy} = \rho_a (0.63W + 0.066W^2) \times 10^{-3} W_y \quad (3.45)$$

3.3.4 Heaps Formülü

$$\tau_w = 1.25 c_d W^2 \quad (3.46)$$

c_d , sürüklenme katsayısı olmak üzere;

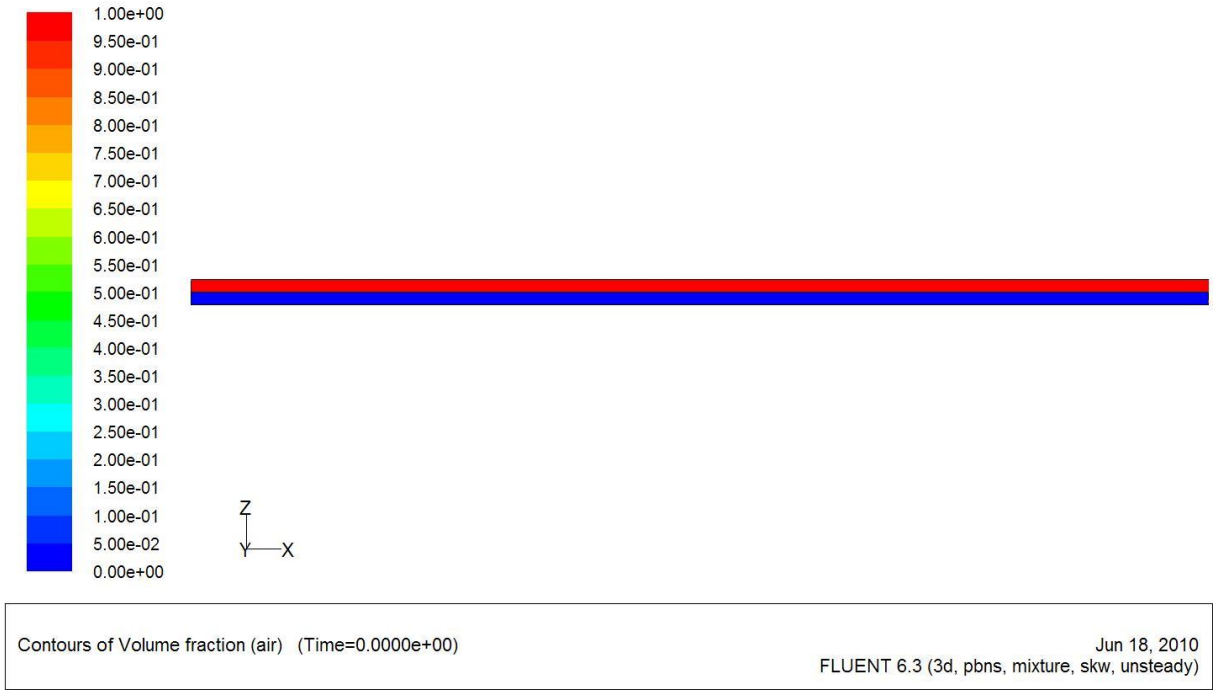
$$10^3 c_d = 0.554 \quad W \leq 4.917 \text{ m/s için} \quad (3.47)$$

$$10^3 c_d = -0.12 + 0.137W \quad 4.917 < W < 19.221 \text{ m/s için} \quad (3.48)$$

$$10^3 c_d = 2.513 \quad W \geq 19.221 \text{ m/s için} \quad (3.49)$$

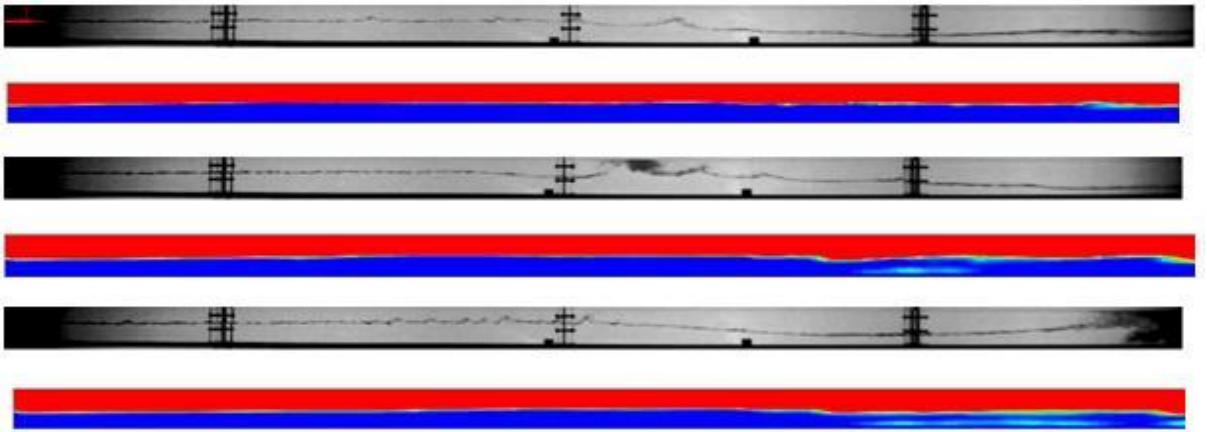
3.3.5 Rüzgar Kesme Kuvveti Formüllerinin Karşılaştırılması

Yukarıda rüzgar kaynaklı kesme kuvveti hesabı için dört farklı formül verilmiştir. Bu dört formülün hepsi verilen bir rüzgar hızı için farklı miktarlarda yüzey gerilmesi hesaplamaktadır. 10 m/s 'nin altındaki rüzgar hızlarında Neumann & Pierson yöntemi diğerlerinin hesapladığı gerilmenin neredeyse iki katı bir gerilme hesaplamaktadır. Ancak aynı yöntem 30 m/s 'nin üstündeki rüzgar hızlarında diğer yöntemlere göre daha az kesme kuvveti tahmininde bulunmaktadır. Genel olarak, 10 m/s 'nin altındaki rüzgar hızları için Heaps (1977), Dorn (1953) ve Smith & Banke (1975) yöntemleri birbirleriyle uyumludur. Bu çalışmada da Heaps yöntemi kullanılarak rüzgar kaynaklı yüzey gerilmesi hesaplanmıştır.



Şekil 4.2 Başlangıç koşulları

Şekil 4.3'te farklı zamanlardaki deney sonuçları ile sayısal sonuçlar yer almaktadır. Bu iki şekildeki sonuçlar sırasıyla şu zaman aralıklarında alınan sonuçlardır: 1.10 s, 1.50 s, 1.80 s.

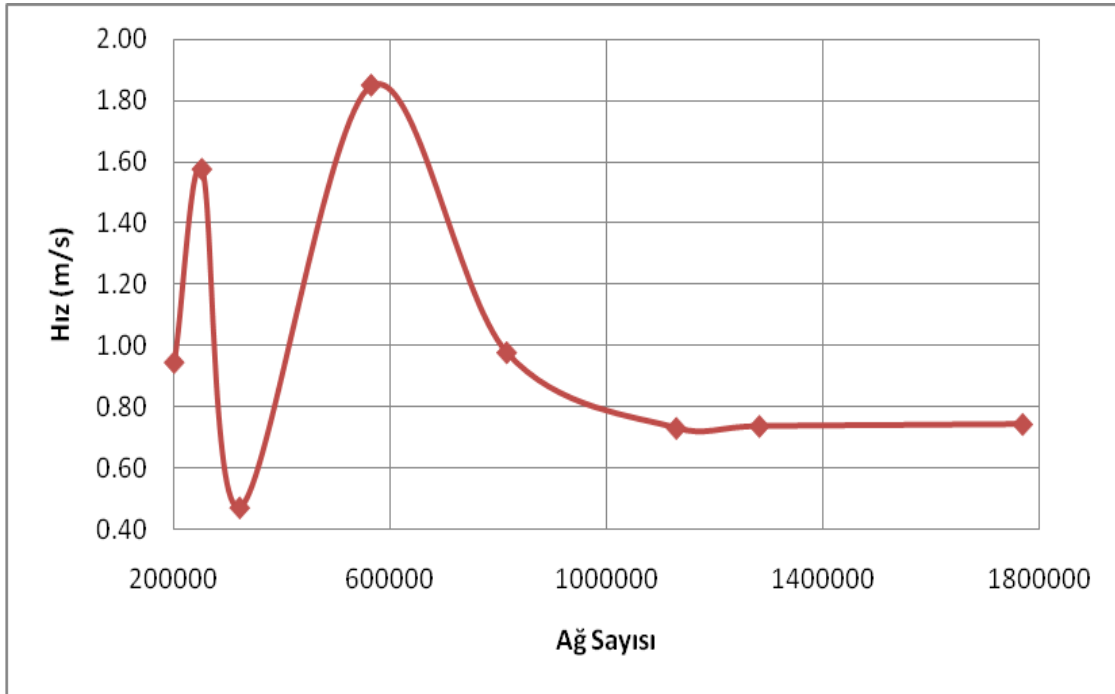


Şekil 4.3 Deneysel (Vallée vd., 2008) ve sayısal sonuçların karşılaştırılması

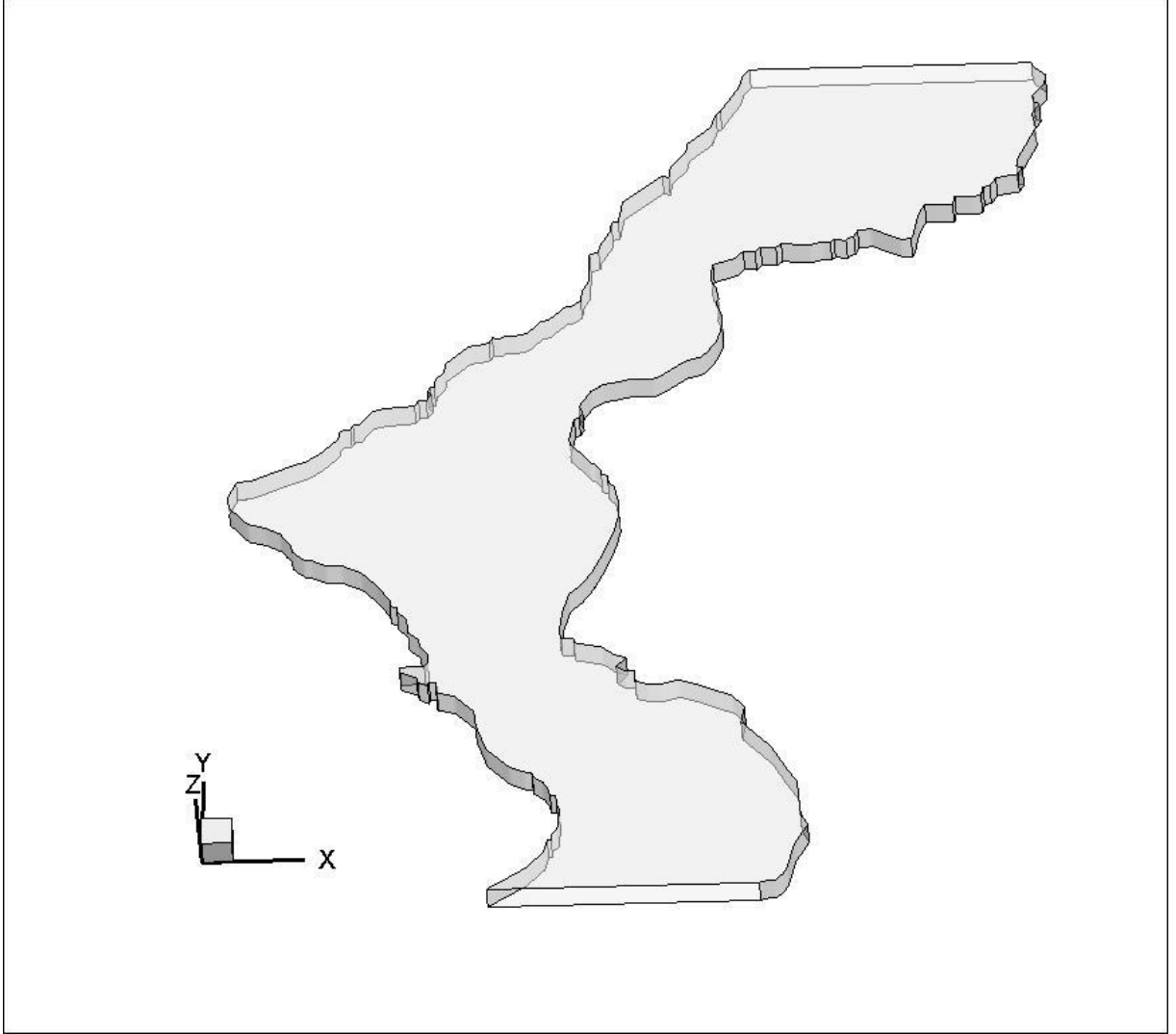
Deneysel sonuçlar ile sayısal sonuçlar, zamana bağlı faz değişimi açısından incelenmiştir. Akış süresince sayısal analizde dalga oluşumu ve yayılımı deneysel sonuçlarla paralellik göstermiştir. Sayısal analizler için

4.2 Çözüm Ağı Bağımsızlığı

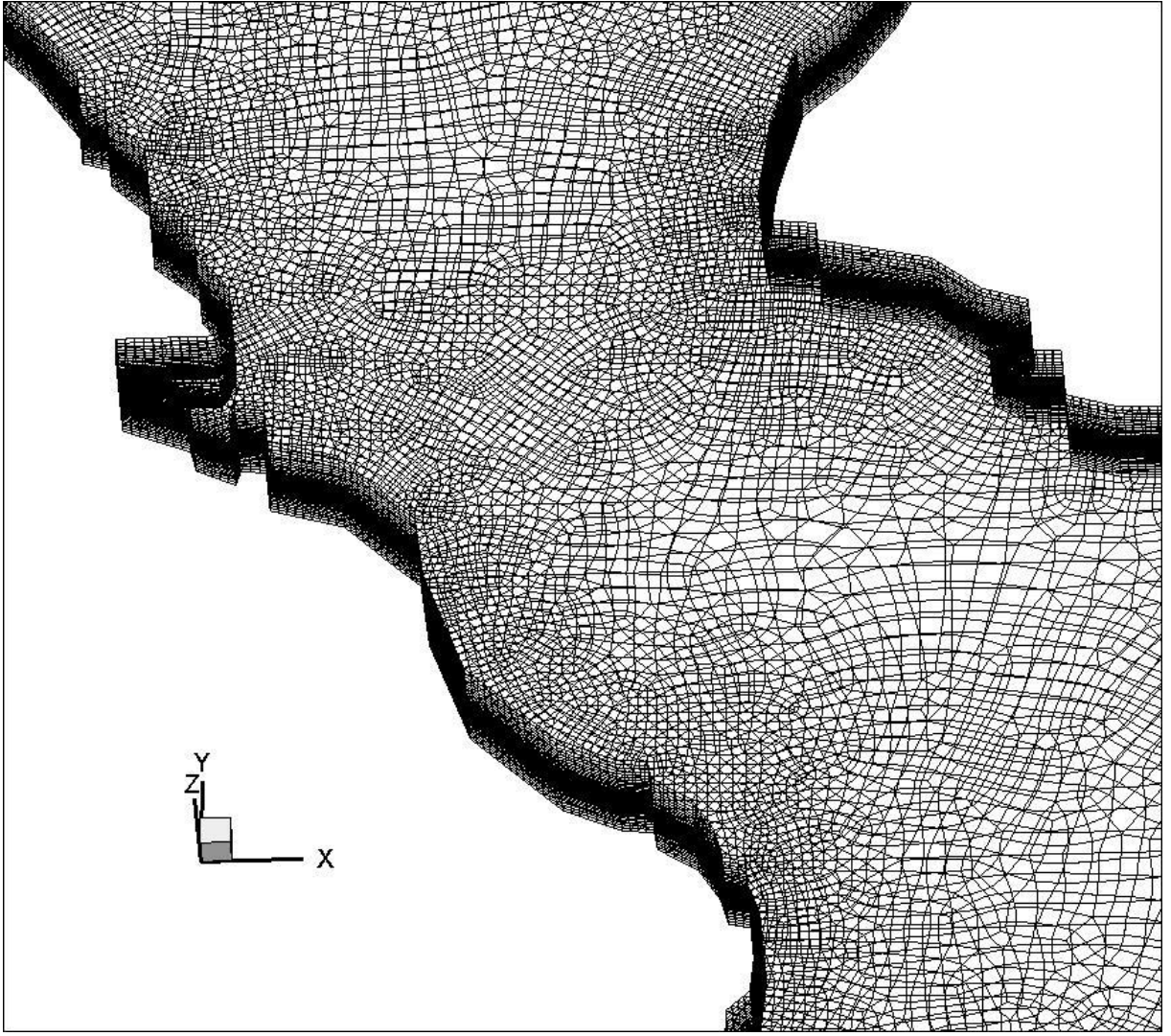
Hem iki fazlı analizler hem de yakıt kirliliği analizi için kullanılacak model aynı olduğundan bu model için optimum ağ sayısının bulunması amaçlanmıştır. Bu amaçla aynı model için 8 farklı sayıda ağ yapısı oluşturulmuştur. Her bir model tek fazlı olarak analiz edilerek bir noktadaki hız değerleri okunmuştur. Hız değerinin sabitlenmeye başladığı ağ sayısı optimum ağ sayısı olarak seçilmiş ve bundan sonraki analizler bu ağ sayısındaki model ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.1). Aşağıdaki şekilden de anlaşılacağı üzere uygun ağ sayısı yaklaşık 1120000 olmuştur. Analizlerde kullanılan model Şekil 4.2’de, ağ yapısı ise Şekil 4.3’te verilmiştir.



Şekil 4.4 Çözüm ağı bağımsızlığı



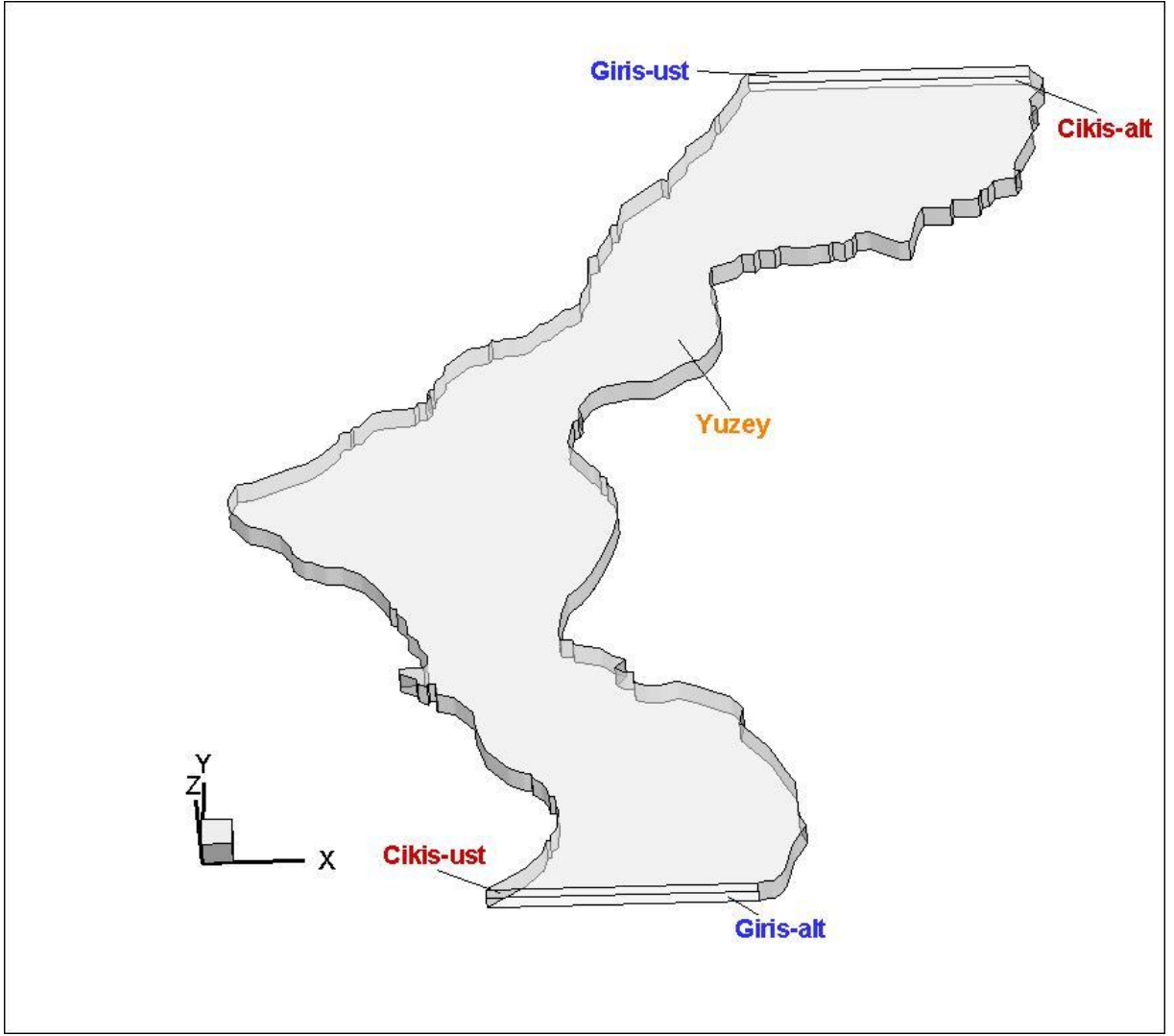
Şekil 4.5 Rumeli Kavağı 3 Boyutlu Model



Şekil 4.6 Çözüm ağı yapısı

4.3 Sınır Koşulları

Rumeli Kavağı bölgesinin derinlik bilgilerine göre alt tabakanın ortalama derinliği 20 metre, üst tabakanın ortalama derinliği ise 30 metre olarak alınmıştır. Üst akıntı hızı 0.3 m/s, alt akıntı hızı 1.3 m/s olarak kabul edilmiştir (Beji vd., 2008). Üst tabakanın tuzluluk oranı binde 18, alt tabakanınki ise binde 21 olarak alınmıştır (Can, 1988). Kullanılan programda girilen sınır koşulları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

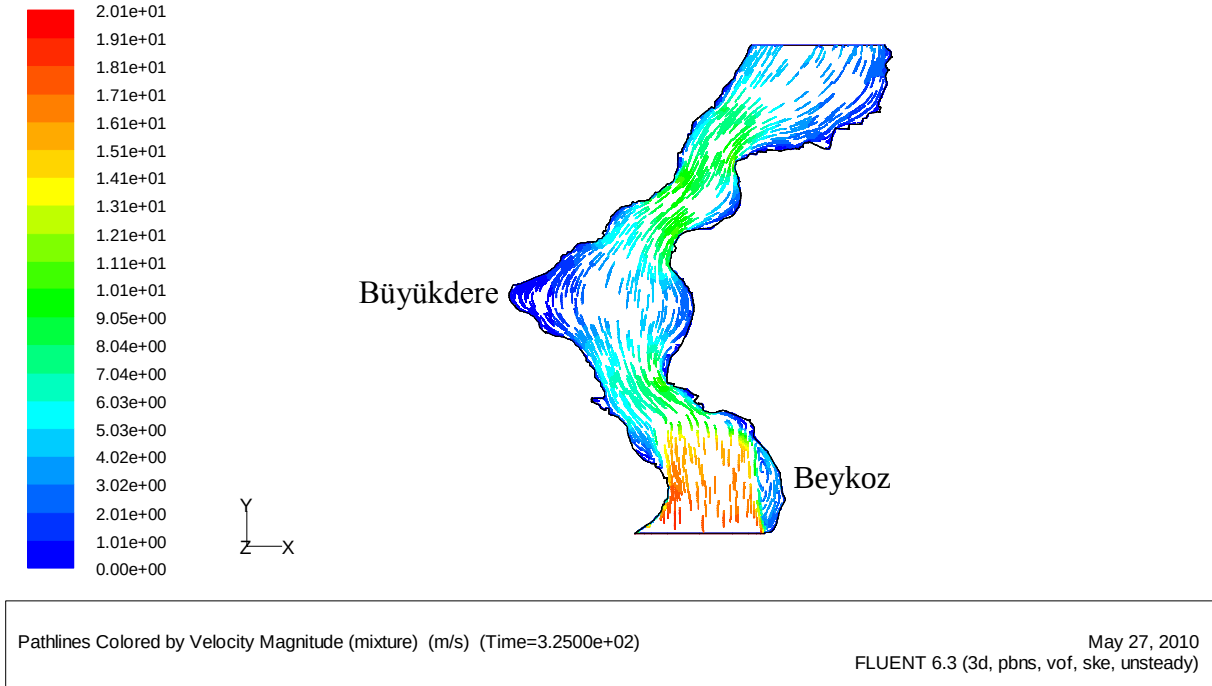


Şekil 4.7 İki Fazlı Akım Sınır Koşulları

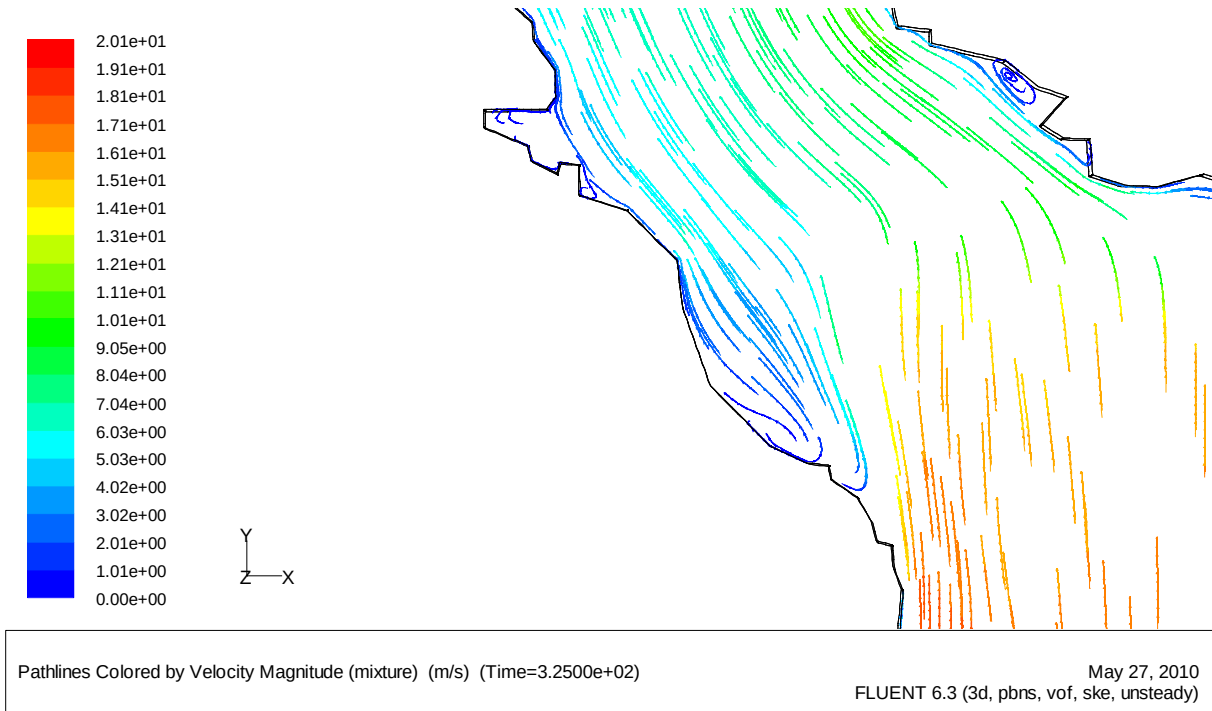
Çizelge 4.1 İki fazlı akım analizi için sınır koşulları

Üst akıntı	Karadeniz girişi	Velocity Inlet
	Marmara girişi	Pressure Outlet
Alt akıntı	Karadeniz girişi	Pressure Outlet
	Marmara girişi	Velocity Inlet
	Yan yüzeyler	No Slip Wall
	Taban	No Slip Wall
	Yüzey	Slip Wall

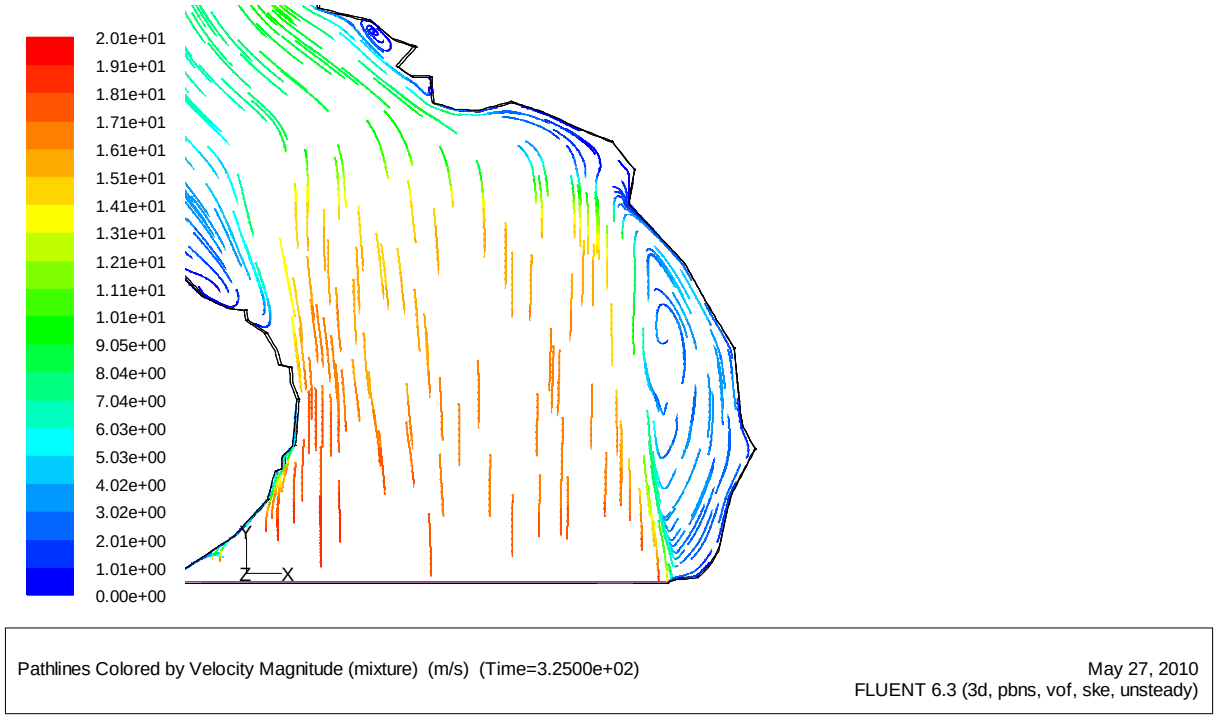
Şekil 4.4'teki gibi sınır koşullarına göre optimum ağ sayısındaki model ile zamana bağlı olarak çift fazlı analizler yapılmış ve iki tabakanın birbiriyle kısmen etkileşim içinde olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.5, 4.6 ve 4.7'de yüzeydeki hız vektörleri ile bazı bölgelerdeki girdap oluşumu görülmektedir.



Şekil 4.8 325 s' deki yüzeydeki hız dağılımı

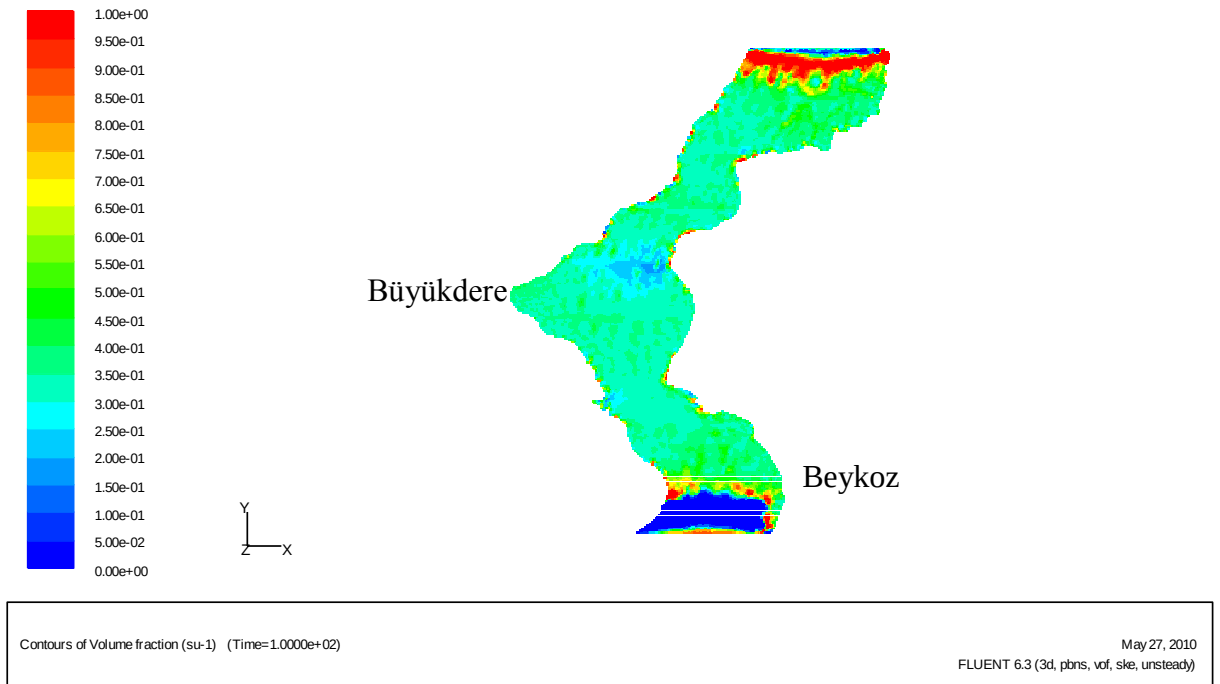


Şekil 4.9 325 s' deki girdap oluşumu (İstinye burnu)

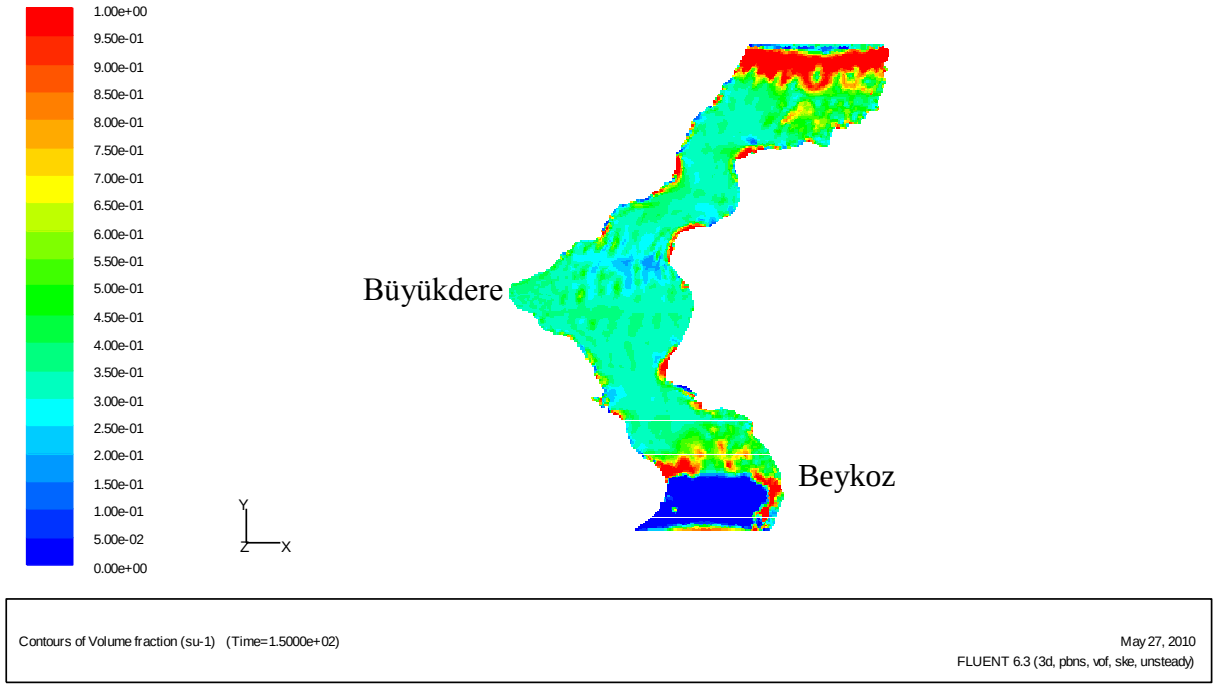


Şekil 4.10 325 s' deki girdap oluşumu (Beykoz)

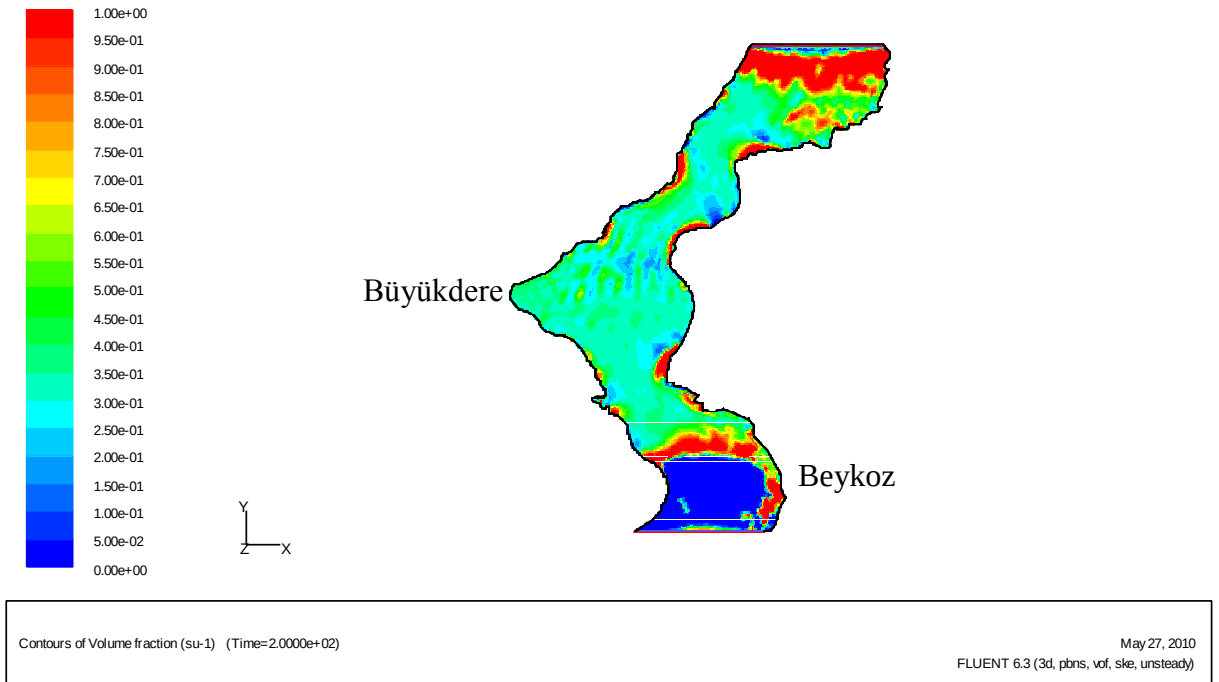
Şekil 4.8 ile Şekil 4.13 arasındaki şekillerde ise iki tabakanın birbiriyle temas ettiği yüzeydeki faz dağılımı verilmiştir.



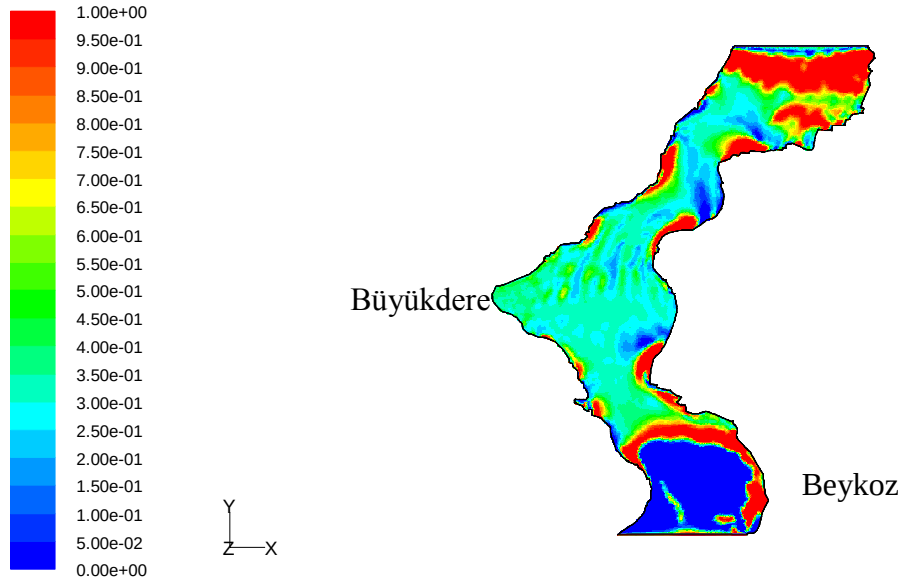
Şekil 4.11 100 s' deki iki tabaka arasındaki etkileşim



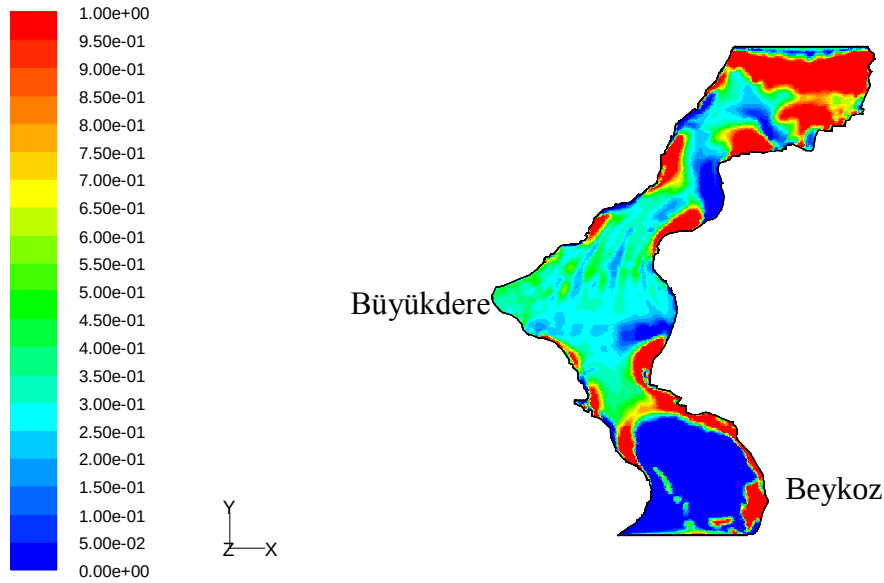
Şekil 4.12 150 s' deki iki tabaka arasındaki etkileşim



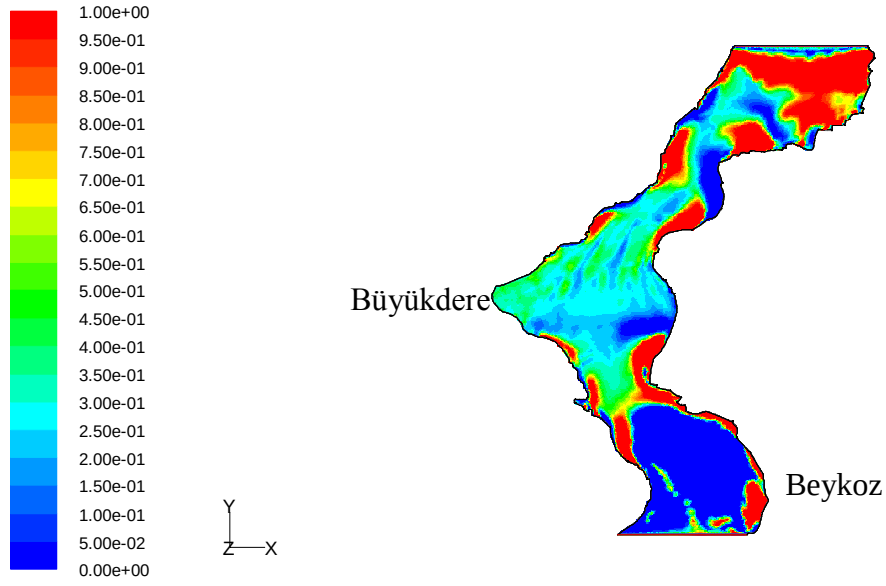
Şekil 4.13 200 s' deki iki tabaka arasındaki etkileşim



Şekil 4.14 250 s' deki iki tabaka arasındaki etkileşim



Şekil 4.15 300 s' deki iki tabaka arasındaki etkileşim



Contours of Volume fraction (su-1) (Time=3.2500e+02)

May 27, 2010
FLUENT 6.3 (3d, pbns, vof, ske, unsteady)

Şekil 4.16 325 s' deki iki tabaka arasındaki etkileşim

5. YAKIT SIZINTI ANALİZİ

5.1 Sınır Koşulları

Yakıt sızıntı analizi için kullanılan model, iki fazlı akım analizi için kullanılan model ile aynıdır. İstanbul Boğazı'nın istatistiki bilgilere göre deniz trafiğinin en tehlikeli olduğu ve en çok tanker kazasının gerçekleştiği bölgesi için yakıt sızıntı analizi yapılmıştır. Bu amaçla Rumeli Kavağı civarında bir noktadan 50000 m³ yakıt denize sızdırılmıştır. Analiz boyunca rüzgarın kuzeyden güneye doğru 1 m/s hızla estiği kabul edilmiştir. Üçüncü bölümde bahsedilen yüzeydeki rüzgar kaynaklı kesme kuvveti hesaplanarak sınır koşulu olarak deniz yüzeyine girilmiştir. Yakıtın denize sızdığı alan 2500 m² olup yakıt hızı 0.01 m/s'dir. Yakıt yoğunluğu 960 kg/m³ alınmıştır. Bu durumda yakıtın tamamının sızması yaklaşık olarak 1600 saniye sürmüştür. Yakıtın zamana göre hızının değişimi Çizelge 5.1'de verilmiştir. Yakıtın tamamı sızdıktan sonra yakıt hızı sıfırlanarak deniz yüzeyine sızan yakıtın zamana bağlı olarak davranışı incelenmiştir. Analiz boyunca zaman adımı 100 saniye olarak alınmıştır. Hesaplanan rüzgar kesme kuvveti 0.0006925 Pa'dır.

Sınır koşulları olarak deniz yüzeyi duvar olarak tanımlanmış ve rüzgar kesme kuvveti Karadeniz'den Marmara'ya doğru olan yönde girilmiştir. Yan yüzeyler ve taban yüzeyi de duvar olarak girilmiştir. Karadeniz girişinde üst tabaka için su girişi, alt tabaka için su çıkışı tanımlanmıştır. Marmara girişinde ise üst tabaka için su çıkışı, alt tabaka için su girişi tanımlanmıştır. Yakıt sızıntısı da aynı şekilde yukarıda bahsedilen noktadan giriş olarak tanımlanmıştır. Bu sınır koşulları Çizelge 5.2'de görülmektedir.

Çözüm algoritması PISO, çok fazlı akım modeli "mixture" olarak seçilmiştir. Türbülans modeli ise "standart k-ε" dur.

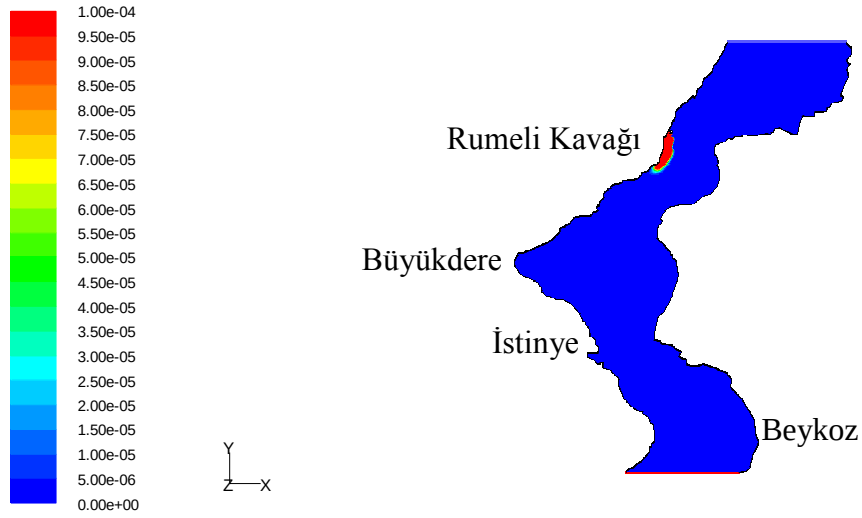
Çizelge 5.1 Yakıt giriş hızı ve zamanı

t(s)	0	1000	1600
v(m/s)	0.01	0.01	0

Şekil 5.1 ile Şekil 5.17 arasındaki şekillerde boğaz yüzeyine sızan yakıtın zamana bağlı olarak davranışı gösterilmiştir.

Çizelge 5.2 Yakıt analizi için sınır koşulları

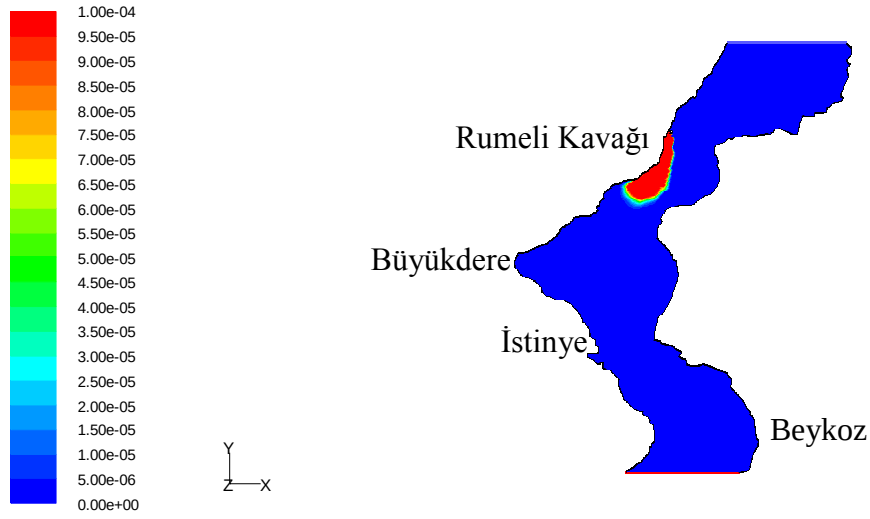
Üst akıntı	Karadeniz girişi	Velocity Inlet
	Marmara girişi	Pressure Outlet
Alt akıntı	Karadeniz girişi	Pressure Outlet
	Marmara girişi	Velocity Inlet
	Yan yüzeyler	No Slip Wall
	Taban	No Slip Wall
	Yüzey	Slip Wall
	Yakıt girişi	Velocity Inlet



Contours of Volume fraction (oil) (Time=5.0000e+02)

May 27, 2010
FLUENT 6.3 (3d, pbns, mixture, ske, unsteady)

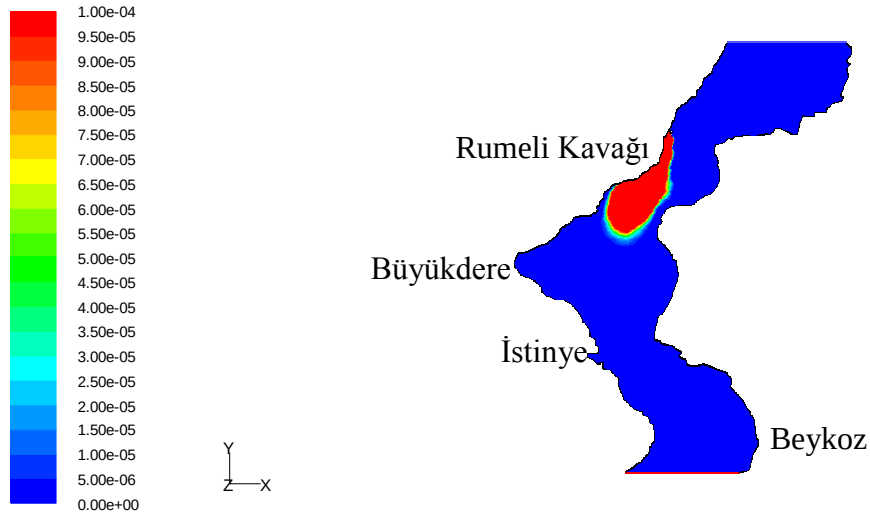
Şekil 5.1 500 s' deki yakıt dağılımı



Contours of Volume fraction (oil) (Time=1.0000e+03)

May 27, 2010
FLUENT 6.3 (3d, pbns, mixture, ske, unsteady)

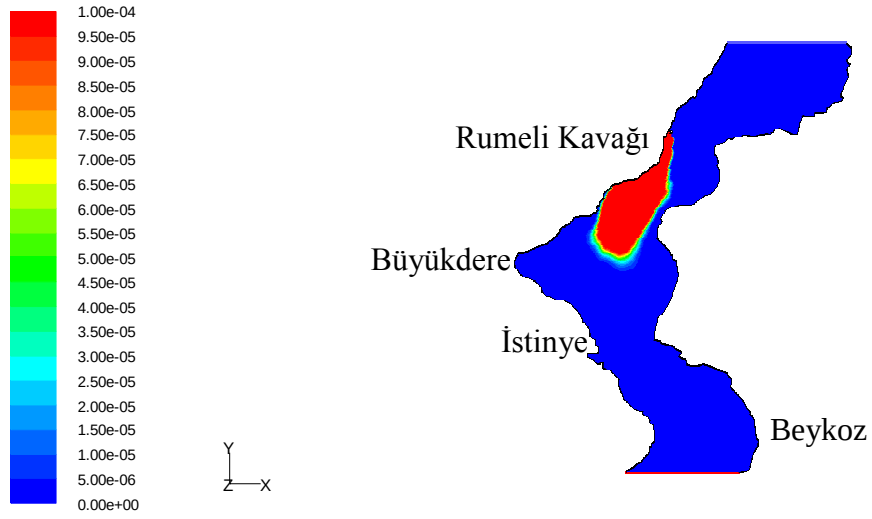
Şekil 5.2 1000 s' deki yakıt dağılımı



Contours of Volume fraction (oil) (Time=1.6000e+03)

May 27, 2010
FLUENT 6.3 (3d, pbns, mixture, ske, unsteady)

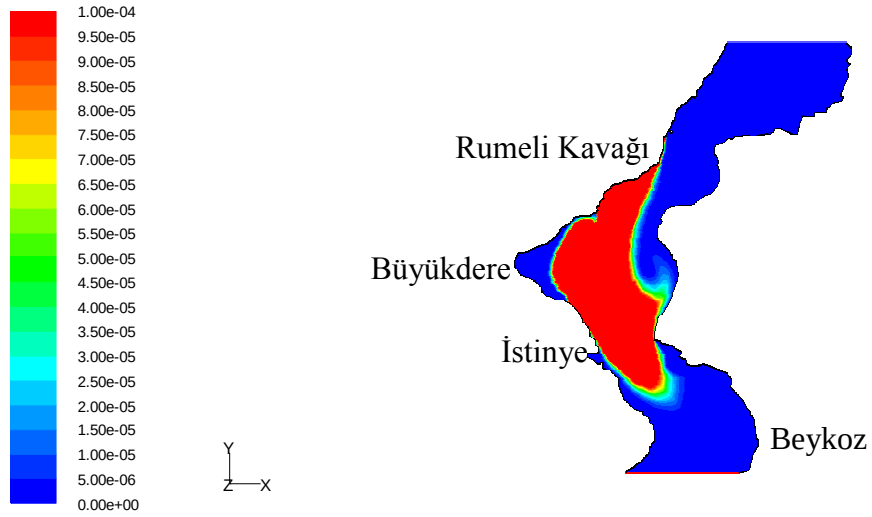
Şekil 5.3 1600 s' deki yakıt dağılımı



Contours of Volume fraction (oil) (Time=2.0000e+03)

May 27, 2010
FLUENT 6.3 (3d, pbns, mixture, ske, unsteady)

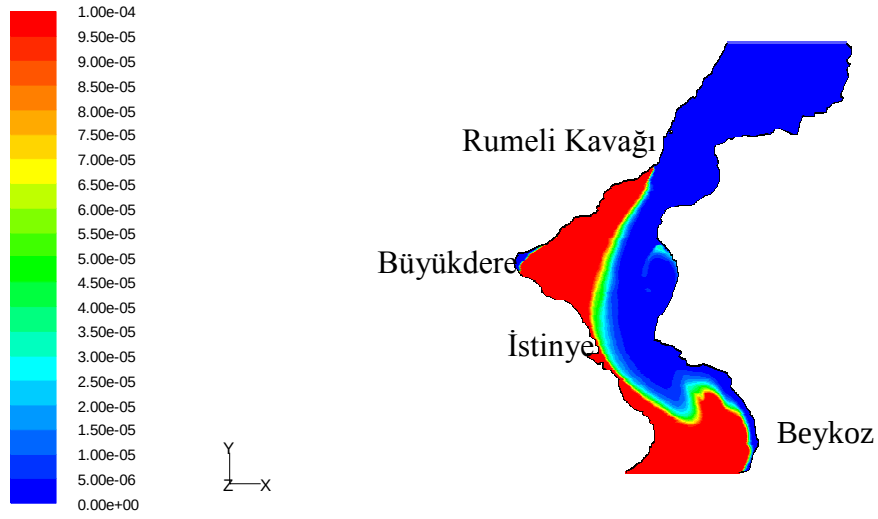
Şekil 5.4 2000 s' deki yakıt dağılımı



Contours of Volume fraction (oil) (Time=5.0000e+03)

May 27, 2010
FLUENT 6.3 (3d, pbns, mixture, ske, unsteady)

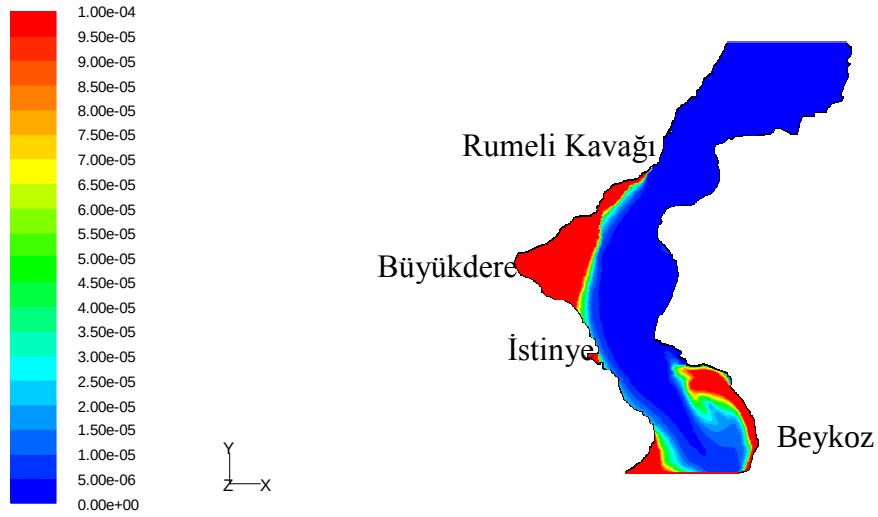
Şekil 5.5 5000 s' deki yakıt dağılımı



Contours of Volume fraction (oil) (Time=1.0000e+04)

May 27, 2010
FLUENT 6.3 (3d, pbns, mixture, ske, unsteady)

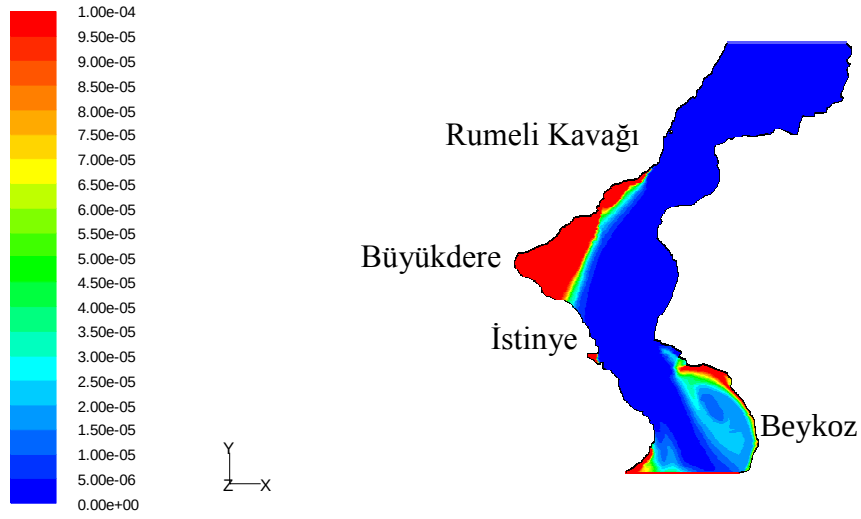
Şekil 5.6 10000 s' deki yakıt dağılımı



Contours of Volume fraction (oil) (Time=1.5000e+04)

May 27, 2010
FLUENT 6.3 (3d, pbns, mixture, ske, unsteady)

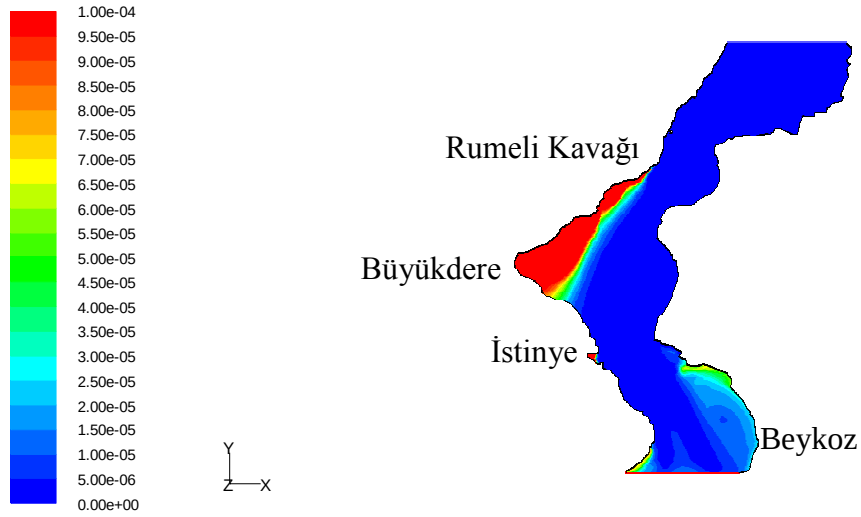
Şekil 5.7 15000 s' deki yakıt dağılımı



Contours of Volume fraction (oil) (Time=2.0000e+04)

May 27, 2010
FLUENT 6.3 (3d, pbns, mixture, ske, unsteady)

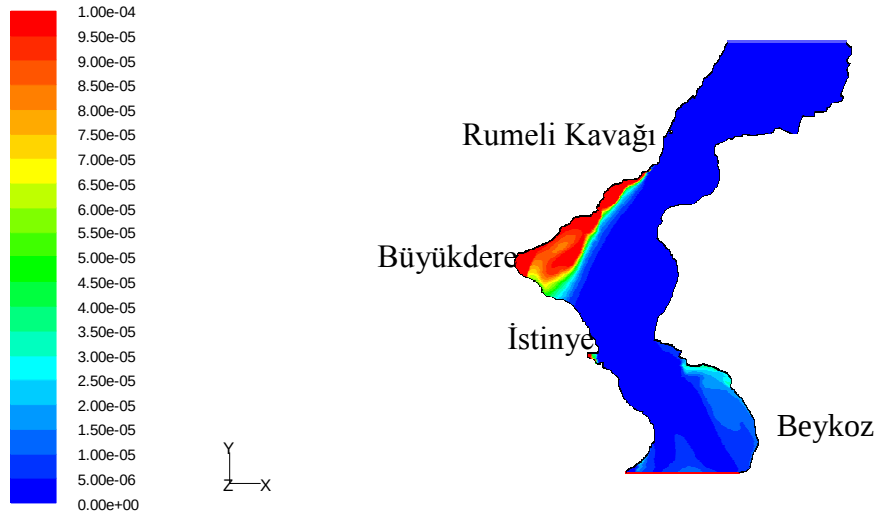
Şekil 5.8 20000 s' deki yakıt dağılımı



Contours of Volume fraction (oil) (Time=2.5000e+04)

May 27, 2010
FLUENT 6.3 (3d, pbns, mixture, ske, unsteady)

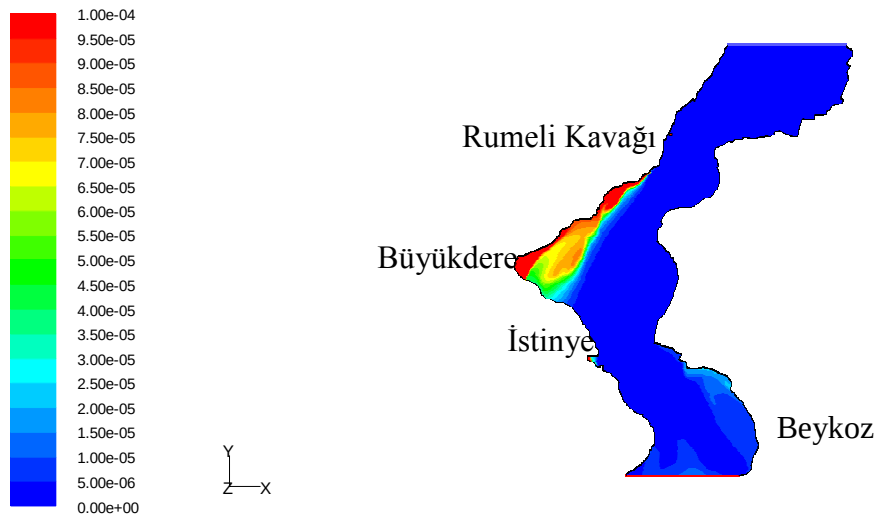
Şekil 5.9 25000 s' deki yakıt dağılımı



Contours of Volume fraction (oil) (Time=3.0000e+04)

May 27, 2010
FLUENT 6.3 (3d, pbns, mixture, ske, unsteady)

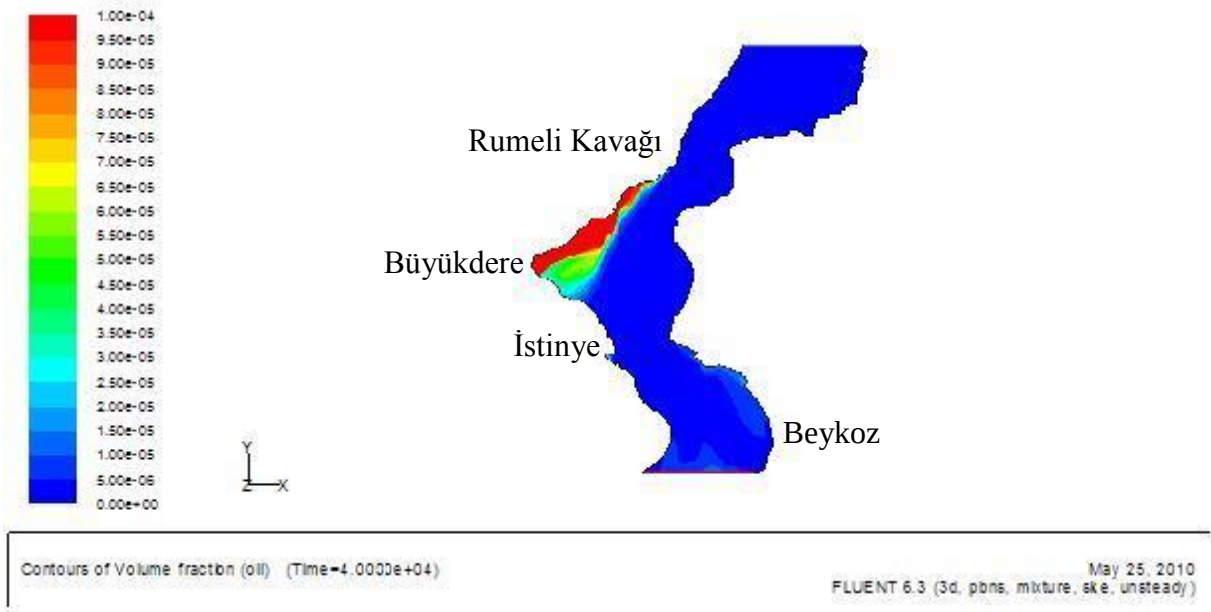
Şekil 5.10 30000 s' deki yakıt dağılımı



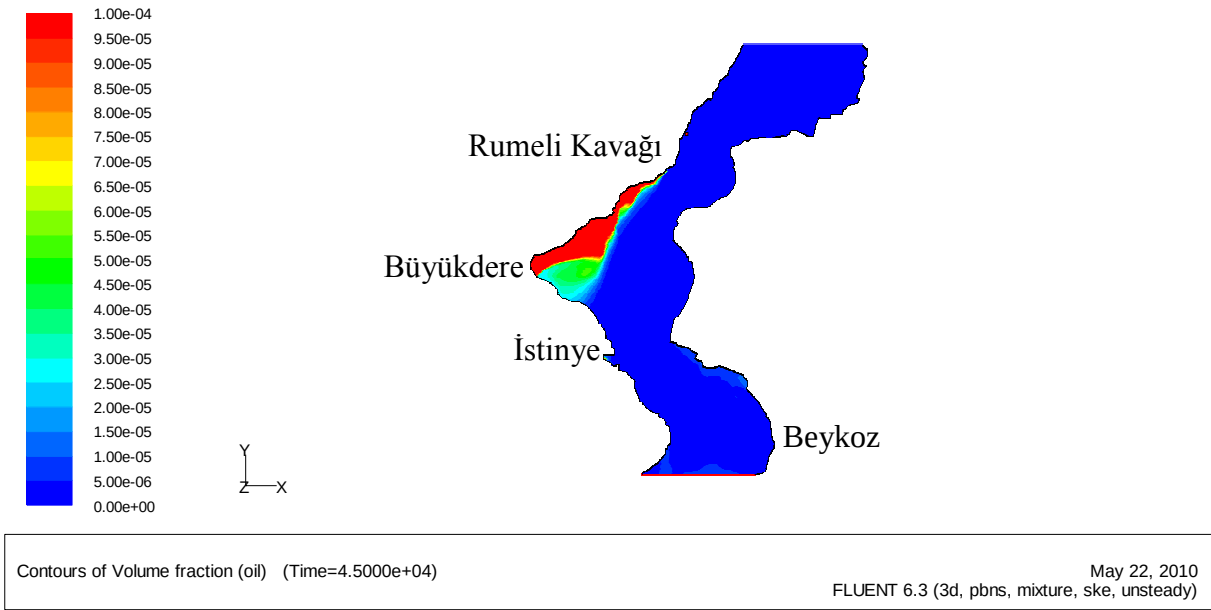
Contours of Volume fraction (oil) (Time=3.5000e+04)

May 25, 2010
FLUENT 6.3 (3d, pbns, mixture, ske, unsteady)

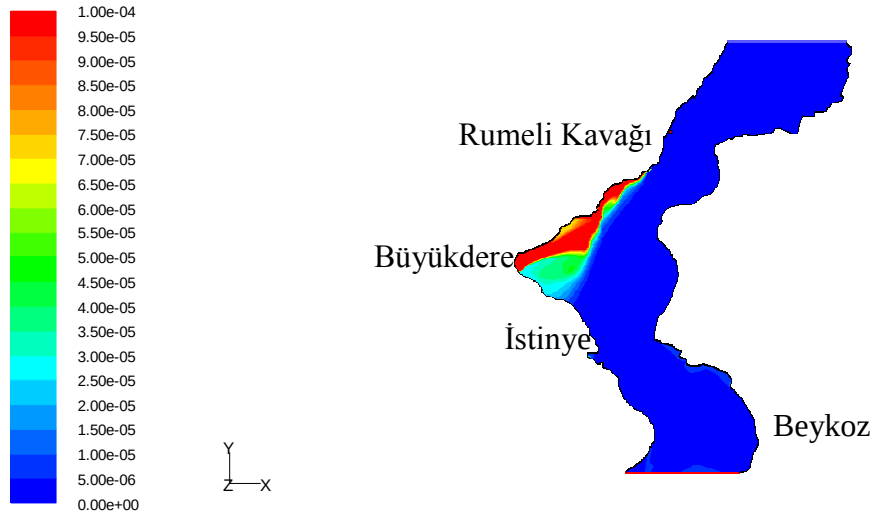
Şekil 5.11 35000 s' deki yakıt dağılımı



Şekil 5.12 40000 s' deki yakıt dağılımı



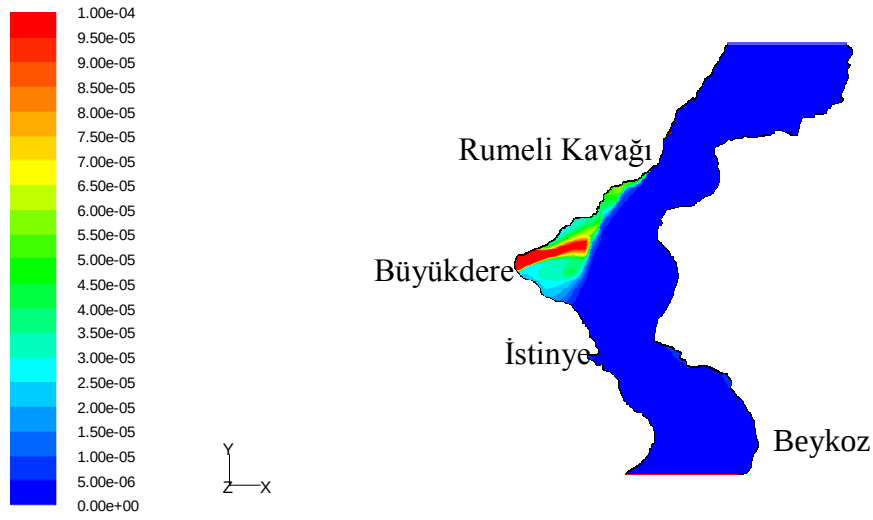
Şekil 5.13 45000 s' deki yakıt dağılımı



Contours of Volume fraction (oil) (Time=5.0000e+04)

May 22, 2010
FLUENT 6.3 (3d, pbns, mixture, ske, unsteady)

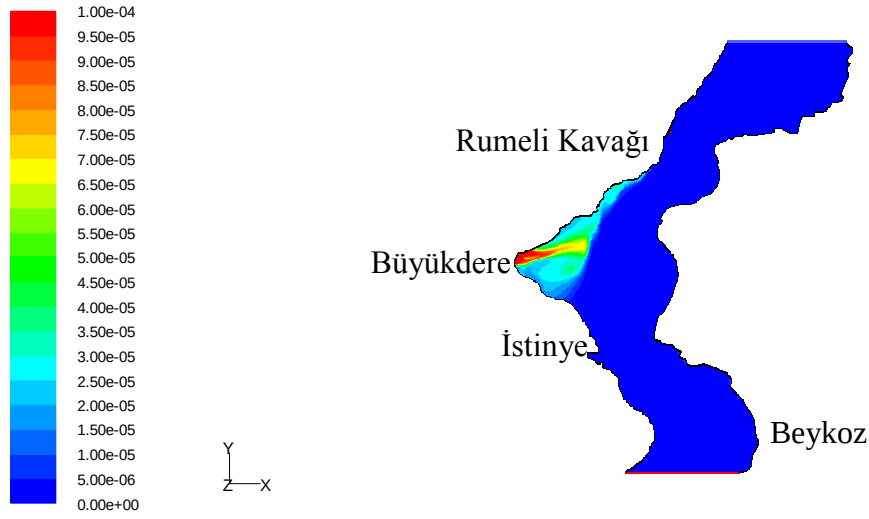
Şekil 5.14 50000 s' deki yakıt dağılımı



Contours of Volume fraction (oil) (Time=5.5000e+04)

May 25, 2010
FLUENT 6.3 (3d, pbns, mixture, ske, unsteady)

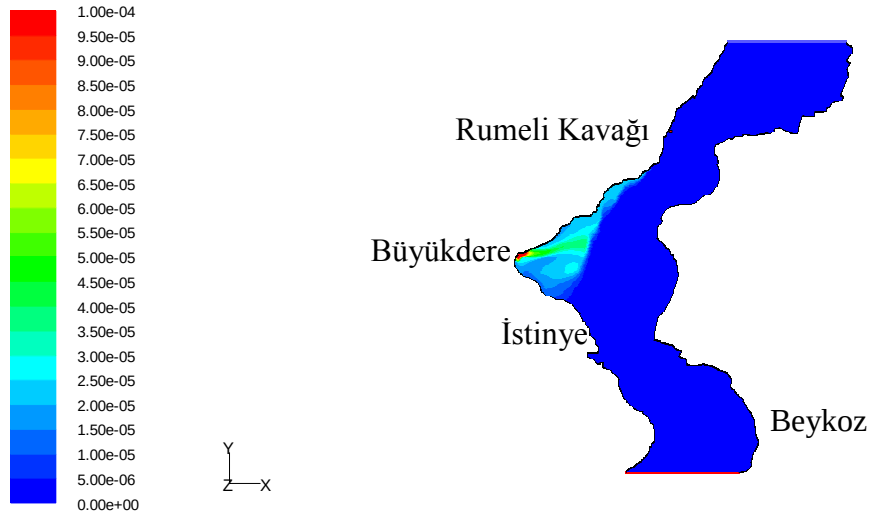
Şekil 5.15 55000 s' deki yakıt dağılımı



Contours of Volume fraction (oil) (Time=6.0000e+04)

May 25, 2010
FLUENT 6.3 (3d, pbns, mixture, ske, unsteady)

Şekil 5.16 60000 s' deki yakıt dağılımı



Contours of Volume fraction (oil) (Time=7.0000e+04)

May 25, 2010
FLUENT 6.3 (3d, pbns, mixture, ske, unsteady)

Şekil 5.17 70000 s' deki yakıt dağılımı

5.2 Sayısal Değerlendirme

Şekillerden görüldüğü üzere 70000 saniye sonunda çok küçük mertebede yakıt model sınırları içerisinde kalmıştır. Özellikle Büyükdere civarında akıntı hızı sıfıra yaklaştığından ve o bölgedeki girdapların da etkisiyle yakıt o bölgeyi terk edememiştir. Bütün analizler boyunca Büyükdere bölgesinde yakıt görülmüştür.

Yakıt sızıntısı durdurulduktan sonra yakıtın 5000 saniye sonunda boğazı x- yönünde kapladığı görülmüştür. Yüzey akıntısı ve rüzgarın etkisiyle yüzeydeki yakıtın güneye doğru süpürüldüğü görülmüştür. Ancak boğaz geometrisinin de etkisiyle Büyükdere ve İstinye bölgelerinde yakıt adeta sıkışmıştır ve bu bölgelerin de yakıttan arınması uzun sürmüştür.

Yakıt güneye doğru ilerlerken Beykoz kısmında tekrar birikmeye başlamış ve 10000 saniye sonunda bölgeyi terk etmeye başlamıştır. Büyükdere kısmında yakıt miktarı azalırken güneye doğru bir hareket gözlemlenmediğinden bu bölgede yakıtın dibe çökmeye başladığı düşünülmektedir.

Can (2007)'nin yaptığı çalışmada boğazdaki yakıt sızıntısı simülasyonu sonucunda bulunan hız vektörleri ile lokal girdaplara bu çalışma çerçevesinde yapılan analizlerde de rastlanmıştır. Ayrıca yakıtın analiz boyunca davranışı da diğer çalışmayla paralellik göstermektedir.

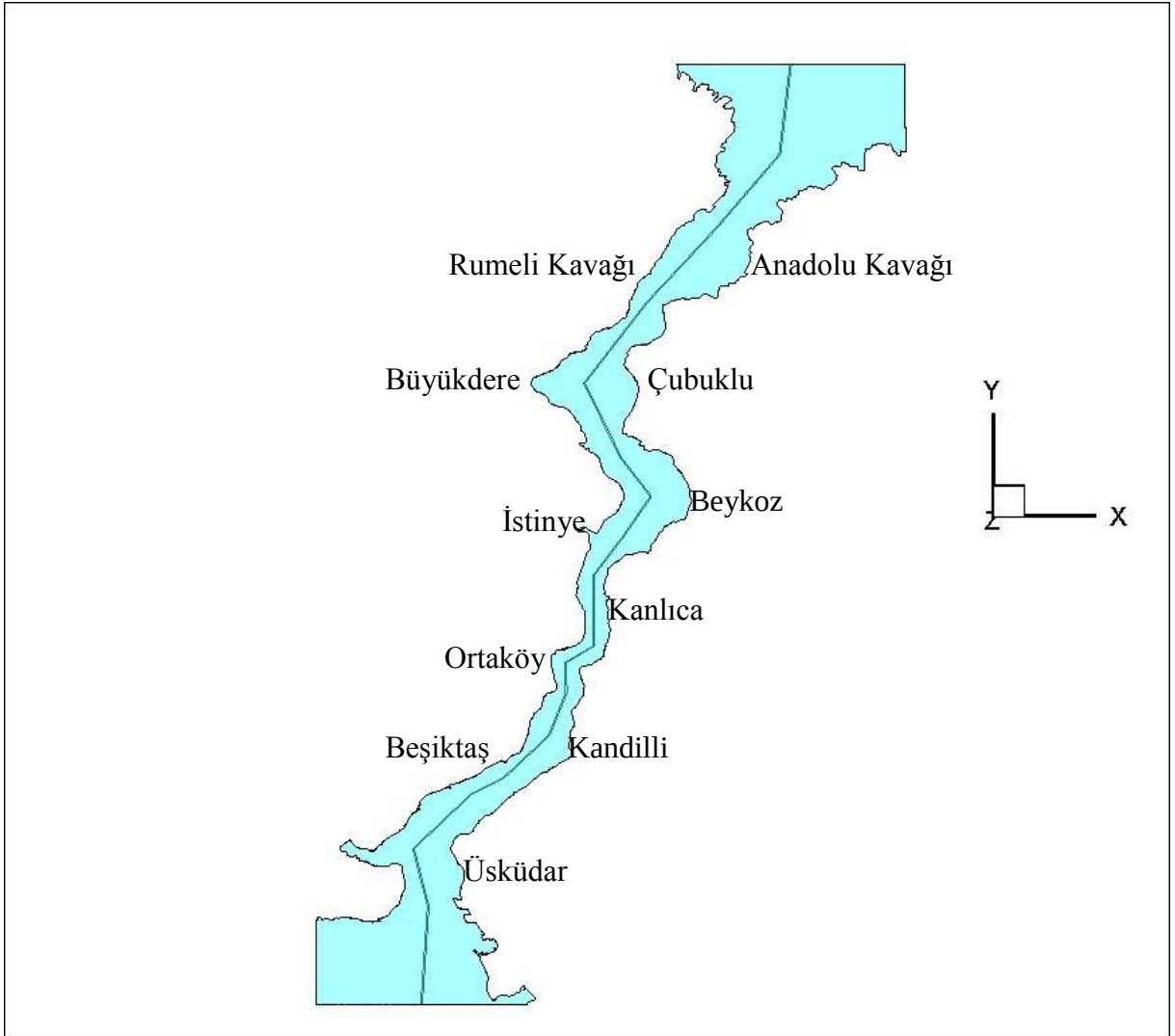
6. GEMİ EMİSYONU ANALİZİ

6.1 Sınır Koşulları

Gemi emisyonu analizleri için boğazın tamamı üç boyutlu olarak modellenmiştir. Diğer analizlerde kullanılan modelden farklı olarak bu model için yaklaşık 410000 elemandan oluşan bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Karadeniz'den Marmara'ya doğru 1 m/s hızında rüzgar estiği durum için deniz yüzeyinden gemi kaynaklı emisyonu neden olan SO₂ gazı verilmiştir. Modelin tabanı deniz yüzeyi olarak kabul edilip duvar olarak tanımlanmıştır. Yan yüzeylerin devam ettiği düşünülerek bu yüzeyler simetri olarak tanımlanmıştır. Modelin tabanı ile tavan arasındaki yükseklik 100 metredir. Bu yükseklik deniz yüzeyi üzerindeki havanın tavan yüksekliğini temsil etmektedir. Modelin Karadeniz girişi hava girişi, Marmara çıkışı ise hava çıkışı olarak tanımlanmıştır. Boğaz üzerinde gemilerin izlediği rota dikkate alınarak deniz yüzeyinde oluşturulmuş olan 50 metre genişliğinde boğaz boyunca uzanan şerit şeklindeki yüzey SO₂ gazı girişi olarak düşünülmüştür (Otay, Özkan, 2005). Modelin üst yüzeyi ise çıkış olarak kabul edilmiştir. Aşağıdaki şekillerde bu yüzeydeki hava ve baca gazı dağılımları görülmektedir. Analizler için Çizelge 2.2'de verilen istatistiki bilgiler kullanılmıştır. Bu bilgiler ışığında 2006-2009 yılları için ortalama SO₂ salınımı 692 kg/saat olarak hesaplanmıştır. SO₂ gazının giriş hızı 0.001 m/s olarak girilmiştir. Analizler 12 saat için gerçekleştirilmiştir. Zaman adımı 50 saniye alınmıştır. SO₂ gazı sıcaklığı 788 K alınmıştır ((Deniz, Durmuşoğlu, 2008). Ortam sıcaklığı ise 288 K alınmıştır. Sınır koşulları Çizelge 6.1'de verilmiştir. Şekil 6.1'de boğazın 3 boyutlu modeli yer almaktadır. Şekil 6.2'de modele uygulanan ağ yapısı görülmektedir. SO₂ gazının girişi olarak tanımlanmış yüzeye yakın yerlerde daha sık ağ kullanılmıştır.

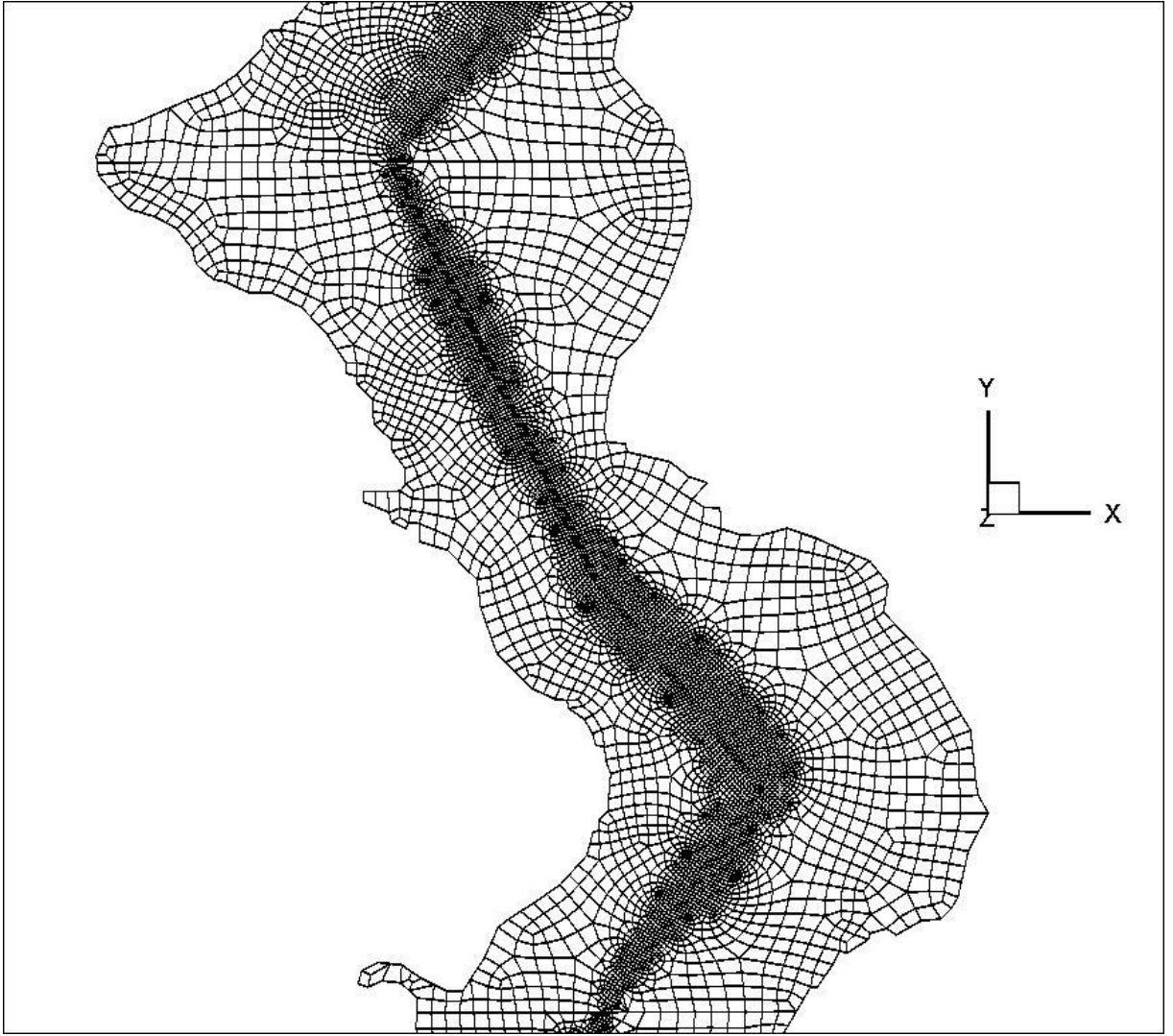
Çizelge 6.1 Gemi emisyonu analizi için sınır koşulları

Karadeniz girişi	Velocity Inlet
Marmara çıkışı	Pressure Outlet
Yan yüzeyler	Symmetry
Tavan	Pressure Outlet
SO ₂ girişi	Velocity Inlet
Deniz yüzeyi	Slip Wall



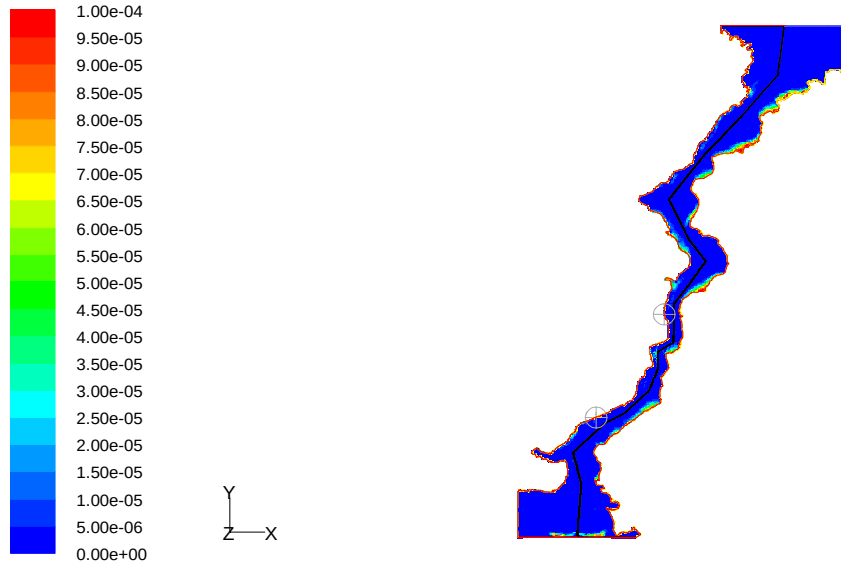
Şekil 6.1 İstanbul Boğazı 3 Boyutlu Model

Yukarıda belirtilen sınır koşulları ile analizler zamana bağlı olarak yapıldıktan sonra aynı model için zamandan bağımsız bir analiz daha yapılmıştır. Bu analiz için uygulanan sınır koşulları olarak modelin üst yüzeyi simetri, sol yan yüzey ile Karadeniz girişi “Velocity Inlet”, sağ yan yüzey ile Marmara girişi “Pressure Outlet” ve deniz yüzeyi duvar olarak tanımlanmıştır. İlk analizdeki gibi rüzgar hızı 1 m/s olarak alınmıştır.



Şekil 6.2 İstanbul Boğazı ağ yapısı (Beykoz bölgesi)

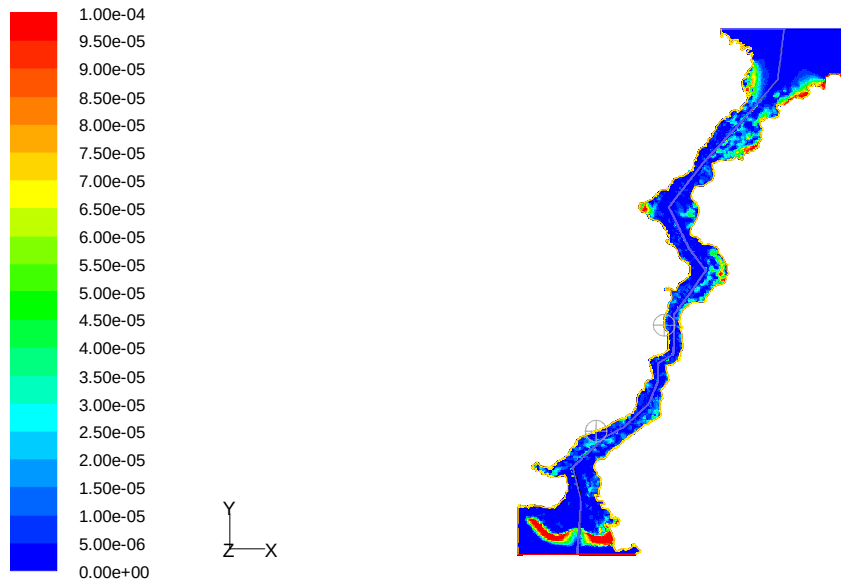
Şekil 6.3 ile Şekil 6.13 arasındaki şekillerde birer saat arayla SO_2 gazının çözüm alanının üst yüzeyindeki değişimi gösterilmiştir.



Contours of Volume fraction (exhaust) (Time=3.6000e+03)

May 26, 2010
FLUENT 6.3 (3d, pbns, mixture, ske, unsteady)

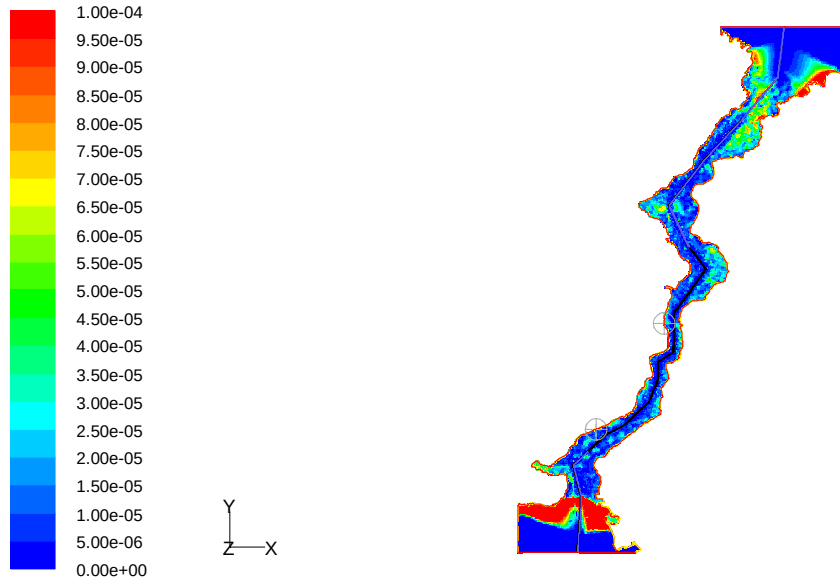
Şekil 6.3 3600 s' deki emisyon dağılımı



Contours of Volume fraction (exhaust) (Time=7.2000e+03)

May 26, 2010
FLUENT 6.3 (3d, pbns, mixture, ske, unsteady)

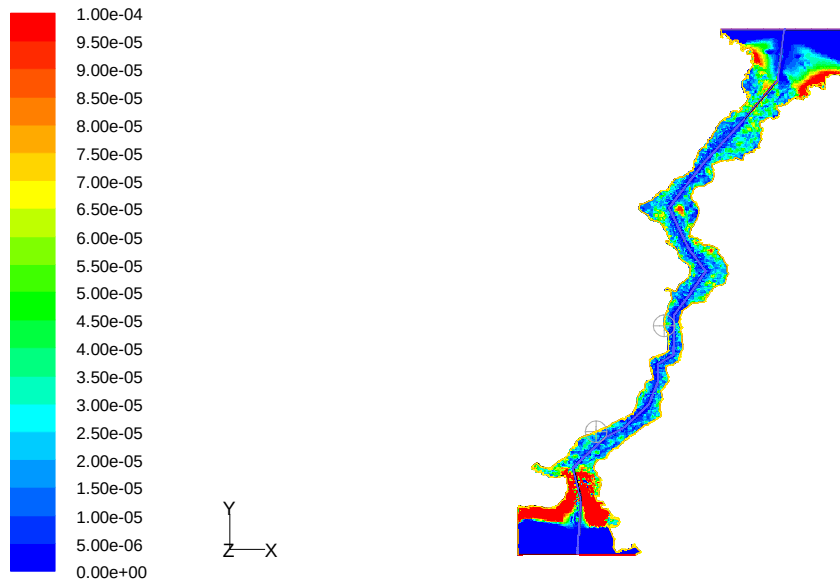
Şekil 6.4 7200 s' deki emisyon dağılımı



Contours of Volume fraction (exhaust) (Time=1.0800e+04)

May 26, 2010
FLUENT 6.3 (3d, pbns, mixture, ske, unsteady)

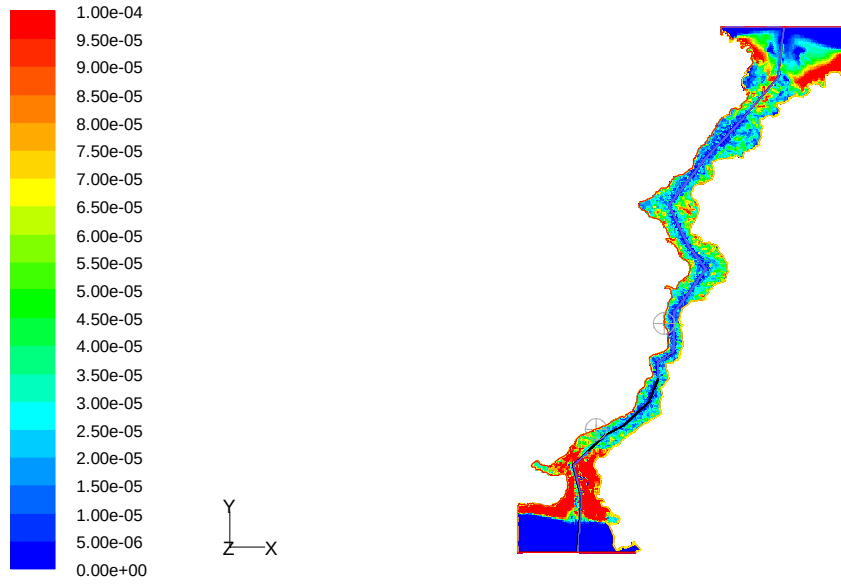
Şekil 6.5 10800 s' deki emisyon dağılımı



Contours of Volume fraction (exhaust) (Time=1.4400e+04)

May 26, 2010
FLUENT 6.3 (3d, pbns, mixture, ske, unsteady)

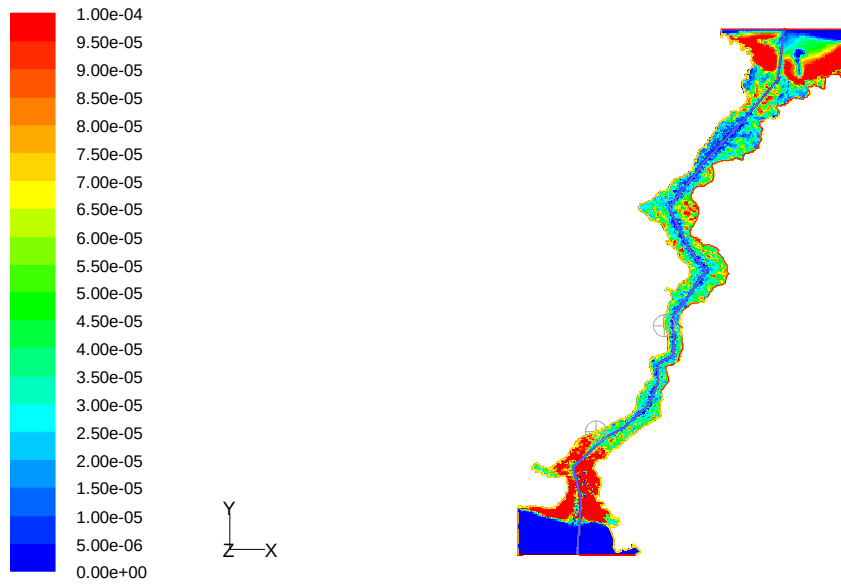
Şekil 6.6 14400 s' deki emisyon dağılımı



Contours of Volume fraction (exhaust) (Time=1.8000e+04)

May 26, 2010
FLUENT 6.3 (3d, pbns, mixture, ske, unsteady)

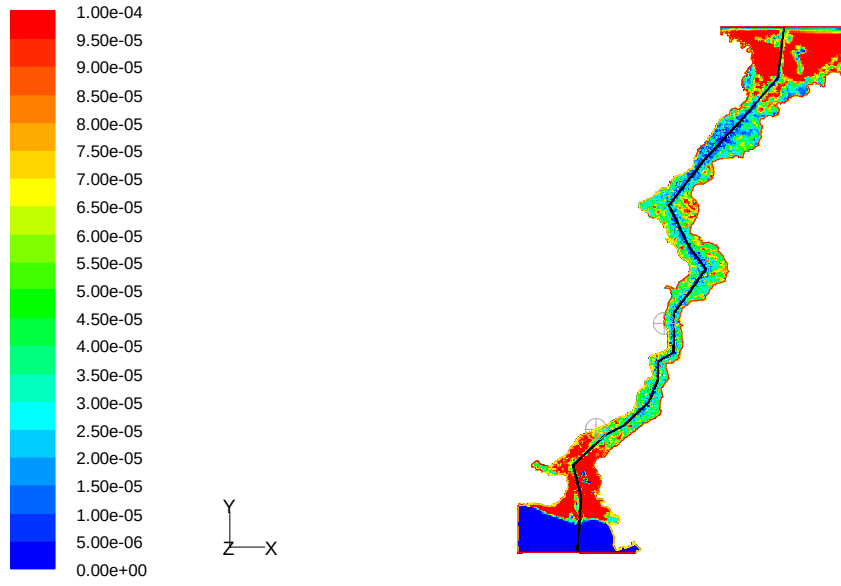
Şekil 6.7 18000 s' deki emisyon dağılımı



Contours of Volume fraction (exhaust) (Time=2.1600e+04)

May 26, 2010
FLUENT 6.3 (3d, pbns, mixture, ske, unsteady)

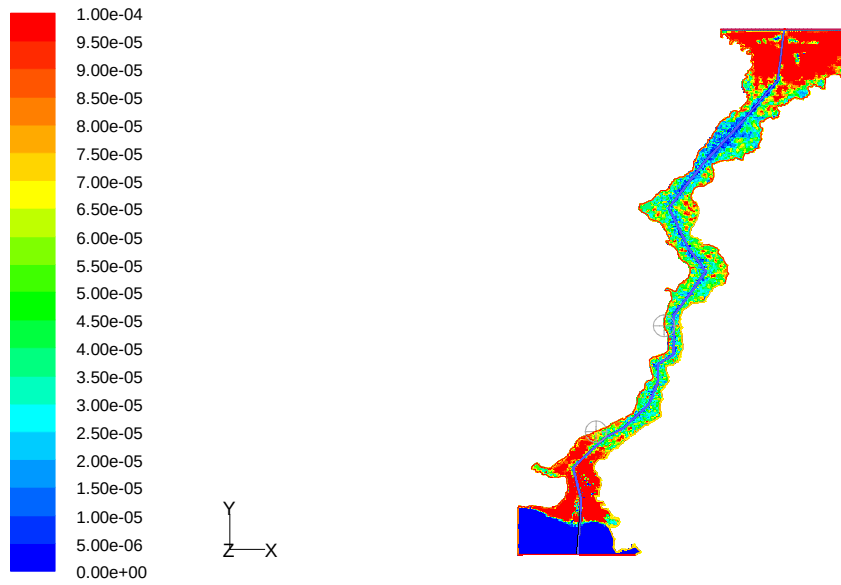
Şekil 6.8 21600 s' deki emisyon dağılımı



Contours of Volume fraction (exhaust) (Time=2.5200e+04)

May 26, 2010
FLUENT 6.3 (3d, pbns, mixture, ske, unsteady)

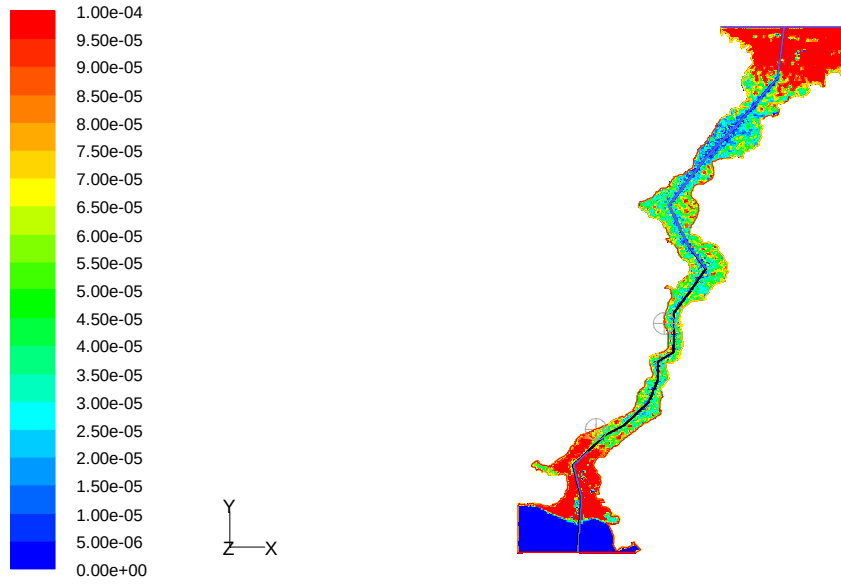
Şekil 6.9 25200 s' deki emisyon dağılımı



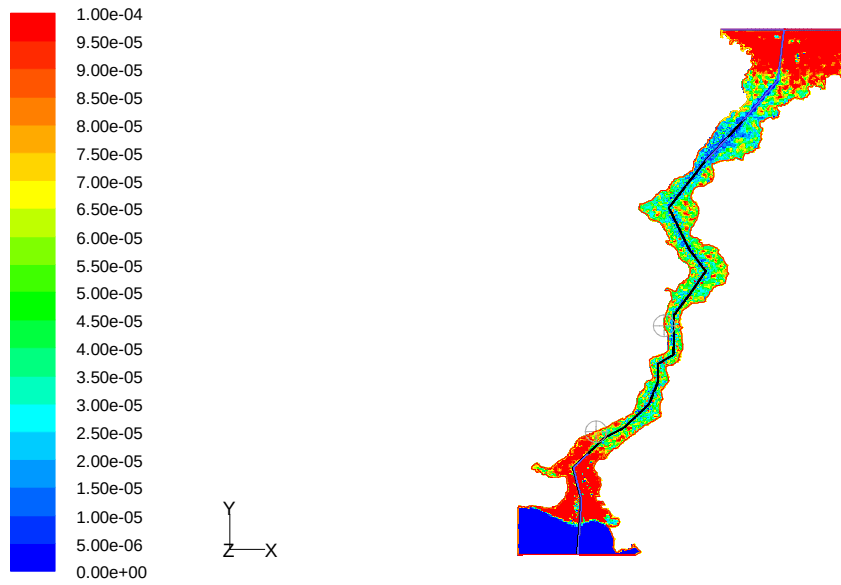
Contours of Volume fraction (exhaust) (Time=2.8800e+04)

May 26, 2010
FLUENT 6.3 (3d, pbns, mixture, ske, unsteady)

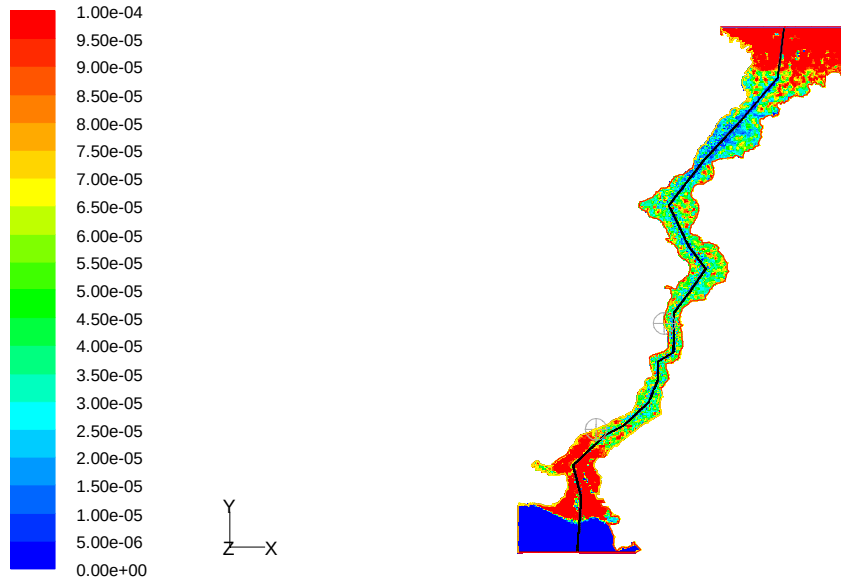
Şekil 6.10 28800 s' deki emisyon dağılımı



Şekil 6.11 32400 s' deki emisyon dağılımı



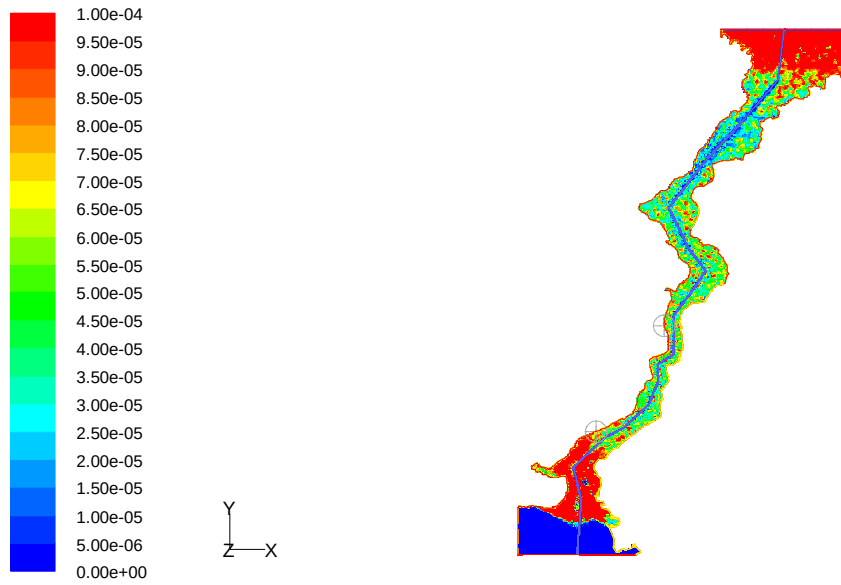
Şekil 6.12 36000 s' deki emisyon dağılımı



Contours of Volume fraction (exhaust) (Time=3.9600e+04)

May 26, 2010
FLUENT 6.3 (3d, pbns, mixture, ske, unsteady)

Şekil 6.13 39600 s' deki emisyon dağılımı



Contours of Volume fraction (exhaust) (Time=4.3200e+04)

May 26, 2010
FLUENT 6.3 (3d, pbns, mixture, ske, unsteady)

Şekil 6.14 43200 s' deki emisyon dağılımı

6.2 Zamandan Bağımsız Analizler

Zamandan bağımsız analizler için üç farklı senaryo oluşturulmuştur. İlk iki senaryoda rüzgar hızı 1 m/s olarak alınmıştır. 1. senaryo için rüzgarın kuzeyden estiği kabul edilmiştir. Çizelge 6.2'de bu senaryonun sınır şartları verilmiştir.

Çizelge 6.2 1. Senaryo için sınır koşulları

Senaryo 1	
Karadeniz girişi	Velocity Inlet
Marmara çıkışı	Pressure Outlet
Sol yan yüzey	Velocity Inlet
Sağ yan yüzey	Pressure Outlet
Tavan	Pressure Outlet
SO ₂ girişi	Velocity Inlet
Deniz yüzeyi	No Slip Wall

2. senaryo için rüzgarın güneyden estiği kabul edilmiştir. Çizelge 6.3'te bu senaryonun sınır şartları verilmiştir.

Çizelge 6.3 2. Senaryo için sınır koşulları

Senaryo 2	
Karadeniz girişi	Pressure Outlet
Marmara çıkışı	Velocity Inlet
Sol yan yüzey	Pressure Outlet
Sağ yan yüzey	Velocity Inlet
Tavan	Pressure Outlet
SO ₂ girişi	Velocity Inlet
Deniz yüzeyi	No Slip Wall

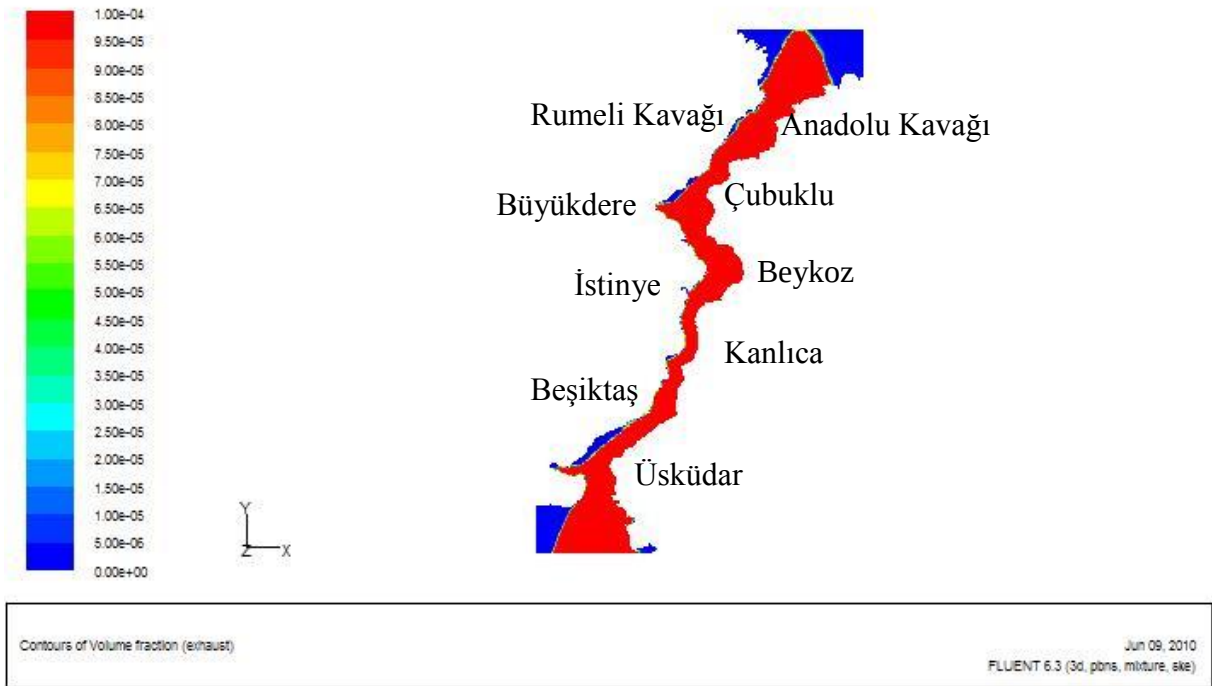
3. senaryo rüzgarsız esmediği durumu temsil etmektedir. Çizelge 6.4'te bu senaryonun sınır şartları verilmiştir.

Çizelge 6.4 3. Senaryo için sınır koşulları

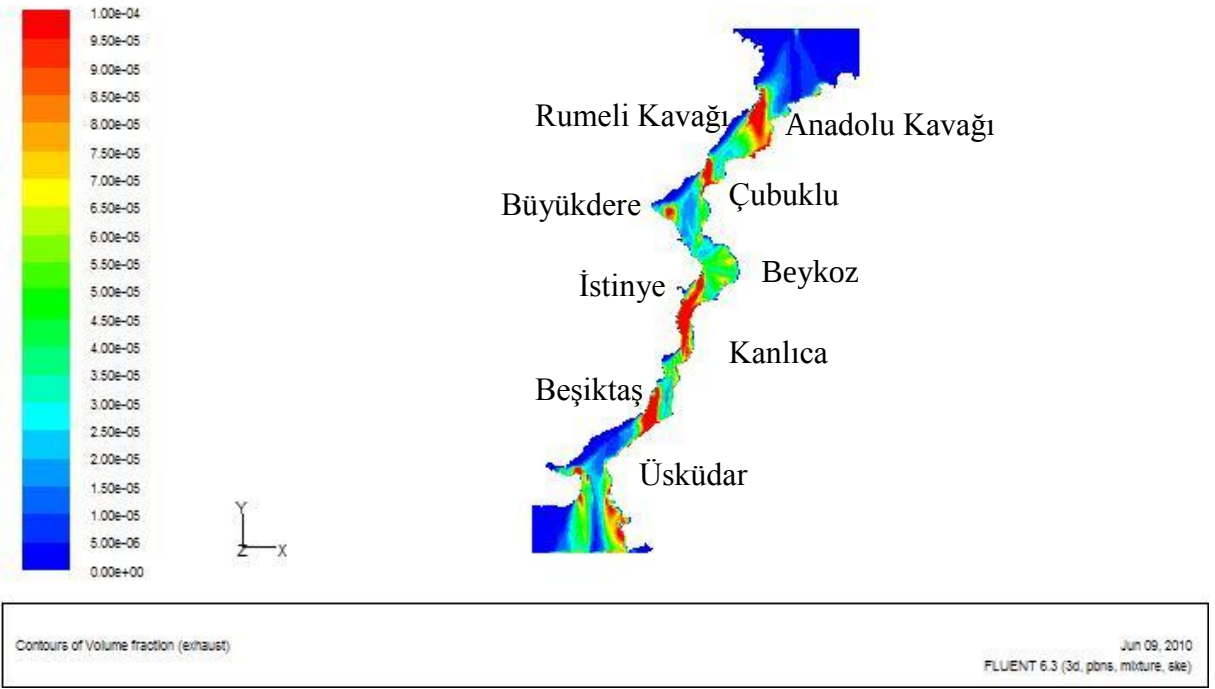
Senaryo 3	
Karadeniz girişi	Pressure Outlet
Marmara çıkışı	Pressure Outlet
Sol yan yüzey	No Slip Wall
Sağ yan yüzey	No Slip Wall
Tavan	Pressure Outlet
SO ₂ girişi	Velocity Inlet
Deniz yüzeyi	No Slip Wall

6.2.1 1. Senaryo Analizleri

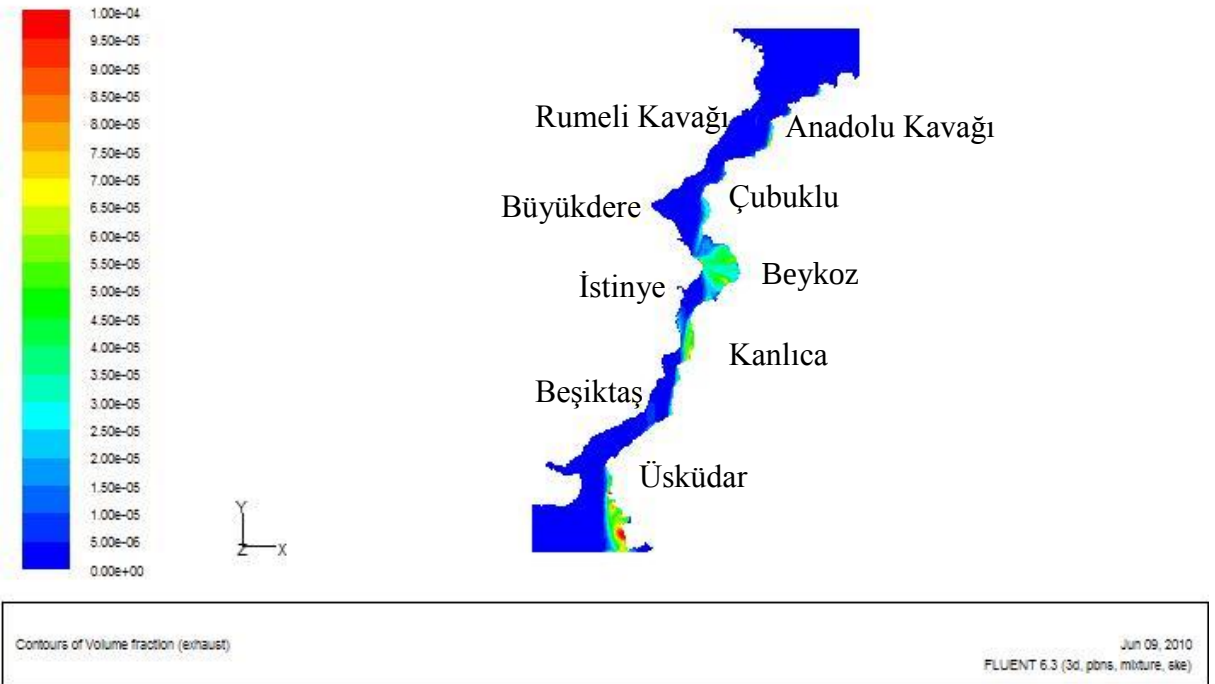
Şekil 6.15, 6.16 ve 6.17 çeşitli yüksekliklerdeki emisyon dağılımlarını göstermektedir. Şekil 6.18 ve 6.19 ise Avrupa ve Anadolu yakası kıyılarındaki çeşitli noktalardan ölçülen emisyon miktarlarını göstermektedir.



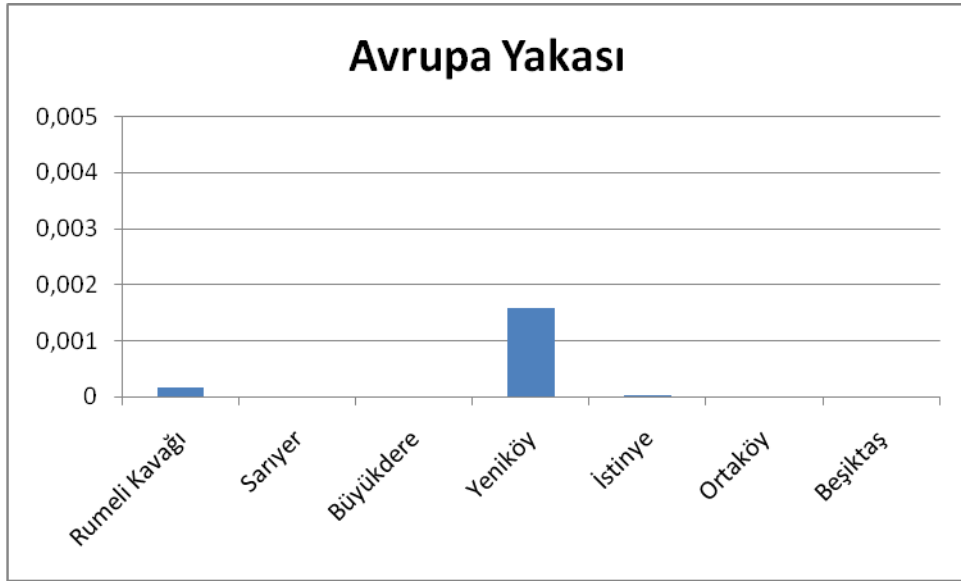
Şekil 6.15 10 m' deki emisyon dağılımı



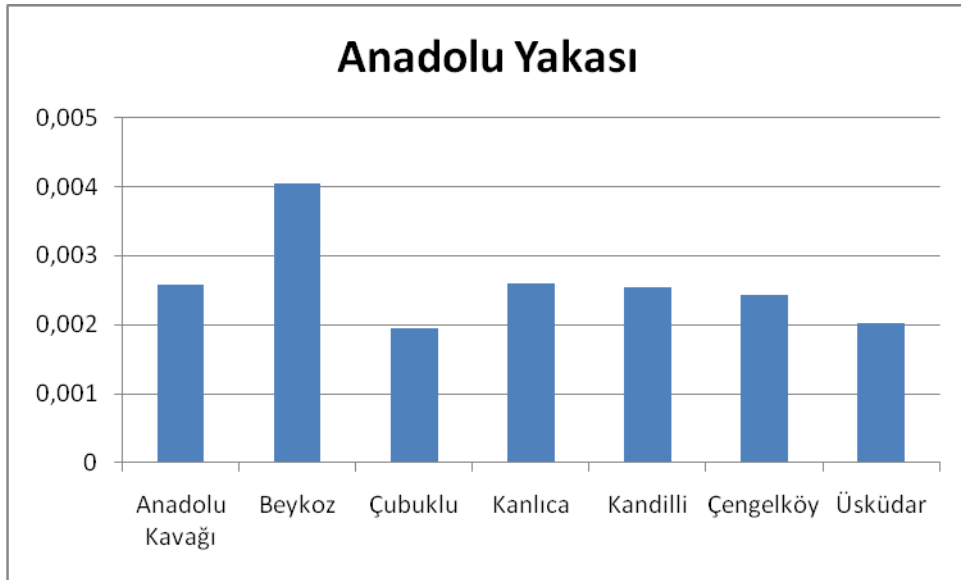
Şekil 6.16 50 m' deki emisyon dağılımı



Şekil 6.17 100 m' deki emisyon dağılımı



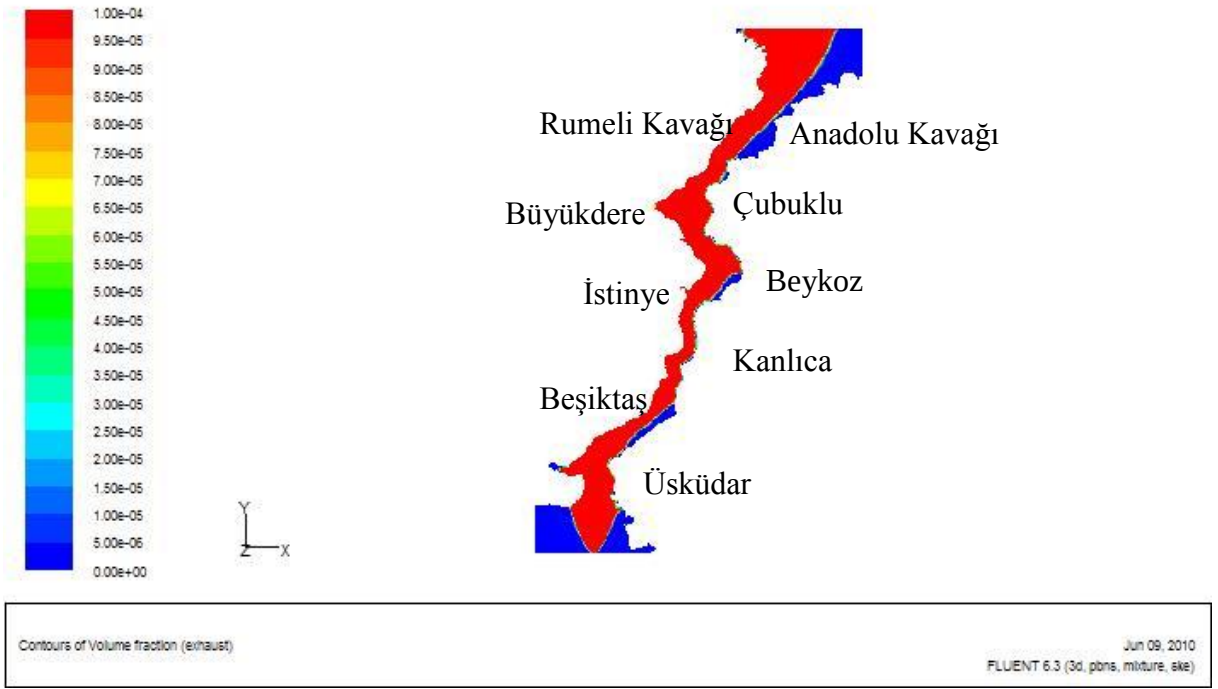
Şekil 6.18 10 m için Avrupa yakasındaki emisyon değerleri



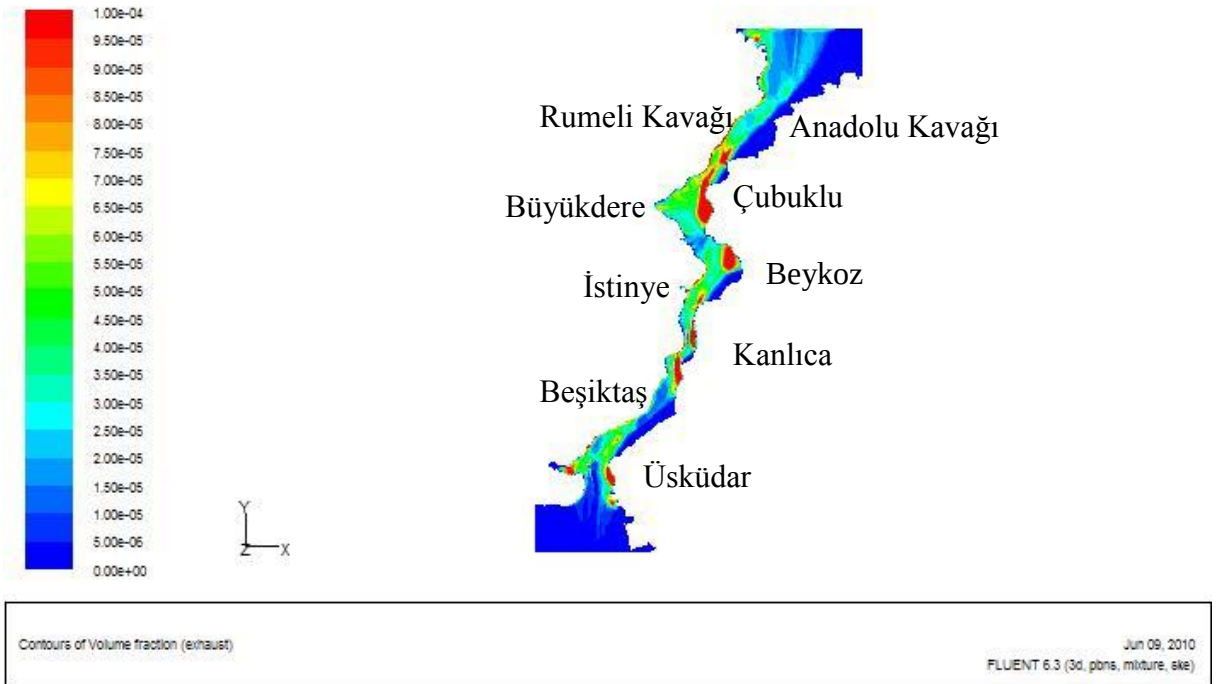
Şekil 6.19 10 m için Anadolu yakasındaki emisyon değerleri

6.2.2 2. Senaryo Analizleri

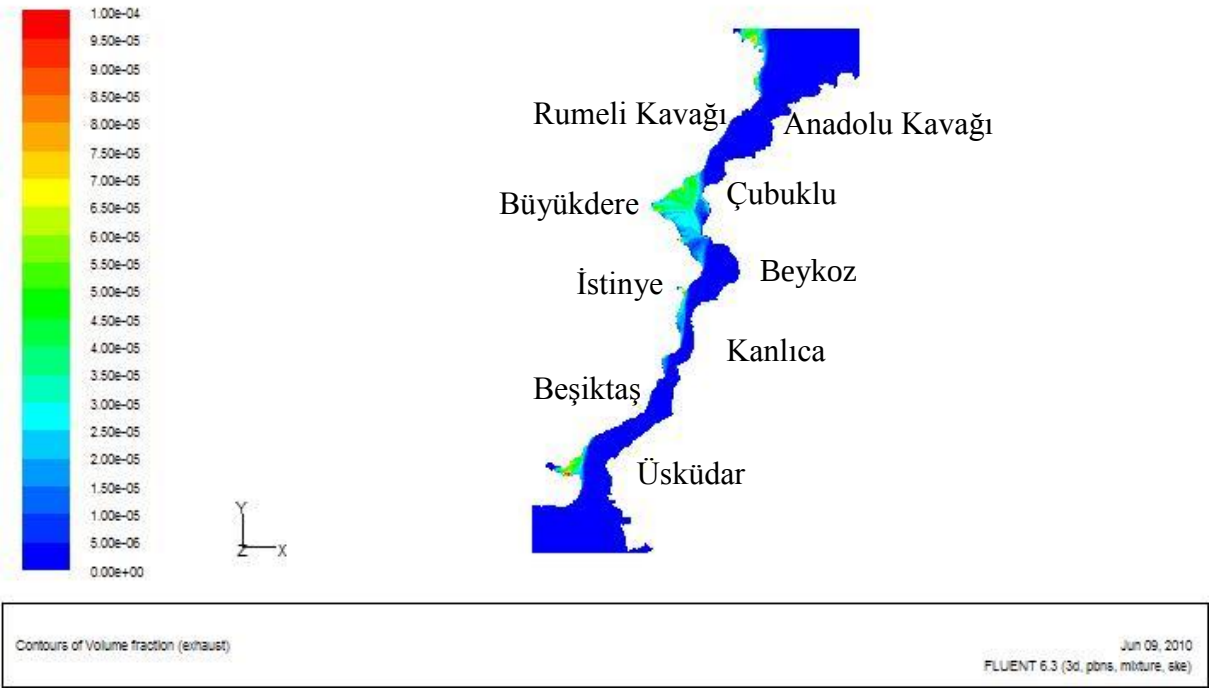
Şekil 6.20, 6.21 ve 6.22 çeşitli yüksekliklerdeki emisyon dağılımlarını göstermektedir. Şekil 6.23 ve 6.24 ise Avrupa ve Anadolu yakası kıyılarındaki çeşitli noktalardan ölçülen emisyon miktarlarını göstermektedir.



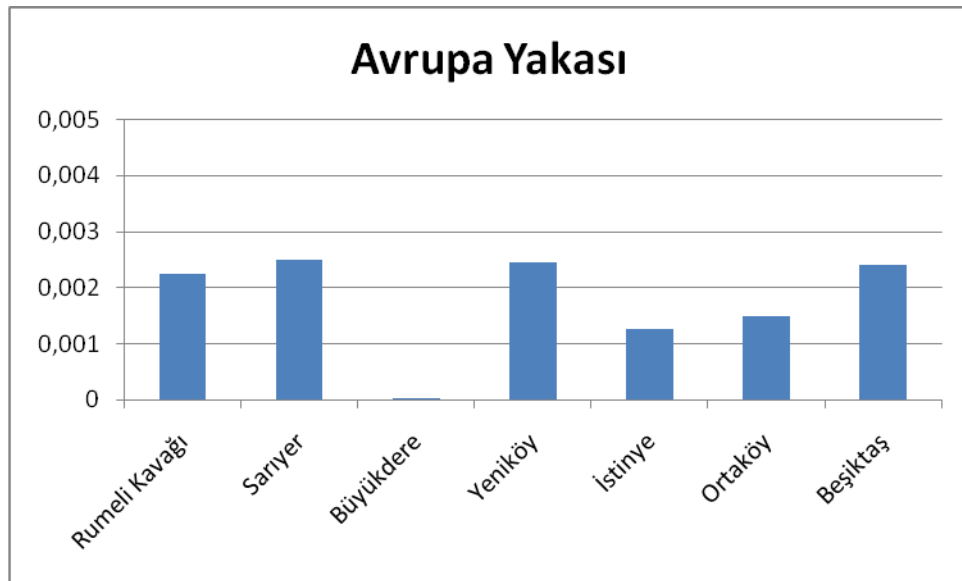
Şekil 6.20 10 m' deki emisyon dağılımı



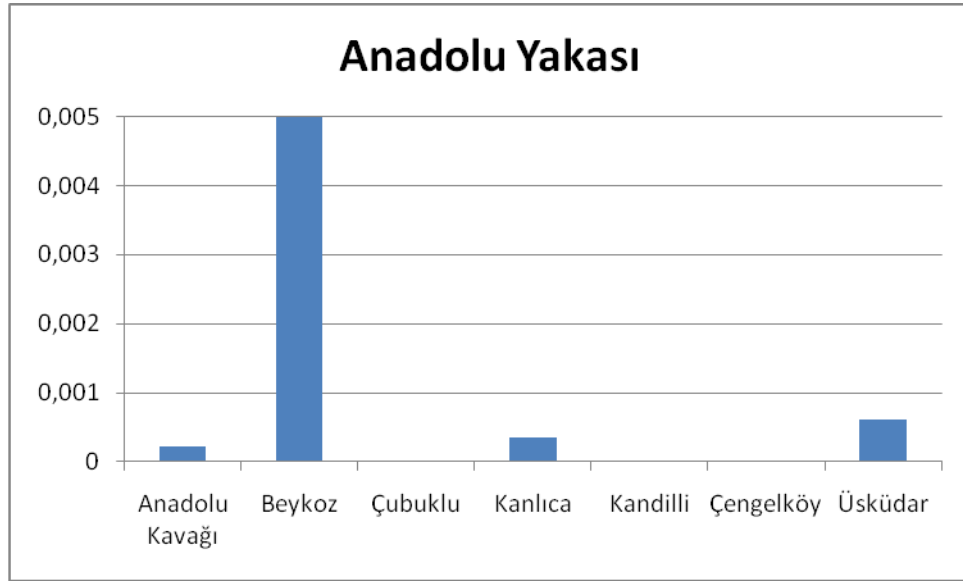
Şekil 6.21 50 m' deki emisyon dağılımı



Şekil 6.22 100 m' deki emisyon dağılımı



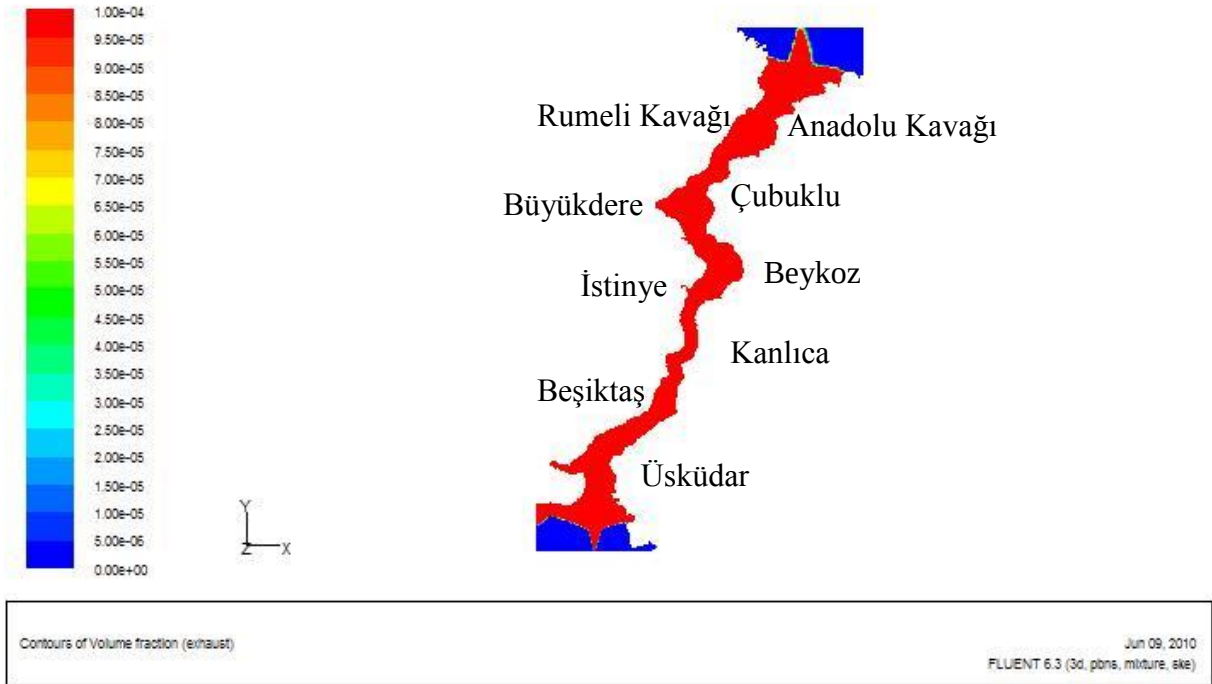
Şekil 6.23 10 m için Avrupa yakasındaki emisyon değerleri



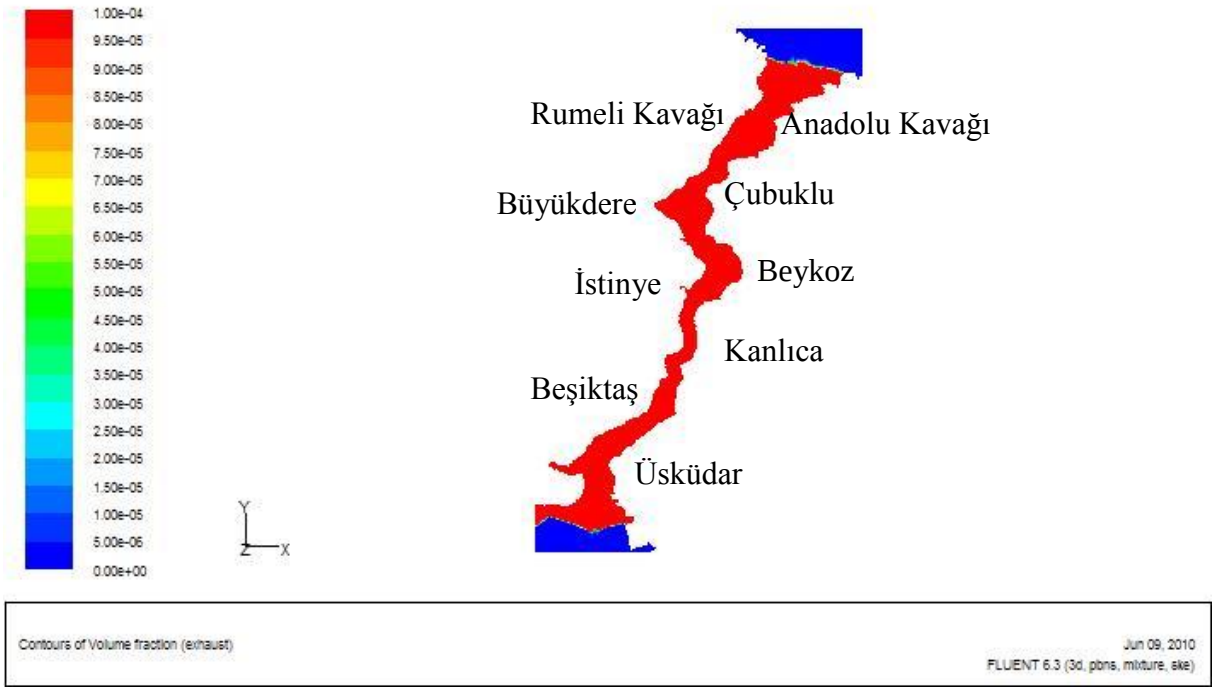
Şekil 6.24 10 m için Anadolu yakasındaki emisyon değerleri

6.2.3 3. Senaryo Analizleri

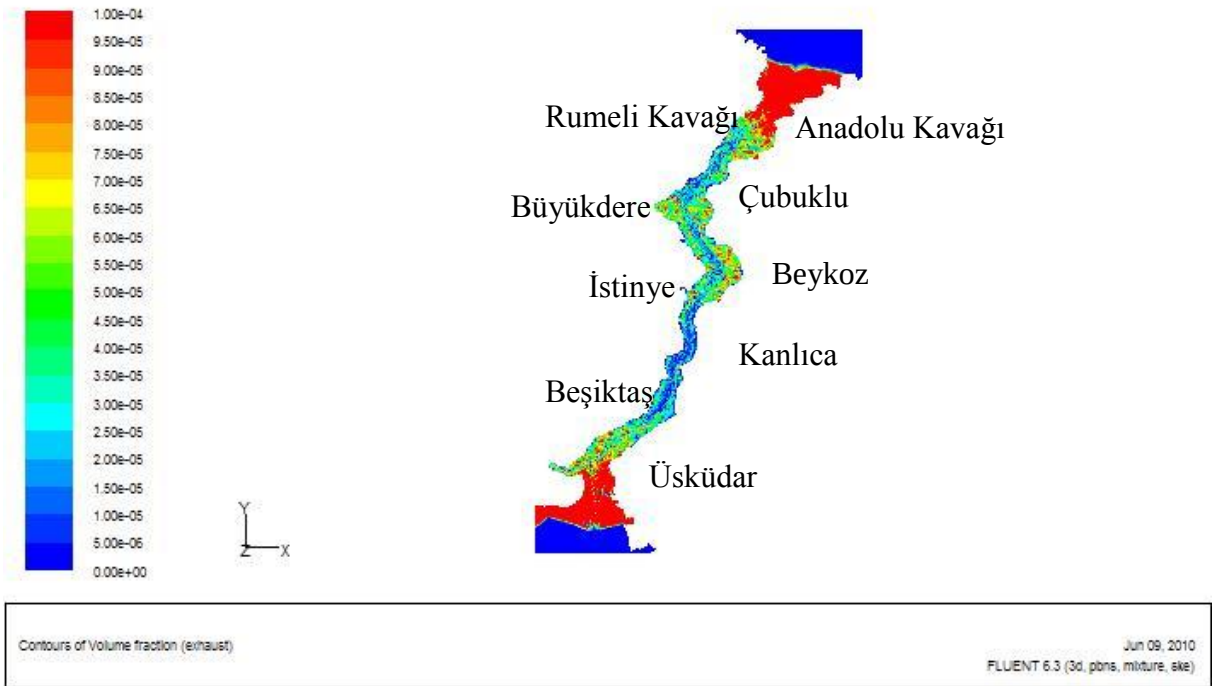
Şekil 6.25, 6.26 ve 6.27 çeşitli yüksekliklerdeki emisyon dağılımlarını göstermektedir. Şekil 6.28 ve 6.29 ise Avrupa ve Anadolu yakası kıyılarındaki çeşitli noktalardan ölçülen emisyon miktarlarını göstermektedir.



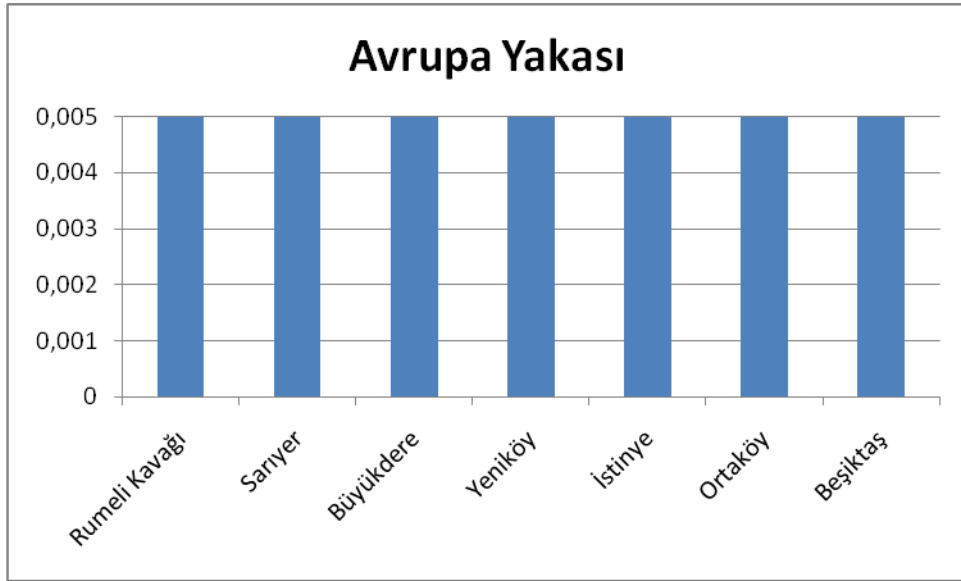
Şekil 6.25 10 m' deki emisyon dağılımı



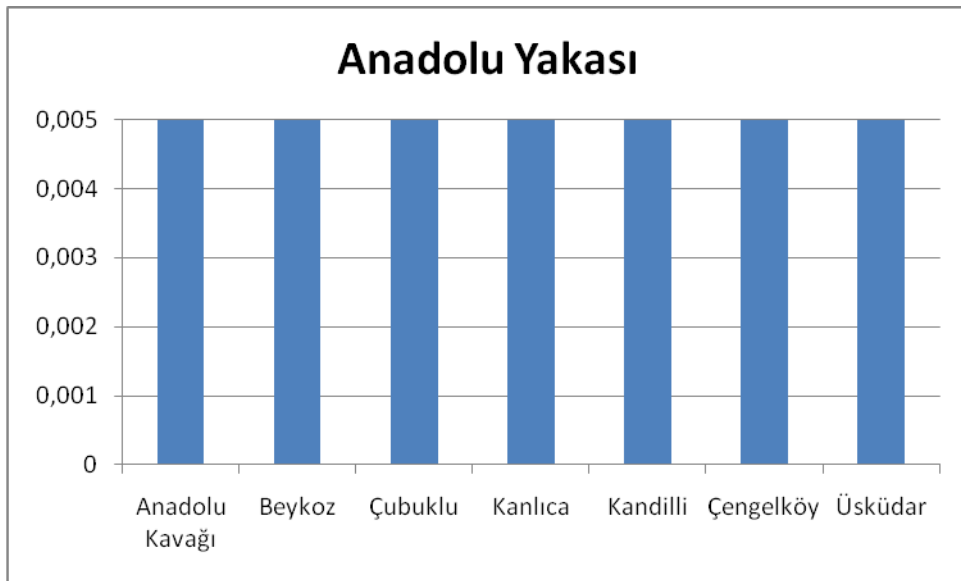
Şekil 6.26 50 m' deki emisyon dağılımı



Şekil 6.27 100 m' deki emisyon dağılımı



Şekil 6.28 10 m için Avrupa yakasındaki emisyon değerleri



Şekil 6.29 10 m için Anadolu yakasındaki emisyon değerleri

6.3 Sayısal Değerlendirme

Analizlerden görüldüğü üzere 7 saatlik süreye kadar en üste ulaşabilen SO₂ gazının dağılımı bu andan itibaren çok fazla değişiklik göstermemiştir. 12 saat sonunda dahi boğazın güney tarafında SO₂ gazı 100 metre yüksekliğe ulaşamamıştır. Analize devam edildiği takdirde güney kısımda da SO₂ gazına rastlamak mümkün olacaktır.

Analizler boyunca Ortaköy ve Rumeli Hisarı civarındaki iki noktadaki SO₂ gazı miktarı gözlemlenmiştir. Analiz boyunca her iki noktada da SO₂ gazı miktarı benzer eğilimle artış göstermiştir. Analizin sonlarına doğru SO₂ gazı miktarı sabitlenmeye başlanmıştır.

Ancak zamana bağlı olarak yapılan bu analizin zamandan bağımsız hale gelmesi için çok uzun zaman çözdürülmesi gerekmektedir. Dolayısıyla aynı model kullanılarak zamandan bağımsız olarak üç ayrı senaryo için analizler yapılmıştır.

Yapılan son analizlerde Ortaköy ve Rumeli Hisarı noktalarından farklı olarak çok sayıda nokta tayin edilmiş ve bu noktalardaki emisyon oranları gözlemlenmiştir. Bu analizlerde rüzgarın ve boğaz geometrisinin etkisi açıkça görülmüştür. Özellikle son senaryoda rüzgar olmadığı için emisyon dağılımının yoğun olduğu görülmüştür. Şekil 6.28 ve 6.29'daki emisyon miktarları 0.02 ile 0.03 arasında değişmekte olup bütün senaryolar içerisinde en yüksek orana bu senaryoda ulaşılmıştır.

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada İstanbul Boğazı'nın Rumeli Kavağı bölgesi modellenmiş ve gerçekçi olması açısından iki fazlı olarak analiz yapılmış, iki tabaka arasındaki etkileşim gözlemlenmiştir. Daha sonra yapılan analizler ile boğazın bir noktasında yaşanabilecek bir tanker kazası sonrasında sızacak yakıtın davranışı incelenmiştir. Ayrıca yılda binlerce geminin geçtiği ve havaya tonlarca sağlığa zararlı gaz bıraktığı bilinen boğazın tamamı için SO₂ gazı analizi yapılarak boğaz ve çevresindeki hava kirliliğine ışık tutulması amaçlanmıştır.

Bu amaçla ilk önce sadece tek fazlı durum için çok sayıda analiz yapılarak sonraki analizde kullanılacak en uygun eleman sayısı tespit edilmiştir. Yakıt sızıntısı analizleri için boğazın Rumeli Kavağı ile Beykoz arasında kalan kısmı modellenmiş ve bir noktadan yakıt verilmiştir. Analiz boyunca toplamda 50000 m³ yakıtın boğaz yüzeyine sızması sağlanmıştır.

Yakıt sızıntısı için yapılan analizler ile yakıtın zamanla boğaz boyunca nasıl ilerlediği, akıntının sızıntıyı nasıl etkilediği görülebilmektedir. analiz sonuçlarına göre Büyükdere civarında yakıt çok uzun süre kalmış, o bölgenin kirlenmesine neden olmuştur. Beykoz bölgesinde de yakıt girişi o noktadan olmamasına rağmen yakıt birikmiş ve bölgeyi çok geç terk etmiştir. Güney yönünde ilerleyen yakıt zaman zaman yüzey akıntısıyla birlikte sürüklenmiş olsa da akıntı hızının yavaş olduğu Büyükdere ve İstinye burnunda kıyıları kirlenmiştir.

SO₂ gazı salınımını gözlemlemek için yapılan analizlerde kullanılan model önceki analizlerde kullanılan modelden farklı olup İstanbul Boğazı'nın tamamını kapsamaktadır. Dolayısıyla boğaz boyunca havaya salınan bir saatteki SO₂ miktarından yola çıkılarak boğaz yüzeyinden gemi bacasından çıktığı kabulü ile SO₂ gazı verilmiştir. SO₂ gazının 100 metre yüksekliğindeki hacim içerisinde dağılımı zamana bağlı olarak incelenmiştir.

Yapılan analizlere göre SO₂ gazı bir kaç saat sonunda 100 metre yüksekliğe erişebilmiştir. Ancak boğazın güney kısmında 12 saat sonunda dahi SO₂ gazının en yukarıya ulaşamadığı görülmüştür.

Gemi emisyon salınımı için yapılan sonraki analizler, rüzgarın hava kirliliği üzerindeki etkisini açıkça göstermiştir. Bu analizde rüzgar, ilk analizden farklı olarak iki yönden uygulanmıştır. Rüzgarın etkisiyle SO₂ gazı karşı yüzeye yakın yerlerde birikmiştir.

Bu çalışma ile elde edilen sayısal sonuçlar kullanılarak deniz ve hava kirliliği için çeşitli önlemler alınabilir.

KAYNAKLAR

- Abdul-Wahab, S., Elkamel, A., Al Balushi, A. S., Al-Damkhi, A. M. ve Siddiqui, R. A., (2008), "Modeling of nitrogen oxides (NOx) concentrations resulting from ships at berth", *Journal of Environmental Science and Health, A 43*: 1706-1716.
- Anonim, (2001), "Türk Boğazları Gemi Trafik Yönetim ve Bilgi Sistemi Projesi", Denizcilik Müsteşarlığı Yayınları, Ankara, 55.
- Başar, E., (2003), "İstanbul Boğazı'nda Tanker Kazaları ile Oluşabilecek Petrol Dağılımının Simülasyonu", Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Baydar, M., (1994), "İstanbul Boğazı ve Yakın Çevresinin İklim Özellikleri", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Deniz Bilimleri ve İşletmeciliği Enstitüsü, İstanbul, 91.
- Beji, S., Dikili, A. C. ve Barlas, B., (2008), "İstanbul Boğazı'ndaki İki Tabakalı Akışın Sayısal İncelenmesi", Gemi İnşaatı ve Deniz Teknolojisi Teknik Kongresi, 1: 118-127.
- Brennen, C. E., (2005), *Fundamentals of Multiphase Flows*, Cambridge University Press.
- Can, S., Çelik, F., Yılmaz, H., Satır, T. ve Bak, O. A., (2007), "The Case Studies for oil Spill Simulation in İstanbul Strait", ICRMT, Napoli, Italy.
- Can, S., (2007), "Tanker kazaları sonrası İstanbul Boğazı'ndaki yakıt kirliliği simülasyonu", Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Can, S., (1988), "İstanbul Boğazı'ndaki Tabakalı Akımın İncelenmesi", Lisans Bitirme Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Gemi İnşaatı Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
- Clark, R. B., (1997), *Marine Pollution*, Clarendon Oxford Press, London, 161.
- Çengel, Y. A. Ve Cimbala, J. M., (2007), *Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları*, Güven Kitabevi, İzmir.
- Davidson, L., (2003), *An Introduction to Turbulence Models*, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden.
- Degens, E. T. ve Ross, D. A., (1974), "The Black Sea Geology, Chemistry and Biology", *The American Association of Petroleum Geologists*, Tulsa Oklahoma, USA, 245.
- Deniz, C. ve Durmuşoğlu, Y., (2008), "Estimating shipping emissions in the region of the Sea of Marmara, Turkey", *Science of the Total Environment*, 390: 255-261.
- Dorn, W. G., (1953), "Wind stress on an artificial pond", *Journal of Marine Research*, 12: 249-276.
- Elliott, A. J. ve Jones, B., (2000), "The Need for Operational Forecasting During Oil Spill Response", *Marine Pollution Bulletin*, 40 (2): 110-121.
- Ertürk, Ş. N. ve Yonsel, F., (2002), "An application of the ADAM model for pollution and oil spill tracking in Bosphorus".
- Fluent 6.2 Documentation, (2005), *Commercial code users guide*, Fluent Inc., Germany.
- Gambit 2.2 Documentation, (2005), *Commercial code users guide*, Fluent Inc., Germany.
- Gidaspow, D., (1994), *Multiphase flow and fluidization: Continuum and kinetic theory*

descriptions, Academic Press, Boston.

Güler, N. ve Poyraz, Ö., (1997), "İstanbul Boğazı'nda Deniz Trafiği ve Seyir Güvenliği", Türkiye'nin Kıyı ve Deniz Alanları I. Ulusal Konferansı, Türkiye Kıyıları Konferansı Bildiriler Kitabı, 533-542, Ankara.

Güven, K. C., Unlu, S., Okus, E. ve diğerleri, (1998), "The Oil and Anionic Surfactant Pollutions in Seawater of Turkish Straits in 1995-1997", The Proceedings of the First Int. Sym. on Fisheries and Ecology, 1: 403-409, Trabzon.

Hansen, P. F. ve Ditlevsen, O., (2003), "Nature preservation acceptance model applied to tanker oil spill simulations", Structural Safety, 25 (1): 1-34.

Harlow, F. H. ve Nakayama, P. I., (1968), "Transport of turbulence-energy decay rate", Los Alamos Sci. Lab. U. Calif. Report, Los Angeles, 3854.

Heaps, N. S., (1977), "Development of storm-surge models at Bidston", Report No. 53, Institute of Oceanographic Sciences, Bidston.

Ishii, M., (1975), Thermoifluid Dynamic Theory of Two-Phase Flow, Eynolles, Paris, France.

Jasak, H., (2006), Numerical Solution Algorithms for Compressible Flows, University of Zagreb, Croatia.

Kesgin, U. ve Vardar, N., (2001), "A study on exhaust gas emissions from ships in Turkish Straits", Atmos. Environment, 35: 1863-1870.

Kolev, N. I., (2004), Multiphase Flow Dynamics 1, Springer 2nd edition, Germany.

Kolmogorov, A. N., (1942), "Equations of turbulent motion of an incompressible fluid", Izv Akad Nauk SSR Ser Phys, 6 (1/2): 56.

Latif, M. A., Özsoy, E., Oğuz, T. ve Ünlüata, Ü., (1991), "Observations of the Mediterranean Inflow into the Black Sea", Deep Sea Research, 38 (2): 711-723.

Launder, B. ve Sharma, B., (1972), "Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc", Letters in Heat nad Mass Transfer, 1 (2): 131-138.

Manninen, M., Taivassalo, V. ve Kallio, S., (1996), "On the mixture model for multiphase flow", VTT Publications 288, Finland.

Mengöl, S., (1950), Oceanography, Ulaştırma Bakanlığı, Yüksek Denizcilik Okulu, İstanbul, 4 (22), 142.

Neumann, G. ve Pierson, W. J., (1966), Principles of Physical Oceangraphy, Prentice-Hall Inc., N.J.

Oğuzülgen S., (1995), "Türk Boğazları Bölgesi'nde Deniz Trafiğinin Kontrolü ve Gerekli Yaptırım Düzenlemeleri, Boğazlardan Geçiş Güvenliği ve Montreaux Sözleşmesi Semineri", İstanbul Üniversitesi, İstanbul, 12.

Oliveria, P. J. ve Issa, R. I., (2001), "An Improved PISO Algorithm for the Computation of Buoyancy-Driven Flows", Numerical Heat Transfer, B 40: 473-493.

Otay, E. N. ve Özkan, Ş., (2005), "İstanbul Boğazı Risk Haritası".

Örs, H., (1997), "A Contaminant Transport Model For The Bosphorus Strait", Journal of

Environmental Scientific Health, A 32(3): 699-714.

Örs, H., (2004), "A Stochastic Approach to the Modelling of the Oil Pollution", Energy Sources, 26: 879-884.

Örs, H., (2005), "A Stochastic Approach to the Modelling of the Oil Pollution: Part III", Energy Sources, 27: 393-397.

Örs, H. ve Yılmaz, S. L., (2003), "Oil Transport in the Turkish Straits System: A Simulation of Contamination in the İstanbul Strait", Energy Sources, 25 (11): 1043-1052.

Özdemir, Y. H., (2007), "Gemi Etrafındaki Akışın Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemi Kullanılarak İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Plant, G., (2000), "The Turkish Straits and Tanker Traffic: An Update", Marine Policy, 24: 193-214.

Saffman, P. G., (1970), Vortex Dynamics, Press of the University of Cambridge, Cambridge.

Saxea, H. ve Larsena, T., (2008), "Air pollution from ships in three Danish ports", Atmos. Environment, 38: 4057-4067.

Sebastião, P. ve Guedes Soares, C., (2007), "Uncertainty in predictions of oil spill trajectories in open sea", Ocean Engineering, 34: 576-584.

Shih, T.H., Liou, W.W., Shabbir, A., Yang, Z., ve Zhu., J., (1995), "A New - Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation", Computers Fluids, 24 (3): 227-238.

SHODB, (1994), Denizcilere İlanlar, Deniz Kuvvetleri Komutanlığı, Seyir Hidrografi ve Oşinografi Yayınları, İstanbul, 24.

Smith, S. D. ve Banke, E. G., (1975), "Variation in the sea surface drag coefficient with wind speed", Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 101: 665-673.

Skognes, K. ve Johansen, O., (2004), "Statmap 3-dimensional model of oil spill risk assessment", Environmental Modelling & Software, 19 (7-8): 727-737.

Skjølsvik, K.O., Andersen, A.B., Corbett, J. ve Skjelvik, J.M., (2000), "Study on greenhouse gas emissions from ships", MT Rep. Mtoo, A23-038, Trondheim, Norway, MARINTEK.

Sodja, J., (2007), Turbulence models in CFD, University of Ljubljana, Slovenia.

Sugioka, S., Kojima, T., Nakata, T. ve Horiguchi, F., (1999), "A Numerical Simulation of an Oil Spill in Tokyo Bay", Spill Science & Technology Bulletin, 5 (1): 51-61.

The Admiralty, (1990), Hydrographic Department (1948, 1955, 1990), Black Sea Pilot, HMSO, London, 458.

Ungarish, M., (1993), An Introduction to Gravity Currents and Intrusions, CRC Press, USA.

Van Dorn, W.D., (1953), "Wind stress on an artificial pond", Journal of Marine Research, 12 (3): 249-276.

Vallée, C., Höhne, T., Prasser, H. M. ve Sühnel, T., (2008), "Experimental Investigation and CFD Simulation of Horizontal Stratified Two-Phase Flow Phenomena", Nuclear Engineering and Design, 238: 637-646.

Wang, S. D., Shena, Y. M. ve Zheng, Y. H., (2005), “Two dimensional numerical simulation for transport and fate of oil spills in seas”, *Ocean Engineering*, 32: 1556-1571.

Wilcox, D. C., (1994), *Turbulence Modelling For CFD*, DCW Industries Inc., La Canada, California.

İNTERNET KAYNAKLARI

- [1] <http://www.coastalsafety.gov.tr>
- [2] <http://www.google.com>
- [3] <http://www.turkishpilots.org>

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 21.10.1985

Doğum yeri Nevşehir

Lise 2000-2003 Nevşehir Anadolu Lisesi

Lisans 2004-2008 Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fak.
Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2008-2010 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Müh. Anabilim Dalı

Çalıştığı kurum(lar)

2008-2009 Dearsan Tersanesi Askeri Projeler Dizayn Grubu
Askeri Dizayn Mühendisi

2009-Devam ediyor YTÜ Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Müh. Gemi
Hidromekanik Anabilim Dalı Araştırma Görevlisi