

RÜZGAR KABARMASININ SAYISAL MODELLEMESİ

Yusuf BOZDEMİR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2007

ANKARA

Yusuf BOZDEMİR tarafından hazırlanan RÜZGAR KABARMASININ SAYISAL MODELLEMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Lale BALAS

Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ Anabilim Dalında Yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: : PROF. DR. AYŞEN ERGİN

Üye : DOÇ. DR. AHMET CEVDET YALÇINER

Üye : DOÇ. DR. OSMAN ÖZDEMİR

Üye : DOÇ. DR. LALE BALAS

Üye : DOÇ. DR. CAN ELMAR BALAS

Tarih : 20 / 07 / 2007

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Yusuf BOZDEMİR

RÜZGAR KABARMASININ SAYISAL MODELLEMESİ**(Yüksek Lisans Tezi)****Yusuf BOZDEMİR****GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ****Temmuz 2007****ÖZET**

Bu tez çalışmasında rüzgar kaynaklı su kabarmasının belirlenmesi amacıyla, derinlik boyunca ortalaması alınmış lineer olmayan sığ su denklemlerini sonlu farklar yöntemiyle çözümleyen sayısal bir model geliştirilmiştir. Lineer olmayan denklem sistemi şaşırtmacalı çözüm ağı kullanılarak ve direkt zaman adimli hesap yöntemi ile çözülmektedir. Sayısal model herhangi bir geometriye sahip çözüm alanları için uygulanabilmektedir. Sayısal model sonuçları, analitik çalışmayla karşılaştırıldıktan sonra gerçek kıyı alanına uygulanmıştır. Model uygulamasında çalışma alanı olarak Muğla il sınırları içerisinde yer alan Bodrum Gökova Körfezi kıyı alanı seçilmiştir.

Bilim Kodu : 911.1.083
Anahtar Kelimeler : Rüzgar kabarması, sonlu farklar, sayısal modelleme, Gökova Körfezi
Sayfa Adedi : 73
Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Lale BALAS

NUMERICAL MODELING OF WIND INDUCED STORM SURGE

(M.Sc. Thesis)

Yusuf BOZDEMİR

GAZİ UNIVERSITY

INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

July 2007

ABSTRACT

In this study a numerical model has been developed to predict the wind induced storm surge, by solving vertically averaged non-linear shallow water equations. Finite difference method has been applied to solve the system of non-linear equations by explicit method on a space staggered grid. Model can be applied on any domain having variable geometrical shape. Developed model results are compared with the analytical solution of storm surge. Then model has been applied to Gokova Bay located at Aegean Sea of Turkish coastline.

Science Code : 911.1.083

Key Words : Storm surge, finite difference, numerical modeling, Gokova Bay

Page Number: 73

Adviser : Assoc. Prof. Dr. Lale BALAS

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca, gerek yüksek lisans eğitimimde gerekse tez çalışmamda çok değerli yardım ve katkılarını sunan, değerli hocam Sayın Doç. Dr. Lale BALAS'a, yine bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım Sayın Doç. Dr. Can Elmar BALAS'a, manevi desteklerini hiç eksik etmeyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	viii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	ix
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
HARİTALARIN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	7
3. TEORİ	12
3.1. Serbest Yüzey Sınır Koşulu	15
4. SAYISAL YÖNTEM	16
5. SAYISAL MODEL UYGULAMALARI	23
5.1. Sayısal Modelin Analitik Çalışma ile Karşılaştırılması	23
5.2. Sayısal Modelin Gökova Körfezi Kıyı Alanına Uygulanması	27
6. SONUÇ	52
KAYNAKLAR	54
EKLER	57
EK-1 Stabilite analizi	58
EK-2 Rüzgarlar	61
EK-3 Sonlu farklar yaklaşımı	71
ÖZGEÇMİŞ	73

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Dalga tipleri ve sebepleri	3
Çizelge 5.1. Seçilen ‘h = 50 m’ çözüm ağı uzunluğu için hata değerleri	26
Çizelge 6.1. Seçilen rüzgar yönlerine göre hesaplanan maksimum kabarma yükseklikleri.....	53

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Bir kıyı alanında fırtına kabarması	1
Şekil 1.2. Fırtına kabarması ve gelgit etkisinin karşılaştırılması	2
Şekil 1.3. Kapalı bir su alanında oluşan rüzgar kabarması	2
Şekil 1.4. Fırtına kabarmasının deniz tabanının eğime bağlı değişimi	4
Şekil 3.1. Eksen takımı	13
Şekil 4.1. Sayısal modelin şaşırtmacalı çözüm ağı sistemi.....	16
Şekil 4.2. Çözüm ağı numaralandırılması	21
Şekil 4.3. Zamansal çözüm ağı	22
Şekil 5.1. Çözüm ağı	24
Şekil 5.2. Su yüzü eğiminin karşılaştırılması.....	26
Şekil 5.3. Gökova Körfezi su derinlikleri (m).....	28
Şekil 5.4. Model çözüm ağı.....	30
Şekil 5.5. Geliştirilen modelin özet akış diyagramı	31
Şekil 5.6. Bodrum DMI rüzgar gülü	32
Şekil 5.7. Bodrum DMI rüzgar gülü (10 m/sn'den büyük hızlar için).....	33
Şekil 5.8. Yatay doğrultudaki Eddy viskozitesinin (N_h) rüzgarın esme yönünde, X = 2400 m'de alınan kesit boyunca, su yüzü profiline etkisi.....	34
Şekil 5.9. Taban sürtünme kuvvetinin rüzgarın esme yönünde, X = 2400 m'de alınan kesit boyunca, su yüzü profiline etkisi.....	35
Şekil 5.10. Körfezdeki ortalama çevrinti düzeni (cm/sn) ($U_w = 12,80$ m/sn - W yönü)	36
Şekil 5.11. Körfezdeki su düzeyi değişimi (cm) ($U_w = 12,80$ m/sn - W yönü)	37

Şekil	Sayfa
Şekil 5.12. 3 Boyutlu olarak körfezdeki su düzeyi değişimi (cm) ($U_w = 12,80$ m/sn - W yönü)	38
Şekil 5.13. Körfezde $X = 2400$ m’de alınan kesit boyunca su yüzü profili ($U_w = 12,80$ m/sn - W yönü)	38
Şekil 5.14. Körfezdeki ortalama çevrinti düzeni (cm/sn) ($U_w = 12,50$ m/sn - SW yönü)	39
Şekil 5.15. Körfezdeki su düzeyi değişimi (cm) ($U_w = 12,50$ m/sn - SW yönü)	40
Şekil 5.16. 3 Boyutlu olarak körfezdeki su düzeyi değişimi (cm) ($U_w = 12,50$ m/sn - SW yönü)	41
Şekil 5.17. Körfezde $X = 2400$ m’de alınan kesit boyunca su yüzü profili ($U_w = 12,50$ m/sn - SW yönü)	42
Şekil 5.18. Körfezde $Y = 6300$ m’de alınan kesit boyunca su yüzü profili ($U_w = 12,50$ m/sn - SW yönü)	42
Şekil 5.19. Körfezdeki ortalama çevrinti düzeni (cm/sn) ($U_w = 13,60$ m/sn - NW yönü)	43
Şekil 5.20. Körfezdeki su düzeyi değişimi (cm) ($U_w = 13,60$ m/sn - NW yönü)	44
Şekil 5.21. 3 Boyutlu olarak körfezdeki su düzeyi değişimi (cm) ($U_w = 13,60$ m/sn - NW yönü)	45
Şekil 5.22. Körfezde $X = 2400$ m’de alınan kesit boyunca su yüzü profili ($U_w = 13,60$ m/sn - NW yönü)	46
Şekil 5.23. Körfezde $Y = 6300$ m’de alınan kesit boyunca su yüzü profili ($U_w = 13,60$ m/sn - NW yönü)	46
Şekil 5.24. Körfezdeki ortalama çevrinti düzeni (cm/sn) ($U_w = 16,10$ m/sn - NNE yönü)	47
Şekil 5.25. Körfezdeki su düzeyi değişimi (cm) ($U_w = 16,10$ m/sn - NNE yönü)	48
Şekil 5.26. 3 Boyutlu olarak körfezdeki su düzeyi değişimi (cm) ($U_w = 16,10$ m/sn - NNE yönü)	49

Şekil	Sayfa
Şekil 5.27. Körfezde $X = 2400$ m’de alınan kesit boyunca su yüzü profili ($U_w = 16,10$ m/sn - NNE yönü).....	50
Şekil 5.28. Körfezde $Y = 900$ m’de alınan kesit boyunca su yüzü profili ($U_w = 16,10$ m/sn - NNE yönü).....	50
Şekil 5.29. Artan rüzgar hızına bağlı olarak, körfezde $X = 2400$ m’de alınan kesit boyunca su yüzü profili değişimi	51

RESİMLERİN LİSTESİ**Resim****Sayfa**

Resim 1.1. Fırtına kabarmasının kıyıya verdiği şiddetli zarar 4

HARİTALARIN LİSTESİ

Harita	Sayfa
Harita 5.1. Gökova Körfezi kıyı alanı.....	27

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
C_d	Havanın sürüklenme katsayısı
D	Toplam su derinliği
f	Coriolis katsayısı
g	Yerçekimi ivmesi
h	Alansal çözüm ağı uzunluğu
H	Sakin su yüzeyinden olan derinlik
L_b	Rüzgarın esme yönünde su alanı uzunluğu
N_h	Yatay doğrultudaki eddy vizkosite katsayısı
N_v	Düşey doğrultudaki eddy vizkosite katsayısı
p	Basınç
r	Taban sürtünme katsayısı
R	Taban sürtünme terimi
t	Zaman
T	Zamansal çözümlemede hesap adım büyüklüğü
u	x eksenini yönündeki hız bileşeni
u^*	Kayma hızı
u_w	x yönündeki rüzgar hızının bileşeni
U_w	Rüzgar hızı
U	Derinlik boyunca ortalaması alınmış x eksenini yönündeki hız bileşeni
v	y eksenini yönündeki hız bileşeni
v_w	y yönündeki rüzgar hızının bileşeni
V	Derinlik boyunca ortalaması alınmış y eksenini yönündeki hız bileşeni

Simgeler**Açıklama**

w	z eksenî yönündeki hız bileşeni
x	İlerleme yönündeki yatay koordinat
y	İlerleme yönüne dik yatay koordinat
z	Derinlik boyunca koordinat
Δh	Kabarma yükselikliğı
η	Su düzeyi değışimi
ρ	Su yoğunluğu
ρ_a	Havanın yoğunluğu
τ	Rüzgar kesme kuvveti
τ_x^s	x yönünde su yüzeyindeki kesme kuvveti
τ_x^b	x yönünde su tabanındaki kesme kuvveti
τ_y^s	y yönünde su yüzeyindeki kesme kuvveti
τ_y^b	y yönünde su tabanındaki kesme kuvveti
v_h	Yatay yönlerdeki türbülans vizkozitesi
v_v	Düşey yöneki türbülans vizkozitesi

Kısaltmalar**Açıklama**

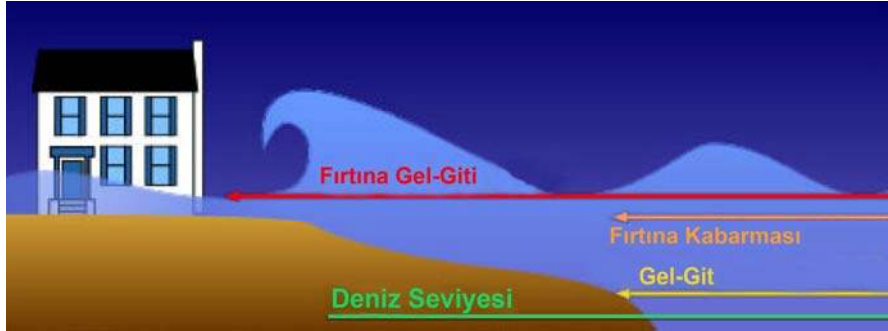
E	Doğı
ENE	Doğı kuzey doğı
ESE	Doğı güney doğı
GD	Güney doğı
N	Kuzey
NE	Kuzey doğı
NNE	Kuzey kuzey doğı
NNW	Kuzey kuzey batı
NW	Kuzey batı

Kısaltmalar	Açıklama
S	Güney
SE	Güney doğu
SSE	Güney güney doğu
SSW	Güney güney batı
SW	Güney batı
W	Batı
WNW	Batı kuzey batı
WSW	Batı güney batı
DMI	Devlet Meteoroloji İstasyonu
SSY	Sakin su yüzeyi
RMS	Hata karelerinin ortalamasının karekökü

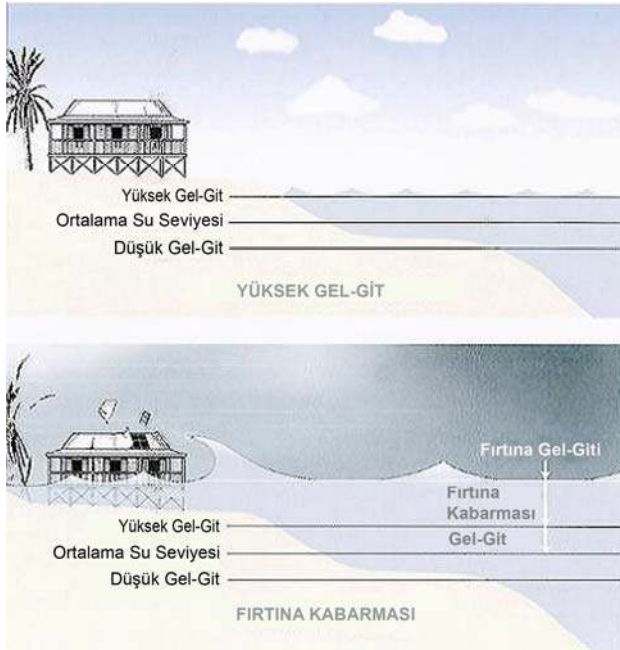
1. GİRİŞ

İnşaat mühendisliğinin başlıca uygulama ve araştırma alanlarından birisi; kıyı mühendisliğidir. Üç tarafı denizlerle çevrili ülkemizde, kıyılarda rüzgar kaynaklı su kabarması ve su düzeyi değişimlerinin önceden tahmini ve modellenmesi öncelikli bir konudur.

Deniz yüzeyinde rüzgar etkenli kayma gerilmelerinin, su düzeyinde meydana getirdiği değişime, fırtına kabarması (storm surge) adı verilir (Şekil 1.1) [18]. Fırtına kabarmasında; rüzgar ve basınç kuvvetleri, suyu, kıyıya doğru itmektedir. Tropikal fırtınalar, kasırgalar veya kıyıdan uzakta deniz/okyanusta bulunan kuvvetli alçak basınç sistemlerinin neden olduğu normal deniz seviyesinin yükselmesi fırtına kabarmasına neden olmaktadır. Fırtına kabarması, gelgit etkisi ve dalga tırmanmasını da içermektedir (Şekil 1.2) [17].

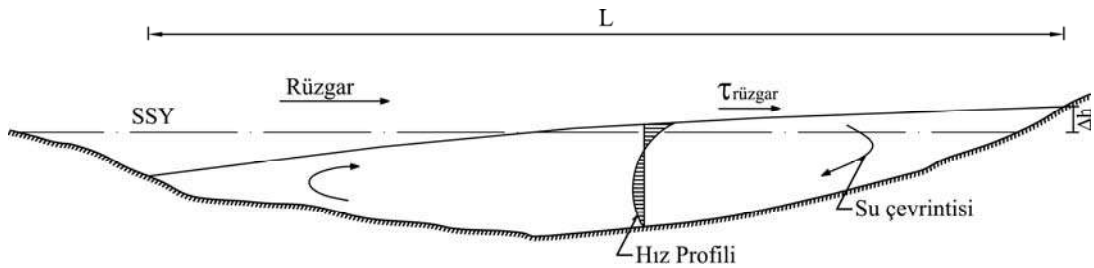


Şekil 1.1. Bir kıyı alanında fırtına kabarması [18]



Şekil 1.2. Fırtına kabarması ve gelgit etkisinin karşılaştırılması [17]

Rüzgarın neden olduğu kayma gerilmesi sonucu, azalan su derinliklerinde sakin su yüzeyindeki kabarma, büyüklüğünü arttıracak şekilde kıyı alanlarına etkimektedir. Bunun sonucu sığ sularda önemli kabarma yükseklikleri oluşurken, bunun aksine derin denizde kabarma etkisi batimetriden dolayı sığ sudaki gibi gelişme göstermemekte ve büyüklüğü düşük kalmaktadır. Atmosferdeki alçak basınç sistemlerinin etkisiyle oluşan kuvvetli fırtınalar, kapalı kıyısal alanlarda yüksek kabarmalara neden olabilmektedirler (Şekil 1.3) [14, 23].



Şekil 1.3. Kapalı bir su alanında oluşan rüzgar kabarması [14]

Rüzgar etkisiyle oluşan ağırlık dalgaları, rasgele karaktere sahiptirler, rüzgar etkisiyle suyun dengesi bozulduktan sonra, dalganın rüzgara karşı ve ona ters oluşan sırtları arasında basınç farkı doğar. Böylece rüzgar enerjisi su yüzeyine geçer. Açık

denizdeki, bu atmosferden su yüzeyine sürekli enerji geçişi rüzgar dalgalarını oluşturur. Meydana gelen rüzgar dalgaları yükseklikleri değişmekle beraber, periyotlarını koruyarak çok uzun mesafeler kat etmek suretiyle kıyıya ulaşırlar, bu işlem dispersiyon olarak adlandırılır. Çizelge 1.1’de dalga tipleri görülmektedir [16]. Çizelgede görüldüğü gibi fırtına kabarması, yüksek periyodundan ötürü uzun süre etkili olabilmektedir.

Çizelge 1.1. Dalga tipleri ve sebepleri [16]

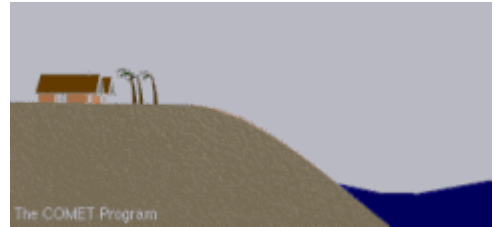
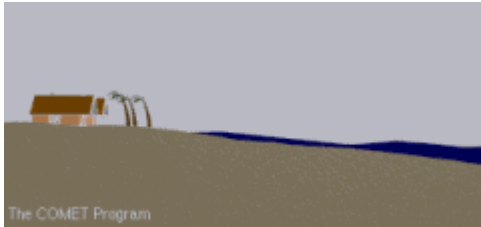
Dalga Tipi	Periyot	Sebebi
Rüzgar Dalgası	≤ 15 sn	Rüzgar gerilmesi
Ölü deniz dalgası, soluğan (Swell)	≤ 30 sn	Rüzgar dalgası
Surf Salınımı (Surf beat)	1-5 dak	Dalga grubu
Seiche	2-40 dak	Rüzgar değişimi
Çalkantı	2-40 dak	Tsunami, surf salınımı
Tsunami	5-60 dak	Deprem
Gelgit	12-24 saat	Güneş ve Ay çekimi
Fırtına kabarması (Storm Surge)	1-30 gün	Rüzgar gerilmesi ve atmosfer basıncındaki azalma

Rüzgar kaynaklı kabarma etkisi, normal gelgit ile birleşebilmekte ve fırtına etkisine sahip olabilmektedir. Fırtına durumunda dalga yüksekliğinin artması ve periyodunun küçülmesi sonucu ortalama su seviyesinde sakin su seviyesine göre büyük bir artış olur. Bu nedenle kabarma etkisi deniz yüzeyinin ortalama su seviyesinin 5 m veya daha fazla yükselmesine sebep olabilmektedir. Bu kabarma, kıyı alanlarında özellikle fırtına kabarmasının normal gelgit zamanı ile çakışması durumunda şiddetli kıyısal taşkınlara sebep olabilmektedir. Fırtına kabarması aynı zamanda nehirleri ve iç gölleri etkilemekte, potansiyel olarak tahliye edilecek insan sayısını arttırmaktadır (Resim 1.1.) [17].



Resim 1.1. Fırtına kabarmasının kıyıya verdiği şiddetli zarar [17]

Belli bir alandaki fırtına kabarmasının seviyesi aynı zamanda kıta sahanlığının eğimiyle de tanımlanabilir. Yatık bir eğime sahip kıyılarda daha küçük dalgalar oluşmasına karşın, kıyısal alanda daha büyük bir su kabarması görülmektedir. Dik bir eğime sahip kıyılarda ise kabarma seviyesi daha düşük kalmakta, bununla beraber daha büyük kırılan dalgalar oluşmaktadır (Şekil 1.4). Ayrıca kıyı alanının topoğrafyası da fırtına kabarmasının boyutunda önemli bir diğer etkidir. Deniz seviyesinden birkaç metre yüksek kıyı alanları fırtına kabarmasının neden olabileceği kıyı taşkınları açısından risk oluşturmaktadır. Fırtına kaynaklı su kabarması, kapalı bir alan oluşturan limanları, yat limanlarını, gemileri büyük ölçüde olumsuz etkilemekte, ekonomik değeri yüksek kıyısal alanlarda yaşamsal ve ekolojik risk oluşturmaktadır [18].



Şekil 1.4. Fırtına kabarmasının deniz tabanının eğime bağlı değişimi [18]

Fırtına kabarma yüksekliğinin tanımlanmasında, kıyıya yakın tropikal fırtınaların hızları, şiddeti, maksimum rüzgarların olduğu alanın karakteristikleri (rüzgar alanın

çapı gibi), kıyı çizgisinin fiziksel özellikleri ve deniz tabanının batimetrik özellikleri gibi faktörler göz önüne alınır.

Fırtına kabarması, siklon veya benzeri hava sistemlerinin yaklaşımlarına göre bir kaç saatlik zaman çerçevesinde gelişmektedir. Kıyısız alanı etkileyen her siklon fırtına kabarmasını meydana getirir. Ancak tüm fırtına kabarmaları tehlikeli seviyelerde olmayabilir. Fırtına kabarmasının yüksekliği aşağıdakilere dayanmaktadır [17];

- Siklonun (Atmosferde bir alçak basınç alanı çevresinde hızla dönen rüzgarların oluşturduğu şiddetli fırtına) şiddeti; rüzgarın etkisi arttıkça, kabarmanın üstündeki dalgaların boyu uzamaktadır.
- Siklonun ilerleme hızı; daha hızlı siklonlar, daha çabuk kabarmanın oluşmasına neden olmakta, oluşan dalgalar kıyıya daha güçlü vurmaktadır.
- Siklonun kıyıyla yaptığı açı; bu açıya göre kıyı alanında etkilediği alan dar ya da geniş olmaktadır.
- Deniz tabanının şekli; sığ sularda daha güçlü fırtına kabarması gelişmektedir. Eğer deniz tabanı dik bir şekilde değişiyorsa kabarma yüksekliği daha az olmaktadır.
- Yerel topoğrafya – koy, burun ve açıkdeniz adaları hortum bulutları oluşturabilmekte ve kabarmayı kuvvetlendirmektedir.

Sayısal modeller, hem fırtına dalgasının oluşumunun benzeştirilmesinde hem de oluşacak dalgaların karakteristiklerinin tahmininde kullanılabilmektedir. Bu modeller ile olası fırtına kabarmasının mertebesi öngörülebilmektedir. Ek olarak bu modeller, su alanında rüzgar etkenli çevrinti düzenini belirlemek ve gelgit etkisiyle su yüzeyinde meydana gelen değişimleri hesaplamak için de kullanılmaktadırlar.

Kıyı yapıları tasarlanırken, kıyının, oradaki nüfusun ve onu çevreleyen yapılarının belirli seviyelerde korunması sağlanmalıdır. Bu koruma seviyesi, genel olarak fırtına kabarmasının oluşma sıklığına bağlı olarak belirlenmiş maksimum su yüksekliklerine, yapısal göçme riski veya tasarım projesinde yapının ekonomisi dikkate alınarak seçilen su aşma miktarına dayanmaktadır [19].

Fırtına kabarmasının şiddetinin hangi seviyelerde olacağını bilmesi, kıyı alanlarındaki potansiyel riskin tespiti açısından da önemlidir. Olası acil durumlara hazırlık ve ekonomik önlemler gerek can kaybını önlemek, gerekse diğer olumsuz faktörlerin önüne geçilmesi açısından gereklidir.

2. KAYNAK TARAMASI

Kıyı mühendisliğinde önemli bir konu olan fırtına kabarmasının dinamiği, etki ve sonuçları yakın geçmişten beri araştırılmaktadır. Bu bölümde fırtına kabarması ve modellenmesi hakkında yapılmış analitik, sayısal ve deneysel çalışmalara değinilecektir.

Dünyada kıyı alanlarında hızla artan nüfusla birlikte, haliçlere ve kıyısız alanın çevresine daha fazla dikkat çekilmektedir. Uzun yıllardan beri bilim adamları suya ilişkin çevredeki karmaşık fiziksel ve ekolojik süreçleri anlamak adına laboratuvar ve arazi çalışmaları yürütmektedirler. Bu çalışmalardan elde edilen bilgilerle günümüzde başarılı sayısal modeller geliştirilebilmektedir. Bu model çalışmaları ile kıyısız alan ve ekosisteminin dinamiğini benzeştirmek mümkün olmaktadır. Günümüzde geliştirilen 2 ve 3 boyutlu sayısal modeller sürekli gelişim göstermekte, bu karmaşık sayısal modelleme sistemleri, gelişmelerine paralel olarak daha uzun zamansal ölçekte, daha geniş inceleme alanlarına uygulanabilmektedir. Geliştirilen modeller ile kıyısız alanları etkileyebilecek fırtına kabarması ve oluşabilecek güçlü fırtınalar inceleme alanı için benzeştirilmekte, fırtına kabarmasına ait karakteristikler ortaya çıkarılmaktadır.

Sayısal modeller ile geleceğe yönelik tahminde bulunmanın yanında geçmişteki rüzgar ve dalga verilerini kullanarak yine geçmişe ait dalga karakteristiklerinin tahmini de yapılabilmektedir. Bu modeller kasırga ya da tropikal fırtınaların rüzgar ve basınç kuvvetleriyle ilişkili olarak fırtına kabarmasının büyüklüğünün saptanmasını içermektedir. Buna ek olarak bu modeller su seviyesindeki gelgit etkisini de içerirler.

Preller, Posey ve Dawson (2003), fırtına kabarmasının sayısal model çalışmasını, ABD'nin doğu kıyıları için gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada incelenen alanın özelliklerine göre rüzgar verisinden dalga verisi türetilmiş, geliştirilen tahmin modeli ile gözlemlenen su seviyesi bilgisi karşılaştırılmış, kabarmanın dinamiği tariflenmeye çalışılmıştır. Yapılan çalışmalar, yıkıcı etkisi uzun süren (2003 yılında) ve ABD'nin

doğu kıyılarında etkili olan Isabel Kasırgası'yla ilişkilendirilmiştir. Bu şiddetli kasırga sonucu oluşan fırtına kabarmasının, kıyı alanlarına ve mevcut kıyı yapılarına şiddetli etkisi olmuştur. Geliştirilen model; 2 boyutlu barotropik okyanus modeli olup, rüzgar ve yüzey kuvveti ve/veya gelgit etkisinin yarattığı kuvvetleri kapsamaktadır. Model için uluslararası hidrografik gözlem veri tabanından yararlanılmıştır. Model ile fırtınanın neden olduğu kabarma etkisine bağlı olarak kıyılardaki su seviyesi değişiminin benzeşimi gerçekleştirilmektedir [1].

Davis ve Sheng (2003), fırtına kabarması ve sonucunda kıyılarda yarattığı etkiyi incelemek için yaptıkları çalışmalarda, paralel fırtına kabarması modeli ve çevresel model geliştirmiş ve analitik çözümlemelerle karşılaştırmışlardır. Geliştirilen model, 2 boyutlu olup, direkt zaman adımlı (explicit) çözüm yöntemi, yarı kapalı (semi-implicit) yöntem ve tam kapalı (fully implicit) yöntemlere göre işletilebilmektedir. Kapalı çözümde ilerleme, Coriolis ve taban sürtünme terimlerinin hepsi ele alınabilmektedir. İlerlemeli taşınım ve difüzyon terimleri bu çalışma için geliştirilen Euler-Lagrangian modeline göre çözülmüştür. Araştırmacılar 2 boyutlu Navier – Stokes denklemlerini kullanmışlardır. Akışkanın yoğunluğu sabit kabul edilmiştir (sıkışmayan akışkan). Sayısal çözüm için sonlu farklar yaklaşımından yararlanılmıştır. Geliştirilen model Florida'nın Hint kıyılarına uygulanmış ve çeşitli analitik çözümlemelerle karşılaştırılarak doğruluğu gerçekleştirilmiştir [2].

Grzechnik (2000), 3 boyutlu gelgit ve fırtına modeli ile tabakalaşmış parçacık izleme tekniğini Avustralya güney kıyıları için uygulamıştır. Fırtına modelinin kurulmasında 3 boyutlu gelgit denklemleri kullanılmış ve sayısal çözümde sonlu farklar yaklaşımından yararlanılmıştır. Ayrıca parçacık takip modeli geliştirilmiş ve irdelenmiştir. Muhtelif fırtına senaryolarına göre gelgit, rüzgar, atmosferik basınç ve azami fırtınaya göre açık (okyanus) ve kapalı (kıyı alanı) olmak üzere iki sınır koşuluna bağlı olarak model sınanmıştır. Ayrıca güney Avustralya'da St. Vincent Körfezi'nde gelgit ve fırtına etkisiyle oluşan akıntılarda modellenmiştir. Burada da benzer şekilde farklı fırtına senaryoları işletilmiş ve çıkan sonuçlar modelde irdelenmiştir [3].

Blain, Westerink, Luettich (1998), kasırğa kaynaklı fırtına kabarmasının hesabına ilişkin, çözüm ağı noktalarının yakınsaklığı üzerine çalışma yapmışlardır. Fırtına kabarmasının benzeşimi gerçekleştirilmiş, idealize edilmiş bir çözüm ağında; çözüm ağı aralıklarının etkisi, kıyı çizgisinin detayları ve karakteristikleri, fırtına kabarması oluşumuna etki eden meteorolojik parametreler irdelenmiştir. Çalışmalar kıta sahanlığı içerisinde fırtına kabarma yüksekliğinin doğru tahmin edilmesi için çözüm ağı çözünürlüğünün (sıklığının) yeter derecede olması gerektiğini göstermiştir. Eğer model ile büyük bir alanda oluşabilecek kabarma yükseklikleri hesaplanmak istenirse derinlik boyunca (alansal) çözüm ağının yeter derecede iyi kurulmasının modelin etkinliği açısından gerektiğini ortaya koymuşlardır [4].

Jain, Chittibabu, Agnihotri, Dube, Sinha, Rao (2006), Hindistan ve Pakistan kıyıları için fırtına kabarması modeli geliştirmişlerdir. Model Arab denizinde (Umman Denizi) tropikal siklonlar sonucu yüksek su seviyelerinin oluştuğu Hindistan ve Pakistan'ın batı kıyılarına uygulanmıştır. Söz konusu kıyılarda tropikal siklonların oluşma sıklıkları fazla olmamasına rağmen, kabarmadan etkilenmekte ve can kayıpları söz konusu olmaktadır. Modelde derinlik boyunca ortalanan süreklilik ve momentum denklemleri, kartezyen koordinat sisteminde çözülmüştür. Fırtına kabarması modellerinde temel girdi parametresi olarak rüzgar gerilme kuvvetinin tanımlanmasına gereksinim vardır. Bu amaçla rüzgar gerilmesi Jelesnianski ve Taylor'un (1973) dinamik fırtına modeli kullanılarak hesaplanmıştır. Fırtına modelinde dinamik bir rüzgar profili elde etmek için, başlangıçta durağan simetrik rüzgar profili alınmış, fırtınanın hareketinden dolayı oluşan asimetri dikkate alınarak profil düzeltilmiştir. Geliştirilen model, durağan (stationary) fırtına için, basınç değişimi, merkezkaç, Coriolis ve yüzey sürtünme kuvvetleri arasındaki dengeyi göstermektedir. Modelde kullanılan denklemlerin çözümünde şaşırtmacalı (staggered) çözüm ağı sistemi yarı açık (semi explicit) sonlu farklar yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Geliştirilen model ile 1999 ve 2001 yıllarında Pakistan kıyılarına etki eden siklonlar benzeştirilerek sayısal çalışmalar yapılmıştır. Model sonucu hesaplanan kabarma yükseklikleri var olan gözlem tahminleriyle uyumlu olmuştur [5].

Westerink, Baptista, Scheffner, Farrar (1992), Meksika körfezinden Florida'nın kuzeybatı sahillerine kadar olan bölge için gelgit ve fırtına kabarmasını, sonlu elemanlar yöntemiyle modellemiştir. Çözüm alanının çok büyük olması, çözüm ağı ile ilgili parametreleri fazlasıyla önemli kılmaktadır. Problemin çözümünde genelleştirilmiş dalga – süreklilik denklemleri ve sığ su denklemlerinin sonlu elemanlar yöntemiyle matematiksel modeli kurulmuştur. Hesaplamalarda çözüm ağı aralığının seçimi, yerel detayları ve değişkenliğini etkilemektedir. Geliştirilen modelin etkin ve doğru çözüm verdiği gösterilmiştir [6].

Jelesniasnski (1966), taban gerilmesini hesaba katmadan fırtına kabarması için sayısal hesaplamalar yapmıştır. Araştırmacı doğrusallaştırılmış taşınım denklemlerini kullanarak, değişen derinlik için, dikdörtgensel bir havzada, fırtına kabarması hesabını gerçekleştirmiştir. Hesaplanan kabarma değerlerinin, fırtınanın başlangıç konumuna, hareket doğrultusu ve hızına, kıyıya doğru hareket durumuna karşı duyarlı olduğu belirtilmiştir. Kıyılardaki fırtına kabarma yüksekliği ve fırtınanın şiddetine, hızına, yönüne bağlı dispersiyonun hesaplanması, modelle irdelenmiştir [7].

Flather (1987), açık deniz yapılarının tasarımı için akıntıların tahmini, gelgit etkisi, fırtınadan kaynaklı su değişimlerini incelemiştir. Yapılan çalışmalar kuzeybatı Avrupa sahiline uygulanmıştır. Geliştirilen sayısal model, gelgit ve fırtına kaynaklı kabarmanın alansal dağılımlarına uygulanmıştır [8].

Abohadima, Rable (2002), lineer olmayan kısmi diferansiyel denklemler ile kütle ve momentum korunum denklemleri sayısal olarak çözmüşlerdir. Geliştirilen model ile küçük adalardan oluşan bir koydan geçmekte olan fırtınada kaynaklı akıntı etkisi altında su yüzeyi yüksekliğinin zamansal değerlendirilmesi yapılmıştır. Modelin geçerliliği analitik çözümlemeler ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca Tokyo Körfezi'ndeki tayfunlardan kaynaklanan fırtına kabarması dinamiği, model ile tahmin edilmiştir. Sonuçlar, benzer çalışmalar yürüten diğer araştırmacılar ile karşılaştırılmıştır [9].

Lardner, Cekirge (1988), lagünlerde ve sığ sulardaki 3 boyutlu gelgit ve fırtına kabarmasından kaynaklı hareketleri benzeştirmek ve hidrodinamik denklemleri çözmek için bir algoritma önermiştir. Su yüzeyinin yer değiştirmesi ve derinlik boyunca ortalanan hız bileşenleri iki boyutlu sığ su denklemlerinin çözüm algoritmasına göre önce hesaplanmakta, bu değerler daha sonra iki yatay doğrultuda momentum denklemlerinin çözümüyle düşey hız profilinin oluşturulması için kullanılmaktadır. Araştırmacı parabolik ifadelerin çözümünde Crank-Nicholson metodunu kullanmıştır. Sabit eddy viskozite katsayılarının kabulüyle, sadece stabilite koşulu sınırlayıcı koşul olmaktadır [10].

Canizares, Heemink, Vested (1998), ardışık verileri benzeştirme tekniği ile, tamamıyla lineer olmayan denklemleri kapsayacak şekilde hidrodinamik model geliştirmişlerdir. Deterministik model çıktısı, elde edilebilir bilgilere göre düzeltilmiş, böylece model için en iyi başlangıç koşulu oluşturulmuştur. Deterministik model daha sonra su seviyesinin tahmininde kullanılmıştır. Araştırmacı, geliştirdiği modeli oluşmuş gerçek bir fırtına için uygulamıştır [11].

Sinha (1987), Fırtına kabarmasının değerlendirilmesi ve gelgit ile etkileşimleri irdelenmiş, Bengal körfezi için hidrodinamik sayısal model ve gelgit – fırtına kabarması etkileşim modeli tanımlanmıştır. Bu modeller ile Hindistan ve Bangladeş kıyılarını etkileyen şiddetli siklon kaynaklı kabarmaların benzeşimi gerçekleştirilmiştir [12].

Lardner (1994), 3 boyutlu sayısal gelgit ve fırtına kabarması modeli geliştirmiştir. Modelde Eddy viskoziteleri hem sabit hem de değişken parametre olarak ele alınabilmektedir. Sayısal yöntemde, Crank-Nicolson metodu uygulanmıştır. Verilerin gerçek modele uygunluğu irdelenmiş ve herhangi bir stabilite bozukluğuna yer vermemek için eksik verilerin denetlenmesi gerektiği vurgulanmıştır [13].

3. TEORİ

Körfez, göl veya haliç gibi kıyısız su sistemlerinde serbest yüzeyli akımları tanımlayan üç boyutlu matematiksel model Navier-Stokes denklemlerinden oluşmaktadır. Model denklemleri sıkıştırılamayan akışkanın kütle ve momentum korunumu prensibine dayanmaktadır. Kartezyen koordinat sistemindeki üç boyutlu temel denklemler aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [15, 22] :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(vu)}{\partial y} + \frac{\partial(wu)}{\partial z} = fv - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_h \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} + \frac{\partial(wv)}{\partial z} = -fu - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_h \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (3.3)$$

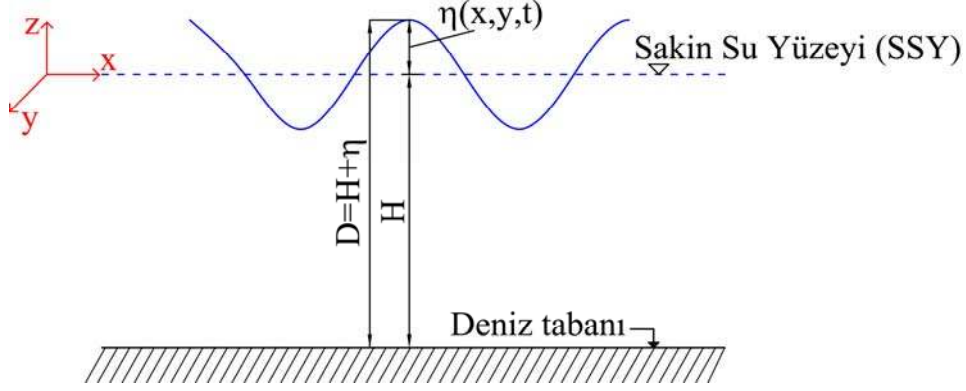
$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial(uw)}{\partial x} + \frac{\partial(vw)}{\partial y} + \frac{\partial(ww)}{\partial z} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_h \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_h \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_v \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (3.4)$$

Bu denklemlerde, x, y: yatay koordinatlar; z: düşey koordinat; u, v, w: herhangi bir çözüm ağı noktasında sırasıyla x, y ve z yönlerindeki hız bileşenleri; p: basınç; t: zaman, g: yerçekimi ivmesi; ρ : akışkan yoğunluğu, f: Coriolis katsayısı; ν_h , ν_v : sırasıyla yatay ve düşey yönlerdeki türbülans vizkozitesidir (eddy akışkanlık katsayısı).

Süreklilik denkleminin (Eş. 3.1) derinlik boyunca integrali alınıp serbest yüzeyde kinematik sınır şartının uygulanmasıyla serbest yüzey denklemi elde edilir.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-H}^{\eta} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-H}^{\eta} v dz = 0 \quad (3.5)$$

Burada H: kıyas düzlemi altında kalan taban yüksekliğidir (Sakin su yüzeyinden olan derinlik) (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Eksen takımı

Bu çalışma kapsamında fırtına kaynaklı rüzgar kabarmasının hesabı için geliştirilen model iki boyutlu olup (derinlik boyunca ortalananmış) incelenecek deniz ortamında kullanılacak hareket denklemleri x ve y doğrultusu için aşağıda verilmiştir. Hareket denklemlerinin türetilmesinde geçerli tüm kabuller model için de geçerlidir .

$$\rho \left(\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} - fV \right) = -g\rho \frac{\partial \eta}{\partial x} + \tau_x^s / D - \tau_x^b / D + \rho N_h \Delta U \quad (3.6)$$

$$\rho \left(\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} - fU \right) = -g\rho \frac{\partial \eta}{\partial y} + \tau_y^s / D - \tau_y^b / D + \rho N_h \Delta V \quad (3.7)$$

Süreklilik denklemi,

$$\frac{\partial}{\partial x} UD + \frac{\partial}{\partial y} VD + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad (3.8)$$

$$\text{Toplam su derinliği } D = H + \eta \quad (3.9)$$

$$\text{Burada; } \Delta = \frac{\partial}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y^2} \quad (3.10)$$

Eşitliklerde belirtilen su düzeyi değişimi (η); zamanın ve konumun bir fonksiyonudur; $\eta(x, y, t)$. Eş. 3.6 – 3.8’de hız bileşenleri, derinlik boyunca ortalananmış hız bileşenleridir.

$$U = \frac{1}{D} \int_{-H}^{\eta} u dz \quad V = \frac{1}{D} \int_{-H}^{\eta} v dz \quad (3.11)$$

Benzer şekilde düşey yöndeki sürtünme terimi, derinlik boyunca integre edilirse; Eş. 3.6 ve Eş.3.7’de ifade edilen su yüzeyindeki ve su tabanındaki kesme kuvvetleri elde edilir.

$$\rho \int_{-H}^{\eta} \frac{\partial}{\partial z} N_v \frac{\partial u}{\partial z} dz = \tau_x^s - \tau_x^b \quad (3.12)$$

$$\rho \int_{-H}^{\eta} \frac{\partial}{\partial z} N_v \frac{\partial v}{\partial z} dz = \tau_y^s - \tau_y^b \quad (3.13)$$

Bu denklemlerde,

x, y : yatay koordinatlar;

t : zaman;

U, V : x ve y yönlerindeki derinlik boyunca ortalananmış hızlar;

f : Coriolis katsayısı;

ρ : su yoğunluğu;

p : basınç;

η : su düzeyi değişimi;

τ_x^s ve τ_x^b : x yönünde su yüzeyindeki ve su tabanındaki kesme kuvvetleri;

τ_y^s ve τ_y^b : y yönünde su yüzeyindeki ve su tabanındaki kesme kuvvetleri;

- D : toplam su derinliği;
H : su yüzünden olan derinlik;
 N_h : yatay doğrultudaki eddy vizkosite katsayısı.
 N_v : düşey doğrultudaki eddy vizkosite katsayısıdır.

3.1. Serbest Yüzey Sınır Koşulu

Serbest yüzeydeki rüzgar nedenli kesme kuvveti aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$[\tau_x^s, \tau_y^s] = \rho_a C_d [u_w, v_w] \sqrt{u_w^2 + v_w^2} \quad (3.14)$$

Bu eşitlikte; τ_x^s, τ_y^s : Rüzgar kuvvetinin x ve y doğrultusundaki bileşenleri; u_w ve v_w : Sırasıyla x ve y yönünde rüzgar hızının bileşenleri (m/sn); ρ_a : Havanın yoğunluğu; C_d : Boyutsuz olarak havanın sürüklenme katsayısıdır.

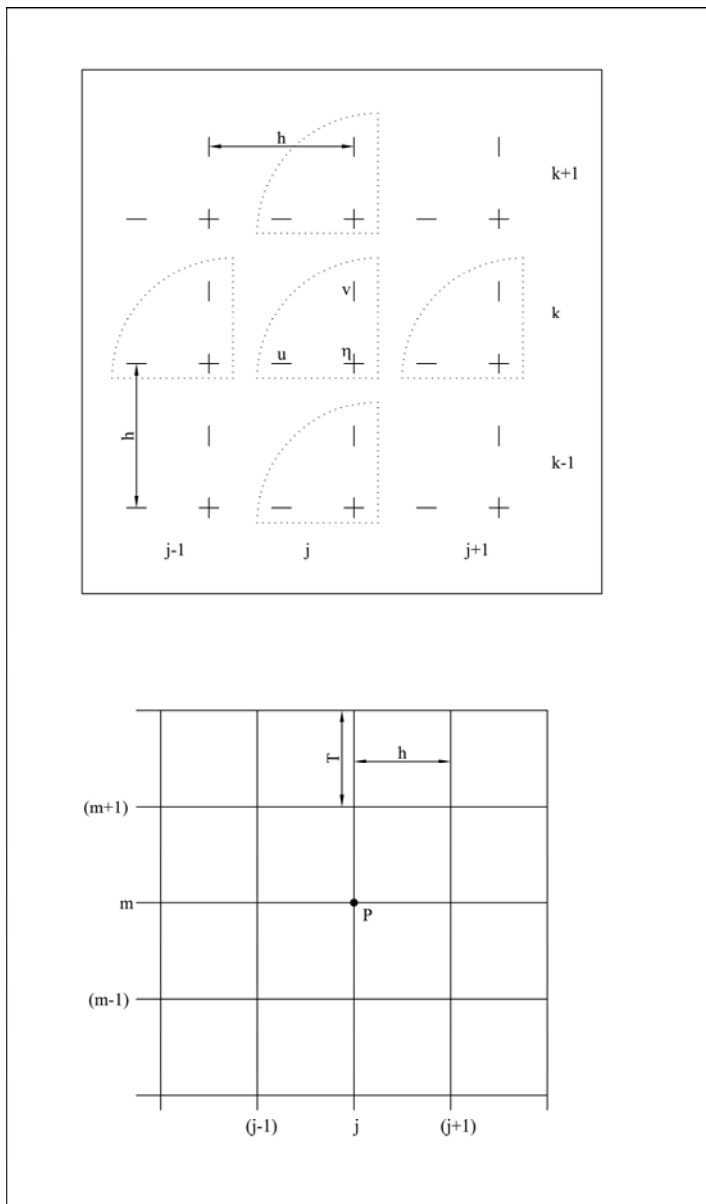
Aşağıda belirtilen rüzgar sürüklenme katsayısı eşitliği Large and Pond [20] tarafından önerilmiştir. Üç boyutlu modellemelerde sık sık kullanılan bu eşitlik, bu modellemede de kullanılmaktadır.

$$C_d = \begin{cases} 1,2 * 10^{-3} & U_w < 11 \text{ m/sn} \\ (0,49 + 0,065 U_w) * 10^{-3} & 11 \text{ m/sn} \leq U_w < 25 \text{ m/sn} \end{cases} \quad (3.15)$$

U_w : Rüzgar hızıdır.

4. SAYISAL YÖNTEM

Bu bölümde, rüzgar kaynaklı su kabarmasını benzeştirmek amacıyla geliştirilen modele ilişkin, iki boyutlu ve zamana bağlı kısmi diferansiyel denklemlerin çözümüne yönelik sayısal yaklaşımlara değinilecektir. Denklemlere sonlu farklar yöntemi, Şekil 4.1’de görülen şaşırtmacalı (staggered) çözüm ağı sistemi kullanılarak uygulanmıştır.



Şekil 4.1. Sayısal modelin şaşırtmacalı çözüm ağı sistemi

Şekil 4.1’de; T: zamansal çözümlemede hesap adım büyüklüğü, h: alansal çözüm ağı uzunluğunu göstermektedir. x ve y yönlerinde çözüm ağı uzunluğu (h) eşit alınmıştır. Her çözüm ağı noktası; hızın x yönündeki bileşeni (u), hızın y yönündeki bileşeni (v) ve su seviyesini (η) içermektedir.

Bölüm 3’de açıklanan Eş. 3.6 – Eş. 3.8 ifadelerinin çözümü için, sonlu farklar yaklaşımı aşağıdaki ifadelerde sunulmuştur. İfadelerde x yönündeki konum bileşeni ‘j’, y yönündeki konum bileşeni ‘k’ ve zaman ‘m’ indisleriyle ifade edilmiştir. Eş. 3.6 ‘u’ noktasında, Eş. 3.7 ‘v’ noktasında, Eş. 3.8 ‘ η ’ noktasında çözülmektedir [15].

$$\begin{aligned}
& \frac{U_{j,k}^{m+1} - U_{j,k}^m}{T} + UPOS(U_{j,k}^m - U_{j-1,k}^m)/h + UNEG(U_{j+1,k}^m - U_{j,k}^m)/h \\
& + VAUP(U_{j,k}^m - U_{j,k-1}^m)/h + VAUN(U_{j,k+1}^m - U_{j,k}^m)/h \\
& - f\bar{V}^{u,m} = -\frac{g}{h}(\eta_{j,k}^m - \eta_{j-1,k}^m) + \frac{1}{\rho D_{u,j,k}^m}(\tau_{x,j,k}^{s,m} - R_{x,j,k}^m U_{j,k}^m) \\
& + \frac{N_h}{h^2}(U_{j+1,k}^m + U_{j-1,k}^m + U_{j,k+1}^m + U_{j,k-1}^m - 4U_{j,k}^m)
\end{aligned} \tag{4.1}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{V_{j,k}^{m+1} - V_{j,k}^m}{T} + UAVP(V_{j,k}^m - V_{j-1,k}^m)/h + UAVN(V_{j+1,k}^m - V_{j,k}^m)/h \\
& + VPOS(V_{j,k}^m - V_{j,k-1}^m)/h + VNEG(V_{j,k+1}^m - V_{j,k}^m)/h \\
& + f\bar{U}^{v,m+1} = -\frac{g}{h}(\eta_{j,k+1}^m - \eta_{j,k}^m) + \frac{1}{\rho D_{v,j,k}^m}(\tau_{y,j,k}^{s,m} - R_{y,j,k}^m V_{j,k}^m) \\
& + \frac{N_h}{h^2}(V_{j+1,k}^m + V_{j-1,k}^m + V_{j,k+1}^m + V_{j,k-1}^m - 4V_{j,k}^m)
\end{aligned} \tag{4.2}$$

$$\frac{\eta_{j,k}^{m+1} - \eta_{j,k}^m}{T} = -\frac{1}{h}(U_{j+1,k}^{m+1} D_{u,j+1,k}^m - U_{j,k}^{m+1} D_{u,j,k}^m) - \frac{1}{h}(V_{j,k}^{m+1} D_{v,j,k}^m - V_{j,k-1}^{m+1} D_{v,j,k-1}^m) \tag{4.3}$$

Eş. 4.1 ve 4.2’de yer alan lineer olmayan terimlerin açılımları aşağıda ifade edilen yaklaşımla hesaplanmaktadır [15].

$$UPOS = \left(U_{j,k}^m + |U_{j,k}^m| \right) / 2 \quad (4.4)$$

$$UNEG = \left(U_{j,k}^m - |U_{j,k}^m| \right) / 2 \quad (4.5)$$

$$VAUP = \left(\overline{V}^{u,m} + |\overline{V}^{u,m}| \right) / 2 \quad (4.6)$$

$$VAUN = \left(\overline{V}^{u,m} - |\overline{V}^{u,m}| \right) / 2 \quad (4.7)$$

$$VPOS = \left(V_{j,k}^m + |V_{j,k}^m| \right) / 2 \quad (4.8)$$

$$VNEG = \left(V_{j,k}^m - |V_{j,k}^m| \right) / 2 \quad (4.9)$$

$$UAVP = \left(\overline{U}^{v,m+1} + |\overline{U}^{v,m+1}| \right) / 2 \quad (4.10)$$

$$UAVN = \left(\overline{U}^{v,m+1} - |\overline{U}^{v,m+1}| \right) / 2 \quad (4.11)$$

Eş. 4.1 ve Eş. 4.2’de şaşırtmacalı çözüm ağı kullanılmasından dolayı, u hızının ifade edildiği noktalarda v hızını tanımlamak, benzer şekilde v hızının ifade edildiği noktalarda u hızını tanımlamak için hızların ortalaması alınmaktadır. Şekil 4.1’de görüldüğü gibi, çözüm ağının m zaman adımında j, k ; j-1, k ; j-1, k-1 ; j, k-1 noktalarındaki u hızlarının ve j, k ; j, k+1 ; j+1, k+1 ; j+1, k noktalarındaki v hızlarının ortalaması aşağıdaki eşitliklerle ifade edilmektedir [15].

$$\overline{V}^{u,m} = 0,25(V_{j,k}^m + V_{j-1,k}^m + V_{j-1,k-1}^m + V_{j,k-1}^m) \quad (4.12)$$

$$\overline{U}^{v,m+1} = 0,25(U_{j,k}^{m+1} + U_{j,k+1}^{m+1} + U_{j+1,k+1}^{m+1} + U_{j+1,k}^{m+1}) \quad (4.13)$$

Şekil 4.1’de tanımlanan sayısal çözüm ağı sisteminde, su derinlikleri ‘η’ noktalarına ortalamaları alınarak taşınmaktadır. Buna göre; u ve v hızlarının hesaplandıkları noktalarındaki su derinlikleri ve toplam su derinliği sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$D_{u,j,k} = 0,5(D_{j,k} + D_{j-1,k}) \quad (4.14)$$

$$D_{v,j,k} = 0,5(D_{j,k} + D_{j,k+1}) \quad (4.15)$$

$$D = H + \eta \quad (4.16)$$

Eş. 4.16’da belirtildiği gibi toplam su derinliği sadece x ve y doğrultusundaki konumun bir fonksiyonu olmayıp, aynı zamanda su seviyesi değişimini de içeren zamanın bir fonksiyonudur.

Su tabanındaki sürtünme kuvvetleri (τ^b), aşağıdaki eşitliklerle ifade edilmektedir.

$$\tau_{x,j,k}^{b,m} = R_{x,j,k}^{m-1} \cdot U_{j,k}^m \quad (4.17)$$

$$\tau_{y,j,k}^{b,m} = R_{y,j,k}^{m-1} \cdot V_{j,k}^m \quad (4.18)$$

Şaşırtmacalı çözüm ağı kullanılmasından dolayı, u noktası etrafındaki v hızlarının ve v noktası etrafındaki u hızlarının ortalaması alınmaktadır. Burada,

$$R_{x,j,k}^{m-1} = r \cdot \sqrt{[(U_{j,k}^{m-1})^2 + (\bar{V}^{u,m-1})^2]} / (\rho D_{u,j,k}^{m-1}) \quad (4.19)$$

$$R_{y,j,k}^{m-1} = r \cdot \sqrt{[(\bar{U}^{v,m-1})^2 + (V_{j,k}^{m-1})^2]} / (\rho D_{v,j,k}^{m-1}) \quad (4.20)$$

Burada taban sürtünme terimleri (m-1) zaman adımıda açılmıştır. Bu ifadenin m zaman adımıda açılmama nedeni, denklemin stabilite şartını sağlamamasından kaynaklanmaktadır. Matematiksel ifadenin doğruluğunu ve stabiliteyi arttırmak için bu terimlerin yarı – kapalı (semi – implicit) olarak ifadesi [15];

$$U_{j,k}^m = \frac{U_{j,k}^{m-1} + U_{j,k}^{m+1}}{2} \quad (4.21)$$

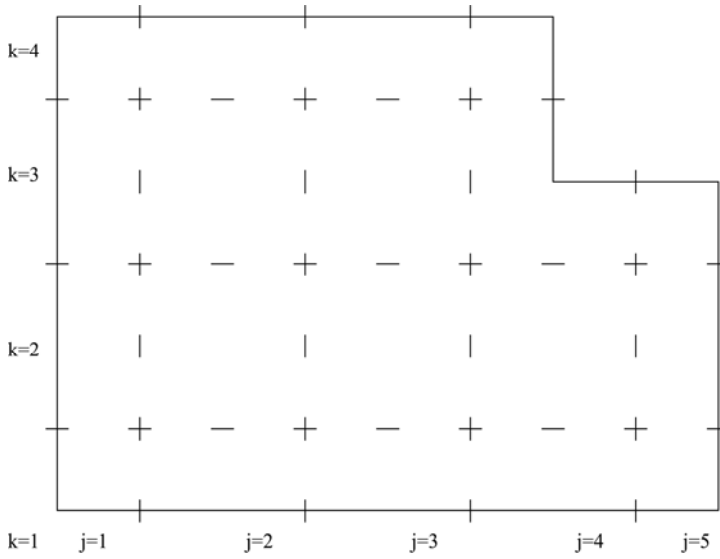
$$V_{j,k}^m = \frac{V_{j,k}^{m-1} + V_{j,k}^{m+1}}{2} \quad (4.22)$$

Taban sürtünme kuvvetini ifade eden denklemler toplam su derinliğine (D) bağlıdır. Ancak bu yaklaşım $D \rightarrow 0$ olması durumunda geçerli değildir. Dolayısıyla bir minimum su derinliği (0,10 m), stabil olmayan – kararsız durumu önlemek için seçilmelidir. Yatay doğrultudaki sürtünme terimleri m zaman adımıda ifade edilerek stabilite şartı gerçekleştirilebilir.

$$\left. \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \right|_{j,k}^m = \frac{U_{j+1,k}^m - 2 \cdot U_{j,k}^m + U_{j-1,k}^m}{h^2} \quad (4.23)$$

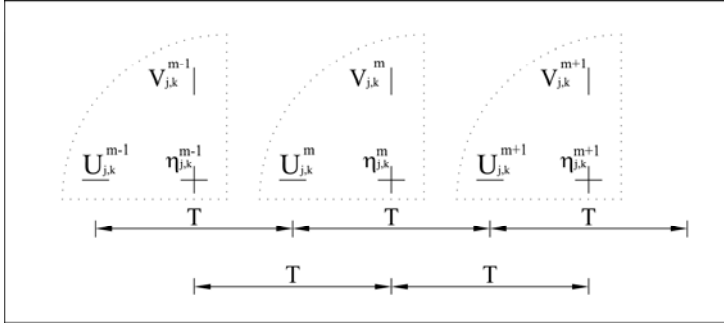
$$\left. \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right|_{j,k}^m = \frac{U_{j,k+1}^m - 2 \cdot U_{j,k}^m + U_{j,k-1}^m}{h^2} \quad (4.24)$$

Eş. 4.1 – 4.3 ifadeleri u, v, ve η noktalarında çözümlenmektedir. Çözüm noktalarının numaralandırılması Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Çözüm ağı numaralandırılması

Eş. 4.1 – 4.3’te zamansal çözümleme T zaman adımıyla gerçekleştirilmektedir. İkinci türevler birinci dereceden, $\theta(\Delta x^2)$ ve $\theta(\Delta y^2)$ doğruluk mertebesinde merkezi sonlu farklar açılımı ile yaklaşılmaktadır. Öncelikle m+1 zaman adımıyla eski su seviyeleri (η^m , η^{m-1}) kullanılarak yeni hız bileşenleri (U^{m+1} , V^{m+1}) hesaplanmakta, hesaplanan yeni hız bileşenlerinden T zaman adımı sonrasında yeni su seviyesi (η^{m+1}) hesaplanmaktadır (Şekil 4.3) [15].



Şekil 4.3. Zamansal çözüm ağı

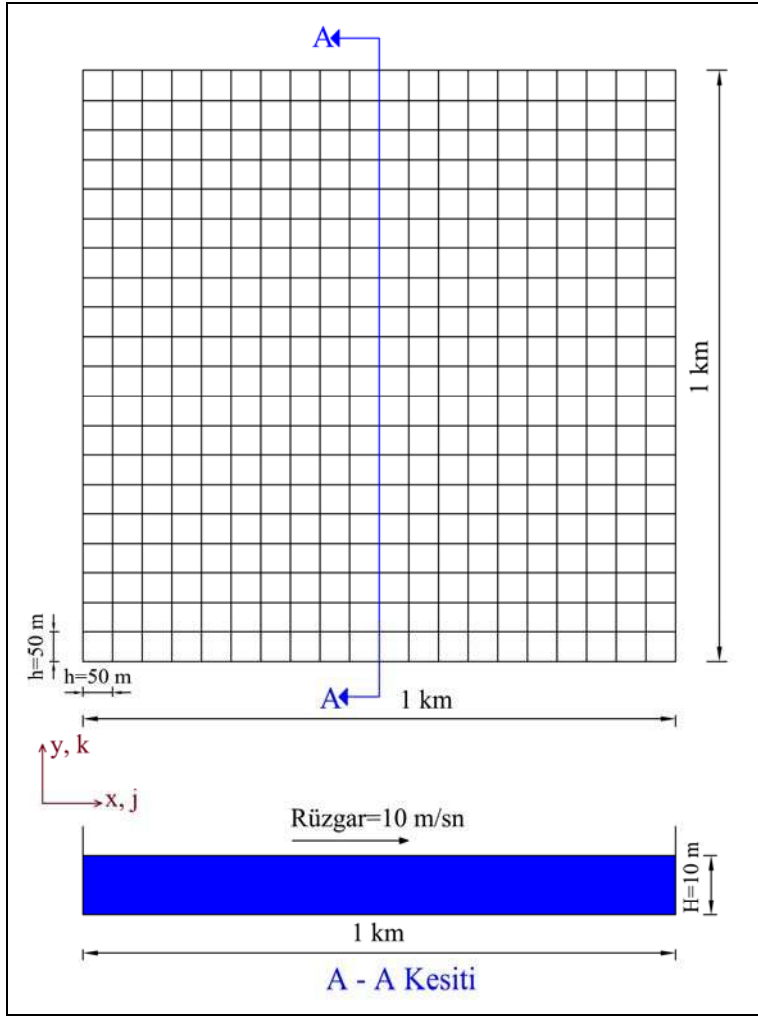
Her iki hesap doğrultusunda (x ve y yönünde) çözüm ağı uzunluğu sabit alınmıştır. Zamansal çözümlemede hesap adım büyüklüğü (T), Eş. 1.1’de verilen stabilite denklemini sağlayacak şekilde seçilmiştir (Bkz. EK-1).

5. SAYISAL MODEL UYGULAMALARI

Bu bölümde, geliştirilen sayısal model, ilk olarak daha önce yapılmış olan analitik çalışmayla karşılaştırılmış, daha sonra ise Bodrum Gökova Körfezi kıyı alanına uygulanmıştır.

5.1. Sayısal Modelin Analitik Çalışma ile Karşılaştırılması

Rüzgar etkisiyle oluşan kabarmanın analitik çözümü ile model benzeştirmeleri karşılaştırılmıştır. Kenar uzunluğu 1 km, düz tabanlı ve su derinliği $H = 10$ m olan kapalı bir kanal seçilmiştir (Şekil 5.1). Modelde çözüm ağı uzunluğu, $h = 50$ m olarak alınmıştır. T zaman adımı 10 sn seçilmiştir. Sistemin $T = 0$ anındaki hız vektörel alanı sıfır kabul edilmiş ve başlangıçta durgun su yüzeyi olduğu düşünülmüştür. y doğrultusunda sabit bir rüzgar hızına ($U_w = 10$ m/sn) bağlı olarak su kabarmasının hesabı gerçekleştirilmiştir. Analitik çözümlemede; yataydaki türbülans, taban sürtünme etkileri ve Coriolis etkisi dikkate alınmamıştır. Sayısal model, su alanında kabarma yüksekliklerinin zamanla değişmediği yatışkın duruma (steady-state) erişilene kadar çalıştırılmıştır.



Şekil 5.1. Çözüm ağı

Serbest yüzeyde rüzgar nedenli kesme kuvveti Bölüm 3.1’de ifade edildiği gibi hesaplanmaktadır. y doğrultusunda 10 m/sn sabit hızla esen rüzgar için boyutsuz olarak havanın sürüklemeye katsayısı Eş. 3.9 yardımıyla; $C_d = 1,2 \times 10^{-3}$, suyun yoğunluğu $\rho = 1020 \text{ kg/m}^3$, havanın yoğunluğu $\rho_a = 1,25 \text{ kg/m}^3$ olmak üzere rüzgar kesme kuvveti Eş. 3.8 yardımıyla; $\tau = 0,15 \text{ kg/m sn}^2$ olarak hesaplanmıştır. Rüzgar nedeniyle oluşan kabarma yüksekliği yüzey sürüklemeye ve yerçekimsel kuvvetlerin dengesiinden aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\Delta h = \frac{u_*^2 L_b}{gH} \quad (5.1)$$

Burada, Δh ; kabarma yüksekliği, $u_{*s} = \sqrt{\frac{\tau^s}{\rho}}$; kayma hızı, L_b ; rüzgarın esme yönünde su alanı uzunluğu, g ; yerçekimi ivmesi, H ; su derinliğidir.

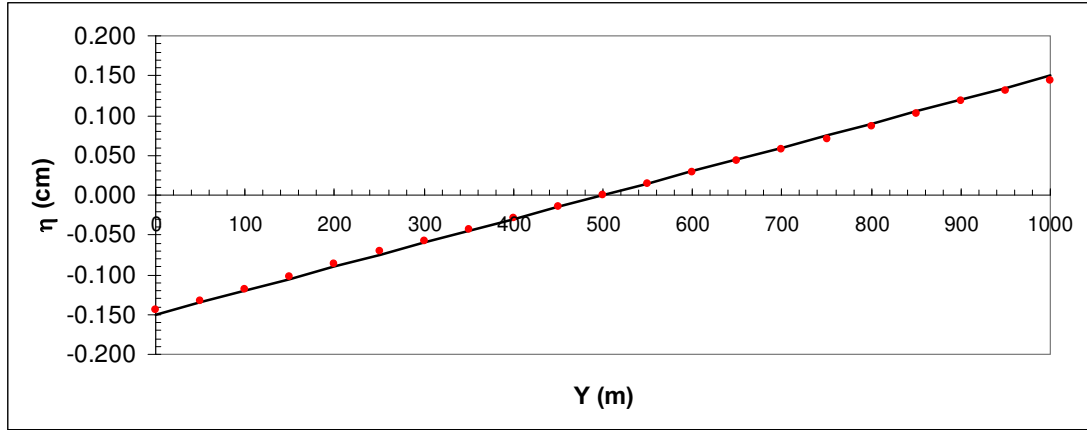
Kanalın merkezinden geçen eksen için ($x = 500$ m), analitik çözümde hesaplanan kabarma yükseklikleri sayısal çözümleme ile karşılaştırılmış ve Şekil 5.2’de sunulmuştur.

Sayısal ve analitik çözümleme arasındaki hata değerleri Eş. 5.2 ve Eş. 5.3 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Bağıl Hata (\%)} = \left| \frac{\text{Gerçek Değer} - \text{Hesaplanan Değer}}{\text{Gerçek Değer}} \right| \times 100 \quad (5.2)$$

$$\text{RMS (\%)} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\text{Gerçek Değer} - \text{Hesaplanan Değer})^2}}{N} \times 100 \quad (5.3)$$

Yatay çözüm ağı uzunluğu $h = 50$ m seçilmiştir. Çizelge 5.1’de ise hesaplanan bağıl hata yüzdeleri verilmiştir. Analitik çözüm ile sayısal model sonuçları arasındaki RMS hata değeri 0,0622 olarak hesaplanmıştır. Sonuçlardan görülebileceği gibi, sayısal çözümün analitik çözüme çok yakın sonuçlar vermesi, analitik çalışma ile model sonuçlarının uygunluk içinde olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.2. Su yüzü eğiminin karşılaştırılması (Düz çizgi; analitik çözüm, noktalar; sayısal model sonuçları)

Çizelge 5.1. Seçilen ‘h = 50 m’ çözüm ağı uzunluğu için hata değerleri

h (m)	ANALİTİK ÇÖZÜM	SAYISAL MODEL	Bağıl Hata (%)
	SU KABARMASI (cm)		
0	-0.150	-0.144	3.829
50	-0.135	-0.132	1.892
100	-0.120	-0.118	1.409
150	-0.105	-0.102	2.375
200	-0.090	-0.086	4.067
250	-0.075	-0.071	5.430
300	-0.060	-0.058	3.012
350	-0.045	-0.044	1.286
400	-0.030	-0.029	4.868
450	-0.015	-0.014	6.826
500	0.000	0.000	0.000
550	0.015	0.014	6.826
600	0.030	0.029	4.868
650	0.045	0.044	1.286
700	0.060	0.058	3.012
750	0.075	0.071	5.430
800	0.090	0.086	4.067
850	0.105	0.102	2.375
900	0.120	0.118	1.409
950	0.135	0.132	1.892
1000	0.150	0.144	3.829

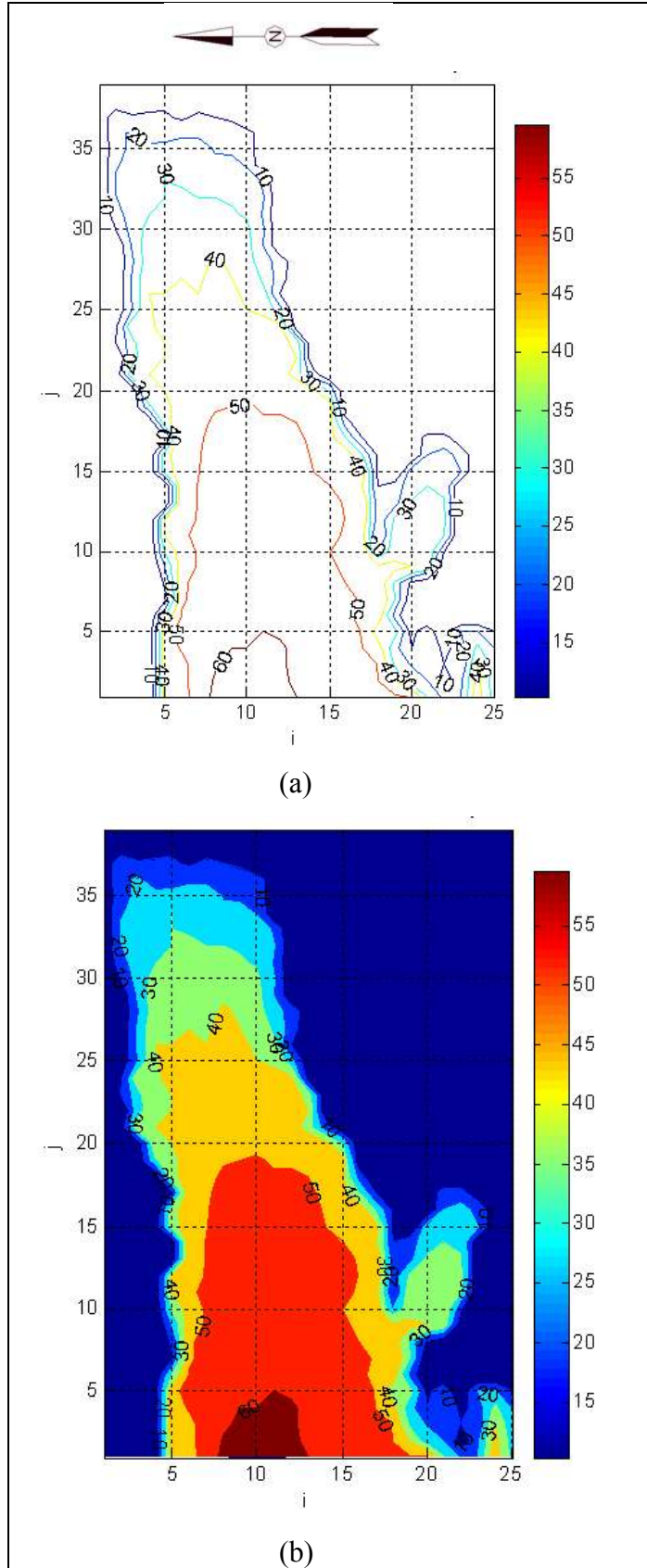
5.2. Sayısal Modelin Gökova Körfezi Kıyı Alanına Uygulanması

Sayısal model, Türkiye Ege Bölgesi, Muğla ili Gökova Körfezi kıyı alanına uygulanmıştır (Harita 5.1). Uygulama alanı olarak seçilen $28^{\circ} 12' - 28^{\circ} 20' E$, $36^{\circ} 58' - 37^{\circ} 03' N$ arasındaki su alanının batimetrik haritası Şekil 5.3’de gösterilmiştir.

Ege denizinin Güney doğu kesiminde Muğla il sınırları içinde yer alan Gökova körfezi, Doğu - Batı doğrultusunda 100 km, Kuzey - Güney doğrultusunda 30 km (en batı ucunda) uzunlukta ve kuzeyde Bodrum yarımadası, güneyde Datça yarımadası, batıda İstanköy (Kos) adası ile sınırlıdır [24].

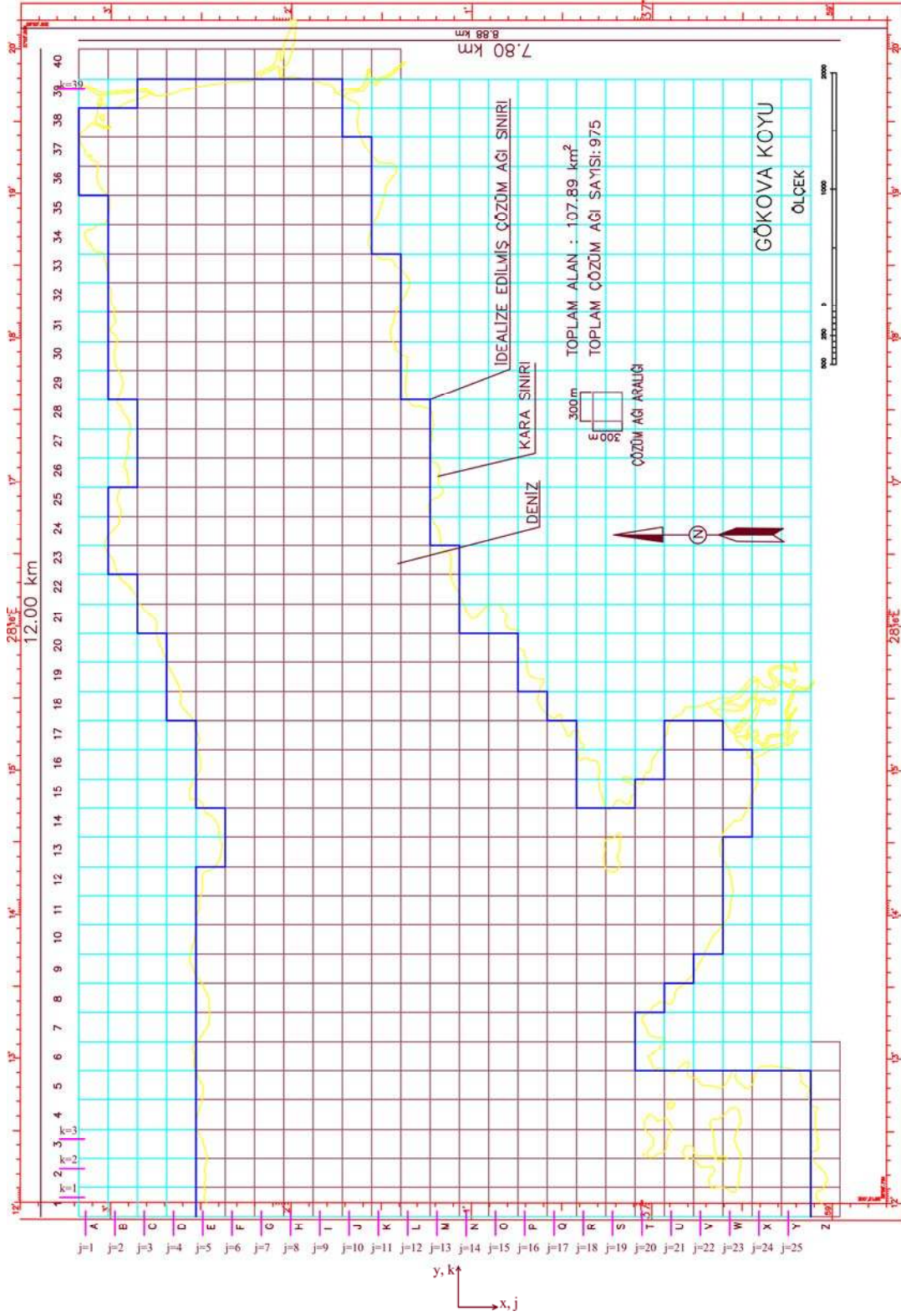


Harita 5.1. Gökova Körfezi kıyı alanı

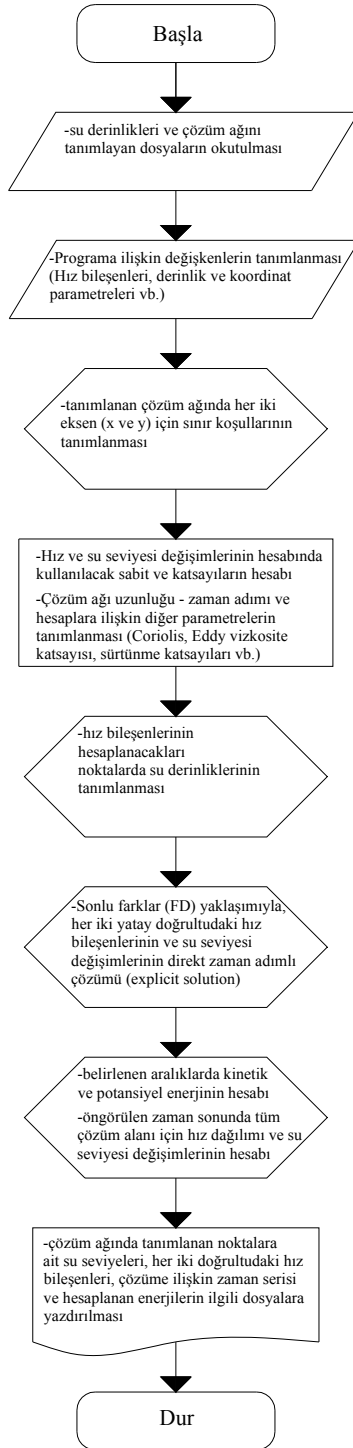


Şekil 5.3. Gökova Körfezi su derinlikleri (m)

Uygulama alanı, sayısal çözümleme için her iki yönde eşit çözüm ağı aralıklarına ($h = 300$ m) bölünerek çözüm ağı tanımlanmıştır. Çözüm ağı toplam $107,9 \text{ km}^2$ olup, sayısal çözümlemede kullanılan çözüm ağı nokta sayısı 975'dir (x yönünde 25; y yönünde 39). Model çözüm ağı Şekil 5.4'de görülmektedir. Karada derinlikler sıfır olarak tanımlanmış, denizde ise her bir çözüm ağı noktasının koordinatı ve derinlikleri programın giriş dosyasına kaydedilmiştir. Sayısal yöntem bölümünde değinildiği üzere her bir çözüm ağı noktasında her iki doğrultudaki hızlar ve su seviyesi değişimleri hesaplanmıştır. Çözümlemelerde dinamik stabilite koşulunu gerçekleyen $T = 10$ sn lik bir zaman aralığı seçilmiştir.

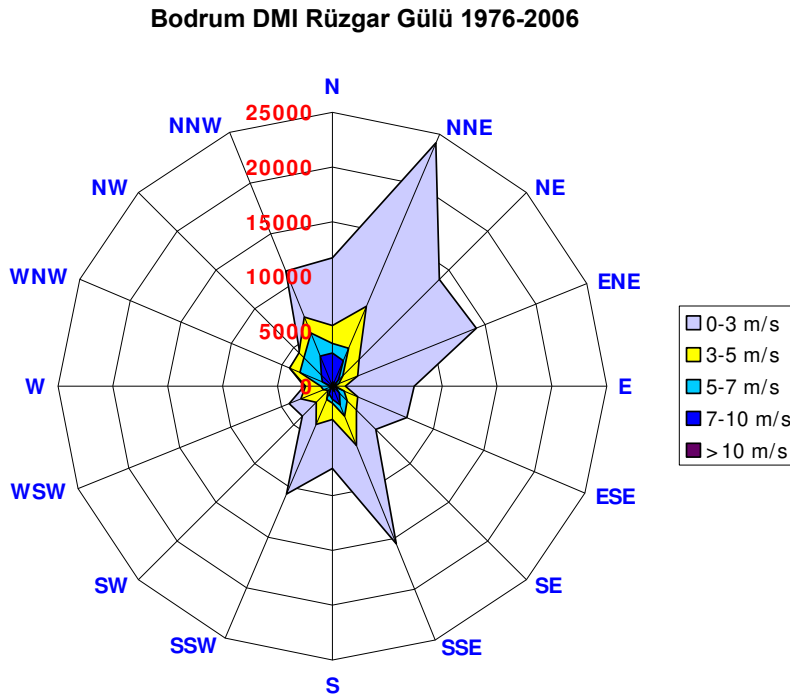


Fırtına Kabarmasını iki boyutlu olarak, değişken bir geometriye sahip çözüm ağında benzeştiren modelin özet akış diyagramı Şekil 5.5’de gösterilmiştir.

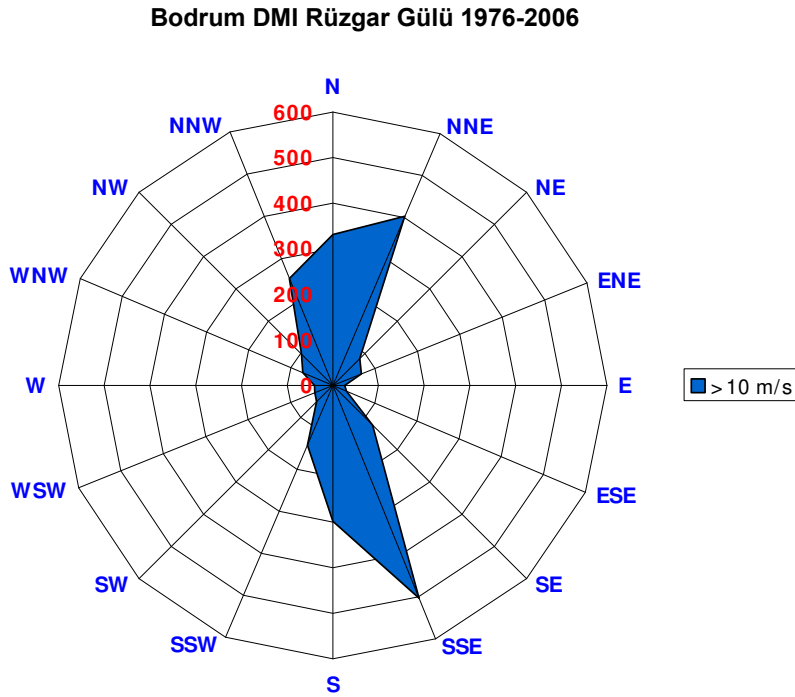


Şekil 5.5. Geliştirilen modelin özet akış diyagramı

Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nden alınan Bodrum meteoroloji istasyonuna ait 31 yıllık (1976 – 2006) rüzgar verisi kullanılarak rüzgar gülü elde edilmiştir (Şekil 5.6 ve Şekil 5.7). 31 yıllık rüzgar verileri incelendiğinde en yüksek rüzgar hızının N yönünden 20,6 m/sn olduğu görülmektedir. Körfezin konumu itibarıyla en fazla rüzgar esme mesafesi NW – SW aralığındadır. Model uygulamalarında körfez için etkin rüzgar kabarması oluşturabilecek yönler olan NW – SW aralığı ve en şiddetli rüzgarların estiği NNE yönü çalışılmıştır.



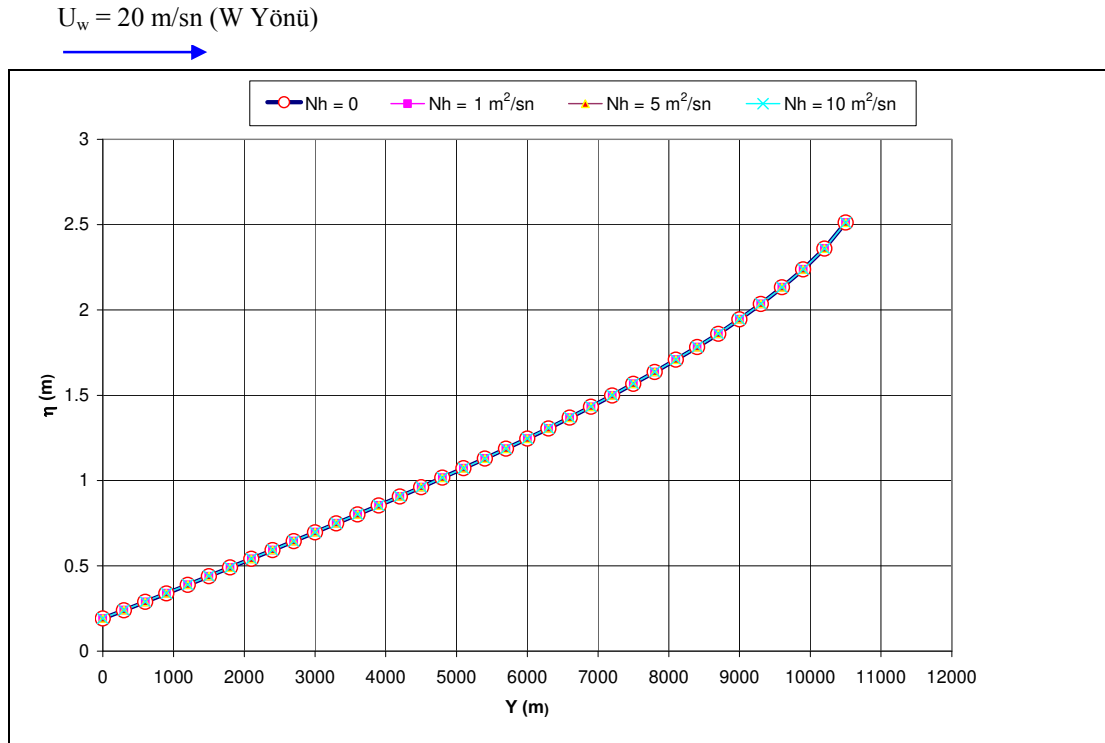
Şekil 5.6. Bodrum DMI rüzgar gülü



Şekil 5.7. Bodrum DMI rüzgar gülü (10 m/sn'den büyük hızlar için)

Ek 2'de seçilen etkin yönlerle ait histogramlar ve çeşitli hız aralıklarına göre çizilen rüzgar gülleri sunulmuştur. Ayrıca kısa olarak rüzgar ve karakteristikleri tariflenmiştir.

Körfezde rüzgar etkenli çevrinti düzeni ve su seviyesi değişimleri (kabarma yükseklikleri) farklı yönlerden esen rüzgarlara göre benzeştirilmiştir. Buna ek olarak rüzgar hızı (U_w) sabit kalmak şartı ile, yataydaki türbülansın ve taban sürtünme etkilerinin kabarmaya olan etkileri irdelenmiştir. Bu amaçla sayısal çalışmalarda ilk olarak körfez yüzey sularına, rüzgar verilerindeki en yüksek rüzgar hızı olan $U_w = 20$ m/sn, W yönünden etkiltilmiştir. Sayısal çözümlemelerde öncelikle, su alanında yatay doğrultudaki Eddy viskozite (N_h) etkisi ihmal edilmiş, daha sonra Eş. 5.5'te belirtilen, alt çözüm ağı ölçekli türbülans modeli baz alınarak seçilen $N_h = 1$ m²/sn, $N_h = 5$ m²/sn ve $N_h = 10$ m²/sn değerleri dikkate alınarak çözüm yapılmıştır [25]. Su alanında rüzgarın esme yönünde dikkate alınan kesitte ($X = 2400$ m), değişen N_h değerlerine göre su yüzü profilleri (kabarma yükseklikleri) Şekil 5.8'de gösterilmiştir.



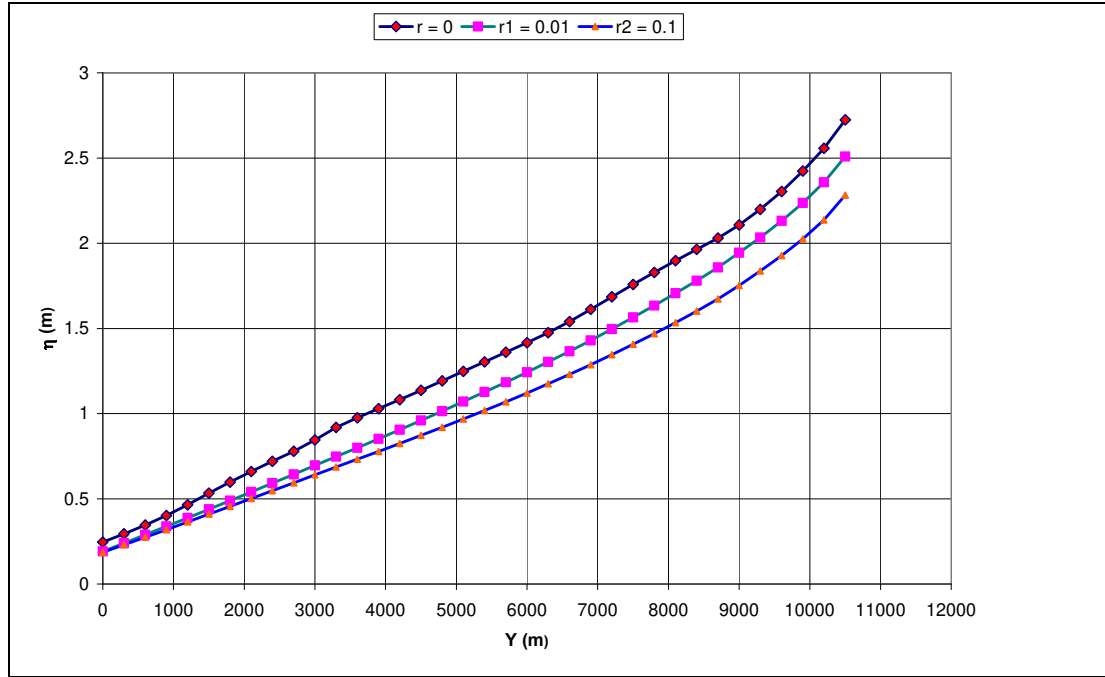
Şekil 5.8. Yatay doğrultudaki Eddy viskozitesinin (N_h) rüzgarın esme yönünde, $X = 2400 \text{ m}$ 'de alınan kesit boyunca, su yüzü profiline etkisi

$$N_h = 0,01h^2 \left(\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (5.5)$$

Sayısal çözüm sonuçları incelendiğinde, yataydaki viskozitenin su kabarmasında etkin bir parametre olmadığı, N_h değeri 10 kat arttırıldığında dahi, su düzeyi değişiminin sadece birkaç cm arttığı görülmüştür. Ayrıca seçilen N_h değerlerinin uygun olduğu, sayısal çözümleme stabilitesini etkilemediği görülmüştür.

Taban sürtünme gerilmelerinin su kabarmasına etkisini incelemek amacıyla, sayısal model 3 farklı durum için su alanına uygulanmıştır. İlk olarak taban sürtünme etkisi ihmal edilmiş (taban sürtünme katsayısı, $r = 0$), daha sonra taban sürtünme etkisi denklemlerde dikkate alınarak ($r1 = 0,01$) çözüm yapılmış ve sürtünme katsayısı on katına çıkartılarak ($r2 = 0,10$) bir başka çözüm gerçekleştirilmiştir. Sabit rüzgar hızına göre, değişik taban sürtünme katsayıları dikkate alınarak hesaplanan kabarma yükseklikleri, rüzgarın esme yönünde alınan kesit boyunca ($X = 2400 \text{ m}$), Şekil

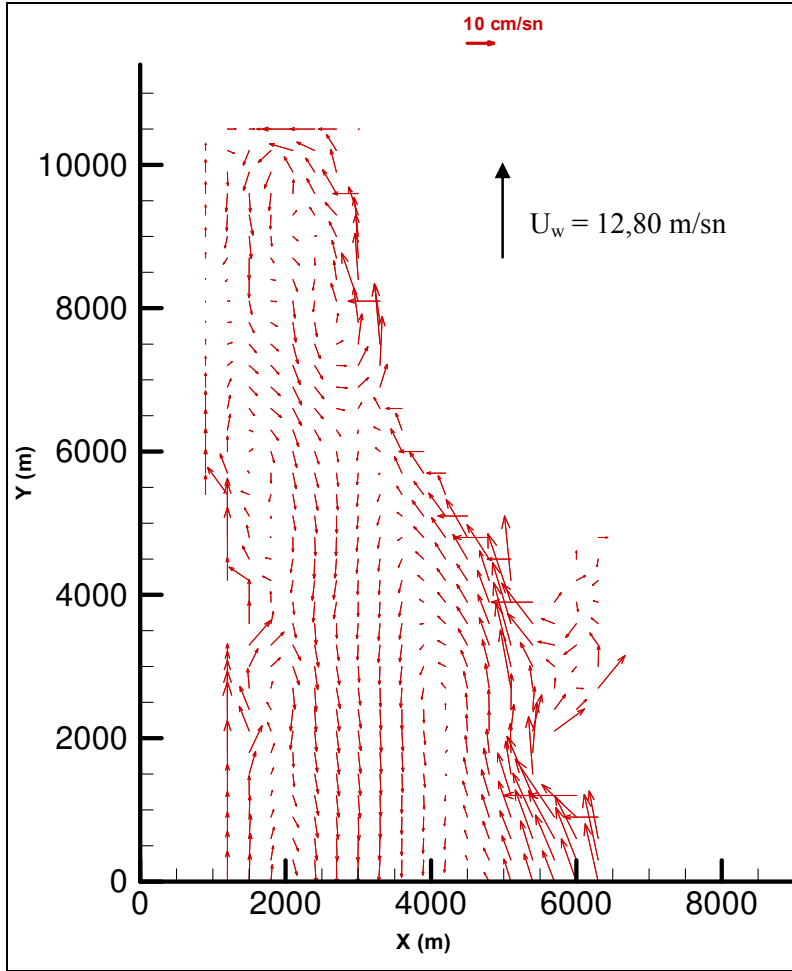
5.9’da gösterilmektedir. Sayısal model sonuçları incelendiğinde taban sürtünme kuvvetlerinin dikkate alınmadığı durumda daha büyük kabarma yüksekliklerinin olduğu gözlenmiştir. Artan taban sürtünme etkisi kabarmayı azaltacak yönde olmaktadır.



Şekil 5.9. Taban sürtünme kuvvetinin rüzgarın esme yönünde, X = 2400 m’de alınan kesit boyunca, su yüzü profiline etkisi

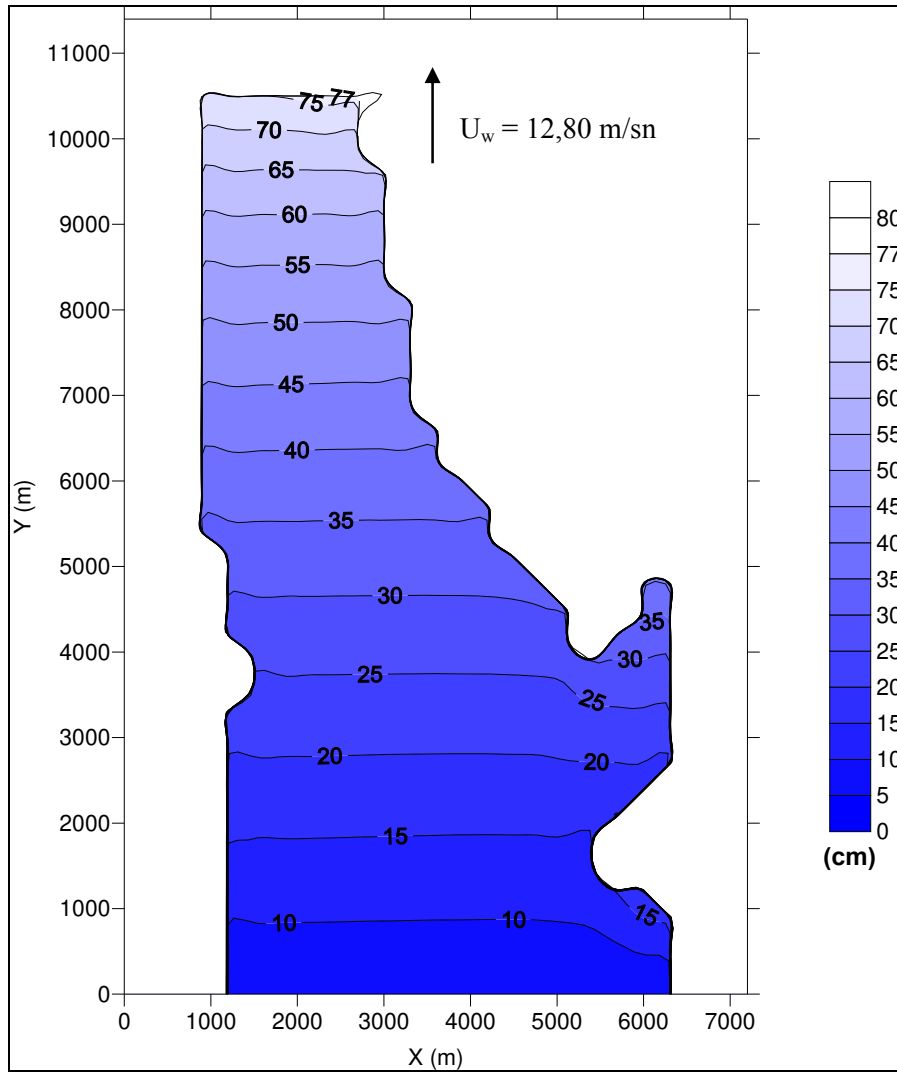
Körfezde rüzgar etkenli çevrinti düzeni ve su seviyesi değişimlerini benzeştirmek amacıyla, rüzgar kabarmasını oluşturabilecek etkin yönler olan NW – SW aralığı ve en şiddetli rüzgarların estiği NNE yönü için çözüm yapılmıştır. Bu amaçla; rüzgar verileri dikkate alınarak, her yön için kaydedilmiş 31 yıl içerisindeki maksimum rüzgar hızına bağlı olarak rüzgar kesme kuvvetleri hesaplanmış ve su alanında yatışkın duruma erişlene kadar çözümler uygulanmıştır. Sayısal model hesaplamaları sonucunda her yön için benzeştirilen kabarma yükseklikleri, hız dağılımları (çevrinti düzeni) ve rüzgarın esme yönünde alınan kesit/kesitler boyunca su yüzü değişimi gösterilmiştir.

$U_w = 12,80$ m/sn (W yönü) için çevrinti düzeni Şekil 5.10'da gösterilmiştir. Çevrinti etkisiyle körfezde maksimum ortalama hız 27 cm/sn olarak gözlenmiştir.



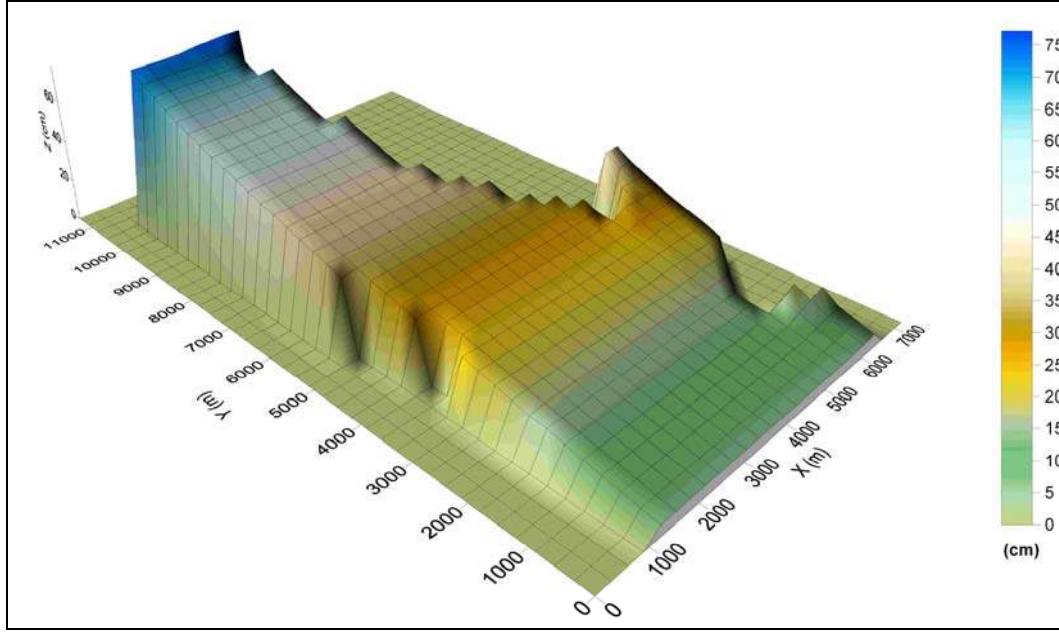
Şekil 5.10. Körfezdeki ortalama çevrinti düzeni (cm/sn) ($U_w = 12,80$ m/sn - W yönü)

Körfezde en uzun rüzgar esme mesafesi yönünde (W) oluşan kabarma yükseklikleri (cm), Şekil 5.11'te görülmektedir. Rüzgar etkisiyle körfezde 2,5 günün sonunda oluşan maksimum kabarma yüksekliği $\Delta h = 77$ cm olarak gözlenmiştir.

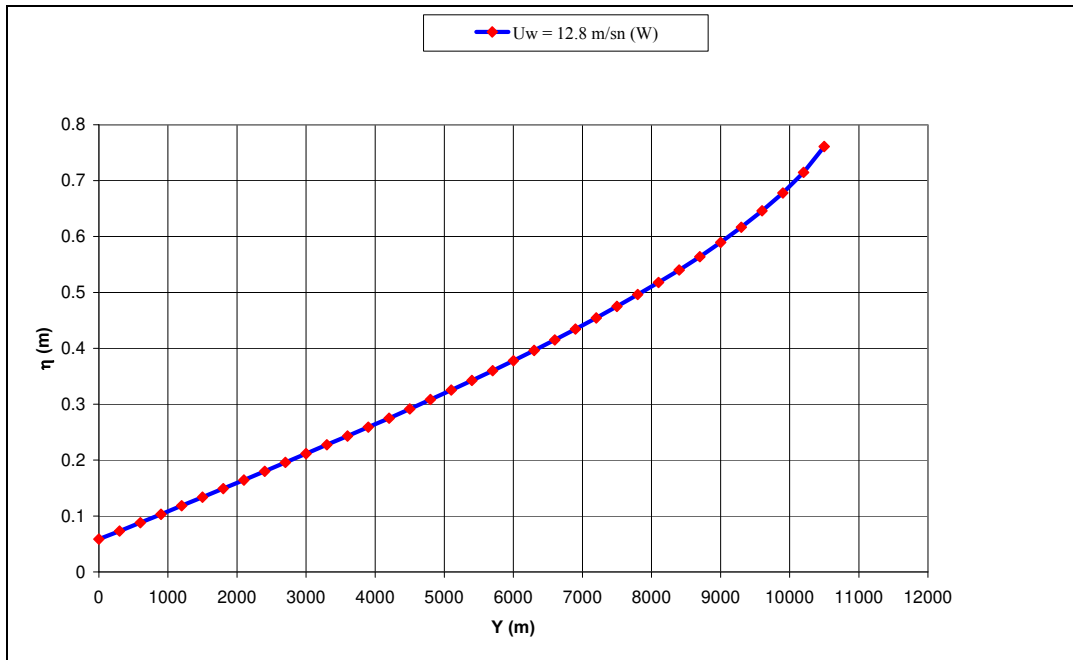


Şekil 5.11. Körfezdeki su düzeyi değişimi (cm) ($U_w = 12,80$ m/sn - W yönü)

Körfezde oluşan kabarma yüksekliklerinin üç boyutlu gösterimi Şekil 5.12’de sunulmuştur. Rüzgarın feç uzunluğu boyunca kabarma yükseklikleri derin denizden, sığ kıyı alanlarına doğru artış göstermektedir. Körfezde rüzgarın esme yönünde $X = 2400$ m’de alınan kesit boyunca su yüzü profili Şekil 5.13’te gösterilmiştir.

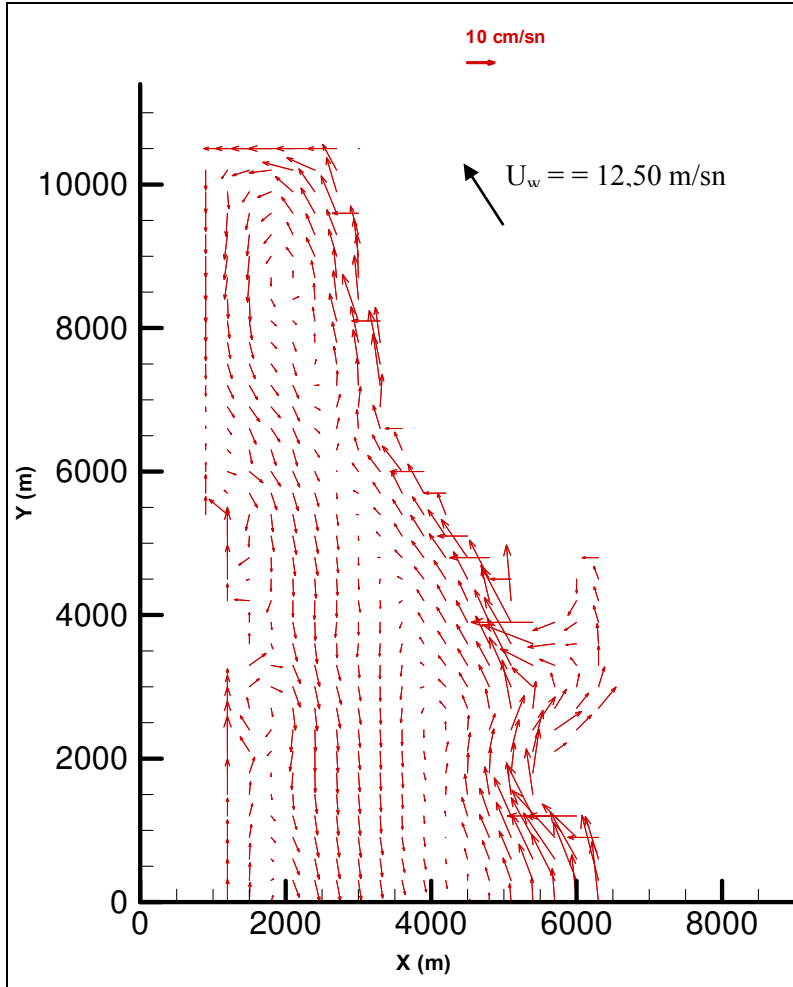


Şekil 5.12. 3 Boyutlu olarak körfezdeki su düzeyi değişimi (cm)
($U_w = 12,80$ m/sn - W yönü)



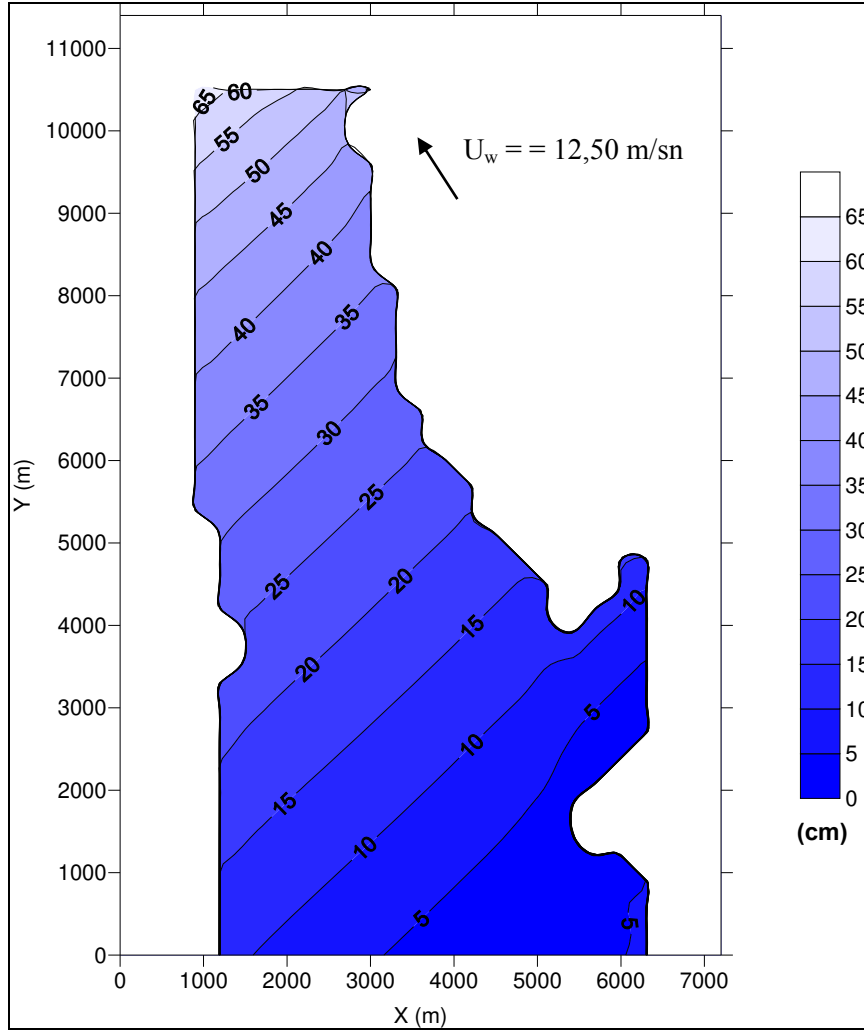
Şekil 5.13. Körfezde $X = 2400$ m'de alınan kesit boyunca su yüzü profili
($U_w = 12,80$ m/sn - W yönü)

$U_w = 12,50$ m/sn (SW yönü) için çevrinti düzeni Şekil 5.14’da gösterilmiştir. Çevrinti etkisiyle körfezde maksimum ortalama hız 25 cm/sn olarak gözlenmiştir.



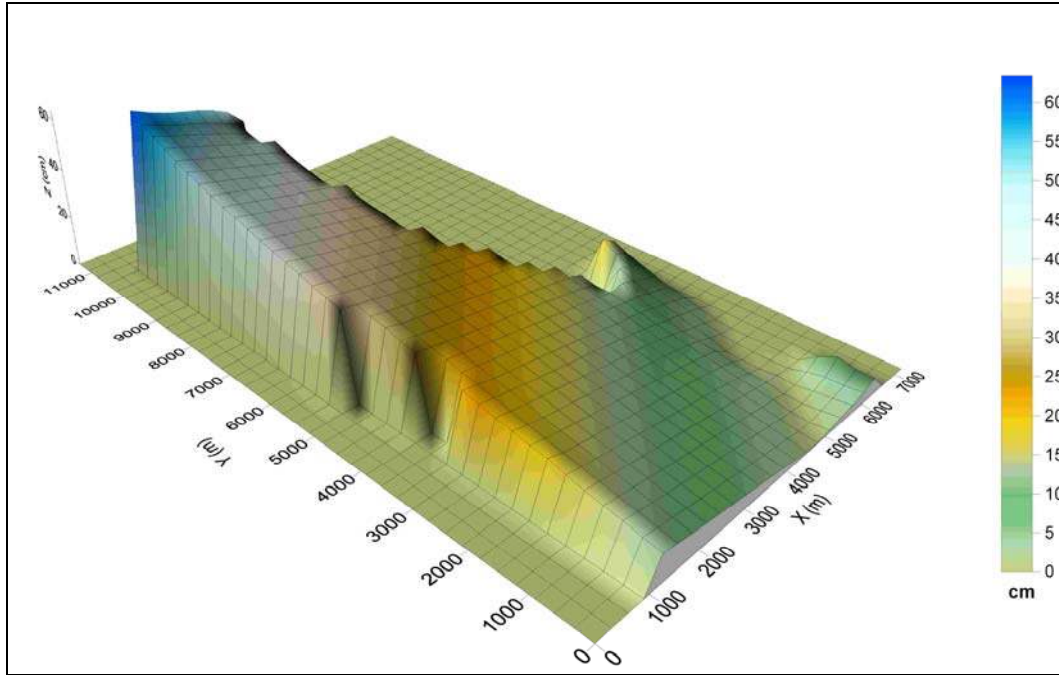
Şekil 5.14. Körfezdeki ortalama çevrinti düzeni (cm/sn)
($U_w = 12,50$ m/sn - SW yönü)

Körfezde SW yönünde oluşan kabarma yükseklikleri (cm), Şekil 5.15’de görülmektedir. Rüzgar etkisiyle körfezde 2,5 günün sonunda oluşan maksimum kabarma yüksekliği $\Delta h = 64$ cm olarak gözlenmiştir.



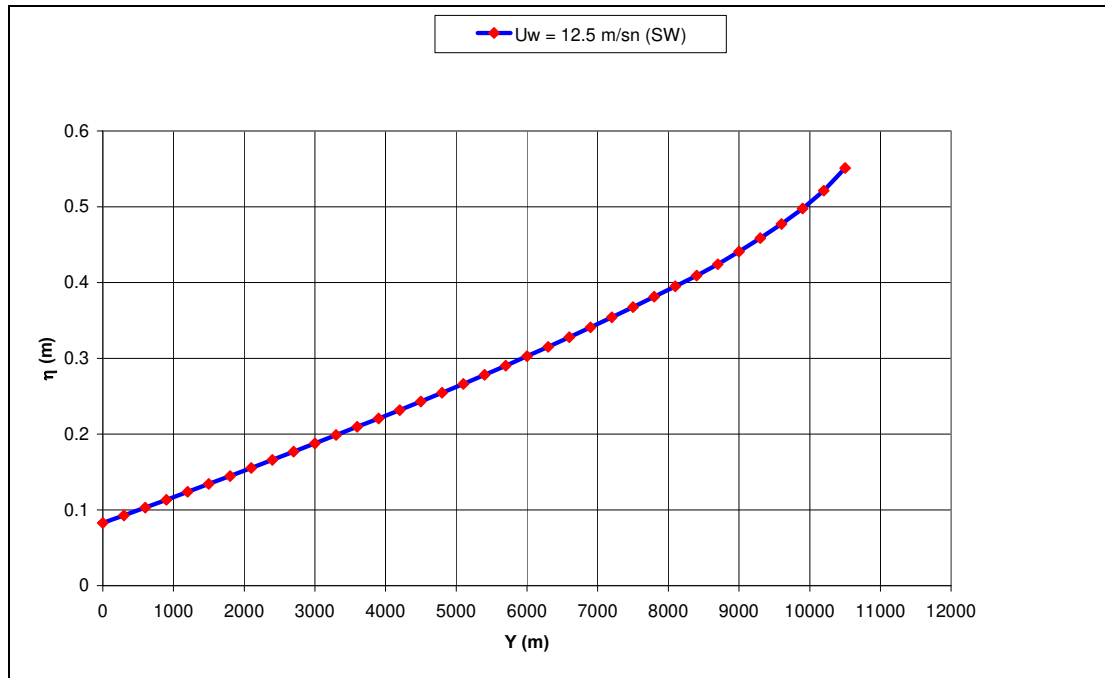
Şekil 5.15. Körfezdeki su düzeyi değişimi (cm) ($U_w = 12,50 \text{ m/sn}$ - SW yönü)

Körfezde oluşan kabarma yüksekliklerinin üç boyutlu gösterimi Şekil 5.16'da sunulmuştur.

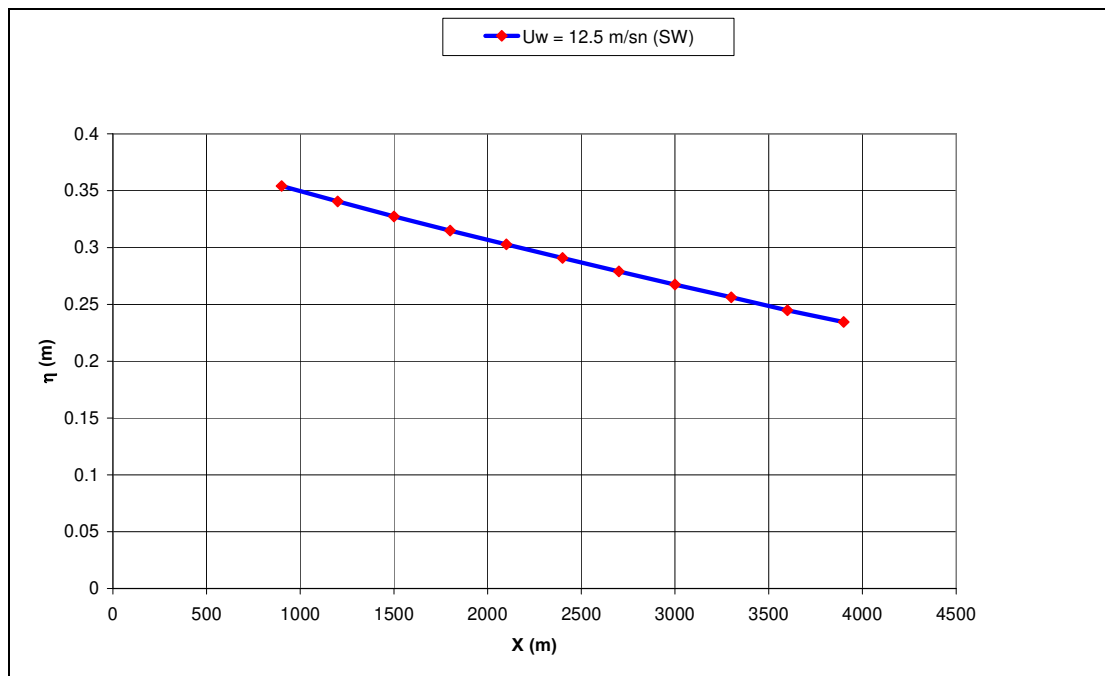


Şekil 5.16. 3 Boyutlu olarak körfezdeki su düzeyi değişimi (cm)
($U_w = 12,50$ m/sn - SW yönü)

SW yönünden esen rüzgar için hem x hem de y yönünde alınan kesitler boyunca su yüzü profilleri gösterilmiştir. $X = 2400$ m’de alınan kesit boyunca su yüzü profili Şekil 5.17’de, $Y = 6300$ m’de alınan kesit boyunca su yüzü profili ise Şekil 5.18’de gösterilmiştir.

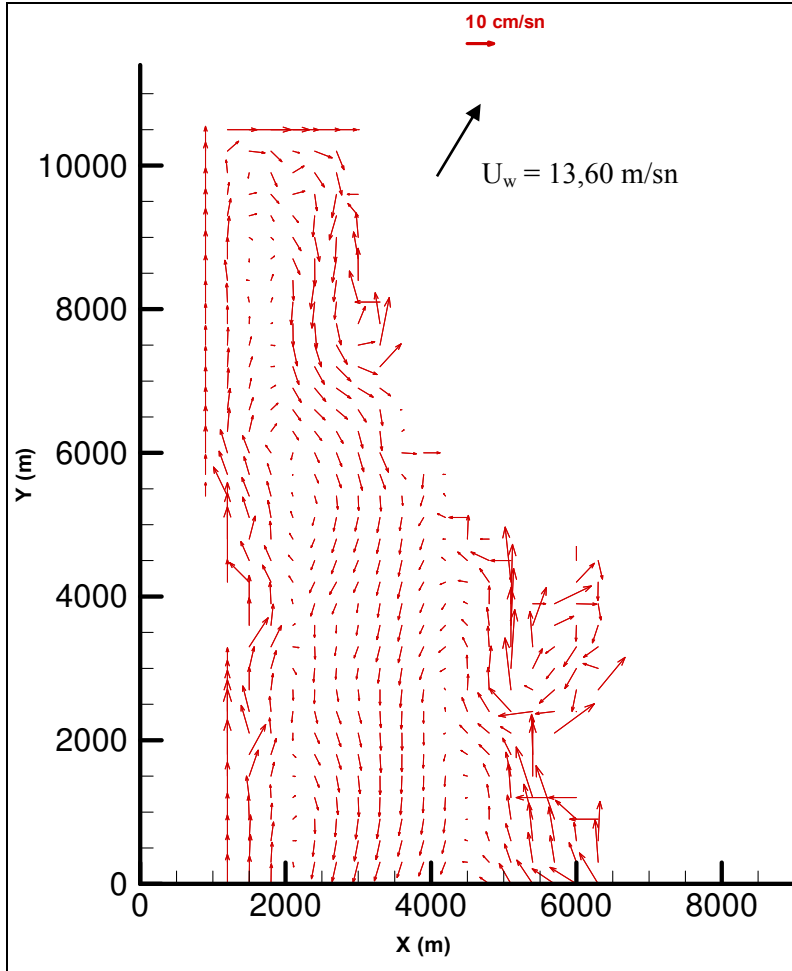


Şekil 5.17. Körfezde $X = 2400$ m’de alınan kesit boyunca su yüzü profili
($U_w = 12,50$ m/sn - SW yönü)



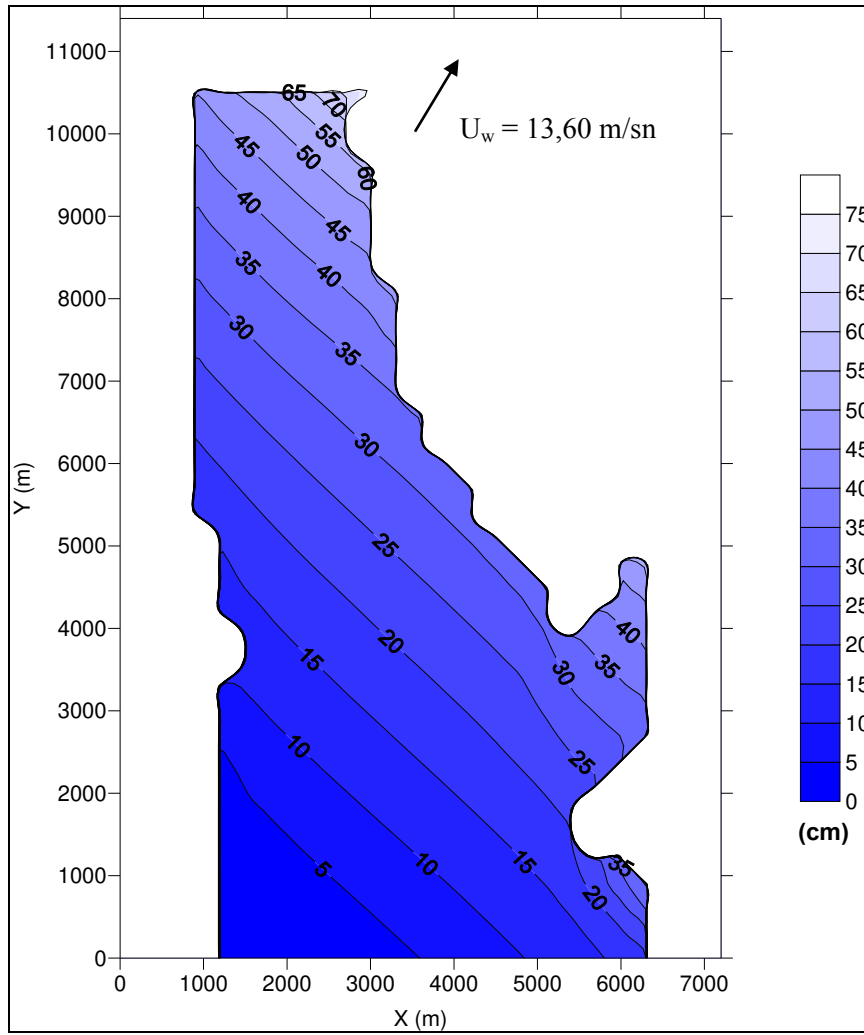
Şekil 5.18. Körfezde $Y = 6300$ m’de alınan kesit boyunca su yüzü profili
($U_w = 12,50$ m/sn - SW yönü)

$U_w = 13,60$ m/sn (NW yönü) için çevrinti düzeni Şekil 5.19’da gösterilmiştir. Çevrinti etkisiyle körfezde maksimum yüzey hızı 26 cm/sn olarak gözlenmiştir.



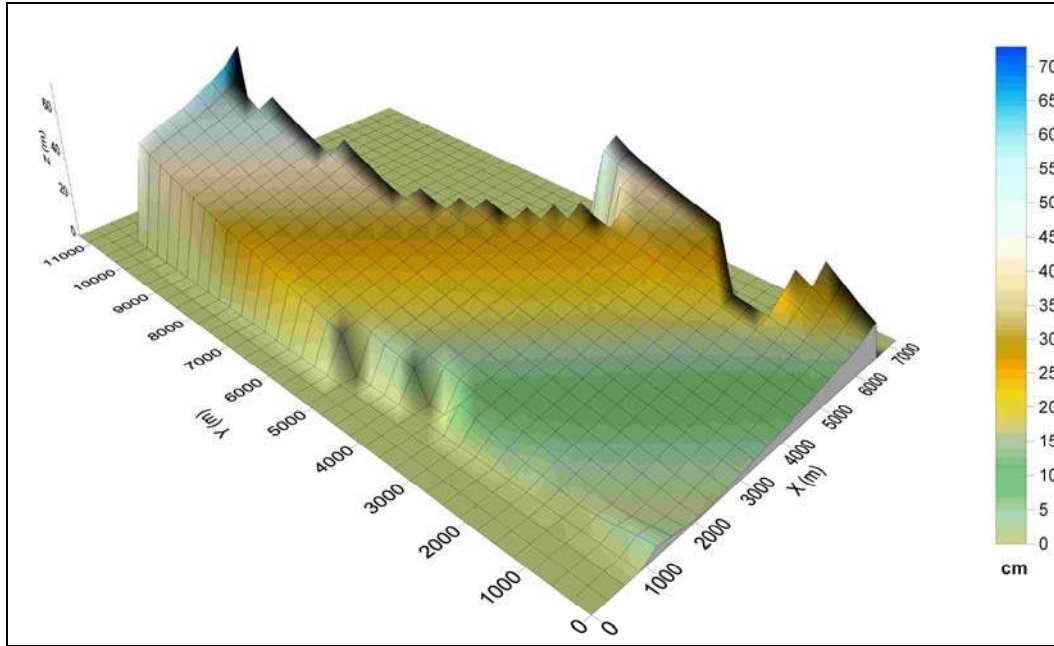
Şekil 5.19. Körfezdeki ortalama çevrinti düzeni (cm/sn)
($U_w = 13,60$ m/sn - NW yönü)

Körfezde NW yönünde oluşan kabarma yükseklikleri (cm), Şekil 5.20’de görülmektedir. Rüzgar etkisiyle körfezde 2,5 günün sonunda oluşan maksimum kabarma yüksekliği $\Delta h = 73$ cm olarak gözlenmiştir.



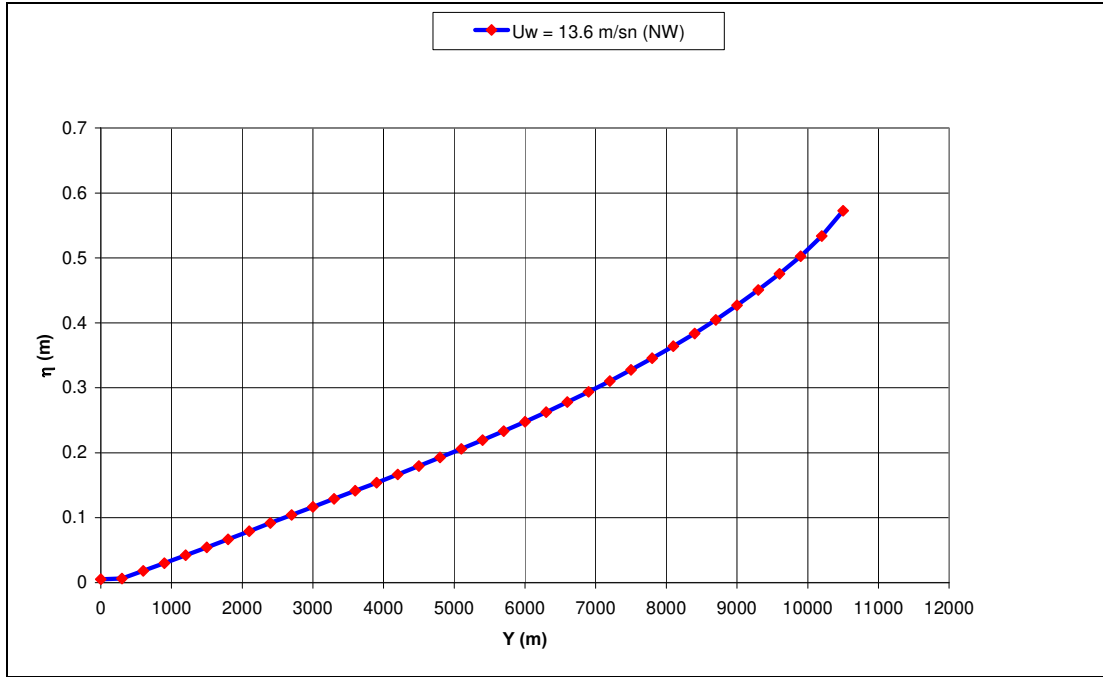
Şekil 5.20. Körfezdeki su düzeyi değişimi (cm) ($U_w = 13,60 \text{ m/sn}$ - NW yönü)

Körfezde oluşan kabarma yüksekliklerinin üç boyutlu gösterimi Şekil 5.21’de sunulmuştur.

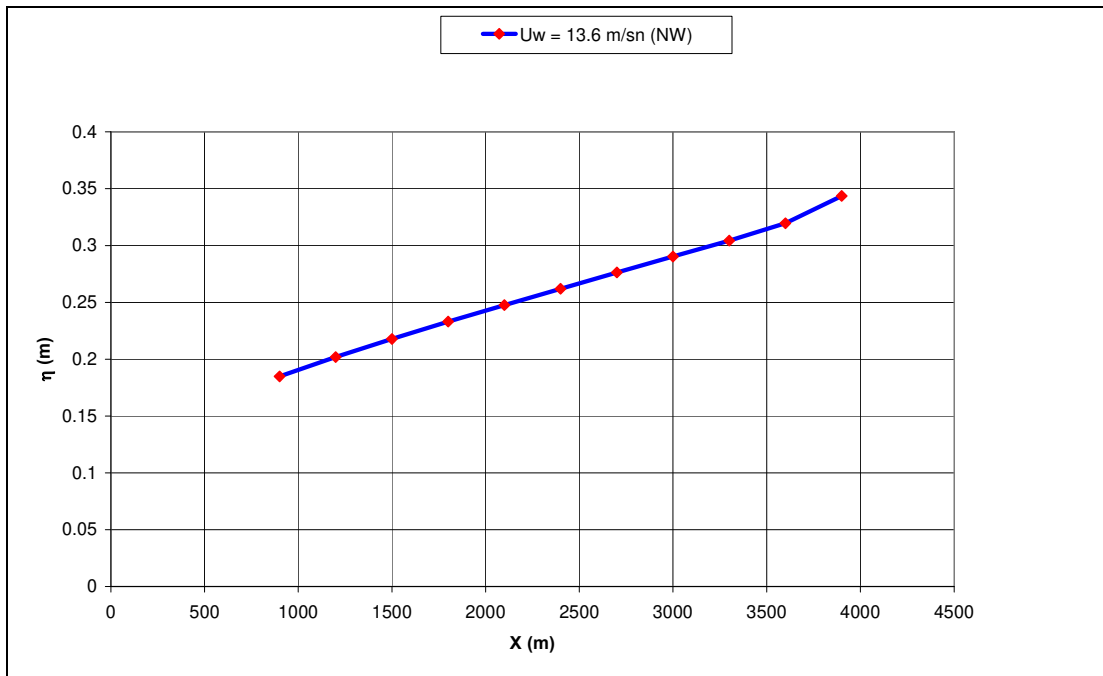


Şekil 5.21. 3 Boyutlu olarak körfezdeki su düzeyi değişimi (cm)
($U_w = 13,60$ m/sn - NW yönü)

NW yönünden esen rüzgar için hem x hem de y yönünde alınan kesitler boyunca su yüzü profilleri gösterilmiştir. $X = 2400$ m’de alınan kesit boyunca su yüzü profili Şekil 5.22’de, $Y = 6300$ m’de alınan kesit boyunca su yüzü profili ise Şekil 5.23’de gösterilmiştir.

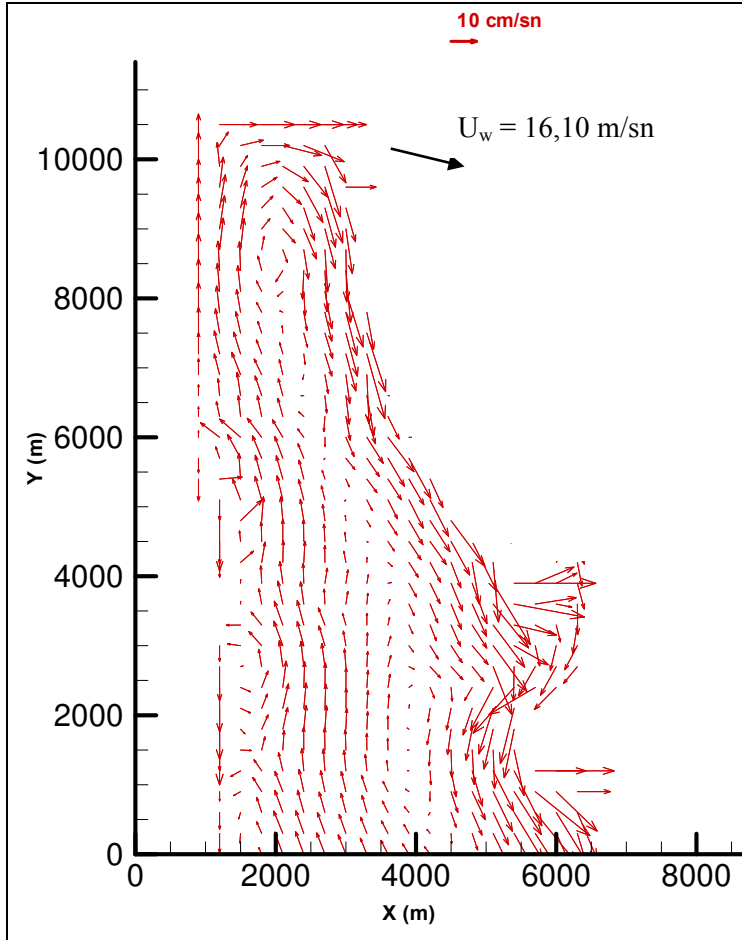


Şekil 5.22. Körfezde $X = 2400$ m’de alınan kesit boyunca su yüzü profili
($U_w = 13,60$ m/sn - NW yönü)



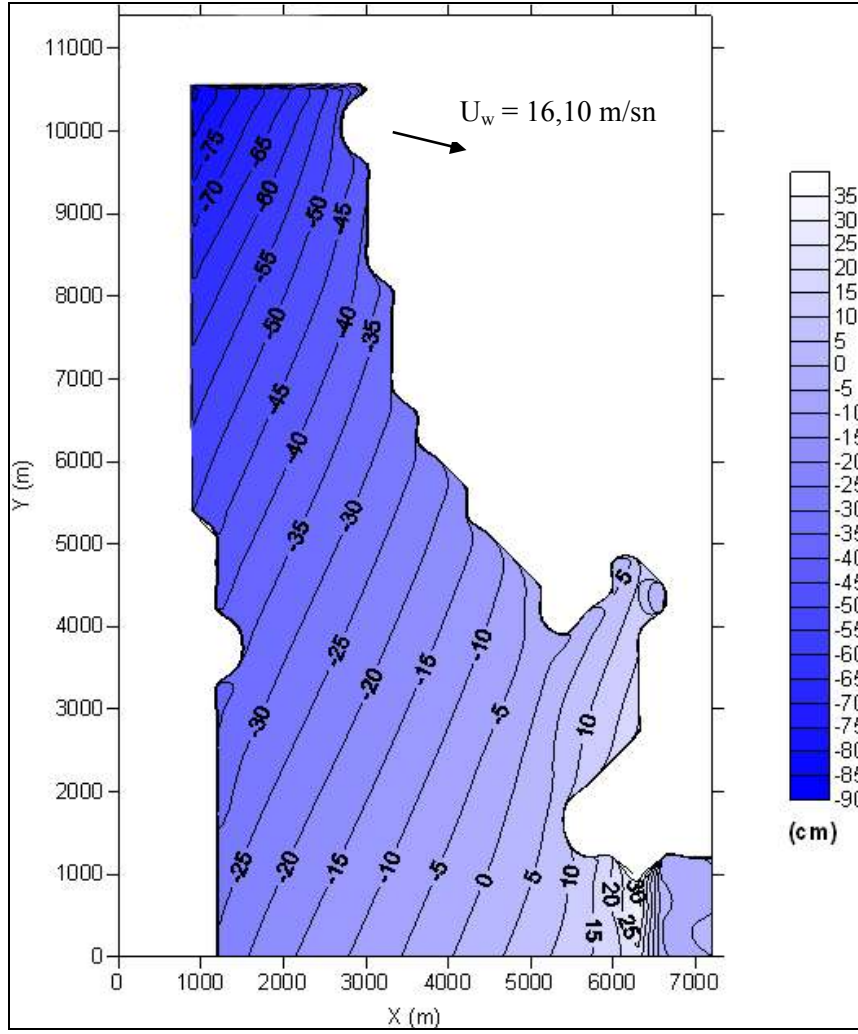
Şekil 5.23. Körfezde $Y = 6300$ m’de alınan kesit boyunca su yüzü profili
($U_w = 13,60$ m/sn - NW yönü)

$U_w = 16,10$ m/sn (NNE yönü) için çevrinti düzeni Şekil 5.24’de gösterilmiştir. Çevrinti etkisiyle körfezde maksimum yüzey hızı 32 cm/sn olarak gözlenmiştir.



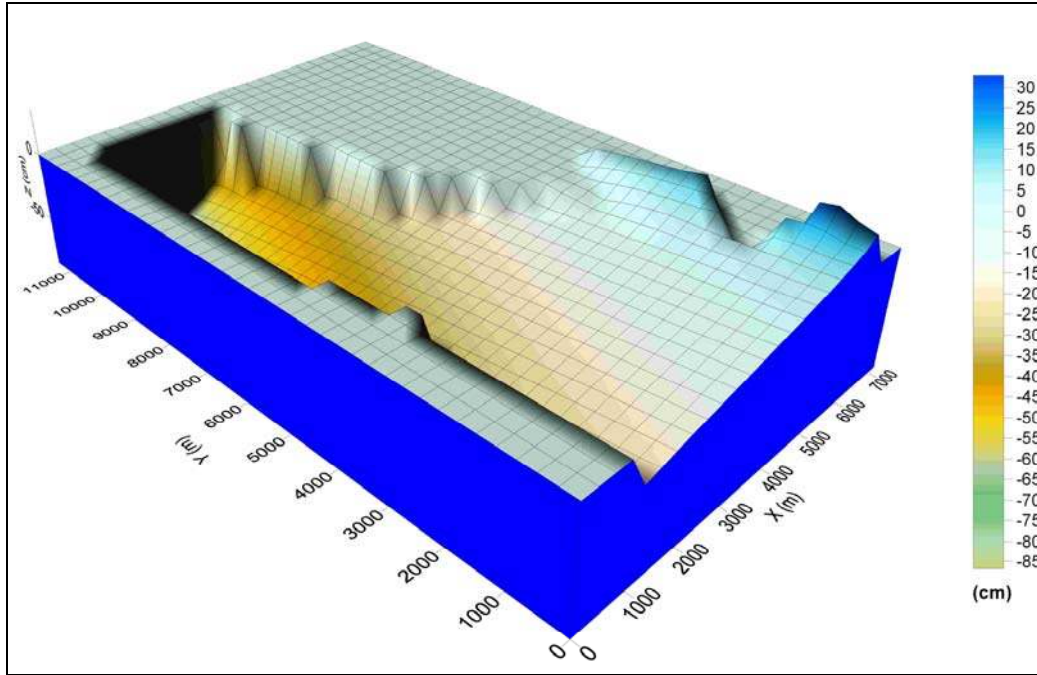
Şekil 5.24. Körfezdeki ortalama çevrinti düzeni (cm/sn)
($U_w = 16,10$ m/sn - NNE yönü)

Körfezde NNE yönünde oluşan kabarma yükseklikleri (cm), Şekil 5.25’de görülmektedir. Rüzgar etkisiyle körfezde 2,5 günün sonunda oluşan maksimum kabarma yüksekliği $\Delta h = 33$ cm olarak gözlenmiştir. Rüzgarın esme yönü dikkate alındığında körfezin en sık bölgesinde su kütesinde büyük bir alçalma oluşmakta, bu bölgede en büyük alçalma $\Delta h = -87$ cm olarak gözlenmiştir.



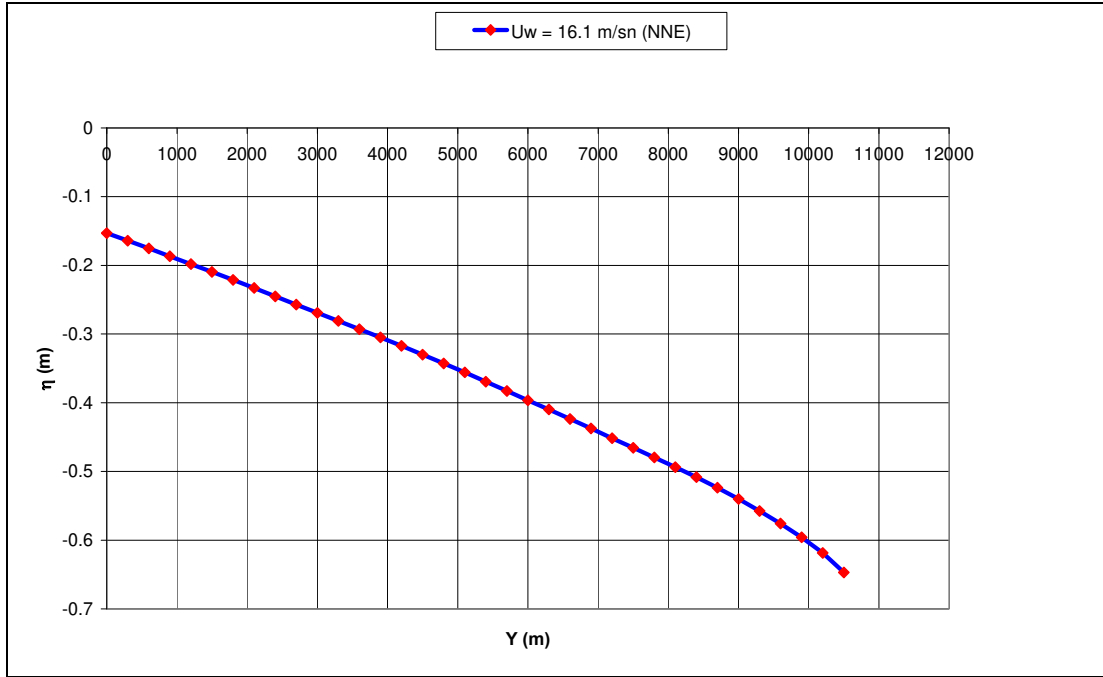
Şekil 5.25. Körfezdeki su düzeyi değişimi (cm) ($U_w = 16,10 \text{ m/sn}$ - NNE yönü)

Körfezde oluşan kabarma yüksekliklerinin üç boyutlu gösterimi Şekil 5.26'de sunulmuştur.

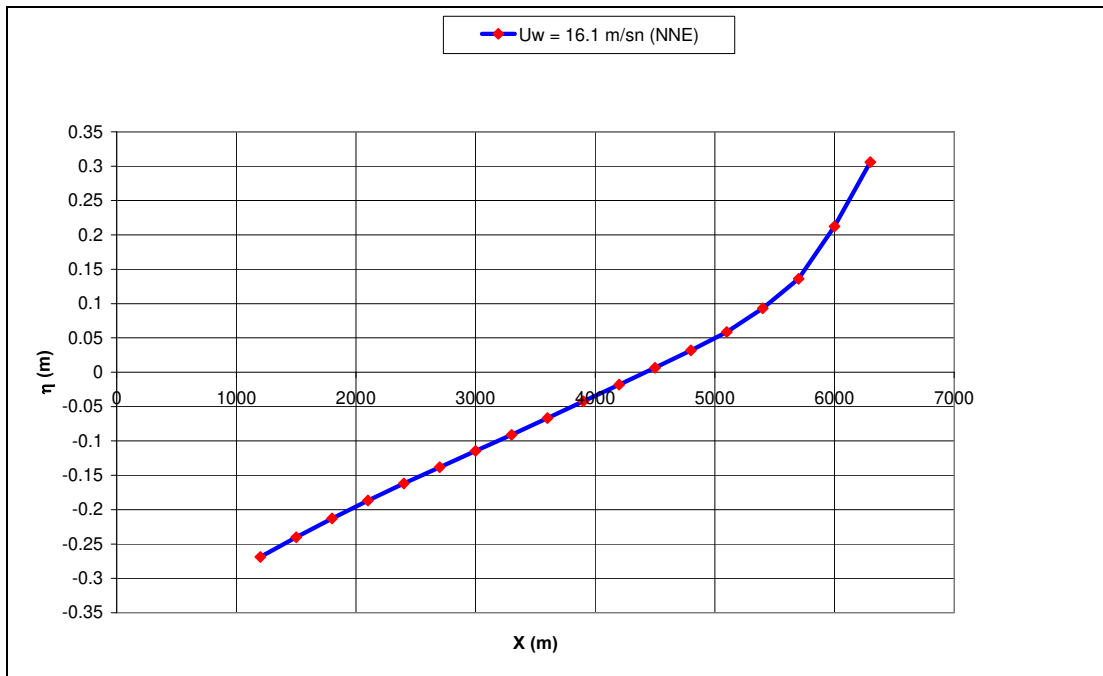


Şekil 5.26. 3 Boyutlu olarak körfezdeki su düzeyi değişimi (cm)
($U_w = 16,10$ m/sn - NNE yönü)

NNE yönünden esen rüzgar için hem x hem de y yönünde alınan kesitler boyunca su yüzü profilleri gösterilmiştir. $X = 2400$ m’de alınan kesit boyunca su yüzü profili Şekil 5.27’de, $Y = 900$ m’de alınan kesit boyunca su yüzü profili ise Şekil 5.28’de gösterilmiştir.

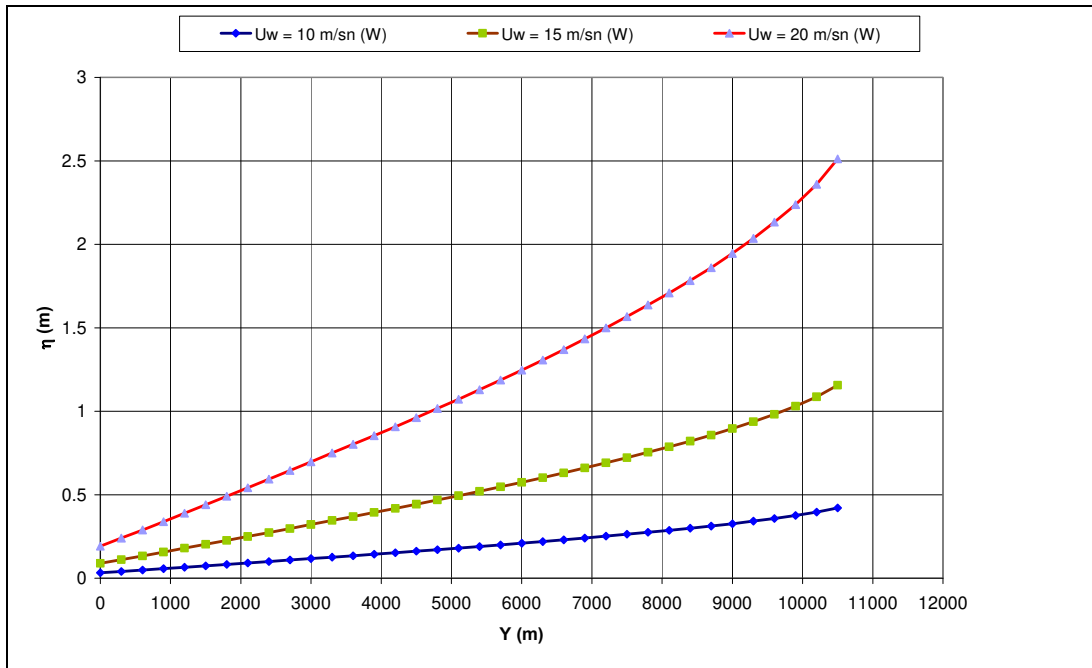


Şekil 5.27. Körfezde $X = 2400$ m’de alınan kesit boyunca su yüzü profili ($U_w = 16,10$ m/sn - NNE yönü)



Şekil 5.28. Körfezde $Y = 900$ m’de alınan kesit boyunca su yüzü profili ($U_w = 16,10$ m/sn - NNE yönü)

Rüzgar hızındaki artışın, su alanında kabarmaya etkisini göstermek için, W yönünden esen $U_w=10$ m/sn, $U_w=15$ m/sn ve $U_w=20$ m/sn rüzgar hızları su alanına etkililmiş ve su yüzü değişimleri incelenmiştir. Artan rüzgar hızıyla (diğer tüm parametreler sabit kabul edildiğinde), kabarma yükseklikleri de artış göstermektedir. Bu artış düzensiz batimetriden dolayı lineer olmayıp, Şekil 5.29’da görüldüğü gibi parabolik bir değişimdir. 2,5 gün sonunda; $U_w=10$ m/sn’lik rüzgar etkisiyle oluşan maksimum kabarma yüksekliği $\Delta h = 0,42$ m, $U_w=15$ m/sn’lik rüzgar etkisiyle oluşan maksimum kabarma yüksekliği $\Delta h = 1,16$ m, $U_w=20$ m/sn’lik rüzgar etkisiyle oluşan maksimum kabarma yüksekliğinin $\Delta h = 2,51$ m olduğu görülmüştür. Rüzgar hızı 1,5 kat arttığında oluşan maksimum kabarma yüksekliğinin yaklaşık 3 kat arttığı, rüzgar hızının 2 kat arttığı durumda ise oluşan maksimum kabarmanın yaklaşık 6 kat arttığı gözlenmiştir. Su yüzü profili incelendiğinde, sığlaşan su derinliklerinin etkisiyle su kabarmasındaki parabolik değişim izlenmektedir.



Şekil 5.29. Artan rüzgar hızına bağlı olarak, körfezde $X = 2400$ m’de alınan kesit boyunca su yüzü profili değişimi

6. SONUÇ

Türkiye kıyılarında gelgit etkisi fazla olmayıp, su kabarmasına etken parametre rüzgardır. Kıyısız su alanlarının yatay düzlemdeki genişlikleri, düşey yönde sınırlayıcı olan su derinliklerine oranla büyük olduğu için, düşey yöndeki etkiler ihmal edilebilmektedir. Fırtına kabarması ve gelgit etkisi gibi su düzeyi değişimlerinin incelendiği durumlarda sayısal modeller, model ölçeğinin çok büyük olmadığı durumlar hariç, genellikle iki boyutlu geliştirilmektedir. Bu çalışma kapsamında geliştirilen model iki boyutlu olup (derinlik boyunca ortalanmış) rüzgar nedeniyle oluşan su kabarmasını benzeştirmektedir. Kıyı bölgesini tanımlayan koordinatlar, batimetri özellikleri ve rüzgar gerilmesi girdi olarak kullanılarak, su alanı çevrinti özellikleri ve su düzeyi değişimi belirlenmektedir. Sayısal model yataydaki Eddy viskozite, Coriolis ve taban sürtünme etkilerini içermektedir.

Rüzgar kabarması sayısal modelinde, lineer olmayan derinlik boyunca ortalaması alınmış sığ su denklemleri sonlu farklar yöntemiyle çözülmektedir. Denklemlerin çözümlerinde, şaşırtmacalı çözüm ağı üzerinde ikinci derece doğruluklu merkezi sonlu farklar açılımları kullanılmıştır. Model, herhangi bir geometriye sahip kıyı alanlarına uygulanabilmektedir.

Model Bodrum Gökova Körfezi kıyı alanına uygulanmıştır. Model alanında yataydaki Eddy viskozite değişiminin su alanı boyunca su düzeyi değişimine etkisi incelenmiştir. Yataydaki Eddy viskozite değişiminin su kabarmasında etkin bir parametre olmadığı görülmüştür. Model seçilen farklı taban sürtünme katsayılarına göre irdelenmiş, artan taban sürtünme etkisinin kabarmayı azaltacak yönde olduğu görülmüştür.

Körfezin konumu itibarıyla kıyılarda kabarmaya sebep olabilecek kritik rüzgar yönleri seçilmiş, bunun sonucu rüzgarın esme doğrultusunda kıyı alanı boyunca oluşan kabarma yükseklikleri ve su alanı çevrinti düzeni incelenmiştir. Rüzgar kabarmasının rüzgarın esme yönünde geliştiği, rüzgarın hızının artmasıyla artış gösterdiği, derinlik artışı ile azalış gösterdiği görülmüştür. Sığ sularda önemli

kabarma yükseklikleri oluşmaktadır. İncelenen yönlere göre oluşan maksimum kabarma yükseklikleri Çizelge 6.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 6.1. Seçilen rüzgar yönlerine göre hesaplanan maksimum kabarma yükseklikleri

Rüzgar Yönü	Maksimum Rüzgar Hızı	Maksimum Su Kabarması Δh (cm)
W	12.8	77
SW	12.5	64
NW	13.6	73
NNE	16.1	33

Rüzgar kabarması kıyı yapılarını olumsuz etkilemekte, ekonomik değeri yüksek kıyısız alanlarda yaşamsal ve ekolojik risk oluşturmaktadır. Rüzgar kabarmasının şiddetinin hangi seviyelerde olacağının bilinmesi, kıyı alanlarındaki potansiyel riskin tespiti açısından da önemlidir.

KAYNAKLAR

1. Preller, R. H., Posey, P. G., Dawson, G. M., "Hurricane Isabel: a numerical model study of storm surge along the east coast of the United States", ***Naval Research Laboratory, Stennis Space Center Ms Oceanography Div***, Mississippi, NRL/PP/7320-04-5010 (2003).
2. Davis, J. R., Sheng, Y. P., "Development of a parallel storm surge model", ***International Journal for Numerical Methods in Fluids***, 42: 549-580 (2003).
3. Grezechnik, M. P., "Three-dimensional tide and surge modelling and layered particle tracking techniques applied to southern australian coastal seas", Doktora Tezi, ***University of Adelaide, Institute of Science and Technology***, Australia, 20-54 (2000).
4. Blain, C. A., Westerink, J. J., Luettich JR, R. A., "Grid convergence studies for the prediction of hurricane storm surge", ***International Journal for Numerical Methods in Fluids***, 26: 369-401 (1998).
5. Jain, I., Chittibabu, P., Agnihotri, N., Dube, S. K., Sinha, P. C., Rao, A. D., "Numerical storm surge model for India and Pakistan", ***Springer Science - Business Media***, 10.1007/s11069-006-9060-7, (2006).
6. Westerink, J. J., Luettich, Baptista, R. A., Scheffner A. M., Farrar, N. W., "Tide and storm surge predictions using finite element model", ***Journal of Hydraulic Engineering***, 118(10): 1373-1390 (1992).
7. Jelesnianski, C. P., "Numerical computations of storm surges without bottom stress", ***Environmental Science Services Administration, Washington, D.C.***, 94(6): 379-394 (1966).
8. Flather, R. A., "Estimates of extreme conditions of tide and surge using a numerical model of the north-west european continental shelf", ***Inst. of Oceanographic Sciences, Birkenhead, England, Estuarine, Coastal and Shelf Science***, 24(1): 69-93 (1987).
9. Abohadima, S. A., Rabie, A. A., "Numerical modeling of storm surges", ***Journal of Engineering and Applied Science***, 49(6): 1017-1031 (2002).
10. Lardner, R.W., Cekirge, H.M., "New algorithm for three-dimensional tidal and storm surge computations", ***Applied Mathematical Modelling***, 12(5): 471-481 (1988).
11. Canizares, R., Heemink, A.W., Vested, H.J., "Application of advanced data assimilation methods for the initialization of storm surge models", ***Journal of Hydraulic Research/De Recherches Hydrauliques***, 36(4): 655-674 (1998).

12. Sinha, P. C., "Hydrodynamic numerical modelling of storm surges application to the bay of Bengal" *Indian Inst of Technology, New Delhi, India - Sadhana*, 10(3): 433-444 (1987).
13. Lardner, R.W., "Optimal estimation of eddy viscosity for a quasi-three-dimensional numerical tidal and storm surge model", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 18(3): 295-312 (1994).
14. "Coastal pollution course", *WHO Training Course*, Geneva, Switzerland, 1: 6-16 (1976).
15. Kowalik, Z., Murty, T.S., "Numerical modeling of ocean dynamics", *Advanced Series on Ocean Engineering*, 5: 1-140 (1993).
16. Yüksel, Y., Çevik, E., Çelikoğlu, Y., "Kıyı Ve Liman Mühendisliği", *Türk Mühendis ve Mimarlar Odaları Birliği İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara Şubesi*, 10-12 (1998).
17. "Storm surge preparedness and safety", *Australian Bureau of Meteorology, Department of the Environment and Water Resources*, Australia, (2007).
18. Jarvinen, B., "The greatest potential for loss of life related to a hurricane storm surge", *National Hurricane Center, USA*, (2007).
19. "The Coastal Engineering Manual (CEM)", *U.S. Army Corps of Engineers (USACE)*, Washington, Part II, EM 1110-2-1110, 38-44 (2002).
20. Küçükosmanoğlu, A., "Kapalı su alanlarında su değişiminin modellenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 10-35 (2004).
21. Bakioğlu, M., "Sayısal Analiz", *Birsen Yayınevi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 279-455 (2004).
22. Sümer, B. M., Ünsal, İ., Bayazıt, M., "Hidrolik", *Birsen Yayınevi*, Y.0029, 121-133 (1983).
23. Gemmell, K., "Fırtınalar ve Kasırgalar", *Tübitak Popüler Bilim Kitapları*, Ankara, 1-25 (2004).
24. Özer, N., Demirbağ, E., Kurt, H., "Yansıma sismliği ve sismisite verileri ile Gökova körfezi aktif tektoniğinin araştırılması", *Türkiye Kuvaterner Sempozyumu*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 278-279 (2005).
25. Balas, L., "Three dimensional numerical modelling of transport process in coastal water bodies", Doktora Tezi, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 27-48 (1998).

26. Öcal, H., “Coğrafya”, **Güvender Yayınları**, Baskı; Çağlayan A.Ş., İzmir, 68-76 (1999).
27. İnternet : Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü “Rüzgar, Kuvvetli Rüzgar ve Fırtına”, Nezihe Akgün, <http://www.meteoroloji.gov.tr> (2007).

EKLER

EK-1 Stabilite analizi

Sonlu farklar ile diferansiyel denklemler çözülürken ağ aralıklarının h_x ve $h_y \rightarrow 0$ iken fark denklemlerinin diferansiyel denkleme yakınsaması gerekir. Yakınsama için iki şartın sağlanması gerekir. Birinci şart başlangıçta yapılan ufak bir hatanın büyümemesidir. Bu durum kararlılık (stabilite) ile ilgilidir. İkinci şart ise h_x ve $h_y \rightarrow 0$ iken sonlu fark denklemleri verilen diferansiyel denkleme yakınsaması gerekir. Burada kararlılık analizi için en fazla kullanılan yöntem olan von Neumann yöntemi uygulanmıştır. Von Neumann yöntemi yoğun şekilde Fourier serilerini kullandığından bu yönteme bazı literatürlerde Fourier yöntemi adı da verilmektedir [21].

Eş. 4.1 – Eş. 4.3'te belirtilen sistemin stabilitesi, $u(u,v,\eta)$ fonksiyonda değişkenlerin yerine aşağıda belirtilen hata matrisi yerine konularak bulunur. Bulunan fonksiyonun sınırlı kalma şartı kararlılık şartıdır.

δu ; hatayı göstermek üzere [15],

$$\delta u = u^* \exp i\omega t \exp i k_1 x \exp i k_2 y \quad (1.1)$$

Burada $u^*(u,v,\eta)$; başlangıç koşullarıyla tanımlanan büyütme faktörü vektörüdür.

Eş. 1.1'in, fark denklemleri olarak ifadesi;

$$\delta u = u^* \lambda^m \exp i k_1 j h \exp i k_2 k h \quad (1.2)$$

$$\lambda^m = \exp i \omega T m \quad (1.3)$$

EK-1 (Devam) Stabilité analizi

Burada, w ; salınımın frekansı, k_1 ve k_2 sırasıyla x ve y yönlerindeki dalga numarası, λ ; büyütme faktörüdür. İfadelerde çözüm ağı uzunluğu (h) eşit alınmıştır. Stabilité şartı aşağıda belirtilen matrisin determinantının çözümüyle elde edilir.

$$\begin{pmatrix} \lambda^2 - 1 + a_1 + b_1 & c_1 & \lambda d_1 Tg / h \\ \lambda c_2 & \lambda^2 - 1 + a_2 + b_2 & \lambda d_2 Tg / h \\ \lambda d_1^* TH / h & \lambda d_2^* TH / h & \lambda^2 - 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u^* \\ v^* \\ \eta^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

Burada $k = 2\pi / L = 2\pi / 2h$ olarak ifade edilmektedir. Farklı stabilité şartlarını tanımlamak için bu karmaşık problemi, daha basit problemlere indirgersek; sadece su yüzü değişimi dikkate alınır (sürtünme kuvvetleri ve Coriolis kuvveti ihmal edilirse) denklemlerde sadece su yüzü değişiminden dolayı ivme ve basınç terimleri kalır. Eş. 1.4'de belirtilen ifadenin determinantı Eş. 1.5'de belirtildiği gibi sadeleştirilir.

$$\det \begin{vmatrix} \lambda^2 - 1 & 0 & \lambda d_1 Tg / h \\ 0 & \lambda^2 - 1 & \lambda d_2 Tg / h \\ \lambda d_1^* TH / h & \lambda d_2^* TH / h & \lambda^2 - 1 \end{vmatrix} = 0 \quad (1.5)$$

Yukarıdaki eşitliklerde, $d_1 = 1 - e^{-ik_1 h}$, $d_2 = 1 - e^{-ik_2 h}$, d_1^* ve d_2^* ; d_1 ve d_2 'nin karmaşık eşleniği olmak üzere;

$$d_1 d_1^* = -4 \left(\sin \frac{k_1 h}{2} \right)^2 \quad d_2 d_2^* = -4 \left(\sin \frac{k_2 h}{2} \right)^2 \quad (1.6)$$

Eş. 1.5'de belirtilen determinant, stabilité parametresi aşağıdaki gibi ifade edilir.

EK-1 (Devam) Stabilite analizi

$$(\lambda^2 - 1)^2 + \lambda^2 4 \left(\frac{T}{h} \right)^2 gH \left[\left(\sin \frac{k_1 h}{2} \right)^2 + \left(\sin \frac{k_2 h}{2} \right)^2 \right] = 0 \quad (1.7)$$

Denklemin kökleri;

$$\lambda^2 = \left[(2 - a^2) \pm \sqrt{a^4 - 4a^2} \right] / 2 \quad (1.8)$$

Yukarıdaki eşitlikte iki durum söz konusudur. Eğer $a^2 > 4$ ise stabilite parametresi; $\lambda^2 > 1$, eğer $a^2 \leq 4$ ise, Eş. 1.8'deki kareköklü ifade $ai\sqrt{4 - a^2}$ ve mutlak değerce stabilite parametresi; $|\lambda^2| = 1$ olmalıdır.

$$a^2 = 4 \left(\frac{T}{h} \right)^2 gH \left[\left(\sin \frac{k_1 h}{2} \right)^2 + \left(\sin \frac{k_2 h}{2} \right)^2 \right] \quad (1.9)$$

olmak üzere, stabilite şartı;

$$\left(\frac{T}{h} \right)^2 gH \left[\left(\sin \frac{k_1 h}{2} \right)^2 + \left(\sin \frac{k_2 h}{2} \right)^2 \right] \leq 1 \quad \text{veya} \quad \left(\frac{T}{h} \right)^2 gH 2 \leq 1 \quad (1.10)$$

Bölüm 4'te ifade edilen Eş. 4.1 – 4.2'deki lineer olmayan adveksiyon terimleri, stabilite açısından daha kritik bir şartı sağlamalıdır. Bir doğrultuda, zamana bağlı adveksiyon hareketi için, stabilite şartı Eş. 1.11'deki gibi ifade edilir. Model çalışmasında hesap zaman adım büyüklüğünün (T) seçimi Eş. 1.11'de tanımlanan stabilite şartı dikkate alınarak seçilmiştir [15].

$$0 \leq \frac{T \cdot |u|}{h} \leq 1 \quad (1.11)$$

EK-2 Rüzgarlar

Rüzgarın tanımı ve karakteristikleri

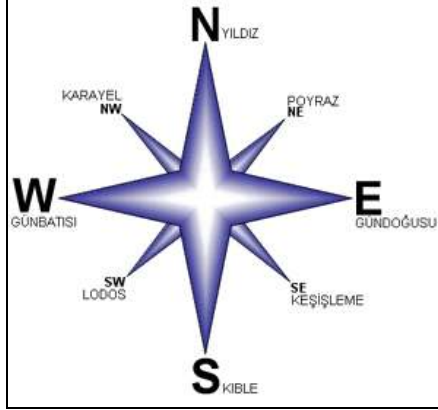
Rüzgar, atmosferdeki havanın dünya yüzeyine yakın, doğal yatay hareketleridir. Hava hareketlerinin temel prensibi, mevcut atmosfer basıncının bölgeler arasında değişmesidir. Rüzgar, alçak basınçla yüksek basınç bölgesi arasında yer değiştiren hava akımıdır, daima yüksek basınç alanından alçak basınç alanına doğru hareket eder. İki bölge arasındaki basınç farkı ne kadar büyük olursa, hava akım hızı o kadar fazla olur. Rüzgar sahip olduğu hıza göre fırtına, hortum gibi isimler alır [26, 27].

Rüzgarın yönü rüzgar gülü, hızı ise anemometre ile ölçülür. Okyanuslardaki akımların ve dalgaların meydana gelmesinde büyük rolü olan rüzgarlar, kara şekillerinin değişmesine de sebep olur. Rüzgar, alçak (siklon) ve yüksek (antisiklon) alanlarda farklı özellikler taşır. Rüzgarın yüksek basınç alanından, alçak basınç alanına hareket etmesinin sebepleri; dünyanın dönüşü, yüzey sürtünmeleri, yerel ısı yayılması, başka atmosferik olaylar, toprağın topografik yapısı gibi sebeplerdir. Atmosferin alt tabakalarında meydana gelen rüzgarlar, yerin ısı ve mekanik özelliklerinden dolayı türbülans oluşturur [27].

Türkiye'de rüzgar adları

Rüzgarlar estikleri yönlerle göre isim alırlar. Kuzeyden esene yıldız, güneyden esene kible, doğudan esene gündoğusu, batıdan esene günbatısı, kuzeydoğudan esene poyraz, kuzeybatıdan esene karayel, güneydoğudan esene samyeli, güneybatıdan esene ise lodos denir (Şekil 2.1).

EK-2 (Devam) Rüzgarlar



Şekil 2.1. Rüzgar yönleri; Türkiye'de sekiz ana yönden esen rüzgarlara verilen adlar

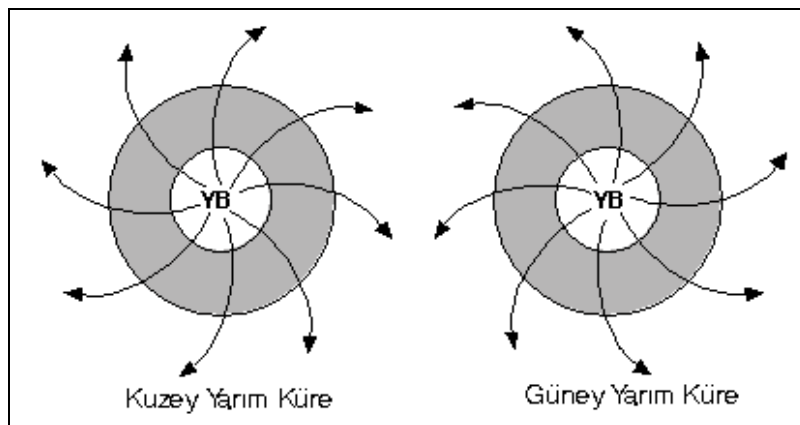
Rüzgarın hızını etkileyen faktörler [26];

- a. Basınç farkı: Rüzgarın hızı basınç farkıyla doğru orantılıdır. Basınç farkı çok ise rüzgar hızlı, basınç farkı az ise rüzgar yavaş eser. İki bölge arasındaki basınç farkının sona ermesi ile rüzgar etkinliği kaybeder.
- b. Basınç merkezleri arasındaki uzaklık: Aynı basınç farklarına sahip, birbirinden farklı uzaklıktaki noktalar arasında rüzgarların hızı farklıdır. Birbirine yakın olan noktalar arasında, izobar yüzeylerinin eğimi fazladır ve rüzgar hızlı eser. Birbirine uzak olan noktalar arasında ise, izobar yüzeylerinin eğimi azdır ve rüzgar yavaş eser.
- c. Dünya'nın Dönmesi: Dünya'nın dönüşüne bağlı olarak rüzgarlar, düz çizgiler yerine saparak hareket ederler. Bu sapmalar ise onlara hız kaybettirir.
- d. Sürtünme: Engelibeli arazilerde rüzgarlar çok fazla engellerle karşılaştığı için hızları azalır. Bundan dolayı, rüzgarların hızı, sürtünmenin azaldığı düz ve açık alanlarda fazladır.

EK-2 (Devam) Rüzgarlar

Rüzgarın yönünü etkileyen faktörler [26];

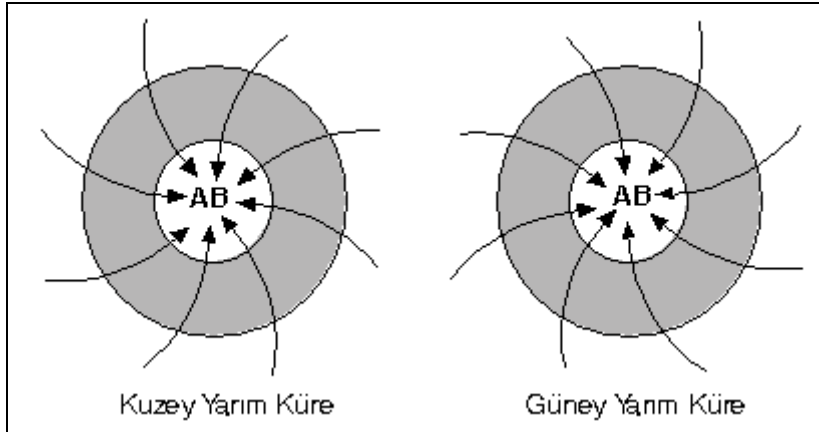
- a. Basınç merkezlerinin konumu: Rüzgarın yönünü belirleyen, öncelikle basınç merkezlerinin konumudur. Basınç merkezleri yer değiştirdikçe rüzgarın yönü de değişir.
- b. Yeryüzü şekilleri: Rüzgarlar basınç merkezleri arasında hareket ederken, yeryüzü şekillerine çarparak yön değiştirirler. Bir bölgede rüzgarın yıl içerisinde en fazla estiği yöne hakim rüzgar yönü denir. Hakim rüzgar yönü yerşekillerine göre ortaya çıkar.
- c. Dünya'nın Dönmesi: Dünya'nın kendi eksenini etrafında dönmesi sonucunda, rüzgarlar basınç merkezleri arasındaki en kısa yolu izleyemezler. Rüzgarlar, Kuzey Yarım Küre'de hareket yönünün sağına, Güney Yarım Küre'de ise hareket yönünün soluna saparlar. Yüksek basınç alanlarında rüzgarlar, merkezden çevreye doğru hareket ederler (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Yüksek basınç alanında rüzgar hareketi

EK-2 (Devam) Rüzgarlar

Alçak basınç alanlarında ise rüzgarlar, çevreden merkeze doğru hareket ederler (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Alçak basınç alanında rüzgar hareketi

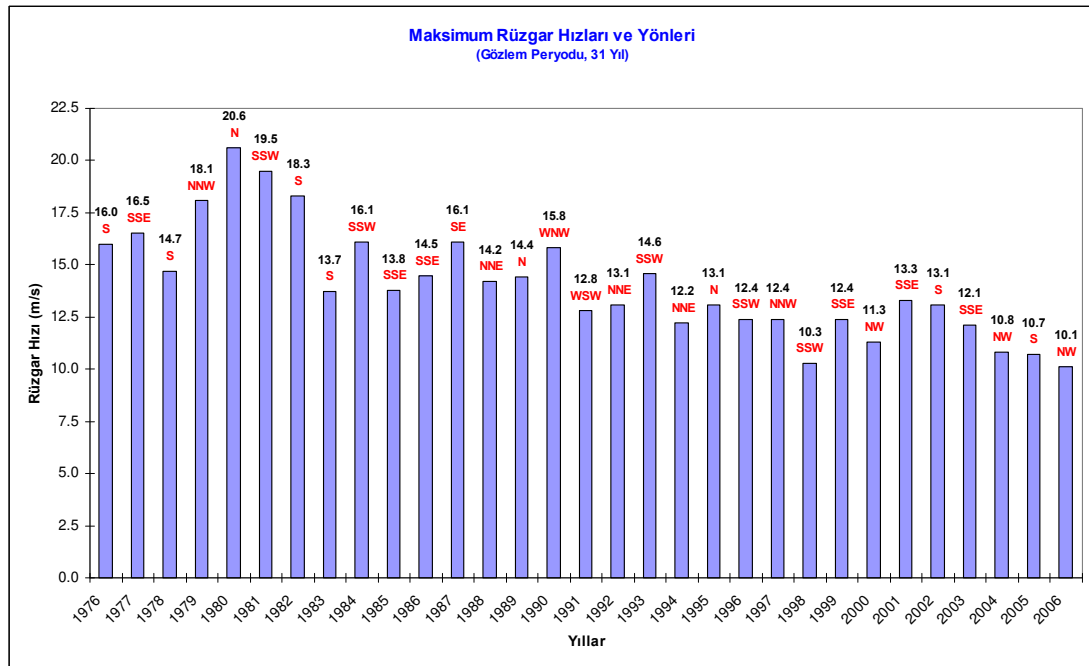
Türkiye’de fırtına durumu

Türkiye’de orta enlem kuşağında (30-60 kuzey enlemleri) bulunduğu için, bulunduğu konum itibariyle tropik alanlarda (30S-0-30N enlemleri) oluşan çok güçlü tropikal fırtınalar (siklonlardan) görülmez. Ancak, ekstra-tropik fırtına denilen tropik alanların dışında görülen fırtınalar zaman zaman özellikle kışın daha etkili olmaktadır. Bu fırtınaların maksimum hızı 30 m/sn civarındadır [27].

EK-2 (Devam) Rüzgarlar

Bodrum DMI rüzgar verisi değerlendirilmesi

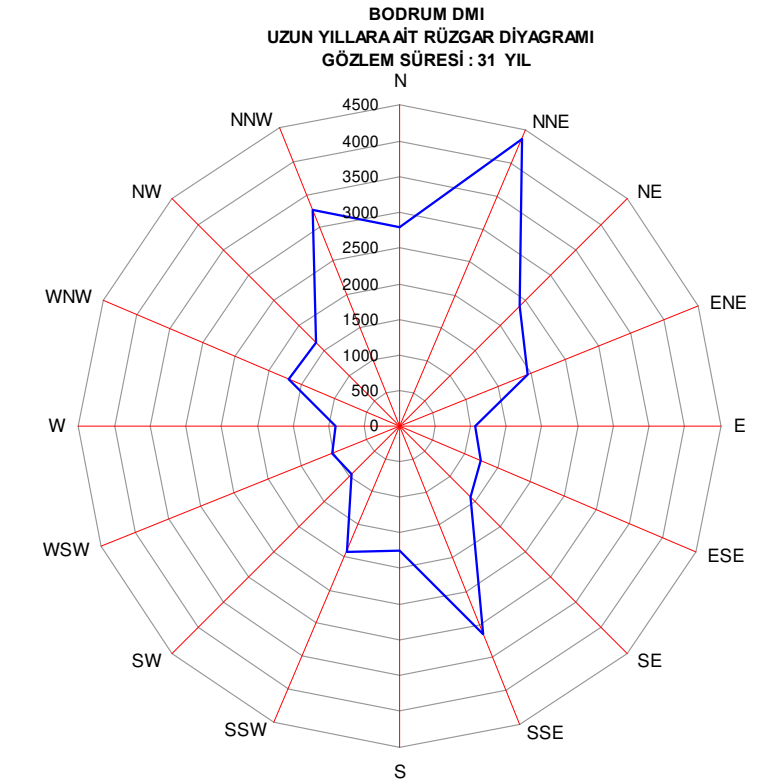
Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nden alınan Bodrum meteoroloji istasyonuna ait 31 yıllık (1976 – 2006) rüzgar verisi incelendiğinde yıllara göre oluşan maksimum rüzgar hızları ve yönleri Şekil 2.4'de verilmektedir. Veriler incelendiğinde maksimum rüzgar hızının 1980 yılında N (Kuzey) yönünden 20,6 m/sn olduğu görülmüştür. En düşük rüzgar hızı ise 2006 yılında 10,1 m/sn olarak kaydedilmiştir.



Şekil 2.4. Maksimum Rüzgar Hızları ve Yönleri

EK-2 (Devam) Rüzgarlar

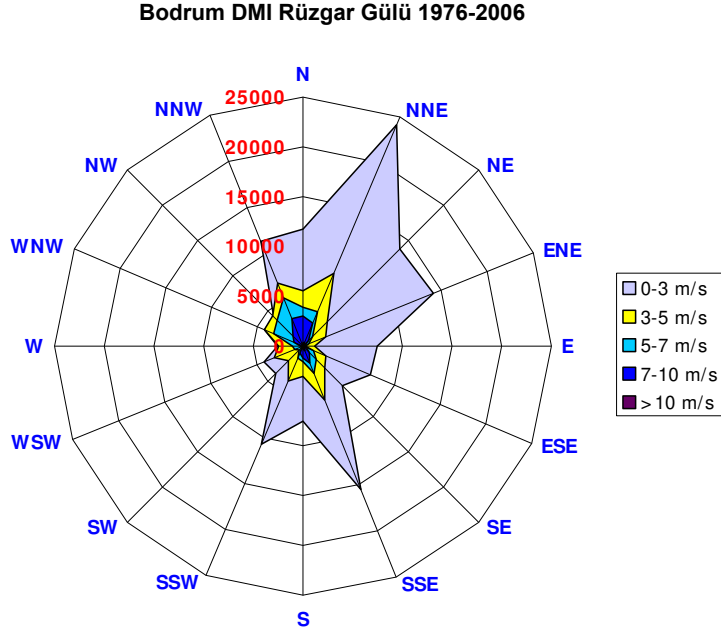
Rüzgarın esme yönlerine göre frekansları, Bodrum DMI meteoroloji bülteninden alınmıştır. Rüzgarın yönlere göre esme sayıları toplamı Şekil 2.5’de sunulmuştur.



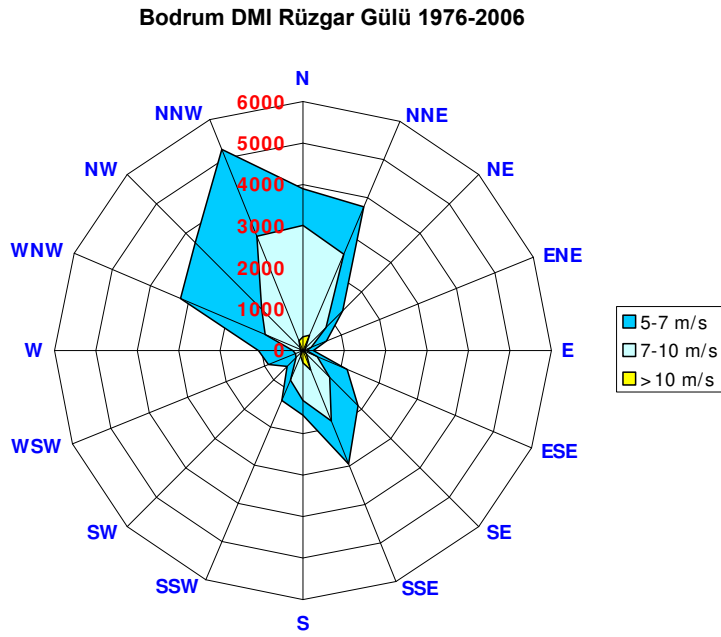
Şekil 2.5. Rüzgarların esme yönlerine göre frekans dağılımı

Bölgedeki hakim rüzgar doğrultularını belirlemek amacıyla, meteorolojik verilerden yararlanılarak elde edilen rüzgar gülleri çeşitli hız aralıklarına göre aşağıda sunulmuştur.

EK-2 (Devam) Rüzgarlar

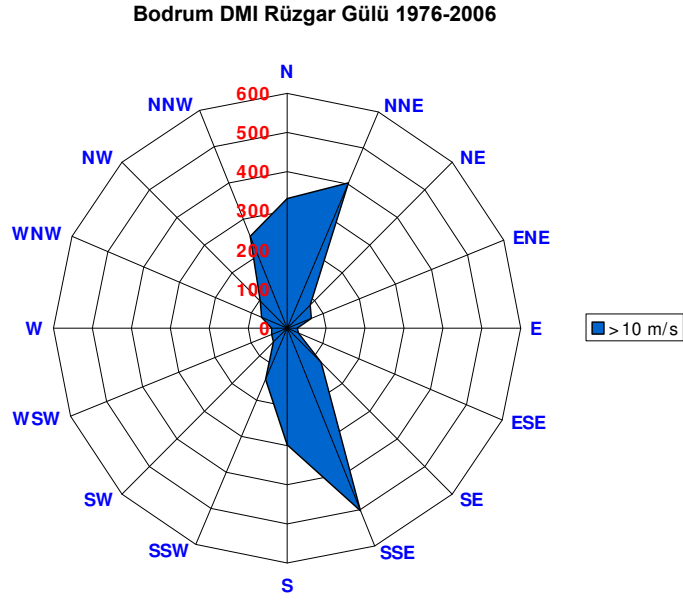


Şekil 2.6. Bodrum DMI rüzgar gülü



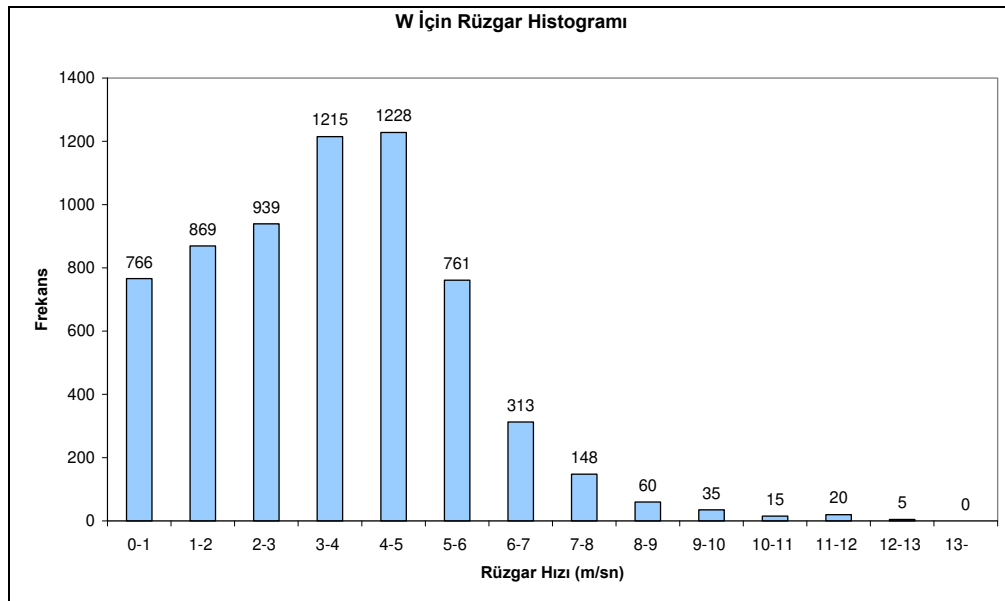
Şekil 2.7. Bodrum DMI rüzgar gülü (5 m/sn'den büyük hızlar için)

EK-2 (Devam) Rüzgarlar



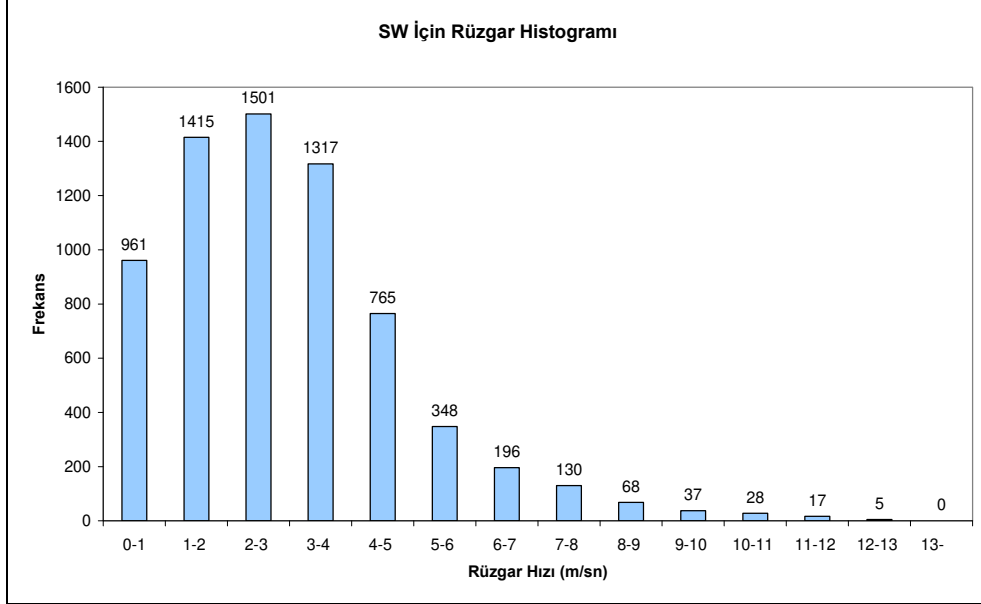
Şekil 2.8. Bodrum DMI rüzgar gülü (10 m/sn'den büyük hızlar için)

Kıyılarda su kabarması oluşturabilecek etkin yönlere ait histogramlar (1976 ile 2006 yılları arasındaki ölçülen kayıtlar dikkate alınarak) aşağıda sunulmuştur.

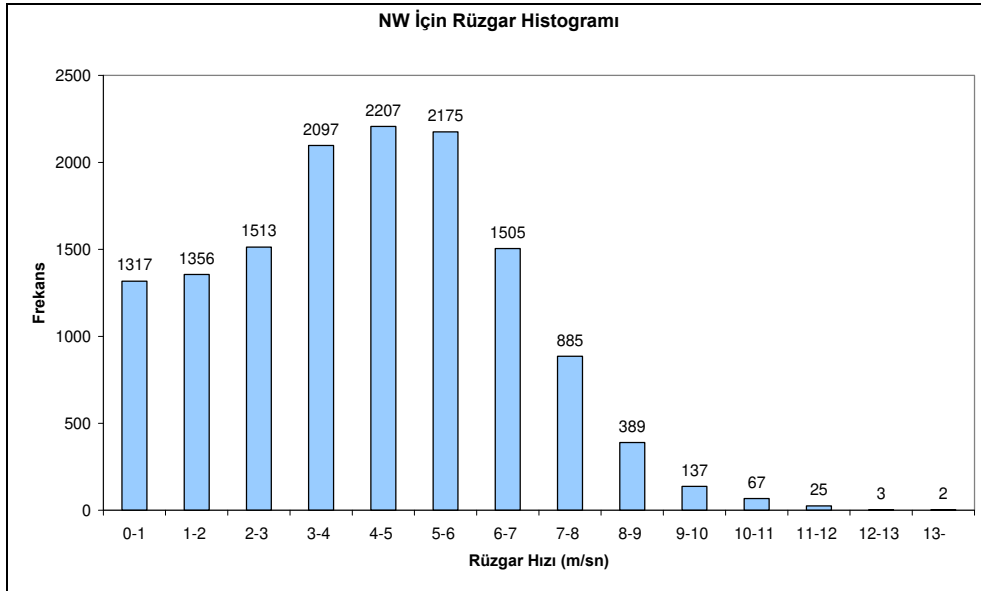


Şekil 2.9. W (Batı) yönü için rüzgar histogramı

EK-2 (Devam) Rüzgarlar

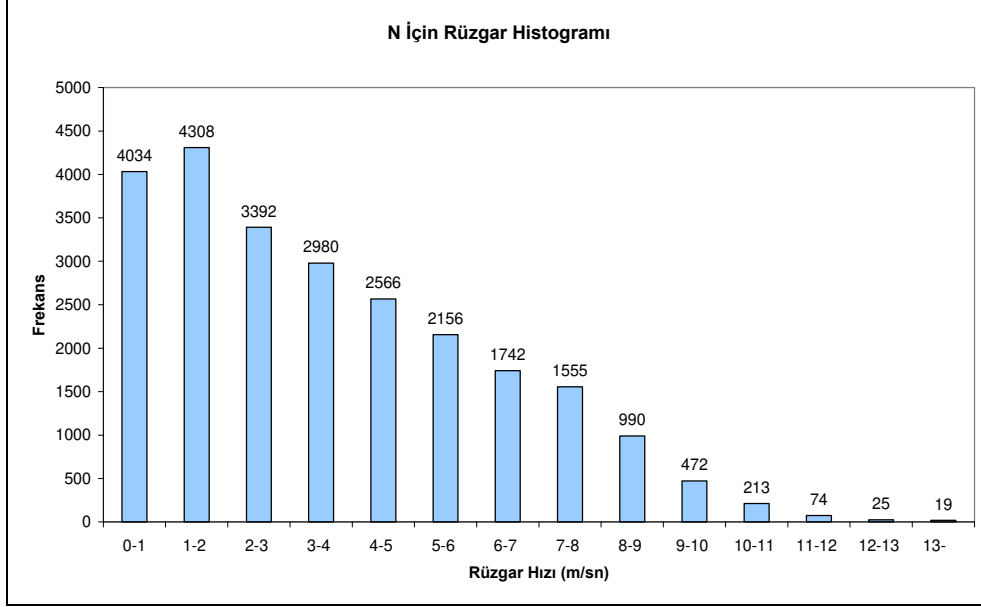


Şekil 2.10. SW (Güneybatı) yönü için rüzgar histogramı

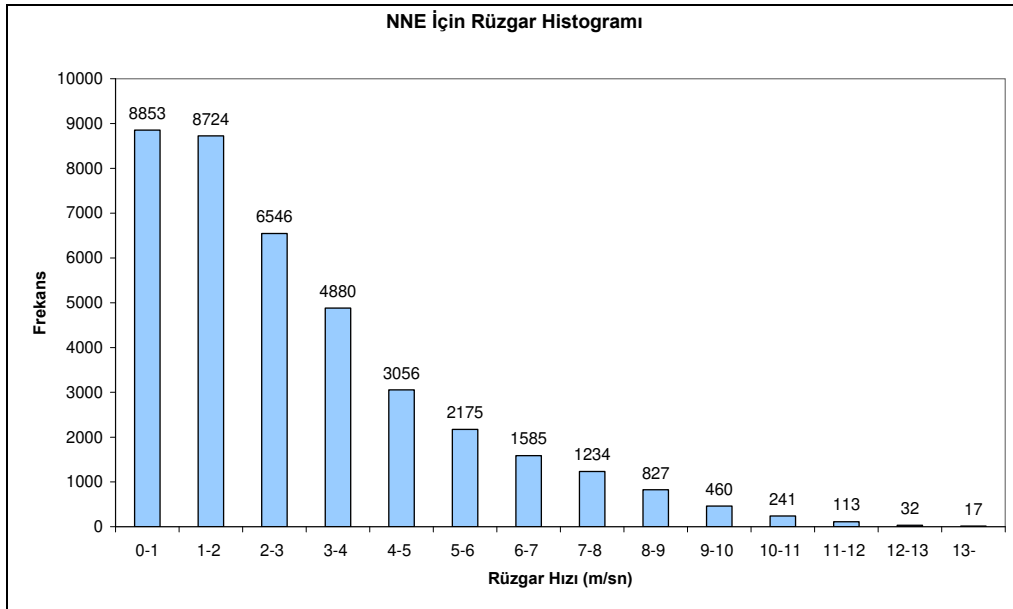


Şekil 2.11. NW (Kuzeybatı) yönü için rüzgar histogramı

EK-2 (Devam) Rüzgarlar



Şekil 2.12. N (Kuzey) yönü için rüzgar histogramı



Şekil 2.13. NNE (Kuzey-Kuzeydoğu) yönü için rüzgar histogramı

EK-3 (Devam) Sonlu farklar yaklaşımı

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_{j+1,k} - u_{j,k}}{h} + Q(h) \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_{j,k} - u_{j-1,k}}{h} + Q(h) \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_{j+1,k} - u_{j-1,k}}{2h} + Q(h^2) \quad (3.5)$$

Benzer şekilde $u(x,y)$ fonksiyonunun (x_j, y_k) noktasında y 'e göre kısmi türevi;

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{u_{j,k+1} - u_{j,k}}{h} + Q(h) \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{u_{j,k} - u_{j,k-1}}{h} + Q(h) \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{u_{j,k+1} - u_{j,k-1}}{2h} + Q(h^2) \quad (3.8)$$

İkinci dereceden kısmi türevler ise Eş. 3.1 ve Eş. 3.2 bağıntılarının birbirleri ile toplanmasıyla Eş. 3.9 ve Eş. 3.10'da verilen şekilde bulunur.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{u_{j+1,k} - 2u_{j,k} + u_{j-1,k}}{h^2} + Q(h^2) \quad (3.9)$$

Fonksiyonun y 'e göre ikinci kısmi türevi benzer şekilde bulunur.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{u_{j,k+1} - 2u_{j,k} + u_{j,k-1}}{h^2} + Q(h^2) \quad (3.10)$$

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : BOZDEMİR, Yusuf
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 20.11.1982 Ankara
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (312) 479 10 98
 Faks : 0 (312) 442 05 34
 e-mail : ybozdemir@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / İnş. Müh. Bölümü	2007
Lisans	Balıkesir Üniversitesi/ İnş. Müh. Bölümü	2004
Lise	Çağrıbey Anadolu Lisesi	2000

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2005-2007	Skopsu Proje Ltd. Şti.	Proje Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Bilgisayar teknolojileri, Yüzme, Basketbol, Sinema