

2000-00014



TÜRKİYE BİLİMSEL VE
TEKNİK ARAŞTIRMA KURUMU

THE SCIENTIFIC AND TECHNICAL
RESEARCH COUNCIL OF TURKEY

**KIYI LAGÜNLERİNİN HİDRODİNAMİĞİNİN,
TUZLULUK VE SU SICAKLIĞI
DAĞILIMLARININ VE KİRLENMESİNİN ÜÇ
BOYUTLU MATEMATİKSEL MODELLENMESİ**

PROJE NO: INTAG 821

1997000

İnşaat Teknolojileri Araştırma Grubu

Construction Technologies Research Grant Committee

KIYI LAGÜNLERİNİN HİDRODİNAMİĞİNİN,
TUZLULUK VE SU SICAKLIĞI
DAĞILIMLARININ VE KİRLENMESİNİN ÜÇ
BOYUTLU MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

PROJE NO: INTAG 821
198I009

PROF. DR. ERDAL ÖZHAN
DR. LALE HAPOĞLU-BALAS
DR. CAN ELMAR BALAS
İNŞ.MÜH. CUMHUR ÖZTÜRK

MART 1998
ANKARA

**KIYI LAGÜNLERİNİN HİDRODİNAMİĞİNİN,
TUZLULUK VE SU SICAKLIĞI
DAĞILIMLARININ VE KİRLENMESİNİN ÜÇ
BOYUTLU MATEMATİKSEL MODELLENMESİ**

**PROJE NO: INTAG 821
198I009**

**PROF. DR. ERDAL ÖZHAN
DR. LALE HAPOĞLU-BALAS
DR. CAN ELMAR BALAS
İNŞ.MÜH. CUMHUR ÖZTÜRK**

**MART 1998
ANKARA**

ÖNSÖZ

Rüzgar, gel-git ve yoğunluk değişimi etkisiyle oluşan kıyısal akıntıları, su düzeyi değişimlerini, su sıcaklığı ve tuzluluğunun dağılımlarını ve deniz suyuna karışan bir kirleticinin zamansal ve yersel derişimlerini hesaplamak için Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kıyı Mühendisliği Laboratuvarı'nda geliştirilen üç boyutlu matematiksel modelin; denizle bağlantılı bir göl niteliğiyle, hidrodinamik ve kirlenme açılarından özel önemi bulunan lagünlere uyarlanması amaçlayan bu proje, Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) İnşaat Teknolojileri Araştırma Grubu'nun (İNTAG) maddi katkılarıyla gerçekleştirilmiştir. Yürütücülüğünü Prof.Dr. Erdal ÖZHAN'ın yaptığı projede Dr. Lale Hapoğlu BALAS ve Dr. Can Elmar BALAS yardımcı araştırmacı olarak çalışmışlardır. Yardımcı personel olarak, İnşaat Mühendisliği Bölümü Yüksek Lisans öğrencisi Cumhur ÖZTÜRK görev yapmıştır.

Proje çalışmaları sırasında yakın ilgi ve desteklerini gördüğümüz TÜBİTAK-İNTAG Grubu çalışanlarına, alan ölçümleri sırasında sağladıkları yardımlardan dolayı Fethiye Turizm Kültür ve Çevre Eğitim Vakfı (FETÇEV), Club Lykia World ve Hotel Meri yöneticilerine, özverili çalışmalarından dolayı İnşaat Mühendisi Cumhur Öztürk'e ve alan ölçümlerini gerçekleştiren İnşaat Mühendisliği Bölümü öğrencilerine teşekkür ederiz.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ i

İÇİNDEKİLER ii

ÖZ iv

ABSTRACT vi

BÖLÜMLER

1.	GİRİŞ	1
	1.1 Kıyisal Akıntılar	2
	1.2 Türbülans	4
	1.3 Kıyı Lagünleri	6
2.	BİLİMSEL KAYNAK TARAMASI	10
	2.1 İki Boyutlu Modeller	11
	2.2 Yarı-Üç Boyutlu Modeller	12
	2.3 Üç Boyutlu Modeller	13
	2.4 Türbülans Modelleri	17
3.	ÜÇ BOYUTLU MATEMATİKSEL HİDRODİNAMİK MODEL	21
	3.1 Temel Denklemler	21
	3.2 Türbülans Modeli	26
	3.3 Sınır Koşulları	28

3.3.1 Su Yüzeyi	29
3.3.2 Deniz Tabanı	31
3.3.3 Kıyı Çizgisi	32
3.3.4 Açık Deniz	34
3.4 Sayısal Çözüm Yöntemi	34
3.4.1 Çözüm Matrisleri	37
3.4.2 Zamana Göre Türev Alınması	43
3.4.2.1 Doğrudan Zaman Adımlı çözüm	43
3.4.2.2 Dolaylı Zaman Adımlı çözüm	44
3.4.3 Süreklilik Denklemi	45
4. ALAN ÖLÇÜMLERİ	46
4.1 Rüzgar Verileri	48
4.2 Akıntı Ölçümleri	50
4.3 Tuzluluk ve Su Sıcaklığı Ölçümleri	75
5. MODELİN ÖLÜDENİZ LAGÜNÜ'NE UYARLANMASI	79
5.1 Rüzgar Kuvveti Etkisiyle Oluşan Akıntılar	82
5.2 Gel-git Kuvveti Etkisiyle Oluşan Akıntılar	88
5.3 Yoğunluk Değişimi Etkisiyle Oluşan Akıntılar	90
5.4 Kirletici Dağılımları	91
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	99
YARARLANILAN KAYNAKLAR	102
EK A: TABLO VE ÇİZİMLER	110

ÖZ

Lagün, haliç, göl yada körfez gibi, yüzey alanına oranla ortalama su derinliğinin az olduğu kıyusal su sistemlerinde, rüzgar, gel-git ve yoğunluk değişimleri nedeniyle oluşan akıntıları belirleyebilmek için üç boyutlu matematiksel modellerin kullanılması gereklidir.

Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kıyı Mühendisliği Laboratuvarı'nda, rüzgar, gelgit ve yoğunluk değişimi etkisiyle oluşan kıyusal akıntıları, su düzeyi değişimlerini, su sıcaklığı ve tuzluluğunun dağılımlarını ve deniz suyuna karışan bir kirleticinin zamansal ve yersel derişimlerini hesaplayan bir matematiksel model geliştirilmiştir. Modelde, düşey yönde su taneciklerinin ivmesinin önemsiz olduğu varsayımıyla üç boyutlu Navier-Stokes denklemleri çözülmektedir. Su yoğunluğunu belirleyen, su sıcaklığı ve tuzluluğunun alansal ve zamansal değişimi, üç boyutlu taşınım-yayınım denklemleri çözümlenerek hesaplanmaktadır. Türbülans kinetik enerjisi ve kinetik enerjinin sönümlenme hızının benzeştirilmesinde, iki eşitlikli $k-\epsilon$ türbülans modeli kullanılmaktadır. Sayısal çözüm yöntemi olarak yatay düzlemde sonlu farklar, düşeyde ise sonlu elemanlar uygulanmıştır. Kara sınırları değişebilir gözetilebilmekte ve yatay düzlemde değişik büyüklükte çözüm ağı uzunlukları seçilebilmektedir. Düşeyde, çözüm ağı kümeleşmesi uygulanarak çözümlülük istenilen düzeylerde artırılabilir.

Bilimsel kaynaklarda yayınlanan analitik ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak gerçekleştirilen üç boyutlu matematiksel hidrodinamik model öncelikle, denizle bağlantılı bir göl niteliğiyle, hidrodinamik ve kirlenme açılarından özel önemi bulunan lagünlere uygulanmıştır. Lagün içerisindeki su hareketleri ve düzey değişimleri, denizle su alışveriş mekanizması, lagün sularının sıcaklık ve tuzluluk dağılımları ve kirletici derişikliklerinin zamansal ve alansal değişimleri geliştirilen üç boyutlu matematiksel model kullanılarak hesaplanmıştır.

Matematiksel model, lagün ortamında kullanılmaya uygun duruma getirildikten sonra, topografya ve batimetri, hidrodinamik özellikler, rüzgar iklimi ve benzeri konularda mevcut bilgiler toplanıp değerlendirilerek, Ölüdeniz Lagünü'ne uyarlanmıştır.

Ölüdeniz Lagünü ve Belceğiz Körfezi'nde, Temmuz, Ağustos ve Eylül 1997 aylarında, ikişer hafta süreli alan ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu alan çalışmalarında, dip ve yüzey akıntıları, ve deniz suyunun tuzluluk ve sıcaklık değerleri ölçülmüştür.

Anahtar Sözcükler Kıyı lagünleri, matematiksel modelleme, su alışverişi, kirlenme, akıntılar, gelgit, türbülans, Ölüdeniz.

ABSTRACT

In coastal water bodies such as lakes, estuaries, lagoons or bays, where the horizontal length scale is much larger than the vertical one, the use of three dimensional mathematical models are essential in order to simulate the currents which occur due to wind, tide and density gradients.

A three dimensional numerical model to compute wind induced currents and water level elevations, was developed at the Middle East Technical University, Civil Engineering Department, Coastal Engineering Laboratory. The model also simulates the transport and diffusion of temperature, salinity and certain types of pollutants. In the model, the Navier-Stokes equations are solved with the hydrostatic assumption and the Boussinesq approximation. The three dimensional convective diffusion equations are solved for the spatial and temporal distribution of the water temperature and the salinity which affect the density of water. A two-equation $k-\epsilon$ turbulence model is used to determine the kinetic energy of the turbulence and its dissipation rate. The solution method is a composite finite difference-finite element method. In the horizontal plane finite difference approximations and in the vertical plane finite element shape functions are used. In the treatment of coastal land boundaries, the flooding and drying processes can be considered and the horizontal mesh sizes can be variable. To increase the vertical resolution, grid clustering can be applied.

The developed three dimensional numerical model which is verified for various flow situations by using several experimental and analytical results published in the literature, is applied to lagoons which have the characteristics of a lake connected to sea; since the hydrodynamics and pollution of lagoons possess an unique importance throughout the world. The circulations in the lagoon system, the water exchange mechanism with the sea, the distribution of water temperature and salinity, the temporal and spatial variation of a pollutant concentration are simulated by the developed three dimensional numerical model.

After general studies on the application to the lagoon environment, Ölüdeniz Lagoon was selected as the case study area. The required data such as the bathymetry and wind climate of the lagoon were accumulated and analyzed. Then, the model was applied to Ölüdeniz Lagoon.

In Ölüdeniz Lagoon and Belceğiz Bay, field observations and measurements were performed in July, August and September, 1997. Each of these measurements lasted about two weeks. During the field campaigns, the current pattern was observed and the sea water salinity and the temperature were measured.

Keywords: Coastal lagoons, numerical modelling, water exchange, pollution, coastal currents, circulation, tide, turbulence, Ölüdeniz.

BÖLÜM I

GİRİŞ

Su, insanlık için en önemli doğal kaynaklardan birisidir. Su alanlarının korunması da toplumların bugünü ve yarını açısından büyük önem taşır. Ancak, geride bırakacağımız bu yüzyıl içerisinde, insanların yoğun etkinlikleri sonucu ortaya çıkan çevresel kirlilik her geçen gün artarak, su alanlarını ve insan sağlığını tehlikeye sokan bir boyut kazanmıştır. Doğal çevrenin bozulması ve özellikle su kaynaklarının atık maddelerle yoğun olarak kirlenmesi, günümüzde çevre korumasını, sosyal ve ekonomik boyutları ile dünya çapında önemli bir konu haline getirmiştir. Bu yüzden, tanker kazaları için erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesinden, sanayi bölgelerinin akılcı planlanmasına dek pek çok alanda, su alanlarındaki kirlenici dağılımının önceden bilinmesi, gerekli önlemlerin zamanında alınarak olası sorunların önlenmesi açısından yaşamsal önem kazanmıştır. Su akışının ve sudaki atık maddelerin dağılımının tahmini, fiziksel veya sayısal modeller kullanılarak, doğadaki oluşumun benzeşimi ile mümkün olmaktadır. Uygulamalarda, doğruluğu kanıtlanmış ve benzeşim gücü yüksek sayısal modeller, hem zaman hem de ekonomik açıdan tercih edilmektedir.

Su akışının ve sudaki atık maddelerin dağılımının tahmini ve üç boyutlu olarak benzeştirilmesi, gelişen bilgisayar teknolojisiyle birlikte bugün üç boyutlu sayısal modeller kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Çağdaş bilgisayar teknolojisinin hızlı gelişimi, hız ve kapasite bakımından üstün özelliklere sahip bilgisayarların araştırmalarda yaygın olarak kullanılmasına ve böylece büyük miktarda verinin saklanıp işlenebilmesine olanak sağlamıştır. Bu hızlı gelişimin sonucunda, su akışını ve atık bulutunun dağılımını tahmin eden ve canlandıran üç boyutlu sayısal modellerin üretimi ve kullanımı olanaklı hale gelmiştir. Bir tasarım aracı olan ve karar destek sistemlerinin temel unsuru sayılan bu modeller, her geçen gün daha da geliştirilmektedir.

Bilindiği gibi belirli akıntılar için, benzeşim gücü üç boyutlu modellere oranla sınırlı olan iki boyutlu sayısal model, mühendislik uygulamalarında kendisine bir yer edinmiş durumdadır. Ancak, üç boyutlu modellerin kullanımı, yoğunluk dağılımının göz ardı edilemeyeceği ve rüzgarların oluşturduğu akıntıların önemli olduğu durumlarda kaçınılmazdır (Balas ve Özhan, 1995a; Balas ve Özhan, 1997b). Bu yüzden, özellikle kıyısal su alanlarındaki akıntı ve kirletici hareketlerinin modellenmesinde üç boyutlu modellere gerek duyulmaktadır (Balas ve Özhan, 1995b).

1.1 Kıyısal Akıntılar

Su akımı, küçük ve büyük ölçekli akımlar olmak üzere iki ana grupta incelenebilir. İlk gruba örnek olarak, sabit ya da yüzen cisimler çevresindeki ve akarsuların dönüş noktalarındaki akımlar verilebilir. Bu tür akımların ortak özelliği akım alanının, düşey ve yataydaki uzunluk ölçeklerinin aynı büyüklükte olmasıdır. İkinci gruba örnek akımlar ise, yatay uzunluk ölçeğinin düşeye göre çok daha büyük olduğu, sığ sular olarak adlandırılan, kıyısal su alanlarındaki akımlardır. Büyük ölçekli akımlar, atık maddelerin dağılımını büyük oranda belirleyen akımlardır.

Büyük ölçekli su akımları, özellikle lagün, haliç, göl veya körfez gibi, yüzey alanı/ortalama su derinliği oranı büyük olan kıyı sistemlerinde oluşmaktadır. Bu akımlar çok çeşitli hidrodinamik kuvvetlerin etkisiyle oluşmaktadır. Yerçekimi, ay ve güneşin çekim etkisiyle oluşan gel-git kuvveti ve su yüzeyini etkileyen rüzgar kuvveti, büyük ölçekli akımları oluşturan dış etkenli kuvvetlerdendir. Atalet, sürtünme ve basınç gibi kuvvetler ise suyun yapısal özelliğinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, büyük ölçekli su akımlarının matematiksel modellenmesinde, dünyanın dönüş etkisini tanımlayan sanal Coriolis kuvveti de kullanılmaktadır.

Kıyı sistemlerinin su alanı yüzeyinde çekme gerilmesi yaratan rüzgar kuvveti, yüzey tabakasını sürükleyerek, rüzgar yönündeki kıyı kenarında su düzeyinin yükselmesine, karşı yöndeki kıyıda ise düzeyinin düşmesine neden olur. Rüzgar yönünde oluşan bu su düzeyi

eğimi, barotropik basınç değişimi meydana getirerek, su tabanına yakın tabakalarda, yzey tabakasının sdrklenme ynüne karşıt ynde bir akıntı oluşturur. Sonuç olarak, yzeydeki su tabakasını sdrkleyerek alt tabakaların sdrtnmeden dolayı ters ynde akmasına yol açan ruzgar kuvveti, dűşeyde gđlü bir su çevrintisi yaratır. Bu evrinti hareketi, dűşeydeki momentum değişimini artırarak, derinlik boyunca yoğunluk farklılaşmasından kaynaklanan akıntılarının azalmasına ve bu sayede, yatay dűzlemdeki karışmanın artmasına neden olur.

Dengeli katmanlardan oluşan bir su kdtlesinin serbest yzeyine etkiyen ruzgar kuvveti, yoğunluğu daha fazla olan tabakalardaki suyun geçişiyle zamanla derinleşen trbtlanslı bir yzey tabakası oluşturur (Balas ve zhan, 1998). Bu tabakaların arasında, trbulansın yoğunluk farklılaşması ve yatay hız değişimleri ile snmlendiği ve karışım uzunluğunun azalarak dűşey yndeki taşımının onemli olde etkilendiği ince bir geçiş tabakası da yer alır. Böylece trbtlans kinetik enerjisinin bir blmü karışım sreci ile potansiyel enerjiye dnűřür ve dűşey trbtlans yayımını da azalır.

Trbtlanslı yzey tabakası, gelgit etkisi altındaki kıyı sistemlerinde, gelgit akıntılarında da etkilenmektedir. Gelgit dalgasının ilerlemesi, kıyı sisteminin topoğrafyası ve açık deniz bağlantı kanalının geometrisi ile bağıntılıdır. Değişen su hacmi nedeniyle, kıyı sisteminin bir blmü, belirli zaman aralıklarında tamamen kuruyabilmektedir. Sonuç olarak, kıyı sisteminin kara sınırları, sabit değil, dinamik olarak değişen sınır koşulları ile modellenmelidir.

Kıyı sistemlerindeki su hareketleri, su alanı yzeyine etkiyen ruzgar kuvvetine ve sıcaklık-tuzluluk farklılıkları sonucu oluşan su yoğunluğu değişimlerine neden olan gnlük ve mevsimlik iklim değişikliklerinden de etkilenmektedir. Bu değişiklikler, dűşey ekseninde derinlik boyunca belirli sıcaklık tabakaları oluşturur: Gunes enerjisinin emilmesi ile oluşan sıcak yzey tabakası; derinliğe bağlı olarak ani sıcaklık dűřűřü görülen ısı değişim tabakası (thermocline) ve sıcaklık değişiminin çok yavaş gerçekleştiği derin tabaka. Ancak, kıyı sistemleri bu oluşumun gerçekleşmesi için gereken derinliğe genelde sahip değildirler. Bu sistemlerde, mevsimlik ve gnlük ısı değişim tabakaları oluşmaktadır. Belirli mevsimlerdeki su-hava etkileşimleri sonucunda, yzey tabakası ve alt tabakalar arasında meydana gelen ani

sıcaklık düşüşleri, mevsimlik ısı değişim tabakasını (seasonal thermocline) oluşturur. Su-hava sınır tabakasinda gün içerisinde oluşan ısı değişimleri de günlük ısı değişim tabakasını (diurnal thermocline) meydana getirir. Bu tabakalarda, sıcaklığa ve tuzluluğa bağlı olarak suyun yoğunluğu değişmekte ve kıyı sistemlerindeki yoğunluğa dayalı su çevrintileri oluşmaktadır.

Su alanı yüzeyindeki yoğunluk, buharlaşma ve soğuma ile artmakta; ısınma, su buharı yoğunlaşması, yağış ve kaynak suyu akımları ile azalmaktadır. Güneş ışınlarının su yüzeyini ısıtması ile azalan yoğunluk, düşey yönde dengeli bir tabakalaşma oluşturur ve düşey karışımı azaltır. Su yüzeyinin gece soğuması veya buharlaşma ile yoğunluğun artması, dengesiz yoğunluk farklılaşması oluşturur. Sonuç olarak, su yüzeyindeki yüksek yoğunluklu tabaka derine doğru batma eğilimi gösterir. Bu su yoğunluğu hareketi düşey çevrintilere (thermohaline convection) sebep olur. Farklı derinliklerdeki ısınma ve karışma farklılıklarının neden olduğu yatay yoğunluk değişimleri de büyük ölçekli su çevrintilerine yol açarlar. Geliştirilen üç boyutlu hidrodinamik model, sıcaklık ve tuzluluk farklılıklarından kaynaklanan yoğunluk değişimlerini benzeştirebilmektedir.

1.2 Türbülans

Büyük ölçekli akımlar, genelde akım hareketinin oldukça düzensiz, yatışkın olmayan ve üç boyutlu olduğu türbülanslı akımlardır. Türbülans hareketleri, momentum, ısı ve kütle taşınımı oluşturduğu için akım alanındaki hız, sıcaklık, tuzluluk ve kirlenici derişimi dağılımlarını önemli ölçüde etkilerler. Türbülans taşınımı kesin çözümlü yöntemlerle belirlenemediğinden, ortalama akım alanıyla ilişkilendirilen deneysel yöntemlere dayanan türbülans modelleri ile tanımlanırlar. Türbülans modeli, akım denklemlerindeki türbülans taşınım terimlerini hesaplayan bir denklem takımı olarak tanımlanabilir. Türbülans modelleri, türbülans hareketini detaylı olarak benzeştiremeyen, ancak türbülansın ortalama akım hareketi üzerindeki etkisini belirleyebilen modellerdir ve girdi parametresi olarak deneysel sabit ya da fonksiyonlara gereksinim gösterirler.

Türbülans, oldukça geniş bir frekans spektrumuna sahip düzensiz eddy hareketlerinin mevcut olduğu ve genelde yüksek Reynolds sayılarında baskın olarak görülen bir akım şeklidir. Akımın sınır koşulları ile belirlenen büyük eddy hareketlerinin değerleri, akım parametreleri ile aynı mertebededir. Yüksek frekans oynamaları ile tanımlanan küçük eddy hareketlerinin değerleri ise akıcılık (viscous) kuvvetleriyle belirlenir. Spektrumun genişliği ile, büyük ve küçük eddy hareket değerleri arasındaki mertebe farkı Reynolds sayısı ile birlikte artar. Momentum, ısı ve kütle taşınımı başlıca büyük ölçekli türbülans hareketleri ile sağlanır. Bu sebepten dolayı, geliştirilen matematiksel modelde, büyük ölçekli türbülans hareketleri benzeştirilmektedir. Hız ve uzunluk ölçekleri, bu hareketleri tanımlayan başlıca model parametrelerindedir.

Büyük eddy hareketleri, ortalama akımla ilişkili olduğundan, akımın kinetik enerjisini büyük ölçekli türbülans hareketlerine aktarırlar. Türbülans hareketini oluşturan vorteks gerilmeleri de, akıcılık kuvvetlerinin etkin hale gelerek kinetik enerjinin sönümlenmesine kadar, mevcut enerjiyi küçük eddy hareketlerine aktarırlar. Enerji sönümlenmesi, küçük eddy hareketlerinde ve akıcılık kuvvetlerince sağlandığı halde; ortalama akım enerjisinin türbülans hareketine aktarılma hızı (ancak belirli bir miktar enerjinin daha küçük ölçekli hareketlere aktararak sönümlenebilmesinden dolayı) büyük ölçekli türbülans hareketlerince belirlenir. Diğer bir deyişle, akıcılık sönümlenen enerjinin miktarını değil, işlemin oluşma ölçeğini belirler. Akıcılık etkisi azaldıkça, yani Reynolds sayısı arttıkça, sönümlendirilen eddy hareketleri, büyük ölçekli hareketlere oranla azalır.

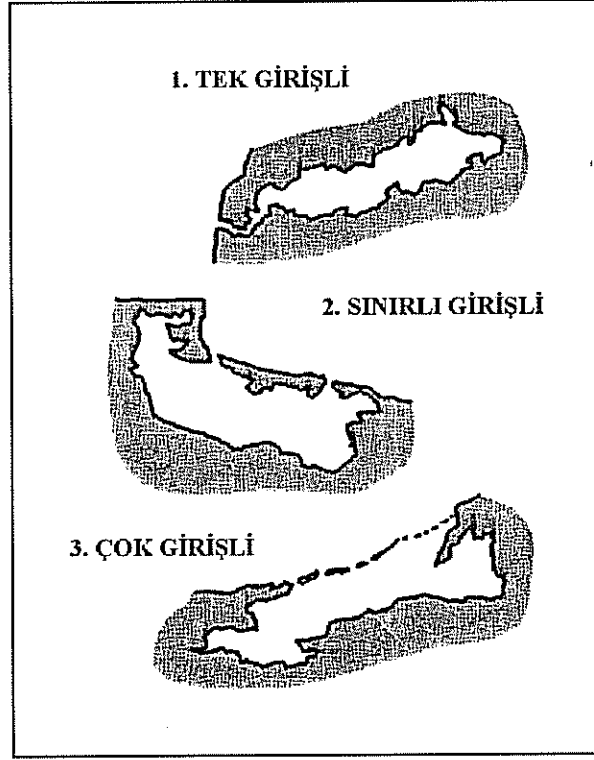
Geliştirilen matematiksel modelde, türbülansın kinetik enerjisi (k) ve sönümlenme hızı (ϵ), iki-denklemlilik bir k - ϵ türbülans modeli uygulanarak belirlenmektedir. Temel denklemler, Kartezyen koordinat sisteminde hem doğrudan (explicit) hem de dolaylı zaman adımlı (implicit) olarak çözülebilmektedir.

1.3 Kıyı Lagünleri

Kıyı lagünleri, genellikle kıyıya paralel olarak uzanan, denizden bir kara şeridi ile ayrılmış, denize bir veya birden fazla sınırlı açıklıkla bağlanan, derinlikleri birkaç metreyi genellikle aşmayan, kara içerisindeki su alanlarıdır (Kjerfve, 1994). Dünya kıyı alanlarının yüzde 13'ünü oluşturan kıyı lagünlerinin hassas yapısı, doğal ve beşeri faaliyetlerden kolayca etkilenmektedir (Sikora ve Kjerfve, 1985). Dünyada mevcut lagünlerin büyüklükleri birbirinden oldukça farklıdır ve yüzey alanı 10,200 km²'ye kadar ulaşan lagünlere rastlanmaktadır. Bu lagünlerin tuzluluğu da, yerel iklim şartlarına bağlı olarak, tatlı sudan, çok tuzlu suya kadar değişkenlik gösterir (More ve Slinn, 1984; Kjerfve ve Magill, 1989). Su derinlikleri, genel olarak 1-3 metre arasındadır ve giriş kanalları ile lagünün bir kaç çöküntü veya kanal bölgesi dışında 5 metreden azdır. Kıyı lagünleri, inorganik çökeltilerle organik maddeleri yakalayarak filtre görevi görürler. Bu sebeple, balıkçılık, su tarımı ve tuz üretimi yönünden değerli alanlardır ve üretim çeşitliliği açısından da zenginlik gösterirler.

Kıyı lagünleri, rüzgar etkisiyle oluşan hareketlerin incelendiği yüzey alanı/ortalama su derinliği oranı en büyük sığ su sistemleridir. Bu sistemlerin hidrolik ve hidrografik özellikleri, belirtilen orana bağlı olarak değişim gösterir. Bu özellikler, ayrıca tatlı su girişi, rüzgar şiddeti, gelgit, buharlaşma ve yağış dengesi ile yüzey ısı dengesi gibi değişkenlerin etkisi altındadır ve herbir değişken ile farklı şekillerde etkileşim gösterirler. Su kalitesi, ötrifikasyon, su ve tuz dengesi büyük oranda belirtilen değişkenlere, lagün içi çevrıntilere, tuz ve madde dağılımına ve deniz bağlantılarıyla gerçekleşen su alışverişine bağlıdır. Bu nedenle, lagünlerde kıyı yönetimi ve planlama, ancak lagünlerin fiziksel, kimyasal, jeolojik ve ekolojik dinamiğinin anlaşılması ile mümkün olmaktadır.

Lagünlerin deniz ile olan etkileşimlerinin nicelik ve niteliği, bu lagünlerdeki etkin kuvvetler ile hidrolojik parametrelerin zamansal değişimini belirlemektedir. Kıyı lagünleri, bu açıdan çok değişik yapısal şekillere sahiptirler. Deniz ile olan su alışverişlerine göre, Çizim (1.1) de gösterilen üç temel jeomorfolojik grup, bu geniş yapısal yelpazenin üç değişik noktası olarak belirlenebilir (Kjerfve, 1986):



Çizim 1.1 Kıyusal lagünlerin sınıflandırılması.

a) Tek Girişli Lagünler: Tek girişli (tıkalı) lagünler, yüksek dalga enerjisinin ve önemli miktarda kum taşınımının görüldüğü kıyılar boyunca bir dizi eliptik hücre şeklinde oluşan, uzun ve dar bir giriş kanalıyla denize bağlanan lagünlerdir. Tek girişli lagünlerin en önemli özelliği, açık denizdeki gelgit oluşumuyla aynı frekansa sahip gelgit etkisi altında kaldıkları halde, lagün içi su düzeyi değişimlerini ve gelgit akıntılarını büyük ölçüde engelleyen ve dinamik bir filtre görevini gören tek bir giriş kanalına sahip olmalarıdır. Lagünün denizle olan etkileşimini sağlayan tek giriş kanalının uzun ve dar yapısı, bu lagünlerde gelgit etkisiyle oluşan su düzeyi değişimlerini, aynı bölgede gözlenen gelgit miktarının yüzde 5'i ya da daha azı düzeyine indirgemektedir. Bu lagünler, dünyanın kurak veya yarı-kurak bölgelerinde sürekli ya da geçici olarak aşırı miktarda tuzluluğa erişirler.

Tek girişli bir lagünün temel özellikleri, uzun dönemli bir su yenilenme süresine sahip olması, rüzgar kuvvetinin baskın olması, yoğun güneş ışması ve tatlı su girişleri nedeniyle değişik yoğunluklu tabakaların oluşmasıdır. Tek girişli lagünlerin büyük bir çoğunluğu kıyıya paralel olarak uzanmaktadır, ancak bazen nehir deltalarıyla birlikte yeni bir oluşum meydana getirerek kıyıya dik bir konum kazandıkları da gözlenmiştir.

b) Sınırlı Girişli Lagünler: Sınırlı girişli (restricted) lagünler kıyıya paralel olarak uzanan ve iki ya da daha fazla giriş kanalına sahip büyük ve geniş su alanlarından oluşurlar. Sonuç olarak, bu lagünlerde belirgin bir gelgit çevrintisi gözlenir. Gelgit ve rüzgar etkisiyle oluşan çevrıntiler, düşeyde tam bir karışım sağlar ve lagünün tuzluluğu hafif tuzlu su ile deniz suyu aralığında değişkenlik gösterir. Sınırlı girişli lagünlerdeki suyun yenilenme süresi, tek girişli bir lagün ile karşılaştırıldığında oldukça kısadır.

c) Çok Girişli Lagünler: Çok girişli (leaky) lagünler, bir çok deniz bağlantısına sahip kıyıya paralel uzanan su alanlarıdır. Dalga ve kum taşınım olaylarının etkisiyle deniz ile olan bağlantı kanallarının kapanma eğilimine karşı, güçlü gelgit akıntılarının bulunduğu kıyılarda rastlanır. Bu lagünlerin temel özellikleri, tek girişli lagünler ile karşılaştırıldığında, yapısal yelpazenin diğer ucunda yer alırlar. Çok sayıda ve geniş yapıdaki gelgit geçiş ağzları; yalnızca gelgit etkisiyle değil, dalga ve uzun süreli diğer etkileşim mekanizmaları ile de kesintisiz su alışverişini sağlar. Güçlü gelgit akıntıları ve deniz suyuna yakın tuzluluk değerleri bu lagünlerin en önemli özellikleridir.

Lagün içindeki su, tuz ve ısı dengesi gibi fiziksel oluşumlar başlıca beş jeomorfolojik faktörden etkilenirler: Lagün ağzının yapısı, lagün büyüklüğü, etkin rüzgar yönlerine göre lagünün konumu, dip topografyası ve ortalama derinlik (Smith N.P., 1994). Lagün girişinin boyutları, çözünmüş ve askı maddeleri ile su alışverişini kontrol eder. Lagün-deniz alışverişini, suyun yenilenme süresini, lagün içindeki kalış süresini ve dolayısıyla da lagünün su kalitesini belirler. Büyük lagünlerde rüzgar etkisi, özellikle lagünün uzun eksenine, etkin rüzgar yönüyle aynı doğrultuda olduğunda oldukça belirgindir. Dip topografyası, doğal oluşumlu veya insan yapısı lagün içi kanalların da etkisiyle; gelgit, rüzgar veya diğer etkenlerle oluşan çevrıntileri yönlendirir ve taşınımı kontrol eder. Ortalama derinlik ise, yukarıda belirtilen etkenler içinde

en önemli olanıdır. Kıyı lagünleri, sığ su sistemleri olduklarından, ısınma ve soğumaya karşı oldukça duyarlıdırlar. Ayrıca, belirgin dalga etkisi sonucu oluşan su tabakalarındaki karışmalar, bazen lagün tabanına kadar ulaşabilmekte ve düşey tabakalanmayı tamamen yok etmektedir. Bunun sonucu olarak, lagünlerde yoğunluk değişimleri yatay düzlemde düşeye oranla daha büyüktür.

Sığ su sistemleri olan lagünlerde, dip sürtünme tabakası, düşey tabakalanmanın alışılmışın dışında çok güçlü olduğu bölgeler dışında, su yüzeyine kadar ulaşmaktadır. Böylece akıntılar, etken olan kuvvetin sona ermesi ile bir kaç saat içinde sönümlenmektedirler. Başka bir deyişle, lagünlerde belirgin akıntı düzenlerinin oluşması için kuvvetlerin sürekli ve bölgesel etkenli olması gerekmektedir. Örneğin, gelgit kuvveti periyodik olarak sürekli bir etkendir, ancak gelgit hareketleri açık denizle olan su alışverişinden kaynaklandığından, lagün girişinin kısıtlayıcı özelliği sebebiyle etkisi oldukça azalmaktadır. Buna rağmen, gelgit hareketleri özellikle lagün girişleri etrafında önemli bir etken durumundadırlar. Rüzgar kuvveti ise, bölgesel olduğundan lagünü doğrudan etkiler, fakat zaman içinde hızı ve yönü değişkendir. Bu yüzden, lagünün giriş ağzı bölgesinde gelgit akıntıları baskınken, iç kesimlerde rüzgar etkisi çevrıntilerin oluşumunda etkilidir. Rüzgar etkenli çevrıntiler, rüzgarın esiş yönünde su yüzeyinde bir çekilme oluştururken, lagün tabanında ters yönlü bir akıntı meydana getirirler. Bunun sonucu olarak, gelgit etkisi uzun dönemde etken bir kuvvet haline dönüşse bile, kısa dönemde, bölgesel rüzgar etkisine karşı oluşan net akım baskın olarak gözlenmektedir. Yoğunluk etkenli akıntılar ise, genellikle, çok sığ lagünlerde etkili akıntılardır.

BÖLÜM II

BİLİMSEL KAYNAK TARAMASI

Bilimsel kaynaklarda, koy, lagün ve haliç gibi kapalı özellik gösteren kıyısız deniz alanlarında meydana gelen türbülans taşınım olaylarıyla ilgili çeşitli sayısal model çalışmaları bulunmaktadır. Bu çalışmalarda model ve yaklaşımlar, kullanılan matematiksel yöntemler (örneğin sonlu farklar, sonlu elemanlar, yarı analitik gibi) ve fiziksel modelleme metodları (örneğin basit doğrusal, iki boyutlu, doğrusal olmayan üç boyutlu, türbülans çözünümlü vb.) açısından büyük farklılıklar göstermektedirler.

Lagün-deniz etkileşiminin hidrodinamik özelliklerinin ve doğal denge karakteristiklerinin belirlenmesi konulu bir çalışma (YDABÇAG-93 No'lu proje), TÜBİTAK, Yer Deniz Atmosfer Bilimleri ve Çevre Araştırma Grubu tarafından desteklenmiştir. Proje raporunda, lagünler sınıflandırılmış, yurt içi ve dışındaki bazı lagün örnekleri verilerek lagün ağızları, lagün konfigürasyonları, lagünlere etki eden faktörler (morfolojik, gelgit etkisi ve bataklıkların oluşumu, kanalların dolması ve sedimentasyon etkisi, rüzgar-dalga-akıntı ilişkileri, kirlilik, buharlaşma), lagünlerin hidrodinamik yapıları üzerine bilgiler sunulmuştur. Aynı projede, rüzgarın lagün sistemindeki akımın yapısına etkisinin olmadığı ve kanaldan içeri giren akımın, deniz ve lagündeki su düzeyinin doğrusal fonksiyonu olduğu, yüzey alanın sabitliği ve üniform tuzluluk karışımı varsayımıyla, tek boyutlu bir matematiksel model uygulanmış, Büyükçekmece ve Köyceğiz Lagünleri'nde alan çalışmaları yürütülmüştür.

2.1 İki Boyutlu Modeller

Kıyısal alanlardaki gelgit çevrintileri, derinlik boyunca ortalamaya dayanan iki boyutlu modeller tarafından başarıyla benzeştirilmektedirler. Li ve Falconer (1994) tarafından, kare şeklindeki bir limanda oluşan gelgit akıntılarını laboratuvar ölçeğinde benzeştirmek amacıyla, 0-mertebesinden basit bir türbülans modeli içeren ve derinlik boyunca integrasyon uygulayan iki boyutlu sayısal bir model geliştirilmiştir. Bu modelde, ilerlemeli momentum terimlerini en düşük yapısal özellik uygulaması (minimax characteristics scheme) ile çözen ayrışım uygulayıcı bir yöntem (split operator scheme) kullanılmıştır. Sonuçta, model çözümlerinin deney verileri ile oldukça uyumlu olduğu görülmüştür.

Wu ve Tsanis (1994), yıkışık ölçekli Windermere Körfezi fiziksel modelinde, rüzgarın kıyısal çevrinti hareketleri, kirleticili taşınımı ve kirleticinin suda kalış süresi üzerine olan etkilerini, derinlik boyunca ortalamaya dayanan hidrodinamik bir model kullanarak incelemişlerdir. Szymkiewicz (1992), Vistula Lagünü'ndeki fırtına kaynaklı akıntılar ve su düzeyi kabarmalarını, derinlik boyunca ortalamaya dayanan deklemleri çözen matematiksel bir model ile benzeştirmiştir. Hearn, Hunter ve Heron (1987), sığ bir körfezde rüzgar etkisiyle oluşan su alış-verişleri üzerine derin bir bağlantı kanalının etkisini ve bu körfezdeki rüzgar etkenli çevrintileri, iki ve üç boyutlu sayısal modeller kullanarak incelemişlerdir. Bu incelemelerin sonucunda, derin bağlantı kanalı etkisiyle oluşan su alış-verişinin tahmininde, rüzgar etkenli barotropik hareketleri modelleyen ve düşeyde ortalama değerlerle çalışan iki boyutlu matematiksel modellerin iyi sonuçlar verdiğini belirlenmiştir. Ancak, bu modellerin akımın düşeydeki değişiminden kaynaklanan çevrinti hareketleri hakkında hiçbir bilgi vermediği de saptanmıştır. Belirtilen çevrinti hareketleri, düz bir basenin su alış-verişinde oldukça etkili olduğundan, iki boyutlu modellerdeki taban sürtünme değişkenlerinin doğruluğunu da geçersiz kılmaktadır.

Jamart ve Ozer (1987), derinlik boyunca düşeyde integrasyon uygulayan iki boyutlu sayısal bir model ile, stream fonksiyonu denklemlerine dayanan Ekman tipi üç boyutlu bir modeli, yatay kesme gerilmelerini ihmal ederek karşılaştırmışlardır. Bu modelleri, sabit yoğunluklu kapalı ve sığ sulardaki rüzgar etkenli yatışkın çevrintilerin belirlenmesi amacıyla

kullanmışlardır. Sonuçta, iki ve üç boyutlu modeller arasındaki en önemli farkın, taban gerilmesinin benzeştirilmesinde olduğunu belirlemişler ve bu iki modelin benzer sonuçlar verdiği koşulları araştırmışlardır.

2.2 Yarı-Üç Boyutlu Modeller

Doğal su alanlarının büyük bir bölümü için, sığ su kabulleri yapılabilmekte ve hareket denklemleri basitleştirilmektedir. Yarı-üç boyutlu (quasi-three-dimensional -Q3D) modellerin geliştirilmesi de bu kabullere dayanmaktadır. Yapılan kabullere ek olarak, çoğu zaman gerçekleştirilen diğer yaklaşım ve basitleştirmeler ise, belirtilen modellerin benzeştirme ve tahmin yeteneğini azaltmaktadır. Yaklaşımlarda, genellikle doğrusal olmayan terimler ihmal edilmektedir (Cheng, Powell ve Dillon, 1976; Cheng, 1977; Lardner ve Çekirge, 1988). Ayrıca, düşeydeki eddy akışkanlık parametresi de çoğunlukla sabit alınmakta veya örneğin düşey kordinatın doğrusal ya da üssel bir fonksiyonu olarak kabul edilerek değerler atanmaktadır (Jamart ve Ozer, 1987).

Yarı-üç boyutlu sayısal modellerin tanımı genelde araştırılan bilimsel kaynağa bağlı olarak değişkenlik gösterir. Ancak bu modellerin, hidrostatik basınç dağılım kabulü ve Düşey-Yatay Ayrışım Algoritması'nın (Vertical-Horizontal Splitting Algorithm - VHS) uygulanması gibi ortak özellikleri bulunmaktadır. Bu algoritmanın kullanılmasıyla, akım değişkenlerinin dağılımı yatay ve düşey düzlemlerde olmak üzere iki ayrı basamakta çözülebilmektedir. İlk çözüm basamağında, akım hızları sadece yatay koordinatın bir fonksiyonu olarak derinlik boyunca ortalamaya dayanan akım modülü ile, ikinci çözüm basamağında ise, düşey koordinatın fonksiyonu olarak hız profili modülü ile hesaplanmaktadır.

Jin ve Kranenburg (1993) tarafından önerilen yarı-üç boyutlu modelde, düşey eddy akışkanlığı için basit bir cebirsel formül kabul edilmiş ve yoğunluğun derinlik tabakalarındaki değişimi dikkate alınmamıştır. Alansal türevlerde sonlu farklar yaklaşımı kullanılmıştır. Çözüm noktalarının sayısı düşeyde eşit alınmış ve eşit uzaklıklı bir çözüm ağı kullanılmıştır.

Bunun sonucu olarak, düşeydeki çözüm ağlarının yatayla oluşturduğu açılı hesapta katmak amacıyla, düşey türevlerdeki sonlu farklar yaklaşımlarına ilave terimler eklenmiştir. Bu terimler, düşey değişimlerinin ağ çizgisi eğimleri ile etkileşimini içerirler.

2.3 Üç Boyutlu Modeller

Son zamanlarda, yüksek kapasiteli ve hızlı bilgisayarların araştırmalarda yaygın olarak kullanılmaya başlanması ile, üç boyutlu matematiksel modeller geliştirilmeye başlanmıştır. Üç boyutlu modeller, uygulamalarda sık kullanılan ve akım parametrelerini derinlik boyunca ortalayarak hesaplayan iki boyutlu modellerin, düşeydeki oluşumları da hesaba katabilmeleri için geliştirilmişlerdir.

Üç boyutlu olarak nitelendirilebilen ilk modellerde, pek çok yaklaşım ve basitleştirmeler mevcuttur. Heaps (1973), İrlanda Denizi'ne uygulanan üç boyutlu matematiksel akıntı modelinin temel bulgularını ve teorik yapısını yayınlamıştır. Uygulanan model, derinlik eksenini ihmal ederek doğrusal hale dönüştürülen hidrodinamik denklemleri çözmektedir. Sonuç olarak elde edilen ve yalnızca iki yatay konum eksenini içeren diferansiyel denklemler, sonlu farklar yöntemi kullanılarak sayısal olarak çözülmüştür. Hesaplanan değerlere uygulanan ters dönüşüm ile, bu değerlerin düşeydeki aksenal bağımlılığı tekrar kazanılmış ve suyun homojen olduğu kabul edilerek, düşey akıntı yapısı bir dizi Eigen fonksiyonu ile tanımlanmıştır.

Son yıllarda geliştirilen üç boyutlu modellerin çoğunda, yatayda sonlu farklar metodu kullanılırken, düşeyde farklı bir yonteme başvurulmuştur. Katmanlı model olarak adlandırılan modellerdeki temel diferansiyel denklemler, her bir katmanda ortalama üç boyutlu süreklilik ve momentumun korunumu denklemleridir (Lin ve Falconer, 1996; Falconer, George ve Hall, 1991). Çözüm ağı kutusu modeli (grid box model) adı verilen bir diğer modelde ise üç boyutlu hareket denklemleri, içinden akışkanın serbest olarak aktığı bir kutu şeklinde düşünülen ve düşeyde sabit alınan bir sonlu farklar ağı kullanılarak çözülmüştür. Rajar (1989), Adriyatik Denizi'nde gel-git ve rüzgar etkileriyle oluşan akıntıların modellenmesi

amacıyla, çözüm ağı kutularını kullanan ve doğrudan zaman adımlı (explicit) çözüm sağlayan üç boyutlu hidrodinamik bir model geliştirmiştir. Kim ve Lee (1994), sonlu farklar yöntemini kullanarak geliştirdikleri ve yarı-dolaylı zaman adımlı (semi-implicit) çözüm sağlayan üç boyutlu hidrodinamik modelde, yine çözüm ağı kutularını kullanmışlardır. Model, Kore'deki Suyoung Körfezi'ne uygulanarak, körfezdeki gel-git ve rüzgar etkisiyle oluşan akıntılarının tahmininde kullanılmıştır.

Casulli ve Cheng (1992), homojen özellik gösteren sığ sulardaki üç boyutlu akıntılarının belirlenmesi amacıyla, yarı-dolaylı zaman adımlı sonlu farklar yöntemi ile çözüm ağı kutularını kullanan bir model önermişlerdir. Bu modeldeki temel diferansiyel denklemler, düşeydeki basınç dağılımını hidrostatik kabul eden, türbülans eddy akışkanlığını sabit alan ve oldukça basitleştirilmiş yapıdaki üç boyutlu ortalama türbülans akım denklemleridir. Bu model, gel-git etkisiyle oluşan akıntılarının tahmin edilmesi amacıyla Venedik Lagünü'ne ve San Fransisko Körfezi'ne uygulanmıştır. Bu modellerde, düşeyde sabit alınan sonlu farklar ağı nedeniyle, derinlik arttıkça düşey çözüm ağı kutularının sayısını artmakta, sığ alanlarda ise bu sayı azalmaktadır. Bu sebeple, düşey kesme kuvvetinin yüksek olduğu sığ sularda düşey çözünürlük azalmaktadır. Sığ sularda karşılaşılan düşey çözünürlük problemi, ilk olarak bir parçacığın atmosfer aerodinamiğinde izlenmesinde uygulanan sigma koordinat kutusu modeli ile (Philips, 1957), hidrodinamik denklemlerin sigma koordinatlarına çevirilmesiyle çözülebilir. Bu değişimden sonra, düşeyde sonlu farklar çözüm ağı uygulanabilir. Böylece, herbir yatay ağ noktasında, sabit sayıda düşey çözüm ağı kullanılır.

Owen (1980), sigma koordinatlarını kullanan üç boyutlu bir model geliştirmiş ve Bristol Boğazı'na uygulamıştır. Bu modelde, hidrodinamik hareket denklemleri sigma koordinatlarına çevirilerek ve yatayda sonlu farklar çözüm ağı, düşeyde ise Galerkin metodu kullanılarak çözülmüştür. Gordon ve Spaulding (1987), üç boyutlu bir model ile gel-git ve kısmen de rüzgar etkisiyle Narragansett Körfezi'nde oluşan sabit yoğunluklu akım şekillerini incelemişlerdir. Sigma koordinat değişiminden sonra temel denklemler, düşeyde Galerkin Ağırlıklı Kalan (Galerkin Weighted Residual) Yöntemi, yatayda da sonlu farklar metodu kullanılarak çözülmüştür.

Blumberg ve Mellor (1987), kıyı ve deniz alanlarındaki çevrintilerin benzeştirilmesi için geliştirdikleri üç boyutlu modellerinde, hız ve düşey su düzeyi ile tuzluluk ve sıcaklık alanlarını tanımlayan denklemleri, kartezyen koordinat sisteminden sigma koordinatlarına çevirerek, düşey ve yatay düzlemlerde sonlu farklar yaklaşımı ile çözmüşlerdir. Eğrisel fiziksel alanların işlemsel çözüm ortamına çevrilmesinde, akım ve taşınımın temel denklemlerinin de dönüşüme uğraması ile karmaşık denklem takımları elde edilmektedir. Stansby (1997) gel-git etkisiyle sığ sularda oluşan akımlar için, standart bir $k-\epsilon$ türbülans taşınım modeli ve sigma koordinat sistemi kullanan üç boyutlu bir matematiksel model geliştirmiştir. Bu modelde, hidrostatik basınç dağılımı kabul edilmiş ve yarı-dolaylı zaman adımlı bir sonlu hacim uygulaması kullanılmıştır. Model, gel-git akıntılarını tahmin etmek amacıyla Elbe Halici'ne uygulanmıştır. Sigma koordinat sisteminde yatay düzlemdeki eğimlerin belirlenmesi, gerçekte sistemde var olmayan akımları tanımlayan yüksek dereceden türevlerin oluşmasına yol açacağından, bu eğimler gerçek koordinat uzayında elde edilmiştir. Sigma koordinat dönüşümü konformal bir dönüşüm olmadığından, çevrilen temel denklemler ilave çapraz türevler içeren karmaşık bir yapıya sahiptirler.

Davies tarafından geliştirilen yöntemlerin (Davies, 1982; Davies, 1980; Davies ve Owen, 1979) en önemli özelliği derinlik izlemeli koordinat sisteminin (depth-following coordinate system) kullanılmasıdır. Davies, düşeyde kosinüs fonksiyonlarını ve Chebyshev polinomları ile Gram-Schmidt ortogonal polinomlarını temel alan Galerkin yöntemini kullanarak kapalı bir dikdörtgen basendeki rüzgar etkenli akımın üç boyutlu sayısal benzeşimini elde etmiştir. Modeldeki denklemler ilk olarak kartezyen koordinat sisteminde tanımlanmıştır. Ancak integral alma aşamasında, fonksiyonların tüm yatay eğim terimleri, temel fonksiyonların yatay değişimleri göz önüne alınarak düzeltilmiştir. Aynı yöntem, Koutitas ve O'Connor (1980) tarafından rüzgar ve gelgit etkenli akımların üç boyutlu matematiksel modellenmesinde kullanılmıştır. Sabit yoğunluklu hidrostatik basınç dağılımı varsayılmış, yatay momentum değişimi ise ihmal edilmiştir. Model bir $k-L$ türbülans modeli de içermektedir.

Galerkin yönteminin uygulanmasından önce, denklemlere derinlik izlemeli koordinat dönüşümünün uygulanması ile, kartezyen koordinatlarında dönüşüm uygulanmadan erişilen

çözümlerin denkliği Davies (1982) tarafından belirlenmiştir. Davies ve Stephens (1983), hidrodinamik denklemlerin çözümünde, düşeyde, sonlu farklar ve Galerkin yöntemlerinin uygulamasını karşılaştırmışlardır. Her iki yöntemin uygulanması sırasında, bilgisayarın zaman ve bellek gereksinimi açısından uygulama verimliliği ve elde edilen çözümün doğruluğu incelenmiştir. Sonuç olarak, düşeyde, Galerkin sonlu elemanlar yönteminin, sonlu farklar yöntemine göre çok daha doğru sonuçlar verdiği bulunmuştur.

Hapoğlu (1992), rüzgar ve gelgit etkenli akıntıların körfezlerde oluşturduğu çevrinti hareketlerinin ve kirlenici taşınımının benzeşimi amacıyla, düşey düzlemde Galerkin metodunu, yatay düzlemde sonlu farklar yaklaşımını uygulayan üç boyutlu bir matematiksel model geliştirmiştir. Modelde, sabit yoğunluklu hidrostatik basınç dağılımı varsayılarak, temel denklemler sabit türbülans eddy akıcılık katsayıları ile çözülmüştür. Model, İzmir Körfezi'ne uygulanmıştır (Özhan ve Hapoğlu, 1992).

Derinlik izlemeli koordinat sisteminde, tabaka kalınlığı, koordinat noktasındaki su derinliğiyle orantılıdır. Büyük batimetrik düzensizliklerin bulunduğu bir yörede tabaka kalınlığı, derin deniz bölgesinde en büyük, sığ su alanlarında ise en küçük değerlerine ulaşmaktadır. Sonuç olarak, tabaka kalınlığı sığ su alanlarında yeterli iken, derin denizde akım parametrelerindeki değişimlerin doğru olarak tanımlanabilmesi için istenen hassaslığa bazen erişememektedir. Huang ve Spaulding (1995), bilinen σ -koordinat dönüşümünde cebirsel bir çevirim uygulayarak, γ -koordinatları adı verilen yeni bir düşey koordinat sistemi oluşturmuşlardır. Uyguladıkları bu yöntemde, su yüzeyine ve tabanına yakın bölgelerde, çözüm noktalarındaki su derinliğiyle orantılı olan yoğunluk katsayıları kullanılmakta ve böylece çözüm ağları yoğunlaştırılmaktadır. Geliştirilen hidrodinamik model, açık bir kanalda gel-git kuvvetleri ve yoğunluk etkisiyle, kapalı bir basende ise rüzgar etkisiyle oluşan akımların benzeşiminde kullanılarak denenmiştir.

2.4 Türbülans Modelleri

Boussinesq (1877), günümüzden yüz yirmi bir yıl önce, belirgin türbülans kesme gerilmesinin, türbülans yada eddy akıcılık değerleri ve ortalama birim deformasyon değişimiyle orantılı olabileceğini belirlemiştir. Günümüzde kullanılan türbülans modelleri, Boussinesq yaklaşımının uygulanmasına göre sınıflandırılmaktadır. Bu yaklaşımı kullanan modeller, türbülans akıcılık modelleri olarak adlandırılmaktadır. Deneysel çalışmalar, pek çok akım şekli için türbülans akıcılık kuramınının geçerli olduğunu kanıtlamıştır. Bu yaklaşımı kullanmayan modeller ise, Reynolds gerilim terimlerini içeren gerilim-denklemler olarak bilinirler.

Türbülans modellerinin sınıflandırılmasında kullanılan diğer bir yöntem de, model parametrelerinin çözümünü sağlayan kısmi türev denklemlerinin sayısıdır. Basit cebirsel modeller için sıfır olan kısmi türev denklemlerinin sayısı, karmaşık Reynolds gerilim modellerinde (Lauder B.E. ve Spalding D.B., 1972) on ikiye kadar çıkmaktadır. Türbülans modelleri, çözümün benzeşim derecesine göre de sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırmaya göre, birinci dereceden bir benzeşimde, sadece ortalama hız ve geometriye dayanan fonksiyonların kullanılmasıyla Reynolds gerilimleri hesaplanmaktadır. İkinci dereceden benzeşimlerde, türbülansın bir veya daha fazla özelliği için, taşınımın kısmi türev denklemleri çözülmektedir.

Cebirsel veya sıfır-denklemliler türbülans modellerinin tümü, Boussinesq yaklaşımını uygulamaktadır. Bu modellerin en başarılı örneklerinden biri Prandtl tarafından 1920'de önerilmiştir. Prandtl, eddy akıcılığının rassal değişim gösteren su taneciği hızlarının ortalama değerleri ve karışım uzunluğuyla orantılı olduğunu kabul etmiştir. Karışım uzunluğu, akışkan tanelerinin ilk momentumlarını koruduğu akıma dik yöndeki uzunluk olarak düşünülür ve genelde akışkan tanelerinin serbest çarpışma sonucu karıştıkları ortama yol mesafesi mertebesinde hesaplanır.

Prandtl denklemi, türbülans akıcılığını skalar bir değişken olarak kabul ettiğinden, özellikle tabana yakın bölgede doğru sonuçlar vermektedir. Fakat dış tabakada, türbülans

akıcılığının birim deformasyon yönüne bağlı bir tensor ile tanımlanması gerektiği, artan deneysel kanıtlarla ortaya konmaktadır. Akıma dik yönün kesin olarak belirlenemediği geometrilere ise, Prandtl denklemi geliştirilerek kullanılmaktadır.

Karışım uzunluğu modelleri, deneysel olarak bulunan ve modellerin temel girdi parametresi olan karışım uzunluğu dağılımının, incelenen probleme bağlı olarak değişkenlik göstermesi sebebiyle genel amaçlı kullanımdan uzaktırlar. Ayrıca, modellerin eddy akıcılığı ve yayınımlı değişkenleri, ortalama hız değişiminin sıfır olduğu durumlarda, uygulamada problemlere sebep olmaktadır. Modelin temelde hız değişimine bağlı olması, türbülansın yerel oluşum hızına eşdeğer bir hızda sönmüldüğünü kabul eden "türbülansın yerel dengesi" varsayımını dayanak aldığını göstermektedir. Bu varsayımda, hesaplama noktasında önceki zaman aralıklarında oluşan değişimlerin veya taşınımın etkisiyle diğer çözüm ağı noktalarında mevcut olan değerlerin, hesaplama zamanındaki türbülans değerlerini etkilemediği kabul edilmektedir. Böylece, karışım uzunluğu modellerinin bu etkileşimlerin önemli olduğu hızlı gelişimli (rapidly developing) ve tekrarlı çevrıntili (recirculating) akım koşulları ile haliç, lagün, koy gibi kıyasal alanlarda oluşan zamana bağımlı (unsteady) akımlar için uygun olmadığı ortaya çıkmaktadır. Bu modeller özellikle karmaşık akımlarda, karışım uzunluğu dağılımının belirlenmesindeki zorluklar sebebiyle çok az kullanılmaktadır.

Kim ve Lee (1994), karışım uzunluğu yöntemini, gel-git ve rüzgar etkenli türbülansın benzeştirildiği üç boyutlu modellerinde uygulamışlardır. Bloss ve arkadaşları (1988), haliç akıntıları ve taşınım olaylarının modellenmesi için geliştirdikleri ve sonlu farklar yaklaşımını uyguladıkları matematiksel modellerinde, tabakalaşma etkisini de göz önüne alarak, düşeydeki eddy akıcılığını karışım uzunluğu yöntemi ile benzeştirmişlerdir.

Karışım uzunluğu kuramının içerdiği kısıtlamaları gidermek amacıyla, diğer hesap ağı noktalarındaki veya önceki zaman aralıklarındaki değerlerin taşınım yoluyla hesaplanan zamanda belirlenen türbülans değerlerine olan etkisini, bu etkileri tanımlayan kısmi türev denklemlerini çözerek belirleyen türbülans modelleri geliştirilmiştir. Bu alanda kaydedilen gelişmelerin önemli adımlarından birisi, düzensiz değişimli hız ölçeğiyle ortalama hız eğimleri arasında doğrudan bir bağıntı kurmaktan vazgeçerek, bu ölçeği taşınım dekleminde

elde etmek olmuştur. Bu tür modellere tek denklem modelleri adı verilmektedir. Tek denklem modellerinde kullanılan ve fiziksel olarak en anlamlı bulunan ölçek $k^{0.5}$ 'tir. Bu ölçekte k , türbülans hareketinin birim kütlede sahip olduğu kinetik enerji olarak tanımlanır. Kolmogorov-Prandtl denklemi, eddy akıcılık bağıntısında bu ölçeği kullanmaktadır. Kolmogorov (1942) ve Prandtl (1945), birbirlerinden bağımsız olarak eddy akıcılık bağıntısını ve Navier-Stokes denklemlerinden k değerini hesaplayan eşitliği elde etmişlerdir. Bu çıkarımlarla ilgili detaylar Mohammadi ve Pironneau (1994) tarafından verilmektedir. Kolmogorov-Prandtl denklemi ve k -denklemindeki türbülansın sönümlenme terimi, türbülans modelinin işlevselliği için tanımlanması gereken bir uzunluk ölçeğini (L) de içermektedir. Bu ölçek, kesme kuvveti katmanlarında basit deneysel bağıntılardan bulunabilir (Launder ve Spalding, 1972). Koutitas ve O'Connor (1980) tarafından geliştirilen ve rüzgar etkenli akımların benzeşiminde kullanılan tek denklem modelinde, zamandan bağımsız (steady) ve düzenli (uniform) bir akım varsayılmıştır. Bu modelde, türbülansın sönümlendiği uzunluk ölçeği karmaşık bir bağıntının yardımıyla hesaplanarak, deneysel bir denklemle tanımlanan eddy yayını için bir çözüme ulaşılmıştır. Ancak, daha karmaşık akım şekillerinde türbülansın sönümlenmesini belirlemek oldukça zordur (Rodi, 1980). Bu yüzden türbülans modellerindeki eğilim, uzunluk ölçeğini yine bir taşınım denkleminde hesaplayan iki-denklemliler kullanılması şeklinde belirginleşmektedir.

Enerji taşıyan büyük ölçekli eddy yayını tanımlayan uzunluk ölçeği L , k -kinetik enerjisi gibi, önceki zaman aralıklarındaki değişimlerin ve taşınımın etkisine maruz kalmaktadır. Bu etkiyi belirleyerek uzunluk ölçeğini, k -denklemine ek olarak ayrı bir denklemle hesaplayan ve bu nedenle iki-denklemliler adı verilen modeller gittikçe yaygınlaşmaktadır. İki-denklemlilerde, uzunluk ölçeğini belirleyen denklemde, ölçeğin kendisini bağımlı bir değişken olarak tanımlamaktansa, k -denkleminin çözülmesiyle elde edilen kinetik enerji değerini kullanarak $Z=k^m L^n$ şeklindeki bir bağıntının kullanılması yeterlidir. Bu tür modeller için çok sayıda bağıntı önerilmiştir (Rodi, 1980, 1994). Bunlar arasında, fiziksel olarak türbülansın sönümlenme hızını (ϵ) tanımlayan $k^{3/2}/L$ bağıntısı pratikte en yaygın olarak kullanılanıdır. Bunun sebebi, ϵ denkleminin, diğer değişkenler için kullanılan denklemlerin aksine, duvar kenarı gibi fiziksel bir sınırda ikincil bir sınır koşulu terimine gereksinim duymamasıdır. Türbülans hareketinin birim kütlede sahip olduğu kinetik

enerjiyi (k) ve sönümlenme hızını (ϵ) tanımlayan denklemleri çözen türbülans modellerine, k - ϵ modeli adı verilmektedir. Ancak bu modelde, ϵ denkleminin kullanılması eleştirilmektedir (Mellor ve Yamada, 1982). Yapılan eleştirilerde, sönümlenme işleminin küçük ölçekli türbülansla ilgili olduğu belirtilmekte, ancak hesaplanması istenen asıl parametrenin, enerji taşıyan büyük ölçekli eddy yayılımını tanımlayan uzunluk ölçeği olduğu hatırlatılmaktadır. Fakat, ϵ hızı ile sönümlenen enerji miktarı, büyük ölçekli türbülans hareketinden spektrum aracılığı ile küçük ölçekli harekete aktarılan enerji tarafından kontrol edilmektedir. Bu durumda, ϵ parametresi büyük ölçekli hareketi tanımlayan bir değişken olarak da kabul edilebilir. Aslında ϵ parametresi, büyük ölçekli türbülans hareketinin küçük ölçeklerde sönümlenecek olan enerjisinin, bu harekete aktarılma hızıdır. Türbülansın sönümlenme hızını belirleyen ϵ denklemi, Navier-Stokes denklemlerinden de çıkarılabilir (Launder ve Spalding, 1972). Sonuç olarak, rüzgar ve yoğunluk etkenli çevrinti hareketlerinin (Huang ve Spaulding, 1995; Stansby, 1997) ve sıcaklık değişimleri ile oluşan akımların (Raitby vd., 1988) üç boyutlu olarak modellenmesinde k - ϵ türbülans modelleri başarıyla uygulanmaktadır.

Değişik hız ölçeklerini tanımlayan Reynolds gerilimlerinin taşınım denklemlerini kullanan Reynolds gerilim modelleri de geliştirilmiştir (Launder, Reece ve Rodi, 1975). Reynolds gerilim modelleri, türbülans gerilim ve akı taşınımının oldukça önemli olduğu ve bu taşınımın türbülansın kinetik enerjisinin (k) taşınım bağıntısı ile yeterli doğrulukta modellenemediği akım durumlarında, umut verici sonuçlar sağlayan modellerdir (Mellor ve Yamada, 1982). Ancak bu modeller, hesaplama yöntemi açısından pahalı oldukları ve günümüze kadar da çok az denendikleri için, nadir olarak pratikte uygulanmışlardır. Ayrıca, iki denklemlilik modellerdeki uzunluk ölçeğini belirleyen denklemin (örneğin ϵ denklemi) kullanılması ile yeterli doğrulukta benzeşim sağlanamayan akım durumlarında, benzer bir uzunluk ölçeği bağıntısı uygulayan gerilim denklemi modeli ile, daha geliştirilmiş bir benzeşim elde etmek mümkün değildir. Bu modellerin kullanımında karşılaşılan diğer bir sorun ise, özellikle akım olan sınırlardaki sınır koşullarının belirlenmesi için mevcut bilginin yeterli olmamasıdır.

BÖLÜM III

ÜÇ BOYUTLU MATEMATİKSEL HİDRODİNAMİK MODEL

Düşey ve yatay düzlemlerde önemli yoğunluk değişimlerine neden olan tuzluluk ve sıcaklık katmanlarının bulunduğu kıyusal sularda, yoğunluk etkenli akıntıları ve rüzgar etkenli çevrintileri benzeştirebilmek için üç boyutlu matematiksel modellerin kullanılması gereklidir. Geliştirilen üç boyutlu matematiksel model, üç ana yöndeki (x,y,z) su düzeyini ve su tanesi hız dağılımlarını, Navier-Stokes denklemlerini çözerek hesaplamaktadır. Modelde sadece iki basitleştirici yaklaşım kullanılmıştır. Bunlardan ilki, akışkanın ağırlığının basıncı dengelediği yaklaşımı, yani hidrostatik basınç kabulüdür. İkinci olarak Boussineq yaklaşımı kullanılmıştır, yani yoğunluk farklılıkları yerçekimi ivmesiyle çarpılmadıkça ihmal edilmektedir.

3.1 Temel Denklemler

Üç boyutlu kartezyen koordinat sistemindeki temel hidrodinamik denklemler:

Süreklilik denklemi:

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

Yatayda birbirine dik konumdaki x ve y yönleri için momentum denklemleri:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = f_x - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} (v_x \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (v_y (\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})) + \frac{\partial}{\partial z} (v_z \frac{\partial u}{\partial z}) \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -fu - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + 2 \frac{\partial}{\partial y} (v_y \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial x} (v_x (\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y})) + \frac{\partial}{\partial z} (v_z \frac{\partial v}{\partial z}) \quad (3.3)$$

Düşeyde, z yönünde:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (3.4)$$

Bu denklemlerde,

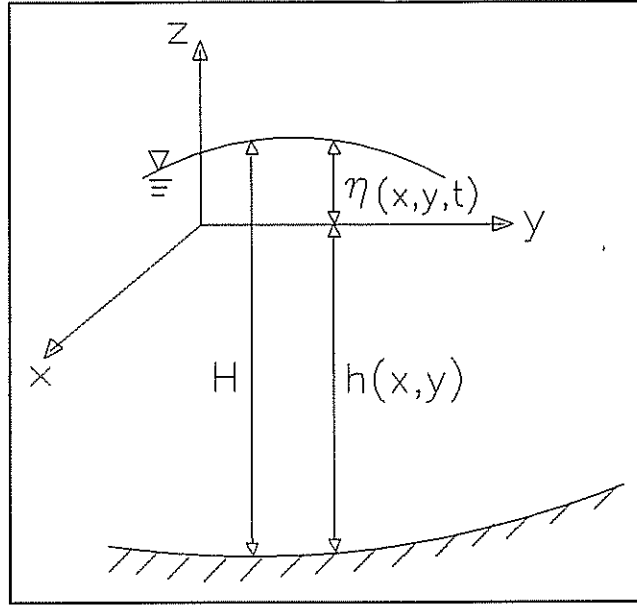
- x,y : Yatay koordinatlar,
z : Düşey koordinat,
t : Zaman,
u,v,w : Herhangi bir çözüm ağı noktasında x,y ve z yönlerindeki hız bileşenleri,
 v_x, v_y, v_z : Sırasıyla x,y ve z yönlerindeki eddy akışkanlık katsayıları,
f : Coriolis katsayısı,
 $\rho(x,y,z,t)$: Akışkan yoğunluğu,
 ρ_0 : Referans yoğunluk,
g : Yerçekimi ivmesi,
p : Basınçtır.

Su yüzeyi düzeyi ve derinliği Çizim (3.1)'de tanımlanmaktadır. Geliştirilen matematiksel model, termohalin kuvvetleri de içermektedir. Sıcaklık ve tuzluluk değişimleri, üç boyutlu taşınım-dağılım denkleminin çözülmesi ile hesaplanmaktadır:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + u \frac{\partial Q}{\partial x} + v \frac{\partial Q}{\partial y} + w \frac{\partial Q}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (D_x \frac{\partial Q}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (D_y \frac{\partial Q}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (D_z \frac{\partial Q}{\partial z}) \quad (3.5)$$

Bu denklemde,

- D_x, D_y and D_z : Sırasıyla x, y ve z yönlerindeki türbülans dağılım katsayıları,
Q : Su sıcaklığı (T) veya tuzluluğudur (S).



Çizim 3.1 Su yüzeyi, yüksekliği ve derinlik tanımları.

Kirletici sakınım denklemi:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (D_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (D_y \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (D_z \frac{\partial C}{\partial z}) + kC \quad (3.6)$$

Bu denklemde,

C : Kirletici derişikliği,

k : Kirleticinin yok olma hızı,

D_x, D_y and D_z : Sırasıyla, x, y ve z yönlerindeki türbülans dağılım katsayılarını tanımlamaktadır.

Serbest yüzeydeki kinematik sınır koşulu:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u_s \frac{\partial \eta}{\partial x} + v_s \frac{\partial \eta}{\partial y} - w_s = 0 \quad (3.7)$$

Bu denklemde,

- u_s, v_s : Deniz yüzeyindeki su tanesinin yatay hızları,
 w_s : Deniz yüzeyindeki su tanesinin düşey hızı,
 η : Durgun su düzeyinden itibaren deniz yüzeyi düzeyidir.

Süreklilik denkleminin derinlik boyunca integrali alınarak ve serbest yüzeydeki kinematik sınır koşulu uygulanarak aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\int_{z_h}^{\eta} u \, dz \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\int_{z_h}^{\eta} v \, dz \right] = 0 \quad (3.8)$$

Burada,

- $h(x,y)$: Durgun deniz yüzeyinden itibaren su derinliği,
 $H(x,y,t)$: Toplam su derinliğidir, $H(x,y,t) = h(x,y) + \eta(x,y,t)$.

Yatay basınç değişimi terimlerini elde etmek için Denklem (3.4)'ün integrali alınır:

$$p(x,y,z,t) = \int_z^{\eta} g \rho(x,y,z,t) \, dz \quad (3.9)$$

Leibniz kuralı uygulanarak bağımsız değişkenler denklemden çıkarılır:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \int_z^{\eta} g \rho \, dz = \int_z^{\eta} g \frac{\partial \rho}{\partial x} \, dz + g \rho_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (3.10)$$

Burada, ρ_{η} yüzeydeki yoğunluktur. Benzer bir denklem $\partial p / \partial y$ için de yazılabilir.

Deniz suyu yoğunluğu içerdiği tuz miktarının (tuzluluk), sıcaklığının ve az da olsa basıncının bir fonksiyonudur. Bu sebeple, yoğunluk dağılımı suyun sıcaklık ve tuzluluk dağılımına bağlıdır. Deniz suyunun ortalama yoğunluğu yaklaşık olarak 1.0276 g/cm^3 'dür. Diğer su örneklerinin yoğunluğuyla karşılaştırıldığında, aradaki fark üçüncü ondalık basamakta belirginleşmektedir.

Su yoğunluğunun (ρ) yerine σ_t değeri de kullanılabilir. İki değişken arasındaki bağıntı şöyledir:

$$\sigma_t = (\rho - 1) \times 10^3 \quad (3.11)$$

Bu bağıntıda, ρ : gr/cm³ cinsinden su yoğunluğunu belirtmektedir.

Artan hidrostatik basınç sebebiyle derinlik boyunca yoğunluk da önemli miktarda artar. Aşağı-yukarı hareket eden tüm su kütleleri aynı oranda sıkıştırıldığı için, kaldırma ya da denge kuvvetleri bu sıkışmadan etkilenmez. Böylece yoğunluk, σ_t değerlerine (1 atm. basınçta) indirgenebilir ve hareket denklemlerindeki suyun sıkışabilirliği ihmal edilebilir. Aşağıdaki denklemler σ_t değişkenini, tuzluluk ve sıcaklığın fonksiyonu olarak hesaplamakta kullanılmaktadır. Bu denklemlerde, S tuzluluk (%), Cl klorluluk (gr/kg) ve T sıcaklıktır (°C) (Riley ve Skirrow, 1975):

$$S = 1.80655 Cl \quad (3.12)$$

$$\sigma_t = (\sigma_o + 0.1324)(1 - A_t + B_t(\sigma_o - 0.1324)) + \Sigma_t \quad (3.13)$$

$$\sigma_o = -6.9 \times 10^{-2} + 1.4708 Cl - 1.57 \times 10^{-3} Cl^2 + 3.98 \times 10^{-5} Cl^3 \quad (3.14)$$

$$A_t = 4.7867 \times 10^{-3} T - 9.8185 \times 10^{-5} T^2 + 1.0843 \times 10^{-6} T^3 \quad (3.15)$$

$$B_t = 1.803 \times 10^{-5} T - 8.146 \times 10^{-7} T^2 + 1.667 \times 10^{-8} T^3 \quad (3.16)$$

$$\Sigma_t = -(T - 3.98)^2 (T + 283) (503.57 (T + 67.26))^{-1} \quad (3.17)$$

3.2 Türbülans Modeli

Türbülans modeli olarak iki denklemlilik k-ε modeli kullanılmıştır. Kinetik enerji ve kinetik enerjinin sönümlenmesi için kullanılan model denklemleri şunlardır:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} + w \frac{\partial k}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\nu_z}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + P + G - \epsilon + F_k \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \epsilon}{\partial y} + w \frac{\partial \epsilon}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\nu_z}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) + c_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (P + C_{3\epsilon} G) - c_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} + F_\epsilon \quad (3.19)$$

Bu denklemlerde,

- k : Kinetik enerji,
- ε : Kinetik enerjinin sönümlenme hızı.
- ν_x, ν_y : Yatay eddy akışkanlık katsayıları,
- ν_z : Düşey eddy akışkanlık katsayısı,
- P : Kinetik enerjinin oluşturduğu gerilim,
- G : Aşaşıdaki denklem ile tanımlanan kinetik enerjinin oluşturduğu kaldırma kuvveti:

$$G = \frac{g}{\rho_o} \frac{\nu_z}{P_r} \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (3.20)$$

$$P = \nu_h \left[2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] + \nu_z \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] \right] \quad (3.21)$$

$$\nu_z = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3.22)$$

Burada,

- P_r : Prandtl ya da Schmidth sayısı

Denklem (3.18-3.22)'de şu evrensel deneysel sabitler kullanılmıştır: $C_\mu=0.09$, $\sigma_\epsilon=1.3$, $C_{1\epsilon}=1.44$, $C_{2\epsilon}=1.92$, $G>0$ için $C_{3\epsilon}=1$ ve $G<0$ için $C_{3\epsilon}=0.2$. Yatay dağılım terimleri de aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır (Huang and Spaulding, 1995):

$$F_{q_i} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial q_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial q_i}{\partial y} \right) \quad (3.23)$$

Burada, (q_i) değişkeni (k) ya da (ϵ) değerlerini almaktadır. Deneysel, türbülansın Prandtl ya da Schmidt sayılarının akım boyunca ya da akımdan akıma çok az değiştiğini göstermiştir. Bu nedenle, P_r değeri sabit alınabilir ($P_r=0.7$), (Launder ve Spalding, 1974; Rodi, 1994; Huang ve Spalding, 1995).

Yalnızca, $C_{3\epsilon}$ sabiti evrensel bir sabit değildir. Negatif kaldırma kuvvetinin olduğu akımlarda (örneğin dengeli tabakalanma) ve pozitif kaldırma kuvvetinin meydana geldiği akım şekillerinde (dengesiz tabakalanma), farklı $C_{3\epsilon}$ değerleri kullanılmalıdır. Modelde kullanılan değerler: $G>0$ için $C_{3\epsilon}=1$ ve $G<0$ için $C_{3\epsilon}=0.2$ 'dir (Launder ve Spalding, 1974; Rodi, 1994; Huang ve Spalding, 1995).

Standart $k-\epsilon$ modeli, yatay ve düşey eddy akışkanlık katsayılarının eşit olduğu durumlarda, türbülansın yerel isotropi durumunu kabul eder. Eğer sıg su alanlarında olduğu gibi, yatay hareketin yoğunluk ve uzunluk ölçekleri düşey hareketten daha büyükse, yatay eddy akışkanlığı $k-\epsilon$ modeli tarafından daha düşük olarak hesaplanır. Yatay kesme kuvveti tarafından oluşturulan büyük ölçekli türbülansın benzeştirmek için, yatay eddy akışkanlığı Smagorinsky cebirsel alt-çözüm ağı ölçekli türbülans modeli kullanılarak hesaplanmaktadır (Oey v.d.,1985; Mohammadi ve Pironneau, 1994):

$$\nu_h = 0.01 \Delta x \Delta y \sqrt{\left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right]^2} \quad (3.24)$$

Huq ve Stretch (1995) tarafından elde edilen deney sonuçlarına göre, tabakalanmanın yataydaki türbülansa etkisi ihmal edilebilir. Böylece, yatay düzlemdeki eddy dağılım değişkenleri, yataydaki eddy akışkanlık katsayılarına eşit alınabilir. Düşeydeki dağılım katsayısı, D_z , ise:

$$D_z = \frac{\nu_z}{P_r} \quad (3.25)$$

Bu denkleme,

- P_r : Türbülansın Prandtl ya da Schmidt sayıları,
 ν_z : Düşeydeki eddy akışkanlık katsayısıdır.

3.3 Sınır Koşulları

Geliştirilen matematiksel modelde:

- 1) Serbest su yüzeyi,
- 2) Deniz tabanı,
- 3) Açık deniz,
- 4) Kıyısal kara sınırları,

olmak üzere toplam dört sınır koşulu ele alınmaktadır.

3.3.1 Su Yüzeyi

Serbest su yüzeyindeki kesme gerilimi, aşağıdaki denklemlerle tanımlanabilir:

$$[\tau_{wx}, \tau_{wy}] = \rho_a C_d [u_w, v_w] \sqrt{u_w^2 + v_w^2} \quad (3.26)$$

Bu denklemde,

- τ_{wx}, τ_{wy} : Sırasıyla, x ve y yönlerindeki rüzgar gerilimi bileşenleri,
 u_w, v_w : Sırasıyla, x ve y yönlerindeki rüzgar hızı bileşenleri (m/sn),
 ρ_a : Havanın yoğunluğu,
 C_d : Havanın sürtünme katsayısıdır.

Bilimsel kaynaklarda, bütün rüzgar hızları için sabit alınan sürtünme katsayısından, rüzgarın hızını ve yönünü, deniz yüzeyinin çalkantısını (dalga yüksekliğini) ve rüzgar enerjisi iletiminin doygunluk düzeyini hesaba katan yaklaşımlara kadar birçok sürtünme katsayısı hesaplama yöntemi bulunmaktadır (Verboom v.d., 1992; Hsu, 1986; Large ve Pond, 1981). Modelde sürtünme katsayısının hesaplanması için, Large ve Pond (1981) tarafından önerilen yöntem kullanılmaktadır:

$$C_d = \begin{cases} 1.2 * 10^{-3} & W < 11 \text{ m/sn} \\ (0.49 + 0.065W) * 10^{-3} & 11 \text{ m/sn} \leq W < 25 \text{ m/sn} \end{cases} \quad (3.27)$$

Bu denklemde, W rüzgar hızıdır (m/sn). Su yüzeyinde rüzgar etkenli oluşan kesme gerilmesi, yüzeyin altında su taneciklerinin düşey düzlemdeki hız bileşeninde değişime neden olur:

$$\tau_{wx} = \rho_o \nu_z \frac{\partial u}{\partial z} \quad ; \quad \tau_{wy} = \rho_o \nu_z \frac{\partial v}{\partial z} \quad (3.28)$$

Serbest su yüzeyinde, kirletici ve tuz akıları, atmosferde depolanmadıkları için sıfır alınırken, ısı akısı aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır:

$$D_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{K}{\rho C_p} (T_s - T_e) \quad (3.29)$$

Bu denklemde,

- K : Yüzey ısı iletim katsayısı,
 ρ : Akışkanın kütle yoğunluğu,
 C_p : Suyun özgül ısısı,
 T_s : Su yüzeyi sıcaklığı,
 T_e : Denge sıcaklığı.

Kinetik enerjinin sınır koşulları ve sönümlenme hızı da rüzgar kesme gerilmesine bağlıdır. Rüzgar kesme gerilmesinin mevcut olduğu durumda (Rodi, 1994):

$$k_s = \frac{u_{*s}^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad ; \quad \epsilon_s = \frac{|u_{*s}|^3}{\kappa \Delta z_s} \quad (3.30)$$

Rüzgar kesme gerilmesinin mevcut olmadığı durumda ise:

$$\frac{\partial k}{\partial z} = 0 \quad ; \quad \epsilon = \frac{(k_s \sqrt{C_\mu})^3}{0.07 \kappa H} \quad (3.31)$$

Burada,

- u_{*s} : Yüzeydeki kesme hızı,
 Δz_s : Su yüzeyinden ilk çözüm ağı noktasına olan uzaklık.

3.3.2 Deniz Tabanı

Deniz tabanındaki kesme gerilmesi, logaritmik sınır tabakası yaklaşımı ile hesaplanmaktadır:

$$\tau_{bx} = \left[\nu_z \frac{\partial u}{\partial z} \right]_b = \rho_o C_f u_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2} ; \tau_{by} = \left[\nu_z \frac{\partial v_b}{\partial z} \right]_b = \rho_o C_f v_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2} \quad (3.32)$$

Bu denklemden,

- τ_{bx}, τ_{by} : Deniz tabanının üzerindeki ilk çözüm ağı noktasında hesaplanan taban kesme gerilmesinin yatay düzlemdeki bileşenleri,
 u_b, v_b : Deniz tabanının üzerindeki ilk çözüm ağı noktasında hesaplanan su taneciklerinin yatay düzlemdeki hız bileşenleri,
 ρ_o : Ortalama su yoğunluğu,
 C_f : Taban sürtünmesi için deneysel katsayı.

Deniz tabanı sınır koşulu için yeterli bir çözünürlük sağlandığında C_f deneysel katsayısı, logaritmik sınır tabakası yaklaşımı ile hesaplanmaktadır:

$$C_f = \left[\frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{\Delta z_b}{z_o} \right) \right]^{-2} \quad (3.33)$$

Burada,

- κ : Karman sabiti $\kappa=0.42$,
 Δz_b : Deniz tabanından üzerindeki ilk çözüm ağı noktasına olan uzaklık,
 z_o : Deniz tabanının pürüzlülüğünü tanımlayan değişken, $z_o=1$ cm. alınmıştır.

Taban sınır bölgesinde yeterli çözünürlük elde edilemediğinde, sürtünme katsayısı C_f , genellikle (0.002-0.003) aralığında bir sabit olarak belirlenir. Taban sınır bölgesi $30 < z^+ < 100$ aralığındaki bölgeyi kapsar. Sınır bölgesini tanımlayan z^+ parametresi $z^+ = \Delta z_b u_{*b} / \nu$ denkleminde hesaplanabilir. Bu denklemden, u_{*b} taban sürtünme hızıdır.

Düsey çözünürlükte, ilk çözüm ağı noktasının bu bölge içinde yer almasına dikkat edilmelidir. Deniz tabanındaki kinematik sınır koşulu da aşağıdaki denklem ile tanımlanmaktadır:

$$w_b = -u_b \frac{\partial h}{\partial x} - v_b \frac{\partial h}{\partial y} \quad (3.34)$$

Tabandaki türbülans kinetik enerjisi k_b ve sönmülenme ϵ_b , aşağıdaki eşitliklerden belirlenebilir:

$$k_b = \frac{u_{*b}^2}{\sqrt{c_\mu}} \quad ; \quad \epsilon_b = \frac{u_{*b}^3}{\kappa \Delta z_b} \quad (3.35)$$

Bu denklemlerde,

u_{*b} : Tabandaki kesme hızı,

Δz_b : Deniz tabanından ilk çözüm ağı noktasına olan uzaklıktır.

Deniz tabanında sınır koşulu olarak, sıcaklık, tuzluluk ve kirleticinin taşınım ve dağılım akıları olmadığından, akı (flux) değerleri sıfır olarak alınmaktadır.

3.3.3 Kıyı Çizgisi

Kıyı sistemlerinde, özellikle de lagünlerde, kara sınırına yakın bölgelerdeki su alanlarının kurumasına ya da kara alanlarının suyla kaplanmasına neden olan mevsimsel su hacimi değişimleri görülür. Bu sebeple, bu sistemlerdeki kıyı şeridi sınır koşulları, kuruma ve su altında kalma süreçlerini benzeştirebilecek şekilde tanımlanmalıdır. Bu amaçla, yeni su yüzeyi düzeyi ve hızları bütün çözüm ağı noktalarında hesaplandıktan sonra, toplam su derinliği ve düşey çözüm ağı aralıkları, bir sonraki zaman dilimine geçmeden önce, lagünün belirtilen bölgelerindeki yeni sınır koşulları göz önüne alınarak düzeltilmektedir. Negatif bir toplam su derinliği değeri, fiziksel olarak bir anlam taşımadığından, toplam derinlik değişkeni çözüm ağı noktaları için ($H_{i,j}$) aşağıdaki bağıntı kullanılarak tanımlanmaktadır:

$$H_{i,j} = \max (0, h_{i,j} + \eta_{i,j}) \quad (3.36)$$

Burada,

- $h(x,y)$: Durgun deniz düzeyinden itibaren su derinliği,
 $\eta(x,y,t)$: Durgun deniz düzeyinden itibaren deniz yüzeyi düzeyi
 $H(x,y,t)$: Toplam su derinliğidir, $H(x,y,t) = h(x,y) + \eta(x,y,t)$.

Taban pürüzlülüğünü belirlemekte kullanılan uzunluk ölçeği L_1 , herbir çözüm ağı kenarının orta noktasındaki su derinliğiyle karşılaştırılır. Toplam su derinliği L_1 'den küçük ya da sıfır olduğunda belirtilen noktanın kurduğu ve belki daha sonra, toplam su derinliği pozitif olduğunda, yeniden suyla kaplanacağı anlaşılmaktadır. Bu durumda, çözüm ağının kenarlarına dik yöndeki u ya da v hız bileşeni sıfır alınır. Diğer bir deyişle, çözüm ağının kara sınırını oluşturan kenar tekrar suyla kaplanmadığı sürece, bu kenardan akışa izin verilmez. Hesap yapılan çözüm ağı için, su düzeyi yüksekliğini tanımlayan sonlu fark denkleminin, toplam derinlik değişkeninin pozitif ya da sıfır değerlerini doğru olarak dikkate alması gereklidir. Kullanılan sayısal yöntem, kuruma ve suyla kaplanma işlemlerini otomatik olarak hesaba kattığından kütlenin korunumu da sağlanmaktadır. Bu işlemlerin sonucu olarak lagünün kara sınırı (kıyı çizgisi) zaman içinde değişim gösterebildiğinden, çözüm ağının kenarlarına dik yöndeki kütle akısı sıfır alınmaktadır. Çözüm ağının kara sınırında, sıcaklık, tuzluluk ve kirleticinin bu sınıra dik yöndeki değişimleri de sıfır alınmaktadır.

Lagüne su giriş/çıkışının bulunduğu kıyı çizgisinde sınır koşulu olarak, k_d ve ϵ_d değerleri, kanal verilerinden yararlanılarak tanımlanabilir (Demuren ve Rodi, 1983):

$$k_d = 0.004 u_d^2 \quad ; \quad \epsilon_d = C_\mu^{3/4} \frac{k_d^{3/2}}{0.09 b} \quad (3.37)$$

Bu denklemde,

- u_d : Giriş hızı,
 b : Giriş ağzının açıklığıdır.

3.3.4 Açık deniz

Açık deniz sınırında, bu sınıra dik yöndeki hızlar, gelgit bulunmadığı durumda, su derinliğinin bilindiği çözüm ağının orta noktasında hesaplanmakta, yatay değişim terimleri de bu noktaya göre tanımlanmaktadır (Balas, 1998). Gelgit etkisiyle oluşan akımlarda, açık deniz sınırı aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\eta = \eta_{\max} \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right) \quad (3.38)$$

$$v_n = (gH)^{\frac{1}{2}} \eta_{\max} H^{-1} \cos\left[\frac{2\pi}{L} \frac{\Delta n}{2} + \frac{2\pi}{T} t\right] \quad (3.39)$$

Bu denklemlerde,

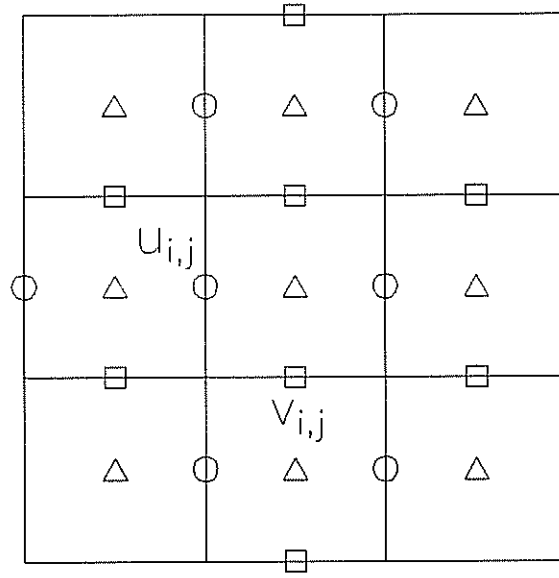
- T : Gelgit periyodu,
V_n : Açık deniz sınırına dik yönde, hesaplanan ortalama hız,
Δn : Çözüm ağının sınıra dik yöndeki uzaklığı,
η_{max} : Gelgit dalga genliği.

3.4 Sayısal Çözüm Yöntemi

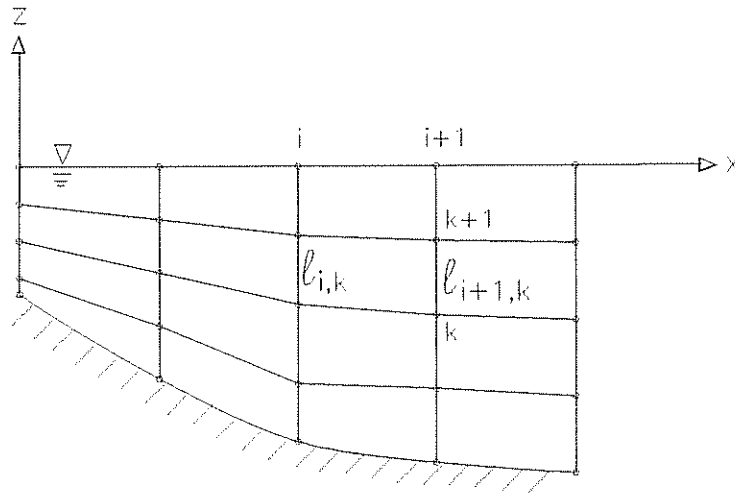
Denklemler, yatay değişim terimleri için Çizim (3.2)'de gösterilen şaşırtmalı (staggered) sonlu farklar çözüm ağı kullanılarak çözülmektedir. Düşey düzlemde ise, Galerkin Metodu'nun uygulandığı sonlu elemanlar yöntemi kullanılmaktadır. Su derinliği, taban topografyasını izleyecek şekilde eşit sayıda yatay çözüm ağına bölünmüştür. Tüm çözüm ağı noktalarında, herbir eleman uzunluğunun toplam derinliğe oranı sabittir:

$$\frac{l_{i,k}}{H_i} = \frac{l_{i+1,k}}{H_{i+1}} = \frac{l_{i,k+1}}{H_i} \quad (3.40)$$

Bu bağıntıda, *i* ve *k*, sırasıyla x-y ve x-z (ya da y-z) düzlemlerinde bir noktanın koordinatlarını tanımlayan indislerdir (Çizim 3.3).



Çizim 3.2 Yatay düzlemde kullanılan şartırlı sonlu farklar çözüm ağı, (□: v hız bileşeni , ○: u hız bileşeni, Δ: diğer değişkenler).



Çizim 3.3 Düşey düzlemde kullanılan sonlu elemanlar çözüm ağı.

Düşey düzlemde kullanılan sonlu elemanlar yöntemi ile değişkenler, derinlik boyunca herhangi bir çözüm ağı noktasındaki değerleri cinsinden, doğrusal şekil fonksiyonları kullanılarak tanımlanmaktadır:

$$\tilde{G} = N_1 G_1^k + N_2 G_2^k \quad (3.41)$$

$$N_1 = \frac{z_2 - z}{z_2 - z_1} \quad (3.42)$$

$$N_2 = \frac{z - z_1}{z_2 - z_1} \quad (3.43)$$

$$l_k = z_2 - z_1 \quad (3.44)$$

Bu denklemlerde,

- N_1, N_2 : Doğrusal şekil fonksiyonları,
 k : Eleman indisi,
 l_k : k 'inci elemanın uzunluğu,
 G : Aşağıda tanımlanan değişkenlerden herhangi birisi:
 u, v, w : Hız bileşenleri,
 ν_x, ν_y, ν_z : Türbülans eddy akışkanlıkları,
 T : Sıcaklık,
 S : Tuzluluk,
 C : Kirletici derişikliği,
 D_x, D_y, D_z : Türbülans dağılım katsayıları,
 k : Kinetik enerji,
 ϵ : Kinetik enerjinin sönümlenme hızı,
 p : Basınç.

Tanımlanan değişkenler için kullanılan sonlu elemanlar yaklaşımları ilgili denklemlerde yerine konur. Denklem (3.41) sonlu elemanlar yaklaşımı içerdiğinden, her denklem için elde edilen sonuç ile gerçek çözüm arasındaki fark kadar hata değeri oluşur. Bu hata (R), Galerkin Metodu uygulanarak en aza indirgenir:

$$\int_{l_k} R N_\alpha dz = 0 \quad \text{for} \quad \alpha = 1,2 \quad (3.45)$$

İntegraller, çözüm ağındaki noktalar arasında ve zaman içinde değişken olan l_k uzunluğu boyunca alınır.

Düşey çözünürlüğün artırılması isteniyorsa, geliştirilen bilgisayar programında düşey düzlemde çözüm ağı kümelenmesi uygulanabilir (Balas, 1998). Çözüm ağı kümelenmesi ile, tabanda, yüzeyde ya da orta katmanlardaki ağ noktaları, Denklem (3.40) ile tanımlanan koşulu sağlayacak şekilde yoğunlaştırılır.

3.4.1 Çözüm Matrisleri

Galerkin Metodu'nun uygulanmasından sonra, denklemlerde yatay kordinatlara göre alınan türev terimleri için, merkezi sonlu farklar yaklaşımı kullanılır. Çözüm ağı uzunlukları, yatay düzlemde de değişken olarak alınabilir (Balas, 1998). Böylece, derinlik boyunca herhangi bir k elemanı için, doğrusal olmayan denklemleri tanımlayan aşağıdaki eleman matrisleri ve vektörleri elde edilir:

$$\begin{bmatrix} A_{1,1}^k & A_{1,2}^k \\ A_{2,1}^k & A_{2,2}^k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial G_1^k}{\partial t} \\ \frac{\partial G_2^k}{\partial t} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} a_1^k \\ a_2^k \end{Bmatrix} \quad (3.46)$$

Bu denklemde,

- G_1^k : k 'inci elemanın başlangıç düzeyindeki herhangi bir değişken değeri,
 G_2^k : k 'inci elemanın bitiş düzeyindeki herhangi bir değişken değeri,
 A^k : Eleman matrisinin k 'inci elemanı,
 a^k : Eleman vektörünün k 'inci elemanı.

Her bir çözüm ağı noktasında, eleman matrislerinin derinlik boyunca bileşimiyle; yatay düzlemde bulunan bir çözüm ağı noktasındaki değişkenlerin zamana bağlı türevlerinin hesaplanmasını sağlayan toplu matrisler oluşturulur.

Derinlik boyunca toplu matrislerin oluşumunda, deniz tabanı ve yüzeyindeki sınır koşulları da dikkate alınır. Aşağıdaki denklem sistemi, değişkenlerin deniz yüzeyindeki

değişim $(\frac{\partial G_2^m}{\partial z})$ ve deniz tabanındaki değişim $(\frac{\partial G_1^1}{\partial z})$ terimlerinin bilinmesi ile elde edilir:

$$\begin{aligned}
 A_{1,1}^1 \frac{\partial G_1^1}{\partial t} + A_{1,2}^1 \frac{\partial G_2^1}{\partial t} &= a_1^1 - F_1^k \frac{\partial G_1^1}{\partial z} \\
 A_{2,1}^1 \frac{\partial G_1^1}{\partial t} + A_{2,2}^1 \frac{\partial G_2^1}{\partial t} &= a_2^1 \\
 A_{1,1}^2 \frac{\partial G_1^2}{\partial t} + A_{1,2}^2 \frac{\partial G_2^2}{\partial t} &= a_1^2 \\
 A_{2,1}^2 \frac{\partial G_1^2}{\partial t} + A_{2,2}^2 \frac{\partial G_2^2}{\partial t} &= a_2^2 \\
 \dots & \dots \dots \\
 A_{1,1}^m \frac{\partial G_1^m}{\partial t} + A_{1,2}^m \frac{\partial G_2^m}{\partial t} &= a_1^m \\
 A_{2,1}^m \frac{\partial G_1^m}{\partial t} + A_{2,2}^m \frac{\partial G_2^m}{\partial t} &= a_2^m + F_2^k \frac{\partial G_2^m}{\partial z}
 \end{aligned} \tag{3.47}$$

Bu denklemlerde,

- G : Herhangi bir temel denklem değişkenini,
 F : Eddy akışkanlığı ya da türbülans dağılım katsayısını,
 alt indis : Matris elemanlarının yatay düzlemdeki konumunu,
 üst indis : Denklemlerin yazıldığı düzlemin düşeydeki konumunu belirler.

Matrislerin çıkarımı Balas (1998) tarafından verilmiştir. Genel olarak, toplu matrisler, aşağıdaki denklem gibi yazılabilir:

$$\begin{bmatrix}
 A_{1,1}^1 & A_{1,2}^1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\
 A_{2,1}^1 & (A_{2,2}^1 + A_{1,1}^2) & A_{1,2}^2 & 0 & \dots & 0 \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\
 0 & \dots & 0 & A_{2,1}^{m-1} & (A_{2,2}^{m-1} + A_{1,1}^m) & A_{1,2}^m \\
 0 & \dots & 0 & 0 & A_{2,1}^m & A_{2,2}^m
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 \frac{\partial G_1^1}{\partial t} \\
 \frac{\partial G_2^1}{\partial t} \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 \frac{\partial G_2^{m-1}}{\partial t} \\
 \frac{\partial G_2^m}{\partial t}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 a_1^1 - F_1^1 \frac{\partial G_1^1}{\partial z} \\
 a_2^1 + a_1^2 \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 a_2^{m-1} + a_1^m \\
 a_2^m + F_2^m \frac{\partial G_2^m}{\partial z}
 \end{bmatrix}
 \quad (3.48)$$

Değişkenin deniz yüzeyindeki değeriminin ($\frac{\partial G_2^m}{\partial z}$) ve deniz tabanındaki değerinin (G_1^1)

bilinmesi ile, toplu matrisler aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$[A] = \begin{bmatrix} (A_{2,2}^1 + A_{1,1}^2) & A_{1,2}^2 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ A_{2,1}^2 & (A_{2,2}^2 + A_{1,1}^3) & A_{1,2}^3 & 0 & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ 0 & \dots & 0 & A_{2,1}^{m-1} & (A_{2,2}^{m-1} + A_{1,1}^m) & A_{1,2}^m \\ 0 & \dots & 0 & 0 & A_{2,1}^m & A_{2,2}^m \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

$$[G] = \begin{bmatrix} \frac{\partial G_1^1}{\partial t} \\ \frac{\partial G_2^2}{\partial t} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \frac{\partial G_2^{m-1}}{\partial t} \\ \frac{\partial G_2^m}{\partial t} \end{bmatrix} ; [a] = \begin{bmatrix} a_2^1 + a_1^2 - A_{2,1}^1 * \frac{\partial G_1^1}{\partial t} \\ a_2^2 + a_1^3 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ a_2^{m-1} + a_1^m \\ a_2^m + F_2^m \frac{\partial G_2^m}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

Değişkenin deniz yüzeyindeki değerinin (G_2^m) ve deniz tabanındaki değerinin (G_1^1) bilinmesi durumunda, toplu matrisler ve vektörler aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$[A] = \begin{bmatrix} (A_{2,2}^1 + A_{1,1}^2) & A_{1,2}^2 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ A_{2,1}^2 & (A_{2,2}^2 + A_{1,1}^3) & A_{1,2}^3 & 0 & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ 0 & \dots & 0 & A_{2,1}^{m-2} & (A_{2,2}^{m-2} + A_{1,1}^{m-1}) & A_{1,2}^{m-1} \\ 0 & \dots & 0 & 0 & A_{2,1}^{m-1} & A_{2,2}^{m-1} + A_{1,1}^m \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

$$\{G\} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial G_2^1}{\partial t} \\ \frac{\partial G_2^2}{\partial t} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \frac{\partial G_2^{m-2}}{\partial t} \\ \frac{\partial G_2^{m-1}}{\partial t} \end{Bmatrix} ; \quad \{a\} = \begin{Bmatrix} a_2^1 + a_1^2 - A_{2,1}^1 * \frac{\partial G_1^1}{\partial t} \\ a_2^2 + a_1^3 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ a_2^{m-2} + a_1^{m-1} \\ a_2^{m-1} + a_1^m - A_{1,2}^m * \frac{\partial G_2^m}{\partial t} \end{Bmatrix} \quad (3.52)$$

Değişkenin deniz yüzeyindeki değerinin (G_2^m) ve deniz tabanındaki değişiminin ($\frac{\partial G_1^1}{\partial z}$)

bilinmesi ile, toplu matrisler ve vektörler aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{1,1}^1 & A_{1,2}^1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ A_{2,1}^1 & (A_{2,2}^1 + A_{1,1}^2) & A_{1,2}^2 & 0 & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ 0 & \dots & 0 & A_{2,1}^{m-2} & (A_{2,2}^{m-2} + A_{1,1}^{m-1}) & A_{1,2}^{m-1} \\ 0 & \dots & 0 & 0 & A_{2,1}^{m-1} & A_{2,2}^{m-1} + A_{1,1}^m \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

$$\{G\} = \begin{bmatrix} \frac{\partial G_1^1}{\partial t} \\ \frac{\partial G_1^2}{\partial t} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \frac{\partial G_1^{m-1}}{\partial t} \\ \frac{\partial G_1^m}{\partial t} \end{bmatrix} ; \quad \{a\} = \begin{bmatrix} a_1^1 - F_1^1 \frac{\partial G_1^1}{\partial z} \\ a_2^1 + a_1^2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ a_2^{m-2} + a_1^{m-1} \\ a_2^{m-1} + a_1^m - A_{1,2}^m * \frac{\partial G_2^m}{\partial t} \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

3.4.2 Zamana Göre Türev Alınması

Denklemler takımlarında zamana göre alınan türevlerin açılımları, Doğrudan Zaman Adımlı (Explicit) veya Dolaylı Zaman Adımlı (Implicit) çözüm yöntemlerinin seçilmesine bağlı olarak belirlenir.

3.4.2.1 Doğrudan Zaman Adımlı çözüm

Doğrusal olmayan denklemler sistemi, uyarlamalı adım genişliği kontrollü (adaptive step size controlled) Runge-Kutta Fehlberg Metodu kullanılarak çözülmektedir (Chapra ve Canale, 1989). Runge-Kutta Fehlberg Metodu her bir hesap adımı için altı fonksiyon gerektirmekte, ancak dördüncü dereceden standart çözüm metoduna göre daha iyi bir doğruluk ve otomatik bir hata tahmini sağlamaktadır. Bu fonksiyonlardan dördünün değerlerinin bir dizi katsayı ile kullanılması sonucu dördüncü dereceden, altı fonksiyonun tümünün değerlerinin değişik bir katsayı dizisi ile birlikte kullanılması sonucu ise beşinci dereceden doğruluğun elde edildiği Fehlberg tarafından gösterilmiştir (Chapra ve Canale, 1989). Dördüncü ve beşinci derece metodlardan elde edilen değerlerin karşılaştırılması ile de, hesap adımlarının aralık kontrolünde kullanılan hata tahminleri elde edilir (Balas, 1998).

Hata tahmini, değişik bölgeler için küçük veya büyük hesap aralıkları gerektiren fonksiyonların uygulamalarında büyük önem taşır. Bu tür uygulamalarda hata tahmini, hesap aralığının değiştirilmesinde temel etkidir. Aksi takdirde, küçük hesap aralıkları gerektiren bölgelerde yeterli doğruluğun elde edilmesi için, gerektiğinden daha küçük hesap aralıklarının seçilmesi olasıdır. Bu durumda, bilgisayarın merkezi işletim biriminin (CPU) kullandığı zaman gereksiz yere oldukça artmış olacaktır.

Değişken hesap aralığının belirlenmesinde aşağıdaki yöntem uygulanmaktadır:

- i) Çözüm için kabul edilebilir bir hata payı (E) tanımlanır. Amaç, her hesap adımı için, tanımlanan hata payından daha düşük hata verecek bir hesap aralığı belirlemektir.
- ii) Denklem sistemlerindeki en yüksek kabul edilebilir hata değeri (E_{max}) hesaplanır (Balas, 1998).
- iii) Hesaplanan hatanın, kabul edilebilir hata payından büyük olduğu zaman aralıklarında ($E_{max} > E$), hesaplanan hata, kabul edilebilir hatadan (E) küçük olana dek, aynı zaman aralığı yarıya indirilerek, hesaplamalar tekrarlanır.
- iv) Hesaplanan hata, bir hesap aralığı için kabul edilebilir hata payının onda birinden daha küçük ise; hata, kabul edilebilir sınırlarda ($E/10 < E_{max} < E$) elde edilene kadar aynı zaman aralığı iki katına çıkarılır.

3.4.2.2 Dolaylı Zaman Adımlı çözüm

Doğrusal olmayan denklem takımı, zamana bağlı çözümde ikinci dereceden doğruluğa sahip Crank Nicholson Metodu'yla çözülmektedir. Bu doğruluğu sağlayabilmek için sonlu farklar yaklaşımları, zaman aralıklarının orta noktalarında elde edilmektedir. Zamana göre birinci türev ($t+1/2$) anında, diğer tüm değişkenler ve türevler zaman aralıklarının başlangıç (t) ve bitiş ($t+1$) noktalarındaki sonlu farklar yaklaşımlarının ortalaması alınarak belirlenmektedir. Sonuçta elde edilen dolaylı zaman adımlı denklem takımları, alt mertebeden serbestlik denetimi sağlayan yinelemeli bir yöntem (under-relaxation controlled iterative method) kullanılarak çözülür (Balas, 1998). Bu yöntem, yakınsak olmayan denklem sistemlerinin çözüme ulaşmalarını ya da çözüm esnasında oluşan sayısal salınımları sönmüştürmek amacıyla sıkça kullanılmaktadır.

3.4.3 Süreklilik Denklemi

Yatay düzlemdeki hızların belirlenmesinden sonra, düşey hızlar (w) herbir zaman aralığında süreklilik denklemi kullanılarak hesaplanır. Yatay düzlemdeki u ve v hızlarının sonlu farklar yaklaşımları süreklilik denkleminde yerine konur:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (3.55)$$

Sonuçta kalan hata (R), Galerkin Metodu uygulanarak en aza indirgenir. Yatay hızlar bilindiğinden, düşey hızları hesaplamak için aşağıdaki denklem kullanılır:

$$w_2^k = w_1^k - \frac{1}{2} \left[\frac{\partial l_k}{\partial x} (u_1^k - u_2^k) + l_k \left(\frac{\partial u_1^k}{\partial x} + \frac{\partial u_2^k}{\partial x} \right) + \frac{\partial l_k}{\partial y} (v_1^k - v_2^k) + l_k \left(\frac{\partial v_1^k}{\partial y} + \frac{\partial v_2^k}{\partial y} \right) \right] - l_k \left[(u_1^k - u_2^k) \left(\frac{z_2}{l_k^2} \frac{\partial z_1}{\partial x} - \frac{z_1}{l_k^2} \frac{\partial z_2}{\partial x} \right) + (v_1^k - v_2^k) \left(\frac{z_2}{l_k^2} \frac{\partial z_1}{\partial y} - \frac{z_1}{l_k^2} \frac{\partial z_2}{\partial y} \right) \right] \quad (3.56)$$

Bu denklemde,

k : Düşeydeki çözüm ağı düzlemlerinin (tabaka) sayısı ($k=1,2,\dots,m$)

l_k : k 'inci elemanın uzunluğudur. Çıkarımın detayları Balas (1998) tarafından verilmiştir.

Sonuç olarak, düşey hızlar, süreklilik denklemini sağlamak için, tabandaki tabakadan başlayarak yüzey katmanına kadar her noktada, dolaylı zaman adımı kullanılarak hesaplanmaktadır.

BÖLÜM 4

ALAN ÖLÇÜMLERİ

Araştırma projesi çerçevesinde, Fethiye Ölüdeniz Lagünü'nde, lagün-deniz bağlantı kanalında ve Belceğiz Körfezi'nde, Temmuz, Ağustos ve Eylül 1997 aylarında ikişer hafta süreli alan ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu alan çalışmalarında, dip ve yüzey akıntıları, ve deniz suyunun tuzluluk ve sıcaklık değerleri ölçülmüştür.

Gerçekleştirilen alan çalışmalarının programı Tablo (4.1) 'de verilmiştir. 5-10 Mayıs 1997 tarihleri arasında yürütülen ilk çalışmada, proje ile ilgili alan bilgileri derlenmiş, ölçüm yöntemleri belirlenmiş ve alan çalışmaları planlanmıştır. Ayrıca, projede görevli elemanlara ölçüm yöntemleri tanıtılarak, Fethiye Ölüdeniz Lagünü ve Belceğiz Körfezi'nde eğitim çalışmaları yapılmıştır. Proje araştırmacısı İnşaat Mühendisi Cumhur Öztürk başkanlığında yürütülen diğer alan çalışmaları Tablo (4.2) 'de gösterilen programa göre yürütülmüş, bu çalışmalarda, dip ve yüzey akıntıları ve deniz suyunun tuzluluk ve sıcaklık değerleri ölçülmüştür.

Tablo 4.1 Ölüdeniz Lagünü ve Belceğiz Körfezi'nde gerçekleştirilen alan çalışmalarının tarihleri.

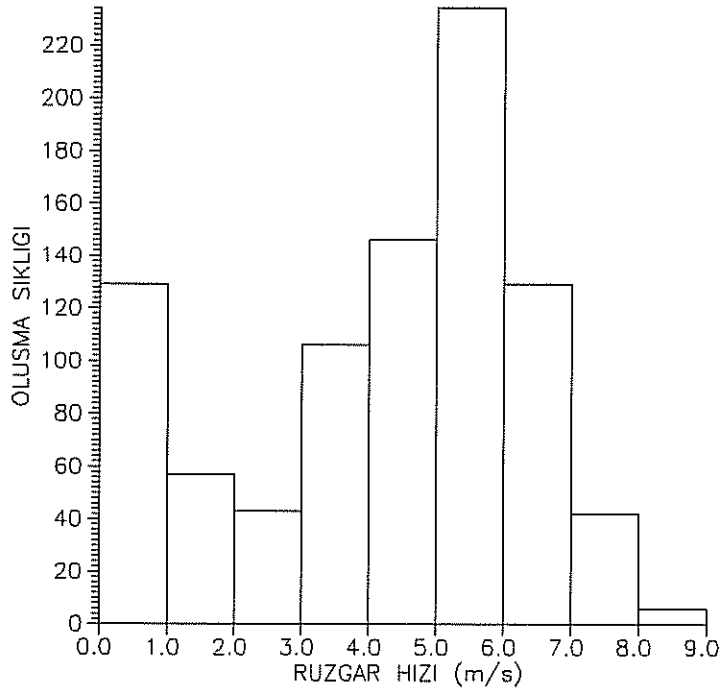
Alan Çalışması	Çalışma Tarihleri
İlk inceleme	5 Mayıs - 9 Mayıs 1997
1	30 Haziran - 13 Temmuz 1997
2	28 Temmuz - 4 Ağustos 1997
3	13 Eylül - 18 Eylül 1997

Tablo 4.2 Alan çalışmalarının programı

	Akıntı Ölçümü	Su Sıcaklığı Ölçümü	Su Tuzluluğu Ölçümü
01.07.1997	✓		
02.07.1997	✓		
03.07.1997	✓		
04.07.1997	✓		
05.07.1997	✓		
06.07.1997	✓		
07.07.1997	✓		
08.07.1997	✓		
09.07.1997	✓		
10.07.1997			
11.07.1997			
12.07.1997	✓		
13.07.1997	✓		
30.07.1997	✓	✓	✓
31.07.1997	✓	✓	✓
01.08.1997	✓	✓	✓
02.08.1997	✓	✓	✓
03.08.1997	✓	✓	✓
04.08.1997	✓	✓	✓
14.09.1997	✓		
15.09.1997	✓		
16.09.1997	✓	✓	✓
17.09.1997	✓		
18.09.1997	✓		
19.09.1997			
20.09.1997		✓	✓

4.1 Rüzgar Verileri

Rüzgar verileri, Fethiye ve Dalaman Meteoroloji İstasyonları'ndan sağlanmıştır. Bu istasyonların, 6 yıllık (1991-1996) rüzgar verileri bilgisayar ortamında incelenerek her yön için rüzgar hızlarının olasılık dağılımları elde edilmiştir. Fethiye ve Dalaman Meteoroloji İstasyonları'ndan sağlanan veriler, sabah (7:00), öğlen (14:00) ve akşam (21:00) saatlerinde ölçülen rüzgar verileridir. Fethiye ve Dalaman Meteoroloji İstasyonlarından sağlanan verilere göre rüzgar hızlarının oluşma sıklığı (frekans) dağılımları sırasıyla Tablo (A.1) ve (A.2)'de, rüzgar hızlarının yönlere göre dağılımları (rüzgar gülleri) ise sırasıyla Çizim (A.1) ve Çizim (A.2)'de verilmiştir. Fethiye Meteoroloji İstasyonu bölgeye en yakın istasyon olmakla birlikte Ölüdeniz yöresinin rüzgar iklimi, coğrafi konum benzerliği nedeni ile Dalaman Meteoroloji İstasyonu'ndan alınan rüzgar verileri ile daha doğru elde edilmektedir. Dalaman Meteoroloji İstasyonu'ndan elde edilen verilere göre, egemen rüzgar yönü (4-10) m/sn aralığındaki hızlar için Güney (S) yönüdür. Bu yön için, rüzgar hızlarının oluşma sıklığı histogram olarak Çizim (4.1)'de verilmiştir.



Çizim 4.1 Dalaman Meteoroloji İstasyonu'ndan alınan rüzgar verilerine göre, Güney (S) yönü rüzgar hızlarının oluşma sıklığı histogramı.

Dalaman Meteoroloji İstasyonu'ndan sağlanan verilerden elde edilen rüzgar hızlarının oluşma sıklığının (frekans) ölçüm saatlerine göre dağılımı Tablo (4.3)'de verilmiştir. Rüzgar yönünün ve hızının gün içerisinde değiştiği Tablo (4.3)'den anlaşılmaktadır. Güney-güneybatı (SSW), Güney (S) ve Güney-güneydoğu (SSE) yönlerinin, alan çalışmalarının yürütüldüğü öğlen saatlerinde, rüzgarın çoğunlukla oluştuğu yönler oldukları görülmektedir.

Tablo 4.3 Dalaman Meteoroloji İstasyonu'ndan sağlanan verilere göre rüzgar hızlarının oluşma sıklığının (frekans) ölçüm saatlerine dağılımı.

Rüzgar Hızı (m/s)	4-5			5-6			6-7			7-8			8-9			9-10		
	7:00	14:00	21:00	7:00	14:00	21:00	7:00	14:00	21:00	7:00	14:00	21:00	7:00	14:00	21:00	7:00	14:00	21:00
N	7	3	1	5	4	3	3	1	1	1	1	2	2	0	0	0	1	0
NNE	16	4	6	11	10	4	4	5	9	4	2	1	1	1	3	1	0	1
NE	23	11	20	6	5	9	5	7	7	8	4	3	0	1	1	1	1	2
ENE	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ESE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SE	0	3	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
SSE	7	98	10	3	106	7	2	55	1	2	12	1	2	2	1	2	3	0
S	0	145	1	3	229	1	1	127	0	0	54	0	1	5	0	0	1	0
SSW	3	96	2	1	110	0	0	56	0	0	17	0	0	4	0	0	0	1
SW	1	10	0	0	13	0	0	8	0	0	5	0	0	1	0	0	0	0
WSW	0	18	1	0	19	0	0	14	0	1	4	0	0	5	0	0	1	0
W	0	1	0	0	5	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
WNW	0	13	0	0	8	1	0	8	3	0	8	1	0	5	0	0	1	0
NW	17	23	10	6	23	5	1	12	3	1	12	2	1	3	3	0	1	0
NNW	28	9	14	10	9	3	3	4	5	0	3	0	0	1	1	1	0	0

Alan çalışmalarının yapıldığı günlerdeki rüzgar verileri, ancak Fethiye Meteoroloji İstasyonu'ndan sağlanabilmiştir. Elde edilen veriler, (Ek-A) bölümünde Tablo (A.3)'de sunulmuştur. Alan çalışmalarının yapıldığı günlerde ölçülen rüzgar hızları 4 m/sn'nin altındadır. Rüzgar hızlarının düşük olması, alan çalışmaları sırasında akıntılara neden olan en önemli etmenin, özellikle Belçeğiz Körfezi'nde, gel-git devinimi olduğunu göstermektedir.

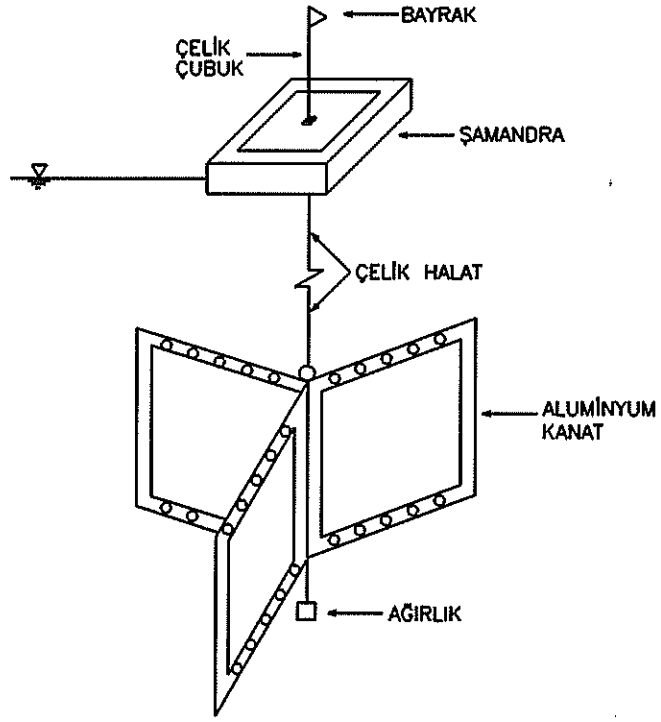
4.2 Akıntı Ölçümleri

Projede yürütülen alan çalışmalarında kıyasal akıntı düzeninin Lagrange yöntemi kullanılarak belirlenmesine çalışılmıştır. Bu yöntemde akıntı yönü doğrudan, akıntı hızı da yolun zamana göre türevi alınarak bulunmaktadır. Fethiye Ölüdeniz Lagünü ve Belceğiz Körfezi'ndeki kıyasal akıntıların izlediği yol, akıntı ile aynı hızda sürüklendiği varsayılan yüzeklerin, Küresel Yer Belirleme Sistemi (Global Positioning System - GPS) ve teodolitler kullanılarak izlenmesiyle saptanmıştır.

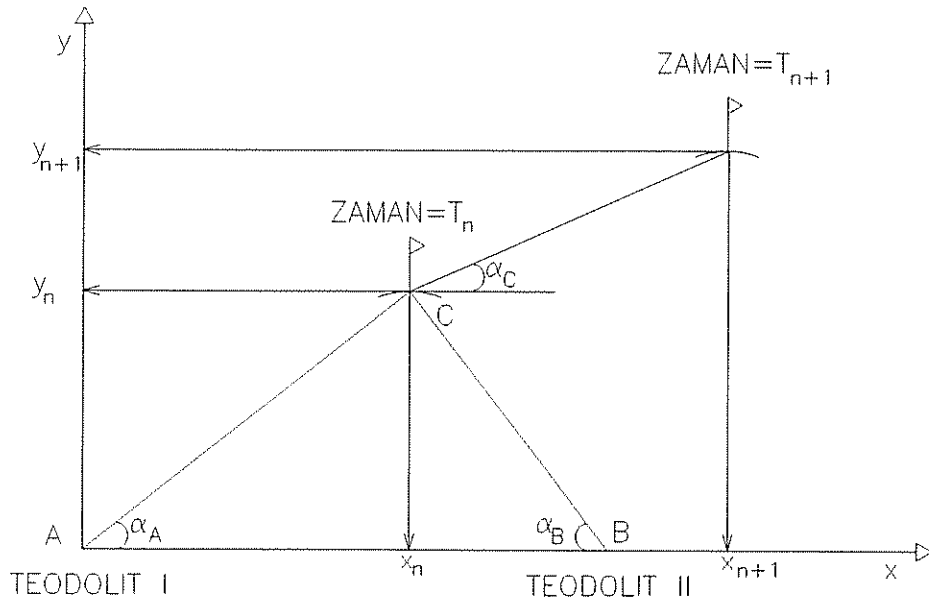
Proje çalışmalarında kullanılan kanatlı yüzekler Çizim (4.2) ve Fotoğraf (4.1)'de gösterilmiştir. Yüzeklerin kanatlarından ikisi, akıntı yönüne yaklaşık olarak dik konum almakta ve akıntının kanatları itmesiyle, bağlı oldukları deniz yüzeyindeki şamandıra taşınmaktadır (Fotoğraf 4.2). Kanatlar ile şamandıra arasındaki bağlantının uzunluğu ayarlanarak, istenilen derinlikte akıntının ölçülmesi sağlanmaktadır. Şamandıraların izlediği yol, kıyıya yerleştirilen iki teodolit ile izlenmiştir (Fotoğraf 4.3). Yüzüğün belirli bir T_n zamanındaki konumu $P(X_n, Y_n)$, şamandıra ile teodolitler arasındaki uzaklığın yatay eksen ile yaptığı iç açı değerleri (α_A ve α_B) ve iki teodolit arasındaki uzaklık (d_{AB}) kullanılarak Denklem (4.1) ve (4.2) yardımıyla hesaplanabilir (Çizim 4.3):

$$Y_n = \frac{d_{AB}}{\sqrt{\frac{1}{(\sin \alpha_A)^2} + \frac{1}{(\sin \alpha_B)^2} - \frac{2 \cos(180^\circ - \alpha_A - \alpha_B)}{\sin \alpha_A \sin \alpha_B}}} \quad (4.1)$$

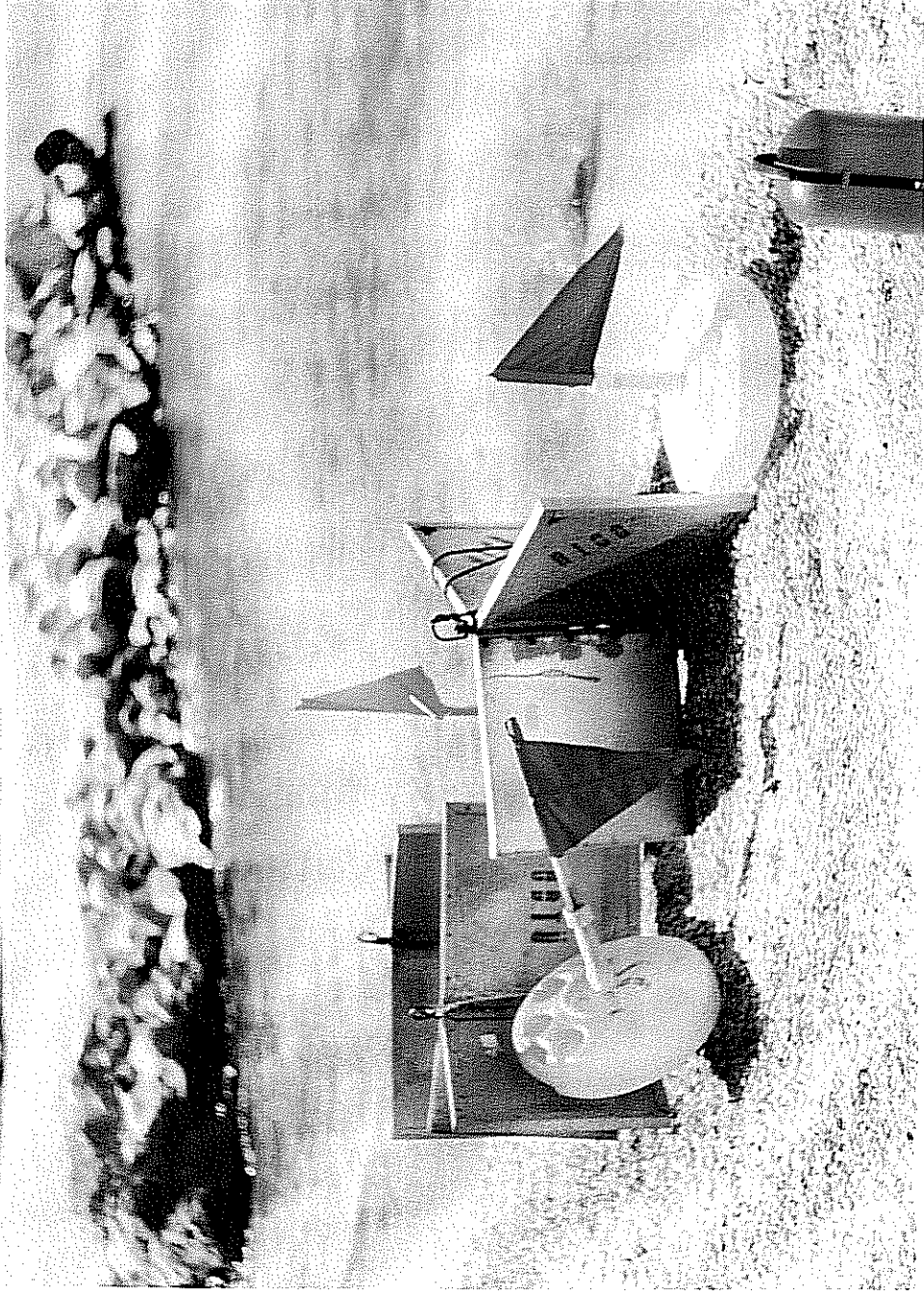
$$X_n = \frac{Y_n}{\tan(\alpha_A)} \quad (4.2)$$



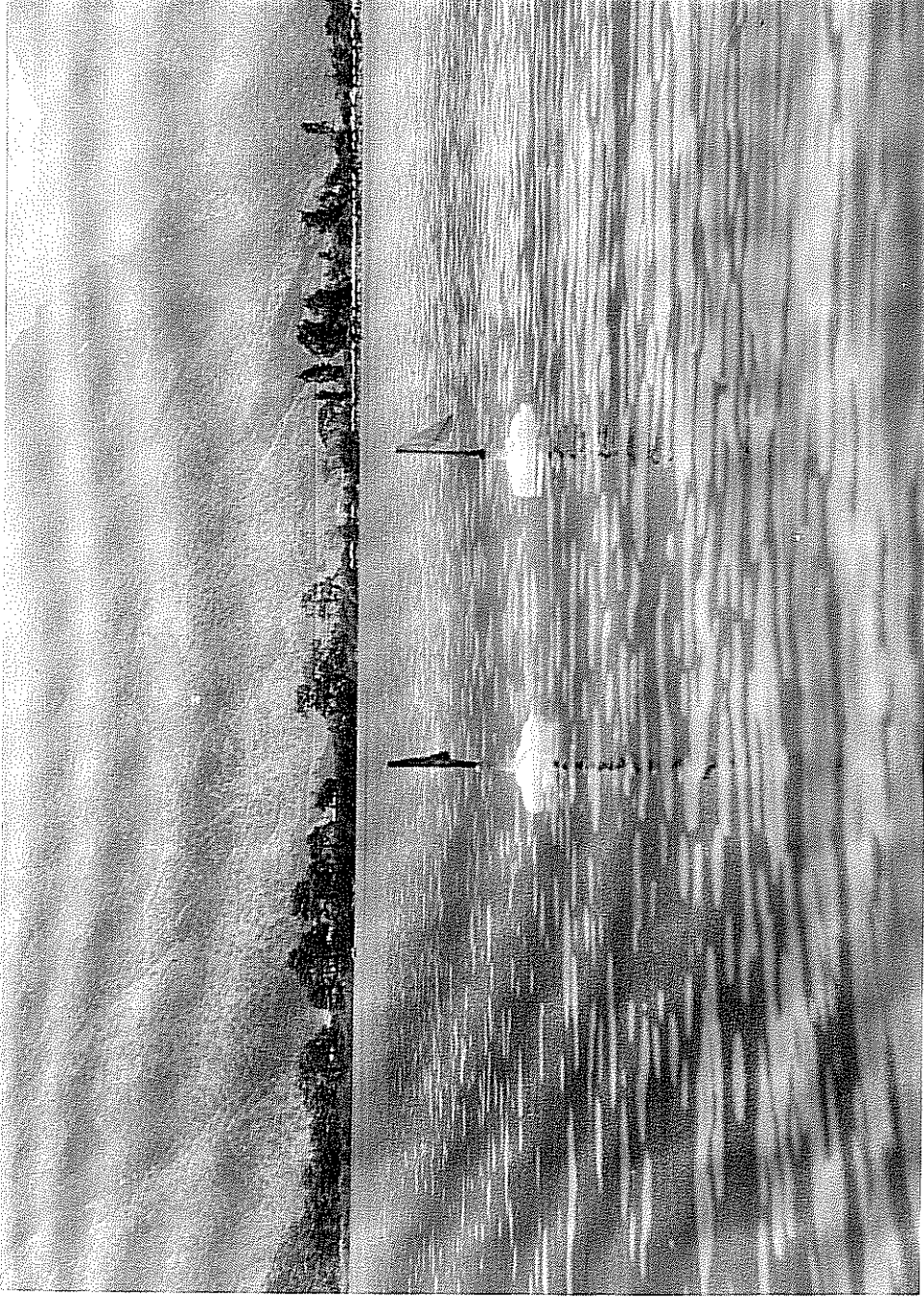
Çizim 4.2 Proje çalışmalarında kullanılan kanatlı yüzekler.



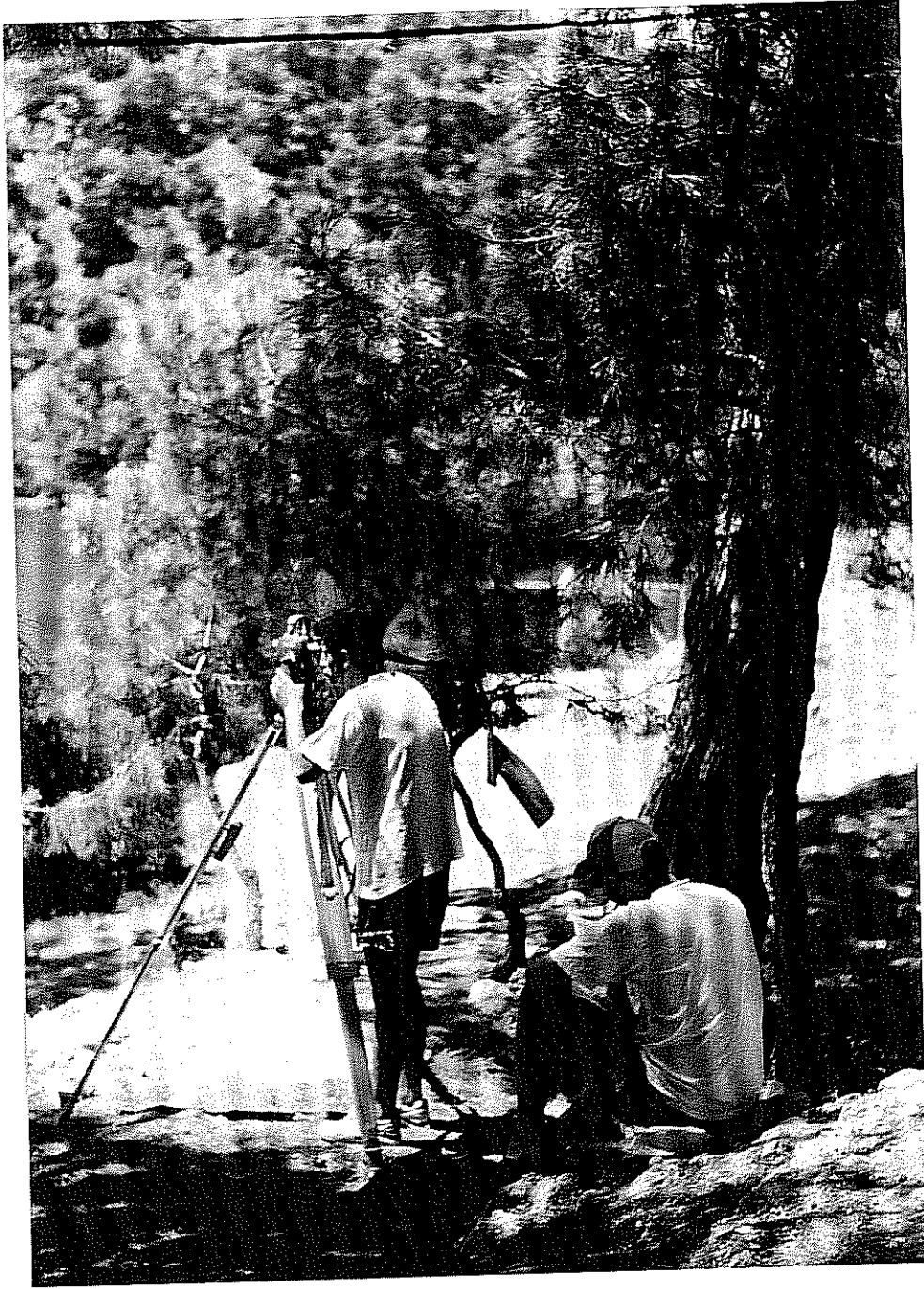
Çizim 4.3 Yüzeklerin izlediği yolun belirlenmesi.



Fotoğraf 4.1 Akıntı ölçümlerinde kullanılan yüzekler.



Fotoğraf 4.2 Ötügeniz Lagünü'nde teodolitlerle izlenen şamandıralar.



Fotoğraf 4.3 Yüzeklerin izlediği yolun kıyıya yerleştirilen teodolitler ile izlenmesi.

Yüzeklerin belirli zamanlardaki yerleri saptandıktan sonra, ardışık iki yer arasındaki ortalama akıntı hızı (V_c) ve yönü (α_c) sırasıyla Denklem (3.3) ve Denklem (3.4) kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$V_c = \frac{1}{T_{n+1} - T_n} \sqrt{(X_{n+1} - X_n)^2 + (Y_{n+1} - Y_n)^2} \quad (4.3)$$

$$\alpha_c = \tan^{-1} \left(\frac{Y_{n+1} - Y_n}{X_{n+1} - X_n} \right) \quad (4.4)$$

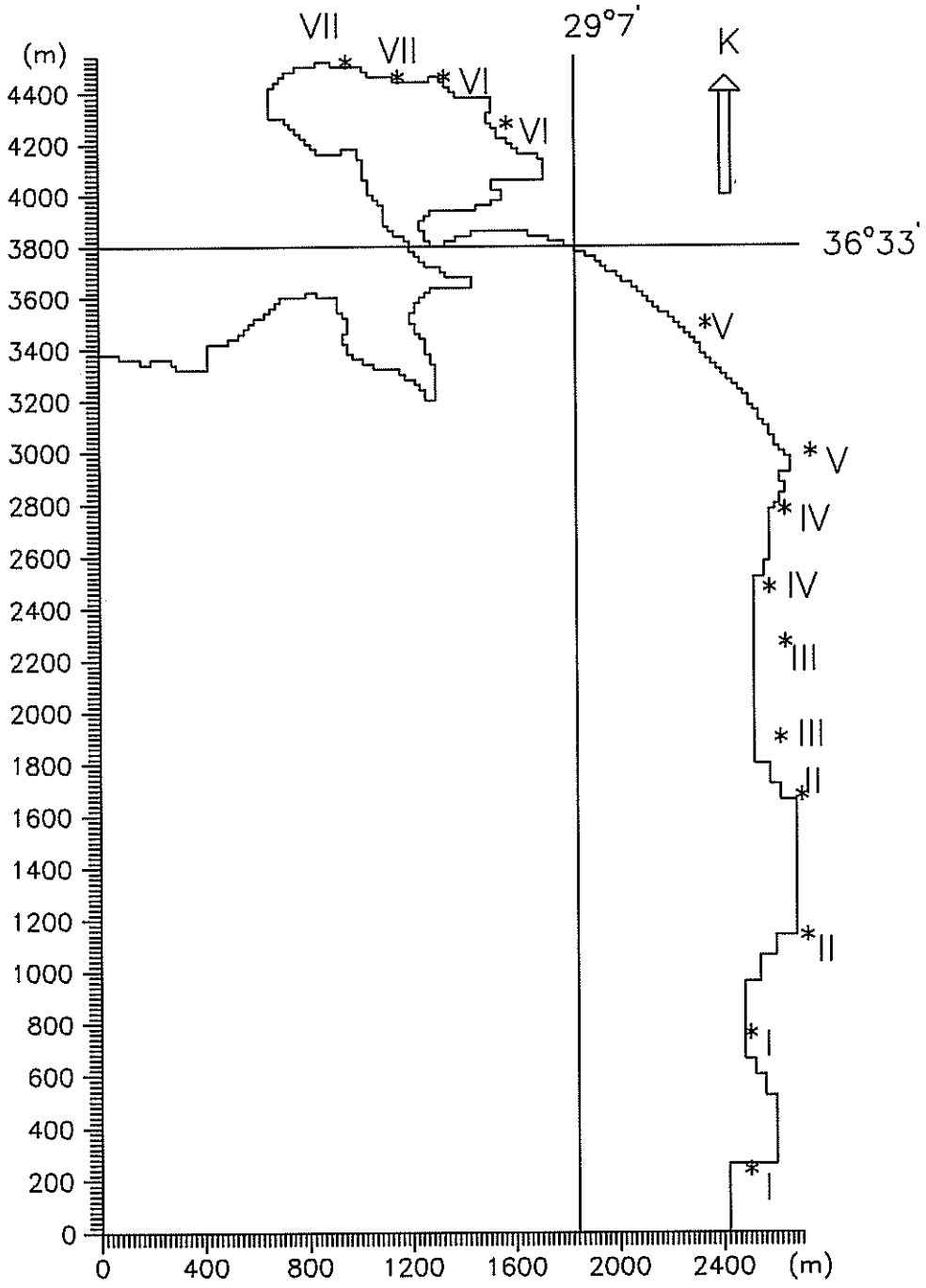
Çizim (4.2)'de görülen yüzek sistemlerinin kanatları ile şamandıra arasındaki bağlantılar ayarlanarak, değişik derinliklerdeki akıntılar ölçülmüştür. Yüzey akıntısının izlenmesinde kullanılan yüzeğin kanatlarını yüzeydeki şamandıraya bağlayan çelik halatın uzunluğu 1 metredir. Dip akıntılarını izlemek için kullanılan yüzeklerin şamandıra bağlantıları ise, 10 ve 20 metre uzunluklarındadır. Bu nedenle, yüzekleri sürükleyen akıntı hızlarının ortalama olarak 1.5, 10.5 ve 20.5 metre derinliklerde ölçüldüğü söylenebilir. Yüzeklerin ayırt edilebilmeleri ve kıyıdaki teodolitler tarafından gözlenebilmeleri için değişik renklerde şamandıra bayrakları kullanılmıştır. Ölçümlerde, ikisi Ölüdeniz Lagünü içinde olmak üzere, toplam yedi adet farklı gözetleme istasyonu kurulmuştur. Çizim (4.4)'de bu istasyonların yerleri görülmektedir. Herbir istasyonda iki adet teodolit noktası bulunmaktadır. Yüzeklerin atıldığı nokta, iki teodolitin üzerinde buldukları yatay eksen taban olarak kabul eden sanal bir eşkenar üçgenin tepe noktası olarak belirlenmiş ve üçgenin taban açıları teodolitlerce ölçülmüştür. İstasyonlarda akıntı düzeni izlenen günler ve teodolitler arasındaki uzaklıklar Tablo (4.4)'de verilmiştir.

Yüzeklerin, tekneyle istenilen noktalara bırakılmasıyla, ölçümler başlatılmış ve teodolitler ile, her beş dakikada bir, yüzeklerin yerleri saptanmıştır. Ölçüm aralığı lagün ağzı gibi dar ve akıntının hızlı olduğu bölgelerde üç dakikaya indirilmiştir. Ölçümler, yüzekler teodolitlerin görüş alanı dışına çıkıncaya ya da okunan açılar çok küçülünceye kadar sürdürülmüştür. Şamandıranın rüzgar kuvveti ile itilmesi ya da çelik halatın akıntıyla çekilmesi gibi olayların sonuçlara olan etkilerinin önemsiz olacağı varsayılmıştır.

Ölüdeniz Lagünü ve Belceğiz Körfezi'nde, üç ayrı derinlikteki (1.5, 10.5 ve 20.5 metre) yüzeklerin ölçüm süresince izlediği yollar, Çizim (4.5-4.13)'da gösterilmiştir. Yüzeklerin devinimlerinin izlenmesiyle elde edilen ortalama akıntı hızları ve yönleri, ölçüm tarihleri ve ölçüm süreleri ile birlikte, Tablo (4.5-4.13) 'de sunulmuştur.

Tablo 4.4 İstasyonlarda akıntı düzeni izlenen günler ve teodolitler arasındaki uzaklıklar.

İstasyon Numarası	Teodolitler Arası Uzaklık (m)	Ölçüm Günleri
I	520	1-4 Temmuz 14-15 Eylül
II	550	7-8 Temmuz 16 Eylül
III	390	30-31 Temmuz 17 Eylül
IV	310	1-2 Ağustos 18 Eylül
V	640	12-13 Temmuz 3 Ağustos
VI	320	5 Temmuz
VII	270	6,9,12 Temmuz 4 Ağustos

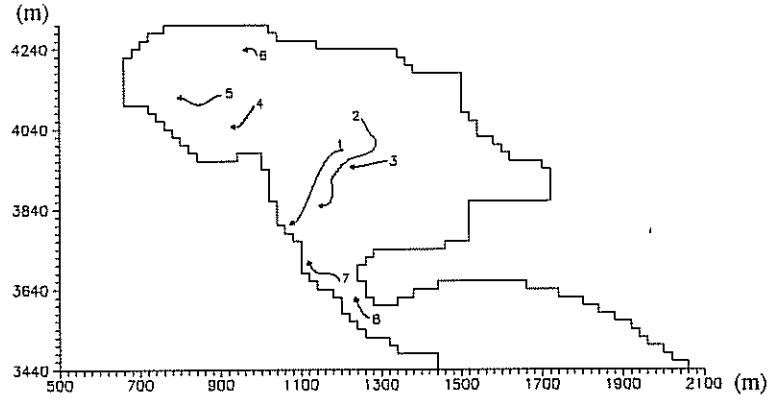


Çizim 4.4 Yüzeklerin gözleendiği ölçüm istasyonları

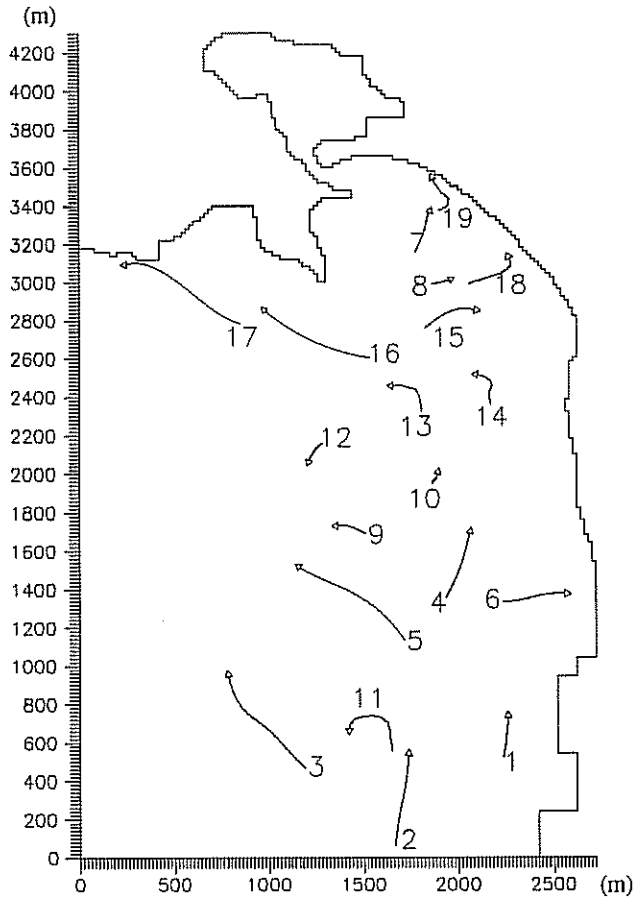
Ölüdeniz Lagünü’de, üç ayrı derinlikteki yüzeklerle yapılan çalışmalardan elde edilen akıntı hızlarının ölçüm süresindeki ortalama değerleri Tablo (4.14) de verilmiştir. Bu tabloda ayrıca, ölçülen en yüksek ve en düşük hızlar da ölçüm günü ve saatiyle yer almaktadır. Ortalama akıntı hızı derinlikle önemli miktarda değişmemekte, ve her üç derinlik için de yaklaşık olarak 2.5 cm/sn. kadar olduğu görülmektedir. Ölüdeniz Lagünü’de ölçülen akıntı hızları genellikle 5.0 cm/sn.’den daha küçüktür. Akıntı hızlarının ortalaması 1.5, 10.5 ve 20.5 metre derinlikteki ölçümler için sırasıyla 3.84, 2.62 ve 2.08 cm/sn’dir. Ancak akıntı hızı zaman içerisinde önemli ölçüde değişmektedir. Örneğin ölçüm süresi içerisinde, 1.5 metre derinlikte ölçülen en yüksek hız değeri 9.0 cm/sn., en düşük hız değeri ise 1.03 cm/sn’dir. Lagünde en hızlı akıntılar lagün-deniz bağlantı kanalında gözlenmektedir. Bağlantı kanalında ölçülen ortalama akıntı hızı yüzeyde 9 cm/sn’dir. Lagünün kuzey batısı, akıntı bakımından en hareketsiz bölümüdür. Bu bölümde ortalama akıntı hızlarının 1.5 cm/sn kadar olduğu görülmektedir.

Ölüdeniz Lagünü’nde akıntı hızlarının yönlere göre dağılımı, 1.5, 10.5 ve 20.5 metre derinlikteki ölçümler için sırasıyla Çizim (4.14), (4.15) ve (4.16)’da gösterilmiştir. Çizim (4.14)’den, 1.5 metre derinlikte alınan akıntı ölçümlerinin genelde 135 ile 200 dereceleri (Kuzeyden Batıya doğru saat yelkovanının zıt yönünde) arasında kalan yönlerde (Güneybatı-Güneydoğu) olduğu görülmektedir. Çizim (4.15-4.16) incelendiğinde, 10.5 ve 20.5 metre derinlikte alınan akıntı ölçümlerinin genelde 65 ile 115 dereceleri arasında kalan yönlerde (Kuzeybatı-Güneybatı) olduğu belirlenmektedir.

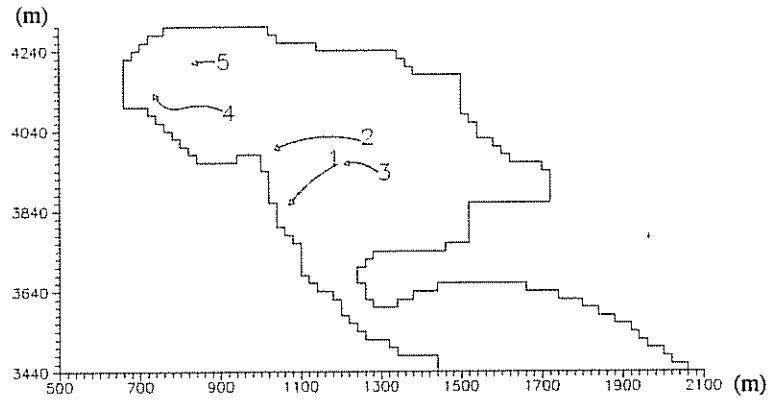
Belceğiz Körfezi’nde, üç ayrı derinlikteki yüzeklerle yapılan çalışmalardan elde edilen akıntı hızlarının ölçüm süresindeki ortalama değerleri de Tablo (4.15)’de verilmiştir. Bu tabloda ayrıca, ölçülen en yüksek ve en düşük hızlar da ölçüm günü ve saatiyle yer almaktadır. Ortalama akıntı hızı önemli miktarda değişmemekte, ve bu üç derinlik için de yaklaşık olarak 5.0 cm/sn. kadar olduğu görülmektedir. Belceğiz Körfezi’nde ölçülen akıntı hızları genellikle 10 cm/sn.’den daha küçüktür.



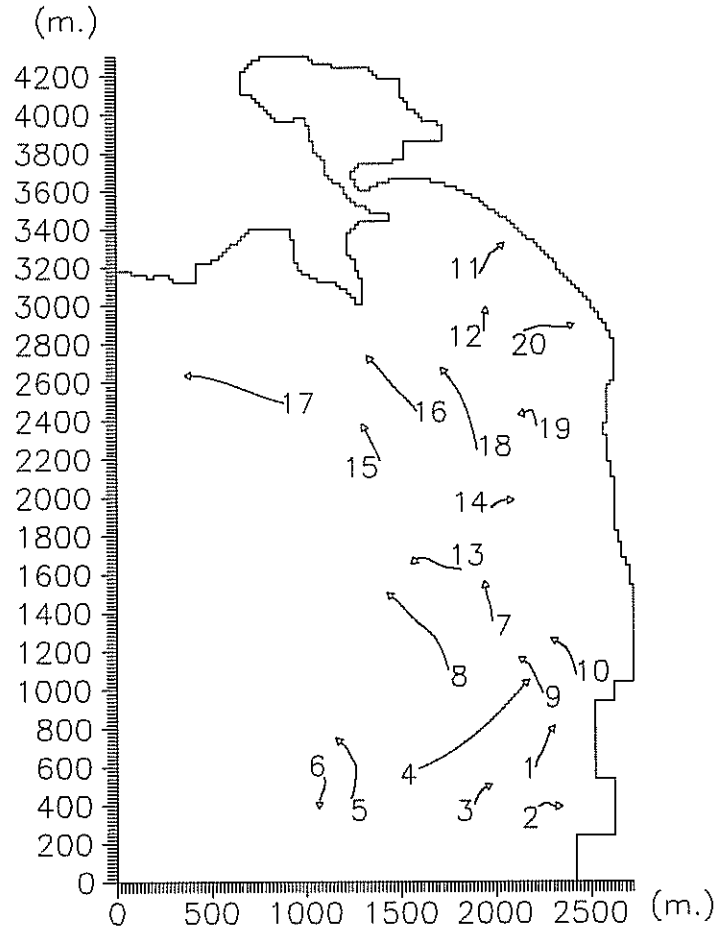
Çizim 4.5 Ölüdeniz Lagünü'nde, 1.5 metre derinlikteki yüzeklerin izlediği yollar



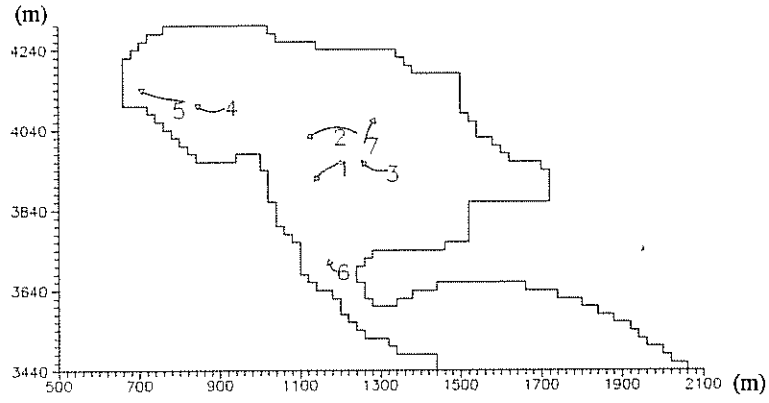
Çizim 4.6 Belceğiz Körfezi'nde, 1.5 metre derinlikteki yüzeklerin izlediği yollar



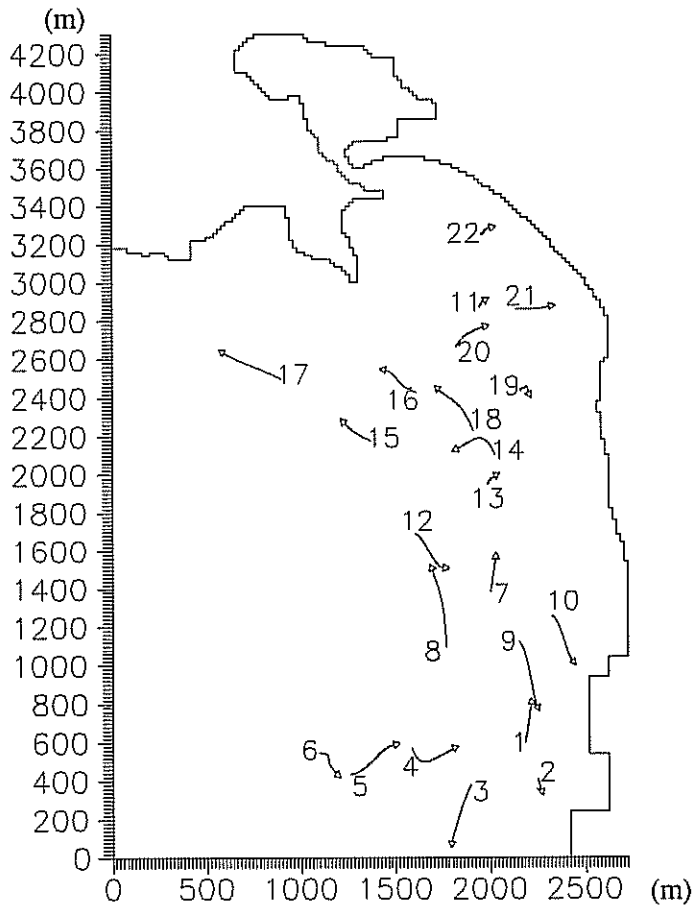
Çizim 4.7 Ölüdeniz Lagünü'nde, 10.5 metre derinlikteki yüzeklerin izlediği yollar



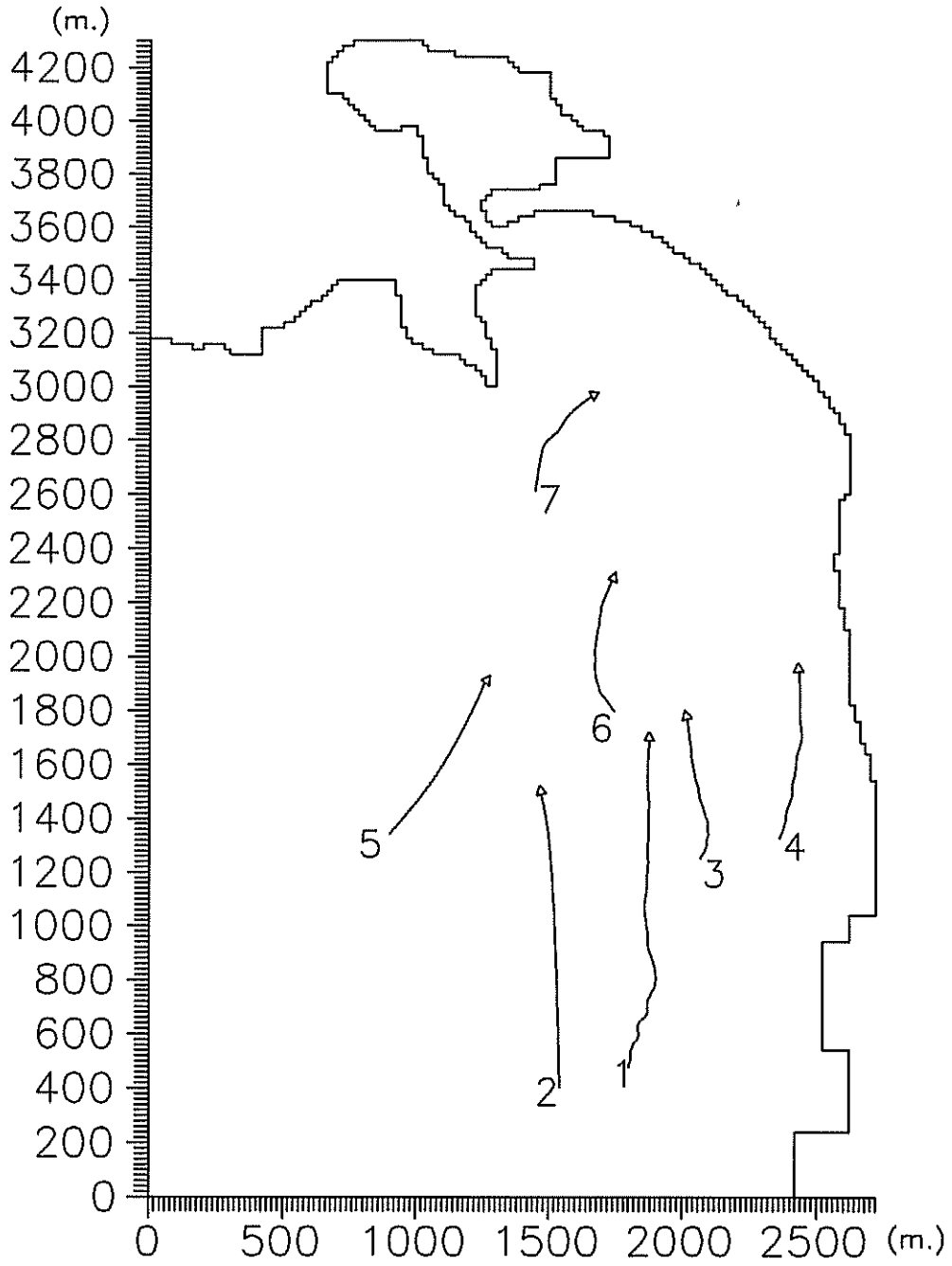
Çizim 4.8 Belceğiz Körfezi'nde, 10.5 metre derinlikteki yüzeklerin izlediği yollar



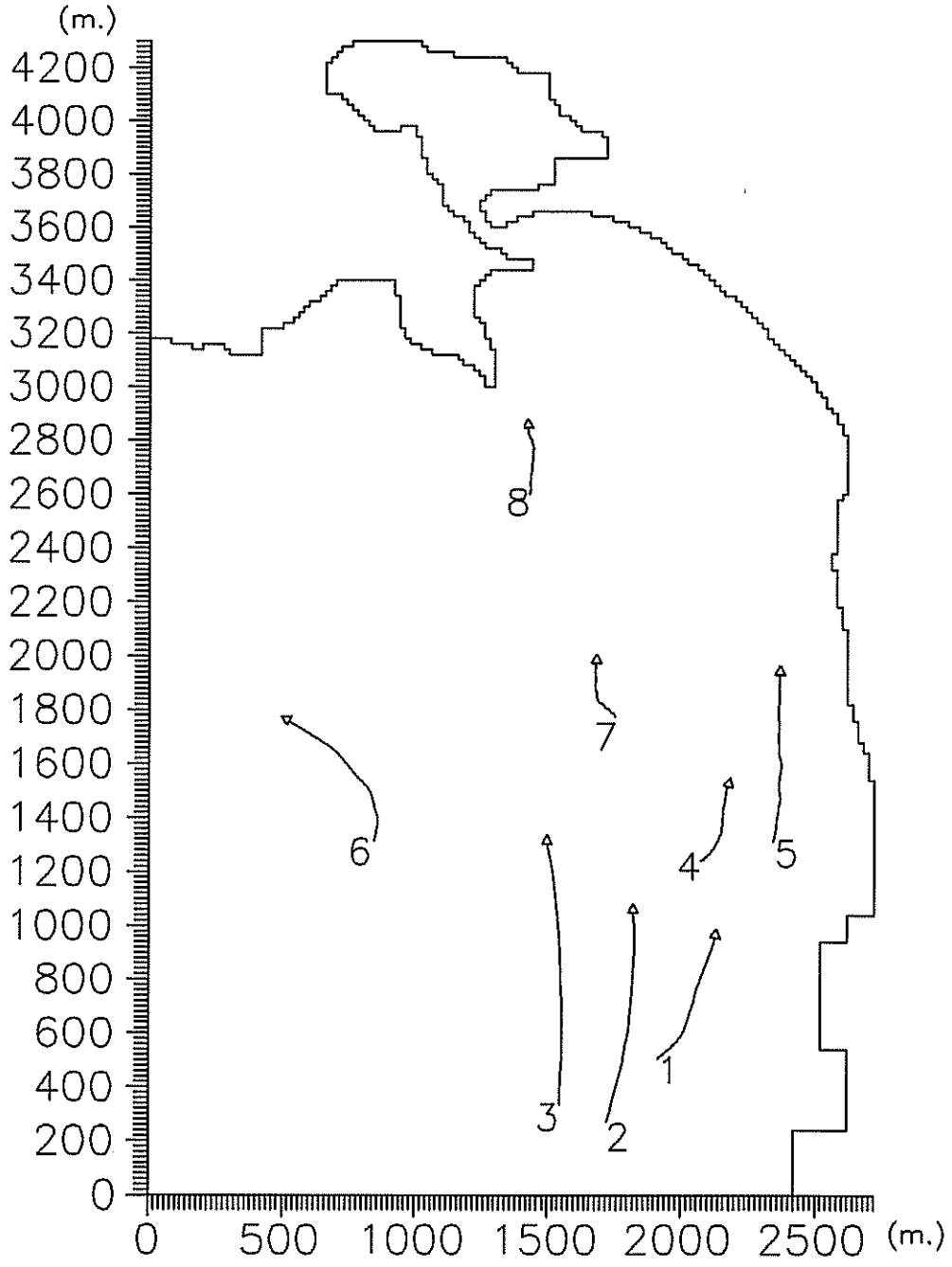
Çizim 4.9 Ölüdeniz Lagünü'nde, 20.5 metre derinlikteki yüzeklerin izlediği yollar



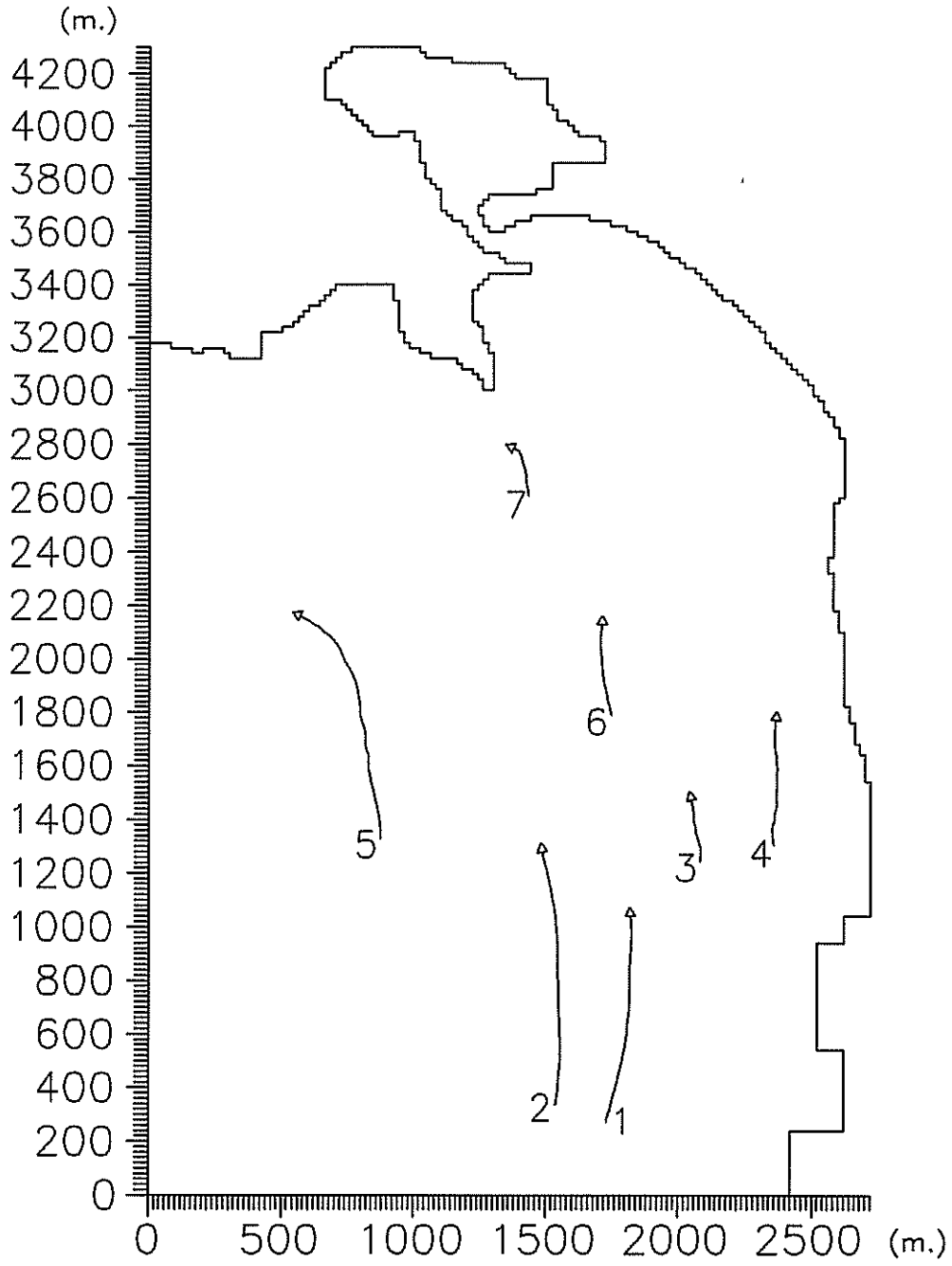
Çizim 4.10 Belceğiz Körfezi'nde, 20.5 metre derinlikteki yüzeklerin izlediği yollar



Çizim 4.11 Belceğiz Körfezi'nde, 1.5 metre derinlikteki yüzüklerin izlediği yollar.



Çizim 4.12 Belceğiz Körfezi'nde, 10.5 metre derinlikteki yüzeklerin izlediği yollar.



Çizim 4.13 Belceğiz Körfezi'nde, 20.5 metre derinlikteki yüzeklerin izlediği yollar.

Tablo 4.5 Ölüdeniz Lagünü'nde 1.5 metre derinlikteki yüzekler ile yapılan ölçümlerin (Çizim 4.5) tarihleri, ölçüm süresi, devinim yönleri ve ortalama hızları.

No	Tarih	Ölçüm Saati	Ölçüm Süresi (dakika)	Egemen Yön (Kuzeyden Batıya) (derece)	Ortalama Yön (Kuzeyden Batıya) (derece)	Ortalama Hız (cm/sn)
1	05.07	12:25	65	140,167	140	5.65
2	05.07	13:50	135	210,115,168	168	3.61
3	05.07	16:20	95	189	189	2.11
4	06.07	10:55	115	137	137	1.38
5	06.07	13:05	110	110,60	110	1.71
6	06.07	15:10	65	60	60	1.03
7	09.07	16:05	25	65,115,50	50	6.22
8	09.07	16:45	15	30	30	9.0

Tablo 4.6 Ölüdeniz Lagünü'nde 10.5 metre derinlikteki yüzekler ile yapılan ölçümlerin (Çizim 4.7) tarihleri, ölçüm süresi, devinim yönleri ve ortalama hızları.

No	Tarih	Ölçüm Saati	Ölçüm Süresi (dakika)	Egemen Yön (Kuzeyden Batıya) (derece)	Ortalama Yön (Kuzeyden Batıya) (derece)	Ortalama Hız (cm/sn)
1	05.07	12:25	65	127	127	3.9
2	05.07	13:50	135	85,106	85	3.1
3	05.07	16:20	95	78	78	2.1
4	06.07	10:55	115	85,100,65	100	2.6
5	06.07	15:10	65	89	89	1.4

Tablo 4.7 Ölüdeniz Lagünü'nde 20.5 metre derinlikteki yüzekler ile yapılan ölçümlerin (Çizim 4.9), tarihleri, ölçüm süresi, devinim yönleri ve ortalama hızları.

No	Tarih	Ölçüm Saati	Ölçüm Süresi (dakika)	Egemen Yön (Kuzeyden Batıya) (derece)	Ortalama Yön Kuzeyden Batıya (derece)	Ortalama Hız (cm/sn)
1	05.07	12:25	65	115	115	3.5
2	05.07	13:50	135	80,110	80	3.0
3	05.07	16:20	95	85	85	2.1
4	06.07	10:55	115	95,80	95	1.1
5	06.07	13:05	110	75	75	1.6
6*	12.07	10:05	27	55	55	1.0
7	04.08	15:10	85	340	340	1.2

(*) Ölçüm, Lagünün boğaz kısmında 5 metre derinlikte 3 dakikalık aralıklarla alınmıştır.

Belceğiz Körfezi'nde, akıntı hızlarının ortalaması 1.5, 10.5 ve 20.5 metre derinlikteki ölçümler için sırasıyla 7.33, 5.18 ve 3.57 cm/sn'dir. Ancak akıntı hızı körfezde zaman içerisinde önemli ölçüde değişmektedir. Örneğin ölçüm süresi içerisinde, 1.5 metre derinlikte (yüzeyde) ölçülen en yüksek hız değeri 15.2 cm/sn, en düşük hız değeri ise 2.72 cm/sn'dir.

Belceğiz Körfezi'nde akıntı hızlarının yönlere göre dağılımı, 1.5, 10.5 ve 20.5 metre derinlikteki ölçümler için sırasıyla Çizim (4.17), (4.18) ve (4.19)'da gösterilmiştir. Bu çizimlerden, akıntının çoğu zaman 315 ve 45 dereceleri (Kuzeyden Batı'ya doğru saat yelkovanının zıt yönünde) arasında kalan yönlerde (Kuzeydoğu ve Kuzeybatı arası) olduğu görülmektedir. Bu yönlerde oluşan akıntı enerjisi diğer yönlerle oranla daha belirgindir.

Tablo 4.8 Belceğiz Körfezi'nde 1.5 metre derinlikteki yüzükler ile yapılan ölçümlerin (Çizim 4.6) tarihleri, ölçüm süresi, devinim yönleri ve ortalama hızları.

No	Tarih	Ölçüm Başlangıç Saati	Ölçüm Süresi (dakika)	Egemen Yön Kuzeyden Batıya (derece)	Ortalama Yön Kuzeyden Batıya (derece)	Ortalama Hız (cm/sn)
1	01.07	15:40	50	358	358	5.52
2	02.07	14:35	135	173	173	6.01
3	04.07	11:00	155	40	40	7.7
4	07.07	11:10	155	345	345	5.3
5	07.07	14:00	170	45	45	7.34
6	08.07	14:05	135	285	285	4.6
7	12.07	15:55	55	350	350	2.72
8	13.07	14:00	50	277	277	3.0
9	30.07	12:55	135	70	70	3.42
10	30.07	15:48	60	330	330	3.7
11	31.07	11:40	125	10,102	10	6.43
12	31.07	14:10	60	140	140	3.45
13	01.08	11:20	135	20,65	65	4.5
14	01.08	13:50	150	65,185	185	5.0
15	01.08	16:35	95	285	285	5.67
16	02.08	11:36	140	65	65	8.13
17	02.08	14:10	105	60	60	11.0
18	03.08	11:05	100	295	295	4.52
19	03.08	12:55	90	305,30	30	4.1

Tablo 4.9 Belceğiz Körfezi'nde 10.5 metre derinlikteki yüzükler ile yapılan ölçümlerin (Çizim 4.8) tarihleri, ölçüm süresi, devinim yönleri ve ortalama hızları.

No	Tarih	Ölçüm Saati	Ölçüm Süresi (dakika)	Egemen Yön (Kuzeyden Batıya) (derece)	Ortalama Yön (Kuzeyden Batıya) (derece)	Ortalama Hız (cm/sn)
1	01.07	15:40	50	340	340	6.5
2	02.07	11:30	105	269	269	1.6
3	03.07	10:55	115	320	320	2.1
4	03.07	13:04	130	297,325	297	9.4
5	04.07	11:00	155	345,30	30	3.5
6	04.07	13:55	130	165	165	2.1
7	07.07	11:10	155	17	17	2.5
8	07.07	14:00	170	43	43	5.2
9	08.07	10:25	170	295	295	2.4
10	08.07	14:25	135	305	305	2.5
11	12.07	15:55	55	335	335	1.3
12	13.07	14:00	50	354	354	2.7
13	30.07	12:55	135	255	255	3.7
14	30.07	15:48	60	300	300	2.9
15	31.07	14:10	60	20	20	5.4
16	01.08	11:20	140	40	40	4.6
17	01.08	13:50	150	55	55	8.1
18	01.08	16:35	95	15	15	5.7
19	02.08	11:36	140	277,193	193	1.7
20	03.08	11:05	95	271	271	4.1

Tablo 4.10 Belceğiz Körfezi'nde 20.5 metre derinlikteki yüzekler ile yapılan ölçümlerin (Çizim 4.10), tarihleri, ölçüm süresi, devinim yönleri ve ortalama hızları.

No	Tarih	Ölçüm Saati	Ölçüm Süresi (dakika)	Egemen Yön (Kuzeyden Batıya) (derece)	Ortalama Yön (Kuzeyden Batıya) (derece)	Ortalama Hız (cm/sn)
1	01.07	15:40	50	346	346	5.8
2	02.07	13:30	45	194	194	3.3
3	03.07	10:55	115	160	160	0.8
4	03.07	13:04	130	205,293	293	1.5
5	04.07	11:00	155	315	315	2.2
6	04.07	13:55	130	210	210	4.4
7	07.07	11:10	155	358	358	2.0
8	07.07	14:00	170	15	15	4.5
9	08.07	10:25	170	200	200	3.5
10	08.07	14:25	135	215	215	3.2
11	13.07	14:00	50	320	320	1.2
12	30.07	12:55	135	225	225	2.9
13	30.07	15:48	60	320	320	2.0
14	31.07	11:40	130	50,115	115	3.5
15	31.07	14:10	60	55	55	4.3
16	01.08	11:20	135	30	30	2.4
17	01.08	13:50	145	60	60	5.2
18	01.08	16:35	95	30	30	3.6
19	02.08	11:36	130	278,185	278	1.2
20	02.08	14:10	110	310	310	2.7
21	03.08	11:05	95	270	270	2.9
22	03.08	12:55	90	317	317	1.2

Tablo 4.11 Belceğiz Körfezi'nde 1.5 metre derinlikteki yüzekler ile yapılan ölçümlerin (Çizim 4.11) tarihleri, ölçüm süresi, devinim yönleri ve ortalama hızları.

No	Tarih	Ölçüm Saati	Ölçüm Süresi (dakika)	Egemen Yön (Kuzeyden Batıya) (derece)	Ortalama Yön (Kuzeyden Batıya) (derece)	Ortalama Hız (cm/sn)
1	14.09	11:00	150	340,5	5	15.2
2	15.09	12:55	100	5	5	14.0
3	16.09	13:25	90	345,10	10	9.6
4	16.09	15:11	55	340,360	360	12.0
5	17.09	15:50	75	320,335	320	14.41
6	18.09	11:45	95	50,345	345	9.8
7	18.09	13:40	45	350,310	310	13.5

Tablo 4.12 Belceğiz Körfezi'nde 10.5 metre derinlikteki yüzekler ile yapılan ölçümlerin (Çizim 4.12) tarihleri, ölçüm süresi, devinim yönleri ve ortalama hızları.

No	Tarih	Ölçüm Saati	Ölçüm Süresi (dakika)	Egemen Yön (Kuzeyden Batıya) (derece)	Ortalama Yön (Kuzeyden Batıya) (derece)	Ortalama Hız (cm/sn)
1	14.09	11:00	150	300,335	335	7.5
2	15.09	10:35	125	340,355	340	10.1
3	15.09	12:55	100	355,10	355	13.6
4	16.09	13:25	90	310,350	350	5.4
5	16.09	15:11	105	350,360	350	9.5
6	17.09	15:50	60	10,45	45	13.0
7	18.09	11:45	95	60,5	5	4.0
8	18.09	13:40	115	355,30	355	3.8

Tablo 4.13 Belceğiz Körfezi'nde, 20.5 metre derinlikteki yüzekler ile yapılan ölçümlerin (Çizim 4.13) tarihleri, ölçüm süresi, devinim yönleri ve ortalama hızları.

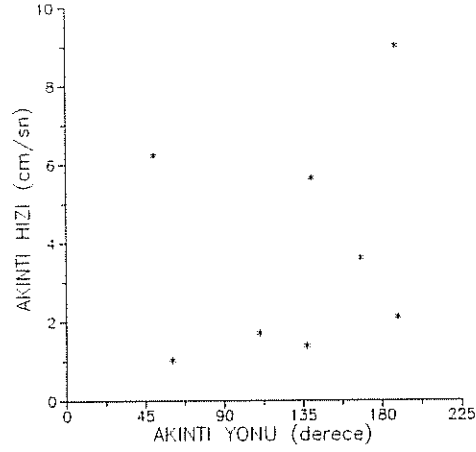
No	Tarih	Ölçüm Saati	Ölçüm Süresi (dakika)	Egemen Yön (Kuzeyden Batıya) (derece)	Ortalama Yön (Kuzeyden Batıya) (derece)	Ortalama Hız (cm/sn)
1	15.09	10:35	125	340,355	355	8.1
2	15.09	12:55	100	355,15	355	7.3
3	16.09	13:25	90	10	10	4.1
4	16.09	15:11	105	355	355	7.1
5	17.09	15:50	85	15,45	15	8.0
6	18.09	11:45	95	10,360	360	2.5
7	18.09	13:40	115	10	10	2.0

Tablo 4.14 Ölüdeniz Lagünü'nde ortalama, en yüksek ve en düşük akıntı hızları.

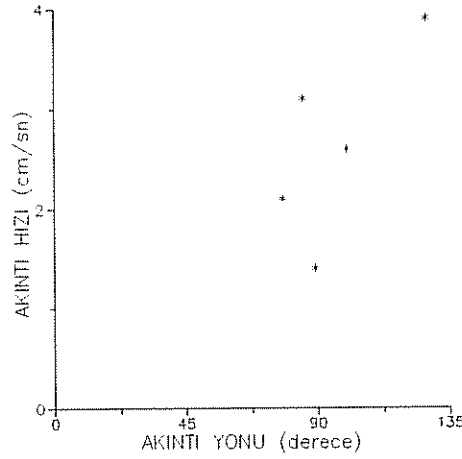
Ölçüm derinliği	1.5 metre	10.5 metre	20.5 metre
Ortalama akıntı hızı (cm/sn.)	3.84	2.62	2.08
En yüksek akıntı hızı (cm/sn.)	9.0	3.9	3.5
Ölçüm günü ve zamanı	09/07/1997 16:45-17:00	05/07/1997 12:25-13:30	05/07/1997 12:25-13:30
En düşük akıntı hızı (cm/sn.)	1.03	1.4	1.1
Ölçüm günü ve zamanı	06/07/1997 15:10-16:15	06/07/1997 15:10-16:15	06/07/1997 10:55-12:50

Tablo 4.15 Belceğiz Körfezi'nde ortalama, en yüksek ve en düşük akıntı hızları.

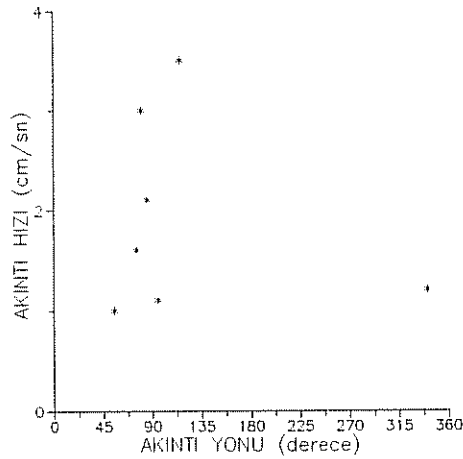
Ölçüm derinliği	1.5 metre	10.5 metre	20.5 metre
Ortalama akıntı hızı (cm/sn.)	7.33	5.18	3.57
En yüksek akıntı hızı (cm/sn.)	15.2	13.6	8.1
Ölçüm günü ve zamanı	14/09/1997 11:00-13:30	15/09/1997 12:55-14:35	15/09/1997 10:35-12:40
En düşük akıntı hızı (cm/sn.)	2.72	1.3	0.8
Ölçüm günü ve zamanı	12/07/1997 15:55-16:50	12/07/1997 15:55-16:50	03/07/1997 10:55-12:50



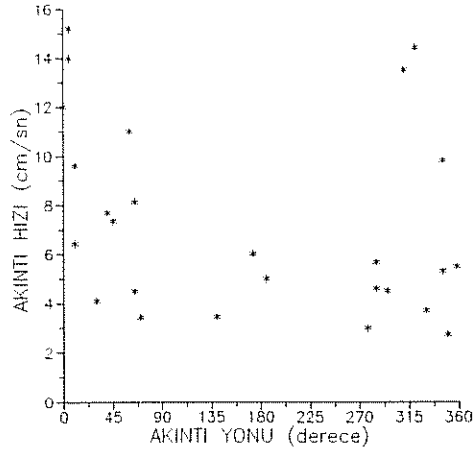
Çizim 4.14 Ölüdeniz Lagünü'nde 1.5 metre derinlikte ölçülen akıntı hızlarının yönlere göre dağılımı.



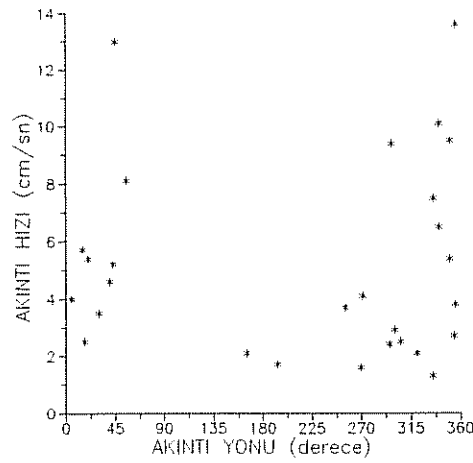
Çizim 4.15 Ölüdeniz Lagünü'nde 10.5 metre derinlikte ölçülen akıntı hızlarının yönlere göre dağılımı.



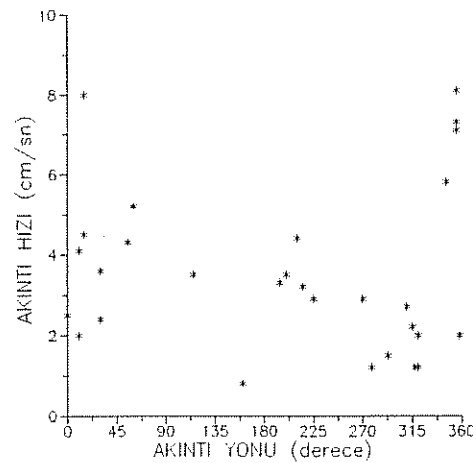
Çizim 4.16 Ölüdeniz Lagünü'nde 20.5 metre derinlikte ölçülen akıntı hızlarının yönlere göre dağılımı.



Çizim 4.17 Belceğiz Körfezi'nde 1.5 metre derinlikte ölçülen akıntı hızlarının yönlere göre dağılımı.



Çizim 4.18 Belceğiz Körfezi'nde 10.5 metre derinlikte ölçülen akıntı hızlarının yönlere göre dağılımı.



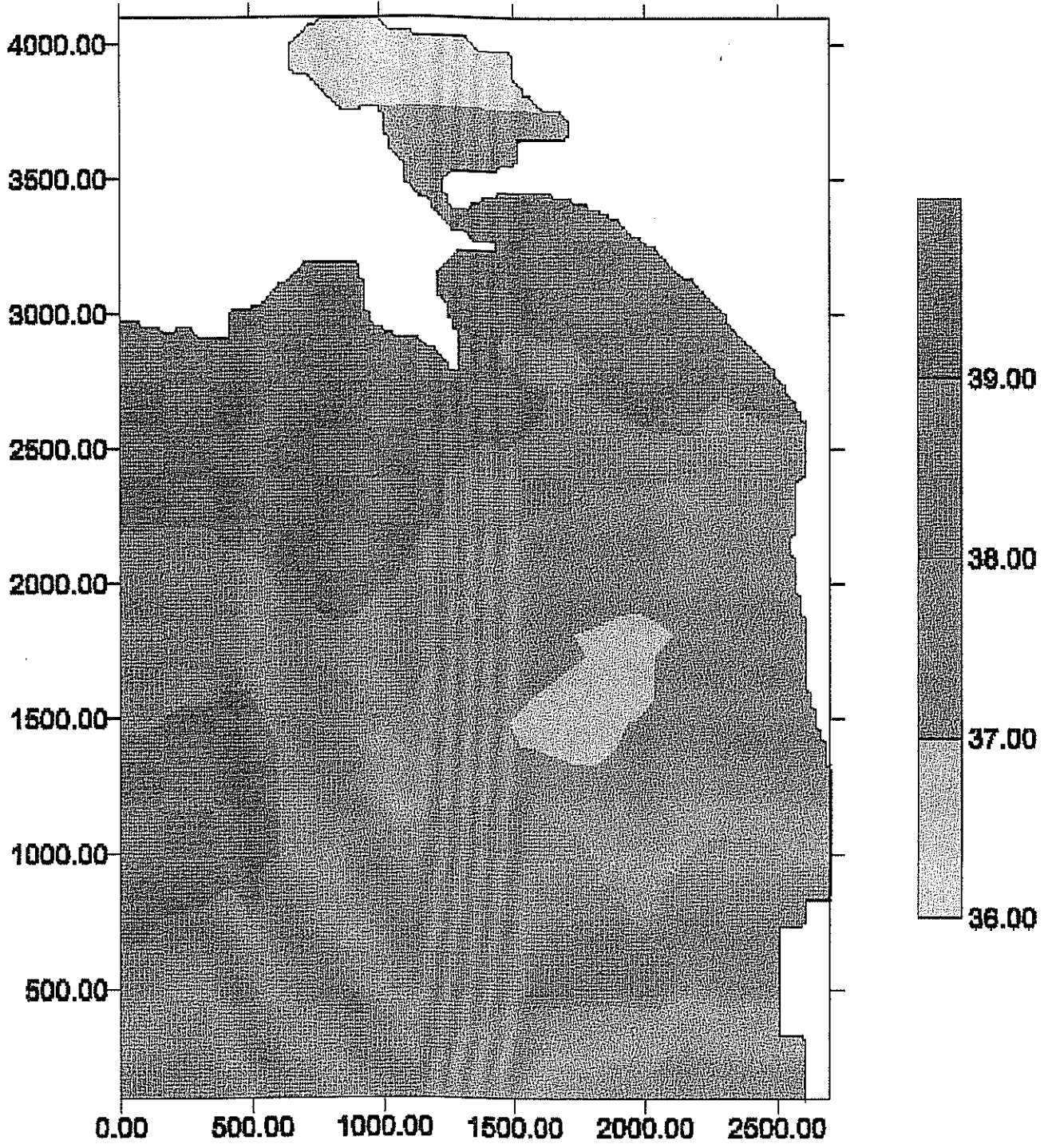
Çizim 4.19 Belceğiz Körfezi'nde 20.5 metre derinlikte ölçülen akıntı hızlarının yönlere göre dağılımı.

4.3 Tuzluluk ve Su Sıcaklığı Ölçümleri

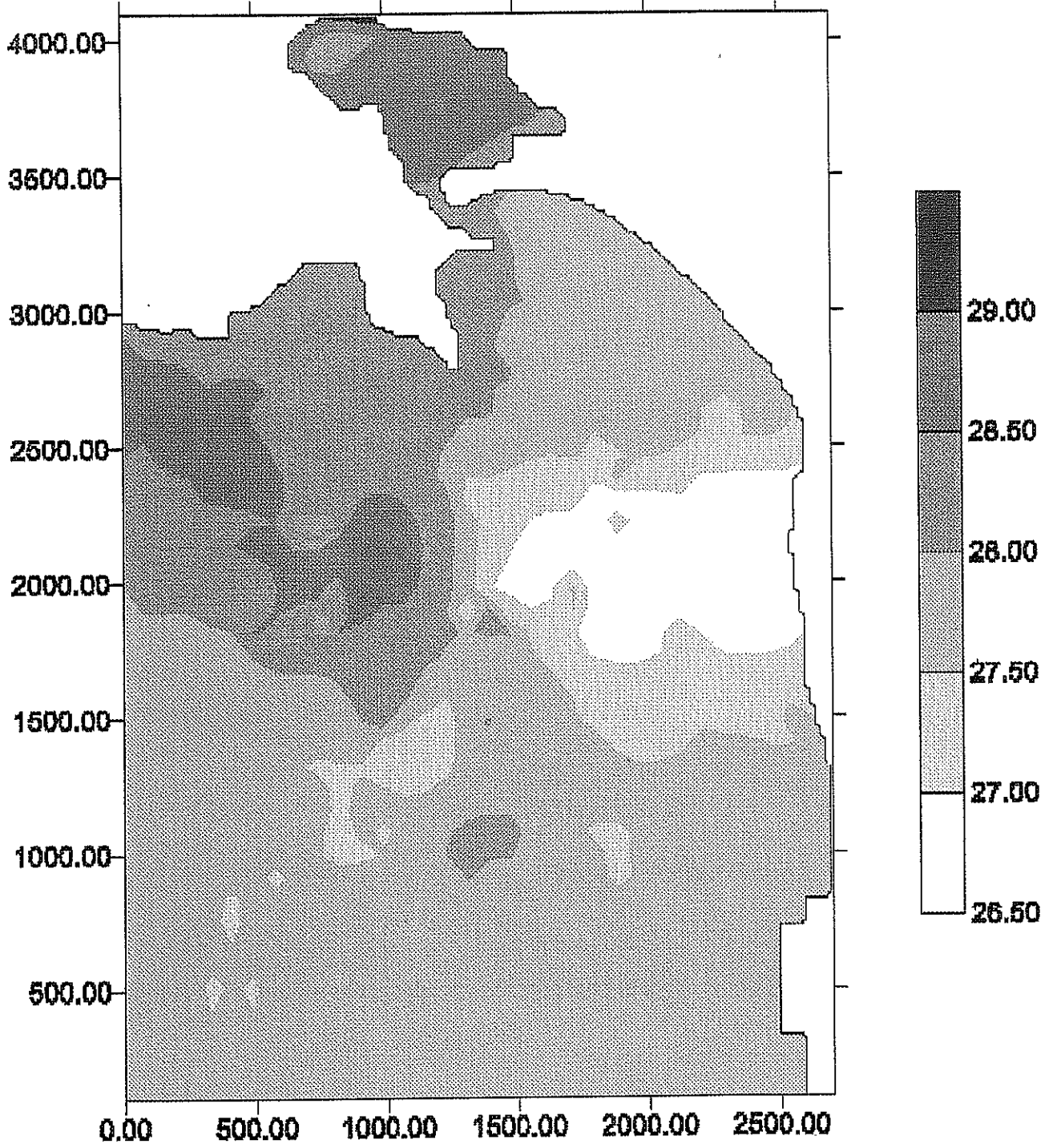
Deniz suyu tuzluluk ve su sıcaklığı ölçümleri, YSI Model 33 S-C-T Meter ile alınmıştır. Yüzeide ölçülen su tuzluluk ve sıcaklıkları Çizim (A.3-A.6)'de ölçüm noktalarıyla birlikte, Çizim (4.20) ve (4.21)'de ise alansal dağılımlarıyla sunulmuştur.

Ölüdeniz Lagünü içinde, su hareketleri daha yavaş ve su derinlikleri daha azdır. Bu nedenle, lagün içi su sıcaklıkları, Belceğiz Körfezi'ne göre daha yüksektir. Lagün içi sularında, Belceğiz Körfezi'ne oranla daha düşük tuzluluklar ölçülmüştür. Lagünün batı kıyılarından başlayarak ortasına doğru uzanan bölgede tuzluluğun ve sıcaklığının en düşük olması, batı kıyılarında bir tatlı su kaynağı olasığını kuvvetlendirmektedir. Belceğiz Körfezi'nde de kıyıda bulunan tesislerin son bulduğu noktadan Club Lykia World açıklarına kadar uzanan kıyı şeridinde (0-2200 m.) ölçülen düşük su tuzluluk ve sıcaklıkları, bu bölgede de bir tatlı su kaynağının varlığını göstermektedir.

Alan ölçümleri süresince, Belceğiz Körfezi güney sahillerinde, deniz yüzeyinde, sebebi henüz anlaşılamayan yoğun bir köpüklenme gözlenmiştir (Fotoğraf 4.4).



Çizim 4.20 Yüzeyde ölçülen su tuzluluklarının alansal dağılımları.



Çizim 4.21 Yüzeyde ölçülen su sıcaklıklarının alansal dağılımları.



Fotoğraf 4.4 Belceğiz Körfezi'nin güney sahillerinde oluşan köpüklenme.

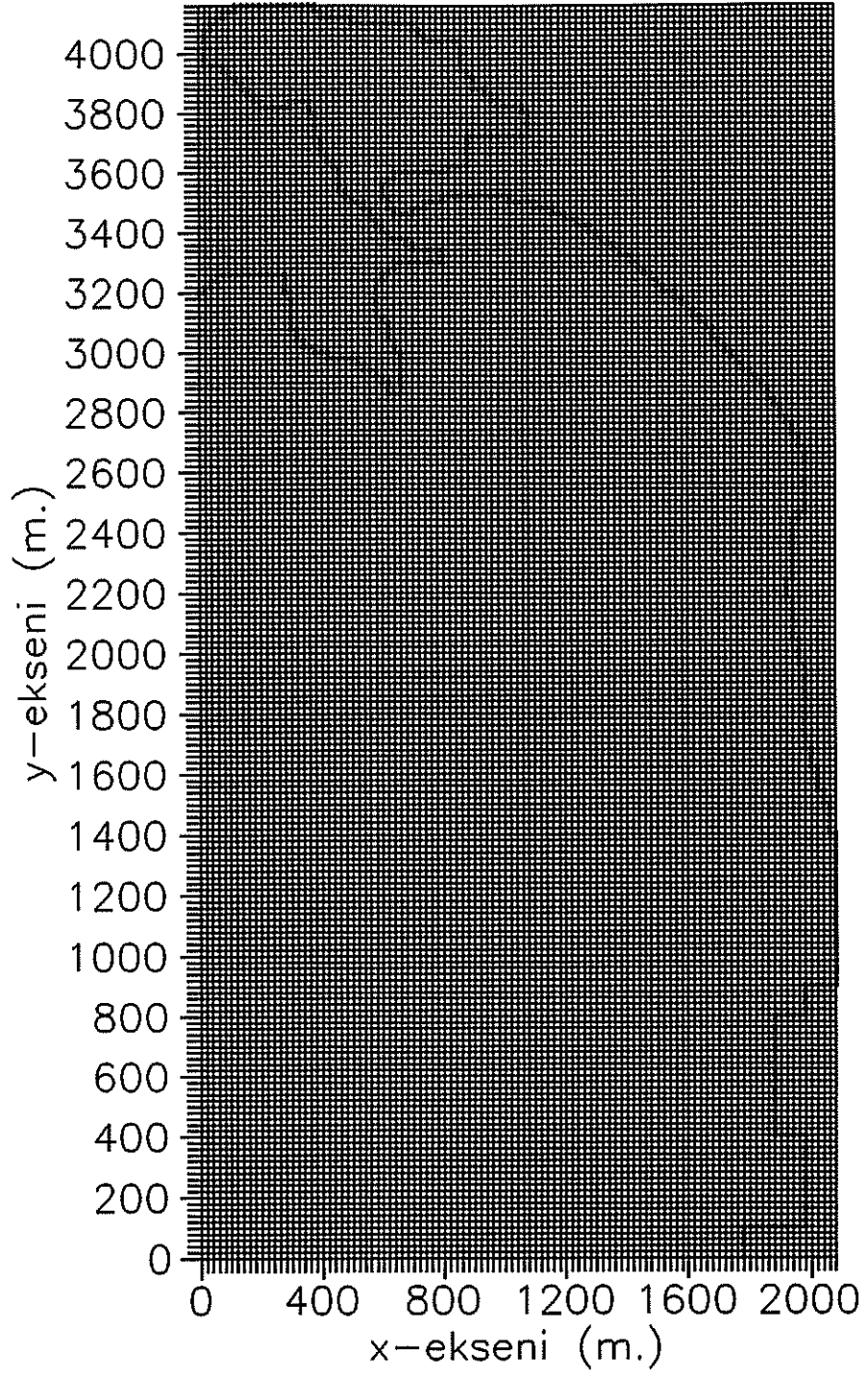
BÖLÜM 5

MODELİN ÖLÜDENİZ LAGÜNÜ'NE UYARLANMASI

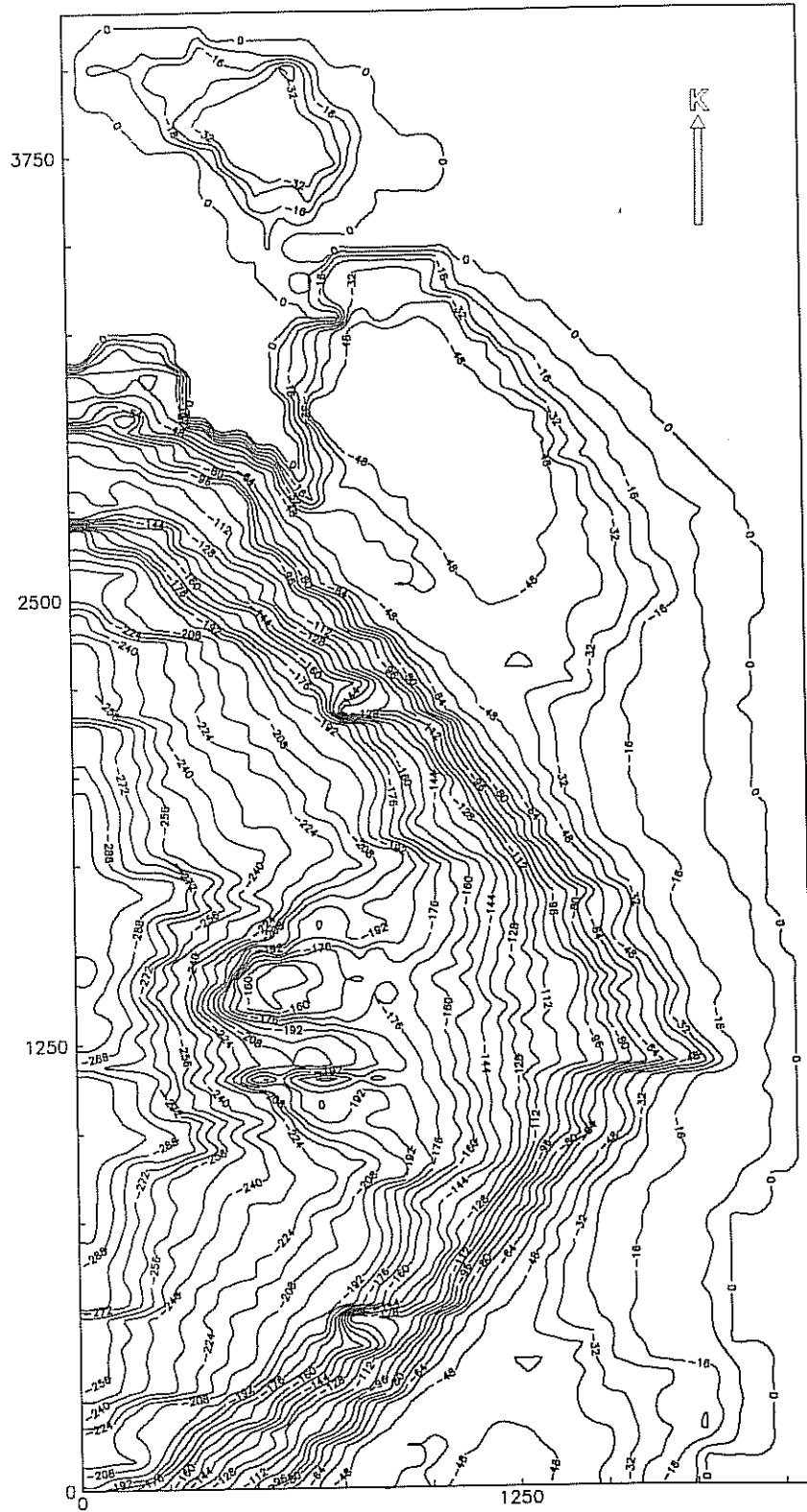
Geliştirilen model lagün ortamında kullanılmaya uygun duruma getirildikten sonra Ölüdeniz Lagünü'ne uyarlanmıştır (Balas, Özhan ve Öztürk, 1997; Balas ve Özhan, 1998; Balas, 1998). Fethiye'nin 7.5 km. güneyinde yaklaşık 0.6 km² alan kaplayan Ölüdeniz Lagünü, 3 km. Güneydoğusundaki Kıdırak Deresi'nin denize taşıdığı alüvyonların kıyı boyu akıntıları ile Kuzey-kuzeybatı yönünde taşınarak Belçeğiz Körfezi'nde bir kıyı dili oluşturması sonucunda oluşmuştur (Ozaner, Erkal ve Güneysu, 1997).

Ölüdeniz'in topografya ve batimetri haritası (Harita No: 3131, Ölçek: 1:7500), Deniz Kuvvetleri Komutanlığı; Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı'nca (İstanbul) sağlanmıştır. Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı'ndan alınan topografya ve batimetri haritası kullanılarak; Ölüdeniz'in su alanı, lagün-deniz bağlantı kanalı ve Belçeğiz kumsalını içeren bilgisayar programı çözünüm ağı (20m.x20m.) hazırlanmıştır (Çizim 5.1). Çizim (5.1)'de görülen çözünüm ağındaki su derinlikleri, tarayıcı ile okunarak geliştirilen bilgisayar programının girdi dosyası hazırlanmıştır. Su derinlikleri, üç boyutlu olarak Çizim (A.7)'de gösterilmektedir. Eş derinlik haritası ise Çizim (5.2)'de verilmiştir.

Modelin zamansal çözüme başlayabilmesi için, başlangıç anındaki ($t=0$), su sıcaklıkları ve tuzluluk dağılımlarının, derinlik boyunca ve alansal olarak bilinmesi gerekmektedir. Yörede, daha önce bu amaçla yapılan ölçüm çalışmaları bulunamadığı için, alan çalışmalarıyla elde edilen su sıcaklık ve tuzluluk dağılımları (Çizim 4.20-4.21), başlangıç dağılımları olarak alınmıştır. Kıyı çizgisi sabit kabul edilmiştir. Düşey eddy akıcılık katsayıları $k-\epsilon$ türbülans modeli, yatay eddy akıcılık katsayıları ise Smagorinsky cebirsel alt-çözüm ağı ölçekli türbülans modeli ile hesaplanmışlardır.



Çizim 5.1 Bilgisayar programı çözünüm ağı.



Çizim 5.2 Ölüdeniz Lagünü ve Belceğiz Körfezi eş derinlik haritası
(Derinlikler metredir)

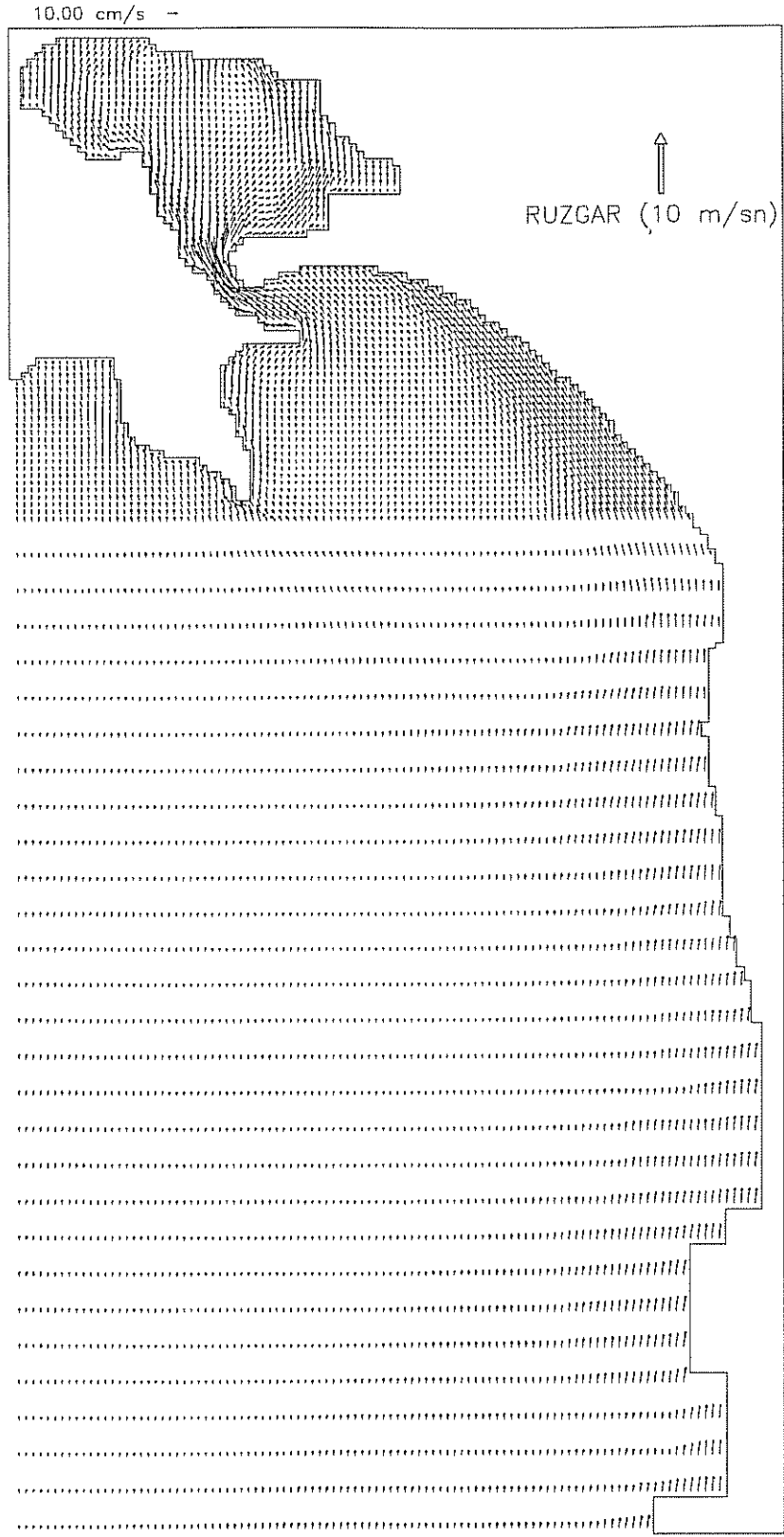
5.1. Rüzgar Kuvveti Etkisiyle Oluşan Akıntılar

Ölüdeniz Lagünü ve Belceğiz Körfezi'nde rüzgar kuvveti etkisiyle oluşan akıntıları benzeştirmek için su yüzeyi, öncelikle, 10 m/sn'lik sabit bir hızla, egemen yön olan güneyden kuzeye doğru esen rüzgarın kesme kuvvetiyle hareketlendirilmiştir. Su taneciklerinin hızları derinlik boyunca on seviyede hesaplanmıştır. Yatay düzlemdeki y-ekseni boyunca iki ayrı çözüm ağı uzunluğu uygulanmıştır. Belceğiz Körfezi'nde 100 m. alınan çözünüm ağı uzunluğu, çözünürlüğü artırmak amacıyla, Ölüdeniz Lagünü'nde 20 m.'ye indirilmiştir. Yatay düzlemdeki x-ekseni boyunca ise 20 m'lik çözüm ağı uzunluğu kullanılmıştır.

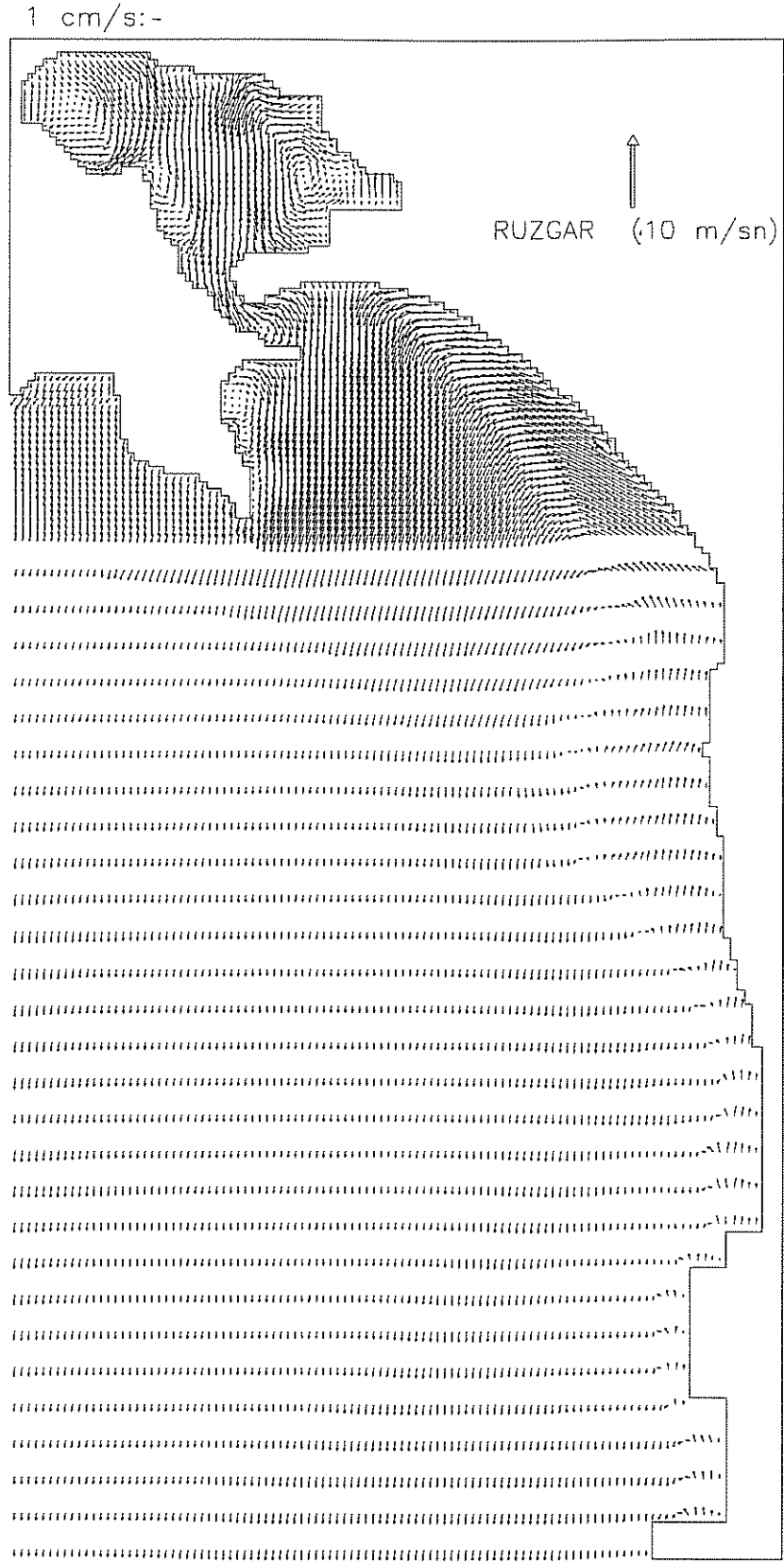
Sayısal hesaplamalar, hareketsiz durumdan başlayarak, akıntı düzeninin zamana bağlı olmayan denge durumu elde edilinceye kadar sürdürülmüştür. Rüzgarın esmeye başlamasından yaklaşık beş saat sonra, denge durumu elde edilmiştir. Su taneciklerinin, su yüzeyi ve su tabanındaki hız vektörleri Çizim (5.3a - 5.3b)'de gösterilmiştir.

Çizim (5.3a-5.3b)'de, yüzey sularının rüzgarın esme yönüne doğru aktıkları, su tabanı seviyelerinde ise, esme yönüne karşıt yönde bir zıt akıntı meydana geldiği görülmektedir. Kıyı çizgisine yakın sığ sularda ise derinlik boyunca bütün su tanecikleri, rüzgarın esme yönünde sürüklenmektedirler. Uygulanan rüzgar kuvveti etkisiyle, lagün-deniz bağlantı kanalındaki yüzey akıntı hızları 25 cm/sn'ye ulaşmaktadırlar.

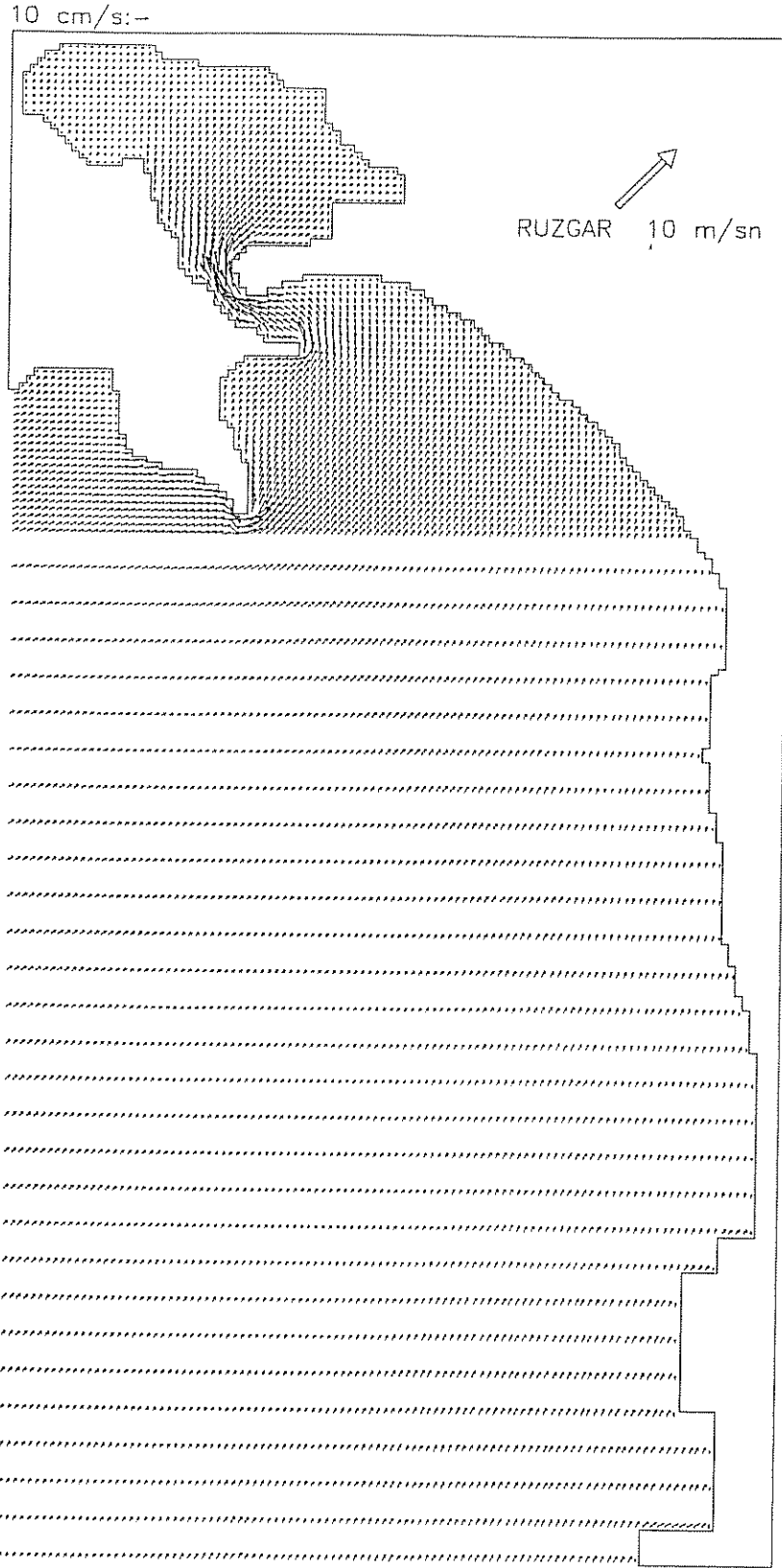
İkinci olarak, 10 m/sn'lik sabit bir hızla, Güneybatıdan Kuzeydoğuya doğru esen rüzgar kuvveti ile oluşan akıntılar benzeştirilmiştir. Sayısal hesaplamalar, hareketsiz durumdan başlayarak, akıntı düzeninin zamana bağlı olmayan denge durumu elde edilinceye kadar sürdürülmüştür. Rüzgarın esmeye başlamasından yaklaşık dört saat sonra, denge durumu elde edilmiştir. Su taneciklerinin, su yüzeyi ve su tabanındaki hız vektörleri Çizim (5.3c - 5.3d)'de gösterilmiştir.



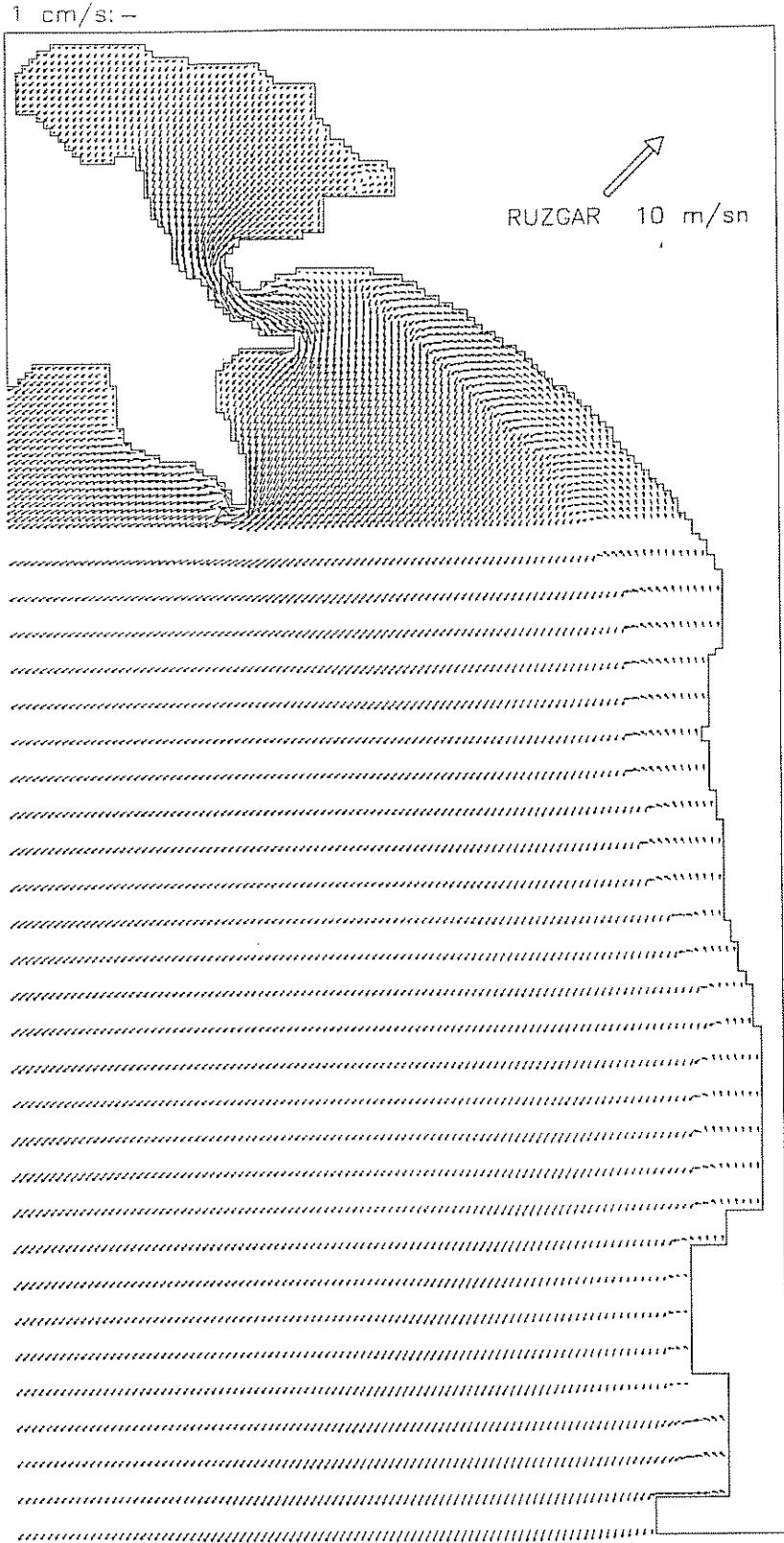
Çizim 5.3a Zamana bağılı olmayan denge durumunda su yüzeyi hız vektörleri



Çizim 5.3b Zamana bağlı olmayan denge durumunda su tabanı hız vektörleri



Çizim 5.3c Zamana bağlı olmayan denge durumunda su yüzeyi hız vektörleri



Çizim 5.3d Zamana bağlı olmayan denge durumunda su tabanı hız vektörleri

Rüzgar çekmesiyle oluşan akıntılarda, düşey akıcılık parametresinin sabit alınması, derinlik boyunca parabolik bir hız profili oluşturmaktadır. Türbülansın zaman içinde gelişmesini ve taşınımını benzeştiren k-ε modeli kullanılarak yapılan sayısal çözümde, akıntı hızları, deneysel verilerle daha uyumlu bir dağılım göstermektedirler (Balas, 1998). Bu nedenle uygulamalarda k-ε türbülans modeli kullanılmıştır.

Rüzgar kuvveti etkisiyle oluşan kıyasal akıntılar, rüzgar şiddetine ve rüzgarın su alanı üzerindeki esme yönüne bağlıdır. Bir kıyasal su alanı üzerindeki rüzgar çekmesi, yüzey sularını rüzgarın esme yönünde sürükler ve esme yönündeki kıyı kenarında su düzeyi yükselirken, karşıt kenarda su düzeyi alçalır. Rüzgarın esme yönündeki bu pozitif su düzeyi eğimi, su basıncı değişimine neden olur. Yüzey suları rüzgarın esme yönüne doğru akarlar, su tabanı tabakalarında, esme yönüne karşıt yönde bir ters akıntı meydana gelir. Bu akıntılar, düşeyde oldukça güçlü bir su çevrintisine yol açarlar. Bu düşey çevrinti, derinlik boyunca oluşmuş olan yoğunluk farklılaşmasını azaltır ve yatay düzlemdeki karışmaya yardımcı olur (Balas ve Özhan, 1997a).

Güneybatıdan Kuzeydoğuya esen rüzgarın oluşturduğu akıntı hızları, Güneyden aynı şiddette esen rüzgara göre daha azdır. Lagün-deniz bağlantı kanalı güney yönünde olup, güney yönü kara sınırı ile çevrili değildir, açık denizdir. Bu nedenle güneyden esen rüzgarlar lagün girişinde daha fazla su yükselmesi ve daha hızlı bir akıntı oluşturmaktadır. Güneybatıdan Kuzeydoğuya 10 m/sn'lik sabit hızla esen rüzgarın lagün girişinde oluşturduğu akıntı hızları 16 cm/sn'ye ulaşmaktadır. Yüzey sularının yine rüzgarın esme yönüne doğru aktıkları, su tabanı seviyelerinde ise, esme yönüne karşıt yönde bir ters akıntı meydana geldiği, ancak kıyı çizgisine yakın sığ sularda derinlik boyunca bütün su taneciklerinin rüzgarın esme yönünde sürüklendikleri görülmektedir.

Su yüzeyine etki eden rüzgar çekmesi, buna karşı koyan yerçekimi ve sürtünme kuvvetleri ile dengelenir ve esme yönündeki kıyı kenarında rüzgar kabarması (su düzeyi yükselmesi) oluşur. Güneyden 10 m/sn'lik sabit bir hızla esen rüzgarın, zamana bağlı olmayan denge durumunda, lagün girişi yakınlarında oluşturduğu rüzgar kabarması yaklaşık olarak 30 cm iken, Güneybatıdan esen rüzgarın oluşturduğu kabarma yaklaşık 13 cm'dir.

5.2 Gel-git Kuvveti Etkisiyle Oluşan Akıntılar

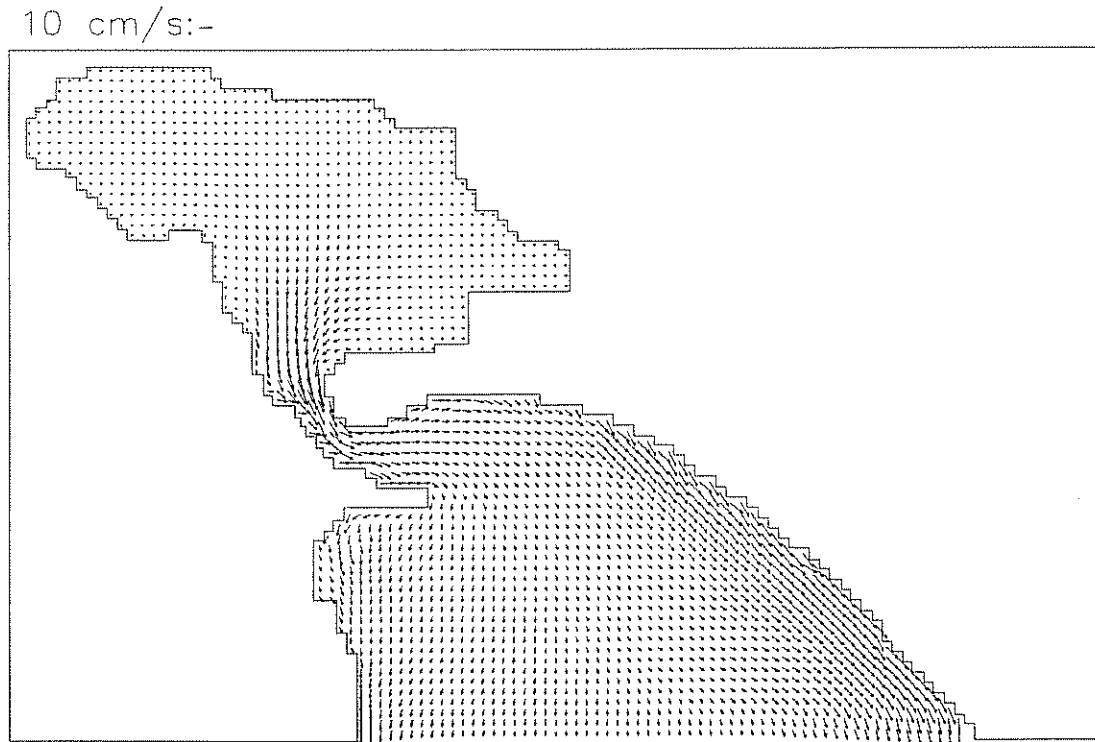
Gel-git kuvveti etkisiyle oluşan akıntıları benzeştirmek amacıyla su yüzeyi, genliği $a=15$ cm., dönemi $T=12$ saat olan get-git dalgasıyla hareketlendirilmiştir. Sayısal hesaplamalara, su seviyesinin en düşük ve akıntı hızlarının sıfır olduğu, durgun alçak su düzeyi anından ($t=0$) başlanılmıştır. Zamanın sıfıra eşit gözetildiği bu andan itibaren, açık deniz sınırı boyunca su düzeyinin sinüs dalgası formunda hareket ettiği varsayılmıştır. Su taneciklerinin hızları derinlik boyunca sekiz seviyede hesaplanmıştır. Yatay düzlemde 20×20 m. uzunluğunda çözünüm ağı uygulanmıştır. Gelgit başlangıcından 3 ($t=T/4$) saat ve 9 ($t=3T/4$) saat sonraki, su taneciklerinin ortalama hız vektörleri, sırasıyla Çizim (5.4a ve 5.4b) 'de sunulmuştur.

Gelgit dalgasının ilerlemesi, kıyı sisteminin topografyası ve açık deniz bağlantı kanalının geometrisi ile bağıntılıdır. Ölüdeniz Lagünü tek girişli bir lagün örneğidir. Lagün denize dar bir kanalla bağlanmaktadır. Tek girişli lagünlerin en önemli özelliği, açık denizdeki gelgit oluşumuyla aynı frekansa sahip gelgit etkisi altında kaldıkları halde, lagün içi su düzeyi değişimlerini ve gelgit akıntılarını büyük ölçüde engelleyen ve dinamik bir filtre görevini gören tek bir giriş kanalına sahip olmalarıdır. Bu tek giriş kanalının uzun ve dar yapısı nedeniyle, gelgit akıntı hızları bağlantı kanalında önemli ölçüde sönümlenirler. Bu nedenle, Ölüdeniz Lagünü içinde, gelgit kuvveti etkisiyle oluşan akıntı hızlarının, rüzgar etkisiyle oluşan akıntı hızlarına oranla daha düşük olduğu görülmektedir. Belceğiz Körfezi'nde ve lagün girişinde ise, dalga genliğinin düşüklüğüne rağmen ($a=15$ cm.) gelgit etkisiyle oluşan akıntı hızları, rüzgar etkisiyle oluşan akıntı hızlarıyla karşılaştırılabilecek düzeydedir.

Gelgit deviniminde, su düzeyinin alçak düzeyden yüksek düzeye değişmesi sırasında su akımının lagün içine, yüksek düzeyden alçak düzeye inişi sırasında ise denize doğru olduğu görülmektedir. Dalga döneminin uzun olması sebebiyle (12 saat), gelgit dalgasının dalga boyu, lagünün boyutlarından çok daha fazladır. Gelgit dalgası gibi uzun dalga boyuna sahip dalgalar etkisiyle oluşan akımlar, yatay akımlardır ve akım derinlik boyunca yaklaşık olarak aynı yöndedir. Akım derinlik boyunca logaritmik bir dağılım gösterir.



Çizim 5.4-a Gelgit etkisinin başlangıcından 3 ($t=T/4$) saat sonra, su taneciklerinin ortalama hız vektörleri.



Çizim 5.4-b Gelgit etkisinin başlangıcından 9 ($t=3T/4$) saat sonra, su taneciklerinin ortalama hız vektörleri.

5.3 Yoğunluk Değişimi Etkisiyle Oluşan Akıntılar

Alan çalışmalarıyla elde edilen su sıcaklık ve tuzluluk dağılımları (Çizim 4.20 ve 4.21), başlangıç zamanındaki ($t=0$) dağılımlar olarak alınmıştır. Uygulamalarda, derinlik boyunca dengeli yoğunluk değişimi olduğu düşünülerek, hava sıcaklığı, deniz suyunun yüzeydeki sıcaklığından daha yüksek kabul edilmiştir ($t_a = 32$ °C). Güneş ışınlarının ısıtması ile yüzey tabakalarındaki su yoğunluğunu azalmakta, az yoğunluklu su tabakasının yukarıda olması ise derinlik boyunca dengeli bir yoğunluk değişimi oluşturmaktadır. Hava sıcaklığı ve yüzey su sıcaklığı ile orantılı olan su yüzeyi ısı akısı, Denklem (3.29) kullanılarak hesaplanmış ve yüzey sınır koşulu olarak uygulanmıştır.

Su yoğunluğu, su sıcaklığı ve tuzluluğunun bir fonksiyonudur. Su sıcaklığındaki yada tuzluluğundaki herhangi bir değişme, su yoğunluğunun da değişmesine neden olur. Su yoğunluğu (3.11-3.17) denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır. Yoğunluk değişim kuvvetleri, hidrostatik basınç dağılımı (Denklem 3.4) ve basıncın yatay düzlemdeki değişimi (Denklem 3.9-3.10) ile, momentum denklemlerinde (Denklem 3.2-3.3) yer almaktadır.

Sayısal hesaplamalar, hareketsiz durumdan başlayarak, 12 saat sonuna kadar sürdürülmüştür. Su taneciklerinin hızları derinlik boyunca on seviyede hesaplanmıştır. Yatay düzlemde 20 x 20 m. uzunluğunda çözünüm ağı uygulanmıştır. Sadece yoğunluk değişimi etkisiyle oluşan ortalama akıntı hızı düzeni Çizim (5.5)'de gösterilmiştir (Balas ve Özhan, 1997a). Akıntıların yüksek yoğunluklu bölgelerden düşük yoğunluklu bölgelere doğru olduğu görülmektedir.

Yoğunluk değişimleri nedeniyle oluşan akıntı hızları, gelgit ve rüzgar kuvveti etkisiyle oluşan akıntılara oranla çok daha düşüktür. Akıntı hızları 1 cm/sn'nin altındadır. Bu da yoğunluk değişimlerinin Ölüdeniz Lagünü için önemli bir akıntı nedeni olmadığını göstermektedir.



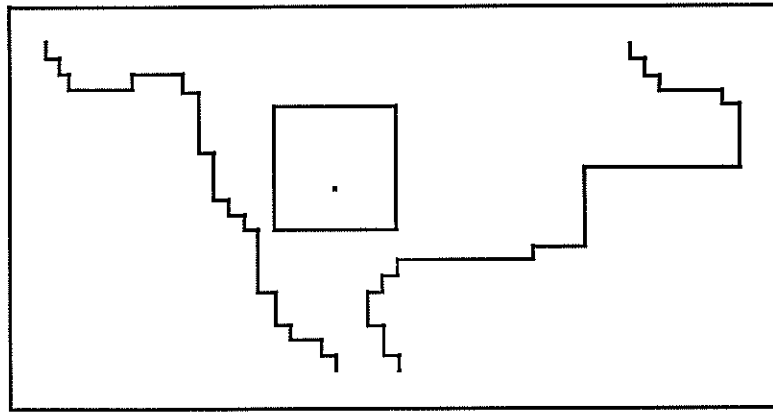
Çizim 5.5 Yoğunluk değişimleri nedeniyle oluşan ortalama akıntı düzeni

5.4 Kirletici Dağılımı

Bir kirleticinin dağılımının benzeştirilmesinde, kirletici olarak bakteri kullanılmıştır. Başlangıç anında, Çizim (5.6)'da gösterilen noktada, kirletici yoğunluğunun 10^6 bakteri/ml, diğer su alanlarında ise 1 bakteri/ml olduğu varsayılmıştır. Denize boşaltımın, su yüzeyinden ve sürekli olarak yapıldığı düşünülmüştür. Çizim (5.6)'da gösterilen bölgede çözünürlülük artırılarak, 10 x 10 m. yatay çözünüm ağı uzunlukları uygulanmıştır. Kirletici dağılımları derinlik boyunca sekiz seviyede hesaplanmıştır. Bakterilerin %90'nın yok olması için gerekli zaman (T_{90}), 2 saattir.

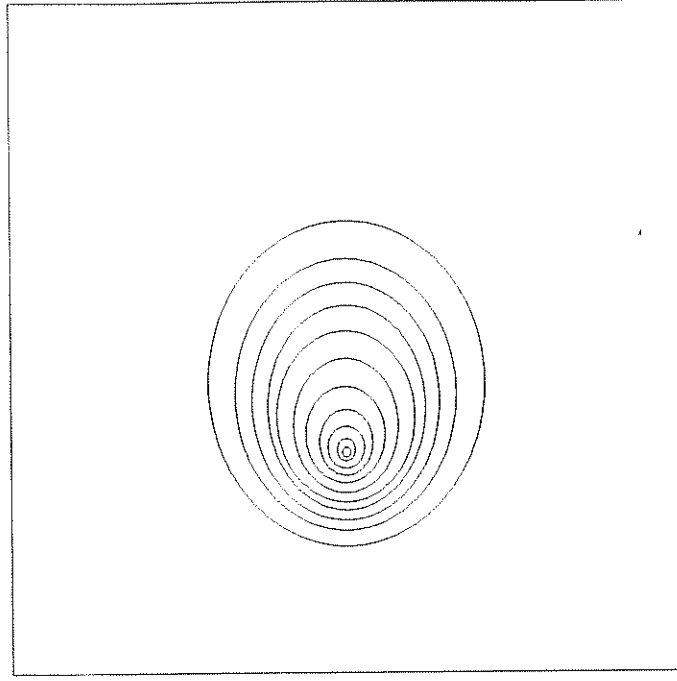
Düşey eddy akışkanlık katsayısı iki denklemlili $k-\epsilon$ türbülans modeli, yatay eddy akışkanlık katsayısı ise Smagorinsky cebirsel alt-çözüm ağı ölçekli türbülans modeli ile

hesaplanmıştır. Yatay hareketin uzunluk ölçekleri düşey hareketten daha büyük olduğunda, yatay eddy akışkanlık katsayıları, yerel isotropi yaklaşımına dayanan k- ϵ modeli tarafından daha düşük olarak hesaplanmakta, Smagorinsky cebirsel alt-çözüm ağı ölçekli türbülans modeli ise, yatay kesme kuvveti tarafından oluşturulan büyük ölçekli türbülansı daha iyi benzeştirmektedir (Balas, 1998). Yatay düzlemdeki eddy akışkanlık katsayıları, kirletici taşınımında büyük önem kazanmaktadırlar.

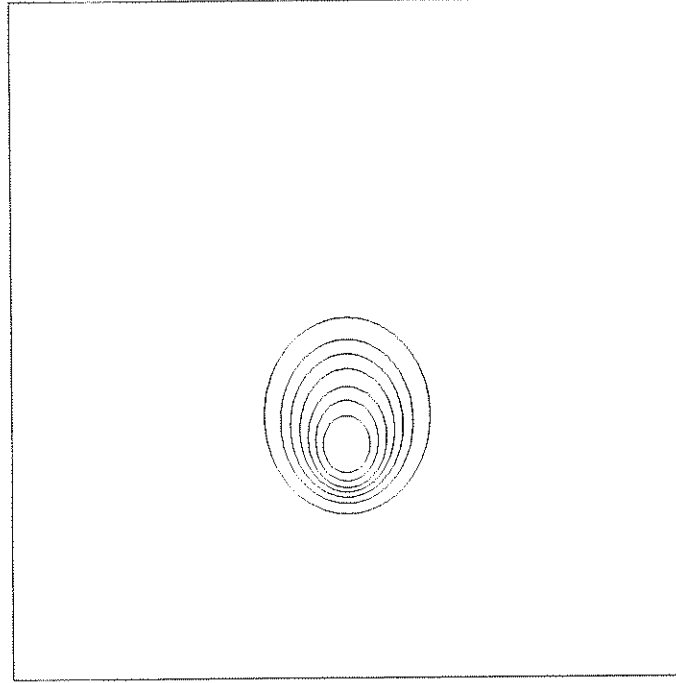


Çizim 5.6 Kirletici boşaltım noktası ve kirletici dağılımı çözüm ağı

Kirleticinin dağılımında gelgit kuvvetiyle oluşan akıntıların etkisini incelemek amacıyla, denize boşaltımın, gelgit devinimiyle birlikte başladığı ($t=0$) düşünülmüştür. Su yüzeyi ve tabanında oluşan kirletici dağılımları, su düzeyinin alçak düzeyden yüksek düzeye değişmesi sırasında her saat için, Çizim (5.7-5.11)'de gösterilmektedir. Su yüzeyindeki eş yoğunluk eğrileri içten dışa doğru: 900000, 300000, 100000, 50000, 25000, 10000, 5000, 2500, 1000, 500, 250, 10 bakteri/ml; su tabanındaki eş yoğunluk eğrileri içten dışa doğru: 10000, 5000, 2500, 1000, 500, 250, 10 bakteri/ml'dir. Yüzeyde boşaltılan kirleticinin derişikliği tabanda yaklaşık on kat azalmaktadır. Kirleticinin yüzeyde ve tabandaki yayılımın yanısıra akıntı etkisiyle akıntı yönünde taşındığı da görülmektedir. Yüksek su düzeyine ulaşıldığında ($t=6$ saat), kirletici dağılımı denge durumuna erişmektedir.

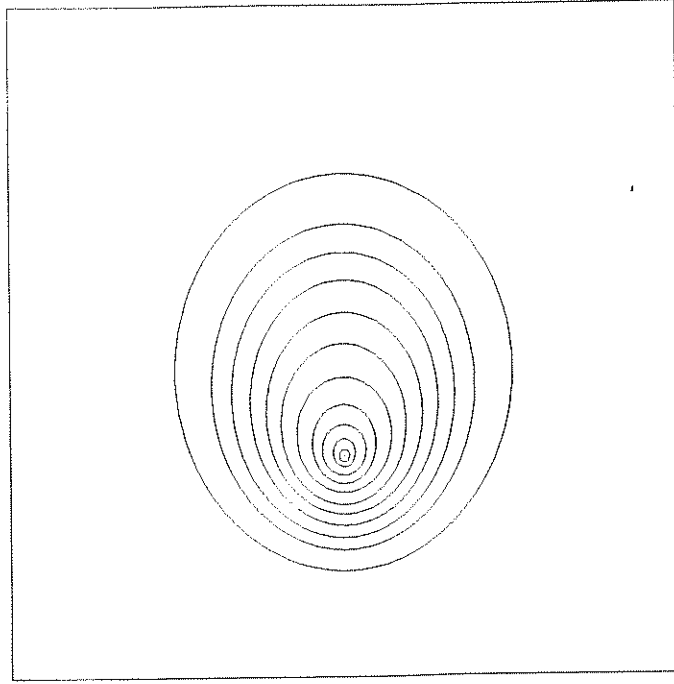


(a)

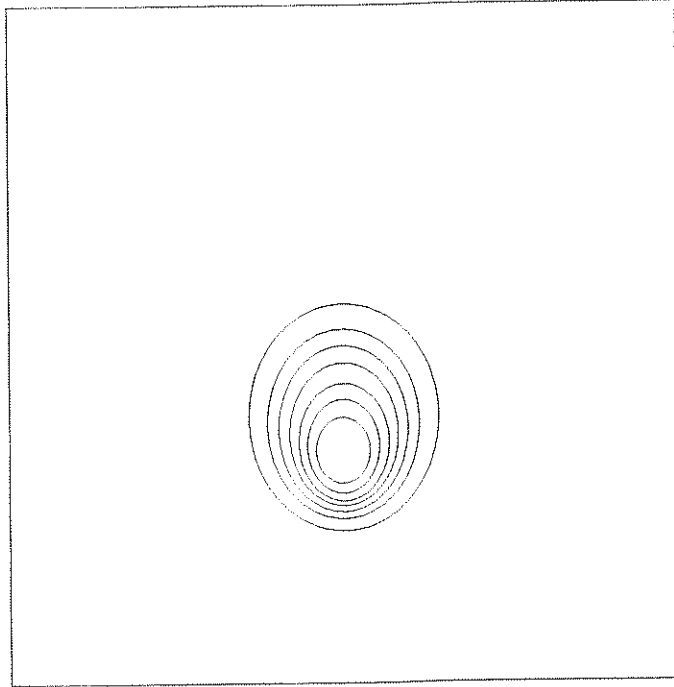


(b)

Çizim 5.7 Gelgit devinimin başlangıcından 1 saat sonraki kirletici madde dağılımı
a) su yüzeyinde, b) su tabanında



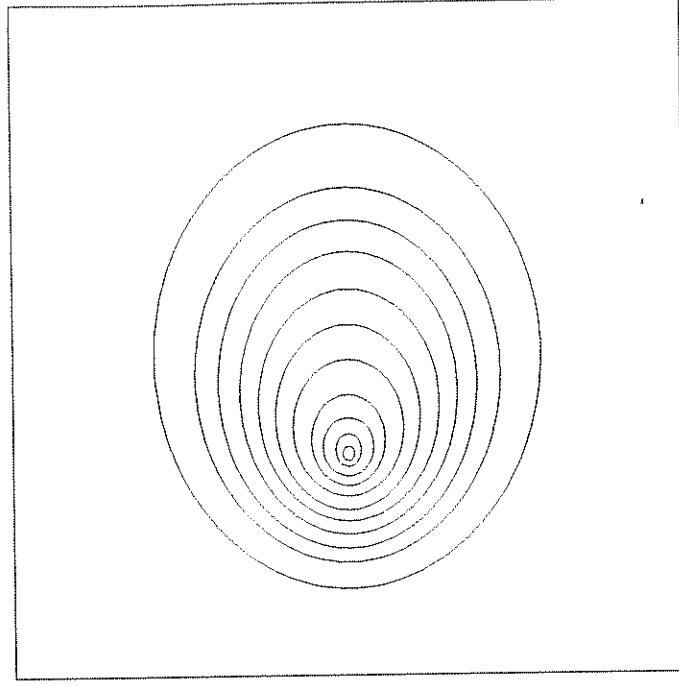
(a)



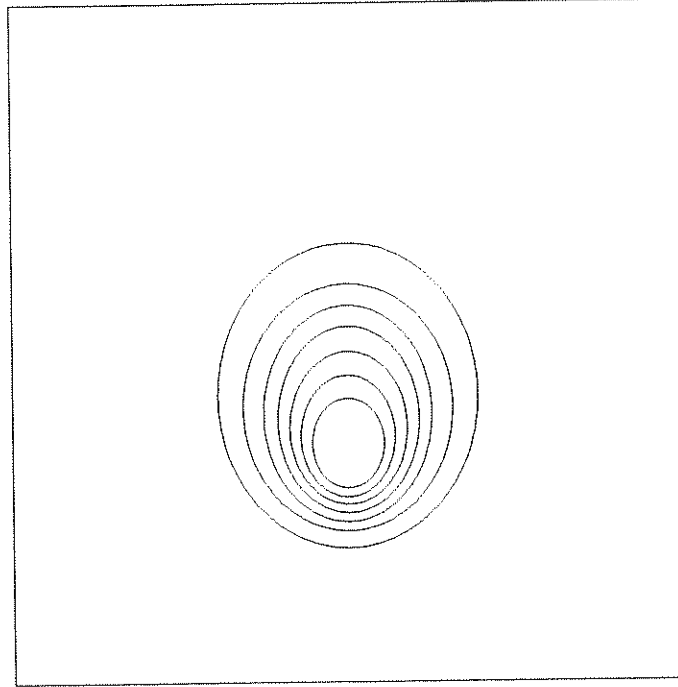
(b)

Çizim 5.8 Gelgit devrinin başlangıcından 2 saat sonraki kirletici madde dağılımı

a) su yüzeyinde, b) su tabanında

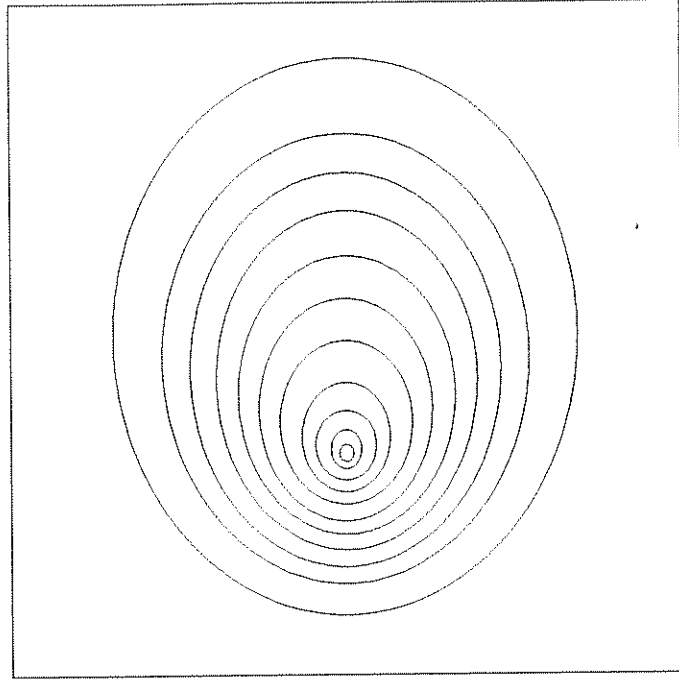


(a)

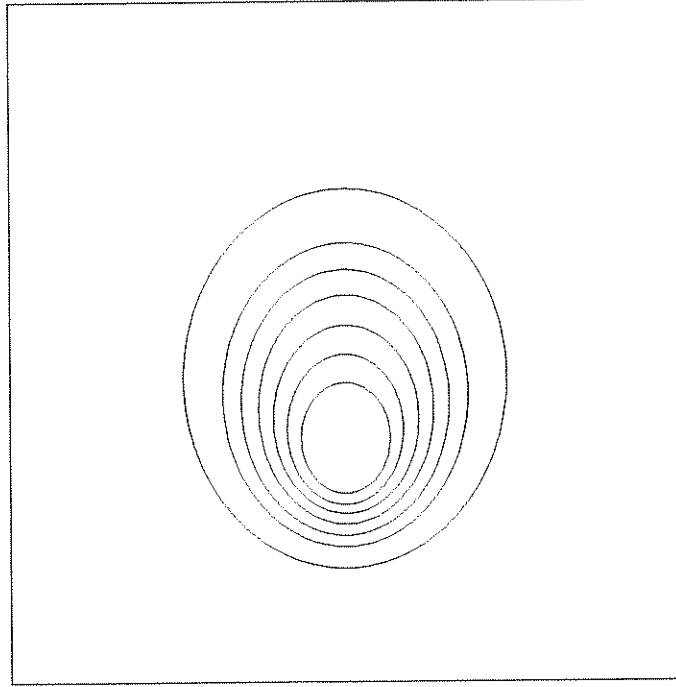


(b)

Çizim 5.9 Gelgit devinimin başlangıcından 3 saat sonraki kirletici madde dağılımı
a) su yüzeyinde, b) su tabanında



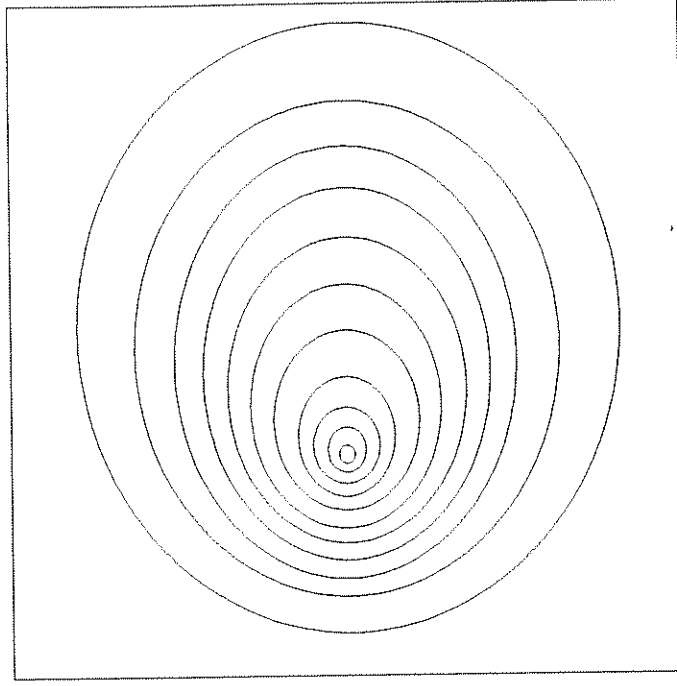
(a)



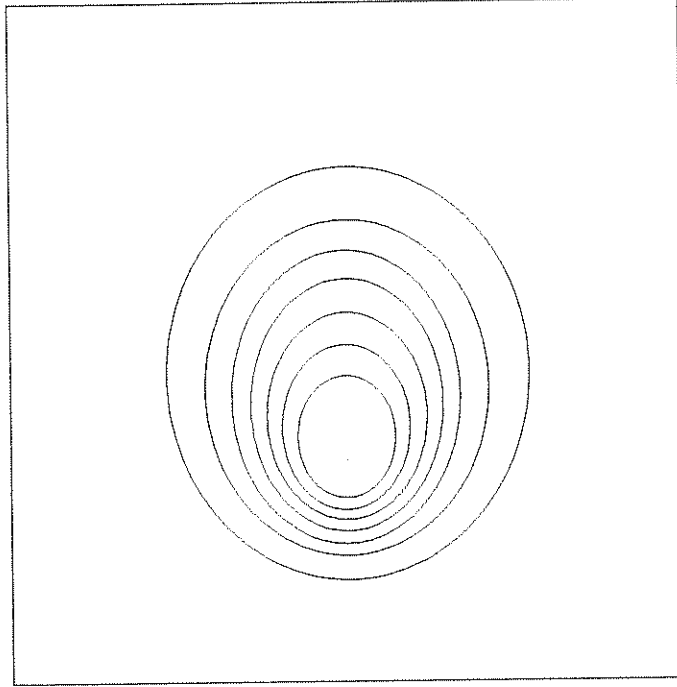
(b)

Çizim 5.10 Gelgit deviniminin başlangıcından 4 saat sonraki kirletici madde dağılımı

a) su yüzeyinde, b) su tabanında



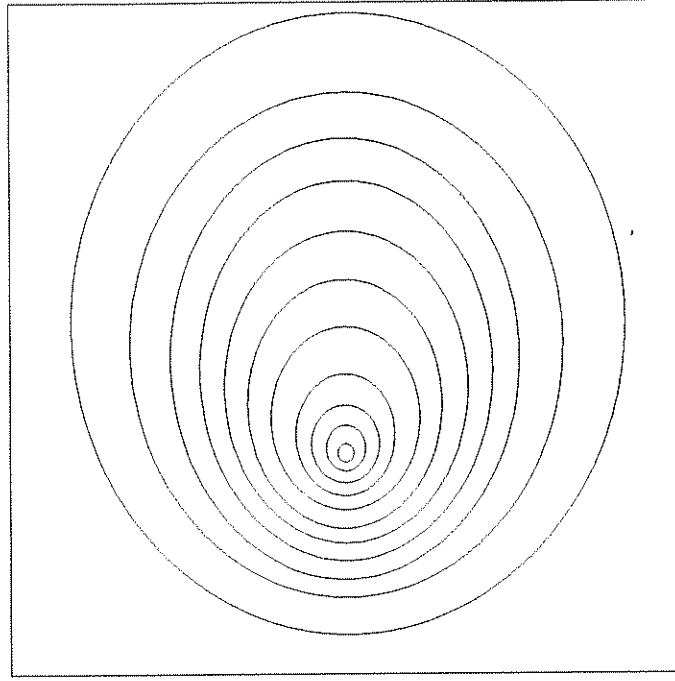
(a)



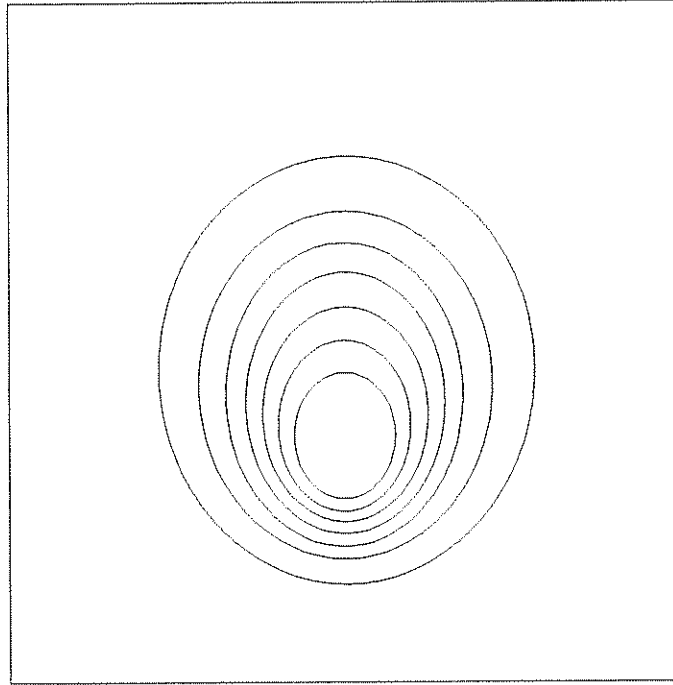
(b)

Çizim 5.11 Gelgit devriminin başlangıcından 5 saat sonraki kirletici madde dağılımı

a) su yüzeyinde, b) su tabanında



(a)



(b)

Çizim 5.12 Gelgit devinimin başlangıcından 6 saat sonraki kirletici madde dağılımı

a) su yüzeyinde, b) su tabanında

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER

1. Kıyusal su alanlarındaki taşınım olaylarının benzeşimi için geliştirilen üç boyutlu matematiksel model, lagünlere uyarlanmıştır. Model, rüzgar, gelgit ve yoğunluk değişimi etkisiyle oluşan kıyusal akıntıları, su düzeyi değişimlerini, su sıcaklığı ve tuzluluğunun dağılımlarını ve deniz suyuna karışan bir kirleticinin zamansal ve yersel derişimlerini hesaplamaktadır. Geliştirilen matematiksel model sonuçları, bilimsel kaynaklarda yayınlanan analitik ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak gerçekleştirilmiş ve başarıyla Türkiye'deki çeşitli kıyusal sulara uygulanmıştır (Balas, 1998).

2. Model, hidrodinamik, taşınım ve türbülans alt modellerinden oluşmaktadır. Hidrodinamik alt modelinde, düşey yöndeki su taneciklerinin ivmesinin önemsiz olduğu ve Bousinessq yaklaşımının geçerliliği varsayılarak, Navier-Stokes eşitlikleri çözülmektedir. Yoğunluk değişim kuvvetleri, hidrostatik basınç dağılımı ve basıncın yatay düzlemdeki değişimi ile momentum denklemlerinde yer almaktadır.

3. Taşınım alt modelinde, su sıcaklığı ve tuzluluğunun taşınımı, deniz suyuna karışan bir kirleticinin zamansal ve yersel derişimleri benzeştirilmektedir. Bu alt modelde, su sıcaklığı, tuzluluğu ve kirletici taşınımları için, üç boyutlu ilerlemeli yayılma denklemleri çözülmektedir.

4. Türbülans alt modelinde, türbülans kinetik enerjisi ve kinetik enerjinin sönümlenme hızı, iki eşitlikli $k-\epsilon$ türbülans modeli kullanılarak hesaplanmaktadır. Geliştirilen türbülans modeli, rüzgar, gelgit ve yoğunluk değişimi etkisiyle oluşan kıyusal akıntıların benzeşiminde başarı ile uygulanmıştır (Balas, 1998).

5. Standart bir $k-\epsilon$ türbülans modeli, yatay ve düşey eddy akışkanlık katsayılarının eşit olduğunu, başka bir deyişle türbülansla yerel isotropi durumunu kabul eder. Ancak, lagünler gibi, yatay hareketin uzunluk ölçeğinin düşey hareketten daha büyük olduğu alanlarda, yatay eddy akışkanlığı bu model tarafından daha düşük olarak hesaplanmaktadır. Bu durumda, büyük ölçekli türbülansın parametresi olan yatay eddy akışkanlığı katsayısı, Smagorinsky cebirsel alt-çözüm ağı ölçekli türbülans modeli ile daha doğru olarak benzeştirilmektedir (Balas, 1998).

6. Sayısal çözüm metodu olarak sonlu farklar-sonlu elemanlar yöntemleri kullanılmıştır. Temel denklemler kartezyen koordinat sisteminde yazılmış ve düşeyde Galerkin Ağırlıklı Kalan Yöntemi, yatayda da Sonlu Farklar Metodu kullanılarak çözülmüştür. Su derinliği, taban topografyasını izleyecek şekilde eşit sayıda çözüm ağına bölünmüştür. Derinlik izlemeli koordinat sisteminde, çözüm ağı katman kalınlıklarının toplam derinliğe oranı sabit alınmıştır. Düşeyde, çözüm ağı kümeleşmesi uygulanarak çözünürlük artırılabilir. Çözüm ağı kümeleşmesi ile, tabandaki, yüzeydeki ya da istenen bir düzeydeki ağ noktaları yoğunlaştırılabilir (Balas, 1998).

7. Modelde, birbirine dik olmayan bir çözüm ağı sistemi kullanıldığından, herbir çözüm ağı elemanının uzunluğu su derinliğine bağlı olarak çözüm ağı noktalarında farklılık göstermektedir. Bu nedenle, kullanılan interpolasyon fonksiyonları yatay eğim terimleri içerirler. İntegral alma aşamasında, fonksiyonların tüm yatay eğim terimleri, temel fonksiyonların yatay değişimleri göz önüne alınarak düzeltilmektedir. Terimlerin sonlu farklar yaklaşımlarında, yatay düzlemde değişik büyüklükte çözüm ağı uzunlukları seçilebilmektedir. Kıyı sistemlerinde, özellikle de sığ lagünlerde, kara sınırına yakın bölgelerdeki su alanlarının kurumasına ya da kara alanlarının suyla kaplanmasına neden olan mevsimsel su hacimi değişimleri görülebilir. Modelde, kıyı çizgisi sınır koşulu, kuruma ve su altında kalma süreçlerini benzeştirebilecek şekilde hareketli tanımlanabilmektedir. Sayısal çözümdeki dinamik denge, ikinci dereceden doğruluğa sahip Crank-Nicholson Metodu'yla sağlanmaktadır.

8. Model Ölüdeniz'e başarıyla uygulanmıştır. Rüzgar kuvveti ve gelgit deviniminin önemli akıntılar oluşturabileceği, yoğunluk değişimlerinin neden olacağı akıntıların ise daha güçsüz oldukları görülmüştür. Gelgit kuvveti periyodik olarak sürekli bir etkidir. Ölüdeniz Lagünü'nün denize tek bir kanalla bağlanması ve bu kanalının uzun ve dar yapısı nedeniyle, gelgit akıntı hızları bağlantı kanalında önemli ölçüde sönümlenmektedirler. Buna rağmen, gelgit hareketleri özellikle lagün girişi etrafında önemli akıntılar oluşturmaktadır. Rüzgar kuvveti ise, bölgesel olduğundan lagünü doğrudan etkilemektedir. Ancak, zaman içinde rüzgarın hızının ve yönünün değişkenliği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu yüzden, çevrıntilerin oluşumunda, lagünün giriş bölgesinde gelgit devinimi baskınken, iç kesimlerde rüzgar kuvvetinin etkili olabileceği düşünülebilir. Rüzgar etkenli çevrıntiler, rüzgarın esiş yönünde su yüzeyinde bir çekilme oluştururken, lagün tabanında ters yönlü bir akıntı meydana getirmektedirler. Gelgit devinimi etkisiyle oluşan akıntılar ise derinlik boyunca aynı yöndedirler.

9. Yapılan alan ölçümleri, Ölüdeniz Lagünü'nün hidrodinamik özelliklerinin belirlenmesi için ön çalışmalar niteliğindedir. Model sonuçlarının karşılaştırılabileceği kapsamlı alan ölçümlerine gereksinim vardır. Ölüdeniz Lagünü ve Belceğiz Körfezi'nde yapılacak uzun süreli akıntı, su seviyesi değişimi, rüzgar, su tuzluluğu ve sıcaklığı ölçümleri başka bir proje olarak önerilebilir.

10. Kıyısız su alanlarındaki su akımını ve kirletici dağılımını benzeştirmek amacıyla geliştirilen bu üç boyutlu sayısal model, güçlü bir tasarım ve tahmin aracı olarak Karar Destek ve Erken Uyarı Sistemleri'nde kullanılabilir. Ayrıca modelden limanlardaki, rüzgar, gelgit, kırılan dalgalarla oluşan akıntıların neden olduğu su girişi ve benzeri etkilerle oluşan doğal su değişiminin hesaplanması; ya da örneğin şaft tipi bir dolu savakla suyun zorla değişimin sağlanmasıyla oluşan akıntıların benzeştirilmesi gibi çok çeşitli Kıyı Mühendisliği uygulamalarında da etkin olarak faydalanılabilir.

YARARLANILAN KAYNAKLAR

Balas (Hapoğlu) L., *Three Dimensional Numerical Modelling of Transport Processes in Coastal Water Bodies*, (Doktora Tezi), Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (1998).

Balas (Hapoğlu) L., Özhan E., *Three Dimensional Modelling of Transport Processes in Stratified Coastal Waters*, *Proceedings of International Conference on Hydroinformatics*, International Association of Hydraulic Research, Copenhagen, Danimarka, (1998), baskıda.

Balas (Hapoğlu) L., Özhan E., Öztürk C., *Three Dimensional Modelling of Hydrodynamic and Transport Processes in Ölüdeniz Lagoon*, *Proceedings of the Third International Conference on the Mediterranean Coastal Environment, MEDCOAST'97*, Qawra, Malta, Cilt 1-2, Editör: E. Özhan, MEDCOAST Sekreteryası, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye, Cilt 2, (1997), s. 1097-1109.

Balas (Hapoğlu) L., Özhan E., *Kıyı Sularının Taşınım Süreçlerinin Üç Boyutlu Matematiksel Modellenmesi*, *Türkiye Kıyıları '97, Türkiye'nin Kıyı ve Deniz Alanları Birinci Ulusal Konferansı*, Editör: E. Özhan, Kıyı Alanları Yönetimi (KAY) Türkiye Milli Komitesi Sekreteryası, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye, (1997a), s.659-669.

Balas (Hapoğlu) L., Özhan E., *A Comprehensive Mathematical Model for Coastal Water Pollution Studies*, *Proceedings of International Conference on Water Problems in the Mediterranean Countries*, Yakın Doğu Üniversitesi, Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti, (1997b), Baskıda.

Balas (Hapoğlu) L., Özhan E., *Three Dimensional Modelling of Transport Processes in Gökusu Lagoon System*, *Proceedings of the Second International Conference on the Mediterranean Coastal Environment, MEDCOAST'95*, Tarragona, İspanya, Cilt 1-3, Editör: E. Özhan, MEDCOAST Sekreteryası, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye, Cilt 3, (1995a), s. 1661-1672.

Balas (Hapoğlu) L., Özhan E., Three Dimensional Hydrodynamic Modelling and Pollutant Transport in Coastal Areas, *The Third Workshop on Coastal Engineering*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, (1995b), s. 73-84.

Bloss S., Lehfeldt, R., Patterson, J.C., Modelling Turbulent Transport in Stratified Estuary, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Cilt 114, No.9, s. 1115-1133, (1988).

Blumberg A.F., Mellor L.G., A Description of a Three-Dimensional Coastal Ocean Circulation Model, *Three Dimensional Coastal Ocean Models*, Editör: N.S. Heaps, American Geophysical Union, Washington, ABD (1987) s. 1-16.

Boussinesq J., Essai Sur La Theorie Des Eaux Courantes, *Mem. Presentes Acad. Sci.*, Paris, Fransa, Cilt 23, s. 46, (1877).

Casulli V., Cheng R.T., Semi Implicit Finite Difference Methods for Three Dimensional Shallow Water Flow, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Cilt 15, s. 629-648, (1992).

Chapra S.C., Canale P.R., *Numerical Methods for Engineers*, İkinci Baskı, McGraw-Hill International Editions, New York, ABD, (1989)

Cheng R.T, Powell T.M., Dillon T.M., Numerical Models of Wind Driven Circulation in Lakes, *Applied Mathematical Modelling*, Cilt 1, s. 141-158, (1976).

Cheng R.T., Transient Three Dimensional Circulation of Lakes, *Journal of Engineering Mech. Div., ASCE*, Cilt 103 (1), s. 17-34, (1977).

Davies A.M., Owen A., Three Dimensional Numerical Sea Model Using the Galerkin Method with a Polynomial Basis Set, *Applied Mathematical Modelling*, Cilt 3, s. 421, (1979).

Davies A.M., Application of the Galerkin Method to the Formulation of a Three-Dimensional Nonlinear Hydrodynamic Numerical Sea Model, *Applied Mathematical Modelling*, Cilt 4, s. 245, (1980).

Davies A.M., On Computing the Three Dimensional Flow in a Stratified Sea Using the Galerkin Method, *Applied Mathematical Modelling*, Cilt 6, s. 347, (1982).

Davies A.M., Stephens C.V., Comparison of the Finite Difference and Galerkin Methods as Applied to the Solution of the Hydrodynamic Equations, *Applied Mathematical Modelling*, Cilt 7, s. 226-240, (1983).

Demuren A.O., Rodi W., Side Discharges into Open Channels: Mathematical Model, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Cilt 109, No.12, s. 1707-1722, (1983).

Falconer R.A., George D.G., Hall P., Three Dimensional Numerical Modelling of Wind Driven circulation in a Shallow Homogeneous Lake, *Journal of Hydrology*, Cilt 124, s. 59-79, (1991).

Gordon R.B., Spaulding M.L., Numerical Simulation of the Tidal and Wind Driven Circulation in Narragansett Bay, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Cilt 24, s. 611-636, (1987).

Hapoğlu L. *Three Dimensional Mathematical Modelling of Circulation and Pollution Transport in İzmir Bay*, (Yüksek Lisans Tezi), Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (1992).

Heaps N.S., Three Dimensional Numerical Model of the Irish Sea, *Journal of Geophysical Research*, Cilt 35, s. 99-120, (1973).

Hearn C.J., Hunter J.R., Heron, M.L., The Effects of a Deep Channel on the Wind Induced Flushing of a Shallow Bay or Harbor, *Journal of Geophysical Research*, Cilt 92, s.3913-3924, (1987).

Hsu S.A., Determination of Wind Stress (Drag) Coefficient for Coastal Waters under Variable Meteorological and Oceanographic Conditions, *20'th International Conference on Coastal Engineering*, Taipei, (1986), s. 286-292.

Huang W., Spaulding M., 3-D Model of Estuarine Circulation and Water Quality Induced by Surface Discharges, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Cilt 121, No.4., s. 300-311, (1995).

Huq P., Stretch D.D., Critical Dissipation Rates in Density Stratified Turbulence, *Physics of Fluids*, Cilt 7, No.5, s. 1034-1039, (1995).

Jamart B.M., Ozer J., Comparison of 2-D and 3-D models of the Steady Wind Driven Circulations in Shallow Waters, *Coastal Engineering*, Cilt 11, s. 393-413, (1987).

Jin X., Kranenburg C., Quasi-3D Numerical Modelling of Shallow water Circulation, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Cilt 119, No. 4, s. 458-473, (1993).

Kapdaşlı S., Maktav D., Yüksel Y., Mutlu T., Bayhan H., Lagün-Deniz Etkileşiminin Hidrodinamik Özelliklerinin ve Doğal Denge Karakteristiklerinin Belirlenmesi, Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK), Yer Deniz Atmosfer Bilimleri ve Çevre Araştırma Grubu (YDABÇAG-93), Ankara, (1996).

Kim C., Lee J., A Three Dimensional PC Based Hydrodynamic Model Using an ADI Scheme, *Coastal Engineering*, Cilt 23, s. 271-287, (1994).

Kjerfve B., Coastal Lagoons, *Coastal Lagoon Processes*, Bölüm 1, Editör: B. Kjerfve, Columbia, ABD, (1994), s. 1-8.

Kjerfve B., Comparative Oceanography of Coastal Lagoons, *Estuarine Variability*,
Editör: D.A. Wolfe, Academic Press, New York, ABD, (1986), s. 63-81.

Kjerfve B, Magill K.E., Geographic and Hydrographic Characteristics of Shallow
Coastal Lagoons, *Marine Geology*, Cilt 88, s. 187-199, (1989).

Kolmogorov A.N., Equations of Turbulent Motion of an Incompressible Fluid", *Izv.
Akad. Nauk. SSR, Seria Fizicheska VI*, No: 1-2, s. 56-58, (1942).

Koutitas C.G., O'Connor B., Modelling of Three-Dimensional Wind Induced Flows,
Journal of the Hydraulic Division, ASCE, s. 1843-1865, (1980).

Lardner R.W., Cekirge H.M., A New Algorithm for Three Dimensional Tidal and
Storm Surge Computations, *Appl. Math. Modelling*, Cilt 12, s. 471-481, (1988).

Large W.G., Pond S., Open Ocean Momentum Flux Measurements in Moderate to
Strong Winds, *Journal of Physical Oceanography*, Cilt 11, s. 324-336, (1981).

Lauder B.E., Spalding D.B., *Mathematical Models of Turbulence*, Academic Press,
Londra, (1972).

Lauder B.E., Spalding, D.B., The numerical computation of turbulent flows,
Computational Method in Applied Engineering, Cilt 3, s. 269-289, (1974).

Lauder B.E., Reece G.J., Rodi W., Progress in the Development of a Reynolds
Stress Turbulence Closure, *Journal of Fluid Mechanics*, Cilt 68, s. 537-566, (1975).

Li C.W., Falconer R.A., Depth Integrated Modelling of Tide Induced Circulation in
a Square Harbour, *Journal of Hydraulic Research*, Cilt 33, s. 321-332, (1994).

Lin B., Falconer R.A., Numerical Modelling of Three Dimensional Suspended Sediment for Estuarine and Coastal Waters, *Journal of Hydraulic Research*, Cilt 34, s. 435-455, (1996).

Mellor G., Yamada P., Development of a Turbulence-Closure Model for Geophysical Fluid Problems, *Reviews of Geophysics and Space Physics*, Cilt 20, No.4, s.851-875, (1982).

Mohammadi B., Pironneau O., *Analysis of the K-Epsilon Turbulence Model*, John Wiley and Sons, İngiltere, (1994).

More N.H., Slinn D.J., The Physical Hydrology of a Lagoon System on the Pacific Coast of Mexico, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Cilt 19, s. 413-426, (1984).

Oey L., Mellor G.L., Hires R.I., A three dimensional simulation of the Hudson Raritan Estuary, Part I: Description of the model and model simulations, *Journal of Physical Oceanography*, Cilt 15, s. 1676-1692, (1985).

Owen A., A Three Dimensional Model of the Bristol Channel, *Journal of Physical Oceanography*, Cilt 10, s. 1290-1302, (1980).

Ozner F.S, Erkal T, Güneysu A.C., Ölüdeniz (Fethiye) Lagünü'ndeki Siltasyonun Önlenmesine İlişkin Hidrojeomorfoloji Projesi, Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK), Yer Deniz Atmosfer Bilimleri ve Çevre Araştırma Grubu (YDABÇAG-187), Ankara, (1997).

Özhan, E., Hapoğlu L., 3-D Mathematical modelling of Current and Pollutant Transport in İzmir Bay, *Proceedings of the Second International Conference on Hydraulics and Environmental Modelling of Coastal, Estuarine and River Waters*, Bradford, İngiltere, (1992), Cilt 1, s. 381-396.

Phillips N.A., A Coordinate System Having Some Special Advantages for Numerical Forecasting, *Journal of Meteorology*, Cilt 14, s. 184-197, (1957).

Prandtl L., Über die Ausgebildete Turbulenz, *Nachr. Akad. Wiss.*, Göttingen, Cilt 5, s. 136, (1925).

Prandtl L., Über ein neues Formalsystem für die Ausgebildete Turbulenz, *Nachr. Akad. Wiss.*, Göttingen, Math.-Phys. Klasse, s. 6, (1945).

Raitby G.D., Elliott R.V., Hutchinson B.R., Prediction of Three Dimensional Thermal Discharge Flows, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Cilt 114, s. 720-737, (1988).

Rajar R., Three Dimensional Modelling of Currents in the Northern Adriatic, *XXIII. Congress of International Association for Hydraulic Research*, Ottawa, Kanada, (1989), s.335-342.

Riley J.P., Skirrow G., *Chemical Oceanography*, Cilt 1, Academic Press, New York, ABD, (1975).

Rodi W., Turbulence Models for Environmental Problems, *Prediction Methods for Turbulent Flows*, Editör: W. Kollmann, Von Karman Institute, U.S.A, (1980).

Rodi W., *Turbulence Models and Their Application in Hydraulics*, International Association for Hydraulic Research (IAHR) Series Publications, Üçüncü Baskı, (1994).

Sikora W.B., Kjerfve B., Factors Influencing the Salinity of Lake Pontchartrain, Louisiana, a Shallow Coastal Lagoon: Analysis of a Long-Term Data Set, *Estuaries*, Cilt 8 (2A), s. 170-180, (1985).

Smith N.P., Water, Salt and Heat Balance of Coastal Lagoons, *Coastal Lagoon Processes*, Bölüm 4, Editör: B. Kjerfve, Columbia, ABD, (1994), s. 69-101.

Stansby P.K., Semi Implicit Finite Volume Shallow Water Flow and Solute Transport Solver with k- ϵ Turbulence Model, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Cilt 25, s. 285-313, (1997).

Szymkiewicz R., A Mathematical Model of Storm Surge in the Vistula Lagoon of Poland, *Coastal Engineering*, Cilt 16, s. 181-203, (1992).

Verboom G.K., Ronde J.G., Van Dijk R.P., A Fine Grid Tidal Flow and Storm Surge Model of the North Sea, *Continental Shelf Research*, Cilt 12., No. 2/3, s. 213-233, (1992).

Wu J., Tsanis I.K., Pollutant Transport and Residence Time in a Distorted Scale Model and a Numerical Model, *Journal of Hydraulic Research*, Cilt 32, s. 583-598, (1994).

EK A

TABLO VE ÇİZİMLER

Tablo A.1 Fethiye Meteoroloji İstasyonu'ndan sağlanan rüzgar verilerine göre, rüzgar hızlarının oluşma sıklığı (frekans) dağılımı.

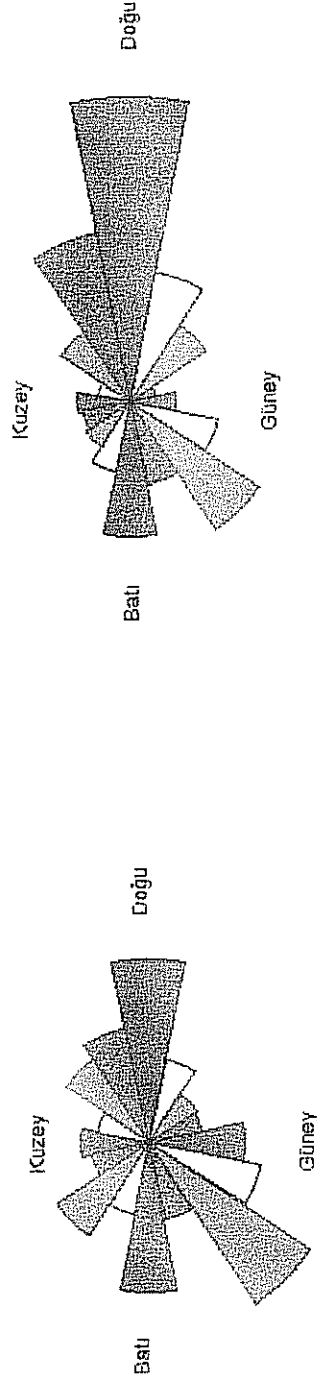
Hız Aralığı (m/sn)	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
Yön									
N	80	37	13	13	3	0	0	0	0
NNE	83	36	10	5	0	0	0	0	0
NE	165	58	10	10	3	2	2	0	0
ENE	221	88	43	29	30	16	13	3	0
E	446	105	16	30	60	36	33	11	7
ESE	265	105	7	3	5	0	3	3	0
SE	214	67	4	0	2	1	2	1	0
SSE	71	47	9	3	0	0	0	0	1
S	94	37	10	11	10	4	3	0	0
SSW	50	45	47	86	54	10	2	0	1
SW	56	65	132	183	46	6	0	0	0
WSW	34	93	100	62	15	1	0	0	0
W	45	111	134	95	31	7	3	0	0
WNW	56	84	80	38	7	1	0	0	0
NW	62	63	42	24	3	0	0	0	0
NNW	75	42	30	23	2	0	0	0	0

Tablo A.2 Dalaman Meteoroloji İstasyonu'ndan sağlanan rüzgar verilerine göre, rüzgar hızlarının oluşma sıklığı (frekans) dağılımı.

Hız Aralığı (m/sn)	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
Yön									
N	247	190	52	24	11	12	5	4	2
NNE	256	148	36	48	26	25	18	7	5
NE	395	235	7	72	54	20	19	15	2
ENE	121	62	9	7	0	1	0	0	0
E	35	19	3	4	1	0	0	0	0
ESE	24	14	3	1	0	0	0	0	0
SE	44	22	5	6	4	2	0	1	1
SSE	80	37	34	80	121	116	58	16	5
S	129	57	43	106	146	234	129	42	6
SSW	72	44	34	88	102	111	56	17	4
SW	65	18	12	12	12	15	8	5	1
WSW	59	26	1	16	19	19	14	5	5
W	75	37	6	4	1	5	4	0	0
WNW	77	37	16	12	13	9	11	9	5
NW	132	102	65	72	50	34	16	15	7
NNW	187	318	228	180	51	22	1		

Tablo A.3 Alan çalışmaları sırasında oluşan rüzgar hızlarının (m/sn) gün içindeki değişimi (Fethiye Meteoroloji İstasyonu).

Ölçüm Günü	07:00		14:00		21:00		Ortalama Hız
	Yön	Hız	Yön	Hız	Yön	Hız	
01.07	NNW	0.7	WSW	3.1	Durağan	0.0	1.3
02.07	E	0.7	WNW	2.9	N	0.2	1.3
03.07	E	5.5	SW	3.2	E	0.5	3.1
04.07	E	4.3	WNW	1.9	NNW	0.7	2.3
05.07	E	5.1	NNE	4.0	N	1.6	3.6
06.07	E	3.2	WSW	3.1	N	0.3	2.2
07.07	Durağan	0.0	W	3.4	NE	0.2	1.2
08.07	NNE	0.7	SW	3.1	SSW	0.8	1.5
09.07	NNE	0.3	SW	3.1	SW	0.7	1.4
10.07	Durağan	0.0	SSW	3.2	NNE	0.7	1.3
11.07	ENE	0.5	SW	3.2	W	0.5	1.4
12.07	Durağan	0.0	WSW	2.4	W	1.4	1.3
13.07	Durağan	0.0	WSW	3.2	NW	0.7	1.3
30.07	Durağan	0.0	WNW	2.4	N	0.8	1.1
31.07	NE	0.5	SSW	3.2	SE	0.7	1.5
01.08	ENE	0.8	SSW	3.2	NNE	1.2	1.7
02.08	ENE	0.5	WSW	3.6	Durağan	0.0	1.4
03.08	WSW	0.3	SW	2.7	Durağan	0.0	1.0
04.08	Durağan	0.0	SW	3.4	NE	0.3	1.2



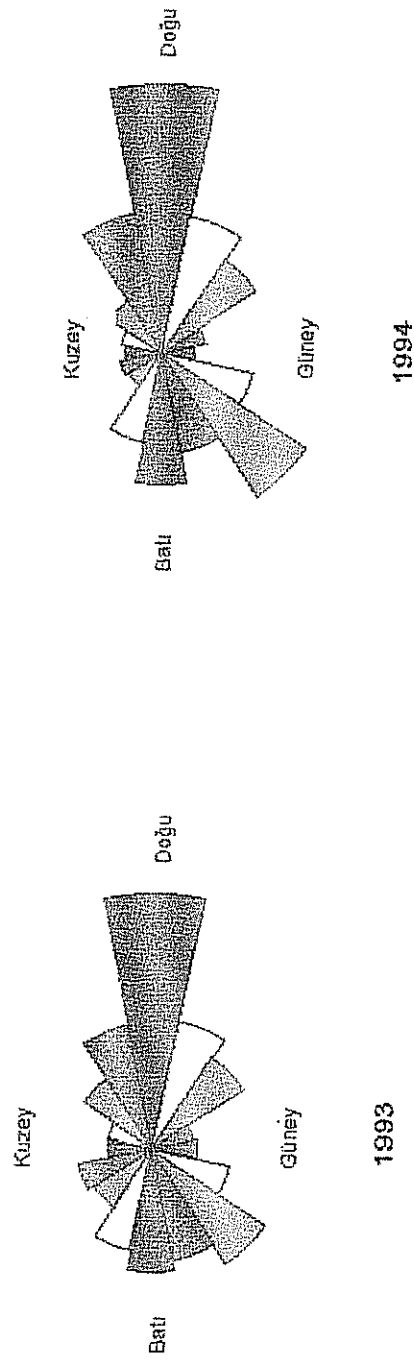
1992

1991

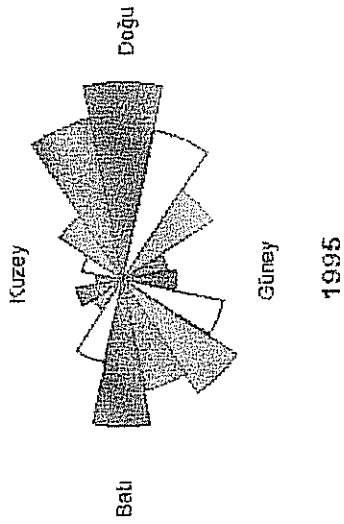
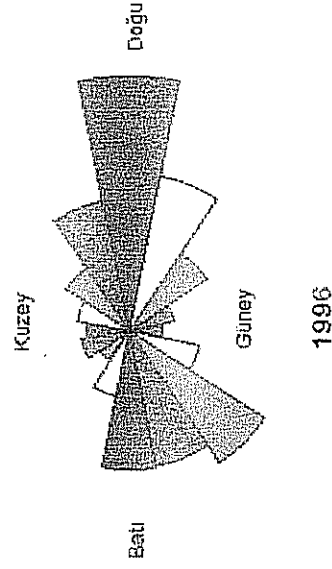
100

ÖLÇEK

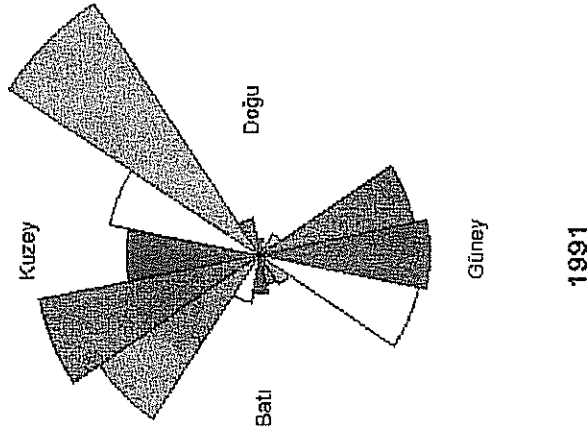
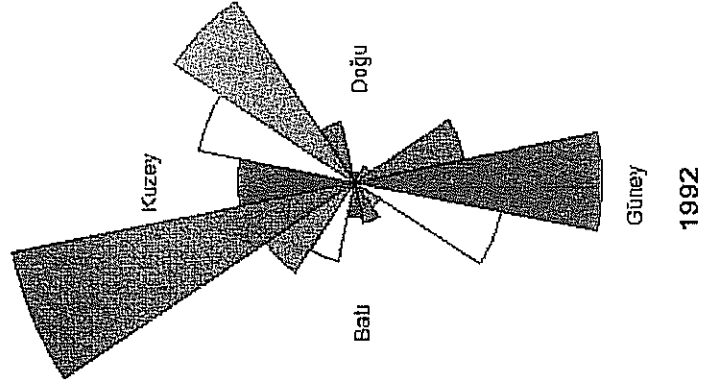
Çizim A.1a Rüzgar hızlarının 1991 ve 1992 yılları için yönlere göre dağılımları (Fethiye Meteoroloji İstasyonu)



Çizim A.1b Rüzgar hızlarının 1993 ve 1994 yılları için yönlere göre dağılımları (Fethiye Meteoroloji İstasyonu)

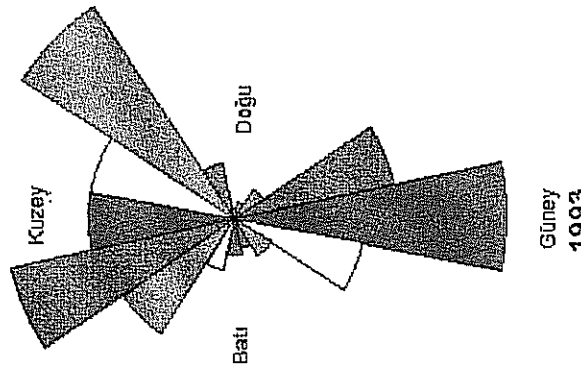
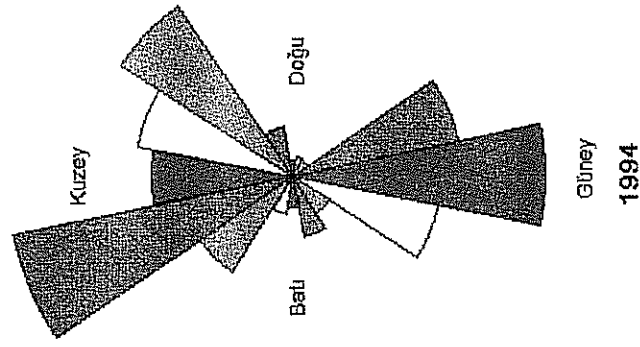


Çizim A.1c Rüzgar hızlarının 1995 ve 1996 yılları için yönlere göre dağılımları (Fethiye Meteoroloji İstasyonu)



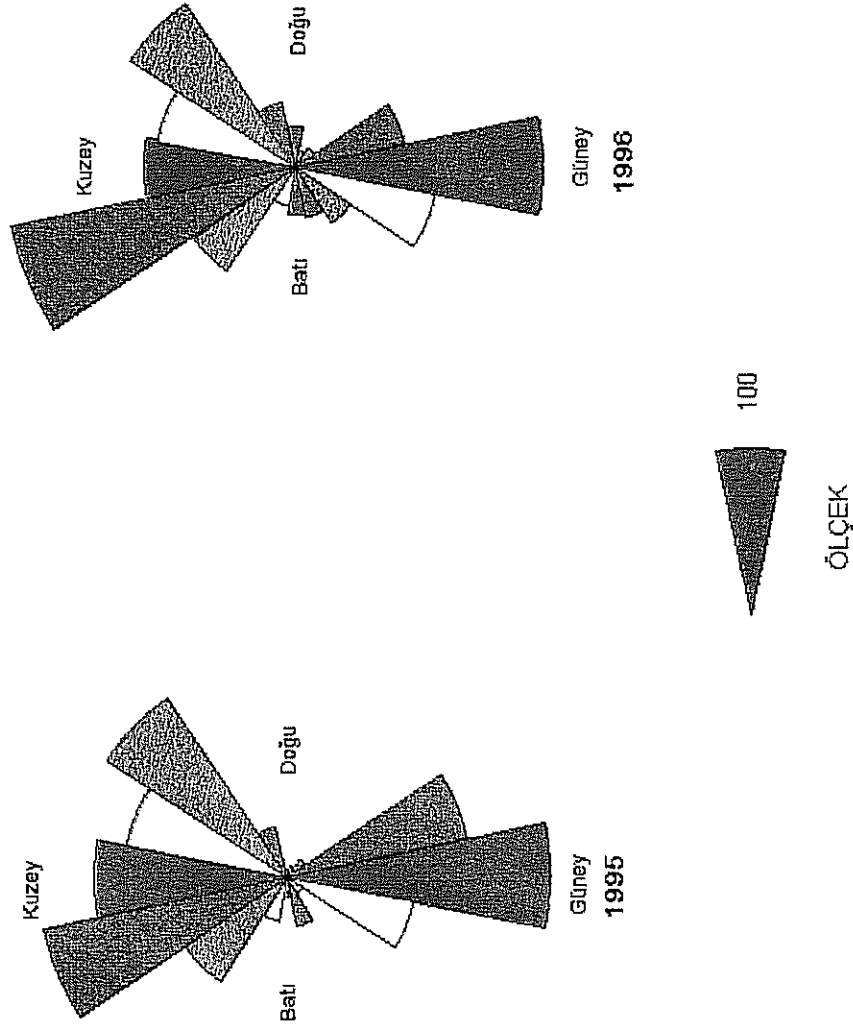
ÖLÇEK

Çizim A.2a Rüzgar hızlarının 1991 ve 1992 yılları için yönlere göre dağılımları (Dalaman Meteoroloji İstasyonu)

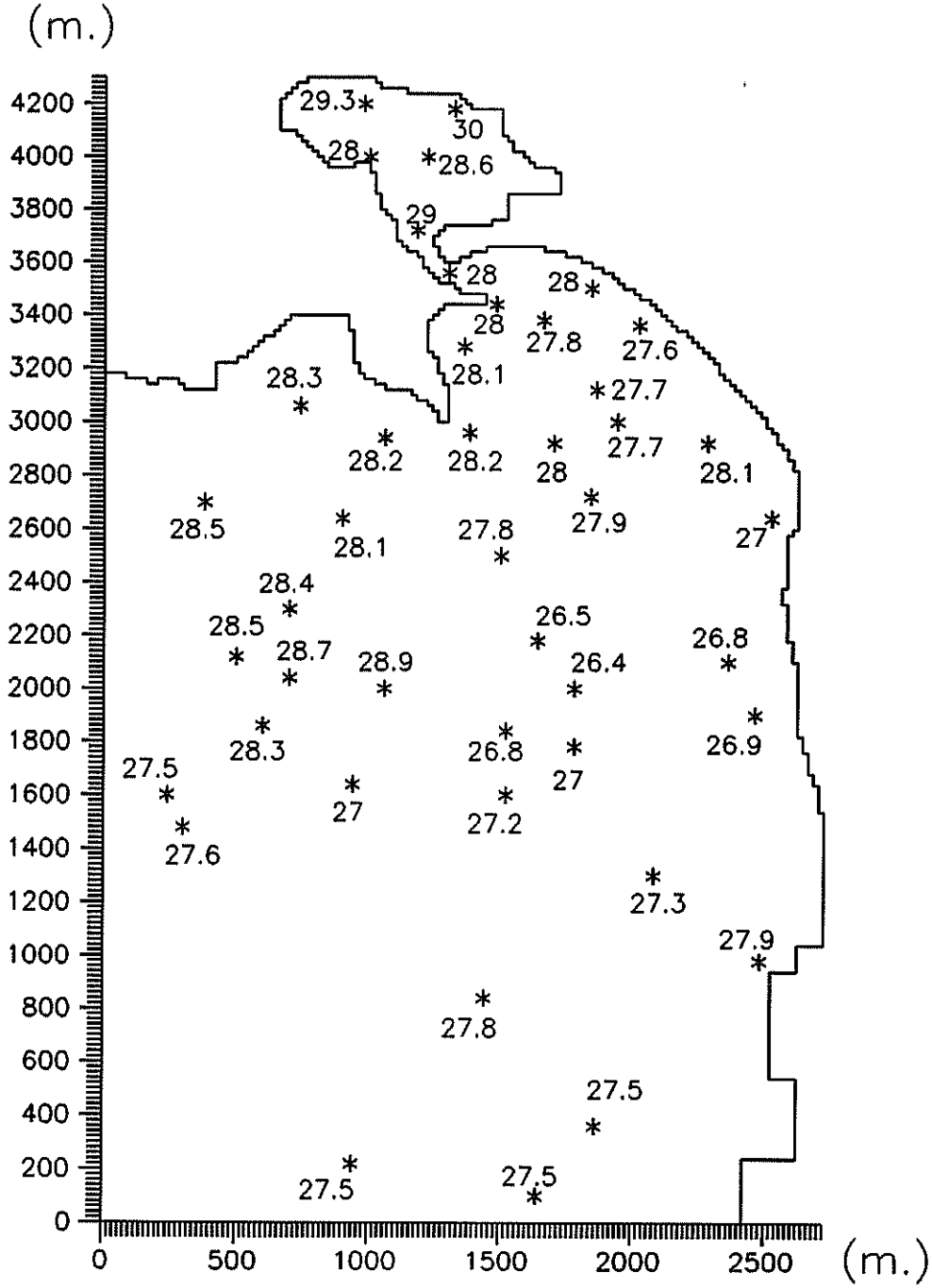


ÖLÇEK

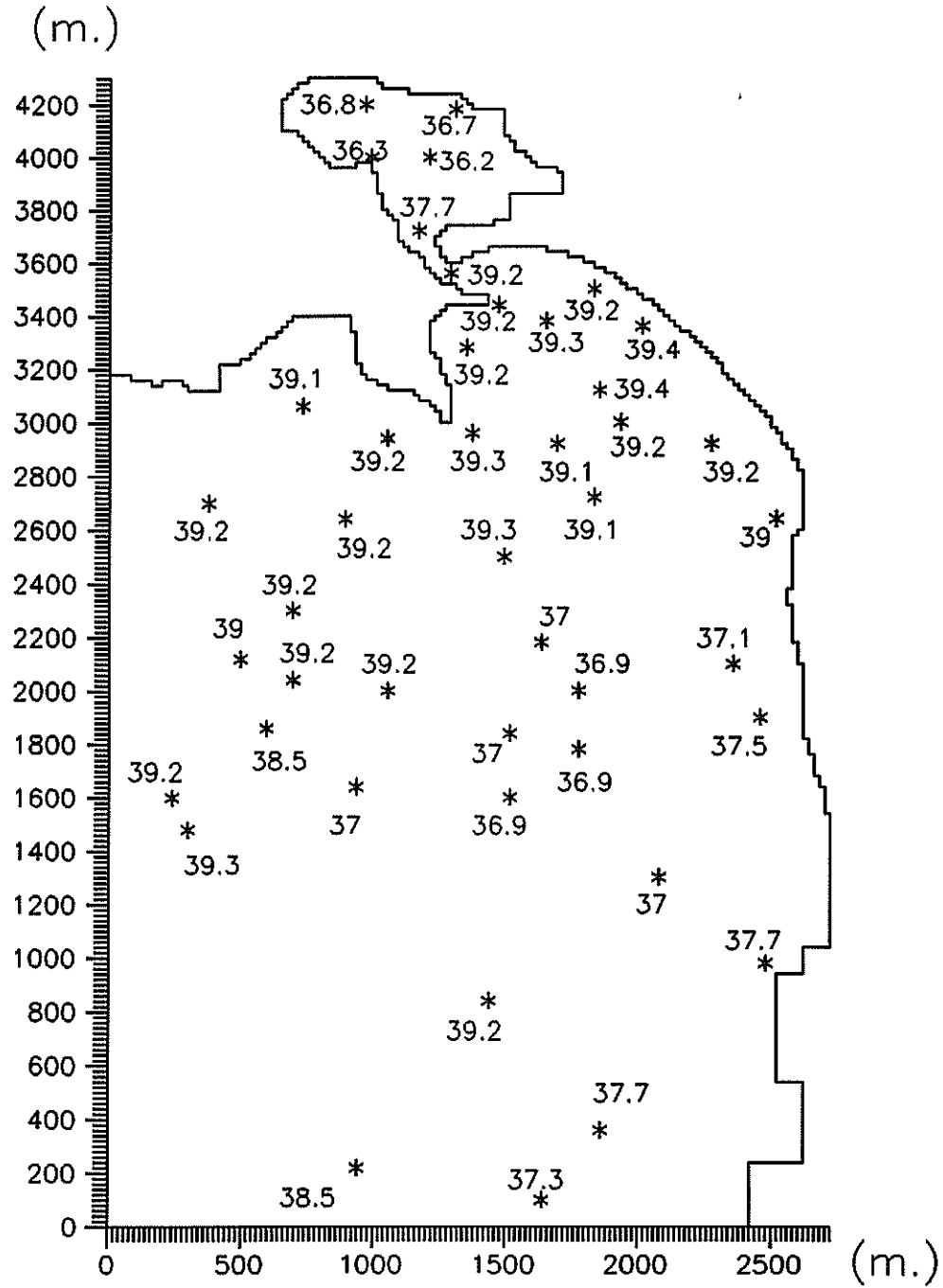
Çizim A.2b Rüzgar hızlarının 1993 ve 1994 yılları için yönlere göre dağılımları (Dalaman Meteoroloji İstasyonu)



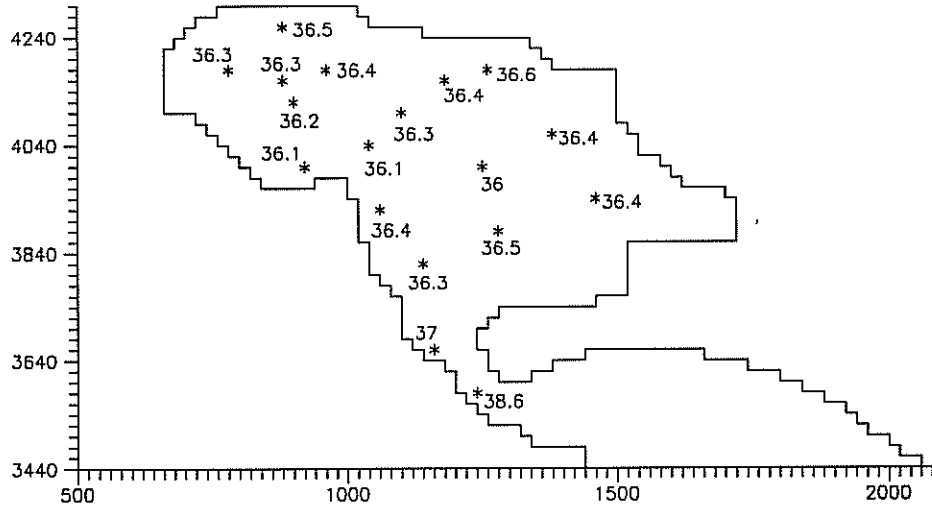
Çizim A.2c Rüzgar hızlarının 1995 ve 1996 yılları için yönlere göre dağılımları (Dalaman Meteoroloji İstasyonu)



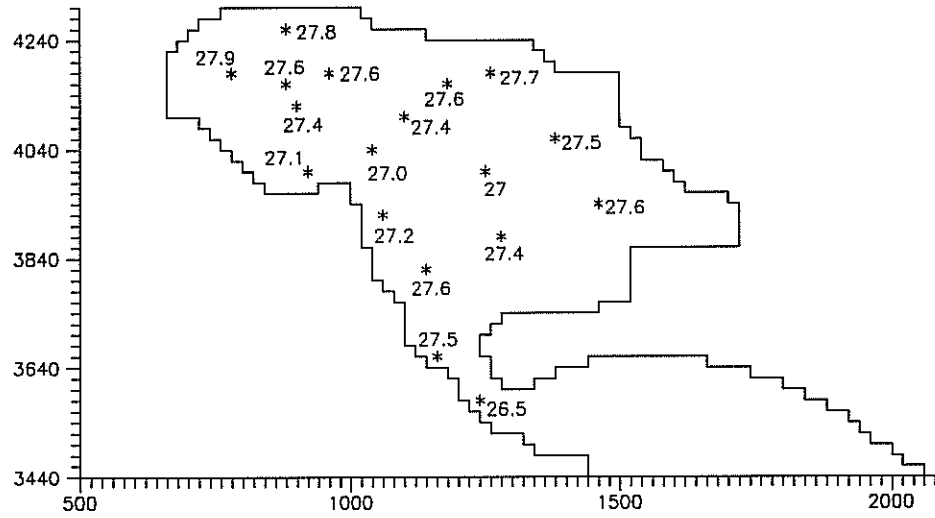
Çizim A.3 Yüzeyde ölçülen su sıcaklıkları ve ölçüm noktaları
(30.07-4.08 1997 tarihleri arası yapılan ölçümler)



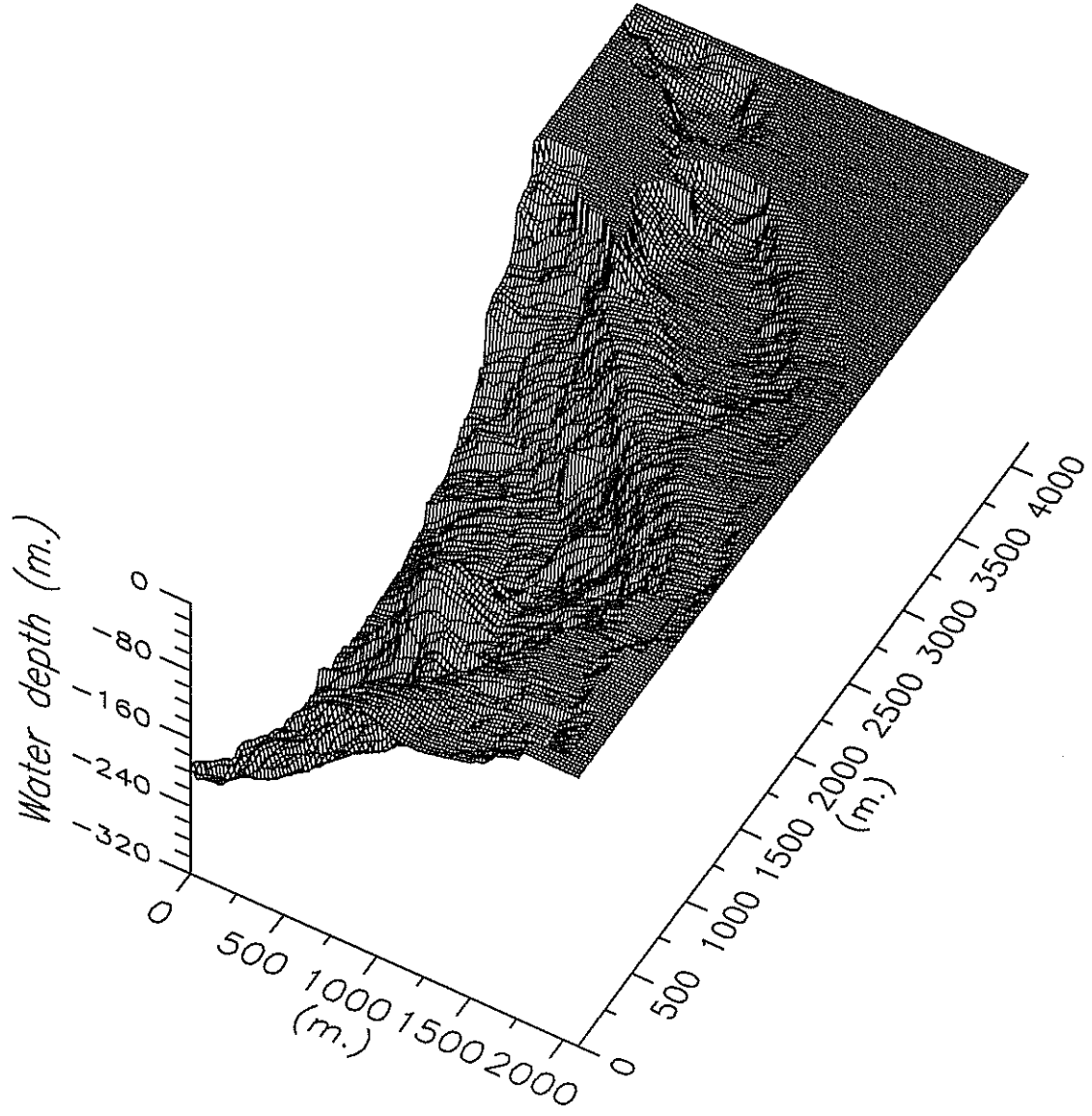
Çizim A.4 Yüzeyde ölçülen su tuzlulukları ve ölçüm noktaları
(30.07-4.08 1997 tarihleri arası yapılan ölçümler)



Çizim A.5 Yüzeyde ölçülen su tuzlulukları ve ölçüm noktaları
(16.09-20.09 1997 tarihlerinde yapılan ölçümler)



Çizim A.6 Yüzeyde ölçülen su sıcaklıkları ve ölçüm noktaları
(16.09-20.09 1997 tarihlerinde yapılan ölçümler)



Çizim A.7 Ölüdeniz Lagünü su derinlikleri (m.)

BİBLİYOGRAFİK BİLGİ FORMU	
1- Proje No: İNTAG 821	2- Rapor Tarihi: Mart 1998
3- Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 1 Ekim 1996-30 Eylül 1997	
4- Projenin Adı: Kıyı Lagünlerinin Hidrodinamiğinin, Tuzluluk ve Su Sıcaklığı Dağılımlarının ve Kirlenmesinin Üç Boyutlu Matematiksel Modellenmesi	
5- Proje Yürütücüsü ve Yardımcı Araştırmacılar: Prof.Dr. Erdal Özhan (Proje Yürütücüsü) Dr. Lale Balas (Yardımcı Araştırmacı) Dr. Can E. Balas (Yardımcı Araştırmacı)	
6- Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kıyı ve Liman Mühendisliği Laboratuvarı, 06531 Ankara	
7- Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi:	
8- Öz (Abstract): Lagün, haliç, göl yada körfez gibi, yüzey alanına oranla ortalama su derinliğinin az olduğu kıyısız su sistemlerinde, rüzgar, gel-git ve yoğunluk değişimleri nedeniyle oluşan akıntıları belirleyebilmek için üç boyutlu matematiksel modellerin kullanılması gereklidir. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kıyı Mühendisliği Laboratuvarı'nda, rüzgar, gelgit ve yoğunluk değişimi etkisiyle oluşan kıyısız akıntıları, su düzeyi değişimlerini, su sıcaklığı ve tuzluluğunun dağılımlarını ve deniz suyuna karışan bir kirlenmenin zamansal ve yersel derişimlerini hesaplayan bir matematiksel model geliştirilmiştir. Modelde, düşey yönde su taneciklerinin yvmesinin önemsiz olduğu varsayımıyla üç boyutlu Navier-Stokes denklemleri çözülmektedir. Su yoğunluğunu belirleyen, su sıcaklığı ve tuzluluğunun alansal ve zamansal değişimi, üç boyutlu taşınım-yayınım denklemleri çözülerek hesaplanmaktadır. Türbülans kinetik enerjisi ve kinetik enerjinin sönmülenme hızının benzeştirilmesinde, iki eşitlikli k-ε türbülans modeli kullanılmaktadır. Sayısal çözüm yöntemi olarak yatay düzlemde sonlu farklar, düşeyde ise sonlu elemanlar uygulanmıştır. Kara sınırları değişebilir gözetilebilmekte ve yatay düzlemde değişik büyüklükte çözüm ağı uzunlukları seçilebilmektedir. Düşeyde, çözüm ağı kümeleşmesi uygulanarak çözünürlük istenilen düzeylerde artırılabilir. Bilimsel kaynaklarda yayınlanan analitik ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak gerçekleştirilen üç boyutlu matematiksel hidrodinamik model öncelikle, denizle bağlantılı bir göl niteliğiyle, hidrodinamik ve kirlenme açılarından özel önemi bulunan lagünlere uygulanmıştır. Lagün içerisindeki su hareketleri ve düzey değişimleri, denizle su alışveriş mekanizması, lagün sularının sıcaklık ve tuzluluk dağılımları ve kirlenme derişikliklerinin zamansal ve alansal değişimleri geliştirilen üç boyutlu matematiksel model kullanılarak hesaplanmıştır. Matematiksel model, lagün ortamında kullanılmaya uygun duruma getirildikten sonra, topografya ve batimetri, rüzgar iklimi ve benzeri konularda mevcut bilgiler toplanıp değerlendirilerek, Ölüdeniz Lagünü'ne uyarlanmıştır. Ölüdeniz Lagünü ve Belceğiz Körfezi'nde, Temmuz, Ağustos ve Eylül 1997 aylarında, ikişer hafta süreli alan ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu alan çalışmalarında, dip ve yüzey akıntıları, ve deniz suyunun tuzluluk ve sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Anahtar Kelimeler: Kıyı lagünleri, matematiksel modelleme, su alışverişi, kirlenme, akıntılar, gelgit, türbülans, Ölüdeniz.	
9- Proje ile ilgili Yayın/Tebliğlerle ilgili Bilgiler Balas E., Ozhan E., Ozturk C., Three Dimensional Modelling of Hydrodynamic and Transport Processes in Ölüdeniz Lagoon, <i>Proc. of MEDCOAST'97</i> , Malta, Cilt 2, (1997), s. 1097-1109. Balas E., Ozhan E., Three Dimensional Modelling of Transport Processes in Stratified Coastal Waters. <i>Proc. of Hydroinformatics'98</i> , Danimarka, (1998), Baskıda.	
10- Bilim Dalı: Doçentlik B. Dalı Kodu: ISIC Kodu: Uzmanlık Alanı Kodu:	
11- Dağıtım (*): <input type="checkbox"/> Sınırlı <input checked="" type="checkbox"/> Sınırsız	
12- Raporun Gizlilik Durumu: <input type="checkbox"/> Gizli <input checked="" type="checkbox"/> Gizli Değil	

(*) Projenizin Sonuç Raporunun ulaştırılmasını istediğiniz kurum ve kuruluşları ayrıca belirtiniz



BİBLİYOGRAFİK BİLGİ FORMU	
1- Proje No: İNTAG 821	2- Rapor Tarihi: Mart 1998
3- Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 1 Ekim 1996-30 Eylül 1997	
4- Projenin Adı: Kıyı Lagünlerinin Hidrodinamiğinin, Tuzluluk ve Su Sıcaklığı Dağılımlarının ve Kirlenmesinin Üç Boyutlu Matematiksel Modellenmesi	
5- Proje Yürütücüsü ve Yardımcı Araştırmacılar: Prof. Dr. Erdal Özhan (Proje Yürütücüsü) Dr. Lale Balas (Yardımcı Araştırmacı) Dr. Can E. Balas (Yardımcı Araştırmacı)	
6- Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kıyı ve Liman Mühendisliği Laboratuvarı, 06531 Ankara	
7- Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi:	
8- Öz (Abstract): Lagün, haliç, göl yada körfez gibi, yüzey alanına oranla ortalama su derinliğinin az olduğu kıyısız su sistemlerinde, rüzgar, gel-git ve yoğunluk değişimleri nedeniyle oluşan akıntıları belirleyebilmek için üç boyutlu matematiksel modellerin kullanılması gereklidir. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kıyı Mühendisliği Laboratuvarı'nda, rüzgar, gelgit ve yoğunluk değişimi etkisiyle oluşan kıyısız akıntıları, su düzeyi değişimlerini, su sıcaklığı ve tuzluluğunun dağılımlarını ve deniz suyuna karışan bir kirleticinin zamansal ve yersel derişimlerini hesaplayan bir matematiksel model geliştirilmiştir. Modelde, düşey yönde su taneciklerinin ivmesinin önemsiz olduğu varsayımıyla üç boyutlu Navier-Stokes denklemleri çözülmektedir. Su yoğunluğunu belirleyen, su sıcaklığı ve tuzluluğunun alansal ve zamansal değişimi, üç boyutlu taşınım-yayınım denklemleri çözülerek hesaplanmaktadır. Türbülans kinetik enerjisi ve kinetik enerjinin sönmülme hızının benzeştirilmesinde, iki eşitlikli k-ε türbülans modeli kullanılmaktadır. Sayısal çözüm yöntemi olarak yatay düzlemde sonlu farklar, düşeyde ise sonlu elemanlar uygulanmıştır. Kara sınırları değişebilir gözetilebilmekte ve yatay düzlemde değişik büyüklükte çözüm ağı uzunlukları seçilebilmektedir. Düşeyde, çözüm ağı kümeleşmesi uygulanarak çözünürlük istenilen düzeylerde artırılabilir. Bilimsel kaynaklarda yayımlanan analitik ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak gerçekleşen üç boyutlu matematiksel hidrodinamik model öncelikle, denizle bağlantılı bir göl niteliğiyle, hidrodinamik ve kirlenme açılarından özel önemi bulunan lagünlere uygulanmıştır. Lagün içerisindeki su hareketleri ve düzey değişimleri, denizle su alışveriş mekanizması, lagün sularının sıcaklık ve tuzluluk dağılımları ve kirleticiler derişikliklerinin zamansal ve alansal değişimleri geliştirilen üç boyutlu matematiksel model kullanılarak hesaplanmıştır. Matematiksel model, lagün ortamında kullanılmaya uygun duruma getirildikten sonra, topografya ve batimetri, rüzgar iklimi ve benzeri konularda mevcut bilgiler toplanıp değerlendirilerek, Ölüdeniz Lagünü'ne uygulanmıştır. Ölüdeniz Lagünü ve Belceğiz Körfezi'nde, Temmuz, Ağustos ve Eylül 1997 aylarında, ikişer hafta süreli alan ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu alan çalışmalarında, dip ve yüzey akıntıları, ve deniz suyunun tuzluluk ve sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Anahtar Kelimeler: Kıyı lagünleri, matematiksel modelleme, su alışverişi, kirlenme, akıntılar, gelgit, türbülans, Ölüdeniz.	
9- Proje ile ilgili Yayın/Tebliğlerle ilgili Bilgiler Balas L., Ozhan E., Öztürk C., Three Dimensional Modelling of Hydrodynamic and Transport Processes in Ölüdeniz Lagoon, <i>Proc. of MEDCOAST '97</i> , Malta, Cilt 2, (1997), s. 1097-1109. Balas L., Ozhan E., Three Dimensional Modelling of Transport Processes in Stratified Coastal Waters, <i>Proc. of Hydroinformatics '98</i> , Danimarka, (1998), Baskıda.	
10- Bilim Dalı: Doçentlik B. Dalı Kodu: ISIC Kodu: Uzmanlık Alanı Kodu:	
11- Dağıtım (*): <input type="checkbox"/> Sınırlı <input checked="" type="checkbox"/> Sınırsız	
12- Raporun Gizlilik Durumu: <input type="checkbox"/> Gizli <input checked="" type="checkbox"/> Gizli Değil	

(*) Projenizin Sonuç Raporunun ulaştırılmasını istediğiniz kurum ve kuruluşları ayrıca belirtiniz