

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

78079

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DALGA SAPMASININ SAYISAL  
YÖNTEMLE BELİRLENMESİ

İÇİŞİLERİ VE İKTİSADİ İLİMLER ENSTİTÜSÜ  
KURULU  
KURUMSAL İNTEGRASYON MERKEZİ

İnş. Müh. Murat İhsan KÖMÜRCÜ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde

“Yüksek Mühendis”

Ünvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06.01.1998

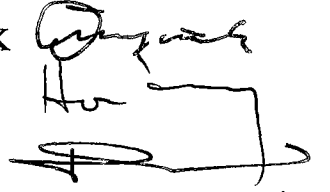
Tezin Savunma Tarihi : 26.01.1998

78079

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ömer YÜKSEK

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Hızır ÖNSOY

Jüri Üyesi : Doç. Dr. Basri ERTAŞ



Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Fazlı ARSLAN



Trabzon 1998

## ÖNSÖZ

Düzenli dalgaların sapmasının sayısal yöntemlerle hesabı için bir bilgisayar programının geliştirilmesini ve bu programın sonuçlarının, analitik ve grafik yöntemlerle (Snell Kanunu) karşılaştırılmasını konu alan bu çalışma; Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarı'nda hazırlanmıştır.

Yüksek Lisans Tez Danışmanlığımı üstlenerek konu seçimi ve çalışmaların yürütülmesi sırasında yardımlarını esirgemeyen Sayın Hocam Doç. Dr. Ömer YÜKSEK'e teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Yapıcı eleştirilerinden yararlandığım Sayın Hocam Prof. Dr. Hızır ÖNSOY'a teşekkür ederim.

Tezin hazırlanmasında ilgilerinden ve yardımlarından dolayı Arş. Gör. İsmail Hakkı ÖZÖLÇER'e, Arş. Gör. Hülya BOĞUŞLU'ya, Arş. Gör. Hikmet Kaplan'a, bilgisayar programı hazırlama aşamasında bilgilerinden yararlandığım Arş. Gör. Ali Remzi BİRBEN ve İnş. Yük. Müh. Levent USTAOĞLU'na şükranlarımı sunarım.

Ayrıca tezin hazırlanmasında manevi desteklerini esirgemeyen Hidrolik Laboratuvarı teknisyenleri Namık Kemal KARABEKİR, İsmail KAZAZ ve Selim OLCA'ya teşekkür ederim.

Murat İhsan KÖMÜRCÜ

## İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa No</u></b>
ÖNSÖZ .....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
ÖZET.....	vi
SUMMARY.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	x
SEMBOLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	xi
1. GENEL BİLGİLER .....	1
1.1. Giriş .....	1
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı .....	1
1.3. Literatür Çalışmaları .....	2
1.4. Dalga Mekaniği .....	9
1.4.1. Rüzgar Dalgalarının Oluşumu .....	9
1.4.2. Dalga İklimi .....	10
1.4.3. Dalga Teorileri .....	10
1.4.4. Küçük Genlikli Dalga Teorisi .....	11
1.4.5. Dalgaların Sınıflandırılması .....	16
1.4.5.1. Su Derinliğine Göre .....	16
1.4.6. Dalgaların Kıyıya Yaklaşırken Uğradığı Değişimler (Dalga Transformasyonu) .....	17
1.4.6.1. Dalga Sığlaşması (Wave Shoaling) .....	17
1.4.6.2. Dalga Kırınımı (Wave Diffraction) .....	18
1.4.6.3. Dalga Yansıması (Wave Reflection) .....	18
1.4.6.4. Dalga Kırılması (Wave Breaking) .....	19
1.4.6.5. Dalga Sapması (Wave Refraction) .....	23
1.4.6.5.1. Snell Kanunu .....	24
1.4.6.5.2. Düz Paralel Konturlarda Dalga Sapması .....	25

1.4.6.5.3. Karmaşık Konturlarda Dalga Sapması .....	26
1.4.6.5.3.1. Dalga Cephesi Yöntemi .....	27
1.4.6.5.3.2. Ortogonal Yöntemi .....	28
1.4.6.5.4. Akıntı Etkisiyle Dalga Sapması .....	34
<b>2. YAPILAN ÇALIŞMALAR .....</b>	<b>35</b>
2.1. Sapma - Sığlaşma Hesabında Yapılan Kabuller .....	35
2.2. Dalga Sapma Yönünün Belirlenmesi .....	36
2.3. Dalga Sapma Katsayısının Belirlenmesi .....	38
2.4. Dalga Sığlaşma Katsayısının Belirlenmesi .....	40
2.5. Dalga Yüksekliğinin Belirlenmesi .....	40
2.6. Diferansiyel Denklemlerin Sayısal Çözümleri .....	41
2.6.1. Karelaj Ağının Oluşturulması .....	41
2.6.2. Dalga Sapması Hesabında Kullanılacak Diferansiyel Denklemlerin Sayısal Çözümleri .....	43
2.6.2.1. Sonlu Farklar Tekniğiyle Dalga Yönünü Belirleyen Diferansiyel Denklemlerin Düzenlenmesi .....	43
2.6.2.2. Sonlu Farklar Tekniğiyle Dalga Yüksekliğini Belirleyen Diferansiyel Denklemlerin Düzenlenmesi .....	44
2.6.3. Dalga Hızının Belirlenmesi .....	45
2.6.4. Sayısal Çözümün Kontrolü ve Durdurulması Gerektiren Şartlar .....	45
2.7. Yapılan Bilgisayar Programı Hakkında Genel Bilgi .....	47
2.8. Sayısal Modelin Uygulamaları .....	48
2.8.1. Sayısal Modelin Düz Paralel Konturlu Topografyaya Uygulanması .....	48
2.8.2. Sayısal Modelin Düzensiz Konturlu Topografyaya Uygulanması .....	48
<b>3. BULGULAR .....</b>	<b>51</b>
3.1. Düz Paralel Konturlu Topografyada Sayısal Çözüm ve Snell Kanunu Kullanılarak Elde Edilen Sonuçlar .....	51
3.2. Düzensiz Topografyada (Şekil 13) Sayısal Çözüm ve Grafik Yöntem Uygulamasından Elde Edilen Sonuçlar .....	55

4. İRDELEME .....	60
4.1. Düz Paralel Konturlu Topografyada, Model Sonuçlarıyla Snell Kanunundan Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi .....	60
4.2. Düzensiz Topografyada (Şekil 13) Sayısal Çözüm Sonuçlarıyla Grafik Çözümünden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi .....	62
5. SONUÇLAR .....	65
6. ÖNERİLER .....	67
7. KAYNAKLAR .....	68
8. EKLER .....	72
ÖZGEÇMİŞ .....	84



## ÖZET

Kıyı bölgesinin anlaşılabilmesi, düzenlenebilmesi ve bu bölgeden faydalanılabilmesi, dalga mekaniğinin belirlenmesiyle mümkündür. Bu bölgede son derece düzensiz olan dalga hareketini belirlemek oldukça güçtür. Özellikle, düzensiz topografyalar üzerinde dalga sapmasını belirlemek çok kompleks bir problemdir.

Bu çalışmada, dalga sapmasını belirleyen diferansiyel denklemler sayısal olarak çözülmüş, dalga sığlaşması ve kırılması da dikkate alınarak dalga ortogonalinin yörüngesini, dalga yüksekliğini ve açısını belirleyen bir bilgisayar programı hazırlanmıştır.

Çalışma altı bölüm ve eklerden oluşmaktadır.

Çalışmanın birinci bölümünde dalga mekaniği hakkında genel bilgiler ve literatür çalışmaları verilmiştir.

İkinci bölümde dalga sapması konusundaki sayısal çalışmalar ve yapılan bilgisayar programı hakkında bilgiler anlatılmıştır.

Üçüncü bölümde, sayısal modelin düzenli ve düzensiz topografyalara uygulanmasıyla, düzenli topografyalar için Snell Kanunundan, düzensiz topografyalar içinse grafik yöntemlerden elde edilen sonuçlar çizelge ve şekillerle verilmiştir.

Dördüncü bölümde, bilgisayar programından elde edilen sonuçlarla, Snell Kanunu ve grafik yöntemlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve irdelenmiştir.

Beşinci bölümde çalışmadan elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Altıncı bölümde öneriler sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Dalga Mekaniği, Dalga Sapması, Dalga Sığlaşması, Dalga Kırılması, Sayısal Model

## SUMMARY

### **Determining of Wave Refraction by a Numerical Method**

It is necessary to determine the wave mechanics in the coastal zone in order to understand and utilize this area. It is very difficult, however, to determine wave mechanism in this irregular zone. Especially, wave refraction over such irregular topographies is a very complicated process.

In this study, differential equations governing wave refraction of regular waves are numerically solved and a computer programme which determine orthogonal, height and angle of refracted waves is developed. Wave shoaling and breaking are also taken into consideration in the programme.

The study comprises six chapters and appendices.

In the first chapter, general knowledge about wave mechanics and related literature review are given.

In the second chapter, numerical studies on wave refraction are introduced and a computer programme to solve the governing equations is developed.

In the thirty chapter, the developed model is applied to both regular and irregular topographies. The result are presented together with a result of Snell law for regular bottoms and with a result of graphical methods for irregular bottoms.

In the fourth chapter, the results obtained from the numerical model are compared with those of Snell law and graphical methods.

In the fifty chapter, conclusion of this study are presented.

In the sixty chapter, recommendations are given.

**Key words:** Wave Refraction, Wave Mechanics, Water Wave, Wave Shoaling,  
Wave Breaking, Numerical Model

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Sinüsoidal dalga tanımı .....	12
Şekil 2. Snell kanunu .....	24
Şekil 3. Düz paralel konturlarda dalga sapması.....	26
Şekil 4. Düz paralel konturlarda dalga sapma hesabı .....	27
Şekil 5. Dalga cephesi yönteminde kullanılan ölçek .....	28
Şekil 6. Ortogonal yönteminde dalga sapması .....	29
Şekil 7. Sapma şablonu .....	32
Şekil 8. $R/J$ yönteminde ortogonal geçiş aralığının bölünmesi .....	34
Şekil 9. Ardışık dalga ortogonalleri ( $O_1, O_2$ ) ve cepheleri ( $F_1, F_2$ ) .....	36
Şekil 10. Karelaj ağı .....	42
Şekil 11. Karelaj ağı üzerinde ortogonal yörüngesi .....	43
Şekil 12. Sayısal modelin uygulandığı düzenli (düz paralel konturlu) topografya ...	49
Şekil 13. Sayısal modelin uygulandığı düzensiz topografya .....	50
Şekil 14. Düz paralel konturlu topografyada oluşturulan karelaj ağı üzerinde ortogonal yörüngesi ve dalga yüksekliğini gösteren bilgisayar program çıktısı .....	56
Şekil 15. Düzensiz topografya üzerinde (Şekil 13) ortogonal yörüngesi ve dalga yüksekliği .....	59
Şekil 16. Düz paralel konturlu topografya üzerinde sayısal model ve Snell Kanunu karşılaştırılması (su derinliği ile dalga yüksekliği).....	61
Şekil 17. Düz paralel konturlu topografya üzerinde sayısal model ve Snell Kanunu karşılaştırılması (su derinliği ile sapma katsayısı) .....	61
Şekil 18. Düz paralel konturlu topografya üzerinde sayısal model ve Snell Kanunu karşılaştırılması (su derinliği ile dalga yönü) .....	62
Şekil 19. Düzensiz konturlu topografya üzerinde (Şekil 13) sayısal model ve grafik yöntemin karşılaştırılması (su derinliği ile dalga yüksekliği) .....	63



Şekil 20. Düzensiz konturlu topografya üzerinde (Şekil 13) sayısal model ve grafik yöntemin karşılaştırılması (su derinliği ile sapma katsayısı).....	63
Şekil 21. Düzensiz konturlu topografya üzerinde (Şekil 13) sayısal model ve grafik yöntemin karşılaştırılması (su derinliği ile dalga yönü) .....	64
Ek Şekil 1. Sayısal model için hazırlanan bilgisayar programı başlığı .....	72
Ek Şekil 2. Düzensiz topografya üzerinde (Şekil 13) ortogonal yörüngesi ve dalga yüksekliği .....	73
Ek Şekil 3. Düzensiz topografya üzerinde (Şekil 13) ortogonal yörüngesi ve dalga yüksekliği .....	74
Ek Şekil 4. Düzensiz topografya üzerinde (Şekil 13) ortogonal yörüngesi ve dalga yüksekliği .....	75



## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 1. Dalgaların su derinliğine göre sınıflandırılması .....	16
Çizelge 2. Dalga kırılma tipleri .....	22
Çizelge 3. Düz paralel konturlu topografya üzerinde Snell Kanunu uygulanarak elde edilen sonuçlar .....	52
Çizelge 4. Düz paralel konturlu topografya üzerinde sayısal model uygulanarak elde edilen sonuçlar .....	54
Çizelge 5. Düzensiz topografya (şekil 13) üzerinde ortogonal yöntemi uygulanarak elde edilen sonuçlar .....	57
Çizelge 6. Düzensiz topografya (şekil 13) üzerinde sayısal model uygulanarak elde edilen sonuçlar .....	58
Ek Çizelge 1. Programda dosya okuma menüsü .....	72
Ek Çizelge 2. Düzensiz topografya üzerinde sayısal model bilgisayar sonuçları .....	76

## SEMBOLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ

$a$	: Dalga genliği
$a_{i,j}$	: Karelaj ağı yatay koordinatlarını belirleyen indis
$b_0$	: Derin deniz dalga ortogonalleri arası mesafe
$b$	: Dalga ortogonalleri arası mesafe
$C$	: Dalga hızı
$C_g$	: Dalga grup hızı
$C_0$	: Derin deniz dalga hızı
$d$	: Su derinliği, diferansiyel aralığı
$d_0$	: Derin deniz sınırındaki su derinliği
$d_b$	: Kırılma anındaki su derinliği
$d_t$	: Seçilen zaman aralığı
$Df$	: Dalga ortogonalleri arasındaki sonsuz küçük mesafe
$D_f$	: Seçilen ortogonal aralığı
$D_{f_b}$	: Başlangıç noktasındaki dalga ortogonalleri arasındaki mesafe
$Ds$	: Dalga cepheleeri arasındaki sonsuz küçük mesafe
$DX_0$	: Karelaj ağının x-ekseni yönündeki dilim uzunluğu
$DY_0$	: Karelaj ağının y-ekseni yönündeki dilim uzunluğu
$E_f$	: İki ortogonal arasındaki dalga enerjisi
$E_0$	: Derin deniz dalga enerjisi
$F$	: Feç mesafesi
$f$	: Feç genişliği
$g$	: Yerçekimi ivmesi
$H$	: Dalga yüksekliği
$H_b$	: Kırılma anındaki dalga yüksekliği
$H_d$	: Kırınımına uğramış dalga yüksekliği
$H_y$	: Yansıyan dalga yüksekliği

$H_0$	: Derin deniz dalga yüksekliği
$i$	: Karelej ağı x-ekseni doğrultusu boyunca dilim artış indisi
$j$	: Karelej ağı y-ekseni doğrultusu boyunca dilim artış indisi
$J$	: Dönme noktasında konturlar arası mesafe
$k$	: Dalga sayısı, ortogonal boyunca değişim noktalarını gösteren indis
$\bar{k}$	: Dönüştürölmüş dalga sayısı
$K_d$	: Kırınım katsayısı
$K_f$	: Dalga cephesinin eğriliği
$K_r$	: Sapma katsayısı
$K_s$	: Sığlaşma katsayısı, dalga ortogonalinin eğriliği
$K_y$	: Yansıma katsayısı
$L$	: Dalga boyu
$L_0$	: Derin deniz dalga boyu
$m$	: Taban eğimi
$M$	: Sayısal model hesap başlangıç noktası (x- eksteni doğrultusu)
$N$	: Sayısal model hesap başlangıç noktası (y- eksteni doğrultusu)
$P_0$	: Derin deniz enerji akısı
$P$	: Enerji akısı
$R$	: Ortogonal boyunca seçilen mesafe (geçiş aralığı), $i$ 'nin maksimum değeri
$S$	: Belirli bir yönde ve frekans aralığında taşınan dalgaların toplam enerjisinin fonksiyonu, ortogonalin aldığı yol, $j$ 'nin maksimum değeri
$t$	: Zaman, fırtına süresi
$T$	: Dalga periyodu
$u$	: Su parçacıklarının hızı
$U$	: Rüzgar hızı
$U_r$	: Ursel parametresi
$x,y$	: Yatay eksen takımı
$X,Y$	: Karelej ağı üzerinde ortogonalin konumunu belirleyen koordinatlar
$X_k$	: Ortogonalin $k$ 'inci adımında x-ekseni doğrultusunda aldığı yol
$Y_k$	: Ortogonalin $k$ 'inci adımında y-ekseni doğrultusunda aldığı yol

- $\alpha$  : Sapan dalga tepelerinin kıyı çizgisiyle yapmış olduğu açı
- $\alpha_b$  : Kırılma anındaki dalga açısı
- $\alpha_0$  : Derin deniz dalga tepelerinin kıyı çizgisiyle yapmış olduğu açı
- $\beta$  : Ortogonal ayırma faktörü
- $\theta$  : Dalga ortogonal yönünü belirleyen sapma açısı, dalga ortogonalı ile x-ekseni arasındaki açı, dalga ortogonalı ile kıyı çizgisi arasındaki açı
- $\eta$  : Dalga profili düşey eksen koordinatı
- $\rho$  : Deniz suyunun yoğunluğu
- $\omega$  : Açısal frekans
- $\varphi_0$  : Potansiyel fonksiyonu
- $\gamma$  : Dalga kırılma indisi
- $\Delta t$  : Sayısal model uygulamasında seçilen zaman aralığı
- $\Delta X_1$  : Ortogonalın x-ekseni doğrultusunda her bir adımda aldığı yol
- $\Delta Y_1$  : Ortogonalın y-ekseni doğrultusunda her bir adımda aldığı yol
- $\Delta\alpha$  : Ortogonal dönme açısı
- $\xi$  : Dalga kırılma tipi katsayısı (Irribaren sayısı)

## **1. GENEL BİLGİLER**

### **1.1. Giriş**

Kıyı mühendisliği çalışmalarında, su dalgalarının etkileri oldukça önemlidir. Dalgalar, limanlar, kıyı koruma yapıları, diğer kıyı yapıları ve kumsal düzenlemesinin projelendirilmesinde en önemli ve belirleyici faktörlerdir. Yüzey dalgaları genelde rüzgarın etkisiyle meydana gelirler. Oluşan dalga enerjisi kumsalda veya kıyıya yakın bölgelerde gelişen olaylarla sönümlenir. Dalgalar kumsal şeklinin belirlenmesinde etkin olan önemli enerji kaynaklarıdır. Kıyı bölgesindeki taban malzemesinin sınıflandırılmasını ve taşınımını (kıyıya, açığa veya kıyı boyu ) belirlerler. Büyük su kütlelerinin kıyı bölgesindeki kompleks hareketini anlamak için öncelikle yüzey dalgalarının oluşumunu ve yayılmasını fiziksel ve matematiksel olarak belirlemek gerekmektedir. Kıyıda yapılacak çalışmaların projelendirilmesinde dalga mekaniği esas oluşturmaktadır.

Dalgaların karmaşık yapısı ve mekanizmasının tam olarak çözülememesi, kıyı mühendisliği çalışmalarını zor ve zahmetli bir hale sokmaktadır. Dalga parametrelerinin kıyı bölgesindeki değişimini belirlemek, bir çok çalışmacının ilgisini çekmiştir. Bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle, yapılan çalışmalar artmış ve daha kolay sonuç elde edilir duruma gelmiştir. Ancak çok kompleks olan bu konuda istenilen sonuca henüz varılamamıştır (dalga sığlaşma hesabı hariç direkt sonuç veren formüller geliştirilememiştir).

### **1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı**

Derin denizde (açıkta) oluşan dalgalar, kıyıya yaklaşırken, sapma, sığlaşma, yansıma, dönme ve kırılma sonucu değişimlere uğrarlar. Yüzyılımızda, araştırmacılar bu değişimleri belirlemek için bir çok çalışma yapmışlardır. Bu çalışmalardan elde edilen diferansiyel denklemler, sonraki araştırmacılar tarafından belirli başlangıç ve sınır şartları yardımıyla çözülmeye çalışılmıştır. Elde edilen sayısal çözümler programlanmış ve geçerliliği olanlar, büyük paralara dünya çapında pazarlanmaya başlanmıştır. Ülkemizde,

bu konuya gerektiği kadar önem verilmemiş ve kıyı mühendisliğindeki tüm çalışmalar için esas olan bu hesaplar, ya çok eski grafik yöntemlerden veya yurt dışından bu programlar satın alınarak yapılmıştır.

Bu çalışmanın amacı; ülkemizde eksikliği duyulan bu konuyla ilgili olarak, düzenli dalgaların, düzensiz topografya üzerinde hareketini, yapılan bilgisayar programı yardımıyla belirleyerek, kullanıcıları grafik yöntemlerden ve yurt dışında yapılan buna benzer programlara büyük paralar vererek, ülkemizin sınırlı kaynaklarını gereksiz yere israf etmekten kurtarmaktır.

Çalışmada ağırlıklı olarak dalga sapması incelenmiştir. Dalga sapma mekanizması henüz tam anlamıyla bir çözüm üzerinde fikir birliğine varılamamış bir konudur ve dünyadaki dalga mekaniği ile ilgili çalışmalarda bu konuya gereken önem verilmiştir. Bu çalışmayla, bu konuda bilime bir katkıda bulunulmaya çalışılmıştır.

Yapılan bu çalışmayla derin deniz sınırından kıyıya doğru yaklaşan düzenli dalgaların, düzensiz topografya etkisiyle sapma, sığlaşma ve kırılma değerleri incelenerek dalga büyüklükleri bulunmaya çalışılmıştır. Oluşturulan karelaj ağı boyutları içerisinde bu büyüklükler, yapılan bilgisayar programı yardımıyla kolaylıkla hesaplanabilmektedir. Programın çizim moduyla, karelaj ağı üzerinde dalga ortogonalı boyunca, dalga yüksekliği ve yönünü belirleyen grafik çıktıları da alınabilmektedir.

Çalışmada, dalgaların tabandan yansımaları, sürtünmesi, ve akıntıların etkisiyle sapması ihmal edilmiştir. Ayrıca dalga kırınımından sonra oluşacak sapma hesabı ve yapılardan oluşan yansımalar bu çalışmanın kapsamı dışındadır. Çalışmada, küçük genlikli dalga teorisi kullanılmıştır. Yapılan sayısal programlar, düzenli ve düzensiz olmak üzere iki farklı topografyaya uygulanmış, elde edilen sonuçlar, düzenli topografyada Snell Kanunu, düzensiz topografyada grafik yöntemlerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve programın kullanılabilirliği gösterilmiştir.

### **1.3. Literatür çalışmaları**

Burada; dalga sapması konusunda yapılan araştırma ve çalışmaların özet bilgileri tarih sırasına göre verilmiştir:

Karlsson [1], yaptığı çalışmalarda herhangi bir derinlikteki suda sürekli dalga yönü spektrumunun (okyanus dalga spektrumu) dağılımı için aşağıdaki denklemi geliştirmiştir:

$$\cos\theta \cdot \frac{\partial(Scc_g)}{\partial x} + \sin\theta \cdot \frac{\partial(Scc_g)}{\partial y} + c_g \frac{\partial S}{\partial \theta} \left( \sin\theta \frac{\partial c}{\partial x} - \cos\theta \cdot \frac{\partial c}{\partial y} \right) = 0 \quad (1)$$

Bu denklemde:

$\theta$  : Dalga taşınım yönü

$C$  : Dalga hızı

$C_g$ : Dalga grup hızı

$x, y$ : Yatay koordinatlar

$S$  : Belirli bir yönde ve frekans aralığında taşınan dalgaların toplam enerjisinin fonksiyonudur.

Bu denklemle, dalga sabit frekansı ve yayılma yönündeki değişim miktarı, rüzgarın ve taban sürtünmesinin etkileri dikkate alınarak, dönme ve akıntının etkileri ise ihmal edilerek belirlenmiştir. Denklem, derin deniz sınır şartları kullanılıp sayısal olarak çözüldüğünden, çözüme sadece derin deniz sınırından başlanabilir. Geliştirilen model, üniform eğimli tabanlara uygulandığında, sapma etkisinin, düşük frekanslar için büyük, yüksek frekanslar için ise çok küçük olduğu sonucuna varılmıştır.

Berkhoff. [2], basit harmonik dalgalar için sapma ve dönme olaylarını birlikte tanımlayan iki boyutlu diferansiyel bir denklem bulmuştur ( Mild Slope Equation ):

$$\nabla(C C_g \nabla \phi_0) + \frac{\omega^2 \cdot C_g}{C} \cdot \phi_0 = 0 \quad (2)$$

Denklemde:

$C$  : Dalga hızı

$C_g$ : Dalga grup hızı

$\omega$  : Açısal frekans ( $\omega = 2 \cdot \pi / T$ )

$\phi_0$ : Potansiyel fonksiyonudur.



Bu denklem, küçük bir parametre yardımıyla geliştirilmiş ve sonlu elemanlar tekniğiyle çözülmüştür. Denklemde, taban sürtünmesi ve dalga kırılmasıyla oluşan enerji kaybı dikkate alınmamıştır. Bir engel veya liman girişinde hesap yapılırken, bu bölgedeki dalgalar süperpoze edilecek (işaretleriyle toplanacak) ve su derinliği sabit kabul edilecektir. Bu denklemde, sığ sulardaki ( $d/L_0 < 1/25$ ) lineer dalga teorileri kullanılamaz.

Skovgaard, Jonsson ve Bertelsen [3], yaptıkları çalışmalarla, dalga ortogonalinin yönünü ve yüksekliğini, kompleks topoğrafya üzerinde otomatik olarak hesaplayan sayısal bir yöntem geliştirmişlerdir. Dalga yüksekliğini hesaplarken; sığlaşma, sapma ve türbülans etkisiyle oluşan taban sürtünmesinin etkilerini de dikkate almışlardır. Hesaplara sadece derin deniz sınırından değil, istenilen derinlikten başlanabilir. Bu yaklaşımda, düzenli, uzun tepeli ve küçük genlikli yüzey dalgaları kullanılmış; akıntının, yansımanın ve dönmenin etkisi ihmal edilmiştir. Geliştirdikleri yöntemi; Snell kanununun geçerli olduğu düz paralel konturlu topoğrafya üzerindeki eşik etkisiyle oluşan dalga sapması ve yüksekliği ile karşılaştırmışlar, dilim aralığının artmasının dalga yüksekliğinin, dolayısıyla da hataların artmasına sebep olduğu sonucuna varmışlardır.

Liu ve Tsay [4], Stokes dalgalarının yayılmasının ve değişiminin hesabı için bir model geliştirmişlerdir. Bu model, yavaş değişen su derinlikleri için geçerli olan, değişken katsayılı, lineer olmayan, Djordjevic tarafından geliştirilen Schrödinger denklemidir [5]:

$$2 \cdot i \cdot \bar{k} \cdot \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \left[ k^2 - \bar{k}^2 - \frac{\nabla^2 (CC_g)^{0.5}}{(CC_g)^{0.5}} + i \cdot \frac{\partial k}{\partial x} \right] \cdot A + \frac{k \cdot |A|^2 \cdot A}{(CC_g)^2} = 0 \quad (3)$$

Denklemde:

$C$  : Dalga hızı

$C_g$ : Dalga grup hızı

$k$  : Dalga sayısı ( $k = 2 \cdot \pi / L$ )

$\bar{k}$  : Dönüştürülmüş dalga sayısı

$x, y$ : Yatay koordinatlar

a dalga genliğini göstermek üzere,

$$A = \frac{a}{(CC_g)^{0.5}} \quad (4)$$

$$K = k^4 \cdot C^2 \cdot \frac{[\cosh 4kd + 8 - 2 \tanh^2 kd]}{8 \sinh^4 kd} \quad (5)$$

şeklindedir.

Modelin geçerliliği, yarı dairesel kıyılar üzerinde Ursell parametresi kullanılarak denenmiştir. Ursel parametresi ( $u_r$ ),  $d$  su derinliğini göstermek üzere aşağıdaki gibidir.

$$u_r = \frac{a/d}{(kd)^2} \quad (6)$$

Ursell parametresinin büyük olduğu değerlerde, bu yöntemin kullanılmaması gerektiği sonucuna varmışlardır.

Liu , Yon ve Kirby [6], parabolik yaklaşımla lineer olmayan sığ su dalgaları için, zayıf sapma-dönme olaylarına ilişkin iki farklı model sunmuşlardır. Sunulan ilk modelde Boussinesq denklemini, yavaş değişen iki boyutlu alanlarda, spektral dalgalar için geliştirmişlerdir; ikincisinde ise, iki boyutlu K-P denklemini (Kadomtsev ve Petviashvili) düzenlemişlerdir [7]. Bu çalışmalarda taban sürtünmesinin ve dalga kırılmasının etkisi ihmal edilmiştir. Modeller, düzenli dalgalar ve bunların lineer olmayan dağılımlarıyla sınırlandırılmıştır.

Sang Oh ve Grosch [8], yaptıkları çalışmalarla, değişik topoğrafyalarda enerji dağılımını dahil ederek ve etmeyerek birinci ve üçüncü dalga teorilerini kullanarak buldukları ortogonal yolu ve sapma katsayılarını karşılaştırmışlardır. Ayrıca; modeli kullanarak, kırılma noktası civarındaki derinliklerden ve kaustik (dalgaların girişimi) etrafındaki sabit eğimli değişik tabanlardan elde ettikleri bazı sonuçları da sunmuşlardır. Sunulan sonuçlarda, enerji dağılımının etkisi ihmal edildiğinde:

- Sabit taban eğimli topoğrafyalarda; sonlu genlikli dalgaların sonsuz genlikli dalgalardan daha az saptıkları,

-Taban eğiminin değiştiği topografyalarda (bir çukur veya tepe etrafı) ise üçüncü dalga teorisinden (sonsuz genlikli) hesaplanan ortogonallerin, birinci dalga teorisinden (sonlu genlikli) hesaplanan dalga ortogonallerinden daha az saptıkları ortaya çıkmıştır.

Modelde; enerji dağılımının etkisi dahil edildiğinde, sabit bir dalga dikliği için, hesaplanan sapma katsayısı, enerji dağılımının etkisi ihmal edildiğinden daima daha küçüktür.

Ebersole [9], kompleks batimetri üzerinde sapma ve dönme etkilerini dikkate alarak düzenli dalgaların değişimini tahmin eden sayısal bir model sunmuştur. Berkhoff'un denklemi geliştirmiş ve geliştirdiği denklemin çözümünde sonlu farklar tekniğini kullanmıştır. Model sonuçlarını Whalin'in yaptığı deneylerle karşılaştırmıştır [10]. Model; sapma ve dönme etkileriyle dalga parametrelerini hesaplarken sadece sapmayı dikkate alarak da hesap yapabilmektedir. Geliştirilen model; lineer dalga değişim problemlerinin çözümü için genel, yeterli ve ekonomik yaklaşımlar vermiştir.

Treloar [11], açık deniz dalga frekans-yön spektrumunu kullanarak, derinlik değişimi ve akıntılarının etkileri altında kıyı bölgesine doğru sapma ile dalga katsayısını belirleyen bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntemde, enerji yayılımı ve dalga-akıntı etkileşimi ihmal edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Skovgard, Jonsson ve Bertelsen'in sonuçlarıyla benzerlik göstermiştir [3]. Kısa periyotlu dalgalarda, akıntının, dalga sapmasını derinlik değişiminden daha fazla etkilediğini göstermiştir. Spektral dalga sapmasının, dalga girişimi (kaustic) ve yansıma olan bölgelerinde, dalga parametreleri hesabı için daha avantajlı olduğu sonucuna varmıştır.

Dalrymple [12], düzensiz taban topografyası üzerinde lineer ve lineer olmayan dalgaların sapmasını hesaplayan mikro bilgisayarlar için sayısal bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntemde, dalga-akıntı etkileşimi ve sığlaşma dikkate alınmıştır. Model çıktılarında dalga yükseklikleri, yön vektörlerinin boyu ile gösterilmiştir. Modelin lineer versiyonu New Jersey Kıyıları'nın bir bölümüne uygulanmış ve uzun periyotlu dalgaların düzensiz batimetriye kısa periyotlu dalgalardan daha fazla tepki gösterdiği sonucuna varılmıştır. Modelin lineer olmayan versiyonu düz paralel konturlu bir kıyıya uygulandığında, ters akıntılarla korunmuş bölgeye doğru, lineer modelde olduğu gibi dalga enerjisinin odaklanmadığı belirlenmiştir.

Rygg [13], lineer olmayan Boussinesq denkleminin çözümü için sayısal bir yöntem geliştirmiştir. Sayısal model, yarı dairesel kıyılar üzerindeki yüzeysel dalgaların lineer olmayan sapma ve dönmesini incelemede kullanılmıştır. Sonuçlar, deneysel verilerle karşılaştırılmış ve birbirine uyum gösterdiği görülmüştür. Geliştirilen model, dalga grubunun periyodikliğine bağlı olmadığı için geçici dalga yayılma problemlerine de uygulanabilmektedir.

Panchang, Roisin ve Pearce [14], geniş alanlarda sapma ve dönme denklemlerinin birlikte çözümü için bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu denklem, eliptik dalga denkleminin kısaltılmasıyla oluşturulmuştur. Bilgisayar hafızasında depolamayı gerektiren büyük matrisler elimine edilmiş ve çözüm standartlaştırılmıştır. Dalga geliş yönündeki yapılardan yansımalar ve geri dönüş dalga yayılmaları ihmal edilmemiştir. Geliştirilen bu model, düzensiz batimetriye geniş alanlara uygulanabilmektedir.

Panchang ve Kopriva [15], Berkhoff'un dalga denklemini Chebyshev spektral düzenleme yöntemiyle çözmüşler ve iki boyutlu dalga yayılma problemlerine uygulamışlardır [16]. Daha önce, sayısal modellemelerde sonlu farklar ve sonlu elemanlar tekniği kullanılırdı. Bu yöntem denklem çözümünde ise, daha az dilim noktası gerektiren ve daha doğru sonuç veren Chebyshev spektral düzenleme yöntemi kullanılmıştır. Bu model, birçok kıyı mühendisliği uygulamalarında (sapma-dönme, yansıma ,dönme) başarıyla kullanılabilen ve geniş alanlara kolaylıkla uygulanabilmektedir.

Tsay, Zhu ve Liu [17], dalga sapması, dönmesi, yansıması ve yayılmasını hesaplayan karışık sonlu elemanlar yöntemini geliştirmişlerdir. Topografyanın değişimini ve enerji yayılımını dikkate alan bu yöntemde, batimetri yavaş değişen ve hızlı değişen olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Sayısal sonuçlar, bir dalga kanalında oluşturulan kıyı üzerindeki dalga yayılmasındaki deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Dairesel bir silindirde dalga dönmesi ve liman içinde çalkantıyı içine alan analitik çözümler, sayısal sonuçları doğrulamıştır. Karışık sonlu elemanlar modeli, dalga dağılımı problemlerinin hesabı için geliştirilmiştir. Hızlı topografik değişimleri ve enerji yayılımı gibi yeni özellikleri içeren bu modelle, bir kanaldaki dalga dağılımının benzeşimi yapılabilmektedir.

Vincent ve Briggs [18], suya batmış eliptik bir tepe üzerinden doğrusal olarak yayılan düzensiz dalga geçişinin, düzenli değişimini laboratuvar deneyleri ile incelemiştir. Belirgin dalga yüksekliği ve periyodu eşit olan düzenli dalgalarla beraber

eşit pik frekanslı ve spektral enerjili düzensiz dalgalar oluşturmak için doğrusal dalga jeneratörü kullanılmıştır. Dalga jeneratörüyle, hem dar, hem de geniş frekanslı ve doğrusal dağılımlı dalgalar oluşturulmuştur. Deneyler; düzenli dalgaların, düzensiz dalgalardan %50-%100 arasında farklı ve yanıltıcı sonuçlar verdiğini göstermiştir. Bunun en önemli nedenleri ise doğrusal dağılımın ve dalga dikliğinin büyüklüğüdür.

Chae ve Jeong [19], yavaş akıntılı ve topografyası değişen bölgelerde düzensiz dalga yayılmasındaki sapma ve dönmeyi birlikte belirleyen sayısal bir model geliştirmişlerdir. Bu yöntem, Berkhoff'un geliştirdiği denklemin eliptik türde düzenlenmesiyle elde edilmiştir. Yöntemde, dalga-akıntı etkileşimi dikkate alınmış, sayısal çözümde kullanılan dilim boyutlarının hesabın doğruluğuna etkisinin çok olmadığı belirlenmiştir. Bu model geniş alanlara uygulanabilir. Modelde, az eğimli kumsallarda ters-akıntılarda dalga yayılması değişiminin sayısal sonuçları da gösterilmiştir. Sığ sulardaki güçlü akıntılarda, dalga kırılması çok belirgin olduğu için geliştirilen model bu alanlarda kullanılmamalıdır.

Nwogu [20], sapma, dönme, yansıma ve sığlaşma etkileriyle sığ sulardaki yüzey dalgalarının lineer olmayan taşınımını belirlemek için, Boussinesq türü denklemleri kullanarak bir model geliştirmiştir. Boussinesq denkleminin yeni şekli olan bu modelde, ortalama derinlikte kullanılan hız yerine su seviyesinden keyfi bir mesafedeki hız kullanılmıştır. Bu yöntemle, sabit derinlikteki sularda derin su dalgalarının yayılması belirlenebilir. Model, su derinliğinin geniş bir aralığı için uygulanabilir. Denklemlerin çözümünde sonlu farklar kullanılmıştır. Düzenli dalgalarda, sayısal yöntemle laboratuvar deneylerinin karşılaştırılması sonucu, geçiş bölgesi ve sığ sularda; dalga yüksekliğinin, sayısal modelde laboratuvar deneylerinden %10 daha küçük olduğunu belirlenmiştir. Bunun bu bölgedeki akıntıların ve dalgaların düzensizliğinden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Geliştirilen yeni Boussinesq denklemiyle, eski Boussinesq denkleminin uygulama aralığı geliştirilmiştir.

Li ve Anastasiou [21], akıntıların önündeki büyük alanlar üzerinde su dalgalarının yayılması için, Berkhoff denkleminin uygun eliptik çözümünü, çoklu dilim metoduyla yapmışlardır. Dalga sapmasını, sığlaşmasını, dönmelerini ve kırılmasını da hesaplara katmışlardır. İstenirse, hesaba, dalga yansıması da ilave edilebilir. Berkhoff denkleminin sunulan çözümü, sonuca daha hızlı ulaşmakta ve çok randımanlı olmaktadır.

Massel [22], geçiş bölgesi ve sığ sularda lineer dalgalar için daha genel bir denklem geliştirmiştir. Bu denklem, Berkhoff'un mild-slope yaklaşımının uygulanabilirlik alanını genişletmiştir. Galerkin-Eigen fonksiyon metodu kullanılarak mild-slope yaklaşımı içindeki tüm terimlerin daha uygun bir analizi yapılmıştır. Bu denklemler, yüksek dereceden taban eğimlerini ve tabandaki eğrilikleri de kapsamaktadır. Modelin önceki çalışmalarla ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmasında, özellikle dik eğimli tabanlarda, yansıma katsayısı için daha gerçekçi sonuçlar verdiği ortaya çıkmıştır.

Li, Reeve ve Fleming [23], düzensiz su dalga yayılması için, Berkhoff denkleminin eliptik çözümünü, çoklu dilim sistemini kullanarak yapmışlardır. Sığlaşma, sapma, dönme ve dalga kırılmasını dikkate almışlardır. Sayısal hesap şeması, geniş çalışma alanları üzerinde yapılabilen spektral dalga hesaplarının kullanılmasına izin vermekte ve de çok iyi uyum sağlamaktadır.

Model sonuçlarıyla dalga kanalındaki deney ölçümlerinin karşılaştırılmasından, düzenli dalgalar kullanıldığında, dalga genliği hesabında büyük hatalar olduğu ortaya çıkmaktadır. Bunun yanında spektral dalga hesaplarının kullanılmasıyla elde edilen sonuçların daha doğru olduğu ortaya çıkmıştır.

## 1.4. Dalga Mekaniği

### 1.4.1. Rüzgar Dalgalarının Oluşumu

Rüzgar dalgalarının oluşmasını açıklayan mekanizmalar tam olarak anlaşılamamakla beraber; yapılan araştırmalar, dalgaların, deniz üzerindeki rüzgarın teğetsel ve normal gerilmelerinden meydana geldiğini göstermektedir. Rüzgar dalgalarının oluşumunu etkileyen başlıca parametreler; rüzgar hızı ( $U$ ), fe (kabarma) mesafesi ( $F$ ), fırtına süresi ( $t$ ), su derinliği ( $d$ ), fe genişliği ( $f$ )'dir [24].

Rüzgar, dalgaların enerji transferini etkileyen en önemli parametredir. Rüzgar hızı arttıça, dalga yüksekliği ve periyodu da artar. Dalgaları üreten rüzgarın estiği mesafe fe olarak adlandırılır. Fırtına süresi arttıça, dalgaların yüksekliği ve periyodu da artar. Fe genişliği, çok dar kıyılar dışında etkin bir parametre değildir. Su derinliğinin etkisi ise dalga transformasyonu kısmında verilecektir.

### 1.4.2. Dalga İklimi

Kıyılardaki tüm değişimlerin en önemli nedeni dalgalardır. Bu nedenle, incelenen yörenin uzun süreli dalga değerlerinin (dalga iklimi) belirlenmesi gereklidir. Bu değerlere göre yörenin belirgin dalga parametreleri bulunarak tasarımı yapılacak proje gerçekleştirilir. Dalga değerleri iki yoldan elde edilebilmektedir. Elde edilen bu değerler fiziksel ve sayısal modelleme çalışmalarında kullanılan en önemli veri kaynaklarıdır.

Dalga verilerini elde etmenin bir yöntemi, doğrudan ölçüm yolu ile belirlemek, diğeri ise rüzgar verilerinden tahmin etmektir. Doğrudan ölçüm yöntemi en uygun yöntem olmasına karşılık, kıyılarda sürekli ölçüm yapabilen istasyonların kurulmuş olması gerekir. Ülkemizde bu ölçümler hem çok kısa sürelidir hem de çok az kıyıda yapılmaktadır. Bu nedenle, ülkemizde yapılacak çalışmalarda rüzgar verileriyle dalga tahmini zorunluluğu vardır.

Dalga verilerini elde etmenin diğer bir yöntemi olan rüzgar verilerine dayanarak elde edilen veriler de kendi aralarında ikiye ayrılmaktadır. Birincisi meteorolojik istasyonların rüzgar değerlerinden, diğeri ise uydular aracılığı ile alınmış olan sinoptik haritalardan yararlanılarak elde edilmektedir.

Her iki yöntemden elde edilen rüzgar verilerini dalga tahminlerine (belirgin dalga parametreleri) dönüştürmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan en yaygın kullanılanı SBM (Suerdrup-Bresitschneider-Munk) Yöntemi, diye adlandırılan yöntemdir [25, 26, 27]. Rüzgar verilerinin elde edilış yöntemine göre aynı yöreler için farklı sonuçlar elde edilmektedir. Meteorolojik verilerden elde edilen veriler, Sinoptik haritalardan elde edilenlerden daha küçük değerler vermektedir. Bu sebeple, gerçeğe daha yakın sonuç veren, genel olarak da güvenli tarafta kalan sinoptik haritalardan elde edilen veriler kullanılmaktadır [25, 26, 27].

### 1.4.3. Dalga Teorileri

Genel anlamıyla dalga, bir hidrolik sistemin dengesini bozan kırışıklıklar diye tarif edilebilir. Tabiattaki olayların karmaşıklığı her zaman bu olayların tam olarak tanımlanabilmesine olanak tanımaz. Bu nedenle, tabiat olaylarını öncelikle basite

indirgeyerek tanımlamalar yapılabilmektedir. Dalgalar için de aynı durum geçerlidir, fakat her yerde ve her konumda geçerli olabilecek bir matematiksel formül geliştirilebilmiş değildir [28, 29, 30, 31].

Gerçek su dalgaları, üç boyutlu rastgele davranış gösterdikleri ve lineer olmadıkları için, bunları matematiksel olarak tanımlamak oldukça güçtür. Bununla birlikte, basit dalgalar için iki farklı teori geliştirilmiştir. Bunlardan birisi Airy'nin geliştirdiği küçük genlikli dalga teorisi, diğeri ise Stokes tarafından ortaya atılan Stokes dalga teorisidir. Bu teoriler, dalga boyunun büyük olduğu derinliklerde iyi sonuçlar vermektedir [24].

Sığ sularda Cnoidal dalga teorisi Korteweg ve De Vries tarafından geliştirilmiştir. Bu dalga teorisi oldukça komplekstir. Bunun için, teori sınırlandırılarak daha kolay anlaşılabilen ve uygulanabilen Solitary (tekil) dalga teorisi geliştirilmiştir [24]. Burada, daha çok kullanılan ve kolay uygulanabilen küçük genlikli dalga teorisi açıklanacaktır.

#### 1.4.4. Küçük Genlikli Dalga Teorisi

Basit dalga teorilerinde olduğu gibi bu dalga teorisinde de yapılan kabuller şunlardır:

1. Akışkan homojen ve sıkışmazdır (yoğunluğu sabittir).
2. Yüzey gerilmeleri ihmal edilebilir.
3. Su yüzeyi basıncı üniform ve sabittir.
4. Akışkan idealdir.
5. Dalgaların girişimi ihmal edilebilir.
6. Su tabanında hız sıfırdır.
7. Dalga genliği küçüktür ve dalga şekli sabittir.
8. Dalgalar iki boyutludur.

Dalga olayının çözümünün, teorik olarak trigonometrik fonksiyonlarla açıklanabilirliği gösterilmiştir. Dalga hareketi, bir sinüs fonksiyonu grafiğine benzediğinden, idealize edilmiş ve bu tanıma sinüzoidal dalga (küçük genlikli dalga , basit harmonik dalga, ilerleyen dalga, lineer basit dalga) adı verilmiştir (Şekil 1).



Dalga şekli , durgun su seviyesinden itibaren, zamanın ve konumun fonksiyonu olarak düşey yer değıştirme olarak tanımlanır; dalga profili veya dalga biçimi olarak isimlendirilir. Sinüzoidal dalga profili şu şekilde verilmektedir;

$$\eta = a \cdot \sin\left(2\pi\left[\frac{x}{L} - \frac{t}{T}\right]\right) \quad (7)$$

burada,

$\eta$  : Dalga profilinin düşey eksen koordinatı,

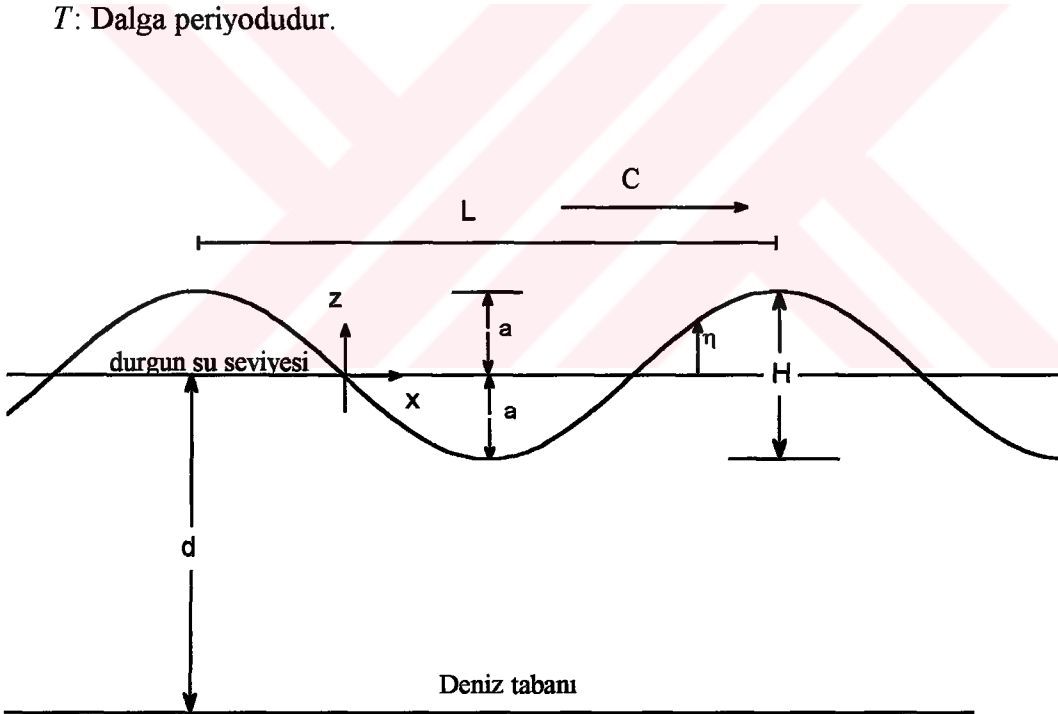
$x$  : Yatay eksen koordinatı,

$t$  : Zaman,

$a$  : Dalga genliği,

$L$  : Dalga boyu,

$T$  : Dalga periyodudur.



Sekil 1. Sinüzoidal dalga tanımı

Dalga profilini tanımlayan “ temel dalga parametreleri “ şunlardır:

$H$ : Dalga yüksekliği,

$L$  : Dalga boyu,

$T$  : Dalga periyodu,

$C$  : Dalga hızı,

$C_g$ : Dalga grup hızı,

$d$  : Su derinliği.

$$C = \frac{L}{T} \quad (8)$$

$$C = \sqrt{\frac{g \cdot L}{2 \cdot \pi} \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d}{L}\right)} \quad (9)$$

$$L = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d}{L}\right) \quad (10)$$

$$C = \frac{g \cdot T}{2 \cdot \pi} \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d}{L}\right) \quad (11)$$

$$C_g = n \cdot C \quad (12)$$

$$n = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{\frac{4 \cdot \pi \cdot d}{L}}{\sinh\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot d}{L}\right)} \right] \quad (13)$$

(10) denklemi görüldüğü gibi kapalı (implicit) bir eşitliktir. Denklemin her iki yanında da dalga boyunun ( $L$ ) olması, değerinin doğrudan elde edilmesini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, derinliğe bağlı olarak dalga boyu aşağıdaki gibi hesaplanıp tablolar haline getirilmiştir ( $d/L$  ve  $d/L_0$ ) ( GWT: Gravity Wave Tables ).

$$\frac{d}{L_o} = \frac{d}{L} \tanh\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{d}{L}\right) \quad (14)$$

Dalga boyunun (L) doğrudan elde edilebilmesi için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bunlardan Eckart'ın %5 yaklaşık sonuç veren denklemi şöyledir [24]:

$$L \cong \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \sqrt{\tanh\left(\frac{4 \cdot \pi^2 d}{T^2 g}\right)} \quad (15)$$

Denklem (14)'ün seri açılımı, Hunt tarafından yapılarak, dalga boyunun %1 in altında hatayla yaklaşık olarak bulunabileceği gösterilmiştir [32]. Bu çalışmalardan yararlanılarak Birben tarafından elde edilmiş olan denklem ise şöyledir [47];

$$L \cong L_o \left( \tanh\left(5.5 \frac{d}{L_o}\right) \right)^{0.485} \quad (16)$$

(16) denklemi,  $d/L_o > 0.0001$  değerlerde %1.5'den daha küçük hatayla dalga uzunluğunu vermektedir. Sayısal modellemede ise, iterasyon yöntemi ile dalga uzunluğunu istenilen yaklaşık değerde elde edebilmek mümkün olmaktadır.

Açık denizde rüzgar etkisi ile oluşan dalgalar belirli bir yayılma hızıyla ilerleyerek kıyıya yaklaşırlarken çeşitli etkenler nedeniyle değişime maruz kalırlar. Bu değişimin başladığı derinlik, “ derin deniz sınırı “ olarak isimlendirilmektedir. Derin deniz sınırı, dalga boyunun (L), su derinliğinin (d) iki katına eşit olduğu yerdir.

$$\frac{d}{L} = 0.5 \quad (17)$$

Derin sularda ( $d/L \geq 0.5$ )

$$\frac{2 \cdot \pi \cdot d}{L} \rightarrow \infty \rightarrow \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d}{L}\right) \cong 1 \quad (18)$$

$$L_o = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \cong 1.56 \cdot T^2 \quad (19)$$

ve,

$$d = 0.78 \cdot T^2 \quad (20)$$

$$C_g = \frac{1}{2} C_o \quad (21)$$

olur. Sığ sularda ( $d/L < 1/25$ ),

$$C_g = C \approx \sqrt{g \cdot d} \quad (22)$$

burada,

$d$  : Derin deniz sınırındaki su derinliği,

$L_o$  : Derin deniz dalga boyu,

$g$ : Yerçekimi ivmesi,

$C_o$ : Derin deniz dalga hızıdır.

Dalgaların açık denizde sahip oldukları enerji ve açık denizde  $b_o$  aralıklı iki bitişik dalga ortogonalı arasından geçen enerji akısı şöyledir:

$$E_o = \frac{1}{8} \rho \cdot g \cdot L_o \cdot H_o^2 \quad (23)$$

$$P_o = \frac{1}{2} \cdot b_o \cdot E_o \cdot C_o \quad (24)$$

Burada,

$E_o$  : Derin deniz dalga enerjisi,

$\rho$  : Deniz suyunun yoğunluğu,

$H_0$  : Derin deniz dalga yüksekliği,

$P_0$  : Derin deniz enerji akısı,

$b_0$  : Derin deniz dalga ortogonalleri arası uzaklıktır.

#### 1.4.5. Dalgaların Sınıflandırılması

Dalgalar kısaca şu kriterlere göre sınıflandırılabilir:

1. Periyotlarına
2. Su derinliğine
3. Dalga yüksekliğine
4. Dalga hareketi karakteristiklerine
5. Dalgayı üreten kuvvete göre

Kıyı mühendisliği çalışmalarında, dalgalar, daha çok su derinliğine göre sınıflandırılırlar. Burada bu sınıflandırma açıklanacaktır.

##### 1.4.5.1. Su Derinliğine Göre

Çizelge 1. Dalgaların su derinliğine göre sınıflandırılması

Derin su dalgaları	$\frac{d}{L} \geq \frac{1}{2}$
Geçiş derinliği dalgaları	$\frac{1}{25} \leq \frac{d}{L} \leq \frac{1}{2}$
Sığ su dalgaları	$\frac{d}{L} \leq \frac{1}{25}$

### 1.4.6. Dalgaların Kıyıya Yaklaşırken Uğradığı Değişimler (Dalga Transformasyonu)

Açık denizde oluşan dalgalar, derin deniz sınırından itibaren kıyıya yaklaşırken tabandan etkilenmeye başlarlar, bu etkilenme sonucu oluşan değişiklikler şunlardır:

1. Sığlaşma (shoaling),
2. Sapma (refraction),
3. Kırılma (breaking)

Ayrıca , doğal veya yapay bir engelle karşılaşan dalgalar;

1. Kırınım (diffraction),
2. Yansıma (reflection)'ya maruz kalırlar.

Bu değişimler, dalga mekaniği ve katımadde hareketini önemli ölçüde etkileyen olaylardır. Bu nedenle bu olaylar hakkında kısa bilgiler verilecektir.

#### 1.4.6.1. Dalga Sığlaşması (Wave Shoaling)

Derinliğin azalması nedeniyle dalgalar tabandan etkilenir. Bunun sonucu, dalga yüksekliğinde çoğu kez azalma, bazı durumlarda ise artma meydana gelir. Sığlaşma sonucu oluşan dalga yüksekliği şöyle hesaplanır [33];

$$\frac{H}{H_o} = K_s = \left[ \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d}{L}\right) \right]^{-0.5} \left[ 1 + \frac{4 \cdot \pi \cdot d / L}{\sinh(4 \cdot \pi \cdot d / L)} \right]^{-0.5} \quad (25)$$

burada,

$H$  : Dalga yüksekliği,

$K_s$  : Sığlaşma katsayısıdır.

$K_s$  katsayısı,  $d/L_o$  değerine bağlı olarak Ağırlık Dalgaları Tablolarından (GWT) da alınabilir [24, 33, 34].

#### 1.4.6.2. Dalga Kırınımı (Wave Diffraction)

Dalga kırınımı , dalga cephesi boyunca yanal enerji transferi olayıdır. Bir dalga katarı bir engelle karşılaştığında dönme olayı oluşur. Yanal enerji transferi olmasaydı, dalgalar, engelin arkasındaki bölgede herhangi bir değişikliğe uğramadan ilerlemeye devam ederlerdi. Oysaki gerçek akışkanlarda enerjinin çok olduğu yerden az olduğu yere doğru bir enerji geçişi olmak durumundadır. Bu sebeple, engelin arkasındaki dalganın sürekliliğini sağlayacak şekilde bir miktar dalga oluşur ve bu şekilde dalga engelin arkasına dönmüş olur. Kırınım sonucu dalgaların yönü değiştiği gibi yüksekliği de azalır.

Dalga kırınımı kıyı mühendisliğinde önemli bir yer tutar. Özellikle dalgakıran yapılarında, liman giriş ağzı yeri ve liman içi çalkantıları bu olaya bağlıdır.

Dalgakıran arkasına dönen dalgaların büyüklüğü grafik veya sayısal yöntemlerle bulunabilirler.

Bir engele gelen  $H$  yüksekliğindeki dalga, engelin arkasında belli bir noktadaki dalga yüksekliği  $H_d$  ise, kırınım katsayısı  $K_d$

$$K_d = \frac{H_d}{H} \quad (26)$$

şeklinde tanımlanır.

Bir engelin arkasındaki değişik noktalarda, dalga yükseklikleri de değişik olacağından, farklı kırınım katsayıları elde edilir. Engelin arkasındaki, aynı dönme katsayısına sahip noktaları birleştiren eğrilere dönme çizgileri adı verilir.

Kırınım katsayıları, dalganın dalgakıran eksenine göre geliş açısına, dalgakıran tipine, boyutlarına ve geometrik özelliklerine de bağlıdır.

#### 1.4.6.3. Dalga Yansıması (Wave Reflection)

Açık denizden kıyıya doğru yaklaşan dalga bir engelle karşılaştığında, eğer engelin geometrisi ve yüzey özellikleri dalganın tamamen sönmülmesine yol açmıyorsa, gelen dalga enerjisinin bir kısmı veya tamamı geri yansır.

Dalga yansıması, çeşitli kıyı problemlerinde ve özellikle liman boyutlarının ve liman yapı tiplerinin belirlenmesinde başlıca etkenlerden birisidir. Bir limanda yansıyan ve gelen dalgaların üst üste çakışması ile büyük çalkantılar meydana gelmektedir. Yansıma katsayısı,

$$K_y = \frac{H_y}{H} \quad (27)$$

şeklindedir. Burada,

$H$  : Gelen dalga yüksekliği

$H_y$  : Yansıyan dalga yüksekliğidir.

Bu katsayı 0 ile 1 arasındadır.  $K_y = 1$  olduğunda dalganın tam yansıdığı,  $K_y = 0$  olduğunda ise tamamen sönmüldüğü söylenebilir.

#### 1.4.6.4. Dalga Kırılması (Wave Breaking)

Yerçekimi etkisiyle su parçacıklarının dalgadan ayrılması olayına ‘dalga kırılması’ denir. Dalga kırılmasının nedeni, dalga tepesindeki su parçacığı hızının ( $u$ ), dalga hızına ( $C$ ) eşit hale gelmesidir. Dalgalar kıyıya yaklaşırken dalga hızı azalırken parçacık hızı artar. Tam  $u=C$  anında dalgalar kırılır.

Kırılma noktasına kadar bir salınım halinde gelen dalgalar, bu noktadan itibaren bir kütle taşınımına dönüşerek enerjilerini kaybederler. Dalgaların kırılma noktası, katı madde taşınımı için önemli parametrelerden biridir. Kıyıya yaklaşan dalgalar, tabandan etkilenmeye başlarlar ve belirli bir noktaya geldikten sonra kırılırlar. Kırılma anındaki su derinliğine “kırılma derinliği” ( $d_b$ ), dalga yüksekliğine “ kırılma yüksekliği “ ( $H_b$ ) ve su derinliğinin dalga yüksekliğine oranına da kırılma indisi ( $\gamma$ ) adı verilmektedir.

$$\gamma = \frac{d_b}{H_b} \quad (28)$$



Kırılma indisini bulabilmek için deneysel ve teorik çalışmalardan çeşitli denklemler elde edilmiştir, [33, 35, 36, 37, 38, 39].

$$\frac{d_b}{H_b} = \frac{1}{b - a \frac{H_b}{g \cdot T^2}} \quad (29)$$

$$a = 43.75 \cdot (1 - e^{-19m}) \quad (30)$$

$$b = \frac{1.56}{1 + e^{-19.5m}} \quad (31)$$

$$H_b = \frac{H_o}{3.3 \cdot \sqrt[3]{H_o / L_o}} \quad (32)$$

Burada,

$m$  : Taban eğimidir.

Sığ suda hareket eden bir dalganın maksimum yüksekliğini sınırlayan bir sınır dalga dikliği değeri vardır ki, bu değerden sonra dalga artık dengesini kaybeder ve kırılır. Bu kritik değerde, dalga kretindeki su molekülünün hızı, dalga hızına eşit hale gelir. Bu kritik dalga dikliği aşağıdaki gibi tanımlanmıştır [39, 40]:

$$\left(\frac{H}{L}\right)_{\max} = \frac{1}{7} \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d}{L}\right) \quad (33)$$

Derin denizde  $[\tanh(2 \cdot \pi \cdot d / L)] \cong 1$  olduğundan bu denklem şu hale gelir:

$$\left(\frac{H_0}{L_0}\right)_{\max} = \frac{1}{7} \cong 0.142 \quad (34)$$

Deniz taban eğimine bağlı olarak kırılan dalga yüksekliğini hesaplamak için çeşitli formüller şöyle tanımlanmıştır [40, 41]:

$$H_b/L_b = 0.14 \tanh \left\{ (1.3) \cdot 2 \cdot \pi \cdot d_b / L_b \right\} \quad m < 0.1 \quad (35)$$

$$H_b/L_b = 0.14 \tanh \left\{ (1.3) \cdot 2 \cdot \pi \cdot d_b / L_b \right\} \quad m > 0.1 \quad (36)$$

Goda tarafından aşağıdaki denklem geliştirilmiştir [42]:

$$H_b = 0.17 \cdot L_o \cdot \left[ 1 - \exp \left( -1.5 \cdot \pi \frac{d_b}{L_o} [1 + 15 \cdot m]^{(4/3)} \right) \right] \quad (37)$$

Sunamura'nın , deneysel olarak elde etmiş olduğu dalga kırılması ile ilgili tanımlar aşağıdaki şekildedir [43]:

$$H_b = 1.09 \cdot d_b \cdot m^{0.19} \cdot (d_b/L_o)^{-0.1} \quad (38)$$

$$H_b = m^{0.2} \cdot H_o \cdot (H_o/L_o)^{-0.25} \quad (39)$$

Taban eğimine ve dalga dikliğine bağlı olarak üç çeşit dalga kırılması oluşur: Şişerek kırılma (surging), dalarak kırılma (plunging) ve dökerek kırılma (spilling). Ayrıca şişerek kırılma ile dalarak kırılma arasında geçiş kırılma çeşidi olarak çökerek (collapsing) kırılma diye dördüncü bir kırılma çeşidini kabul eden araştırmacılar vardır. Galvin ve Battjes kırılma çeşitlerini aşağıdaki şekilde tanımlamışlardır [44, 45];

$$\xi_o = \frac{m}{\sqrt{H_o / L_o}} \quad (40)$$

$$\xi_b = \frac{m}{\sqrt{H_b / L_o}} \quad (41)$$

Çizelge 2. Dalga kırılma tipleri

Kırılma Türü	$\xi_0$	$\xi_b$
Taşarak ve Çökerek	$3.3 < \xi_0$	$2.0 < \xi_b$
Dalarak	$0.5 < \xi_0 < 3.3$	$0.4 < \xi_b < 2.0$
Dökülerek	$\xi_0 < 0.5$	$\xi_b < 0.4$

Le Mehaute ve Koh, dalga kırılma noktasında geliş açısının değişimini aşağıdaki gibi belirlemiştir [46]:

$$\alpha_b = (0.25 + 0.55 \cdot (H_o / L_o)) \cdot \alpha_o \quad (42)$$

Dalga kırılma derinliğini ve yüksekliğini, dalgaları etkileyen bütün parametreleri dikkate alarak hesaplamak için en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri aşağıda verilmiştir:

- $d_b$  için bir  $d_1$  seçilir,
- $d_1$ 'e bağlı olarak  $L_1$  hesaplanır (GWT tablolarından veya dalga uzunluğunu doğrudan veren eşitliklerden),
- $L_1$ 'den  $K_r, K_s$  hesaplanır (GWT'den veya ilgili eşitliklerden),
- $H'_0 = K_s \cdot K_r \cdot H_0$  hesaplanır,
- Goda'nın grafikleri kullanılarak Birben tarafından elde edilmiş olan (43) formülden  $H_b$  hesaplanır[47],
- $H_b = (H'_0/T)^2 + 0.8 \cdot m^{0.125} \cdot T^{0.5} \cdot (H'_0)^{0.75} + 0.785 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 \quad (43)$
- $d_2$  (29) eşitliğinden hesaplanır,
- $d_1 = d_2$  ise  $d_b = d_1$  alınır ve kırılma anındaki dalga yüksekliği, hesaplanan  $H_b$  olur,
- $d_1 \neq d_2$  ise  $d_1 = d_2$  alınır ve işlemler baştan itibaren  $d_1 = d_2$  oluncaya kadar tekrar edilir.

#### 1.4.6.5. Dalga Sapması (Wave Refraction)

Dalgalar deniz tabanındaki değişmelerin, akıntuların ve diğer olayların (örneğin rüzgarın) etkisiyle sarmaya maruz kalırlar. Dalgalar, geçiş bölgesine ( $1/25 < d/L < 1/2$ ) girdiklerinde deniz tabanıyla temas etmeye başlarlar. Bu bölgede, derinliğin azalmasıyla dalga hızları dolayısıyla da boyları azalır. Derinde bulunan dalganın bir kısmı, sığdakine kıyasla daha hızlı hareket eder ve dalga cephesi, kıvrılarak taban konturlarına paralel konuma gelmeye çalışır. Bu kıvrılmaya 'derinlik değişimiyle oluşan dalga sapması' denir.

Deniz tabanındaki akıntılar, dalgalarla belirli bir açıyla keşiştiklerinde dalgaların sarmalarına sebep olurlar. Özellikle cezir (ebb tide) akıntuları, akarsu ağızlarındaki akıntılar, okyanus akıntuları ve kıyı boyu akıntılar dalga sarmasına, bunun sonucu olarak da dalga yönünün, yüksekliğinin ve dalga dikliğinin değişmesine sebep olurlar. Akıntılar etkisiyle dalga sarmasının belirlenmesi oldukça güçtür.

Dalga sarması aşağdaki nedenlerden dolayı çok önemlidir:

1. Dalga yüksekliğinin artmasına veya azalmasına neden olur.
2. Kırılma anındaki dalgaların yaklaşma açısını kontrol eder.
3. Kumsalda erozyon veya yığılma etkisiyle taban topografyasının değişmesini belirler.
4. Sapma analizleriyle yakın kıyıdaki batimetrimin tanınmasını sağlar.

Deniz tabanı değişmesiyle oluşan dalga sarmasının belirlenmesinde bir çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda yapılan ortak kabuller şöyledir:

1. Dalga ortogonalleri arasında dalga enerjisi sabittir.
2. Dalga hareket yönü, dalga cephelerine diktir.
3. Dalga hızı, belirli bir yerde bu yerin derinliğine ve verilen periyoda bağlıdır.
4. Taban topografyası yavaş değişir.
5. Dalgalar, uzun tepeli, sabit periyotlu, küçük genlikli ve düzenlidir.
6. Akıntuların, rüzgarın ve deniz tabanından dalga yansımalarının etkileri ihmal edilebilir.

### 1.4.6.5.1. Snell Kanunu

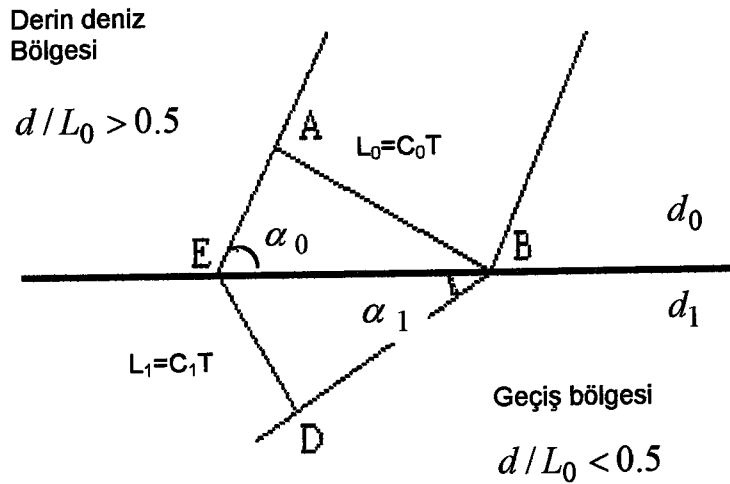
Dalga sapması diyagramlarının çizilmesinde kullanılan ve ismine "*Ortogonal Yöntem*" denen yöntem, Snell Kanunu'na bağlı olarak geliştirilmiştir (Şekil 2).

Şekil 2'de AE ve BD dalga cepheleri, AB ve ED dalga ortogonalleridir. Şekilden görüldüğü gibi  $d_0$ 'dan  $d_1$ 'e ( $d_0 > d_1$ )'e ani düşen bir basamaktan geçen bir dalga göz önüne alalım. BE çizgisi, basamağı göstermektedir. T periyodunda ve tepe çizgisi üzerinde bulunan bir A noktası,  $C_0$  hızı ile  $L_0$  yolunu kat ederek B'ye gidecektir. Aynı zamanda E noktası da  $C_1$  hızı ile ( $C_1 < C_0$ ) D'ye ( $L_1 < L_0$ ) gidecektir.  $L_1 < L_0$  olduğundan tepe çizgisinin yeni pozisyonu (BD) dönme hareketi yapacak ve BE basamağına yönelecektir. Böylece,  $\alpha_1 < \alpha_0$  olur. Geometriden;

$$\text{Sin}\alpha_0 = L_0/BE, \text{Sin}\alpha_1 = L_1/BE \quad (44)$$

$$\frac{\text{Sin}\alpha_1}{\text{Sin}\alpha_0} = \frac{L_1}{L_0} = \frac{C_1}{C_0} = \frac{\tanh(2 \cdot \pi \cdot d_1 / L_1)}{\tanh(2 \cdot \pi \cdot d_0 / L_0)} = \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d_1}{L_1}\right) \quad (45)$$

yazılabilir. Bu da Snell Kanunu'nun ifadesidir. Bu kanun, dalga sapma hesabı için temel denklemi sağlamaktadır.



Şekil 2. Snell Kanunu

### 1.4.6.5.2. Düz Paralel Konturlarda Dalga Sapması

Deniz tabanındaki değişimler kopmleks olmayıp düzgün ve yavaş olduğunda bu yöntem dalga sapmasının hesabında kesin sonuç vermektedir. Dalga sapması, derinlik konturları;  $d/L_0 = 0.5, 0.4$  vb gibi rölatif derinliklere göre hesaplanır (şekil 3). Derinlik değişimleri, orta konturdaki basamaklar olduğu varsayılarak hesaplar yapılır. Böylece, Snell Yasası'nın uygulaması yapılır [48].

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \alpha_0} = \frac{C}{C_0} \quad (46)$$

Bu formülden dalga sapmasının yönü,

$$\alpha = \arcsin \left[ \frac{C}{C_0} \sin \alpha_0 \right] = \arcsin \left[ \frac{L}{L_0} \sin \alpha_0 \right] \quad (47)$$

belirlenir. Sapma katsayısı olarak:

$$K_r = \sqrt{\frac{b_0}{b}} = \sqrt{\frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha}} \quad (48)$$

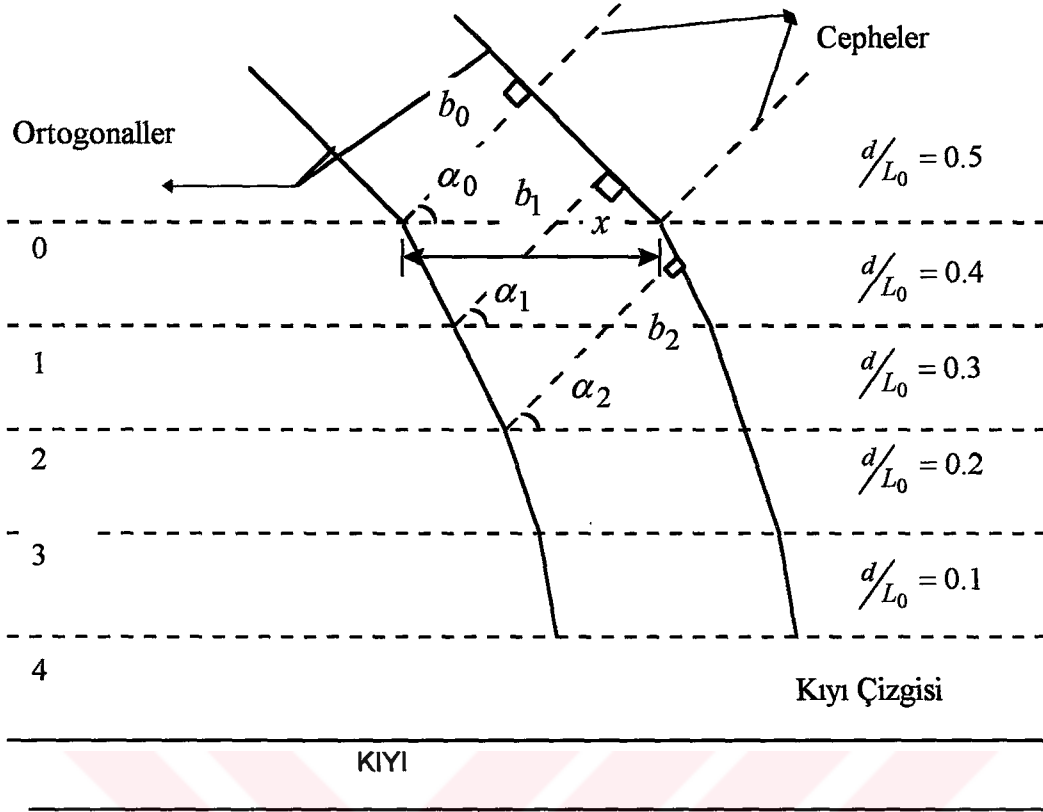
hesaplanır. Bu denklemlerde:

$K_r$  : Sapma katsayısı

$\alpha_0$  : Derin deniz dalga cephelerinin kıyı çizgisiyle yapmış olduğu açı

$\alpha$  : Sapan dalga cephelerinin kıyı çizgisiyle yapmış olduğu açı

$b$  : Dalga ortogonalleri arasındaki uzaklıktır.

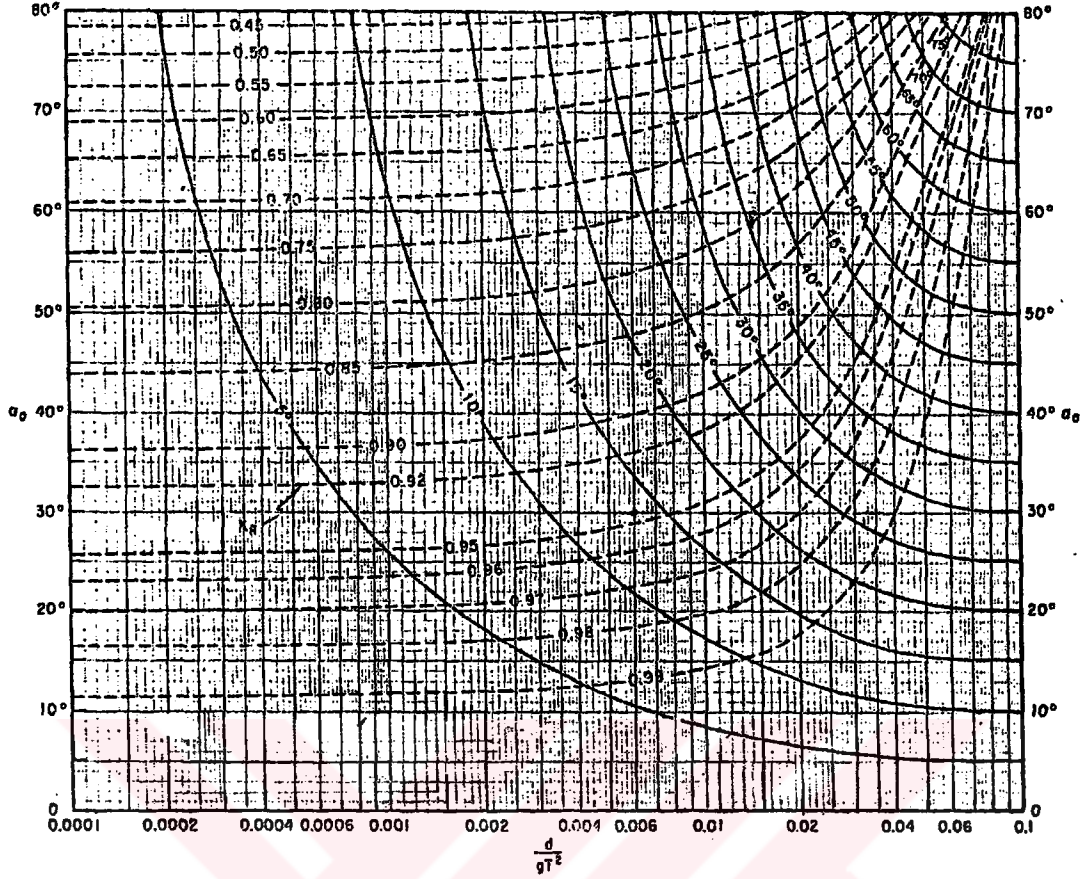


Şekil 3. Düz paralel konturlarda dalga sapması

Düz paralel konturlarda dalga sapması, yukarıdaki formüller yardımıyla oluşturulmuş aşağıdaki Şekil 4 yardımıyla da hesaplanabilir.

#### 1.4.6.5.3. Karmaşık Konturlarda Dalga Sapması

Kıyı topografyası genellikle çok karmaşıktır, taban konturları birbirine ve kıyıya paralel değildir. Bu durum, özellikle yakın kıyıda çok daha belirgindir. Karışık topografya durumunda, Snell kanunundan yararlanılarak yaklaşık hesap yapan grafik yöntemler geliştirilmiştir. Bu durumlarda sapma hesabı başlıca iki yöntemle yapılır: Dalga cephesi yöntemi, ortogonal yöntemi.



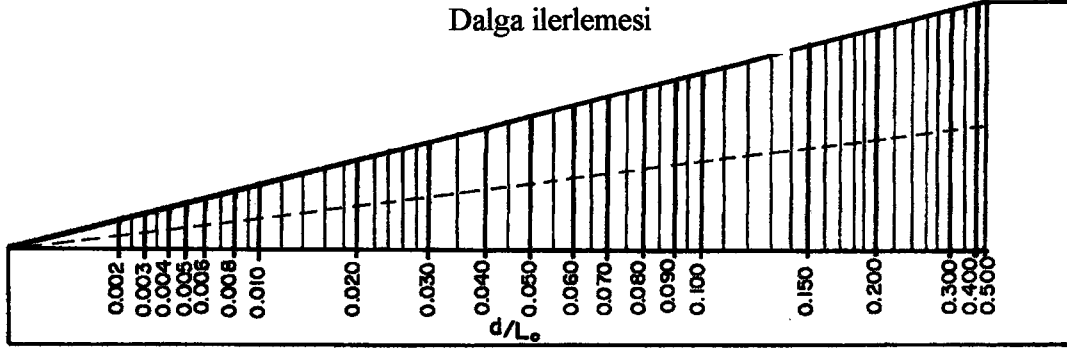
Şekil 4. Düz paralel konturlarda dalga sapması hesabı

#### 1.4.6.5.3.1. Dalga Cephesi Yöntemi

Dalga sapması hakkında çok genel bilgi veren ve dalga sapma katsayısını hesaplayabilen bu yöntem 1948 yılında Johnson, O'Brien ve Isaacs tarafından geliştirilmiştir[24, 34]. Bu yöntemin uygulanabilmesi için farklı ölçeklerde hazırlanmış deniz taban topografyasını belirleyen haritalara ihtiyaç vardır. Bu haritalar üzerinde derinlik konturlarının doğru bir şekilde çizilip hazırlanması gerekir. Derin deniz sınırında düz olan dalga cephesi, geçiş bölgesine girdiğinde hızının azalmasıyla kıvrılarak düzlüğünü kaybedecektir ve dolayısıyla dalga sapması oluşacaktır.

Bu yöntem, dalga tepelerine dik yönde dalga cephesinin ilerlemesini belirler. Her harita ölçeğinde  $d/L_0$  değerleri için hazırlanmış dalga cephesinin ilerlemesini veren bir ölçek vardır (Şekil 5). Bu ölçek yardımıyla dalga sapması, harita üzerinde dalga





Şekil 5. Dalga cephesi yönteminde kullanılan ölçek

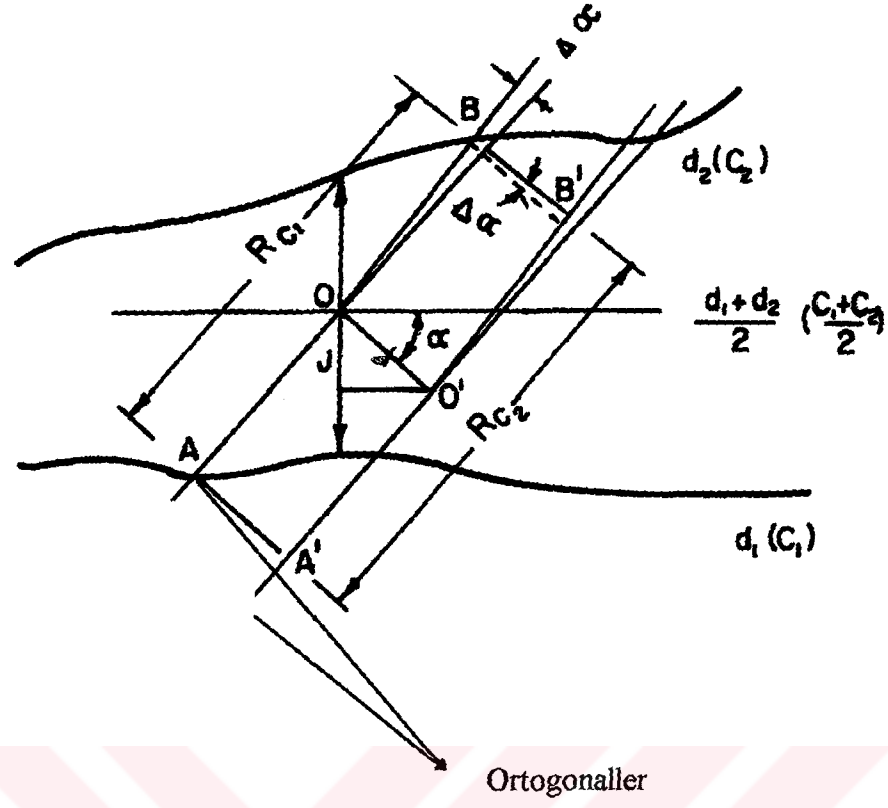
cephelerinin teşkiliyle belirlenir. Kompleks deniz tabanlarında daha fazla dalga cephesi kullanılmalıdır. Bu yöntemin en büyük sakıncaları ise; dalga cephelerinin sürekli düzeltilmesi ve her dalga periyodu için farklı ölçeğin kullanılması zorunluluğudur.

#### 1.4.6.5.3.2. Ortogonal Yöntemi

Bu yöntemde dalga ortogonalleri derin deniz sınırından kıyıya doğru adım adım çizilerek dalga sapması belirlenir. Johnson, O'Brien ve Isaacs tarafından geliştirilmiş bu yöntemde yapılan kabuller şunlardır [34]:

1. Harita eğimindeki ani düzensizliklerde bile konturlar çizilebilir.
2. Bitişik konturlar arasında derinlik değişimi lineerdir.
3. Bitişik konturlar arasında dalga boyu ve hız değişimi lineerdir.
4. Konturlar arasında eğrilik çapı sabittir.
5. Yay açısındaki değişme ortogonal açısındaki değişime eşittir.
6. Taban özellikleri dalga boyunu etkilemeyecek kadar düzenlidir. Deniz tabanı dalgada titreşimi oluşturmaz.
7. Yaklaşma ve uzaklaşma açıları, sapma açısıyla karşılaştırıldıklarında daha küçüktür.
8. Bitişik konturlarla eşit açılar yapacak şekilde iki kontur arasında orta kontur çizilebilir.

Dalga sapması için hazırlanan ortogonal teorisi aşağıdaki şekle dayanmaktadır:



Şekil 6. Ortogonal yönteminde dalga sapması

$$\tan \Delta\alpha \approx \sin \Delta\alpha \approx \Delta\alpha = \frac{R_{C_2} - R_{C_1}}{BB'} \quad (49)$$

$$AA' = OO' = BB' = d \quad (\text{diferansiyel aralığı})$$

$$\Delta\alpha = \frac{R_{C_2} - R_{C_1}}{d} \quad (50)$$

$$R_{C_2} = C'' \cdot t \quad (51)$$

$$R_{C_1} = C'' \cdot t \quad (52)$$

$$\Delta\alpha = \frac{C' \cdot t}{d} \quad (53)$$

$$C'' = C' + \Delta C \quad (54)$$

$$\frac{\Delta C}{C_1 - C_2} = \frac{d \cdot \tan \alpha}{J \cdot \cos \alpha} = \frac{d \cdot \sin \alpha}{J} \quad (55)$$

$$C'' = C' \cdot \frac{C_1 - C_2}{J} \cdot d \cdot \sin \alpha \quad (56)$$

$$t = \frac{R_{C_1}}{C'} \quad (57)$$

$$C' = \frac{C_1 + C_2}{2} \quad (58)$$

$$\Delta\alpha = \frac{R_{C_1}}{J} \cdot \frac{C_1 - C_2}{\frac{1}{2} \cdot (C_1 + C_2)} \cdot \sin \alpha \quad (59)$$

$$\Delta\alpha = \frac{R_C \cdot \Delta C}{J \cdot C_{ort}} \cdot \sin \alpha \quad (60)$$

$$\Delta\alpha = \frac{R_C \cdot \Delta L}{J \cdot L_{ort}} \sin \alpha; \alpha > 80 \text{ derecede} \quad (61)$$

Genel durumlar için ;  $\frac{R_C}{J} = \sec \alpha$  olduğundan

$$\Delta\alpha = \frac{\Delta L}{L_{ort}} \tan \alpha \quad (62)$$

Bu iki denklem; harita ölçeğinden ve  $\Delta L / L_{ort}$  oranı boyutsuz olduğu için de dalga periyodundan bağımsızdır. Bu denklemler göstermiştir ki, dalga sapması,  $L = L_{ort}$  derinlik konturunda dalga hızının değişimi olarak ifade edilebilir (Şekil 6). Buradan her adım için geçerli olan aşağıdaki denklem yazılabilir:

$$\frac{L_1}{\sin \alpha} = \frac{L_2}{\sin(\alpha + \Delta\alpha)} \quad (63)$$

Ortogonal yönteminde, yukarıdaki denkleme dayandırılarak hazırlanmış Şekil 7'de gösterilen şablon yardımıyla dalga sapması belirlenir.

#### **a. Ortogonal Yönteminin $\alpha$ Açısının 80 Dereceden Küçük Olduğu Durumlara Uygulanması**

$\alpha$  açısı, taban konturlarıyla dalga cephesi arasındaki açı olmak üzere her ortogonal için istenilen noktadan başlanılarak derine veya kıyıya doğru Şekil 7'de verilen şablon kullanılarak dalga sapması belirlenebilir. Başlangıç noktasındaki dalga verilerinin bilinmesi ve hesap yapılacak bölgenin taban topografyası üzerine derinlik konturlarının çizilip hazırlanması gerekir. Hesap sırası aşağıdaki gibidir:

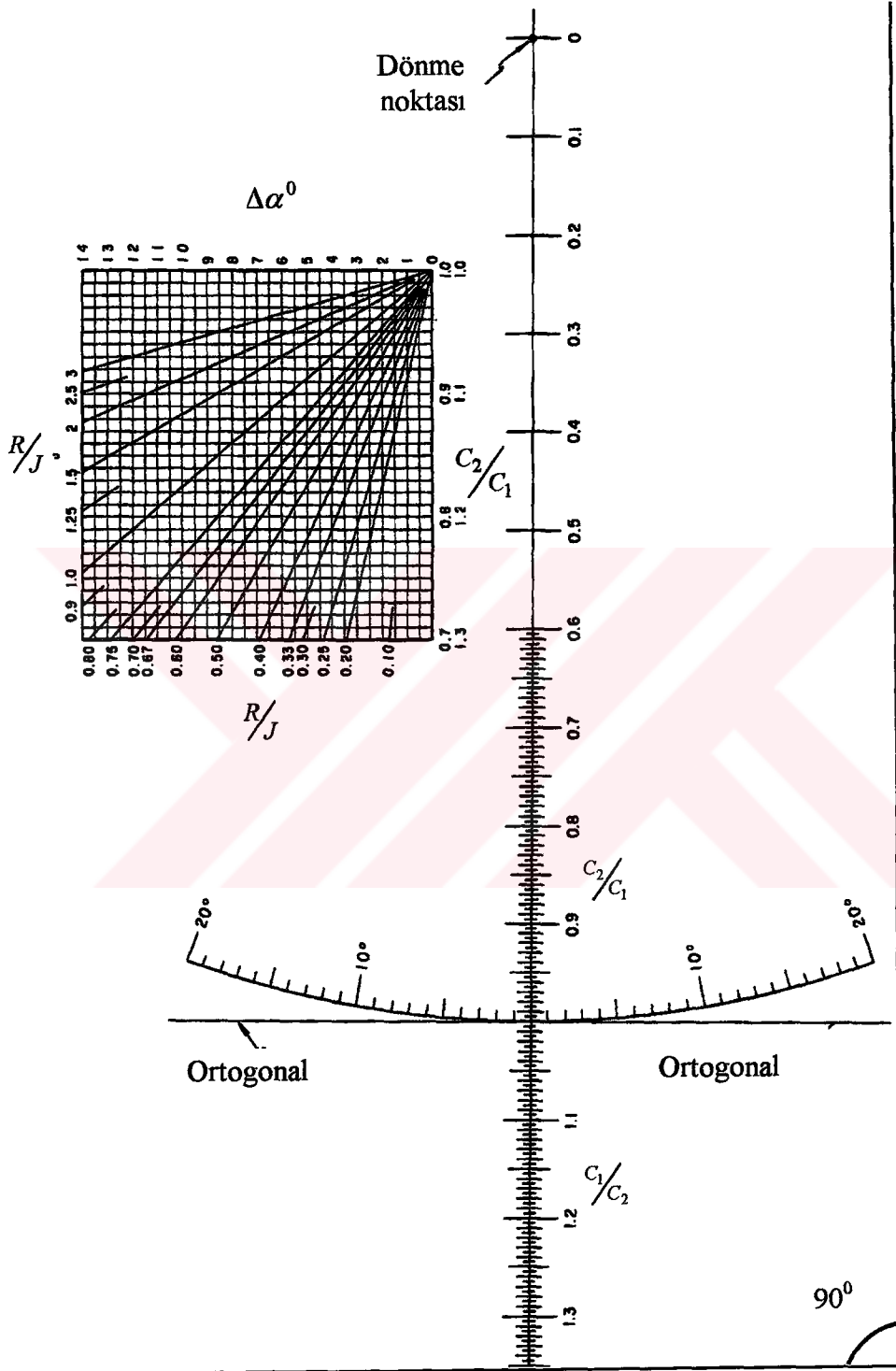
1. Eğer derin denizden başlanılarak dalga sapması hesaplanacaksa; konturların birbirine ve kıyıya paralel olduğu derinliğe kadar düz paralel kontur durumundaki hesaplar yapılır.

2. Şablon yardımıyla hesap yapılacak bölgedeki tüm derinlik konturların ortalarından enterpolasyonla orta kontur diye adlandırılan yeni konturlar çizilir.

3. Ardışık iki konturdaki hızların birbirine oranı ( $C_1/C_2$ ) hesaplanır.

4. Başlangıçtaki ortogonal çizgisi orta kontura kadar uzatılır. Bu kesişim noktasında orta kontura teğet çizilir. Şablondaki ortogonal çizgisi gelen dalga ortogonal ile üst üste konur. Bunun için şablonun asetat kağıdı gibi şeffaf bir kağıda çizilmesi kolaylık sağlar.

5. Şablon, dönme noktası etrafında  $C_1/C_2$  hız oranı; orta kontur teğetini kesinceye kadar döndürülür. Şablondaki ortogonal yönü, yeni ortogonal yönüdür.



Şekil 7. Sapma hesabı şablonu

6. Birinci kontur ile orta kontur arasındaki dalga ortogonal uzunluğu, orta kontur ile ikinci kontur arasındaki dalga ortogonal uzunluğuna eşit olacak şekilde düzeltme yapılır.

7. Ardışık kontur aralıklarında istenilen derinliğe kadar yukarıdaki adımlar tekrar edilir.

Eğer Ortogonal sığ sulardan derin sulara doğru çizilmek isteniyorsa,  $C_1/C_2$  hız oranı yerine  $C_2/C_1$  hız oranı kullanılarak aynı yöntem uygulanır [24].

### **b. Ortogonal Yönteminin $\alpha$ Açısının 80 Dereceden Büyük Olduğu Durumlara Uygulanması**

$\alpha$  açısının 80 dereceden büyük olduğu derinliklerde yukarıdaki yöntem kullanılamaz. Bu durumda ortogonal, derinlik konturlarını kesmez, onlara hemen hemen paralel gider. Böyle durumlarda kontur aralığından, küçük kısımlara ayrılarak geçiş yapılabilir. Tüm aralık, küçük aralıklar serisi şeklinde bölünür. Her bir aralığın ortasındaki ortogonal açısı döndürülür. Şekil 8'de gösterildiği gibi ortogonal geçiş aralığı küçük aralıklara (hücrelere) bölünmüştür.

Şekil 8'de:

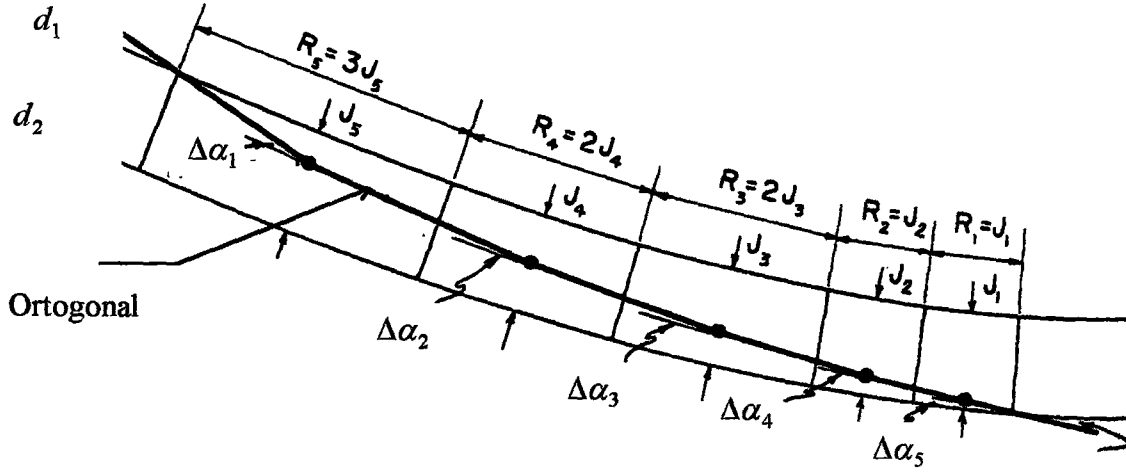
$J$  : Dönme noktasında konturlar arasındaki mesafe

$R$  : Ortogonal boyunca seçilen aralık

$R$  geçiş çizgisi aralığı; konturlar arasındaki  $J$  mesafesinin bir oranı olarak keyfi seçilir. Tüm aralık için  $C_2/C_1$  hız oranı hesaplanır.

Şekil 7'de verilen şablondaki grafik,  $R/J$  oranının değişik değerleri için, ortogonal dönme açısını ( $\Delta\alpha$ );  $C_2/C_1$  hız oranının bir fonksiyonu olarak verir.  $\Delta\alpha$  değeri, hücre merkezindeki gelen ortogonalın sapma açısıdır. Bu yöntemle dalga ortogonalı şu şekilde belirlenir:

Gelen ortogonal hücre merkezine kadar uzatılır, ortogonal dönme açısı  $\Delta\alpha$  şablondaki grafikten okunur. Bu işlem,  $\alpha$  açısı 80 dereceden küçük olduğu noktaya kadar ardışık hücrelerde tekrarlanır. Bu noktada bu işlem durdurularak  $\alpha$  açısının 80 dereceden küçük olduğu durumdaki yöntem kullanılır [24].



Şekil 8.  $R/J$  yönteminde ortogonal geçiş aralığının bölünmesi

Grafik yöntemlerin en büyük sakıncaları; bu yöntemleri uygulayan kişinin bu konuda uzman (tecrübeli) olmasının gerekmesi; yöntemi uygulamanın çok fazla vakit alması ve sonuçların kişiden kişiye az da olsa farklılıklar göstermesidir. Bu nedenle, grafik yöntemleri kullanma yerine sayısal modelleme teknikleri geliştirilmiş ve kullanılmaya başlanmıştır.

#### 1.4.6.5.4. Akıntı Etkisiyle Dalga Sapması

Dalgalar; akıntıyla karşılaştıklarında boyları, yönleri, diklikleri ve hızları değişir. Değişimin büyüklüğü akıntının şiddetine, hızına ve yönüne bağlıdır [34]. Bu çalışmada akıntının etkisi dikkate alınmadığından, bu konu burada açıklanmayacaktır.

## **2. YAPILAN ÇALIŞMALAR**

### **2.1 Giriş**

Dalga sapması, düz ve paralel konturlu topografyalarda analitik olarak kolayca belirlenebilmesine rağmen; düzensiz topografyalarda oldukça zaman alıcı, sıkıcı, kullanımda uzmanlık gerektiren ve sonuçları kişilere bağlı olabilen grafik yöntemlerle oldukça zor belirlenebilmektedir. Bu sebeplerden dolayı, günümüzde düzensiz topografyalarda grafik yöntemler yerine sayısal yöntemler geliştirilmeye ve bilgisayar yardımıyla hesap yapılmaya başlanmıştır.

Sayısal yöntemlerde, grafik yöntemlerle hesap yaparken kullanılan derinlik konturları yerine, hesap yapılacak bölgeyi karelaj oluşturacak şekilde dilimlere bölerek bu dilimler yardımıyla hesap yapılmaktadır.

Dilim boyutları, sonucun istenilen hassasiyetine göre seçilebilir; başlangıç şartları bilindiğinde derin deniz sınırından başlanma şartı aranmaz.

Sayısal yöntemler için diferansiyel denklemler ortogonal boyunca oluşturulur, taban topografyasının etkisi hızın bir fonksiyonu olarak dikkate alınır.

### **2.2. Sapma - Sığlaşma Hesabında Yapılan Kabuller**

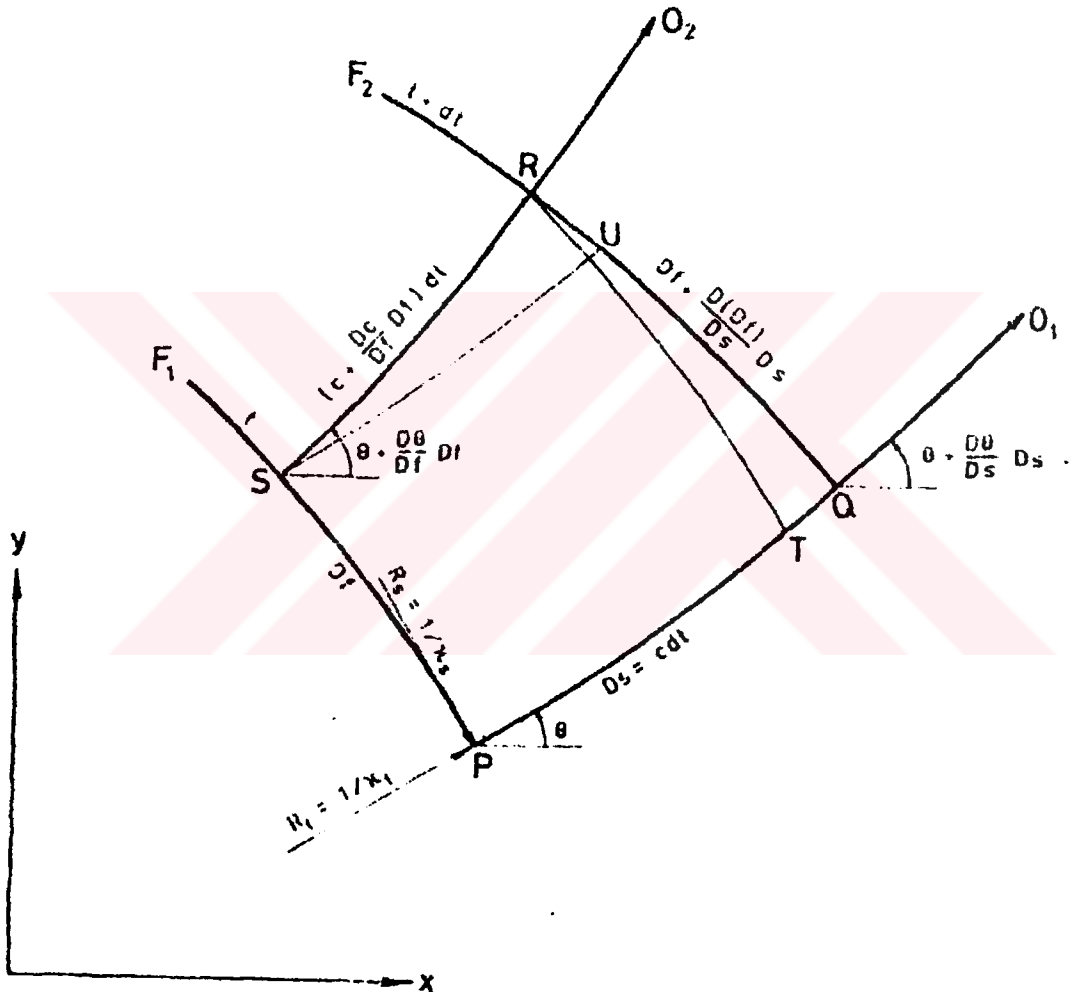
Sunulacak olan bu yaklaşımda, düzenli, uzun tepeli, küçük genlikli yüzey dalgaları kullanılmış, akıntının, rüzgarın, sızmanın ve türbülans dolayısıyla taban sürtünmesinin etkileri ihmal edilmiştir.

Yansımanın ve dönmenin etkileri dikkate alınmamış, bitişik ortogonaller arasında enerji kaybı olmadığı kabul edilmiştir. Ayrıca ortogonallerin birbirini kesmediği (kaustik oluşmadığı) kabul edilmiştir [3].



### 2.3. Dalga Sapma Yönünün Belirlenmesi

Dalga sapma yönünün belirlenmesi için ilk önce enerjinin yayıldığı yol bulunmalıdır. Şekil 9'da belirli bir zaman aralığıyla ayrılmış, ardışık iki dalga ortogonalı  $O_1$  ve  $O_2$  ve ardışık iki dalga cephesi  $F_1$  ve  $F_2$  gösterilmiştir. P noktası dikkate alındığında, dalga ortogonalleri ve cepheleri arasındaki sonsuz küçük mesafeler sırasıyla,  $Df$  ve  $Ds$ ' dir.



Şekil 9. Ardışık dalga ortogonalleri ( $O_1, O_2$ ) ve cepheleri ( $F_1, F_2$ )

Şekil 9'da

$$Ds = C \cdot dt \quad (64)$$

Şekil 9'da gösterildiği gibi  $s$  mesafesi dalga hareket yönünde pozitif alınır.  $x$ - eksenine dalga ortogonal arasındaki  $\theta$  açısının pozitif yönü saat dönüşünün tersi yönündedir.

Şekil 9'daki  $RTQ$  ve  $SUR$  üçgenlerinden  $Ks$  ve  $Kf$  eğrilikleri denklem (64) kullanılarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

Dalga ortogonalı için:

$$Ks = \frac{D\theta}{Ds} = -\frac{1 \cdot Dc}{C \cdot Df} \quad (65)$$

Dalga cephesi için:

$$Kf = \frac{D\theta}{Df} = \frac{1}{Df} \cdot \frac{D(Df)}{Ds} \quad (66)$$

Kartezyen koordinat sisteminde aşağıdaki basit operatörlerle (denklem (67 ve 68)) ortogonaller ve cepheler boyunca oluşan değişimler ifade edilebilir.

$$\frac{D}{Ds} = \cos\theta \cdot \frac{\partial}{\partial x} + \sin\theta \cdot \frac{\partial}{\partial y} \quad (67)$$

$$\frac{D}{Df} = -\sin\theta \cdot \frac{\partial}{\partial x} + \cos\theta \cdot \frac{\partial}{\partial y} \quad (68)$$

(64) ve (65) denklemleriyle birlikte  $d\theta/dt = -Dc/Df$  eşitliğini, denklem (68)'de kullanarak dalga ortogonallerinin koordinatlarını ve yönünü zamanın bir fonksiyonu olarak belirleyen basit diferansiyel denklemler geliştirilebilir [49].

$$\frac{dx}{dt} = C \cdot \cos \theta \quad (69)$$

$$\frac{dy}{dt} = C \cdot \sin \theta \quad (70)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\partial C}{\partial x} \cdot \sin \theta - \frac{\partial C}{\partial y} \cdot \cos \theta \quad (71)$$

Bu denklemlerde:

$C$  : Dalga hızı

$x, y$  : Ortogonalin yolunu belirleyen koordinatlar

$\theta$  : Ortogonalin x- eksenine yaptığı açı (ortogonal açısı)

$dt$  : Seçilen zaman aralığıdır.

#### 2.4. Dalga Sapma Katsayısının Belirlenmesi

Munk ve Arthur, ortogonal boyunca sapma hesabı için ikinci dereceden homojen bir diferansiyel denklem geliştirmişlerdir [50].

$$\frac{D^2 \beta}{Ds^2} + p_s \cdot \frac{D\beta}{Ds} + q_s \cdot \beta = 0 \quad (72)$$

Burada:

$$p_s = -\frac{1}{C} \cdot \left( \frac{\partial C}{\partial x} \cdot \cos \theta + \frac{\partial C}{\partial y} \cdot \sin \theta \right) \quad (73)$$

$$q_s = \frac{1}{C} \cdot \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \cdot \sin^2 \theta - \frac{\partial^2 C}{\partial x \partial y} \cdot 2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \cdot \cos^2 \theta \right) \quad (74)$$

$$\beta = \frac{Df}{Df_b} \quad (75)$$

Burada:

$Df$  : Dalga ortogonaller arasındaki mesafe

$Df_b$  : Başlangıç noktasındaki dalga ortogonalleri arasındaki mesafe

$\beta$  : Ortogonal ayırma faktörüdür.

Skovgaard, Jonsson ve Bertelsen bu denklemleri, bağımsız değişken olarak zamanı kullanarak yeniden düzenlemiştir [3].

$$\frac{D\beta}{Ds} = \frac{1}{C} \cdot \frac{d\beta}{dt} \quad (76)$$

$$\frac{D^2\beta}{Ds^2} = \frac{1}{C^2} \cdot \left( \frac{d^2\beta}{dt^2} - \frac{Dc}{Ds} \cdot \frac{d\beta}{dt} \right) \quad (77)$$

Denklem (76) ve (77), denklem (72)'de kullanılarak, bağımsız değişkeni zaman olan yeni bir diferansiyel denklem elde edilir:

$$\frac{d^2\beta}{dt^2} + \left( C \cdot p_s - \frac{Dc}{Ds} \right) \cdot \frac{d\beta}{dt} + C^2 \cdot q_s \cdot \beta = 0 \quad (78)$$

Denklem (73) ve denklem (67) kullanılarak,

$$\frac{d^2\beta}{dt^2} + p_t \cdot \frac{d\beta}{dt} + q_t \cdot \beta = 0 \quad (79)$$

diferansiyel denklemi elde edilir. Bu denklemdeki katsayılar aşağıdaki kısmi diferansiyel denklemlerle ifade edilebilir.

$$p_t = 2 \cdot C \cdot p_s = -2 \cdot \left( \frac{\partial C}{\partial x} \cdot \cos \theta + \frac{\partial C}{\partial y} \cdot \sin \theta \right) \quad (80)$$

$$q_t = C^2 q_s = C \cdot \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \cdot \sin^2 \theta - \frac{\partial^2 C}{\partial x \partial y} \cdot 2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \cdot \cos^2 \theta \right) \quad (81)$$

Sapma katsayısı, denklem (79)'un çözümünden elde edilen ortogonal ayırma faktörü “ $\beta$ ” ‘ya bağlıdır.

$$K_r = \left( \frac{Df_b}{Df} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (82)$$

Veya

$$K_r = \beta^{-\frac{1}{2}} \quad (83)$$

## 2.5. Dalga Sığlaşma Katsayısının Belirlenmesi

Sığlaşma katsayısı, denklem (25) yardımıyla analitik olarak belirlenebilir.

## 2.6. Dalga Yüksekliğinin Belirlenmesi

Dalga yüksekliğinin belirlenmesinde bitişik iki dalga ortogonalı arasındaki enerji korunumundan yararlanılmaktadır.

$$E_f \cdot D_f = \frac{1}{16} \cdot \rho \cdot g \cdot H^2 \cdot C \cdot (1+G) \cdot D_f \quad (84)$$

Bu denklemde:

$$G = \frac{2 \cdot k \cdot d}{\sinh(2 \cdot k \cdot d)} \quad (85)$$

$$k = \frac{2 \cdot \pi}{L} \quad (86)$$

$E_f$ : İki ortogonal arasındaki dalga enerjisidir.

Başlangıç durumundaki dalga yüksekliği ile (84) denkleminin oranından aşağıdaki ifade yazılabilir.

$$\frac{H}{H_0} = K_s \cdot K_r \quad (87)$$

Denklem (87) yardımıyla , dalga kırılması oluşmadan önceki, dalga yüksekliğinin ( $H$ ) değişimi, başlangıç dalga yüksekliğine ( $H_0$ ), hesaplanan sığlaşma ( $K_s$ ) ve sapma ( $K_r$ ) katsayılarına bağlı olarak hesaplanabilir [49].

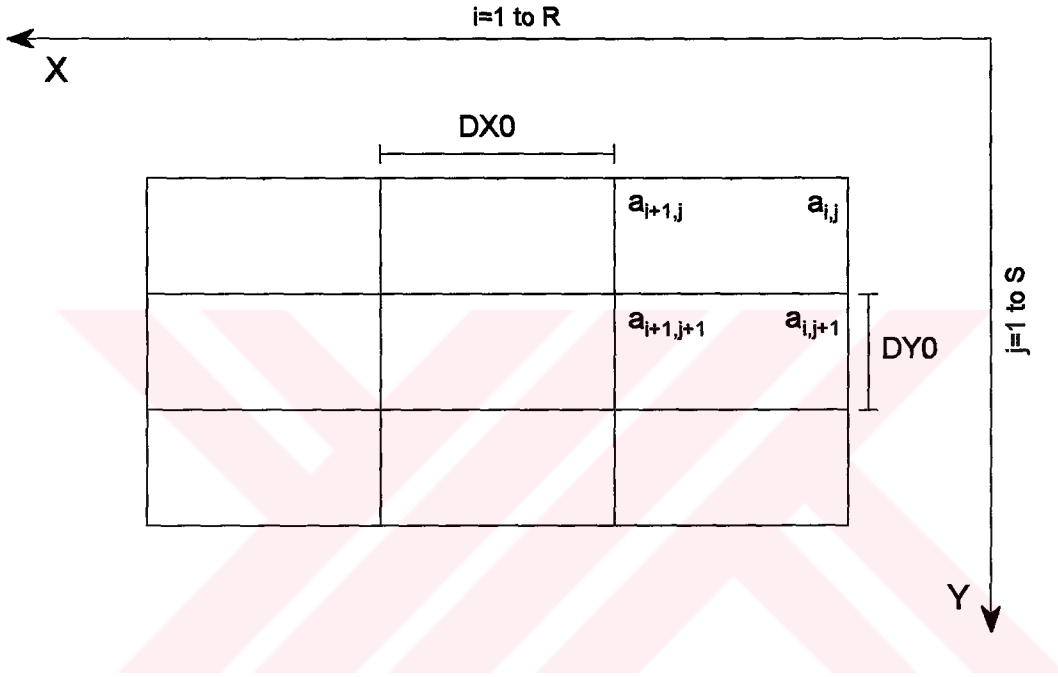
## 2.7. Diferansiyel Denklemlerin Sayısal Çözümleri

### 2.7.1. Karelaj Ağının Oluşturulması

Geliştirilen diferansiyel denklemlerin sayısal olarak çözülebilmesi için, adi ve kısmi türevler, sonlu farklar yardımıyla yeniden düzenlenmiştir. Sonlu farklar tekniği kullanımında gerekli olan karelaj ağı, taban topografyasını temsil edecek şekilde oluşturulmuştur. Çözümün doğruluğu, bu karelaj ağının iyi bir şekilde teşkil edilmesiyle doğrudan ilişkilidir.

Uygulamacılar tarafından yapılacak çalışmada, karelaj ağının boyutları; hesap hassasiyetine, kullanım kolaylığına, zamana ve eldeki hazır bilgilere bağlı olarak önceden seçilebilmektedir.

Şekil 10'da büyük bir karelaj ağının dokuz dikdörtgen hücreli (dilimli) küçük bir parçası gösterilmiştir. Her hücre x-ekseni yönünde  $DX_0$  ve y-ekseni yönünde  $DY_0$  uzunluğundadır. Hücreler dikdörtgen veya kare olabilir ve boyutları her uygulama için farklı seçilebilir. Şekil 10'da verilen  $i$  ve  $j$ 'nin maksimum değerleri sırasıyla  $R$  ve  $S$ 'dir.  $R$  ve  $S$  değerleri, hesap yapılacak alanın büyüklüğüne ve hücre boyutlarına bağlıdır [51].



Şekil 10. Karelaj ağı

Taban topografyası, karelaj ağında, hücrelerin köşegenlerindeki yatay koordinatlar ve bu noktadaki kotlarla ifade edilir.

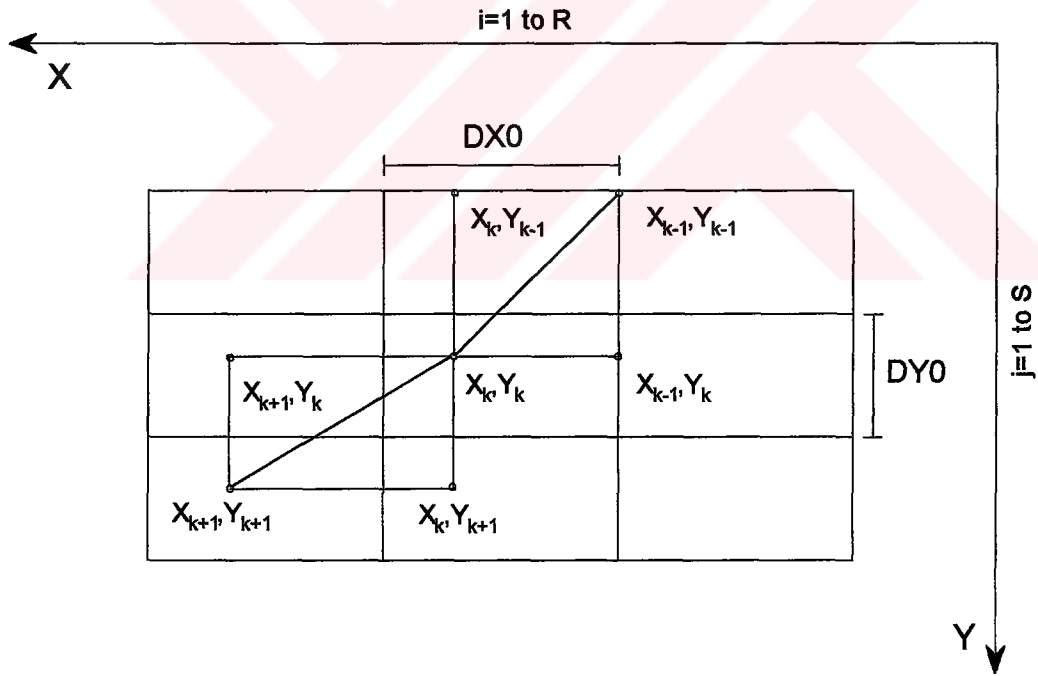
Köşegenlerdeki kotlar elle doğrudan hesaplanacağı gibi, sayısal yükseklik modelleri yöntemlerinden multikuadrik enterpolasyon yöntemiyle de belirlenebilir. Bu yöntemde, oluşturulan karelaj ağındaki hücre köşegenlerindeki kotlar, dayanak noktaları yardımıyla yapılan bilgisayar programıyla hesaplanabilmektedir [52].

## 2.7.2. Dalga Sapması Hesabında Kullanılacak Diferansiyel Denklemlerin Sayısal Çözümleri

Sapma hesabında; dalga yönünü belirlemede kullanılacak (69,70,71), dalga yüksekliğini belirlemede kullanılacak (79,80,81), adi ve kısmi türevli diferansiyel denklemler sayısal olarak yeniden düzenlenmiştir.

### 2.7.2.1. Sonlu Farklar Tekniğiyle Dalga Yönünü Belirleyen Diferansiyel Denklemlerin Düzenlenmesi

(69,70,71) diferansiyel denklemleri ileri yön sonlu farklar tekniği kullanılarak aşağıdaki gibi yazılabilir [53]. Şekil 11'de gösterilen karelaj ağında  $X_k, Y_k$  " $k \rightarrow 1 - n$ " e kadar "başlangıç noktası olmak üzere:



Şekil 11. Karelaj ağı üzerinde ortogonal yörüngesi



$$X_{k+1} = \Delta t \cdot C_{X_k, Y_k} \cdot \cos \theta_k + X_k \quad (88)$$

$$Y_{k+1} = \Delta t \cdot C_{X_k, Y_k} \cdot \sin \theta_k + Y_k \quad (89)$$

$$\theta_{k+1} = \Delta t \cdot \left\{ \frac{(C_{X_{k+1}, Y_k} - C_{X_k, Y_k}) \cdot \sin \theta_k}{\Delta X_l} - \frac{(C_{X_k, Y_{k+1}} - C_{X_k, Y_k}) \cdot \cos \theta_k}{\Delta Y_l} \right\} + \theta_k \quad (90)$$

$$\Delta X_l = X_{k+1} - X_k \quad (l=1-n) \quad (91)$$

$$\Delta Y_l = Y_{k+1} - Y_k \quad (l=1-n) \quad (92)$$

Bu denklemlerde:

$X, Y$  : Koordinatlar

$\Delta t$  : Seçilen zaman aralığı

$C$  : Dalga hızı

$\theta$  : Dalga ortogonal yönünü belirleyen sapma açısı

### 2.7.2.2. Sonlu Farklar Tekniğiyle Dalga Yüksekliğini Belirleyen Diferansiyel Denklemlerin Düzenlenmesi

İkinci dereceden kısmi türevli (79, 80,81), diferansiyel denklemlerin Şekil 11'de gösterilen  $k$  noktasına göre sayısal ifadeleri aşağıda verilmiştir [53].

$$\beta_{k+1} = \frac{-q_t \cdot \beta_k \cdot \Delta t^2 + 2 \cdot \beta_k - \beta_{k-1} + p_t \cdot \beta_k \cdot \Delta t}{1 + \Delta t \cdot p_t} \quad (93)$$

$$p_t = -2 \cdot \left\{ \frac{(C_{X_{k+1}, Y_k} - C_{X_k, Y_k}) \cdot \cos \theta_k}{\Delta X_l} + \frac{(C_{X_k, Y_{k+1}} - C_{X_k, Y_k}) \cdot \sin \theta_k}{\Delta Y_l} \right\} \quad (94)$$

$$q_t = C_{X_k, Y_k} \cdot (q_{t_1} - q_{t_2} - q_{t_3}) \quad (95)$$

$$q_{t_1} = \frac{(C_{X_{k+1}, Y_k} - 2 \cdot C_{X_k, Y_k} + C_{X_{k-1}, Y_k}) \cdot \sin^2 \theta_k}{\Delta X_l^2} \quad (96)$$

$$q_{t_2} = \frac{(C_{X_{k+1}, Y_{k+1}} + C_{X_k, Y_k} - C_{X_{k+1}, Y_k} - C_{X_k, Y_{k+1}}) \cdot 2 \cdot \sin \theta_k \cdot \cos \theta_k}{\Delta X_l \cdot \Delta Y_l} \quad (97)$$

$$q_{t_3} = \frac{(C_{X_k, Y_{k+1}} - 2 \cdot C_{X_k, Y_k} + C_{X_k, Y_{k-1}}) \cdot \cos^2 \theta_k}{\Delta Y_l^2} \quad (98)$$

### 2.7.3. Dalga Hızının Belirlenmesi

Dalga hızı ( $C$ ), denklem (11)'dan görüldüğü gibi dalga periyodu ( $T$ ), dalga boyu ( $L$ ) ve su derinliğine ( $d$ ) bağlıdır. Su derinliği, hesap yapılacak topografyadan, dalga boyu ise denklem (10)'dan belirlenir.

Sabit periyotlu dalgaların boyunu veren denklem (10) kapalı (implicit) bir denklemdir. Bu denklem kabul edilebilir hata sınırı (0.01, 0.001, 0.0001, 0.00001, 0.000001) içerisinde iterasyon (ardışık yaklaşım) yöntemiyle çözülüp dalga boyu hesaplanabilir [54].

Dalga hızının hesaplanması istenen noktadaki su derinlikleri; karelej ağındaki dilim köşegen noktalarındaki derinlikler yardımıyla çift taraflı doğrusal interpolasyonla belirlenir.

### 2.7.4. Sayısal Çözümün Kontrolü ve Durdurulması Gerektiren Şartlar

Hesaplar ortogonal boyunca sürekli kontrol edilmeli ve aşağıdaki şartlara uyup uymadığına bakılmalıdır. Eğer uymuyorsa hesaplar durdurulmalıdır.

a. Hesap yapılacak bölge sınırları dışına taşılmamalıdır.

$$\Sigma X \geq R \cdot DX0 \quad (99)$$

$$\Sigma Y \geq S \cdot DY0 \quad (100)$$

Karelaj ağıyla oluşturulan hesap alanı sınırları aşıldığı zaman hesaplar durdurulmalıdır.

b. Ortogonaller birbirine çok fazla (kaustik oluşma başlangıcı) yaklaşmamalıdır.

$$\Delta\beta/dt < [-\beta/T] \quad (101)$$

eşitliği gerçekleştiği zaman ortagonallerin kaustik oluşturduğu kabul edildiğinden hesaplar durdurulmalıdır [3].

c. Dalga kırılması oluşmamalıdır.

Dalga kırılması oluştuğunda, dalga mekanizması değiştiğinden, sapma ve sığlaşma hesabında dalga yüksekliğinin belirlenmesi doğru olmamaktadır (kırılma noktasına kadar salınımlı olarak gelen dalgalar, bu noktadan sonra kütle hareketine dönüşerek ilerlerler).

Kırılma noktasındaki kırılan dalga yüksekliği, ortalama eğime, sapma ve sığlaşma hesabından bulunan dalga yüksekliğine ve dalga periyoduna bağlı olarak denklem (43)'den, kırılma derinliği ise denklem (29)'dan belirlenir. Bu işlem hesapların her adımı için yapılarak kırılmanın gerçekleşip gerçekleşmediği kontrol edilir.

Dalga yüksekliği hesabına, kırılma oluştuktan sonra, sapma ve sığlaşma etkisiyle yapılan hesap durdurularak, kıyı çizgisi üzerinde sıfır olacak şekilde doğrusal olarak azalacağı kabul edilerek devam edilir.

d. Taban eğimi çok fazla artmamalıdır.

$$\Delta d/\Delta s < m \cdot d/L \quad (102)$$

eşitliği gerçekleştiği zaman hesabı sonuçlandırmak gerekmektedir [3].

## 2.8. Yapılan Bilgisayar Programı Hakkında Genel Bilgi

Dalgaların, kıyı bölgesinde, derin deniz sınırından kıyı çizgisine kadarki taban topografyası etkisiyle değişimlerini belirleyen diferansiyel denklemler, sayısal olarak çözülmüş ve programlanmıştır.

Yapılan bilgisayar programı GW-BASIC yazım dilinde hesap ve çizim yapacak şekilde hazırlanmıştır. Hesap moduyla, sapma etkisiyle dalga açısı (ortogonalin yörüngesi) ve sapma katsayısı, sığlaşma katsayısı, bunlara bağlı olarak dalga yüksekliği, kırılma etkisiyle kırılma derinliği ve bu derinlikteki kırılan dalga yüksekliği belirlenmiştir. Çizim moduyla ise, oluşturulan karelaj ağı üzerinde dalga ortogonalinin yörüngesi ve bu yörünge üzerindeki dalga yüksekliği gösterilmiştir.

Taban topografyası, oluşturulan karelaj ağının her bir dilimindeki yatay koordinatlar ve yükseklikler şeklinde programa girilecek ve boyutları da önceden belirlenecektir (dilim boyutları; DX0, DY0, karelaj ağı boyutları R.DX0, S.DY0). Girilen topografya, program tarafından veri dosyası olarak istenilen bir kotla kaydedilebilir ve farklı başlangıç değerleriyle istenildiği kadar farklı hesap yapılabilir.

Programa veri dosyası olarak girilen karelaj ağı üzerinde yapılacak hesaplar için, başlangıç dalga şartları (açık deniz dalga yüksekliği, periyodu ve yönü) ve başlangıç noktası yatay koordinatları (M,N) girilir.

Program, sapma hesabına açık deniz sınırından başlar ve karelaj ağına kadar düz paralel konturlar için hesap yapar. Bu noktadan itibaren dalga sapması için, geliştirilen sayısal modele göre hesaplara devam eder. Hesaplara ortogonal boyunca adım adım devam eder ve her adımdan sonra gerekli kontrolleri yapar. Daha sonra dalganın kırılıp kırılmadığına bakar. Eğer dalga kırılmıyorsa ve kontroller gerçekleşmemişse hesaba normal olarak devam eder ve her adım için hesap ve çizim sonuç dosyasını oluşturur.

Kontroller gerçekleşiyorsa, sadece o zamana kadar yapılan hesaplar için hesap ve çizim dosyası oluşturur. Eğer dalga kırılıyorsa, sapma ve sığlaşma etkisiyle dalga yüksekliği hesabını durdurur ve kırılma etkisiyle dalga yüksekliği kıyı çizgisinde sıfır olacak şekilde lineer olarak azaltır.

## **2.9. Sayısal Modelin Uygulamaları**

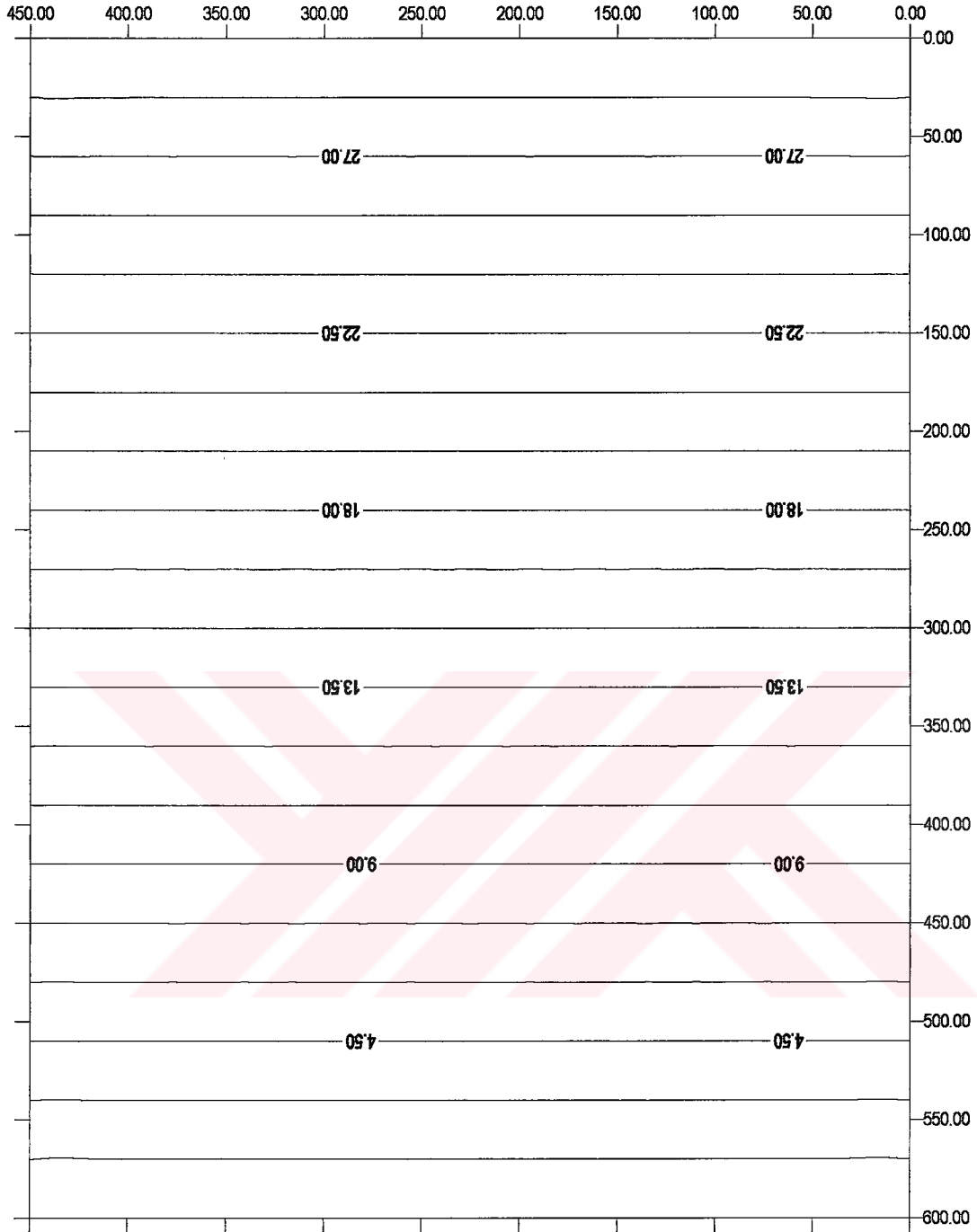
### **2.9.1. Sayısal Modelin Düz Paralel Konturlu Topografyaya Uygulanması**

Sayısal model, Şekil 12’de verilen 1/20 eğimli düz paralel konturlu topografyaya uygulanmış ve elde edilen sonuçlar analitik sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

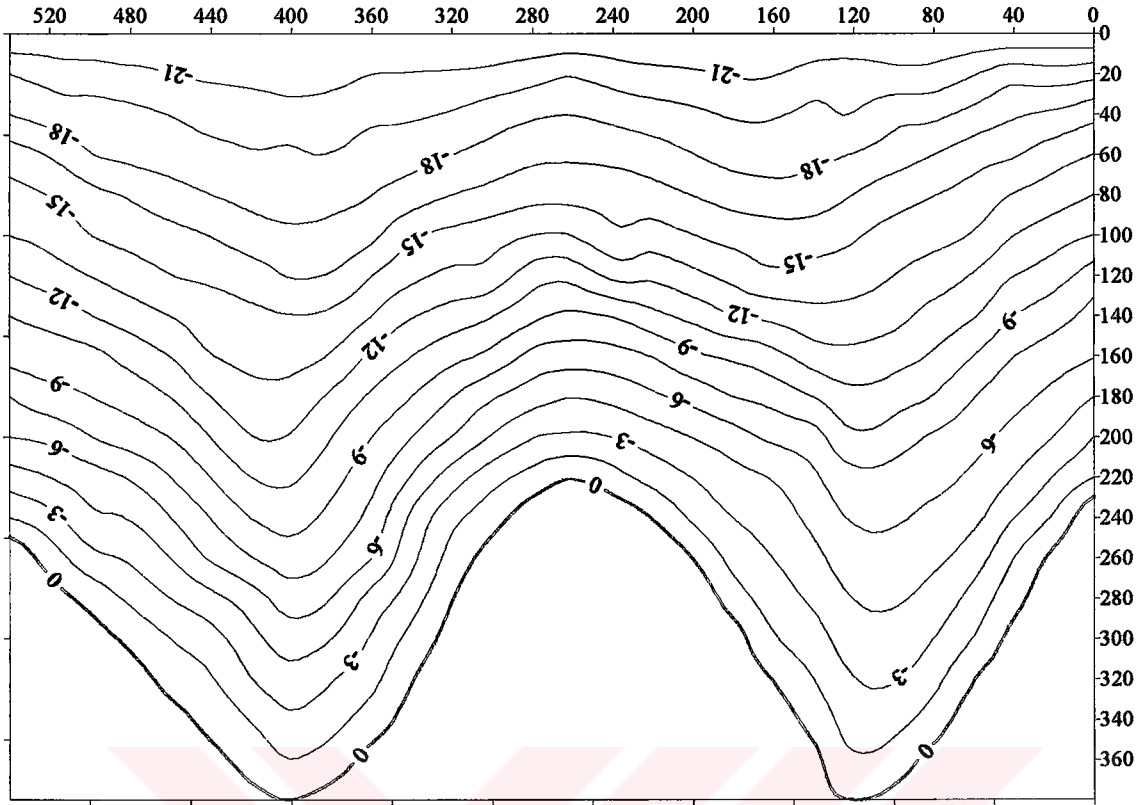
Snell Kanununun geçerli olduğu düz paralel konturlu topografyalardaki hesap sırası ve kullanılan denklemler Bölüm 2’de verilmiştir.

### **2.9.2. Sayısal Modelin Düzensiz Konturlu Topografyaya Uygulanması**

Sayısal model Şekil 13’de verilen düzensiz topografyaya uygulanmış ve elde edilen sonuçlar ortogonal yöntemiyle hesap yapılan grafik yöntemle karşılaştırılmıştır. Kullanılan grafik yöntemle hesabın ayrıntıları, Bölüm 2’de verilmiştir.



Şekil 12. Sayısal modelin uygulandığı düzenli (düz paralel konturlu) topografya



Şekil 13. Sayısal modelin uygulandığı düzensiz topografya

### 3. BULGULAR

Bu bölümde, analitik (Snell Kanunu) ve grafik yöntem ile, geliştirilen sayısal yöntemin, hem düz paralel konturlara sahip bir topografyaya (Şekil 12), hem de karmaşık konturlara sahip bir topografyaya (Şekil 13) uygulamasından elde edilen sonuçlar verilmiştir. Ayrıca, sayısal yöntem uygulamasında oluşturulan karelaj ağı üzerinde ortogonalin yörüngesini ve dalga yüksekliğini gösteren bilgisayar program çıktıları da verilmiştir.

Sayısal model düzenli, dalgalar kullanılarak hazırlanmıştır. Düzenli dalgalarda, derin deniz dalga dikliği ( $H_0 / L_0$ ), genellikle 0.02 ile 0.06 değerleri arasında değişir. Uygulamada başlangıç şartları seçilirken bu değerler dikkate alınmıştır. Dalga dikliğinin bu değerler arasında değiştiği bir çok başlangıç değeriyle sayısal uygulamalar yapılmış ve burada en çok sapma oluşturan başlangıç değerleriyle yapılan hesap sonuçları verilmiştir. Dalga yüksekliği büyük seçildiğinde dalga sapmasının arttığı ve hataların da büyüdüğü görüldüğünden, dalga yüksekliği büyük seçilmiştir.

#### 3.1. Düz Paralel Konturlu Topografyada Sayısal Çözüm ve Snell Kanunu Kullanılarak Elde Edilen Sonuçlar

Düz paralel konturlu topografya üzerinde dalga sapması (Snell Kanunu uygulamasında elde edilen) denklem (46, 47 ve 48)'den; dalga sığlaşması, denklem (25)'ten analitik olarak belirlenebilmektedir.

1/20 eğimli düz paralel konturlu topografya üzerinde (Şekil 12) istenilen derinlikteki dalga parametreleri, seçilen başlangıç şartları (açık deniz dalga şartları) açık deniz dalga yüksekliği  $H_0 = 6$  m, dalga periyodu  $T = 10$  sn, açık deniz dalga açısı  $\theta_0 = 55^\circ$  ( $\alpha = 90^\circ - \theta$ , kıyı diki ile ortogonalin yaptığı açı), başlangıç noktası koordinatları  $X = 60$  m  $Y = 0$  ve  $d = 30$  m kullanılarak denklem (46, 47, 48 ve 25) uygulanarak elde edilen sonuçlar Çizelge 3'te verilmiştir. Dalga kırılma noktasına kadar taban sürtünmesi ve yansımaları önemsiz olduğundan ihmal edilmiştir. Bu nedenle, dalga yüksekliğindeki değişme sebebi olarak dalga sapması ve sığlaşması alınmıştır.



Çizelge 3. Düz paralel konturlu topografya üzerinde Snell Kanunu uygulanarak elde edilen sonuçlar

Başlangıç Değerleri (Açık Deniz Dalga Şartları)							
$H_0 = 6 \text{ m}$		$T = 10 \text{ sn}$		$\theta_0 = 55^\circ$			
Nokta No	X (m)	Y (m)	d (m)	$\theta$ (°)	$K_r$	$K_s$	H (m)
Baş. Nok.	90.00	0.00	30.00	59.7073	0.9740	0.9165	5.3558
1	100.39	17.78	29.11	59.9736	0.9727	0.9154	5.3496
2	110.61	35.46	28.23	60.2339	0.9714	0.9146	5.3307
3	120.66	53.05	27.35	60.5212	0.9700	0.9139	5.3189
4	130.53	70.53	26.47	60.8216	0.9686	0.9134	5.3083
5	140.22	87.89	25.61	61.1356	0.9699	0.9131	5.3137
6	149.72	105.15	24.74	61.4609	0.9656	0.9130	5.2896
7	159.03	122.27	23.89	61.7971	0.9641	0.9131	5.2819
8	168.14	139.27	23.04	62.1470	0.9625	0.9135	5.2755
9	177.04	156.12	22.19	62.5114	0.9609	0.9142	5.2708
10	185.72	172.83	21.36	62.8877	0.9593	0.9152	5.2677
11	194.19	189.38	20.53	63.2749	0.9577	0.9164	5.2658
12	202.44	205.77	19.71	63.6786	0.9560	0.9180	5.2656
13	210.45	221.99	18.90	64.0912	0.9543	0.9200	5.2677
14	218.23	238.02	18.10	64.5214	0.9528	0.9224	5.2732
15	225.78	253.87	17.31	64.9657	0.9508	0.9251	5.2775
16	233.08	269.51	16.52	65.4197	0.9491	0.9283	5.2863
17	240.13	284.95	15.75	65.8909	0.9473	0.9320	5.2973
18	246.93	300.16	14.99	66.3735	0.9456	0.9362	5.3116
19	253.48	315.14	14.24	66.8685	0.9438	0.9409	5.3281
20	259.77	329.88	13.51	67.3800	0.9420	0.9462	5.3479
21	265.80	344.37	12.78	67.9033	0.9403	0.9521	5.3716
22	271.56	358.59	12.07	68.4385	0.9385	0.9587	5.3984
23	277.07	372.54	11.37	68.9887	0.9367	0.9660	5.4291
24	282.31	386.20	10.69	69.5521	0.9350	0.9742	5.4652
25	287.28	399.55	10.02	70.1301	0.9333	0.9832	5.5057
26	291.99	412.59	9.37	70.7197	0.9316	0.9931	5.5510
27	296.43	425.31	8.73	71.3204	0.9299	1.0041	5.6023
28	300.61	437.69	8.11	71.9369	0.9282	1.0162	5.6594
29	304.53	449.72	7.51	72.5642	0.9266	1.0295	5.7236
30	308.18	461.38	6.93	73.2044			6.5070
31	311.58	472.67	6.37	73.8547			5.9812
32	317.73	483.57	5.82	74.5194			5.4649
33	317.64	494.06	5.30	75.1947			4.9765
34	320.30	504.15	4.79	75.8800			4.4977

## 'Çizelge 3'ün devamı'

Başlangıç Değerleri (Açık Deniz Dalga Şartları)							
$H_0= 6 \text{ m}$ $T= 10 \text{ sn}$ $\theta_0= 55^\circ$							
Nokta No	X (m)	Y (m)	d (m)	$\theta$ (°)	$K_r$	$K_s$	H (m)
35	322.72	513.80	4.31	76.5793			4.0469
36	324.91	523.00	3.85	77.2880			3.6150
37	326.88	531.77	3.41	78.0064			3.2018
38	328.64	540.06	3.00	78.7365			2.8169
39	330.20	547.88	2.61	79.4779			2.4507
40	331.55	555.20	2.24	80.2274			2.1033
41	332.72	562.03	1.90	80.9886			1.7840
42	333.72	568.34	1.58	81.7599			1.4836
43	334.56	574.13	1.29	82.5404			1.2113
44	335.25	579.38	1.03	83.3322			0.9672
45	336.22	588.22	0.59	84.9523			0.5540
46	336.89	597.18	0.14	87.5239			0.1315
Dalga Kırılma Noktasında	Su Derinliği		7.44 m				
	Dalga Yüksekliği		6.98 m				
	Kırılma İndisi		1.07				

Dalga kırılması gerçekleşikten sonra, dalga sapması ve sığlaşması dikkate alınmadığından bu değerler hesaplanmamış ve Çizelgelerde gösterilmemiştir.

Aynı başlangıç şartları kullanılarak ve  $\Delta t=1.5$  sn alınarak sayısal çözümün uygulamasından elde edilen sonuçlar Çizelge 4'de verilmiştir.

Her iki uygulamada da dalga kırılma noktasında; dalga yüksekliği, denklem (43)'den, kırılma derinliği ise denklem (29)'dan elde edilmiştir.

Kırılma noktasından sonraki dalga yüksekliği değişimi, dalga yüksekliği kıyı çizgisi üzerinde sıfır olacak şekilde kırılma indisi kullanılarak lineer olarak azaltılmasıyla belirlenmiştir.

Çizelge 4. Düz paralel konturlu topografya üzerinde sayısal model uygulanarak elde edilen sonuçlar

Başlangıç Değerleri (Açık Deniz Dalga Şartları)							
$H_0 = 6 \text{ m}$		$T = 10 \text{ sn}$		$\theta_0 = 55^\circ$		$\Delta t = 1.5 \text{ sn}$	
Nokta No	X (m)	Y (m)	d (m)	$\theta$ (°)	$K_r$	$K_s$	H (m)
Baş. Nok.	90.00	0.00	30.00	59.70731	0.9740	0.9165	5.3558
1	100.39	17.78	29.11	59.9734	0.9727	0.9154	5.3427
2	110.61	35.46	28.23	60.2509	0.9713	0.9146	5.3303
3	120.66	53.05	27.35	60.5385	0.9700	0.9139	5.3187
4	130.53	70.53	26.47	60.8391	0.9686	0.9134	5.3081
5	140.22	87.89	25.61	61.1534	0.9671	0.9131	5.2984
6	149.72	105.15	24.74	61.4789	0.9657	0.9130	5.2900
7	159.03	122.27	23.89	61.8154	0.9642	0.9131	5.2828
8	168.14	139.27	23.04	62.1656	0.9627	0.9135	5.2769
9	177.04	156.12	22.19	62.5303	0.9612	0.9142	5.2725
10	185.72	172.83	21.36	62.9069	0.9597	0.9152	5.2696
11	194.19	189.38	20.53	63.2946	0.9581	0.9164	5.2684
12	202.44	205.77	19.71	63.6986	0.9566	0.9180	5.2691
13	210.45	221.99	18.90	64.1132	0.9550	0.9200	5.2718
14	218.23	238.02	18.10	64.5421	0.9535	0.9224	5.2766
15	225.78	253.87	17.31	64.9868	0.9519	0.9251	5.2837
16	233.08	269.51	16.52	65.4412	0.9503	0.9283	5.2932
17	240.13	284.95	15.75	65.9129	0.9488	0.9320	5.3055
18	246.93	300.16	14.99	66.3959	0.9472	0.9362	5.3206
19	253.48	315.14	14.24	66.8913	0.9457	0.9409	5.3387
20	259.77	329.88	13.51	67.4033	0.9442	0.9462	5.3603
21	265.80	344.37	12.78	67.9269	0.9427	0.9521	5.3853
22	271.56	358.59	12.07	68.4624	0.9412	0.9587	5.4142
23	277.07	372.54	11.37	69.0130	0.9398	0.9660	5.4473
24	282.31	386.20	10.69	69.576	0.9384	0.9742	5.4849
25	287.28	399.55	10.02	70.1551	0.9370	0.9832	5.5276
26	291.99	412.59	9.37	70.7449	0.9357	0.9931	5.5756
27	296.43	425.31	8.73	71.3459	0.9344	1.0041	5.6292
28	300.61	437.69	8.11	71.9626	0.9332	1.0162	5.6896
29	304.53	449.72	7.51	72.5900	0.9320	1.0295	5.7568
30	308.18	461.38	6.93	73.2298			6.5408
31	311.58	472.67	6.37	73.8803			6.0081
32	317.73	483.57	5.82	74.5453			5.4939
33	317.64	494.06	5.30	75.2205			4.9986
34	320.30	504.15	4.79	75.9057			4.5230

'Çizelge 4'ün devamı'

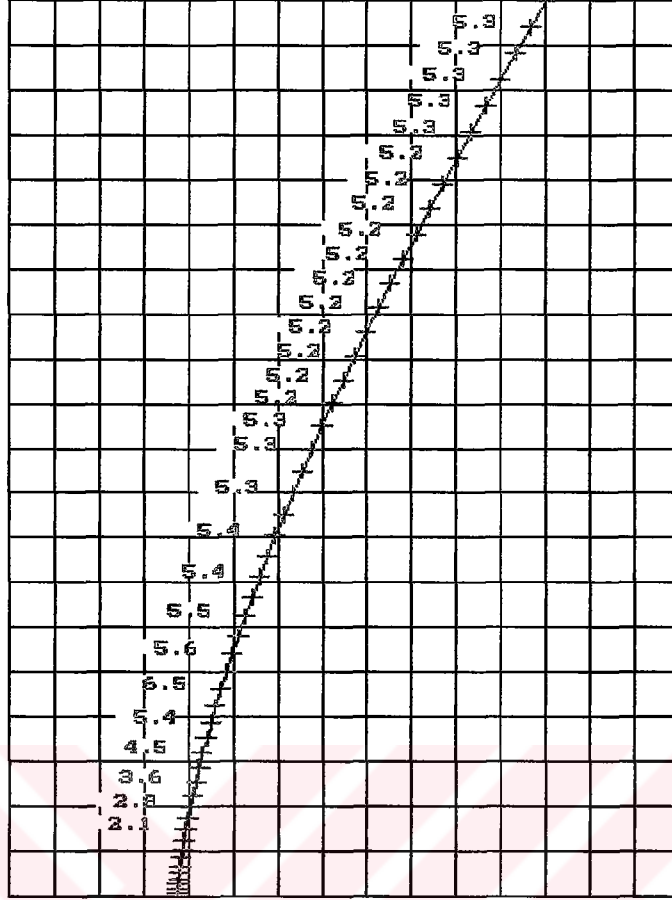
Başlangıç Değerleri (Açık Deniz Dalga Şartları)							
$H_0 = 6 \text{ m}$		$T = 10 \text{ sn}$		$\theta_0 = 55^\circ$		$\Delta t = 1.5 \text{ sn}$	
Nokta No	X (m)	Y (m)	d (m)	$\theta$ (°)	$K_r$	$K_s$	H (m)
35	322.72	513.80	4.31	76.6046			4.0675
36	324.91	523.00	3.85	77.3131			3.6329
37	326.88	531.77	3.41	78.0310			3.2196
38	328.64	540.06	3.00	78.7605			2.8283
39	330.20	547.88	2.61	79.5012			2.4595
40	331.55	555.20	2.24	80.2499			2.1139
41	332.72	562.03	1.90	81.0097			1.7918
42	333.72	568.34	1.58	81.7795			1.4940
43	334.56	574.13	1.29	82.5594			1.2209
44	335.25	579.38	1.03	83.3507			0.9731
45	336.22	588.22	0.59	84.9667			0.5554
46	336.89	597.18	0.14	87.5342			0.1329
Dalga Kırılma Noktasında			Su Derinliği	7.32 m			
			Dalga Yüksekliği	6.91 m			
			Kırılma İndisi	1.059			

Sayısal çözüm için ortogonal yörüngesini ve bu yörünge üzerinde dalga yüksekliğini gösteren bilgisayar programı çıktısı da Şekil 14'te verilmiştir.

### 3.2. Düzensiz Topografyada (Şekil 13) Sayısal Çözüm ve Grafik Yöntem Uygulamasından Elde Edilen Sonuçlar

Düzensiz topografyalarda uygulanan grafik yöntemlerden daha önce bahsedilmiştir. Şekil 13'te verilen düzensiz topografyaya grafik yöntemlerden ortogonal yöntemi uygulanmış ve edilen sonuçlar Çizelge 5'te verilmiştir.

Başlangıç değerleri olarak (açık deniz dalga şartları), açık deniz dalga yüksekliği  $H_0=5\text{m}$ , dalga periyodu  $T=8\text{sn}$ , dalga açısı (kıyı diki ile ortogonalin yaptığı açı  $\alpha = 90-\theta$ )  $\theta_0 = 45^\circ$ , iki ortogonal arasındaki mesafe  $b_0 = 13 \text{ m}$  alınmış yatay koordinatları,  $X = 20 \text{ m}$  ve  $Y = 0 \text{ m}$ ,  $d = 22.5 \text{ m}$  su derinliğine kadar topografyanın düz paralel konturlu



Şekil 14. Düz paralel konturlu topografyada oluşturulan karelaj ağı üzerinde ortogonal yörüngesi ve dalga yüksekliğini gösteren bilgisayar program çıktısı

olduğu kabul edilerek Snell Kanunundan hesap yapılmıştır. Bu derinlikten sonra grafik yöntem, dalga kırılma noktasına kadar uygulanmış, ortogonal yönü ve sapma katsayısı belirlenmiştir. Sıçlama katsayısı ise denklem (25)'ten elde edilmiştir.

Sayısal çözüm aynı topografya ve aynı başlangıç şartlarıyla  $\Delta t=1.5$  sn alınarak uygulanmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 6'da verilmiştir.

Ortogonal yöntemi ve sayısal yöntemde, kırılma noktasındaki dalga yüksekliği ve kırılma derinliği sırasıyla denklem (43) ve (29)'dan bulunmuştur. Bu noktadan sonraki dalga yüksekliğindeki değişme kırılma indisine göre kıyı çizgisi üzerinde dalga yüksekliği sıfır olacak şekilde lineer olarak azaltılmıştır.

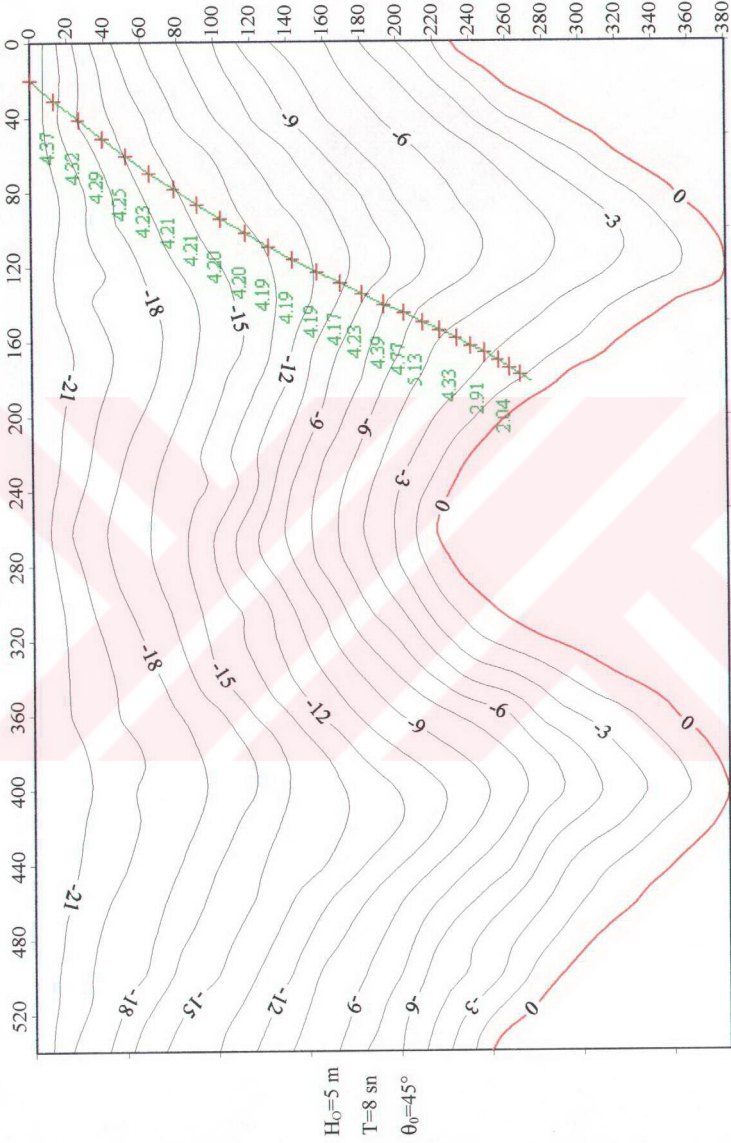
Çizelge 5. Düzensiz topografya (Şekil 13) üzerinde ortogonal yöntemi uygulanarak elde edilen sonuçlar

Başlangıç Değerleri (Açık Deniz Dalga Şartları)							
$H_0 = 5 \text{ m}$		$T = 8 \text{ sn}$		$\theta_0 = 45^\circ$		$b_0 = 13 \text{ m}$	
Nokta No	X (m)	Y (m)	d (m)	$\theta$ (°)	$K_r$	$K_s$	H (m)
Baş. Nok.	20.00	0	22.5	49.76	0.9625	0.9232	4.4429
1	26.18	7.14	21.0	50.50	0.9625	0.9205	4.4299
2	33.32	15.47	19.5	51.50	0.9430	0.9170	4.3237
3	42.84	28.56	18.0	52.50	0.9430	0.9145	4.3119
4	60.69	52.36	16.5	55.00	0.9325	0.9131	4.2573
5	82.11	79.73	15.0	58.00	0.9325	0.9133	4.2583
6	108.29	127.33	13.5	61.00	0.9247	0.9156	4.2333
7	123.00	154.47	12.0	63.00	0.8911	0.9204	4.1008
8	130.20	171.36	10.5	63.50	0.9075	0.9290	4.2153
9	135.66	180.29	9.0	64.50	0.9247	0.9420	4.3553
10	141.00	189.21	7.5	64.00	0.9625	0.9622	4.6306
11	151.13	207.06	6.0	65.00	1.0200	0.9932	5.0653
12	158.27	220.15	4.5	64.00			4.3689
13	166.60	233.24	3.0	60.00			2.9126
Dalga Kırılma Noktasında			Su Derinliği	6.17 m			
			Dalga Yüksekliği	5.99 m			
			Kırılma İndisi	1.03			

Sayısal çözümden elde edilen program çıktısı, Surfer programına taşınarak burada çizilmiş olan düzensiz topografya (Şekil 13) üzerine yapıştırılmıştır. Şekil 15'te verilen bu çıktıyla, düzensiz topografya üzerinde ortogonalin gidişi açıkça görülebilmektedir.

Çizelge 6. Düzensiz topografya (Şekil 13) üzerinde sayısal model uygulanarak elde edilen sonuçlar

Başlangıç Değerleri (Açık Deniz Dalga Şartları)							
$H_0 = 5 \text{ m}$		$T = 8 \text{ sn}$		$\theta_0 = 45^\circ$		$\Delta t = 1.5 \text{ sn}$	
Nokta No	X (m)	Y (m)	d (m)	$\theta$ (°)	$K_r$	$K_s$	H (m)
Baş. Nok.	20.00	0.00	22.50	49.7500	0.9625	0.9246	4.4497
1	31.05	13.06	19.88	51.1152	0.9531	0.9179	4.3741
2	41.49	25.30	18.28	52.2218	0.9450	0.9148	4.3226
3	51.45	38.85	17.33	53.5703	0.9383	0.9137	4.2867
4	60.95	51.73	16.40	55.0097	0.9312	0.9131	4.2515
5	69.99	64.64	15.73	56.4179	0.9262	0.9130	4.2282
6	78.60	77.61	15.14	57.6833	0.9225	0.9132	4.2124
7	86.82	90.60	14.61	58.7514	0.9214	0.9137	4.2091
8	94.71	103.60	14.15	59.5910	0.9196	0.9143	4.2040
9	102.32	116.58	13.74	60.5950	0.9173	0.9150	4.1968
10	109.64	129.56	13.34	61.7493	0.9150	0.9159	4.1905
11	116.62	142.55	12.71	62.9853	0.9135	0.9177	4.1916
12	123.21	155.48	11.87	63.9144	0.9100	0.9210	4.1907
13	129.44	168.20	10.80	64.4066	0.9007	0.9268	4.1738
14	135.35	64.41	9.20	65.2769	0.9001	0.9400	4.2304
15	140.73	192.23	7.35	65.2154	0.9106	0.9648	4.3929
16	145.65	202.89	6.54	65.6910	0.9737	0.9803	4.7728
17	150.26	213.09	5.61	65.9191			5.1278
18	154.53	222.65	4.74	65.1148			4.3324
19	158.63	231.46	4.16	62.9944			3.7993
20	162.78	239.62	3.66	61.86			3.3459
21	166.86	247.24	3.19	60.9512			2.9181
22	170.80	254.33	2.71	59.8378			2.4790
23	174.57	260.83	2.23	58.4908			2.0408
24	178.16	266.67	1.77	56.9105			1.6146
25	181.50	271.81	1.26	54.4337			1.1535
26	184.53	276.04	0.81	52.7111			0.7401
27	187.07	279.38	0.52	51.8483			0.4708
28	189.07	282.01	0.33	51.7411			0.2973
29	190.79	284.11	0.20	52.3697			0.1859
30	192.08	285.78	0.132	53.7624			0.1144
Dalga Kırılma Noktasında			Su Derinliği		6.48 m		
			Dalga Yüksekliği		5.88 m		
			Kırılma İndisi		1.10		



Şekil 15. Düzensiz topografya üzerinde (Şekil 13) ortogonal yörüngesi ve dalga yüksekliği



#### 4. İRDELEME

Bu bölümde geliştirilen sayısal yöntem iki ayrı topografyaya farklı başlangıç şartları kullanılarak uygulandığında elde edilen sonuçlar, bu topografyaya grafik yöntem ve Snell Kanunu uygulandığında elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Karşılaştırmalar su derinliği ( $d$ ) ile dalga yüksekliği ( $H$ ), sapma katsayısı ( $K_r$ ) ve dalga açısı ( $\theta$ ) arasında yapılmıştır.

Karşılaştırmalardan elde edilen sonuçlar grafikler şeklinde verilmiştir.

##### 4.1. Düz Paralel Konturlu Topografyalarda, Model Sonuçlarıyla Snell

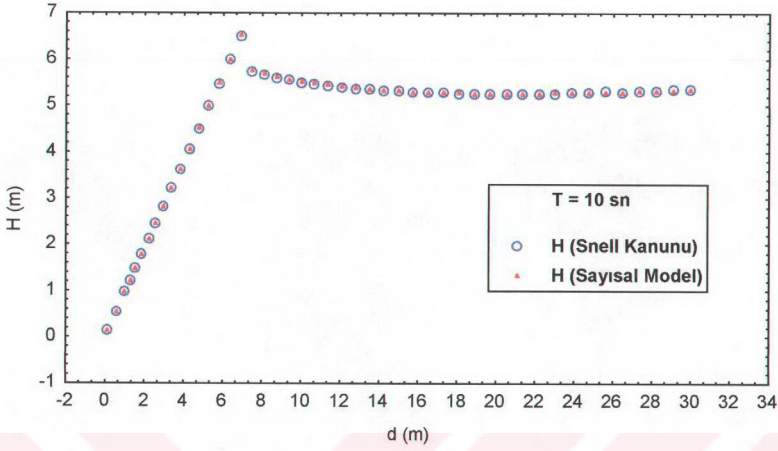
##### Kanunundan Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Düz paralel konturlu topografyaya, model uygulandığında elde edilen sonuçlar, aynı topografyaya Snell Kanunu uygulanarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar Şekil 16, 17 ve 18'de verilmiştir.

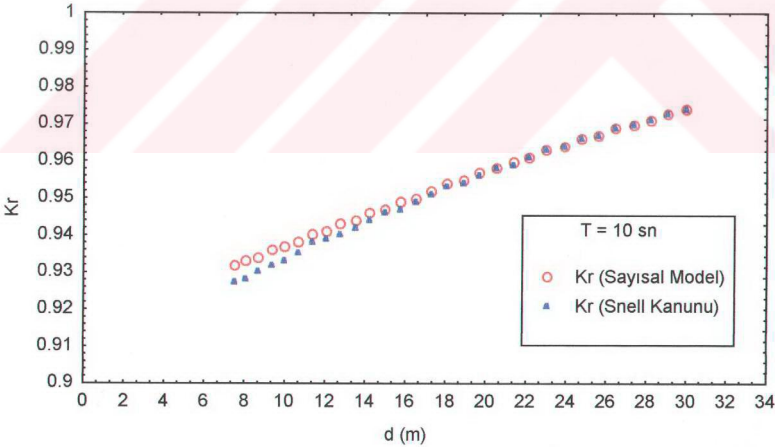
Şekil 16'da su derinliği ( $d$ ) ile dalga yüksekliği ( $H$ ) karşılaştırıldığında her iki yöntem arasında önemli bir farkın olmadığı görülmüştür. Oluşan hataların, kırılma noktası yakınlarında ve % 0.58 değeri civarında olduğu görülmüştür.

Şekil 17'de, su derinliği ( $d$ ) ile sapma katsayısı ( $K_r$ ) incelenirse, sayısal yöntemdeki hatanın yine % 0.58 civarında olduğu görülür ki bu hatanın da sapma hesabında sayısal yöntemin getirdiği yaklaşım hatalarından kaynaklandığı söylenebilir.

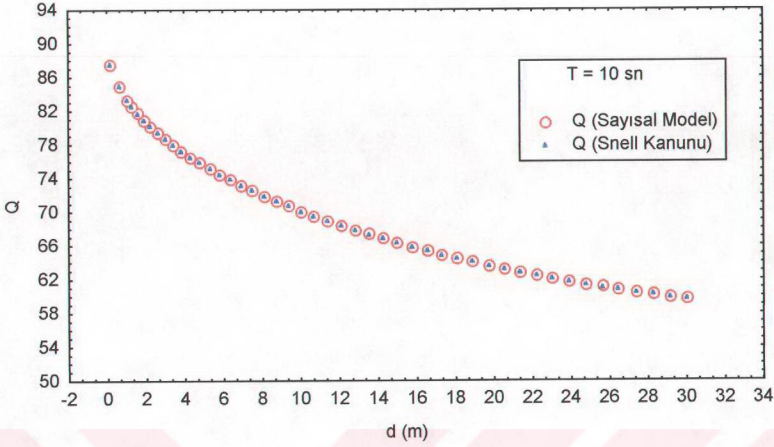
Düz paralel konturlu topografyada sayısal yöntemden ve Snell Kanunundan bulunan değerlere göre, su derinliği ( $d$ ) ile dalga açısının ( $\theta$ ) karşılaştırıldığı Şekil 18'deki grafik incelendiğinde iki yöntem arasında maksimum hatanın % 0.035 değerini geçmediği görülmüştür.



Şekil 16. Düz paralel konturlu topografya üzerinde sayısal model ve Snell Kanunu karşılaştırılması (su derinliği ile dalga yüksekliği)



Şekil 17. Düz paralel konturlu topografya üzerinde sayısal model ve Snell Kanunu karşılaştırılması (su derinliği ile sapma katsayısı)

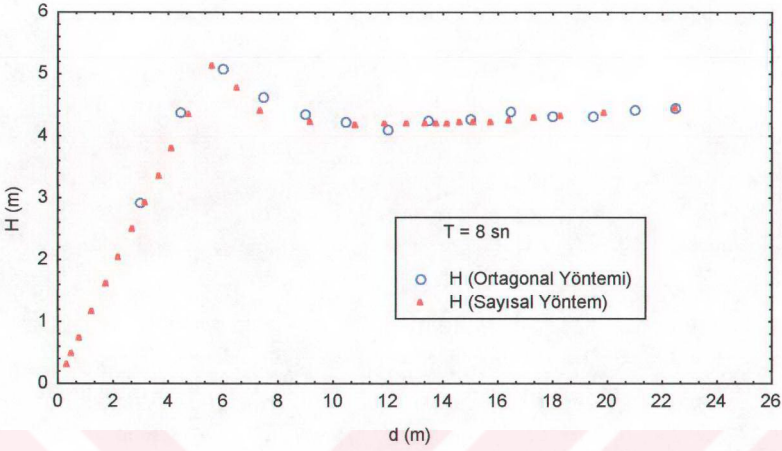


Şekil 18. Düz paralel konturlu topografya üzerinde sayısal model ve Snell Kanunu karşılaştırılması (su derinliği ile dalga yönü)

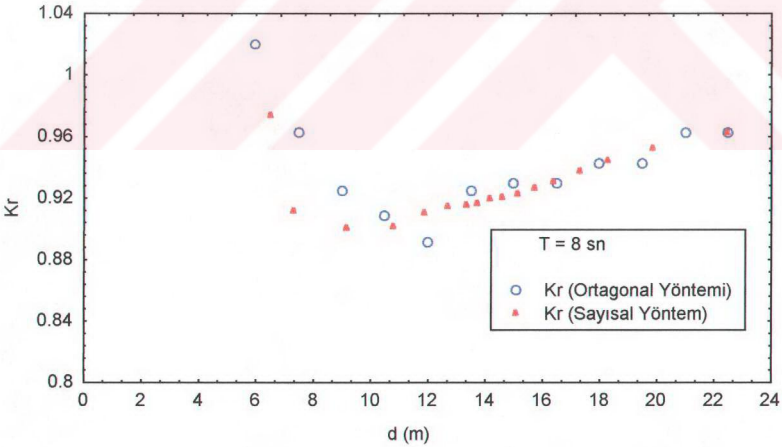
#### 4.2. Düzensiz Topografyalarda (Şekil 13) Sayısal Çözün Sonuçlarıyla Grafik Çözümünden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Sayısal yöntemle grafik yöntem arasındaki karşılaştırmalar Şekil 19, 20 ve 21'deki grafiklerle verilmiştir.

Bu grafiklerden Şekil 19'da, su derinliği (d) ile dalga yüksekliği (H) ve Şekil 20'de su derinliği (d) ile sapma katsayısı ( $K_r$ ) arasındaki ilişki incelendiğinde, aynı topografyada iki yöntem arasında dalga yükseklikleri ve sapma katsayıları arasında maksimum farkın kırılma noktası yakınlarında % 5.4 olduğu görülmüştür. Bu farkın, grafik yöntem uygulanırken yapılabilecek hataların yığılımlı olarak artmasından ve sayısal çözümün getireceği hatalardan kaynaklandığı söylenebilir.



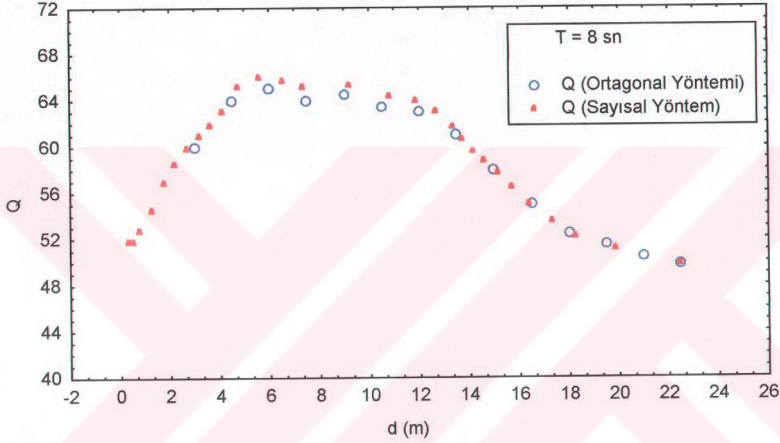
Şekil 19. Düzensiz konturlu topografya üzerinde (Şekil 13) sayısal model ve grafik yöntemin karşılaştırılması (su derinliği ile dalga yüksekliği)



Şekil 20. Düzensiz konturlu topografya üzerinde (Şekil 13) sayısal model ve grafik yöntemin karşılaştırılması (su derinliği ile sapma katsayısı)

Şekil 21'deki su derinliği ( $d$ ) ile dalga açısı ( $\theta$ ) incelendiğinde, aynı topografyada, iki yöntem arasında oluşabilecek maksimum farkın, kırılma noktası yakınlarda % 1.06 civarında olduğu görülmüştür. Bu farkın, grafik yöntemde, açıölçer hassasiyetinden, uygulama hatasından, sayısal yöntemde ise yaklaşım hatalarından kaynaklandığı görülmüştür.

Tüm bu incelemelerden sonra, geliştirilen sayısal yöntemin düzensiz topografyalara uygulanmasında, oldukça güvenli sonuçlar elde edilebileceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 21. Düzensiz konturlu topografya üzerinde (Şekil 13) sayısal model ve grafik yöntemin karşılaştırılması (su derinliği ile dalga yönü)

## 5. SONUÇLAR

Kıyı mühendisliğinde, dalga parametrelerinin belirlenme zorluğu, karşılaşılan problemlerin çözümünü de güçleştirmektedir. Dalgalar kıyıya yaklaşırken oluşan değişimlerin matematiksel ifadelerle belirlenmesi, özellikle taban topografyası düzensiz olan bölgelerde oldukça zordur. Bu değişimlerin belirlenmesi için bir çok teorik ve deneysel çalışma yapılmış ve halen de yapılmaktadır.

Kıyıda, düzensiz topografya üzerinde dalga sapmasını sayısal olarak belirlemeye yönelik yapılmış bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

1. Kıyı bölgesinde, düzensiz topografya üzerinde, dalga sapmasının sayısal olarak belirlenmesi yanında, dalga sığlaşması ve kırılması da dikkate alınarak bir bilgisayar programı geliştirilmiştir.

2. Yapılan irdelemeler sonucu geliştirilen sayısal modelin, tabanı düzgün değişmeyen kıyı bölgesindeki lineer su dalgalarının (düzenli dalgaların) sapmalarını belirlemede rahatlıkla kullanılabilceği sonucuna varılmıştır.

3. Sayısal model düzenli (düz paralel) topografyalarda, analitik çözümle çok iyi bir uyum göstermiş ve oluşan hatalar sapma katsayısında % 0.58, dalga açısında ise % 0.035 değerlerini geçmemiştir.

4. Sayısal model düzensiz topografyalarda, grafik yöntemlerle karşılaştırıldığında, aradaki farklılığın sapma katsayısında % 5.4, dalga açısında ise % 1.06 değerleri civarında olduğu görülmüştür. Bu değerler maksimum değerlerdir ve mühendislik projelendirmelerinde kabul edilebilir hata sınırları içindedir.

5. Sayısal modelle grafik ve analitik çözümler karşılaştırıldığında, hataların kırılma noktası civarında en büyük değere ulaştığı görülmüştür. Bunun sebebi, dalgaların hareketlerin bu noktada tamamen değişmesidir. Kırılma noktasına kadar salınımlı gelen dalgalar, bu noktadan sonra kütle taşınımı şeklinde hareket etmektedirler.

6. Dalgaların hareketlerinde dalga dikliği önemli bir parametredir. Sayısal model uygulamalarında, dalga dikliğinin büyük seçildiği başlangıç değerleriyle elde edilen dalga sapma katsayısı sonuçlarının, dalga dikliği küçük seçilen başlangıç değerleriyle elde edilen dalga sapma katsayısı sonuçlarından daha büyük olduğu görölmüştür. Dalga dikliğinin büyük olmasının dalga sapma katsayısı artırdığı sonucuna varılmıştır.



## 6. ÖNERİLER

Kıyı bölgesinde, dalga değişimini belirlemek oldukça geniş kapsamlı ve zaman alıcı bir çalışmayı gerektirmektedir. Yapılan çalışmada, dalgaların sapma, sığlaşma ve kırılma parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır.

Yapılan çalışmaya; geçiş bölgesinde, taban sürtünmesinin, yapı önünden dalga tırmanmasının, yansımalarının kırınımının etkileri de eklenebilir. Ayrıca, taban topografyasının bilgisayara girilmesinde, veri girişi sayısını azaltacak, karelej ağını daha az veriyle oluşturacak bilgisayar programlarıyla birleştirilebilir.

Yapılan çalışmada, sayısal modelden elde edilen sonuçlar, düz paralel konturlu topografyalarda analitik, düzensiz topografyalarda grafik çözümlerle karşılaştırılmış olsa da, sayısal modelden elde edilen tüm sonuçlar, fiziksel model (laboratuvar deneyleri) sonuçları ve arazi verileriyle de karşılaştırılarak doğrulukları kontrol edilmelidir.

Yapılan tüm hesaplarda düzenli dalgalar kullanılmıştır. Düzensiz dalga durumunda da, bu hesaplar yapılmalıdır. Düzensiz dalgaların kıyı bölgesindeki dalga hareketine etkileri incelenmelidir. Ayrıca, düzenli ve düzensiz dalgalar arasındaki farklılıklar araştırılmalıdır.

Düzenli ve düzensiz dalgaların, sapma ve kırınımını birlikte inceleyen matematiksel ve fiziksel model çalışmaları geliştirilmelidir.



## 7. KAYNAKLAR

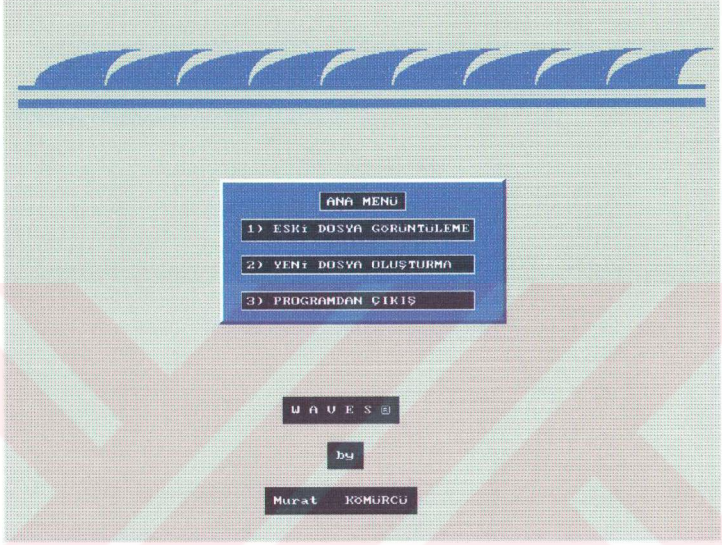
1. Karlsson, T., Refraction of Ocean Wave Spectra, Journal of the Waterways and Harbors Division Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 95, No. WW4, November, (1969), 437-448
2. Berkhoff, J.C.W., Computation of Combined Refraction - Diffraction, Proc. 13<sup>th</sup> Coastal Eng. Conf., Vancouver, Canada, ASCE, Vol. 1, (1972), 471-490
3. Skovgaard, O., Jonsson, I.G., ve Bertelsen, J.A., Computation of Wave Heights due to Refraction and Friction, Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, ASCE, 101, No. WW1. February, (1975), 15-32.
4. Liu, P.L.F., ve Tsay, T.K., Refraction - Diffraction Model for Weakly Nonlinear Water Waves, J. Fluid Mech. Vol. 141, (1984), 265-274.
5. Djordjevic, V.D. ve Redekopp, L.G, On the Development of Packets of Surface Gravity Waves Moving Over an Uneven Bottom, Z. Angev. Math. Phys. 29, (1978), 950- 962
6. Liu, P.L.F., Yoon, S.B. ve Kirby, J.T., Nonlinear Refraction - Diffraction of Waves in Shallow Water, J. Fluid Mech. Vol. 153, (1985), 185-201.
7. Kadomtsev, B.B. ve Petviashvili, V.I., On the Stability of Solitary Waves in Weakly Dispersing Media, Sov. Phys. Dokl. 15, (1970), 539-541.
8. Oh, I.S., ve Grosch, C.E., Numerical Study of Finite Amplitude Wave, Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, ASCE, Vol. 111, No. 1, (1985), 78-93.
9. Ebersole, B.A., Refraction - Diffraction Model for Linear Water Waves, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 6, (1985), 939-953.
10. Whalin, R.W., The Limit of Applicability of Linear Wave Refraction Theory in a Convergence Zone, Research Report H-71-3, U.S. Army Corps of Engineers, Wes, Vicksburg, Miss., Dec., 1971.
11. Treloar, P.D., Spectral Wave Refraction Under the Influence of Depth and Current, Coastal Engineering, 9 (1986) 439-452.
12. Dalrymple, R.A., Model for Refraction of Water Waves, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 4, (1988), 423-435.
13. Rygg, O.B., Nonlinear Refraction - Diffraction of Surface Waves in Intermediate and Shallow Water, Coastal Engineering, 12 (1988) 191-211.

14. Panchang, V.G., Roisin, B.C. ve Pearce, B. R. Combined Refraction - Diffraction of Short - Waves in Large Coastal Regions, Coastal Engineering, 12 (1988) 133-156.
15. Panchang, V.G., ve Kopriva, D.A. Solution of Two - Dimensional Water - Wave Propagation Problems by Chebyshev Collocation, Math. Comput. Modelling, Vol. 12, No. 6, (1989), 625-640.
16. Canuto, C., Hussaini, M.Y., Quarteroni, A. ve Zang, T.A., Spectral Methods in Fluid Dynamics, Springer, New York, (1987).
17. Tsay, T.-K., Zhu, W. ve Liu, P.L.-F A Finite Element Model for wave Refraction, Diffraction, Reflection and Dissipation, Applied Ocean Research, Vol. 11, No. 1, (1989), 33-38.
18. Vincent, C.L. ve Briggs, M.J., Refraction - Diffraction of Irregular Waves Over A Mound, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 115, No. 2, (1989).
19. Chae, J.W. ve Jeong, S.T., Current - Depth Refraction and Diffraction Model for Irregular Water Waves, Coastal Engineering 1992 Proceeding of Twenty - Third International Conference Held October 1992, Venice, Italy, 129-141.
20. Nwogu, O., Alternative Form of Boussinesq Equations for Nearshore Wave Propagation, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 119, No. 6, (1993) 618-638.
21. Li, B. ve Anastasiou, K., Efficient Elliptic Solvers for the Mild - Slope Equation Using the Multigrid Technique, Coastal Eng., 16 (1992) 245-256
22. Massel, S.R., Extended Refraction - Diffraction Equation for Surface Waves, Coastal Engineering, 19 (1993) 97-126.
23. Li, B., Reeve, D.E. ve Fleming, C.A., Numerical Solution of the Elliptic Mild - Slope Equation for Irregular Wave Propagation, Coastal Engineering, 20 (1993) 85-100
24. CERC, Shore Protection Manual, Fourth Edition, US Army WES, 1984.
25. Uysal, K., Ruzgar Verileri Kullanarak Dogu Karadeniz'de Tasarım Dalgası Tahmini, Y. Lisans Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1995.
26. Çam, T., Doğu Karadeniz'de Dalga Tahmini ve Tasarım Dalgası Özelliklerinin Belirlenmesi, Y. Lisans Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1986.
27. Günbak, A.R., Introduction Coastal and Harbour Engineering, Ders Notları, ODTÜ, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 1992.

28. Fredsoe, J., Deigaard, R., *Mechanics of Coastal Sediment Transport*, World Scientific Publ. Co., London, 1992.
29. Horikawa, K., *Nearshore Dynamics and Coastal Processes*, University of Tokyo Press, 1987.
30. Kapdaşlı, S., *Kıyı Mühendisliği*, İTÜ Yayını No.1504, 1992.
31. Dean, R.G., ve Dalrymple, R.A., *Water wave Mechanics for Engineers and Scientist*, World Scientific, London, 1991, 353p.
32. Hunt, J.N., *Direct Solution of Wave Dispersion Equation*, Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, 105, (1979), 457-459.
33. Ippen, T., *Estuary and Coastline Hydrodynamics*, McGraw-Hill Book Co 1966
34. Wiegel, R. L., *Oceanographical Engineering*, Prentice-Hall Int. Ser., 1964.
35. Munk, W.H., *The Solitary Wave Theory and Its Application to Surf Problems*, Annals of the New York Academy of Sciences, Vol.51,(1949), 376-462.
36. Iversen, H.W., *Waves and Breakers in Shoaling Water*, Proc. 3<sup>rd</sup>. Conference on Coastal Engineering, ASCE, 1953.
37. Galvin, C.J., *Breaker Travel and Choice of Design Wave Height*, Journal of the Waterways and Harbours Division, ASCE, (1963), 175-200.
38. Goda, Y., *A Synthesis of Breaker Indices*, Transaction of the Japanese Society of Civil Engineering, Vol.2, 1970.
39. Weggel, J.R., *Maximum Breaker Height*, Journal of the Waterways, Harbours and Coastal Engineering Division, Vol.98, 1972.
40. Yüksek, Ö., *Kıyılarda Katımadde Hareketi*, Yüksek Lisans Ders Notları, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1996.
41. Komar, R.P. ve Gaughan, M.K., *Airy Wave Theory and Breaker Height Prediction*, Proc. 13<sup>th</sup> Int. Coastal Engineering Conference, 1973, 405-418.
42. Goda, Y., *Irregular Wave Deformation in the Surf Zone*, Coastal Engineering in Japan, Vol. 18, (1975), 13-26.
43. Sunamura, T., *Determination of Breaker Weight and Depth in the Field*, Ann. Rep., Inst. Geosci., University of Tsukuba, No.8, 53-54.
44. Galvin, C.J., *Breaker Type Classification on Three Laboratory Beaches*, Journal of Geophys. Research, Vol.73, (1968), 3651-3659.
45. Battjes, J.A., *Surf Similarity*, Proc. 14<sup>th</sup>. Coastal Engineering Conference, ASCE, 1974, 466-480.

46. Le Mahaute, B. ve Koh, R.C.Y., On the Breaking of Waves Arriving at an Angle to the Shore, Journal of Hydraulic Res. Vol. 5, No. 1, (1967), 67-88
47. Birben, A.R., Kıyı Korumasında Açıkdeniz Dalgakıranların Etkilerinin Araştırılması, Doktora Tezi KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1997.
48. Yüksek, Ö., Kıyı Hidroliği, Yüksek Lisans Ders Notları, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1995.
49. Svendsen, I.A. ve Jonsson, I.G., Hydrodynamics of Coastal Regions, First Edition, Den Private Ngenqrfond Technical University, Denmark, 1976.
50. Munk, W.H. ve Arthur, R.S., Wave Intensity Along a Refracted Ray, Gravity Waves, National Bureau of Standards Circular 521, United States Government Printing Office, Washington, D.C., 95-109, (1952).
51. Ebesole, B.A., Cialone, M., ve Prater, M.D., Regional Coastal Processes Numerical Modelling System, Technical Report, CERC-86-4, CERC, 1984
52. Bayrak, T., Sayısal Yükseklik Modellerinde Interpolasyon Yöntemlerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1996.
53. Smith, G.D., Numerical Solution of Partial Differential Equations, Third Edition, Oxford University Press, Ely House, London W. I, 1975.
54. Akpınar, S., Sayısal Çözümleme, İkinci Baskı, KTÜ Mühendislik - Mimarlık Fak., Trabzon, 1994,

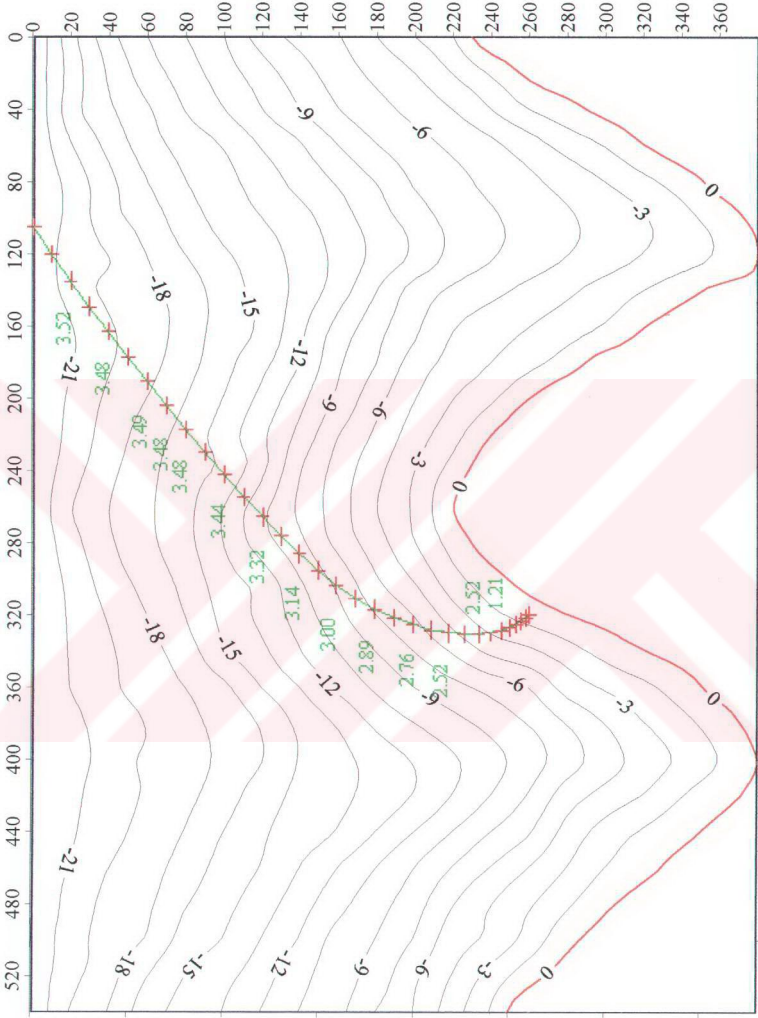
## 8. EKLER



Ek Şekil 1. Sayısal model için hazırlanan bilgisayar programı başlığı

Ek Çizelge 1. Programda dosya okuma menüsü

DOSYA OKUMA MENÜSÜ	
Dosya Adı	:
Başlangıç Dalga Açısı ( $\theta_0$ )	:
Başlangıç Dalga Yüksekliği ( $H_0$ )	:
Dalga Periyodu (T)	:
Seçilen Zaman Aralığı ( $\Delta T$ )	:
Yatay Başlangıç Noktası (M)	:
Düşey Başlangıç Noktası (N)	:

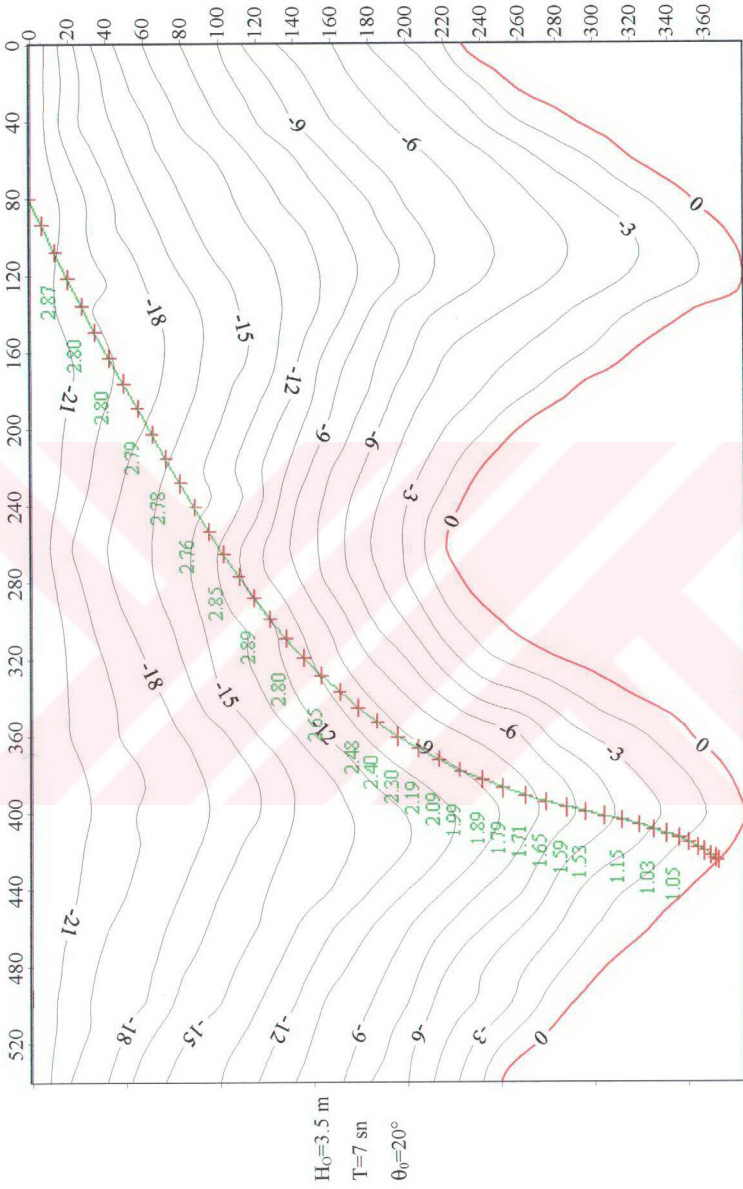


$H_0=4$  m

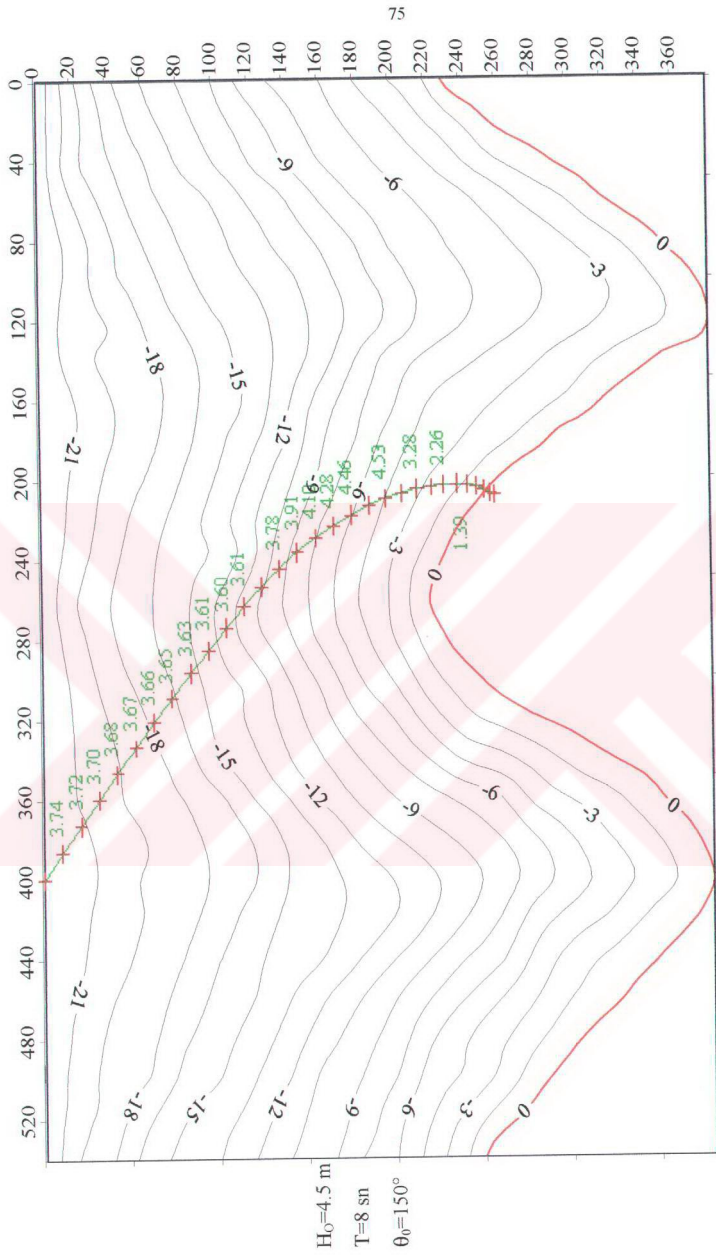
$T=8$  sn

$\theta_0=25^\circ$

Ek Şekil 2. Düzensiz topografi üzerinde (Şekil 13) ortogonal yörüngesi ve dalga yüksekliği



Ek Şekil 3. Düzensiz topografya üzerinde (Şekil 13) ortogonal yörüngesi ve dalga yüksekliği



Ek Şekil 4. Düzensiz topografiya üzerinde (Şekil 13) ortogonal yörüngesi ve dalga yüksekliği



Ek Çizelge 2. Düzensiz topografya üzerinde sayısal model bilgisayar sonuçları

**Başlangıç Değerleri (Açık Deniz Dalga Şartları)**

Dalga Yüksekliği (H <sub>0</sub> )	: 5 m
Dalga Periyodu (T)	: 8 sn
Dalga Açısı (θ <sub>0</sub> )	: 45°
Zaman Aralığı (Δt)	: 1.5 sn

**Başlangıç Noktası**

X Koordinatı	: 20.000000
Y Koordinatı	: 0.0000000
Su Derinliği	: 22.500000
Dalga Boyu	:
Dalga Açısı	: 49.757310
Sığlaşma Katsayısı	: 0.9246318
Sapma Katsayısı	: 0.9624776
Dalga Yüksekliği	: 4.4496870

**1. Nokta**

X Koordinatı	: 31.054470
Y Koordinatı	: 13.061440
Su Derinliği	: 19.884940
Dalga Boyu	:
Dalga Açısı	: 51.115180
Sığlaşma Katsayısı	: 0.9178732
Sapma Katsayısı	: 0.9530999
Dalga Yüksekliği	: 4.374125

**2. Nokta**

X Koordinatı	: 41.488150
Y Koordinatı	: 25.999060
Su Derinliği	: 18.280740
Dalga Boyu	: 86.699340
Dalga Açısı	: 52.221670
Sığlaşma Katsayısı	: 0.9148912
Sapma Katsayısı	: 0.9449530
Dalga Yüksekliği	: 4.3226460

**3. Nokta**

X Koordinatı	: 51.446780
Y Koordinatı	: 38.847690
Su Derinliği	: 17.327290
Dalga Boyu	: 85.412860
Dalga Açısı	: 53.570250
Sığlaşma Katsayısı	: 0.9137153
Sapma Katsayısı	: 0.9382992
Dalga Yüksekliği	: 4.2866920

“Ek Çizelge 2'nin devamı”

**4. Nokta**

X Koordinatı	: 60.957030
Y Koordinatı	: 51.733060
Su Derinliği	: 16.400220
Dalga Boyu	: 84.047900
Dalga Açısı	: 55.009670
Sığlaşma Katsayısı	: 0.9130867
Sapma Katsayısı	: 0.9312355
Dalga Yüksekliği	: 4.2514940

**5. Nokta**

X Koordinatı	: 69.993840
Y Koordinatı	: 64.643590
Su Derinliği	: 15.734150
Dalga Boyu	: 82.997870
Dalga Açısı	: 56.417910
Sığlaşma Katsayısı	: 0.9130037
Sapma Katsayısı	: 0.9262107
Dalga Yüksekliği	: 4.2281690

**6. Nokta**

X Koordinatı	: 78.601720
Y Koordinatı	: 77.608280
Su Derinliği	: 15.135540
Dalga Boyu	: 82.005200
Dalga Açısı	: 57.683280
Sığlaşma Katsayısı	: 0.9132255
Sapma Katsayısı	: 0.9225399
Dalga Yüksekliği	: 4.2124350

**7. Nokta**

X Koordinatı	: 86.821690
Y Koordinatı	: 90.602600
Su Derinliği	: 14.610330
Dalga Boyu	: 81.087740
Dalga Açısı	: 58.751350
Sığlaşma Katsayısı	: 0.9136772
Sapma Katsayısı	: 0.9213586
Dalga Yüksekliği	: 4.2091220

“Ek Çizelge 2’nin devamı”

**8. Nokta**

X Koordinatı	: 94.708790
Y Koordinatı	: 103.60080
Su Derinliği	: 14.151500
Dalga Boyu	: 80.245990
Dalga Açısı	: 59.591010
Sığlaşma Katsayısı	: 0.9142917
Sapma Katsayısı	: 0.9196212
Dalga Yüksekliği	: 4.2040100

**9. Nokta**

X Koordinatı	: 102.32470
Y Koordinatı	: 116.57710
Su Derinliği	: 13.743430
Dalga Boyu	: 79.471450
Dalga Açısı	: 60.595030
Sığlaşma Katsayısı	: 0.9150205
Sapma Katsayısı	: 0.9173111
Dalga Yüksekliği	: 4.1967920

**10. Nokta**

X Koordinatı	: 109.64070
Y Koordinatı	: 129.55830
Su Derinliği	: 13.336470
Dalga Boyu	: 78.675670
Dalga Açısı	: 61.749280
Sığlaşma Katsayısı	: 0.9159276
Sapma Katsayısı	: 0.9150380
Dalga Yüksekliği	: 4.1905430

**11. Nokta**

X Koordinatı	: 116.62310
Y Koordinatı	: 142.55290
Su Derinliği	: 12.708180
Dalga Boyu	: 77.379140
Dalga Açısı	: 62.985280
Sığlaşma Katsayısı	: 0.9177388
Sapma Katsayısı	: 0.9134559
Dalga Yüksekliği	: 4.1915700

“Ek Çizelge 2’nin devamı”

**12. Nokta**

X Koordinatı	: 123.21320
Y Koordinatı	: 155.47840
Su Derinliği	: 11.866320
Dalga Boyu	: 75.532290
Dalga Açısı	: 63.914410
Sığlaşma Katsayısı	: 0.9210066
Sapma Katsayısı	: 0.9100253
Dalga Yüksekliği	: 4.1906970

**13. Nokta**

X Koordinatı	: 129.44060
Y Koordinatı	: 168.19820
Su Derinliği	: 10.801140
Dalga Boyu	: 72.978920
Dalga Açısı	: 64.406620
Sığlaşma Katsayısı	: 0.9268040
Sapma Katsayısı	: 0.9006785
Dalga Yüksekliği	: 4.1737620

**14. Nokta**

X Koordinatı	: 135.35160
Y Koordinatı	: 180.53910
Su Derinliği	: 9.1980680
Dalga Boyu	: 68.623410
Dalga Açısı	: 65.276920
Sığlaşma Katsayısı	: 0.9400023
Sapma Katsayısı	: 0.9000728
Dalga Yüksekliği	: 4.2303520

**15. Nokta**

X Koordinatı	: 140.73300
Y Koordinatı	: 192.22660
Su Derinliği	: 7.3498940
Dalga Boyu	: 62.664550
Dalga Açısı	: 65.215350
Sığlaşma Katsayısı	: 0.9648009
Sapma Katsayısı	: 0.9106362
Dalga Yüksekliği	: 4.3929130

“Ek Çizelge 2'nin devamı”

**16. Nokta**

X Koordinatı	: 145.65850
Y Koordinatı	: 202.89400
Su Derinliği	: 6.5449090
Dalga Boyu	: 59.677320
Dalga Açısı	: 65.691020
Sığlaşma Katsayısı	: 0.9802963
Sapma Katsayısı	: 0.9737449
Dalga Yüksekliği	: 4.7727920

Kırılan Dalga	
Yüksekliği	: 5.7780060
Kırılma Derinliği	: 6.3245050

**17. Nokta**

X Koordinatı	: 150.26470
Y Koordinatı	: 213.09140
Su Derinliği	: 5.6098980
Dalga Boyu	: 55.835530
Dalga Açısı	: 65.909050
Sığlaşma Katsayısı	:
Sapma Katsayısı	:
Dalga Yüksekliği	: 5.1277830

**18. Nokta**

X Koordinatı	: 154.53810
Y Koordinatı	: 222.64870
Su Derinliği	: 4.7397510
Dalga Boyu	: 51.819200
Dalga Açısı	: 65.114810
Sığlaşma Katsayısı	:
Sapma Katsayısı	:
Dalga Yüksekliği	: 4.3324170

**19. Nokta**

X Koordinatı	: 158.62660
Y Koordinatı	: 231.46260
Su Derinliği	: 4.1565190
Dalga Boyu	: 48.844840
Dalga Açısı	: 62.994380
Sığlaşma Katsayısı	:
Sapma Katsayısı	:
Dalga Yüksekliği	: 3.7993080

“Ek Çizelge 2’nin devamı”

**20. Nokta**

X Koordinatı	: 162.78530
Y Koordinatı	: 239.62240
Su Derinliği	: 3.6605310
Dalga Boyu	: 46.088560
Dalga Açısı	: 61.861850
Sığlaşma Katsayısı	:
Sapma Katsayısı	:
Dalga Yüksekliği	: 3.3459440

**21. Nokta**

X Koordinatı	: 166.86070
Y Koordinatı	: 247.24270
Su Derinliği	: 3.1924460
Dalga Boyu	: 43.257990
Dalga Açısı	: 60.951190
Sığlaşma Katsayısı	:
Sapma Katsayısı	:
Dalga Yüksekliği	: 2.9180870

**22. Nokta**

X Koordinatı	: 170.79890
Y Koordinatı	: 254.33330
Su Derinliği	: 2.7121050
Dalga Boyu	: 40.079970
Dalga Açısı	: 59.837840
Sığlaşma Katsayısı	:
Sapma Katsayısı	:
Dalga Yüksekliği	: 2.4790260

**23. Nokta**

X Koordinatı	: 174.57480
Y Koordinatı	: 260.83080
Su Derinliği	: 2.2326480
Dalga Boyu	: 36.553830
Dalga Açısı	: 58.490830
Sığlaşma Katsayısı	:
Sapma Katsayısı	:
Dalga Yüksekliği	: 2.0407740

“Ek Çizelge 2'nin devamı”

**24. Nokta**

X Koordinatı	: 178.15690
Y Koordinatı	: 266.67410
Su Derinliği	: 1.7664460
Dalga Boyu	: 32.677490
Dalga Açısı	: 56.910530
Sığlaşma Katsayısı	:
Sapma Katsayısı	:
Dalga Yüksekliği	: 1.6146380

**25. Nokta**

X Koordinatı	: 181.50190
Y Koordinatı	: 271.80740
Su Derinliği	: 1.2619780
Dalga Boyu	: 27.771920
Dalga Açısı	: 54.433700
Sığlaşma Katsayısı	:
Sapma Katsayısı	:
Dalga Yüksekliği	: 1.1535240

**26. Nokta**

X Koordinatı	: 184.53070
Y Koordinatı	: 276.04320
Su Derinliği	: 0.8096322
Dalga Boyu	: 22.349530
Dalga Açısı	: 52.711070
Sığlaşma Katsayısı	:
Sapma Katsayısı	:
Dalga Yüksekliği	: 0.7400524

**27. Nokta**

X Koordinatı	: 187.06950
Y Koordinatı	: 279.37720
Su Derinliği	: 0.5150962
Dalga Boyu	: 17.882180
Dalga Açısı	: 51.848310
Sığlaşma Katsayısı	:
Sapma Katsayısı	:
Dalga Yüksekliği	: 0.4708288

“Ek Çizelge 2'nin devamı”

**28. Nokta**

X Koordinatı	: 189.14070
Y Koordinatı	: 282.01380
Su Derinliği	: 0.3252160
Dalga Boyu	: 14.237410
Dalga Açısı	: 51.741000
Sığlaşma Katsayısı	:
Sapma Katsayısı	:
Dalga Yüksekliği	: 0.2972669

**29. Nokta**

X Koordinatı	: 190.79370
Y Koordinatı	: 284.11000
Su Derinliği	: 0.2033443
Dalga Boyu	: 11.272430
Dalga Açısı	: 52.369700
Sığlaşma Katsayısı	:
Sapma Katsayısı	:
Dalga Yüksekliği	: 0.1858689

**30. Nokta**

X Koordinatı	: 192.08420
Y Koordinatı	: 285.78390
Su Derinliği	: 0.1251526
Dalga Boyu	: 8.8507150
Dalga Açısı	: 53.762360
Sığlaşma Katsayısı	:
Sapma Katsayısı	:
Dalga Yüksekliği	: 0.11439690

Kırılma Noktası Parametreleri

Kırılan Dalga	
Yüksekliği	: 5.7780060
Kırılma Derinliği	: 6.3245050
Kırılma İndisi(d/H)	: 1.0945826



## ÖZGEÇMİŞ

1972 yılında Trabzon ili Yomra ilçesi Kayabaşı Köyünde doğdu. İlkokulu Kayabaşı Köyü İlkokulu, ortaokulu Yomra Ortaokulu ve liseyi Trabzon Lisesinde 1989 yılında tamamladı. 1990 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü kazandı. 1994 yılında mezun oldu ve aynı yıl yüksek lisans eğitimine başladı. 1995 yılında Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Görevlisi kadrosuna atandı. İngilizce bilmektedir.

