

CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÜZENSİZ DALGALARIN ETKİSİNDEKİ
DENİZ BORU HATLARININ DİNAMİK ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Müh. Engin GÜCÜYEN

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Programı : Hidrolik

MANİSA 2008

CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÜZENSİZ DALGALARIN ETKİSİNDEKİ
DENİZ BORU HATLARININ DİNAMİK ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Engin GÜCÜYEN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22/08/2008

Tezin Savunulduğu Tarih : 03/09/2008

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Bekir SOLMAZ

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ümit GÖKKUŞ (C.B.Ü.)

Prof. Dr. Mehmet PAKDEMİRLİ (C.B.Ü.)

MANİSA 2008

İÇİNDEKİLER

	SAYFA
SEMBOL LİSTESİ	I
ŞEKİL LİSTESİ	IV
ÇİZELGE LİSTESİ	VI
TEŞEKKÜR	VII
ÖZET	VIII
ABSTRACT	IX
GİRİŞ	1
1. DÜZENSİZ DALGALARIN TANIMLANMASI	2
2. SPEKTRAL ANALİZ	4
2.1. Fast Fourier Dönüşüm Metodu	5
2.2. Düzensiz Dalga Verilerinden Düzenli Dalga Verileri Oluşturulması	7
3. LİNEER DALGA TEORİSİ	13
3.1. Ki-Kare Dağılımı	20
3.2. Boru Hattının Konumunun Belirlenmesi	28
3.3. Boru Hattına Etkiyen Hidrodinamik Yüklerin Bulunması	31
4. BORU HATTININ STABİLİTESİ VE STATİK ANALİZİ	37
4.1. Boru Hattına Etkiyen Statik Yüklerin Bulunması	37
4.1.1. Boru Hattına Uygulanan Kaldırma Kuvveti	37
4.1.2. Boru Hattının Etrafındaki Betonun Ağırlığından Oluşan Batırma Kuvveti	38
4.1.3. Boru Hattının Zati Ağırlığından Oluşan Batırma Kuvveti	38
4.1.4. Boru Hattının İçinde Taşınan Arıtılmış Suyun Oluşturduğu Batırma Kuvveti	39
4.2. Sehim Hesabı ve Kesit Tahkiki	39
4.3. Kayma Emniyeti Tahkiki	40
4.4. Tespit Kütlesi Tasarımı	40
4.5. Tespit Kütlesinin Temas Ettiği Zemin Gerilmelerinin Tahkiki	41
5. BORU HATTININ DİNAMİK ANALİZİ	43
5.1. Tesir Katsayıları Yöntemi İle Dinamik Analiz	43
5.1.1. Analitik Çözüm	43
5.1.1.1. Tesir Katsayılarının Hesaplanması	43
5.1.1.2. Tesir Çizgisi Diyagram Alanları	47

5.1.2.	Sap2000 Yazılımına Göre Bilgisayar Destekli Çözüm	48
5.2.	Zaman Tanım Alanında (Time History) Dinamik Analiz	49
6.	GERİLME KONTROLÜ	53
7.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	54
	KAYNAKLAR	56
	EKLER	57
	ÖZGEÇMİŞ	67

SEMBOL LİSTESİ

A	:Tesar katsayılarının hesabında kullanılan çarpım katsayısı
A_{BH}	:Boru hattının enkesit alanı
A_B	:Boru hattının dış yüzeyindeki betonun enkesit alanına
$A_ç$	:Çelik enkesit alanı
A_{su}	:Boru hattı içinde taşınan akışkanın en kesit alanı
a	:Tespit kütlesi kalınlığı
a_z	:Düşey dalga ivmeleri
a_x	:Yatay dalga ivmeleri
B	:Tespit kütlesi efektif temel genişliği
b	:Tespit kütlesi üst yüzey genişliği
B'	:Tesar katsayılarının hesabında kullanılan çarpım katsayısı
C	:Tesar katsayılarının hesabında kullanılan çarpım katsayısı
c	:Tespit kütlesi efektif temel eni
c'	:Dalga çukur ya da tepe noktasının yayılım hızı
D	:Boru hattının dış çapı
D'	:Tesar katsayılarının hesabında kullanılan çarpım katsayısı
d	:Dalga derinliği
d_b	:Dalga kırılma derinliği
E	:Birim alan enerjisi
Ei	:Hipotezde ileri sürülen anakitle dağılımının beklenen frekansı
e	:Boru hattının tabanının zemine olan mesafesi
F_C	:Zemin taşıma kapasitesi
F_D	:Boru hattına etkiyen sürüklenme kuvveti
F_H	:Boru hattına etkiyen maksimum yatay kuvvet
F_L	:Boru hattına etkiyen kaldırma kuvveti
F_M	:Boru hattına etkiyen atalet kuvveti
F_S	:Yanal zemin direnci
F_V	:Boru hattına etkiyen maksimum düşey kuvvet
f	:Dalga frekansı
f_s	:Boru hattının yaptığı sehim
f_0	:Dalga temel frekansı
G	:Boru hattının birim ağırlığı

g	:Frekans dağılımındaki grup veya sınıf sayısı
H	:Dalga yüksekliği
H_b	:Kırılan dalga yüksekliği
H_1	:Açık denizde okunmuş düzensiz dalga yükseklikleri
H_2	:Sinüzoidal dalga yükseklikleri
H_0	:Derin su dalga yükseklikleri
J	:Boru atalet momenti
K_r	:Dalga sapma katsayısı
K_s	:Dalga sıkışma katsayısı
Kx_1	: β_1 'e göre hesaplanan çarpım katsayısı
Kx_2	: β_2 'e göre hesaplanan çarpım katsayısı
k	:Dalga sayısı
k	:FFT yönteminde üst üste bindirme sayısı
L	:Dalga boyu
L_a	:Mesnetler arası mesafe
L_0	:Derin su dalga boyu
I	:FFT yönteminde bir penceredeki veri sayısı
I_1	:Kirişin ilk açıklığının uzunlu
I_2	:Kirişin ikinci açıklığının uzunluğu
M	:FFT yönteminde bölüm sayısı
M_2	:Mesnet eğilme momenti
MS_1	:İlk açıklığın 0,4L1 kesitindeki mesnet eğilme momenti
MS_2	:İkinci açıklığın ortasındaki mesnet eğilme momenti
m	:FFT yönteminde verilerin toplam sayısı
m	:Anakitle parametre sayısı
N	:Fourier bileşenleri sayısı
N_q	:Zemin taşıma gücü katsayısı
N_γ	:Zemin taşıma gücü katsayısı
O_i	:Örnek değişkenin gözlenen frekansı
o	:FFT yönteminde üst üste bindirilen veri sayısı
P	:Hidrodinamik basınç
P_{xx}	:Spektral güç yoğunluğu
R_{md}	:Düşey mesnet reaksiyonu
R_{my}	:Yatay mesnet reaksiyonu

$S(\omega)$	:Spektral enerji yoğunluğu
T	:Dalga periyodu
T_s	:Dalga kaydı uzunluğu
t	:Çelik boru et kalınlığı
u	:Yatay dalga hızı
v	:Düşey dalga hızı
y_1	:İlk açıklık tesir katsayısı
y_2	:İkinci açıklık tesir katsayısı
y_3	:Üçüncü açıklık tesir katsayısı
z	:Tespit kütlesi temel kalınlığı
X	:Tesir katsayısı hesaplanacak noktanın başlangıç noktasına uzaklığı
x	:Sinyal verileri
W	:Boru mukavemet momenti
W_k	:Deniz suyunun oluşturduğu kaldırma kuvveti
W_T	:Boru hattına etkileyen toplam statik yük
W_{beton}	:Boru hattı üzerine giydirilen betonun ağırlığından oluşan batırma kuvveti
$W_{\text{çelik}}$	:Çelik boru hattının kendi ağırlığından oluşan batırma kuvveti
W_{su}	:Boru hattının içinde taşınan akışkanın ağırlığından oluşan batırma kuvveti
ω	:Dalga açısal frekansı
q	:Toplam düşey yük
Δt	:Zaman aralığı
η	:Dalga profili
ε	:Perturbasyon sayısı
Φ	:Potansiyel fonksiyonu
μ	:Boru veya tesbit kitlesi ile deniz tabanı arasındaki sürtünme katsayısı
ϕ	:İçsel sürtünme açısı
ϕ'	:Titreşim katsayısı
ρ	:Boru hattı dışındaki akışkanın özgül kütlesi
α	: l_1 ve l_2 bağlı olarak hesaplanan çarpım katsayısı
β_1	: X' e bağlı olarak hesaplanan çarpım katsayısı
β_2	: X' e bağlı olarak hesaplanan çarpım katsayısı

ŞEKİL LİSTESİ	SAYFA	
Şekil 1.1	Düzensiz dalgadan düzenli (sinüzoidal) dalga üretilmesi	1
Şekil 1.2	Düzensiz dalga verileri	3
Şekil 2.1	Spektral enerji yoğunluğu	9
Şekil 3.1	Açık ve kapalı sularda dalga tipleri	11
Şekil 3.2	Lineer teoride parçacık hızları ve yörüngeleri	16
Şekil 3.3	Faz farkı uygulaması öncesi genlikler	19
Şekil 3.4	Faz farkı uygulanmamış D3 dalgası	21
Şekil 3.5	Faz farkı uygulanmış D3 dalgası	22
Şekil 3.6	Faz farkı uygulanmış 32 adet dalga formu	22
Şekil 3.7	Sinüzoidal dalga genlik toplamı	22
Şekil 3.8	Sinüzoidal dalga genlikleri toplamıyla düzensiz dalganın karşılaştırılması	23
Şekil 3.9	Spektrum karşılaştırılması	28
Şekil 3.10	H_0'/gt^2 abağı	29
Şekil 3.11	H_b'/gt^2 abağı	29
Şekil 3.12	Boru hattının görünüşü	31
Şekil 3.13	Boru hattına etkiyen atalet kuvvetinin konumla değişimi	36
Şekil 3.13	Boru hattına etkiyen sürüklenme kuvvetinin konumla değişimi	36
Şekil 3.14	Boru hattına etkiyen toplam yatay kuvvetinin konumla değişimi	36
Şekil 4.1	Boru hattı enkesiti	37
Şekil 4.2	Tespit kütlelerinin perspektif görünüşü ve ölçülendirilmesi	40
Şekil 4.3	Tespit kütlelerine etki eden kuvvetlerin gösterimi	41
Şekil 5.1	M_2 Tesir Çizgisi Ordinatlari	44
Şekil 5.2	M_{S1} Tesir Çizgisi Ordinatlari	45
Şekil 5.3	M_{S2} Tesir çizgisi ordinatlari	45
Şekil 5.4	1 Nolu mesnedin sağındaki kesme kuvveti tesir çizgisi ordinatlari	46
Şekil 5.5	2 Nolu mesnedin solundaki kesme kuvveti tesir çizgisi ordinatlari	46
Şekil 5.6	2 Nolu mesnedin sağındaki kesme kuvveti tesir çizgisi ordinatlari	47
Şekil 5.7	2 Nolu mesnet reaksiyonu tesir çizgisi ordinatlari	47
Şekil 5.8	Dalga kuvvetlerinin taşıt yükü olarak tanımlanması	49
Şekil 5.9	Boru hattının karşılaştırmalı kesit tesirleri	50
Şekil 5.10	Boru hattının Sap2000 programı ile modellenmesi	50

Şekil 5.11	Zaman tanım alanı fonksiyonlarının oluşturulması	51
Şekil 5.12	15 numaralı düğüm noktasının zamanla değişen deplasman değerleri	51
Şekil 5.13	Karşılaştırmalı düğüm nokta deplasmanları	52

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1	Pxx tablosu	8
Çizelge 2.2	Pxx uzunluğu tablosu	9
Çizelge 2.3	Frekans vektörü karakteristikleri	9
Çizelge 2.4	Spektral analiz sonrası H ve T değerleri	12
Çizelge 3.1	Derin su, sıg su sınırları ve dalga boyları	19
Çizelge 3.2	Ki-Kare dağılımı	22
Çizelge 3.3	Faz farkları	23
Çizelge 3.4	Faz farkı sonrası Ki-Kare dağılımı	24
Çizelge 3.5	Enerji spektrumları arasındaki Ki-Kare dağılımı	27
Çizelge 3.6	Sinüzoidal dalgaların kırılma yükseklikleri, derinlikleri ve derin su boyları	30
Çizelge 3.7	C_M , C_D , C_L sabitleri için tavsiye edilen değerler	33
Çizelge 3.8	Yatay dalga hızları	34
Çizelge 3.9	Yatay dalga ivmeleri	35
Çizelge 5.1	Moment ve kesme kuvveti değerleri	48
Çizelge E.1	Ki-Kare değerleri	57
Çizelge E.2	D10 Dalgasının inceleme alanındaki boyları ve yükseklikleri	58
Çizelge E.3	Boru hattına etkileyen atalet kuvveti(F_M) değerleri	59
Çizelge E.4	Dalgaların boru hattına uyguladığı sürüklenme kuvveti(F_D) değerleri	60
Çizelge E.5	Boru hattına etkileyen toplam yatay kuvvet (F_H) değerleri	61
Çizelge E.6	Tesir çizgisi ordinatları	62
Çizelge E.7	Birim yükleme ile elde edilen kesit tesirleri	63
Çizelge E.8	Zaman tanım alanı yöntemi ile elde edilen moment değerleri	64

TEŞEKKÜR

Bu çalışma kapsamında ve her zaman benden her türlü yardımı esirgemeyen danışman hocam sayın Prof.Dr. Bekir SOLMAZ'a, bilgisine sürekli başvurduğum ve bana zamanını ve emeğini harcayan sayın Prof. Dr. Ümit GÖKKUŞ'a, çalışmalarında yardımcı olan meslektaşım İnş. Müh. Fuat KARATURP'a, bilgisayar destekli çözümlemede bilgisine başvurduğum başta Arş.Gör. Ali DEMİR olmak üzere bölümümüzdeki tüm araştırma görevlisi arkadaşlarıma ve beni yetiştirip bu günlere getiren aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

İnş. Müh. Engin GÜCÜYEN

ÖZET

Deniz boruhatlarının stabilizasyonunda, genellikle düzenli dalga verileri kullanılmaktadır. Ancak deniz ortamında bilinmektedir ki, dalga istatistikleri incelendiğinde su yüzü profillerinin düzenli dalga profilinden daha çok rastgele dalga profillerine benzediği görülmektedir. Rastgele dalga verileri, Yükselirken veya Alçalırken Sıfırı Kesme Yöntemiyle veya Hızlı Fourier Dönüşümü-HFD (Fast Fourier Transform-FFT) tekniğiyle düzenli dalga verilerine dönüştürülebilir. Bu çalışmada, FFT tekniği kullanılarak sınırlı bir rastgele dalga verisi incelenmiş ve düzenli dalga verilerine dönüştürülerek tasarım dalga verileri elde edilmiştir. Rastgele dalga verilerine ilişkin su yüzü profilleri ve spektrum değerleriyle, modellenen düzenli dalganın karşılık gelen değerleri istatistiksel uyumluluk testine (Ki-Kare) tabi tutularak uyumlulukları saptanmıştır.

Düzensiz dalga verileriyle uyumlulukları test edilen düzenli dalga verileri kullanılarak, kıyıdan açık denize doğru uzanan belirgin boyutlarda tasarlanmış deniz boru hattı üzerinde oluşacak dalga kökenli kuvvetler hesaplanmıştır. Dalga hız ve ivme parametrelerinin hesaplanmasında, Lineer Dalga (Airy) Teorisi kullanılmıştır. FFT tekniğinden elde edilen ve düzenli dalganın su yüzü profilini ve spektrumunu sağlayan her bir dalganın boru üzerinde oluşturduğu yatay ve düşey dalga kuvvetler, değişen periyotlara bağlı olarak hesaplanmıştır. Boru hattı koordinatlarına karşılık gelen farklı genlikli ve faz açılı sinüsoidal dalgaların oluşturduğu kuvvetlerin bileşkeleri alınarak boruya etkiyen nihai dalga kuvvetleri bulunmuştur.

Stabilizasyonda, belli aralıklarda tasarlanan tesbit kütleleri üzerindeki yatay ve düşey kuvvetler etkisindeki dengesine göre boyutlandırması yapılmıştır. Bu kapsamda, borunun yapay ağırlaştırması ve sehimli dikkate alınmıştır. Akabinde belli zemin özelliklerine göre tesbit kütlelerinin dengeli olabilecek boyutları saptanmıştır.

Statikçe stabil haldeki boru hattının dalga kuvvetleri etkisinde dinamik analizi yapılmıştır. Dinamik analiz tesir çizgileri yöntemi ve zaman tanım alanı (SAP2000 destekli) yöntemlerine göre yapılarak boru hattının kesit tesirleri ve deplasman değerleri hesaplanmıştır. Tesir katsayıları yöntemi analitik ve bilgisayar destekli (SAP2000) olmak üzere iki yolla çözümlenerek sonuçların uyumu gözlenmiştir. Deplasman değerleri bilgisayar destekli (SAP2000) hesaplanmıştır. Zaman tanım alanı yöntemine göre anlık deplasman değerleri hesaplanarak tesir katsayıları yöntemi ile kıyaslanmıştır. Dinamik analizde her iki yöntemle elde edilen kesit tesirlerinin maksimum değeri alınarak ve statik analiz sonuçları da dikkate alınarak kesit tahkiki yapılmıştır.

ABSTRACT

Regular wave records are generally used in stabilization of offshore pipelines, however it's known that, while evaluating wave statistics, surface profiles resemble irregular wave profiles more than regular wave profiles in marine environment. Irregular wave records can be transformed into regular wave records by Fast Fourier Transform (FFT) Method or Zero-Up Crossing Or Zero Down Crossing Method. In this study, based on Fast Fourier Transform Method, a limited irregular wave records are examined and transformed into regular wave records. The convenience of real wave profiles and its spectrum with those of employed waves that are obtained from FFT is compared by Chi-square test. The outputs from Fast Fourier Transform is basically utilized in determining the design wave parameters.

After testing its convenience between regular and irregular waves, regular waves' records are utilized to calculate the hydrodynamic forces based on waves that affect to offshore pipeline connected to shore. Eventhough there are several wave theories (Stokes, Cnoidal, Solitary), Lineer (Airy) wave theory is used in calculating wave velocities and accelerations. Vertical and horizontal forces on pipeline for each sinusoidal wave, obtained from FFT, are calculated in accordance with various time intervals and cross-sections on pipeline. Total forces on pipeline can be calculated by combining whole sinusoidal waves, having different phase angles and amplitudes, corresponding to pipeline's coordinates.

Artificial weighted supports, designed with certain distances, are sized cosidering balance of vertical and horizontal wave forces.

Stabilized pipeline is dynamically analysed under wave forces. Influence lines and time history methods are used in dynamic analysis to find displacements and interval stresses-reactions of pipeline. Influence lines method is analyzed in two ways, analitic and computational (SAP2000). Outputs of these two ways convenience is observed. Displacements are calculated with computer supported method by using SAP2000 software. Instant displacements from Time History Method are compared with those of influence lines methods. According to maximum values of interval stresses-reactions obtained from both methods is employed in sizing the crosssections of pipeline.

GİRİŞ

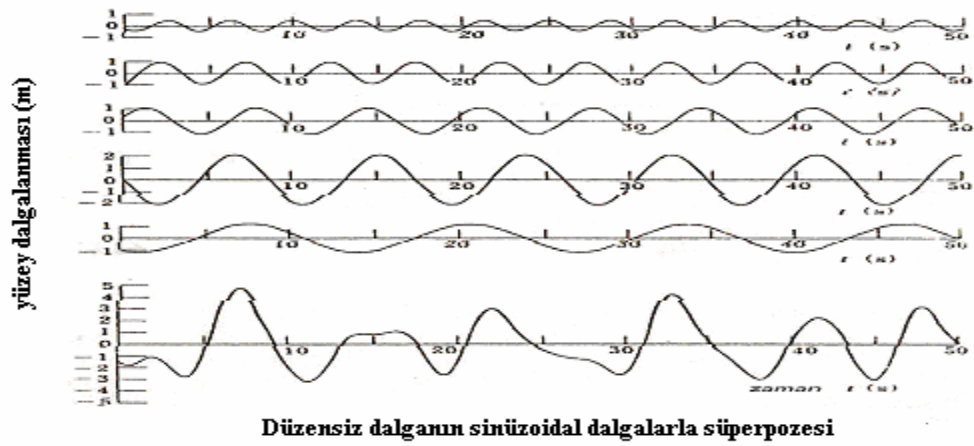
Deniz boru hatları; evsel ve endüstriyel atık suların deşarjlarında, doğalgaz ve petrolün boru taşımacılığında, endüstriyel tesislerin soğuk su alma ve boşaltım yapılarında ve enerji ile haberleşme kablolarının deniz geçişlerinde geniş kullanım alanına sahiptir.

Çevresel parametrelerden olan dalgalar, tasarım için ya rüzgar verilerinden istatistiksel analizle ya da basınç ölçerle doğrudan ölçülen su yüzü profillerinin değişimiyle elde edilen verilerin değerlendirmesiyle saptanmaktadır. Bu çalışmada analog veya dijital kayıtlarla yapılan düzensiz su yüzü profil değişimleri, Hızlı Fourier Dönüşüm (FFT; Fast Fourier Transform) tekniğine dayanan spektral yöntemle değerlendirilmiştir. Tasarım dalga parametrelerine ise spektrum eğrisinden yararlanılarak bulunan çoklu sinüsoidal dalgaların su yüzü profillerinin süperpozisyonu ile ulaşılmıştır. Çoklu düzenli dalgaların her biri değişik genliklere, periyotlara, ve faz açılara sahip sinüs dalgasıyla temsil edilmektedir. Çoklu düzenli dalgaların süperpozisyonları ile elde edilen birleşik dalgağın profili ve spektrumu ile gerçek dalgağın benzer özellikleri Ki-Kare testi kullanılarak incelenmiş ve uyumlulukları saptanmıştır. Bu durumda çoklu düzenli dalgağın süperpozisyonu ile boruhattı üzerindeki dalga kuvvetleri hesaplanmıştır. Boruhattının yapay ağırlaştırmayla yüzmesi önlenmiş ve su-boru-zemin etkileşim kuvvetlerine göre stabilizasyonu yapılmıştır.

Stabilizasyonu sağlanan boru hattına etki eden maksimum kuvvetlerin bulunduğu son üç açıklığı göz önünde bulundurularak dinamik analizi Tesir Katsayıları Yöntemi ve Zaman Tanım Alanı yöntemine göre yapılmıştır. Tesir Katsayıları Yöntemine göre, bilgisayar destekli (SAP2000) ve analitik olmak üzere iki tür çözümleme yapılmıştır. Bu çözümlerin sonucunda elde edilen kesit tesirlerinin uyumu gözlemlendikten sonra bilgisayar destekli çözümden elde edilen düğüm nokta deplasmanları ile Zaman Tanım Alanı yöntemiyle elde edilen düğüm nokta deplasmanları karşılaştırılmıştır. Zaman Tanım Alanı ve Tesir Katsayıları Yöntemlerinden elde edilen maksimum kesit tesirleri kullanılarak boru hattı kesit tahkiki yapılmıştır.

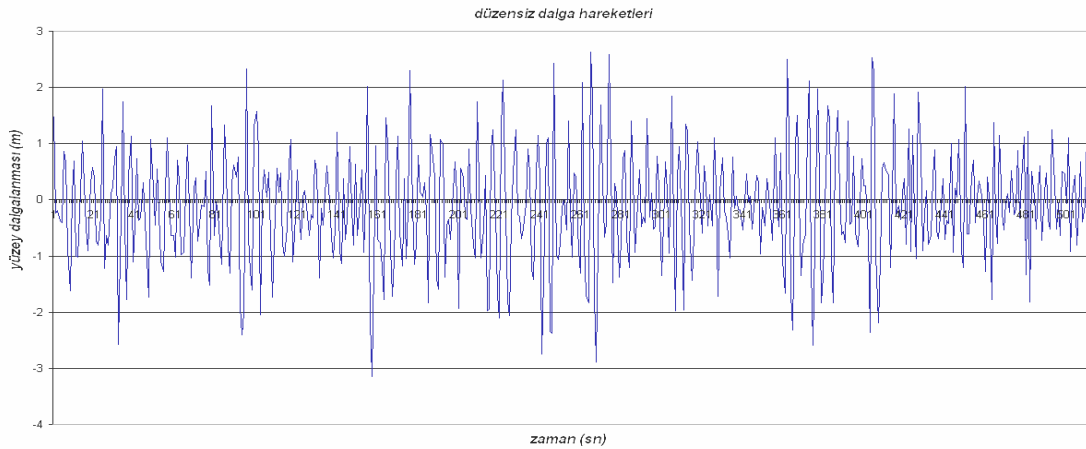
1. DÜZENSİZ DALGALARIN TANIMLANMASI

Açık denizde, genelde rüzgar yönüne, şiddetine ve esme süresine bağlı olarak çeşitli yönlerde doğru su yüzünde dalgalanmalar oluşur. Su yüzündeki oluşan yükselmeler ve çukurlaşmalar, periyodik, rasgele ve periyodik rasgele su yüzü formlarına sebep olur. Su yüzeyinde oluşan bu salınımlar, genelde sinüzoidal formda olabildiği gibi farklı formlarda da olabilir. Doğal deniz ortamındaki salınımlar, ancak çoklu sinüs dalgalarının bileşimi (eşdeğer düzenli dalgalar) biçiminde tanımlanabilir. Bunun nedeni de tek bir sinüs dalgasının oluşumu ancak ideal koşullarda görülebilmektedir.



Şekil 1.1 Düzensiz dalgadan düzenli (sinüzoidal) dalga üretilmesi

Düzensiz dalga formu, sonsuz sayıda değişik frekans ve genliklerde sinüzoidal dalgaların süperpozisyonundan oluştuğu düşüncesiyle eşdeğer düzenli dalga biçiminde analiz edilir. (Goda, Y. 1985)



Şekil 1.2 Düzensiz dalga verileri

Bu çalışmada, Şekil (1.2)'de görünen derin su bölgesindeki düzensiz dalga formunun zamanla değişimi veri olarak alınmış ve eşdeğer düzenli dalgaların kombinasyonu biçiminde tanımlanmasına çalışılmıştır. Sınırlı süreli zaman serisi biçiminde alınan veri saniyelik dilimlerle ayrıştırılmıştır. Bu veri, denizin belirli bir konumda kaydedilen 512 sn süreli dalga hareketini temsil etmektedir.

Dalgalanmamış su seviyesinden olan su yüzü profilinin yükseklik farkları ayrıştırılmış veri biçiminde alınarak, düzensiz dalganın karakteristiği enerji spektrumu ile tanımlanmıştır. Düzensiz dalganın spektrumu, birçok sinüzoidal dalganın kombinasyonunun oluşabilmesi için farklı genlik ve periyottaki düzenli dalgaların elde edilmesine olanak sağlayacaktır.

2. SPEKTRAL ANALİZ

Su dalgasının en basit formu, durgun suyun sinüzoidal salınımı olarak düşünülebilir. Bir sinüzoidal dalga için, dalga profili aşağıdaki gibi belirlenmiştir. (Gökkuş, Ü. ,1990)

$$y(x,t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (2.1)$$

Denklem (2.1)'de, ω ; T (dalga periyodu)'ye bağlı olarak ($\omega=2\pi/T$) ile hesaplanan dalga açısal frekansını, k; L (dalga boyu)'ye bağlı olarak ($k=2\pi/L$) ile hesaplanan dalga sayısını, H; dalga yüksekliğini temsil eder.

Belirli bir konumda ($x = 0$) dalganın orijini seçilirse,

$$y(t) = \frac{H}{2} \cos(\omega t) \quad (2.2)$$

dalga formunun bağıntısı elde edilir. Bu formun Fourier serisi biçiminde ifadesi,

$$y(t) = \sum_{n=1}^N (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)) \quad (2.3)$$

olarak tanımlanabilir. Burada, N; Fourier bileşenlerinin sayısıdır. Bu bağıntı deniz ortamındaki dalganın rasgele formunu temsil etmemektedir. Dalganın karakteristiğini en iyi tanımlayacak olan enerji yoğunluğu spektrumudur.

Toplam dalga enerjisi, E (birim alan enerjisi), sonsuz zaman aralığındaki bir dalga kaydına ilişkin olarak aşağıdaki integral ifadesiyle hesaplanabilir.

$$E = \frac{1}{2} \rho g \int_{-\infty}^{+\infty} [y(t)]^2 dt \quad (2.4)$$

Denklem (2.3)'teki Fourier bileşenleri a_n ve b_n , $a(\omega)$ ve $b(\omega)$ olarak genelleştirilirse Denklem (2.4) aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$E = \frac{1}{2} \rho g \int_{-\infty}^{\infty} [a^2(\omega) + b^2(\omega)] d\omega \quad (2.5)$$

$$E = \frac{1}{2} \delta g \int_{-\infty}^{\infty} A^2(\omega) d\omega \quad (2.6)$$

Dalga kaydı uzunluğuna T_s denilirse, E (birim alan enerjisi) aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\bar{E} = \frac{1}{2} \delta g \int_{-\infty}^{\infty} ([A(\omega)]^2 / T_s) d\omega \quad (2.7)$$

Spektral enerji yoğunluğunun tanımı;

$$S(\omega) = \frac{[A(\omega)]^2}{\pi T_s} \quad (2.8)$$

Toplam enerji, frekans-spektral enerji yoğunluğu eğrisinin altında kalan alandır.

$$\bar{E} = \frac{1}{2} \delta g \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) d\omega \quad (2.9)$$

Burada; $S(\omega)$ 'nin birimi "uzunluk²-saniye" olarak ifade edilmektedir.

2.1. Fast Fourier Transform (FFT) Metodu

FFT tekniğinde, gerçek zamanlı seri $y(t)$ dikkate alınarak, fonksiyon sonsuz sayıdaki sinüzoidal bileşenlerin genlik ve fazlarıyla ifade edilebilir. Ayırık seri, bu tip problemlerin analizinde kullanılır. Bu serilerdeki $y(t)$ değerleri, eşit zaman aralıklı ayırık noktaların serisinden meydana gelir. (Gökkuş, Ü.,1990) Sürekli spektruma ulaşabilmek için en kısa yol Fourier dönüşümüdür. Bu dönüşümünde zaman serisi $y(t)$, sonsuz aralıkta bir fonksiyon gibi düşünülür. Fourier bileşenlerine, Fourier integrali ve tersi kullanılarak ulaşılabilir.

Son olarak sürekli bir fonksiyon için;

$$Y(f) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.10)$$

ifadesi kullanılabilir. Sınırlı dalga kaydı için zaman serisinin Fourier dönüşümü,

$$Y(f;T) = \int_{-1/2T}^{1/2T} y(t;T)e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.11)$$

ifadesiyle açıklanabildiği gibi ve tersi de ,

$$Y(t;T) = \int_{-\infty}^{\infty} Y(f;T)e^{-j2\pi ft} df \quad (2.12)$$

denklemleriyle bağlantısıyla temsil edilebilir. Burada, T; zaman serisinin sınırlı uzunluğunu tanımlar. Denklem (2.13), A_n ve $Y(f;T)$ arasındaki ilişkinin doğruluğunu kolaylıkla tanımlar.

$$A_n^2 = \int_{f_n-f/2}^{f_n+f/2} \frac{|Y(f;T)|^2}{T} df \quad (2.13)$$

Ayrık bir sinyal, T süreli sürekli sinyal zaman serisinin toplam uzunluğunun N ile bölümüyle elde edilen $\Delta t = T/N$ zaman aralıklarındaki $y(t)$ 'den elde edilebilmektedir.

T_0 periyotlu ayrık serinin kompleks formu şöyle yazılabilir.

$$y(t) = \sum_{n=1}^{N-1} A_n e^{j2\pi n(f_0)t} \quad (2.14)$$

f_0 , temel frekans ($1/T_0$) ve A_n Fourier katsayıları,

$$A_n = \frac{1}{T_0} \sum_{t=0}^{T_0} y(t) e^{-j2\pi n(f_0)t} \Delta t \text{ ve } T_0 = N \cdot \Delta t \quad (2.15)$$

olarak tanımlanabilir. Bir dalgaya ilişkin sürekli enerji spektrumu, her bir dalgaanın enerji yoğunluğundan hesaplanacak çizgi spektrumundan oluşur.

$$S_n = \frac{|A_n|^2}{f} \quad (2.16)$$

Enerji düşüncesinin temelinde Parseval teoreminde yer alır.

$$\sum_{n=1}^N |A_n|^2 = \frac{1}{T} \int_{-1/2T}^{1/2T} Y^2(t) dt \quad (2.17)$$

Zaman serisinin enerjisi, Fourier katsayılarının karelerinin toplamına eşittir. FFT hesabında genellikle, T_s toplam veri uzunluğu, Δt sabit zaman aralıklı N (ikinin kuvveti olmalıdır) veri sayısına sahip M sayıda küçük bölümlere ayrılır. Sonuç M bölümlerin ortalamasıdır. İlk olarak bu nicelikler bağımsız seçilmiş olmalıdır. Kayıt uzunluğu T_s ,

$$T_s = M.N.\Delta t \quad (2.18)$$

İle ifade edilir ve bilinen bir kayıt için T_s ve Δt sabittir. Böylece toplam veri sayısı bu değerlerden elde edilebilir. $y(t)$ zaman fonksiyonu olarak dalga profiliyse, FFT den elde edilen enerji spektrumu,

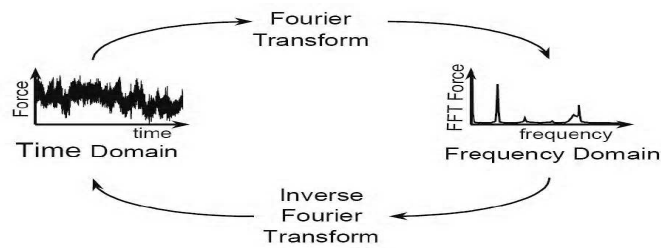
$$S(\omega) = \frac{1}{T_s} \left[\sum_{n=1}^N y(n\Delta t) e^{j2\pi f(n\Delta t)} \Delta t \right]^2 \quad (2.19)$$

olarak verilebilir.

Analiz edilen dalga kaydı uzunluğu daima sonludur. M genellikle 8 den büyük alınır ve N 512 ile 2048 arasındadır.

2.2. Düzensiz Dalga Verilerinden Düzenli Dalga Verileri Oluşturulması

Düzensiz dalgalara FFT yöntemi uygulandığında, düzensiz dalgalara farklı frekanslara sahip sinüzoidal dalgalara ifade edilebilmektedir. Sinüzoidal dalgalara bilindiği gibi düzenli dalgalardır. Çoklu sinüs dalgalara temel parametreleri, FFT yöntemiyle elde edilen spektrum eğrilerinden faydalanılarak elde edilebilmektedir. (Gökkuş, Ü. ,1990)



Şekil 2.1 FFT Yönteminin şematik gösterimi

Bu çalışmada birim zaman aralıklarında kayıtlardan elde edilen dalga genlikleri, FFT yöntemi kullanılarak analiz edilmiş, zaman tanım aralığından frekans tanım aralığına geçilerek dönüşüm yapılmış ve spektral enerji eğrisi elde edilmiştir. Spektral enerji eğrisinin frekans ve spektrum değerleri kullanılarak sinüzoidal dalgalar üretilmiştir.

Spektral enerji eğrisi hesaplanırken, MATLAB programının sinyal işleme araç kutusu kullanılmıştır. Araç kutusundaki Welch ortalama değiştirilmiş periodogram metodu ile çalışılmıştır. Programda kullanılan sözdizimi;

$[P_{xx}, \omega] = \text{pwelch}(x)$

$[P_{xx}, \omega] = \text{pwelch}(x, \text{window})$

$[P_{xx}, \omega] = \text{pwelch}(x, \text{window}, \text{noverlap})$

$[P_{xx}, \omega] = \text{pwelch}(x, \text{window}, \text{noverlap}, \text{nfft})$

$[P_{xx}, \omega] = \text{pwelch}(x, \text{window}, \text{noverlap}, \omega)$

$[P_{xx}, f] = \text{pwelch}(x, \text{window}, \text{noverlap}, \text{nfft}, \text{fs})$

$[P_{xx}, f] = \text{pwelch}(x, \text{window}, \text{noverlap}, f, \text{fs})$

$[...] = \text{pwelch}(x, \text{window}, \text{noverlap}, \dots, \text{'range'})$ olarak genellenebilir. (Sticklen, J., Eskil, M., T., 2006)

Sözdiziminde; P_{xx} , spektral güç yoğunluğunu, x , sinyal verilerini temsil eder.

$[P_{xx}, \omega] = \text{pwelch}(x)$ ifadesi spektral güç yoğunluğunu hesaplar; x veri vektörü eşit uzunlukta sekiz bölüme ayrılır ve her biri % 50 oranında üst üste bindirilir. Eşit uzunluktaki bölümlere dahil edilemeyen girdiler hesaplama dahil edilmez. Her bölüm hamming yöntemiyle pencerelenir.

x vektörü gerçek sayılardan oluşuyorsa, spektral güç yoğunluğu tek taraflı oluşur. Ancak vektör kompleks sayılardan oluşuyorsa yoğunluk çift taraflıdır. Bu sözdiziminde, N sayısı 256'dan büyük ve bölüm uzunluğundan büyük 2'nin üst katları kadardır.

Genelde, fft uzunluğunu N olarak ifade edersek, hesaplama sonucunda bulunacak olan P_{xx} sayısı ve normalize edilmiş frekans (ω), x ve N 'e bağlıdır ve aşağıdaki gibi gösterilebilir.

Çizelge 2.1. P_{xx} Tablosu

Veri türü	P_{xx} sayısı	frekans aralığı
reel sayılar	$(N/2)+1$	$0, \pi$
kompleks sayılar	N	$0, 2\pi$

$[P_{xx}, \omega] = \text{pwelch}(x, \text{window})$ ifadesi spektral güç yoğunluğunu hesaplar; window kısmıyla x verileri istenilen sayıda bölüme ayrılarak %50 üst üste bindirme uygulanır. Her bölümün

uzunluğu pencere uzunluğu kadardır. Eğer window kısmı boş vektör [] olarak girilirse, veri 8 bölüme ayrılır ve yine her bir bölüme hamming yöntemi uygulanır.

$[P_{xx}, \omega] = \text{pwelch}(x, \text{window}, \text{noverlap})$ ifadesi spektral güç yoğunluğunu hesaplar; öncelikle x verisi window kısmına bağlı olarak bölümlere ayrılır. noverlap kısmı bize üst üste bindirilecek olan veri sayısını yada yüzdesini girmemizi sağlar. Bu kısımdaki veri sayısının bir bölümdeki veri sayısından fazla olmaması gerekir. Eğer noverlap kısmı boş vektör [] olarak girilirse, üst üste bindirme olarak % 50 alınır.

$[P_{xx}, \omega] = \text{pwelch}(x, \text{window}, \text{noverlap}, \text{nfft})$ ifadesi spektral güç yoğunluğunu hesaplar; nfft kısmı sayesinde pencere uzunluğu tanımlanır. Boş vektör olarak [] tanımlanırsa, daha önce belirtilen kurallara göre N sayısı atanır. Pxx ve ω , x verilerine ve nfft sayısına bağlıdır.

Çizelge 2.2. Pxx Uzunluğu Tablosu

Reel/kompleks veri	nfft tek/çift	Pxx uzunluğu	w aralığı
Reel sayılar	çift	$(\text{nfft} / 2 + 1)$	$0, \pi$
Reel sayılar	tek	$(\text{nfft} + 1)/2$	$0, \pi$
Kompleks sayılar	tek veya çift	nfft	$0, 2\pi$

$[P_{xx}, \omega] = \text{pwelch}(x, \text{window}, \text{noverlap}, \omega)$ ifadesi spektral güç yoğunluğunu hesaplar; Goertzel algoritması kullanılarak ω kısmında girilen normalize edilmiş frekanslarda çift taraflı spektral güç yoğunluğu hesaplar. ω değerleri sinyal çözümüne uygun en yakın ayrık Fourier transform ikilisine yuvarlanır. ω 'nin birimi rad/örnek dir.

$[P_{xx}, f] = \text{pwelch}(x, \text{window}, \text{noverlap}, \text{nfft}, f_s)$ ifadesi spektral güç yoğunluğunu hesaplar; f_s (Hz) kısmına verilerin frekansı girilerek bulunmasına olanak tanır. Spektral yoğunluk her Hz için gücün birimlerinde hesaplanır. Eğer boş vektör olarak tanımlanırsa [] f_s 1 olarak atanır. Burada hesaplanan f vektörünün aralığı f_s , x ve nfft sayısına bağlıdır.

Çizelge 2.3. Frekans Vektörü Karakteristikleri

Reel/kompleks veri	nfft tek/çift	f aralığı
Reel sayılar	çift	$[0, f_s/2]$
Reel sayılar	tek	$[0, f_s/2)$
Kompleks sayılar	tek veya çift	$[0, f_s)$

[Pxx,f] = pwelch(x>window,noverlap,f,fs) ifadesi spektral güç yoğunluğunu hesaplar; Goertzel algoritması kullanılarak f kısmında girilen normalize edilmiş frekanslarda çift taraflı spektral güç yoğunluğu hesaplar. Bulunması istenen f değerleri sinyal çözümüne uygun en yakın ayırık Fourier transform ikilisine yuvarlanır.

[...] = pwelch(x>window,noverlap,...,'range') ifadesi; frekans değerlerinin aralığını hesaplar. x vektörü gerçek sayılardan oluştuğunda faydalı olabilir. Range dizisi aynı zamanda; çift taraflı (two-sided) girilirse, [0,fs) frekans aralığında spektral güç yoğunluğu hesaplanır. Eğer fs değeri boş vektör olursa , frekans aralığı [0,1) olur. Eğer fs belirtilmezse, frekans aralığı [0 ,2 π) olur.

Range dizisi aynı zamanda tek taraflı (one –sided) girilirse; x'in frekans aralığında tek taraflı spektral güç yoğunluğu hesaplar. Range dizisi, noverlap kısmından sonra istenilen yere girilebilir.

Metodun kullandığı algoritma;

1-Sinyal verisi vektörü, k kadar üst üste bindirilen kısımlara ayrılır. k sayısı, bindirme yüzdesi veya sayısı ile pencereleme yöntemine bağlıdır.

$$k = \frac{m - o}{l - o} \quad (2.20)$$

Denklem (2.19)'da m; verilerin toplam sayısını, l; bir penceredeki veri sayısını, o; üst üste bindirilen veri sayısını temsil eder.

2-Belirlenen pencere, x'in her bölümüne uygulanır.

3-fft uzunluğunun bir noktası pencerelenmiş veriye uygulanır.

4-Hazırlanan her bir bölümün periodogramı hesaplanır.

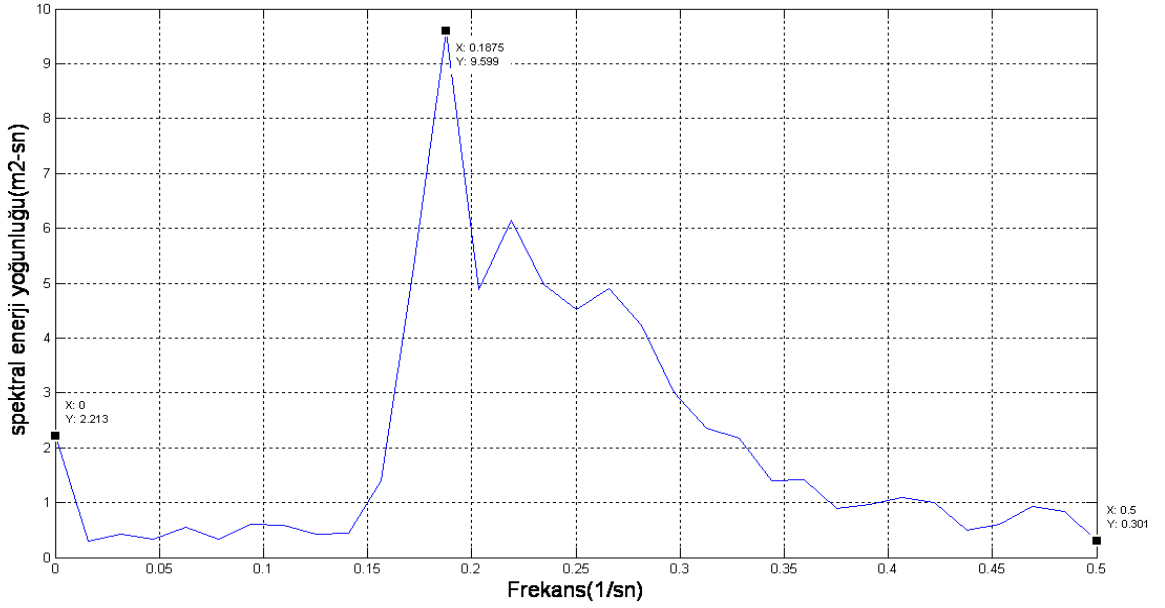
5-Spektrum tahminini oluşturmak için, hesaplanan her bir periodogramın ortalaması alınır.

6-Spektrum tahmini, spektral enerji yoğunluğunu hesaplamak için ölçeklendirilir.

Bu çalışmada kullanılan sözdizimi; [Pxx,f]=pwelch(H1,[],[],64,1) olarak MATLAB programına girilmiştir. Burada H1 verileri Şekil 1.2'de görülen, açık denizde okunmuş düzensiz dalga yükseklikleridir. Pencereleme ve üst üste bindirme kısımları boş vektör olarak tanımlanarak, pencereleme yönteminin, hamming, üst üste bindirme yüzdesinin, %50, FFT pencere boyunun (N), 64, bölüm sayısının (M), 8 olması sağlanmıştır.

Nfft kısmında fft uzunluğunu 64 olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla Pxx (diğer tanımlamalarda Sf) sayısı ve f sayısı $N/2+1=33$ olarak çıkmıştır. fs değeri olarak verilerin frekansı olan 1 sn girilmiştir.

MATLAB programının FFT tekniği için değinilen veriler ve Şekil (1.2)'de görülen düzensiz dalga verilerinin ayrıklaştırılan değerleri kullanılarak düzensiz dalganın spektral enerji yoğunluğu Şekil (2.2)'deki gibi hesaplanmıştır. (Karaturp, F., 2007)



Şekil 2.2 Düzensiz dalganın spektral enerji yoğunluğu

Spektral enerji yoğunluğu ($P_{xx} = m^2 \cdot sn$), frekans ($f = Hz$), dalga yüksekliği ($H = m$) ve dalga periyodu ($T = sn$) alınarak Denklem (2.21) ve Denklem (2.22)' den her bir birey düzenli dalganın yükseklik ve periyotları hesaplanmıştır. (Gökkuş, Ü. ,1990)

$$H(f_1) = 2[2P_{xx}(f_1)\Delta f]^{1/2} \quad (2.21)$$

$$T_1 = 1/f_1 \quad (2.22)$$

Elde edilen birey düzenli dalgaların parametreleri Çizelge (2.4) de sunulmaktadır.

Çizelge 2.4 Spektral analiz sonrası H ve T değerleri

Pxx(m ² – sn)	f(Hz)	H	T
2,213	0,000	0,526	-
0,295	0,016	0,192	64,103
0,424	0,031	0,230	32,051
0,336	0,047	0,205	21,322
0,546	0,063	0,261	16,000
0,341	0,078	0,206	12,804
0,611	0,094	0,276	10,661
0,583	0,109	0,270	9,141
0,417	0,125	0,228	8,000
0,440	0,141	0,234	7,112
1,401	0,156	0,418	6,402
5,306	0,172	0,814	5,817
9,599	0,188	1,094	5,333
4,884	0,203	0,781	4,924
6,155	0,219	0,876	4,570
4,970	0,234	0,788	4,266
4,514	0,250	0,751	4,000
4,906	0,266	0,782	3,765
4,230	0,281	0,727	3,556
3,001	0,297	0,612	3,368
2,358	0,313	0,542	3,200
2,184	0,328	0,522	3,048
1,392	0,344	0,417	2,909
1,423	0,359	0,421	2,782
0,891	0,375	0,334	2,667
0,966	0,391	0,347	2,560
1,097	0,406	0,370	2,462
0,996	0,422	0,353	2,370
0,496	0,438	0,249	2,286
0,599	0,453	0,273	2,207
0,937	0,469	0,342	2,133
0,834	0,484	0,323	2,064
0,301	0,500	0,194	2,000

Birey düzenli dalgaların kombinasyonları alınarak düzensiz dalgaları temsil edip etmedikleri belirlenecektir. Bunun için faz farkları dikkate alınarak kombinasyonlar geliştirilmiştir. Hangi kombinasyonun gerçek düzensiz dalgaanın formunu temsil ettiği öncelikle saptanacaktır. Bu çalışmada; her bir birey dalga sinüs formunda tanımlanmakta ve düzenli dalgalar, lineer dalga teorisiyle izah edilmiştir. Bilinmektedir ki, farklı dalga teorileri vardır ve dalga yüksekliği-su derinliği-periyot özelliklerine göre lineer dalga teorisi dışında kalan dalga teorileri de kullanılabilir. Ancak bu çalışma, lineer dalga teorisi esaslı düzenli dalga formu tanımlanmasına dayanmaktadır.

3. LİNEER DALGA TEORİSİ

Spektral analiz sonucu bulunan dalga yüksekliği H ve periyodu T değerleri, düzensiz dalgayı temsil eden 32 adet sinüzoidal dalgaya aittir. Bu değerlerin fazlalaştırılmasıyla gerçek dalga formu daha iyi tanımlanabilecektir.

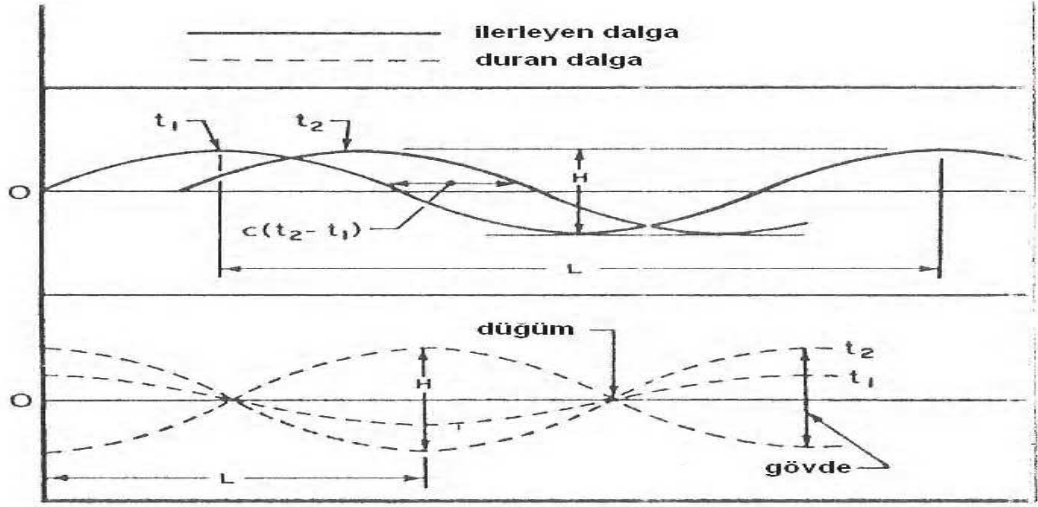
Birçok dalga teorisi, çevresel parametrelere bağlı olan değişik ortamlara uygun olarak geliştirilmiştir. Bu parametrelere, su derinliği, dalga yüksekliği ve dalga periyodu örnek gösterilebilir. Kıyı yapılarının dizaynında kullanılan dalga teorilerinin birçoğu bu üç parametreye dayanır. (Karaturp, F., 2004)

Bütün dalga teorileri, dalgaların periyodik ve üniform olduğunu kabul eder. (Periyot T, dalga yüksekliği H) Periyot, dalga tepesinin bir dalga uzunluğu kadar mesafeyi kat etmesi için gereken zamandır. Dalga yüksekliği ise iki dalga arası çukur ile dalga tepesi arasındaki dikey mesafedir. Dalga boyu, dalganın yayılım yönünde birbirini izleyen dalgaların benzer noktaları arasında (L) ölçülen yatay mesafedir. Periyodik bir dalga için tepe noktasının ve çukur noktasının hızı yayılım hızı olarak adlandırılır. Bu hız basit şekilde;

$$c' = \frac{L}{T} \quad (3.1)$$

olarak verilebilir.

Dalgalar XY düzleminde iki boyutlu olarak düşünülür. Deniz tabanı örselenmiştir ve derinliği (d) yatay olarak kabul edilir. Burada d mesafesi deniz tabanından durgun su seviyesine olan mesafedir. Dalgalar pozitif x yönünde ilerler. Bu noktada, duran bir dalga ve ilerleyen bir dalga arasındaki farkı anlamak uygun olur. Şekil (3.1)'e bakarak fark anlaşılabilir. İlerleyen dalga, verilen bir hızda x ekseninde hareket eder. Dalga özellikleri aynı kalır. Diğer tarafta, duran dalgada su yüzeyi ilerleme yapmadan iki sabit nokta arasından dikey olarak dalgalanma yapar. Duran bir dalganın iki tane ilerleyen dalganın (genliği ve periyodu aynı olan) birleşiminden oluştuğu söylenebilir. Ama aynı hızda ve ters yönlerde hareket etmeleri neticesinde net hareket sıfırdır, geriye sadece dikey dalgalanma kalır. Verilen bir noktada, duran dalga x ekseninde bir döngüden diğerine aynı miktarda dalgalanma yapar. Böylece bir nokta maksimum dikey dalgalanmayı yapar ve dalganın gövdesini oluşturur. Diğer nokta düşey deplasman yapmaz ve düğümü oluşturur. Duran bir dalgada birçok gövde ve düğüm oluşur. Genelde bu tip dalgalara liman haznesi, göller, laboratuvar haznesi gibi sınırlı sularda rastlanır.



Şekil 3.1 Açık ve kapalı sularda dalga tipleri

Bir dalga hareketi genelde H , T , d parametreleri ile ifade edilir. Herhangi bir dalga teorisi için problem akım alanına mahsus olan hız potansiyelini bulmaktır. (Φ veya aynı şekilde akım fonksiyonu Ψ) Sınır değer problemi iki boyutlu olarak özetlenirse;

$$\text{Diferansiyel (Laplace) denklemi: } \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 0 \quad (3.2)$$

$$\text{Taban sınır koşulu: } y=-d \text{ için } \frac{\partial \Phi}{\partial y} = 0 \quad (3.3)$$

$$\text{Serbest yüzey kinematik koşulu: } y=\eta \text{ için } \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial \Phi}{\partial y} = 0 \quad (3.4)$$

$$\text{Serbest yüzey dinamik koşulu: } y=\eta \text{ için } \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 \right] + g\eta = 0 \quad (3.5)$$

bağıntıları elde edilebilir.

Potansiyel fonksiyon, Laplace denklemini ve üç sınır koşulunu sağlamak zorundadır. Bu problemin çözümü zordur. Çünkü serbest yüzey sınır koşulları nonlineerdir ve sürekli olarak değişen bir yapıya sahiptir. (Karaturp, F., 2004)

Küçük genlikli dalga teorisi en basit ve en çok kullanılan dalga teorisidir. Bu teori aynı zamanda airy teori veya sinüzoidal teori olarak da bilinir. Bu teoride dalga yüksekliği, dalga uzunluğuna veya su derinliğine kıyasla daha küçüktür. Bu teori, birinci mertebedeki dalga yüksekliği terimlerini düşürerek, serbest yüzey sınır koşullarını doğrusallaştırmaya imkan tanır. Aynı şekilde serbest yüzey koşullarını dalgalanan bir yüzeyden ziyade normal su seviyesinde sağlanmasına da imkan tanır. Potansiyel fonksiyonun çözümü (Φ) boyutsuz perturbasyon parametresi olan ε 'un terimlerinin seri açılımı ile elde edilir.

$$\varepsilon = \frac{kH}{2} \quad (3.6)$$

Burada k dalga sayısıdır. Bu ifade $k = 2\pi/L$ ile verilir. Böylece;

$$\Phi = \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n \Phi_n \quad (3.7)$$

Burada Φ_n , Φ için n. dereceden çözümdür. Benzer şekilde (η) dalga profili;

$$\eta = \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n \eta_n \quad (3.8)$$

şeklinde tanımlanabilir. Lineer dalga teorisi 1. mertebedeki terimler ile ilgilidir. Bu nedenle Φ ve η açılımlarında lineer terimler tutulur nonlinear terimler dikkate alınmaz ve serbest yüzey tabaka koşullarında yerine yazılırsa; Denklem (3.4-3.5) şu şekli alır:

$$y=0 \text{ için; } \frac{\partial \eta_1}{\partial t} - \frac{\partial \Phi_1}{\partial y} = 0 \quad (3.9)$$

$$y=0 \text{ için; } \frac{\partial \Phi_1}{\partial t} + g\eta_1 = 0 \quad (3.10)$$

denklem (3.10)'den serbest yüzey profili;

$$y=0 \text{ için; } \eta_1 = -\frac{1}{g} \left(\frac{\partial \Phi_1}{\partial t} \right) \quad (3.11)$$

şeklinde verilebilir.

İki serbest yüzey sınır koşulu denklemi, bilinmeyenlerden biri ihmal edilerek tek denkleme yazılabilir. $y=0$ için;

$$\frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi_1}{\partial y} = 0 \quad (3.12)$$

Sınır değer problemindeki diğer denklemler Denklem (3.2-3.3) ile aynıdır. c' hızında ilerleyen bir dalga için periyodiklik $\alpha = x - c't$ şeklinde verilebilir. α 'nın bu formu zamanın x 'in negatif yönünde ilerlediğini gösterir. (dalga yayılım yönü $+x$ boyunca). Alternatif olarak zaman $-x$ eksenı boyunca dalga yayılım yönünde ilerliyorsa $\alpha = x + c't$ yazılabilir. Bu tip sınır değer problemi değişken ayrıştırma tekniği ile çözülür. Φ_1 fonksiyonunun;

$$\Phi_1 = Y(y) \Lambda(\alpha) \quad (3.13)$$

şeklinde olduğu söylenebilir. Bu denklem kısmi diferansiyel denklemde yerine konduğunda iki diferansiyel denklem meydana getirir.

$$\frac{d^2 Y}{dy^2} - k^2 Y = 0 \quad (3.14)$$

$$\frac{d\Lambda}{d\alpha} - k^2 \Lambda = 0 \quad (3.15)$$

Burada k^2 sabittir. Genel çözüm;

$$Y = A_1 \cosh ky + A_2 \sinh ky \quad (3.16)$$

$$\Lambda = A_3 \cos[k(x - ct)] + A_4 \sin[k(x - ct)] \quad (3.17)$$

şeklinde verilebilir. Deniz ortamının belli bir konumunda $x=0$ noktasında $\eta_1 = H/2$ ($t=0$). Böylelikle $A_3=0$ yazılabilir. Taban sınır koşulundan $A_2 = A_1 \tanh kd$ yazılabilir.

Denklem (3.13)'e göre Φ şöyle yazılabilir.

$$\Phi = A_5 \frac{\cosh k(y+d)}{\cosh kd} \sin[k(x-ct)] \quad (3.18)$$

Burada $A_5 = A_1 A_4$ 'dir ve $\eta = H/2$ olduğuna göre;

$$A_5 = gH/2kc \quad (3.19)$$

elde edilir. Denklem (3.18)'den $L = 2\pi/k$, $T = 2\pi/kc$, $c' = L/T$, $kc' = \omega$ elde edilir. Buradan sonra $s=y+d$ ve $\Theta = k(x - c't)$ yazılarak birinci merteye hız potansiyeli ($\Phi = \Phi_1$)

$$\Phi = \frac{gH}{2\omega} \frac{\cosh ks}{\cosh kd} \sin \Theta \quad (3.20)$$

olarak yazılabilir.

Denklem (3.11)'den;

$$\eta = \frac{H}{2} \cos \Theta \quad (3.21)$$

yazılabilir. Φ değerini Denklem (3.12)'de yazarsak, lineer ayrılma ilişkisi olan;

$$\omega^2 = gk \tanh kd \quad (3.22)$$

elde ederiz. Denklem (3.9) ve Denklem (3.21) birleştirilerek Φ için alternatif bir form yazılabilir.

$$\Phi = \frac{\pi H}{kT} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \sin \Theta \quad (3.23)$$

Benzer şekilde; $c' = \omega/k$ olduğu hatırlanarak ayrılma ilişkisine alternatif olarak;

$$c'^2 = \frac{g}{k} \tanh kd \quad (3.24)$$

yazılabilir.

Dalga boyu için de aynı şekilde;

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh kd \quad (3.25)$$

yazılabilir. Denklem (3.25)'de görüldüğü gibi dalga boyu T ve d'ye bağlıdır. Dolayısıyla dalga boyu doğrudan hesaplanamaz. Dalga boyu için derin su değerleriyle başlayan bir tekrarlama tekniği kullanılabilir. Daha sığ sularda, tekrarlama sığ su yaklaşımıyla başlatmak daha verimli olur. Orta derinlikte sular için ise dalga boyu için daha basit bir formül verilebilir. (Coastal engineering manual, 2006)

$$L = L_0 \left[\tanh(2\pi d/L_0) \right]^{1/2} \quad (3.26)$$

Burada L_0 derin sulardaki dalga boyudur. Verilen bir su derinliği ve periyotta, dalganın kırılmaya başladığı bir üst sınır vardır. Dalga kırılması için Stokes kriteri, dalga tepesindeki akışkan parçasının hızının yayılma hızına ulaşmasıdır. Yayılım hızından daha büyük hızlarda dalganın ileri doğru itilerek kırılacağı sezgisel olarak açıktır. Stokes'un kırılan dalga kriteri, dalga tepesi açısının 120° 'den fazla olmamasıdır. Derin suda dalga dikliği limiti;

$$H_b/L_0 = 0,142 \quad (3.27)$$

ile verilebilir. H_b kırılan dalga yüksekliğidir. Yaklaşık olarak derin sudaki dalga uzunluğunun yedide biridir. Sonlu bir su derinliği için dalga dikliği orta su parametresine benzer bir hal alır.

$$\frac{H_b}{L} = 0,142 \tanh kd \quad (3.28)$$

Burada L orta sulardaki dalga genişliğidir. Hız potansiyeli (Φ) ve hidrodinamik basınç (P) birinci mertebe yapısında yer alır.

$$P = -\rho \epsilon \frac{\partial \Phi_1}{\partial t} = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \rho g \frac{H \cosh ks}{2 \cosh kd} \cos \Theta \quad (3.29)$$

Denklem (3.22-3.24-3.25)'de ifade edilen tanh fonksiyonun asimptotik değerlerinde bazı sadeleştirmeler yapılabilir; x 'in büyük değerleri için; $\tanh x \approx 1$ 'dir. Bu ifade $x > \pi$ değerleri için %0,4 hata payı ile doğrudur. Aynı şekilde küçük x değerleri için $\tanh x \approx x$. Bu ifadede $x < (\pi/10)$ için %0,1 hata ile kabul edilebilir.

Bu ifadelerden yararlanarak derin ve sığ sular için Çizelge (3.1)'de verilen bazı sınırlar elde edilebilir.

Çizelge 3.1. Derin su, sığ su sınırları ve dalga boyları

	Koşul	Dalga Boyu
Derin Su	$d/L_0 > 1/2$	$gT^2/2\pi$
Sığ Su	$d/L_0 < 1/25$	$T\sqrt{g \times d}$

Diğer ifadeler de benzer yaklaşımla sadeleştirilebilir.

$$\text{Derin su için; } \frac{\cosh ks}{\sinh kd} = \frac{\sinh ks}{\sinh kd} = e^{ky} \quad (3.30)$$

$$\text{Sığ su için; } \frac{\cosh ks}{\sinh kd} = \frac{1}{kd}, \frac{\sinh ks}{\sinh kd} = 1 + \frac{y}{d} \quad (3.31)$$

Akışkan parçacığı yörüngeleri ve hız profilleri; sığ, orta ve derin sular için şekil 3.2'de gösterilmiştir. Sığ suda yatay hızın sabit (v lineerken) olduğu unutulmamalıdır. Derin sularda ise parçacık yörüngeleri daireseldir ve yatay hızın düşey hıza eşit olduğu söylenebilir.

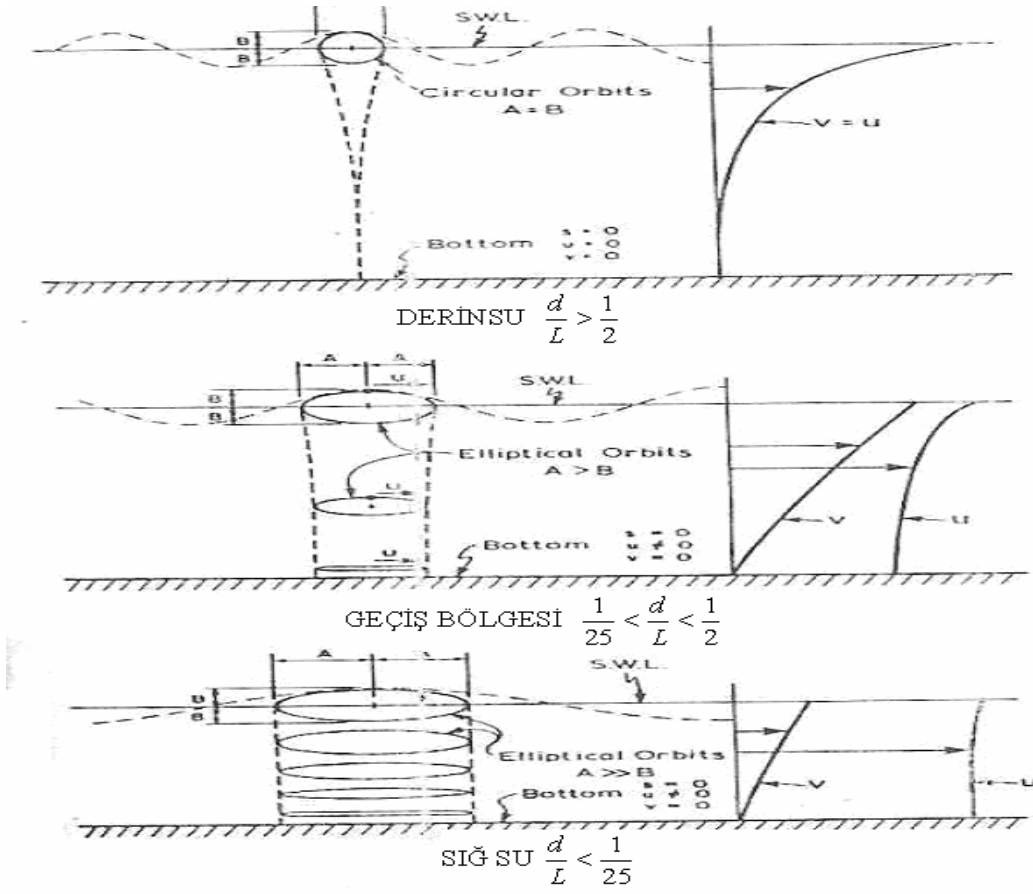
Bilinen değerler için dalga genliği;

$$\eta = \frac{H}{2} \cos \Theta, \quad \eta = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right) \quad (3.32)$$

Belli bir deniz ortamında $x=0$ noktası için denklem;

$$\eta = \frac{H}{2} \cos\left(-\frac{2\pi}{T}t\right) \quad (3.33)$$

olarak yazılabilir.



Şekil 3.2 Lineer teoride parçacık yörüngeleri ve kinematikleri

İlk olarak $x=0$ noktası ve $t=0,1,2,\dots,511$ zamanları için 32 dalganın η değerleri hesaplanmıştır. 128 saniyedeki zaman dilimlerinde dalga profili aynı özellikleri gösterdiğinden $t=0,1,2,\dots,127$ zamanları alınarak genelleştirilmiştir.

Bu dalgaların herhangi bir andaki toplam η değerleri düzensiz dalganın η değerini vermesi veya bu değerlere yakınsaması gerekir. Bu amaçla dikkate alınan 32 dalganın aynı t anlarındaki dalga genlikleri toplanarak elde edilen yeni dalga formunun genlikleri düzensiz dalganın genliğiyle karşılaştırılmıştır. Yeni dalga formu olarak tanımlanan 32 dalganın farklı genlik ve fazlı kombinasyonlarının gerçek dalganın genliklerine uyumu için istatistiksel test tekniği olan Ki-Kare (Chi-Square) yöntemi kullanılmıştır.

3.1. Ki-Kare Dağılımı

Ana kitlenin dağılımı hakkında tam olarak açık bir bilgi olmadığı zaman veya bu bilgiye ihtiyaç hissedilmediği zaman bir hipotez testi uygulanabilir. Parametrik olmayan veya serbest dağılımlı

testler bu amaçla geliştirilmiştir. Bu testlerin uygulanmasındaki zorunluluk, bizim anakitle hakkındaki bir şey öğrenmek istemediğimizden değil, yeterli bilgiye sahip olunamadığı için klasik parametrik testlerin uygulanamamış olması ve anakitle dağılımı hakkında bir ön bilgiye sahip olunamamasıdır. Şu halde parametrik olmayan istatistik denildiği zaman anakitle dağılımı hakkında varsayım yapmaksızın ve belirli spesifik parametre değerlerine sahip olmaksızın hipotez testlerin yapılabilirdiği istatistik dalı anlaşılmaktadır. (Çakıcı, M., Oğuzhan, A., Özdil, T., 2003) Parametrik olmayan testler içinde en yaygın olarak kullanılan Ki-Kare testidir ve sürekli bir olasılık dağılımı biçiminde ifade edilir. Burada tek bir dağılımdan söz edilememekte, her serbestlik derecesi için ayrı bir Ki-kare dağılımı mevcut olmaktadır. Serbestlik dereceleri bu dağılımının kullanılış amacına göre belirlenir ve dağılımın şeklinin uygunluğunu test etmekte kullanılacaksa aşağıdaki denklem geçerlidir.

$$Sd=g-1-m \quad (3.34)$$

Denklem (3.34)'de g; frekans dağılımdaki grup veya sınıf sayısını, m; hipotez testi için örnek istatistiklerinden tahmin edilecek anakitle parametrelerinin sayısını göstermektedir.

Her serbestlik derecesi için ayrı bir Ki-Kare dağılımı mevcut olduğuna göre serbestlik derecesinin belirlenmesinde dikkatli olmak gerekir. Ki-Kare dağılımının çeşitli alfa ve serbestlik derecelerine göre değerleri tablo halinde Çizelge (E.1)'de verilmiştir.

Ki-Kare testi yaygın bir şekilde uygunluk testinde kullanılmaktadır. Bu testin amacı, örnek değerlerinin gösterdiği dağılımın hipotezde ileri sürülen anakitle dağılımını destekleyip desteklemediğini araştırmaktır. Ki-Kare dağılımını bu amaçla uygulayabilmek için kritik değerler şu formülle bulunur; (Çakıcı, M., Oğuzhan, A., Özdil, T. , 2003)

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^g \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (3.35)$$

Denklem (3.35)'de, O_i ; örnek değişkenin gözlenen frekansını, E_i ; Hipotezde ileri sürülen anakitle dağılımının beklenen frekansını temsil eder.

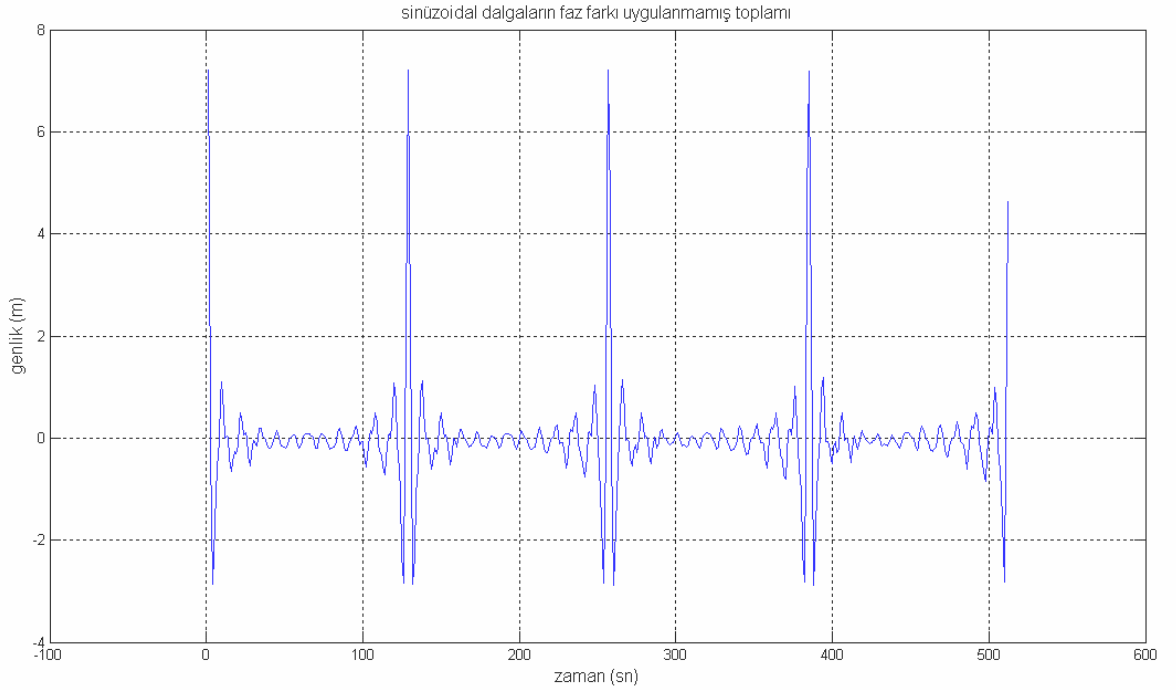
Bu testin uygulanmasından önce bir sıfır hipotez belirlenir. Beklenen değerler, gözlenen değerlerle karşılaştırılır ve beklenen değerler ile gözlenen değerler arasında uyum varsa sıfır hipotez kabul edilir. Uyum yoksa ret edilir.

Bu çalışmada; 32 adet sinüs dalgasının kombinasyonlarının gerçek verileri sağlayıp sağlamadıkları test edilmiştir. Elbette ki daha fazla sayıdaki dalganın süperpozisyonu ile elde edilecek yeni dalganın genlikleri, gerçek verilere daha fazla yakınsamaya neden olacaktır. Burada Ki-Kare dağılımının analizi için 32 adet sinüzoidal dalga genlikleri esas alınmıştır. Denklem (3.34) kullanılarak $g=8$, $m=0$, $sd=8-1-0=7$ alınmak suretiyle test 0,01 önem seviyesinde yapılmıştır. H_1 , düzensiz dalga genlikleri, H_2 , sinüzoidal dalgaların toplam genlikleri temsil eder. 32 dalganın faz farkları hesaplanmadan test tekniği uygulandığında genliklerin dağılımı Çizelge 3.2 de sunulmaktadır.

Çizelge 3.2 Ki-Kare dağılımı

Sınıf aralığı	H_1 dağılımı	H_2 dağılımı
< -2,5	5	0
>-2,5 , <-2	11	0
>-2 , <-1	79	16
>-1 , <0	186	340
>0 , <1	160	148
>1 , <2	58	0
>2 , <2,5	9	0
>=2,5	4	8
TOP	512	512

Tablodan, 0,01 önem seviyesi ve 7 serbestlik derecesinde bakılacak olan değer 18,475 dir. $\chi^2=265,65>18,475$ olduğundan hipotez kabul edilemez.



Şekil 3.3 Faz farkı uygulaması öncesi genlikler

Ki-Kare sonuçlarına göre düzensiz dalgayı temsil edecek olan sinüzoidal dalgaların uygun sonuçları vermediği görülmüştür. Bunu gidermek için sinüzoidal dalgaların başlangıç anlarında faz farkı uygulanarak her t anı için farklı genlikler hesaplanmıştır. Bunun sonucunda bir andaki η değerleri toplamının düzensiz verilere yakınsadığı görülmüştür. Faz farkı uygulaması , dalganın zaman boyutunda 0 anından 127 anına kadar geçen süre içerisinde toplam 128 saniyelik hareketi değişmeden başlangıç zamanını sıfırdan farklı almak kaydıyla yapılmıştır. Bunun sonucunda dalgaların başlangıçtan itibaren her saniyedeki genlikleri değişmiştir. (Şekil 3.3)' de görüldüğü gibi (t=0) anından başlayarak 128 saniyede bir dalganın periyodundan bağımsız olarak kosinüs değerleri pozitif çıktığı için; bu anlarda genlik değerleri toplamı yükselmiştir.

Çizelge 3.3 Faz farkları

Dalga No	T(sn)	faz farkı t'(sn)
1	64,103	0
2	32,051	0
3	21,322	115
4	16,000	0
5	12,804	12
6	10,661	119
7	9,141	5
8	8,000	118
9	7,112	119
10	6,402	0
11	5,817	118
12	5,333	14
13	4,924	115
14	4,570	8
15	4,266	116
16	4,000	0
17	3,765	8
18	3,556	119
19	3,368	13
20	3,200	117
21	3,048	8
22	2,909	6
23	2,782	118
24	2,667	12
25	2,560	121
26	2,462	9
27	2,370	122
28	2,286	119
29	2,207	7
30	2,133	6
31	2,064	10
32	2,000	0

Her bir dalganın faz farkları dikkate alınarak test uygulanması yoluna gidilmiştir. Bu kapsamda örnek olarak alınan D3 dalgasına faz farkı uygulanmamış durumdaki dalga formu;

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (3.36)$$

şeklinde tanımlanırken, faz farkı uygulanmış aynı dalganın formu ise,

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega(t + t')) \quad (3.37)$$

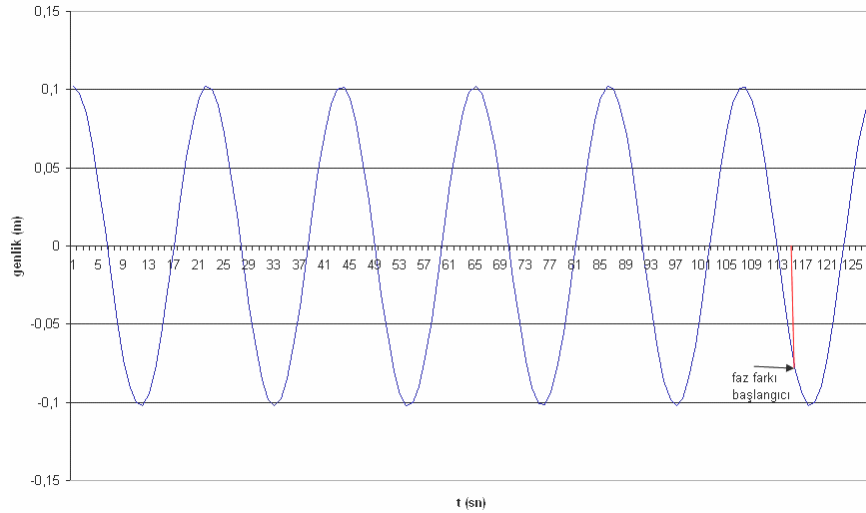
şeklinde tanımlanmaktadır.(Şekil 3.4-3.5)

Faz farkı uygulandıktan sonra tekrar uygulanan Ki-Kare testinin sonuçları Çizelge (3.4)'de sunulmaktadır.

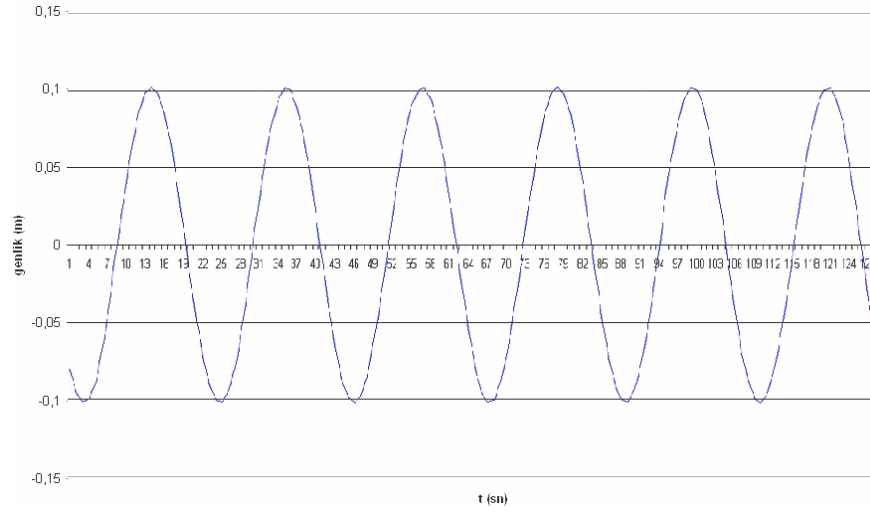
Çizelge 3.4 Faz farkı sonrası Ki-Kare dağılımı

Sınıf aralığı	H ₁ dağılımı	H ₂ dağılımı
< -2,5	5	8
>-2,5 , <-2	11	8
>-2 , <-1	79	80
>-1 , <0	186	160
>0 , <1	160	176
>1 , <2	58	64
>2 , <2,5	9	16
>=2,5	4	0
TOP	512	512

$\chi^2=17,93 < 18,475$ olduğundan hipotez kabul edilir.

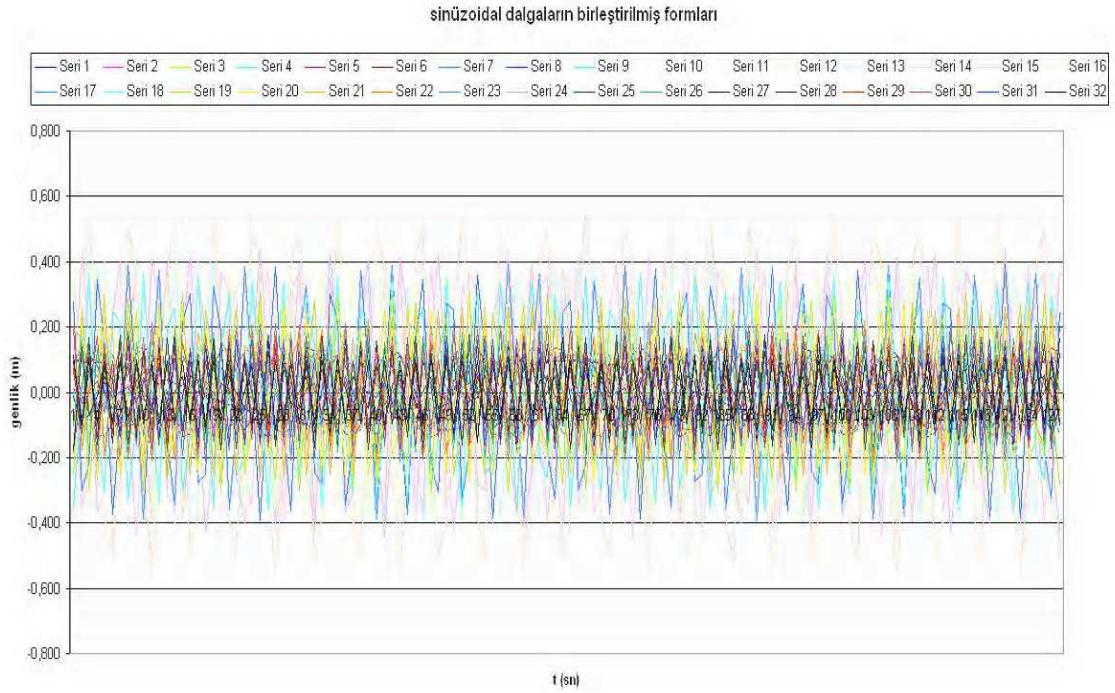


Şekil 3.4 Faz farkı uygulanmamış D3 dalgası



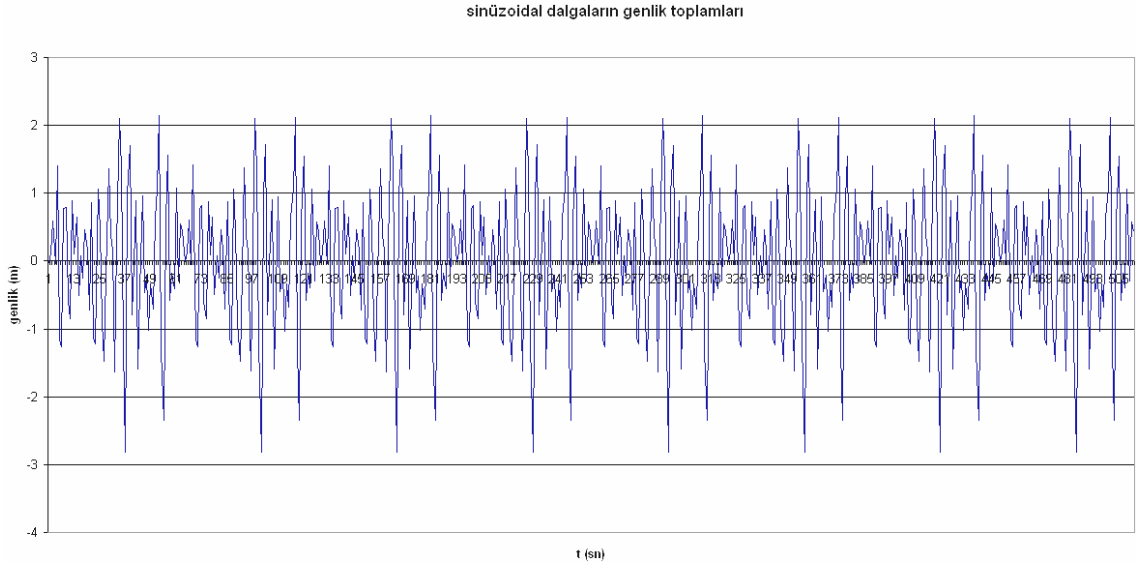
Şekil 3.5 Faz farkı uygulanmış D3 dalgası

Çalışmanın bu kısmında görülmektedir ki; faz farklı dikkate alınan 32 düzenli dalganın genliklerinin süperpozisyonu, gerçek düzensiz dalganın genlikleri ile uyum sağlamıştır. Faz farkı uygulanmış dalgaların kombinasyonları Şekil (3.6)'da verilmektedir.



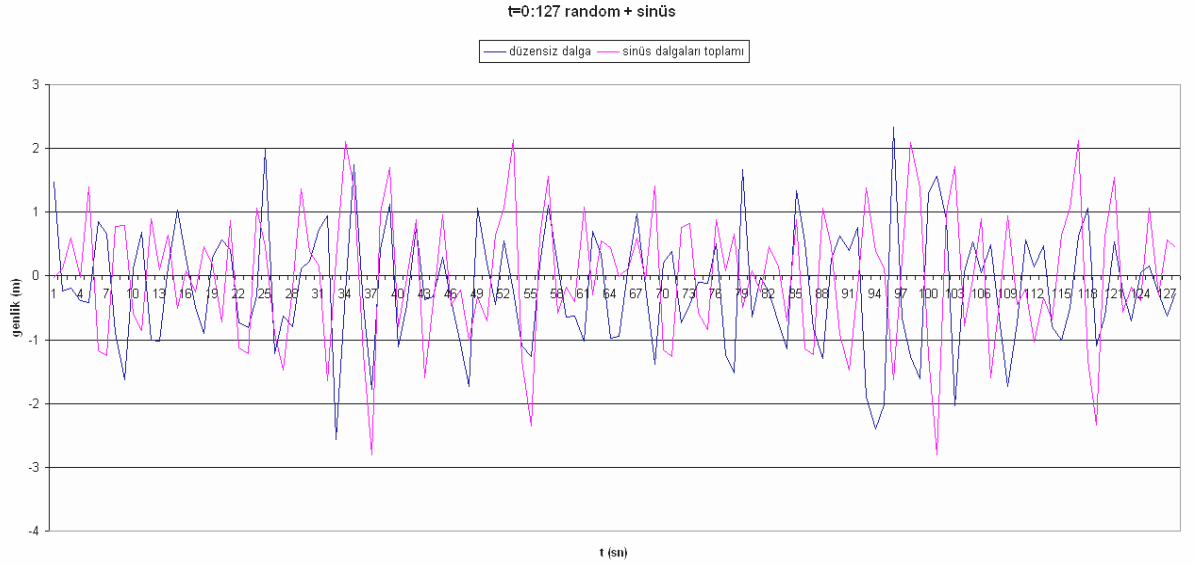
Şekil 3.6 Faz farkı uygulanmış 32 adet dalga formu

Dalgaların genliklerinin toplamı ise Şekil (3.7)' da verilmektedir.



Şekil 3.7 Sinüzoidal dalgaların genlik toplamları

FFT analizinden elde edilen spektrum değerleri kullanılarak hesaba katılan 32 dalganın genlik toplamlarının gerçek dalganın genlikleriyle olan ilişkisi Şekil (3.8)'de verilmiştir. Burada 128 saniyelik veri uzunluğu hesaba katılmıştır. Diğer kısımlarda ise periyodik dalga formu yer almaktadır.



Şekil 3.8 Sinüzoidal dalgaların genlik toplamıyla düzensiz dalganın karşılaştırılması

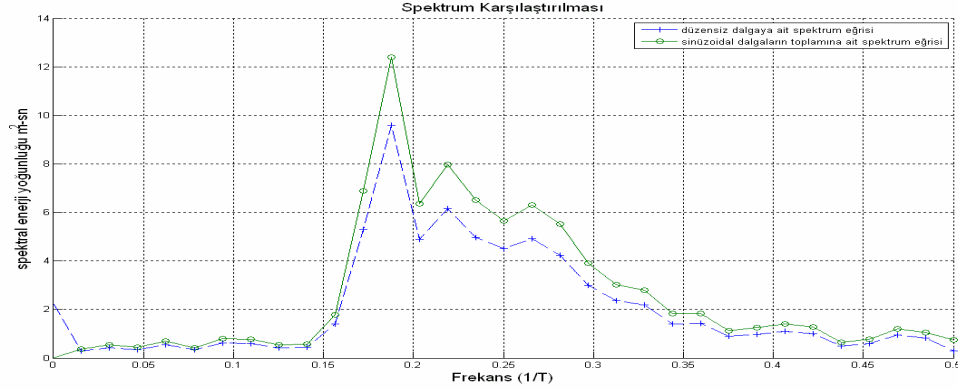
Dalga formunun genlikleri üzerinde yapılan Ki-Kare testi, benzer şekilde 32 dalganın genlik toplamlarıyla oluşan yeni dalganın enerji spektrumu ile gerçek dalganın enerji spektrumu arasında da uygulanabilir. Bu durumda, Ki-Kare testi sonuçları Çizelge (3.5) de sunulmaktadır.

Çizelge 3.5 Enerji spektrumları arasındaki Ki-Kare dağılımı

O	E	$(O_i - E_i)^2 / O_i$
2,2134	0,0007	2,212
0,2954	0,3683	0,017991
0,4238	0,5375	0,030504
0,3358	0,4423	0,033777
0,5458	0,7069	0,047551
0,3405	0,4296	0,023315
0,6114	0,7982	0,057073
0,5829	0,7712	0,060828
0,4166	0,5349	0,033593
0,4403	0,5614	0,033307
1,4009	1,7814	0,103348
5,3058	6,8835	0,469135
9,5987	12,3936	0,813805
4,8838	6,3631	0,448079
6,1548	7,9855	0,544528
4,9698	6,5063	0,475036
4,514	5,6548	0,288309
4,9062	6,3138	0,403844
4,2295	5,5112	0,388404
3,0005	3,9166	0,2797
2,3578	3,0112	0,181072
2,1837	2,7911	0,168949
1,3918	1,8236	0,133964
1,4226	1,8443	0,125004
0,8913	1,129	0,063392
0,9658	1,2459	0,081234
1,0969	1,4131	0,09115
0,9959	1,2879	0,085615
0,4963	0,6415	0,04248
0,5985	0,77	0,049143
0,9367	1,1889	0,067903
0,8338	1,0548	0,058576
0,301	0,7522	0,67635

Çizelge (3.5)'de, O; düzensiz dalga formunun spektral enerji yoğunluklarını, E ise 32 dalganın genlik toplamlarıyla oluşan yeni dalganın spektral enerji yoğunluklarını göstermektedir.

Çizelge (3.5) de verilen $(O_i - E_i)^2 / O_i$ değerlerinin toplamı 8,58896'dır. Bu değer, Çizelge (E.1)'de verilen Ki-Kare tablosundaki, $df=40$ için verilen (63,691) değerinden küçüktür (burada $df=32$) dolayısıyla, verilen tüm anlamlılık düzeyindeki değerlerden düşüktür. Dolayısıyla 32 dalganın genlik toplamlarıyla oluşan yeni dalganın enerji spektrumu ile gerçek dalganın enerji spektrumu arasında anlamlı ve güvenilir bir ilişki olduğu söylenebilir. Şekil (3.9) ise her iki enerji spektrum eğrisinin birbirine olan uyumunu göstermektedir. (Karaturp, F., 2007)



Şekil 3.9 Spektrum karşılaştırılması

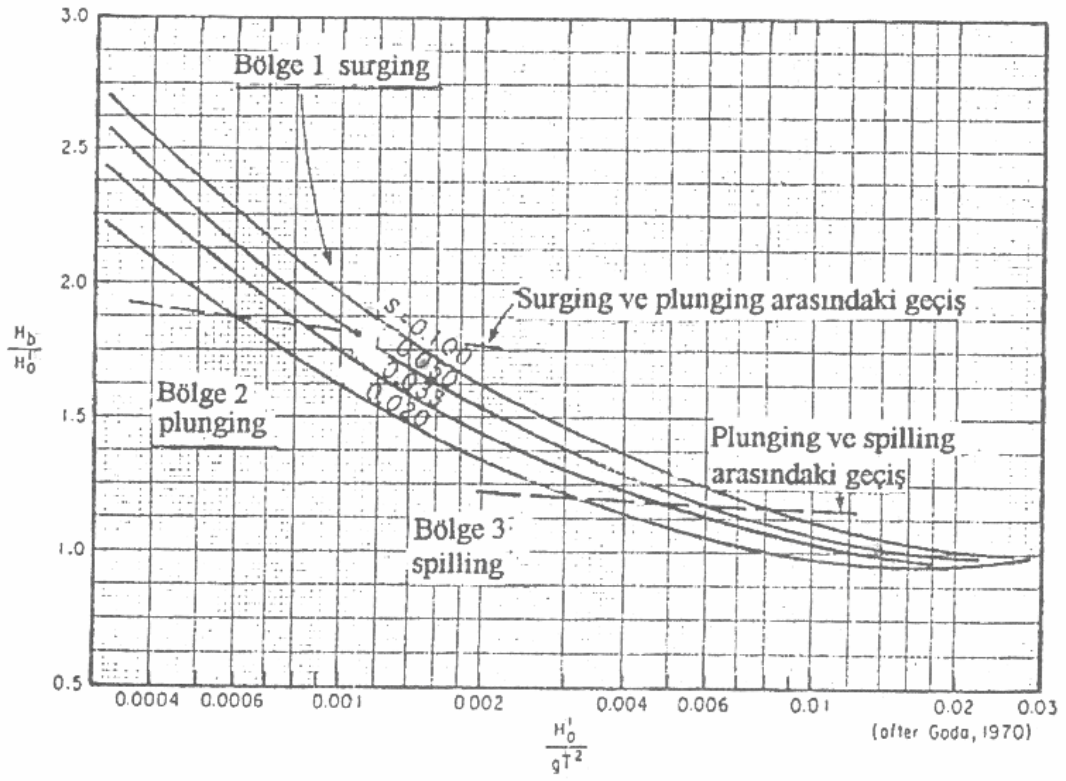
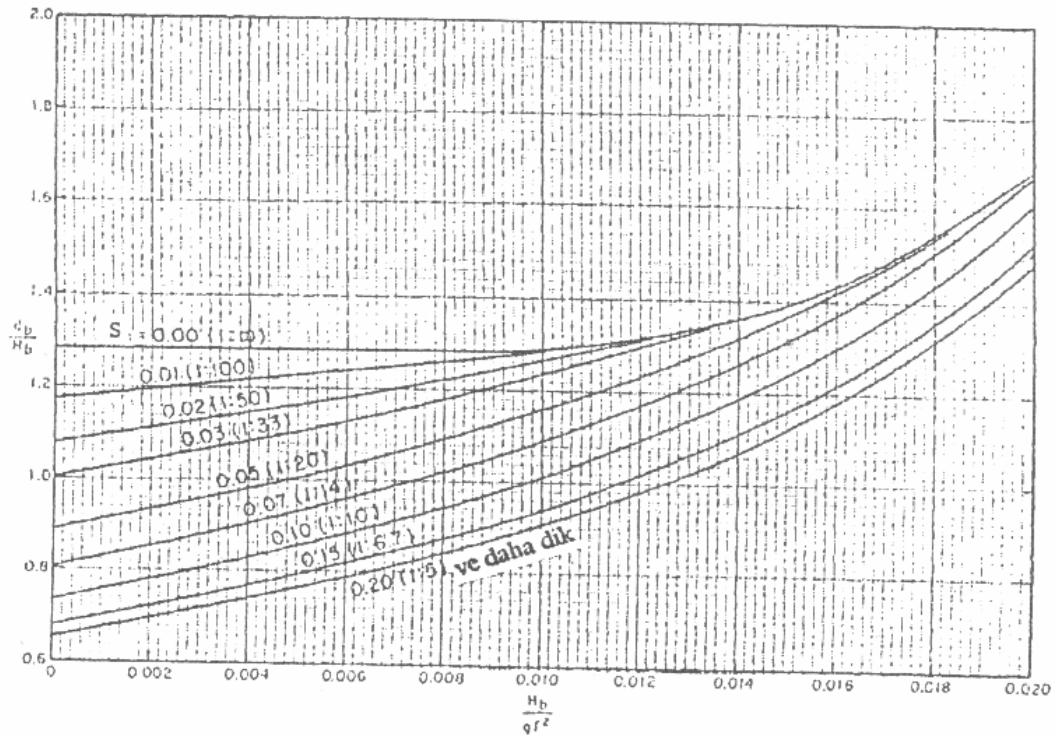
Çizelge (3.5) ve Şekil (3.9)' dan görüldüğü gibi üretilen 32 adet çoklu sinüs dalgasının (eşdeğer düzenli dalga) kombinasyonu, düzensiz dalgayı temsil edebilmektedir. Bu durum hem su yüzü profillerinin uyumu hem de enerji spektrumlarının uyumuyla saptanmıştır.

3.2. Boru Hattının Konumunun Belirlenmesi

Faz farkları oluşturularak Ki-Kare testiyle uygunluğu görülen 32 adet sinüzoidal dalganın deniz tabanında yaratacağı etkilerin incelenebilmesi amacıyla sınırları belirli olan bir bölgenin belirlenmesi gerekir. Deniz tabanı eğiminden dolayı ($m=0,05$) ve kıyıya doğru yaklaştıkça her dalganın periyodu ve yüksekliği farklı olduğundan, dalgaların farklı derinliklerde farklı etkiler göstermeleri beklenir. Her dalga için derin su sınırı kıyıdan değişik mesafelerdedir. Öncelikle kıyı bölgesine yerleştirilecek olan boru hattının kırılmış dalga kuvvetlerinden etkilenmemesi amacıyla, tüm dalgaların kırılma derinlikleri hesaplanmıştır. Bu hesaplama yapılırken, derinsu dalga yükseklikleri (H_0) ve periyotları (T) belli olan dalgaların sapma katsayısı (K_r) değerinin 1 alınarak;

$$H'_0 = H_0 \times K_r \quad (3.38)$$

bağıntısıyla H'_0 değerleri hesaplanmıştır. Bulunan bu değerler yardımıyla her dalga için H'_0/gT^2 değerleri hesaplanmıştır. Şekil (3.9)'daki abak yardımıyla $m=0,05$ deniz taban eğimi için H_b/H'_0 değerleri okunmuştur. Buradan kırılma yüksekliği (H_b) değerleri bulunmuştur. Bulunan kırılma yükseklikleri yardımıyla H_b/gT^2 değerleri hesaplanarak Şekil (3.10)'daki abaktan d_b/H_b değerleri okunmuştur. Okunan bu değerler yardımıyla dalga kırılma derinlikleri (d_b) hesaplanmıştır. (Yalçın, Y., Çevik E., Çelikoğlu, Y., 1998)

Şekil 3.10 H_0^1/gT^2 abağıŞekil 3.11 H_b/gT^2 abağı

Çizelge 3.6 Sinüzoidal dalgaların kırılma yükseklikleri, derinlikleri ve derin su boyları

	H_0	T	H'_0	$\frac{H'_0}{gT^2}$	$\frac{H_b}{H'_0}$	H_b	$\frac{H_b}{gT^2}$	$\frac{d_b}{H_b}$	d_b	$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi}$	h_0
D1	0,192	64,103	0,192	0,000	3,000	0,576	0,000	0,875	0,504	6415,639	3207,820
D2	0,230	32,051	0,230	0,000	2,900	0,667	0,000	0,880	0,587	1603,910	801,955
D3	0,205	21,322	0,205	0,000	2,800	0,573	0,000	0,883	0,506	709,812	354,906
D4	0,261	16,000	0,261	0,000	2,750	0,718	0,000	0,885	0,635	399,695	199,848
D5	0,206	12,804	0,206	0,000	2,700	0,557	0,000	0,888	0,494	255,969	127,984
D6	0,276	10,661	0,276	0,000	2,650	0,732	0,001	0,890	0,651	177,453	88,727
D7	0,270	9,141	0,270	0,000	2,500	0,674	0,001	0,893	0,602	130,453	65,227
D8	0,228	8,000	0,228	0,000	2,450	0,559	0,001	0,895	0,500	99,924	49,962
D9	0,234	7,112	0,234	0,000	2,200	0,516	0,001	0,900	0,464	78,980	39,490
D10	0,418	6,402	0,418	0,001	1,850	0,774	0,002	0,925	0,716	63,992	31,996
D11	0,814	5,817	0,814	0,002	1,450	1,180	0,004	0,955	1,127	52,837	26,418
D12	1,094	5,333	1,094	0,004	1,300	1,423	0,005	0,990	1,409	44,411	22,205
D13	0,781	4,924	0,781	0,003	1,350	1,054	0,004	0,975	1,028	37,850	18,925
D14	0,876	4,570	0,876	0,004	1,280	1,122	0,005	1,005	1,127	32,613	16,307
D15	0,788	4,266	0,788	0,004	1,250	0,984	0,006	1,008	0,992	28,417	14,208
D16	0,751	4,000	0,751	0,005	1,240	0,931	0,006	1,025	0,954	24,981	12,490
D17	0,782	3,765	0,782	0,006	1,190	0,931	0,007	1,040	0,968	22,133	11,066
D18	0,727	3,556	0,727	0,006	1,150	0,836	0,007	1,042	0,871	19,745	9,873
D19	0,612	3,368	0,612	0,005	1,200	0,734	0,007	1,040	0,764	17,712	8,856
D20	0,542	3,200	0,542	0,005	1,200	0,651	0,006	1,030	0,670	15,988	7,994
D21	0,522	3,048	0,522	0,006	1,180	0,616	0,007	1,042	0,642	14,504	7,252
D22	0,417	2,909	0,417	0,005	1,220	0,508	0,006	1,026	0,522	13,209	6,605
D23	0,421	2,782	0,421	0,006	1,200	0,506	0,007	1,041	0,526	12,087	6,044
D24	0,334	2,667	0,334	0,005	1,240	0,414	0,006	1,025	0,424	11,103	5,551
D25	0,347	2,560	0,347	0,005	1,200	0,417	0,006	1,030	0,429	10,234	5,117
D26	0,370	2,462	0,370	0,006	1,150	0,425	0,007	1,060	0,451	9,463	4,731
D27	0,353	2,370	0,353	0,006	1,140	0,402	0,007	1,060	0,426	8,771	4,386
D28	0,249	2,286	0,249	0,005	1,240	0,309	0,006	1,025	0,316	8,157	4,079
D29	0,273	2,207	0,273	0,006	1,180	0,322	0,007	1,042	0,336	7,605	3,803
D30	0,342	2,133	0,342	0,008	1,100	0,376	0,008	1,100	0,414	7,104	3,552
D31	0,323	2,064	0,323	0,008	1,100	0,355	0,008	1,100	0,390	6,654	3,327
D32	0,194	2,000	0,194	0,005	1,220	0,236	0,006	1,025	0,242	6,245	3,123

Çizelge (3.6)'da tüm dalgaların kırılma derinlikleri (db) gösterilmiştir. Bunun sonucunda boru hattının d=5 m metre su yüksekliğinde zemin üstüne çıkmasına karar verilmiştir. Bu yüksekliğe kadar boru hattı zeminin altına gömülü durumdadır. Boru hattının db derinliklerden daha derinde olması sağlanarak kırılmamış dalga üzerinden hesap yapılması esas alınmıştır.

Derinsu sınırının $h_0/L_0=1/2$ olduğunu bilindiğine göre tüm dalgaların özellikle derinsu sınır derinlikleri hesaplanmıştır. Sınır değerlerin anlamlı olması bakımından derinsu sınır değerleri hesaplanarak uygun bir derinsu sınırı bütün dalgalar için (32 dalga için) esas alınacaktır. (Çizelge 3.6)

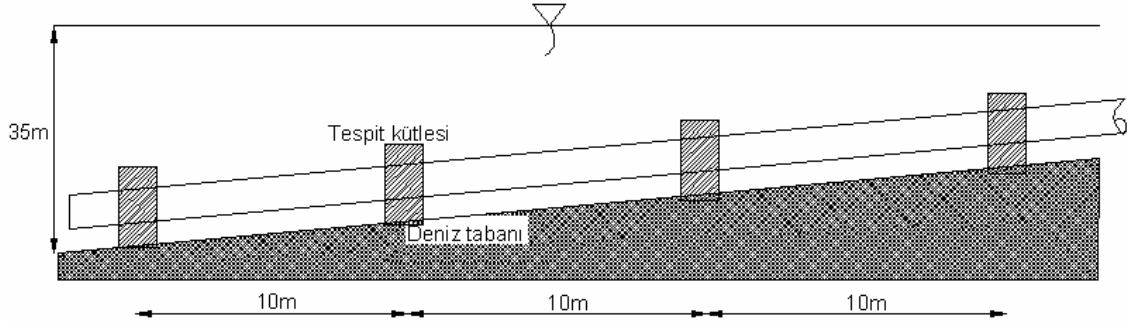
Çizelge (3.6)'da verilen h_0 değerlerine bakarak inceleme alanının d=35 metre su yüksekliğinde başlamasına karar verilmiştir. İnceleme bölgesine karar verildikten sonra tüm bu bölge içerisinde 32 adet sinüzoidal dalganın yatayda 10m ve düşeyde 0,5m taban değişimlerinde dalga boyları ve dalga yükseklikleri hesaplanmıştır. Bu hesaplama yapılırken d/L_0 ve d/L

değerleri dikkate alınmıştır. Daha önce belirtildiği üzere d/L_0 değerlerinden hareketle dalgaların her derinlikte ifade edildikleri bölge türü (sığ su , geçiş bölgesi suyu , derin su) dikkate alınarak L boyları bulunmuştur. Bulunan L boyları yardımıyla d/L değerleri hesaplanmıştır. Her derinlikteki dalga yükseklikleri (H') bulunurken derinsu yükseklikleri sıkışma katsayılarıyla (K_s) çarpılmıştır.

$$H' = H_0 \times K_s \quad (3.39)$$

$$K_s = \left[\frac{\coth\left(\frac{2\pi d}{L}\right)}{1 + \frac{4\pi d/L}{\sinh(4\pi d/L)}} \right]^{0.5} \quad (3.40)$$

Çizelge (E.2)'de D10 dalgası için örnek olarak verilen derinlikle değişen dalga boyları ve sıkışma katsayıları diğer 31 dalga içinde hesaplanarak dalga kuvvetlerinin hesabında kullanılmıştır.



Şekil 3.12 Boru hattının görünüşü

Boru hattının deniz ortamında kalan 600m'lik bölümü Şekil (3.12)'de 35m derinlikten 5m derinliğe kadar 0,5m azalma göstererek 10m'lik yatay mesafeler için incelenmiştir.

3.3. Boru Hattına Etkiyen Hidrodinamik Yüklerin Bulunması

Her derinlikte sinüzoidal dalgalara ait veriler bulunduktan sonra bu dalgaların yörüngesel hızları ve bu yörüngesel hızların belirli bir t anındaki değişimleri ile oluşan yörüngesel ivmeleri bulunmuştur. Bulunan bu yörüngesel hızlar ve ivmeler yardımıyla boru hattına etkiyen hidrodinamik yükler (sürüklenme, kaldırma, atalet) bulunmuştur.

u yatay, v düşey hızları göstermek üzere potansiyel fonksyonu cinsinden hızlar;

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (3.41)$$

şeklinde yazılabilir. Bu ifade çevrintisizlik şartında yerine yazılırsa;

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad (\text{Çevrintisizlik Şartı}) \quad (3.42)$$

$$u = \frac{H}{2} \times \frac{gT}{L} \times \frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \times \cos\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right) \quad (3.43)$$

$$v = \frac{H}{2} \times \frac{g \times T}{L} \times \frac{\sinh(2\pi \times (z+h)/L)}{\cosh(2\pi \times h/L)} \times \sin\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right) \quad (3.44)$$

bulunan hızların zamana göre türevleri alınarak yörüngesel ivmeler bulunmuştur.

$$a_x = \frac{g \times \pi \times H}{L} \times \frac{\cosh(2\pi \times (z+h)/L)}{\cosh(2\pi \times h/L)} \times \sin\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right) = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (3.45)$$

$$a_z = -\frac{g \times \pi \times H}{L} \times \frac{\sinh(2\pi \times (z+h)/L)}{\cosh(2\pi \times h/L)} \times \cos\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right) = \frac{\partial v}{\partial t} \quad (3.46)$$

(Coastal engineering manual , 2006)

Deniz tabanındaki borunun birim boyuna eksene dik yönde etkiyen sürüklenme (F_D), atalet (F_M) ve kaldırma kuvvetleri (F_L), dalgaların hızlarına ve ivmelerine bağlı olarak aşağıdaki denklemlerle hesaplanabilir.

$$F_M = C_M \times \rho \times \frac{\pi \times D^2}{4} a_x \quad (3.47)$$

$$F_D = 1/2 \times C_D \times \rho \times D \times u \times |u| \quad (3.48)$$

$$F_L = 1/2 \times C_L \times \rho \times D \times u^2 \quad (3.49)$$

Bu ifadelerde; C_M , atalet kuvveti sabitini, C_D , sürüklenme kuvveti sabitini, C_L , kaldırma kuvveti sabitini, D , borunun dış çapını, ρ (γ/g) ile hesaplanan boru dışındaki akışkanın özgül kütlesini, g ,

Yerçekimi ivmesini temsil eder. C_M , C_D , C_L sabitleri için çeşitli kaynaklarca tavsiye edilen değerler Çizelge (3.7)'de verilmiştir.

Çizelge 3.7 C_M , C_D , C_L sabitleri için tavsiye edilen değerler

Kaynak	e/D=0			e/D>1/4		
	C_M	C_D	C_L	C_M	C_D	C_L
Grace(1978)	3,30	1,00	1,00	2,15	1,00	0,50
Janson(1990)	3,30	1,00	2,00	2,00	0,70	0,00
HRS(1977)	3,77	1,04	-	2,40	0,95	-
SWECO(1978)	3,00	2,00	4,00	2,40	1,10	0
Det Norske Veritas(1978)	3,30	0,70	0,95	2,40	0,70	0
Genel	3,30	1,00	1,00	2,20	1,00	0

Çizelgede; e değeri boru hattının tabanının zemine olan mesafesini, D değeri de borunun çapını ifade eder. Bu çalışmada $e=0,30m$ ve $D=1,00m$ için ve Det Norske Veritas(1978)'a göre $C_M=2,40$ $C_D=0,70$ $C_L=0,00$ alınmıştır.

Dalgalar sebebiyle oluşan hidrodinamik kuvvetlerin lineer teoriye göre hesabında, boru hattının yer aldığı bölgedeki hakim rüzgar yönlerindeki maksimum atalet, sürüklenme, ve kaldırma kuvvetleri Denklem (3.47-3.48-3.49) yardımıyla her derinlik için ayrı ayrı hesaplanabilir. Bunun için denklemden $y=-h$ alınır ve faz açısı ve faz açısı $0 \leq \theta \leq 2\pi$ aralığında değiştirilmek suretiyle, maksimum yatay (F_H) ve düşey (F_V) dalga kuvvetleri sırası ile;

$$F_H = \max[F_M + F_D] \quad (3.50)$$

$$F_V = \max F_L \quad (3.51)$$

olarak bulunur. Ancak bu çalışmada Det Norske Veritas(1978)'a göre hesap yapıldığından $F_V = \max F_L = 0$ bulunmuştur. Denklem (3.43) kullanılarak 10 metrede aralıklarla değişen yatay dalga hızları (u) Çizelge (3.9)'da verilmiştir.

Çizelge (3.8)'da verilen dalga hızları kullanılarak Denklem (3.45) yardımıyla Çizelge (3.9)'da verilen yatay dalga ivmeleri hesaplanmıştır.

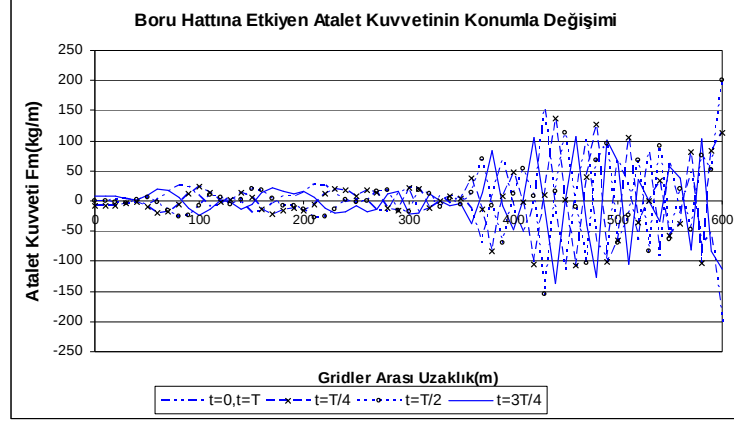
Çizelge 3.8 Yatay Dalga Hızları (u)

x(m)	h(m)	u(m/s)				
		t=0	t=T/4	t=T/2	t=3T/4	t=T
0	35,0	0,019	-0,002	-0,019	0,002	0,019
10	34,5	0,009	0,008	-0,009	-0,008	0,009
20	34,0	0,006	0,000	-0,006	0,000	0,006
30	33,5	0,009	-0,008	-0,009	0,008	0,009
40	33,0	0,020	-0,011	-0,020	0,011	0,020
50	32,5	0,033	-0,005	-0,033	0,005	0,033
60	32,0	0,040	0,013	-0,040	-0,013	0,040
70	31,5	0,031	0,033	-0,031	-0,033	0,031
80	31,0	0,009	0,042	-0,009	-0,042	0,009
90	30,5	-0,014	0,033	0,014	-0,033	-0,014
100	30,0	-0,024	0,010	0,024	-0,010	-0,024
110	29,5	-0,012	-0,012	0,012	0,012	-0,012
120	29,0	0,011	-0,014	-0,011	0,014	0,011
130	28,5	0,022	0,001	-0,022	-0,001	0,022
140	28,0	0,019	0,014	-0,019	-0,014	0,019
150	27,5	0,012	0,019	-0,012	-0,019	0,012
160	27,0	0,004	0,021	-0,004	-0,021	0,004
170	26,5	-0,004	0,015	0,004	-0,015	-0,004
180	26,0	-0,004	0,004	0,004	-0,004	-0,004
190	25,5	0,008	-0,004	-0,008	0,004	0,008
200	25,0	0,027	0,005	-0,027	-0,005	0,027
210	24,5	0,030	0,032	-0,030	-0,032	0,030
220	24,0	0,011	0,053	-0,011	-0,053	0,011
230	23,5	-0,020	0,056	0,020	-0,056	-0,020
240	23,0	-0,044	0,036	0,044	-0,036	-0,044
250	22,5	-0,051	0,008	0,051	-0,008	-0,051
260	22,0	-0,040	-0,019	0,040	0,019	-0,040
270	21,5	-0,009	-0,033	0,009	0,033	-0,009
280	21,0	0,024	-0,015	-0,024	0,015	0,024
290	20,5	0,024	0,028	-0,024	-0,028	0,024
300	20,0	-0,017	0,047	0,017	-0,047	-0,017
310	19,5	-0,050	0,020	0,050	-0,020	-0,050
320	19,0	-0,049	-0,014	0,049	0,014	-0,049
330	18,5	-0,031	-0,038	0,031	0,038	-0,031
340	18,0	0,005	-0,045	-0,005	0,045	0,005
350	17,5	0,031	-0,013	-0,031	0,013	0,031
360	17,0	0,010	0,015	-0,010	-0,015	0,010
370	16,5	-0,005	0,004	0,005	-0,004	-0,005
380	16,0	-0,004	0,006	0,004	-0,006	-0,004
390	15,5	-0,023	-0,008	0,023	0,008	-0,023
400	15,0	0,007	-0,042	-0,007	0,042	0,007
410	14,5	0,058	-0,010	-0,058	0,010	0,058
420	14,0	0,059	0,069	-0,059	-0,069	0,059
430	13,5	-0,063	0,116	0,063	-0,116	-0,063
440	13,0	-0,134	-0,028	0,134	0,028	-0,134
450	12,5	-0,008	-0,111	0,008	0,111	-0,008
460	12,0	0,083	0,004	-0,083	-0,004	0,083
470	11,5	-0,046	0,090	0,046	-0,090	-0,046
480	11,0	-0,135	-0,065	0,135	0,065	-0,135
490	10,5	0,055	-0,145	-0,055	0,145	0,055
500	10,0	0,111	0,036	-0,111	-0,036	0,111
510	9,5	-0,079	0,058	0,079	-0,058	-0,079
520	9,0	-0,018	-0,112	0,018	0,112	-0,018
530	8,5	0,083	0,014	-0,083	-0,014	0,083
540	8,0	-0,045	-0,020	0,045	0,020	-0,045
550	7,5	0,101	-0,064	-0,101	0,064	0,101
560	7,0	0,071	0,102	-0,071	-0,102	0,071
570	6,5	-0,038	-0,017	0,038	0,017	-0,038
580	6,0	0,057	0,086	-0,057	-0,086	0,057
590	5,5	0,007	0,007	-0,007	-0,007	0,007
600	5,0	-0,133	-0,150	0,133	0,150	-0,133

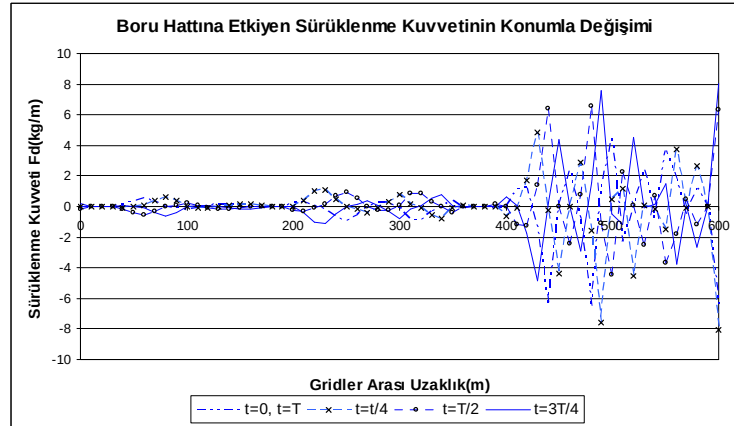
Çizelge 3.9 Yatay Dalga İvmeleri(a_x)

x(m)	h(m)	ax(m/s ²)				
		t=0	t=T/4	t=T/2	t=3T/4	t=T
0	35,0	0,000	-0,004	0,000	0,004	0,000
10	34,5	0,000	-0,004	0,000	0,004	0,000
20	34,0	0,001	-0,004	-0,001	0,004	0,001
30	33,5	0,002	-0,002	-0,002	0,002	0,002
40	33,0	-0,001	-0,001	0,001	0,001	-0,001
50	32,5	-0,003	-0,005	0,003	0,005	-0,003
60	32,0	0,001	-0,010	-0,001	0,010	0,001
70	31,5	0,008	-0,010	-0,008	0,010	0,008
80	31,0	0,014	-0,003	-0,014	0,003	0,014
90	30,5	0,012	0,006	-0,012	-0,006	0,012
100	30,0	0,004	0,012	-0,004	-0,012	0,004
110	29,5	-0,005	0,007	0,005	-0,007	-0,005
120	29,0	-0,004	-0,001	0,004	0,001	-0,004
130	28,5	0,003	0,001	-0,003	-0,001	0,003
140	28,0	-0,002	0,007	0,002	-0,007	-0,002
150	27,5	-0,010	0,003	0,010	-0,003	-0,010
160	27,0	-0,009	-0,007	0,009	0,007	-0,009
170	26,5	-0,002	-0,011	0,002	0,011	-0,002
180	26,0	0,004	-0,009	-0,004	0,009	0,004
190	25,5	0,004	-0,006	-0,004	0,006	0,004
200	25,0	0,007	-0,008	-0,007	0,008	0,007
210	24,5	0,014	-0,003	-0,014	0,003	0,014
220	24,0	0,013	0,006	-0,013	-0,006	0,013
230	23,5	0,007	0,011	-0,007	-0,011	0,007
240	23,0	-0,001	0,009	0,001	-0,009	-0,001
250	22,5	0,001	0,004	-0,001	-0,004	0,001
260	22,0	0,000	0,009	0,000	-0,009	0,000
270	21,5	-0,008	0,007	0,008	-0,007	-0,008
280	21,0	-0,009	-0,006	0,009	0,006	-0,009
290	20,5	0,008	-0,008	-0,008	0,008	0,008
300	20,0	0,010	0,011	-0,010	-0,011	0,010
310	19,5	-0,010	0,010	0,010	-0,010	-0,010
320	19,0	-0,006	-0,006	0,006	0,006	-0,006
330	18,5	0,005	0,000	-0,005	0,000	0,005
340	18,0	-0,002	0,005	0,002	-0,005	-0,002
350	17,5	0,003	0,002	-0,003	-0,002	0,003
360	17,0	-0,007	0,019	0,007	-0,019	-0,007
370	16,5	-0,036	-0,007	0,036	0,007	-0,036
380	16,0	0,004	-0,043	-0,004	0,043	0,004
390	15,5	0,036	0,004	-0,036	-0,004	0,036
400	15,0	-0,006	0,025	0,006	-0,025	-0,006
410	14,5	-0,027	-0,001	0,027	0,001	-0,027
420	14,0	-0,005	-0,055	0,005	0,055	-0,005
430	13,5	0,080	0,005	-0,080	-0,005	0,080
440	13,0	-0,008	0,071	0,008	-0,071	-0,008
450	12,5	-0,059	0,001	0,059	-0,001	-0,059
460	12,0	0,005	-0,055	-0,005	0,055	0,005
470	11,5	0,053	0,021	-0,053	-0,021	0,053
480	11,0	-0,035	0,066	0,035	-0,066	-0,035
490	10,5	-0,049	-0,053	0,049	0,053	-0,049
500	10,0	0,036	-0,034	-0,036	0,034	0,036
510	9,5	0,012	0,055	-0,012	-0,055	0,012
520	9,0	-0,035	-0,018	0,035	0,018	-0,035
530	8,5	0,043	0,000	-0,043	0,000	0,043
540	8,0	-0,047	0,018	0,047	-0,018	-0,047
550	7,5	0,033	-0,030	-0,033	0,030	0,033
560	7,0	-0,011	-0,020	0,011	0,020	-0,011
570	6,5	0,024	0,042	-0,024	-0,042	0,024
580	6,0	-0,039	-0,054	0,039	0,054	-0,039
590	5,5	-0,027	0,043	0,027	-0,043	-0,027
600	5,0	-0,104	0,059	0,104	-0,059	-0,104

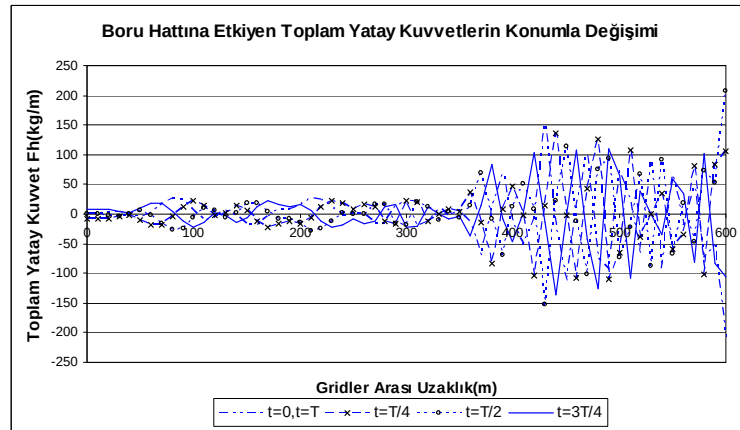
Yatay hızların ve ivmelerin hesaplanmasından sonra boru hattına etkiyen yatay kuvvetler Denklem (3.47-3.48-3.50) yardımıyla Şekil (3.13-3.14-3.15) ve Çizelge (E3-E4-E5)'de görüldüğü gibi elde edilir.



Şekil 3.13 Atalet kuvvetlerinin konumla değişimi



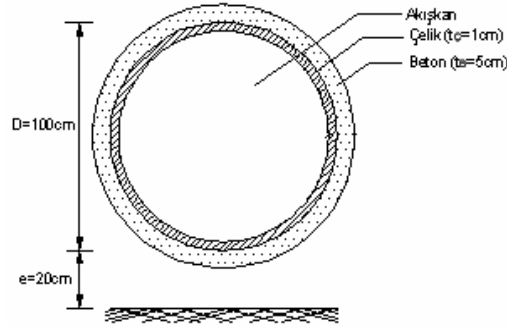
Şekil 3.14 Sürüklenme kuvvetinin konumla değişimi



Şekil 3.15 Toplam yatay kuvvetin konumla değişimi

4. BORU HATTININ STABİLİTESİ VE STATİK ANALİZİ

Boru hattına etkiyen dış kuvvetler hesaplandıktan sonra, tasarlanan kesit özelliklerinin etkiyen kuvvetler göz önünde bulundurularak statik analizi yapılır. Kesit özellikleri belirlenen boru hattının düşey ve yatay eksenlerde hareketinin engellenmesi gerekir. Bu amaçla boru hatları, zemine gömülü, zemin üzerinde serbest oturan yada suda asılı olarak tasarlanırlar.



Şekil 4.1 Boru hattı enkesiti

Bu çalışmada, dış kuvvetler boru hattının deniz ortamında kalmasını engelleyecek düzeyde olmadığından dolayı, boru hattı suda asılı olarak tasarlanmıştır. Boru hattının askıda kalmasını sağlamak için belirlenen noktalarda tespit kütlesi denilen yapay ağırlaştırmalar kullanılmıştır.

4.1. Boru Hattına Etkiyen Statik Yüklerin Bulunması

Bu çalışmada, boru hattına dalga kuvvetleri tarafından uygulanan kaldırma kuvveti olmadığından, boru hattının düşey stabilitesi için; boru hattının ağırlığından dolayı deniz suyunun oluşturduğu kaldırma kuvveti (W_k), boru hattı üzerine giydirilen betonun ağırlığından oluşan batırma kuvveti (W_{beton}), çelik boru hattının kendi ağırlığından oluşan batırma kuvveti ($W_{çelik}$) ve boru hattının içinde taşınan akışkanın ağırlığından oluşan batırma kuvveti (W_{su}) hesaplanmıştır.

4.1.1. Boru Hattına Uygulanan Kaldırma Kuvveti

Deniz ortamındaki boru hattına deniz suyu kaldırma kuvveti uygular. Bu kuvvet; boru hattının enkesit alanına (A_{BH}) ve deniz suyunun özgül ağırlığına ($\gamma_{d.suyu}=1,02 \text{ t/m}^3$) bağlı olarak hesaplanır.

$$(A_{BH}) = \pi D^2 / 4 = 0,785 \text{ m}^2 \quad (4.1)$$

bulunur ve deniz suyunun boru hattına uyguladığı kaldırma kuvveti,

$$W_k = 1,02 \times 0,785 = 0,800 \text{ t/m} \quad (4.2)$$

olarak hesaplanır.

4.1.2. Boru Hattının Etrafındaki Betonun Ağırlığından Oluşan Batırma Kuvveti

Boru hattını çevreleyen beton, boru hattına batırmaya çalışır ve bu yönde kuvvet uygular. Bu kuvvet; betonun enkesit alanına (A_B), betonun özgül ağırlığına ($\gamma_{\text{beton}} = 2,5 \text{ t/m}^3$) bağlı olarak hesaplanır.

$$A_B = \left(\frac{\pi \times D_{\text{dış}}^2}{4} \right) - \left(\frac{\pi \times D_{\text{iç}}^2}{4} \right) = 0,165 \text{ m}^2 \quad (4.3)$$

olarak hesaplandığına göre boru hattı üzerinde oluşan batırma kuvvetinin değeri;

$$W_{\text{beton}} = (\gamma_{\text{beton}} - \gamma_{\text{denizsuyu}}) \times A_b = 0,2442 \text{ t/m} \quad (4.4)$$

olarak bulunur.

4.1.3. Boru Hattının Zati Ağırlığından Oluşan Batırma Kuvveti

Boru hattının yapım malzemesinin (çelik) ağırlığından oluşan batırma kuvveti; çelik enkesit alanına ve çeliğin özgül ağırlığına ($\gamma_{\text{çelik}} = 7,86 \text{ t/m}^3$) bağlı olarak hesaplanır.

$$A_{\text{ç}} = \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) - \left(\frac{\pi (D - 2t)^2}{4} \right) = 0,0311 \text{ m}^2 \quad (4.5)$$

olarak hesaplandığına göre boru hattı üzerinde oluşan batırma kuvvetinin değeri;

$$W_{\text{çelik}} = \gamma_{\text{çelik}} \times A_{\text{ç}} = 0,24 \text{ t/m} \quad (4.6)$$

olarak bulunur.

4.1.4. Boru Hattının İçinde Taşınan Arıtılmış Suyun Oluşturduğu Batırma Kuvveti

Boru hattı ile taşınan arıtılmış su, boru hattını batırmaya çalışarak bu yönde kuvvet uygular. Bu kuvvet, boru hattının iç alanına eşit olan suyun kesit alanına (A_s), ve suyun özgül ağırlığına ($\gamma_{su}=1t/m^3$) bağlı olarak hesaplanır.

$$(A_s) = \left(\frac{\pi \times (D - 2 \times t)^2}{4} \right) = 0,754m^2 \quad (4.7)$$

olarak bulunur. Boru hattı üzerinde oluşan düzgün yayılı yükün değeri

$$W_{su} = \gamma_{su} \times A_s = 0,754t/m \quad (4.8)$$

olarak bulunur. Sonuç olarak boru üzerindeki yükler (dalga yükleri hariç);

$$W_k(\text{Kaldırma kuvveti})=0,800t/m$$

$$W_b + W_{\zeta} + W_{su}(\text{Ağırlık kuvvetleri})=0,24+0,2442+0,754=1,24t/m$$

$$W_T(\text{Toplam yük})=1,24-0,8=0,44t/m \quad (4.9)$$

olarak bulunur.

4.2 Sehim Hesabı

Boru hattına etkiyen toplam yük değerleri ile sehim hesabı yapılarak mesnetler arası mesafe tayin edilir böylelikle boru hattının açıklıklarda sehim yaparak zemine temasını önleyecek mesnet mesafeleri seçilir. Boru hattının yapacağı sehim (f_s) Denklem (4.10) ile bulunur.

$$f_s = \frac{5}{384} \times \frac{q \times L_a^4}{E \times J_x} \leq \frac{L_a}{500} \quad (4.10)$$

Mesnetler arası mesafe (L_a) 10m ve toplam düşey yük (q) 0,44t/m için sehim hesabı yapılırsa;

$$\frac{5}{384} \times \frac{0,044 \times 1000^4}{21000 \times 103343} \leq \frac{1000}{500}$$

olarak bulunur. Mesnetler arası mesafe 10m alınarak borunun sehim yapması önlenmiştir.

4.3. Kayma Emniyeti Tahkiki

Boru hattının kendi ağırlığı ile stabilitesinin temini için, kayma emniyeti bakımından;

$$(W_T - \max F_L) \times \mu \geq \max F_H \quad (4.11)$$

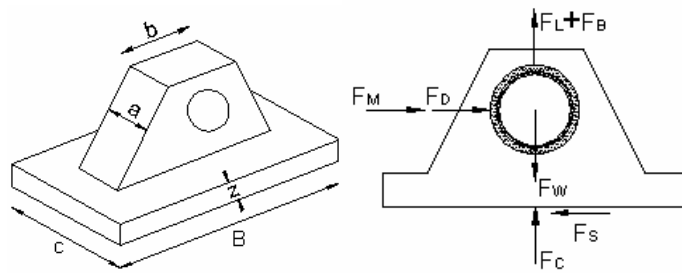
şartını sağlamalıdır. Ülkemizde yatay ve düşey yüklere karşı en az 1,5 misli emniyet istendiği için ifade yeniden yazılacak olursa ve μ (boru veya tespit kütlesi ile deniz tabanı arasındaki sürtünme katsayısı kumlu zeminlerde 0,6 ~ 1,4 olmak üzere) 1,0 seçilirse Denklem (4.11) yardımıyla

$$0,44 \times 1 \geq 1,5 \times 0,206$$

olarak bulunur. Şartı sağladığı için boru stabildir. Bu nedenle toplam yük (W_T) değerine yapay ağırlık (tespit kütlesi) eklenmemiştir. Ancak boru hattına yatay yönde etkiyen hidrodinamik yükleri dengelemek için sisteme mesnetlerde tespit kütlesi eklenmelidir.

4.4. Tespit Kütlesi Tasarımı

Sisteme mesnet noktalarında yerleştirilecek olan tespit kütlelerinin boyutlarına bağlı olarak belirlenen tasarım şartları vardır. Bu şartlar; ($0,3m < a < 1,5m$, $c = a + 0,6m$, $0,2m < z < 1m$)'dir. Tespit kütlesi tasarımında bu şartlar göz önünde bulundurulur.



Şekil 4.2 Tespit kütlesinin perspektif görünüşü ve tespit kütlesine etki eden kuvvetler

Tespit kütlesi kalınlığı (a) 0,8m seçilirse, efektif temel eni (c) 1,4m olarak bulunur ve temel kalınlığı (z) 0,3m seçilebilir. Tespit kütlesi çapına bağlı olarak üst yüzey genişliği (b) 1,2m seçilirse efektif temel genişliği (B) 4,65m bulunur.

4.5. Tespit Kütlesinin Temas Ettiği Zemin Gerilmelerinin Tahkiki

Sisteme tespit kütlesi eklendikten sonra, zeminin yeni sistemi zeminin taşıyıp taşımayacağı kontrol edilmelidir. Bu amaçla zemin taşıma kapasitesi (F_C) kuvveti hesaplanmalıdır. Kohezyonsuz zeminler için zemin taşıma kapasitesi içsel sürtünme açısına ($\phi=40^\circ$) bağlı olarak hesaplanan zemin taşıma gücü katsayılarına (N_q , N_γ) bağlı olarak hesaplanır. (Det Norske Veritas, 1981)

$$F_C = (N_q \times \gamma_s \times z + 1/2 \times N_\gamma \times \gamma_s \times B) \times B \quad (4.12)$$

$$N_q = e^{\pi \times \tan \phi} \times \tan(45 + \phi/2) = 64,19 \quad (4.13)$$

$$N_\gamma = 2 \times (N_q + 1) \tan \phi = 109,40 \quad (4.14)$$

olarak bulunursa zemin taşıma kapasitesi ($F_C=2571t/m^2$) bulunur. Zemin taşıma kapasitesi hesaplandıktan sonra hidrostatik düşey kuvvetin mesnetlerde oluşturduğu maksimum düşey kuvvetler hesaplanarak bu kuvvetin zemin taşıma kapasitesinden küçük olması istenir. SAP2000 programıyla maksimum düşey kuvvet ikinci mesnette ($R_{md}=4,01t$) bulunur.

Zemin taşıma tahkiki;

$$R_{md} < F_C \times c \times B \quad (4.15)$$

şartına göre yapılır. Hesaplanan değerlere göre zemin üzerindeki hidrostatik düşey kuvveti ve tespit kütlesini taşıyabilmektedir.

Zemin gerilme tahkikinde yapılması gereken diğer bir tahkikte yanal zemin direnci tahkikidir. Tespit kütlesinin oturduğu zeminin hidrodinamik yatay kuvvetler nedeniyle kayıp kaymayacağı kontrol edilir. Bu amaçla yanal zemin direnci hesaplanmalıdır.

Yanal zemin direnci (F_S); Denklem (4.16) ile hesaplanır.

$$F_S = (F_v \times \tan(3\phi/2) + 1/2 \times \gamma_s \times z^2 \times \tan^2(45 + \phi/2)) \quad (4.16)$$

Bilinen değerler formüle yerleştirilirse yanal zemin direnci ($F_s=0,95t/m^2$) bulunur. Yanal zemin direnci hesaplandıktan sonra hidrodinamik yatay yükün mesnetlerde oluşturduğu maksimum yatay kuvvetler hesaplanarak bu kuvvetin tespit kütlesinin oturduğu zeminin yanal zemin direncinden küçük olması istenir. SAP2000 programıyla maksimum yatay kuvvet ikinci mesnette ($R_{my}=1,32t$) bulunur.

Yanal zemin direnci tahkiki;

$$R_{my} < F_s \times c \times B \quad (4.17)$$

şartına göre yapılır.

Hesaplanan değerlere göre tespit kütlesinin oturduğu zemin mesnetlere gelen yatay kuvvete karşı koyacak dirence sahiptir ve yanal hareket etmez.

Sonuç olarak yapılan tahkikler göstermiştir ki boru hattı stabil durumdadır.

5. BORU HATTININ DİNAMİK ANALİZİ

Yapılara etki eden dinamik yüklerin analizinde; spektral analiz, zaman tanım alanı yöntemi, enerji yöntemleri, tesir çizgisi yöntemi, elasto-kinetik analiz yöntemi gibi yöntemler kullanılabilir. Bu çalışma kapsamında, zaman tanım alanı yöntemi (SAP2000 destekli) ve tesir katsayıları yöntemine göre dinamik analiz yapılarak boru hattının kesit tahkiki ve dinamik yükler etkisinde yaptığı deplasman değerleri bulunmuştur.

5.1. Tesir Katsayıları Yöntemi İle Dinamik Analiz

Genellikle köprüler üzerindeki hareketli taşıt yüklerinin köprülerdeki dinamik etkilerini analiz etmek için kullanılan tesir katsayıları yöntemi, bu çalışmada boru hattına etki eden dalga kuvvetlerinin oluşturduğu dinamik etkinin incelenmesinde kullanılmıştır. Şekil 3.10'da görülen maksimum yatay dalga kuvvetlerinden son üç açıklığa etki eden değerleri dinamik analizde kullanılmıştır. Dinamik analiz; analitik ve bilgisayar destekli olmak üzere iki yöntemle yapılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Çıkan sonuçların uyumu göz önünde bulundurularak boru hattının düğüm noktalarında yaptığı deplasmanlar ve kesit tesirleri hesaplanmıştır.

5.1.1. Analitik Çözüm

İki ucu ankastre olacak şekilde mesnetlenmiş tek açıklıklı, sabit atalet momenti bir sistemi, üç açıklıklı basit mesnetli bir sisteme indirgeyebiliriz. İndirgenen üç açıklıklı sürekli kirişin önemli kesitlerine ait tesir çizgileri çizilerek en büyük değerleri veren yüklemeler bulunur.

5.1.1.1. Tesir Katsayılarının Hesaplanması

Her kesit tesirine ait tesir çizgisi ordinatları birinci açıklıkta y_1 , ikinci açıklıkta y_2 ve üçüncü açıklıkta da y_3 olacak şekilde gösterilerek özetlenmiş ve şekiller yardımıyla açıklanmıştır. Her açıklıkta birer metrede değişen tesir katsayıları hesaplanarak, sonuçlar Çizelge (5.1)'de verilmiştir.

$$\alpha = \frac{l_1}{l_2} = \frac{10,00}{10,00} = 1,00 \quad (5.1)$$

Denklem (5.1)'de; l_1 kirişin ilk açıklığının uzunluğu, l_2 kirişin ikinci açıklığının uzunluğu ve α bunlara bağlı olarak hesaplanan çarpım katsayısıdır. Bu katsayı yardımıyla A, B', C, D sayıları bulunur. Bu sayılar tesir katsayıların hesaplanmasında kullanılır.

$$A = \frac{1}{1-4(1+\alpha)^2} = \frac{1}{1-4(2,00)^2} = -0,06667 \quad (5.2)$$

$$B' = (1+\alpha)A = (1+1,00) \times -0,06667 = -0,13333 \quad (5.3)$$

$$C = (1+2\alpha)A = (1+2 \times 1,00) \times -0,06667 = -0,20000 \quad (5.4)$$

$$D = (3+2\alpha)A = (3+2 \times 1,00) \times -0,06667 = -0,33333 \quad (5.5)$$

$$\beta_1 = \frac{X}{l_1} = \frac{X}{10,00} \quad \beta_2 = \frac{X}{l_2} = \frac{X}{10,00} \quad (5.6)$$

Denklem (5.6)'da X, tesir katsayısı hesaplanacak noktanın başlangıç noktasına olan uzaklığıdır ve β_1 ve β_2 katsayılarının hesaplanmasında kullanılır.

$$Kx_1 = \beta_1(1-\beta_1) = 0,010X(1-0,010X), \quad Kx_2 = \beta_2(1-\beta_2) = 0,010X(1-0,010X) \quad (5.7)$$

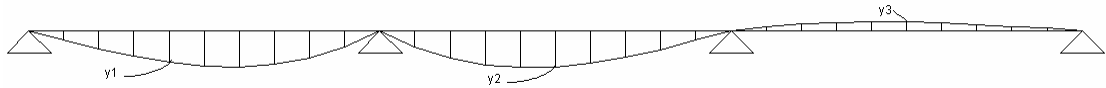
Denklem (5.7)'de β_1 ve β_2 katsayıları yardımıyla mesafelere göre değişen Kx_1 ve Kx_2 katsayıları bulunur. Bulunan katsayılar yardımıyla tesir çizgisi ordinatları bulunur.

-M₂ mesnet eğilme momenti tesir çizgisi ordinatları;

$$y_1 = 2B'(1+\beta_1)Kx_1l_1 \quad y_1 = -0,26666(1+\beta_1)Kx_1 \times 10,00 \quad (5.8)$$

$$y_2 = [2B'(2-\beta_2) - A(1+\beta_2)]Kx_2l_2 \quad y_2 = [-0,26666(2-\beta_2) - 0,06667(1+\beta_2)]Kx_2 \times 10,00 \quad (5.9)$$

$$y_3 = -A\alpha(2-\beta_1)Kx_1l_1 \quad y_3 = 0,06667(2-\beta_1)Kx_1 \times 10,00 \quad (5.10)$$



Şekil 5.1M₂ Tesir Çizgisi Ordinatlari

-Birinci açıklığın 0,40L₁ kesitinde (M_{s1}) eğilme momenti tesir çizgisi ordinatları

0<x<0,40L₁ için;

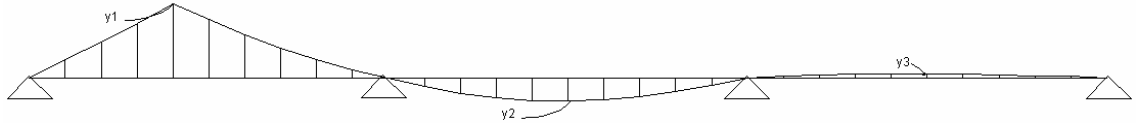
$$y_1 = [0,80B(1+\beta_1)Kx_1 + 0,60\beta_1]l_1 \quad y_1 = [-0,10666(1+\beta_1)Kx_1 + 0,60\beta_1] \times 10,00 \quad (5.11)$$

$0,40L_1 < x < L_1$ için;

$$y_1 = [0,80B(1+\beta_1)Kx_1 + 0,40(1-\beta_1)]l_1 \quad y_1 = [-0,10666(1+\beta_1)Kx_1 + 0,40(1-\beta_1)] \times 10,00 \quad (5.12)$$

$$y_2 = 0,40[2B(2-\beta_2) - A(1+\beta_2)]Kx_2l_2 \quad y_2 = [-0,10666(2-\beta_2) - 0,06667(1+\beta_2)]Kx_2 \times 10,00 \quad (5.13)$$

$$y_3 = -0,40A\alpha(2-\beta_1)Kx_1l_1 \quad y_3 = 0,02667(2-\beta_1)Kx_1 \times 10,00 \quad (5.14)$$



Şekil 5.2 M_{S1} Tesir Çizgisi Ordinatlari

-İkinci açıklığın $0,50 L_2$ kesitindeki eğilme momenti (M_{S2}) tesir çizgisi ordinatlari

$$y_1 = 0,50C\alpha(1+\beta_1)Kx_1l_1 \quad y_1 = -0,10000(1+\beta_1)Kx_1 \times 10,00 \quad (5.15)$$

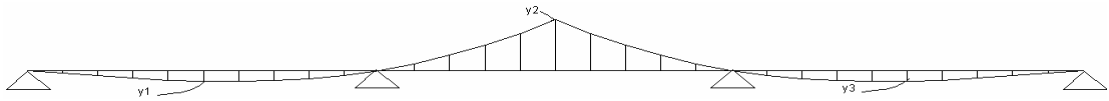
$0 < x < 0,50 l_2$ için;

$$y_2 = (0,50\beta_2 + 1,5CKx_2)l_2 \quad y_2 = (0,50\beta_2 - 0,30000Kx_2) \times 10,00 \quad (5.16)$$

$0,50 l_2 < x < l_2$ için;

$$y_2 = [0,50(1-\beta_2) + 1,50CKx_2]l_2 \quad y_2 = [0,50(1-\beta_2) - 0,30000Kx_2] \times 10,00 \quad (5.17)$$

$$y_3 = 0,50C\alpha(2-\beta_1)Kx_1l_1 \quad y_3 = -0,10000(2-\beta_1)Kx_1 \times 10,00 \quad (5.18)$$



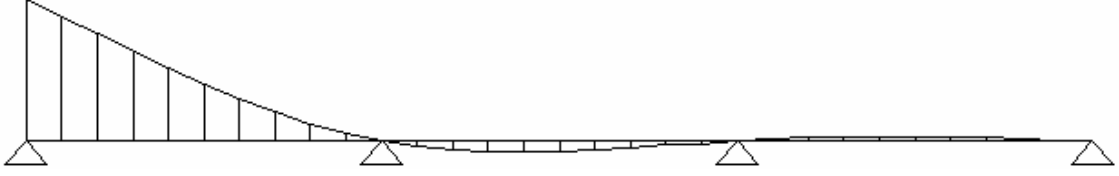
Şekil 5.3 M_{S2} Tesir çizgisi ordinatlari

-1 Nolu mesnedin sağındaki kesme kuvveti ($R_1=V_{12}$) tesir çizgisi ordinatlari

$$y_1 = 2B\alpha(1+\beta_1)Kx_1 + (1-\beta_1) \quad y_1 = -0,26666(1+\beta_1)Kx_1 + (1-\beta_1) \quad (5.19)$$

$$y_2 = \frac{1}{\alpha}[2B(2-\beta_2) - A(1+\beta_2)]Kx_2 \quad y_2 = [-0,26666(2-\beta_2) - 0,06667(1+\beta_2)]Kx_2 \quad (5.20)$$

$$y_3 = -A\alpha(2 - \beta_1)Kx_1 \quad y_3 = 0,06667(2 - \beta_1)Kx_1 \quad (5.21)$$



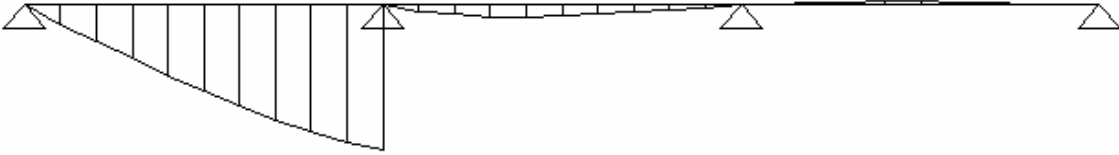
Şekil 5.4 1 Nolu mesnedin sağındaki kesme kuvveti tesir çizgisi ordinatları

-2 Nolu mesnedin solundaki kesme kuvveti (V_{21}) tesir çizgisi ordinatları

$$y_1 = 2B(1 + \beta_1)Kx_1 - \beta_1 \quad y_1 = -0,26666(1 + \beta_1)Kx_1 - \beta_1 \quad (5.22)$$

$$y_2 = \frac{1}{\alpha}[(2B(2 - \beta_2) - A(1 + \beta_2))]Kx_2 \quad y_2 = [(-0,26666(2 - \beta_2) + 0,06667A(1 + \beta_2))]Kx_2 \quad (5.23)$$

$$y_3 = -A\alpha(2 - \beta_1)Kx_1 \quad y_3 = 0,06667(2 - \beta_1)Kx_1 \quad (5.24)$$



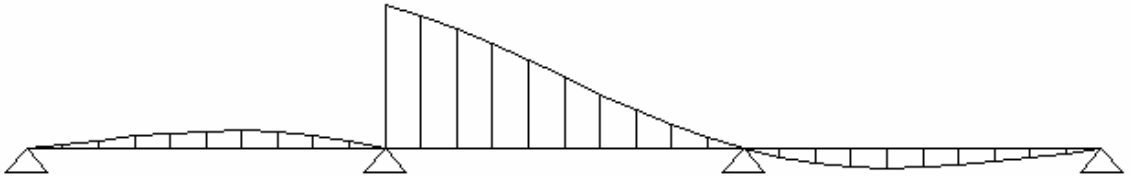
Şekil 5.5 2 Nolu mesnedin solundaki kesme kuvveti tesir çizgisi ordinatları

-2 Nolu mesnedin sağındaki kesme kuvveti V_{23} tesir çizgisi ordinatları

$$y_1 = -\alpha^2 D'(1 + \beta_1)Kx_1 \quad y_1 = 0,33333(1 + \beta_1)Kx_1 \quad (5.25)$$

$$y_2 = (1 - \beta_2) + D'(2\beta_2 - 1)Kx_2 \quad y_2 = (1 - \beta_2) - 0,33333(2\beta_2 - 1)Kx_2 \quad (5.26)$$

$$y_3 = \alpha^2 D'(2 - \beta_1)Kx_1 \quad y_3 = -0,33333(2 - \beta_1)Kx_1 \quad (5.27)$$



Şekil 5.6 2 Nolu mesnedin sağındaki kesme kuvveti tesir çizgisi ordinatları

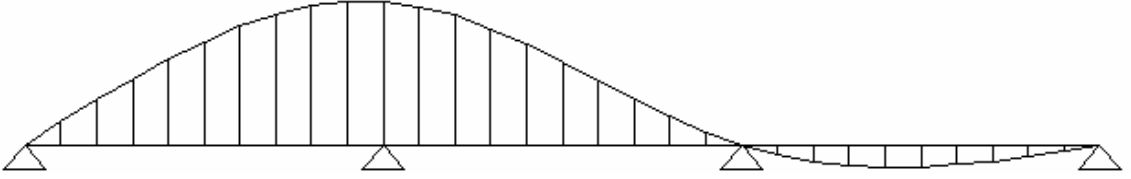
-2 Nolu mesnet reaksiyonu (R_2) tesir çizgisi ordinatları

$$y_1 = \beta_1 - (2B + D\alpha)(1 + \beta_1)\alpha Kx_1 \quad y_1 = 0,59999(1 + \beta_1)Kx_1 + \beta_1 \quad (5.28)$$

$$y_2 = (1 - \beta_2) + [D'(2\beta_2 - 1) + \frac{1}{\alpha}(A(1 + \beta_2) - 2B(2 - \beta_2))]Kx_2$$

$$y_2 = (1 - \beta_2) + [-0,33333(2\beta_2 - 1) + (-0,06667(1 + \beta_2) + 0,26666(2 - \beta_2))]Kx_2 \quad (5.29)$$

$$y_3 = (A + D'\alpha)\alpha(2 - \beta_1)Kx_1 \quad y_3 = -0,40000(2 - \beta_1)Kx_1 \quad (5.30)$$



Şekil 5.7 2 Nolu mesnet reaksiyonu tesir çizgisi ordinatları

Üç açıklığın her bir metresinde hesaplanan tesir katsayıları Çizelge (E5.1)'de verilmiştir.

5.1.1.2. Tesir Çizgisi Diyagram Alanları

Hareketli birim yükten dolayı oluşabilecek max moment ve kesme kuvveti değerleri bazı katsayılara bağlı olarak kolaylıkla hesaplanır, tesir çizgisi diyagramları çizilir. Birim yükleme yerine sisteme etkiyen dinamik yük yerine konularak, diyagramlar süperpoze edilir ve istenen moment ve kesme kuvveti değerleri (Şekil 5.9)'da görüldüğü gibi bulunur.

Çizelge 5.1 Moment ve kesme kuvveti değerleri

t=2sn	1No'lu Mesnet Kesme Kuvveti(t)	2 No'lu Mesnetin Solundaki K.K.(t)	2 No'lu Mesnetin Sağındaki K.K.(t)	2 No'lu Mesnet Kesme Kuvveti(t)	M2 Moment (tm)	Ms1 Moment (tm)	Ms2 Moment (tm)
F=0,073t	0,06804	-0,0047	0,00117	0,00584	-0,0095	0,01789	-0,0037
	0,05928	-0,014	0,00321	0,01752	-0,0281	0,05402	-0,0106
	0,05052	-0,0228	0,00555	0,02862	-0,0449	0,09089	-0,0168
	0,04176	-0,0315	0,0073	0,03884	-0,0588	0,12921	-0,0223
	0,033	-0,0397	0,00847	0,04847	-0,0686	0,13286	-0,0263
	0,0257	-0,0476	0,00905	0,05665	-0,0734	0,10184	-0,0277
	0,0184	-0,0549	0,00905	0,06366	-0,0719	0,07337	-0,027
	0,01168	-0,0613	0,00818	0,06862	-0,0624	0,04782	-0,0237
	0,00584	-0,0651	0,00584	0,07154	-0,0442	0,02555	-0,0168
	0,00175	-0,0712	0,00234	0,07271	-0,0164	0,00767	-0,0062
F=0,053t	-0,0011	-0,0011	0,05088	0,05194	-0,0122	-0,0064	0,00622
	-0,0025	-0,0028	0,04643	0,0494	-0,0329	-0,0178	0,01988
	-0,0034	-0,0038	0,04134	0,04516	-0,0464	-0,0262	0,03684
	-0,0042	-0,0042	0,03583	0,03986	-0,0533	-0,0315	0,05698
	-0,004	-0,004	0,02968	0,03371	-0,0546	-0,0339	0,0803
	-0,0034	-0,0034	0,02311	0,02671	-0,0514	-0,0337	0,0803
	-0,003	-0,003	0,01717	0,02035	-0,0443	-0,0305	0,05698
	-0,0021	-0,0021	0,01166	0,01378	-0,0339	-0,0244	0,03684
	-0,0013	-0,0013	0,00657	0,00763	-0,0212	-0,0162	0,01988
	-0,0006	-0,0006	0,00212	0,00233	-0,0072	-0,0058	0,00622
F=0,206t	0,000824	0,000824	-0,00659	-0,00742	0,01133	0,00515	-0,01751
	0,003296	0,003296	-0,01895	-0,01978	0,0309	0,01339	-0,04738
	0,00412	0,00412	-0,02307	-0,02719	0,04326	0,01751	-0,06695
	0,005768	0,004944	-0,02554	-0,02966	0,05047	0,01957	-0,07622
	0,006592	0,006592	-0,02554	-0,03131	0,05253	0,02163	-0,07828
	0,004944	0,004944	-0,0239	-0,02884	0,04841	0,01957	-0,07416
	0,00412	0,00412	-0,0206	-0,02472	0,0412	0,01648	-0,06283
	0,003296	0,003296	-0,01566	-0,01978	0,0309	0,01236	-0,04738
	0,002472	0,001648	-0,01071	-0,01236	0,01957	0,00824	-0,02987
	0,000824	0,000824	-0,0033	-0,00412	0,00721	0,00309	-0,0103

Boru hattına etki eden kuvvetler nedeniyle boru hattı titreşime uğrar. Bu nedenle; elde edilen (Çizelge 5.1) moment ve kesme kuvveti değerleri Denklem (5.31) ile hesaplanan titreşim katsayısı ile çarpılır.

$$\phi' = 1 + 15/L_a + 37 = 1,32 \quad (5.31)$$

Denklem (5.31)'de; ϕ , titreşim katsayısını temsil eder. (Ekiz, İ., 1981)

5.1.2. SAP2000 Yazılımına Göre Bilgisayar Destekli Çözüm

Tesir çizgileri yönteminin bilgisayar destekli çözümünde SAP2000 Programı kullanılmıştır. Şekil 5.10'da modellemesi görülen boru hattının her bir açıklığına etkiyen dalga kuvvetleri, üniform şerit yükü biçiminde tanımlanmıştır. Dalga kuvvetleri; Şekil 5.8'de görüldüğü gibi üniform taşıt yükü olarak SAP 2000 programında ataması yapılmıştır.

General Vehicle Data

Vehicle Name: GEN3

Usage

- ☒ Lane Negative Moments at Supports
- ☒ Interior Vertical Support Forces
- ☒ All other Responses

Floating Axle Loads

Value: 0, Width Type: One Point, Axle Width: 0

☐ Double the Lane Moment Load when Calculating Negative Span Moments

Loads

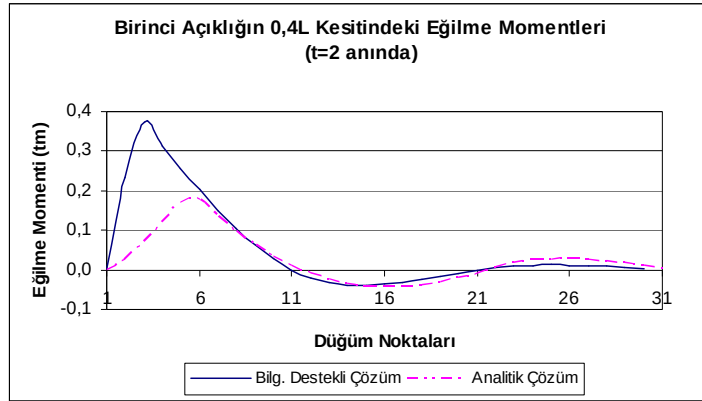
Load Length Type	Minimum Distance	Maximum Distance	Uniform Load	Uniform Width Type	Uniform Width	Axle Load	Axle Width Type	Axle Width
Fixed Length	1	0.206	0.206	Zero Width	0	0	One Point	0
Fixed Length	1	0.206	0.206	Zero Width	0	0	One Point	0

Buttons: Add, Insert, Modify, Delete, OK, Cancel

Units: Ton, m, C

Şekil 5.8 Dalga kuvvetlerinin taşıt yükü olarak tanımlanması

Her bir anda boru hattına etki eden dalga kuvvetlerinin ayrı ayrı dinamik analizi yapılarak anlık kesit tesirleri elde edilmiştir. Elde edilen kesit tesirleri Şekil (5.9)'de görüldüğü gibi analitik çözümle karşılaştırılarak sonuçlar elde edilmiştir.

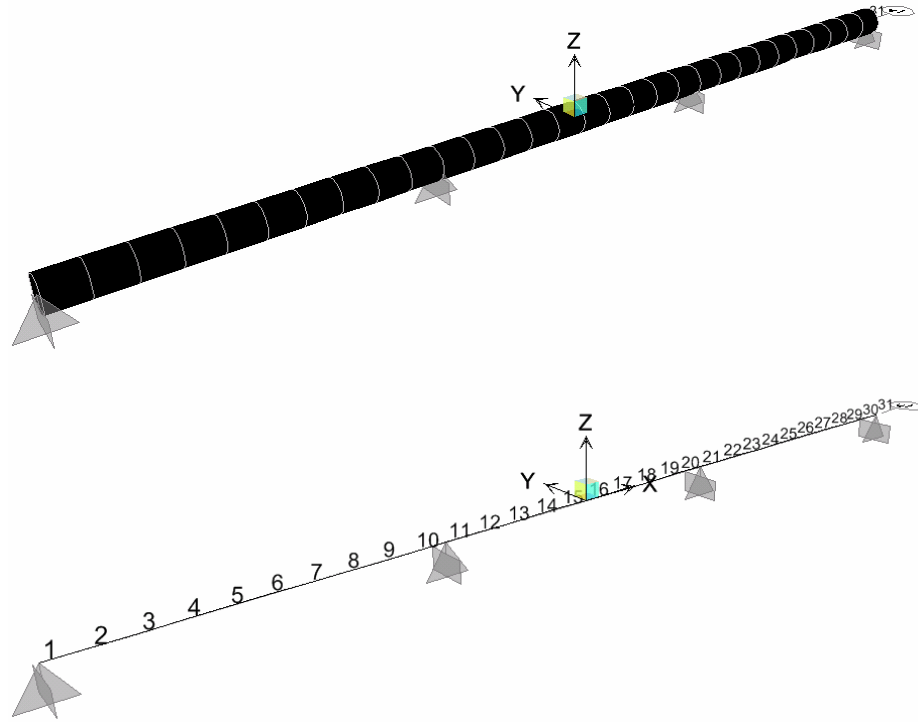


Şekil 5.9 Boru hattının karşılaştırmalı kesit tesirleri

Kesit tesirlerinin uyumlu olduğu görüldükten sonra, bilgisayar destekli anlık yapılan analizler kombine edilerek boru hattının düğüm noktalarında yapmış olduğu deplasmanlar elde edilmiştir.

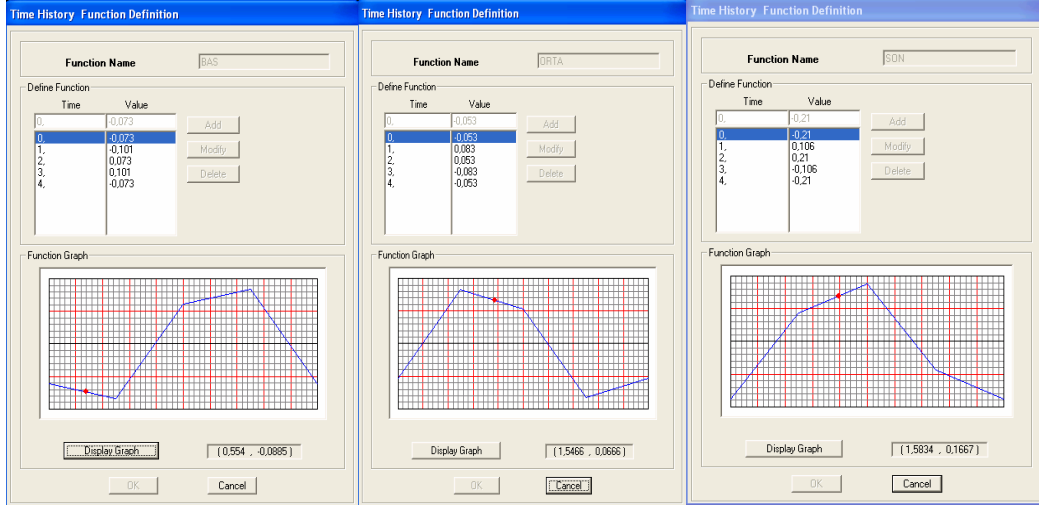
5.2. Zaman Tanım Alanında (Time History) Dinamik Analiz

Zaman tanım alanının SAP2000 Programında genel olarak kullanım şekli; belirli zaman dilimlerinde, belirli bir yönde, depreme ait zemin ivmelerinin yada kuvvetlerinin kaydı biçimindedir. Ancak bu çalışma kapsamında Şekil 5.10'da görülen boru hattının dalga kuvvetleri etkisindeki dinamik analizinde zaman tanım alanı yöntemi SAP2000 Programıyla kullanılmıştır.



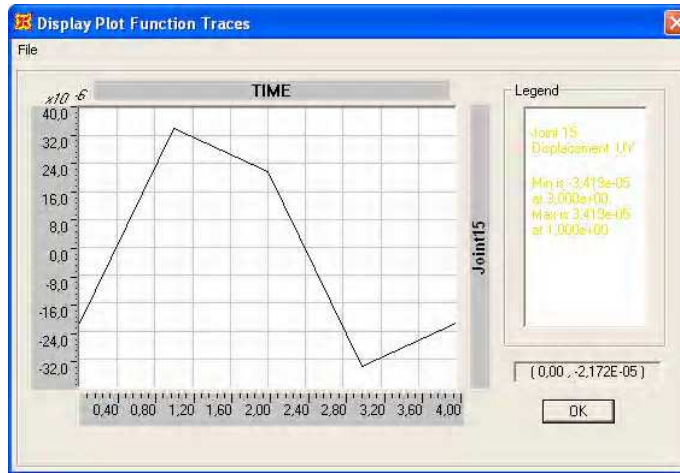
Şekil 5.10 Boru hattının SAP2000 programı ile modellenmesi

Boru hattına etkiyen maksimum kuvvetlerin bulunduğu son üç açıklığa etki eden, Çizelge (E.5)' den alınan kuvvet değerleri kullanılarak zaman tanım alanı fonksiyonları oluşturulmuştur.



Şekil 5.11 Zaman tanım alanı fonksiyonlarının oluşturulması

Şekil (5.11)'de görülen zaman tanım alanı fonksiyonları her açıklıkta birim yük değerlerine atanarak programa aktarılmıştır. Zaman tanım alanı fonksiyonları, lineer, modal analiz olarak bilgisayara kaydedilmiştir. Zaman tanım alanı cm/sn^2 biriminde, toplam 4 saniyelik zaman dilimi için 1sn zaman aralığında analiz tamamlanacaktır. (Computers & Engineering, 2006)



Şekil 5.12 15 numaralı düğüm noktasının zamanla değişen deplasman değerleri

6. GERİLME KONTROLÜ

Kesit özellikleri; dış çap ($D=1000\text{mm}$), kesit alanı ($A=311,02\text{cm}^2$), et kalınlığı ($t=10\text{mm}$), birim ağırlığı ($G=244,15\text{kg/m}$), atalet momenti ($J=381074,404\text{cm}^4$), mukavemet momenti ($W=7621,49\text{cm}^3$) olan 3 açıklıklı 30m uzunluğundaki boru hattına; $\alpha=90$ elde edilen yatay hidrodinamik kuvvetler de dikkate alarak üzerine etkittiğimiz de ortaya çıkan maksimum moment değerleri (Çizelge E.8) ($M_x=2,88\text{ t.m}$ $M_z=1,62\text{ t.m}$)'dir. Bu değerlere göre gerilme tahkiki Denklem (6.1)'e göre yapılır.

$$\sigma = \frac{M_x}{W_x} + \frac{M_z}{W_z} = \frac{288}{7621,49} + \frac{162}{7621,49} = 0,06\text{t/cm}^2 \leq 2,4\text{t/cm}^2 \quad (6.1)$$

Yapılan kesit tahkikine göre kesit yeterlidir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada; düzensiz dalgaların etkidiği boru hattının dinamik analizi tesir katsayıları ve zaman alanı yöntemlerine göre yapılmıştır. Deniz ortamında düzensiz formda bulunan dalgaların, parametrelerinin hesabı için düzenli dalga formunda olması gerekmektedir. Bu amaçla alınan bir düzensiz dalga verisinden 32 adet sinüs dalgası türetilmiştir. Bu işlem yapılırken MATLAB programı yardımıyla Hızlı Fourier Dönüşüm (FFT) metodu kullanılmıştır. Bu yöntem dışında; alçalırken ve yükselirken sıfırı kesme yöntemi gibi farklı yöntemlerde kullanılabilir. Hızlı Fourier Dönüşüm metodu kullanılarak birey dalga ve ondan türetilen sinüs dalgalarının toplamından üretilen yeni dalganın spektrumları ve su yüzü profilleri karşılaştırılmıştır. Çözümlemeler sonucunda Hızlı Fourier Dönüşüm metodunun düzensiz dalgadan çoklu düzenli dalga türetmede uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür.

Dalga parametrelerinin elde edilmesinde her bir dalganın Lineer Dalga Teorisi bölgesinde kaldığı kabulü yapılarak boru hattına etki eden kuvvet değerleri hesaplanmıştır.

Boru hattına etki eden dalga kuvvetlerinin boru hattına olumsuz etkisinin olmayacağı hesaplamalar sonucunda görülerek, daha az maliyetli olması düşüncesiyle deniz ortamında askıda tasarlanmasına karar verilmiştir. Boru hattı hidrodinamik kaldırma kuvvetinin ihmal edilebilir yüksekliğe yerleştirilmiştir.

Boru hattının stabilitesi tespit kütleleri ile sağlanmıştır. Mesnet noktalarına yerleştirilen tespit kütlelerinin boyutlandırılmasında zemin etkileşimi ve dolayısıyla geoteknik analizde dikkate alınmıştır.

Stabil bir boru hattına etkiyen dinamik kuvvetlerde gözetilerek dinamik analiz yapılma gereği ortaya çıkmıştır. Dinamik analiz; Zaman Tanım Alanı ve Tesir Katsayıları Yöntemlerine göre karşılaştırmalı olarak yapılmıştır.

Zaman Tanım Alanı Yöntemi bilgisayar destekli olarak yapılmış ve bu nedenle SAP2000 programı kullanılmıştır. Bu aşamada hidrodinamik kuvvet değerleri kullanılarak taşıyıcı sistemi belirlenen boru hattının yük analizi yapılmıştır. Hesaplamada kuvvet-zaman değerleri haricinde her bir dalganın ivme değerleri programa aktarılarak da ivme-zaman esaslı analiz yapılma seçeneği vardır. Ancak hidrodinamik kuvvet değerleri kullanılarak kuvvet-zaman esaslı yükleme seçeneğinin dikkate alınmasıyla dinamik hesaplama daha kısa ve net hale getirilmiştir.

Tesir katsayıları yöntemi; hem analitik olarak hem de bilgisayar destekli (SAP2000) uygulanmıştır. Sonuçların uyumu gözlenerek SAP2000 destekli çözümleme ile nokta

deplasmanları bulunmuştur. Bu yöntemde hidrodinamik dalga kuvvetleri taşıt yükü biçiminde temsil edilmektedir. Boru hattına etkiyen yükler; boru eksenine dik yöndedir. Bu nedenle üniform dağılım gösteren ve zamanla boru üzerindeki bir noktada farklılaşan yük her bir zaman diliminde sanki bir statik üniform yük etkisi gibi bir sonucun ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Tesir katsayıları yöntemi ise yükün giriş üzerinde hareket etme esasına dayanmaktadır. Bu çalışmanın akabinde hareketli yüklerin olduğu boru eksenine-dalga yönü açısının dik olması dışında uygulanacak bir durumdaki hareketli yük mantığı dikkate alınarak yükleme yapılması daha isabetli olacaktır.

Dinamik analizde kullanılan her iki yöntemden elde edilen kesit tesirleri ve düğüm nokta deplasmanları uygun sonuçlar vermektedir.

sinüs dalgaları farklı dalga teorileri (Stokes, Cnoidal, Solitary) ile incelenebilir ve sonuçlar karşılaştırılabilir. Ayrıca Zaman Tanım Alanı yöntemi kullanılırken hidrodinamik kuvvetlere ek olarak deprem kayıtları da sisteme aktararak deprem ve dalga kuvvetlerinin analizi yapılması önerilebilir.

KAYNAKLAR

1. Coastal Engineering Manual, Chapter 1, Water Wave Mechanics, Part2, U.S. Army Coastal Engineerig Resarch Center, 2006.
2. Chakrabarti, S.K. Hydrodynamics of Offshore Structures, Compitational Mechanics Publications, Springer-Verlag, Berlin, 1987.
3. Çakıcı, M., Oğuzhan, A., Özdil, T., Temel İstatistik 2 İstanbul 2003.
4. Ekiz, İ., Çözümlü Köprü Problemleri, İstanbul, 1981.
5. Goda, Y., Random Sea and Design of Maritime Structures, 2nd edn. Advanced Series On Ocean Engineering, Vol 15. World Scientific, Singapore., 1985
6. Gökkuş, Ü. Estimation of Design Wave Parametersfrom Spectral Information, Research Report, Dept. Of Atmospheric Sciences, Universty of Washington, Seattle, 1990.
7. Hallam, M.G., Heaf, N.J.Wootton, L.R, Dynamics of Marine Structures, CIRIA, Underwater Engineering Group, London, 1990.
8. Hsua, T., Hsiao, S., Ou, C., Wang, S., Yang, B., Chou, S., An Application of Boussinesq Equations to Bragg Reflection of Irregular Waves, Ocean Engineering Vol.34 pp.870-883, 2006.
9. Karturp, F., Dalgaların Matematiksel Teorisi, Seminer, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, 2004.
10. Karturp, F., Kıyı Hidrodinamiğine İlişkin Dalga Denklemlerinin Çözümlemesinde Kısmi Diferansiyel Denklem Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, 2007.
11. Modeling and Optimized Design of Structures Using SAP2000, Computers & Engineering, 2006.
12. Rules For The Design Construction and Inspection of Offshore Structures, Det Norske Veritas, Norway, 1978.
13. Rules For Submarine Pipeline Systems, Det Norske Veritas, Norway, 1981.
14. Sticken, J., Eskil, M., T., Matlab &Simulink Based Book, An Introduction to Technical Problem Solving with Matlab v.7.2 e,2006.
15. Yalçın, Y., Çevik, E., Çelikoğlu, Y., Kıyı, Liman Mühendisliği İMO Ankara Şube, 1998.

EKLER

Çizelge E.1 Ki-Kare değerleri

df	0.995	0.99	0.975	0.95	0.90	0.10	0.05	0.025	0.01	0.005
1	---	---	0.001	0.004	0.016	2.706	3.841	5.024	6.635	7.879
2	0.010	0.020	0.051	0.103	0.211	4.605	5.991	7.378	9.210	10.597
3	0.072	0.115	0.216	0.352	0.584	6.251	7.815	9.348	11.345	12.838
4	0.207	0.297	0.484	0.711	1.064	7.779	9.488	11.143	13.277	14.860
5	0.412	0.554	0.831	1.145	1.610	9.236	11.070	12.833	15.086	16.750
6	0.676	0.872	1.237	1.635	2.204	10.645	12.592	14.449	16.812	18.548
7	0.989	1.239	1.690	2.167	2.833	12.017	14.067	16.013	18.475	20.278
8	1.344	1.646	2.180	2.733	3.490	13.362	15.507	17.535	20.090	21.955
9	1.735	2.088	2.700	3.325	4.168	14.684	16.919	19.023	21.666	23.589
10	2.156	2.558	3.247	3.940	4.865	15.987	18.307	20.483	23.209	25.188
11	2.603	3.053	3.816	4.575	5.578	17.275	19.675	21.920	24.725	26.757
12	3.074	3.571	4.404	5.226	6.304	18.549	21.026	23.337	26.217	28.300
13	3.565	4.107	5.009	5.892	7.042	19.812	22.362	24.736	27.688	29.819
14	4.075	4.660	5.629	6.571	7.790	21.064	23.685	26.119	29.141	31.319
15	4.601	5.229	6.262	7.261	8.547	22.307	24.996	27.488	30.578	32.801
16	5.142	5.812	6.908	7.962	9.312	23.542	26.296	28.845	32.000	34.267
17	5.697	6.408	7.564	8.672	10.085	24.769	27.587	30.191	33.409	35.718
18	6.265	7.015	8.231	9.390	10.865	25.989	28.869	31.526	34.805	37.156
19	6.844	7.633	8.907	10.117	11.651	27.204	30.144	32.852	36.191	38.582
20	7.434	8.260	9.591	10.851	12.443	28.412	31.410	34.170	37.566	39.997
21	8.034	8.897	10.283	11.591	13.240	29.615	32.671	35.479	38.932	41.401
22	8.643	9.542	10.982	12.338	14.041	30.813	33.924	36.781	40.289	42.796
23	9.260	10.196	11.689	13.091	14.848	32.007	35.172	38.076	41.638	44.181
24	9.886	10.856	12.401	13.848	15.659	33.196	36.415	39.364	42.980	45.559
25	10.520	11.524	13.120	14.611	16.473	34.382	37.652	40.646	44.314	46.928
26	11.160	12.198	13.844	15.379	17.292	35.563	38.885	41.923	45.642	48.290
27	11.808	12.879	14.573	16.151	18.114	36.741	40.113	43.195	46.963	49.645
28	12.461	13.565	15.308	16.928	18.939	37.916	41.337	44.461	48.278	50.993
29	13.121	14.256	16.047	17.708	19.768	39.087	42.557	45.722	49.588	52.336
30	13.787	14.953	16.791	18.493	20.599	40.256	43.773	46.979	50.892	53.672
40	20.707	22.164	24.433	26.509	29.051	51.805	55.758	59.342	63.691	66.766
50	27.991	29.707	32.357	34.764	37.689	63.167	67.505	71.420	76.154	79.490
60	35.534	37.485	40.482	43.188	46.459	74.397	79.082	83.298	88.379	91.952
70	43.275	45.442	48.758	51.739	55.329	85.527	90.531	95.023	100.425	104.215
80	51.172	53.540	57.153	60.391	64.278	96.578	101.879	106.629	112.329	116.321
90	59.196	61.754	65.647	69.126	73.291	107.565	113.145	118.136	124.116	128.299
100	67.328	70.065	74.222	77.929	82.358	118.498	124.342	129.561	135.807	140.169

Çizelge E.2 D10 Dalgasının inceleme alanındaki boyları ve yükseklikleri

D10		$L_0(m)=63,99$		$H'_0(m)=0,418$			
Grid(x)	d(m)	X(m)	d/ L_0	L(m)	d/L	K_s	H'(m)
1	35,0	0	0,547	63,926	0,547	0,994	0,416
2	34,5	10	0,539	63,919	0,539	0,993	0,415
3	34,0	20	0,531	63,912	0,531	0,993	0,415
4	33,5	30	0,524	63,903	0,524	0,992	0,415
5	33,0	40	0,516	63,894	0,516	0,992	0,415
6	32,5	50	0,508	63,884	0,508	0,991	0,414
7	32,0	60	0,500	63,873	0,500	0,990	0,414
8	31,5	70	0,492	63,861	0,493	0,990	0,414
9	31,0	80	0,484	63,847	0,486	0,989	0,413
10	30,5	90	0,477	63,832	0,478	0,988	0,413
11	30,0	100	0,469	63,816	0,470	0,987	0,413
12	29,5	110	0,461	63,797	0,462	0,986	0,412
13	29,0	120	0,453	63,777	0,455	0,985	0,412
14	28,5	130	0,445	63,755	0,447	0,984	0,411
15	28,0	140	0,438	63,731	0,439	0,983	0,411
16	27,5	150	0,430	63,704	0,432	0,981	0,410
17	27,0	160	0,422	63,674	0,424	0,980	0,410
18	26,5	170	0,414	63,642	0,416	0,978	0,409
19	26,0	180	0,406	63,605	0,409	0,977	0,408
20	25,5	190	0,398	63,566	0,401	0,975	0,408
21	25,0	200	0,391	63,522	0,394	0,973	0,407
22	24,5	210	0,383	63,474	0,386	0,972	0,406
23	24,0	220	0,375	63,420	0,378	0,970	0,405
24	23,5	230	0,367	63,362	0,371	0,968	0,405
25	23,0	240	0,359	63,297	0,363	0,966	0,404
26	22,5	250	0,352	63,225	0,356	0,963	0,403
27	22,0	260	0,344	63,147	0,348	0,961	0,402
28	21,5	270	0,336	63,060	0,341	0,959	0,401
29	21,0	280	0,328	62,965	0,334	0,956	0,400
30	20,5	290	0,320	62,860	0,326	0,954	0,399
31	20,0	300	0,313	62,744	0,319	0,951	0,398
32	19,5	310	0,305	62,617	0,311	0,949	0,397
33	19,0	320	0,297	62,476	0,304	0,946	0,396
34	18,5	330	0,289	62,322	0,297	0,943	0,394
35	18,0	340	0,281	62,152	0,290	0,941	0,393
36	17,5	350	0,273	61,965	0,282	0,938	0,392
37	17,0	360	0,266	61,760	0,275	0,935	0,391
38	16,5	370	0,258	61,534	0,268	0,932	0,390
39	16,0	380	0,250	61,285	0,261	0,930	0,389
40	15,5	390	0,242	61,012	0,254	0,927	0,388
41	15,0	400	0,234	60,712	0,247	0,925	0,387
42	14,5	410	0,227	60,383	0,240	0,923	0,386
43	14,0	420	0,219	60,021	0,233	0,920	0,385
44	13,5	430	0,211	59,624	0,226	0,918	0,384
45	13,0	440	0,203	59,190	0,220	0,917	0,383
46	12,5	450	0,195	58,713	0,213	0,915	0,383
47	12,0	460	0,188	58,191	0,206	0,914	0,382
48	11,5	470	0,180	57,619	0,200	0,913	0,382
49	11,0	480	0,172	56,993	0,193	0,913	0,382
50	10,5	490	0,164	56,309	0,186	0,913	0,382
51	10,0	500	0,156	55,562	0,180	0,914	0,382
52	9,5	510	0,148	54,745	0,174	0,915	0,383
53	9,0	520	0,141	53,855	0,167	0,917	0,383
54	8,5	530	0,133	52,883	0,161	0,919	0,384
55	8,0	540	0,125	51,824	0,154	0,923	0,386
56	7,5	550	0,117	50,670	0,148	0,927	0,388
57	7,0	560	0,109	49,413	0,142	0,932	0,390
58	6,5	570	0,102	48,045	0,135	0,939	0,392
59	6,0	580	0,094	46,555	0,129	0,946	0,396
60	5,5	590	0,086	44,932	0,122	0,956	0,400
61	5,0	600	0,078	43,163	0,116	0,968	0,405

Çizelge E.3 Boru hattına etkiyen atalet kuvveti(F_M) değerleri

x(m)	h	$F_M(\text{kg/m})$				
		t=0	t=T/4	t=T/2	t=3T/4	t=T
0	35,0	0,172	-7,508	-0,172	7,508	0,172
10	34,5	0,238	-7,621	-0,238	7,621	0,238
20	34,0	2,218	-7,789	-2,218	7,789	2,218
30	33,5	3,651	-4,576	-3,651	4,576	3,651
40	33,0	-1,055	-2,240	1,055	2,240	-1,055
50	32,5	-5,612	-9,206	5,612	9,206	-5,612
60	32,0	1,155	-19,094	-1,155	19,094	1,155
70	31,5	16,261	-18,681	-16,261	18,681	16,261
80	31,0	26,478	-5,293	-26,478	5,293	26,478
90	30,5	23,786	12,410	-23,786	-12,410	23,786
100	30,0	7,235	22,917	-7,235	-22,917	7,235
110	29,5	-10,227	13,778	10,227	-13,778	-10,227
120	29,0	-6,872	-2,413	6,872	2,413	-6,872
130	28,5	5,448	1,743	-5,448	-1,743	5,448
140	28,0	-2,960	14,001	2,960	-14,001	-2,960
150	27,5	-19,272	5,455	19,272	-5,455	-19,272
160	27,0	-17,885	-13,046	17,885	13,046	-17,885
170	26,5	-4,157	-21,444	4,157	21,444	-4,157
180	26,0	7,758	-16,821	-7,758	16,821	7,758
190	25,5	8,516	-11,836	-8,516	11,836	8,516
200	25,0	13,982	-15,601	-13,982	15,601	13,982
210	24,5	27,702	-6,086	-27,702	6,086	27,702
220	24,0	24,887	11,915	-24,887	-11,915	24,887
230	23,5	12,969	20,833	-12,969	-20,833	12,969
240	23,0	-2,072	16,945	2,072	-16,945	-2,072
250	22,5	1,136	7,470	-1,136	-7,470	1,136
260	22,0	0,551	16,934	-0,551	-16,934	0,551
270	21,5	-16,144	13,257	16,144	-13,257	-16,144
280	21,0	-17,265	-12,466	17,265	12,466	-17,265
290	20,5	16,016	-15,936	-16,016	15,936	16,016
300	20,0	18,773	20,850	-18,773	-20,850	18,773
310	19,5	-18,658	20,061	18,658	-20,061	-18,658
320	19,0	-11,974	-11,670	11,974	11,670	-11,974
330	18,5	9,605	0,143	-9,605	-0,143	9,605
340	18,0	-4,595	8,743	4,595	-8,743	-4,595
350	17,5	6,686	4,515	-6,686	-4,515	6,686
360	17,0	-13,634	37,335	13,634	-37,335	-13,634
370	16,5	-68,997	-13,454	68,997	13,454	-68,997
380	16,0	7,584	-82,359	-7,584	82,359	7,584
390	15,5	70,097	7,571	-70,097	-7,571	70,097
400	15,0	-11,331	47,903	11,331	-47,903	-11,331
410	14,5	-53,011	-1,413	53,011	1,413	-53,011
420	14,0	-8,868	-105,907	8,868	105,907	-8,868
430	13,5	153,992	9,023	-153,992	-9,023	153,992
440	13,0	-16,349	136,740	16,349	-136,740	-16,349
450	12,5	-113,384	1,391	113,384	-1,391	-113,384
460	12,0	10,356	-107,096	-10,356	107,096	10,356
470	11,5	102,474	40,165	-102,474	-40,165	102,474
480	11,0	-67,923	127,751	67,923	-127,751	-67,923
490	10,5	-94,993	-101,598	94,993	101,598	-94,993
500	10,0	69,313	-66,000	-69,313	66,000	69,313
510	9,5	23,966	106,004	-23,966	-106,004	23,966
520	9,0	-66,898	-34,769	66,898	34,769	-66,898
530	8,5	83,948	-0,120	-83,948	0,120	83,948
540	8,0	-91,316	34,405	91,316	-34,405	-91,316
550	7,5	63,627	-57,297	-63,627	57,297	63,627
560	7,0	-20,625	-38,148	20,625	38,148	-20,625
570	6,5	47,121	81,428	-47,121	-81,428	47,121
580	6,0	-74,424	-103,994	74,424	103,994	-74,424
590	5,5	-52,521	82,554	52,521	-82,554	-52,521
600	5,0	-200,069	113,767	200,069	-113,767	-200,069

Çizelge E.4 Dalgaların boru hattına uyguladığı sürüklenme kuvveti(F_D) değerleri

x(m)	h	$F_D(\text{kg/m})$				
		t=0	t=T/4	t=T/2	t=3T/4	t=T
0	35,0	0,136	-0,001	-0,136	0,001	0,136
10	34,5	0,028	0,024	-0,028	-0,024	0,028
20	34,0	0,011	0,000	-0,011	0,000	0,011
30	33,5	0,032	-0,021	-0,032	0,021	0,032
40	33,0	0,142	-0,045	-0,142	0,045	0,142
50	32,5	0,400	-0,009	-0,400	0,009	0,400
60	32,0	0,578	0,059	-0,578	-0,059	0,578
70	31,5	0,350	0,398	-0,350	-0,398	0,350
80	31,0	0,028	0,647	-0,028	-0,647	0,028
90	30,5	-0,073	0,398	0,073	-0,398	-0,073
100	30,0	-0,202	0,035	0,202	-0,035	-0,202
110	29,5	-0,049	-0,049	0,049	0,049	-0,049
120	29,0	0,042	-0,069	-0,042	0,069	0,042
130	28,5	0,180	0,000	-0,180	0,000	0,180
140	28,0	0,133	0,066	-0,133	-0,066	0,133
150	27,5	0,053	0,134	-0,053	-0,134	0,053
160	27,0	0,005	0,154	-0,005	-0,154	0,005
170	26,5	-0,006	0,083	0,006	-0,083	-0,006
180	26,0	-0,006	0,007	0,006	-0,007	-0,006
190	25,5	0,024	-0,005	-0,024	0,005	0,024
200	25,0	0,265	0,010	-0,265	-0,010	0,265
210	24,5	0,331	0,358	-0,331	-0,358	0,331
220	24,0	0,044	1,004	-0,044	-1,004	0,044
230	23,5	-0,137	1,120	0,137	-1,120	-0,137
240	23,0	-0,709	0,474	0,709	-0,474	-0,709
250	22,5	-0,924	0,024	0,924	-0,024	-0,924
260	22,0	-0,582	-0,134	0,582	0,134	-0,582
270	21,5	-0,032	-0,401	0,032	0,401	-0,032
280	21,0	0,212	-0,084	-0,212	0,084	0,212
290	20,5	0,212	0,283	-0,212	-0,283	0,212
300	20,0	-0,105	0,781	0,105	-0,781	-0,105
310	19,5	-0,885	0,143	0,885	-0,143	-0,885
320	19,0	-0,848	-0,068	0,848	0,068	-0,848
330	18,5	-0,341	-0,515	0,341	0,515	-0,341
340	18,0	0,010	-0,742	-0,010	0,742	0,010
350	17,5	0,352	-0,059	-0,352	0,059	0,352
360	17,0	0,038	0,078	-0,038	-0,078	0,038
370	16,5	-0,009	0,007	0,009	-0,007	-0,009
380	16,0	-0,006	0,015	0,006	-0,015	-0,006
390	15,5	-0,190	-0,023	0,190	0,023	-0,190
400	15,0	0,019	-0,628	-0,019	0,628	0,019
410	14,5	1,206	-0,039	-1,206	0,039	1,206
420	14,0	1,254	1,689	-1,254	-1,689	1,254
430	13,5	-1,427	4,846	1,427	-4,846	-1,427
440	13,0	-6,423	-0,273	6,423	0,273	-6,423
450	12,5	-0,024	-4,384	0,024	4,384	-0,024
460	12,0	2,460	0,006	-2,460	-0,006	2,460
470	11,5	-0,747	2,928	0,747	-2,928	-0,747
480	11,0	-6,549	-1,535	6,549	1,535	-6,549
490	10,5	1,067	-7,559	-1,067	7,559	1,067
500	10,0	4,434	0,464	-4,434	-0,464	4,434
510	9,5	-2,251	1,199	2,251	-1,199	-2,251
520	9,0	-0,115	-4,515	0,115	4,515	-0,115
530	8,5	2,487	0,073	-2,487	-0,073	2,487
540	8,0	-0,739	-0,144	0,739	0,144	-0,739
550	7,5	3,696	-1,491	-3,696	1,491	3,696
560	7,0	1,812	3,719	-1,812	-3,719	1,812
570	6,5	-0,507	-0,106	0,507	0,106	-0,507
580	6,0	1,156	2,631	-1,156	-2,631	1,156
590	5,5	0,018	0,016	-0,018	-0,016	0,018
600	5,0	-6,361	-8,031	6,361	8,031	-6,361

Çizelge E.5 Boru hattına etkiyen toplam yatay kuvvet (F_H) değerleri

x(m)	h	F_H (kg/m)				
		t=0	t=T/4	t=T/2	t=3T/4	t=T
0	35,0	0,308	-7,509	-0,308	7,509	0,308
10	34,5	0,266	-7,597	-0,266	7,597	0,266
20	34,0	2,229	-7,789	-2,229	7,789	2,229
30	33,5	3,683	-4,597	-3,683	4,597	3,683
40	33,0	-0,914	-2,285	0,914	2,285	-0,914
50	32,5	-5,212	-9,215	5,212	9,215	-5,212
60	32,0	1,733	-19,035	-1,733	19,035	1,733
70	31,5	16,611	-18,283	-16,611	18,283	16,611
80	31,0	26,506	-4,646	-26,506	4,646	26,506
90	30,5	23,713	12,807	-23,713	-12,807	23,713
100	30,0	7,033	22,952	-7,033	-22,952	7,033
110	29,5	-10,276	13,729	10,276	-13,729	-10,276
120	29,0	-6,830	-2,482	6,830	2,482	-6,830
130	28,5	5,628	1,743	-5,628	-1,743	5,628
140	28,0	-2,826	14,067	2,826	-14,067	-2,826
150	27,5	-19,219	5,589	19,219	-5,589	-19,219
160	27,0	-17,880	-12,892	17,880	12,892	-17,880
170	26,5	-4,163	-21,361	4,163	21,361	-4,163
180	26,0	7,751	-16,814	-7,751	16,814	7,751
190	25,5	8,541	-11,841	-8,541	11,841	8,541
200	25,0	14,246	-15,590	-14,246	15,590	14,246
210	24,5	28,033	-5,728	-28,033	5,728	28,033
220	24,0	24,931	12,919	-24,931	-12,919	24,931
230	23,5	12,831	21,953	-12,831	-21,953	12,831
240	23,0	-2,781	17,420	2,781	-17,420	-2,781
250	22,5	0,212	7,495	-0,212	-7,495	0,212
260	22,0	-0,031	16,800	0,031	-16,800	-0,031
270	21,5	-16,176	12,856	16,176	-12,856	-16,176
280	21,0	-17,053	-12,550	17,053	12,550	-17,053
290	20,5	16,227	-15,653	-16,227	15,653	16,227
300	20,0	18,668	21,632	-18,668	-21,632	18,668
310	19,5	-19,543	20,204	19,543	-20,204	-19,543
320	19,0	-12,822	-11,738	12,822	11,738	-12,822
330	18,5	9,264	-0,372	-9,264	0,372	9,264
340	18,0	-4,585	8,001	4,585	-8,001	-4,585
350	17,5	7,038	4,456	-7,038	-4,456	7,038
360	17,0	-13,596	37,413	13,596	-37,413	-13,596
370	16,5	-69,006	-13,447	69,006	13,447	-69,006
380	16,0	7,578	-82,344	-7,578	82,344	7,578
390	15,5	69,907	7,548	-69,907	-7,548	69,907
400	15,0	-11,312	47,275	11,312	-47,275	-11,312
410	14,5	-51,805	-1,452	51,805	1,452	-51,805
420	14,0	-7,614	-104,218	7,614	104,218	-7,614
430	13,5	152,565	13,869	-152,565	-13,869	152,565
440	13,0	-22,772	136,466	22,772	-136,466	-22,772
450	12,5	-113,408	-2,993	113,408	2,993	-113,408
460	12,0	12,816	-107,091	-12,816	107,091	12,816
470	11,5	101,727	43,093	-101,727	-43,093	101,727
480	11,0	-74,472	126,216	74,472	-126,216	-74,472
490	10,5	-93,925	-109,158	93,925	109,158	-93,925
500	10,0	73,747	-65,536	-73,747	65,536	73,747
510	9,5	21,715	107,203	-21,715	-107,203	21,715
520	9,0	-67,013	-39,284	67,013	39,284	-67,013
530	8,5	86,434	-0,047	-86,434	0,047	86,434
540	8,0	-92,055	34,261	92,055	-34,261	-92,055
550	7,5	67,323	-58,788	-67,323	58,788	67,323
560	7,0	-18,813	-34,429	18,813	34,429	-18,813
570	6,5	46,614	81,322	-46,614	-81,322	46,614
580	6,0	-73,268	-101,363	73,268	101,363	-73,268
590	5,5	-52,503	82,570	52,503	-82,570	-52,503
600	5,0	-206,430	105,736	206,430	-105,736	-206,430

Çizelge E.6 Tesir çizgisi ordinatları

NO	β	K_x	M_2	M_{S1}	M_{S2}	$R1=V12$	V_{21}	V_{23}	R_2
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
1	0,1	0,09	-0,26399	$y_1=[-0,10666*(1+\beta_1)*K_{x1}+0,6*\beta_1]10$	$y_1=-0,1*(1+\beta_1)*K_{x1}*10$	0,87361	-0,12639	$y_1=0,3333*(1+\beta_1)*K_{x1}$	0,15939
2	0,2	0,16	-0,51199	$y_1=[-0,10666*(1+b1)*K_{x1}+0,4*(1-b1)]10$	-0,099	0,74881	-0,25119	0,033	0,31518
3	0,3	0,21	-0,72798	0,494407	-0,192	0,62722	-0,37278	0,06399	0,46377
4	0,4	0,24	-0,89598	0,995213	-0,273	0,51042	-0,48958	0,09099	0,60157
5	0,5	0,25	-0,99998	1,508818	-0,336	0,40003	-0,59998	0,11199	0,72496
6	0,6	0,24	-1,02397	2,041622	-0,375	0,29763	-0,70237	0,12499	0,83036
7	0,7	0,21	-0,95198	1,600025	-0,384	0,20482	-0,79518	0,12799	0,91416
8	0,8	0,16	-0,76798	1,190426	-0,357	0,12322	-0,87678	0,11899	0,97277
9	0,9	0,09	-0,45599	0,819224	-0,288	0,05441	-0,94559	0,09599	0,99765
10	1	0	0	0,217611	-0,171	0	-1	0,05699	1
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
1	0,1	0,09	-0,46259	$y_2=(-0,10666*(2-\beta_2)-0,06667*(1+b2)K_{x2})*10$	$y_2=12,50*\beta_2-7,5*K_{x2}$	-0,03899	-0,03899	$y_2=(1-\beta_2)-0,3333*(2*\beta_2-1)*K_{x2}$	0,96298
2	0,2	0,16	-0,78078	-0,24839	0,23	-0,06399	-0,06399	0,924	0,89597
3	0,3	0,21	-0,97018	-0,43519	0,52	-0,07699	-0,07699	0,832	0,80496
4	0,4	0,24	-1,04638	-0,56279	0,87	-0,07999	-0,07999	0,728	0,69596
5	0,5	0,25	-1,04638	-0,63359	1,28	-0,07999	-0,07999	0,616	0,57496
6	0,6	0,24	-1,02498	-0,64999	1,75	-0,07499	-0,07499	0,5	0,44797
7	0,7	0,21	-0,92158	-0,61439	1,28	-0,06399	-0,06399	0,384	0,32097
8	0,8	0,16	-0,75178	-0,52919	0,87	-0,04899	-0,04899	0,272	0,19998
9	0,9	0,09	-0,53119	-0,3968	0,52	-0,03199	-0,03199	0,168	0,09099
10	1	0	-0,27539	-0,2196	0,23	-0,015	-0,015	0,076	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,1	0,09	0,114006	$y_3=0,02667*(2-\beta_1)*K_{x1}*10$	$y_3=-2,500*(2-\beta_1)*K_{x1}$	0,0114	0,0114	$y_3=-0,3333*(2-\beta_1)*K_{x1}$	-0,06835
2	0,2	0,16	0,19201	0,045606	-0,171	0,0192	0,0192	-0,05699	-0,11511
3	0,3	0,21	0,238012	0,07681	-0,288	0,0238	0,0238	-0,09599	-0,14269
4	0,4	0,24	0,256013	0,095212	-0,357	0,0256	0,0256	-0,11899	-0,15348
5	0,5	0,25	0,256013	0,102413	-0,384	0,025	0,025	-0,12799	-0,14989
6	0,6	0,24	0,250013	0,100013	-0,375	0,0224	0,0224	-0,12499	-0,1343
7	0,7	0,21	0,224011	0,089611	-0,336	0,0182	0,0182	-0,11199	-0,10912
8	0,8	0,16	0,182009	0,072809	-0,273	0,0128	0,0128	-0,09099	-0,07674
9	0,9	0,09	0,128006	0,051206	-0,192	0,0066	0,0066	-0,06399	-0,03957
10	1	0	0,066003	0,026403	-0,099	0	0	-0,033	0
			0	0	0	0	0	0	0

Çizelge E.7 Birim yükleme ile elde edilen kesit tesirleri

ALAN	1No'lu Mesnet Kesme Kuvveti(t)	2 No'lu Mesnetin Solundaki K.K.(t)	2 No'lu Mesnetin Sağındaki K.K.(t)	2 No'lu Mesnet Kesme Kuvveti(t)	M2 Momenti (tm)	Ms1 Momenti (tm)	Ms2 Momenti (tm)
A1	0,932	-0,064	0,016	0,08	-0,13	0,245	-0,05
A2	0,812	-0,192	0,044	0,24	-0,385	0,74	-0,145
A3	0,692	-0,312	0,076	0,392	-0,615	1,245	-0,23
A4	0,572	-0,432	0,1	0,532	-0,805	1,77	-0,305
A5	0,452	-0,544	0,116	0,664	-0,94	1,82	-0,36
A6	0,352	-0,652	0,124	0,776	-1,005	1,395	-0,38
A7	0,252	-0,752	0,124	0,872	-0,985	1,005	-0,37
A8	0,16	-0,84	0,112	0,94	-0,855	0,655	-0,325
A9	0,08	-0,892	0,08	0,98	-0,605	0,35	-0,23
A10	0,024	-0,976	0,032	0,996	-0,225	0,105	-0,085
A11	-0,02	-0,02	0,96	0,98	-0,23	-0,12	0,1173
A12	-0,048	-0,052	0,876	0,932	-0,62	-0,335	0,375
A13	-0,064	-0,072	0,78	0,852	-0,875	-0,495	0,695
A14	-0,08	-0,08	0,676	0,752	-1,005	-0,595	1,075
A15	-0,076	-0,076	0,56	0,636	-1,03	-0,64	1,515
A16	-0,064	-0,064	0,436	0,504	-0,97	-0,635	1,515
A17	-0,056	-0,056	0,324	0,384	-0,835	-0,575	1,075
A18	-0,04	-0,04	0,22	0,26	-0,64	-0,46	0,695
A19	-0,024	-0,024	0,124	0,144	-0,4	-0,305	0,375
A20	-0,012	-0,012	0,04	0,044	-0,135	-0,11	0,1173
A21	0,004	0,004	-0,032	-0,036	0,055	0,025	-0,085
A22	0,016	0,016	-0,092	-0,096	0,15	0,065	-0,23
A23	0,02	0,02	-0,112	-0,132	0,21	0,085	-0,325
A24	0,028	0,024	-0,124	-0,144	0,245	0,095	-0,37
A25	0,032	0,032	-0,124	-0,152	0,255	0,105	-0,38
A26	0,024	0,024	-0,116	-0,14	0,235	0,095	-0,36
A27	0,02	0,02	-0,1	-0,12	0,2	0,08	-0,305
A28	0,016	0,016	-0,076	-0,096	0,15	0,06	-0,23
A29	0,012	0,008	-0,052	-0,06	0,095	0,04	-0,145
A30	0,004	0,004	-0,016	-0,02	0,035	0,015	-0,05

Çizelge E.8 Zaman tanım alanı yöntemi ile elde edilen moment değerleri

TABLE: Element Joint Forces - Frames						
Frame	Joint	OutputCase	CaseType	StepType	M3	FrameElem
Text	Text	Text	Text	Text	Ton-m	Text
13	1	KOMB	LinModHist	Max	0,77856	1
13	2	KOMB	LinModHist	Max	0,41633	1
13	1	KOMB	LinModHist	Min	-0,77856	1
13	2	KOMB	LinModHist	Min	-0,41633	1
14	2	KOMB	LinModHist	Max	0,41633	2
14	3	KOMB	LinModHist	Max	0,07516	2
14	2	KOMB	LinModHist	Min	-0,41633	2
14	3	KOMB	LinModHist	Min	-0,07516	2
15	3	KOMB	LinModHist	Max	0,07516	3
15	4	KOMB	LinModHist	Max	0,20877	3
15	3	KOMB	LinModHist	Min	-0,07516	3
15	4	KOMB	LinModHist	Min	-0,20877	3
16	4	KOMB	LinModHist	Max	0,20877	4
16	5	KOMB	LinModHist	Max	0,39781	4
16	4	KOMB	LinModHist	Min	-0,20877	4
16	5	KOMB	LinModHist	Min	-0,39781	4
17	5	KOMB	LinModHist	Max	0,39781	5
17	6	KOMB	LinModHist	Max	0,46421	5
17	5	KOMB	LinModHist	Min	-0,39781	5
17	6	KOMB	LinModHist	Min	-0,46421	5
18	6	KOMB	LinModHist	Max	0,46421	6
18	7	KOMB	LinModHist	Max	0,39781	6
18	6	KOMB	LinModHist	Min	-0,46421	6
18	7	KOMB	LinModHist	Min	-0,39781	6
19	7	KOMB	LinModHist	Max	0,39781	7
19	8	KOMB	LinModHist	Max	0,20877	7
19	7	KOMB	LinModHist	Min	-0,39781	7
19	8	KOMB	LinModHist	Min	-0,20877	7
20	8	KOMB	LinModHist	Max	0,20877	8
20	9	KOMB	LinModHist	Max	0,07516	8
20	8	KOMB	LinModHist	Min	-0,20877	8
20	9	KOMB	LinModHist	Min	-0,07516	8
22	9	KOMB	LinModHist	Max	0,07516	9
22	10	KOMB	LinModHist	Max	0,41633	9
22	9	KOMB	LinModHist	Min	-0,07516	9
22	10	KOMB	LinModHist	Min	-0,41633	9
23	10	KOMB	LinModHist	Max	0,41633	10
23	11	KOMB	LinModHist	Max	0,77856	10
23	10	KOMB	LinModHist	Min	-0,41633	10
23	11	KOMB	LinModHist	Min	-0,77856	10
24	11	KOMB	LinModHist	Max	0,63956	11
24	12	KOMB	LinModHist	Max	0,342	11
24	11	KOMB	LinModHist	Min	-0,63956	11
24	12	KOMB	LinModHist	Min	-0,342	11

25	12	KOMB	LinModHist	Max	0,342	12
25	13	KOMB	LinModHist	Max	0,06175	12
25	12	KOMB	LinModHist	Min	-0,342	12
25	13	KOMB	LinModHist	Min	-0,06175	12
26	13	KOMB	LinModHist	Max	0,06175	13
26	14	KOMB	LinModHist	Max	0,1715	13
26	13	KOMB	LinModHist	Min	-0,06175	13
26	14	KOMB	LinModHist	Min	-0,1715	13
27	14	KOMB	LinModHist	Max	0,1715	14
27	15	KOMB	LinModHist	Max	0,32678	14
27	14	KOMB	LinModHist	Min	-0,1715	14
27	15	KOMB	LinModHist	Min	-0,32678	14
28	15	KOMB	LinModHist	Max	0,32678	15
28	16	KOMB	LinModHist	Max	0,38132	15
28	15	KOMB	LinModHist	Min	-0,32678	15
28	16	KOMB	LinModHist	Min	-0,38132	15
29	16	KOMB	LinModHist	Max	0,38132	16
29	17	KOMB	LinModHist	Max	0,32678	16
29	16	KOMB	LinModHist	Min	-0,38132	16
29	17	KOMB	LinModHist	Min	-0,32678	16
30	17	KOMB	LinModHist	Max	0,32678	17
30	18	KOMB	LinModHist	Max	0,1715	17
30	17	KOMB	LinModHist	Min	-0,32678	17
30	18	KOMB	LinModHist	Min	-0,1715	17
31	18	KOMB	LinModHist	Max	0,1715	18
31	19	KOMB	LinModHist	Max	0,06175	18
31	18	KOMB	LinModHist	Min	-0,1715	18
31	19	KOMB	LinModHist	Min	-0,06175	18
32	19	KOMB	LinModHist	Max	0,06175	19
32	20	KOMB	LinModHist	Max	0,342	19
32	19	KOMB	LinModHist	Min	-0,06175	19
32	20	KOMB	LinModHist	Min	-0,342	19
33	20	KOMB	LinModHist	Max	0,342	20
33	21	KOMB	LinModHist	Max	0,63956	20
33	20	KOMB	LinModHist	Min	-0,342	20
33	21	KOMB	LinModHist	Min	-0,63956	20
34	21	KOMB	LinModHist	Max	1,61869	21
34	22	KOMB	LinModHist	Max	0,86558	21
34	21	KOMB	LinModHist	Min	-1,61869	21
34	22	KOMB	LinModHist	Min	-0,86558	21
35	22	KOMB	LinModHist	Max	0,86558	22
35	23	KOMB	LinModHist	Max	0,15627	22
35	22	KOMB	LinModHist	Min	-0,86558	22
35	23	KOMB	LinModHist	Min	-0,15627	22
36	23	KOMB	LinModHist	Max	0,15627	23
36	24	KOMB	LinModHist	Max	0,43406	23
36	23	KOMB	LinModHist	Min	-0,15627	23
36	24	KOMB	LinModHist	Min	-0,43406	23

37	24	KOMB	LinModHist	Max	0,43406	24
37	25	KOMB	LinModHist	Max	0,82708	24
37	24	KOMB	LinModHist	Min	-0,43406	24
37	25	KOMB	LinModHist	Min	-0,82708	24
38	25	KOMB	LinModHist	Max	0,82708	25
38	26	KOMB	LinModHist	Max	0,96512	25
38	25	KOMB	LinModHist	Min	-0,82708	25
38	26	KOMB	LinModHist	Min	-0,96512	25
39	26	KOMB	LinModHist	Max	0,96512	26
39	27	KOMB	LinModHist	Max	0,82708	26
39	26	KOMB	LinModHist	Min	-0,96512	26
39	27	KOMB	LinModHist	Min	-0,82708	26
40	27	KOMB	LinModHist	Max	0,82708	27
40	28	KOMB	LinModHist	Max	0,43406	27
40	27	KOMB	LinModHist	Min	-0,82708	27
40	28	KOMB	LinModHist	Min	-0,43406	27
41	28	KOMB	LinModHist	Max	0,43406	28
41	29	KOMB	LinModHist	Max	0,15627	28
41	28	KOMB	LinModHist	Min	-0,43406	28
41	29	KOMB	LinModHist	Min	-0,15627	28
42	29	KOMB	LinModHist	Max	0,15627	29
42	30	KOMB	LinModHist	Max	0,86558	29
42	29	KOMB	LinModHist	Min	-0,15627	29
42	30	KOMB	LinModHist	Min	-0,86558	29
43	30	KOMB	LinModHist	Max	0,86558	30
43	31	KOMB	LinModHist	Max	1,61869	30
43	30	KOMB	LinModHist	Min	-0,86558	30
43	31	KOMB	LinModHist	Min	-1,61869	30

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad :Engin GÜCÜYEN
Doğum Tarihi :13/05/1983
Doğum Yeri :MANİSA
Lise :Dündar Çiloğlu Anadolu Lisesi(1994-2001)
Üniversite :Celal Bayar Üniversitesi(2001-2005)
İletişim :engingucuyen@hotmail.com