

## **DÜZENLİ DALGA ETKİSİNDE VE ASILI KONUMDA BULUNAN DENİZ BORU HATTININ TESİR ÇİZGİSİ YÖNTEMİ İLE ANALİZİ**

**Begüm Y. VAROL<sup>1\*</sup>, Ümit GÖKKUŞ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 45140 Manisa,  
TÜRKİYE

**Özet** Günümüzde; ülkelerin gereksinim duyulan enerjiye zamanında, kesintisiz ve güvenli şekilde ulaşmak istemesi; deniz boru hattı taşımacılığını ön plana çıkarmıştır. Ancak bu yapıların beklentileri karşılayabilmesi için; gerek yapım aşamasında gerekse ekonomik ömürleri boyunca, maruz kalacakları kuvvetlerin iyi belirlenmesi tasarım açısından oldukça önemlidir. Bu çalışma kapsamında düzenli dalga etkisinde ve asılı konumda bulunan deniz boru hattı üzerine etkiyen hidrodinamik kuvvetler *Stokes 3.mertebe* dalga teorisi dikkate alınarak incelenmiş, hidrodinamik kuvvetlerin meydana getirdiği reaksiyon kuvvetleri ise “Tesir Çizgileri Yöntemi” kullanılarak hesaplanmıştır. Çalışma sayısal örnek yardımı ile de desteklenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** *Stokes 3.Mertebe Dalga Teorisi, Deniz Boru Hattı, Tesir Çizgileri Yöntemi.*

## **ANALYSIS OF SUSPENDED PIPELINE WITH INFLUENCE LINE METHOD UNDER THE EFFECT OF REGULAR WAVES.**

**Abstract** Nowadays, the wishes of nations to supply the energy they need in time, non-stopped and safely, brought the pipeline transportation to a very important position. However, in order to respond the expectations, it's very important for project to determine which forces will expose the constructions. The inclusion of this present study, hydro-dynamic forces that influence the marine-pipe line which is in hanged position and is opened to the affect of the regular waves are carefully examined according to Stokes the 3rd. Level Wave Theory and reaction forces caused by hydro-dynamic forces is calculated by using “Influence Line Method”. This study is supported by numerical examples.

**Keywords:** *The 3rd. Level Wave Theory, Marine Pipeline, Influence Line Method.*

---

\***Begüm Y. VAROL**  
begum.dagli@bayar.edu.tr

## 1.GİRİŞ

Deniz boru hatlarının projelendirme aşamasında belirlenen ekonomik ömürlerini tamamlayabilmesi, ancak üzerine etkiyecek kritik dalga yüklerinin göz önünde bulundurulduğu dinamik hesapların yapılması ile mümkündür. Literatürde, deniz yapıları üzerine etkiyen dalga kuvvetlerinin statik ve dinamik analizi üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Teng ve Nath, su altı boru hatlarına gelen dalga ve akımdan kaynaklanan kuvvetleri incelemiştir. Okyanus dalgalarının, çoğunlukla akımdan kaynaklandığını ve batık deniz yapılarına gelen hidrodinamik kuvvetlerin, akışkan elemanın kinematığı ve dinamiği ile doğrudan ilişkili olduğunu, okyanus altında yapılan birçok boru hattı ve açık deniz yapısını araştırarak ortaya koymuşlardır.[17] Pranesh ve Man su altında askıda duran boru hatlarına gelen hidrodinamik kuvvetleri deneysel olarak değişik derinliklerde araştırmışlar, borunun tabana olan değişik yüksekliklerini, boru çapının su derinliğine oranı ve iki komşu paralel boru arasındaki uzaklığın etkisini incelemiştir.[13] Ballet ve Hobbs boru hattında taşınan sıvıların deniz suyu ile aralarındaki yoğunluk ve ısı farkından dolayı borulara gelen kuvvetleri incelemiştir.[1] Fredsoe ve Sümer, boru hatlarına gelen dalga, dalga ve akımın beraber olması hallerinde çeşitli boru düzenekleri için araştırma yapmışlardır. 1993 yılında yapmış oldukları çalışma; dalga ve akımın beraber etkimesi halinde tabanda oluşan kesme gerilmesi ve bu gerilimden kaynaklanan etkileşimin hesaplanması amacı yapmış oldukları deneyleri içermektedir.[7] Gökkuş “Bilgisayar Destekli Deniz Altı Boru Tasarımı” adlı çalışmasında boru hatlarını projelendirirken bilgisayar kullanılması gerekliliğinden bahsetmiştir. Dalgaların istatistiksel analizini ve stabilite hesabını

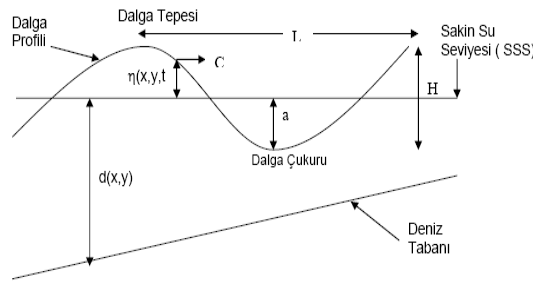
yapan bir program yazmıştır.[9] Wu ve Riha; deniz tabanına oturan boru hatlarına, fırtınalar nedeni ile etkiyen kuvvetleri inceleyerek “Tabandaki Boru Hattının Stabilitésinin Zaman Değişkenli Güvenirlik Analizi” isimli bir yöntem geliştirmişlerdir.[19] Cokgör ve Avcı, laboratuardaki açık kanalda, akım ve dalganın birlikte bulunması halinde, tabana oturan ve tabana kısmen gömülü silindirik borulara etkiyen hidrodinamik kuvvetler ve bu kuvvetlerle ilgili parametreleri deneysel olarak araştırmışlardır.[4] Gündemir; su altındaki borulara etkiyen kuvvetleri araştırmıştır. Akım ve dalga nedeniyle boru hattına etkiyen kuvvetlerle ilgili mevcut deneysel sonuçlarla nümerik neticeleri karşılaştırmıştır.[11].

Bu çalışmada ise lineer teori yerine, dalga tepesi ve çukuru arasındaki asimetri ve kütle taşınımının olduğu, daha büyük yatay ve düşey hız değerleri ve bunlara bağlı olarak daha büyük hidrodinamik kuvvetlerin elde edildiği *Stokes 3. Mertebe Dalga Teorisi* kullanılarak, dalga parametreleri hesaplanmıştır. Dalga parametreleri *Morison* denkleminde kullanılarak boru hattı üzerine etkiyen yatay ve düşey hidrodinamik kuvvetler belirlenmiştir. Bu kuvvetler yatayda sürüklenme ve atalet kuvvetleri ile düşeyde kaldırma kuvvetinden oluşmaktadır. Hesaplanan hidrodinamik kuvvetlerin, yapı üzerinde oluşturacağı reaksiyonlar *Tesir Çizgisi Yöntemi* kullanılarak belirlenmiştir. Boru hattı, köprü gibi düşünülmüş ve boru hattı üzerine etkiyen hidrodinamik kuvvetler de, köprü üzerinden geçen araç yüküne eşdeğer kabul edilmiştir. Bir birimlik hareketli yükün boru hattı üzerinde oluşturduğu reaksiyon değerleri ile dalga yükleri süperpoze edilerek periyot boyunca değişen hidrodinamik kuvvetlere bağlı kritik

reaksiyon kuvvetleri tablolar halinde sunulmuştur.

## 2.DALGA PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Bu çalışma kapsamında kullanılan Stokes 3. Mertebe Dalga Teorisi, dalga tepesinin daralıp yükselmesi ve dalga çukurunun yayvanlaşıp, derinleşmesi sonucu oluşan dalganın modellenmesidir.



Şekil 1 Dalga Parametreleri

Şekil 1’de gösterilen dalganın boru hattı üzerindeki etkisini belirlemeyi sağlayan parametreler; dalga boyu, sayısı, frekansı, hızı periyot boyunca hesaplanır. [12]

Stokes 3. Mertebe teorisine göre; dalga boyunu veren iki dalga tepesi arasındaki yatay uzunluk;

$$L = \frac{g.T^2}{2\pi} \cdot \tanh kd \left[ 1 + \left( \frac{2\pi a}{L} \right) \cdot \frac{5 + 2 \cosh 2kd + 2 \cosh^2 2kd}{8 \sinh^4 kd} \right] \quad (1)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $g$ ; yerçekimi ivmesini,  $T$ ; periyodu,  $a$ ; genliği,  $d$ ; su derinliğini göstermektedir.

Dalga sayısı ( $k = 2\pi/L$ ), açısal dalga frekansı ( $\omega = 2\pi/T$ ) ile hesaplanır.

Dalganın su seviyesinden itibaren yaptığı yer değiştirme, su yüzü profilini verir ve

$$\eta(x,t) = -a^3 f_3(k,d) \cos(kx - \omega t) + \sum_{n=1}^3 a^n f_n(k,d) \cos[n(kx - \omega t)] \quad (2)$$

denklemleri ile hesaplanır. Kullanılan  $f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$  sabitleri su derinliği ve dalga sayısına bağlı katsayılar olup;

$$f_1(k,d) = 1 \quad (3)$$

$$f_2(k,d) = \frac{k}{4} \left[ \frac{3}{\tanh^3(kd)} - \frac{1}{\tanh(kd)} \right] \quad (4)$$

$$f_3(k,d) = \frac{3}{32} k^2 \left[ 4 + \frac{8}{\sinh(kd)} + \frac{5}{\sinh^4(kd)} + \frac{3}{\sinh^6(kd)} \right] \quad (5)$$

şeklinde ifade edilir. Boru hattının başlangıcından, kuvvet hesabı yapılan noktaya kadar olan yatay uzaklık “ $x$ ” değıştikçe, deniz tabanı ve boru hattı eğimine bağlı  $d$  su derinliği,  $f_n$  katsayıları da değışir.

Su yüzü profili ile sakin su seviyesi arasındaki düşey mesafe  $z$ , toplam derinlik ( $S = d + z$ ) ile gösterilirse; akışkan zerresinin yatay ve düşey hızları;

$$u = c(F_1 \cdot \cosh kS \cdot \cos \theta + F_2 \cdot \cosh 2kS \cdot \cos 2\theta + F_3 \cdot \cosh 3kS \cdot \cos 3\theta) \quad (6)$$

$$v = c(F_1 \cdot \sinh kS \cdot \sin \theta + F_2 \cdot \sin 2kS \cdot \sin 2\theta + F_3 \cdot \sinh 3kS \cdot \sin 3\theta) \quad (7)$$

şeklinde olur. Dalga yayılma hızı  $c = L/T$ , faz açısı  $\theta = kx - \omega t$ , hız terimlerinin hesaplanabilmesi için gerekli olan  $F_n$  sabitleri ise derinlik, genlik ve dalga sayısına bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$F_1 = \frac{k \cdot a}{\sin kd} - (k \cdot a)^2 \cdot \frac{\cosh^2 kd \cdot (1 + 5 \cosh^2 kd)}{8 \cdot \sinh^5 kd} \quad (8)$$

$$F_2 = \frac{3}{4} \cdot (k.a)^2 \cdot \frac{1}{\sinh^4 kd} \quad (9)$$

$$F_3 = \frac{3}{64} \cdot (k.a)^3 \cdot \frac{11 - 2 \cosh 2kd}{\sinh^7 kd} \quad (10)$$

$F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  katsayıları periyot boyunca her zaman aralığı için ayrı ayrı hesaplanarak dalganın yatay ve düşey hızı elde edilir.

### 3.HİDRODİNAMİK KUVETLER

Dalga, açık denizden kıyıya doğru ilerlerken birtakım fiziksel olaylar etkisindedir. Bir noktaya dikkatle bakıldığında görülecektir ki: dalgalar bir yükselip bir alçalmaktadır.[20] Dalganın bu periyodik salınımından dolayı silindirik deniz yapılarının birim uzunluğuna etkiyen atalet kuvveti:

$$F_I = C_M \cdot \rho \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot u' \quad (11)$$

direnç kuvveti:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho \cdot D \cdot u |u| \quad (12)$$

kaldırma kuvveti ise:

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot C_L \cdot \rho \cdot D \cdot u^2 \quad (13)$$

şeklinde hesaplanır. Silindirin birim uzunluğuna etkili  $F_H$  eksenel kuvveti için Morison denklemi:

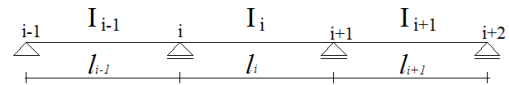
$$F_H = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho \cdot D \cdot u |u| + C_M \cdot \rho \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot u' \quad (14)$$

şeklinde dir. Burada;  $C_M$  atalet katsayısını,  $C_D$  sürüklenme katsayısını,  $C_L$  kaldırma katsayısını,  $u$  su taneciğinin hızını,  $u'$  akımın ivmesini,  $\rho$  akışkanın özgül kütleini,  $D$  boru çapını göstermektedir.

### 4. TESİR ÇİZGİLERİ YÖNTEMİ İLE ANALİZ

Bir yapı sisteminin herhangi bir bölümünün tasarım aşamasında, yapı ömrü süresince maruz kalacağı maksimum gerilmeye dayanabilecek yeterli kuvvete sahip olması göz önüne alınır. Maksimum gerilmeyi belirlemek için ise hareketli yüklerin toplam tasarım gerilmesine katılımının belirlenmesi gerekir. Hareketli yükün yapı üzerinde bulunduğu konumlardan biri yapının belirli bölümünde oluşan maksimum gerilmeye neden olur. Maksimum gerilmeler, yapı analizleri sonucu hesaplanan mesnet tepkilerinden, çubuk uç kuvvetlerinden, yapı kesitlerinin kesme kuvvetlerinden ve eğilme momentlerinden hesaplanabilir.[19].

Kesitlerdeki maksimum tasarım gerilmelerini hesaplamak için kullanılan yöntemlerden biri de *Tesir Çizgileri Yöntemidir*. *Tesir Çizgisi* kesit açıklığı boyunca, uzaklık fonksiyonu olarak çizilen bir diyagram olup, 1 birimlik yükün yapının üzerinde hareket ettiğinde belirli bir noktada oluşan iç kuvveti, mesnet tepkisini veya yer değiştirmeyi verir. Bu çalışmada dalga etkisi ile boru hattı üzerinde oluşacak maksimum moment ve kesme kuvveti değerleri tesir çizgileri diyagramları yardımı ile hesaplanmıştır. Öncelikle İki ucu ankastre olacak şekilde beton tespit kütleleri ile deniz tabanına sabitlenen boru hattının tek açıklığı, basit mesnetlerle sabitlenmiş üç açıklıklı sisteme indirgenmiştir.



Şekil 2 Üç açıklıklı Sistem

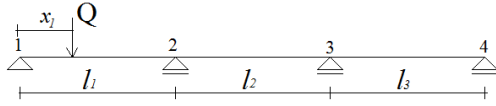
Modellenen bu sürekli sistem için üç momentler denkleminde (Denk.15) yararlanılarak iç mesnet sayısı kadar eşitlik yazılıp ve mesnet eğilme momentleri belirlenmiştir.

$$\frac{l_{i-1}}{I_{i-1}} M_{i-1} + 2 \times \left( \frac{l_{i-1}}{I_{i-1}} + \frac{l_i}{I_i} \right) M_i + \frac{l_i}{I_i} M_{i+1} = -\frac{l_{i-1}}{I_{i-1}} R_{i-1} - \frac{l_i}{I_i} V_i \quad (15)$$

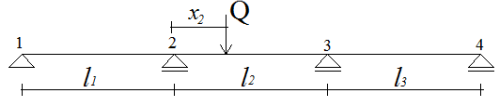
Burada  $M_i$  mesnet eğilme momentini,  $I_i$  açıklık atalet momentini,  $l_i$  açıklık boyunu,  $R_i$  mesnet reaksiyonunu,  $V_i$  ise kesite ait kesme kuvvetini göstermektedir.

#### 4.1. Tesir Katsayılarının Hesabı

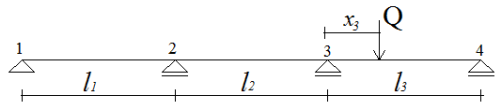
$Q$  birim yükünün indirgenen üç açıklıklı sabit ataletli momentli sürekli sistemin üzerinde hareket etmesi ile oluşacak maksimum eğilme momentleri; 2 nolu mesnet üzerinde, birinci açıklığın  $0,40l_1$  kesitinde ve ikinci açıklığın  $0,50l_2$  kesitinde meydana gelmektedir.



Şekil 3 Yükün Birinci Açıklıkta Olması Durumu



Şekil 4 Yükün İkinci Açıklıkta Olması Durumu



Şekil 5 Yükün Üçüncü Açıklıkta Olması Durumu

Belirlenen kritik kesitlere ait reaksiyonlar, birinci açıklıkta  $y_1$ , ikinci açıklıkta  $y_2$  ve üçüncü açıklıkta da  $y_3$  olacak şekilde gösterilerek özetlenmiş ve diyagramlar yardımıyla açıklanmıştır.

$y_1$ ,  $y_2$ ,  $y_3$  reaksiyon değerlerinin hesaplanabilmesi için, açıklık uzunluğuna bağlı olarak değişen katsayılar;

$$\kappa = \frac{l_1}{l_2} \quad (16)$$

$$A = \frac{1}{1 - 4(1 + \kappa)^2} \quad (17)$$

$$B = (1 + \kappa)A \quad (18)$$

$$C = (1 + 2\kappa)A \quad (19)$$

$$D = (3 + 2\kappa)A \quad (20)$$

$$\beta_1 = \frac{x}{l_1} \quad (21)$$

$$\beta_2 = \frac{x}{l_2} \quad (22)$$

$$Kx_1 = \beta_1(1 - \beta_1) \quad (23)$$

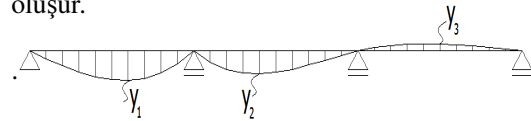
$$Kx_2 = \beta_2(1 - \beta_2) \quad (24)$$

şeklinde hesaplanır. Burada  $l_1$  kirişin ilk açıklığının uzunluğu,  $l_2$  kirişin ikinci açıklığının uzunluğudur.

#### 4.2. Kesit Reaksiyonlarının Hesabı

Bir birimlik yük etkisiyle her bir açıklıkta oluşacak maksimum kesit reaksiyonlarının yeri ve değerlerini veren hesap yöntemleri Şekil 6-12 ve Denklem 25-47'de belirtilmiştir.

Kritik moment değerleri yükün 2 nolu mesnet üzerinde, ilk açıklığın  $0,40l_1$  kesitinde ve ikinci açıklığın ortasında olması durumunda oluşur.

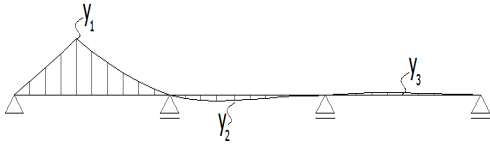


Şekil 6  $M_2$  Mesnet Eğilme Momenti Tesir Çizgisi Ordinatlari

$$y_1 = 2\beta \kappa(1 + \beta_1)Kx_1l_1 \quad (25)$$

$$y_2 = [2B(2 - \beta_2) - A(1 + \beta_2)]Kx_2l_2 \quad (26)$$

$$y_3 = -A\kappa(2 - \beta_1)Kx_1l_1 \quad (27)$$



Şekil 7 Birinci Açıklığın  $0,40l_1$  Kesitinde  $M_{s1}$  Eğilme Momenti Tesir Çizgisi Ordinatlari

$0 < x < 0,40l_1$  için;

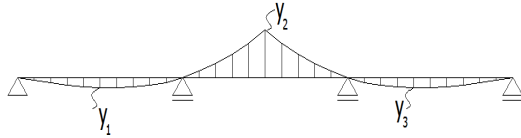
$$y_1 = [0,80\beta\kappa(1 + \beta_1)Kx_1 + 0,60\beta_1]l_1 \quad (28)$$

$0,40l_1 < x < l_1$  için;

$$y_1 = [0,80\beta\kappa(1 + \beta_1)Kx_1 + 0,40(1 - \beta_1)]l_1 \quad (29)$$

$$y_2 = 0,40[2B(2 - \beta_2) - A(1 + \beta_2)]Kx_2l_2 \quad (30)$$

$$y_3 = -0,40A\kappa(2 - \beta_1)Kx_1l_1 \quad (31)$$



Şekil 8 İkinci Açıklığın  $0,50l_2$  Kesitindeki Eğilme Momenti  $M_{s2}$  Tesir Çizgisi Ordinatlari

$$y_1 = 0,50C\kappa(1 + \beta_1)Kx_1l_1 \quad (32)$$

$0 < x < 0,50l_2$

$$y_2 = (0,50\beta_2 + 1,5CKx_2)l_2 \quad (33)$$

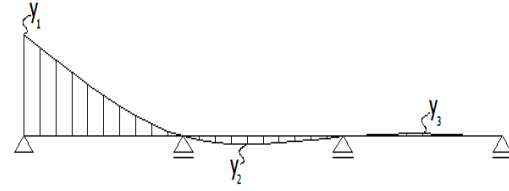
$0,50l_2 < x < l_2$

$$y_2 = [0,50(1 - \beta_2) + 1,50CKx_2]l_2 \quad (34)$$

$$y_3 = 0,50C\kappa(2 - \beta_1)Kx_1l_1 \quad (35)$$

Boru hattı üzerinde oluşacak maksimum kesme kuvveti değerleri ise 1 nolu mesnetin sağında, 2 nolu mesnetin her iki tarafında

oluşmaktadır.

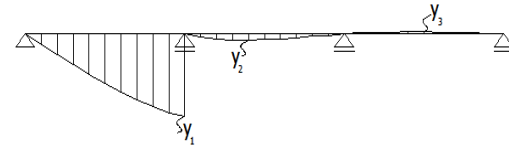


Şekil 9 1 Nolu Mesnetin Sağındaki Kesme Kuvveti Tesir Çizgisi Ordinatlari

$$y_1 = 2B\kappa(1 + \beta_1)Kx_1 + (1 - \beta_1) \quad (36)$$

$$y_2 = \frac{1}{\kappa}[2B(2 - \beta_2) - A(1 + \beta_2)]Kx_2 \quad (37)$$

$$y_3 = -A\kappa(2 - \beta_1)Kx_1 \quad (38)$$

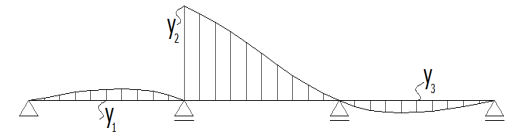


Şekil 10 2 Nolu Mesnetin Solundaki Kesme Kuvveti Tesir Çizgisi Ordinatlari

$$y_1 = 2B(1 + \beta_1)Kx_1 - \beta_1 \quad (39)$$

$$y_2 = \frac{1}{\kappa}[(2B(2 - \beta_2) - A(1 + \beta_2))]Kx_2 \quad (40)$$

$$y_3 = -A\kappa(2 - \beta_1)Kx_1 \quad (41)$$



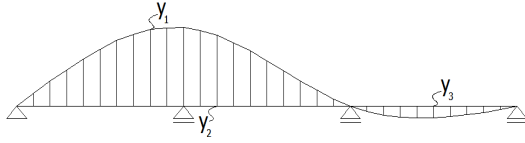
Şekil 11 2 Nolu Mesnetin Sağındaki Kesme Kuvveti Tesir Çizgisi Ordinatlari

$$y_1 = -\kappa^2D(1 + \beta_1)Kx_1 \quad (42)$$

$$y_2 = (1 - \beta_2) + D(2\beta_2 - 1)Kx_2 \quad (43)$$

$$y_3 = \kappa^2D(2 - \beta_1)Kx_1 \quad (44)$$

Hareketli yükün oluşturduğu 2 nolu mesnet reaksiyonuna ait tesir çizgisi diyagramı ise;



Şekil 12 2 Nolu Mesnet Reaksiyonu Tesir Çizgisi Ordinatları

$$y_1 = \beta_1 - (2B + D\kappa)(1 + \beta_1)\kappa Kx_1 \quad (45)$$

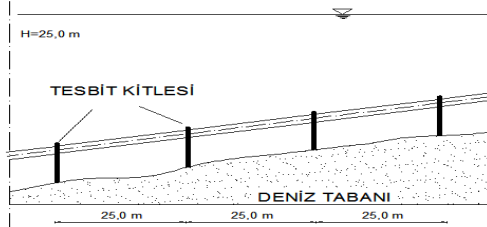
$$y_2 = (1 - \beta_2) + [D(2\beta_2 - 1)]Kx_2 + \left[\frac{1}{\kappa}(A(1 + \beta_2) - 2B(2 - \beta_2))\right]Kx_2 \quad (46)$$

$$y_3 = (A + D\kappa)\kappa(2 - \beta_1)Kx_1 \quad (47)$$

şeklindedir.

## 5.SAYISAL UYGULAMA

Şekil 13'te gösterilen deniz boru hattı, deniz tabanından 20 cm yukarıda askıda kalacak şekilde tespit kütleleri yardımı ile sabitlenmiştir.



Şekil 13 Deniz Boru Hattı

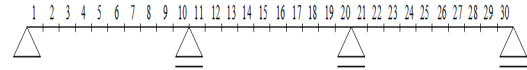
Tespit kütleleri 75m 'lik boru hattı açıklığının iki ucunda ankastre mesnet görevi görmektedir. Ankastre mesnetli bu açıklık; birbirine eşit uzunluktaki basit mesnetli üç açıklıklı sisteme indirgenmiştir.

Tablo 1 Deniz Boru Hattı Tasarımına İlişkin Veriler

Veriler	Değerleri
Su derinliği	25.0 m
Çelik boru dış çapı	1.0 m
Çelik boru iç çapı	0.986 m
Tasarım dalga yüksekliği	6.0 m
Tasarım dalga periyodu	6.0 sn
Atalet katsayısı ( $C_M$ )	2.0

Sürüklenme katsayısı ( $C_D$ )	1.0
Kaldırma katsayısı ( $C_L$ )	0.95
Dalga geliş açısı ( $\alpha$ )	45°
Boru hattı eğimi (m)	%5

Deniz boru hattının tasarımına ilişkin Tablo1'de verilen değerler dikkate alınarak her bir açık 10 eşit kesite ayrılmıştır. Su yüzeyinde zamana ve konuma bağlı oluşacak düşey deplasmanlar bu belirlenen kesitler için dalga periyodu boyunca hesaplanmış ve Şekil 15' te gösterilmiştir.

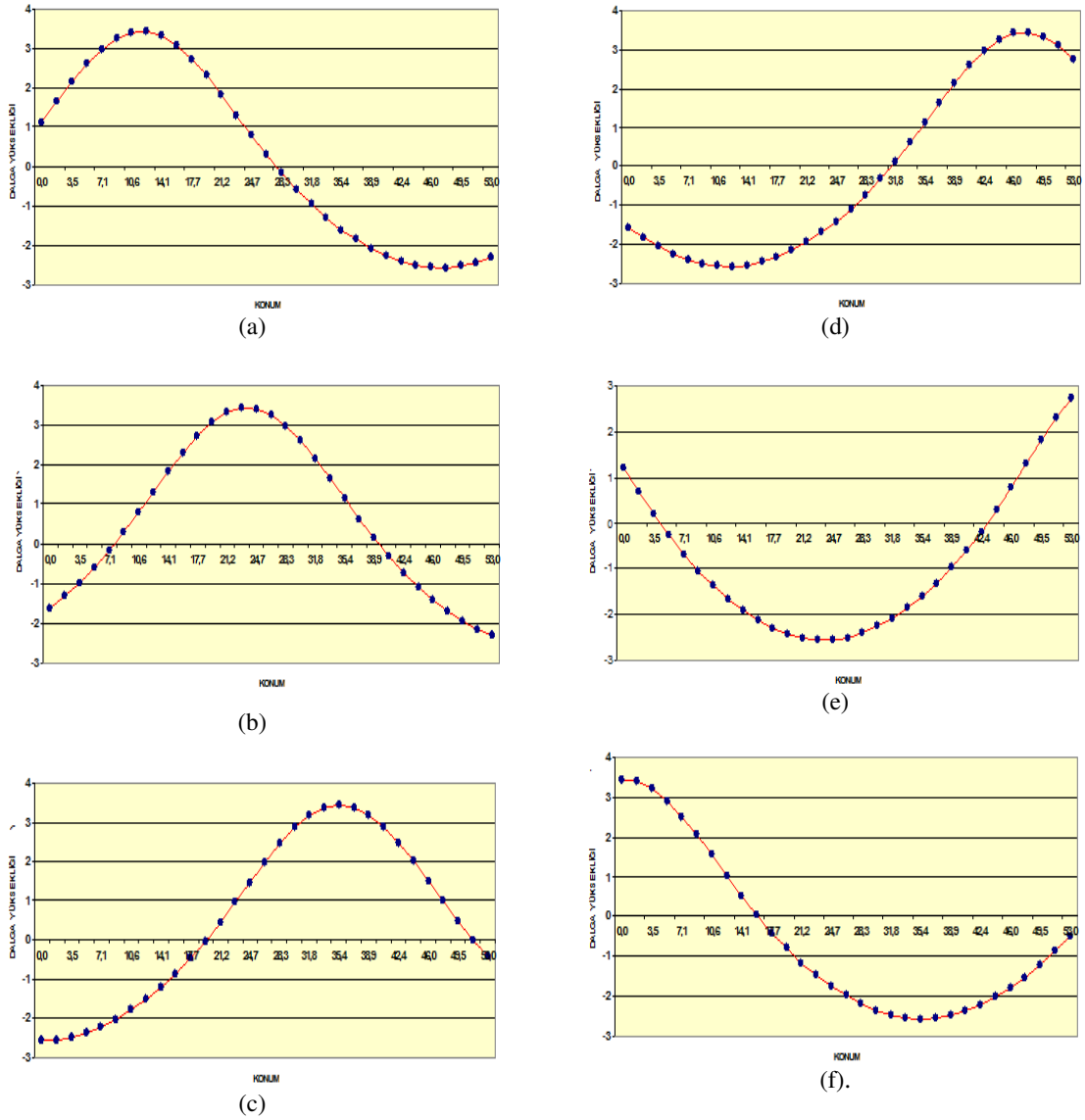


Şekil 14 Deniz Boru Hattı Kesitleri

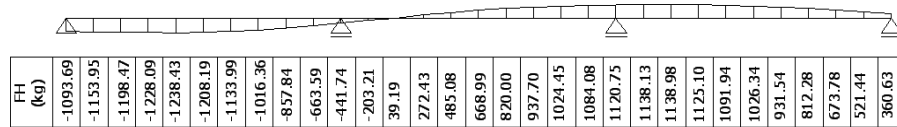
## 5.1.Hidrodinamik Dalga Kuvvetleri Hesabı

Hidrodinamik dalga kuvvetleri olan; yatay  $F_H$  (atalet+sürüklenme) ve düşey  $F_L$  (kaldırma) kuvvetlerinin periyot boyunca değişimi, dalga geliş açısı  $\alpha=45^\circ$  koşuluna göre hesaplanmıştır. Elde edilen veriler göstermiştir ki; hız değerlerine bağlı olarak değişen eksenel dalga kuvvetleri boru hattı üzerinde belirli aralıklarda basınç, belirli aralıklarda da çekme kuvveti oluşturmaktadır.

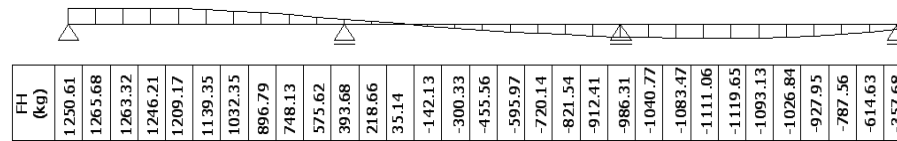
Eksenel kuvvet için elde edilen maksimum çekme kuvveti değerleri  $t=2sn$  anında ortaya çıkmaktadır.(Şekil 16). Hesaplar sonucunda, maksimum basınç kuvveti değerleri ise Şekil 17'de gösterildiği gibi  $t=5sn$  anında boru hattı üzerine etkimektedir



Şekil 15 (a) t=1sn, (b)t=2sn, (c) t=3sn, (d)t=4sn, (e)t=5sn, (f) t=6sn Anında Su Yüzü Profili

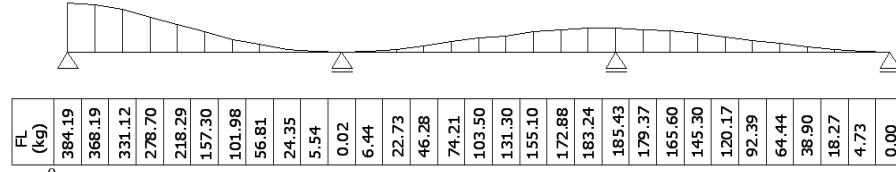


Şekil 16  $\alpha=45^0$  ve t=2sn için Eksenel Kuvvet ( $F_H$ ) Değerleri



Şekil 17  $\alpha=45^0$  ve t=5sn için Eksenel Kuvvet ( $F_H$ ) Değerleri





Şekil 18  $\alpha=45^0$  ve  $t=0sn$  için Hidrodinamik Kaldırma Kuvveti ( $F_L$ ) Değerleri

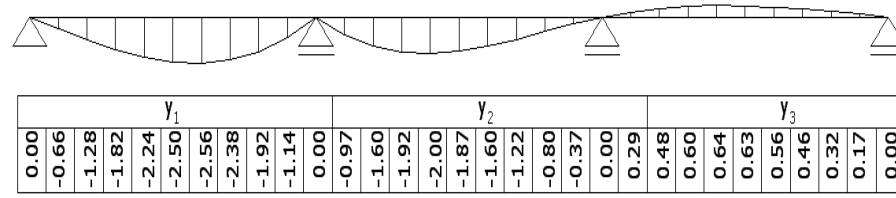
Hidrodinamik kaldırma kuvveti ise  $t=0$  başlangıç anında ve  $t=T=6sn$  anında maksimum değerlere ulaşmaktadır. (Şekil 18)

ordinatlarının kritik noktanın kesit zorunun değerleri olarak çizilmesi ile elde edilmiştir.

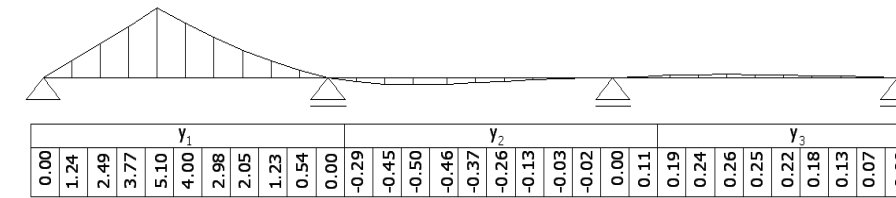
Boru hattı tasarımında esas alınacak kritik kesitlere ait eğilme momenti, kesme kuvveti ve mesnet reaksiyonu tesir çizgisi diyagramları Şekil 19-25' te gösterilmiştir.

## 5.2. Tesir Çizgisi Diyagramları

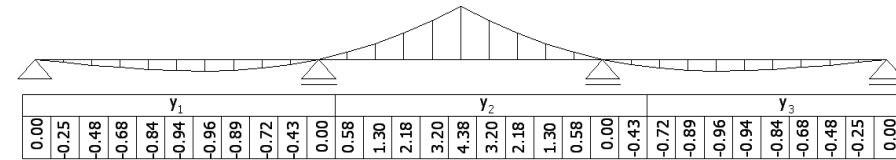
Kritik noktalara ait tesir çizgileri, birim tekil yükün sisteme etkidiği noktaların



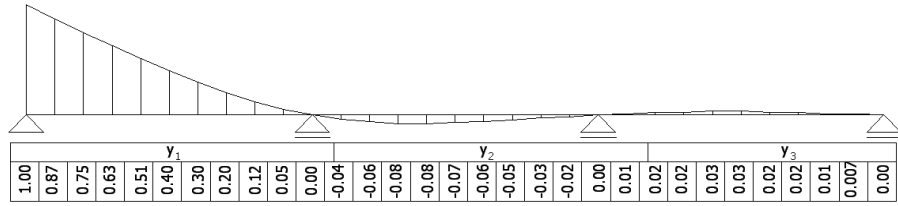
Şekil 19  $M_2$  Mesnet Eğilme Momenti Tesir Çizgisi Diyagramı



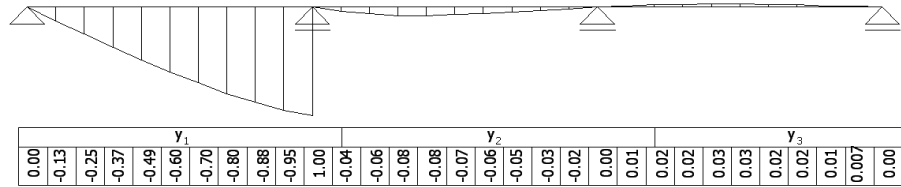
Şekil 20  $M_{s1}$  Eğilme Momenti Tesir Çizgisi Diyagramı



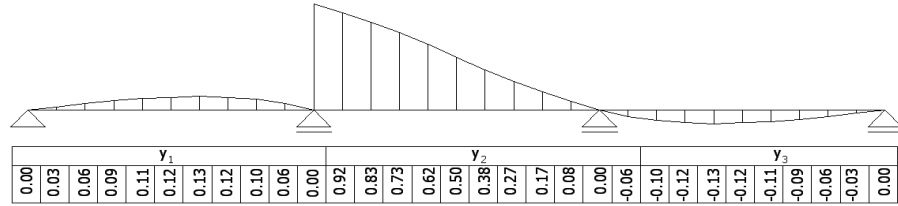
Şekil 21  $M_{s2}$  Eğilme Momenti Tesir Çizgisi Diyagramı



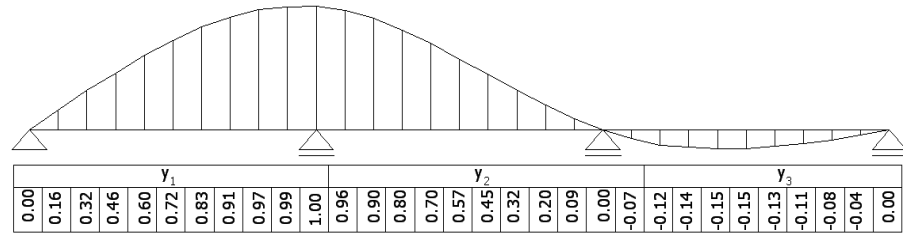
Şekil 22 V<sub>12</sub> Kesme Kuvveti Tesir Çizgisi Diyagramı



Şekil 23 V<sub>21</sub> Kesme Kuvveti Tesir Çizgisi Diyagramı



Şekil 24 V<sub>23</sub> Kesme Kuvveti Tesir Çizgisi Diyagramı



Şekil 25 R<sub>2</sub> Mesnet Reaksiyonu Tesir Çizgisi Diyagramı

2,5 m' lik her bir açıklık için  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $y_3$  ordinat bağıntıları ile elde edilen değerler diyagramların altında yer almaktadır.

### 5.3.Kritik Kesit Reaksiyonları

$F_H$  hidrodinamik aksenal kuvvet değerleri ile  $M_2$ ,  $M_{s1}$ ,  $M_{s2}$  eğilme momentleri ve  $V_{12}$ ,  $V_{21}$ ,  $V_{23}$  kesme kuvvetine ait tesir çizgisi diyagramları süperpoze edilerek

belirlenen en olumsuz kesit reaksiyonu değerleri, Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2**  $F_H$  Kuvveti Etkisi ile Boru Hattı Üzerinde Oluşan Kritik Kesit Reaksiyonları

Açıklık No	Kesit No	Zaman (sn)	Max Moment ( $M_x$ ) kg.m		Açıklık No	Kesit No	Zaman (sn)	Max Kesme Kuvveti ( $V_x$ )kg	
			Basınç	Çekme				Basınç	Çekme
1	5	t=0	-5209.99	9998.26	1	10	t=0	-2351.00	2399.00
2	16	t=1	-4078.58	8908.97	2	12	t=1	-112.00	2004.00
1	5	t=2	-11137.00	5803.38	1	7	t=2	-1875.00	1617.00
1	5	t=3	-7895.55	4114.29	1	10	t=3	-2353.00	2306.00
2	16	t=4	-8520.03	3900.52	2	13	t=4	-1629.00	122.00
1	4	t=5	-4989.33	10960.81	1	7	t=5	-1451.00	1682.00
1	5	t=6	-5166.45	9914.71	1	10	t=6	-2354.00	2402.00

$F_H$  hidrodinamik aksenal kuvveti etkisi altında, moment açısından en kritik kesit 5 nolu kesit iken, kesme kuvveti açısından durum değişmekte ve 10 nolu kesit en kritik kesit olmaktadır.

$F_L$  hidrodinamik kaldırma kuvveti diyagramları ile tesir çizgisi diyagramlarının süperpozisi ile elde edilen en olumsuz kesit reaksiyon değerleri ise Tablo 3'te verilmiştir.

**Tablo 3**  $F_L$  Kuvveti Etkisi ile Boru Hattı Üzerinde Oluşan Kritik Kesit Reaksiyonları

Açıklık No	Kesit No	Zaman (sn)	Max Moment ( $M_x$ ) kg.m		Açıklık No	Kesit No	Zaman (sn)	Max Kesme Kuvveti ( $V_x$ )kg	
			Basınç	Çekme				Basınç	Çekme
1	4	t=0	-1009.87	2218.54	1	4	t=0	-215.00	284.00
1	5	t=1	-1483.89	2847.66	1	8	t=1	-578.00	646.00
2	15	t=2	-1250.64	2354.01	1	10	t=2	-417.00	426.00
1	4	t=3	-661.82	1453.92	1	5	t=3	-143.00	175.00
1	5	t=4	-904.70	1736.18	1	8	t=4	-344.00	385.00
2	15	t=5	-757.68	1426.14	1	10	t=5	-276.00	281.00
1	4	t=6	-1032.76	2268.83	1	3	t=6	-194.00	430.00

tablodaki değerler ışında  $F_L$  hidrodinamik kaldırma kuvveti etkisi altında, moment açısından 5 nolu kesit, kesme kuvveti açısından ise 8 nolu kesit en kritik kesit olmaktadır.

## 6.SONUÇ VE ÖNERİLER

Dinamik etkilerin yapı üzerindeki etkisini görebilmek amacıyla; bu çalışma kapsamında; sinüsoidal dalga hareketine maruz 400m uzunluğundaki boru hattının, deniz tabanına gömülü olmayan 75m 'si için eş değer dinamik analiz yöntemlerinden biri

olan tesir çizgileri yöntemi kullanılarak farklı bir yaklaşımla ile analizi yapılmıştır. Bir birimlik yükün boru hattı üzerinde gezdirilmesi sonucu oluşan reaksiyonlar, sisteme gerçekte etkiyen hidrodinamik yükler ile süperpoze edilerek boru hattının boyutlandırmasında büyük önem taşıyan kritik reaksiyon kuvvetleri elde edilmiştir. Alınan sonuçlar dalga etkisi ile oluşan dinamik yüklerin boru hattı üzerinde azımsanamayacak büyüklükte ilave moment ve gerilme meydana getirdiğini göstermiştir.

Yapılan çalışma ile karayolu köprüleri, demiryolu köprüleri başta olmak üzere birçok yapıda hareketli yükün etkisini ortaya koymak amacı ile kullanılan tesir çizgisi yönteminin deniz boru hatlarının analizinde de kullanılabileceği ortaya konmuştur.

### Kaynaklar

- [1] Ballet, J. P. and Hobbs, R. E., “Asymmetric Effects of Prop Imperfections on the Upheaval Buckling of Pipelines”, Thin-Walled Structures, 355-373 (1992).
- [2] Chakrabarti, S.K., Hydrodynamics of Offshore Structures, Computational Mechanics Publications, Springer-Verlag, Berlin, 1987.
- [3] Coastal Engineering Manual, Chapter 1, Water Wave Mechanics, Part 2, U.S. Army Coastal Engineering Research Center, 2006.
- [4] Cokgör, S. and Avcı, I., “Hydrodynamic Forces on Partly Buried Tandem Twin Pipelines in Current”, Ocean Engineering , 28:1349-1360 (2001).
- [5] Dağlı, B., Deniz Boru Hattı Dinamik Analizi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Manisa 2005.
- [6] Dean, R.G., Dalrymple, R.A., Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists, vol 2. World Scientific. , 1991.
- [7] Fredsoe, L. And Sumer, B. M., Bed Shear Stress Measurements over a Smooth Bed in Three Dimensional Wave-Current Motion, Institute of Hydrodynamics and Enginee
- [8] Goda, Y., Random sea and design of maritime structures, 2nd edn. Advanced series on ocean engineering, vol.15. World Scientific, Singapore., 2000.
- [9] Gökkuş, Ü., “Computer-Aided Design of Submarine Pipelines”, Water Science TEchnology, 233-241 (1995).
- [10] Gökkuş, Ü., Köprüler Ders Notları, Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, 2001
- [11] Gündemir, O. ve Taştan K., “Boyuna Yivli Pürüzlülüğün Akımın Boruya Uyguladığı Sürüklenme Kuvveti Üzerine Etkisi”, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi, Vol 23, No 3, 637-644 (2008).
- [13] Hallam, M.G., Heaf, N.J. ve Wootton, L.R. Dynamics of Marine Structures. London: Ciria Underwater Engineering Group, 1977.
- [12] Petti M., Third Order Analysis of Nonlinearities Bounded to Narrow Banded Spectra, The International Society of Offshore and Polar Engineers, Vol. 4-No.1994
- [13] Pranesh, M. R. R. And Man, J. S., “Wave-Tubular Member-Wave and Current Interaction”, Journal of Waterway, 760-774 (1998).
- [14] Sarpkaya, T. , Isaacson, M. , Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1981.
- [15] Sınır, G., Dalgakıran Altında Oluşan Gözenekli Ortamdan Akışın Sonlu Farklarla Analizi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Manisa, 1996.
- [16] Sümer, B.M., Fredsoe, J., Hydrodynamics around Cylindrical Structures. Advanced Series on Ocean Engineering, vol. 12. World Scientific., 1997.
- [17] Teng, C. C. and Nath, J. S., Forces On Horizontal Cylinder Towed in Waves , American Society of Civil Engineer, ASCE, 1022-1040 (1986).
- [18] Türkmen, G., Tesir Çizgilerinin ve Tesir Yüzeylerinin Mevcut Bir Yapı Analizi Programıyla Doğrudan Elde Edilmesi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Manisa 2011.
- [19] Wu, Y. T. and Riha, D.S., “8th American Society of Civil Engineer Special Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability”, American Society of Civil Engineer, ASCE, 312-325 (2000).
- [20] Yalçın, Y. , Çevik, E., Çelikoğlu, Y., Kıyı Liman Mühendisliği, İMO Ankara Şube, 1998.

**Geliş Tarihi: 21.06.2012**

**Kabul Tarihi: 30.10.2012**