

## ÇELİK RIHTIM KAZIKLARININ DALGA YÜKLERİ ALTINDA DİNAMİK DAVRANIŞININ MODELLENMESİ

Engin GÜCÜYEN<sup>1\*</sup>, B. Yurdanur DAĞLI<sup>2</sup>, Ümit GÖKKUŞ<sup>3</sup>

Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,  
İnşaat Mühendisliği Bölümü, 45140 Manisa, TÜRKİYE

**Özet:** Rıhtımlar; betonarme yada çelikten imal edilmiş düşey taşıyıcı eleman olan kazıklar ve üzerinde yatay taşıyıcı eleman olan tabliyeden oluşmaktadır. Rıhtım kazıkları, tabliyeden gelen eksenel yükleri, gemi çarpmasından kaynaklanan yanal yükleri ve çevresel yükleri güvenle taşıyabilecek sayı, boyut ve kapasitede olmalıdır.

Tabliyeden gelen trafik yükü ve gemi çarpmaları tasarımda çok önemli rol oynasa da çevresel yükler de boyutlandırılmada etkilidir. Bu çalışmada çevresel yükler olarak tanımlanan rüzgar, deprem ve dalga yüklerinden sadece dalga yükü (düzensiz dalga ortamından elde edilen) dikkate alınarak kazık dinamik analizi yapılmıştır.

Enerji spektrumundan faydalanılarak ya çoklu sinüzoidal dalgaların süperpoze edilmesiyle (Yükleme I) ya da belirgin dalga yükseklik ve periyoduna (Yükleme II) dayalı farklı yüklemeler yapılarak hidrodinamik kuvvetler hesaplanmaktadır. Tekil kazığın davranışı her iki yükleme tipine göre Tek Serbestlik Dereceli Sistem (TSDS) ve bilgisayar destekli Zaman Tanım Alanında (ZTA) dinamik analiz yöntemleri kullanılarak modellenmektedir. Bunun sonucu olarak bu çalışmada ankastre temelli dikey konsol biçimindeki sistemin zaman ve konumla değişen deplasman fonksiyonu elde edilmiştir. Sistemin doğal ve titreşim frekanslarının büyüklükleri hesaplanmış, uyumluluk durumuna rezonans olabilirliği incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Hidrodinamik Dalga Kuvvetleri, Tek Serbestlik Dereceli Sistem, Zaman Tanım Alanı, Kazıklı Deniz Yapıları

## MODELLING OF DYNAMIC BEHAVIOUR OF STEEL QUAY PILES UNDER WAVE LOADS

**Abstract:** The wharfs are composed of reinforced concrete or steel piles (vertical structural members) and decks (horizontal structural members). The number, size and capacity of wharf piles shall bear safely the axial loads from the deck, the lateral ship impact loads and the environmental loads.

Although the traffic and ship impact loads take significant part in design, the environmental loads are also effective in sizing. In present study only the wave loads (obtained from irregular wave conditions) among wind, earthquake and wave ones are considered in dynamic design of pile.

The hydrodynamic loads are calculated in two ways, based on either superposed multi-sinusoidal wave (Loading I) or significant wave height and period (Loading II), utilizing the energy spectrum. Behaviour of single pile is modelled according to both loading situations such as single degree of freedom system (SDOF) and computer aided time history (TH). As a result of this, the fixed foundation type systems deflection function, varies with time and location, is obtained. Amplitude of natural frequency and vibration frequency are calculated and resonance possibility is observed in compatibility mode.

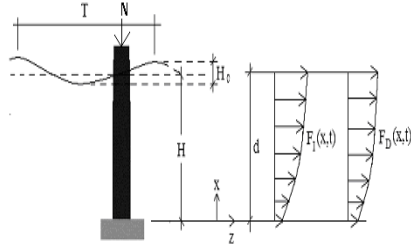
**Keywords:** Hydrodynamic Wave Forces, Single Degree of Freedom System, Time History Solutions, Piled Offshore Structures

\*Sorumlu yazar  
engin.gucuyen@bayar.edu.tr

## 1. GİRİŞ

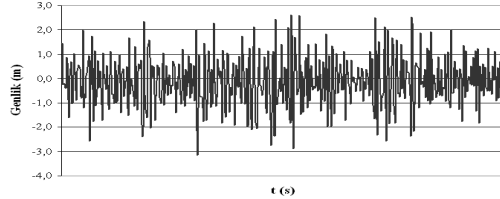
Deniz yapılarından olan rıhtımlar, ya eğimi yüksek deniz tabanlarının olduğu kıyı kesimlerinde ya da derin yanaşma yerine ihtiyaç duyulan gemilerin yanaşması için inşa edilirler.

Rıhtım kazıkları ekonomik ömürleri boyunca statik ve dinamik dış kuvvetlere karşı dayanıklı olmalıdır. Rıhtımlar, bu kuvvetleri güvenli bir biçimde taşıyabilecek şekilde kazıklı temeller üzerine inşa edilirler. Rıhtım platformundan (tabliyeden) aktarılan düşey yükler, dalga hareketinin oluşturduğu hidrodinamik yükler ve gemi yanaşmasından kaynaklanan çarpma yükleri, güvenle zemine aktarılabilir olmalı ve aynı zamanda bu yükleri aktaran taşıyıcı sistemde uygun biçim ve boyutlara sahip olacak şekilde tasarım yapılmalıdır. Kazıklar tekil ve grup davranış biçimlerine göre farklı projelendirilmekte olup bu çalışmada kazık ara mesafeleri ve çap oranlarına göre tekil kazığın dinamik davranışı dikkate alınmıştır.



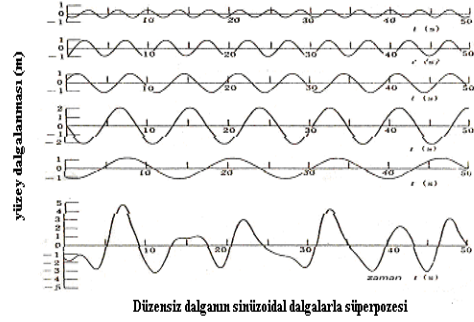
Şekil 1.1 Ankastré Mesnetli Tekil Rıhtım Kazığına Etkiyen Dalga Kuvvetleri

Dalga hareketi rıhtım kazığı üzerinde dinamik yük oluşturur. Hesaplama aşamasında düzensiz dalgaya ait anlık su yüzü değişiminin eşdeğer düzenli dalgalar cinsinden temsil edilmesi gerekmektedir.



Şekil 1.2 Düzensiz dalga verileri

Bu amaçla; düzensiz dalga Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) (Fast Fourier Transform-FFT) yöntemiyle ya çoklu sinüs dalgaları ile ya da belirgin yükseklik ve periyotlu birey sinüs dalgası ile temsil edilerek düzenli dalga formuna sokulur.



Şekil 1.3 Düzensiz dalganın sinüzoidal dalgalarla süperpozisi [1]

Çoklu sinüs dalgalarının her biri değişik genliklere, periyotlara ve faz açlarına sahiptir. Çoklu düzenli dalgaların süperpozisyonları ile elde edilen model dalganın profili ve spektrumu ile gerçek veriler arasındaki uyumluluk Ki-Kare testi ile saptanmıştır.

Çözümlemede statik analize ek olarak dinamik analiz de yürütülmüştür. Statikçe uygun olan boyutlar esas alınarak Zaman Tanım Alanında Analiz [2] ve Tek Serbestlik Dereceli Sistem biçiminde rıhtım kazığının salınımı modellenmiştir. İki farklı yükleme (ZTA, TSDS) ile bulunan konum ve zamanla değişen deplasman değerleri karşılaştırılmış, yapının doğal frekansı ile titreşim frekansı arasında rezonans yapabilecek bir durumun olup olmadığı incelenmiştir.

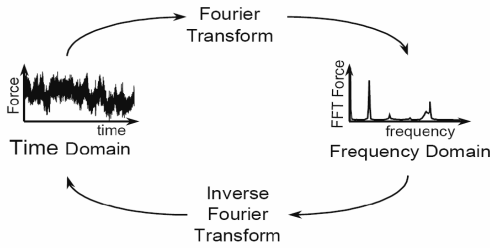
## 2. ZORLAYICI DIŞ KUVVETİN HESABI

Dalga etkilerinden oluşan zorlayıcı dış kuvvet, düzensiz dalganın sinüs dalgalarıyla süperpozisi (Yükleme I) ve düzensiz dalganın birey düzenli dalga ile temsil edilmesi

(Yükleme II) olmak üzere iki farklı biçimde hesaplanmıştır.

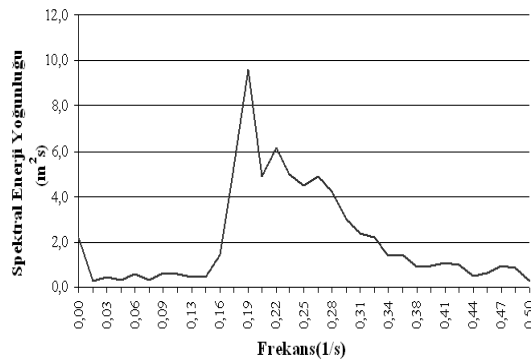
## 2.1. Düzensiz Dalganın Sinüs Dalgalarıyla Süperpozisi (Yükleme I)

Düzensiz dalganın, düzenli (sinüs) dalga olarak temsil edilebilmesi için; düzensiz dalgaya ait su yüzü profilinden  $2^n$  sayıda düzenli (sinüs) dalga ya da tek bir düzenli (sinüs) dalga üretilmesi yolları izlenebilir. İlk aşamada; düzensiz dalga kaydına ait spektral enerji yoğunluğu ( $P_{xx}$ ); [3]'ün sinyal işleme araç kutusunda yer alan HFD yöntemiyle hesaplanmaktadır.



Şekil 2.1 HFD yönteminin şematik gösterimi [4]

MATLAB programının HFD tekniği için kullanılacak düzensiz dalga verileri öncelikle, Yükselirken/Ağalırken Sıfırı Kesme yöntemleriyle farklı periyot ve genliklerle tanımlanacak biçimde ayrıştırılmakta ve spektral enerji yoğunluğu çizilebilmektedir. (Şekil.2.2)



Şekil 2.2 Düzensiz Dalganın Spektral Enerji Yoğunluğu

Dönüşüm ile spektral enerji yoğunluğu  $P_{xx}(m^2/sn)$ , frekans  $f(Hz)$  değerlerine bağlı olarak dalga yüksekliği  $H(m)$  ve dalga periyodu  $T (sn)$  Denklem (2.1) ile her bir birey düzenli dalganın yükseklik ve periyotları hesaplanmıştır [5].

$$H(f_1) = 2[2P_{xx}(f_1)\Delta f]^{1/2} \text{ ve } T_1 = 1/f_1 \quad (2.1)$$

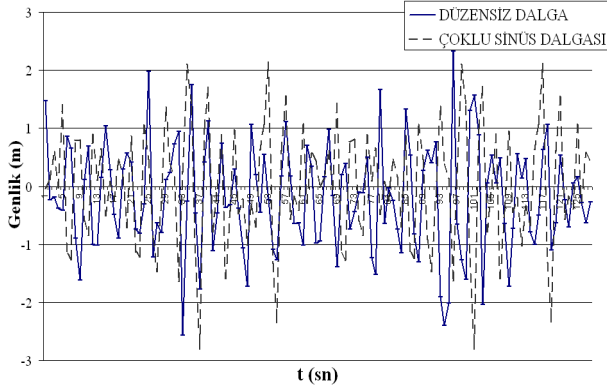
32 adet sinüs formundaki model dalga ( $H_1, f_1$ ) verileri ile gerçek verilerin su yüzü profil ve spektrum açısından uyumluluğunun saptanması amacıyla uygunluk testi yapma gereksinimi vardır. Elbette ki daha fazla sayıdaki dalganın süperpozisyonuyla elde edilecek yeni dalganın genlikleri, gerçek verilere daha fazla yakınsamaya neden olacaktır. Burada Ki-Kare dağılımının analizi için 32 adet sinüzoidal dalga genlikleri esas alınmıştır. Frekans dağılımındaki grup sayısı ( $g=8$ ), sınıf sayısı ( $m=0$ ), serbestlik derecesi ( $sd=8-1-0=7$ ) alınmak suretiyle test 0.01 önem seviyesinde yapılmıştır.  $H_1$ , düzensiz dalga genlikleri,  $H_2$ , sinüzoidal dalgaların toplam genlikleri temsil eder.

Her bir dalganın faz farkları ( $t'$ ) dikkate alınarak Ki-Kare testinin sonuçları Çizelge (2.1)'de sunulmaktadır.

Çizelge 2.1. Faz farkı sonrası Ki-Kare dağılımı

| Sınıf aralığı | H1 dağılımı | H2 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         |

Çizelge (2.2)'den elde edilen kritik değer ( $x^2=17.93$ ), teorik kritik değerden ( $x^2=18.475$ ) küçük olduğundan hipotez kabul edilir.



Şekil 2.3. Düzensiz dalga ve çoklu sinüs dalgasının genlik karşılaştırılması

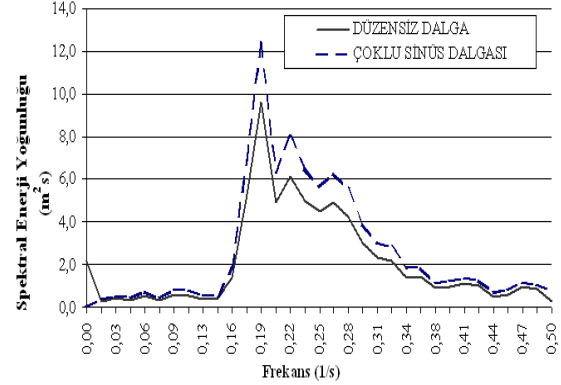
HFT analizinden elde edilen spektrum değerleri kullanılarak hesaba katılan 32 dalganın genlik toplamlarının gerçek dalganın genlikleriyle olan ilişkisi Şekil.(2.3).’de verilmiştir. Burada 128 saniyelik veri uzunluğu hesaba katılmıştır. Diğer kısımlarda ise periyodik dalga formu yer almaktadır.

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 [6]. Bu durumda, Ki-Kare testi sonuçları Çizelge (2.2.)’de sunulmaktadır.

Çizelge 2.2. Enerji Spektrumları Arasındaki Ki-Kare Dağılımı[7]

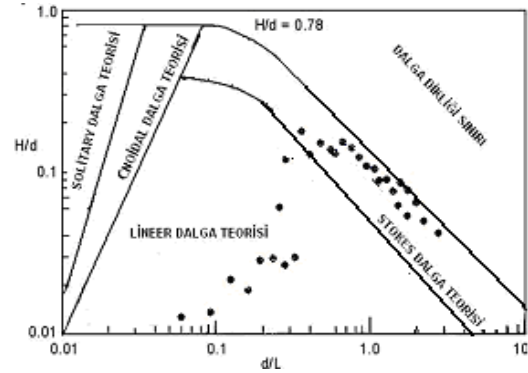
| DALGA NO | O      | E       | (O-E) <sup>2</sup> /E | DALGA NO | O      | E      | (O-E) <sup>2</sup> /E |
|----------|--------|---------|-----------------------|----------|--------|--------|-----------------------|
| 1        | 2,2134 | 0,0007  | 2,212                 | 17       | 4,514  | 5,6548 | 0,288309              |
| 2        | 0,2954 | 0,3683  | 0,017991              | 18       | 4,9062 | 6,3138 | 0,403844              |
| 3        | 0,4238 | 0,5375  | 0,030504              | 19       | 4,2295 | 5,5112 | 0,388404              |
| 4        | 0,3358 | 0,4423  | 0,033777              | 20       | 3,0005 | 3,9166 | 0,2797                |
| 5        | 0,5458 | 0,7069  | 0,047551              | 21       | 2,3578 | 3,0112 | 0,181072              |
| 6        | 0,3405 | 0,4296  | 0,023315              | 22       | 2,1837 | 2,7911 | 0,168949              |
| 7        | 0,6114 | 0,7982  | 0,057073              | 23       | 1,3918 | 1,8236 | 0,133964              |
| 8        | 0,5829 | 0,7712  | 0,060828              | 24       | 1,4226 | 1,8443 | 0,125004              |
| 9        | 0,4166 | 0,5349  | 0,033593              | 25       | 0,8913 | 1,129  | 0,063392              |
| 10       | 0,4403 | 0,5614  | 0,033307              | 26       | 0,8658 | 1,2499 | 0,081234              |
| 11       | 1,4009 | 1,7814  | 0,103348              | 27       | 1,0969 | 1,4131 | 0,091115              |
| 12       | 5,3058 | 6,9835  | 0,469135              | 28       | 0,9959 | 1,2879 | 0,085615              |
| 13       | 9,5987 | 12,3936 | 0,813805              | 29       | 0,4963 | 0,6415 | 0,04248               |
| 14       | 4,8838 | 6,3631  | 0,448079              | 30       | 0,5985 | 0,77   | 0,049143              |
| 15       | 6,1548 | 7,9855  | 0,544528              | 31       | 0,9367 | 1,1899 | 0,067903              |
| 16       | 4,8698 | 6,5063  | 0,475036              | 32       | 0,8338 | 1,0548 | 0,058576              |

Çizelge (2.2)’den elde edilen kritik değer  $x^2=7.9126$  teorik kritik değerden ( $x^2=18.475$ ) küçük olduğundan değerler uyumludur ve düzensiz dalga sinüs dalgalarıyla temsil edilmiştir.



Şekil 2.4. Spektrum karşılaştırılması

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. Her bir dalga için kullanılacak teoriler farklılaşmaktadır.



Şekil 2.5. 32 adet dalganın geçerlilik sınırları

Bu çalışmada; her bir birey dalga sinüs formunda tanımlanmakta ve bazı düzenli dalgalar her ne kadar geçerlilik bölgesi dışına çıkmışsa da, Lineer dalga teorisi alınarak hesaplama yoluna gidilmiştir. Yapılan hesaplamalarda görülmüştür ki süperpoze

dalgaların hepsi kırılmamış haldedir. Toplam dalga genliklerinin saptanmasında aynı karakterli dalgaların kullanılması esas alınmıştır.

## 2.2. Düzensiz Dalganın Birey Düzenli Dalga İle Temsil Edilmesi (Yükleme II)

Düzensiz dalganın birey düzenli dalga olarak temsil edilmesinde önceki yöntemde olduğu gibi spektral enerji yoğunluğu-frekans eğrisi Şekil (2.2) kullanılır. Bu eğrinin altında kalan alan ( $m_0$ ) olmak üzere birey düzenli dalgaya ait dalga yüksekliği ( $H_s$ ) ve periyodu ( $T_s$ );

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \quad T_s = \sqrt{\frac{2m_0}{m_1}} \quad m_1 = \sum_1^{2^n} f^2 S df \quad (2.2)$$

ile hesaplanır. Burada;  $m_1$ ;  $m_0$ 'ın birinci momentini,  $f$ ; frekansı,  $S$ ; spektrum enerji yoğunluğunu,  $df$ ; frekans adım aralığını temsil eder [8]. Süperpoze edilen dalgalarda görüldüğü gibi belirgin dalga da kırılmamış dalga özelliklerine sahiptir.

## 3. ANKASTRE MESNETLİ TEKİL KAZIĞA ETKİYEN HİDRODİNAMİK YÜKLERİN BULUNMASI

Her derinlikte sinüzoidal dalgalara ait veriler bulunduktan sonra bu dalgaların yatay partikül yörünge hızları ve ivmeleri kullanılarak kazığa etkiyen hidrodinamik yükler (sürüklenme, atalet) bulunmuştur. Yatay partikül hızı ( $u$ );

$$u = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \cos\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right) \quad (3.1)$$

ile hesaplanır. Denklem (3.1)'de;  $H$ ; dalga yüksekliğini,  $T$ ; dalga periyodunu,  $d$ ; su derinliğini,  $z$ ; düşey konumu,  $x$ ; yatay konumu,  $L$ ; dalga boyunu,  $t$ ; zamanı,  $g$ ; yerçekimi ivmesini temsil eder. Bulunan hızların zamana göre türevleri alınarak yörüngesel ivmeler bulunmuştur [9].

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{g\pi H}{L} \frac{\cosh(2\pi(z+h)/L)}{\cosh(2\pi h/L)} \sin\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right) \quad (3.2)$$

Kazığın birim boyuna eksene dik yönde etkiyen sürüklenme ( $F_D$ ), atalet ( $F_M$ ) kuvvetleri dalgaların hızlarına ve ivmelerine bağlı olarak aşağıdaki denklemlerle hesaplanabilir.

$$F_D = 1/2 \times C_D \times \rho \times D \times u \times |u| \quad (3.3)$$

$$F_M = C_M \times \rho \times \frac{\pi \times D^2}{4} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (3.4)$$

Bu ifadelerde,  $C_M$ ; atalet kuvveti sabitini,  $C_D$ ; sürüklenme kuvveti sabitini,  $D$ ; borunun dış çapını,  $\rho$ ; ( $\gamma/g$ ) ile hesaplanan boru dışındaki akışkanın özgül kütleini,  $g$ ; Yerçekimi ivmesini temsil eder.  $C_M$ ,  $C_D$ , sabitleri için çeşitli kaynaklarca tavsiye edilen değerler sayısal uygulama kısmında kullanılacaktır.

## 4. RIHTIM KAZIĞIN DİNAMİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Rihtim kazığının çevresel yüklerden olan dalga yüklemesine göre dinamik davranışının incelenmesinde; Tek Serbestlik Dereceli Sistem (TSDS) ve bilgisayar destekli [2] Zaman Tanım Alanında Dinamik Analiz (Z.T.A.) yöntemleri kullanılmıştır. Zamanla değişen (gerek etkin birey sinüs dalgasına gerekse çoklu sinüs dalgasına ait) dalga yükleri sisteme aktararak (Şekil 1.1) yapının deplasmanı, doğal frekansı ve titreşim frekansı bulunmuştur. Deplasman değerlerinin Tek Serbestlik Dereceli Sistem ve Zaman Tanım Alanında Dinamik Analiz yöntemlerine göre uyumu incelenmiştir.

### 4.1. Tek Serbestlik Dereceli Sisteme Göre Dinamik Analiz

Yapının Tek Serbestlik Dereceli Sistem esasına göre çözümlenmesinde öncelikle yapılması gereken şekil fonksiyonunun bulunmasıdır. Yapı üzerine etkiyen zamanla değişen yüklerden maksimum olan değeri

yapıya statik olarak etkilerek yapının konumla değişen deplasman değerleri bulunur. Bu değerler normalleştirilerek şekil fonksiyonu ( $\psi_{(x)}$ ) elde edilir. Bu hesap esasında amaç Denklem (4.1) ile verilen deplasman fonksiyonunu ( $v_{(x,t)}$ ) elde etmektir. Böylece yapının zamanla ve konumla değişen deplasmanına ulaşılır.

$$v_{(x,t)} = \psi_{(x)} Z_{(t)} \quad (4.1)$$

Denklem (4.1) de  $Z(t)$  zamanla değişen deplasman denklemdir. Zamanla değişen deplasman değerinin hesaplanabilmesi için sistemin genel hareket denkleminin çözümlenmesi gerekmektedir [10].

$$m^* \ddot{Z}_{(t)} + c^* \dot{Z}_{(t)} + k^* Z_{(t)} = P_{D(t)}^* \quad (4.2)$$

Denklem (4.2)'de  $m^*$ ; sistemin genel kütlelerini,

$$m^* = m \int_0^L \psi_{(x)}^2 dx \quad (4.3)$$

$c^*$ ; sistemin genel sönümünü

$$c^* = a_1 EI \int_0^L \psi_{(x)}''^2 dx \quad (4.4)$$

ifade eder. Denklem (4.4)'de  $a_1$ ; sistemin sönüm katsayısını,  $E$ ; kullanılan malzemenin elastisite modülünü,  $I$ ; sistemin atalet momentini,  $L$ ; yapı boyunu temsil eder.

$$k^* = EI \int_0^L \psi_{(x)}''^2 dx - N \int_0^L \psi_{(x)}'^2 dx \quad (4.5)$$

ve  $k^*$ ; yapıya eksenel yük etkimesi halinde sistemin genel rijitliğini ifade eder.

Rıhtım kazığına sadece dalga yüklemesi göz önünde bulundurularak analiz yapma yoluna gidilmiştir. Denklem (4.2)'nin sol kısmı zamanla değişen dalga yüklemesini temsil etmektedir. Zamanla ve konumla değişen,

atalet ve sürüklenme kuvvetlerinin toplamından oluşan dalga yüklemesi konumdan bağımsızlaştırılarak;

$$P_{D(t)}^* = \sum P_{i(t)} \psi_{i(x)} \quad (4.6)$$

şeklinde genel hareket denklemine yazılır. Tek serbestlik dereceli sistemin Denklem (4.2) ile verilen doğrusal olmayan hareket denkleminde dinamik dış yük teriminin sıfır ( $P_{Top}(t)=0$ ) olması durumu doğrusal hareket denklemini verir. Modellenen yapının doğal frekansı ise;

$$\omega_0^2 = \frac{EI \int_0^L \psi_{(x)}''^2 dx}{m \int_0^L \psi_{(x)}^2 dx} \quad (4.7)$$

ile hesaplanır. Denklem (4.7) ile hesaplanan doğal frekans değerinin yapıya etkien dış yükün oluşturduğu titreşimin frekansı ile karşılaştırılması gerekmektedir. Titreşim frekansının, doğal frekans ile eşit olması durumunda rezonans durumu meydana gelecektir. Bu durumda, yapının deplasmanları artar ve yapı için tehlikeli durum oluşur. Bu durumun meydana gelmemesi için yapının doğal frekansını veren Mod-1 yapısı ile aynı modda bir dış yükün sisteme etkitilmemesi gerekecektir [11].

## 4.2. Zaman Tanım Alanında (Z.T.A) Dinamik Analiz

Zaman Tanım Alanının [2] genel olarak kullanım şekli; belirli zaman dilimlerinde, belirli bir yönde, depreme ait zemin ivmelerinin yada kuvvetlerinin kaydı biçimindedir. Bu çalışma kapsamında Şekil (1.1)'de görülen rıhtım kazığının dalga kuvvetleri etkisindeki dinamik analizinde Zaman Tanım Alanı yöntemi için [2] kullanılmıştır.

Rıhtım kazığına etkien sürüklenme ve atalet kuvvetlerinin toplamı zamanla değişen tekil

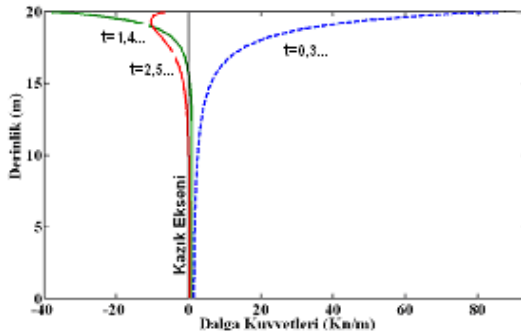
yük olarak hesaplanarak programa aktarılacak zaman tanım alanı fonksiyonları elde edilmiştir. Birey sinüs dalgasına ait ve çoklu sinüs dalgasına ait iki farklı Zaman Tanım Alanı fonksiyonu oluşturulmuştur. Zaman Tanım Alanı fonksiyonu kuvvetin etki noktasına atanan birim yükle eşleştirilerek programa aktarılmıştır. Zaman Tanım Alanı için yük fonksiyonu, lineer-modal analiz olarak bilgisayara kaydedilmiştir. Zaman tanım alanı  $\text{cm/sn}^2$  biriminde, dalga periyodu değerinin saniyelik zaman dilimi için istenilen zaman aralığında analiz tamamlanacaktır.

## 5. SAYISAL UYGULAMA

Bu çalışmada yüksekliği (L) 26.00m, suya gömülü kısmı (d) 20.00m, çapı (D) 1.00m, et kalınlığı (e) 0.01m, elastisite modülü (E)  $2.1 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$ , sönüm katsayısı ( $a_1$ ) 0.05, eksenel yükü (N) 300 kN olan çelik rıhtım kazığının dinamik davranışı atalet ve sürüklenme katsayıları ( $C_M=0.7$   $C_D=1.2$ ) alınarak incelenmiştir.

### 5.1 Dalga Kuvvetlerinin Hesaplanması

Çoklu sinüs dalgasının her birine ait parametreler (H,T) Denklem (2.1) ile hesaplanmıştır. Sinüs dalgasına ait sürüklenme ve atalet kuvvetleri Denklem (3.3) ve Denklem (3.4) ile ayrı ayrı hesaplanarak toplanmıştır. Böylelikle 32 adet dalganın sistem üzerine etkittiği toplam yatay kuvvet hesaplanmıştır.



Şekil 5.1 Derinlikle Değişen Toplam Yatay Kuvvet

Hesaplanan anlık kuvvetlerin derinlikle değişimi Şekil (5.1)'de görülmektedir. Sürüklenme ve atalet kuvvetinden oluşan toplam yatay kuvvetin birey düzenli dalga içinde hesaplanması gerekmektedir. Bu amaçla düzensiz dalganın Şekil (2.2)'de verilen spektral enerji yoğunlu frekans eğrisi kullanılır. Bu eğrinin altında kalan alan yardımıyla ve Denklem (2.2) kullanılarak düzensiz dalga birey sinüs dalgası ile temsil edilir. Bu dalga etkin dalga olarak da tanımlanır. Etkin dalgaya ait yükseklik ( $H_s$ ) değeri 2.50m, periyot değeri ( $T_s$ ) ise 7.54sn olarak hesaplanır. Bu değerler yardımıyla çoklu sinüs dalgasında olduğu gibi rıhtım kazığına etkin dalga nedeniyle etkiyen toplam yatay yük hesaplanmış olur.

### 5.2. Tek Serbestlik Dereceli Sisteme Göre Dinamik Analiz

Şekil (5.1)'de görülen başlangıç ( $t=0$ ) anında elde edilen kuvvetlerin maksimum olduğu görülerek sisteme statik olarak yüklenmiştir ve SAP 2000 programı ile elde edilen 26 noktaya ait deplasman değerleri sıfır ile bir arasında normalize edilerek en küçük kareler yöntemi kullanılarak, Yükleme I durumuna ait şekil fonksiyonu;

$$\Psi_{(x)} = -0.840 \left( \frac{x}{L} \right)^3 + 1.911 \left( \frac{x}{L} \right)^2 - 0.073 \left( \frac{x}{L} \right) - 0.003 \quad (5.1)$$

olarak bulunur. Aynı şekilde Yükleme II durumu için başlangıç ( $t=0$ ) anındaki toplam yatay kuvveti sisteme etkilenerek şekil fonksiyonu;

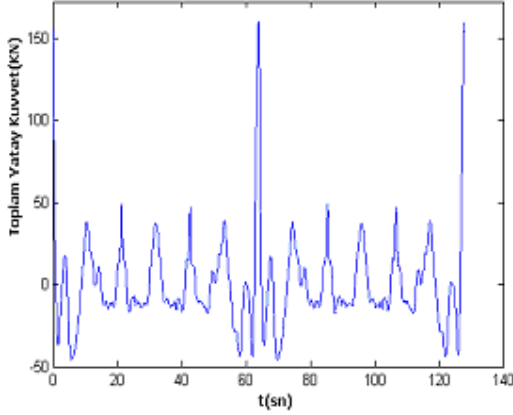
$$\Psi_{(x)} = -0.854 \left( \frac{x}{L} \right)^3 + 1.811 \left( \frac{x}{L} \right)^2 - 0.028 \left( \frac{x}{L} \right) - 0.001 \quad (5.2)$$

olarak bulunur. Yazılan şekil fonksiyonlarının mutlaka geometrik şartı, geometrik şart kadar önemli olmamakla birlikte dinamik şartı sağlaması gerekmektedir. Bir ucu ankastre mesnetli diğer ucu açık durum için geometrik şart;

$$\Psi_{(0)} = 0 \quad \Psi_{(L)} = 1 \quad (5.3)$$

$$\psi_{(0)}' = 0 \quad \psi_{(L)}'' = 0 \quad \psi_{(L)}''' = 0 \quad (5.4)$$

olarak belirlenir. Her iki farklı yükleme durumu (çoklu sinüs-etkin dalga) için hesaplanan kütle, sönüm ve rijitlik ifadeleri ve zamanla değişen tekil yükleme değerleri genel hareket denkleminde yazılır.



Şekil 5.2 Çoklu Sinüs Dalgasının Zamanla Değişen Tekil Yüklemesi

Şekil (5.2)' de ki değerler 32 adet sinüs dalgasına ait sürüklenme ve atalet denklemlerinin (64 adet) derinlik boyunca integrali [12] ile alınarak derinlikten bağımsızlaştırılması ile elde edilir.

Bu hesap aşaması aynen etkin dalga için uygulanır. Her iki durumda da dalga yüklemesinin sisteme etki noktasının yaklaşık tabandan 15m yükseklikte olduğu hesaplanmıştır. Hesaplanan kütle, sönüm, rijitlik ve dış yük ifadeleri denkleme yazıldıktan sonra diferansiyel denklem [3] ile çözülerek yapının uç noktasının zamanla değişen deplasman değerleri elde edilir. Bu değerler sonuçlar ve öneriler kısmında sunulmuştur.

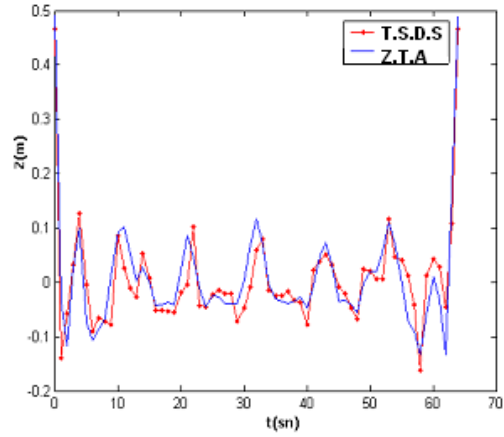
### 5.3. Sap 2000 Yazılımı İle Zaman Tanım Alanında Dinamik Analiz

Şekil (5.2)'de görülen zaman tanım alanı fonksiyonu her iki farklı dalga (çoklu sinüs ve etkin dalga) için oluşturularak kazığın 15.

metresinde tanımlanan birim yatay yükle eşleştirilerek 64 saniye için zaman tanım alanında dinamik analiz yapılmıştır. Analiz kısmında girilmesi gereken sönüm katsayısı Tek Serbestlik Dereceli Sistem Çözümlemesinde olduğu gibi  $a_1=0.05$  olarak programa aktarılmıştır. Sonuç olarak yapının uç noktasının yaptığı deplasmanın zamanla değişimi ve yapının titreşim frekansı elde edilir. Elde edilen deplasman değerleri karşılaştırmalı olarak sonuçlar ve öneriler kısmında sunulmuştur.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

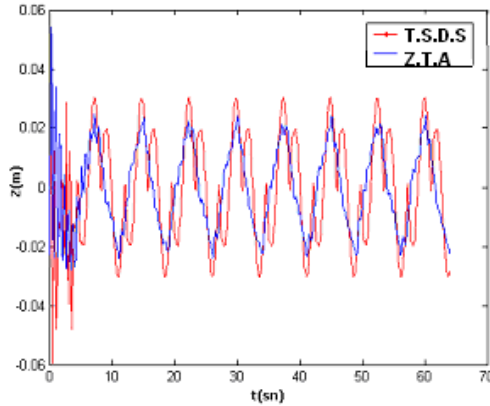
Bu çalışma kapsamında bir düzensiz dalgadan elde edilen birey düzenli dalga ve çoklu düzenli dalgaların yapı üzerinde oluşturdukları dinamik kuvvetler ayrı ayrı hesaplanarak iki farklı yöntemle (T.S.D.S-Z.T.A) dinamik analiz yapılmıştır.



Şekil (6.1) Çoklu sinüs dalgası etkisindeki kazığın tepe noktasının deplasmanı (Yükleme I)

Kolon serbest üst ucundaki titreşimi esas alınarak Şekil (6.1-6.2) karşılaştırması yapılmıştır. Her iki şekilde de üst üste çakıştığı ve titreşim bulgularının birbirlerini doğruladıkları görülmüştür.





Şekil 6.2 Belirgin dalganın etkisindeki kazığın tepe noktasının deplasmanı (Yükleme II)

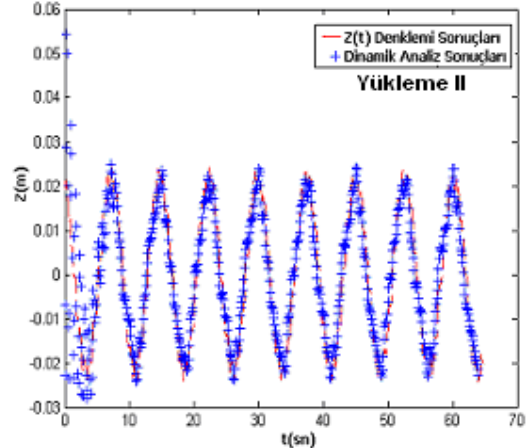
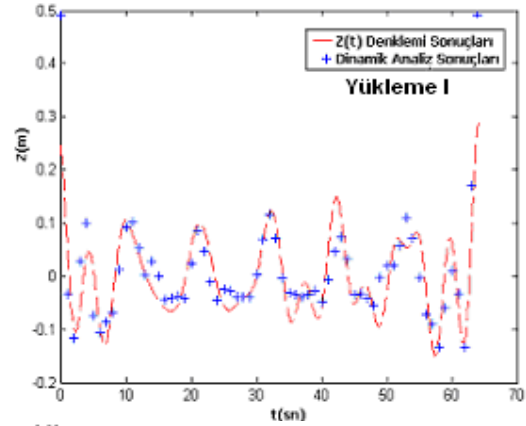
Deplasman değerlerinin; Yüklem I için ( $\delta_{T.S.D.S.} = \pm 0.130m$ ,  $\delta_{Z.T.A.} = \pm 0.100m$ ) Yüklem II için ( $\delta_{T.S.D.S.} = \pm 0.030m$ ,  $\delta_{Z.T.A.} = \pm 0.025m$ ) bandında olduğu gözlenmiştir. Yüklem I durumunda deplasmanları arasındaki farkın %8, Yüklem II durumunda ise %18 olduğu gözlenmiştir. TSDDS ile yapılan analiz sonuçlarının gerçek sonuçlardan yaklaşık %22 hata vereceği belirtilmiştir [10]. Meydana gelen farkların biçim fonksiyonundan kaynaklandığı bilinmektedir. Şekil (6.1-6.2)' de verilen deplasman değerleri ile bulunan Z(t) fonksiyonları sırasıyla, Yüklem I için;

$$Z_{(t)} = 0.08 \sin(0.59t + 1.32) + 0.06 \sin(1.21t + 0.79) + 0.89 \sin(1.33t - 0.12) + 1.89 \sin(1.35t + 2.53) + 1.03 \sin(1.36t + 5.29) \quad (6.1)$$

Yüklem II için ise;

$$Z_{(t)} = 0.02 \sin(0.83t + 1.89) + 0.002 \sin(8.82t - 0.76) \quad (6.2)$$

şeklinde bulunur. Elde edilen bu denklemlerin sistemin yaptığı deplasmanlar ile uyumluluğu Şekil (6.3) görülmektedir.



Şekil 6.3 Uyumluluk Kontrolü

Elde edilen zamanla değişen deplasman denklemleri, konumla değişen deplasman denklemleri ile Denklem (4.1)' yazılarak zamanla ve konumla değişen deplasman denklemleri elde edilir. Yüklem I durumu için bu denklem;

$$v_{(x,t)} = \left(-0.84 \left(\frac{x}{L}\right)^3 + 1.911 \left(\frac{x}{L}\right)^2 - 0.073 \left(\frac{x}{L}\right) - 0.003\right) \left[ \begin{array}{l} 0.08 \sin(0.59t + 1.32) + 0.056 \sin(1.21t + 0.79) + \\ 0.89 \sin(1.33t - 0.12) + 1.89 \sin(1.35t + 2.53) + \\ 1.03 \sin(1.36t + 5.29) \end{array} \right] \quad (6.3)$$

olarak bulunur. Yüklem II durumuna göre konum ve zamanla değişen deplasman denklemleri ise Denklem (6.4)' ile verilmiştir.

$$v_{(x,t)} = -0.854 \left( \frac{x}{L} \right)^3 + 1.881 \left( \frac{x}{L} \right)^2 - 0.027 \left( \frac{x}{L} \right) - 0.001 \quad (6.4)$$
$$0.02 \sin(0.83t + 1.89) + 0.002 \sin(8.82t - 0.76)$$

Sisteme ait doğal frekans değeri ise Denklem (4.7) ile 3.88 1/sn olarak bulunur. İki farklı yükleme durumu için titreşim frekansı ise zamanla değişen tekil yükleme değerlerine Hızlı Fourier Dönüşümü uygulanarak bulunur. Titreşim frekans değerleri Yükleme I için  $\omega=0.59$  1/sn, Yükleme II için  $\omega=0.83$  1/sn olarak bulunur. Her iki yükleme durumu içinde titreşim frekansı ile doğal frekans değerleri eşit olmadığı için rezonans durumu oluşmadığı görülmüştür. Yaklaşık elde edilen şekil fonksiyonu dolayısı ile elde edilen doğal frekans değeri gerçek değerine yukarıdan yaklaşır. Tahmini olarak verilen mod yapısı gerçeğe ne kadar yaklaşır ise bulunan tabii frekansta gerçek değerine o kadar yaklaşır [13].

Titreşim esnasında sistemin mod yapısı şekil fonksiyonu ile gösterilir. Gerçek şekil fonksiyonu hesaplanamadığı için çözümlemeye tahmini bir fonksiyon ele alınır. Tahmini şekil fonksiyonu için mutlak şart sistemin sınır şartlarını sağlamasıdır.

Sonuç olarak düzensiz dalganın çoklu sinüs dalgasıyla süperpoze edilmesinden elde edilen dalganın (Yükleme I), literatürde sıkça kullanılan düzensiz dalgadan elde edilen belirgin genlik ve periyotlu birey dalgaya (Yükleme II) göre daha kritik yükleme koşulu oluşturduğu ve kazığın daha fazla deplasman yapmasına sebep olduğu saptanmıştır. Yükleme II'de elde edilen titreşim frekansı ise Yükleme I'de elde edilene oranla doğal frekansa daha yakın olması nedeniyle rezonans olma ihtimali diğer yöntemle göre kısmen yüksektir denilebilir. Tasarım ve projelendirmede Yükleme I esas alınarak kazık boyutlandırması yoluna gidilirse daha güvenilir bir yol izlenmiş olacaktır.

*Geliş Tarihi: 23/08/2010*

## Kaynaklar

- [1] Goda, Y., Random Seas and Design of Maritime Structures, University of Tokyo Press. Tokyo, Japan. (1985).
- [2] Computer and Engineering (SAP 2000), Software and Consulting, USA. (2003).
- [3] Matlab V 6.5, (2002).
- [4] Design of Support Structures for Offshore Wind Turbines, Jan VAN DER TEMPEL. (2006).
- [5] Chakrabarti, S.K., Hydrodynamics of Offshore Structures, Computational Mechanics Publications, Boston (1986).
- [6] 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, (2006).
- [7] Çakıcı, M., Özdil, T., Oğuzhan, A., Temel İstatistik-II, Özal Matbaası, Dördüncü Baskı, İstanbul (2003).
- [8] CERC, Coastal Engineering Manual, Wave Mechanics, Part II, USA. (2002).
- [9] Ergin, A. Coastal Engineering METU Pres (2009)
- [10] Clough, R.W., Penzien, J., Dynamics of Structures (2nd edition ). Singapore: Mc Graw-Hill, Inc. (1993).
- [11] Leylek, E. İ., Yapı Dinamiği: Depreme Dayanıklı Yapılar, Çağlayan Kitabevi, (2005).
- [12] Maple DEtools V Learning Guide, Waterloo Maple Inc., Canada (2008).
- [13] Celep, Z., Kumbasar N., Yapı Dinamiği (3.Baskı). İstanbul: İTÜ, Rehber Matbaacılık. (2001).

*Kabul Tarihi: 08/11/2010*