

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DİKİLİTAŞIN SALLANMA HAREKETİNİN
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Erine GİNİŞ**

**Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği
Programı : Yapı Mühendisliği**

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hasan BODUROĞLU

HAZİRAN 2005

**DİKİLİTAŞIN SALLANMA HAREKETİNİN
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Erinç GİNİŞ
(501021121)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 9 Mayıs 2005
Tezin Savunulduğu Tarih : 1 Haziran 2005**

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Hasan BODUROĞLU
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Reha ARTAN (İ.T.Ü)
Prof.Dr. Faruk YÜKSELER (Y.T.Ü)

HAZİRAN 2005

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca engin tecrübelerinden yararlandığım, çalışmalarında bana çok yardımcı olan değerli hocam sayın Prof.Dr. Hasan BODUROĞLU'na ve yardımlarını hiç esirgemeyen fakülte sekreterimiz Müh. Gülçin GÜLEY'e teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, tüm yaşamım boyunca bana inanan ve her konuda destekleyen Ailem'e, tez çalışmam sırasında beni yalnız bırakmayan arkadaşlarım Murat ŞAKIR, Ulaş Öner ÖZDEMİR, Aydın YÜKSEL, Çağdaş SEZGİN, Birkan BAYRAK, O.Murat HAMUTÇUOĞLU, Atilla YILMAZ, Gül ÖZER, Çağlar KOÇAK ve Günseli EKAL'e ve ayrıca sıkıntılarımı anlayışla karşılayan patronum Levent GELGİN'e en derin sevgi ve saygılarımı sunarım.

Haziran, 2005

İnşaat Mühendisi
Erinç GİNİŞ

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ	iv
ŞEKİL LİSTESİ	v
SEMBOL LİSTESİ	vi
ÖZET	vii
SUMMARY	viii
1. GİRİŞ	1
1.1. Dikilitaşın Tarihçesi	1
1.2. Rijit Blokların Sallanma Hareketi Hakkında Literatürdeki Benzer Çalışmalar	1
1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	2
2. HAREKET DENKLEMİ	3
3. DİKİLİTAŞIN BOYUTLARI	6
4. RUNGE-KUTTA ŞEMASI VE BİLGİSAYAR PROGRAMLARI	10
4.1. Nümerik Çözüm için Runge-Kutta İntegral Şeması	10
4.2. Bilgisayar Programları ve Çözüm Algoritmaları	12
4.2.1. Deprem Yüklemesinin Nümerik Çözümü İçin Çözüm Algoritması	12
4.2.2. Deprem Yüklemesinin Nümerik Çözümü İçin Bilgisayar Programı	12
4.2.3. Sinüsoid Yüklemenin Nümerik Çözümü İçin Çözüm Algoritması	13
4.2.4. Sinüsoid Yüklemenin Nümerik Çözümü İçin Bilgisayar Programı	13
4.2.5. Sinüsoid Yüklemenin Kapalı Çözümü İçin Çözüm Algoritması	14
4.2.6. Sinüsoid Yüklemenin Kapalı Çözümü İçin Bilgisayar Programı	14
5. ANALİZ	15
5.1. Deprem Kayıtlarıyla Nümerik Çözüm	15
5.1.1. Düzce Depremi Bolu Kaydı	15
5.1.2. Düzce Depremi Düzce Kaydı	15
5.1.3. Kocaeli Depremi Sakarya Kaydı	15
5.1.4. Kocaeli Depremi Gebze Kaydı	16
5.2. Sinüsoid İvme Etkisinde Çözüm	23
5.2.1. Nümerik Çözüm	23
5.2.2. Kapalı Çözüm	29
6. SONUÇLAR	36
KAYNAKLAR	37
EKLER	39
ÖZGEÇMİŞ	51

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1 : Dikilitaşın 4 Yüzü İçin Yapılan Jeodezik Ölçüm Değerleri.....	7
Tablo 3.2 : B Yüzü İçin Kütle Atalet Momenti Hesabı.....	8
Tablo 3.3 : C Yüzü İçin Kütle Atalet Momenti Hesabı.....	8

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Yatay Yer İvmesi İle Sallanma Hareketi.....	3
Şekil 3.1 : Dikilitaşın Geometrisi.....	6
Şekil 3.2 : Kütle Atalet Momenti İçin Hacimlerin Gösterimi.....	7
Şekil 3.3 : Hesaplarda Kullanılan Değerlerin Gösterimi.....	9
Şekil 5.1 : Düzce Depremi Bolu Kaydı İçin Sonuçlar.....	17
Şekil 5.2 : Düzce Depremi Düzce Kaydı İçin Sonuçlar.....	18
Şekil 5.3 : Kocaeli Depremi Sakarya Kaydı İçin Sonuçlar.....	19
Şekil 5.4 : Kocaeli Depremi Gebze Kaydı (0.4 g) İçin Sonuçlar.....	20
Şekil 5.5 : Kocaeli Depremi Gebze Kaydı (0.5 g) İçin Sonuçlar.....	21
Şekil 5.6 : Kocaeli Depremi Gebze Kaydı (0.6 g) İçin Sonuçlar.....	22
Şekil 5.7 : $a=0.55g$ için Sinüsoid Yüklemenin Nümerik Çözümü.....	24
Şekil 5.8 : $a=0.56g$ için Sinüsoid Yüklemenin Nümerik Çözümü.....	25
Şekil 5.9 : $a=0.57g$ için Sinüsoid Yüklemenin Nümerik Çözümü.....	26
Şekil 5.10 : $a=0.5789g$ için Sinüsoid Yüklemenin Nümerik Çözümü.....	27
Şekil 5.11 : $a=0.58g$ için Sinüsoid Yüklemenin Nümerik Çözümü.....	28
Şekil 5.12 : $a=0.55g$ için Sinüsoid Yüklemenin Kapalı Çözümü.....	31
Şekil 5.13 : $a=0.56g$ için Sinüsoid Yüklemenin Kapalı Çözümü.....	32
Şekil 5.14 : $a=0.57g$ için Sinüsoid Yüklemenin Kapalı Çözümü.....	33
Şekil 5.15 : $a=0.5788g$ için Sinüsoid Yüklemenin Kapalı Çözümü.....	34
Şekil 5.16 : $a=0.58g$ için Sinüsoid Yüklemenin Kapalı Çözümü.....	35

SEMBOL LİSTESİ

a	: İvme Genliği
a_h	: Yatay Yer İvmesi
a_v	: Düşey Yer İvmesi
A_i	: Kapalı Çözüm İçin Denklem Katsayıları
b	: Dikilitaşın Taban Genişliğinin Yarısı
e	: Çarpışma Katsayısı
g	: Yerçekimi İvmesi
h	: Dikilitaşın Ağırlık Merkezinin Yerden Yüksekliği
I₀	: Kütle Atalet Momenti
k_{ij}	: Runge-Kutta İterasyon Sabitleri
M	: Kütle
p	: Dairesel Frekans
r	: Narinlik Oranı
R	: Yarıçap
t_i	: Sinüsoid Dalga için Etki Süresi
w	: Açısal Frekans
α	: Kritik Dönme Açısı
θ	: Açısal Dönme
θ'	: Açısal Hız
μ	: Sürtünme Katsayısı
ψ	: Faz

DİKİLİTAŞIN SALLANMA HAREKETİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Güçlü yer sarsıntıları sırasında çeşitli rijit yapılar, örneğin tarihi sütunlar, elektrik trafoları, betonarme radyasyon kalkanları gibi, önemli zararlara neden olan kayma hareketi yapmakta yada sallanma hareketine başlamaktadır. Rijit yapıların yer sarsıntılarına gösterdikleri bu tepkiler birçok araştırmacının ilgisini çekmiş ve bu konu üzerinde çeşitli çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmada da, rijit blokların sallanma hareketi üzerine Türkçe bir kaynak olması amacıyla, Dikilitaşın sallanma hareketi yalnızca yatay yer ivmesi dikkate alınarak MATLAB de yazılmış bir bilgisayar programı yardımıyla incelenmiştir. Dikilitaşın ve zeminin rijit olduğu, sürtünmenin yeteri kadar büyük olduğu ve mermer kaidesinin üzerinde sallanma hareketi yaptığı kabulleri yapılmıştır. İncelemede, p dairesel frekans değerinin en büyük olduğu yüzün boyutları dikkate alınarak bu yüzdeki kütle atalet momenti değeri kullanılmış ve Düzce, Kocaeli depremleri de ayrıca ele alınarak İstanbul'da beklenen tahmini depremin ivme değerine göre deprem dataları büyütülerek Dikilitaşın tepkisi incelenmiştir. Sonuçları daha ayrıntılı irdeleyebilmek için yarım sinüsoid yatay yer ivmesi yüklemeleri altında sallanma hareketinin hem sayısal hem de kapalı çözümü yapılarak Düzce depreminin Bolu kaydında gerçekleştiği gibi ani bir vurma etkisiyle oluşabilecek bir durum da değerlendirilmiştir.

AN ANALYSIS OF ROCKING MOTION FOR THE OBELISK DİKİLİTAŞ

SUMMARY

During strong ground shaking, a variety of rigid structures such as concrete radiation shields, electrical transformers, and other heavy equipment might slide or set up a rocking motion that results in substantial damage. The response of rigid structures to earthquake motions has been an appealing subject to many researchers and they have made various studies in rocking motion. In this study, with the aim of providing a Turkish Source in this subject, rocking motion of Obelisk Dikilitaş was analyzed in a computer program written in MATLAB by taking only horizontal ground acceleration. It was presumed that Dikilitaş and Ground are rigid, friction is large enough and Dikilitaş rocks on its marble pedestal. During the examination, mass moment inertia on the critical side where the p circular frequency takes its own highest value was used and response of the Dikilitaş were analyzed according to probable earthquake which is expected to occur in İstanbul by enlarging the existing earthquake's data. Effects of Düzce and Kocaeli Earthquakes were taken into consideration separately. In order to particularly examine outcomes, half-sine wave loadings were made and rocking motion was examined numerically and analytically for a potential situation may results from sudden impact as such in the Bolu Record of Düzce Earthquake.

1. GİRİŞ

1.1 Dikilitaşın Tarihçesi

M.Ö. 1547 yılında Mısır'ın Hierapolis şehrindeki Karnak Tapınağının önüne dikilmiş iki obeliskten biridir. Pembe Granitten yapılmış ve üzerinde firavun Tutmosis III 'in başarılarını anlatan hiyeroglifler yer almaktadır. MS 390 yılında Bizans imparatoru Theodosius zamanında deniz yoluyla İstanbul'a getirilmiş ve yine o dönemde yapılan mermer bir kaide üzerine yerleştirilmiştir.

Bu mermer kaidenin 4 yüzünde yer alan Bizans kabartmaları o dönem ve dikilitaşın dikilişi hakkında bilgiler vermektedir. Latince ve Grekçe olan bu kitabelere göre Dikilitaş 32 günde iskele yardımıyla dikilmiş ve o dönemde yapılmış 4 bronz küp üzerine yerleştirilmiştir. Yekpare pembe granit olan bu anıt dikilme çalışmaları sırasında kırılmış olup, kırılmadan önceki yüksekliği yaklaşık 29 m olarak tahmin edilmektedir. Şimdiki yüksekliği kaide olmadan 18.60 m, mermer kaide ile birlikte 25 m.dir. Ağırlığının 200 ton olduğu düşünülmektedir.

1.2 Rijit Blokların Sallanma Hareketi Hakkında Literatürdeki Benzer Çalışmalar

Güçlü yer sarsıntıları sırasında çeşitli rijit yapılar, örneğin tarihi sütunlar, elektrik trafoları, betonarme radyasyon kalkanları gibi, önemli zararlara neden olan kayma hareketi yapmakta yada sallanma hareketine başlamaktadır. Rijit yapıların yer sarsıntılarına gösterdikleri bu tepkiler birçok araştırmacının ilgisini çekmiş ve bu konu üzerinde çeşitli çalışmalar yapmışlardır.

Housner [4] bir rijit bloğun sabit ve sinüsoid yatay yer ivmesi etkisinde sallanma hareketini incelemiş ve minimum devrilme ivmesi için çalışmalar yapmıştır. Aslam et al. [1] aynı problem üzerine deneysel ve analitik çalışmalar yapmış, sarsıntı tablası testindeki sonuçlarıyla karşılaştırmak için Lineer olmayan hareket denklemini çözen bir bilgisayar programı geliştirmiştir. Yim et al. [18] olasılıksal bir yaklaşımla ve yapay olarak oluşturulmuş deprem hareketlerini kullanan nümerik bir çalışma ile

sallanma hareketinin sistem parametrelerine karşı ne kadar hassas olduğunu göstermiştir. Ishiyama [5] sallanma tepkisini kayma ve sıçrama hareketleriyle birleştirmiş ve devrilme için bir kriter geliştirmiştir. Spanos ve Koh [12] rijit blokların Harmonik yükleme altındaki tepkilerini detaylı olarak inceleyerek “güvenli” ve “güvensiz” bölgeleri tanımlamış ve sistemin modunun belirlenebilmesi için analitik bir metot geliştirmişlerdir. Sonrasında Hogan [2], [3] onların çalışmalarını ilerleterek sistemin matematiksel yapısını aydınlatmaya çalışmıştır. Tso ve Wong [16], [17] harmonik hareket altındaki rijit blokların tepkisini deneysel olarak incelemiş, sistem frekansının harmonik dalğanın genliğine karşı çok hassas olduğunu bulmuşlardır. Shenton ve Jones [13], [14], [15] yüksek sürtünme katsayısı etkisindeki uzun bokların sallanma hareketine eğilimli olduğunu, düşük sürtünme katsayısı etkisindeki kısa blokların ise kayma hareketine yatkın olduğunu göstermişlerdir. Kadakal, U. [6] Rijit Blokların sallanması analitik ve deneysel olarak incelemiş, blok dairesel frekansının, p , narinlik oranının, r , çarpışma katsayısının, e , harekete etkilerini araştırmış, geliştirdiği bilgisayar programı ile dikilitaşın sallanma tepkisinin hem nümerik hem de lineer çözümlerini sunmuştur. Pompei, Scalia ve Sumbatyan [10] yatay yer ivmesi etkisindeki blokların sabit ve kayma modları için bir kriter formüle etmişlerdir. Makris ve Roussos [8] dairevi yatay yer ivmeleri altında elektrik ekipmanlarının sallanma hareketini incelemiş ve Housner [4] tarafından yapılan çalışmadaki hataları göstermişlerdir.

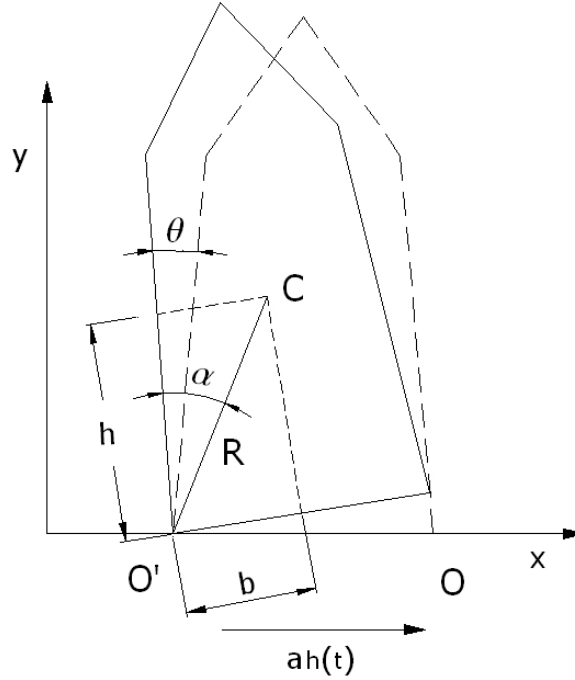
1.3 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Rijit blokların sallanma hareketi üzerine Türkçe bir kaynak olması amacıyla bu çalışmada, Dikilitaşın sallanma hareketi Düzce ve Kocaeli depremleri de göz önüne alınarak İstanbul’da beklenen tahmini depreme göre MATLAB [9] de yazılan bilgisayar programı yardımıyla incelenmiş ve bu deprem etkilerini daha ayrıntılı irdeleyebilmek için sinüsoid yatay yer ivmesi altında sallanma hareketinin hem nümerik hem de kapalı çözümü yapılmıştır.

2. HAREKET DENKLEMİ

Dikilitaşın hareket denklemi aşağıdaki kabuller yapılarak oluşturulmuştur:

- Dikilitaş ve Zemini rijittir.
- Zemin ile Dikilitaş arasındaki sürtünme katsayısı sallanma hareketi yapacak kadar büyüktür ($\mu = b/h$) [1].
- Dikilitaşın O ve O' (Şekil 1) noktaları arasında sallanma hareketi yapmaktadır.
- En az bir köşesi her zaman zemin ile temas halinde olacaktır.
- Düşey yer ivmesi sıfır olarak alınacaktır ($a_v(t) = 0$).



Şekil 2.1 Yatay Yer İvmesi İle Sallanma Hareketi

Sallanma hareketinin başlayabilmesi için gereken minimum yer ivmesi statik analizle bulunabilir.

$$\frac{a_h(t)}{g} \geq \tan(\alpha) \quad (2.1)$$

Hareketin başlamasıyla, Dikilitaş O ve O' arasında sallanma hareketi yapacaktır. Pozitif yatay yer ivmesi etkisiyle, $a_g(t)$, O' köşesine doğru negatif dönme hareketi yapacak ve eğer devrilmez ise O noktasına doğru pozitif dönme hareketi yapacak ve böyle devam edecektir. Buna göre ağırlık merkezinden O ve O' noktalarına göre moment eşitliği yazılırsa, hareket denklemleri:

$$I_o \ddot{\theta} + MgR \sin(-\alpha - \theta) = -Ma_h R \cos(-\alpha - \theta) \quad \theta < 0 \quad (2.2)$$

$$I_o \ddot{\theta} + MgR \sin(+\alpha - \theta) = -Ma_h R \cos(+\alpha - \theta) \quad \theta > 0 \quad (2.3)$$

olarak bulunur [1], [2], [3], [4], [6], [8], [12], [18].

Burada I_o atalet momenti olup dikdörtgen bloklar için $I_o = \frac{4}{3}MR^2$ 'dir. Fakat Dikilitaşın şekli dikdörtgenden farklı olduğu için atalet momenti ölçülen boyutlarından hesaplanacaktır.

α ise kritik dönme açısı olup

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{1}{r}\right) \quad (2.4)$$

olarak hesaplanır. Bu formüldeki r narinlik oranı olup

$$r = \frac{h}{b} \quad (2.5)$$

olarak bulunur.

Bu iki denklem bir signum fonksiyonu yardımıyla tek bir fonksiyon olarak ifade edilebilir;

$$\ddot{\theta} = -p^2 \left\{ \sin(\alpha \operatorname{sgn}(\theta) - \theta) + \frac{a_h}{g} \cos(\alpha \operatorname{sgn}(\theta) - \theta) \right\} \quad (2.6)$$

Bu denklemdeki p bloğun dairesel frekansı olup şu şekilde tanımlanır;

$$p^2 = \frac{MgR}{I_o} \quad (2.7)$$

Yatay yer ivmesinin, $a_h(t)$, pozitif olduğu sırada blok O köşesinden O' ne doğru hareket edecek ve bu esnada $\theta < 0$ olacağından $\text{sgn}(\theta) = -1$ değerini, O' den O köşesine doğru giderken de $\theta > 0$ olacağından $\text{sgn}(\theta) = +1$ değerini alır.

Bloğun sallanması esnasında gerçekleşen her çarpışma sırasında bir enerji kaybı olur. Bu kayıp çarpışmadan hemen önce ve hemen sonraki momentumun korunumu kuralıyla hesaplanır. [18]

$$I_o \dot{\theta}_1 - M \dot{\theta}_1 2bR \sin(\alpha) = I_o \dot{\theta}_2 \quad (2.8)$$

Burada $\dot{\theta}_1$ çarpışmadan hemen önceki, çarpışmadan hemen sonraki açısal hızlardır. Çarpışmadan önceki ve sonraki kinetik enerjilerin oranı şöyle ifade edilir;

$$e^2 = \frac{\dot{\theta}_2^2}{\dot{\theta}_1^2} \quad (2.9)$$

Çarpışma Katsayısı, e , ise

$$e = \sqrt{1 - \frac{3}{2} \sin^2(\alpha)} \quad (2.10)$$

şeklinde tanımlanır ve çarpışma esnasında açısal hızdaki değişim şöyle ifade edilir;

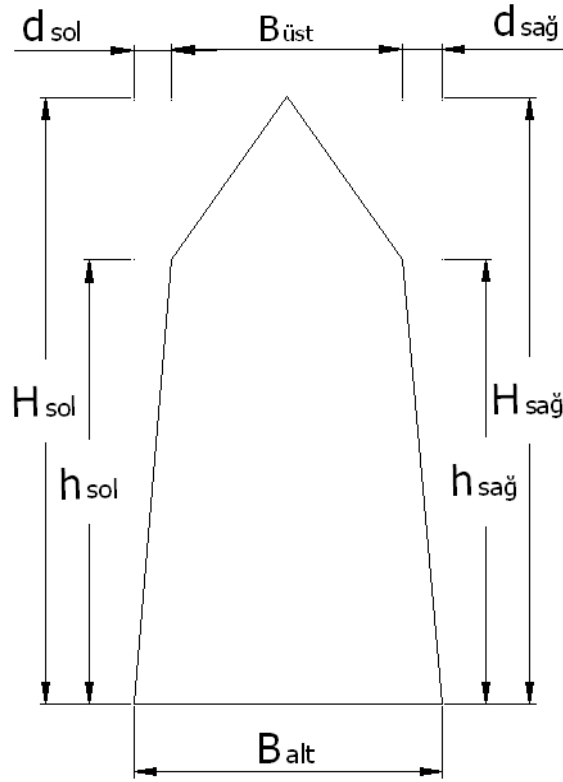
$$\dot{\theta}_2 = e \dot{\theta}_1 \quad 0 \leq e \leq 1 \quad (2.11)$$

Yukarıda tanımlanan hareket denklemleri literatürde iyi bilinmektedir ve değişen α değerleri için geçerlidirler. Uzun narin bloklar için, kritik dönme açısı, $\alpha = \tan^{-1}(b/h)$, çok küçük olacağından hareket denklemleri $\sin(\pm\alpha - \theta) = \pm\alpha - \theta$ ve $\cos(\pm\alpha - \theta) = 1$ kabulüyle lineer hale dönüştürülebilir.

Bu lineer denklemlerin dairevi ivme dalgalarına tabi olan rijit bloklar için kapalı çözümleri Housner [4] tarafından yalnızca pozitif dönme hareketi için ($\theta > 0$) ve Hogan [3] tarafından da pozitif ve negatif dönmeler için sunulmuştur.

3. DİKİLİTAŞIN BOYUTLARI

Dikilitaşın geometrisi jeodezik ölçümler ile elde edilmiş ve Tablo 2.1 de gösterilmiştir. Sallanma hareketinde kullanılacak geometriye bağlı olan değerler (I_o atalet momenti, R moment kolu uzunluğu, p bloğun dairesel frekansı ve r narinlik katsayısı) seçilen kritik yüzey için hesaplanmıştır [6].



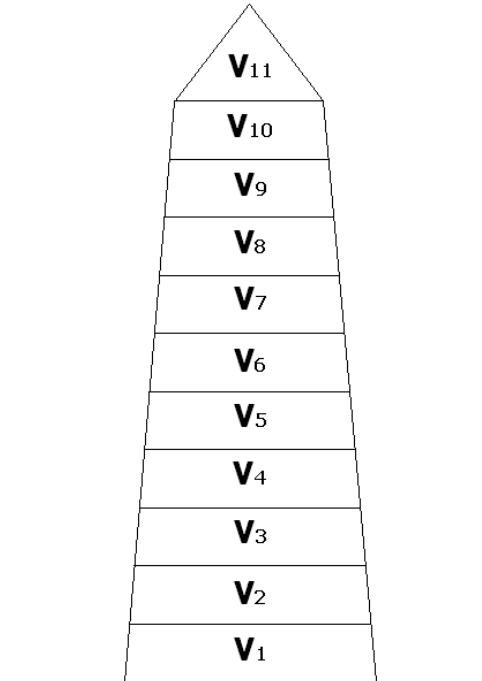
Şekil 3.1 Dikilitaşın Geometrisi

Tablo 3.1 Dikilitaşın 4 Yüzü İçin Yapılan Jeodezik Ölçüm Değerleri

Yüz	H _{sol}	H _{sağ}	h _{sol}	h _{sağ}	B _{alt}	B _{üst}	d _{sol}	d _{sağ}
Ayasofya Müzesi (A)	18.43	18.59	16.55	16.60	2.40	1.63	0.35	0.42
İbrahim Paşa Sarayı (B)	19.01	18.92	16.73	16.64	2.20	1.64	0.25	0.31
Örme Sütun (C)	18.84	18.87	16.57	16.60	2.55	1.95	0.28	0.35
Sultanahmet Camii (D)	18.48	18.51	16.51	16.61	2.27	1.71	0.27	0.29

Tablo 3.1 de gösterilen ölçüm değerleri neticesinde İbrahim Paşa Sarayı (B) yüzünde B_{alt} taban genişliği 2.20 m olup r narinlik oranı diğer yüzlere kıyasla en büyük değerini almakta ve dolayısıyla α kritik dönme açısı en küçük olmaktadır. Örme Sütun (C) yüzünde ise B_{alt} taban genişliği en büyük olup 2.55 m'dir. Bu yüzde r narinlik oranı diğer yüzlere kıyasla en küçük değerini almakta ve dolayısıyla α kritik dönme açısı en büyük olmaktadır.

Harekete etkileyen diğer önemli faktör ise p dairesel frekansıdır. Dairesel frekansın bulunması için gerekli olan I_o kütle atalet momenti, dikilitaşın B ve C yüzlerinin Şekil 2.2 de gösterildiği gibi tepe bölümüne ek olarak 10 eşit yüksekliğe bölünmesi ile hesaplanmıştır. Hesaplamalar Tablo 2.2 ve Tablo2.3 de gösterilmiştir.

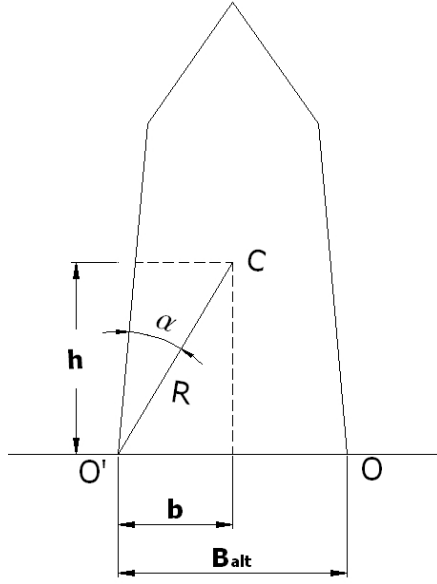
**Şekil 3.2** Kütle Atalet Momentinin Hesabı İçin Hacimlerin Gösterimi

Tablo 3.2 B Yüzü İçin Kütle Atalet Momenti Hesabı

	I <i>Hacim</i>	II <i>Hacim (%)</i>	III <i>R</i>	IV <i>I</i>	V=IV + III² <i>I+R²</i>	VI=V x II <i>(I+R²) x M</i>
V₁	7.832	0.123	1.378	0.623	2.521	0.310
V₂	7.433	0.117	2.722	0.603	8.012	0.937
V₃	7.045	0.111	4.293	0.583	19.013	2.110
V₄	6.667	0.105	5.913	0.564	35.527	3.730
V₅	6.299	0.099	7.550	0.546	57.548	5.697
V₆	5.943	0.094	9.196	0.528	85.094	7.999
V₇	5.596	0.088	10.846	0.511	118.147	10.397
V₈	5.260	0.083	12.498	0.494	156.694	13.006
V₉	4.934	0.078	14.153	0.477	200.784	15.661
V₁₀	4.619	0.073	15.808	0.462	250.355	18.276
V₁₁	1.865	0.029	17.328	0.352	300.611	8.718
	63.493	1.000				I₀ = 86.841

Tablo 3.3 C Yüzü İçin Kütle Atalet Momenti Hesabı

	I <i>Hacim</i>	II <i>Hacim (%)</i>	III <i>R</i>	IV <i>I</i>	V=IV + III² <i>I+R²</i>	VI=V x II <i>(I+R²) x M</i>
V₁	10.529	0.122	1.521	0.758	3.071	0.375
V₂	10.009	0.116	2.758	0.732	8.477	0.983
V₃	9.502	0.110	4.323	0.707	19.395	2.133
V₄	9.008	0.105	5.929	0.682	35.835	3.763
V₅	8.528	0.099	7.558	0.658	57.781	5.270
V₆	8.060	0.094	9.198	0.634	85.237	8.012
V₇	7.606	0.088	10.845	0.612	118.226	10.404
V₈	7.165	0.083	12.494	0.589	156.689	13.005
V₉	6.737	0.078	14.147	0.568	200.705	15.655
V₁₀	6.322	0.073	15.801	0.547	250.218	18.266
V₁₁	2.556	0.030	17.147	0.307	294.327	8.830
	80.022	1.000				I₀ = 87.146



Şekil 3.3 Hesaplarda Kullanılan Değerlerin Gösterimi

B yüzü için hesap değerleri:

$$b = \frac{B_{alt}}{2} = 1.10m, h = 7.782m, R = 7.859m, I_o = 86.841 \times M$$

olarak hesaplanmış ve bu sonuçlara göre p ve r değerleri şöyle bulunmuştur:

$$p = \sqrt{\frac{MgR}{I_o}} \approx 0.942 \quad r = \frac{h}{b} \approx 7.075$$

C yüzü için hesap değerleri:

$$b = \frac{B_{alt}}{2} = 1.275m, h = 7.317m, R = 7.427m, I_o = 87.146 \times M$$

olarak hesaplanmış ve bu sonuçlara göre p ve r değerleri şöyle bulunmuştur:

$$p = \sqrt{\frac{MgR}{I_o}} \approx 0.914 \quad r = \frac{h}{b} \approx 5.739$$

Hesaplar sonucunda p dairesel frekans en büyük değerini B yüzünde, r narinlik oranı ise en büyük değerini C yüzünde aldığı görülmüştür. Bu iki yüzde p dairesel frekanslarının birbirine çok yakın olması B yüzünü en kritik yüz yapmaktadır. Dikilitaşın hareket analizi bu yüze ait değerler göz önüne alınarak yapılmıştır [6].

4. RUNGE-KUTTA ŞEMASI VE BİLGİSAYAR PROGRAMLARI

4.1 Nümerik Çözüm İçin Runge-Kutta İntegral Şeması

Hareket denkleminin lineer olmayan karakterinden dolayı nümerik bir çözüm gereklidir. Bu çözüm için yaygın olarak kullanılan Runge-Kutta metodu seçilmiştir. Daha yakın sonuçlar için 4. derece Runge-Kutta çözümü yapılmıştır. İntegral şeması adi diferansiyel denklemler için şöyledir:

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = f(t, x) \quad (4.1)$$

olmak üzere çözüm

$$x_{n+1} = x_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (4.2)$$

eşitliğinin iterasyonu ile bulur. Buradaki k_1, k_2, k_3, k_4 iterasyon sabitleridir.

$$\begin{aligned} k_1 &= h \times f(t_n, x_n) \\ k_2 &= h \times f\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{k_1}{2}\right) \\ k_3 &= h \times f\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{k_2}{2}\right) \\ k_4 &= h \times f(t_n + h, x_n + k_3) \end{aligned} \quad (4.3)$$

Fakat sallanma hareketi denklemleri gibi 2. dereceden diferansiyel denklemler için Runge-Kutta iki aşamalı olarak uygulanır. Bunun için hareket denklemleri yardımcı bir fonksiyon ile iki ayrı denkleme ayrılır ve Dikilitaşın açısal ivmesi sanki bu fonksiyonun hızıymış gibi tanımlanır [11].

$$\dot{\theta}(t) = y(t) \quad (4.4)$$

$$\dot{y}(t) = -p^2 \left\{ \sin(\alpha \operatorname{sgn}[\theta(t)] - \theta(t) + \frac{a_h}{g} \cos(\alpha \operatorname{sgn}[\theta(t)] - \theta(t)) \right\} \quad (4.5)$$

Dikilitaşın hareketi de 2. dereceden lineer olmayan bir diferansiyel denklem olduğu için, Denklem 3.4 ve Denklem 3.5’den hareketle, bilgisayar programında kullanılan Runge-Kutta çözüm şeması şöyle uygulanmıştır [6]:

$$\dot{\theta} = y1 \quad (4.6)$$

$$\ddot{\theta} = y2 \quad (4.7)$$

$$\dot{y}2 = y1 \quad (4.8)$$

$$y2_i = y2_{i-1} + (k_{11} + 2k_{21} + 2k_{31} + k_{41}) \frac{\Delta t}{6} \quad (4.9)$$

$$y1_i = y1_{i-1} + (k_{12} + 2k_{22} + 2k_{32} + k_{42}) \frac{\Delta t}{6} \quad (4.10)$$

$$k_{11} = y1_{i-1} \quad (4.11)$$

$$k_{21} = y1_{i-1} + \frac{\Delta t}{2} k_{12} \quad (4.12)$$

$$k_{31} = y1_{i-1} + \frac{\Delta t}{2} k_{22} \quad (4.13)$$

$$k_{41} = y1_{i-1} + \Delta t k_{32} \quad (4.14)$$

$$k_{12} = f(t_{i-1}, y2_{i-1}) \quad (4.15)$$

$$k_{22} = f(t_{i-1} + \frac{\Delta t}{2}, y2_{i-1} + \frac{\Delta t}{2} k_{12}) \quad (4.16)$$

$$k_{32} = f(t_{i-1} + \frac{\Delta t}{2}, y2_{i-1} + \frac{\Delta t}{2} k_{22}) \quad (4.17)$$

$$k_{42} = f(t_{i-1} + \Delta t, y2_{i-1} + \Delta t k_{32}) \quad (4.18)$$

Nümerik çözüm için ayrıca MATLAB’in dahili fonksiyonları ODE45 ve ODE15S de kullanılabilir. ODE45 Runge-Kutta formülasyonuna dayalıdır ve genellikle çoğu problemin çözümüne başlarken kullanılabilecek en iyi fonksiyondur. ODE15S ise değişken dereceli fonksiyonlar için nümerik diferansiyel formüllerini kullanan çok adımlı bir çözücü fonksiyondur ve ODE45 hatalı sonuçlar verdiğiinde kullanılabilir [9].

4.2 Bilgisayar Programları ve Çözüm Algoritmaları

Daha önce MATLAB’da [9] yazılmış olan program [6] üzerinde revizyon yapılmış ve sinüsoid ivme yüklemelerinin hem nümerik hem de kapalı çözümü için yeniden düzenlenmiştir.

4.2.1 Deprem Yüklemesinin Nümerik Çözümü İçin Çözüm Algoritması

MATLAB’da [9] yazılan program şu adımları izlemektedir:

1. Yatay yer ivmesinin mutlak değerinin Denklem 2.1 de belirtilen sınırı aşmasıyla sallanma hareketi başlar.
2. Sallanma hareketini başlatan ivme değeri pozitif ise $\text{sgn}(\theta)=-1$, negatif ise $\text{sgn}(\theta)=+1$ değerini alır.
3. Denklem 2.6’nın adım integrasyonuna başlanır.
4. İntegrasyon θ ’nın işaret değiştirdiği t_i anına kadar devam eder. Bu anda t_i ve t_{i-1} 50 aralığa bölünür. Böylece θ ’nın sıfır’a mümkün olduğunca yakın olduğu çarpışma anı olarak kabul edilecek t_j zamanına kadar devam edilir.
5. Çarpışmadan hemen sonraki açısal hız Denklem 2.11 ile hesaplanır.
6. t_j anında $\dot{\theta} = \dot{\theta}_j^+$ ve $\theta = 0$ olarak alınır ve $\text{sgn}(\theta)$ ’nin işaret değiştirdiği kabulüyle devam edilir.
7. Yukarıda özetlenen Madde 4 ve 7 arasındaki basamaklar $\theta/\alpha = \pm 1$ değerini alıncaya kadar tekrarlanır. $\theta/\alpha = \pm 1$ olduğu anda devrilmenin gerçekleştiği kabulüyle hesaplama durdurulur.

4.2.2 Deprem Yüklemesinin Nümerik Çözümü İçin Bilgisayar Programı

Nümerik çözüm yapan program **EK 1**’de verilmiştir.

4.2.3 Sinüsoid İvme Yüklemesinin Nümerik Çözümü İçin Çözüm Algoritması

MATLAB’da [9] yazılan program şu adımları izlemektedir [6]:

1. Yatay yer ivmesinin mutlak değerinin Denklem 2.1 de belirtilen sınırı aşmasıyla sallanma hareketi başlar.
2. Sallanma hareketini başlatan ivme değeri pozitif ise $\text{sgn}(\theta)=-1$, negatif ise $\text{sgn}(\theta)=+1$ değerini alır.
3. Denklem 2.6’nın adım integrasyonuna başlanır.
4. İntegrasyon θ ’nın işaret değiştirdiği t_i anına kadar devam eder. Bu anda Bölüm 3.2.1 Madde 4’ün aksine zaman aralığı çok küçük bir değer seçildiğinden bölme işlemine gerek görülmemiştir.
5. Çarpışmadan hemen sonraki açısal hız Denklem 2.11 ile hesaplanır.
6. t_i çarpışma anında $\dot{\theta} = \dot{\theta}_i^+$ ve $\theta = \theta_i$ olarak alınır ve $\text{sgn}(\theta)$ ’nin işaret değiştirdiği kabulüyle devam edilir.
7. Yukarıda özetlenen Madde 4 ve 7 arasındaki basamaklar $\theta/\alpha = \pm 1$ değerini alıncaya kadar tekrarlanır. $\theta/\alpha = \pm 1$ olduğu anda devrilmenin gerçekleştiği kabulüyle hesaplama durdurulur.

4.2.4 Sinüsoid İvme Yüklemesinin Nümerik Çözümü İçin Bilgisayar Programı

Nümerik çözüm yapan program EK 2’de verilmiştir.

4.2.5 Sinüsoid İvme Yüklemesinin Kapalı Çözümü İçin Çözüm Algoritması

MATLAB da yazılan program şu adımları izlemektedir:

1. Yatay yer ivmesinin mutlak değerinin Denklem 2.1 de belirtilen sınırı aşmasıyla sallanma hareketi başlar.
2. Sallanma hareketini başlatan ivme değeri pozitif ise $\text{sgn}(\theta)=-1$, negatif ise $\text{sgn}(\theta)=+1$ değerini alır.
3. Denklem 2.6'nın adım integrasyonuna başlanır.
4. Sinüsoid İvmenin 0 olduğu andan itibaren Dikilitaş o anda sahip olduğu açısal hız ve yer değiştirme değerleriyle serbest titreşime başlayacaktır. Bu sebeple ivmenin 0 olduğu t_i anından itibaren hareket denklemi ve katsayıları değiştirilir.
5. İntegrasyon θ 'nın işaret değiştirdiği t_i anına kadar devam eder. Bu anda Bölüm 3.2.1 Madde 4'ün aksine zaman aralığı çok küçük bir değer seçildiğinden bölme işlemine gerek görülmemiştir.
6. Çarpışmadan hemen sonraki açısal hız Denklem 2.11 ile hesaplanır.
7. t_i çarpışma anında $\dot{\theta} = \dot{\theta}_i^+$ ve $\theta = \theta_i$ olarak alınır ve $\text{sgn}(\theta)$ 'nin işaret değiştirdiği kabulüyle devam edilir.
8. Yukarıda özetlenen Madde 4 ve 7 arasındaki basamaklar $\theta/\alpha = \pm 1$ değerini alıncaya kadar tekrarlanır. $\theta/\alpha = \pm 1$ olduğu anda devrilmenin gerçekleştiği kabulüyle hesaplama durdurulur.

4.2.6 Sinüsoid İvme Yüklemesinin Kapalı Çözümü İçin Bilgisayar Programı

Kapalı çözüm yapan program Ek 3'te verilmiştir.

5. ANALİZ

5.1 Deprem Kayıtlarıyla Nümerik Çözüm

5.1.1 Düzce Depremi Bolu Kaydı

YER : BOLU BAYINDIRLIK VE İSKAN MÜD
KOORDİNATLAR : 40.745N- 31.610
TARİH : 12/11/99 16:57:22 (GMT)
YÖN : +T KUZEY
VERİ SAYISI : 5590
ZAMAN ARALIĞI : 0.01
MAKS. DEĞER (mG) : 805.878000
DEP. MERKEZİ KOORD. : 40.74N - 31.21E
DEPREMİN BÜYÜKLÜĞÜ : 7.2 Md

5.1.2 Düzce Depremi Düzce Kaydı

YER : DÜZCE METEOROLOJİ İSTASYONU
KOORDİNATLAR : 40.850N- 31.170
TARİH : 12/11/1999 16:57:20 (GMT)
YÖN : +L BATI
VERİ SAYISI : 5182
ZAMAN ARALIĞI : 0.005
MAKS. DEĞER (mG) : 513.780300
DEP. MERKEZİ KOORD. : 40.74N - 31.21E
DEPREMİN BÜYÜKLÜĞÜ : 7.2 Md

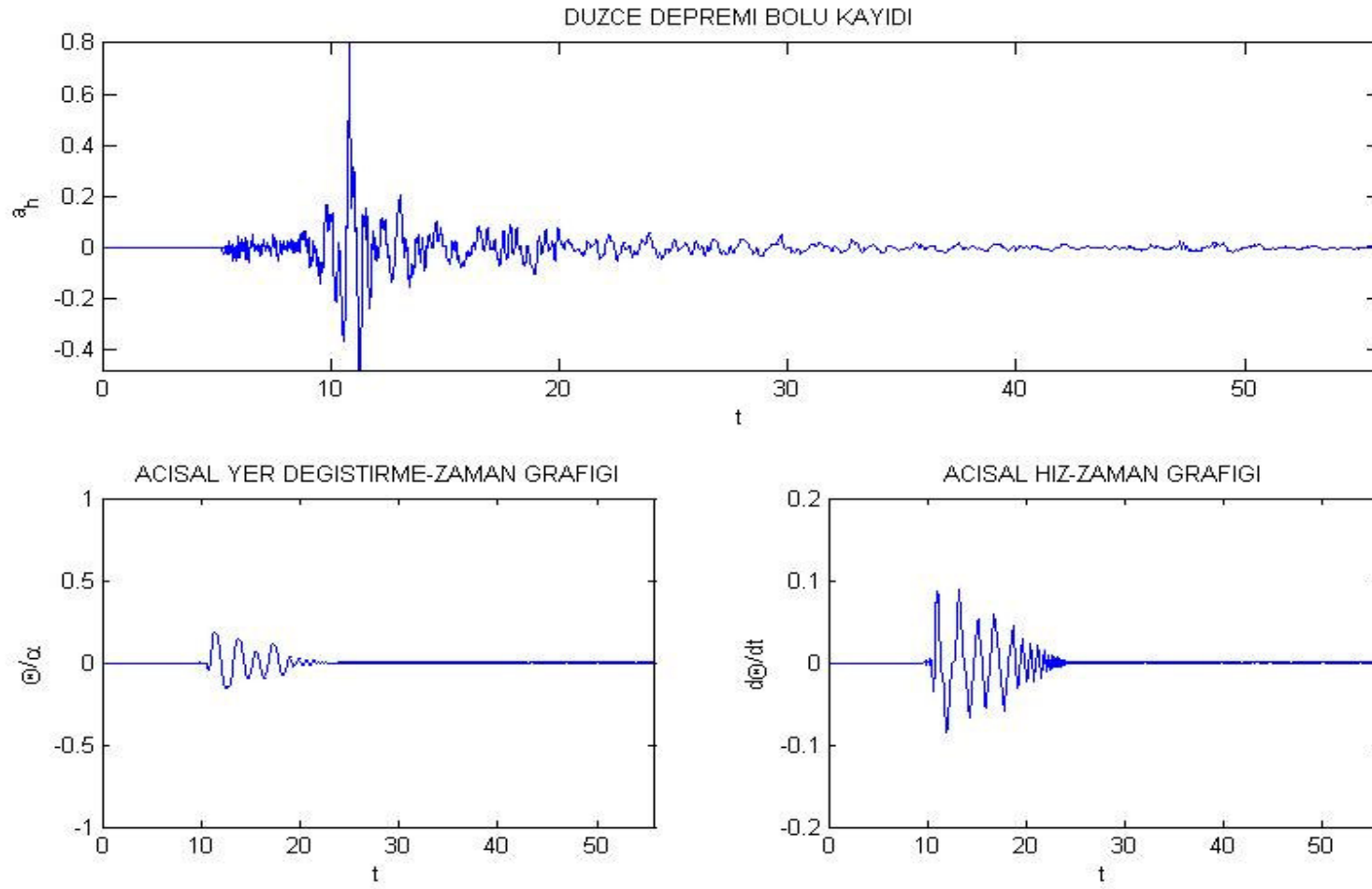
5.1.3 Kocaeli Depremi Sakarya Kaydı

YER : SAKARYA BAYINDIRLIK ve İSKAN MÜD.
KOORDİNATLAR : 40.737N- 30.384E
TARİH : 17/08/1999 00:01:51 (GMT)
YÖN : +T DOĞU
VERİ SAYISI : 38881
ZAMAN ARALIĞI : 0.01
MAKS. DEĞER (mG) : 407.013245
DEP. MERKEZİ KOORD. : 40.70N - 29.91E
DEPREMİN BÜYÜKLÜĞÜ : 6.70Md

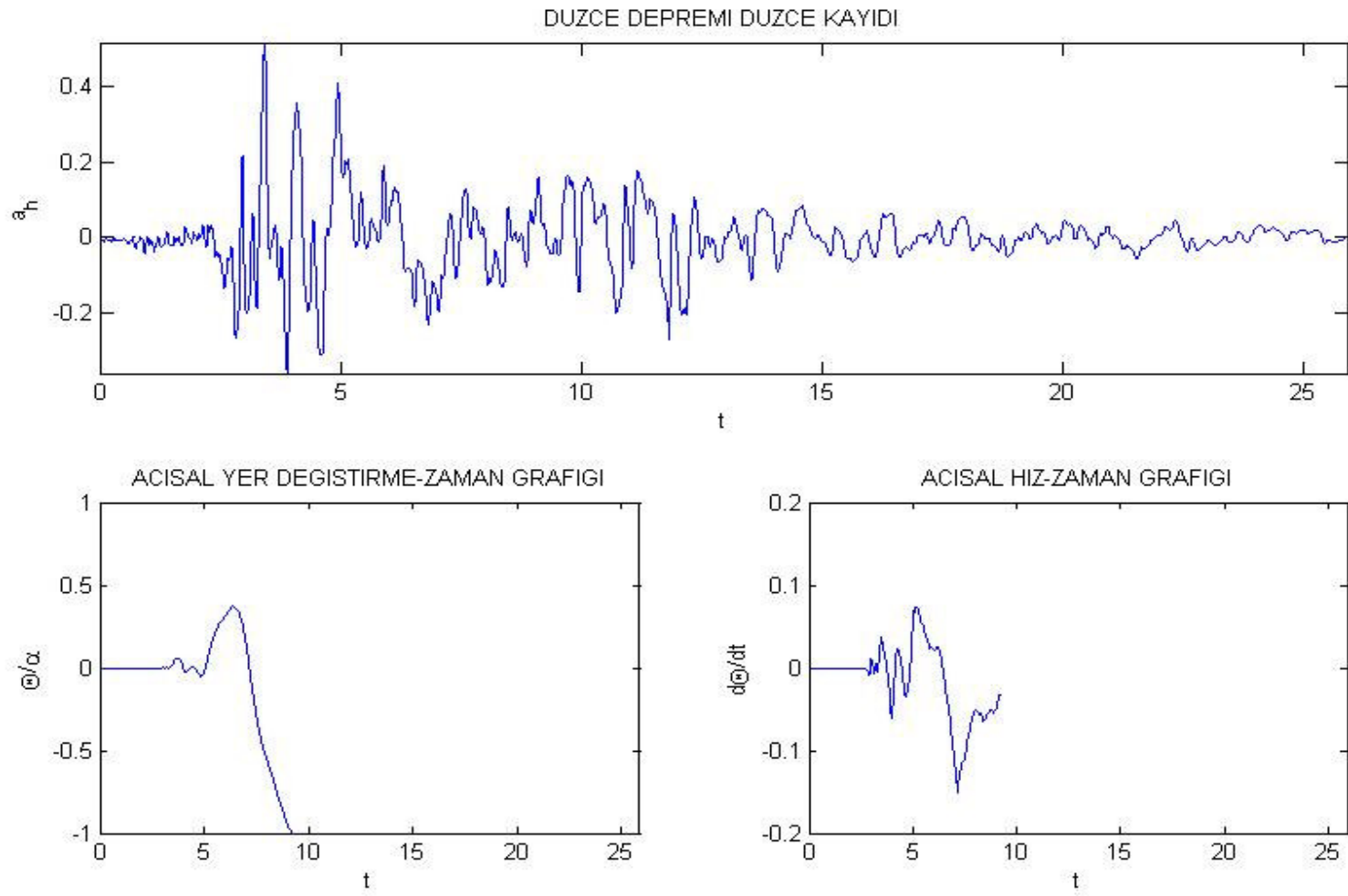
5.1.4 Kocaeli Depremi Gebze Kaydı

YER : GEBZE TÜBİTAK MARMARA ARAST. MERK.
KOORDİNATLAR : 40.820N- 29.440
TARİH : 17/ 8/1999 00:01:39 (GMT)
YÖN : +T BATI
VERİ SAYISI : 9528
ZAMAN ARALIĞI : 0.005
MAKS. DEĞER (mG) : 141.453700
DEP. MERKEZİ KOORD. : 40.79N - 29.86E
DEPREMİN BÜYÜKLÜĞÜ : 6.70 ML

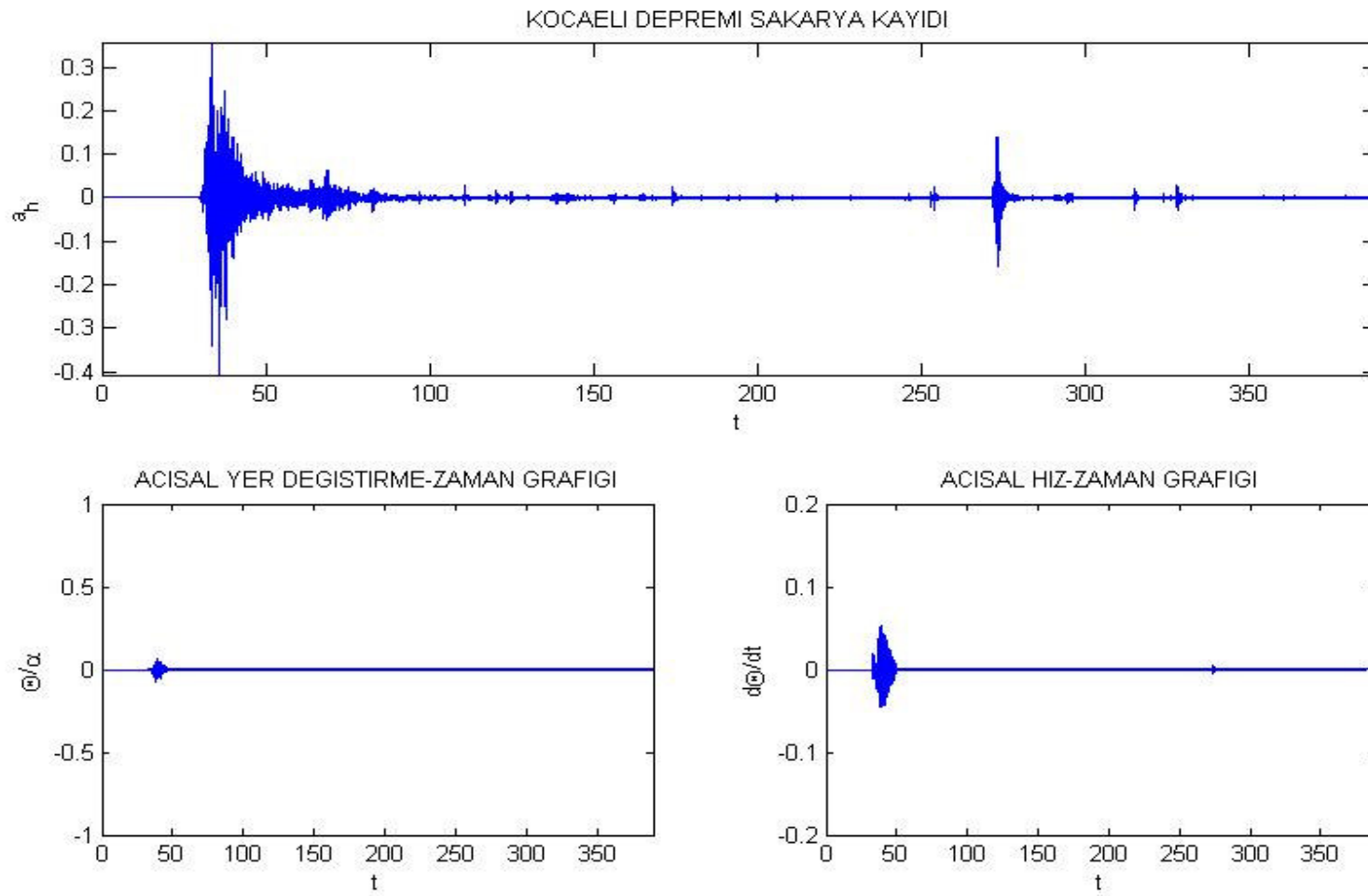
Bu kayıt çok küçük olduğundan İstanbul'da beklenen muhtemel depremin Dikilitaş üzerindeki etkisini incelemek için Gebze kaydı maksimum değeri 0.4 g, 0.5 g ve 0.6 g olacak şekilde büyütülerek programa yüklenmiştir.



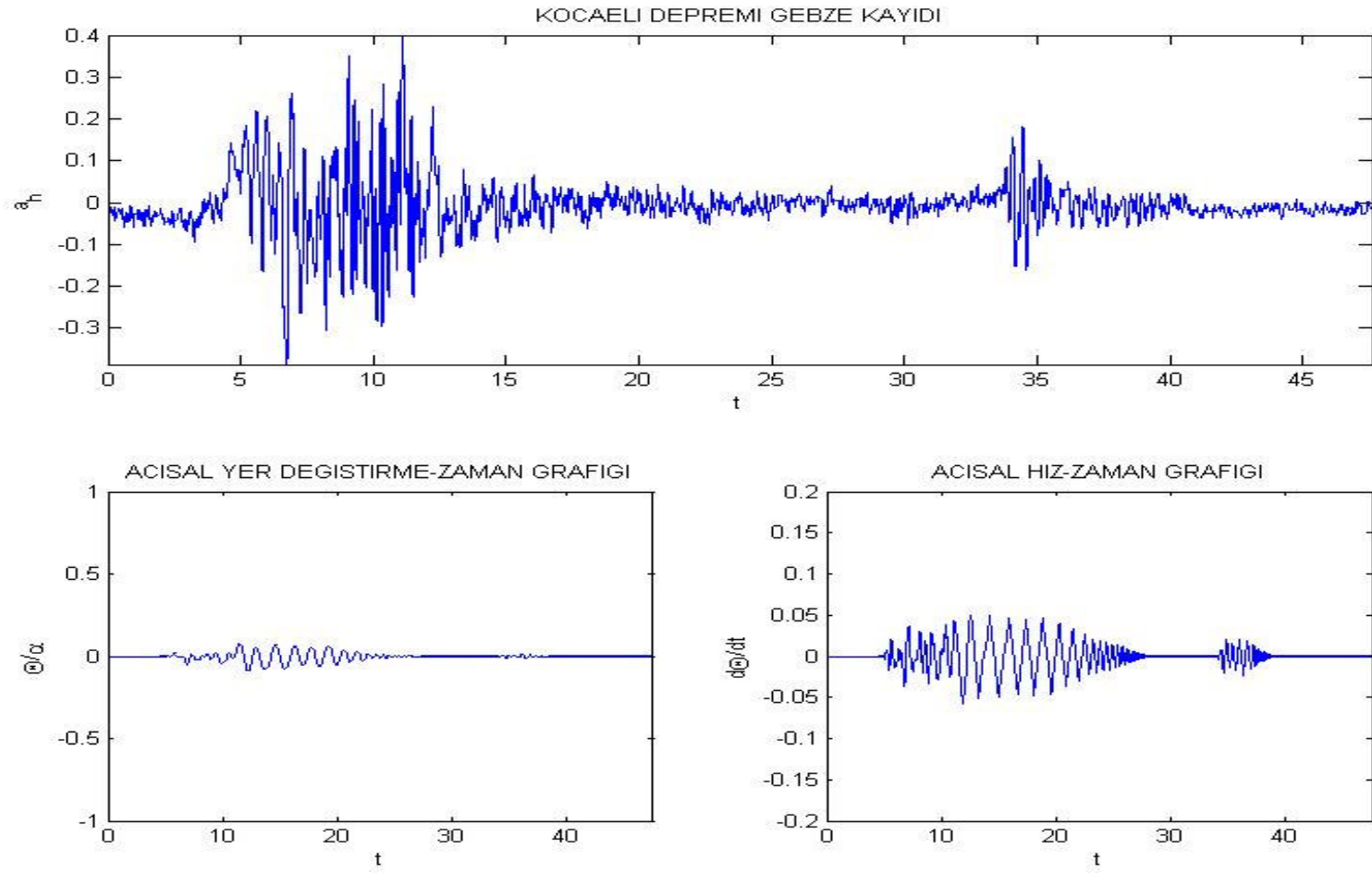
Şekil 5.1 Düzce Depremi Bolu Kaydı İçin Grafikler



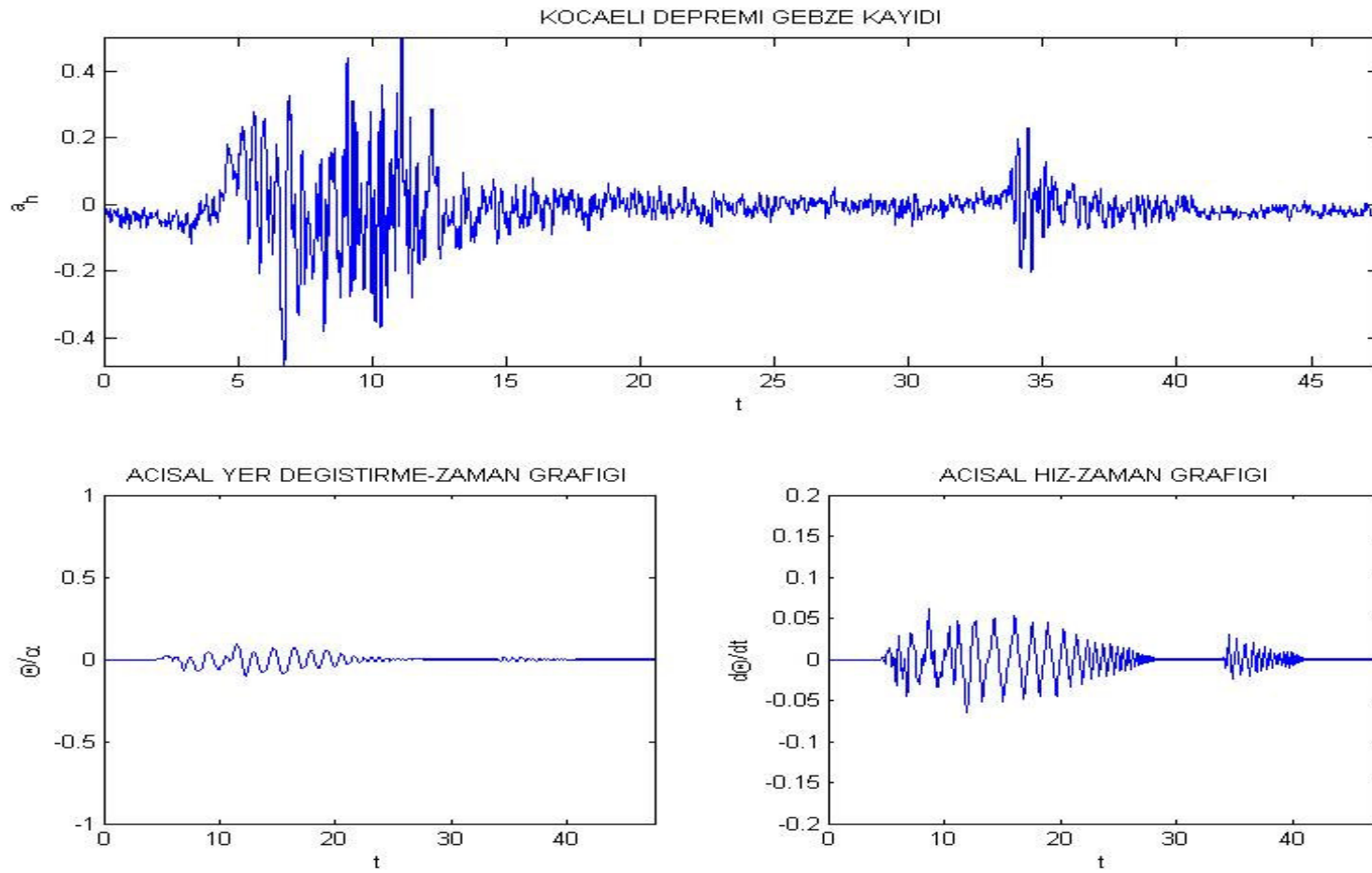
Şekil 5.2 Düzce Depremi Düzce Kaydı İçin Grafikler



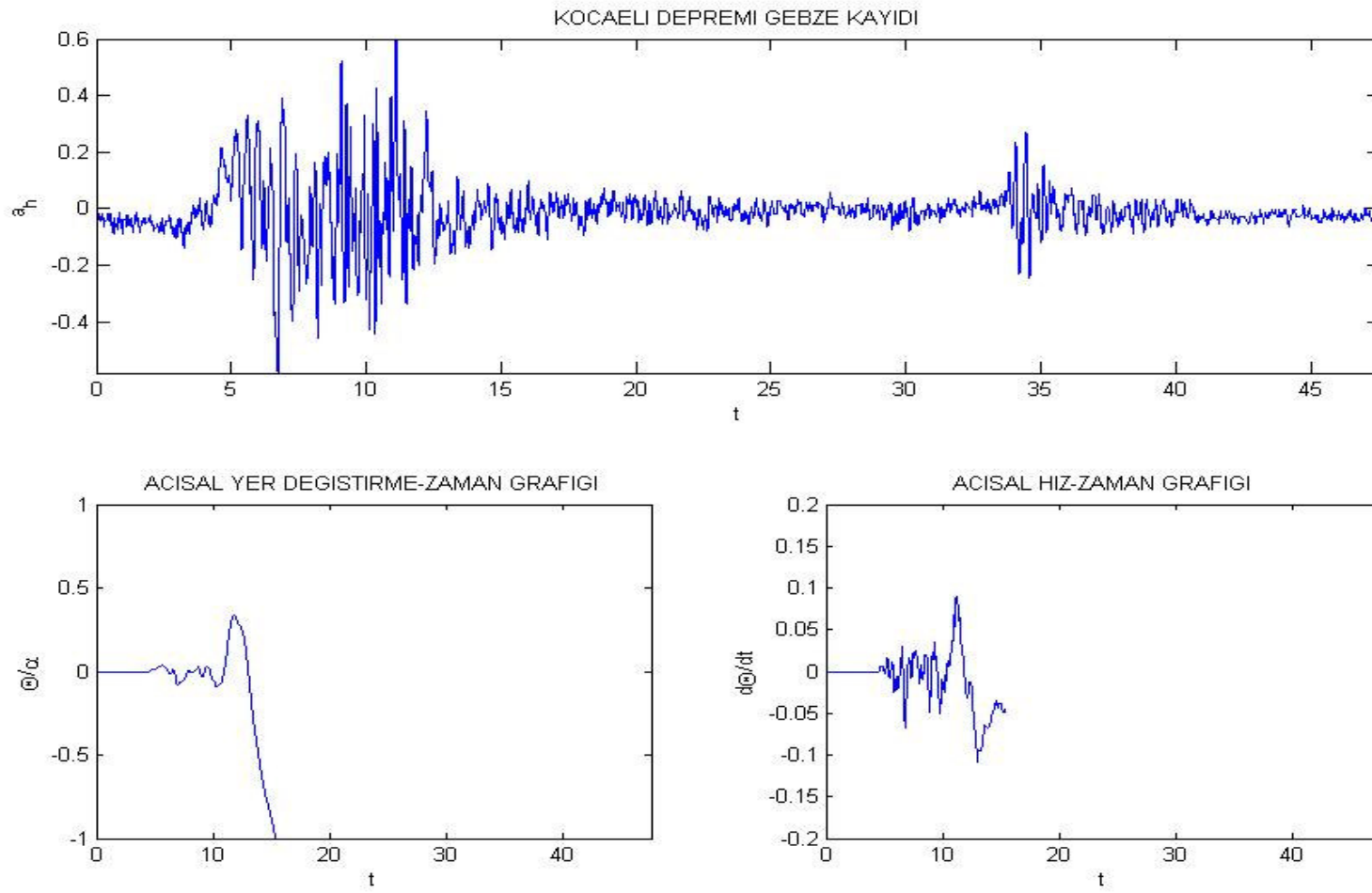
Şekil 5.3 Kocaeli Depremi Sakarya Kaydı İçin Grafikler



Şekil 5.4 Kocaeli Depremi Gebze Kaydı (0.4 g) İçin Sonuçlar



Şekil 5.5 Kocaeli Depremi Gebze Kaydı (0.5 g) İçin Grafikler



Şekil 5.6 Kocaeli Depremi Gebze Kaydı (0.6 g) İçin Grafikler

5.2 Sinüsoid İvmeler Etkisinde Çözüm

Sinüsoid yatay yer ivmesi şu şekilde tanımlanmıştır [8]:

$$a_h = a \sin(\omega t + \psi) \quad (5.1)$$

Burada ω açısal frekans, ψ faz ve a dalga genliğidir. ψ şu şekilde tanımlanır:

$$\psi = \sin^{-1}\left(\frac{ag}{a_h}\right) \quad (5.2)$$

Bu ivmenin hareket denklemlerine konulmasıyla;

$$I_o \ddot{\theta} + mgR \sin(-\alpha - \theta) = -m[a \sin(\omega t + \psi)] R \cos(-\alpha - \theta) \quad \theta < 0 \quad (5.3)$$

$$I_o \ddot{\theta} + mgR \sin(+\alpha - \theta) = -m[a \sin(\omega t + \psi)] R \cos(+\alpha - \theta) \quad \theta > 0 \quad (5.4)$$

haline gelir.

5.2.1. Nümerik Çözüm

θ açısal yer değiştirmesi çok küçük olduğundan $\text{sgn}(\theta)$ fonksiyonu yardımıyla ve $\sin(\pm\alpha - \theta) = \pm\alpha - \theta$ ve $\cos(\pm\alpha - \theta) = 1$ kabulüyle Denklem 5.3 ve 5.4 şu hale gelir:

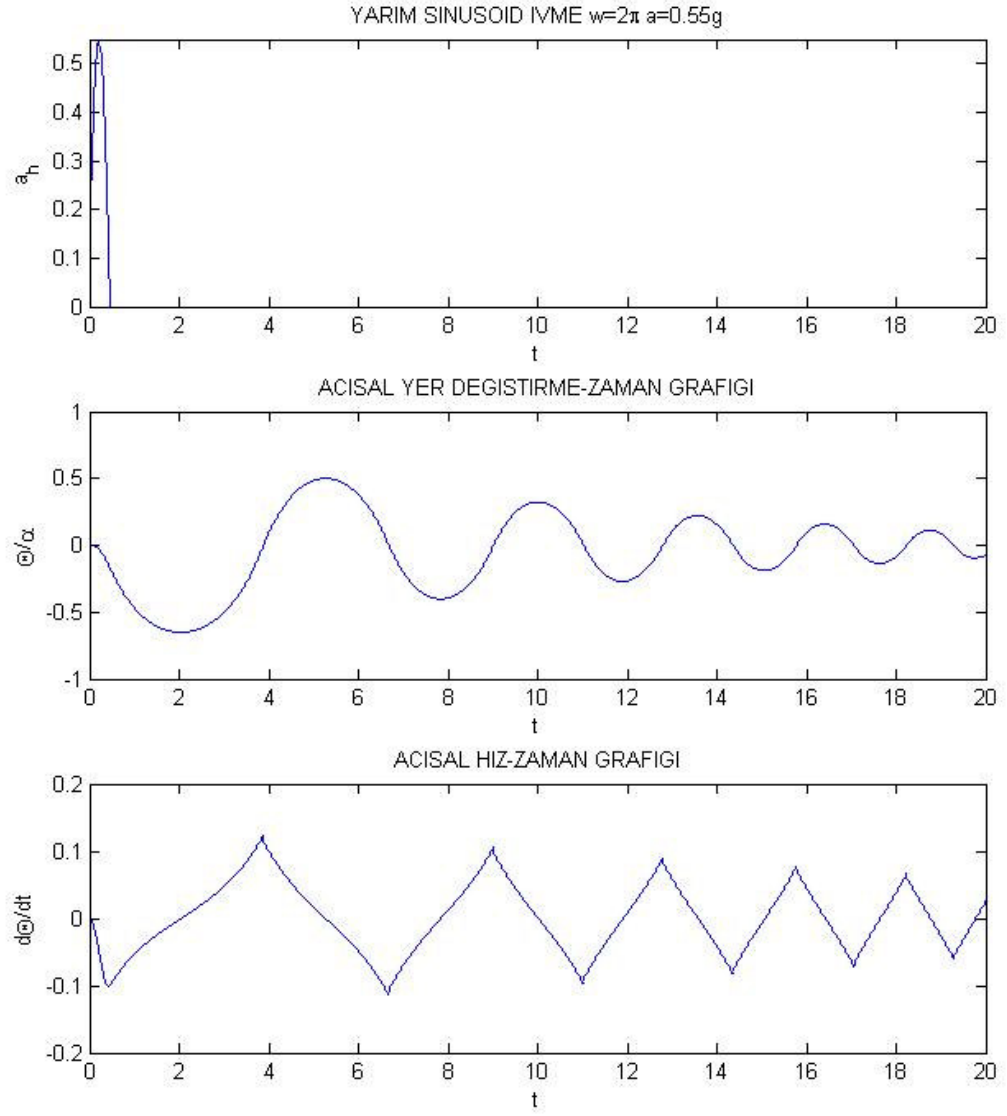
$$\ddot{\theta} = -p^2 \left\{ \sin(\alpha \text{sgn}(\theta) - \theta) + \frac{a}{g} \sin(\omega t + \psi) \cos(\alpha \text{sgn}(\theta) - \theta) \right\} \quad (5.5)$$

Nümerik çözüm sırasında, h zaman aralığı 0.005 sn ve $\omega=2\pi$ olarak alınmıştır. Sinüsoid ivme dalgası yarım olarak sisteme yüklenip a_h değerleri hesaplanmış ve bu değerler ile nümerik çözüm yapılmıştır.

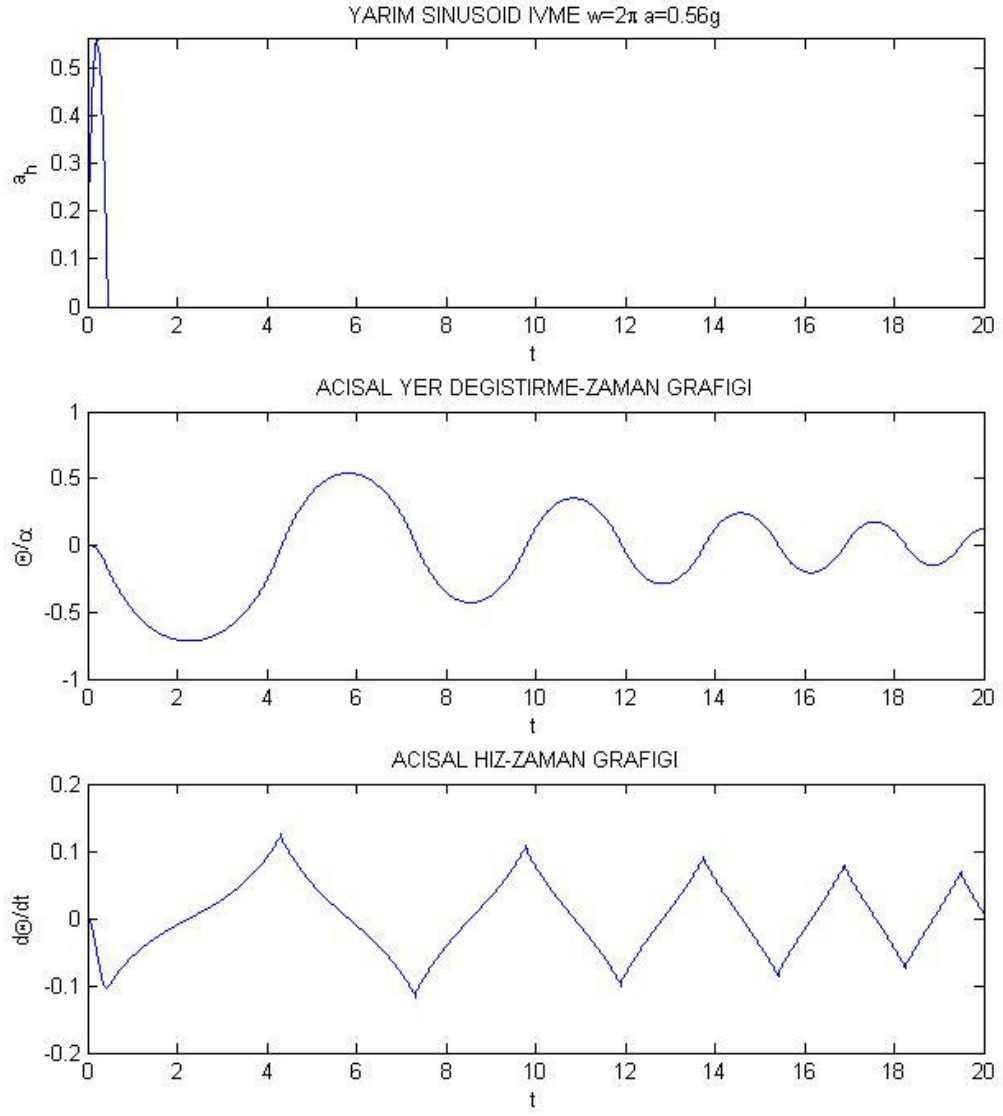
Yarım sinüs dalgası için t_i etki süresi:

$$t_i = \frac{\pi - \psi}{\omega} \quad (5.6)$$

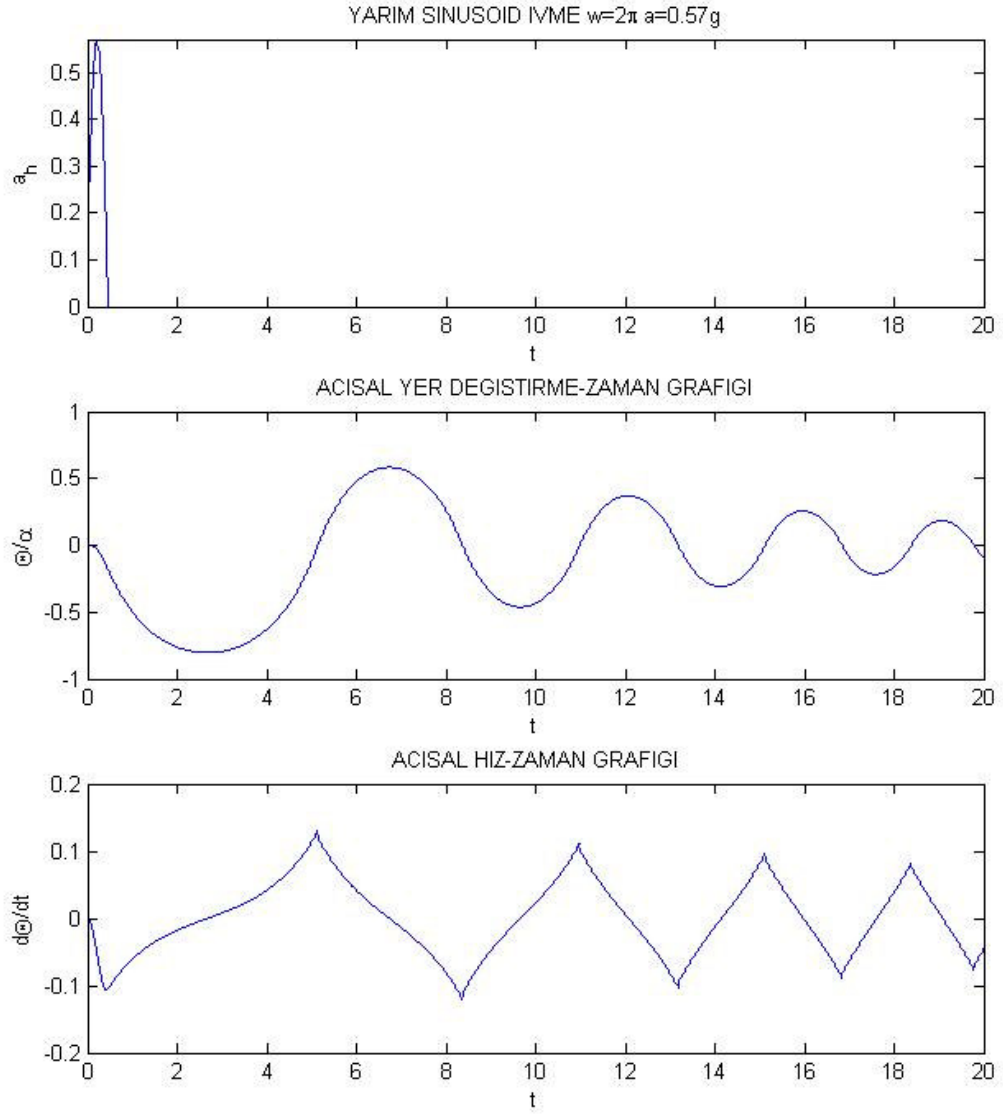
denklemleriyle hesaplanıp, programa girilmiştir.



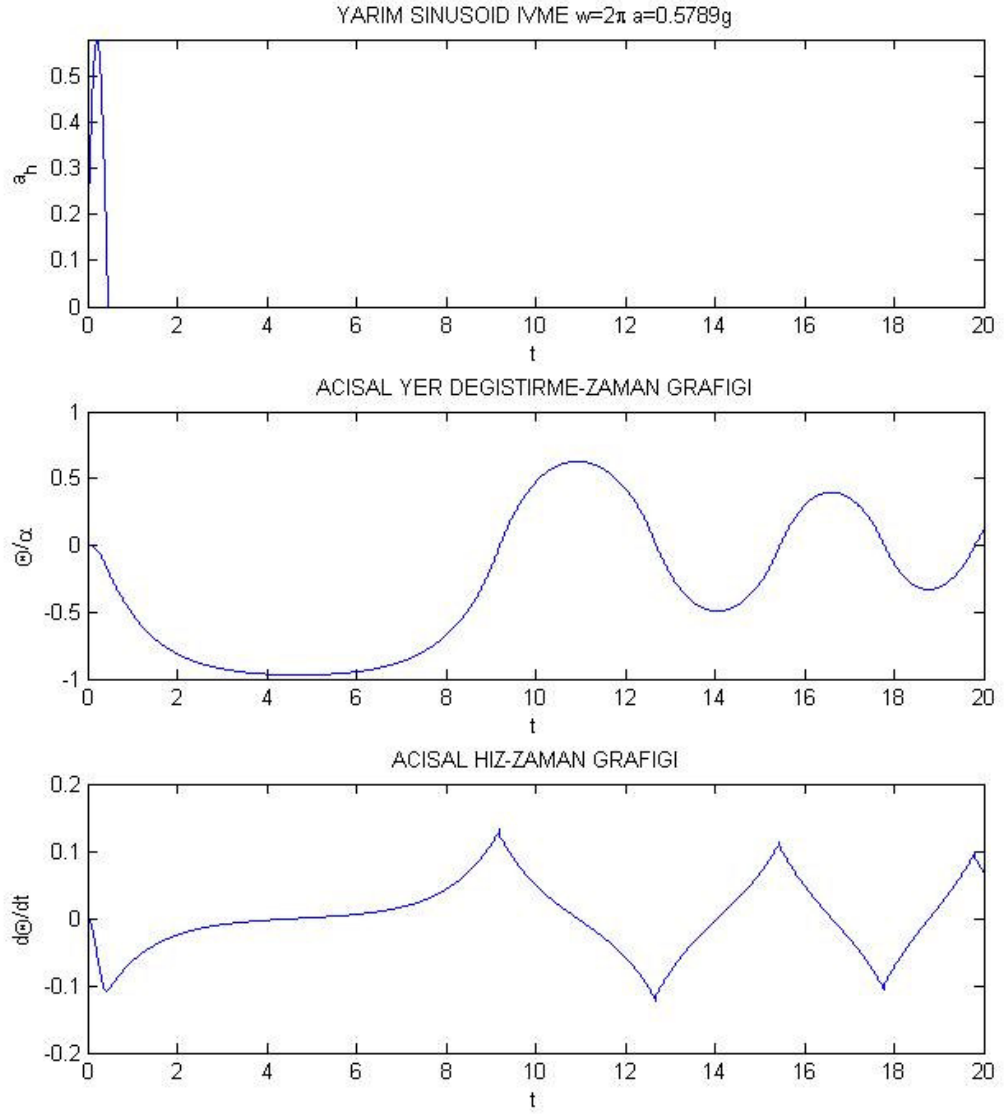
Şekil 5.7 $a=0.55g$ İçin Sinüsoid Yüklemenin Nümerik Çözümü



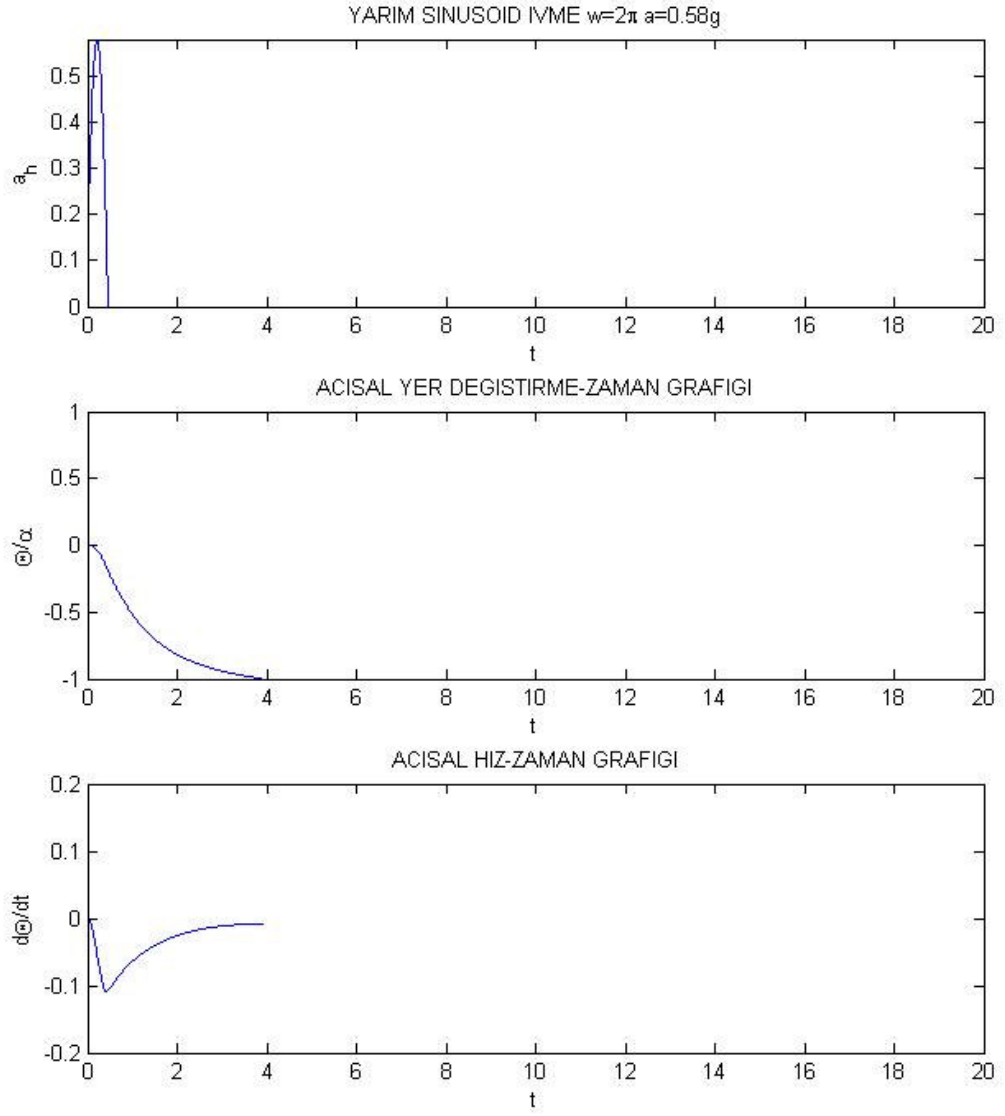
Şekil 5.8 $a=0.56g$ İçin Sinüsoid Yüklemenin Nümerik Çözümü



Şekil 5.9 $a=0.57g$ İçin Sinüsoid Yüklemenin Nümerik Çözümü



Şekil 5.10 $a=0.5789g$ İçin Sinüsoid Yüklemenin Nümerik Çözümü



Şekil 5.11 $a=0.58g$ İçin Sinüsoid Yüklemenin Nümerik Çözümü

5.2.2. Kapalı Çözüm

θ açısal yer değıştirmesi çok küçük olduğundan $\sin(\pm\alpha - \theta) = \pm\alpha - \theta$ ve $\cos(\pm\alpha - \theta) = 1$ kabulüyle Denklem 5.3 ve 5.4 şöyle yazılabilir [8]:

$$\ddot{\theta} - p^2\theta = -\frac{a}{g}p^2\sin(wt + \psi) + p^2\alpha \quad \theta < 0 \quad (5.7)$$

$$\ddot{\theta} - p^2\theta = -\frac{a}{g}p^2\sin(wt + \psi) - p^2\alpha \quad \theta > 0 \quad (5.8)$$

Hareketin durağan durumdan başladığı kabulüyle, Denklem 5.7 ve 5.8'in integrasyonu ile kapalı çözüme gidilir.

$$\theta = A_1 \sinh(pt) + A_2 \cosh(pt) - \alpha + \frac{1}{1 + \frac{w^2}{p^2}} \frac{a}{g} \sin(wt + \psi) \quad \theta < 0 \quad (5.9)$$

$$\theta = A_3 \sinh(pt) + A_4 \cosh(pt) + \alpha + \frac{1}{1 + \frac{w^2}{p^2}} \frac{a}{g} \sin(wt + \psi) \quad \theta > 0 \quad (5.10)$$

Açısal hızlar da Denklem 5.9 ve 5.10 in türeviyle elde edilir.

$$\dot{\theta} = pA_1 \cosh(pt) + pA_2 \sinh(pt) + \frac{w}{1 + \frac{w^2}{p^2}} \frac{a}{g} \cos(wt + \psi) \quad \theta < 0 \quad (5.11)$$

$$\dot{\theta} = pA_3 \cosh(pt) + pA_4 \sinh(pt) + \frac{w}{1 + \frac{w^2}{p^2}} \frac{a}{g} \cos(wt + \psi) \quad \theta > 0 \quad (5.12)$$

A_1, A_2, A_3 ve A_4 katsayıları Denklem 5.2 ve Denklemler 5.9-12 kullanılarak kolayca hesaplanır.

$$A_1 = A_3 = \frac{\dot{\theta}_0}{p} - \frac{w/p}{1 + \frac{w^2}{p^2}} \frac{a}{g} \cos(\psi) = \frac{\dot{\theta}_0}{p} - \alpha \frac{w/p}{1 + \frac{w^2}{p^2}} \frac{\cos(\psi)}{\sin(\psi)} \quad (5.13)$$

$$A_2 = \theta_0 + \alpha - \frac{1}{1 + \frac{w^2}{p^2}} \frac{a}{g} \sin(\psi) = \theta_0 + \alpha - \frac{\alpha}{1 + \frac{w^2}{p^2}} \quad (5.14)$$

$$A_4 = \theta_0 - \alpha - \frac{1}{1 + \frac{w^2}{p^2}} \frac{a}{g} \sin(\psi) = \theta_0 - \alpha - \frac{\alpha}{1 + \frac{w^2}{p^2}} \quad (5.15)$$

Sinüsoidal ivme $t_i = (\pi - \psi) / w$ anında biteceğinden hareket bu andan itibaren serbest titreşime dönüşür. Serbest titreşim için hareket denklemleri Denklem 5.9 ve 5.10 deki a ivme genliğinin 0 olarak alınmasıyla elde edilir.

$$\theta = A_1 \sinh(pt) + A_2 \cosh(pt) - \alpha \quad \theta < 0 \quad (5.16)$$

$$\theta = A_3 \sinh(pt) + A_4 \cosh(pt) + \alpha \quad \theta > 0 \quad (5.17)$$

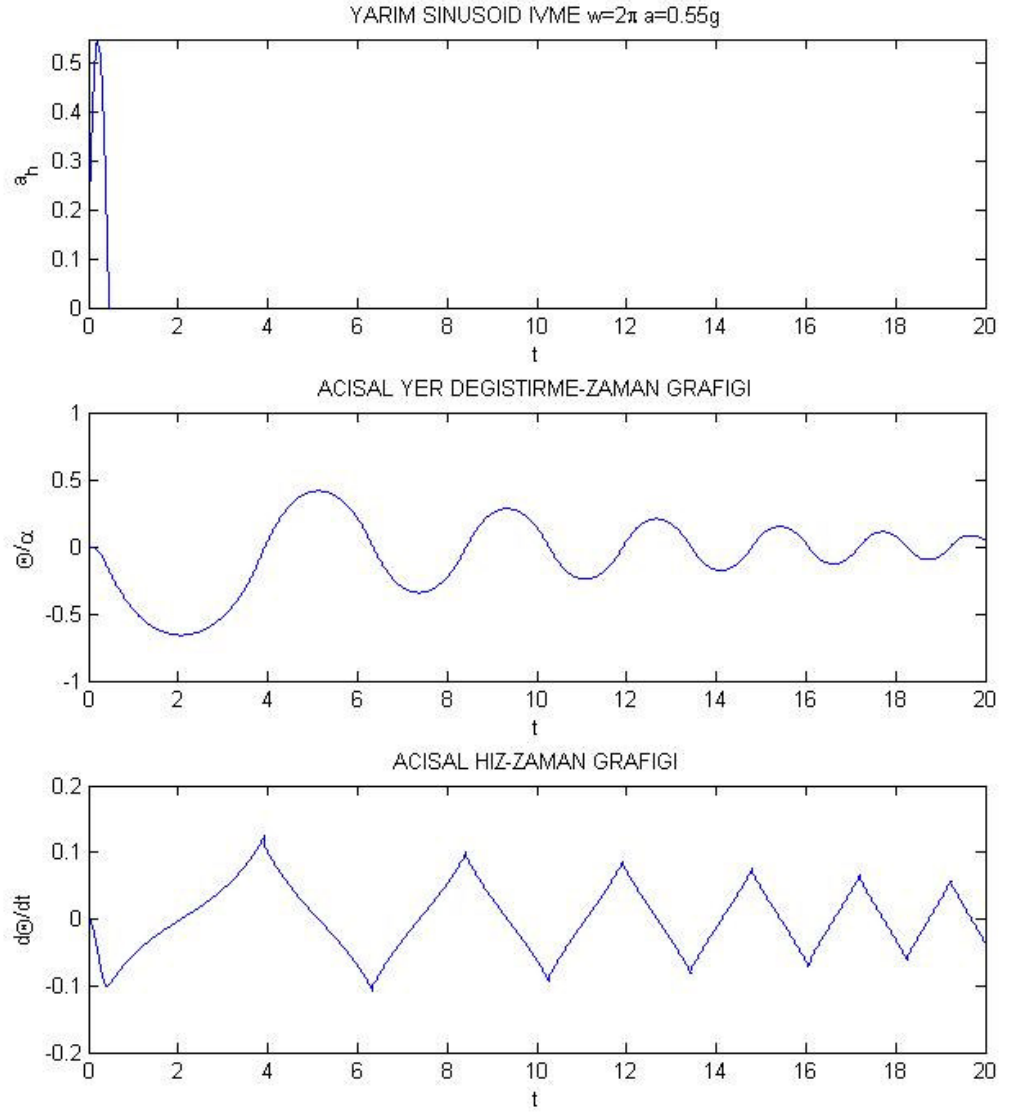
$$\dot{\theta} = pA_1 \cosh(pt) + pA_2 \sinh(pt) \quad \theta < 0 \quad (5.18)$$

$$\dot{\theta} = pA_3 \cosh(pt) + pA_4 \sinh(pt) \quad \theta > 0 \quad (5.19)$$

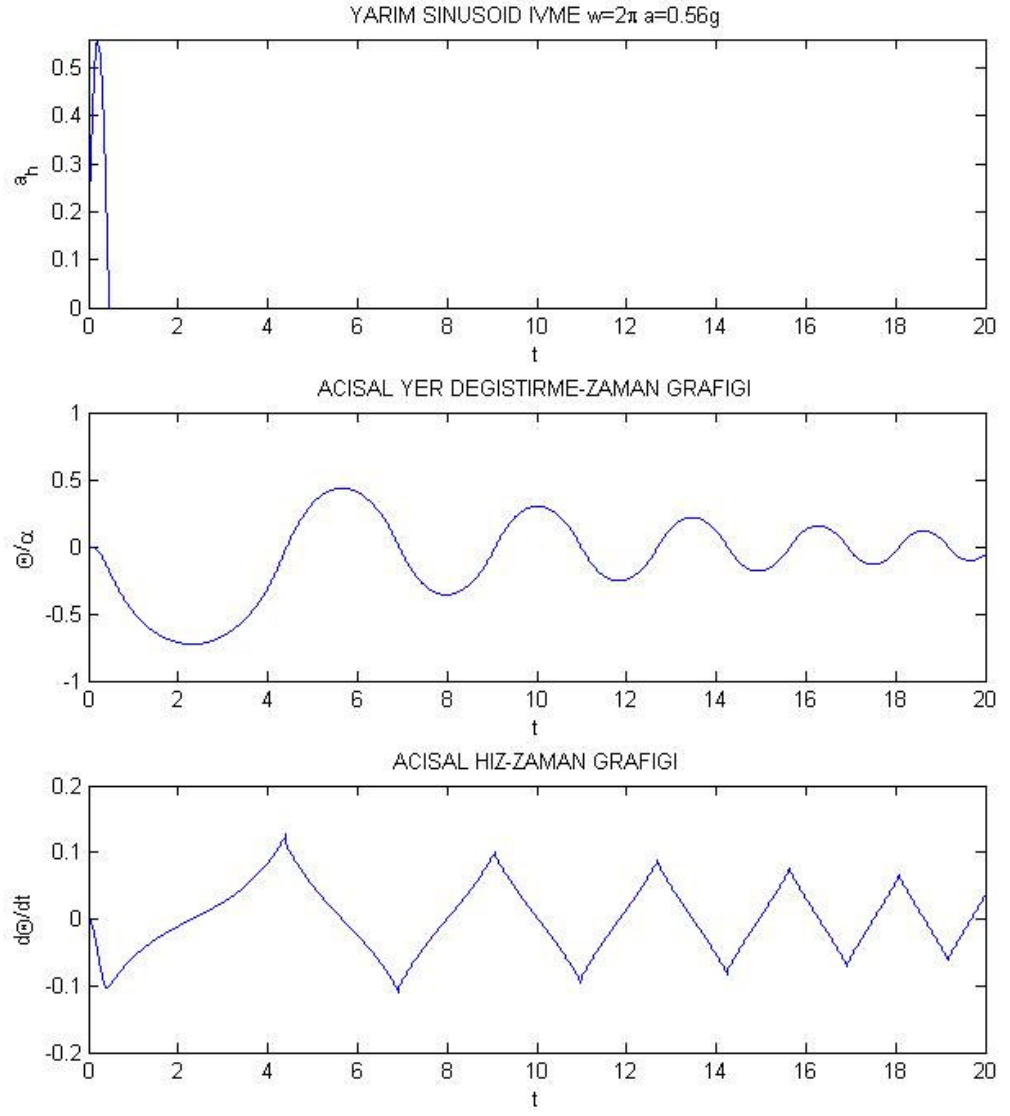
A_1, A_2, A_3 ve A_4 katsayıları ise şöyle ifade edilir:

$$A_1 = A_3 = \frac{\dot{\theta}_0}{p} \quad A_2 = \theta_0 + \alpha \quad A_4 = \theta_0 - \alpha \quad (5.20)$$

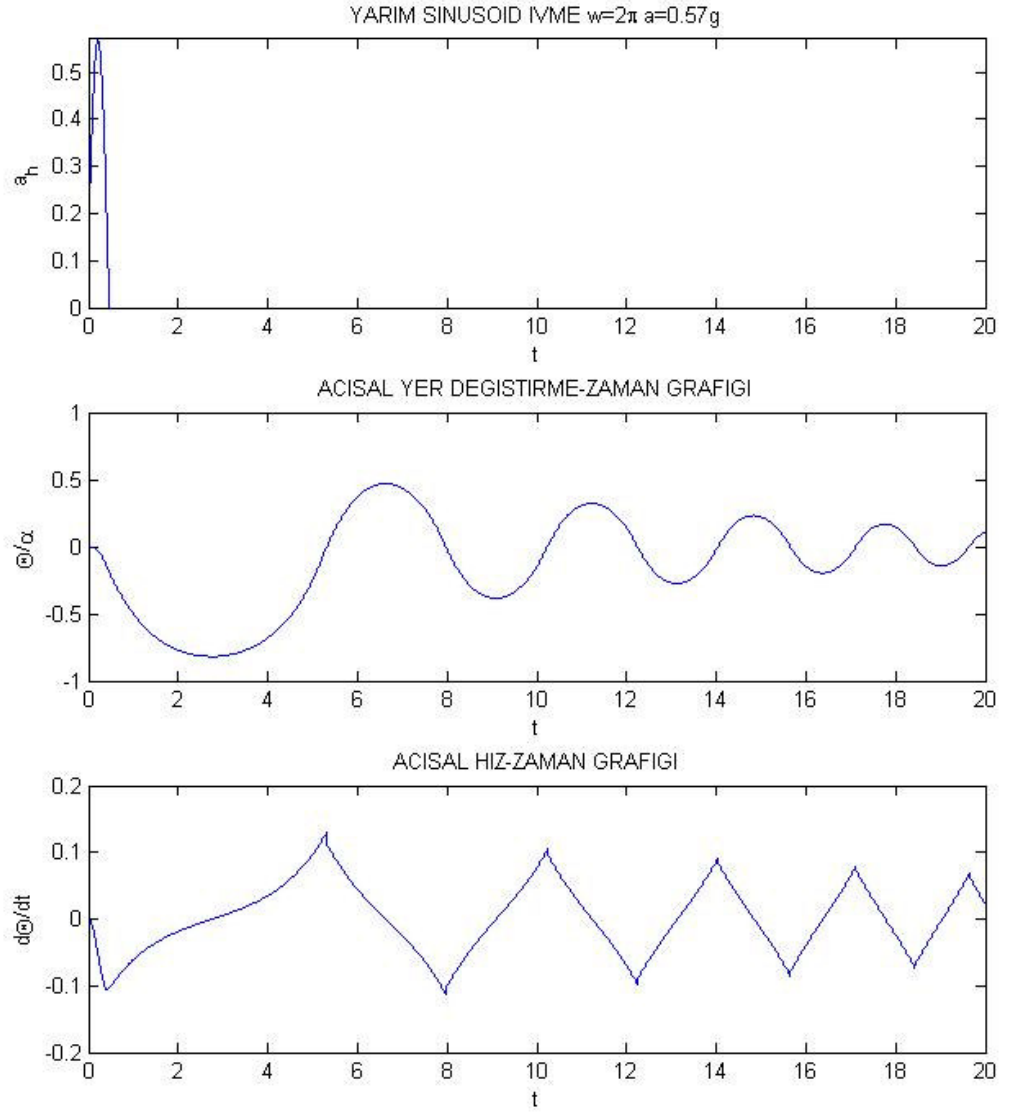
Buradaki θ_0 ve $\dot{\theta}_0$ değerleri sinüsoidal ivmenin bittiği andaki açısal dönme ve açısal hız değerleridir. Bu değerler program içinde hesaplanıp t_i anından itibaren başlayan serbest titreşim hareketinin çözümü için Denklem 5.20 ile verilen katsayılarla konulup kapalı çözüm yapılmıştır.



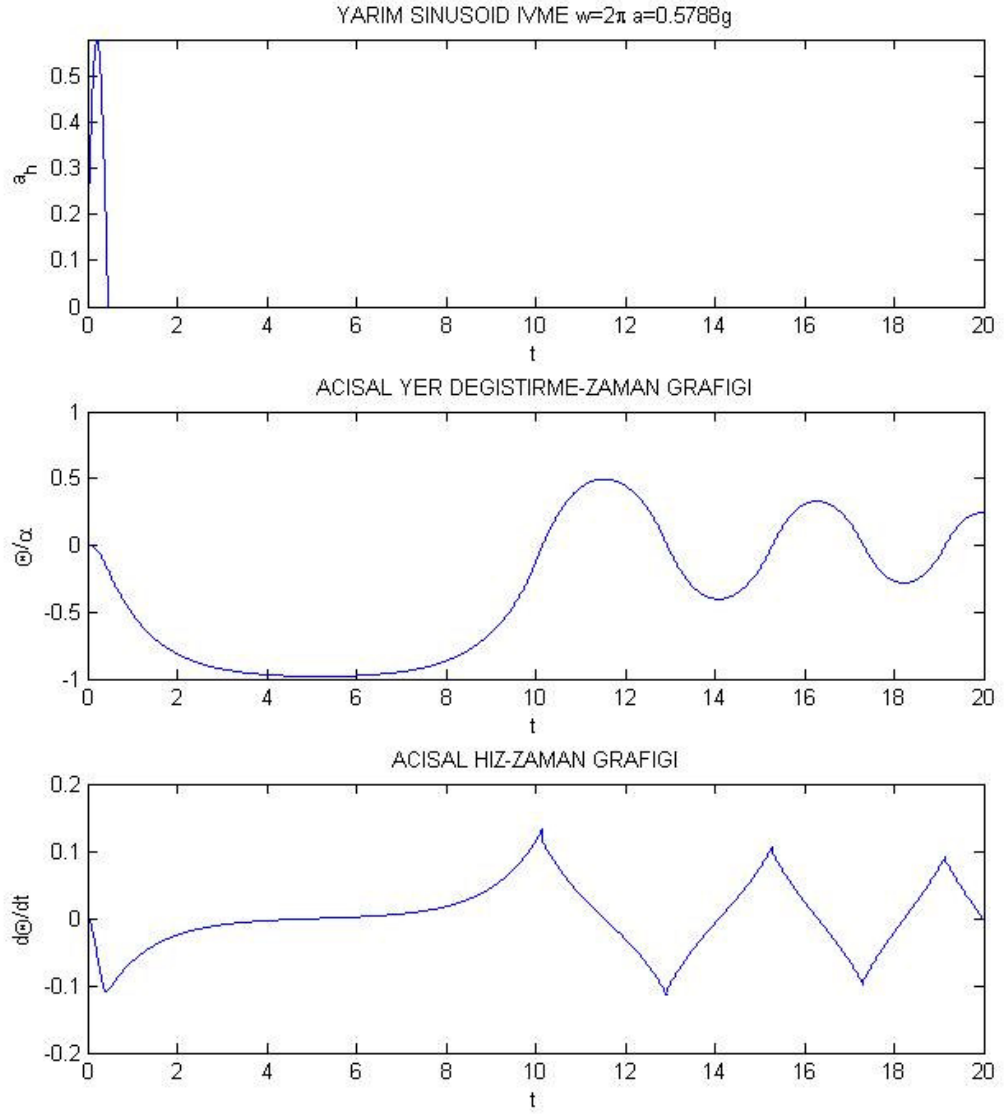
Şekil 5.12 $a=0.55g$ İçin Sinüsoid Yüklemenin Kapalı Çözümü



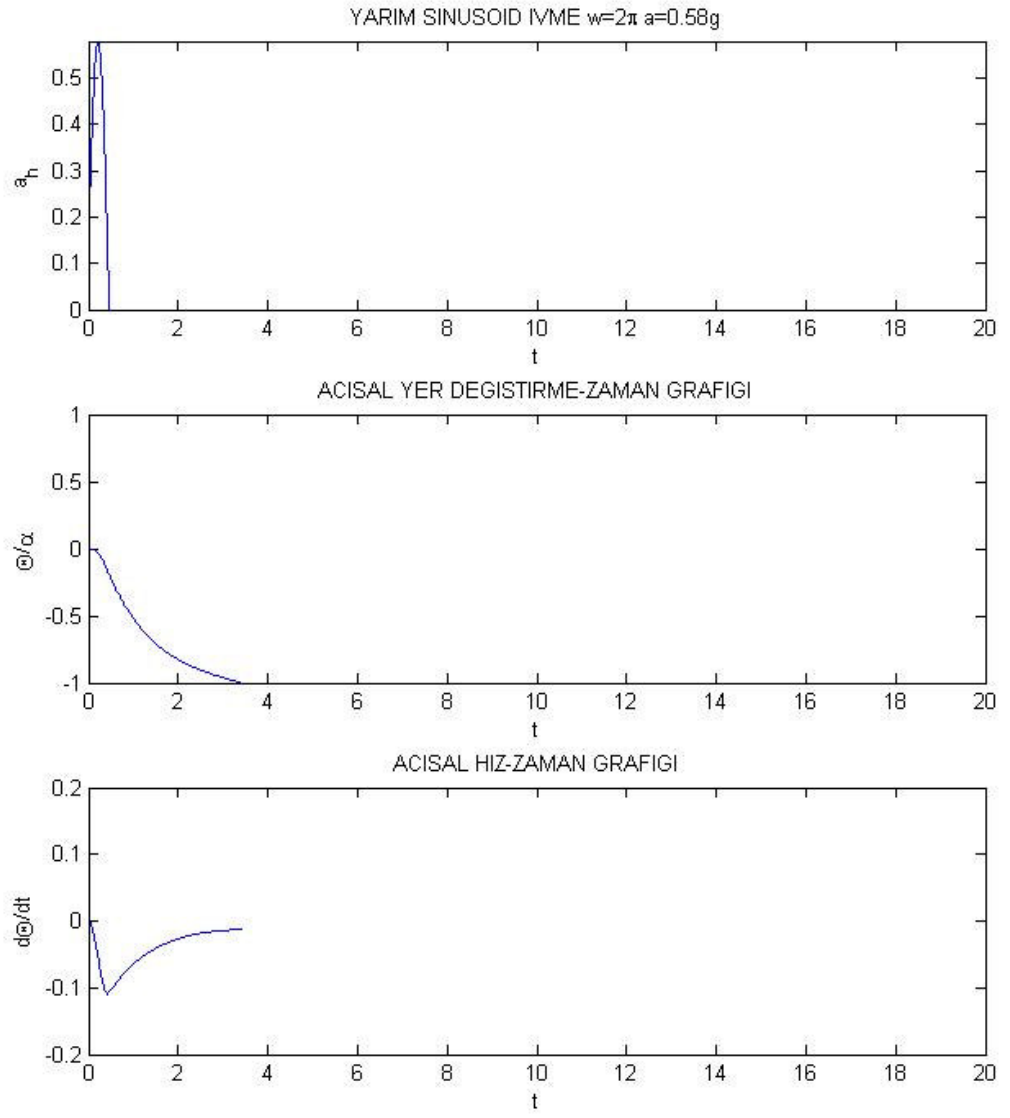
Şekil 5.13 $a=0.56g$ İçin Sinüsoid Yüklemenin Kapalı Çözümü



Şekil 5.14 $a=0.57g$ İçin Sinüsoid Yüklemenin Kapalı Çözümü



Şekil 5.15 $a=0.5788g$ İçin Sinüsoid Yüklemenin Kapalı Çözümü



Şekil 5.16 $a=0.58g$ İçin Sinüsoid Yüklemenin Kapalı Çözümü

5. SONUÇ

Bölüm 5.1’de Deprem Kayıtlarıyla yapılan nümerik çözüm sonucunda yalnızca Düzce Depremi Düzce Kaydında (0.513 m/s^2) devrilme gözlenmiştir. Düzce Depremi Bolu Kaydına (0.805 m/s^2) kıyasla maksimum değeri daha düşük olmasına rağmen devrilmenin gerçekleşmesinin nedeninin depremin uzunluğu olduğu anlaşılmaktadır. (Şekil 5.2)

Düzce Depremi Bolu Kaydı ise yaklaşık olarak 12. sn de ani bir vurma ile gerçekleşmektedir. Bu özellikte bir depremin daha ayrıntılı incelenmesi için Bölüm 5.2 de sinüsoid ivme dalgası yüklemesi yapılmıştır. (0.5789 g) değerinin hemen üzerinde devrilmenin gerçekleştiği Şekil 5.8 ve 5.13 görülmektedir.

İstanbul’da 0.4 g maksimum değerinde olası bir deprem beklenmektedir. Bu sebeple yakın fay etkisi dikkate alınarak Kocaeli Depremi Gebze Kaydı (0.141 m/s^2) maksimum değeri (0.4 g , 0.5 g ve 0.6 g) olacak şekilde büyütülerek yüklenmiş yalnızca 0.6 g ’lık yükleme altında devrilme gözlenmiştir (Şekil 5.4).

KAYNAKLAR

- [1] **Aslam, M., Godden, W.G. and Scalise, F.T.**, 1980. Earthquake Rocking Response of Rigid Bodies, *Journal of the Structural Division*, ASCE, **106**, ST2, 377-392
- [2] **Hogan, S.J.**, 1989. On the Dynamics of Rigid Block Motion under Harmonic Forcing, *Proceedings of the Royal Society of London*, **A425**, 441-476
- [3] **Hogan, S.J.**, 1990. The Many Steady State Responses of a Rigid Block under Harmonic Forcing, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **19**, 1057-1071
- [4] **Housner, G.W.**, 1963. The Behavior of Inverted Pendulum Structures During Earthquakes, *Bulletin of Seismological Society of America*, **53**, No:2, 404-417
- [5] **Ishiyama, Y.**, 1982. Motions of Rigid Bodies and Criteria for Overturning by Earthquake Excitations, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 10, 635-650
- [6] **Kadakal, U.**, 1994. Rocking Response of Rigid Blocks, *Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute Technical Report*, **94-001**, Istanbul, Turkey
- [7] **Lin, H. and Yim, S.C.S.**, 1991. Rocking Response of Rigid Blocks to Earthquakes, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **8**, 565-587
- [8] **Makris, N. and Roussos, Y.**, 1998. Rocking Response and Overturning of Equipment under Horizontal Pulse-Type Motions, *Pacific Earthquake Engineering Research Center Report*, **PEER-1998/05**, Berkeley
- [9] **MATLAB**, 2004. The Language of Technical Computing, the Math Works, Natick, MA
- [10] **Pompei, A., Scalia. A. and Sumbatyan, M.A.**, 1998. Dynamics of Rigid Block Due To Horizontal Ground Motion, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, **124**, 713-717

- [11] **Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T. and Flannery, B.P.**, 1992, *Numerical Recipes in FORTRAN*, Cambridge University Press, USA
- [12] **Spanos, P.D. and Koh, A.S.** 1984. Rocking of Rigid Blocks Due to Harmonic Shaking, *Journal of Engineering Mechanics*, 110, 1627-1642
- [13] **Shenton III, H.W. and Jones, N.P.**, 1991. Base Excitation of Rigid Bodies I: Formulation, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, **117**, 2286-2306
- [14] **Shenton III, H.W. and Jones, N.P.**, 1991. Base Excitation of Rigid Bodies II: Periodic Slide-Rock Response, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, **117**, 2307-2328
- [15] **Shenton III, H.W. and Jones, N.P.**, 1992. Effect of Friction and Restitution on Rocking Response, *Proc. Tenth World Conf. Earthquake Engineering*, 1933-1938
- [16] **Tso, W.K. and Wong, C.M.**, 1989. Steady State Rocking Response of Rigid Blocks Part 1: Analysis, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **18**, 89-106
- [17] **Tso, W.K. and Wong, C.M.**, 1989. Steady State Rocking Response of Rigid Blocks Part 1: Experiment, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **18**, 107-120
- [18] **Yim, C.S., Chopra, A.K. and Penzien, J.**, 1980. Rocking Response of Rigid Blocks to Earthquakes, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **8**, 565-587

EKLER

EK 1

Deprem Yüklemesinin Nümerik Çözümü İçin Bilgisayar Programı

```
function ttt=rbm4(u,h,tfinal,rt,p,e,trace)
%
% Dikiltasin Sallanma Hareketinin 4. Derece
% Runge-Kutta Metoduyla Nümerik Cozumu
%
% u = Yatay Yer Ivmesi Verileri
% h = Zaman Araligi
% tfinal = Ivme Etki Suresi
% nn = Ivme Veri Sayisi
% rt = Narinlik Orani
% p = Acisal Frekans
% a1 = Kritik Donme Acisi (Alpha)
% e = Carpisma Katsayisi
%
if nargin<7, trace=1;,end
%
% Ivme Verilerinin Girisi
u=load('data.txt');
%
% Parametrelerin Girisi
e=0.925
p=0.942;
tfinal=55.89;
h=0.01;
rt=7.075;
format short e;
nn=tfinal/h;
al=atan(1/rt);
umax=max(abs(u));
ini=1;
t=0; tout(1)=1; v=1/rt;
%
% Matrislerin Tanimlanmasi
% angd = Acisal Yerdegistirme
% angv = Acisal Hiz
y=[0;0]; angd=y(1); angv=y(2); tout(ini)=t; yout(:,ini)=y;
tout=zeros(1,nn); yout=zeros(2,nn);
abc=1;
```

```

%
% Sallanma Hareketinin Baslama Sartinin Kontrolu
if umax>v
    for ii=1:nn
        uu=u(ii);
        if (abs(uu)>v)
            ini=ii;
            break
        else
            ini=nn;
        end
        t=t+h;
        tout(ii+1)=tout(ii)+h;
    end
    tst=t
    if trace
        clc;
    end
%
% Sgn(theta) Fonksiyonun Degerinin Belirlenmesi
% gm = Sgn(theta) Fonksiyonu
if(u(ini)>=0)
    gm=-1;
else
    gm=1;
end
ind=0;
%
% Integrasyonun Baslangici
if ini<nn
    for i=ini+1:nn
        ax=u(i-1); ax2=(u(i)-u(i-1))/2;
        [angd,angv]=rg4(t,h,angd,angv,ax,ax2,al,p);
        t=t+h;
        angdd=angd./al;
        abc=i;
    end
%
% Devrilme Kontrolu
    if(abs(angdd)>1.0),ind=1;
        if angdd>0, yout(2,i-1)=al; else, yout(2,i-1)=-al; end
        break
    end
    tout(i)=t; yout(2,i)=angd; yout(1,i)=angv;
    div=10;
    if i>501
        if max(abs(yout(2,i-250:i)))/al<.001, div=2; end
    end
    if trace
        home, t, angdd, angv
    end
end

```

% *Carpismanın Kontrolu*

```
if ((yout(2,i)*yout(2,i-1))<0)
    h1=h/div;
    aa=u(i-1); dx=(u(i)-u(i-1))/div; dx2=dx/2;
    tt=tout(i-1); angd=yout(2,i-1); angv=yout(1,i-1);
    yyout(2,1)=angd; yyout(1,1)=angv; ttout(1)=tt;
    aa=aa+dx;
    [angd,angv]=rg4(tt,h1,angd,angv,aa,dx2,al,p);
    tt=tt+h1;
    ttout(2)=tt; yyout(2,2)=angd; yyout(1,2)=angv;
    k=2;
    while (yyout(2,k-1)*yyout(2,k)>0)
        aa=aa+dx;
        [angd,angv]=rg4(tt,h1,angd,angv,aa,dx2,al,p);
        tt=tt+h1;
        k=k+1;
        ttout(k)=tt; yyout(2,k)=angd; yyout(1,k)=angv;
        angdd=angd/al;
        if (abs(angdd)>1.0), ind=1;, break, end
        if trace
            home, tt, angdd, angv
        end
    end
end
```

%

% *Carpisma Sonrasi Acisal Hizin Hesabi*

```
yyout(1,k)=e*yyout(1,k-1);
angv=yyout(1,k);
angd=0.0;
nh=tout(i)-tt;
aa=aa+dx;
[angd,angv]=rg4(tt,h1,angd,angv,aa,dx2,al,p);
tt=tt+nh;
tout(i)=tt; yout(2,i)=angd; yout(1,i)=angv;
end
```

end

end

```
th=yout(2,1:abc)./al;
thv=yout(1,1:abc);
nsn=length(yout(2,1:abc))-1;
ttt=[tout(1:nsn)' th(1:nsn)' thv(1:nsn)'];
clf
tu=0:h:tfinal;
```

%

%

%

%

%

%

%

%

% Grafiklerin Cizdirilmesi

```
subplot(2,2,1:2),plot(tu,u(1:length(tu))),title('IVME KAYIDI')
axis([0,tfinal,min(u),max(u)]);
xlabel('t'); ylabel('a_h')
subplot(2,2,3),plot(ttt(:,1),ttt(:,2)),title('YER DEGISTIRME-ZAMAN GRAFIGI')
axis([0,tfinal,-1,1]);
xlabel('t'); ylabel('\Theta^alpha')
subplot(2,2,4),plot(ttt(:,1),ttt(:,3)),title('ACISAL HIZ-ZAMAN GRAFIGI')
axis([0,tfinal,-0.2,0.2]);
xlabel('t'); ylabel('d\Theta/dt')
```

end

%

% Runge-Kutta Integrasyon Fonksiyonu

```
function [angd,angv]=rg4(t,h,angd,angv,ax,ax2,al,p)
f11=angv;
f12=feval('rb5',t,angd,ax,al,p);
f21=angv+(f12*h/2);
f22=feval('rb5',t+(h/2),angd+(h*f11/2),ax+ax2,al,p);
f31=angv+(f22*h/2);
f32=feval('rb5',t+(h/2),angd+(h*f21/2),ax+ax2,al,p);
f41=angv+(f32*h);
f42=feval('rb5',t+h,angd+(h*f31),ax+ax2,al,p);
angd=angd+((f11+(2*f21)+(2*f31)+f41)*h/6);
angv=angv+((f12+(2*f22)+(2*f32)+f42)*h/6);
%
```

% Denklem 2.1'in Sag Tarafi Icin Hesap Fonksiyonu

```
function yprime=rb5(t,y,a2,al,p);
if y>=0
    gm=1;
end
if y<0
    gm=-1;
end
p2=p*p;
s2=sin(al-abs(y));
c2=cos(al-abs(y));
yprime=-p2*((gm*s2)-(a2*c2));
```

EK 2

Sinüsoid İvme Yüklemesinin Nümerik Çözümü İçin Bilgisayar Programı

```
function ttt=rbm4(u,h,tfinal,rt,p,e,trace)
%
% Dikiltasin Sallanma Hareketinin 4. Derece
% Runge-Kutta Metoduyla Nümerik Cozumu
%
% u = Yatay Yer İvmesi Verileri
% h = Zaman Araligi
% tfinal = İvme Etki Suresi
% nn = İvme Veri Sayisi
% rt = Narinlik Orani
% p = Acisal Frekans
% a1 = Kritik Donme Acisi (Alpha)
% e = Carpisma Katsayisi
% w = Acisal Frekans
% psi = Faz
% a = Genlik
% tt = Sinusoid İvmenin Etkime Suresi
if nargin<7, trace=1;;end
%
% Parametrelerin Girisi
w=2*pi;
e=0.925;
p=0.942;
rt=7.075;
al=atan(1/rt);
a=0.5;
psi=asin(sin(al)/a);
tfinal=20;
h=0.005;
ti=(pi-psi)/w;
tt=round(ti*100)/100
format short e;
nn=tfinal/h;
k=1;
t=0;
%
% Sinusoid İvme Verilerinin Girisi
for n=1:nn+1
    u(n,:)=a*sin((w*t)+psi);
    if t>tt
        u(n:nn+1,:)=0;
        break
    end
    t=t+h;
end
```

```

%
umax=max(abs(u));
ini=1;
t=0; tout(1)=1; v=1/rt;
%
% Matrislerin Tanimlanmasi
% angd = Acisal Yerdegistirme
% angv = Acisal Hiz
y=[0;0]; angd=y(1); angv=y(2); tout(ini)=t; yout(:,ini)=y;
tout=zeros(1,nn); yout=zeros(2,nn);
abc=1;
%
% Sallanma Hareketinin Baslama Sartinin Kontrolu
if umax>v
    for ii=1:nn
        uu=u(ii);
        if (abs(uu)>v)
            ini=ii;
            break
        else
            ini=nn;
        end
        t=t+h;
        tout(ii+1)=tout(ii)+h;
    end
    tst=t
    if trace
        clc;
    end
%
% Sgn(theta) Fonksiyonun Degerinin Belirlenmesi
% gm = Sgn(theta) Fonksiyonu
if(u(ini)>=0)
    gm=-1;
else
    gm=1;
end
ind=0;
%
% Integrasyonun Baslangici
if ini<nn
    for i=ini+1:nn
        ax=u(i-1); ax2=(u(i)-u(i-1))/2;
        [angd,angv]=rg4(t,h,angd,angv,ax,ax2,al,p);
        t=t+h;
        angdd=angd./al;
        abc=i;
    end
%
%
%
```

```

%
% Devrilme Kontrolu
    if(abs(angdd)>1.0),ind=1;
        if angdd>0, yout(2,i-1)=al; else, yout(2,i-1)=-al; end
        break
    end
    tout(i)=t; yout(2,i)=angd; yout(1,i)=angv;
%
% Carpisma Sonrasi Acisal Hizin Hesabi
    if ((yout(2,i)*yout(2,i-1))<0)
        angv=yout(1,i-1)*e;
        angd=yout(2,i);
        tout(i)=t; yout(2,i)=angd; yout(1,i)=angv;
    end
end
end
th=yout(2,1:abc)./al;
%
% Grafik ve Karsilastirma Icin Data Dosyasi Olusturulmasi
for n=1:abc
    thu(n,:)=-1*yout(2,n);
end
save sin_yar_num.txt thu -ASCII;
%
thv=yout(1,1:abc);
nsn=length(yout(2,1:abc))-1;
ttt=[tout(1:nsn)' th(1:nsn)' thv(1:nsn)'];
clf
tu=0:h:tfinal;
%
% Grafiklerin Cizdirilmesi
subplot(3,1,1),plot(tu,u(1:length(tu))),title('YARIM SINUSOID IVME  $w=2\pi$ 
a=0.5g')
axis([0,tfinal,min(u),max(u)]);
xlabel('t'); ylabel('a_h')
subplot(3,1,2),plot(ttt(:,1),ttt(:,2)),title('YER DEGISTIRME-ZAMAN GRAFIGI')
axis([0,tfinal,-1,1]);
xlabel('t'); ylabel('\Theta^{\alpha}')
subplot(3,1,3),plot(ttt(:,1),ttt(:,3)),title('HIZ-ZAMAN GRAFIGI')
axis([0,tfinal,-0.2,0.2]);
xlabel('t'); ylabel('d\Theta/dt')
end
%
% Runge-Kutta Integrasyon Fonksiyonu
function [angd,angv]=rg4(t,h,angd,angv,ax,ax2,al,p)
f11=angv;
f12=feval('rb5',t,angd,ax,al,p);
f21=angv+(f12*h/2);
f22=feval('rb5',t+(h/2),angd+(h*f11/2),ax+ax2,al,p);
f31=angv+(f22*h/2);

```

```

f32=feval('rb5',t+(h/2),angd+(h*f21/2),ax+ax2,al,p);
f41=angv+(f32*h);
f42=feval('rb5',t+h,angd+(h*f31),ax+ax2,al,p);
angd=angd+((f11+(2*f21)+(2*f31)+f41)*h/6);
angv=angv+((f12+(2*f22)+(2*f32)+f42)*h/6);
%
% Denklemler 2.1'in Sağ Tarafı İçin Hesap Fonksiyonu
function yprime=rb5(t,y,a2,al,p);
if y>=0
    gm=1;
end
if y<0
    gm=-1;
end
p2=p*p;
s2=sin(al-abs(y));
c2=cos(al-abs(y));
yprime=-p2*((gm*s2)-(a2*c2));

```

EK 3

Sinüsoid İvme Yüklemesinin Kapalı Çözümü İçin Bilgisayar Programı

```
function ttt=rbm4(u,h,tfinal,rt,p,e,trace)
%
% Dikiltasin Sallanma Hareketinin
% Kapalı Cozumu
%
% u = Yatay Yer İvmesi Verileri
% h = Zaman Araligi
% tfinal = İvme Etki Suresi
% nn = İvme Veri Sayisi
% rt = Narinlik Orani
% p = Acisal Frekans
% a1 = Kritik Donme Acisi (Alpha)
% e = Carpisma Katsayisi
% w = Acisal Frekans
% psi = Faz
% a = Genlik
% tt = Sinusoid İvmenin Etkime Suresi
if nargin<7, trace=1;,end
%
% Parametrelerin Girisi
w=2*pi;
e=0.925;
p=0.942;
rt=7.075;
al=atan(1/rt)
a=0.5;
psi=asin(sin(al)/a);
tfinal=20;
h=0.005;
ti=(pi-psi)/w;
tt=round(ti*100)/100
format short e;
nn=tfinal/h;
t=0;
%
% Sinusoid İvme Verilerinin Girisi
for n=1:nn+1
    u(n,:)=a*sin((w*t)+psi);
    if t>tt
        u(n:nn+1,:)=0;
        break
    end
    t=t+h;
end
```

```

save sin_ana.txt u -ASCII;
u=load('sin_ana.txt');
umax=max(abs(u));
ini=1;
t=0; tout(1)=1; v=1/rt;
%
% Matrislerin Tanımlanması
% angd = Acisal Yerdegistirme
% angv = Acisal Hiz
y=[0;0]; angd=y(1); angv=y(2); tout(ini)=t; yout(:,ini)=y;
tout=zeros(1,nn); yout=zeros(2,nn);
abc=1;
%
% Sallanma Hareketinin Baslama Sartinin Kontrolu
if umax>v
    for ii=1:nn
        uu=u(ii);
        if (abs(uu)>v)
            ini=ii;
            break
        else
            ini=nn;
        end
        t=t+h;
        tout(ii+1)=tout(ii)+h;
    end
    if trace
        clc;
    end
%
% Sgn(theta) Fonksiyonun Degerinin Belirlenmesi
% gm = Sgn(theta) Fonksiyonu
if(u(ini)>=0)
    gm=-1;
else
    gm=1;
end
ind=0; son=0; t=0; tst=0; t2=0; t3=0; s=0; z=0;
%
% Kapalı Cozumun Baslangici
if ini<nn
    for i=ini+1:nn
        wp=w/p;
        wp1=1/(1+wp^2);
        cs=cos(psi)/sin(psi);
        a13=-al*wp*cs*wp1;
        a24=al-(al*wp1);
        ad0=a13*sinh(p*tt)+a24*cosh(p*tt)-al+wp1*a*sin(w*tt+psi);
        av0=a13*p*cosh(p*tt)+a24*p*sinh(p*tt)+w*wp1*a*cos(w*tt+psi);
        if (t<tt)

```

```

angd=a13*sinh(p*t)+a24*cosh(p*t)-al+wp1*a*sin(w*t+psi);
angv=a13*p*cosh(p*t)+a24*p*sinh(p*t)+w*wp1*a*cos(w*t+psi);
%
% tt Anundan Sonra Serbest Titresime Giris

elseif (t>=tt) && (son<1)
c13=(av0/p);
c24=ad0+al;
angd=c13*sinh(p*tst)+c24*cosh(p*tst)-al;
angv=c13*p*cosh(p*tst)+c24*p*sinh(p*tst);
tst=tst+h;
yout(2,i)=angd; yout(1,i)=angv;
if (yout(2,i)*yout(2,i-1))<0
son=2
end
end
if (yout(2,i-1)<0) && (son>1)
c13=yout(1,i-1-z)*e/p;
c24=yout(2,i-1-z)+al;
angd=c13*sinh(p*t2)+c24*cosh(p*t2)-al
angv=c13*p*cosh(p*t2)+c24*p*sinh(p*t2)
t2=t2+h;
z=z+1;
t3=0;
s=0;
end
if yout(2,i-1)>0;
c13=yout(1,i-1-s)*e/p;
c24=yout(2,i-1-s)-al;
angd=c13*sinh(p*t3)+c24*cosh(p*t3)+al;
angv=c13*p*cosh(p*t3)+c24*p*sinh(p*t3);
t3=t3+h;
s=s+1;
t2=0;
z=0;
end
angdd=angd/al;
abc=i;
%
% Devrilme Kontrolu
if(abs(angdd)>1.0)
if angdd>0, yout(2,i-1)=al; else, yout(2,i-1)=-al; end
break
end
tout(i)=t; yout(2,i)=angd; yout(1,i)=angv;
t=t+h;
end
end
th=yout(2,1:abc)./al;
%
```

% Grafik ve Karsilastirma Icin Data Dosyasi Olusturulmasi

```
for n=1:abc
    thu(n,:)=yout(2,n);
end
save sin_yar_ana.txt thu -ASCII;
thv=yout(1,1:abc);
nsn=length(yout(2,1:abc))-1;
for n=1:nsn+1
    to(n,:)=tout(1,n);
end
save time.txt to -ASCII;
%
ttt=[tout(1:nsn)' th(1:nsn)' thv(1:nsn)'];
clf
tu=0:h:tfinal;
%
% Grafiklerin Cizdirilmesi
subplot(3,1,1),plot(tu,u(1:length(tu))),title('YARIM SINUSOID IVME  $w=2\pi$ 
a=0.5g')
axis([0,tfinal,min(u),max(u)]);
xlabel('t'); ylabel('a_h')
subplot(3,1,2),plot(ttt(:,1),ttt(:,2)),title('YER DEGISTIRME-ZAMAN GRAFIGI')
axis([0,tfinal,-1,1]);
xlabel('t'); ylabel('\Theta^{\alpha}')
subplot(3,1,3),plot(ttt(:,1),ttt(:,3)),title('HIZ-ZAMAN GRAFIGI')
axis([0,tfinal,-0.2,0.2]);
xlabel('t'); ylabel('d\Theta/dt')
end
```

ÖZGEÇMİŞ

Erinç GİNİŞ, 10 Nisan 1979 tarihinde Balıkesir’de doğmuştur. İlk öğrenimini Bandırma 17 Eylül İlkokulu’nda, orta öğrenimini Bandırma Orta Okulu’nda ve lise öğrenimini Şehit Mehmet Gönenç Lisesi’nde tamamlamıştır. 1996 Yılında Boğaziçi Üniversitesi MYO Elektronik Bölümünü kazanmış, orada 1.5 yıl okuduktan sonra 1998 yılında girdiği İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden 2002 yılında mezun olmuş ve aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Mühendisliği Bölümü’nde Yüksek Lisans eğitimine başlamıştır.