

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DEMİRLEME SİSTEMİ HAREKETLERİNİN
İNCELENMESİ VE ÇEŞİTLİ SAYISAL ÇÖZÜM
YÖNTEMLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Deniz BAYRAKTAR**

Anabilim Dalı : DENİZ TEKNOLOJİSİ MÜHENDİSLİĞİ

Programı : DENİZ TEKNOLOJİSİ MÜHENDİSLİĞİ

HAZİRAN 2007

**DEMİRLEME SİSTEMİ HAREKETLERİNİN
İNCELENMESİ VE ÇEŞİTLİ SAYISAL ÇÖZÜM
YÖNTEMLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Deniz BAYRAKTAR
508051103**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07 Mayıs 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 06 Haziran 2007**

**Tez Danışmanı : Prof.Dr. Abdi KÜKNER
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Kadir SARIÖZ
Prof.Dr. Ahmet Dursun ALKAN (Y.T.Ü)**

HAZİRAN 2007

ÖNSÖZ

Vermiş olduğu sonsuz destek ve yardımlarından ötürü değerli hocam Prof. Dr. Abdi KÜKNER'e sonsuz teşekkür ederim. Yine aynı şekilde, eleştirilerini ve tavsiyelerini benden esirgememiş olan sayın hocam Prof. Dr. Kadir SARIÖZ'e de teşekkürü bir borç bilirim.

Bana sevgi ve emeğin değerini öğreten ve her koşulda daima yanımda olan anne ve babam, Şule ve Kadir BAYRAKTAR'a teşekkür ederim.

Son olarak, her sıkıntılı anımda imdadıma yetişen araştırma görevlisi arkadaşlarım Çiğdem AKAN, Sevil Deniz YAKAN, Emre PEŞMAN ve Burak KARACIK ile vermiş olduğu telkinlerle yola devam etmemi sağlayan Murat ERSAN'a sonsuz teşekkür ederim.

Mayıs 2007

Deniz BAYRAKTAR

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	xi
ÖZET	xiv
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ	1
2. DEMİRLEME SİSTEMLERİNİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ	3
2.1. Demirleme Sistemi Dinamiği ve Zaman Aralıkları	4
2.2. Hareket Denklemleri ve Kinematik	5
2.3. Akıntıya Bağlı Olarak Zorlanma	9
2.4. Rüzgara Bağlı Olarak Zorlanma	11
2.5. Dalgalara Bağlı Olarak Zorlanma	12
2.6. Demirleme Hattının Modellenmesi	13
2.7. Demirleme Hatlarına Bağlı Olarak Sönüm	21
3. LİNEER OLMAYAN DEMİRLEME SİSTEMİ HAREKETLERİNİN SAYISAL ÇÖZÜMLERİ	23
3.1. Demirlenmiş Bir Dubanın Dinamik Olarak İncelenmesi ve Harmonik Balans Yöntemine Genel Bir Bakış	24
3.2. Demirleme Hattına Gelen Yatay Kuvvetle Sürüklenme ve Derinlik Arasındaki İlişki	27
3.2.1. Statik Denge Denklemleri	27
3.2.2. Denge Denklemlerinin İntegrasyonu	28
3.3. Demirlenmiş Dubanın Dalgalar İçindeki Yatay Hareketlerinin İncelenmesi	35
3.3.1. Froude-Krylov Kuvvetinin Etkisi	38
3.3.2. Dalga Sürüklenme Kuvvetinin Sisteme Etkisi	41
3.4. Runge-Kutta ve Adams-Bashforth-Moulton Yöntemleri ile Demirlenmiş Bir Dubanın Hareket Denkleminin Çözümü	45
3.4.1. Runge-Kutta Yöntemi ve Hareket Denkleminin Çözümü	45
3.4.2. Adams-Bashforth-Moulton Yöntemi ve Hareket Denkleminin Çözümü	50
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	53

KAYNAKLAR	56
EK A	59
EK B	68
EK C	77
EK D	88
ÖZGEÇMİŞ	96

KISALTMALAR

TMS	: Turret Mooring System
SMS	: Spread Mooring System
SFR	: Synthetic Fiber Rope
AC	: Anchored Catenary
UC	: Upper Chain

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1	Bir sisteme gelen dalga yükleri, tepkiler ve bileşenleri	37
------------------	--	----

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Zorlayıcı kuvvetler incelendiğinde sistem dinamiğinin dört zaman aralığında tanımlanması	5
Şekil 2.2 : Dağınık şekilde demirlenmiş (SMS) bir teknenin geometrik gösterimi	6
Şekil 2.3 : Hibrit bir demirleme hattının modellenmesi	17
Şekil 3.1 : Demirlenmiş içi boş silindirik bir duba	25
Şekil 3.2 : Bir kablo elemanındaki kuvvetler	27
Şekil 3.3 : Çapa ile demirlenmiş duba	32
Şekil 3.4 : Sürüklenme mesafesi ile dubadaki gerilmenin değişimi	33
Şekil 3.5 : Sürüklenme mesafesi ile çapa için gerekli zincir miktarının değişimi	33
Şekil 3.6 : Derinlikle sürüklenme mesafesinin değişimi	34
Şekil 3.7 : Derinlikle dubadaki gerilmenin değişimi	34
Şekil 3.8 : Derinlikle çapa için gerekli zincir miktarının değişimi	36
Şekil 3.9 : Demirlenmiş bir gemiye ait hareket değerleri	38
Şekil 3.10 : Çapı D, su derinliği h olarak verilmiş bir silindir	40
Şekil 3.11 : ω değerleri ile yatay yöndeki Froude Krylov kuvvetinin değişimi	41
Şekil 3.12 : Bir dalga kaydından elde edilen dalga sürüklenme kuvvetleri ...	42
Şekil 3.13 : Bir dubanın düşük frekanslı boyuna öteleme hareketleri	48
Şekil 3.14 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.3$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği	48
Şekil 3.15 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.3$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin faz diyagramı	49
Şekil 3.16 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.84$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 15$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği	49
Şekil 3.17 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.84$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 15$ iken verilen tepkinin faz diyagramı	50
Şekil 3.18 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.6$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği	51
Şekil 3.19 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.6$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2$ iken verilen tepkinin faz diyagramı	51
Şekil 3.20 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.65$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği	52
Şekil 3.21 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.65$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2$ iken verilen tepkinin faz diyagramı	59
Şekil A.1 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.45$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği	59
Şekil A.2 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.45$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin faz diyagram	59

Şekil A.3	: Zorlayıcı frekans $\omega = 0.50$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği	60
Şekil A.4	: Zorlayıcı frekans $\omega = 0.50$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı	60
Şekil A.5	: Zorlayıcı frekans $\omega = 0.57$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği	61
Şekil A.6	: Zorlayıcı frekans $\omega = 0.57$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı	61
Şekil A.7	: Zorlayıcı frekans $\omega = 0.60$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği	62
Şekil A.8	: Zorlayıcı frekans $\omega = 0.60$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı	62
Şekil A.9	: Zorlayıcı frekans $\omega = 0.62$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği	63
Şekil A.10	: Zorlayıcı frekans $\omega = 0.62$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı	63
Şekil A.11	: Zorlayıcı frekans $\omega = 0.65$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği	64
Şekil A.12	: Zorlayıcı frekans $\omega = 0.65$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı	64
Şekil A.13	: Zorlayıcı frekans $\omega = 1.0$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2.5$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği	65
Şekil A.14	: Zorlayıcı frekans $\omega = 1.0$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2.5$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı	65
Şekil A.15	: Zorlayıcı frekans $\omega = 1.25$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği	66
Şekil A.16	: Zorlayıcı frekans $\omega = 1.25$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı	66
Şekil A.17	: Zorlayıcı frekans $\omega = 1.5$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.5$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği	67
Şekil A.18	: Zorlayıcı frekans $\omega = 1.5$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.5$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı	67
Şekil B.1	: Zorlayıcı frekans $\omega = 0.30$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği	68
Şekil B.2	: Zorlayıcı frekans $\omega = 0.30$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin faz diyagramı	68
Şekil B.3	: Zorlayıcı frekans $\omega = 0.45$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği	69
Şekil B.4	: Zorlayıcı frekans $\omega = 0.45$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin faz diyagramı	69
Şekil B.5	: Zorlayıcı frekans $\omega = 0.50$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği	70
Şekil B.6	: Zorlayıcı frekans $\omega = 0.50$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı	70
Şekil B.7	: Zorlayıcı frekans $\omega = 0.57$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği	71
Şekil B.8	: Zorlayıcı frekans $\omega = 0.57$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı	71
Şekil B.9	: Zorlayıcı frekans $\omega = 0.62$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği	72

Şekil B.10 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.62$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı	72
Şekil B.11 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.84$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 15$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği	73
Şekil B.12 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.84$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 15$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı	73
Şekil B.13 : Zorlayıcı frekans $\omega = 1.0$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2.5$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği	74
Şekil B.14 : Zorlayıcı frekans $\omega = 1.0$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2.5$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı	74
Şekil B.15 : Zorlayıcı frekans $\omega = 1.25$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği	75
Şekil B.16 : Zorlayıcı frekans $\omega = 1.25$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı	75
Şekil B.17 : Zorlayıcı frekans $\omega = 1.5$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.5$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği	76
Şekil B.18 : Zorlayıcı frekans $\omega = 1.5$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.5$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı	76
Şekil C.1 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.30$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği	77
Şekil C.2 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.30$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin faz diyagramı	77
Şekil C.3 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.45$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği	78
Şekil C.4 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.45$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin faz diyagramı	78
Şekil C.5 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.50$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği	79
Şekil C.6 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.50$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı	79
Şekil C.7 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.57$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği	80
Şekil C.8 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.57$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı	80
Şekil C.9 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.60$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği	81
Şekil C.10 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.60$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı	81
Şekil C.11 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.62$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği	82
Şekil C.12 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.62$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı	82
Şekil C.13 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.65$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği	83
Şekil C.14 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.65$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı	83
Şekil C.15 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.84$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 15$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği	84
Şekil C.16 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.84$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 15$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı	84

Şekil C.17 : Zorlayıcı frekans $\omega = 1.0$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2.5$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği	85
Şekil C.18 : Zorlayıcı frekans $\omega = 1.0$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2.5$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı	85
Şekil C.19 : Zorlayıcı frekans $\omega = 1.25$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği	86
Şekil C.20 : Zorlayıcı frekans $\omega = 1.25$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı	86
Şekil C.21 : Zorlayıcı frekans $\omega = 1.5$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.5$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği	87
Şekil C.22 : Zorlayıcı frekans $\omega = 1.5$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.5$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı	87
Şekil D.1 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.30$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği	88
Şekil D.2 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.30$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı	88
Şekil D.3 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.45$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği	89
Şekil D.4 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.45$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı	89
Şekil D.5 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.50$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği	90
Şekil D.6 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.50$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı	90
Şekil D.7 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.57$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı	91
Şekil D.8 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.60$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı	91
Şekil D.9 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.62$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı	92
Şekil D.10 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.65$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı	92
Şekil D.11 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.8377$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 15.96$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği	93
Şekil D.12 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.8377$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 15.96$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı	93
Şekil D.13 : Zorlayıcı frekans $\omega = 1.0$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2.5$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı	94
Şekil D.14 : Zorlayıcı frekans $\omega = 1.25$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı	94
Şekil D.15 : Zorlayıcı frekans $\omega = 1.5$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.5$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı	95

SEMBOL LİSTESİ

m	: Geminin kütlesi
I_Z	: Z eksenindeki kütle atalet momenti
m_{11}	: Boyuna öteleme hareketindeki ek kütle
m_{22}	: Yanal öteleme hareketindeki ek kütle
I_{66}	: Yanal öteleme hareketindeki ek kütle atalet momenti
m_{26}	: Yunuslama hareketindeki ivmeye göre yanal ötelemedeki ek kütle
m_{62}	: Yanal öteleme hareketindeki ivmeye göre yunuslamadaki ek kütle
u	: Boyuna öteleme hareketinde suya göre bağıl hız
$\dot{u}$	: Boyuna öteleme hareketinde suya göre bağıl ivme
v	: Yanal öteleme hareketinde suya göre bağıl hız
$\dot{v}$	: Yanal öteleme hareketinde suya göre bağıl ivme
r	: Yunuslama hareketinde suya göre bağıl hız
$\dot{r}$	: Yunuslama hareketinde suya göre bağıl ivme
X_C, Y_C	: Daimi akıma bağlı hidrodinamik kuvvetler
N_C	: Daimi akıma bağlı hidrodinamik moment
X_W, Y_W	: Daimi rüzgara bağlı aerodinamik kuvvetler
N_W	: Daimi rüzgara bağlı aerodinamik moment
X_{WV}, Y_{WV}	: İkinci dereceden dalga sürüklenme yüklerindeki kuvvetler
N_{WV}	: İkinci dereceden dalga sürüklenme yüklerindeki moment
n	: Demirleme hatlarının sayısı
$X_M^{(i)}$	: i. demirleme hattında boyuna öteleme hareketindeki doğrultma kuvveti
$Y_M^{(i)}$	: i. demirleme hattında yanal öteleme hareketindeki doğrultma kuvveti
$X_D^{(i)}$	: i. demirleme hattından hidrodinamik sürüklenmeye bağlı boyuna öteleme kuvveti
$Y_D^{(i)}$	: i. demirleme hattından hidrodinamik sürüklenmeye bağlı yanal öteleme kuvveti
$(x_p(i), y_p(i))$	: i. demirleme hattındaki bağlantı noktalarına ait koordinatlar
U	: Akıntı hızı
Ψ	: Demirlenmiş teknenin yunuslama açısı ya da sürüklenmesi
θ_C	: Mutlak akıntı yönü
ρ_a	: Hava yoğunluğu
U_w	: Su üzerinden 10 m yükseklikteki rüzgar hızı
θ_{WR}	: Rüzgar yönüyle gemi yönü arasındaki bağıl açı
θ_0	: Rüzgar yönünün mutlak açısı
A_T, A_L	: Geminin su yüzeyi üzerindeki kısımlarının enine ve boyuna izdüşüm alanları

C_{XW}, C_{YW}, C_{NW}	: Rüzgarın boyuna ve yanal kuvvetleri ile moment katsayıları
n_f	: Dalga frekanslarının sayısı
ε	: Faz açısı
$A_{j,k}$	: Dalga genliği
g	: Yer çekimi ivmesi
θ_{wv}	: Dalga yönünün mutlak açısı
$\gamma^{(i)}$	: x eksenine ile saat yönünün tersinde ölçülen i. demirleme hattı arasındaki açı
$(x_m^{(i)}, y_m^{(i)})$	: i. demirleme hattının ucunun ya da zincirinin yatay düzlem koordinatları
$l^{(i)}$	: Demirleme hattının ucu ile kurtagzı arasındaki i. demirleme hattının yatay izdüşümü
$(x_T^{(i)}, y_T^{(i)})$	: o-xyz koordinat sistemi içindeki i. demirleme hattının kurtagzı koordinatları
$(x_p^{(i)}, y_p^{(i)})$	: G-XYZ koordinat sistemi içindeki i. demirleme hattının kurtagzı koordinatları
S_b	: Sentetik hattın ortalama kopma gücü
l_w	: Zorlanmamış olan ipin izdüşümünün yatay uzunluğu
h	: Su derinliği
l_H	: Deniz dibindeki demirleme noktası ile demirleme hattının üst ucu (gemiyle olan bağlantı noktası) arasındaki yatay mesafe
d	: Deniz dibindeki AC'nin yatay mesafesi
l_1	: AC'nin askıdaki kısmının yataydaki izdüşümünün uzunluğu
l_1'	: AC'nin yataydaki izdüşümünün toplam uzunluğu
l_2	: SFR'nin yataydaki izdüşümünün uzunluğu
l_3	: UC'nin yatay mesafesi
h_1	: AC'nin derinliği
h_2	: SFR'nin derinliği
h_3	: UC'nin derinliği
θ_1	: Demirleme hattının yatay düzleme göre yaptığı eğimin dikey açı
T_H, T_V	: Demirleme hattındaki gerilmelerin yatay ve dikey bileşenleri
l_{2T}	: SFR'nin deforme olmuş uzunluğu
l_{wT}	: Demirleme hattının toplam deforme olmamış uzunluğu
l_{w1}, l_{w2}, l_{w3}	: Demirleme hattının toplam deforme olmamış uzunluğunun bileşenleri
l_{eff}	: AC'nin askıda olduğu durumunun uzunluğu
$\beta^{(i)}$	: X eksenine ile saat yönünün tersinden ölçülen i. demirleme hattı arasındaki açı
$F_P^{(i)}, F_N^{(i)}$	: i. demirleme hattı hareketinin paraleli ve normali yönlerindeki sönüm kuvvetleri
$C_{XD}^{(i)}, C_{YD}^{(i)}$	: i. demirleme hattının yataydaki hareketlerinin ortalama sürüklenme katsayıları
$\Gamma_D^{(i)}$	: i. demirleme hattının yavaş hareketlerinden dolayı oluşan düzlem içindeki hareketlere bağlı olarak meydana gelen enerji dağılımının bir fonksiyonu

$\theta_l^{(i)}$	: i. demirleme hattının üst tarafındaki dikey açı
m	: Sistemin kütlesi
μ	: Ek kütle
M	: Sistemin toplam kütlesi
C	: Hidrodinamik ve yapısal sönümün toplamı
$R(x)$	: Yer değişimine bağlı geri getirme kuvveti
F_1	: Dalga kuvveti
D	: Çap
$\hat{n}$	: Silindir yüzeyinden dışarı çıkan normal vektörü
p_{dyn}^i	: Gelen dalganın dinamik basıncı
$\forall$	: Silindirin hacmi
ω	: Zorlayıcı frekans
B	: Cismin genişliği
L	: Cismin uzunluğu
T	: Su çekimi
β	: Dalgaların geliş açısı
ρ	: Deniz suyu yoğunluğu
β_{ww}	: Dalgaların geliş açısı

ÖZET

Demirleme sistemi, bir geminin birkaç noktadan deniz dibine halatlarla ya da zincirlerle bağlanmasını kapsar ve modellenmesi oldukça karmaşık yapıda lineer olmayan denklem sistemlerinin çözümünü gerektirir. Buna, zorlayıcı çevre koşulları ve demirleme hatlarının lineer olmamasının da etkisi eklendiğinde ortaya çıkan tablo daha da karmaşık bir hal almaktadır. Bu anlamda, demirlenmiş olan bir geminin yatay düzlemdeki hareketleri (boyuna öteleme, yanal öteleme ve yunuslama) ile zorlayıcı dış kuvvetlerin (akıntı, rüzgar, dalgalar) etkisinin hesaba katıldığı matematiksel bir model incelenmiştir.

Sadece boyuna öteleme hareketi yaptığı farz edilen demirlenmiş silindirik duba problemi ise, çeşitli sayısal yöntemlerin hareket denkleminin çözümünde kullanılabileceği, dalga sürüklenme kuvvetinin hesaplanabileceği ve demirleme hattının statik çözümünün yapılabileceği bir sistem olup, pratik anlamda uygulamaya geçmek için zemin oluşturmaktadır.

Çeşitli zorlayıcı frekans değerlerinde ve çeşitli dalga yükseklikleri için elde edilen dalga sürüklenme kuvvetlerinin etkisiyle sistemin dengesinin nasıl bir hal alacağı sırasıyla, dördüncü dereceden Runge-Kutta ve Adams-Bashforth-Moulton Yöntemleri kullanılarak hareket denkleminin çözülmesi ile ortaya konmuştur. Elde edilen grafiklere genel olarak bakıldığında, harmonik altı tepkiler göze çarpmaktadır. Harmonik altı tepkilerin nedeni, demirleme hatlarının lineer olmama durumundan kaynaklanmaktadır. Öte yandan, periyot katlanması ve simetri kırılması da gözlemlenmektedir. Merkezde simetrinin sağlanamaması, bir demirleme hattının aşırı gerildiğini göstermekte olup, bir çeşit dengesizlik durumuna işaret eder. Daha ileriki zorlayıcı frekans değerlerinde ise, simetri tekrar sağlanmıştır. Dalga kuvvetinin aşırı bir şekilde arttırıldığı ve zorlayıcı frekansın 0.8 rad/s 'ye çok yakın olduğu durumlarda kaotik davranışlar gözlenmektedir. Bu durumdan sistem olumsuz bir şekilde etkilenebilir, demirleme hattı gerilebilir ve sonunda kopabilir.

THE INVESTIGATION OF MOORING SYSTEM MOTIONS AND DIFFERENT NUMERICAL SOLUTION METHODS

SUMMARY

Any mooring system is made of a number of ropes or cables with their upper ends attached to different points of the ship and their lower ends anchored at the sea bed and to model this, a number of complex non linear equations have to be solved. When environmental exciting forces and non linearity of the mooring lines are added to this, emergent form becomes more complicated. Hence, a mathematical model of a moored ship is examined which includes all horizontal plane motions (surge, sway and yaw) and external exciting forces (current, wind and waves).

The problem of a moored cylindrical buoy which is assumed that it only makes surge motion, lays groundwork for using various numerical methods for the solution of equation of motion, evaluation of wave drift force and static solution of the mooring line practically.

The equilibrium of such a system will be affected by the wave drift force which is evaluated for different excitation frequencies plus wave heights and by solving the equation of motion using fourth order Runge-Kutta and Adams-Bashforth-Moulton Methods, the situation of the system equilibrium is introduced. When the graphics obtained from these solutions are checked in general, sub harmonic responses stand out. The reason of these sub harmonic responses is the nonlinearity of the mooring lines. On the other hand, period doubling and symmetry breaking is observed. If the symmetry is not kept in the centre, this shows that a mooring line is extremely taut and indicates instability. For the forthcoming excitation frequencies, the symmetry is kept once again. When the wave force coefficient is increased extremely and excitation frequency is near 0.8 rad/sec, chaotic behaviour is observed. System may be affected from this situation negatively; the mooring line might become very taut and come off at the end.

1. GİRİŞ

Geçtiğimiz yirmi yıl içersinden beri, açık denizdeki petrol operasyonlarının, tankerlerin sabitlenmesinin ve yükleme boşaltma yapan yüzen üretim sistemlerinin (Floating Production, Storage ve Offloading, FPSO) geliştirilebilmesi adına, demirleme sistemleri hakkında yapılmakta olan araştırmalara halen devam edilmektedir. Tipik bir demirleme sistemi, bir geminin birkaç noktadan deniz dibine halatlarla ya da zincirlerle bağlanmasını kapsar. Bunun dışında, değişik bağlama sistemleri mevcuttur. Mesela, tek noktadan demirleme sistemi (Single Point Mooring, SPM), iki noktadan demirleme sistemi (Two Point Mooring, TPM), dağınık demirleme sistemi (Spread Mooring System, SPM), ayırık olarak uyumlu zincirleme sistemi (Differentiated Compliance Anchoring System, DICAS) ve taret demirleme sistemi (Turret Mooring System, TMS). Demirleme sisteminin seçimi, yapılacak olan işleme ve ekonomik olup olmama durumuna bağlıdır. SPM ve TPM sistemleri kısa süreli işlemlerde ve çevre koşullarının çok değişmediği ortamlarda tercih edilir. Daha uzun süreli operasyonlarda ise, çevresel zorlanma nedeniyle oluşan değişiklikler meydana geldiğinden, SMS, DICAS ve TMS daha uygundur [13].

Bir demirleme sisteminde aslında modellenmesi gereken üç temel unsur vardır. Bunlardan biri çevre, diğeri konumu koruyabilme, sonuncusu da, sistem dinamiğidir. Akıntının, rüzgarın ve dalgaların yönüne ve büyüklüğüne bağlı olan çevresel koşullar, su derinliği ve operasyonun ne kadar zaman alacağı gibi şeyler demirleme sistemleri için oldukça önemlidir. Günümüzde, konum korumaya yarayan sistemler, demirlemeye, dinamik pozisyonlamaya ya da bu ikisini bir araya gelmesiyle oluşan hibrit sistemlere dayanır. 3000 m'ye kadar olan derinliklerde kullanılabilecek bu tarz sistemler tasarlanmıştır ve halen geliştirilmektedir. Bu tip sistemlerde, yavaş, yatay düzlem dinamiği söz konusudur. Bölüm 2'de dağınık şekilde demirlenmiş olan bir geminin yatay düzlem dinamiği ele alınıp, zorlayıcı çevre koşulları ile birlikte nasıl modellenebileceği hakkında teorik bilgi verilmektedir.

Pratik anlamda uygulamaya geçebilmek adına, Bölüm 3'te demirlenmiş silindirik duba problemi ele alınmıştır. Birçok noktadan bağlanmış olan bu dubaya düzenli dalgaların geldiği düşünülmüştür. Sistemin lineer olmaması, sönümün lineer olmamasına bağlı olabileceği gibi geri getirme kuvvetinin de lineer olmamasına bağlı olabilir ya da bu ikisinin birleşiminden de lineer olmama durumu doğabilir. Tüm bunların arasında, geri getirme kuvvetinin lineer olmaması, demirlenmiş sistemin dengesini en fazla bozacak olan durumdur.

Sadece boyuna öteleme hareketi yapan lineer olmayan bir osilatör olarak idealize edilen bu sistemin belirli zorlayıcı frekanslarda tepkisi ve buna bağlı faz diyagramlarını bulmak hedeflenmiştir. Farklı çalışmalarda Harmonik Balans Yöntemi ile bazı sonuçlar elde edilmiştir. Harmonik Balans Yöntemi ile elde edilmiş bazı sonuçlar Ek D'de verilmiştir. Farklı dalga sürüklenme kuvvetleri için dalga kuvveti hesaplandıktan sonra hareket denklemi, Runge-Kutta ve Adams-Bashforth-Moulton gibi sayısal yöntemlerle çözülmüştür. Ek A'da Runge-Kutta Yöntemine ait sonuçlara, Ek B'de Adams-Bashforth-Moulton Yöntemine ait sonuçlara, Ek C'de ise bu iki yöntemin karşılaştırmasına yer verilmiştir.

Elde edilmiş sonuçlar ve yapılmış olan bu çalışmayı daha iyi noktalara taşıyacak olan bazı öneriler ise Bölüm 4'te verilmiştir.

2. DEMİRLEME SİSTEMLERİNİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

Bir demirleme sisteminin modellenmesi üç temel unsuru içerir. Bunlardan birincisi; demirleme sisteminin kullanılacağı çevre koşulunun bir modeli, ikincisi; demirleme sisteminin kendisini tanımlayan bir model ve üçüncüsü ise demirleme sistemi dinamiğinin gösterimidir. Problemin üzerinde düzgün ve doğru bir şekilde çalışabilmek için bu üç temel unsurun matematiksel terimlerle tanımlanması gerekmektedir.

Yavaş hareketler söz konusu olduğu zaman iki farklı yaklaşım ortaya çıkar. Bunlardan biri deneysel diğeri ise teorik yaklaşımlardır. Teorik yaklaşımda teknenin yavaş hareketinin matematik modelinin formülasyonu; hareket denklemleri, üçüncü dereceden manevra denklemleri, beşinci dereceden yüksek sürüklemeli manevra denklemleri ile yapılan modellemelerdir. Tüm bu matematiksel modellemelerin yapılmasının nedeni, demirleme sistemlerinin lineer olmayan dinamik analizini anlamak ve onu simule etmektir.

İlk adım, bir takım zorlayıcı kuvvetlerin etkisi altındaki sistemin, karmaşık ve lineer olmayan tepkilerini doğru bir şekilde modelleyebilecek sistem dinamiğinin en uygun gösterimini seçebilmektir. Bu da, sistemin zorlayıcı kuvvetleri ile tepkilerini, frekans ya da zaman aralıklarına bölünmesi şeklinde yapılabilir. Demirleme sistemlerinde birbiriyle ilişkili her tepki görece birbirlerinden bağımsız olduğu için, ilgili problem, her bir zaman aralığında ayrı ayrı incelenip, üzerinde çalışılabilir. Böylece, her bir kısım için elde edilen çözümler birleştirilerek sistemin global tepkisi elde edilir. Bu tür bir modelleme, sistemi biraz olsun basitleştirip, kesin çözümden de fazla uzaklaşmaz. Bu bölümde problemin sadece belli bir kısmı olan, yavaş hareketli, yatay düzlem dinamiği ele alınacaktır.

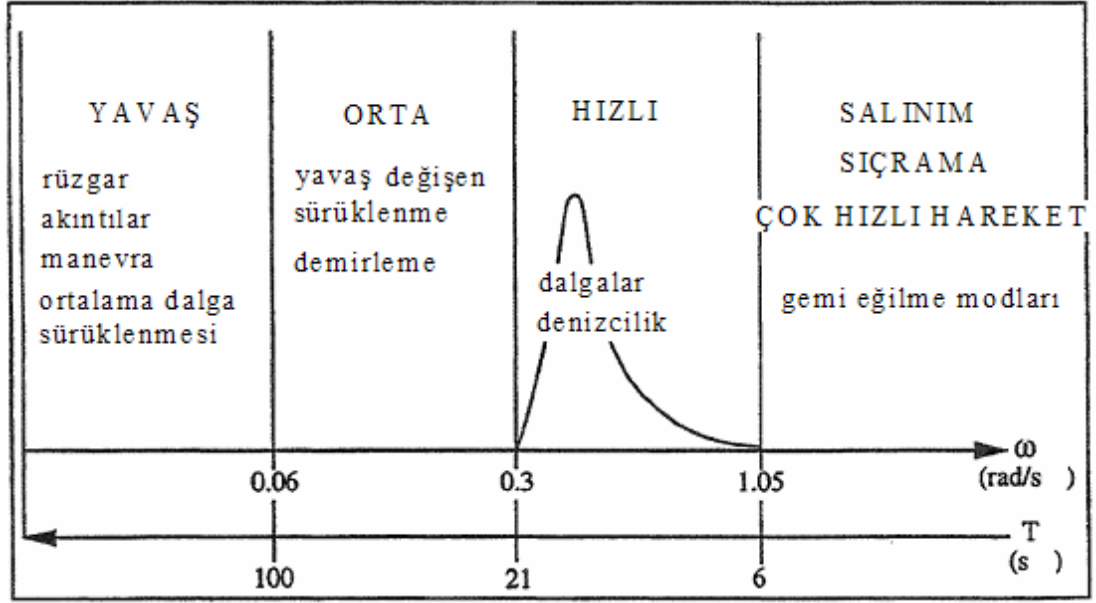
Demirleme sistemi probleminin doğru bir matematiksel çerçevede modellenebilmesi için kullanılacak model elemanlarının da doğru bir şekilde gösterilmesi

gerekmektedir. Bu da, sistem dinamiğini tanımlayan bir takım koordinat sistemleriyle, hareket denklemi ve kinematik bağıntılarla mümkün olabilir. Bu tip bir matematiksel çerçevede, akıntı, rüzgar ve dalga gibi bir takım çevreye bağlı etmenler, hareket denkleminde zorlayıcı kuvvetler adı altında toplanmıştır.

2.1 Demirleme Sistemi Dinamiği ve Zaman Aralıkları

Demirleme sistemleri dıştan gelen zorlayıcı kuvvetlere geniş frekans aralıklarında dinamik olarak tepki verirler. Çevresel nedenlerden ötürü oluşan bu zorlayıcı kuvvetler incelendiğinde, sistem dinamiğinde dört zaman aralığı Şekil 2.1’de gösterildiği gibi tanımlanabilir.

- Zamandan bağımsız ve akıntı, rüzgar gibi etmenlerden ötürü oluşacak temel ortalama dalga sürüklenmelere karşı yüzen bir teknenin vereceği tepkinin yatay düzlemdeki yavaş hareketleri
- Yavaşça değişen dalga sürüklenme [8] ve/veya bellek etkisine bağlı olarak orta derecedeki frekans hareketleri [17]
- Demirleme ile kontrol edilemeyecek olan dalga frekansına bağlı hareketler. Bu hareketler hızlı, birinci dereceden hareketler olup, kısmi olarak demirleme hattına iletilirler. Bu hızlı, zorlayıcı frekans doğrudan demirleme hattına etki eder. Bu hızlı hareketler, teknenin altı serbestlik derecesini etkiler ancak dalıp çıkma, yalpa ile baş kıkırma hareketlerinde, oradaki hidrostatik geri getirme kuvvetlerinden ötürü daha baskındır.
- Demirleme hattına gelen akıştan dolayı oluşan titreşimlere bağlı olarak oluşan akışkan-yapı arası frekanslar. Bu hızlı ve zorlayıcı frekanslar demirli tekneyi esnek bir yapıymış gibi etkiler.



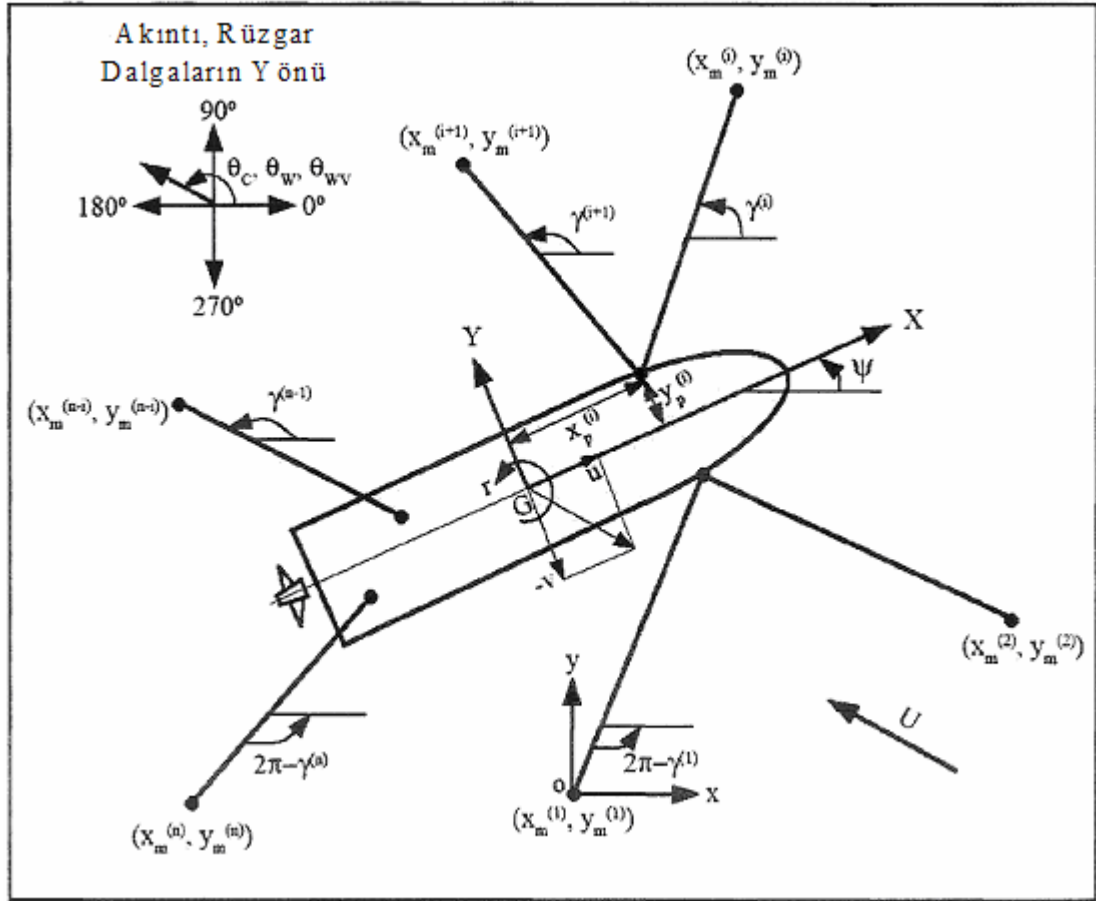
Şekil 2.1 : Zorlayıcı Kuvvetler İncelendiğinde Sistem Dinamiğinin Dört Zaman Aralığında Tanımlanması

Demirleme sistemlerinin dinamiği, lineer olmayan ve karmaşık hesaplamalardan oluşur. Bu problemi biraz olsun basite indirgemek adına, hızlı ve akışkan-yapı ilişkisine bağlı zaman aralıkları ile yavaş ve orta zaman aralıkları birbirinden bağımsızmış gibi düşünülebilir ya da sayısal uygulamalar kısmında da bahsedileceği gibi, yatay düzlemdeki tek bir hareketin varlığı ele alınıp, buna göre hareket denklemi çözülebilir. Öte yandan, gerçekçi bir modelleme hızlı ve yavaş/orta şiddetteki hareketlerin süperpoze edilmesiyle yapılır.

2.2 Hareket Denklemleri ve Kinematik

Bir demirleme sisteminin hareket denklemleri, demirlenen cisim rijit bir biçimde düşünüp, dinamiğini buna göre inceler. Demirleme hatlarından gelen geri getirme kuvvetlerine ait terimler ile çevreden gelen zorlayıcı kuvvete ait terimleri de içerir.

Dağınık bir şekilde demirlenmiş (Spread Mooring System-SMS) tek gövdeli bir geminin genel gösterimi Şekil 2.2’de gösterilmektedir.



Şekil 2.2 : Dağınık Şekilde Demirlenmiş (SMS) Bir Teknenin Geometrik Gösterimi

SMS konfigürasyonunda, demirleme hatlarının azimutu ve pozisyonu tekne gövde etrafında, genel olarak simetrik bir biçimde dağılmıştır. SMS konfigürasyonu çok genel bir demirleme sistemi modeli olup, diğer sistemlere, mesela taret demirleme sistemine (Turret Mooring System-TMS) kolayca adapte edilebilir. TMS tipi demirleme sisteminde, tüm demirleme hatları, düşey düzlemde tekne gövdesine göre kendi eksenini etrafında hareket eden bir silindire bağlıdır [22]. TMS, taret için ek bir rotasyona serbestlik derecesi eklenerek düzgün bir şekilde modellenebilir. Ancak bir SMS tipindeki bir teknenin gövdesi üzerindeki demirleme hatları üzerindeki bağlantı noktaları tek bir noktaya aktarılırsa, mesela taretin merkezine, Şekil 2.2 temel bir TMS geometrisine benzetilmiş olabilir. TMS'nin basitleştirilmesi, taretin iç sürtünmesinin ve çapının ihmal edilmesinden geçer. Bu tür ihmallerin yavaş şiddetteki hareket dinamiğindeki etkisi analiz edilmiş olup [10, 11] ihmal edilebilir olduğu kanısına varılmıştır.

Şekil 2.2'de gösterildiği üzere iki farklı koordinat sistemi kullanılmıştır [18]. Bunlar sırasıyla:

- Cisim baz alınarak düşünölmüş koordinat sistemi G-XYZ. Bu koordinat sisteminin orijini, demirli geminin ağırlık merkezi (CG) dir. (X,Z) teknenin simetri düzlemidir.
- Atalet çerçevesinde düşünölen o-xyz sisteminde (earth-fixed) orijin, deniz dibinde demirleme hattının olduğı yerdedir.

Yatay düzlemde, doğrusal olmayan, yavaş şiddetteki hareketin TMS tipindeki bir demirleme sistemi için denklemleri boyuna öteleme (surge-xx), yanal öteleme (sway-yy) ve yunuslama (yaw-xy) için sırasıyla aşağıdaki gibi verilmiştir [13, 23, 24].

$$(m + m_{11})\dot{u} - mrv = X_C + X_W + X_{WV} + \sum_{i=1}^n [X_M^{(i)} - X_D^{(i)}] \quad (2.1)$$

$$(m + m_{22})\dot{v} + m_{26}\dot{r} + mru = Y_C + Y_W + Y_{WV} + \sum_{i=1}^n [Y_M^{(i)} - Y_D^{(i)}] \quad (2.2)$$

$$m_{62}\dot{v} + (I_Z + I_{66})\dot{r} = N_C + N_W + N_{WV} + \sum_{i=1}^n \{x_p^{(i)} [Y_M^{(i)} - Y_D^{(i)}] - y_p^{(i)} [X_M^{(i)} - X_D^{(i)}]\} \quad (2.3)$$

(2.1), (2.2) ve (2.3) no'lu denklemlere göre;

m , geminin kütlesi; I_Z , Z eksenindeki kütle atalet momenti; m_{11} , boyuna öteleme hareketindeki ek kütle; m_{22} , yanal öteleme hareketindeki ek kütle; I_{66} , yanal öteleme hareketindeki ek kütle atalet momenti; m_{26} , yunuslama hareketindeki ivmeye göre yanal ötelemedeki ek kütle; m_{62} , yanal öteleme hareketindeki ivmeye göre yunuslamadaki ek kütle; u , boyuna öteleme hareketinde suya göre bağıl hız; $\dot{u}$, boyuna öteleme hareketinde suya göre bağıl ivme; v , yanal öteleme hareketinde suya göre bağıl hız; $\dot{v}$, yanal öteleme hareketinde suya göre bağıl ivme; r , yunuslama hareketinde suya göre bağıl hız ve $\dot{r}$, yunuslama hareketinde suya göre bağıl ivmedir.

Çevreden gelen zorlayıcı kuvvetler, akıntı, rüzgar ve dalgaları içerir. Buna göre yukarıdaki (2.1), (2.2) ve (2.3) no'lu denklemlerde; X_C ve Y_C , daimi akıma bağıl hidrodinamik kuvvetler; N_C , daimi akıma bağıl hidrodinamik moment; X_W ve Y_W ,

daimi rüzgara bağlı aerodinamik kuvvetler; N_w , daimi rüzgara bağlı aerodinamik moment; X_{wv} ve Y_{wv} , ikinci dereceden dalga sürüklenme yüklerindeki kuvvetler; N_{wv} ise ikinci dereceden dalga sürüklenme yüklerindeki momentidir.

Demirleme sistemleri için geri getirme kuvvetleri, iticiler (dinamik pozisyonlama), demirleme hatları ya da bu ikisinin birleşiminden oluşur. Yukarıdaki (2.1), (2.2) ve (2.3) no'lu denklemlere yine geri dönmek gerekirse;

n , demirleme hatlarının sayısı; $X_M^{(i)}$, i. demirleme hattında boyuna öteleme hareketindeki geri getirme kuvveti; $Y_M^{(i)}$, i. demirleme hattında yanal öteleme hareketindeki geri getirme kuvveti; $X_D^{(i)}$, i. demirleme hattından hidrodinamik sürüklenmeye bağlı boyuna öteleme kuvveti; $Y_D^{(i)}$, i. demirleme hattından hidrodinamik sürüklenmeye bağlı yanal öteleme kuvveti ve son olarak $(x_p(i), y_p(i))$ ise i. demirleme hattındaki bağlantı noktalarına ait koordinatlardır.

Basit TMS tipindeki bir yapılandırmada $y_p^{(i)} = 0$ ve $x_p^{(i)} = x_p$ 'dir. SMS konfigürasyonu içinse $x_p^{(i)} = \pm x_p$ olabilir.

Bağıl tekne hızının (u,v,r) yatay bileşenleri atalet (earth-fixed) koordinat sistemi o-xyz 'ye aşağıdaki kinematik bağıntılarla bağlıdır. [2, 23]

$$\dot{x} = u \cos \psi - v \sin \psi + U \cos \theta_C \quad (2.4)$$

$$\dot{y} = u \sin \psi + v \cos \psi + U \sin \theta_C \quad (2.5)$$

$$\dot{\psi} = r \quad (2.6)$$

Yukarıdaki denklemlere göre U , akıntı hızı; x , boyuna ötelemede teknenin ağırlık merkezinin o-xyz koordinat düzlemine göre yeri ve G-XYZ koordinat sisteminin orijini ve y , yanal ötelemede teknenin ağırlık merkezinin o-xyz koordinat düzlemine göre yeri ve G-XYZ koordinat sisteminin orijini.

Bu matematiksel modelde ψ ve θ_C açılarının her ikisi de o-xyz koordinat düzleminin x eksenine göre, saat yönünün tersinde ele alınmıştır. Buna göre, ψ ; demirlenmiş teknenin yunuslama açısı ya da sürüklenmesi ve θ_C , mutlak akıntı yönüdür.

2.3 Akıntıya Bağlı Olarak Zorlanma

(2.1), (2.2) ve (2.3) no'lu denklemlerde bahsi geçen hıza bağlı tekne hidrodinamik kuvvetleri X_C , Y_C ve momenti N_C 'nin tahmin edilmesi adına bir çok hidrodinamik model geliştirilmiştir ve üzerinde çeşitli çalışmalar yapılmıştır [25]. Bunlardan biri, Abkowitz Modelidir [1]. Bu anlamda kullanılan diğer modellerden bir diğeri ise, Short-Wing Modelidir ve sürüklenme kuvveti katsayılarına dayanır [19, 20, 21, 24].

Abkowitz Modelinde, hidrodinamik kuvvetler ve moment sabit bir ileri hıza göre Taylor serisine açılır. Bu hidrodinamik kuvvet ve momentler, kinematik parametrelerin ve dümen açısının (δ) fonksiyonu şeklinde yazılabilir [1].

$$\begin{aligned} X &= X(u, v, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{r}, \delta) \\ Y &= Y(u, v, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{r}, \delta) \\ N &= N(u, v, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{r}, \delta) \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} X &= X_0 + \frac{\partial X}{\partial u}(u - U) + \frac{\partial X}{\partial v}v + \frac{\partial X}{\partial r}r + \frac{\partial X}{\partial \dot{u}}\dot{u} + \frac{\partial X}{\partial \dot{v}}\dot{v} + \frac{\partial X}{\partial \dot{r}}\dot{r} + \frac{\partial X}{\partial \delta}\delta \\ &= \frac{1}{2!} \left[\frac{\partial}{\partial u}(u - U) + \frac{\partial}{\partial v}v + \frac{\partial}{\partial r}r + \frac{\partial}{\partial \dot{u}}\dot{u} + \frac{\partial}{\partial \dot{v}}\dot{v} + \frac{\partial}{\partial \dot{r}}\dot{r} + \frac{\partial}{\partial \delta}\delta \right]^2 X \\ &+ \dots + \frac{1}{n!} \left[\frac{\partial}{\partial u}(u - U) + \frac{\partial}{\partial v}v + \frac{\partial}{\partial r}r + \frac{\partial}{\partial \dot{u}}\dot{u} + \frac{\partial}{\partial \dot{v}}\dot{v} + \frac{\partial}{\partial \dot{r}}\dot{r} + \frac{\partial}{\partial \delta}\delta \right]^n X + \dots, \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} Y &= Y_0 + \frac{\partial Y}{\partial u}(u - U) + \frac{\partial Y}{\partial v}v + \frac{\partial Y}{\partial r}r + \frac{\partial Y}{\partial \dot{u}}\dot{u} + \frac{\partial Y}{\partial \dot{v}}\dot{v} + \frac{\partial Y}{\partial \dot{r}}\dot{r} + \frac{\partial Y}{\partial \delta}\delta \\ &= \frac{1}{2!} \left[\frac{\partial}{\partial u}(u - U) + \frac{\partial}{\partial v}v + \frac{\partial}{\partial r}r + \frac{\partial}{\partial \dot{u}}\dot{u} + \frac{\partial}{\partial \dot{v}}\dot{v} + \frac{\partial}{\partial \dot{r}}\dot{r} + \frac{\partial}{\partial \delta}\delta \right]^2 Y \\ &+ \dots + \frac{1}{n!} \left[\frac{\partial}{\partial u}(u - U) + \frac{\partial}{\partial v}v + \frac{\partial}{\partial r}r + \frac{\partial}{\partial \dot{u}}\dot{u} + \frac{\partial}{\partial \dot{v}}\dot{v} + \frac{\partial}{\partial \dot{r}}\dot{r} + \frac{\partial}{\partial \delta}\delta \right]^n Y + \dots, \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned}
N &= N_0 + \frac{\partial N}{\partial u}(u-U) + \frac{\partial N}{\partial v}v + \frac{\partial N}{\partial r}r + \frac{\partial N}{\partial \dot{u}}\dot{u} + \frac{\partial N}{\partial \dot{v}}\dot{v} + \frac{\partial N}{\partial \dot{r}}\dot{r} + \frac{\partial N}{\partial \delta}\delta \\
&= \frac{1}{2!} \left[\frac{\partial}{\partial u}(u-U) + \frac{\partial}{\partial v}v + \frac{\partial}{\partial r}r + \frac{\partial}{\partial \dot{u}}\dot{u} + \frac{\partial}{\partial \dot{v}}\dot{v} + \frac{\partial}{\partial \dot{r}}\dot{r} + \frac{\partial}{\partial \delta}\delta \right]^2 N \\
&+ \dots + \frac{1}{n!} \left[\frac{\partial}{\partial u}(u-U) + \frac{\partial}{\partial v}v + \frac{\partial}{\partial r}r + \frac{\partial}{\partial \dot{u}}\dot{u} + \frac{\partial}{\partial \dot{v}}\dot{v} + \frac{\partial}{\partial \dot{r}}\dot{r} + \frac{\partial}{\partial \delta}\delta \right]^n N + \dots,
\end{aligned} \tag{2.10}$$

Yukarıdaki (2.8), (2.9) ve (2.10) no'lu denklemlerde X_0 , Y_0 , N_0 ve diğer tüm türevler, sabit bir ileri hızın başlangıç değerine göre değerler alırlar. $u_0=U$, $v_0=0$, $r_0=0$, $\dot{u}_0=0$, $\dot{v}_0=0$, $\dot{r}_0=0$, $\delta_0=0$ gibi. Bu denklemlerdeki türevler, hidrodinamik türevler olup, $\frac{\partial x}{\partial u} = X_u$, $\frac{\partial x}{\partial v} = X_v$, $\frac{\partial x}{\partial r} = X_r$, $\frac{\partial x}{\partial \dot{u}} = X_{\dot{u}}$, $\frac{\partial x}{\partial \dot{v}} = X_{\dot{v}}$, $\frac{\partial x}{\partial \dot{r}} = X_{\dot{r}}$, $\frac{\partial x}{\partial \delta} = X_{\delta}$ şeklinde ifade edilir.

Bu model pervane ve bir dümen açısı düzeltmeleri olmadan ele alınırsa aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir.

$$\begin{aligned}
X_C^{(A-M)} &= X_u u + X_v v r + X_{vu} v r u + \\
&+ \frac{1}{2!} (X_{uu} u^2 + X_{vv} v^2 + X_{rr} r^2 + X_{vvu} v^2 u + X_{rru} r^2 u) + \frac{1}{3!} X_{uuu} u^3
\end{aligned} \tag{2.11}$$

$$\begin{aligned}
Y_C^{(A-M)} &= Y_v v + Y_r r + Y_{vu} v u + Y_{ru} r u + \\
&+ \frac{1}{2!} (Y_{vr} v r^2 + Y_{rv} r v^2 + Y_{vu} v u^2) + \frac{1}{3!} (Y_{vv} v^3 + Y_{rr} r^3)
\end{aligned} \tag{2.12}$$

$$\begin{aligned}
N_C^{(A-M)} &= N_v v + N_r r + N_{vu} v u + N_{ru} r u + \\
&+ \frac{1}{2!} (N_{vr} v r^2 + N_{rv} r v^2 + N_{vu} v u^2) + \frac{1}{3!} (N_{vv} v^3 + N_{rr} r^3)
\end{aligned} \tag{2.13}$$

Denklem (2.11), (2.12) ve (2.13)'te ifade edilen X , Y ve N sırasıyla boyuna öteleme, yanal öteleme ve yunuslama hareketlerine bağlı hidrodinamik kuvvetlerindeki katsayılarıdır. u , v ve r indisleri ise konumları göstermektedir.

2.4 Rüzgara Bağlı Olarak Zorlanma

Tekneye gelen daimi aerodinamik rüzgar kuvvetleri ve moment aşağıdaki katsayılarla ifade edilebilir [4,10].

$$X_W = \frac{1}{2} \rho_a U_W^2 C_{XW}(\theta_{WR}) A_T \quad (2.14)$$

$$Y_W = \frac{1}{2} \rho_a U_W^2 C_{YW}(\theta_{WR}) A_L \quad (2.15)$$

$$N_W = \frac{1}{2} \rho_a U_W^2 C_{NW}(\theta_{WR}) L A_L \quad (2.16)$$

Yukarıdaki (2.14), (2.15) ve (2.16) no'lu denklemlerde ρ_a ; hava yoğunluğu, U_W ; su üzerinden 10 m yükseklikteki rüzgar hızı, θ_{WR} , rüzgar yönüyle gemi yönü arasındaki bağıl açıdır ve $\theta_{WR} = \theta_0 - \psi$ şeklinde bulunup θ_0 , rüzgar yönünün mutlak açısını gösterir, A_T ve A_L ; geminin su yüzeyi üzerindeki kısımlarının enine ve boyuna izdüşüm alanları, C_{XW} , C_{YW} ve C_{NW} ; rüzgarın boyuna ve yanal kuvvetleri ile moment katsayıları olup, Fourier serisinde aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$C_{XW}(\theta_{RW}) = \chi_0 + \sum_{n_W=1}^{\infty} \chi_{n_W} \cos(n_W \theta_{WR}) \quad (2.17)$$

$$C_{YW}(\theta_{RW}) = \sum_{n_W=1}^{\infty} \mathcal{G}_{n_W} \sin(n_W \theta_{WR}) \quad (2.18)$$

$$C_{NW}(\theta_{RW}) = \sum_{n_W=1}^{\infty} \zeta_{n_W} \sin(n_W \theta_{WR}) \quad (2.19)$$

Yukarıdaki (2.17), (2.18) ve (2.19) no'lu denklemlerdeki χ_0 , χ_{n_W} , $\mathcal{G}_{n_W}$ ve ζ_{n_W} katsayıları geminin tipine, yaşam mahallinin yerine, geminin yükleme durumuna ve

bağıl rüzgar açısı θ_{WR} 'ye bağlıdır. Tüm bu katsayılar deneylerle birebir ölçekte ölçülüp elde edilmiş veriler yardımıyla bulunmuştur.

2.5 Dalgalara Bağlı Olarak Zorlanma

Gemi ve uzak kıyı hidrodinamiğinde lineer olmayan birçok dalga-cisim arasındaki etkileşim problemleri potansiyel akış teorisine dayanır ve dalga genliği ile uzunluk oranını pertürbasyon parametresi olarak kullanılır. Üç tip dalga zorlayıcı kuvvet vardır. Bunlar, ortalama dalga sürüklenme kuvveti, yavaşça değişen dalga kuvveti (frekans farkı) ve yaylanan dalga kuvvetleridir (frekans toplamı) [9]. Ancak sadece ortalama dalga sürüklenme kuvveti ile yavaşça değişen dalga kuvveti demirleme problemlerinde önemlidir. Newman Yaklaşımı, yavaş değişen dalga sürüklenme kuvvetleri için gemi hidrodinamiğindeki birçok uygulamada kullanılır. Bu yaklaşımdaki en önemli olgu, yavaş değişen dalga sürüklenme kuvvetleri sadece ikinci dereceden ortalama dalga sürüklenme kuvvetlerine bağlıdır. Böylece hesap için kullanılacak zaman azalmış olacaktır [5].

Denklem (2.1), (2.2) ve (2.3)'teki dalgaya bağlı zorlayıcı terim katsayıları (X_{WV} , Y_{WV} , N_{WV}) aşağıdaki gibi ifade edilir [5, 6,10].

$$X_{WV}, Y_{WV}, N_{WV} = \sum_{j=1}^{n_f} \sum_{k=1}^{n_f} A_j A_k T_{jk}^{X,Y,N} \cos(\omega_k - \omega_j) + (\varepsilon_k - \varepsilon_j) \quad (2.20)$$

Denklem (2.20)'de n_f , dalga frekanslarının sayısı; ω ve ε , her bir dalga bileşeninin (j veya k) dairesel frekansı ve faz açısı olup, faz açısı 0 ve 2π arasında düzgün bir şekilde dağılmıştır ve zamana bağlı olarak sabit olarak kalır. Dalga genliği $A_{j,k}$ ise iki parametrelili (dalga yüksekliği $H_{1/3}$ ve dalga periyodu $T_{1/3}$) Bretschneider dalga enerji spektrumu, $S(\omega_{j,k})$ ile aşağıdaki (2.21) no'lu denklem yardımıyla hesaplanabilir.

$$A_{j,k} = \sqrt{2S(\omega_{j,k})\Delta\omega_{j,k}} \quad (2.21)$$

Burada, $\Delta\omega_{j,k} = \omega_{j,k} - \omega_{j-1,k-1}$ eşitliğindeki gibidir.

$T_{jk}^{X,Y,N} = \sqrt{(D_j^{X,Y,N} + D_k^{X,Y,N})}/2$ şeklinde olup, dalga kuvveti için transfer fonksiyonları, $D_j^{X,Y,N}$ ve $D_k^{X,Y,N}$ ile ifade edilir.

Dalga kuvvetleri için transfer fonksiyonları aşağıdaki gibi yazılabilir [5, 6].

$$D_{j,k}^X = \frac{1}{2} \rho g L C_{XWV}(\omega_{j,k}) \cos^3(\theta_{WV} - \psi) \quad (2.22)$$

$$D_{j,k}^Y = \frac{1}{2} \rho g L C_{YWV}(\omega_{j,k}) \sin^3(\theta_{WV} - \psi) \quad (2.23)$$

$$D_{j,k}^N = \frac{1}{2} \rho g L C_{N WV}(\omega_{j,k}) \sin 2(\theta_{WV} - \psi) \quad (2.24)$$

Denklem (2.22), (2.23) ve (2.24)'teki g , yer çekimi ivmesi ve θ_{WV} , dalga yönünün mutlak açısıdır. C_{XWV} , C_{YWV} , $C_{N WV}$ katsayıları ise lineer, birinci dereceden denizcilik probleminin tam çözümünden elde edilir [3].

Denklem (2.20)'de, diyagonal terimlerin ($k = j$) ortalama zaman değerleri, ortalama dalga sürüklenme kuvvetlerini verir. Öte yandan diyagonal olmayan terimler ($k \neq j$) ortadan kalkar. Bulunan ortalama dalga sürüklenme kuvvetleri aşağıdaki (2.25) no'lu denklemdeki gibi yazılabilir [4].

$$\bar{X}_{WV}, \bar{Y}_{WV}, \bar{N}_{WV} = \sum_{j=1}^{n_f} A_j^2 D_j^{X,Y,N} \quad (2.25)$$

2.6 Demirleme Hattının Modellenmesi

Sistemin i. demirleme hattındaki boyuna ve yanal ötelemelerdeki geri getirme kuvveti bileşenleri $X_M^{(i)}$ ve $Y_M^{(i)}$; $T_H^{(i)}$ 'in, yani, i. demirleme hattının yatay düzlemi içindeki gerilmenin izdüşümleridir ve aşağıdaki gibi ifade edilirler.

$$X_M^{(i)} = T_H^{(i)} (\cos \gamma^{(i)} \cos \psi + \sin \gamma^{(i)} \sin \psi) \quad (2.26)$$

$$Y_M^{(i)} = T_H^{(i)} (\sin \gamma^{(i)} \cos \psi - \cos \gamma^{(i)} \sin \psi) \quad (2.27)$$

Denklem (2.26) ve (2.27)'de bahsi geçen $\gamma^{(i)}$, x eksenine ile saat yönünün tersinde ölçülen i. demirleme hattı arasındaki açıyı temsil eder ve Şekil 2.2'de de gösterilmiştir.

Aşağıdaki geometrik bağıntılar, SMS tipindeki bir demirleme sisteminin, demirleme hatlarının konumlanması açısından yararlı olacaktır [4].

$$\cos \gamma^{(i)} = \frac{x_m^{(i)} - x_T^{(i)}}{l^{(i)}} \quad (2.28)$$

$$\sin \gamma^{(i)} = \frac{y_m^{(i)} - y_T^{(i)}}{l^{(i)}} \quad (2.29)$$

$$l^{(i)} = \sqrt{(x_m^{(i)} - x_T^{(i)})^2 + (y_m^{(i)} - y_T^{(i)})^2} \quad (2.30)$$

$$x_T^{(i)} = x + x_p^{(i)} \cos \psi - y_p^{(i)} \sin \psi \quad (2.31)$$

$$y_T^{(i)} = y + x_p^{(i)} \sin \psi - y_p^{(i)} \cos \psi \quad (2.32)$$

Yukarıdaki denklemlerde, $(x_m^{(i)}, y_m^{(i)})$; i. demirleme hattının ucunun ya da zincirinin yatay düzlem koordinatları, $l^{(i)}$; demirleme hattının ucu ile kurtağzı arasındaki i. demirleme hattının yatay izdüşümü, $(x_T^{(i)}, y_T^{(i)})$; o-xyz koordinat sistemi içindeki i. demirleme hattının kurtağzı koordinatları ve son olarak $(x_p^{(i)}, y_p^{(i)})$; G-XYZ koordinat sistemi içindeki i. demirleme hattının kurtağzı koordinatlarını gösterir.

Demirleme sistemlerinin yavaş hareketlerinin dinamiğini inceleyebilmek için, demirleme hatları yarı statik olarak modellenenebilir. Diğer bir genel basitleştirme ise, her bir hattın geometrisinin iki boyutlu olduğu ve her bir hattın kurtağzı ile zincir arasındaki düşey düzlemde yer aldığıdır. Bu yüzden demirleme hattının geri getirme kuvveti bileşeni aynı düşey düzlem içersindedir. Demirleme hattı modellemeleri

öncelikle, düzlem içindeki gerilme ve konumla bağıntılı olarak basite indirgenmeye çalışılmıştır. Bunlar, yatay gerilme T_H ve demirleme hattının izdüşürülmüş uzunluğu olan l' 'dir.,

Demirleme hatları genellikle birçok parçadan meydana gelmektedir. Farklı malzemeler ve imalat teknikleri, bu demirleme hatlarının parçalarının yapımında etkilidir. Bu parçalar, sentetik iplerin, kabloların ve zincirlerin kullanıldığı değişik demirleme operasyonlarında kullanılır.

Sentetik fiber ipler (Synthetic Fiber Ropes, SFR), hafif olduğu gibi aynı zamanda uzayabilirler. Sentetik fiber ipler, suyun dışında işlevlerini yerine getirebildikleri gibi derin su demirlemelerinde kullanılabilen hibrit hatlarda da parça olarak yer alırlar. Geri getirme kuvvetleri, uzayabilmelerinden ileri gelir [12]. SFR modelindeki demirleme hattındaki gerilmenin yatay bileşeni olan T_H , denklem (2.33) ile ifade edilmiştir.

$$T_H = S_b p \left(\frac{l - l_w}{l_w} \right)^q \quad (2.33)$$

Yukarıdaki denklemde S_b , sentetik hattın ortalama kopma gücünü gösterir. p ve q sabitleri ise yapılan deneyler sonucu elde edilmiştir. l_w , zorlanmamış olan ipin izdüşümünün yatay uzunluğudur.

Çelik kablolar, sentetik fiberlere göre daha ağırdırlar ve daha az uzayabilirler ve üç boyutta da deforme olurlar. Kısaca bilgi vermek gerekirse, çelik kablolar, lineer olmayan sonlu elemanlar modeli ile hesaplanır. Bu şekilde, kısmi batma, üç boyutlu deformasyon, etkin gerilme, uzayabilme ve lineer olmayan çekme de göz önünde bulundurulabilir [14].

Zincirler, kablolardan daha ağır olup sadece biraz daha uzayabilme kabiliyetleri vardır ve hidrodinamik sürüklenmeleri fazladır. Genelde tamamen suya batmışlardır ve dikey düzlemde zincir eğrisi denklemleri ile modellenirler [14]. Çekme ve demirleme operasyonlarında çapalı ve askıya alınmış olmak üzere genelde iki tip zincir eğrisi kullanılır. Çapalı zincir eğrisi (Anchored Catenaries, AC) genelde orta derinlikteki sularda kullanılır ve içinde lineer olmayan sürüklenme ile yere inişi de

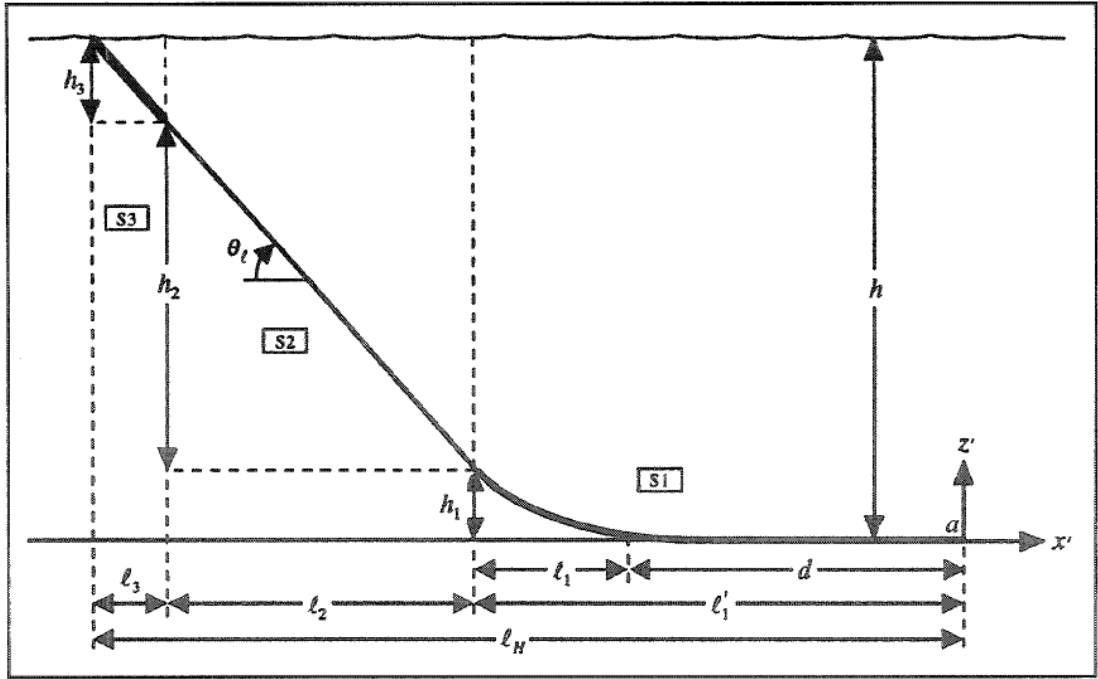
içine alır. Bir zincirdeki gerilme, zincir eğrisinin askıya alınmış olan kısmının izdüşümüne $(l = l_s + d)$ ve su derinliğine (h) bağlıdır. Askıya alınmış şekildeki zincir eğrileri çekmede ve bazen de sığ sudaki demirleme operasyonlarında kullanılır. AC modellemesindeki T_H iteratif olarak aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\frac{T_H}{P} \sinh\left(\frac{Pl_s}{T_H}\right) = \sqrt{h\left(h + 2\frac{T_H}{P}\right)} \quad (2.34)$$

Denklem (2.34)'de verilen P , birim uzunluk başına gelen zincir eğrisinin ağırlığıdır.

Derin sularda zincir ağırlığı kendisinde ve demirlenmiş gemilerde önemli bir dikey yük oluşturur. Bunu önlemek için de iki çözüm düşünülebilir. Bunlardan biri şamandıra, diğeri ise hibrit demirleme hatlarıdır. Her bir şamandıra dinamik olarak üç adet rotasyonel serbestlik derecesinde yeni bir cisim olarak modellenir. Zincir eğrilerindeki her bir parçanın ucundaki gerilmeleri eşleştirerek, şamandıra destekli zincir eğrisi gerilmeleri hesaplanır [14]. Hafif olan sentetik ip ile zincir parçalarının birleştirilmesi petrol endüstrisi tarafında artarak kullanılmaktadır. Bu tip kombinasyonlara hibrit demirleme hatları denir.

Şekil 2.3'te tipik bir hibrit demirleme hattının geometrisini göstermektedir [14]. İki ucu zincir parçalardan oluşurken, ortada, su derinliği h kadar olan, batmış, uzun sentetik bir ip kullanılmıştır.



Şekil 2.3 : Hibrit Bir Demirleme Hattının Modellenmesi

Demirleme hattının atalet koordinatı (x_l, z_l) 'nın orijin noktası, deniz dibi üzerinde konumlanmış çapanın bulunduğu noktadır. Bu hat üç parçadan oluşur. S1 parçası, çapa ile demirlenmiş olan zincirden (AC); S2 parçası, sentetik fiber ipten (SFR); S3 ise demirlenmiş gemiye tutturulmuş zincir veya yukarı zincirden (Upper Chain, UC) oluşur. SFR, zincire göre daha hafiftir ve derin suda demirleme hattının büyük bir kısmını oluşturur. Şekil 2.3'teki demirleme hattının geometrik özellikleri şöyledir. l_H , deniz dibindeki demirleme noktası ile demirleme hattının üst ucu (gemiyle olan bağlantı noktası) arasındaki yatay mesafedir. d , deniz dibindeki AC'nin yatay mesafesi; l_1 , AC'nin askıdaki kısmının yataydaki izdüşümünün uzunluğu; l'_1 , AC'nin yataydaki izdüşümünün toplam uzunluğu ($l'_1 = l_1 + d$); l_2 , SFR'nin yataydaki izdüşümünün uzunluğu; l_3 , UC'nin yatay mesafesi; h_1 , AC'nin derinliği; h_2 , SFR'nin derinliği; h_3 , UC'nin derinliği ve son olarak θ_t , demirleme hattının yatay düzleme göre yaptığı eğimin dikey açısıdır.

Zincir hesabında, her bir parçanın uç noktasına uygulanan momentlerin ihmal edilebilir olduğu düşünülebilir. SFR'nin ağırlığı ihmal edilebilir olduğundan, iki ucundaki gerilmeler eşittir. Bir demirleme hattındaki gerilmeyi elde etmek için, AC ve SFR arasındaki gerilme ilişkisini çok iyi tanımlamak gerekir. Eksensel gerilme T aşağıdaki gibi verilebilir [21].

$$T = \sqrt{T_H^2 + T_V^2} = \frac{T_H}{\cos \theta_l} \quad (2.35)$$

Denklem (2.35)'deki T_H ve T_V , demirleme hattındaki gerilmelerin yatay ve dikey bileşenlerini göstermektedir. Dikey eğim açısı θ_l ise aşağıdaki gibi ifade edilebilir [14].

$$\theta_l = \tan^{-1} \left(\sinh \left(\frac{Pl_1}{T_H} \right) \right) \quad (2.36)$$

AC ve SFR'ye ait eksensel gerilmeler ise sırasıyla aşağıdaki gibidir. [13]

$$T = T_H \cosh \left(\frac{Pl_1}{T_H} \right) \quad (2.37)$$

$$T = S_b p \left(\frac{l_{2T} - l_{w2}}{l_{w2}} \right)^q \quad (2.38)$$

l_{2T} , SFR'nin deforme olmuş uzunluğudur ve aşağıdaki formül ile ifade edilebilir.

$$l_{2T} = \sqrt{l_2^2 + h_2^2} \quad (2.39)$$

Demirleme hattının toplam deforme olmamış uzunluğu, l_{wT} , bileşenleri olan l_{w1} , l_{w2} ve l_{w3} 'ün toplamına eşittir. Bu bileşenler sırasıyla S1, S2 ve S3 parçaları ile uyum içersindedir.

$$l_{wT} = l_{w1} + l_{w2} + l_{w3} \quad (2.40)$$

Hibrit demirleme hattındaki iki temel geometrik bağıntıya şöyledir:

$$l_H = d + l_1 + l_2 + l_3 \quad (2.41)$$

$$h = h_1 + h_2 + h_3 \quad (2.42)$$

Denklem (2.41) ve (2.42)'deki değerler aşağıdaki gibidir.

$$d = l_{w1} - l_{eff} \quad (2.43)$$

$$l_2 = l_{w2} \left[\left(\frac{T}{S_b P} \right)^{1/q} + 1 \right] \cos \theta_l \quad (2.44)$$

$$l_3 = l_{w3} \cos \theta_l \quad (2.45)$$

$$h_1 = \frac{T_H}{P} \left[\cosh \left(\frac{Pl_1}{T_H} \right) - 1 \right] \quad (2.46)$$

$$h_2 = l_{w2} \left[\left(\frac{T}{S_b P} \right)^{1/q} + 1 \right] \sin \theta_l \quad (2.47)$$

$$h_3 = l_{w3} \sin \theta_l \quad (2.48)$$

l_{eff} , AC'nin askıda olduğu durumunun uzunluğudur [14].

$$l_{eff} = \frac{T_H}{P} \sinh \left(\frac{Pl_1}{T_H} \right) \quad (2.49)$$

Denklem (2.35) ve (2.36) göz önüne alındığında aşağıdaki gibi bir ifade yazılabilir.

$$\cos \theta_l = \left[\cosh \left(\frac{Pl_1}{T_H} \right) \right]^{-1} = \operatorname{sech} \left(\frac{Pl_1}{T_H} \right) \quad (2.50)$$

Böylece şu bağıntı elde edilir.

$$\sin \theta_l = \tanh \left(\frac{Pl_1}{T_H} \right) \quad (2.51)$$

Denklem (2.35) ile (2.49)-(2.51)'i denklem (2.43)-(2.48) içinde birleştirilirse, demirleme hattının geometrisi l_1 ve T_H gibi iki değişken ile aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$l_H - l_1 - l_{w1} + \frac{T_H}{P} \sinh \left(\frac{Pl_1}{T_H} \right) - \left\{ l_{w2} \left[\left(\frac{T_H \cosh \left(\frac{Pl_1}{T_H} \right)}{S_b p} \right)^{1/q} + 1 \right] + l_{w3} \right\} \operatorname{sech} \left(\frac{Pl_1}{T_H} \right) = 0 \quad (2.52)$$

$$h - \frac{T_H}{P} \left[\cosh \left(\frac{Pl_1}{T_H} \right) - 1 \right] - \left\{ l_{w2} \left[\left(\frac{T_H \cosh \left(\frac{Pl_1}{T_H} \right)}{S_b p} \right)^{1/q} + 1 \right] + l_{w3} \right\} \tanh \left(\frac{Pl_1}{T_H} \right) = 0 \quad (2.53)$$

Denklem (2.52) ve (2.53), verilmiş olan su derinliği ve tanımlanan l_H , l_{w1} , l_{w2} , l_3 değerleri ile T_H ve l_1 için eş zamanlı olarak çözülürler. Demirleme hattının diğer geometrik bileşenleri denklem (2.35) ve (2.43)-(2.48) yardımıyla, demirleme hattındaki eksensel gerilmeler ise, denklem (2.36) veya (2.37) kullanılarak hesaplanabilir.

2.7 Demirleme Hatlarına Bağlı Olarak Sönüm

Demirleme sistemlerinin stabilitesi ve buna bağlı denge, zincirleme bifürkasyonlar ve bunların tekillikleri gibi birçok şey sönümlemeyle yakından ilgilidir. Teknenin kendi sönümlemesi düzgün bir şekilde modellenemesinin nedeni deney havuzlarında kullanılan modelin hidrodinamik katsayıları deneysel olarak ölçülebilmesidir. Ancak, demirleme hatları için öncelikle iyi bir sönümleme modeli gerekmektedir çünkü batmış olan zincirler üzerindeki sürüklenme kuvvetleri, demirleme sisteminin toplam sönümlemesinin büyük bir kısmını oluşturmaktadır. [13,14] Ayrıca derinlik arttıkça, suya bağlı olarak hareket eden batmış durumdaki demirleme hattı ve buna bağlı olarak sönüm büyüklüğü de artış gösterip, sonuç olarak sistemin davranışını etkileyecektir.

Yavaş hareket problemlerinde, demirleme hatlarının kendisi de yavaş hareket eder, u yüzden yarı statik bir davranışın söz konusu olduğu düşünülebilir. Demirleme hattının sönümü için analitik bir model, demirleme hattı hareketlerine bağlı olarak enerji dağılımı prensibine dayanır. Buna göre, çapayı geminin bağlantı noktasına kadar bağlayan demirleme hattının geometrisi bir zincir eğrisi şekline sahiptir ve bu şekil, yarı statik demirleme hattının hareketi süresince oluşmaktadır [14]. Demirleme hattı hareketlerine bağlı olarak gemiye etki eden boyuna ve yanal öteleme sönüm kuvvetleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$X_D^{(i)} = F_P^{(i)} \cos \beta^{(i)} - F_N^{(i)} \sin \beta^{(i)} \quad (2.54)$$

$$Y_D^{(i)} = F_P^{(i)} \sin \beta^{(i)} - F_N^{(i)} \cos \beta^{(i)} \quad (2.55)$$

Denklem (2.54) ve (2.55)'teki $\beta^{(i)}$, X eksenine ile saat yönünün tersinden ölçülen i.demirleme hattı arasındaki açıdır ($\beta^{(i)} = \gamma^{(i)} - \psi$). $F_P^{(i)}$ ve $F_N^{(i)}$ ise, i. demirleme hattı hareketinin paraleli ve normal yönlerindeki sönüm kuvvetleridir ve şöyle ifade edilirler:

$$F_P^{(i)} = \frac{1}{2} \rho X C_{XD}^{(i)} (\dot{x}_A^{(i)}) d_{eff}^{(i)} h \Gamma_D^{(i)} |\dot{x}_A^{(i)}| \dot{x}_A^{(i)} \quad (2.56)$$

$$F_N^{(i)} = \frac{1}{2} \rho C_{YD}^{(i)} (\dot{y}_A'^{(i)}) d_{eff}^{(i)} h \frac{0.5 \sin \theta_l^{(i)}}{1 - \cos \theta_l^{(i)}} |\dot{y}_A'^{(i)}| \dot{y}_A'^{(i)} \quad (2.57)$$

Yukarıdaki ifadede verilen $C_{XD}^{(i)}$ ve $C_{YD}^{(i)}$, i. demirleme hattının yataydaki hareketlerinin ortalama sürüklenme katsayıları; $d_{eff}^{(i)}$, i. demirleme hattının efektif hidrodinamik çapı ve $\Gamma_D^{(i)}$, i. demirleme hattının yavaş hareketlerinden dolayı oluşan düzlem içindeki hareketlere bağlı olarak meydana gelen enerji dağılımının bir fonksiyonudur. Zincir eğrisi hattının yapılandırılmasına bağlıdır. $\theta_l^{(i)}$, i. demirleme hattının üst tarafındaki dikey açıdır. $\dot{x}_A'^{(i)}$ ve $\dot{y}_A'^{(i)}$, geminin bağlantı noktasındaki hatta paralel ve normal yöndeki demirleme hattının yatay hızlardır ve gemi hızları cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilebilirler.

$$\dot{x}_A'^{(i)} = (u - y_p^{(i)} r) \cos \beta^{(i)} + (v + x_p^{(i)} r) \sin \beta^{(i)} \quad (2.58)$$

$$\dot{y}_A'^{(i)} = (v + x_p^{(i)} r) \cos \beta^{(i)} - (u + y_p^{(i)} r) \sin \beta^{(i)} \quad (2.59)$$

3. LİNEER OLMAYAN DEMİRLEME SİSTEMİ HAREKETLERİNİN SAYISAL ÇÖZÜMLERİ

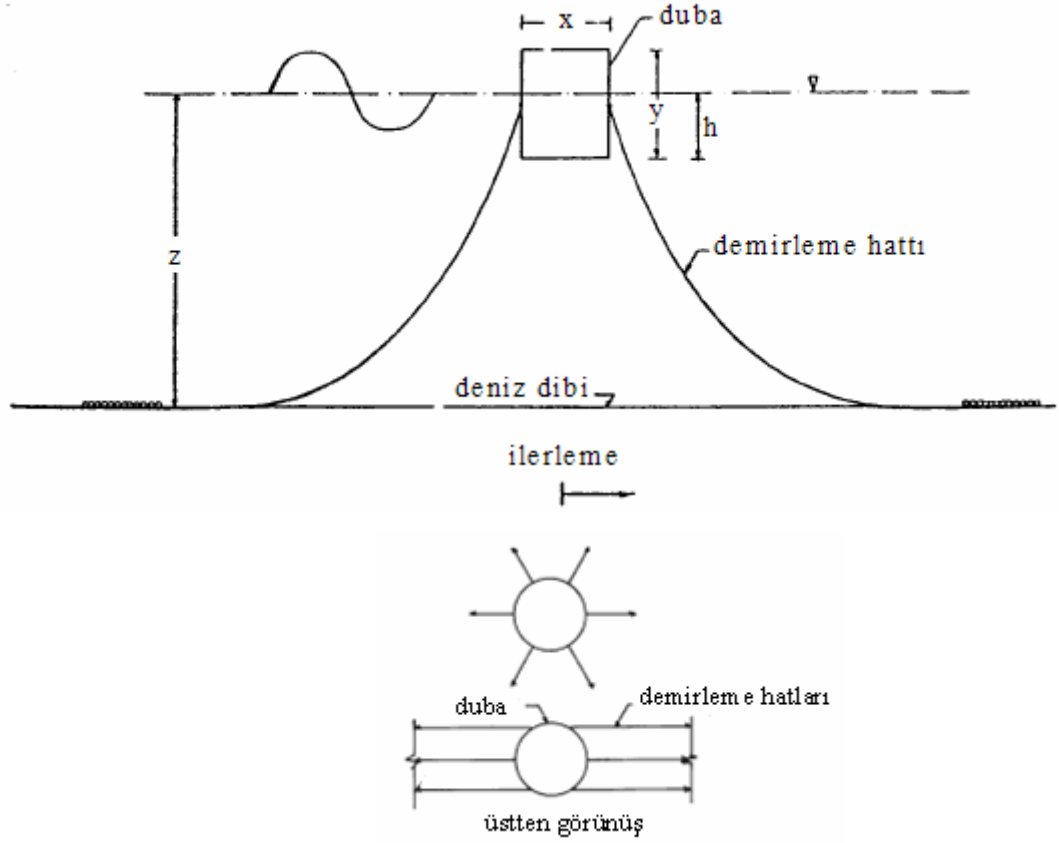
Daha önce de bahsedildiği üzere bir demirleme sisteminin tasarımında çözülmesi gereken denklem takımlarının hepsi ikinci dereceden lineer olmayan problemler üzerine kurulmuştur. Lineer çözümlerde, serbest yüzey şartı ve cismin sınır şartı, serbest yüzeyin ortalama konumunu ve teknenin batmış olan kısmının yüzeyini sırasıyla sağlar. Aynı zamanda, akışkan basıncı ve serbest yüzeydeki akışkan parçacıklarının hızları da lineerleştirilmiştir. Ancak, ikinci dereceden lineer olmama durumu söz konusu olduğunda, cismin herhangi bir andaki konumunda, cisim etrafındaki sıfır-normal akışı daha hassas bir şekilde hesap etmek ve serbest yüzeyin herhangi bir andaki konumunda, akışkan basıncının atmosferik basınca eşit olduğunu belirlemek adına daha hassas bir şekilde yakınsayabilmek ve son olarak serbest yüzeydeki akışkan parçacıklarının hızının lineer olmadığını daha fazla dikkate almak gerekir. Tüm bunlara rağmen gene de problem tam olarak çözülememektedir. İkinci dereceden lineer olmayan problemlerde, bütün terimler hız potansiyeline göre alınır. Akışkan basıncı ve dalga yükleri, dalga genliği ile doğrusal olabildikleri gibi, dalga genliğinin karesiyle de orantılı olabilir. Lineer çözüme ek olarak, ikinci dereceden lineer olmayan problemlerin çözümü, ortalama kuvvetleri, farklı frekanslarda salınım yapan kuvvetleri ve toplam frekansları beraberinde getirir. Daha önce de bahsedildiği üzere, üç tip dalga zorlayıcı kuvvet vardır. Bunlar, ortalama dalga sürüklenme kuvveti, yavaşça değişen dalga kuvveti (frekans farkı) ve yaylanan dalga kuvvetleridir (frekans toplamı). Ortalama ve yavaşça değişen dalga yükleri demirleme sistemlerinin tasarımı açısından oldukça önem taşımaktadır.

3.1 Demirlenmiş Bir Dubanın Dinamik Olarak İncelenmesi ve Harmonik Balans Yöntemine Genel Bir Bakış

Çok noktadan yapılmış demirleme ile dağınık yapılmış demirleme sistemleri temelde lineer olmayan davranışlar gösterir. Bu lineer olmayan davranışların nedeni, sönümün lineer olmamasına ya da geri getirme kuvvetinin lineer olmamasına veya lineer olmayan zorlayıcı kuvvete bağlı olduğu gibi bunların hepsi de etkili olmaktadır. Bunların arasında, geri getirme kuvvetinin lineer olmaması durumu genellikle demirleme sistemini karmaşık şekilde davranıp dengede olmama durumuna yol açmaktadır. Lineer olmayan geri getirme kuvvetinin nedeni ise demirleme hatlarının geometrik olarak lineer olmaması ya da zincir eğrisi etkisidir. Demirlenmiş olan tekne, dalga, rüzgar ve akıntı gibi büyük zorlayıcı etkenlere maruz kalmışken, demirlemede kullanılan iplerden bazıları gevşekken bazıları gergin durur. Bu da tekneye net bir geri getirme kuvveti sağlar.

Şekil 3.1'deki gibi bir sistem ele alınsın. Dinamik analiz için aşağıda belirtilen kabuller şöyledir:

- Demirleme sistemi Şekil 3.1 tek serbestlik derecesinden lineer olmayan bir osilatördür.
- Dalgaların düzenli bir şekilde sinüs dalgası şeklinde gelip, harmonik dalga kuvvetleri yarattığı düşünülmüştür.
- Dubanın sadece boyuna öteleme hareketi göz önüne alınmıştır



Şekil 3.1 : Demirlenmiş İçi Boş Silindirik Bir Duba

Yukarıdaki kabullere göre harmonik zorlamanın etkisi altında hareket denklemi şu şekilde verilebilir [26, 27].

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + R(x) = F_1 \sin \theta \quad (3.1)$$

Denklem (3.1)'deki, m , sistemin kütlesini, μ , ek kütlesini göstermekte olup $M = m + \mu$ ifadesi sistemin toplam kütlesini ifade etmektedir. Diğer yandan, C , hidrodinamik ve yapısal sönümün toplamı; $R(x)$, yer değişimine bağlı geri getirme kuvveti ve F_1 , dalga kuvvetini göstermektedir.

Burada yapısal sönüm, kütleyle ve sistemin sertliğiyle orantılı olarak düşünülmüştür. Denklem (3.1), salınım yapan büyük bir cisim için geçerli olup, hidrodinamik sönüme bağlı lineer olmayan etkiler ihmal edilebilir [26].

Denklem (3.1) düzenlenirse, aşağıdaki gibi birinci dereceden, otonom denklemler elde edilir.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= y \\ \dot{y} &= \ddot{x} \end{aligned} \quad \text{ve} \quad \dot{\theta} = \omega \quad (3.2)$$

Denklem (3.2)'den elde edilen değerler, denklem (3.1)'de yerine yazıldıktan sonra her iki taraf M 'ye bölünüp, düzenlenirse aşağıda denklem (3.3) ile gösterilen ifade elde edilir.

$$\dot{y} = \frac{F_1}{M} \sin \theta - \frac{C}{M} y - \frac{R(x)}{M} \quad (3.3)$$

$$f_1 = \frac{F_1}{M}, \quad r(x) = \frac{R(x)}{M}, \quad \lambda = \frac{C}{M} \quad \text{ve} \quad \theta = \omega t + \phi \quad (3.4)$$

Denklem (3.4)'teki ifadeler, denklem (3.3)'te yerine yazılırsa;

$$\dot{y} = f_1 \sin(\omega t + \phi) - \lambda y - r(x) \quad (3.5)$$

Aşağıda yer alan denklem (3.6)'daki $r(x)$ geri getirme kuvveti, beşinci dereceden anti simetrik bir polinom ile ifade edilebilir. Bu polinom, demirleme sistemindeki iplerin, kuvvete bağlı yer değişimini aşağıdaki gibi tanımlar [26, 27].

$$r(x) = c_1 x + c_3 x^3 + c_5 x^5 \quad (3.6)$$

Sistemin yaklaşık tepkisi, farklı frekanslar için bulunmak istenirse (3.2) no'lu denklem yaklaşım yöntemlerinden biri olan *Harmonik Balans Yöntemi* ile çözülebilir. Harmonik zorlanmaya maruz kalan lineer olmayan dinamik sistemlerin çözümünde bu yöntem oldukça sık kullanılmaktadır [15]. Bu yöntemde, tepki Fourier serisi şeklinde ele alınır ve benzer terimler hareket denkleminin sağında ve solunda toplanır.

Hareket denklemi (3.2) ele alınıp, iki terimden oluşan bir çözüm önerisi aşağıdaki gibi düşünülebilir [26].

$$x(t) = A_1 \cos(\omega t + \phi) + A_3 \cos(3\omega t + \alpha) \quad (3.7)$$

$$\dot{x}(t) = -\omega A_1 \sin(\omega t + \phi) - 3\omega A_3 \sin(\omega t + \alpha) \quad (3.8)$$

$$\ddot{x}(t) = -\omega^2 A_1 \cos(\omega t + \phi) - 9\omega^2 A_3 \cos(\omega t + \alpha) \quad (3.9)$$

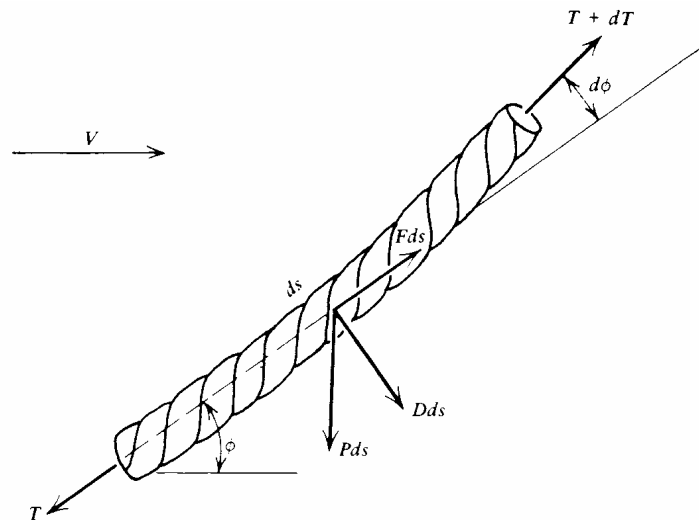
$r(x)$, $x(t)$, $\dot{x}(t)$ ve $\ddot{x}(t)$ denklem (3.1)'de yerine konulduktan sonra dört adet lineer olmayan denklem sistemi elde edilir ve Newton Raphson iterasyon yöntemiyle A_1 , A_3 , α ve ϕ katsayıları bulunur [26]. Bu yöntemde başlangıç şartlarını doğru seçmek oldukça önemlidir. Aksi takdirde doğru sonuca gidilmesi mümkün değildir.

3.2 Demirleme Hattına Gelen Yatay Kuvvetle Sürüklenme ve Derinlik Arasındaki İlişki

Demirleme hatları, çapalanma noktalarından yüzen bir yapıyı bağlayan, tutan esnek mekanik donanımlar olarak tanımlanabilir. Demirleme hatlarının statığı, yüklerin ve bunların sonucu oluşan etkilerin sürekli ortam koşullarında incelenmesidir. Böylece, demirlemenin geometrisi ile gerilmelerin hatlar üzerindeki dağılımı tahmin edilebilir. Gelen yatay kuvvete bağlı demirleme hattındaki sürüklenme mesafesi ile buna bağlı kullanılması gereken kablo miktarı statik denge denklemleri ve bunların integrasyonu sonucu elde edilmiştir.

3.2.1 Statik Denge Denklemleri

Bir kablo elemanındaki statik kuvvetler Şekil 3.2'deki gibi gösterilmiştir.



Şekil 3.2 : Bir kablo elemanındaki kuvvetler

Statik denge altında, bu kuvvetlerin bütün vektör toplamı sıfır olmalıdır. Bu koşulu, bu kuvvetlerini normal ve teğetsel bileşenlerine uygularsak, normal yönünde;

$$(T + dT) \sin d\phi - Dds - PCos\phi ds = 0$$

Öte yandan , $\sin d\phi \cong d\phi$ ve $dT d\phi \cong 0$ şeklinde alınırsa,

$$Td\phi = (D + PCos\phi)ds \quad (3.10)$$

Teğetsel yönde ise,

$$-T + (T + dT)Cosd\phi - PSin\phi ds + Fds = 0$$

ya da

$$dT = (PSin\phi - F)ds \quad (3.11)$$

3.2.2 Denge Denklemlerinin İntegrasyonu

Sürüklenme kuvvetine maruz kalmış, zincir, çelik halat gibi ağır malzemelerden yapılmış kısa bir demirleme hattı göz önüne alınsın. Bu durumda, yer çekimi kuvveti baskındır ve kablo denge denklemindeki direnç terimleri ($P \gg D$ ve F) ihmal edilebilir.

Denklem (3.10) ve (3.11) aşağıdaki gibi yazılabilir [7].

$$Td\phi = PCos\phi ds \quad (3.12)$$

ve

$$dT = PSin\phi ds \quad (3.13)$$

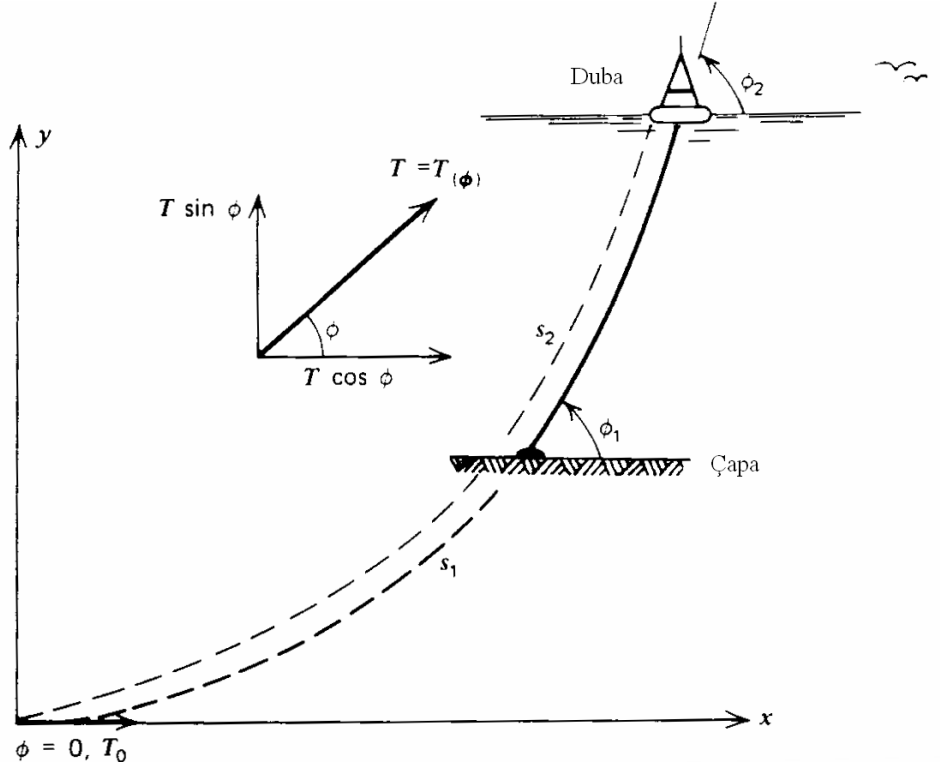
Bu yüzden, $\frac{dT}{T} = Tan\phi d\phi$ şeklinde yazılır.

$\phi = 0$ 'dan $\phi = \phi$ 'ye kadar integre edilirse;

$$\log \frac{T}{T_0} = \int_{\phi=0}^{\phi=\phi} \tan \phi d\phi = \log \sec \phi$$

ya da

$$T_H = T \cos \phi = T_0 \quad (3.14)$$



Şekil 3.3 : Çapa ile demirlenmiş duba

Denklem (3.14)'teki T_0 , $\phi=0$ orijinindeki gerilmedir. Şekil 3.3'te de görüldüğü üzere, gerilmenin yatay bileşeni, T_H sabittir [7]. Denklem (3.14), denklem (3.12)

içine yazılırsa, $\frac{T_0 d\phi}{\cos^2 \phi} = P ds$ şeklini alır.

Aynı şekilde gene integre edildiğinde ise,

$$T_0 \tan \phi = Ps \quad (3.15)$$

ya da

$$T_v = T \sin \phi = Ps \quad (3.16)$$

Bu sonuç, gerilmenin dikey bileşeni T_v , orijin ve $P(\Phi)$ noktası arasındaki kablo uzunluğunun sudaki ağırlığına eşittir. Bu noktadaki gerilme,

$$T = (T_H^2 + T_v^2)^{1/2}$$

$$T = (T_0^2 + (Ps)^2)^{1/2} \quad (3.17)$$

şeklinde yazılabilir [7].

Demirleme hattı boyunca her hangi bir $P(\Phi)$ noktasının x ve y koordinatları

$$x = \int dx = \int ds \cos \phi \text{ şeklinde elde edilir.}$$

Denklem (3.14)'ten $\cos \phi = \frac{T_0}{T}$ ve denklem (3.17)'den $\frac{T_0}{T} = \left[1 + \left(\frac{Ps}{T_0} \right)^2 \right]^{-1/2}$ elde

edilirler. Bu yüzden, $dx = \frac{ds}{\sqrt{(1 + Ps/T_0)^2}}$ şeklinde yazılabilir ve integre edildiğinde

ise,

$$x = \int_0^s dx = \frac{T_0}{P} \sinh^{-1} \left(\frac{Ps}{T_0} \right) \quad (3.18)$$

Elde edilmiş olan bu sonuçtan ise aşağıdaki gibi bir denklem elde edilir.

$$s = \frac{T_0}{P} \sinh \left(\frac{Px}{T_0} \right) \quad (3.19)$$

Son olarak, $\frac{dx}{dy} = \tan \phi$ 'dir ve denklem (3.15)'ten $\tan \phi = \frac{Ps}{T_0}$ gelmiştir. Bu yüzden,

$$dy = \left(\frac{P}{T_0} s \right) dx \text{ şeklinde olur.}$$

Denklem (3.19) kullanıldığında, $dy = \sinh \frac{Px}{T_0} dx$ elde edilir. Bu sonuç tekrar integrale edildiği zaman,

$$y = \int dy = \frac{T_0}{P} \left[\cosh \left(\frac{Px}{T_0} \right) - 1 \right] \quad (3.20)$$

Sonuç olarak, demirleme hattı boyunca olan herhangi bir noktanın koordinatları denklem (3.18) ve (3.20) ile verilmiştir. Orijinden bu noktaya kadar olan yay uzunluğu denklem (3.19) ile bu noktadaki gerilme denklem (3.17) ile belirtilmiştir. Çapa noktası orijinde olmayan demirleme hatları için sonuçlar, hattın uç noktalarında hesaplanan değerlerden elde edilebilir.

Çapı 15 m, yüksekliği 4 m ve et kalınlığı 0.3 m olan Şekil 3.1’de gösterilen içi boş silindirik bir duba deniz dibinden 50 m mesafede demirlidir ve toplam 6 adet demirleme hattı kullanılmıştır. Kullanılan kablounun sudaki ağırlığının 21 kg/m olduğu farz edilip, sisteme farklı yatay kuvvetler uygulandığında sürüklenme mesafeleri ve buna göre değişen kablo uzunlukları aşağıda adım adım hesaplanmıştır. (1N = 0.10197 kg)

- Yatay gerilme, T_0 ilk olarak 19000 N olarak ele alınmıştır. ($T_0 = 1937.43 \text{ kg}$)
- Çapadaki gerilme, T_A , $19000 \text{ N} / \cos 30 = 21939.310 \text{ N}$
- Çapadaki gerilmenin dikey bileşeni, orijindeki hayali zincirin ağırlığına eşittir.

$$s_1 = \frac{T_A \sin 30}{21 \text{ kg/m}} = \frac{10969.655 \text{ N}}{21 \text{ kg/m}} = 53.266 \text{ m}$$

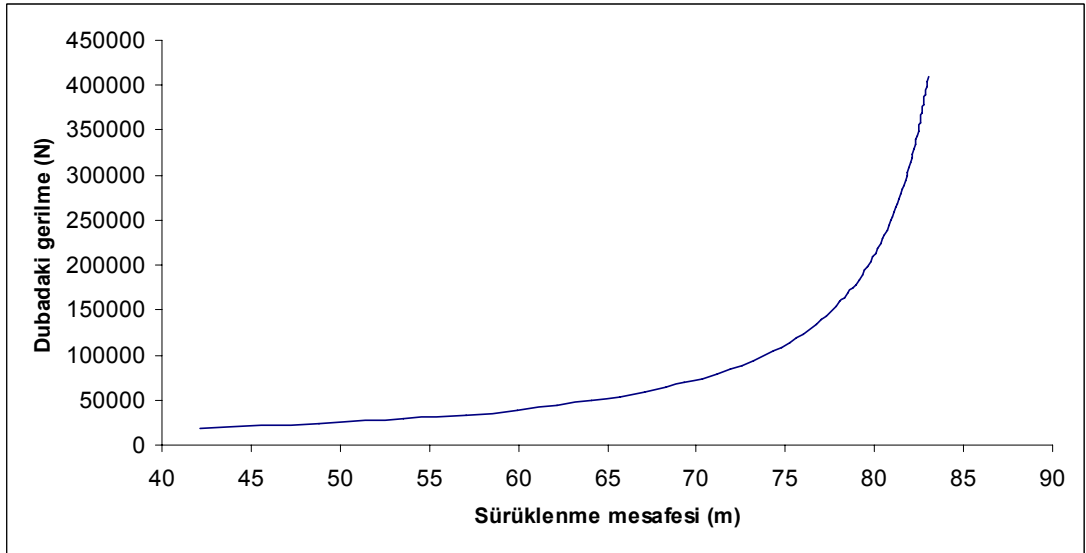
$$x_1 = \frac{1937.43 \text{ kg}}{21 \text{ kg/m}} \sinh^{-1} \frac{T_A \sin 30}{1937.43 \text{ kg}} = 50.678 \text{ m}$$

$$y_2 - y_1 = 50 \text{ m} = \frac{1937.43}{21} \left[\cosh \frac{21}{1937.43} x_2 - \cosh \frac{21 \cdot x_1}{1937.43} \right]$$

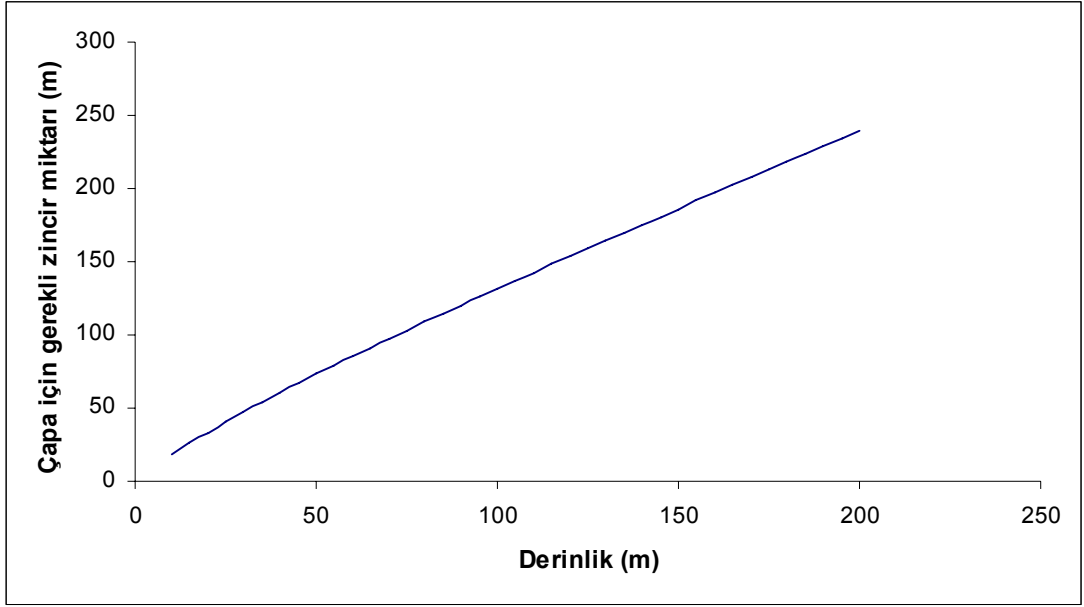
$$1.697 = \cosh(0.011 \cdot x_2)$$

$$x_2 = 103.403 \text{ m}$$

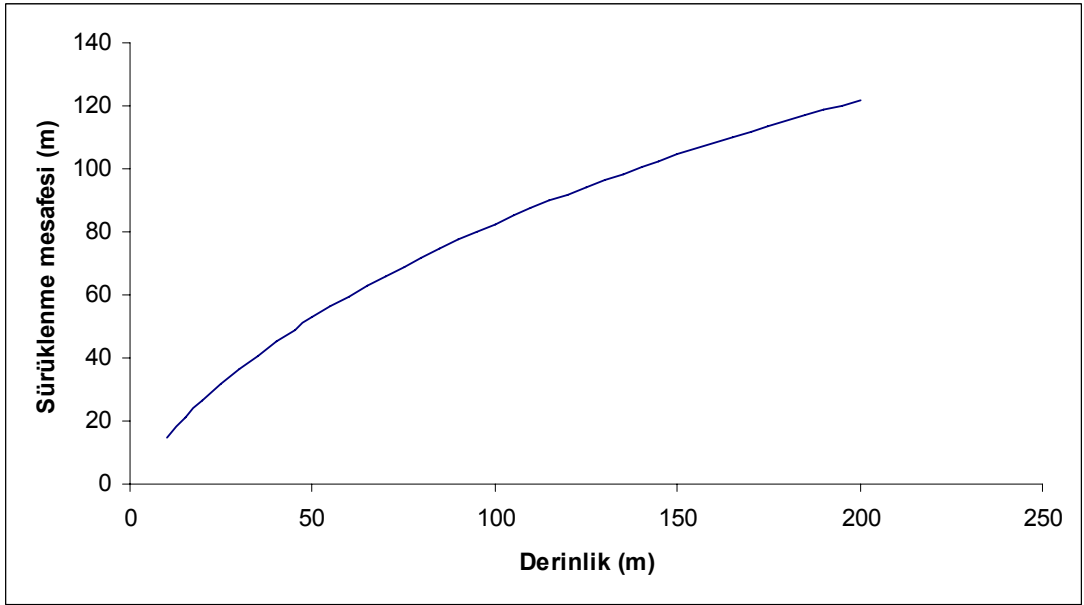
- Akıntı yönünde dubanın gideceği mesafe, $x_2 - x_1 = 52.725m$
- $s_2 = \frac{1937.43kg}{21kg/m} \sinh\left[\frac{21 \cdot x_2}{1937.43}\right] = 126.453m$ olup, çapa için gerekli olan zincir miktarı, $s = s_2 - s_1 = 126.453 - 53.266 = 73.187m$ 'dir.
- Dubadaki gerilmenin dikey bileşeni, dubadan orijine kadar uzanan zincirin ağırlığına eşittir. $T_B \sin \phi_B = Ps_2 = 126.453 \cdot 21 = 26042.101N$
- Aynı sonuç, zincirin gerçek uzunluğunun ağırlığının, çapadaki gerilmenin dikey bileşeniyle toplanmasıyla da elde edilebilir. $T_{BV} = P \cdot s + T_A \sin 30$
- Dubadaki gerilme, $T_B = \left[(19000)^2 + (26042.101)^2\right]^{1/2} = 32236.486N$



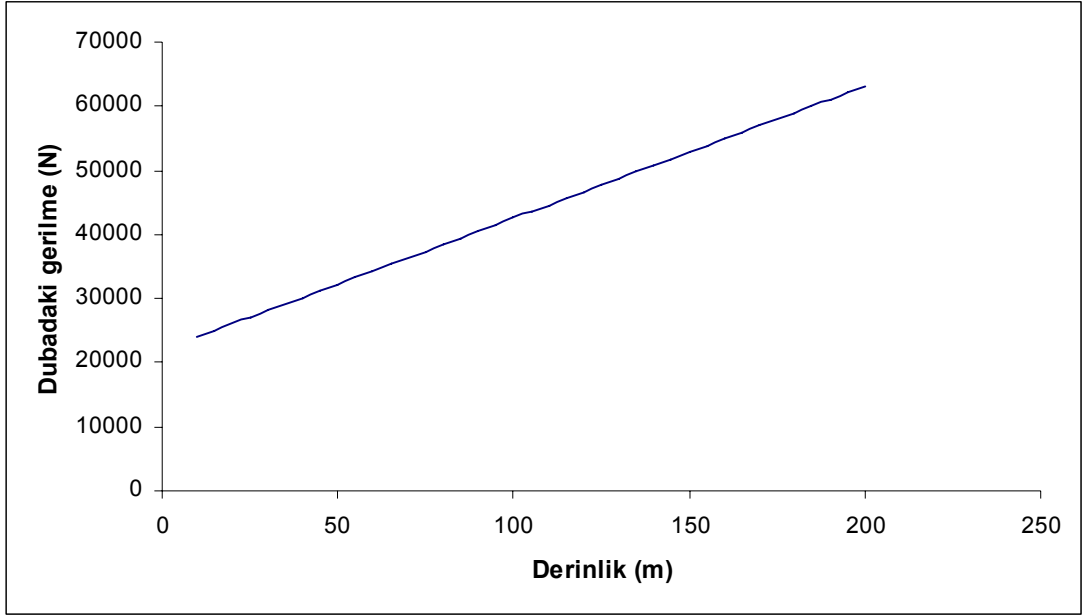
Şekil 3.4 : Sürüklenme mesafesi ile dubadaki gerilmenin değişimi



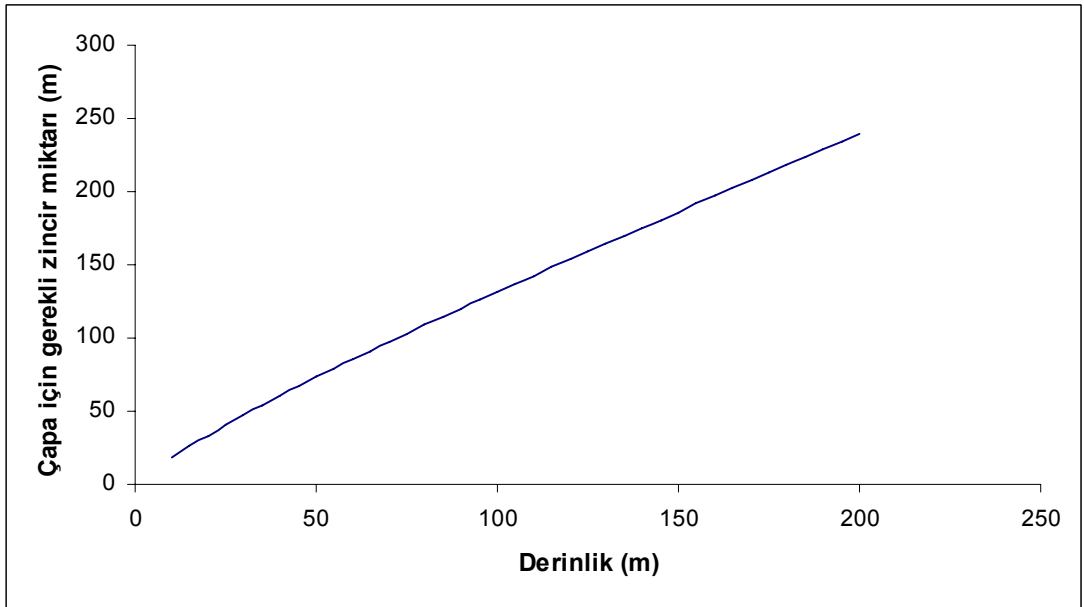
Şekil 3.5 : Sürüklenme Mesafesi ile Çapa İçin Gerekli Zincir Miktarının Değişimi



Şekil 3.6 : Derinlikle Sürüklenme Mesafesinin Değişimi



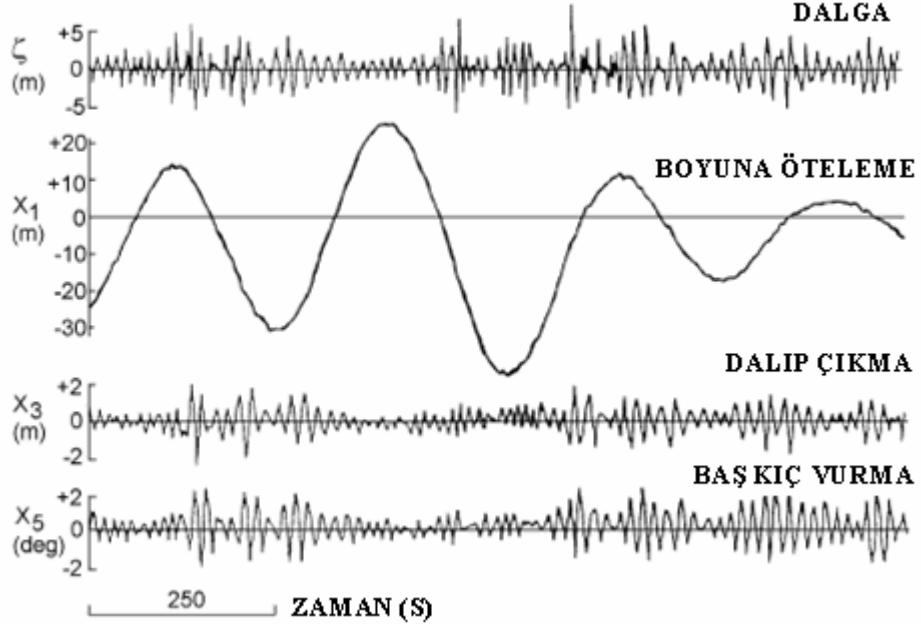
Şekil 3.7 : Derinlikle Dubadaki Gerilmenin Değişimi



Şekil 3.8 : Derinlikle Çapa İçin Gerekli Zincir Miktarının Değişimi

3.3 Demirlenmiş Dubanın Dalgalar İçindeki Yatay Hareketlerinin İncelenmesi

- Bir yük etkisiyle yapının yer değiştirmesi mümkün olabilmektedir. Daha önce de bahsi geçtiği üzere, bu yüklerin temel nedeni akıntı ve rüzgar olup, bunlara *ortalama dalga sürüklenme kuvvetleri* adı verilir. Bu sürüklenme kuvveti, ikinci dereceden lineer olmayan dalga potansiyeli etkileri nedeniyle ortaya çıkar. Demirleme sisteminin kendisiyle birlikte bu yükler, yeni denge konumunu belirler ve genellikle öteleme ve demirleme sisteminin etkisiyle de yunuslama açısı söz konusudur. Yunuslama açısı, dalga giriş açısının belirlenmesi açısından önemlidir.
- Bir diğer durum ise, dalga frekanslarıyla uyumlu frekanslarda yani dalga frekans bölgesinde yapının salınım yaparak yer değiştirmesidir. Bunlar harmonik karakterde olup, lineer hareketlerdir ve *birinci dereceden dalga yükleri* dolayısıyla oluşmaktadır.
- Son olarak, düzensiz dalgaların frekanslarından çok daha düşük frekanslarda yani düşük frekans bölgesinde, yapının salınım yaparak yer değiştirmesi durumudur. Bu hareketler, dalga yüklerindeki lineer olmayan elemanların (*düşük frekanslı dalga sürüklenme kuvvetleri*) ve demirleme sisteminin yay karakteristiği birleşiminden ötürü oluşmaktadır. Genellikle demirlenmiş bir tekne, yatay hareketin olduğu modlarda düşük doğal frekanslara ve aynı zamanda bu frekanslarda sönüm çok düşüktür. Rezonans durumunda çok büyük hareket genlikleri söz konusudur yani teknenin önemli bir bölümünün dinamik olarak yer değiştirmesi bu düşük frekanslı zorlamalarda gerçekleşebilir.



Şekil 3.9 : Demirlenmiş Bir Gemiye Ait Hareket Değerleri

Yukarıdaki şekilde demirlenmiş bir geminin hareketlerine ait değerler verilmiştir [16]. Görüldüğü üzere, dalıp çıkma ve baş kıç vurma hareketleri aynı frekansta, genlikleri dalgaların genliğiyle aynı mertebededir.

Öte yandan, boyuna öteleme hareketi, oldukça yüksek genlikli düşük frekans bileşeninin egemenliğinde, küçük dalga frekansı hareketi bileşeni içerir. Daha yakından bakıldığında, büyük genliğe sahip boyuna öteleme hareketi, demirli sistemin doğal boyuna öteleme periyoduna yakın frekanslar içerir.

Demirlenmiş gemi, rezonanı düşük frekanslı boyuna öteleme hareketlerini barındırır. Bunlar, küçük dalga kuvvetlerine tepkidir ve bu küçük dalga kuvvetleri ise demirlenmiş geminin düşük doğal boyuna öteleme frekansını karşılamaktadır. Tepkinin giderek şiddetlenmesi, boyuna öteleme hareketi sönümünün özellikle düşük frekanslarda çok küçük olması durumundan kaynaklanmaktadır. Demirlenmiş sistemler bu etkinin altındadır ve buna göre tasarlanmalıdırlar.

Yapılar üzerine gelen dalga yüklerinin ve bunlara karşı verilen tepkiler değişik bileşenlere ayrılabilir. Bunu özetleyen tablo aşağıdaki gibidir [16].

Tablo 3.1: Bir sisteme gelen dalga yükleri, tepkiler ve bileşenleri

Dalga	Zorlama	Sistem	Tepki
Düzenli	Birinci derece	Lineer	Birinci derece (tek frekans)
Düzenli	Birinci derece	Lineer olmayan	Harmonik altı (tek düşük frekans)
Düzenli	Yüksek derece	Lineer	Zamandan bağımsız sürüklenme
Düzenli	Yüksek derece	Lineer olmayan	Zamandan bağımsız sürüklenme
Düzensiz	Birinci derece	Lineer	Birinci derece (dalga frekansları)
Düzensiz	Birinci derece	Lineer olmayan	Harmonik altı (belirsiz)
Düzensiz	Yüksek derece	Lineer	Zamana bağlı sürüklenme
Düzensiz	Yüksek derece	Lineer olmayan	Zamana bağlı sürüklenme

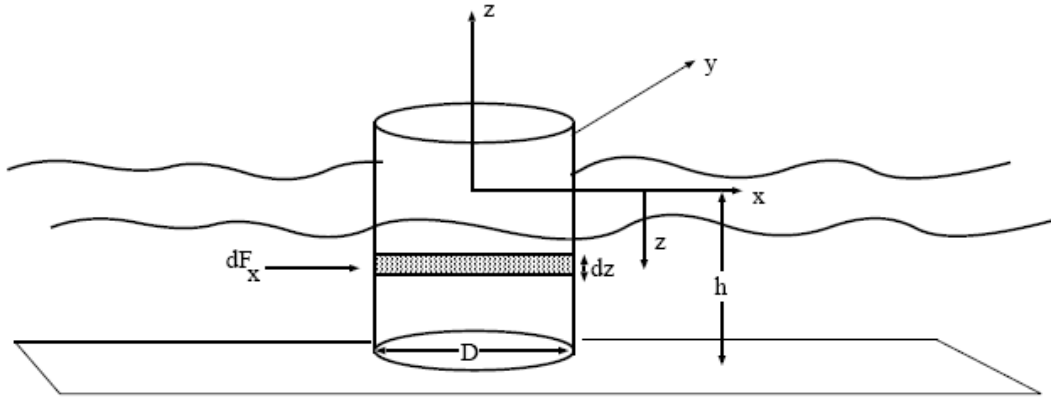
Dalgalarla aynı frekansa sahip dalga yükleri vardır ve bunlar dalgaların genlikleriyle lineer orantılı genliklere sahiptir. Bunlar birinci dereceden dalga kuvvetleridir. İkinci olarak, hem dalga frekanslarıyla aynı frekansa, hem de daha yüksek frekansa sahip dalga yükleri sayılabilir. Bu kuvvetler, dalganın genliğinin karesiyle orantılıdır ve ikinci dereceden dalga kuvvetleri olarak adlandırılırlar.

Düşük frekanslı ikinci dereceden dalga kuvvetleri, düzensiz dalgalarda mevcut olan dalga gruplarının frekanslarını karşılayan frekanslara sahiptir. Bu kuvvetler, zamana bağlı bileşenler içermelerinin yanı sıra aynı zamanda sıfır olmayan temel bir bileşeni de barındırır ve buna da dalga sürüklenme kuvveti adı verilir. Demirlenmiş sistemlerde düşük frekanslı dalga sürüklenme kuvvetleri, büyük genlikli yatay hareketlere neden olur.

3.3.1 Froude Krylov Kuvvetinin Etkisi

Bir cismin salınım yapması engellendiğinde ve aynı zamanda düzenli dalgalara maruz bırakıldığında, gelen bu dalga yüklerine zorlayıcı kuvvetler adı verilir. Bu zorlayıcı kuvvetler, Froude-Krylov kuvvetlerinden ve difraksiyon kuvvet ve momentlerinden oluşur. Bozulmamış basınç alanını karşılayan kuvvet bir Froude-Krylov kuvvetidir. Öte yandan cismin yapısı bu basınç alanını değiştirecek ve bir kuvvet etkiyecektir. Bu kuvvete difraksiyon kuvveti denir. Hız potansiyeli için bir sınır değer problemi çözülerek bulunur. Difraksiyon hız potansiyelinin türevinin normali, bozulmamış dalga sisteminin normal hızıyla aynı büyüklükte ve ters yönde olmalıdır. Bu şekilde, cismin üzerindeki toplam hızın normal bileşeninin sıfır olur.

Şekil 3.10’da çapı D , su derinliği h olarak verilmiş bir silindir gösterilmektedir.



Şekil 3.10 : Çapı D , su derinliği h olarak verilmiş bir silindir

Gelen dalganın yüksekliği ve boyu sırasıyla H ve L ile gösterilmiş olsun. Gelen dalgaların boylarının cismin çapı D 'ye göre çok küçük olduğu kabulünden yola çıkılırsa, zorlayıcı dalga kuvveti, sadece gelen dalganın basınç alanının integrasyonu ile bulunabilir. Cismin üzerindeki dalga difraksiyonu ihmal edilmesi kabulüne Froude-Krylov hipotezi adı verilir ve denklem (3.21) ile ifade edilir.

$$\vec{F} = - \int_S p_{dyn}^i \hat{n} dS \quad (3.21)$$

Yukarıdaki denklemde, $\hat{n}$, silindir yüzeyinden dışarı çıkan normal vektörünü; p_{dyn}^i ise gelen dalganın dinamik basıncı gösterir. Gauss teoremi kullanılarak bu ifade, yüzey integralinden, hacim integraline dönüştürülebilir.

$$\vec{F} = - \int_{\forall} \nabla p_{dyn}^i d\forall \quad (3.22)$$

Denklem (3.22)'deki $\forall$, silindirin hacmini gösterir. Dalga kuvvetinin x yönündeki kuvveti ise aşağıdaki gibidir.

$$\vec{F}_x = - \int_{\forall} \frac{\partial p_{dyn}^i}{\partial x} d\forall \quad (3.23)$$

Küçük genliklerde ilerleyen bir dalganın basınç alanı ise şöyle verilebilir.

$$p_{dyn}^i = \rho g \frac{H}{2} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh(kh)} \sin(kx - \sigma t) \quad (3.24)$$

$$\frac{\partial p_{dyn}^i}{\partial x} = \rho g k \frac{H}{2} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh(kh)} \cos(kx - \sigma t) \quad (3.25)$$

Zorlayıcı dalga kuvveti, Froude-Krylov kuvvetinin x yönündeki bileşeni, F_x aşağıdaki gibidir.

$$F_x = - \int_{\forall} \rho g k \frac{H}{2} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh(kh)} \cos(kx - \sigma t) d\forall \quad (3.26)$$

Silindir narin olduğu düşünülürse ($D/L \ll 1$), denklem (3.26)'da verilmiş integral $x=0$ verilerek şu hale gelir.

$$F_x \approx - \int_{\forall} \rho g k \frac{H}{2} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh(kh)} \cos(\sigma t) d\forall \quad (3.27)$$

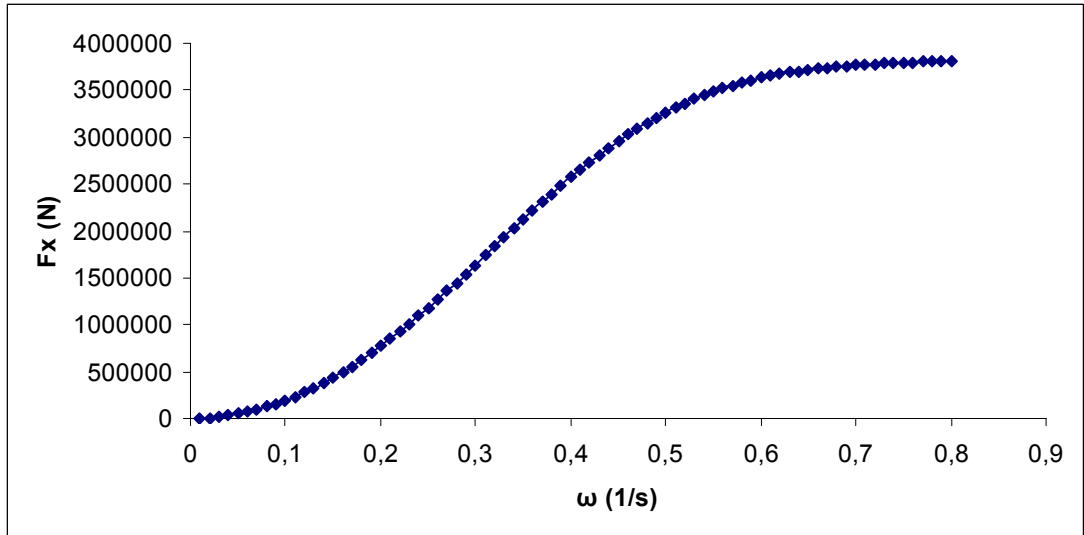
Yukarıdaki ifade, z'ye göre integre edilirse aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\begin{aligned}
F_x &= - \int_{z=-h}^{z=0} \rho g k \frac{H}{2} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh(kh)} \cos(\sigma t) \pi \frac{D^2}{4} dz \\
&= - \rho g k \frac{H}{2} \pi \frac{D^2}{4} \frac{\cos(\sigma t)}{\cosh(kh)} \int_{z=-h}^{z=0} \cosh k(z+h) dz \\
&= - \rho g k \frac{H}{2} \pi \frac{D^2}{4} \frac{\cos(\sigma t)}{\cosh(kh)} \left(\frac{\sinh k(z+h)}{k} \right)_{z=-h}^{z=0} \\
&= - \rho g k \frac{H}{2} \pi \frac{D^2}{4} \tanh(kh) \cos(\sigma t)
\end{aligned} \tag{3.28}$$

Dalga ilerleme yönündeki kuvvetin genliği aşağıdaki gibidir.

$$|F_x| = \rho g \frac{H}{2} \pi \frac{D^2}{4} \tanh(kh) \tag{3.29}$$

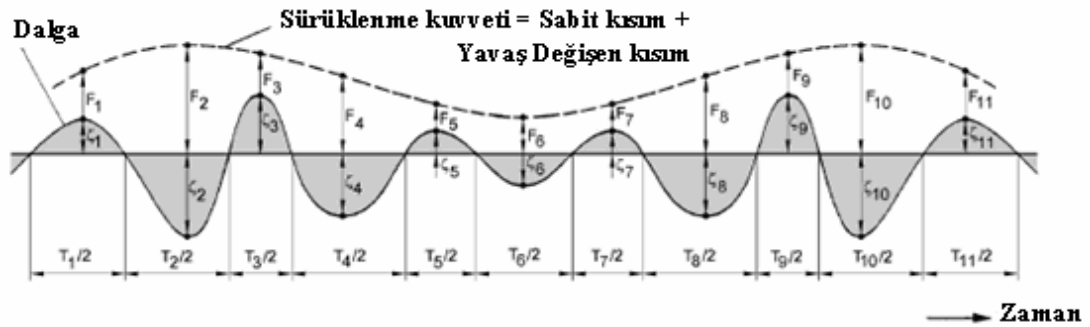
Şekil 3.1’de gösterilen sistem için, $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$ ve $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ olarak alınıp, $H_{1/3} = 4.3 \text{ m}$, $T_m = 7.2 \text{ s}$ ve su derinliği $h = 50 \text{ m}$ şeklinde düşünülmüştür. $k = \omega^2 / g$ ifadesinin yardımıyla, değişik frekanslar için bulunan kuvvetleri gösteren grafik aşağıdaki gibidir.



Şekil 3.11 : ω değerleri ile Yatay Yöndeki Froude Krylov Kuvvetinin Değişimi

3.3.2 Dalga Sürüklenme Kuvvetinin Sisteme Etkisi

Dalga sürüklenme kuvvetlerinin etkisini daha iyi anlaşılabilmesi için aşağıda, genişliği B olan demirlenmiş bir dubanın düzensiz dalgalarda model deneyine ait çalışmadan bir örnek verilmiştir [16].



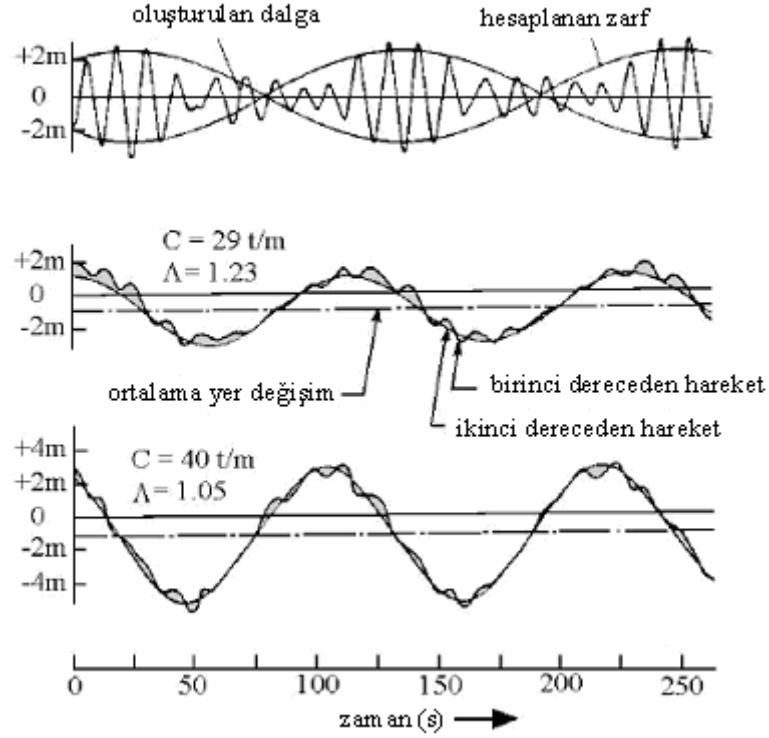
Şekil 3.12 : Bir dalga kaydından elde edilen dalga sürüklenme kuvvetleri

Şekil 3.12’de düzensiz dalgaların, ardışık gelen tek dalgaların birleşiminden oluştuğu düşünülmüştür ve dalga genliği, ζ_{ai} , dalga çukuru ve dalga tepesi yüksekliğiyle karakterize edilmiştir. T_i periyotları ise, sıfırda olan iki kesişme noktasından ya da değerinin tam olarak yarısı alınarak hesaplanmıştır [16]. Bu şekilde elde edilen her bir tek dalga, düzenli dalgalar grubundan biri olarak göz önüne alınmıştır ve bu durumda her biri duba üzerine boyuna öteleme sürüklenme kuvveti uygulayacaktır.

$$F_i = \frac{1}{2} \rho g \cdot \{R(\omega_i) \cdot \zeta_{ai}\} \cdot B \quad (3.30)$$

Bu işlem, gelen dalga grubunun her bir dalga tepesi ve çukuru için yapıldığında, eğri üzerindeki noktalar ile yavaşça değişen dalga sürüklenme kuvvetleri, F_i , $\omega_i = 2\pi / T_i$ ifadesi yardımıyla elde edilmiş olur. Şekil 3.12’ye tekrar göz atılacak olursa, bu sürüklenme kuvveti, yavaş değişen kuvvetini (düşük frekanslı dalga sürüklenme kuvveti) içinde barındırır ve bu kuvvet, ortalama bir değer (ortalama dalga sürüklenme kuvveti) civarındadır.

Dubadaki bu düşük frekanslı dalga sürüklenme kuvvetleri, her 100 saniyelik bir periyotta düşük frekanslı boyuna öteleme hareketlerini indükleyecektir. Şekil 3.13'te iki farklı yay sabiti C için bir örnek gösterilmiştir [16]. Periyot oranı Λ , aşağıdaki şekle göre sistemin doğal boyuna öteleme periyodu ile dalga zarfı periyodu arasındaki oranı tanımlar. Burada sözü geçen dalga zarfı, dalga grubu periyodudur.



Şekil 3.13 : Bir dubanın düşük frekanslı boyuna öteleme hareketleri

Yukarıdaki şekilden de görüleceği üzere, ikinci dereceden hareketlerle (düşük frekanslı) karşılaştırıldığında, birinci dereceden boyuna öteleme hareketleri (dalga frekansı) oldukça küçüktür. Bu olgu, özellikle rezonansa ($\Lambda=1$) iken daha gözle görülür bir şekilde belli olmaktadır.

Demirlenmiş sistemin doğal frekansı civarında rezonans olabilir ve sistemin düşük boyuna öteleme doğal frekanslarından ve bu frekanslardaki düşük sönümlerlerden ötürü yatay yönde büyük hareketler yapar. Bu çalışmaya göre, birkaç ardışık dalga grubuna maruz kalan sistem şiddetli yatay hareketler yapabilmektedir [16].

Daha önceden de bahsedildiği üzere, dalga sürüklenme kuvvetleri dalga yüksekliğinin karesiyle orantılıdır. Buna göre aşağıdaki ampirik bağıntılar yardımıyla dalga sürüklenme kuvvetlerini hesaplamak mümkündür.

$$F_s = 2 \cdot \int_0^{\infty} S^h(\omega) \cdot \left[\frac{R^h(\omega)}{a^2} \right] d\omega \quad (3.31)$$

Denklem (3.22)'ye göre $R^h(\omega)$, sürüklenme kuvveti operatörüdür ve su derinliği h ile dalga frekansı ω 'nın bir fonksiyonudur. $S^h(\omega)$ ise belirli bir derinliğe ve deniz durumuna bağlı dalga spektrumudur.

Derin su etkisinin dalga sürüklenme kuvveti operatörlerine etkisi ve dalga spektrumu denklem (3.22)'de dalga sürüklenme kuvvetinin hesaplanmasında göz önüne alınmıştır. Dalga sürüklenme kuvveti operatörlerinin parabolik yaklaşımı sığ su düzeltmelerini de beraberinde getirmiştir. Bu düzeltmeler, bağlı su derinliğinin ($\sigma = T/H$) tersiyle orantılı terimlerden oluşur.

$$X_{dalga} = (X_1 + X_2) \cdot f(u) \cdot \cos \beta_{ww} \quad (3.32)$$

$$X_1 = 0.0388 \cdot \rho g B C_B \left(H_{\frac{1}{3}} \right)^2 \cdot f \left(H_{\frac{1}{3}}, T \right) \cdot f_y(h) \quad (3.33)$$

$$X_2 = 0.311 \cdot \rho g B^2 \frac{H_{\frac{1}{3}}^{(5/2-D)}}{L^{1.5}} \cdot f_x(h) \quad (3.34)$$

$$D = \frac{\sigma^2}{5} \quad (3.35)$$

$f(H_{\frac{1}{3}}, T)$ faktörü aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$f(H_{\frac{1}{3}}, T) = \sin^2 \left(\frac{T}{2 \cdot H_{\frac{1}{3}}} \right) \quad (3.36)$$

Eğer karakteristik dalga yüksekliği, $H_{\frac{1}{3}}$, cismin su çekiminden daha büyükse, $f(H_{\frac{1}{3}}, T)$ faktörü, düşük deniz şiddetleri ($H_{\frac{1}{3}} > 0.32T$) için 1.0 olur. Yukarıdaki

denklemlerde kullanılan, B , cismin genişliği; L , cismin uzunluğu; T , su çekimi; h , su derinliği; $H_{1/3}$, karakteristik dalga yüksekliği; β , dalgaların geliş açısı ; ρ , deniz suyu yoğunluğu ve g , yer çekimi ivmesidir.

Boyuna öteleme kuvvetinin bulunmasında kullanılan ifadenin ilk terimi düşük hız aralıklarındaki tekne formları için olup, ikinci terim ise, boyuna kuvvet operatörüne dayanmaktadır.

Eksensel kuvvetin, dalgaların geliş açısı β_{ww} 'nın kosinüsü ile değiştiği kabulü yapılmaktadır. Sürüklenme kuvvetlerindeki ek ileri hız etkisi $f(u)$, karşılaşma frekansı σ_e 'den yola çıkılarak hesaplanmıştır ve dalga frekansı olan σ_w 'den farklıdır. Düzensiz dalgalarda, maksimum dalga enerjisiyle, pik frekansı $\sigma_m = 2\pi/T_m$ ile gösterilir. T_m , modal spektrum periyodudur. Düşük ve orta hızlı gemiler için bu faktör için bir yaklaşım aşağıdaki gibi yapılabilir.

$$f(u) = \frac{\sigma_e}{\sigma_m} = 1 - \frac{U \cdot \sigma_m}{g} \cdot \cos \beta_w \quad (3.37)$$

Denklem (3.28)'e göre U , cismin ya da geminin ileri hızı ve g yer çekimi ivmesidir.

Yukarıdaki bilgilerin ışığında, Şekil 3.1'de gösterilen demirlenmiş duba problemine yine göz atılacak olunursa öncelikle sığ su söz konusu olmayacağından denklem (3.24) ve (3.25)'teki $f_y(h)$ ve $f_x(h)$ düzeltmeleri ihmal edilir.

Sırasıyla, yukarıdaki denklemleri bu demirlenmiş duba sistemi için uygulanırsa aşağıdaki sonuçlar elde edilir.

$\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$ ve $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ olarak alınıp, $H_{1/3} = 4.3 \text{ m}$, $T_m = 7.2 \text{ s}$ ve su derinliği $h = 50 \text{ m}$ şeklinde düşünülmüştür. Dalgalar, 90° 'lik açıyla gelip, dubanın ileri yöndeki hızının $U = 0 \text{ m/s}$ olduğu düşünülerek aşağıdaki hesaplar yapılmıştır.

$$f(H_{1/3}, T) = 0.970$$

$$\sigma = 0.035$$

$$D = 0.000245$$

$$\sigma_m = 0.873$$

$$f(u) = 1$$

$$X_1 = 6464.518N \text{ ve } X_2 = 464210.362N$$

Son olarak boyuna öteleme dalga sürüklenme kuvveti $X = 470674.880N$ olarak bulunur.

3.4 Runge-Kutta ve Adams-Bashforth-Moulton Yöntemleri ile Demirlenmiş Bir Dubanın Hareket Denkleminin Çözümü

Harmonik Balans yöntemi ile edilmiş olan sonuçların diğer sayısal analiz yöntemleriyle karşılaştırılmasında kullanılacak olan yöntemlerden birisi dördüncü dereceden Runge-Kutta yöntemi diğeri ise Adams-Bashforth-Moulton yöntemleridir.

3.4.1 Runge-Kutta Yöntemi ve Hareket Denkleminin Çözümü

Runge-Kutta yöntemi, programlama kolaylığı ve hassas sonuçlarıyla halen oldukça sık kullanılmaktadır. Bu yöntemle çok kısa bir şekilde göz atmak gerekirse, $y' = f(t, y)$ gibi tanımlanan bir başlangıç değer problemini ele alalım. $y(t_0) = y_0$

Bu problem için dördüncü dereceden Runge-Kutta yöntemi aşağıdaki denklemlerle verilir.

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (3.38)$$

$$k_1 = f(t_n, y_n) \quad (3.38a)$$

$$k_2 = f\left(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_1}{2}\right) \quad (3.38b)$$

$$k_3 = f\left(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_2}{2}\right) \quad (3.38c)$$

$$k_4 = f(t_n + h, y_n + k_3) \quad (3.38d)$$

Böylece bir sonraki y_{n+1} değeri o anki y_n değerine h aralığının büyüklüğüyle tahmini eğimin çarpımının eklenmesiyle elde edilir. Bu eğim, eğimlerin ağırlıklı ortalamasıdır:

k_1 aralığın başlangıcındaki eğimdir.

k_2 aralığın orta noktasındaki eğimdir. Bu k_2 eğimi, Euler Yöntemi kullanılarak y 'nin $t_n + h/2$ noktasındaki değerinden elde edilir.

k_3 yine orta noktadaki eğimdir. Ama bu sefer y değeri k_2 eğiminden elde edilir.

k_4 aralığın sonundaki eğimdir ve y değeri k_3 eğimi kullanılarak bulunur.

Dördüncü dereceden Runge-Kutta çözümü için MATLAB yardımıyla rk4_sistem isimli bir fonksiyon yazılmıştır.

```
function rk4_sistem(a, b, N, alpha)
```

```
%rk4_sistem(0, 500, 1000, [0 0])
```

```
%a ve b çözüm aranan zaman aralığı N adım sayısı alpha ise vektör olarak
```

```
%başlangıç şartlarıdır.
```

```
m = size(alpha,1);
```

```
if m == 1
```

```
    alpha = alpha';
```

```
end
```

```
h = (b-a)/N;    %adım miktarı
```

```
t(1) = a;
```

```
w(:,1) = alpha;    %başlangıç koşulları
```

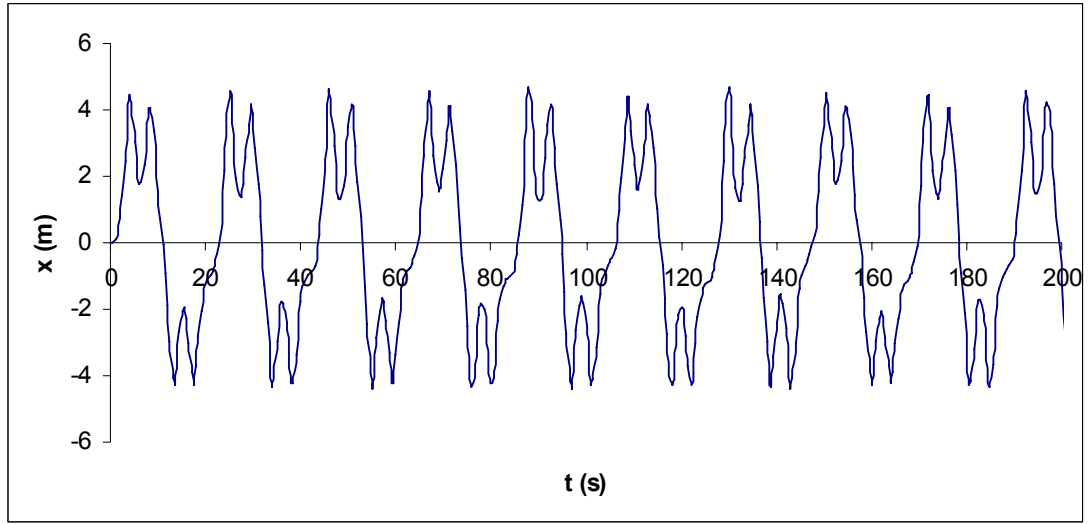
```
for i = 1:N
```

```

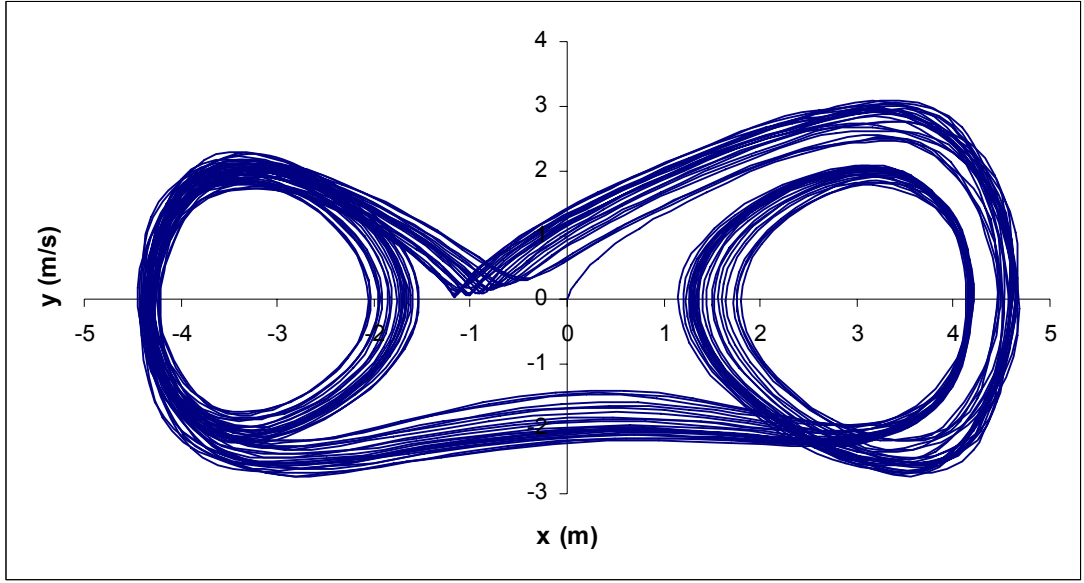
k1 = h*f(t(i), w(:,i));
k2 = h*f(t(i)+h/2, w(:,i)+0.5*k1);
k3 = h*f(t(i)+h/2, w(:,i)+0.5*k2);
k4 = h*f(t(i)+h, w(:,i)+k3);
w(:,i+1) = w(:,i) + (k1 + 2*k2 + 2*k3 + k4)/6;
t(i+1) = a + i*h;
end
[t' w']
figure1 = figure(...
    'Color',[1 1 1],...
    'PaperPosition',[0.6345 6.345 20.3 15.23],...
    'PaperSize',[20.98 29.68]);
%% Create axes
axes1 = axes(...
    'XGrid','on',...
    'YGrid','on',...
    'Parent',figure1);
xlabel(axes1,'zaman (s)');
ylabel(axes1,'x(t)');
hold(axes1,'all');
plot(t,w)
function dy = f(t, y)
dy = [y(2); -0.0664*y(2)-(0.03100*y(1))-(-0.00786*y(1)^3)-(0.004607*y(1)^5) +
2*sin(0.3*t)];

```

Görüldüğü üzere, dy eşitliğinde hareket denklemi ifadesi yer almakta olup, önce denklem birinci dereceye indirgenmeye çalışılmıştır. Sönümün potansiyel kütlelerinin, gemi kütlelerinin yaklaşık olarak %5'i ila %8'i olabileceğinden yola çıkılarak [16], sönüm katsayısı, $C / M = \lambda = 0.0664$ olarak hesaplanmıştır. Söz konusu silindirik duba için sönümün, sistem kütlelerinin %6.5'i civarında olduğu kabul edilmiştir. Geri getirme kuvveti katsayıları, c_1, c_3, c_5 ise sırasıyla, 0.03100, -0.00786 ve 0.004607 olarak alınmıştır [26]. Dalga kuvveti katsayısı, $F / M = f_1 = 470674.8798 \text{ N} / 243708.7 \text{ N} = 1.93$ olarak hesaplanmıştır. Fonksiyon, örnek olarak, zorlayıcı frekans $\omega = 0.3 \text{ rad/s}$ ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ için çalıştırıldıktan sonra Şekil 3.14 ve Şekil 3.15 grafikleri elde edilmiştir.

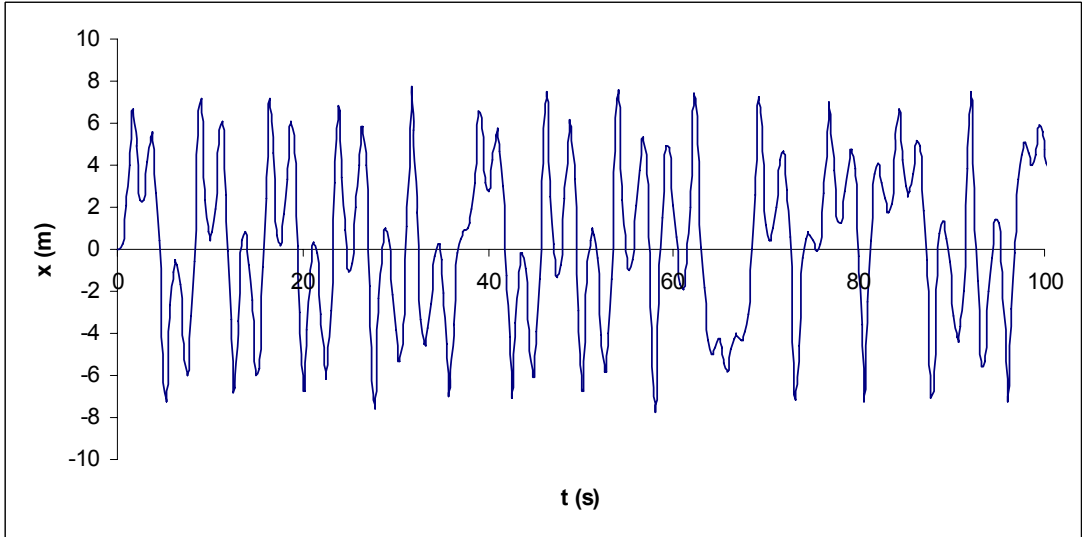


Şekil 3.14 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.3 \text{ rad/s}$ ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği

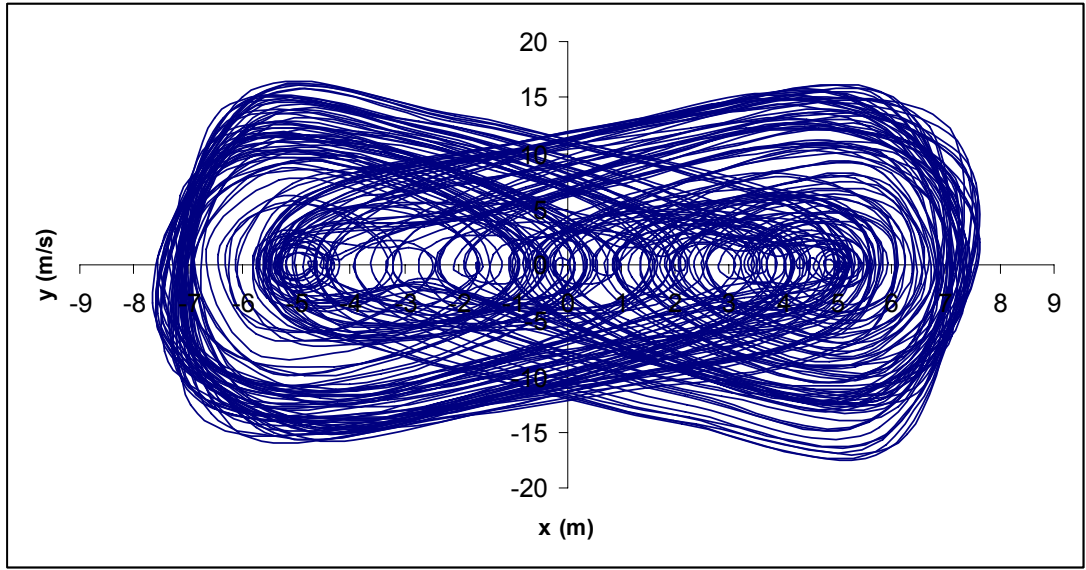


Şekil 3.15 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.3$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin faz diyagramı

Aynı şekilde, çok aşırı deniz şartları göz önüne alınırsa, karakteristik dalga yüksekliği ve periyot artar ve dalga kuvveti katsayısı f_1 , 1.93'ten 15'e kadar yükselebilir. Bu durumda sistem kaotik bir davranış gösterecektir [28]. Program, zorlayıcı frekans $\omega = 0.84$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 15$ iken çalıştırıldığında Şekil 3.16 ve Şekil 3.17'deki değerler elde edilir.



Şekil 3.16 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.84$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 15$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği



Şekil 3.17 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.84$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 15$ iken verilen tepkinin faz diyagramı

3.4.2 Adams-Bashforth-Moulton Yöntemi ve Hareket Denkleminin Çözümü

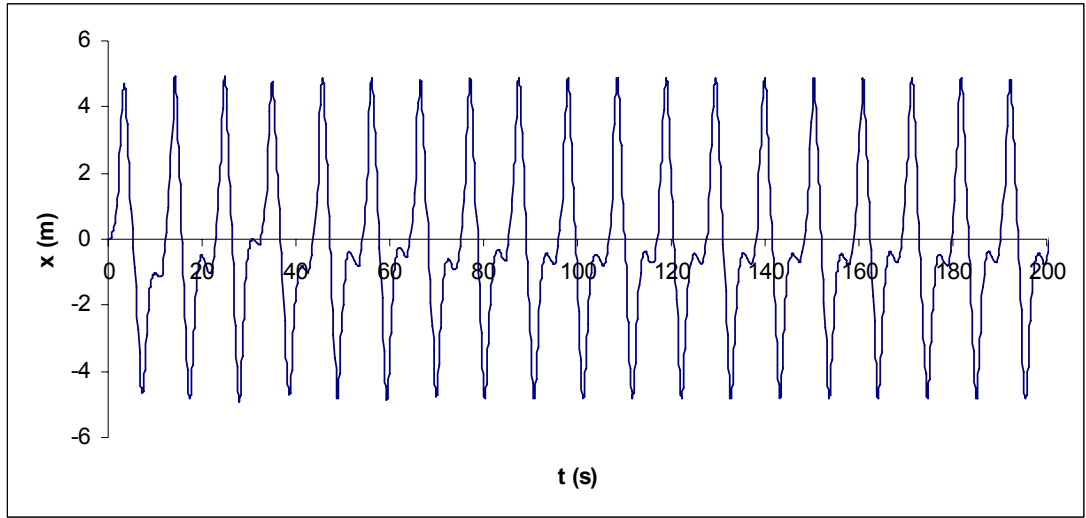
Runge-Kutta yönteminden farklı olarak, Adams-Bashforth-Moulton yöntemi, y_{k+1} 'in hesaplanması için, y_{k-3} , y_{k-2} , y_{k-1} ve y_k değerlerini kullanır. Yani Runge-Kutta yöntemi, tek adımlı bir yöntem olarak tanımlanırken, bu yöntem ise çok adımlı bir yöntemdir. Tahmin edip, düzeltme yapılarak değerler elde edilir. MATLAB içerisindeki ODE113 algoritması yardımıyla [29] yapılan hesaplar sonucu elde edilen grafik ve buna bağlı faz diyagramı, zorlayıcı frekans $\omega = 0.60$ rad/s ve $f_1 = 2$ için Şekil 3.17 ve Şekil 3.18'de gösterilmiştir.

```
function dy = vdp1000(t,y)
```

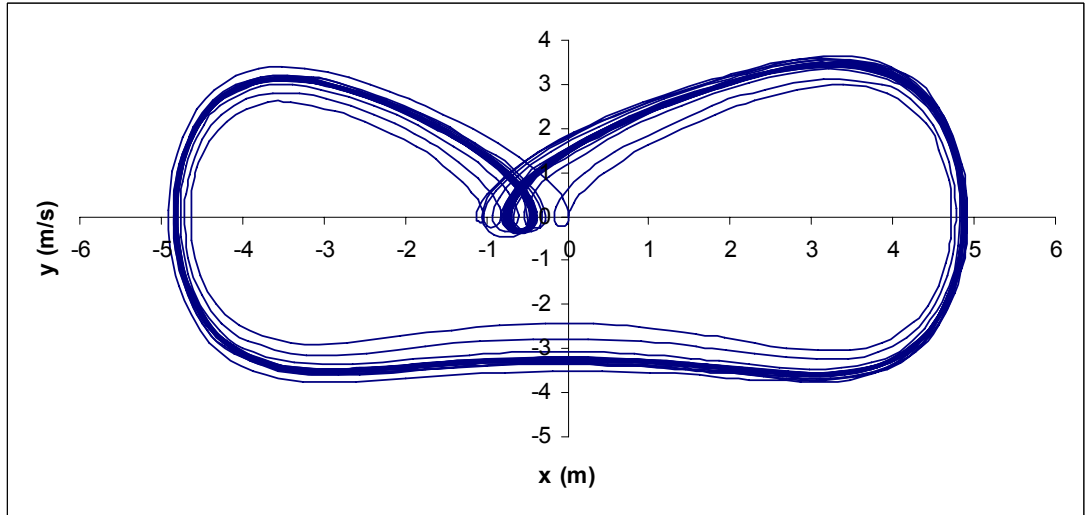
```
dy = zeros(2,1); % a column vector
```

```
dy(1) = y(2);
```

```
dy(2) = -0.0664*y(2)-(0.03100*y(1))-(-0.00786*y(1)^3)-(0.004607*y(1)^5) +  
2*sin(0.60*t);
```

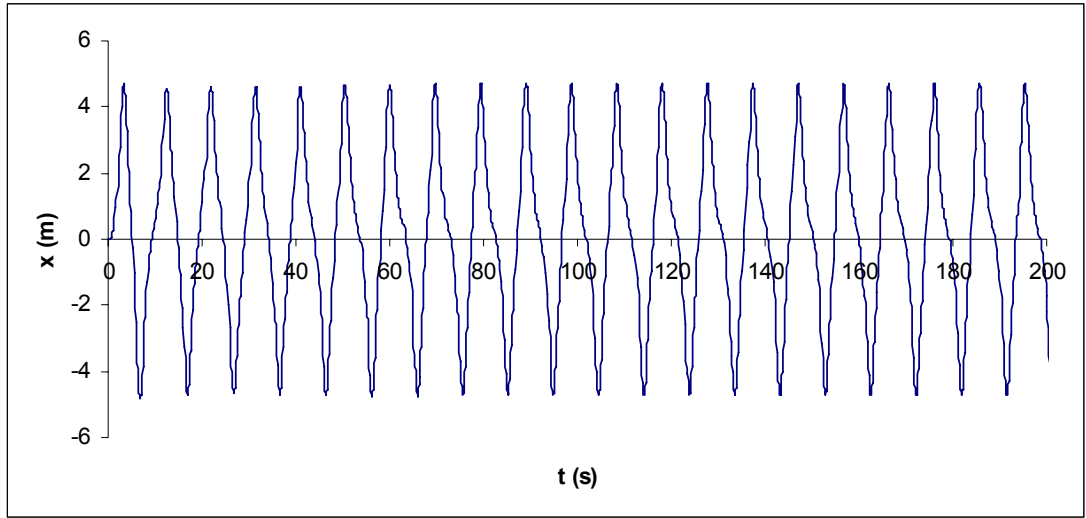


Şekil 3.18 : Zorlayıcı frekans $\omega=0.6$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği

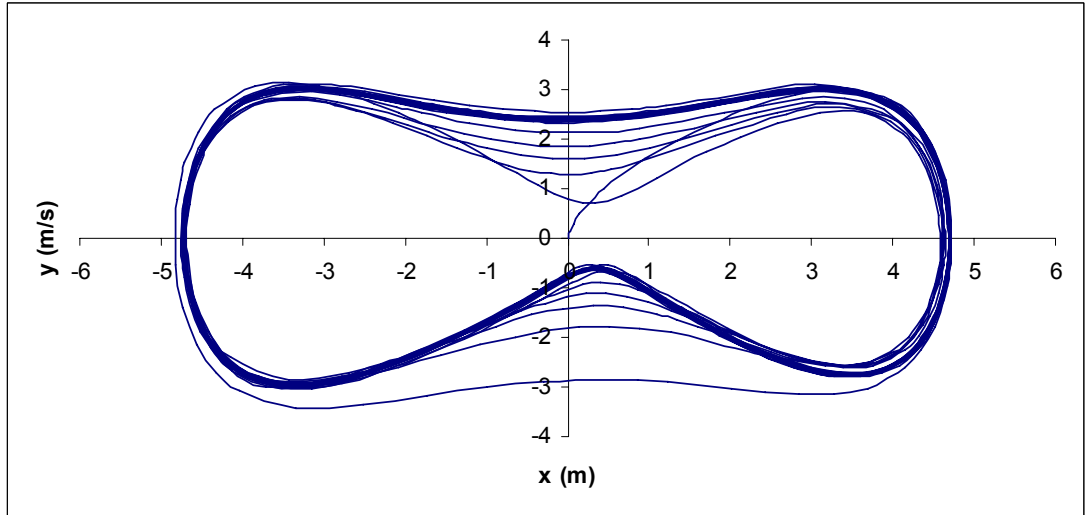


Şekil 3.19 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.6$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2$ iken verilen tepkinin faz diyagramı

Zorlayıcı frekans $\omega = 0.60$ rad/s'den 0.65 rad/s'ye çıkarıldığı zaman ise elde edilen değerler ve buna bağlı faz diyagramı Şekil 3.20 ve Şekil 3.21'de gösterilmektedir.



Şekil 3.20 : Zorlayıcı frekans $\omega=0.65$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği



Şekil 3.21 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.65$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2$ iken verilen tepkinin faz diyagramı

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Demirleme sistemlerinin tiplerine ve kullanılış amaçlarına kısa bir göz attıktan sonra, teorik olarak dağınık şekilde demirlenmiş bir geminin boyuna öteleme, yanal öteleme ve yunuslama hareket denklemleri ve dışardan gelen zorlayıcı kuvvetlerin sisteme olan etkisi incelenmiştir. Akıntı, rüzgar ve dalga kuvvetleri gibi zorlayıcı kuvvetlerden en önemlisi dalga kuvvetinin modellenmesi için Abkowitz modelinden yararlanılmıştır. Hem zincir, hem de sentetik fiber iplerden oluşan bir demirleme hattı modeli üzerinde durulduktan sonra, yatay düzlemdeki tüm hareketleri yapan demirlenmiş bir geminin, zorlayıcı çevre koşullarının da etkisi göz önünde bulundurularak matematiksel modeli teorik olarak Bölüm 2’de incelenmiştir.

Bu bilgilerden yola çıkılarak, pratik bir uygulama niteliği taşıyan, sadece boyuna öteleme hareketi yapan demirlenmiş silindirik bir duba Bölüm 3’te incelenmiştir. Benzer konularda yapılmış olan çalışmalarda Harmonik Balans Yöntemi kullanılmıştır, dolayısıyla Runge-Kutta ve Adams-Bashforth-Moulton gibi sayısal yöntemlerle çözüme gitmeden önce, Harmonik Balans Yöntemi ile hareket denkleminin nasıl çözülebileceği hakkında bilgi verilmiştir. Bir örnek teşkil etmesi açısından, Harmonik Balans Yöntemi ile elde edilmiş olan, çeşitli zorlayıcı frekans değerleri için zamana bağlı grafikler ve faz diyagramları Ek D’de ayrıntılı bir şekilde verilmiştir.

Demirleme hatlarına gelen yatay kuvvet ile sürüklenme mesafesi ve derinlik arasındaki ilişkiyi kurabilmek için, statik denge denklemleri ve bunların integrasyonu ile bulunmuş olan bağıntılar yardımıyla belirli bir duba boyutu ve su derinliği için bazı sonuçlar elde edilmiştir. Buna göre, sürüklenme mesafesi ile dubadaki gerilme arasında eksponansiyel bir ilişki gözlemlenirken, çapa için gereken zincir miktarı ile sürüklenme arasında lineer bir ilişki söz konusudur. Su derinliği arttıkça, sürüklenme ile aralarındaki ilişki lineerlikten giderek uzaklaşmaktadır. Öte yandan, derinlik ile

dubadaki gerilme ve çapa için gereken zincir miktarı arasında lineer bir bağ gözlemlenmiştir.

Söz konusu demirlenmiş silindirik dubaya gelen dalgaların yatay yöndeki etkileri kaçınılmazdır. Bunu incelemek için x yönündeki Froude-Krylov kuvvetinin frekansla olan değişimi hesaplanmıştır; ancak gelen dalgaların, dubanın geometrisi nedeniyle oluşturacağı difraksiyon etkisi bu çalışmada ihmal edilmiştir. Dolayısıyla, f , dalga kuvveti katsayısını hesaplamada Froude-Krylov kuvveti eklenmeyip sadece ikinci dereceden dalga sürüklenme kuvveti kullanılmıştır. Dalga sürüklenme kuvvetleri ampirik bağıntılardan yararlanılarak hesaplanmıştır. Böylece farklı deniz koşullarındaki dalga yükseklikleri ve periyotları için farklı dalga sürüklenme kuvvetlerinin elde edilmesi mümkün olmuştur.

Dubanın hareket denkleminin çözümü için farklı sayısal yöntemler kullanılmıştır. MATLAB yardımıyla dördüncü dereceden Runge-Kutta ve Adams-Bashforth-Moulton Yöntemleri ile çözüme gidilmiştir. Ek A'da Runge-Kutta Yöntemi ile farklı zorlayıcı frekans ve dalga kuvveti katsayıları için tepkinin zamana bağlı grafikleri ile bunlara ait faz diyagramları, Ek B'de ise Adams-Bashforth-Moulton Yöntemi ile elde edilmiş olan grafikler ve bunlara bağlı faz diyagramları gösterilmiştir. Ek C'de ise bu iki yöntemin karşılaştırılmasına yer verilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, Harmonik Balans Yöntemi ile karşılaştırıldığında oldukça uyumlu gözükmemektedir. Bunun yanı sıra, Runge-Kutta ile Adams-Bashforth-Moulton Yöntemleri de yine kendi aralarında ilk bakışta genel olarak uyumlu gözükmele beraber, zorlayıcı frekans sırasıyla, $\omega = 0.667, 0.50, 0.50, 0.45$ ve 0.30 rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2$ iken, zaman ilerledikçe farklılıklar göze batmaktadır. Öte yandan, zorlayıcı frekans $\omega = 0.84$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2.5$ alınarak program çalıştırıldığında ve zorlayıcı frekansı 0.90 rad/s'ye çıkarılıp, dalga kuvveti katsayısı da $f_1 = 15$ olarak değiştirildiğinde iki yöntem arasında yine bazı farklılıklar dikkat çekmektedir. Bu tarz sayısal yöntemlerle yaklaşımlarda bulunulması, farklılıkların ortaya çıkmasında en büyük rolü oynamaktadır. Sayısal yöntemlerle yaklaşımlarda bulunarak, hareket denkleminin çözülmeye çalışılmasının yanı sıra, söz konusu iki yöntem de kendi aralarında oldukça farklıdır. Runge-Kutta tek adımlı bir yöntem iken, Adams-Bashforth-Moulton çok adımlı bir yöntemdir.

Bu grafiklere genel olarak bakılacak olursa, zorlayıcı frekans $\omega = 0.3$ rad/s iken aynı frekansta harmonik altı tepki oluşmaktadır. $\omega = 0.45$ rad/s iken yine aynı şekilde harmonik altı tepkiler oluşmaktadır. Harmonik altı tepkilerin nedeni, demirleme hatlarının lineer olmama durumundan kaynaklanmaktadır. Hareket esnasında, bu hatlardan biri gevşeyip, öteki gerginleşmektedir.

$\omega = 0.50$ rad/s iken periyot katlanması gözlemlenmektedir. $\omega = 0.57, 0.60$, ve 0.62 rad/s iken simetri kırılması görülmektedir. Merkezde simetrinin sağlanamaması, bir demirleme hattının aşırı gerildiğini göstermektedir. Yani, bir çeşit dengesizlik durumu söz konusudur. $\omega = 0.667$ rad/s iken simetri tekrar sağlanmıştır. $\omega = 0.30$ rad/s ile $\omega = 0.62$ rad/s arasında sistem bir çeşit dengesizlik göstermektedir. f_l 'in aşırı büyük ve zorlayıcı frekansın 0.8 rad/s 'e çok yakın olduğu durumlarda kaotik davranışlar gözlenmektedir. Bu durumda, hareketin frekansı, dalganın frekansına eşitlenirse rezonans sonucu tehlikeli durumlar ortaya çıkabilir, zincirin kırılabilme olasılığı gündeme gelir. Aynı şekilde, bir dalga çarptıktan sonra yansıyabileceği için duran dalga oluşumuna zemin hazırlanabilir ve bundan dolayı normal dalganın hemen hemen iki katı bir dalga oluşabilir. Bu durumdan sistem olumsuz bir şekilde etkilenebilir. Demirleme hattı gerilebilir ve sonunda kopabilir. Zorlayıcı frekans, $\omega = 0.84$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_l = 15$ iken sistem yüksek düzensiz tepkiler vermektedir. Yani şiddetli deniz şartlarında sistem gene kaotik davranışlar göstermektedir. Dalga yüksekliklerindeki anormal artışlar bu duruma neden olur. Öte yandan, zorlayıcı frekans sırasıyla, $\omega = 0.9, 1.25$, ve 1.5 rad/s şeklinde arttırıldığında simetrik davranışlar gözlemlenmiştir.

Bundan sonraki çalışmalarda, sistemin sadece boyuna öteleme hareketi değil aynı anda yanal öteleme ve yunuslama hareketlerini de yaptığı göz önünde bulundurulursa, daha gerçekçi bir model elde edilmiş olacaktır. Aynı şekilde dalga kuvvetinin toplamı ile rüzgar, akıntı gibi zorlayıcı etkilerin de hesaba katılması bu bakımdan oldukça önemlidir. Demirleme hatlarının analizinde ise statik çözüm yerine, elastik kablo kabulü yapmak, modelin daha gerçekçi bir hal almasını sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

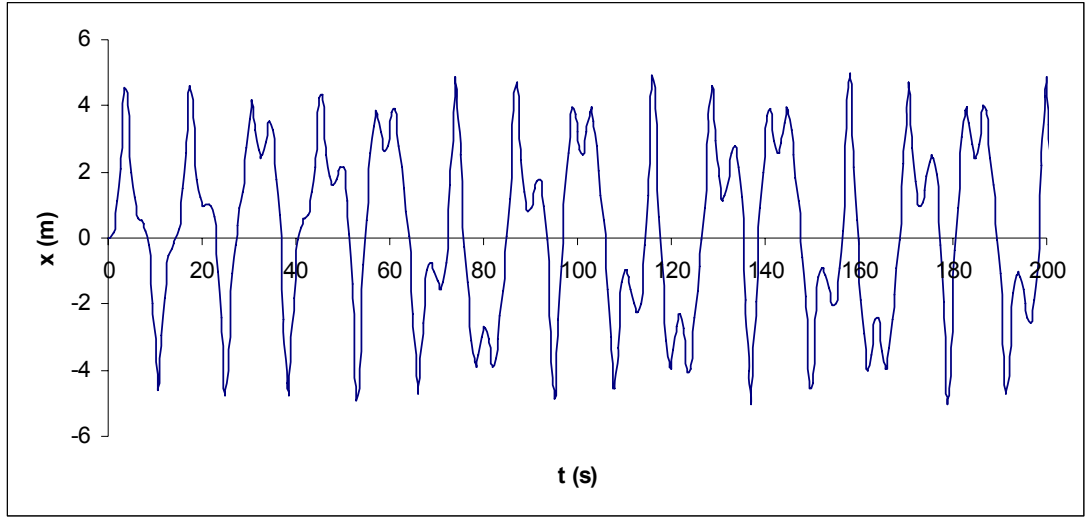
- [1] **Abkowitz, M.A.**, 1972. Stability and Motion Control of Ocean Vehicles, MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- [2] **Bernitsas, M.M., and Chung, J-S**, 1990. Nonlinear Stability and Simulation of Two-Line Ship Towing and Mooring, *Applied Ocean Research*, **12**, 2, 77-92
- [3] **Bernitsas M.M. and Garza-Rios, L.O.**, 1996. Effect of Mooring Line Arrangement on the Dynamics of Spread Mooring Systems, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, **118**, 7-20.
- [4] **Bernitsas M.M. and Kim, B-K.**, 1998. Effect of Slow-Drift Loads on Nonlinear Dynamics of Spread Mooring Systems, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, **120**, 4, 201-211.
- [5] **Bernitsas M.M., Matsuura, J.P.J., and Andersen, T.**, 2004. Mooring Dynamics Phenomena Due to Slowly-Varying Wave Drift, *Transactions of the ASME*, **126**, 280-286.
- [6] **Bernitsas, M.M., and Matsuura, J.P.J.**, 2005. Large Amplitude Slow Motions of Mooring Systems, *Maritime Trs. & Exploitation of Ocean & Coastal Research*, Taylor & Francis Group, London.
- [7] **Berteaux, H.O.**, 1976. *Buoy Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., New York
- [8] **Faltinsen, O.M.**, 1993. *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*, Cambridge Ocean Technology Series, Cambridge University Press.
- [9] **Faltinsen, O.M., and Zhao, R.**, 1989. Slow-Drift Motions of a Moored Two-Dimensional Body in Irregular Waves, *Journal of Ship Research*, **33**, 2, 93-106.

- [10] **Garza-Rios, L.O. and Bernitsas, M.M.**, 1998. Analytical Expressions for Stability and Bifurcations of Turret Mooring Systems, *Journal of Ship Research*, **42**, 3, 216-232.
- [11] **Garza-Rios, L.O. and Bernitsas, M.M.**, 1999. Slow Motion Dynamics of Turret Mooring Systems and its Approximation as Single Point Mooring, *Journal of Applied Ocean Research*, **21**, 1, 27-39.
- [12] **Garza-Rios, L.O. and Bernitsas, M.M.**, 2001. Effect of Size and Position of Supporting Buoys on the Dynamics of Spread Mooring Systems, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, **123**, 2, 49-56.
- [13] **Garza-Rios, L.O., Bernitsas, M.M., Nishimoto, K., and Masetti, I.Q.**, 1999. Preliminary Design of Differentiated Compliance Anchoring Systems, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, **121**, 9-15.
- [14] **Garza-Rios, L.O., Bernitsas, M.M., Nishimoto, K., and Matsuura, J.P.J.**, 2000. Dynamics of Spread Mooring Systems with Hybrid Mooring Lines, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, **122**, 4, 274-281.
- [15] **Jordan, D.D. and Smith, P.**, 1999. *Nonlinear Ordinary Differential Equations – An Introduction to Dynamical Systems*, Third Edition, Oxford Applied and Engineering Mathematics, Oxford University Press.
- [16] **Journée, J.M.J., and Massie, W.W.**, 2001. *Offshore Hydromechanics*, Delft University of Technology.
- [17] **Kim, B-K., and Bernitsas, M.M.**, 1999. Effect of Memory on the Stability of Spread Mooring Systems, *Journal of Ship Research*, **43**, 3, 157-169.
- [18] **Kim, B-K., and Bernitsas, M.M.**, 1999. Nonlinear Dynamics and Stability of Spread Mooring Systems, *Journal of Applied Ocean Research*, **23**, 2, 111-123.
- [19] **Leite, A.J.P., Aranha, J.A.P., Umeda, C., and Conti, M.B.**, 1998. Current Forces in Tankers and Bifurcation of Equilibrium of Turret Mooring Systems: Hydrodynamic Model and Experiments, *Journal of Applied Ocean Research*, **20**, 145-156.

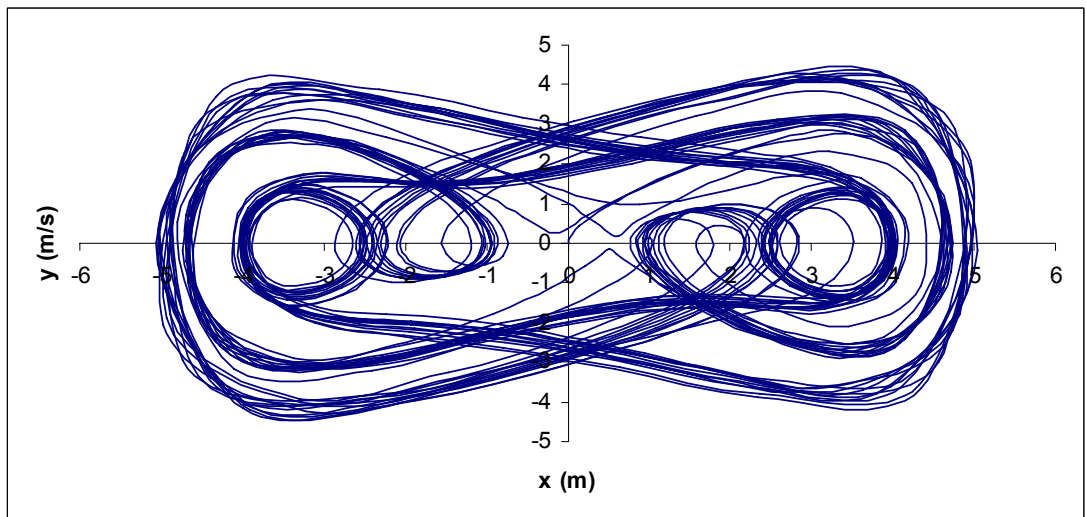
- [20] **Matsuura, J.P.J., Bernitsas, M.M., Garza-Rios, L.O., and Nishimoto, K.,** 2002. Sensitivity and Robustness of Hydrodynamic Mooring Models, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, **124**, 4, 179-189.
- [21] **Matsuura, J.P.J., Nishimoto, K., Bernitsas, M.M., and Garza-Rios, L.O.,** 2000. Comparative Assessment of Hydrodynamic Models in Slow Motion Dynamics, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, **122**, 2, 109-117.
- [22] **Ormberg, H. And Larsen, K.,** 1998. Coupled Analysis of Floater Motion and Mooring Dynamics for a Turret-Moored Ship, *Journal of Applied Ocean Research*, **20**, 1/2, 55-67.
- [23] **Papoulias, F.A., and Bernitsas, M.M.,** 1988. Autonomous Oscillations, Bifurcations and Chaotic Response of Moored Vessels, *Journal of Ship Research*, **32**, 3, 220-228.
- [24] **Simos, A.N., Tannuri, E.A. and Pesce, C.P. and Aranha, J.A.P.,** 2001. A Quasi-Explicit Hydrodynamic Model for the Dynamic Analysis of a Moored FPSO Under Current Action , *Journal of Ship Research*, **45**, 4, 289-301.
- [25] **Tannuri, E.A., Simos, A.N., Leite, A.J.P. and Aranha, J.A.P.,** 2001. Experimental Validation of a Quasi-Explicit Hydrodynamic Model: Fishtailing Instability of a Single-Point Moored Tanker in Rigid-Hawser Configuration , *Journal of Ship Research*, **45**, 4, 302-314.
- [26] **Umar, A., Ahmad, S. and Data, T.K.,** 2004. Stability Analysis of a Moored Vessel, *Transactions of the ASME*, **126**, 164-174.
- [27] **Umar, A., and Data, T.K.,** 2003. Nonlinear Response of a Moored Buoy, *Ocean Engineering*, **30**, 1625-1646.
- [28] **Wiggins, S.,** 1990. *Introduction to Applied Nonlinear Dynamical Systems and Chaos*, Springer-Verlag NY Inc., New York.
- [29] **Yang, W.Y., Cao, W., Chung, T-S., and Morris, J.,** 2005. *Applied Numerical Methods Using MATLAB*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

EK A

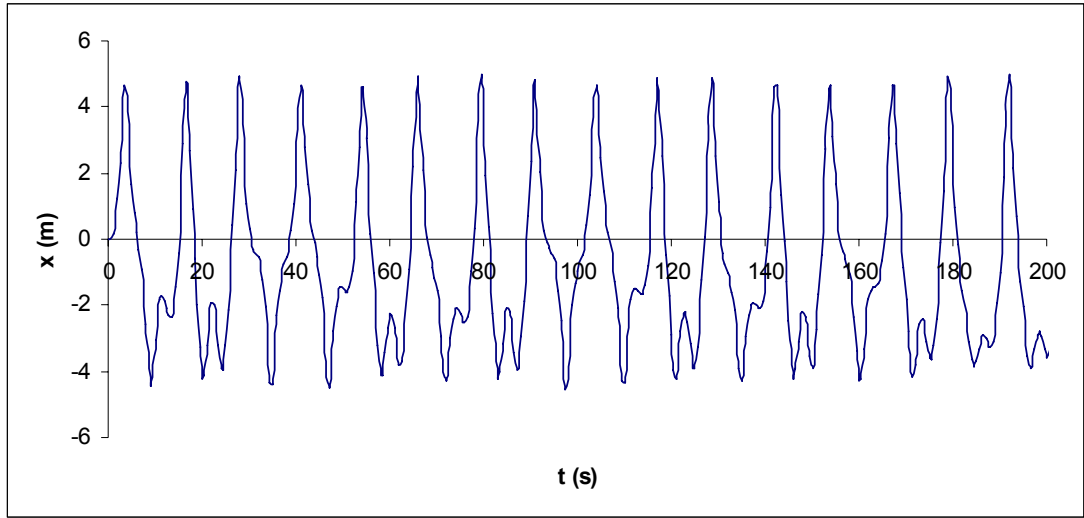
Runge-Kutta Yöntemi ile elde edilen sonuçlar



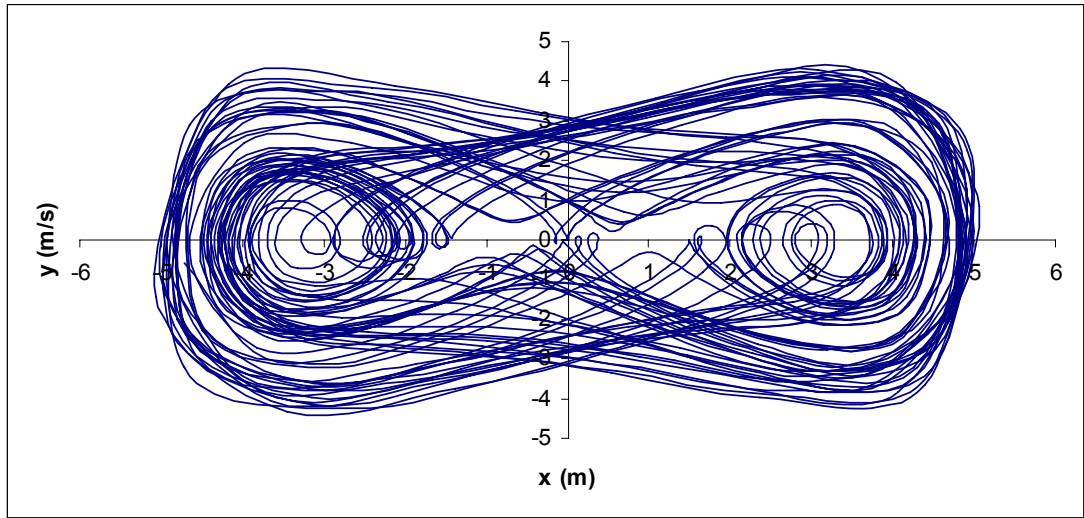
Şekil A.1 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.45$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği



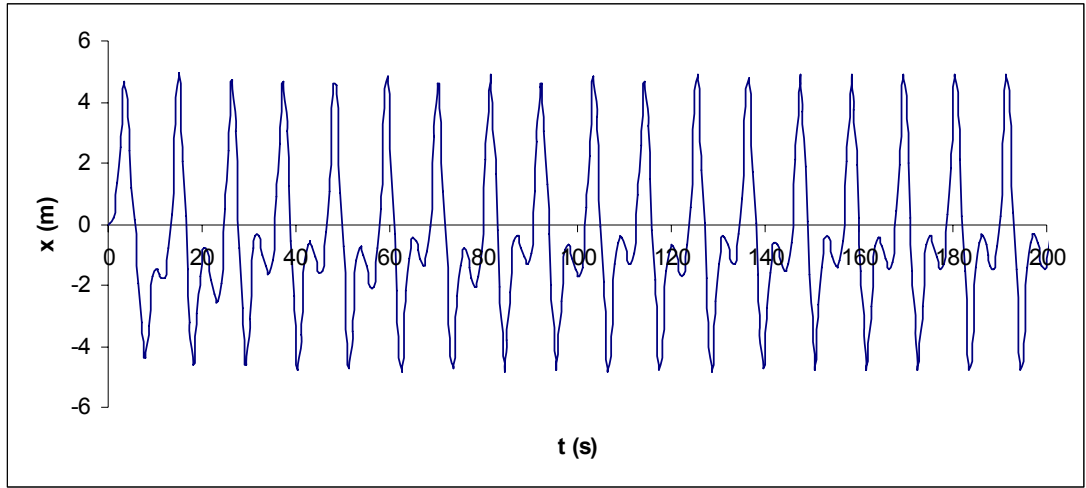
Şekil A.2 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.45$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin faz diyagramı



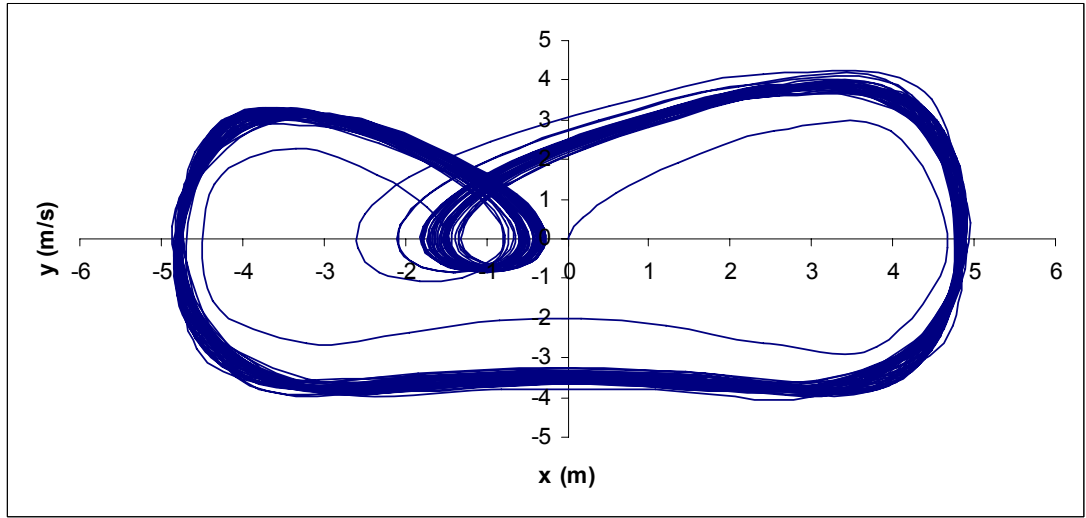
Şekil A.3 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.50$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği



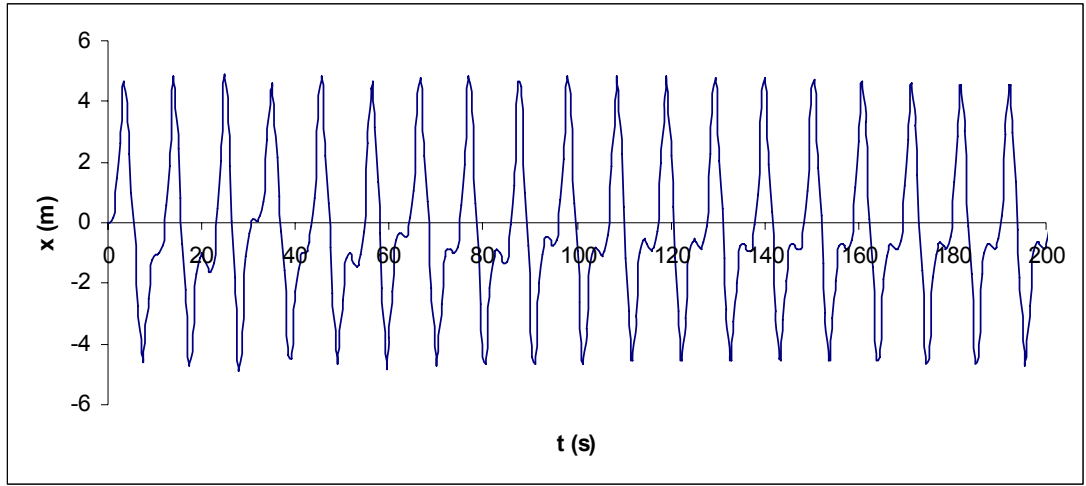
Şekil A.4 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.50$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin faz diyagramı



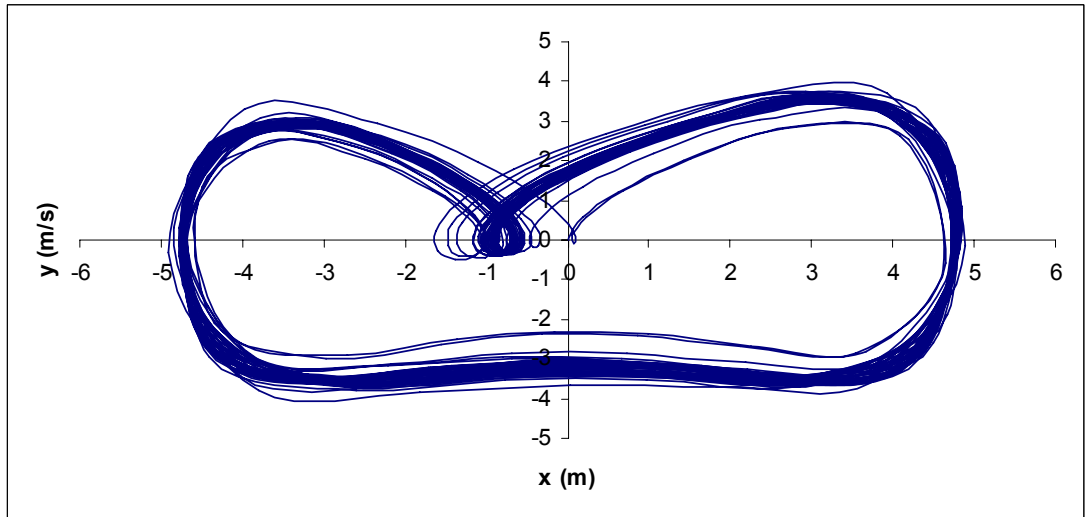
Şekil A.5 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.57$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği



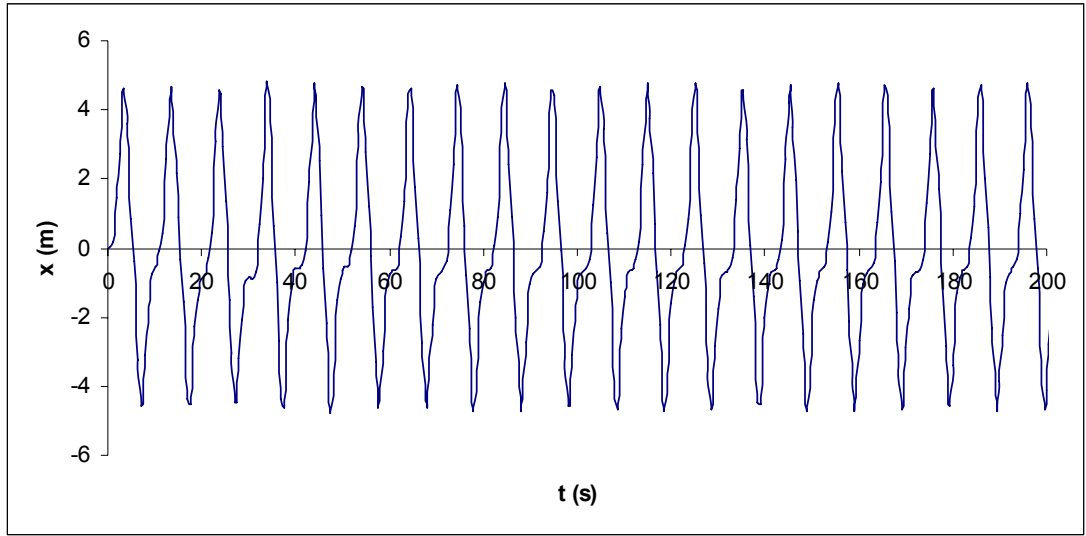
Şekil A.6 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.57$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin faz diyagramı



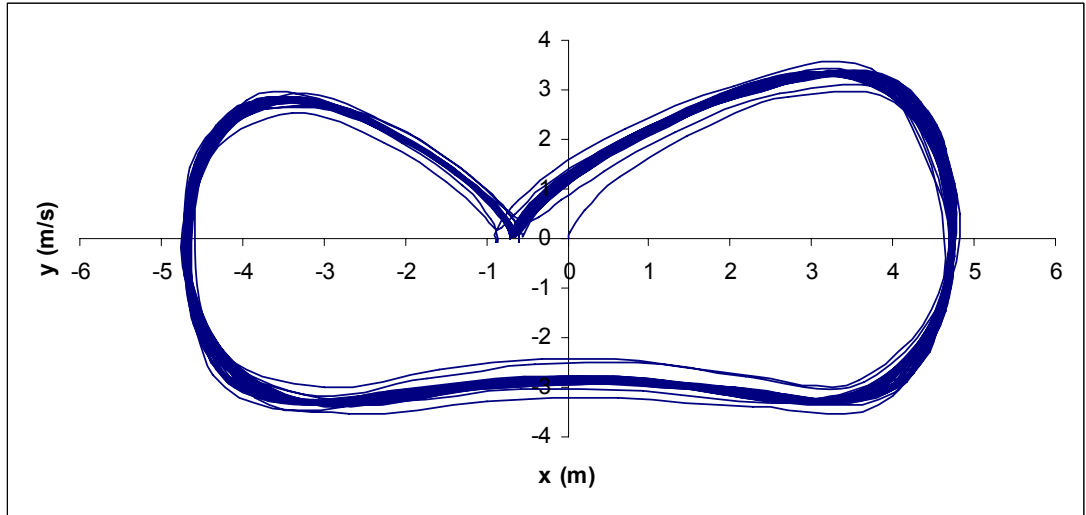
Şekil A.7 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.60$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği



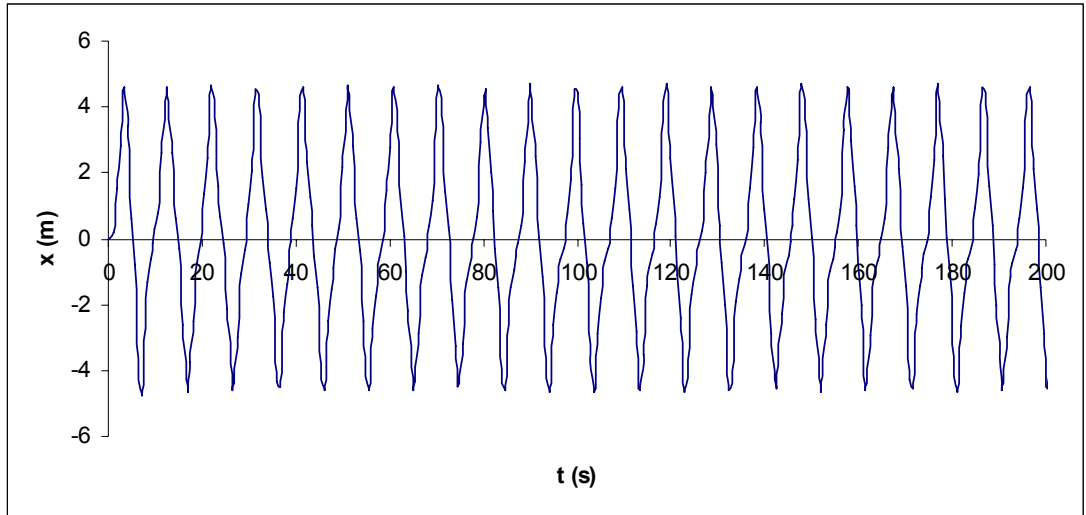
Şekil A.8 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.60$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin faz diyagramı



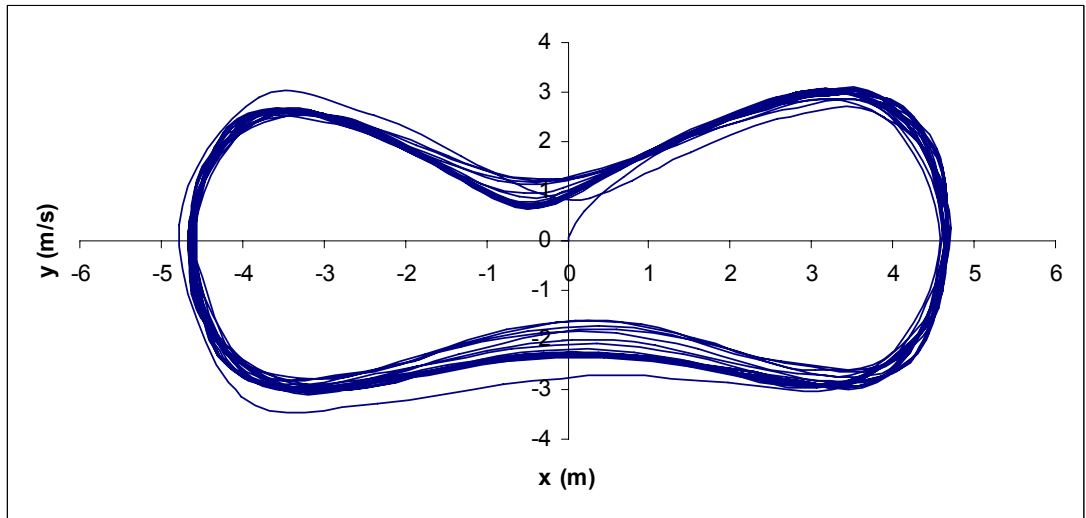
Şekil A.9 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.62$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği



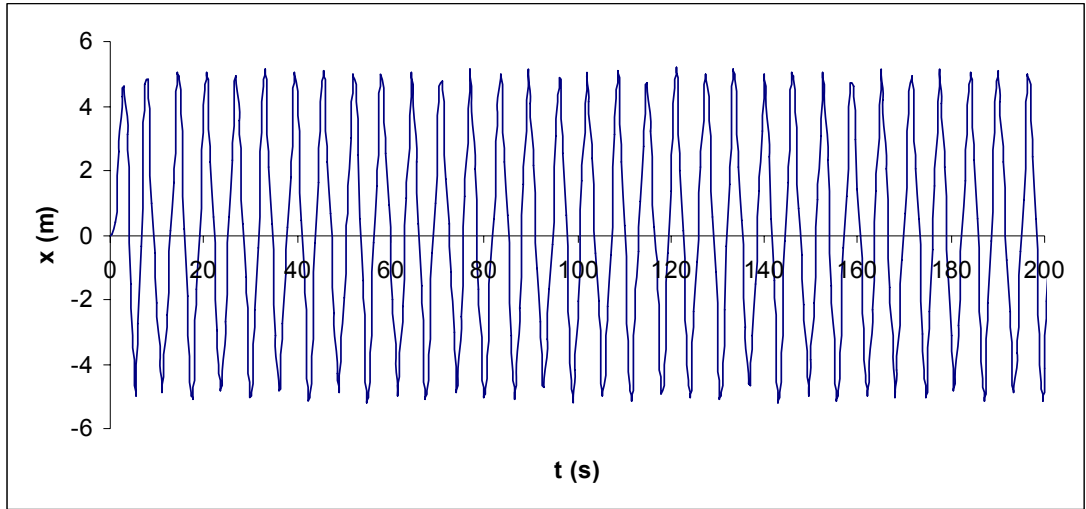
Şekil A.10 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.62$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin faz diyagramı



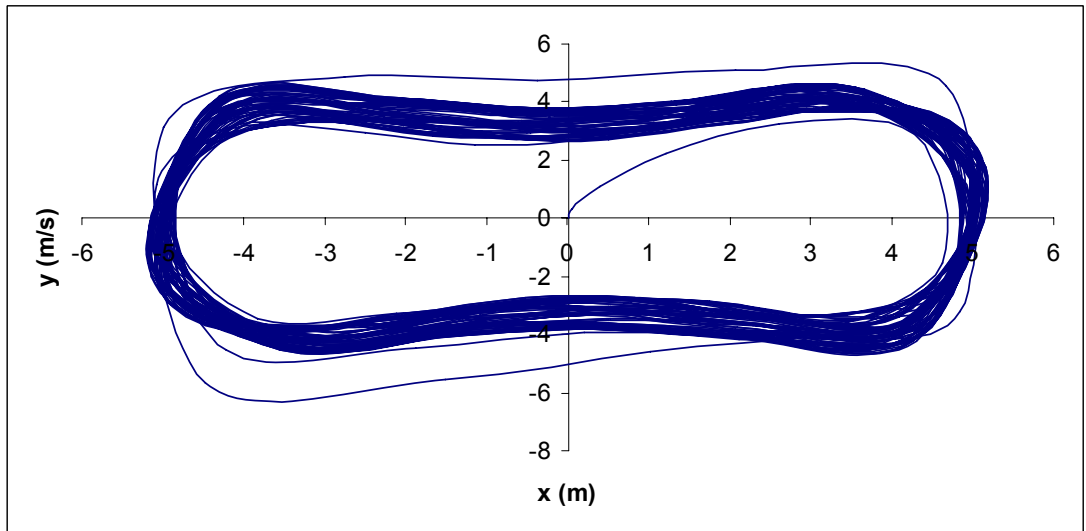
Şekil A.11 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.65$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_l = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği



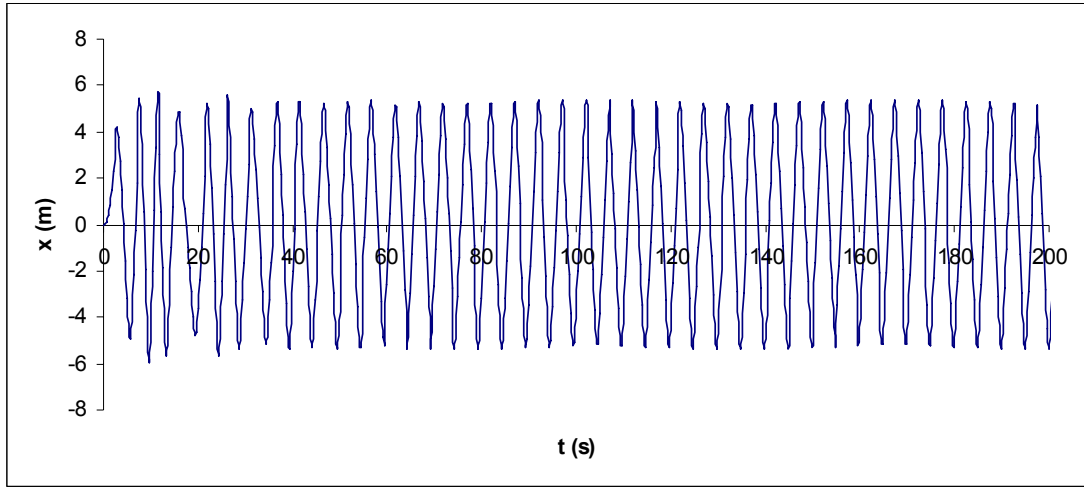
Şekil A.12 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.65$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_l = 1.93$ iken verilen tepkinin faz diyagramı



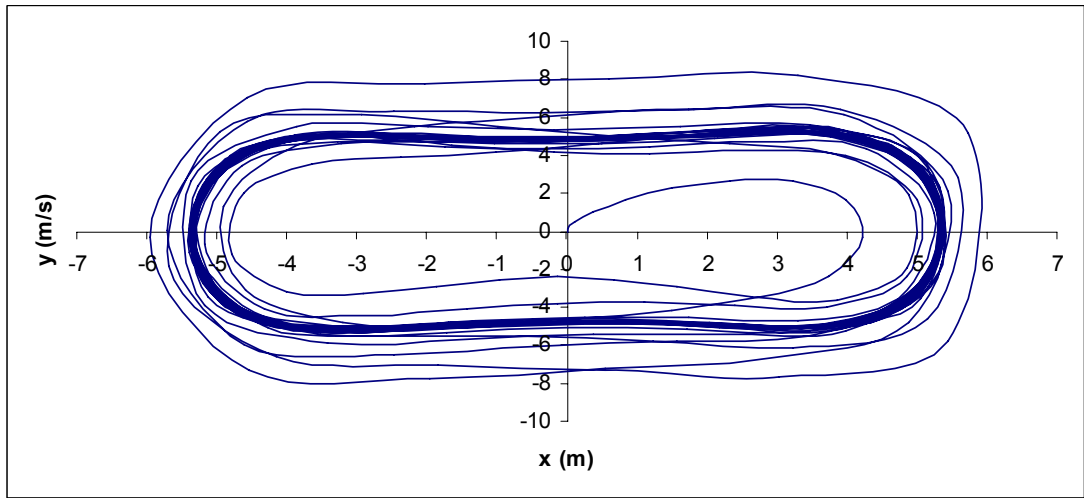
Şekil A.13 : Zorlayıcı frekans $\omega = 1.0 \text{ rad/s}$ ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2.5$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği



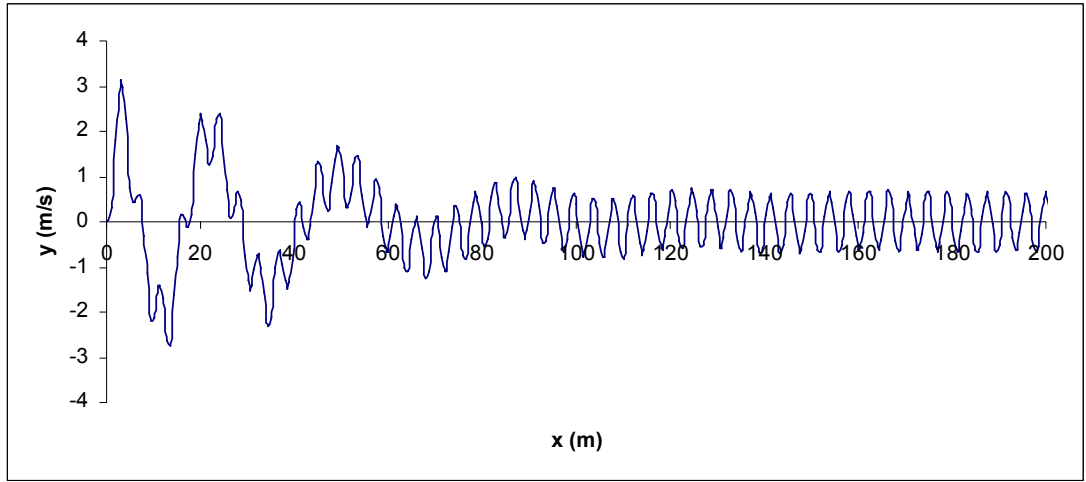
Şekil A.14 : Zorlayıcı frekans $\omega = 1.0 \text{ rad/s}$ ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2.5$ iken verilen tepkinin faz diyagramı



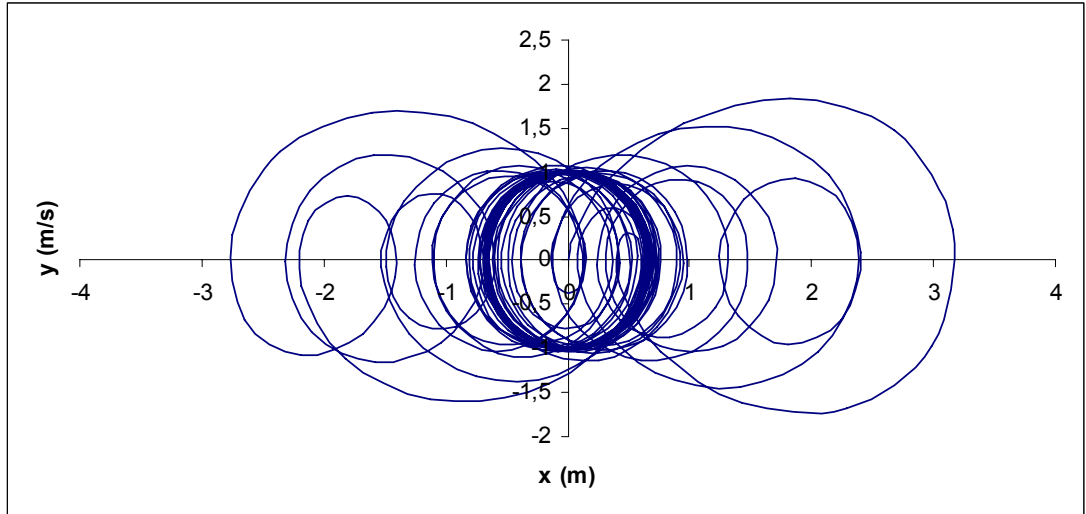
Şekil A.15 : Zorlayıcı frekans $\omega = 1.25$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği



Şekil A.16 : Zorlayıcı frekans $\omega = 1.25$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin faz diyagramı



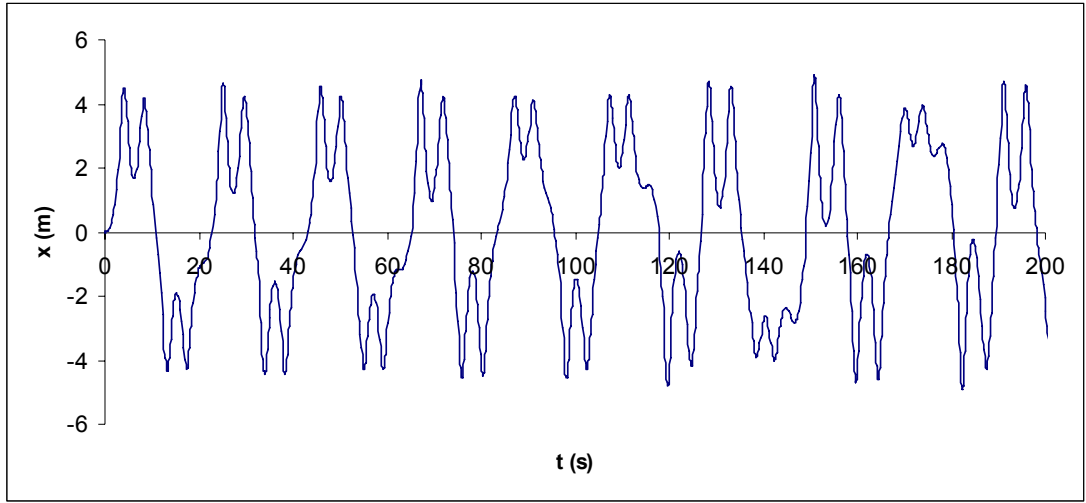
Şekil A.17 : Zorlayıcı frekans $\omega = 1.5$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.5$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği



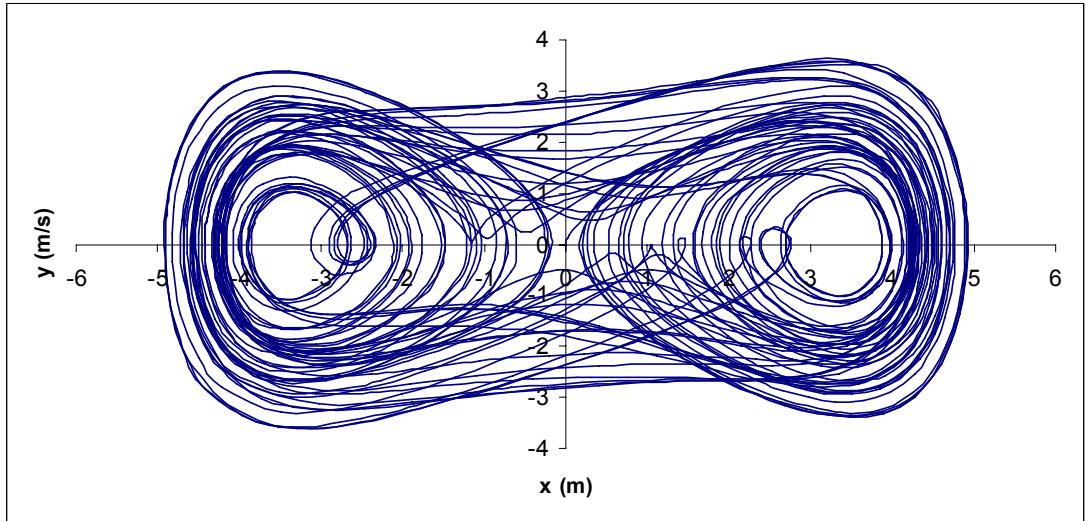
Şekil A.18 : Zorlayıcı frekans $\omega = 1.5$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.5$ iken verilen tepkinin faz diyagramı

EK B

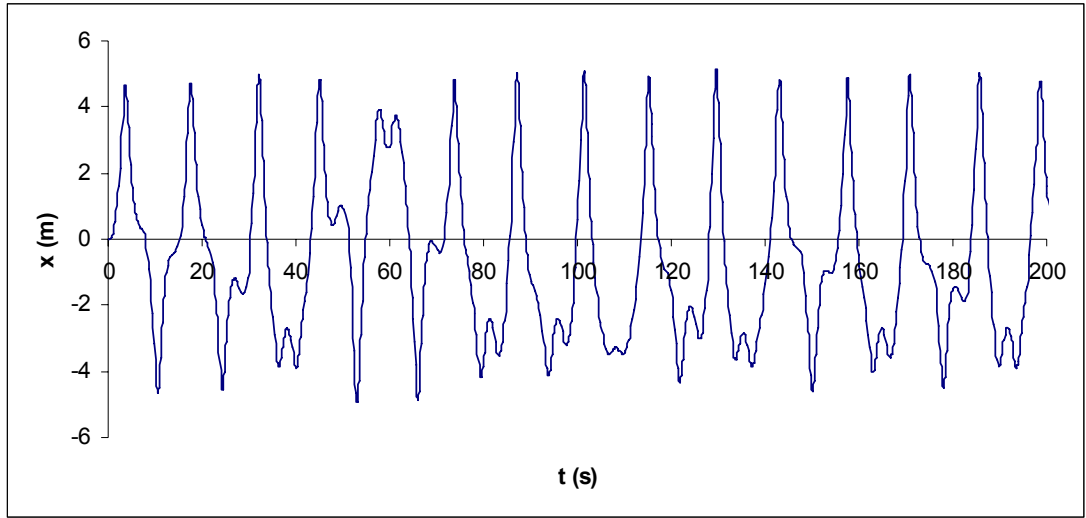
Adams-Bashforth-Moulton Yöntemi ile elde edilen sonuçlar



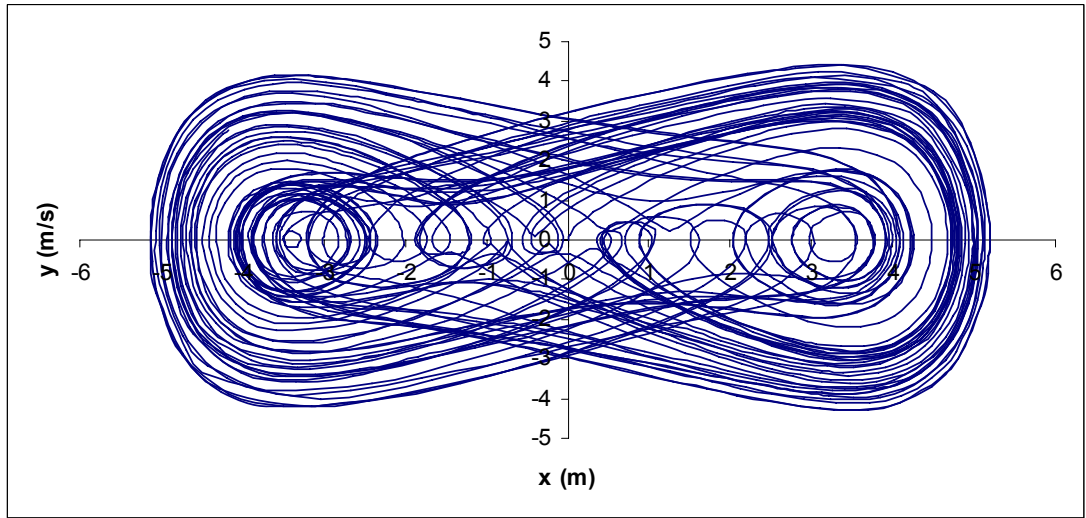
Şekil B.1 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.30$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği



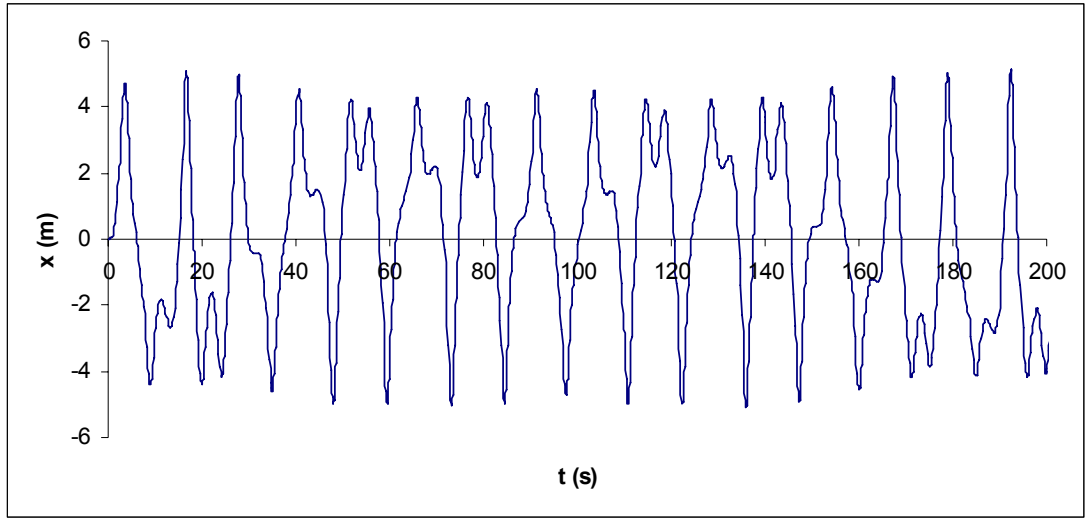
Şekil B.2 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.30$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin faz diyagramı



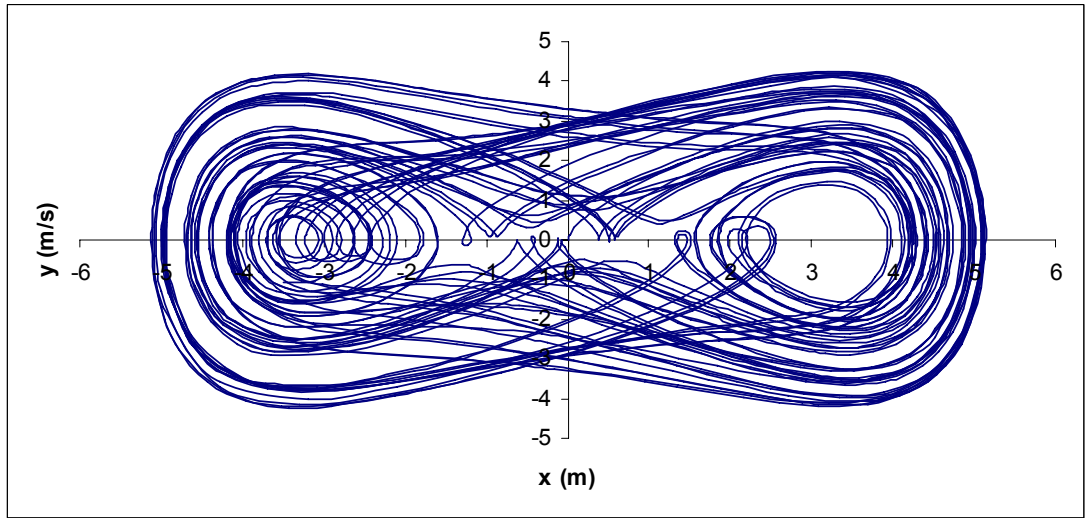
Şekil B.3 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.45$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği



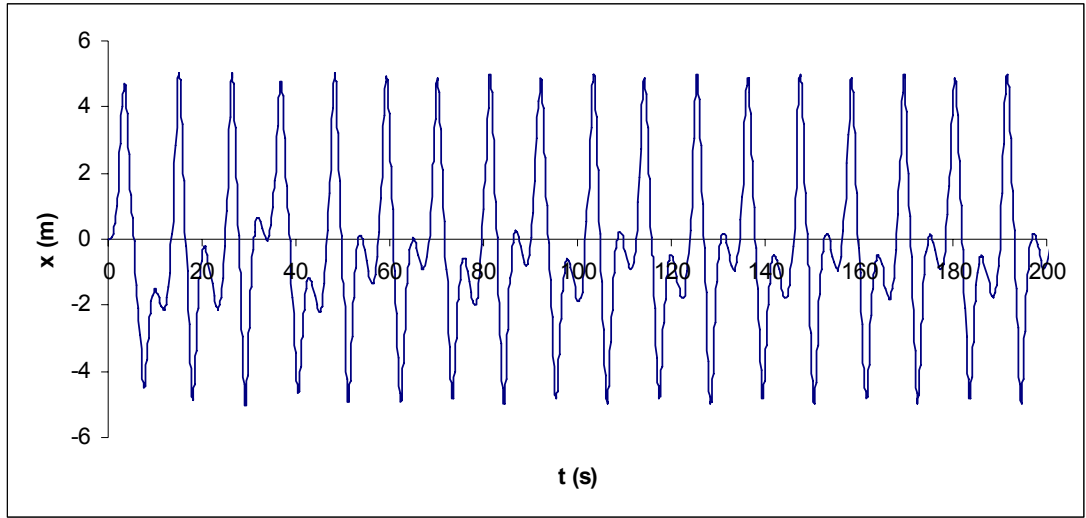
Şekil B.4 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.45$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin faz diyagramı



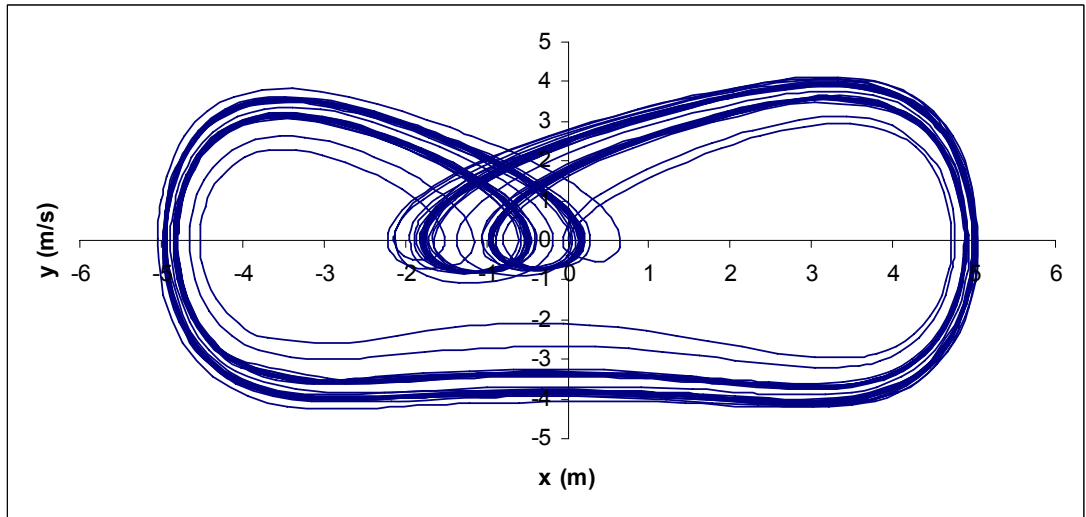
Şekil B.5 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.50$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği



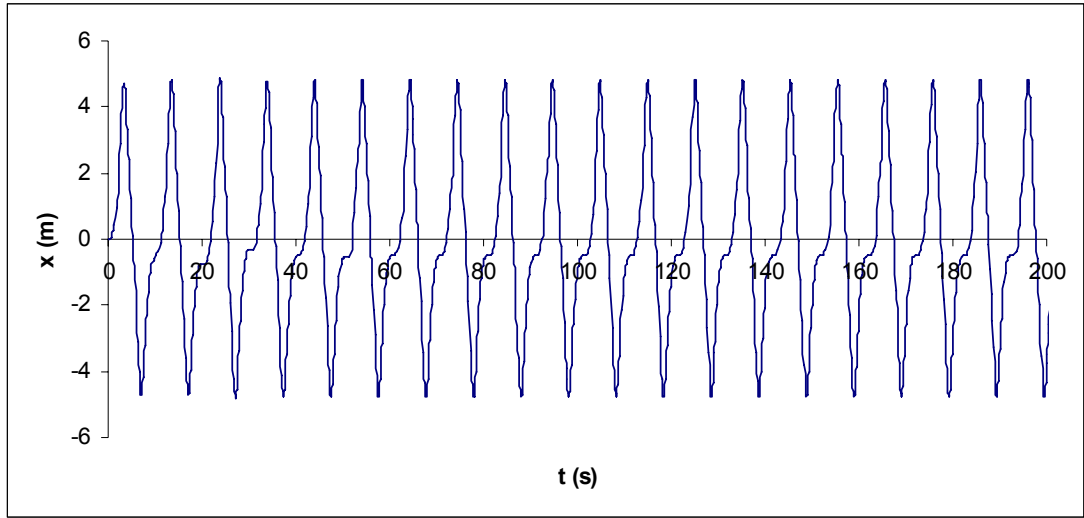
Şekil B.6 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.50$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin faz diyagramı



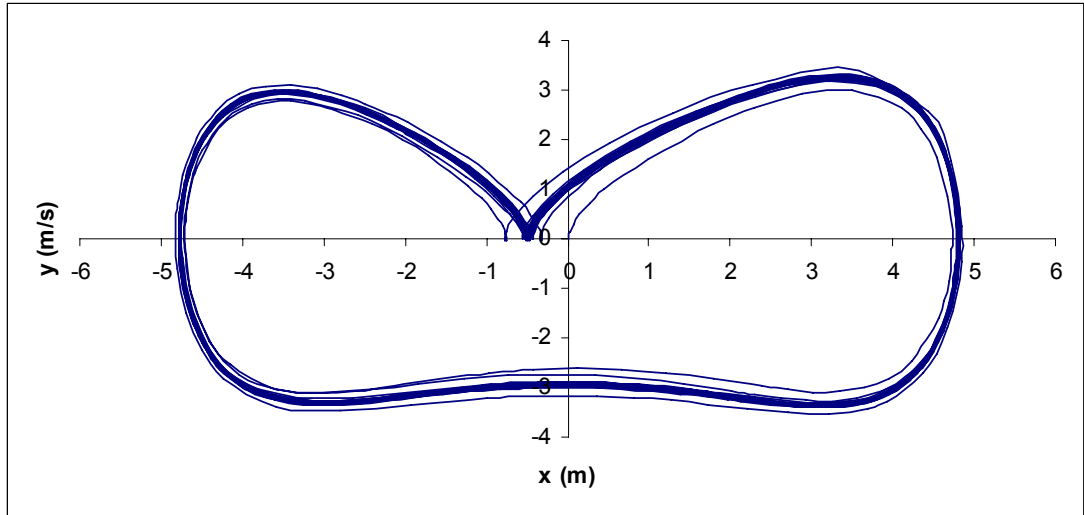
Şekil B.7 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.57$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği



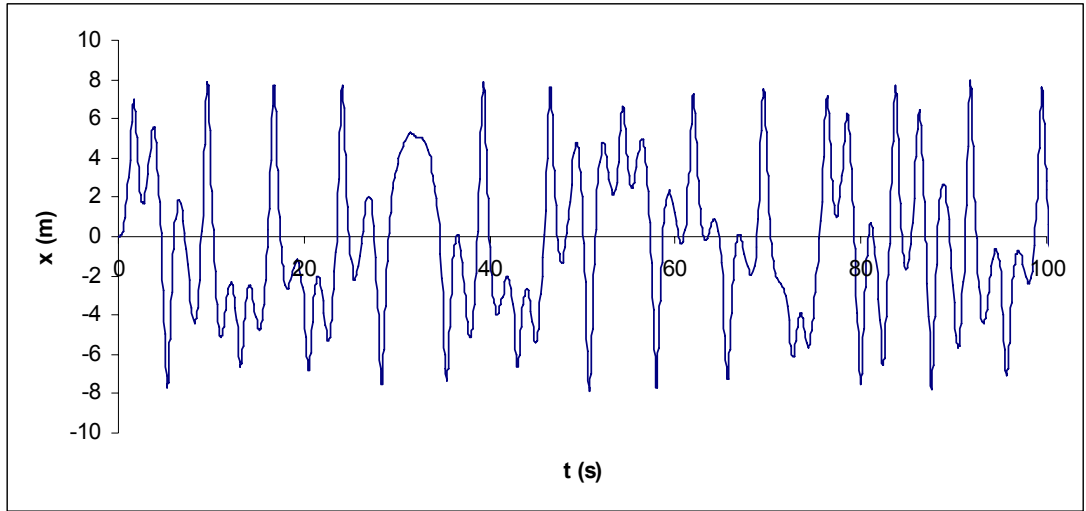
Şekil B.8 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.57$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin faz diyagramı



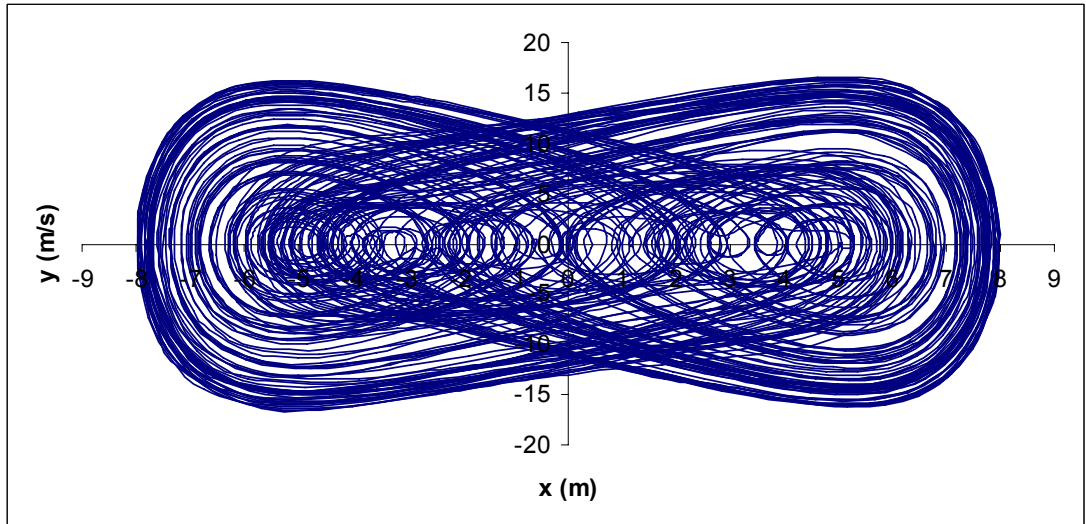
Şekil B.9 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.62$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği



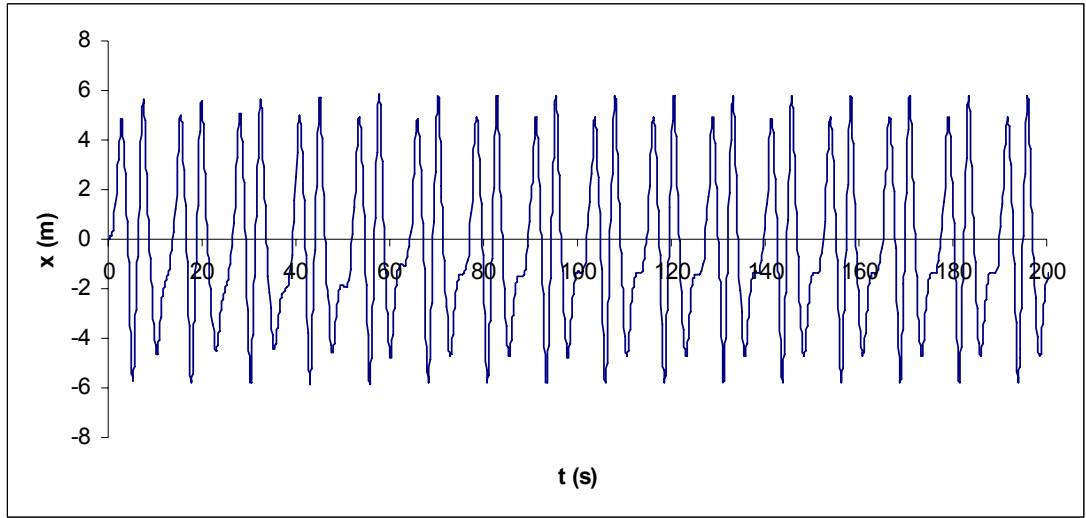
Şekil B.10 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.62$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin faz diyagramı



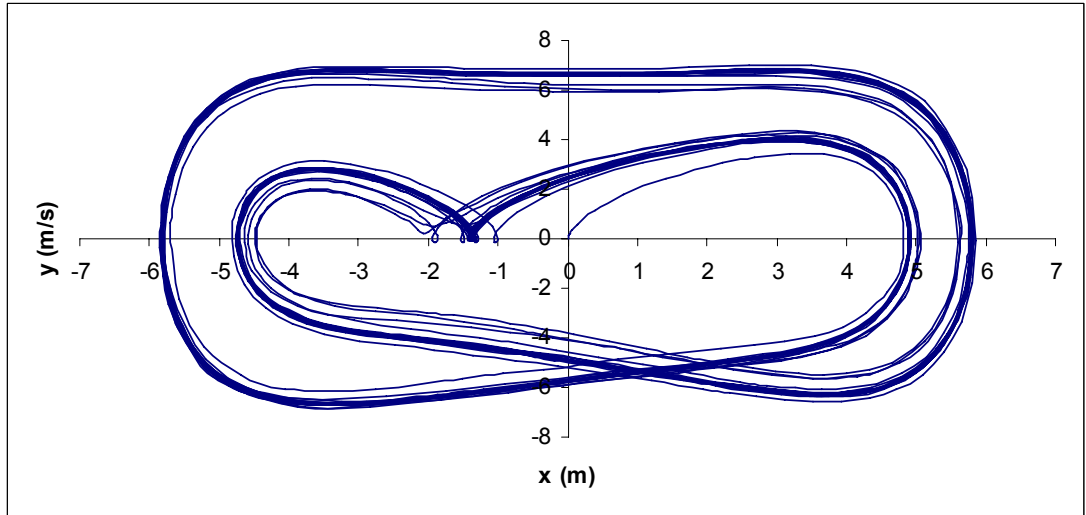
Şekil B.11 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.84$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 15$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği



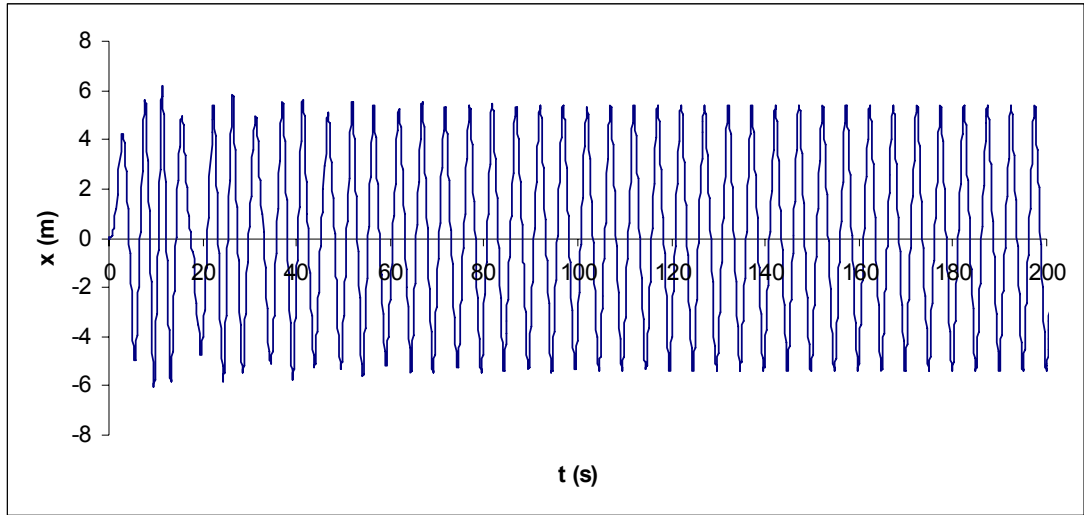
Şekil B.12 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.84$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 15$ iken verilen tepkinin faz diyagramı



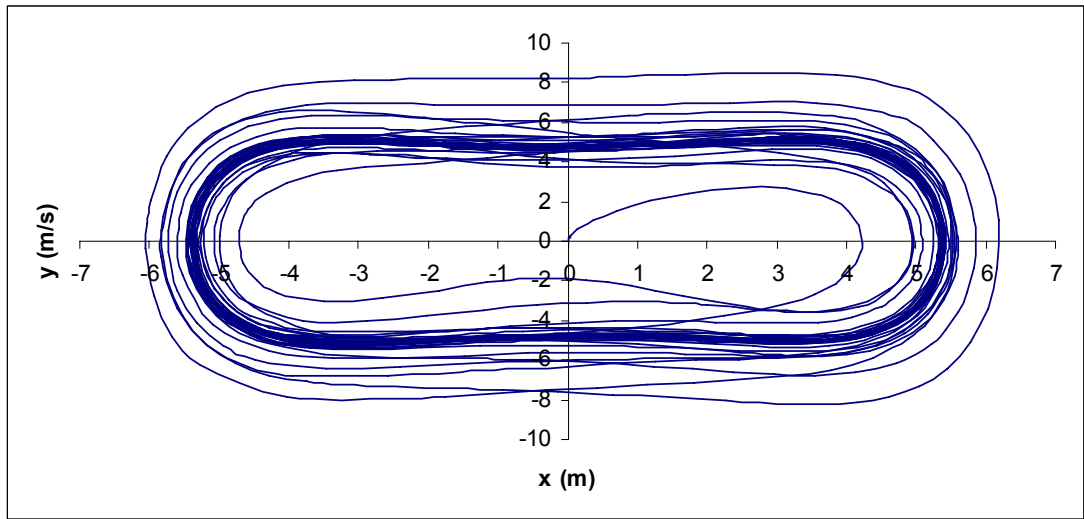
Şekil B.13 : Zorlayıcı frekans $\omega = 1.0$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2.5$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği



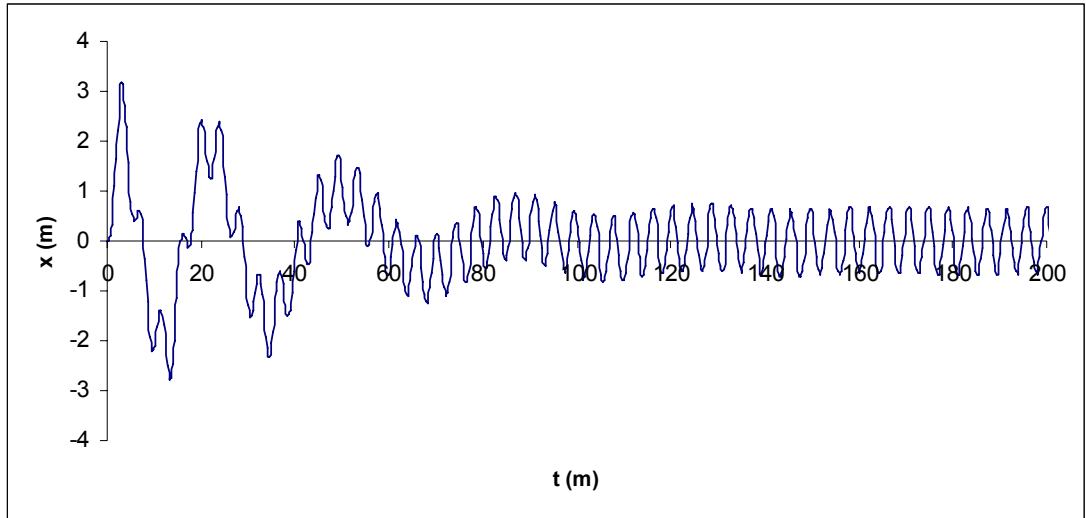
Şekil B.14 : Zorlayıcı frekans $\omega = 1.0$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2.5$ iken verilen tepkinin faz diyagramı



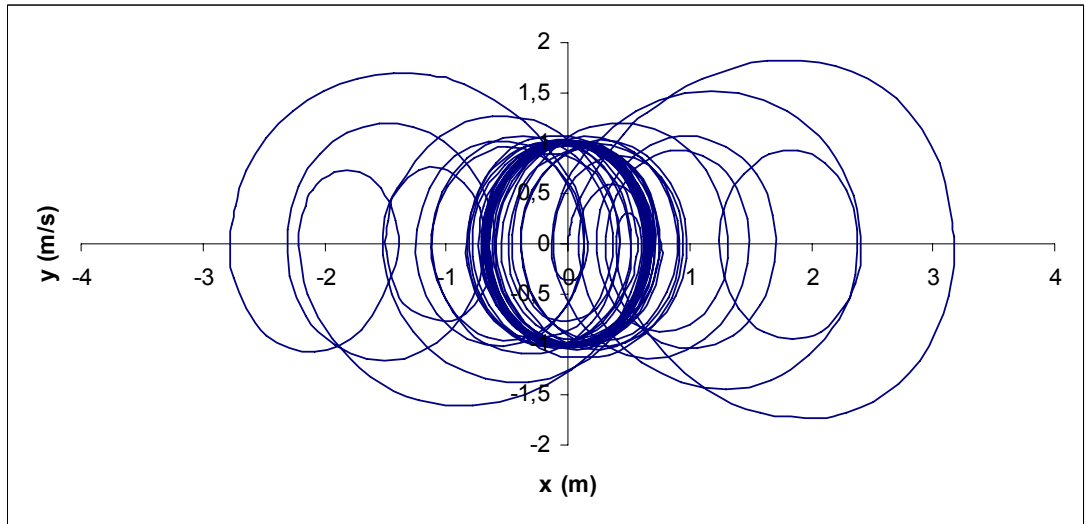
Şekil B.15 : Zorlayıcı frekans $\omega = 1.25$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği



Şekil B.16 : Zorlayıcı frekans $\omega = 1.25$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin faz diyagramı



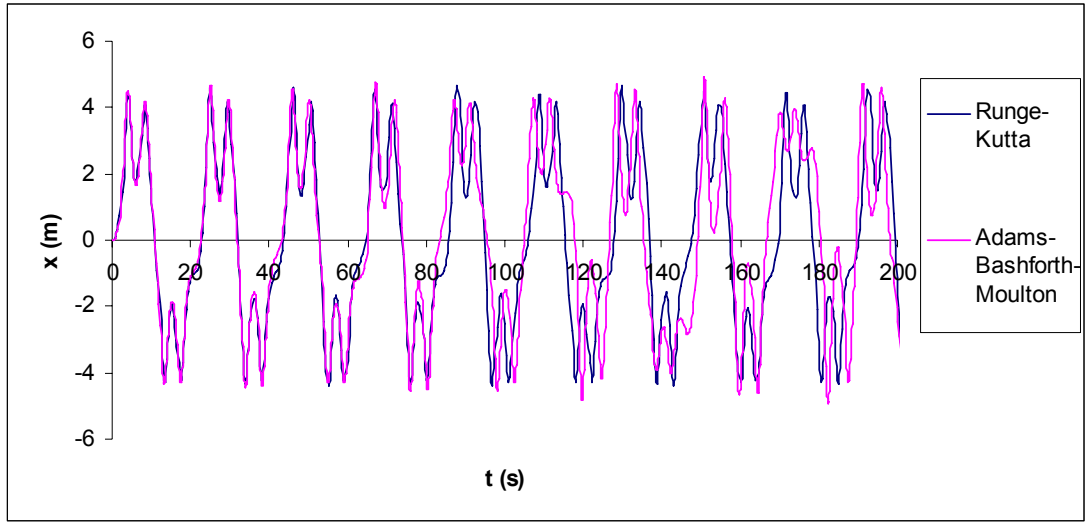
Şekil B.17 : Zorlayıcı frekans $\omega = 1.5$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.5$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği



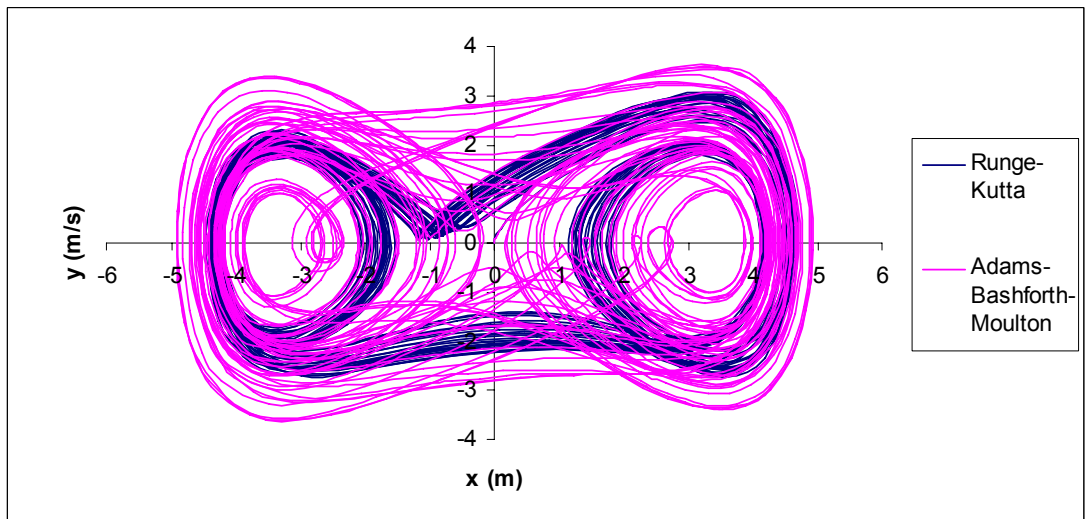
Şekil B.18 : Zorlayıcı frekans $\omega = 1.5$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.5$ iken verilen tepkinin faz diyagramı

EK C

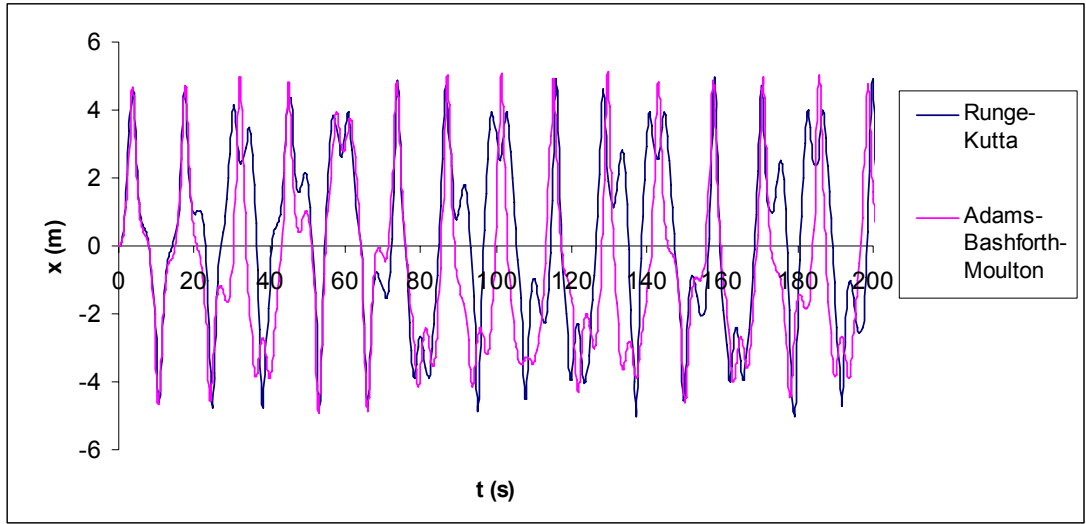
Runge-Kutta Yöntemi ile Adams-Bashforth-Moulton Yöntemlerinin karşılaştırılması



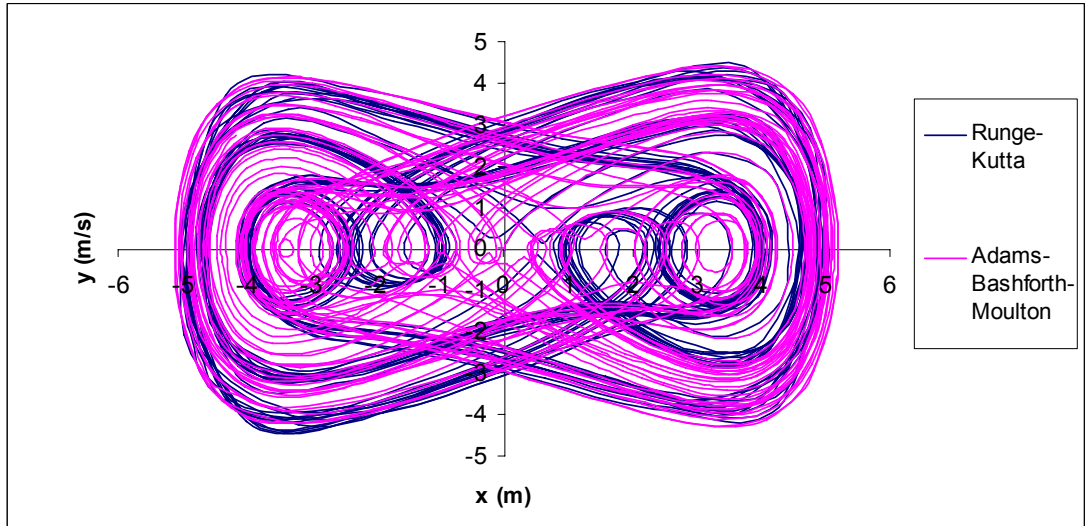
Şekil C.1 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.30$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği



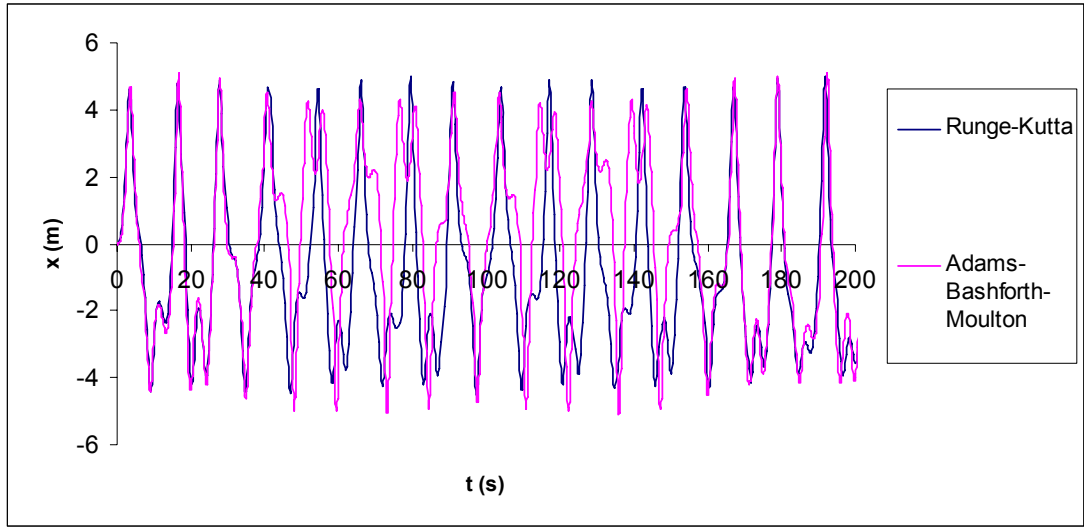
Şekil C.2 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.30$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin faz diyagramı



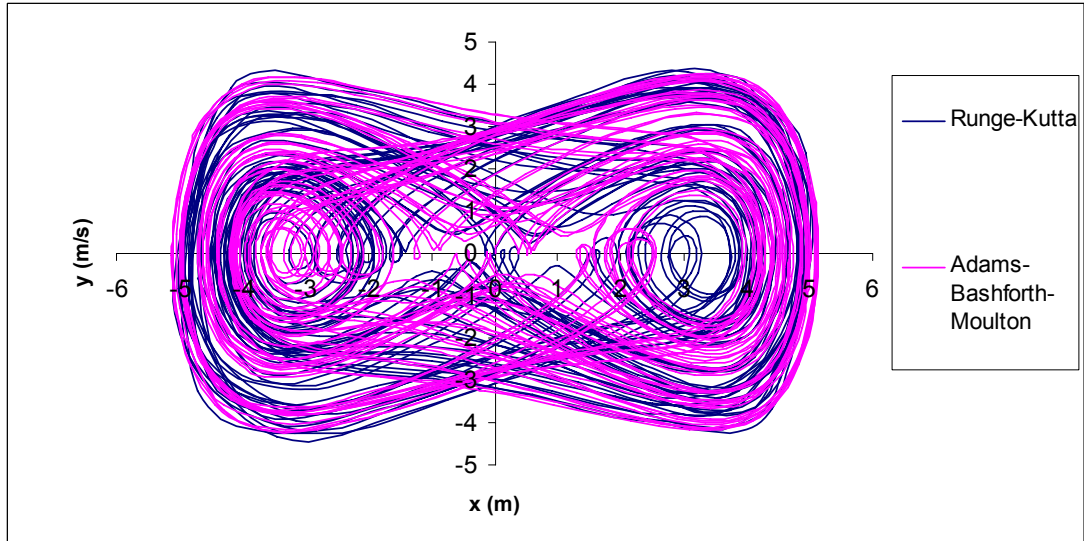
Şekil C.3 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.45$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği



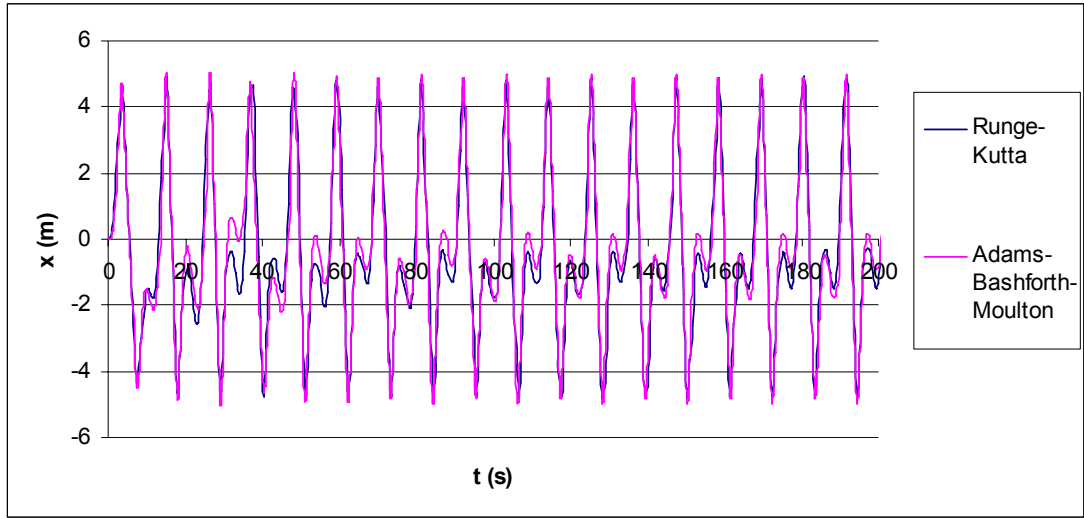
Şekil C.4 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.45$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin faz diyagramı



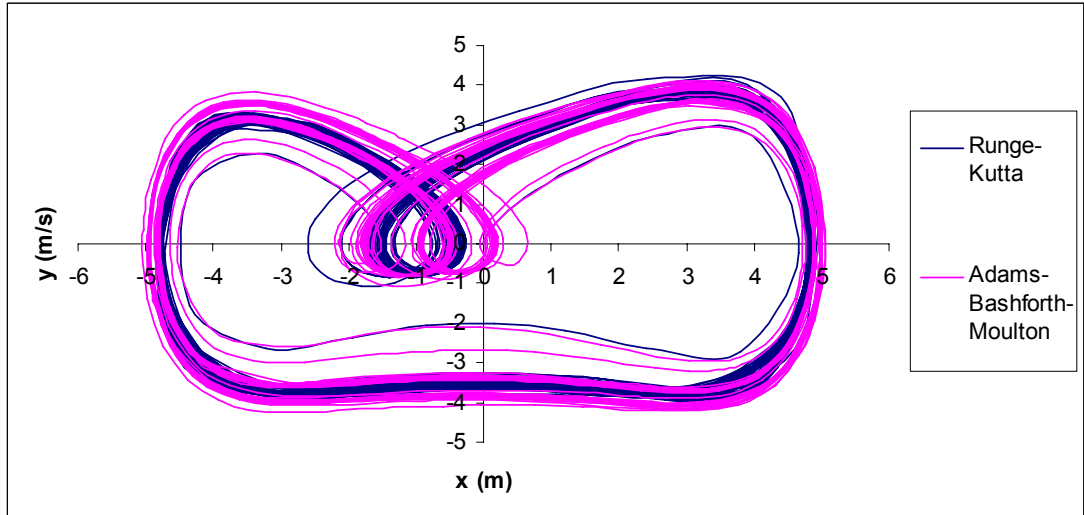
Şekil C.5 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.50$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği



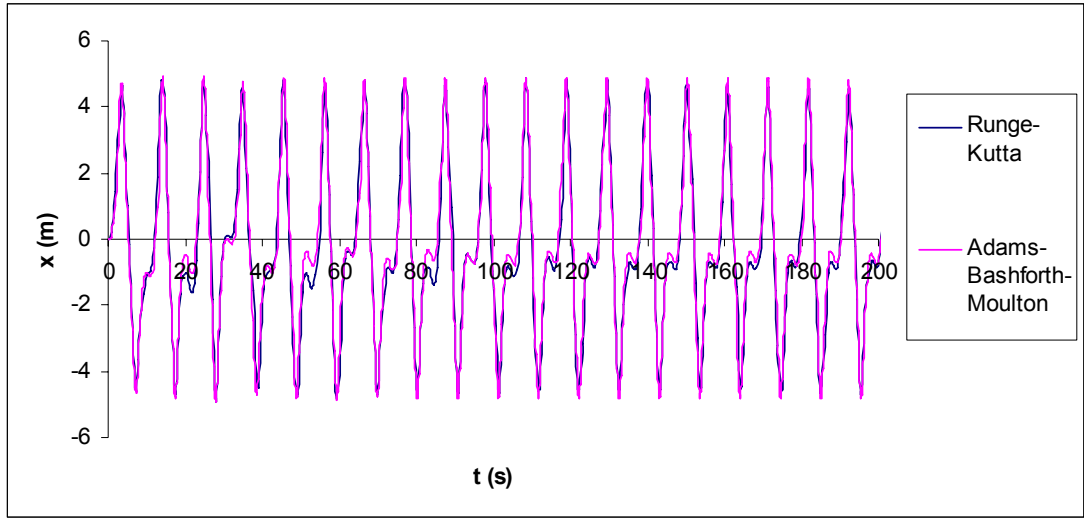
Şekil C.6 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.50$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin faz diyagramı



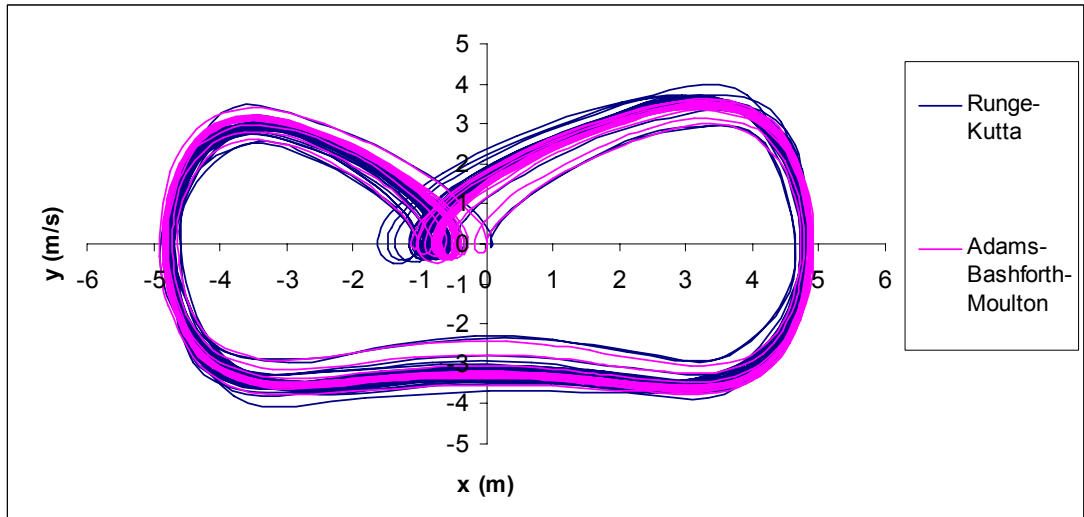
Şekil C.7 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.57$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği



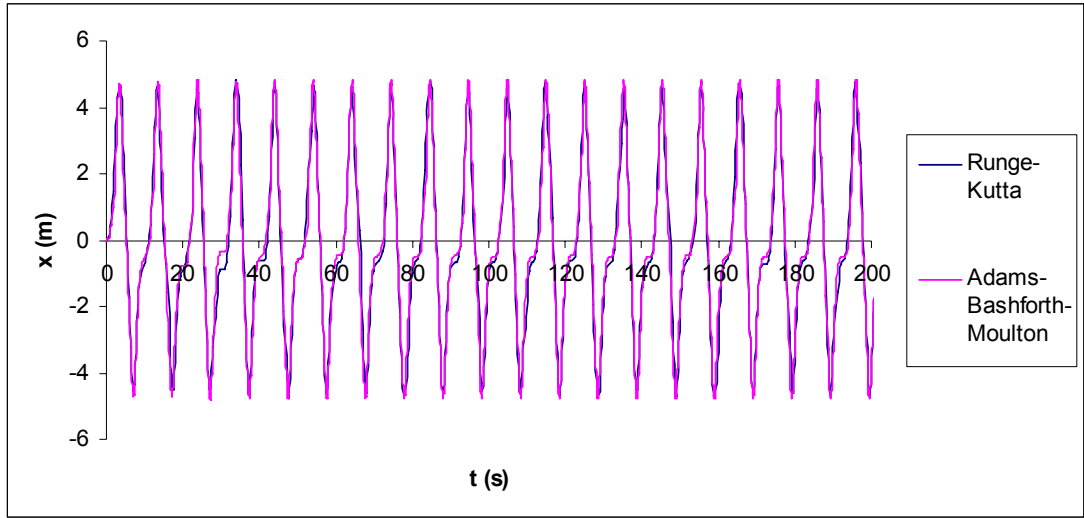
Şekil C.8 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.57$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin faz diyagramı



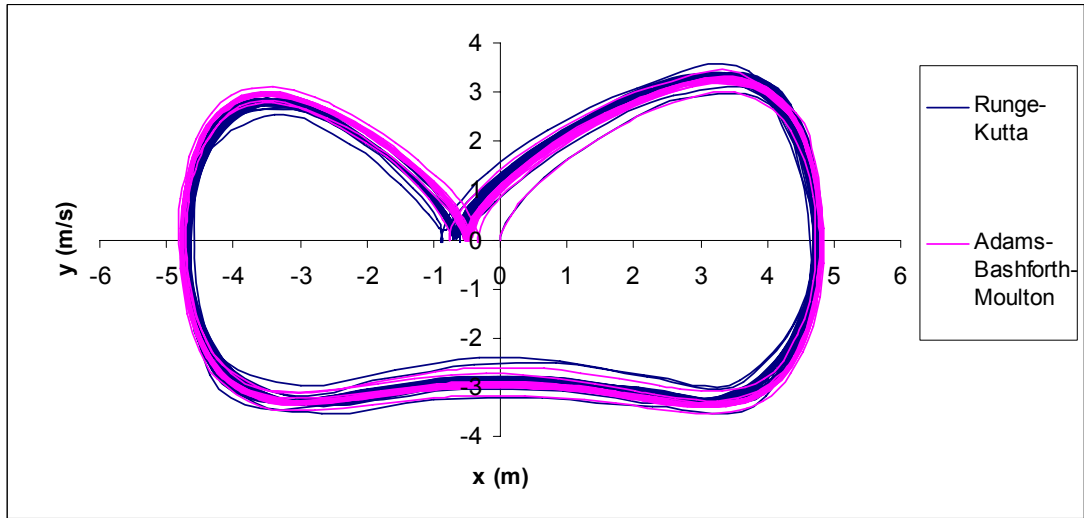
Şekil C.9 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.60$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği



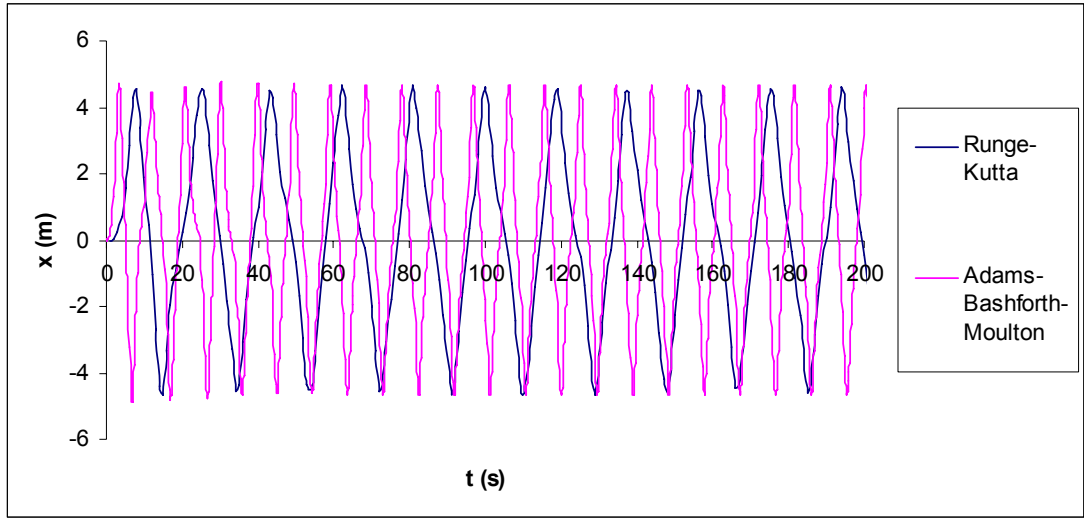
Şekil C.10 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.60$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin faz diyagramı



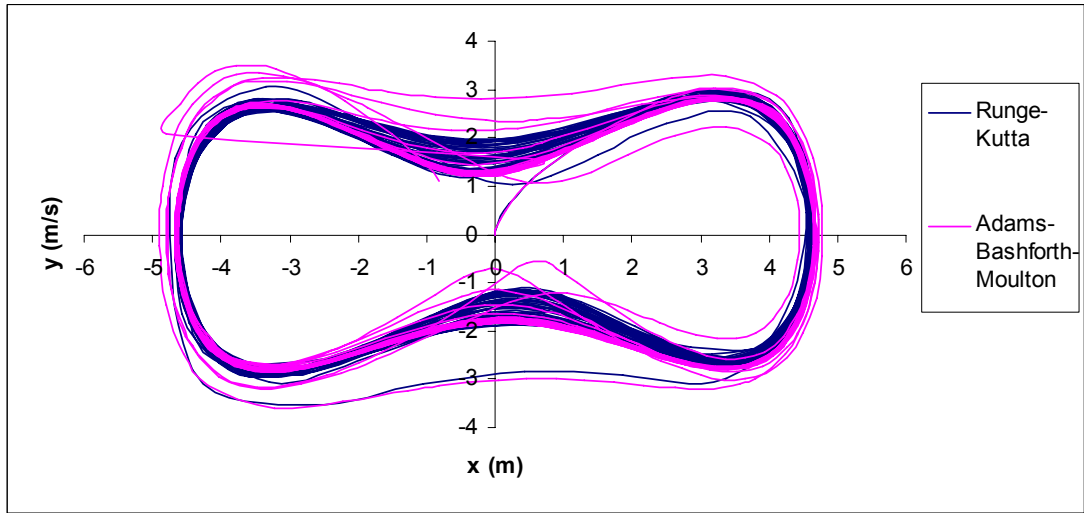
Şekil C.11 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.62$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği



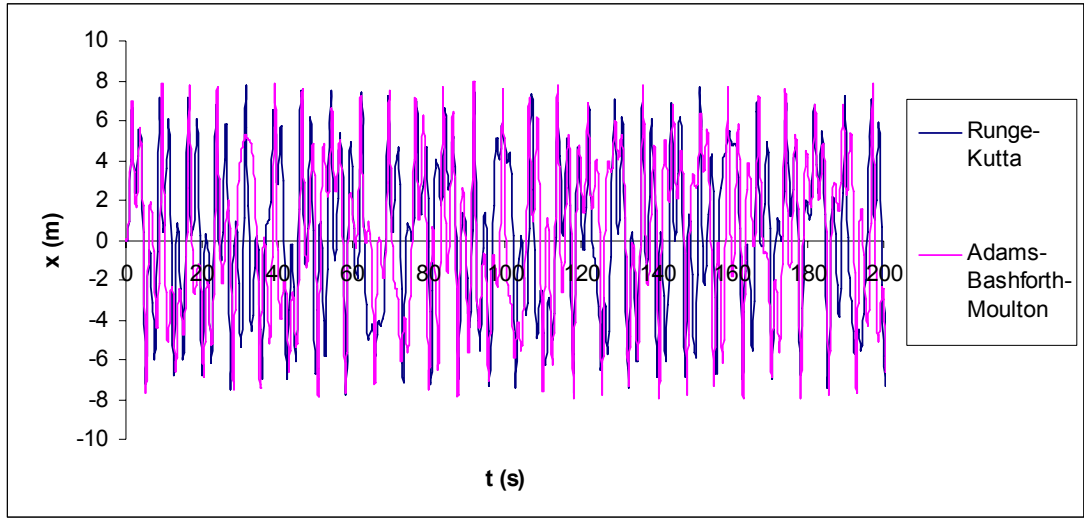
Şekil C.12 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.62$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin faz diyagramı



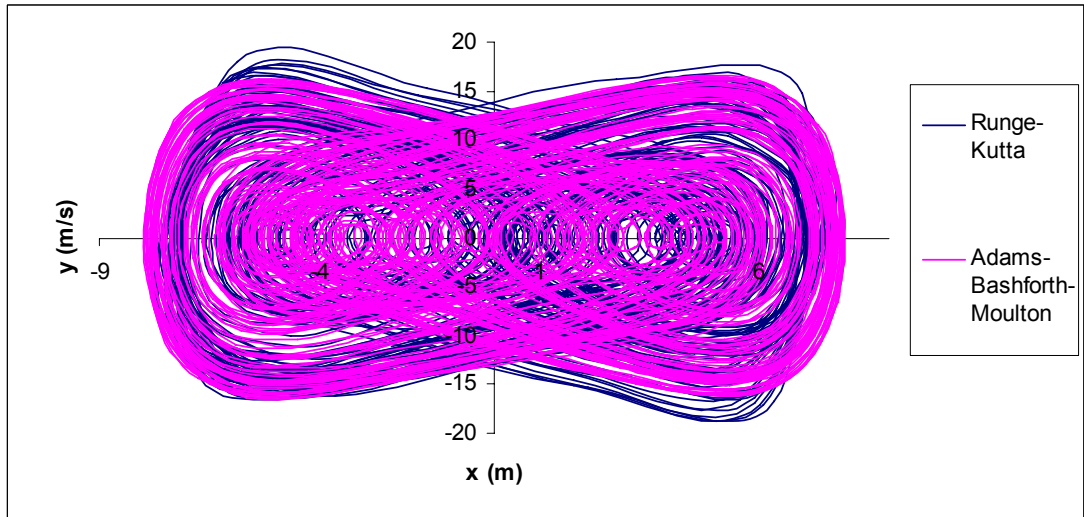
Şekil C.13 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.667$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği



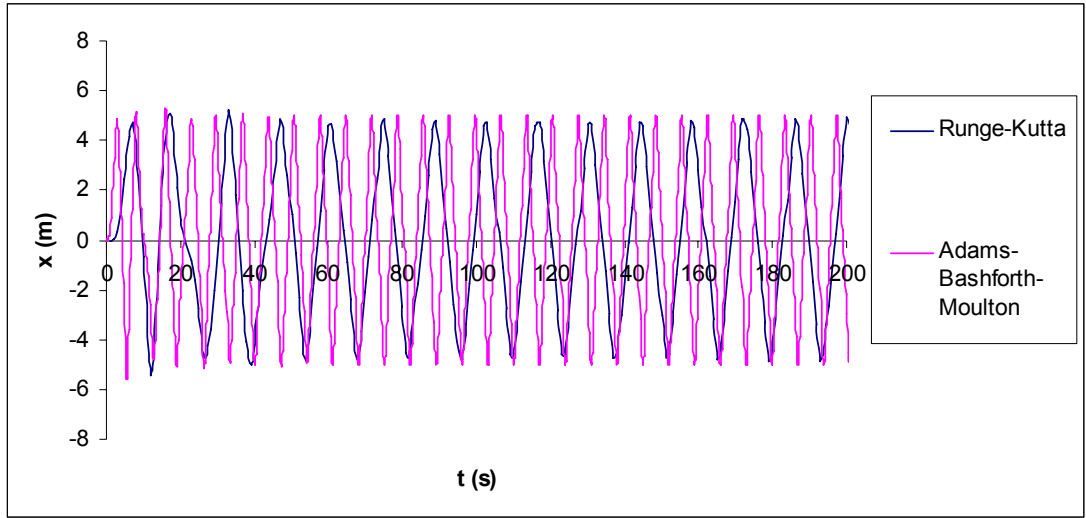
Şekil C.14 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.667$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin faz diyagramı



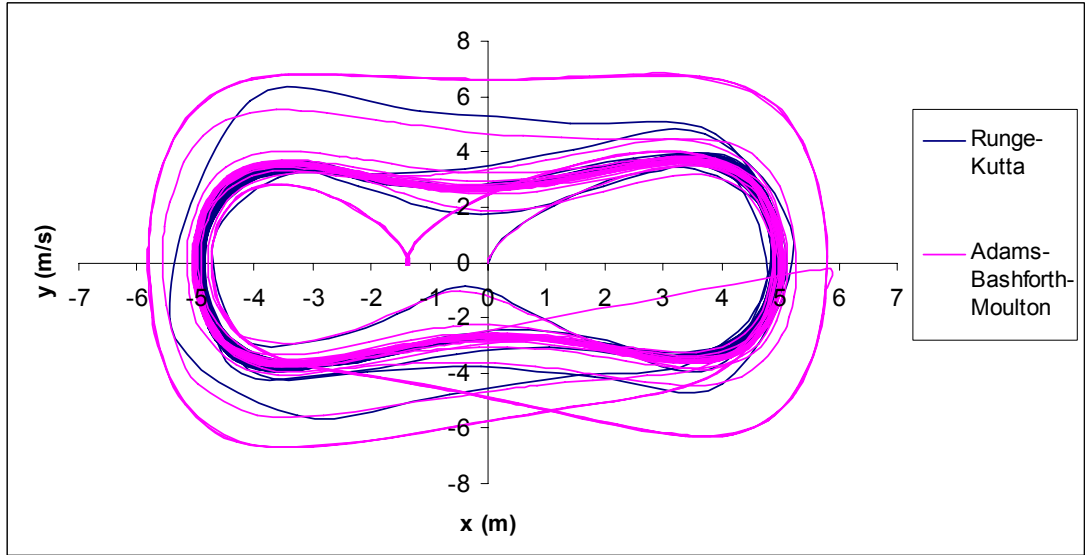
Şekil C.15 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.84$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 15$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği



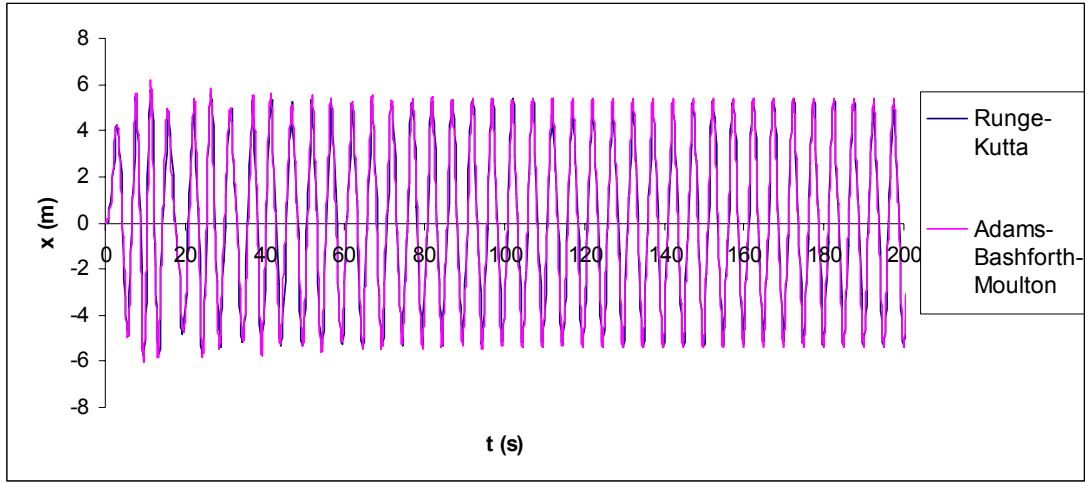
Şekil C.16 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.84$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 15$ iken verilen tepkinin faz diyagramı



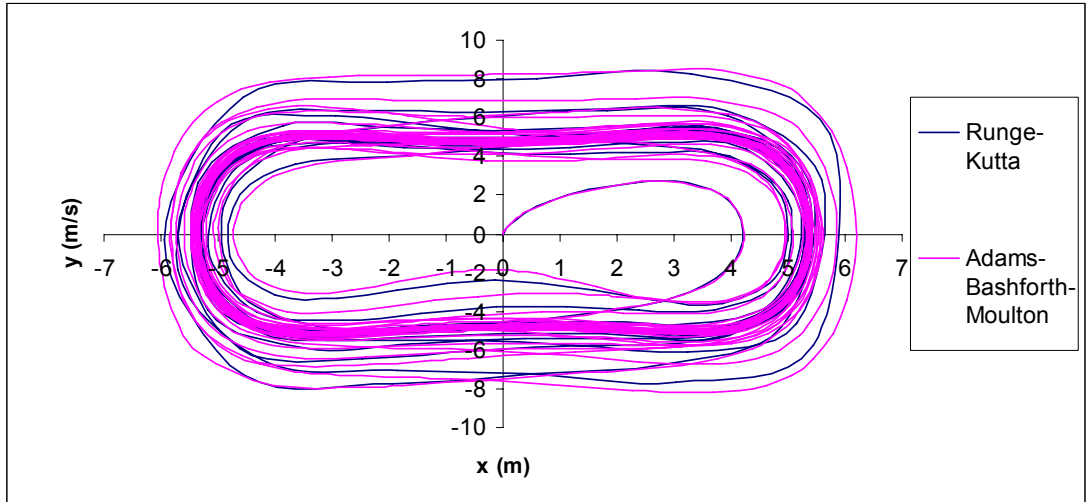
Şekil C.17 : Zorlayıcı frekans $\omega = 1.0$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2.5$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği



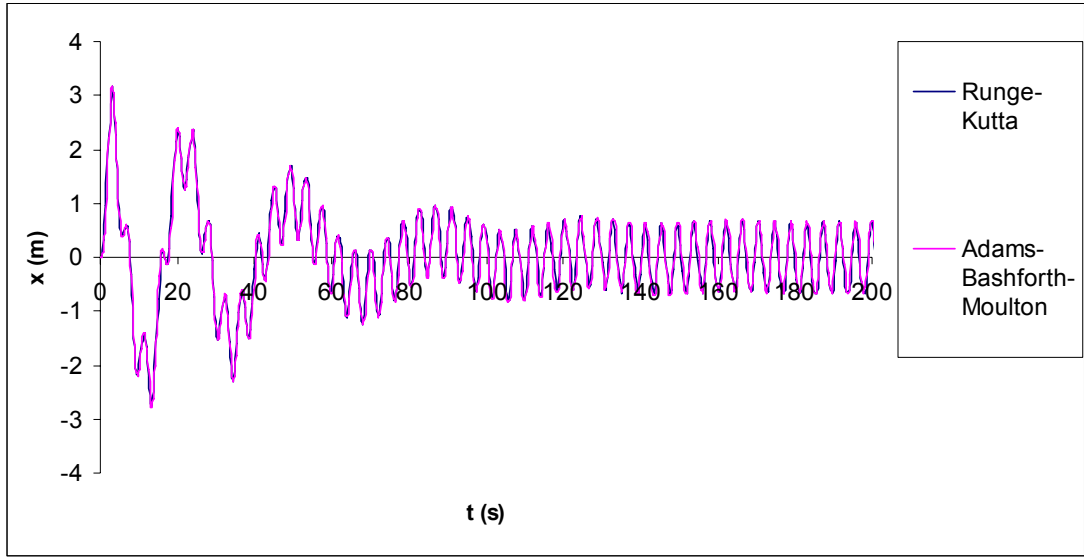
Şekil C.18 : Zorlayıcı frekans $\omega = 1.0$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2.5$ iken verilen tepkinin faz diyagramı



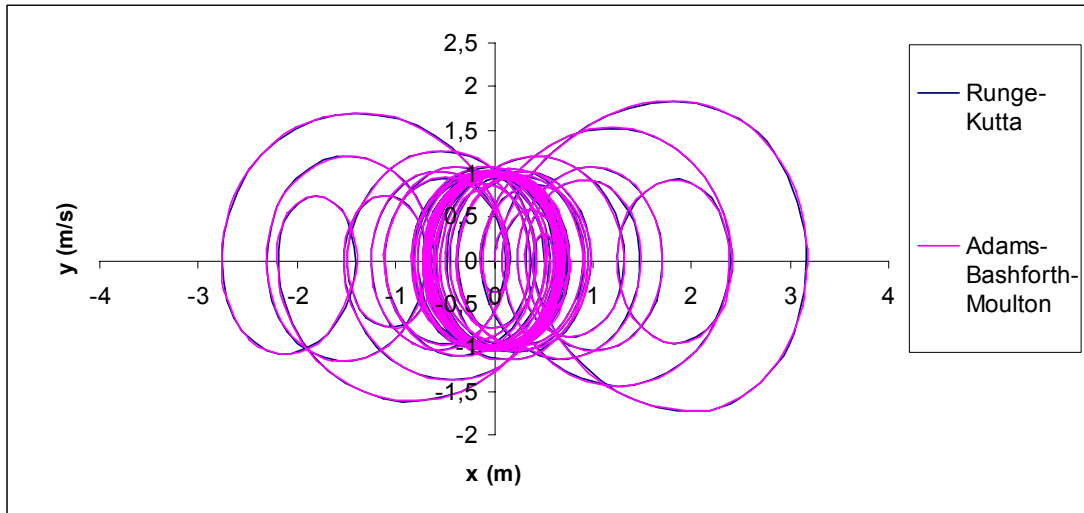
Şekil C.19 : Zorlayıcı frekans $\omega = 1.25$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği



Şekil C.20 : Zorlayıcı frekans $\omega = 1.25$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.93$ iken verilen tepkinin faz diyagramı



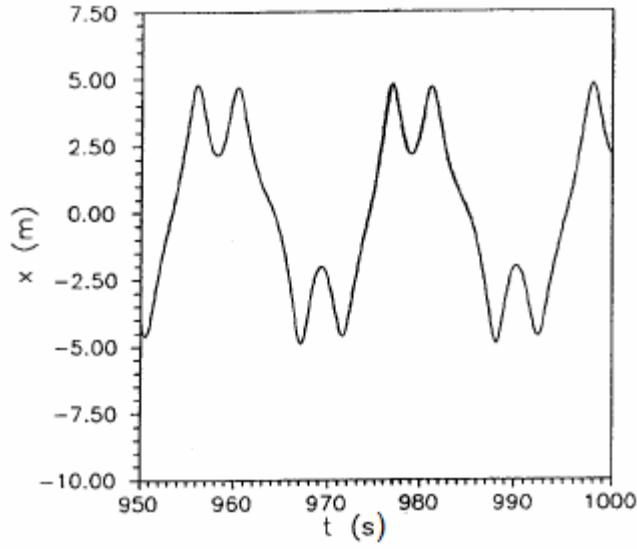
Şekil C.21 : Zorlayıcı frekans $\omega = 1.5$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.5$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği



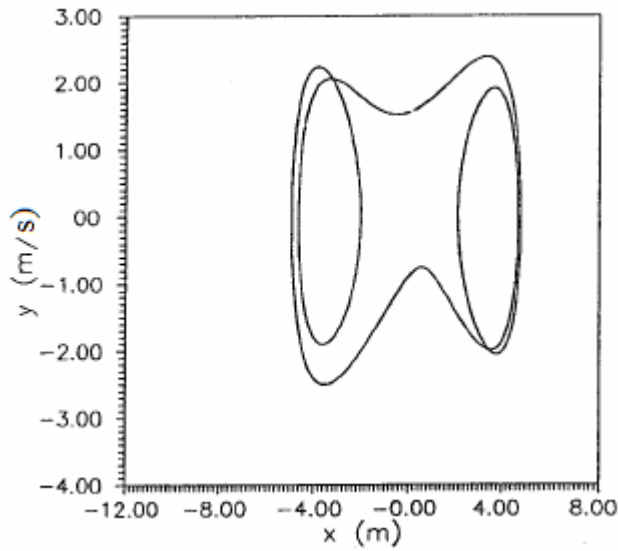
Şekil C.22 : Zorlayıcı frekans $\omega = 1.5$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.5$ iken verilen tepkinin faz diyagramı

EK D

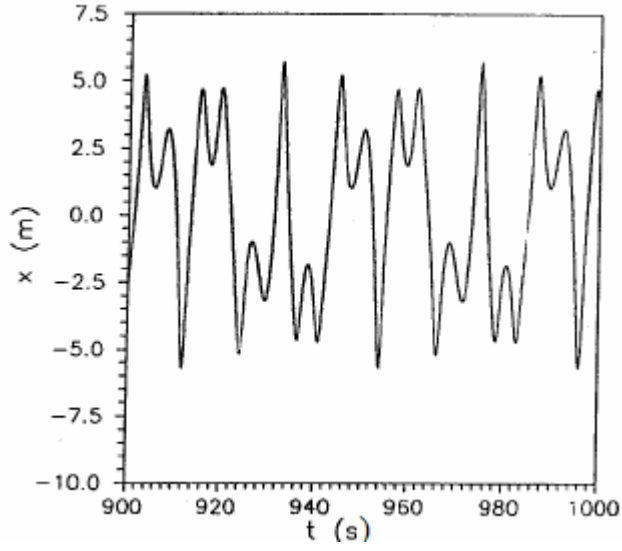
Harmonik Balans Yöntemi ile elde edilmiş sonuçlardan örnekler



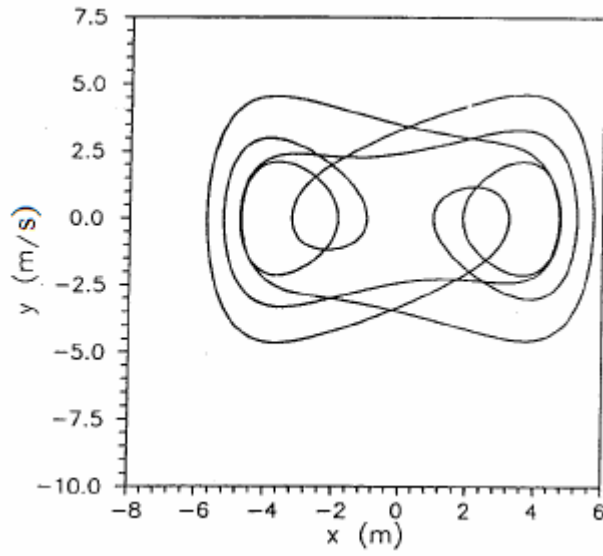
Şekil D.1 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.30$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği



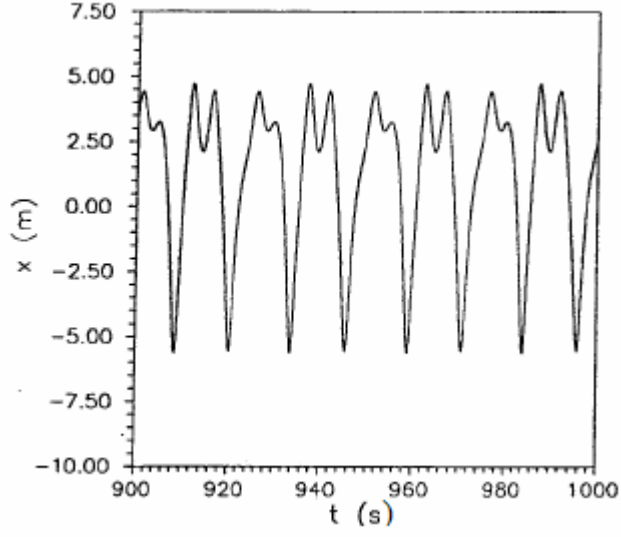
Şekil D.2 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.30$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı



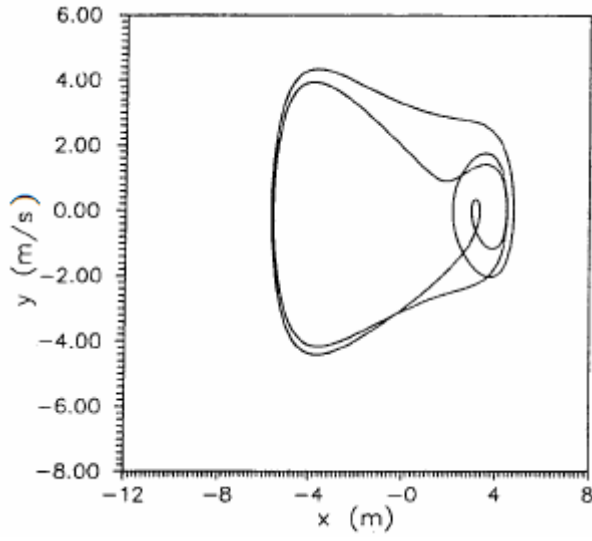
Şekil D.3 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.45$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği



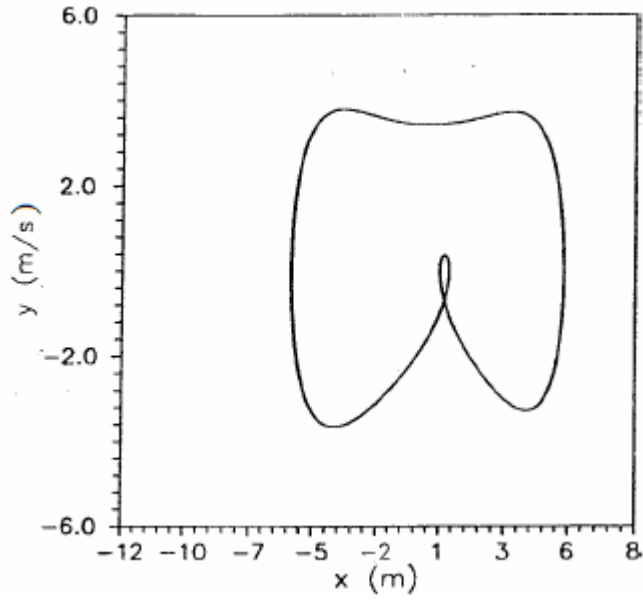
Şekil D.4 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.45$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı



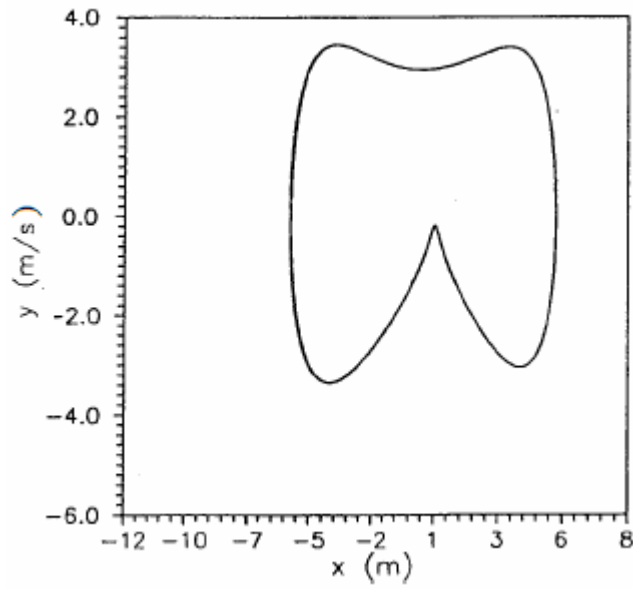
Şekil D.5 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.50$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği



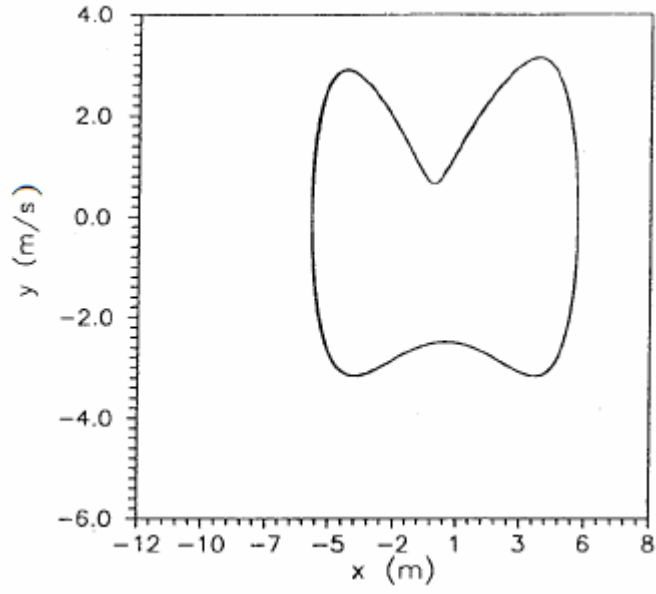
Şekil D.6 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.50$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı



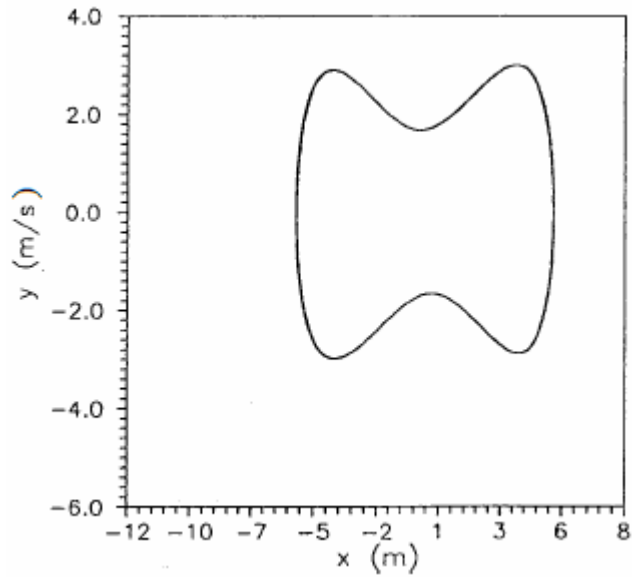
Şekil D.7 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.57$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı



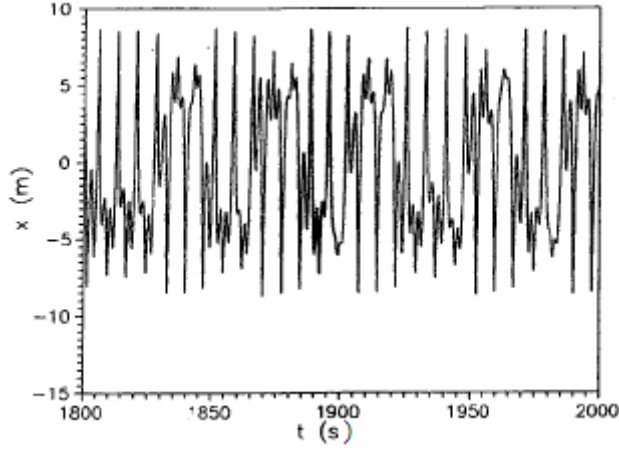
Şekil D.8 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.60$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı



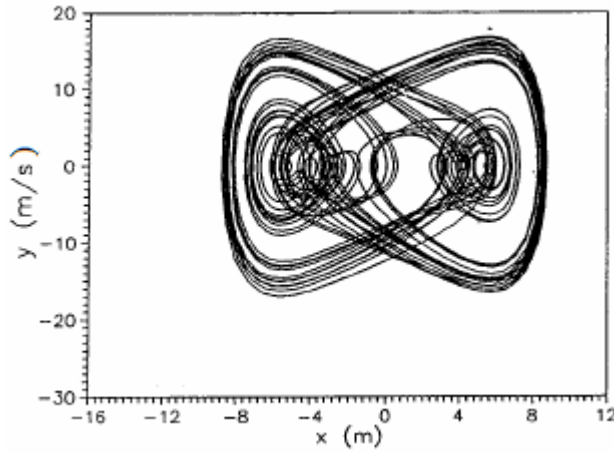
Şekil D.9 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.62$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı



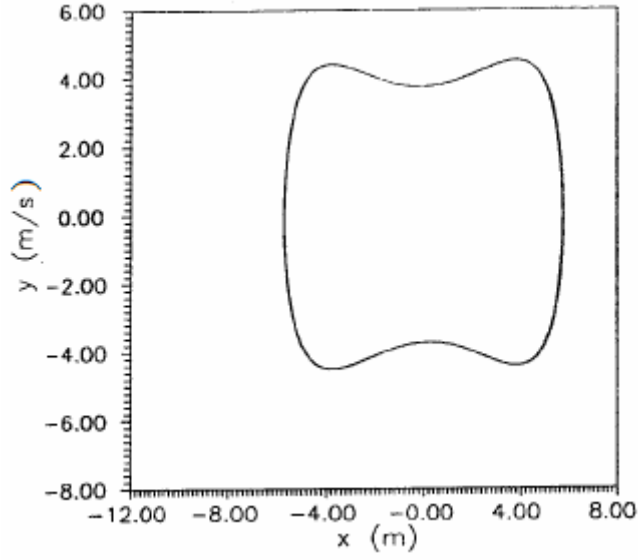
Şekil D.10 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.65$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı



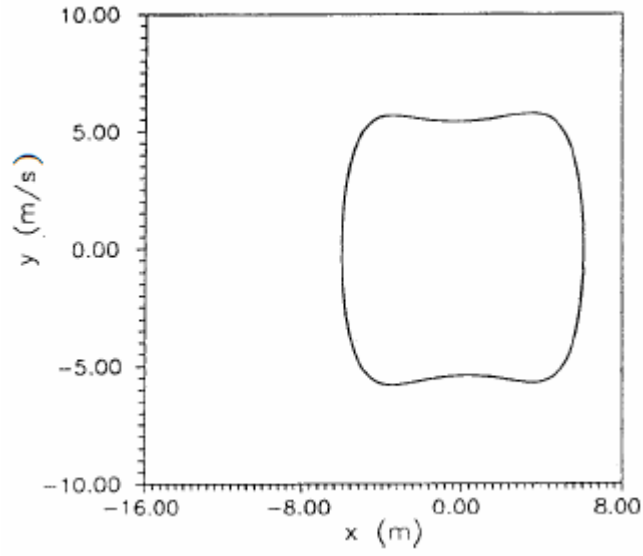
Şekil D.11 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.8377$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 15.96$ iken verilen tepkinin zamana bağlı grafiği



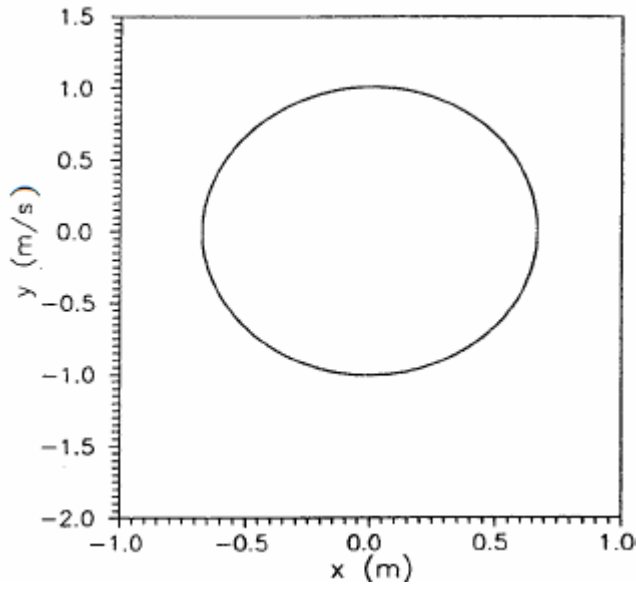
Şekil D.12 : Zorlayıcı frekans $\omega = 0.8377$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 15.96$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı



Şekil D.13 : Zorlayıcı frekans $\omega = 1.0$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2.5$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı



Şekil D.14 : Zorlayıcı frekans $\omega = 1.25$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 2$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı



Şekil D.15 : Zorlayıcı frekans $\omega = 1.5$ rad/s ve dalga kuvveti katsayısı $f_1 = 1.5$ iken verilen tepkinin zamana faz diyagramı

ÖZGEÇMİŞ

Deniz Bayraktar 8 Eylül 1983 yılında İstanbul'da dünyaya geldi. Orta ve lise öğrenimini tam burslu olarak F.M.V Özel Ayazağa Işık Lisesi'nde tamamladı. 2001 yılında girdiği İstanbul Teknik Üniversitesi Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, Deniz Teknolojisi Mühendisliği bölümünden 2005 yılında mezun oldu. Aynı yıl, Deniz Teknolojisi Mühendisliği Anabilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak göreve başlamış olup halen aynı fakültede görevine devam etmektedir.