



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**BİR TAŞITIN SÜRÜCÜSÜ İLE MODELLENMESİ VE  
SİMÜLASYONU**

**Mak. Müh. Aziz SEZGİN  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman  
Prof.Dr. Nurkan YAĞIZ**

**Ağustos, 2009**

**İSTANBUL**



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**BİR TAŞITIN SÜRÜCÜSÜ İLE MODELLENMESİ VE  
SİMÜLASYONU**

**Mak. Müh. Aziz SEZGİN  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman  
Prof.Dr. Nurkan YAĞIZ**

**Ağustos, 2009**

**İSTANBUL**

Bu çalışma 14 / 09 / 2009 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Makina Mühendisliği programında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Prof. Dr. Nurkan YAGIZ

İstanbul Üniversitesi

Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Salim ÖZÇELEBİ

İstanbul Üniversitesi

Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Ahmet SERTBAŞ

İstanbul Üniversitesi

Mühendislik Fakültesi

Doç Dr. Erol UZAL

İstanbul Üniversitesi

Mühendislik Fakültesi

Doç. Dr. Recep BURKAN

İstanbul Üniversitesi

Mühendislik Fakültesi

## **ÖNSÖZ**

Lisans ve yüksek lisans öğrenimim boyunca tez çalışmalarım sırasında her türlü destek ve yardımlarımdan dolayı çok değerli hocam Prof. Dr. Nurkan YAĞIZ'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Bu çalışma sonucunda jürideki bana zaman ayıran değerli hocalarım; Prof. Dr. Salim ÖZÇELEBİ, Prof. Dr. Ahmet SERTBAŞ, Doç. Dr. Erol UZAL, Doç. Dr. Recep BURKAN'a ve Arş. Gör. Yener TAŞKIN'a, Arş. Gör. Yüksel HACIOĞLU'na çalışmalarım boyunca yardımlarını esirgemeyen diğer tüm Makina Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine ve araştırma görevlilerine teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Bu tezi hazırlarken desteklerinden dolayı her zaman yanımda hissettiğim ağabeylerim Cihan SEZGİN ve Recep SEZGİN'e, ablam Canan KARAKUŞ'a, annem Gülfinaz SEZGİN, babam Arif SEZGİN'e, kimi konulardaki ilgisinden dolayı Araş. Gör. Alaattin Sayın'a, Araş. Gör. Birkan Durak'a, Araş. Gör. Hasan Ömür Özer'e teşekkür ederim.

**Eylül, 2009**

**AZİZ SEZGİN**

# İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ .....	İ
İÇİNDEKİLER.....	İİ
ŞEKİL LİSTESİ.....	İV
TABLO LİSTESİ.....	XII
SEMBOL LİSTESİ.....	XIII
ÖZET .....	XIV
SUMMARY .....	XV
1. GİRİŞ .....	1
2. GENEL KISIMLAR.....	3
2.1. TAŞITLARDA TİTREŞİM.....	7
2.1.1. DOĞRUSAL HAREKETLER .....	7
2.1.2. DÖNEM HAREKETLERİ.....	8
2.2. TAŞITLARDAKİ TİTREŞİMLERİN İNSANLARA ETKİLERİ.....	8
2.3. TÜM VÜCUT TİTREŞİMLERİ.....	9
3. MALZEME VE YÖNTEM .....	12
3.1. LAGRANGE DENKLEMLERİ.....	12
3.1.1. LAGRANGE DENKLEMLERİ.....	13
3.1.2. ÖRNEKLER.....	17
3.2. MATLAB HAKKINDA .....	19
3.2.1. ANA ÖZELLİKLERİ.....	19
3.2.2. SAYISAL HESAPLAMALAR YAPMAK .....	19
3.2.3. MATLAB SIMULINK.....	20
3.2.4. MATLAB SIMULINK KULLANIMI.....	20
3.2.5. ÖRNEK .....	22
3.3. İNSAN MODELLERİ.....	24
3.4. İNSAN VE TAŞIT MODELLERİNİN BİRLEŞTİRİLMESİ.....	26

3.5. YOL PÜRÜZLÜLÜĞÜ.....	30
<b>4. BULGULAR.....</b>	<b>31</b>
4.1. ÇEYREK TAŞIT İLE SÜRÜCÜ.....	31
4.2. YARIM TAŞIT İLE SÜRÜCÜ.....	46
4.3. TAM TAŞIT İLE SÜRÜCÜ.....	65
<b>5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....</b>	<b>90</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>97</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>100</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>105</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Pasif Süspansiyonlu Çeyrek Taşıt modeli .....	4
Şekil 2.2 Aktif ve pasif süspansiyon uygulamalarındaki ivmelenme .....	7
Şekil 2.3 Düşey doğrultuda titreşimlerin sürece göre insana olan etkisi (ISO 2631) .....	10
Şekil 2.4 Düşey doğrultularda titreşimlerin sürece göre .....	11
insana olan etkisi (BS 6481).....	11
Şekil 2.5 Yatay doğrultularda titreşimlerin sürece göre .....	11
insana olan etkisi (ISO 2631).....	11
Şekil 3.1 Joseph-Louis Lagrange .....	12
Şekil 3.2 Sarkaç.....	18
Şekil 3.3 Çeyrek Taşıt.....	22
Şekil 3.4 Örnek için hazırlanmış Matlab Blok diyagramı .....	23
Şekil 3.5 $x_1 - t$ Grafiği.....	24
Şekil 3.6 $x_2 - t$ Grafiği.....	24
Şekil 3.9 $x_1$ için frekans cevabı.....	24
Şekil 3.10 İki serbestlik dereceli insan modeli (Muksian ve Nash – 1976) [Liang].....	25
Şekil 3.11 Dört serbestlik dereceli insan modeli (Boileau ve Rakheja – 1998) [Liang].	25
Şekil 3.12 Dört serbestlik dereceli insan modeli (Lui et al. – 1998) [Liang].....	25
Şekil 3.13 Altı serbestlik dereceli insan modeli (Muksian ve Nash – 1974) [Liang] .....	25
Şekil 3.14 Onbir serbestlik dereceli insan modeli (Qassem et. Al. – 1994) [Liang] .....	26
Şekil 3.15 Simülasyon için seçilmiş ondört serbestlik dereceli insan ve çeyrek taşıt modeli.....	27
Şekil 3.16 Simülasyon için seçilmiş onaltı serbestlik dereceli insan ve yarım taşıt modeli.....	28
Şekil 3.17 Simülasyon için seçilmiş ondokuz serbestlik dereceli insan ve tam taşıt modeli.....	29
Şekil 4.1 Sistem girişi .....	37

Şekil 4.2 Kalça için konum zaman grafiği .....	37
Şekil 4.3 Karın için konum zaman grafiği .....	37
Şekil 4.4 Diyafram için konum zaman grafiği .....	38
Şekil 4.5 Göğüs Kafesi için konum zaman grafiği .....	38
Şekil 4.6 Gövde için konum zaman grafiği.....	38
Şekil 4.7 Kol için konum zaman grafiği .....	38
Şekil 4.8 Ön kol için konum zaman grafiği .....	38
Şekil 4.9 Omurga bel bölgesi için konum zaman grafiği.....	38
Şekil 4.10 Omurga üst bölge için konum zaman grafiği.....	39
Şekil 4.11 Boyun için konum zaman grafiği.....	39
Şekil 4.12 Kafa için konum zaman grafiği .....	39
Şekil 4.13 Tekerlek için konum zaman grafiği .....	39
Şekil 4.14 Taşıt ana gövdesi için konum zaman grafiği .....	39
Şekil 4.15 Koltuk için konum zaman grafiği .....	39
Şekil 4.16 Kalça için frekans cevabı.....	40
Şekil 4.17 Karın için frekans cevabı.....	40
Şekil 4.18 Diyafram için frekans cevabı.....	40
Şekil 4.19 Göğüs Kafesi için frekans cevabı .....	40
Şekil 4.20 İnsan Gövdesi için frekans cevabı .....	40
Şekil 4.21 Kol için frekans cevabı .....	40
Şekil 4.22 Ön kol için frekans cevabı .....	41
Şekil 4.23 Omurga bel bölgesi için frekans cevabı.....	41
Şekil 4.24 Omurga üst bölge için frekans cevabı.....	41
Şekil 4.25 Boyun için frekans cevabı.....	41
Şekil 4.26 Kafa için frekans cevabı .....	41
Şekil 4.27 Tekerlek için frekans cevabı.....	41
Şekil 4.28 Taşıt Ana kütle için frekans cevabı.....	42
Şekil 4.29 Koltuk için frekans cevabı.....	42
Şekil 4.30 Kalça ivmesi RMS- frekans grafiği .....	42
Şekil 4.31 Kalça ivmesi RMS- frekans grafiğinin yakından gösterimi .....	42
Şekil 4.32 Karın ivmesi RMS- frekans grafiği .....	42
Şekil 4.33 Karın ivmesi RMS- frekans grafiğinin yakından gösterimi.....	42
Şekil 4.34 Diyafram ivmesi RMS-frekans grafiği .....	43



Şekil 4.35	Diyafram ivmesi RMS- frekans grafiğinin yakından gösterimi .....	43
Şekil 4.36	Göğüs Kafesi ivmesi RMS- frekans grafiği.....	43
Şekil 4.37	Göğüs Kafesi ivmesi RMS- frekans grafiğinin yakından gösterimi.....	43
Şekil 4.38	Gövde ivmesi RMS- frekans grafiği .....	43
Şekil 4.39	Gövde ivmesi RMS- frekans grafiğinin yakından gösterimi .....	43
Şekil 4.40	Kol ivmesi RMS- frekans grafiği.....	44
Şekil 4.41	Kol ivmesi RMS- frekans grafiğinin yakından gösterimi.....	44
Şekil 4.42	Ön Kol ivmesi RMS- frekans grafiği.....	44
Şekil 4.43	Ön Kol ivmesi RMS- frekans grafiğinin yakından gösterimi.....	44
Şekil 4.44	Omurga bel bölgesi ivmesi RMS- frekans grafiği.....	44
Şekil 4.45	Omurga bel bölgesi ivmesi RMS- frekans grafiğinin yakından gösterimi ....	44
Şekil 4.46	Omurga üst bölgesi ivmesi RMS- frekans grafiği .....	45
Şekil 4.47	Omurga üst bölgesi ivmesi RMS- frekans grafiğinin yakından gösterimi ....	45
Şekil 4.48	Boyun ivmesi RMS- frekans grafiği .....	45
Şekil 4.49	Boyun ivmesi RMS- frekans grafiğinin yakından gösterimi .....	45
Şekil 4.50	Kafa ivmesi RMS- frekans grafiği.....	45
Şekil 4.51	Kafa ivmesi RMS- frekans grafiğinin yakından gösterimi .....	45
Şekil 4.52	Yarım taşıt ve insan için Sistem girişi .....	52
Şekil 4.53	Ön tekerlek için zaman cevabı.....	54
Şekil 4.54	Arka tekerlek için zaman cevabı.....	54
Şekil 4.55	Ana gövde için zaman cevabı .....	54
Şekil 4.56	Koltuk için zaman cevabı .....	54
Şekil 4.57	İnsan kalçası için zaman cevabı.....	54
Şekil 4.58	Alt omurga için zaman cevabı .....	54
Şekil 4.59	Üst Omurga için zaman cevabı.....	55
Şekil 4.60	Boyun için zaman cevabı.....	55
Şekil 4.61	Kafa için zaman cevabı.....	55
Şekil 4.62	Karın için zaman cevabı .....	55
Şekil 4.63	Diyafram için zaman cevabı .....	55
Şekil 4.64	Göğüs kafesi için zaman cevabı.....	55
Şekil 4.65	Gövde için zaman cevabı.....	56
Şekil 4.66	Kol için zaman cevabı.....	56
Şekil 4.68	Açısal değişim için zaman cevabı.....	56

Şekil 4.69 Ön tekerlek için frekans cevabı .....	56
Şekil 4.70 Ön tekerlek için frekans cevabı yakından gösterimi.....	56
Şekil 4.71 Arka tekerlek için frekans cevabı .....	57
Şekil 4.72 Arka tekerlek için frekans cevabı yakından gösterimi.....	57
Şekil 4.73 Taşıt Ana Kütlesi için frekans cevabı.....	57
Şekil 4.74 Taşıt Ana Kütlesi için frekans cevabı yakından gösterimi .....	57
Şekil 4.75 Koltuk için frekans cevabı.....	57
Şekil 4.76 Koltuk için frekans cevabı yakından gösterimi .....	57
Şekil 4.77 Kalça için frekans cevabı.....	58
Şekil 4.78 Kalça için frekans cevabı yakından gösterimi .....	58
Şekil 4.79 Alt Omurga için frekans cevabı.....	58
Şekil 4.80 Kalça için frekans cevabı yakından gösterimi .....	58
Şekil 4.81 Üst Omurga için frekans cevabı.....	58
Şekil 4.82 Üst Omurga için frekans cevabı yakından gösterimi.....	58
Şekil 4.83 Boyun için frekans cevabı.....	59
Şekil 4.84 Boyun için frekans cevabı yakından gösterimi.....	59
Şekil 4.85 Kafa için frekans cevabı .....	59
Şekil 4.86 Kafa için frekans cevabı yakından gösterimi.....	59
Şekil 4.87 Karın için frekans cevabı.....	59
Şekil 4.88 Karın için frekans cevabı yakından gösterimi .....	59
Şekil 4.89 Diyafram için frekans cevabı.....	60
Şekil 4.90 Diyafram için frekans cevabı yakından gösterimi .....	60
Şekil 4.91 Göğüs kafesi için frekans cevabı .....	60
Şekil 4.92 Göğüs kafesi için frekans cevabı yakından gösterimi .....	60
Şekil 4.93 Gövde için frekans cevabı.....	60
Şekil 4.94 Gövde için frekans cevabı yakından gösterimi.....	60
Şekil 4.95 Kol için frekans cevabı .....	61
Şekil 4.96 Kol için frekans cevabı yakından gösterimi .....	61
Şekil 4.97 Ön Kol için frekans cevabı .....	61
Şekil 4.98 Ön kol için frekans cevabı yakından gösterimi .....	61
Şekil 4.99 Teta için frekans cevabı.....	61
Şekil 4.100 Teta için frekans cevabı yakından gösterimi .....	61
Şekil 4.101 Kalça ivmesi RMS-frekans grafiği .....	62

Şekil 4.102 Kalça ivmesi RMS- frekans grafiğinin yakından gösterimi .....	62
Şekil 4.103 Omurga Bel Bölgesi ivmesi RMS- frekans grafiği.....	62
Şekil 4.104 Omurga bel bölgesi ivmesi RMS- frekans grafiğinin yakından gösterimi ..	62
Şekil 4.105 Omurga Üst Bölgesi ivmesi RMS- frekans grafiği.....	62
Şekil 4.106 Omurga üst bölgesi ivmesi RMS- frekans grafiğinin yakından gösterimi ..	62
Şekil 4.107 Boyun ivmesi RMS- frekans grafiği.....	63
Şekil 4.108 Boyun ivmesi RMS- frekans grafiğinin yakından gösterimi .....	63
Şekil 4.109 Kafa ivmesi RMS- frekans grafiği.....	63
Şekil 4.110 Kafa ivmesi RMS- frekans grafiğinin yakından gösterimi .....	63
Şekil 4.111 Karın ivmesi RMS- frekans grafiği .....	63
Şekil 4.112 Karın ivmesi RMS- frekans grafiğinin yakından gösterimi.....	63
Şekil 4.113 Diyafram ivmesi RMS- frekans grafiği .....	64
Şekil 4.114 Diyafram ivmesi RMS- frekans grafiğinin yakından gösterimi .....	64
Şekil 4.115 Göğüs Kafesi ivmesi RMS- frekans grafiği.....	64
Şekil 4.116 Göğüs Kafesi ivmesi RMS- frekans grafiğinin yakından gösterimi.....	64
Şekil 4.117 Gövde ivmesi RMS- frekans grafiği .....	64
Şekil 4.118 Gövde ivmesi RMS- frekans grafiğinin yakından gösterimi .....	64
Şekil 4.119 Kol ivmesi RMS- frekans grafiği.....	65
Şekil 4.120 Kol ivmesi RMS- frekans grafiğinin yakından gösterimi.....	65
Şekil 4.121 Ön Kol ivmesi RMS- frekans grafiği.....	65
Şekil 4.122 Ön Kol ivmesi RMS- frekans grafiğinin yakından gösterimi.....	65
Şekil 4.123 Tam Taşıt için yardımcı fiziksel model .....	66
Şekil 4.124 Tam taşıt ve insan modeli için sistem girişi.....	76
Şekil 4.125 Sağ Ön tekerlek için zaman cevabı.....	76
Şekil 4.126 Sol Ön tekerlek için zaman cevabı .....	76
Şekil 4.127 Sağ arka tekerlek için zaman cevabı.....	77
Şekil 4.128 Sol arka tekerlek için zaman cevabı .....	77
Şekil 4.129 Ana gövde için zaman cevabı.....	77
Şekil 4.130 Koltuk için zaman cevabı .....	77
Şekil 4.131 Kalça için zaman cevabı .....	77
Şekil 4.132 Alt omurga için zaman cevabı .....	77
Şekil 4.133 Üst Omurga için zaman cevabı.....	78
Şekil 4.134 Boyun için zaman cevabı.....	78

Şekil 4.135 Kafa için zaman cevabı.....	78
Şekil 4.136 Karın için zaman cevabı .....	78
Şekil 4.137 Diyafram için zaman cevabı .....	78
Şekil 4.138 Göğüs Kafesi için zaman cevabı.....	78
Şekil 4.139 İnsan gövdesi için zaman cevabı .....	79
Şekil 4.140 Kol için zaman cevabı.....	79
Şekil 4.141 Ön Kol için zaman cevabı.....	79
Şekil 4.142 Alfa için zaman cevabı .....	79
Şekil 4.143 Teta için zaman cevabı .....	79
Şekil 4.144 Sağ Ön tekerlek için frekans cevabı .....	80
Şekil 4.145 Sağ Ön tekerlek için frekans cevabı yakından gösterim.....	80
Şekil 4.146 Sol Ön tekerlek için frekans cevabı.....	80
Şekil 4.147 Sol Ön tekerlek için frekans cevabı yakından gösterim .....	80
Şekil 4.148 Sağ arka tekerlek için frekans cevabı .....	80
Şekil 4.149 Sağ arka tekerlek için frekans cevabı yakından gösterim.....	80
Şekil 4.150 Sol Arka tekerlek için frekans cevabı.....	81
Şekil 4.151 Sol arka tekerlek için frekans cevabı yakından gösterim .....	81
Şekil 4.152 Taşıt Ana gövdesi için frekans cevabı.....	81
Şekil 4.153 Taşıt ana gövdesi için frekans cevabı yakından gösterim.....	81
Şekil 4.154 Koltuk için frekans cevabı.....	81
Şekil 4.155 Koltuk için frekans cevabı yakından gösterim .....	81
Şekil 4.156 İnsan kalçası için frekans cevabı .....	82
Şekil 4.157 İnsan Kalçası için frekans cevabı yakından gösterim .....	82
Şekil 4.158 Alt Omurga için frekans cevabı.....	82
Şekil 4.159 Alt Omurga için frekans cevabı yakından gösterim .....	82
Şekil 4.160 Üst Omurga için frekans cevabı.....	82
Şekil 4.161 Üst Omurga için frekans cevabı yakından gösterim .....	82
Şekil 4.162 Boyun için frekans cevabı.....	83
Şekil 4.163 Boyun için frekans cevabı yakından gösterim.....	83
Şekil 4.164 Kafa için frekans cevabı .....	83
Şekil 4.165 Kafa için frekans cevabı yakından gösterim.....	83
Şekil 4.166 Karın için frekans cevabı.....	83
Şekil 4.167 Karın için frekans cevabı yakından gösterim .....	83

<b>Şekil 4.168</b> Diyafram için frekans cevabı.....	84
<b>Şekil 4.169</b> Diyafram için frekans cevabı yakından gösterim .....	84
<b>Şekil 4.170</b> Göğüs Kafesi için frekans cevabı .....	84
<b>Şekil 4.171</b> Göğüs Kafesi için frekans cevabı yakından gösterim.....	84
<b>Şekil 4.172</b> İnsan Gövdesi için frekans cevabı .....	84
<b>Şekil 4.173</b> İnsan Gövdesi için frekans cevabı yakından gösterim.....	84
<b>Şekil 4.174</b> Kol için frekans cevabı .....	85
<b>Şekil 4.175</b> Kol için frekans cevabı yakından gösterim.....	85
<b>Şekil 4.176</b> Ön kol için frekans cevabı .....	85
<b>Şekil 4.177</b> Ön kol için frekans cevabı yakından gösterim.....	85
<b>Şekil 4.178</b> Alfa için frekans cevabı.....	85
<b>Şekil 4.179</b> Alfa için frekans cevabı yakından gösterim .....	85
<b>Şekil 4.180</b> Teta için frekans cevabı.....	86
<b>Şekil 4.181</b> Teta için frekans cevabı yakından gösterim .....	86
<b>Şekil 4.182</b> Kalça ivmesi RMS-frekans grafiği .....	86
<b>Şekil 4.183</b> Kalça ivmesi RMS-frekans grafiğinin yakından gösterimi .....	86
<b>Şekil 4.184</b> Omurga bel bölgesi ivmesi RMS-frekans grafiği.....	86
<b>Şekil 4.185</b> Omurga Bel Bölgesi ivmesi RMS-frekans grafiğinin yakından gösterimi..	86
<b>Şekil 4.186</b> Omurga Üst Bölgesi ivmesi RMS-frekans grafiği.....	87
<b>Şekil 4.187</b> Omurga Üst Bölgesi ivmesi RMS-frekans grafiğinin yakından gösterimi..	87
<b>Şekil 4.188</b> Boyun ivmesi RMS-frekans grafiği .....	87
<b>Şekil 4.189</b> Boyun ivmesi RMS-frekans grafiğinin yakından gösterimi .....	87
<b>Şekil 4.190</b> Kafa ivmesi RMS-frekans grafiği.....	87
<b>Şekil 4.191</b> Kafa ivmesi RMS-frekans grafiğinin yakından gösterimi .....	87
<b>Şekil 4.192</b> Karın ivmesi RMS-frekans grafiği .....	88
<b>Şekil 4.193</b> Karın ivmesi RMS-frekans grafiğinin yakından gösterimi.....	88
<b>Şekil 4.194</b> Diyafram ivmesi RMS-frekans grafiği .....	88
<b>Şekil 4.195</b> Diyafram ivmesi RMS-frekans grafiğinin yakından gösterimi .....	88
<b>Şekil 4.196</b> Göğüs Kafesi ivmesi RMS-frekans grafiği.....	88
<b>Şekil 4.197</b> Göğüs Kafesi ivmesi RMS-frekans grafiğinin yakından gösterimi.....	88
<b>Şekil 4.198</b> Gövde ivmesi RMS-frekans grafiği .....	89
<b>Şekil 4.199</b> Gövde ivmesi RMS-frekans grafiğinin yakından gösterimi .....	89
<b>Şekil 4.200</b> Kol ivmesi RMS-frekans grafiği.....	89

<b>Şekil 4.201</b> Kol ivmesi RMS- frekans grafiğinin yakından gösterimi.....	89
<b>Şekil 4.202</b> Ön Kol ivmesi RMS- frekans grafiği.....	89
<b>Şekil 4.203</b> Ön Kol ivmesi RMS- frekans grafiğinin yakından gösterimi.....	89
<b>Şekil 5.1</b> Kalça ivmesinin ISO 2631 standardındaki ile kıyaslanmalı gösterimi.....	91
<b>Şekil 5.2</b> Alt Omurga ivmesinin ISO 2631 standardındaki ile kıyaslanmalı gösterimi ..	91
<b>Şekil 5.3</b> Üst Omurga ivmesinin ISO 2631 standardındaki ile kıyaslanmalı gösterimi .	92
<b>Şekil 5.4</b> Boynun ivmesinin ISO 2631 standardındaki ile kıyaslanmalı gösterimi .....	92
<b>Şekil 5.5</b> Kafa ivmesinin ISO 2631 standardındaki ile kıyaslanmalı gösterimi .....	93
<b>Şekil 5.6</b> Karnın ivmesinin ISO 2631 standardındaki ile kıyaslanmalı gösterimi .....	93
<b>Şekil 5.7</b> Diyafram ivmesinin ISO 2631 standardındaki ile kıyaslanmalı gösterimi.....	94
<b>Şekil 5.8</b> Göğüs Kafesi ivmesinin ISO 2631 standardındaki ile kıyaslanmalı gösterimi	94
<b>Şekil 5.9</b> İnsan gövdesi ivmesinin ISO 2631 standardındaki ile kıyaslanmalı gösterimi .....	95
<b>Şekil 5.10</b> İnsan kolunun ivmesinin ISO 2631 standardındaki ile kıyaslanmalı gösterimi .....	95
<b>Şekil 5.11</b> İnsan ön kolunun ivmesinin ISO 2631 standardındaki ile kıyaslanmalı gösterimi.....	96
<b>Şekil EK.1</b> Kararlılık analizi için kullanılan sistem girdisi.....	102
<b>Şekil EK.2</b> Çeyrek taşıt modeli için kararlılık analizi .....	103
<b>Şekil EK.3</b> Yarım taşıt modeli için kararlılık analizi .....	103
<b>Şekil EK.4</b> Tam taşıt modeli için kararlılık analizi .....	104

## TABLO LİSTESİ

<b>Tablo 2.1</b> Titreşimin ilgili frekans aralığında insana olan etkisi .....	8
<b>Tablo 3.1</b> Matlab Simulink’te kullanılan kimi komutlar .....	21
<b>Tablo 3.2</b> Matlab Simulink’te kimi blok diyagramları ve elde edilen sonuçlar .....	22
<b>Tablo 2.3</b> Örnek için matlab M- file dosyası.....	23
<b>Tablo 4.1</b> Matlab’te çeyrek taşıt ve insan modeli için hazırlanmış blok diyagramı .....	36
<b>Tablo 4.2</b> Matlab’te yarım taşıt ve insan modeli için hazırlanmış blok diyagram .....	53
<b>Tablo 4.3</b> Matlab’te tam taşıt ve insan modeli için hazırlanmış blok diyagramı .....	75
<b>Tablo 5.1</b> Düzgün bir yolda sabit bir hızla giden sürücünün <u>rahatsızlık</u> duyacağı yolculuk süreleri.....	90

## SEMBOL LİSTESİ

$a$	: İvme
$V$	: Hız
$x, z$	: Yerdeğiştirme (Deplasman)
$\varphi, \alpha, \theta$	: Açısal Yerdeğiştirme
$M, m$	: Kütle
$F$	: Kuvvet
$g$	: Yerçekimi ivmesi
$I$	: Atalet Momenti
$K, T$	: Kinetik Enerji
$V, P$	: Potansiyel Enerji (Potansiyel fonksiyonu)
$D$	: Dissipasyon Fonksiyonu (Sönüm fonksiyonu)
$L$	: Lagrange fonksiyonu
$k$	: Lineer yay sabiti
$b, c$	: Sönümleyici sabiti
$Q$	: Genelleştirilmiş kuvvet
$q_i$	: Genelleştirilmiş koordinatları
<b>RMS</b>	: Kareler Ortalamasının Karekökü
$t$	: Zaman
$\delta r$	: Virtüel Yerdeğiştirme
$\delta W$	: Virtüel iş
$\zeta$	: Sönüm Oranı
$\tau$	: Periyot
$\omega_n$	: Doğal frekans
$\omega$	: frekans
$m.a$	: momentum



## ÖZET

### BİR TAŞITIN SÜRÜCÜSÜ İLE MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU

“Bir Taşıttın Sürücüsü İle Modellenmesi ve Simülasyonu” isimli tez çalışmasında otomobillerin belirli bir hızla yol alırken, yol pürüzlülüğü nedeniyle yolcuya iletilen dokusal titreşimlerin yolcuya olan etkisi incelenmiştir. Bu amaçla; insana etkileyen titreşimlerin etkisini standartlaştıran ISO 2631 ve BS 6841 gibi standartlarla tezde bulunan sonuçlar karşılaştırılıp sürüş titreşimlerinin insana olan etkisi gösterilmiştir.

Titreşim bir aracın yapılandırılmasında en önemli sebeplerden birisidir. Bir tasarımda taşıt sürüş performansındaki ilerleyen büyük mühendislik değişiklikler ve yöntemleri yapıyı öznelmiştir. Sürüş titreşimleri olarak adlandırabileceğimiz bu olgu, yolcuya bu titreşimlerin yansımasıdır. Koltuk tarafından ya da yolcunun elleri ve ayaklarıyla yolcuya iletilen hissedilebilir titreşimler genellikle sürüş titreşimleri ile ilişkilendirilir. Bu sürüş titreşimleri bu tezde bir insan modelinin çeyrek taşıt, yarım taşıt ve tam taşıt modelleri ile birlikte modellenmesi aracılığıyla simüle edilerek incelenmiştir.

Çeyrek taşıt modeli aslında bir taşıttın tüm özelliklerini açıklamada bize yardımcı olamaz. Bu sebeple bu tezde akslar arasındaki uzunlamasına mesafeden dolayı taşıt, düşey doğrultudaki titreşim ve sıçrama hareketlerini de içine alan çok girişli bir sistem gibi düşünülmüştür ve çok sayıda hareketten önemli bir hareket olan kafa vurma hareketi de göz önüne alınabilmiştir. Aynı zamanda bu tezde incelenen taşıtta kafa vurma, sıçrama titreşimleri radyal, çekiş doğrultulu ve yanal kuvvetlerle birlikte sürücü ve koltuk da model içerisine dahil edilerek modelleme ve simülasyon yapılmıştır.

Bu simülasyon için yapılan modelde literatürde kullanılan taşıt modellerinden ve insan modellerinden biri seçilmiştir. Böylelikle yedi serbestlik dereceli bir tam taşıt modeline koltuk ve üzerindeki sürücü de eklenmiştir. Sonuç olarak elde edilen 17 serbestlik dereceli sistem modellenmiş ve simüle edilmiştir. Elde edilen veriler ilgili standartlar ile kıyaslanıp sürüş titreşimlerinin yolcuya olan etkisi gösterilmiştir.

## **SUMMARY**

### **THE MODELING AND SIMULATION OF A VEHICLE WITH DRIVER**

In the thesis study that is named 'The modeling and simulation of a vehicle with driver', the effects are investigated that when vehicles are riding on a certain velocity, vibrations would be quickly transmitted to the passenger due to roughness of the road. For this purpose, the effects of the vibrations to the passenger are shown with comparing of the results of the thesis and the standarts ISO 2631 ve BS 6841 that are the standards of the effects of the vibrations to the human impact.

Vibration is one of the most important reason of the configuration of a vehicle. On one design, the great progress in driving performance of vehicles and methods of engineering changes to the structure has subjective. This phenomenon that can be named as ride vibrations is the reflection of these vibrations to the passengers. Vibrations can be transmitted to the passenger feeling by seat or the hands and feet of the passengers are often associated with ride vibrations. In this thesis, this ride vibrations are examined by simulating of the human model with quarter, half and full-vehicle model.

Actually, the quarter vehicle model can not help us to explain all the features of the vehicles. Therefore, in this thesis, due to the distance between the longitudinal axis of the vehicle, tremor and movement in the direction vertical leap in the field has been considered as a system with many input and a significant movement of many movements, pitch motion, could be taken into the consideration. At the same time not only analyzed in this thesis pitch, the bounce and radial vibration radial, and lateral traction forces, also drivers and seat are included in the model, modeling and simulation were made.

For this simulation model used in the literature on models and human models of vehicles have been selected. In this way, driver and seat are included to full-vehicle model with seven degrees of freedom. As a result, the system model with 17 degrees of freedom is derived and simulated. The effects of the vibrations to the human impact are shown with comparing of the results of the thesis and the standarts.

## 1. GİRİŞ

Motorlu taşıtların hayatımızdaki yerinin büyüklüğü herkesçe bilinen bir gerçeklik iken insan sağlığına olan etkisi tam olarak bilinmemektedir. Taşıtların, kazalardan dolayı bizlere zarar vermesinin ötesinde, kazalar dışında da sağlığınıza bazı zararları olabilmektedir. Bu amaçla literatürde birçok bilim insanı bu gibi zararların neler olabileceğine dair çalışma yapmış ve bu çalışmalarını yayımlamıştır. Hatta bu konu üzerine standartlar dahi geliştirilmiştir. Bu tezde de yapılmak istenilen yine benzer şekilde taşıtlarda, insana aktarılan duyuşal titreşimlerin insan sağlığına olan etkisidir.

Bu tez de amacı doğrultusunda taşıt titreşimlerinin insan sağlığına olan etkilerini araştırmaktadır. Bu doğrultuda aşağıdaki sistematik sıra ile tez ortaya atılmaya çalışılmıştır.

Tezin ikinci kısmında literatürde konu ile ilgili emek harcamış bilim insanların bulduğu sonuçlar ortaya koyulmuştur. Buradan hareketle ilgili çalışmalar ışığında taşıtların titreşim özelliklerinden ve titreşimle mücadele yollarından bahsedilmiştir. Taşıttan insana aktarılan titreşimlerin insana hangi frekans aralığında rahatsızlık verdiği anlatılmaya çalışılmıştır. İnsan titreşimleri üzerinde durulmuş ve taşıt titreşimleri ile ilişkilendirilmeye çalışılmıştır. Benzer şekilde konuyla ilgili titreşim analizi yapmış bilim insanların sonuç olarak ortaya koyduğu farklı standartlar açıklanmıştır.

Yine aynı bölümde taşıt ve insanla ilgili elde edilen fiziksel modellerden matematiksel modellerin oluşturulması amaçlı tezin ileriki aşamalarında kullanılacak olan “Lagrange Denklemleri” nin nereden geldiğini ve nasıl ortaya çıktığı anlatılmaya çalışılmıştır ve konu ile ilgili benzer iki örneğin matematiksel modelleri “Lagrange Denklemleri” kullanılarak çıkarılmıştır. Daha sonra matematiksel olarak modellenmiş olan fiziksel taşıt ve insan modelinin simüle edilebilmesi için tezde kullanılacak olan MATLAB programının kimi özellikleri açıklanmış ve yine benzer şekilde örnek olması amaçlı bir

model simüle edilmiştir. Benzer şekilde aynı bölümde yol pürüzlülüğünün elde edilişi ve bu konu ile literatürdeki ilgili standartlar açıklanmaya çalışılmıştır.

Bu noktaya kadar kullanılacak olan yan programlar ya da denklem sistemleri açıklanmıştır. Böylelikle literatürde kullanılan insan vücudunun dinamik bir sistem gibi düşünülerek oluşturulup kullanılmış kimi fiziksel modeller gösterilmiştir. İstenilen insan taşıt modeli yani tez adında bahsedilen modellenecek olan “sürücüsü ile birlikte taşıt” fiziksel modeli seçilmiş olan insan modeli ile birleştirilerek ortaya konulmuştur.

Tezin üçüncü bölümünde bu bölüme kadar anlatılmış olan literatürdeki fiziksel modeller, Lagrange denklemleri ve MATLAB programı kullanılarak sırasıyla çeyrek taşıt ve insan modeli, yarım taşıt ve insan modeli ve tam taşıt ve insan modeli oluşturulup simüle edilmiştir. Yapılan bu simülasyon sonucunda elde edilen veriler, insanların bugüne değin elde ettikleri tecrübeler doğrultusunda oluşturulmuş olan standartlar ile kıyaslanmış ve taşıt titreşimlerinin insanlar üzerindeki olası etkileri tartışılmıştır.

Tezin son bölümünde ise, simülasyon sonucunda elde edilen veriler ilgili standart ile kıyaslanılıp sonuçları tartışılmıştır. Sonuç olarak da elde edilen bulgular tezin de özleştirisinin yapılmasına olanak vermiştir ve taşıt titreşimlerinin insanlar üzerindeki etkisi de net bir şekilde ortaya koyulmuştur.

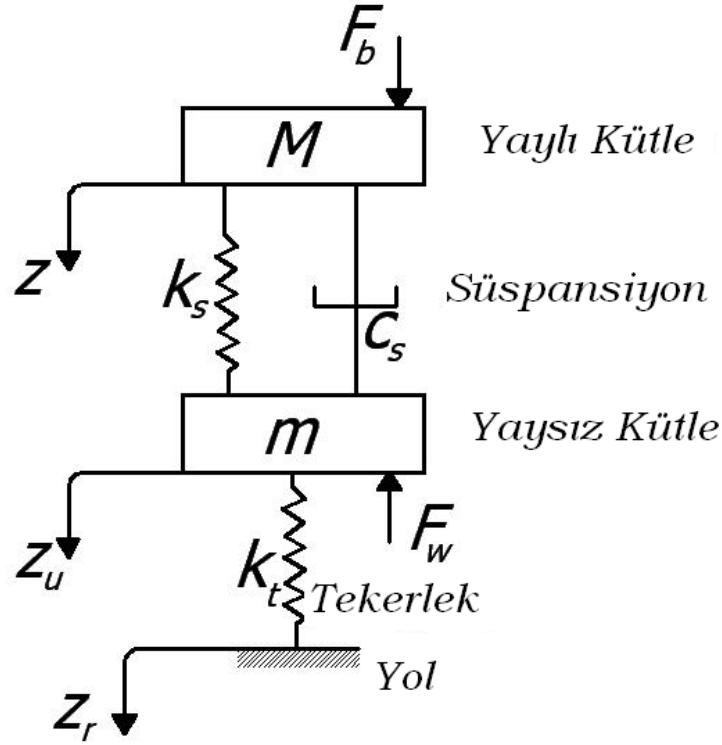
## 2. GENEL KISIMLAR

Yaşadığımız dünyada çoğu zaman titreşimlere maruz kalmaktayız. Bu maruz kaldığımız titreşimlerin hayatımızdaki yeri büyüdükçe vücudumuzdaki etkisi de artmaktadır. Bu konu ile ilgili olarak yapılmış kimi standartlar mevcuttur(ISO 263, BS 6841 gibi). Ülkemizde de bu tip insan hayatına etki eden titreşimle ilgili olarak Titreşim Yönetmeliği bulunmaktadır ve yine bu tip titreşimlerin ölçülmesi amaçlı standartlar bulunmaktadır. Böylelikle çalışan insanların iş hayatında titreşime maruz kalması önlenmeye çalışılmaktadır. Fakat günlük hayatımızda maruz kaldığımız titreşim ile ilgili olarak herhangi bir belge ya da kanun maalesef bulunmamaktadır.

Günlük yaşantımızda daima karşımıza çıkabilen titreşimler sağlığımızı etkilemektedir. Taşıtta seyir ederken de benzer şekilde tahrik edici kimi kaynaklar(Yol pürüzlülüğü, tekerlek teçhizatı, tahrik aktarım hattı, motor) sebebiyle seyir esnasında titreşimlere maruz kalmaktayız. Bu tip titreşimleri engelleyebilmek amaçlı taşıtlarda süspansiyonlar geliştirilmiştir ve her geçen gün geliştirilmektedir. Titreşim bir aracın yapılandırılmasında en önemli sebeplerden birisidir. Bir tasarımda taşıt sürüş performansındaki ilerleyen büyük mühendislik değişiklikler ve yöntemler yapıyı öznelletirmiştir. Sürüş titreşimleri olarak adlandırabileceğimiz bu olgu, yolcuya bu titreşimlerin yansımadır. Literatürde bu konu ile ilgili çok fazla yayına rastlanabilmektedir. Aktif ve pasif kontrol sistemleri farklı araçlarda farklı tasarımlarla karşımıza çıkmaktadır. İleri aşamalarda kontrolcü kullanımı ile aktif süspansiyon sistemleri gelişimi ile ilgili çalışmalar da mevcuttur.

Dinamik bir sistem gibi sistematik olarak bir taşıtın dinamik davranışı süspansiyon sisteminde başlar. Düşük frekanslarda, yaylı bir kütle olan taşıt gövdesi iç bir ünite gibi süspansiyonlarla hareket eder. Bu rijit kütle hareketidir. Akslarla birleşmiş tekerlekler yaysız kütlelerdir, rijit bir kütle gibi hareket ederler ve dış kuvvetleri yaylı kütle kısmına aktarırlar. Bu yüzden alt sistemin de yapısal modlarına ve rezonanslarına bakılmalıdır. Çok çeşitli bireysel çeşitlilikler taşıtın titreşim yanıtını etkileyebilir. Taşıtın dinamik davranışı girdi ve çıktı ilişkisi (frekans cevabı) ile anlamlı bir şekilde ifade edilebilir.

Tüm taşıtlar sürüş izolasyonu için her tekerlekte birincil olarak bir süspansiyon sistemine sahiptir. Bu sistemin ilk amacı yoldan gelen girdileri sönmülemektir. Bu dinamik şekil 2.1’de gösterilen çeyrek taşıt modeli gibidir. Şekilde görüldüğü gibi yaylı kütle birincil süspansiyon üzerindedir ki bunlar aksla birleştirilmişlerdir. Süspansiyon katılık ve sönmüleme özelliklerine sahiptir. Tekerlek basit bir yay gibi düşünölmüştür.



Şekil 2.1 Pasif Süspansiyonlu Çeyrek Taşıt modeli

Süspansiyondaki yaylı kütle ve tekerlek yayı düşey doğrultuda hareket yeteneğine sahiptirler.

$$RR = \frac{1}{\frac{1}{k_s} + \frac{1}{k_t}} = \frac{k_s k_t}{k_s + k_t} \quad \begin{array}{l} RR: \text{Sürüş derecesi} \\ k_s: \text{Süspansiyon katılığı} \\ k_t: \text{Tekerlek katılığı} \end{array} \quad (2.1)$$

Sönmüleyici olmadığı durumlarda;

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{RR}{m}} \text{ olur.} \quad (2.2)$$

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2.3)$$

$$\zeta = C_s / \sqrt{4k_s m} \quad (2.4)$$

Sönümleyici var iken de ikinci formüldeki gibi doğal frekans bulunur. Burada;  
m: kütle,

$\omega_n$  : Sönümleyici yokken doğal frekans,

$\omega_d$  : Sönümleyici varken doğal frekans,

$\zeta$  : Sönümleme oranı,

$C_s$  : Süspansiyon sönümleyici sabiti

İyi bir sürüş için  $\zeta$  modern yolcu arabalarında 0,2 ile 0,4 arasındadır. 0,2 lik bir sönümleme oranında doğal sönümleme frekansı doğal frekansın %98'i 0,4 lük bir sönümleme oranında da doğal sönümle frekansı doğal frekansın % 96'sı olduğundan  $\omega_n$ , sönümsüz doğal frekans genellikle doğal frekans olarak kullanılır.

$$M\ddot{Z} + C_s\dot{Z} + K_s Z = C_s\dot{Z}_u + K_s Z_u + F_b \quad (2.5)$$

$$m\ddot{Z}_u + C_s\dot{Z}_u + (K_s + K_t)Z_u = C_s\dot{Z} + K_s Z + K_t Z_r + F_w \quad (2.6)$$

Buradan,

$$\frac{\ddot{Z}}{\ddot{Z}_r} = \frac{K_1 K_2 + j|K_1 C \omega|}{|\chi \omega^4 - (K_1 + K_2 \chi + K_2) \omega^2 + K_1 K_2| + j|K_1 C \omega - (1 + \chi) C \omega^3|} \quad (2.7)$$

$$\frac{\ddot{Z}}{F_w / M} = \frac{K_2 \omega^2 + j|K_1 C \omega|}{|\chi \omega^4 - (K_1 + K_2 \chi + K_2) \omega^2 + K_1 K_2| + j|K_1 C \omega - (1 + \chi) C \omega^3|} \quad (2.8)$$

$$\frac{\ddot{Z}}{F_b / M} = \frac{|\mu \omega^4 - (K_1 + K_2) \omega^2| + j|K_1 C \omega|}{|\chi \omega^4 - (K_1 + K_2 \chi + K_2) \omega^2 + K_1 K_2| + j|K_1 C \omega - (1 + \chi) C \omega^3|} \quad (2.9)$$

$$\chi = m/M, \quad C = C_s/M, \quad K_1 = K_t/M, \quad K_2 = K_s/M$$

Yukarıdaki denklemler reel ve imajinel kısımlardan oluşmaktadır. Genlikler arasındaki oranı bulmak için pay ve paydadaki reel ve imajinel kısımlara değer vermek gerekmektedir. Payın genliği reel ve imajinel kısımların kareleri toplamının karekökü alınarak determine edilir ve benzer işlem paydada da yapılır. Böylelikle oran bulunabilir.

Çeyrek taşıt modeli sadece düşey doğrultulardaki dinamik davranışlar üzerinde çalışmak için kullanılır. Bu yüzden yol pürüzlülüğünde, tekerlek teçhizatının homojen olmamasında veya diğer radyal kaynaklardan oluşacak titreşimlerin prosedürlerinde işe yararlar. Yol pürüzlülüğü girdileri için kazanç, yaylı sistem hareketi ile yol girdileri arasındaki orandır. Düşük frekanslarda kazanç birdir. Çünkü yaylı kütle yol girdisinin

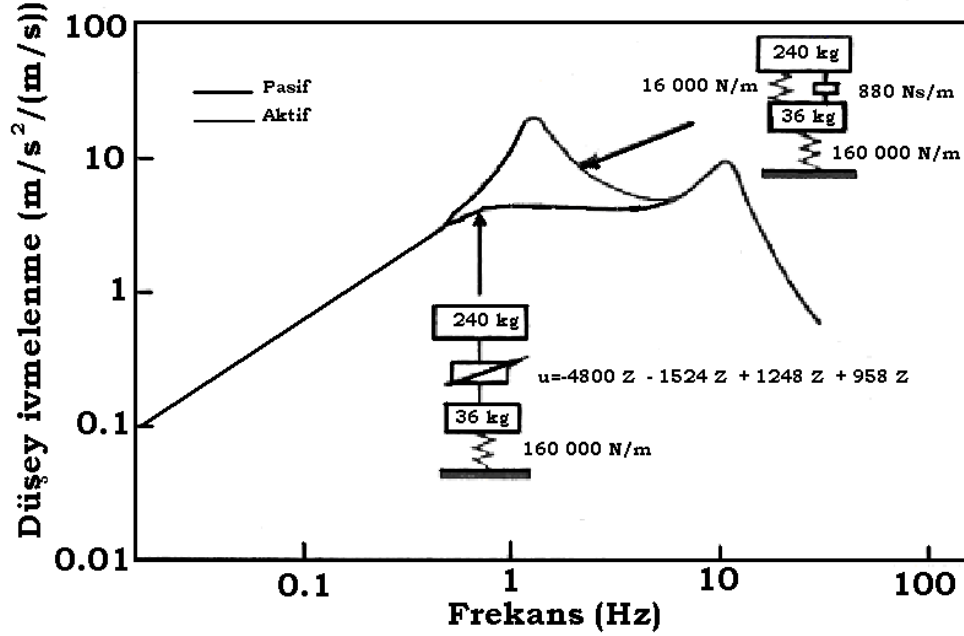
bir kopyası gibi çalışır. Klasik motor tasarımlarında yaylı kütle 1 Hz ve az üzerinde doğal frekanslara sahip seçilir. Bu yüzden 1 Hz civarındaki frekanslarda yaylı kütle rezonansa girer ve yol girdileri büyür. Bu genlik oranlarında sönümlenme düzeyinde tepe çok hassastır ve tipik yolcu araçlarında bu 1,5 ile 3 arasındadır. Tipik ağır taşıtlarda genlik oranı yola bağlıdır ve en kötü durumda 5-6 Hz civarına yükselebilir. Rezonansın üzerinde yol girdileri artarak azalmaktadır. 10-12 Hz civarında tekerlek teçhizatı zıplama rezonansına girer, küçük bir tümsekle bu kavis azalabilir. Direkt etkiyen kuvvetlere yanıtın kazancı yaylı kütle için aynı eşitlikte bir çıktı ile cevap vermesidir. Yanıt benzerdir, fakat yaylı kütle rezonansına büyük üstünlük gösterir. Yüksek frekanslarda kazanç tekildir. Çünkü yerdeğiştirmeler çok küçüktür ve aynen aktarılır. Süspansiyon kuvvetleri çok değişmez ve kuvvet yaylı kütle ivmelenmesi gibi yok edilir. Sonuç olarak dışarıdan gelen tüm kuvvetler taşıt gövdesine taşınmaktadır ve sürü titreşimlerine neden olmaktadır.

Önce tekerlek rezonans frekansına azaldıktan sonra daha da hızlı bir şekilde azalmaya devam eder. Yol girdileri büyüklükleri frekansla artmadıkça, ivmelenme cevabı nitel olarak taşıtın ivmelenme kazancına benzer olacaktır. Böylece ivmelenme tayfi bize sadece sistemin yanıt kazancı hakkında bilgi verir. Yol üzerindeki problemler yine bilinmeyecektir.

Son yıllarda otomotiv sektöründeki sürüş performansındaki ilerlemelerle birlikte aktif elemanlar geliştirildi. Yaygın olarak sönüm kuvveti uygulamak, istenilen sürüş performanslarına ulaşmak amaçlı süspansiyondaki hidrolik silindir bu aktif elemanlardan birisidir. Optimal Kontrol algoritması aktif bir süspansiyon için analitik olarak bulunabilir. Yüksek limitlerde kullanılabilen pasif süspansiyona kıyasla sürüş performansında %30 oranında ivmelenmede düşüş aktif kontrolle mümkündür. Aktif kontrolün yararı yaylı kütle için rezonans frekansının yakınlarında kontrol etmesidir. Düşey doğrultudaki ivmelenmesi için de Şekil 2.2'de görebiliriz. Yaylı kütle rezonans frekansında pasif süspansiyonda görülen tepiyi aktif süspansiyon azaltmıştır. Aktif kontrol yaylı kütle için ivmelenmelerine karşı duyarlı davranıp onları sönümlenmek için kuvvet üretirken, sistem bu moda çok etkin davranır. Yersiz kütle rezonans frekansında aktif süspansiyon pasif bir süspansiyon gibi davranır. Çünkü süspansiyon kuvvetleri yaylı kütle için tekrar gelecek olan tekerlek hoplama hareketine



karşı tepki verecektir. Yürürlükte yaylı kütleye gelen ivmelenmelerin optimizasyonu yaylı kütle, yaysız kütleye etkiyen kuvvetleri anlamada reaksiyon noktası olarak düşünüldüğünden henüz başarılammıştır.



Şekil 2.2 Aktif ve pasif süspansiyon uygulamalarındaki ivmelenme

## 2.1. TAŞITLARDAKİ TİTREŞİM

Taşıt seyri, engebeli yollarda taşıtın titreşimlerine yol açar. Taşıtların titreşimleri, yolların çeşitliliği ve kaynakların çeşitliliğinden ortaya çıkabilir. Genelde rijit gövdenin hareketi, taşıtın ağırlık merkezinden geçen üç eksen boyundaki lineer hareket ile birlikte, eksenlere göre olan dönme bileşenleri şeklindedir. Bu hareketlerin sonucunda altı hareket ortaya çıkmaktadır.

### 2.1.1. Doğrusal Hareketler:

*2.1.1.1 X ekseninde titreşim hareketi:* İleri-geri sarsıntı olarak adlandırılır. Bu hareket frenleme ve hızlanma etkileri sonucu ortaya çıkar. Taşıtın aktarma organlarının esnekliği bu hareketi etkiler.

*2.1.1.2 Y ekseninde titreşim hareketi:* Aşağı-yukarı sarsıntıdır. Bu hareket, taşıtın yol düzlemi boyunca hareketinden kaynaklanır.

*2.1.1.3 Z eksenini boyunca titreşim hareketi:* Yana kayma olarak adlandırılır. Bu hareket merkezci kuvvetlerin etkisiyle ve yan etkilerden ortaya çıkar. Yan etkiler taşıtı yolun dışına doğru yönlendirir.

### **2.1.2. Dönem Hareketleri:**

*2.1.1.1 X eksenini etrafında hareket:* Yalpalanma olarak adlandırılır. Bu hareketler yol girişinin sağ ve sol tekerlere farklı fazlarda etki etmesinden dolayı meydana gelir.

*2.1.1.2 Y eksenini etrafında hareket:* Bu harekete savrulma denir. Merkezci kuvvetlerin sonucunda oluşur.

*2.1.1.3 Z eksenini etrafında hareket:* Kafa vurma hareketidir. Yol girişinin ön ve arka tekerleklere farklı fazlarda etki etmesi sonucu oluşur.

## **2.2. TAŞITLARDAKİ TİTREŞİMLERİN İNSANLARA ETKİLERİ**

Taşıtı titreşimleri, yolcuları psikolojik ve fizyolojik olarak etkiler. Yolcuya etki eden bozucu etkilerin hangi frekansta ve hangi yönde olduklarının bilinmesi, bu titreşimlerden ne şekilde etkileneceklerinin önceden tahmin edilmesini sağlar.

Taşıtı titreşimlerinin irdelenmesinde en önemli kriterlerden biri taşıtı içindeki yolcunun duyduğu rahatsızlıkların büyüklüğüdür. Yukarıda bahsedilen mekanik tepkiler, hem psikolojik hem de fizyolojik olarak gözlemlenebilir. Bu etkilerin oldukça karmaşık ve ölçülmesi zor olmasına rağmen, hayvanlar üzerindeki deneylerden elde edilen bulgular insanlar üzerinde de belirli bir ölçüde geçerli kabul edilebilir. Bu deneyler sonucunda sindirimdeki, kas ve üreme etkinliklerindeki bozukluklar ya da gerçek iç yaralanmalar gibi karşımıza çıkmaktadır.

İnsana etkileyen 1 – 20 Hz aralığındaki kimi titreşimlerin etkileri kabaca şu şekilde sıralanabilir. Frekans aralıkları verilen belirtiler en baskın olanlardır.

**Tablo 2.1** Titreşimin ilgili frekans aralığında insana olan etkisi

<b>Belirti</b>	<b>Frekans aralığı (Hz)</b>
Genel rahatsızlık hissi	4-9
Kafa belirtileri	13-20
Alt çene belirtileri	6-8
Konuşma üzerine etkisi	13-20

Boğazda şişkinlik	12-16
Göğüş Ağrıları	5-7
Karın Ağrıları	4-10
İşeme isteği	10-18
Artan kas tonu	13-20
Nefes alma üzerine etkisi	4-8
Kas kasılmaları	4-9

Sürücü vücuduna etkileyen titreşimler, koltuktan, bacak ve gövdeye, zeminden, ayaklara ve bacaklara, direksiyon ve kol dayanaklarından da el ve kollara iletilir. Bu titreşimler de yukarıdaki kimi rahatsızlıklara sebebiyet verebilir.

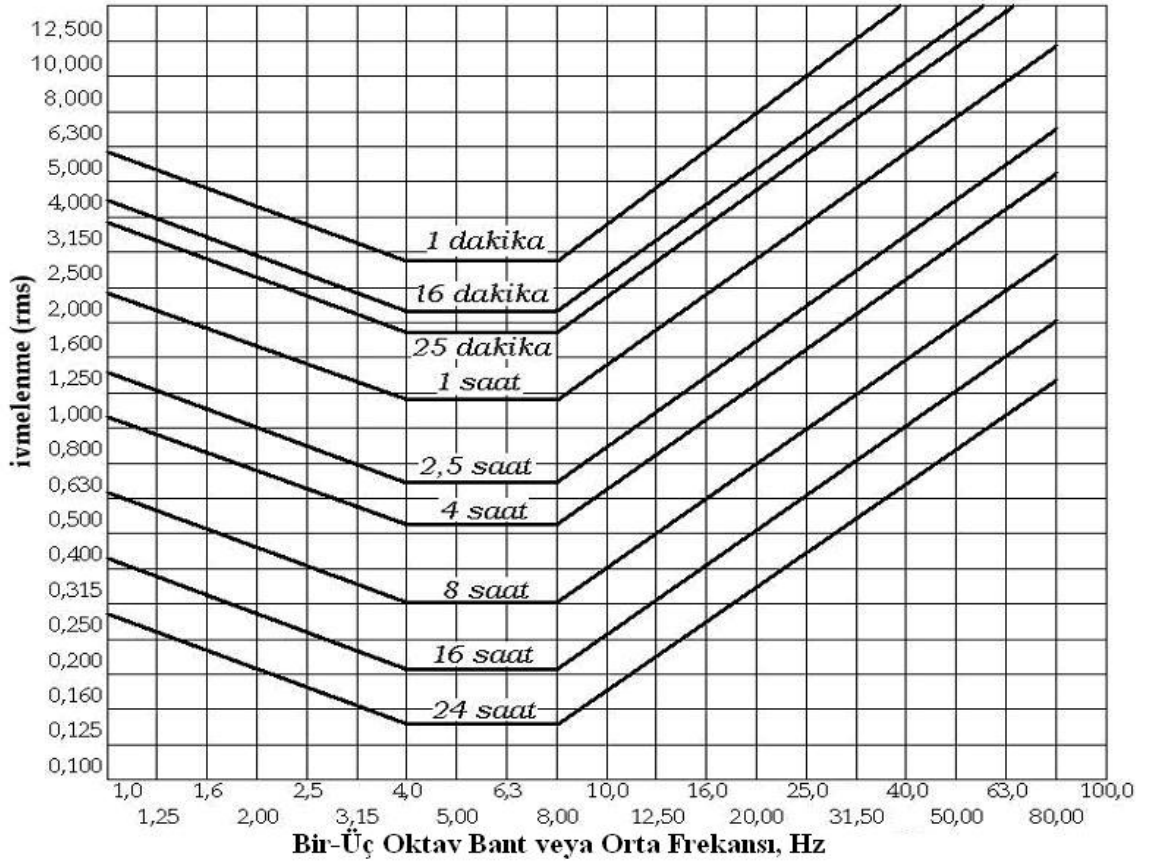
### 2.3. TÛM VÛCUT TİTREŞİMLERİ

İnsanoğlunun endüstride kullanmak üzere makineleri üretmeye başlamasından ve özellikle bu makineleri motorlar vasıtasıyla çalıştırmaya başlamasından itibaren titreşimin azaltılma çabası mühendisleri meşgul etmiştir. Zamanla titreşim izolasyonu ve azaltma tekniklerinin makine dizaynının tamamlayıcı bir parçası haline gelmesiyle, titreşimlerin doğru bir şekilde ölçülmesi ve analizi önemli bir ihtiyaç haline gelmiştir. Bunun bir sonucu olarak titreşim, insan sağlığı, performansı ve konforu üzerinde oluşturduğu hareket hastalığı gibi fizyolojik ve psikolojik etkilere sahiptir. Bu tip rahatsızlıkları belirli standartlara dönüştürmek amaçlı standartlar geliştirilmiştir. Bunlardan en önemlileri ISO 2631 ve BS 6841' dir.

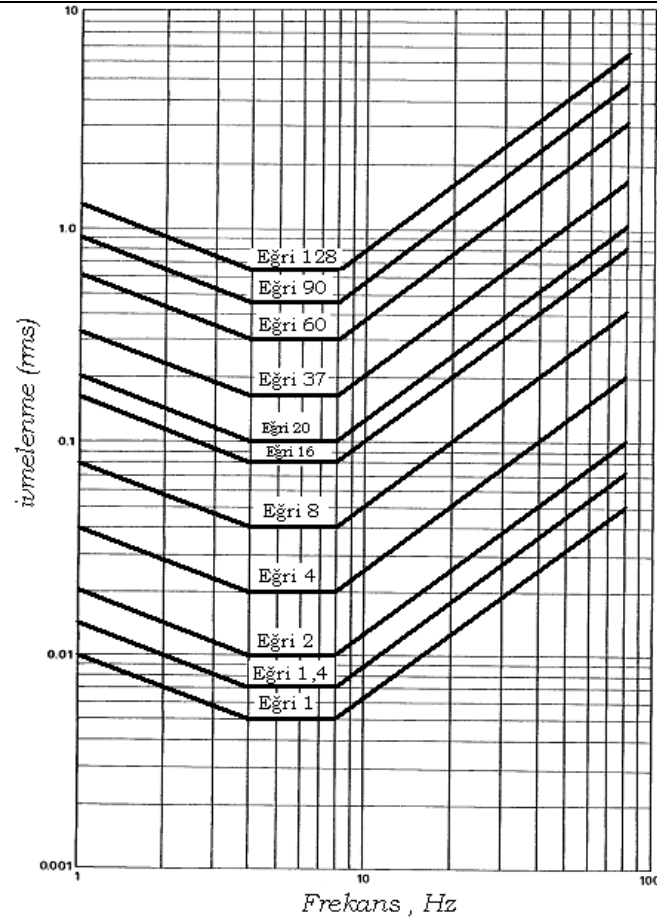
Bu tezde ISO 2631 standardından yararlanılmış ve oluşturulan taşıt modelinin simülasyonu sonucunda elde edilen veriler ilgili standart ile kıyaslanmıştır. Bu standart bu güne değin ulaşılan bilgilerin toparlanması sonucu oluşturulmuştur. Bu sayede deneyimlerden yararlanılarak sürücü için taşıtta seyir titreşimlerinden ötürü meydana çıkabilecek sağlıksal sorunlar ortaya koyulmuştur.

Algılama, rahatsızlık ve ağrı gibi psikolojik etkiler, son zamanlarda ayrıntılı olarak incelenmiştir. Çevresel koşulların araç sürücülerinin ve uçak pilotlarının yeteneklerine olan etkisi üzerine yapılan araştırmaların çoğu titreşimin özellikle önemli olduğunu göstermektedir. ISO 2631 standardındaki mevcut eğriler bahsedilen veriyi 1-80 Hz aralığında göstermektedir. 1 Hz altındaki titreşimler vücutta iletimde ve üretimde etki göstermektedir(Örneğin: Kinetosis(Hareket hastalığı), bu yüksek frekanslardakinden

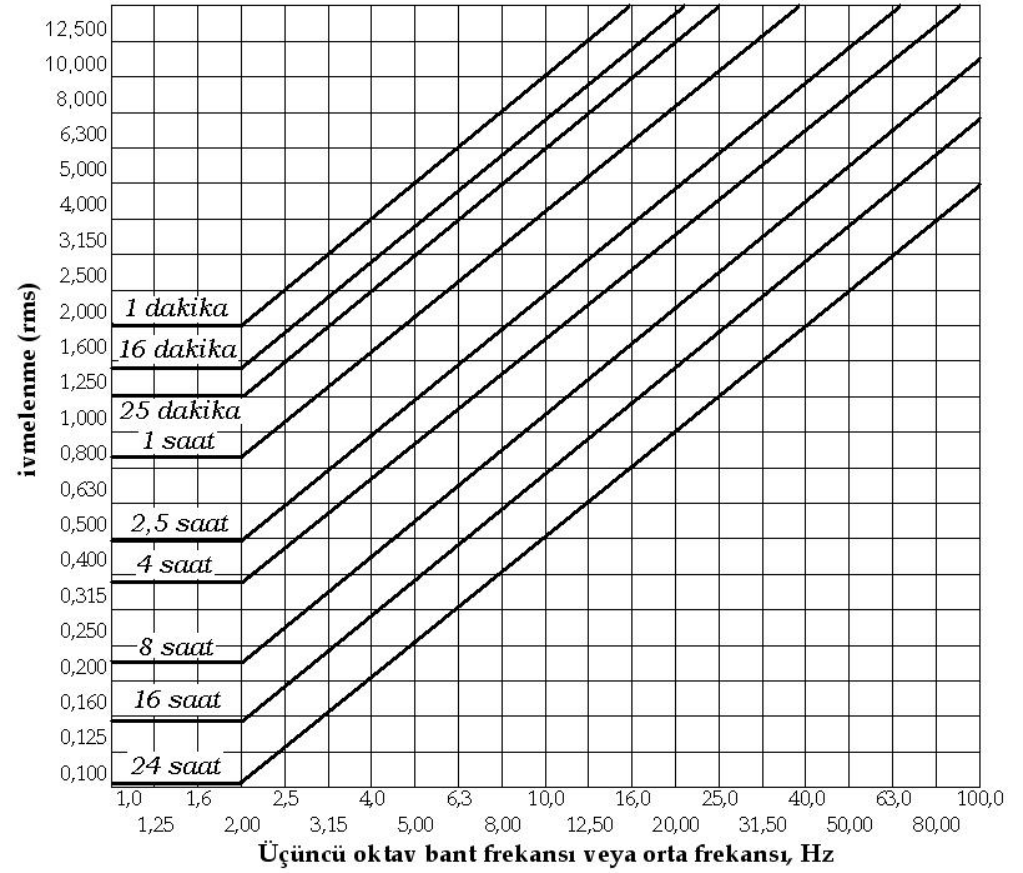
çok farklı karakterdedir.). Ayrıca, 1 Hz altında titreşimlere insanın tepkisi son derece değişken olup yaş, cinsiyet gibi diğer faktörlere çokça bağlıdır. Bu konu ile ilgili bilgi yeterli olmamasına karşın ISO 2631’de bulunan tüm-vücut titreşimleri bölümünde 0,1-1 Hz aralığındaki titreşimlerin formülasyonu ile ilgili bir girişim bulunmaktadır. ISO 2631 standardı tüm vücudun belirli bir süre belirli bir frekansa sahip titreşime maruz kalması sonucu oluşabilecek sorunları göstermektedir. Şekil 2.3 ve 2.5’te verilen grafik ISO 2631 den alınmıştır. Grafikler sırasıyla “z” doğrultusunda ve “x,y” doğrultularında RMS olarak verilen frekans cevaplarının sürelerine göre tüm vücut için etkisini göstermektedir. Benzer şekilde aynı standartta, el ve kol ya da bina titreşimleri sonucu izin verilebilecek titreşim sınırlarına ulaşmak mümkündür. Fakat el, kol ya da bina titreşimleri bu tezin ilgi alanına girmediği için bu grafiklere bu tezde yer verilmemiştir. Farklı standartlarda da başka yaklaşımlarla tüm vücut titreşimleri ile ilgili benzer grafiklere ulaşmak mümkündür. Örneğin Şekil 2.4’teki grafik BS 6481’den bilgi amaçlı alınmıştır. Fakat grafikler incelenirse ISO 2631 standardındaki eğriye benzerliği rahatlıkla görülebilir.



Şekil 2.3 Düşey doğrultuda titreşimlerin sürece göre insana olan etkisi (ISO 2631)



Şekil 2.4 Düşey doğrultularda titreşimlerin sürece göre insana olan etkisi (BS 6481)



Şekil 2.5 Yatay doğrultularda titreşimlerin sürece göre insana olan etkisi (ISO 2631)

### 3. MALZEME VE YÖNTEM

#### 3.1. LAGRANGE DENKLEMLERİ



Şekil 3.1 Joseph-Louis Lagrange

Joseph-Louis Lagrange, (25 Ocak 1736 – 10 Nisan 1813), İtalyan-Fransız matematikçi ve astronom, analiz, sayılar kuramı, klasik mekanik ve gök mekaniği alanlarına önemli katkılarda bulunmuştur. 18. yüzyılın en önemli matematikçilerindendir. Bilimsel makalelerini bir oturuşta, hiç düzeltme yapmadan yazabildiği söylenmektedir. 20 yaşına gelmeden Torino'daki topçu okulunda geometri öğretmeni olmuş, 20'li yaşlarında dalga yayılımı ve eğrilerin minimum ve maksimum noktalarıyla ilgili yazdığı makaleler sayesinde yaşayan en büyük matematikçilerden biri olarak kabul görmüştür. Euler ve d'Alembert'in desteğiyle Berlin'deki Prusya Bilim Akademisi'nin matematik bölümü başkanı olan Lagrange, I. Napoléon döneminde senatör ve kont ilan edilmiştir ve bugün Paris'teki Panthéon'da gömülüdür.

Lagrangian mekanik klasik mekaniğin momentumun korunumu ve enerjinin korunumu yasaları ile birlikte tekrar formüle edilmiş bir halidir. İtalyan-Fransız matematikçi tarafından 1788 yılında ortaya atılmıştır. Lagrangian mekanikte, sistemin tüm genelleştirilmiş koordinatları için sistem parçalarının yörüngeleri Lagrange denklemleri çözülerek türetilmektedir. Varyasyonların hesabının temel teoremi göstermektedir ki Lagrange denklemlerinin çözülmesi fonksiyonların minimumunu bulma yolu ile eşittir.

Genelleştirilmiş koordinatların kullanılması önemli bir sistemin analizini basitleştirebilir. Örneğin, zeminde ilerleyen sürtünmesiz bir boncuk düşünelim. Eğer Newton Mekanikği kullanılarak boncuğun hareket denklemi hesaplanmaya çalışılırsa burada boncuğu zeminde tutabilmek için gerekli kuvvetlerin bilinmesi gerekmektedir. Oysa ki Lagrangian denklemleri kullanılarak boncuğun zemindeki yörüngesine bakıp bağımsız genelleştirilmiş koordinat seçimi ile boncuğun olası hareketi hakkında bilgi sahibi olunabilir. Bu seçim zorlayıcı kuvvetin bileşke sisteme girilmesi zorunluluğunu da ortadan kaldırmaktadır.

### 3.1.1. Lagrange Denklemleri

Lagrangian Mekanikte hareket denklemleri *Euler-Lagrange denklemleri* olarak da bilinen *Lagrange Denklemleridir*. Lagrange denklemleri kabataslak çıkarılırken bilinmelidir ki burada potansiyel enerji için U yerine V ve kinetik enerji için de T yerine K simgesi kullanılmaktadır.

#### 3.1.1.1. *Virtüel İşler Prensibi:*

*“Herhangi bir maddesel sistemin dengede olabilmesi için gerek ve yeter şart, sistemin her virtüel yerdeğiştirmesinde sisteme tesir eden aktif kuvvetlerin virtüel işlerinin cebrik toplamının pozitif olmasıdır.”*

#### 3.1.1.2. *D’Alembert Prensibi:*

*“Herhangi bir maddesel sistemin hareketinden dolayı bir t anında meydana gelen atalet kuvvetleri, aktif dış kuvvetler olarak sisteme tesir eden hakiki kuvvetlerle beraber gözönüne alınırsa, sistem bütün bu kuvvetlerin tesiri altında t anındaki konumunda dengede bulunur.”*

İki prensibin birleştirilmesiyle *“Lagrange Prensibi”* veya *“Lagrange tarzında D’Alembert Prensibi”* adıyla anılan bir prensip ortaya çıkar:

“Herhangi bir sistemin her virtüel yer değiştirmesinde, sisteme tesir eden aktif kuvvetlerin ve sistemin atalet kuvvetlerinin virtüel işlerinin toplamı sıfır veya sıfırdan küçüktür.”

Bu noktada Lagrange denklemleri, tarihi gelişme seyrine uygun olarak “Lagrange tarzında D’Alembert Prensibi” ne dayanılarak  $n$  tane noktasal kütleden ibaret sistem için yazılmış denklemden hareket edilecektir. (PASİN, F., 1994, *Mekanik Sistemler Dinamiği*, İ.T.Ü. Rektörlüğü, 975-561-028-6)

$$\delta W = \sum_{i=1}^n (F_i - m_i a_i) \cdot \delta r_i = 0 \quad (3.1)$$

$\delta W$  : Virtüel İř

$\delta r_i$  : Sistemin virtüel yerdeğişimi (kısıtları ile tutarlı)

$m_i$  : Sistemin parçalarının kütlesi

$a_i$  : Sistemin parçalarının ivmesi

$m_i a_i$  : Sistemin momentumunun zamana göre türevlerini temsil eder, inertial forces

$i$  : Parçanın indisi

$n$  : Göz önüne alınan parça sayısı

Terimlerin ayrılması;

$$\delta W = \sum_{i=1}^n F_i \cdot \delta r_i - \sum_{i=1}^n m_i a_i \cdot \delta r_i = 0 \quad (3.2)$$

$p$  tane  $r_i$  yer vektörü  $m$ -tane genelleştirilmiş koordinat ve zaman fonksiyonu olarak;

$$r_1 = r_1(q_1, q_2, q_3, \dots, q_m, t) \quad (3.3)$$

$$r_2 = r_2(q_1, q_2, q_3, \dots, q_m, t) \quad (3.4)$$

.

.

.

$$r_n = r_n(q_1, q_2, q_3, \dots, q_m, t) \quad (3.5)$$

$m$  toplam genelleştirilmiş koordinatı göstermektedir. Virtüel yerdeğiştirmenin zamandan bağımsız kısıtları řu şekildedir.



$$\delta r_i = \sum_{j=1}^m \frac{\partial r_i}{\partial q_j} \delta q_j \quad (3.6)$$

Burada  $j$  genelleştirilmiş koordinatlara karşılık kullanılmış bir indistir.

Uygulanan dış kuvvetler genelleştirilmiş koordinatlar ve genelleştirilmiş kuvvetler ile yazılması sonucunda;

$$\delta Q_j = \sum_{i=1}^n F_i \cdot \frac{\partial r_i}{\partial q_j} \quad (3.7)$$

$$\Rightarrow \delta W = \sum_{j=1}^m Q_j \delta q_j - \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n m_i a_i \cdot \frac{\partial r_i}{\partial q_j} \delta q_j = 0 \quad (3.8)$$

$$\Rightarrow \delta W = \sum_{j=1}^m Q_j \delta q_j - \sum_{j=1}^m \left( \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} \right) \delta q_j = 0 \quad (3.9)$$

Yukarıdaki denklemde, kısıtlamalarla tutarlı olmasına rağmen  $\delta q_j$  keyfidir. Böylelikle;

$$\Rightarrow Q_j = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} \quad (3.10)$$

Hareketli bir maddesel noktaya tesir eden aktif kuvvet, noktanın yerine bağlı bir fonksiyonla ifade ediliyorsa;

$$\vec{F} = \vec{F}(x, y, z) \quad (3.11)$$

Bu fonksiyon  $t$  zamanını da açık bir şekilde ihtiva ediyorsa,

$$\vec{F} = \vec{F}(x, y, z, t) \quad (3.12)$$

Burada eğer;

$$\vec{F}_x = -\frac{\partial V}{\partial x}, \quad \vec{F}_y = -\frac{\partial V}{\partial y}, \quad \vec{F}_z = -\frac{\partial V}{\partial z} \quad (3.14), (3.15), (3.16)$$

şeklinde yazılabilecek bir  $V = V(x, y, z, t)$  fonksiyonu bulmak mümkünse, bu fonksiyona *potansiyel* veya *potansiyel fonksiyonu* ya da *bu kuvvet alanında hareket*

eden maddesel noktanın potansiyel enerjisi denir. Benzer tarifler maddesel nokta sistemleri için de yapılabilir ki aktif kuvvetler;

$$\vec{F}_{x,i} = -\frac{\partial V^*}{\partial x_i}, \quad \vec{F}_{y,i} = -\frac{\partial V^*}{\partial y_i}, \quad \vec{F}_{z,i} = -\frac{\partial V^*}{\partial z_i} \quad (i = 1, 2, 3 \dots p) \quad (3.17)$$

$$(3.18)$$

$$(3.19)$$

olmak üzere  $V = V(x_1, y_1, z_1, \dots, x_p, y_p, z_p, t)$  potansiyelinden elde edilebiliyorsa, genelleştirilmiş kuvvetler de  $V = V(q_1, q_2, q_3, \dots, q_m, t)$  potansiyel fonksiyonundan elde edilir ki burada Lagrangian'ın tanımından;

$$Q_k = -\frac{\partial V}{\partial q_k} \quad (3.20)$$

$$\Rightarrow -\frac{\partial V}{\partial q_j} = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} \quad (3.21)$$

$$L = T - V \quad (3.22)$$

$$0 = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} \quad (3.23)$$

şeklini alır. Fakat bazı hallerde kuvvetlerin yalnız bir kısmı için potansiyel fonksiyonu mevcut olabilir. Bu hallerde genelleştirilmiş  $\bar{Q}_k$ , kuvveti iki kısımdan ibarettir.

$$\bar{Q}_k = Q_k^* + Q_k \quad (3.24)$$

Buradan  $Q_k^*$  ( $k = 1, 2, \dots, n$ ) için;

$$Q_k = -\frac{\partial V(q_k, t)}{\partial q_k} \quad (3.25)$$

bağlantıları mevcut ise Lagrange denklemleri şu şekli alır;

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} = Q_k \quad (3.26)$$

Bir sistemin hareketi sırasında bir kuvvetin yaptığı iş negatif ise böyle bir kuvvete “disipatif” kuvvet denir. Eğer kuvvetten uygun bir dönüşüm bulunmaya çalışılırsa,

Rayleigh aşağıdaki formu kullanarak disipasyon fonksiyonunu veya sönüm fonksiyonunu göstermiştir.

$$D = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m C_{jk} \dot{q}_j \dot{q}_k \quad (3.27)$$

Bu halde Lagrange denklemlerinin son hali şu şekli alır:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} + \frac{\partial V}{\partial q_j} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_j} = Q_k \quad (3.28)$$

### 3.1.2. Örnekler:

#### 3.1.2.1 Serbest Düşen kütle

Noktasal bir  $m$  kütesinin serbest düşü yaptığını düşünölsün. Yerçekiminden  $F=m.g$  gibi bir kuvvet küteleye etkiyecektir. Newtonun kanunundan ;

$$\ddot{x} = g, \quad (3.29)$$

$$x(t) = \frac{1}{2} g t^2 \quad (3.30)$$

olarak bulunabilir. Aynı sonuç Lagrange formölasyonu ile de bulunabilir,  $x$  genelleştirilmiş koordinat olarak düşünölsürse kinetik ve potansiyel enerji;

$$T = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m \dot{x}^2, \quad (3.31)$$

$$V = -mgx \quad (3.32)$$

$$L = \frac{1}{2} m \dot{x}^2 + mgx \quad (3.33)$$

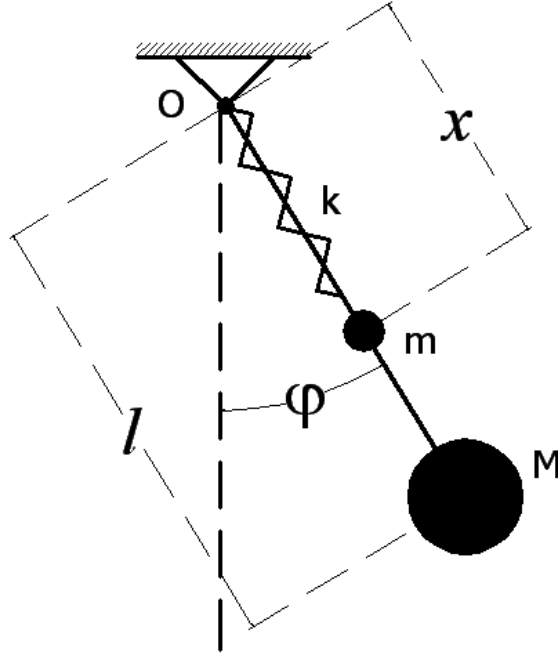
Bu durumda genel formölasyonda yerlerine konulursa;

$$L = \frac{1}{2} m \dot{x}^2 + mgx \quad (3.34)$$

$$0 = \frac{\partial L}{\partial x} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} = mg - m \frac{d\dot{x}}{dt} \quad (3.35)$$

$$\ddot{x} = g \quad (3.36)$$

## 3.1.2.2 Sarkaç



Şekil 3.2 Sarkaç

Yukarıdaki sistemin hareketine ait diferansiyel denklemleri Lagrange denklemleri ile bulunsun. M noktasal kütlesi  $l$  boyundaki kütsüz bir çubukla O noktasına mafsalla bağlanmıştır ve düşey düzlemde hareket edebilmektedir. M kütlesi ise katsayısı  $k$  olan bir yayın ucuna bağlanmış ve çubuk üzerine sürtünmesiz hareket edebilmektedir. Yayın serbest boyu  $l_0$  dir. (PASİN, F., 1994, *Mekanik Sistemler Dinamiği*, İ.T.Ü. Rektörlüğü, 975-561-028-6.)

$$T = \frac{1}{2} m \dot{x}^2 + \frac{1}{2} M l^2 \dot{\varphi}^2 \quad (3.37)$$

$$V = \frac{1}{2} k (x - l_0)^2 - mgx \cos \varphi - Mgl \cos \varphi \quad (3.38)$$

$$L = \frac{1}{2} m \dot{x}^2 + \frac{1}{2} M l^2 \dot{\varphi}^2 - \frac{1}{2} k (x - l_0)^2 + mgx \cos \varphi + Mgl \cos \varphi \quad (3.39)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}} = m x^2 \dot{\varphi} + M l^2 \dot{\varphi} \Rightarrow \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}} = 2 m x \dot{x} \dot{\varphi} + \ddot{\varphi} (m x^2 + M l^2) \quad (3.40)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \varphi} = -mgx \sin \varphi - Mgl \sin \varphi \quad (3.41)$$

$$\Rightarrow \ddot{\varphi}(mx^2 + Ml^2) + 2mx\dot{x}\dot{\varphi} + g \sin \varphi(mx + Ml) = 0 \quad (3.42)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} = 0 \Rightarrow \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} = 0 \quad (3.43)$$

$$\frac{\partial L}{\partial x} = -k(x - l_0) + mg \cos \varphi + mx \dot{\varphi}^2 \quad (3.44)$$

$$k(x - l_0) - mg \cos \varphi - mx \dot{\varphi}^2 = -m\ddot{x} \quad (3.45)$$

$$\Rightarrow m\ddot{x} + k(x - l_0) - mg \cos \varphi - mx \dot{\varphi}^2 = 0 \quad (3.46)$$

### 3.2. MATLAB HAKKINDA

"MATLAB" yüksek seviyeli bir teknik programlama dili olmasının yanında algoritma geliştirme, verilerin görselleştirilmesi, veri analizi ve sayısal hesaplamalar için etkileşimli bir yazılım paketidir. MATLAB ile teknik hesaplama problemlerini, C, C++ ve Fortran gibi geleneksel programlama dillerinden daha hızlı bir şekilde çözebilirsiniz. MATLAB yazılımının birçok alanda uygulamaları vardır. İçerdiği "toolbox" adı verilen paketler aracılığıyla sayısal işaret işleme, dinamik sistem tasarımı, kontrol tasarımı, test ve ölçüm, finansal modelleme ve analiz, haberleşme gibi birçok alanda kullanılabilir.

#### 3.2.1. Ana Özellikleri:

- Teknik hesaplamalar için yüksek seviyeli bir dildir.
- Kodların, dosyaların ve verilerin düzenlenmesi için bir geliştirme ortamıdır.
- İteratif tasarım ve problem çözme yöntemleri için interaktif araçlardır.
- Lineer cebir, istatistik, Fourier analizi, filtreleme, optimizasyon ve sayısal integrasyon için matematik fonksiyonlarıdır.
- Verilerin görselleştirilmesi için 2 ve 3 boyutlu grafik araçlarıdır.
- Grafik arayüzler tasarlamak için araçlardır.

Neredeyse MATLAB'in kullanımı olmayan bir mühendislik alanı yok gibidir.

#### 3.2.2. Sayısal Hesaplamalar Yapmak:

"Matlab" programı(MATrix LABoratory'nin üçer harfleri alınarak isimlendirilmiştir.) mühendislik uygulamalarının, hesaplamalarının ve simülasyonlarının çoğunun gerçekleştirildiği matris ve matematik tabanlı kompleks bir programdır. MATLAB

bilim ve mühendislik alanlarında kullanılan ortak matematiksel işlemler için birçok fonksiyonu içinde bulundurmaktadır. Bu fonksiyonlar MATLAB dilinin temelini oluşturmaktadır. İçerdiği modüller sayesinde işaret işleme, optimizasyon, istatistik ve sembolik matematik gibi birçok özelleştirilmiş fonksiyonları kullanabilirsiniz. Bu modüller MATLAB'e ayrıca eklenebilmektedir. Bu modüllere her geçen gün bir yenisi eklenmektedir. Böylece MATLAB'in kullanım alanları da her geçen gün genişlemektedir.

Birçok klasik algoritmayı tek bir komutta sunmaktadır. Böylece matematiksel hesaplamaların bilgisayarda yapılması diğer programlama dillerinde (C,C++,Fortran gibi) olduğundan daha kısa sürede ve daha az kod yazılarak gerçekleştirilebilmektedir. Böylece problemin bilgisayara uyarlanması çok problemin kendisine yoğunlaşmak daha da kolaylaşmaktadır. MATLAB'in bir diğer ve önemli bir özelliği ise simülasyon olanağı sunmasıdır. Böylelikle uygulamada da birçok sanayi kuruluşundaki AR-GE çalışanları ve bilimsel araştırmacılar tarafından sıklıkla kullanılmaktadır.

### **3.2.3. MATLAB SIMULINK:**

SIMULINK, gerçek dinamik sistemlerin modellenmesi, analiz edilmesi ve simülasyonu için kullanılan etkileşimli bir simülasyon ve prototipleme ortamıdır. Simulink ile hazırlanan uygulamalar bir test ortamındaymışçasına sürekli veya ayrık zamanlı analiz edilebilir, analize bağlı tasarım ve geliştirme işlemleri gerçekleştirilebilir, doğrusal ve doğrusal olmayan sistemlerin zaman ve frekans alanlarında analizleri yapılabilmektedir.


Simulink ile modelleme, bir sistemin kağıt üstüne taslak çizimi yapılması kadar kolaydır. Simulink grafiksel kullanıcı arayüzü; hali hazırda barındırdığı çeşitli blok setleri ile işlemine dayanan basit bir mantıkla, sistem elemanlarını ve sistemleri oluşturur. Sistem özellikleri de hazır kullanıcı arayüzleri ile belirlenmektedir. İstenildiği takdirde, kullanıcılar kendi bloklarını oluşturabilmekte ve kendi kütüphanelerini hazırlayabilmektedirler.

### **3.2.4. MATLAB SIMULINK KULLANIMI:**

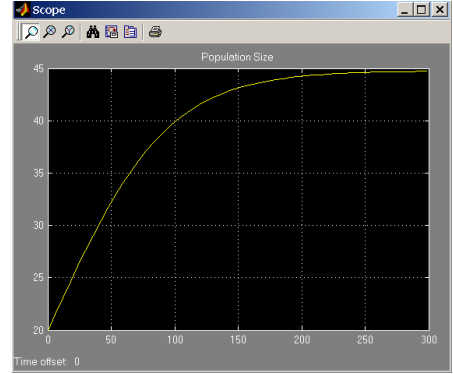
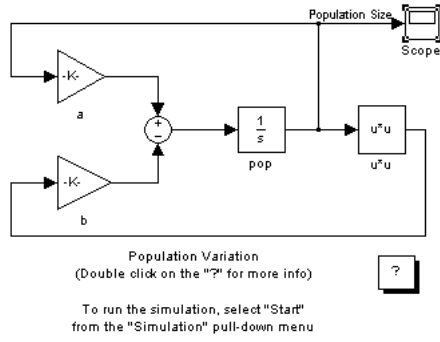
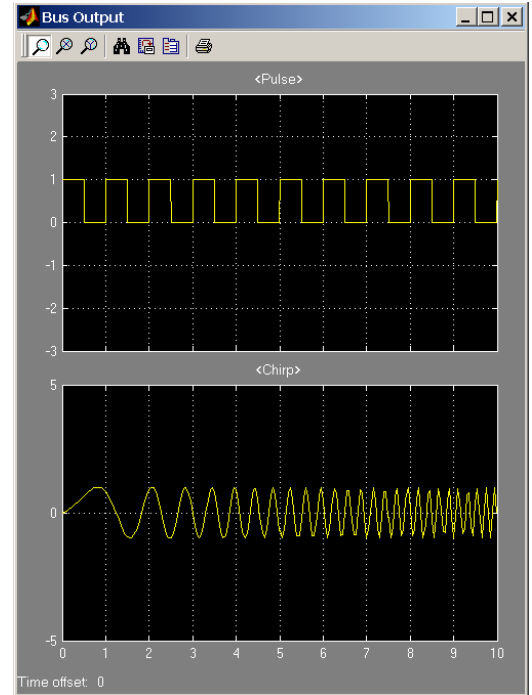
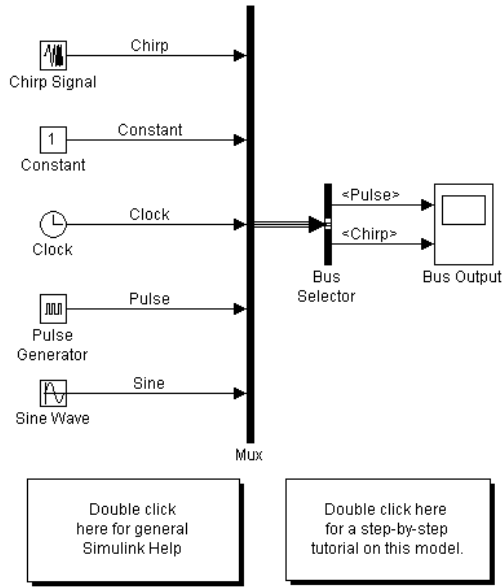
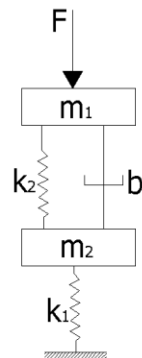
Matlab Simulink kullanımı içerisinde bulunan blokların birbirlerine uygun şekilde bağlanması ile yapılmaktadır. Hemen hemen her türlü dinamik sistemin modelini

kurmak simulink ile mümkündür. Sıklıkla kullanılan ve simulink modülünün kütüphane(simulink library browser) bölümünde bulunan kimi bloklar aşağıdaki gibidir.

**Tablo 3.1** Matlab Simulink'te kullanılan kimi komutlar

	Türev alma işlemi yapar.		Trigonometrik fonksiyon sağlar.
	İntegral alma işlemi yapar.		Herhangi bir verinin çağarılmasını sağlar.
	$u[i]$ değişkenleri ile tanımlanan fonksiyonlardır.		Herhangi bir değişkenin isimlendirilmesini sağlar.
	Sabit bir sayı ile çarpma işlemi yapar.		Giriş fonksiyonudur.
	Toplama çıkarma işlemleri yapar.		Çıkış fonksiyonudur.
	Üstel fonksiyon elde etmeye yarar.		Rampa Fonksiyonudur.
	İki fonksiyonun çarpımını sağlar.		Basamak Fonksiyonudur.
	Nokta çarpım yapmaya yarar.		Alt sistemlerin oluşturulmasını sağlar.
	Sabit girdi yapılmasını sağlar.		Girilen verinin belirli bir zaman ötelenmesini sağlar.
	İki girinin grafiklerini elde etmeye yarar.		İçerisinde çok fazla değişken taşıyan veri toplayan bloktur.

Örnek olarak matlab içerisindeki kimi blok diyagramları ve elde edilen sonuçlar aşağıdaki tablodaki gibidir.

**Tablo 3.2** Matlab Simulink'te kimi blok diyagramları ve elde edilen sonuçlar**Bus Block Demonstration****3.2.5. ÖRNEK:****Şekil 3.3** Çeyrek Taşıt

Yandaki fiziksel model için aşağıda verilenleri kullanarak;  $x_1-t$  ,  $x_2-t$  ,  $x_1''-t$  ,  $x_2''-t$  grafiklerini elde edilsin.

**Parametreler:**

$$k_1=1500 \text{ N/m}, k_2=150 \text{ N/m}$$

$$b=100 \text{ N/(m/s)}, m_1=200 \text{ kg}$$

$$m_2=50 \text{ kg}, F=15000 \text{ N}$$



Yukarıdaki verilen fiziksel modelin matematiksel modeli;

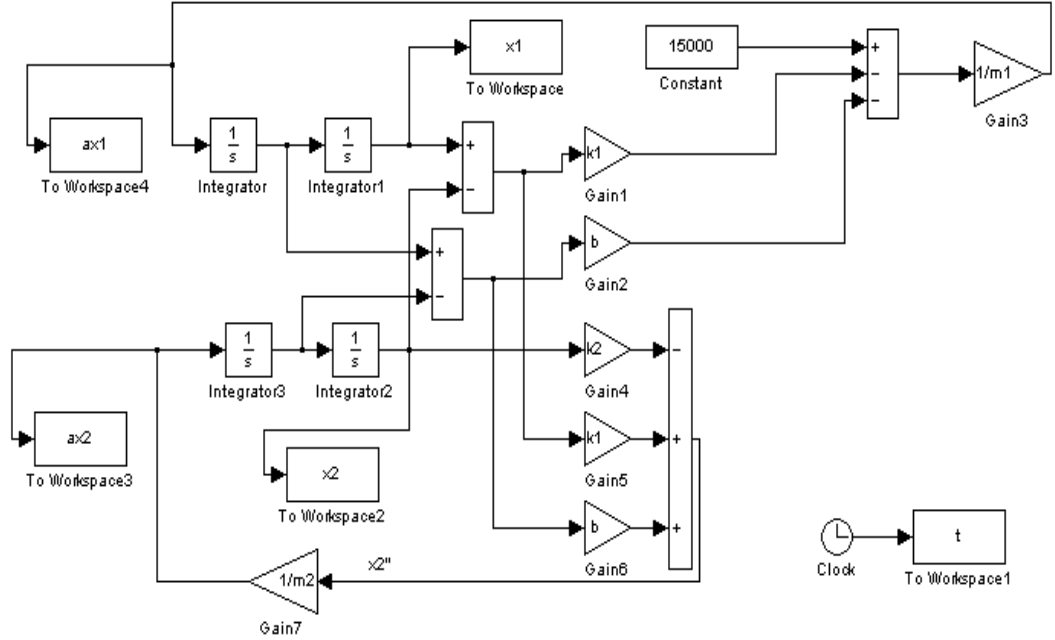
$$m_1 \ddot{x}_1 + b \cdot (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1 \cdot (x_1 - x_2) = F \quad (3.47)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 - b \cdot (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_1 \cdot (x_1 - x_2) + k_2 x_2 = 0 \quad (3.48)$$

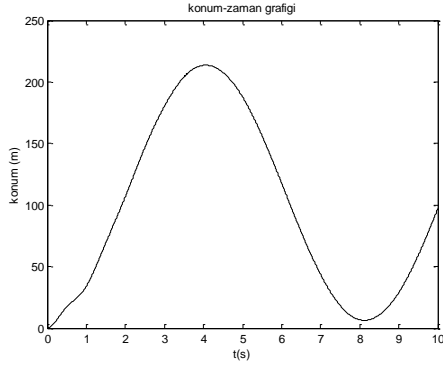
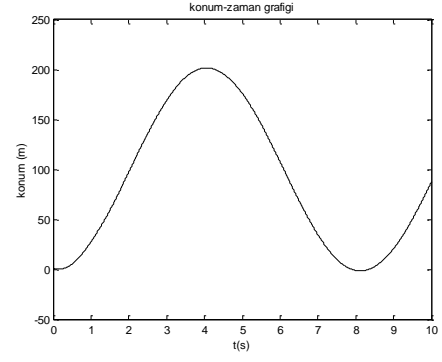
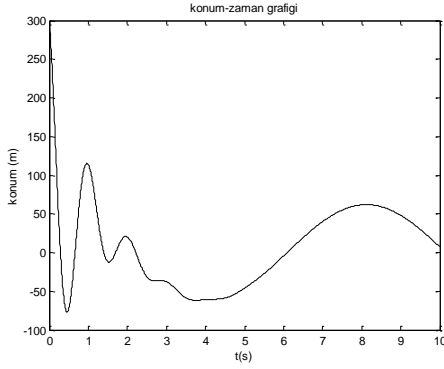
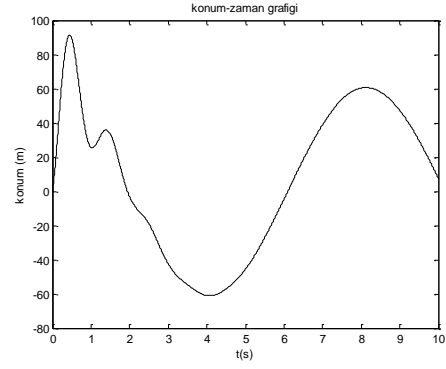
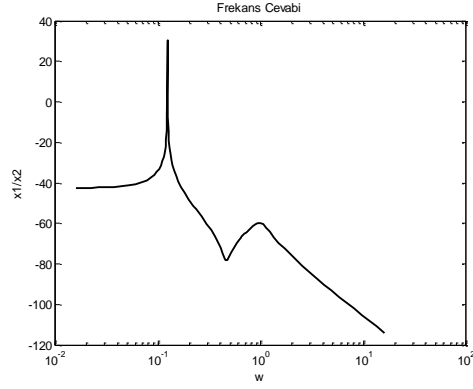
şeklinindedir. Buna göre matlab programında yukarıdaki denklemler doğrultusunda blok diyagramı oluşturularak sırasıyla şu istenilen grafikler elde edilir.

**Tablo 2.3** Örnek için matlab M-file dosyası

```
ti=0;
tf=10;
n=2000;
dt=(tf-ti)/n;
k1=1500;
k2=150;
m1=50;
m2=200;
b=100;
sim aziz_ornek
plot(t,x1);
title('Konum-zaman grafiği');
xlabel('x_1 (m)');
ylabel('zaman (s)');
```

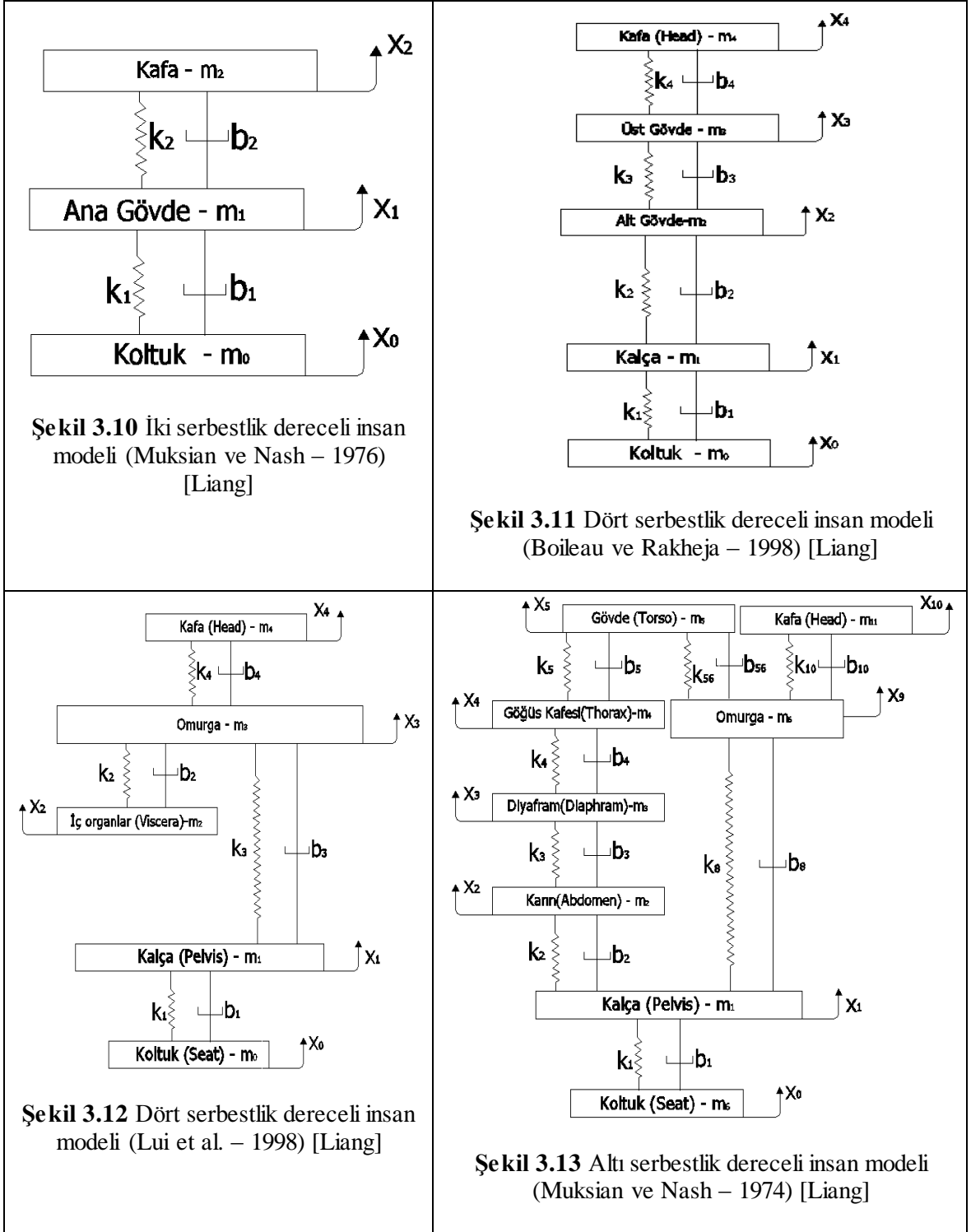


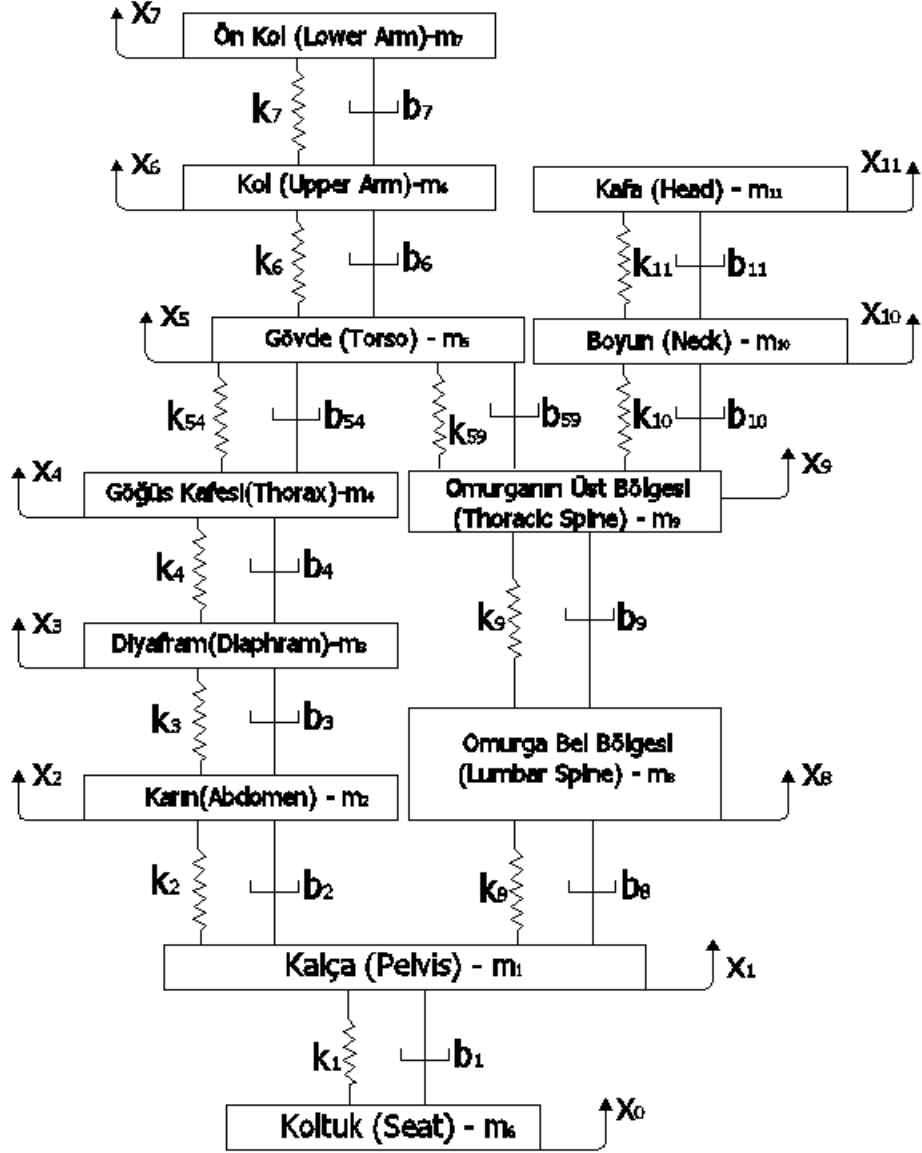
**Şekil 3.4** Örnek için hazırlanmış Matlab Blok diyagramı

Şekil 3.5  $x_1 - t$  GrafiğiŞekil 3.6  $x_2 - t$  GrafiğiŞekil 3.7  $a_1 - t$  GrafiğiŞekil 3.8  $a_2 - t$  GrafiğiŞekil 3.9  $x_1$  için frekans cevabı

### 3.3. İNSAN MODELLERİ

Literatürde insan vücudunun dinamik bir sistem gibi modellenmesi ile ilgili birçok model bulunmaktadır. Bu konu ile ilgili olarak kimi modelleri Cho-Chung Liang, Chi-Feng Chiang 2006 yılında, literatürde kullanılan sistemleri parametreleri ile birlikte bir çalışmada toparlamıştır. Bu modellerden kimileri aşağıdaki gibidir.



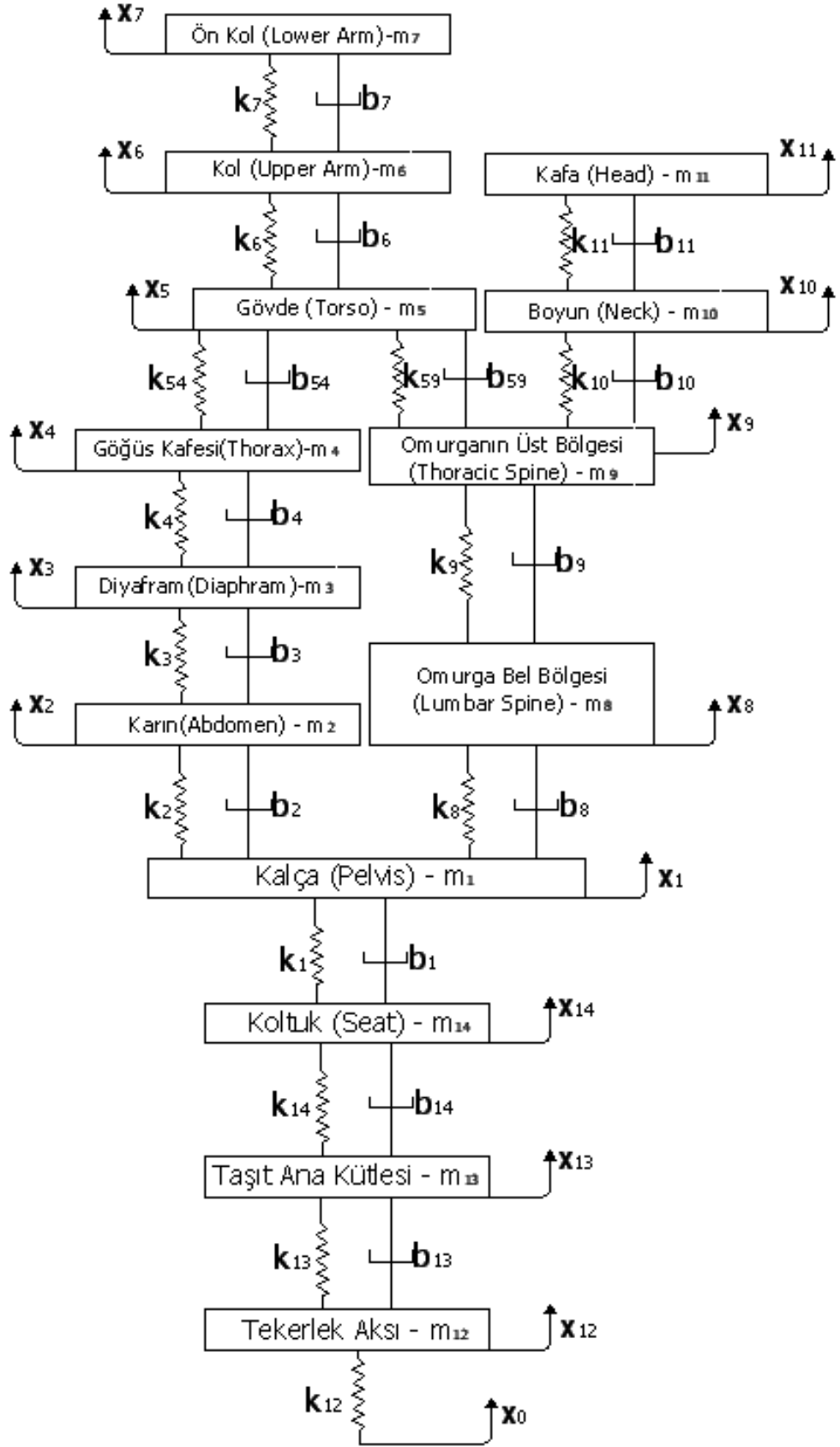


Şekil 3.14 Onbir serbestlik dereceli insan modeli (Qassem et. Al. – 1994) [Liang]

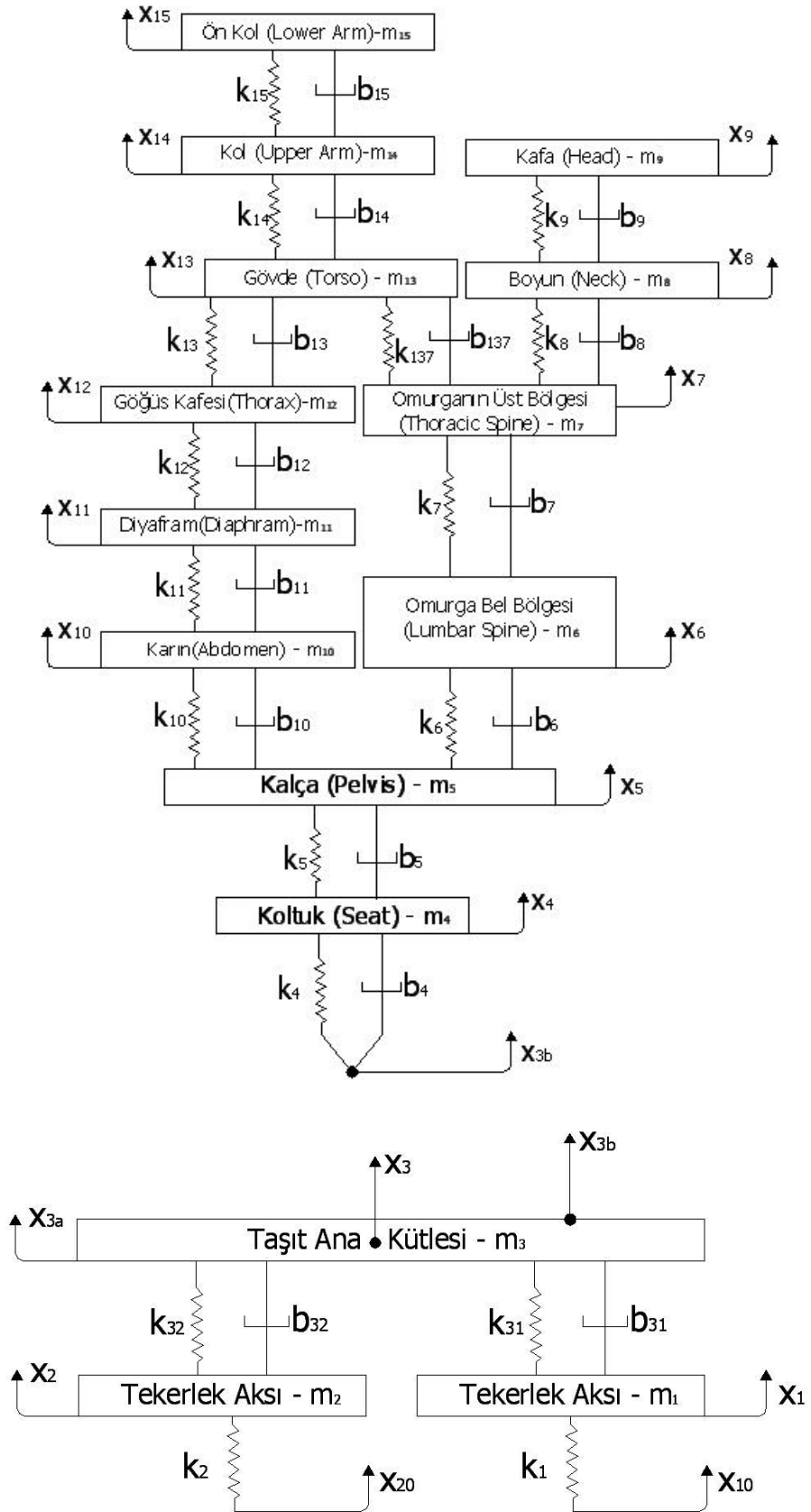
### 3.4. İNSAN VE TAŞIT MODELLERİNİN BİRLEŞTİRİLMESİ

Yukarıda açıklanan insan vücudunun dinamik bir sistem gibi düşünülerek oluşturulmuş sistemler, çeyrek taşıt, yarım taşıt ve tam taşıt modelleri ile birleştirilse aşağıdaki fiziksel modeller elde edilir.

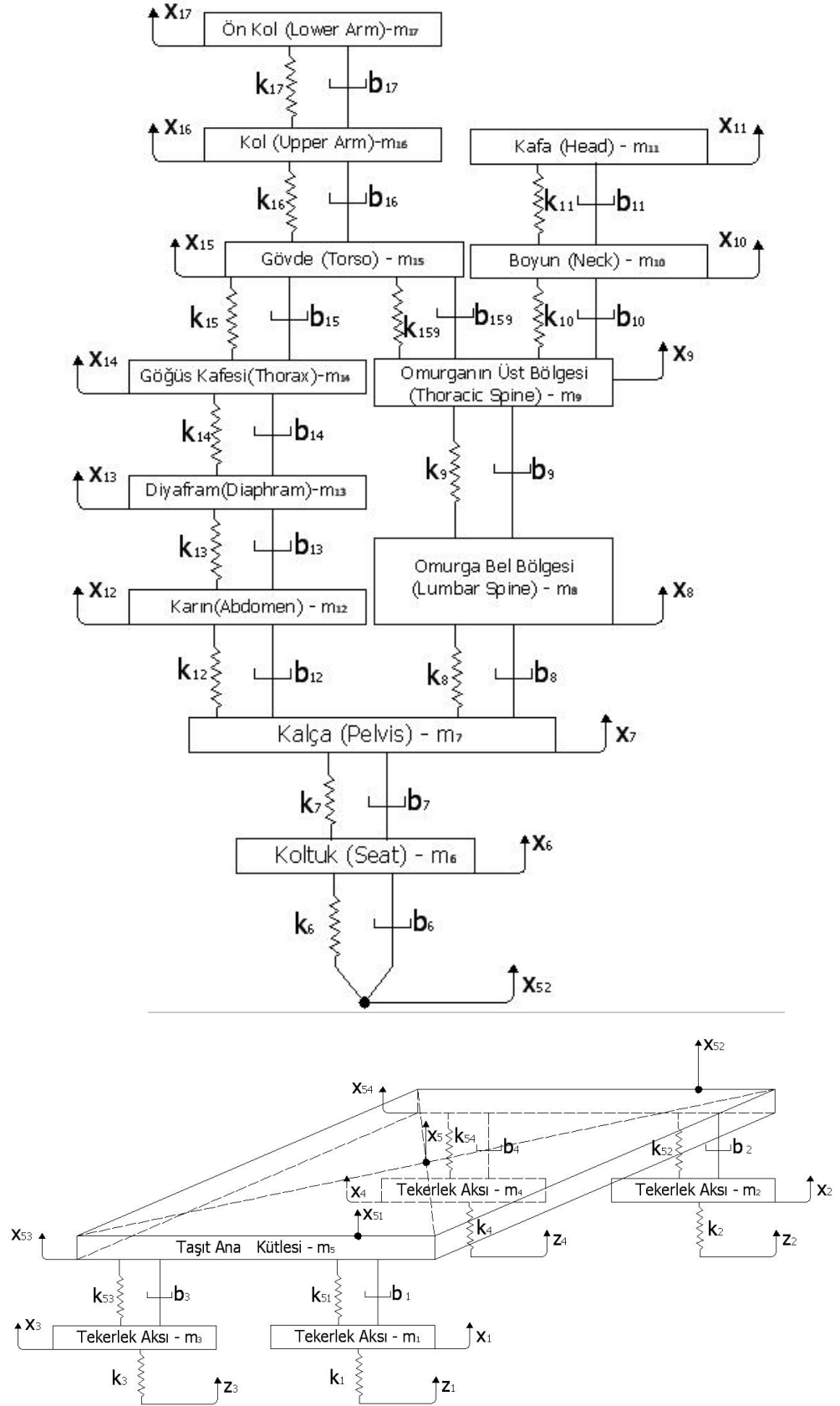
Bu tezde literatürde kullanılan taşıt modellerinin üzerine yukarıda gösterilmiş olan insan modellerinden Şekil 5.23 te gösteril model simülasyonun gerçekçi olması amacıyla seçilmiştir. Bu sayede vücudun tüm bölgeleri için ayrı ayrı frekans ve zaman cevapları alınabilmektedir.



Şekil 3.15 Simülasyon için seçilmiş ondört serbestlik dereceli insan ve çeyrek taşıt modeli



Şekil 3.16 Simülasyon için seçilmiş onaltı serbestlik dereceli insan ve yarım taşıt modeli



Şekil 3.17 Simülasyon için seçilmiş ondokuz serbestlik dereceli insan ve tam taşıt modeli

### 3.5. YOL PÜRÜZLÜLÜĞÜ

Literatürde yapılan araştırmalar sonucunda yol pürüzlülüğü hakkında yol kalitesine göre simülasyon yapma olanağı sağlanmıştır. Farklı yol kalitelerine göre standartlandırılmış bazı yol pürüzlülük indeksleri bulunmaktadır. Bunlardan en önemlisi IRI(International Roughness Index)'tir. Bu indekste yol profilleri rastgele titreşimlerin ve harmonik titreşimlerin birleştirilmesi ile oluşturulmaktadır. Buradaki titreşim yol pürüzlülüğüne olan etkisi yol kalitesi ile ilgili bir faktördür. Yol pürüzlülüğü şu şekilde ifade edilebilir;

$$H(l) = (1 - q) \cdot H_0(l) + q \cdot H_1(l) \quad (3.49)$$

Burada  $H_0(l)$  yolun rastgele titreşimlerini ifade eder ki PSD formu aşağıdaki gibidir.

$$G_{H_0}(\Omega) = C \cdot \Omega^{-w} \quad (3.50)$$

$$IRI = a \cdot \sqrt{C} \quad (3.51)$$

$$a = 2,21 \cdot e^{(-0,356\Delta w + 0,13(\Delta w)^2)} \quad (3.52)$$

$$\Delta w = w - 2 \quad (3.53)$$

Burada  $w=2$  olduğu düşünülürse, ki çoğu uygulamada bu şekilde alınır,  $a=2,21$  olduğu görülebilir.

Benzer şekilde  $H_1(l)$  (2.57) denkleminin harmonik kısmını oluşturur.

$$H_1(l) = A_d \cdot \cos(2\pi l / l_1) \quad (3.54)$$

$$A_d = \sqrt{2D_0 q / (1 - q)} \quad (3.55)$$

$$D_0 = C(2\pi)^{-w+1} (w-1)^{-1} (L_M^{w-1} - L_m^{w-1}) \quad (3.56)$$

Yukarıda görüldüğü gibi birçok farklı parametre ile çok farklı yol tipleri tanımlanabilir. Burada son halde elde edilecek olan yol profili homojen ve gaussian niteliktedir. Bu tezde yol pürüzlülüğü elde etmek amaçlı kullanılan parametreler EK B'de verilmiştir. Daha farklı bir yol pürüzlülüğü elde etmek için "KROPAC O., MUCKA P., 2005, Be Careful when using the International Roughness Index as an indicator of the road un evenness, Journal of Sound and Vibration 287 (2007) 989-1003" isimli bildirisine başvurulabilir.



## 4. BULGULAR

### 4.1. ÇEYREK TAŞIT İLE SÜRÜCÜ

Yukarıda fiziksel modeli gösterilmiş olan çeyrek taşıt model ile birleştirilmiş olan insan modelinin Lagrange denklemleri kullanılarak hareket denklemleri elde edilmeye çalışılırsa aşağıdaki sonuçlar ortaya çıkmaktadır.

$$\begin{aligned}
K &= \frac{1}{2}m_1 \cdot \dot{x}_1^2 + \frac{1}{2}m_2 \cdot \dot{x}_2^2 + \frac{1}{2}m_3 \cdot \dot{x}_3^2 + \frac{1}{2}m_4 \cdot \dot{x}_4^2 + \frac{1}{2}m_5 \cdot \dot{x}_5^2 \\
&+ \frac{1}{2}m_6 \cdot \dot{x}_6^2 + \frac{1}{2}m_7 \cdot \dot{x}_7^2 + \frac{1}{2}m_8 \cdot \dot{x}_8^2 + \frac{1}{2}m_9 \cdot \dot{x}_9^2 + \frac{1}{2}m_{10} \cdot \dot{x}_{10}^2 \\
&+ \frac{1}{2}m_{11} \cdot \dot{x}_{11}^2 + \frac{1}{2}m_{12} \cdot \dot{x}_{12}^2 + \frac{1}{2}m_{13} \cdot \dot{x}_{13}^2 + \frac{1}{2}m_{14} \cdot \dot{x}_{14}^2
\end{aligned} \tag{4.1}$$

$$\begin{aligned}
P &= \frac{1}{2}k_1(x_1 - x_{14})^2 + \frac{1}{2}k_2(x_2 - x_1)^2 + \frac{1}{2}k_3(x_3 - x_2)^2 + \frac{1}{2}k_4(x_4 - x_3)^2 \\
&+ \frac{1}{2}k_{54}(x_5 - x_4)^2 + \frac{1}{2}k_{59}(x_5 - x_9)^2 + \frac{1}{2}k_6(x_6 - x_5)^2 + \frac{1}{2}k_7(x_7 - x_6)^2 \\
&+ \frac{1}{2}k_8(x_8 - x_1)^2 + \frac{1}{2}k_9(x_9 - x_8)^2 + \frac{1}{2}k_{10}(x_{10} - x_9)^2 + \frac{1}{2}k_{11}(x_{11} - x_{10})^2 \\
&+ \frac{1}{2}k_{12}(x_{12} - x_0)^2 + \frac{1}{2}k_{13}(x_{13} - x_{12})^2 + \frac{1}{2}k_{14}(x_{14} - x_{13})^2
\end{aligned} \tag{4.2}$$

$$\begin{aligned}
D &= \frac{1}{2}b_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_{14})^2 + \frac{1}{2}b_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1)^2 + \frac{1}{2}b_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_2)^2 + \frac{1}{2}b_4(\dot{x}_4 - \dot{x}_3)^2 \\
&+ \frac{1}{2}b_{54}(\dot{x}_5 - \dot{x}_4)^2 + \frac{1}{2}b_{59}(\dot{x}_5 - \dot{x}_9)^2 + \frac{1}{2}b_6(\dot{x}_6 - \dot{x}_5)^2 + \frac{1}{2}b_7(\dot{x}_7 - \dot{x}_6)^2 \\
&+ \frac{1}{2}b_8(\dot{x}_8 - \dot{x}_1)^2 + \frac{1}{2}b_9(\dot{x}_9 - \dot{x}_8)^2 + \frac{1}{2}b_{10}(\dot{x}_{10} - \dot{x}_9)^2 + \frac{1}{2}b_{11}(\dot{x}_{11} - \dot{x}_{10})^2 \\
&+ \frac{1}{2}b_{13}(\dot{x}_{13} - \dot{x}_{12})^2 + \frac{1}{2}b_{14}(\dot{x}_{14} - \dot{x}_{13})^2
\end{aligned} \tag{4.3}$$

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_1} \right) &= m_1 \cdot \ddot{x}_1, & \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_2} \right) &= m_2 \cdot \ddot{x}_2, & \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_3} \right) &= m_3 \cdot \ddot{x}_3, \\
\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_4} \right) &= m_4 \cdot \ddot{x}_4, & \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_5} \right) &= m_5 \cdot \ddot{x}_5, & \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_6} \right) &= m_6 \cdot \ddot{x}_6, \\
\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_7} \right) &= m_7 \cdot \ddot{x}_7, & \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_8} \right) &= m_8 \cdot \ddot{x}_8, & \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_9} \right) &= m_9 \cdot \ddot{x}_9, \\
\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_{10}} \right) &= m_{10} \cdot \ddot{x}_{10}, & \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_{11}} \right) &= m_{11} \cdot \ddot{x}_{11}, & \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_{12}} \right) &= m_{12} \cdot \ddot{x}_{12}, \\
\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_{13}} \right) &= m_{13} \cdot \ddot{x}_{13}, & \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_{14}} \right) &= m_{14} \cdot \ddot{x}_{14},
\end{aligned} \tag{4.4}$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_1} = k_1(x_1 - x_{14}) - k_2(x_2 - x_1) - k_8(x_8 - x_1) \tag{4.5}$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_2} = k_2(x_2 - x_1) - k_3(x_3 - x_2) \tag{4.6}$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_3} = k_3(x_3 - x_2) - k_4(x_4 - x_3) \tag{4.7}$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_4} = k_4(x_4 - x_3) - k_{54}(x_5 - x_4) \tag{4.8}$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_5} = k_{54}(x_5 - x_4) + k_{59}(x_5 - x_9) - k_6(x_6 - x_5) \tag{4.9}$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_6} = k_6(x_6 - x_5) - k_7(x_7 - x_6) \tag{4.10}$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_7} = k_7(x_7 - x_6) \tag{4.11}$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_8} = k_8(x_8 - x_1) - k_9(x_9 - x_8) \tag{4.12}$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_9} = k_9(x_9 - x_8) - k_{10}(x_{10} - x_9) \tag{4.13}$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_{10}} = k_{10}(x_{10} - x_9) - k_{11}(x_{11} - x_{10}) \tag{4.14}$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_{11}} = k_{11}(x_{11} - x_{10}) \quad (4.15)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_{12}} = k_{12}(x_{12} - x_0) - k_{13}(x_{13} - x_{12}) \quad (4.16)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_{13}} = k_{13}(x_{13} - x_{12}) - k_{14}(x_{14} - x_{13}) \quad (4.17)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_{14}} = k_{14}(x_{14} - x_{13}) - k_1(x_1 - x_{14}) \quad (4.18)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_1} = b_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_{14}) - b_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - b_8(\dot{x}_8 - \dot{x}_1) \quad (4.19)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_2} = b_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - b_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) \quad (4.20)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_3} = b_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) - b_4(\dot{x}_4 - \dot{x}_3) \quad (4.21)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_4} = b_4(\dot{x}_4 - \dot{x}_3) - b_{54}(\dot{x}_5 - \dot{x}_4) \quad (4.22)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_5} = b_{54}(\dot{x}_5 - \dot{x}_4) + b_{59}(\dot{x}_5 - \dot{x}_9) - b_6(\dot{x}_2 - \dot{x}_5) \quad (4.23)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_6} = b_6(\dot{x}_6 - \dot{x}_5) - b_7(\dot{x}_7 - \dot{x}_6) \quad (4.24)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_7} = b_7(\dot{x}_7 - \dot{x}_6) \quad (4.25)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_8} = b_8(\dot{x}_8 - \dot{x}_1) - b_9(\dot{x}_9 - \dot{x}_8) \quad (4.26)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_9} = b_9(\dot{x}_9 - \dot{x}_8) - b_{10}(\dot{x}_{10} - \dot{x}_9) \quad (4.27)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{10}} = b_{10}(\dot{x}_{10} - \dot{x}_9) - b_{11}(\dot{x}_{11} - \dot{x}_{10}) \quad (4.28)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{11}} = b_{11}(\dot{x}_{11} - \dot{x}_{10}) \quad (4.29)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{12}} = -b_{13}(\dot{x}_{13} - \dot{x}_{12}) \quad (4.30)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{13}} = b_{13}(\dot{x}_{13} - \dot{x}_{12}) - b_{14}(\dot{x}_{14} - \dot{x}_{13}) \quad (4.31)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{14}} = b_{14}(\dot{x}_{14} - \dot{x}_{13}) - b_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_{14}) \quad (4.32)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_1} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_1} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_1} &= 0 \\ \Rightarrow m_1 \cdot \ddot{x}_1 + k_1(x_1 - x_{14}) - k_2(x_2 - x_1) - k_8(x_8 - x_1) \\ + b_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_{14}) - b_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - b_8(\dot{x}_8 - \dot{x}_1) &= 0 \end{aligned} \quad (4.33)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_2} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_2} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_2} &= 0 \\ \Rightarrow m_2 \cdot \ddot{x}_2 + k_2(x_2 - x_1) - k_3(x_3 - x_2) + b_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - b_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) &= 0 \end{aligned} \quad (4.34)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_3} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_3} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_3} &= 0 \\ \Rightarrow m_3 \cdot \ddot{x}_3 + k_3(x_3 - x_2) - k_4(x_4 - x_3) + b_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) - b_4(\dot{x}_4 - \dot{x}_3) &= 0 \end{aligned} \quad (4.35)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_4} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_4} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_4} &= 0 \\ \Rightarrow m_4 \cdot \ddot{x}_4 + k_4(x_4 - x_3) - k_{54}(x_5 - x_4) + b_4(\dot{x}_4 - \dot{x}_3) - b_{54}(\dot{x}_5 - \dot{x}_4) &= 0 \end{aligned} \quad (4.36)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_5} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_5} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_5} &= 0 \\ \Rightarrow m_5 \cdot \ddot{x}_5 + k_{54}(x_5 - x_4) + k_{59}(x_5 - x_9) - k_6(x_6 - x_5) \\ + b_{54}(\dot{x}_5 - \dot{x}_4) + b_{59}(\dot{x}_5 - \dot{x}_9) - b_6(\dot{x}_2 - \dot{x}_5) &= 0 \end{aligned} \quad (4.37)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_6} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_6} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_6} &= 0 \\ \Rightarrow m_6 \cdot \ddot{x}_6 + k_6(x_6 - x_5) - k_7(x_7 - x_6) + b_6(\dot{x}_6 - \dot{x}_5) - b_7(\dot{x}_7 - \dot{x}_6) &= 0 \end{aligned} \quad (4.38)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_7} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_7} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_7} = 0 \Rightarrow m_7 \cdot \ddot{x}_7 + k_7(x_7 - x_6) + b_7(\dot{x}_7 - \dot{x}_6) = 0 \quad (4.39)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_8} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_8} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_8} &= 0 \\ \Rightarrow m_8 \cdot \ddot{x}_8 + k_8(x_8 - x_1) - k_9(x_9 - x_8) + b_8(\dot{x}_8 - \dot{x}_1) - b_9(\dot{x}_9 - \dot{x}_8) &= 0 \end{aligned} \quad (4.40)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_9} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_9} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_9} &= 0 \\ \Rightarrow m_9 \cdot \ddot{x}_9 + k_9(x_9 - x_8) - k_{10}(x_{10} - x_9) + b_9(\dot{x}_9 - \dot{x}_8) - b_{10}(\dot{x}_{10} - \dot{x}_9) &= 0 \end{aligned} \quad (4.41)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_{10}} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_{10}} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{10}} &= 0 \\ \Rightarrow m_{10} \cdot \ddot{x}_{10} + k_{10}(x_{10} - x_9) - k_{11}(x_{11} - x_{10}) \\ + b_{10}(\dot{x}_{10} - \dot{x}_9) - b_{11}(\dot{x}_{11} - \dot{x}_{10}) &= 0 \end{aligned} \quad (4.42)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_{11}} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_{11}} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{11}} &= 0 \\ \Rightarrow m_{11} \cdot \ddot{x}_{11} + k_{11}(x_{11} - x_{10}) + b_{11}(\dot{x}_{11} - \dot{x}_{10}) &= 0 \end{aligned} \quad (4.43)$$

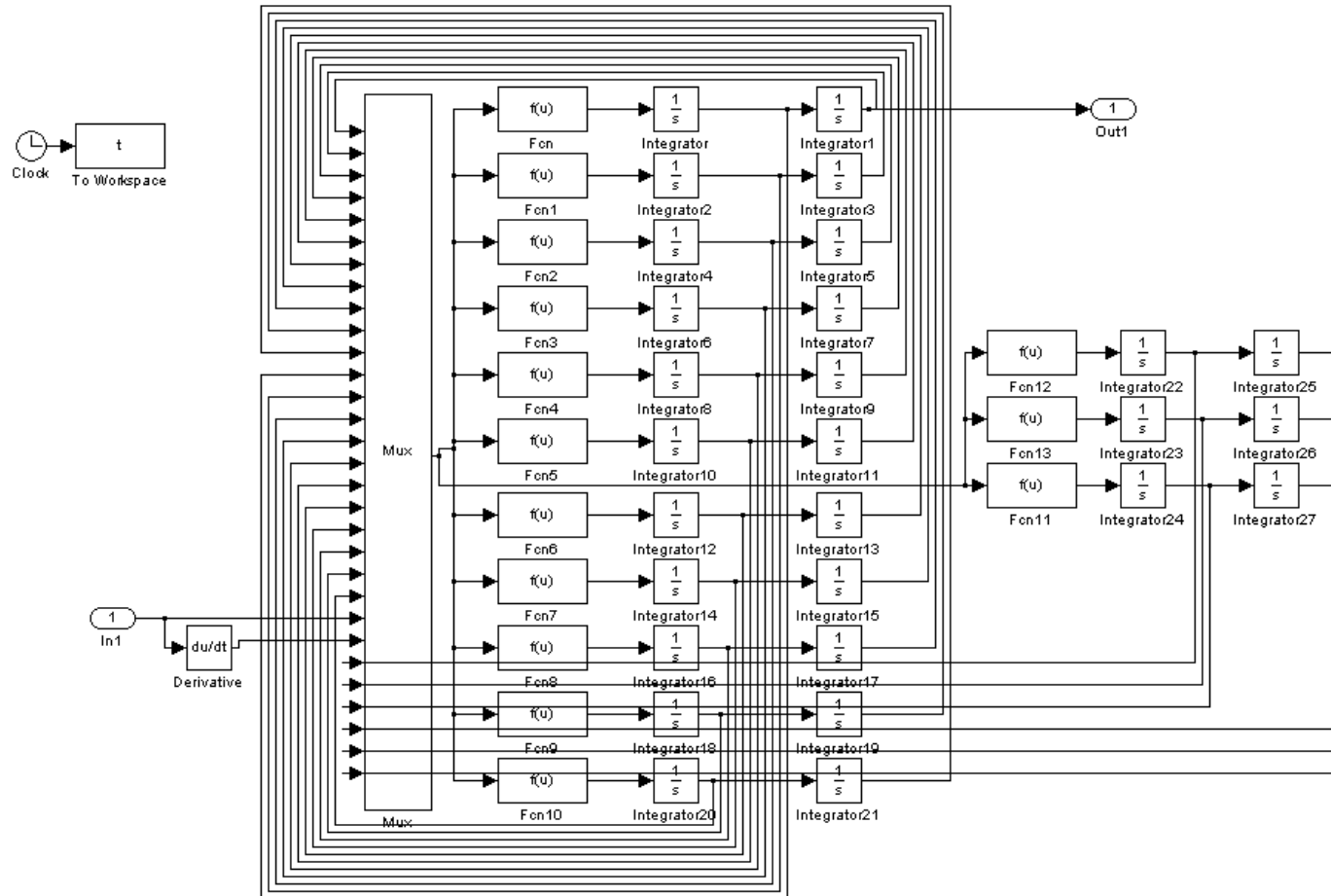
$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_{12}} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_{12}} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{12}} &= 0 \\ \Rightarrow m_{12} \cdot \ddot{x}_{12} + k_{12}(x_{12} - x_0) - k_{13}(x_{13} - x_{12}) - b_{13}(\dot{x}_{13} - \dot{x}_{12}) &= 0 \end{aligned} \quad (4.44)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_{13}} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_{13}} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{13}} &= 0 \\ \Rightarrow m_{13} \cdot \ddot{x}_{13} + k_{13}(x_{13} - x_{12}) - k_{14}(x_{14} - x_{13}) \\ + b_{13}(\dot{x}_{13} - \dot{x}_{12}) - b_{14}(\dot{x}_{14} - \dot{x}_{13}) &= 0 \end{aligned} \quad (4.45)$$

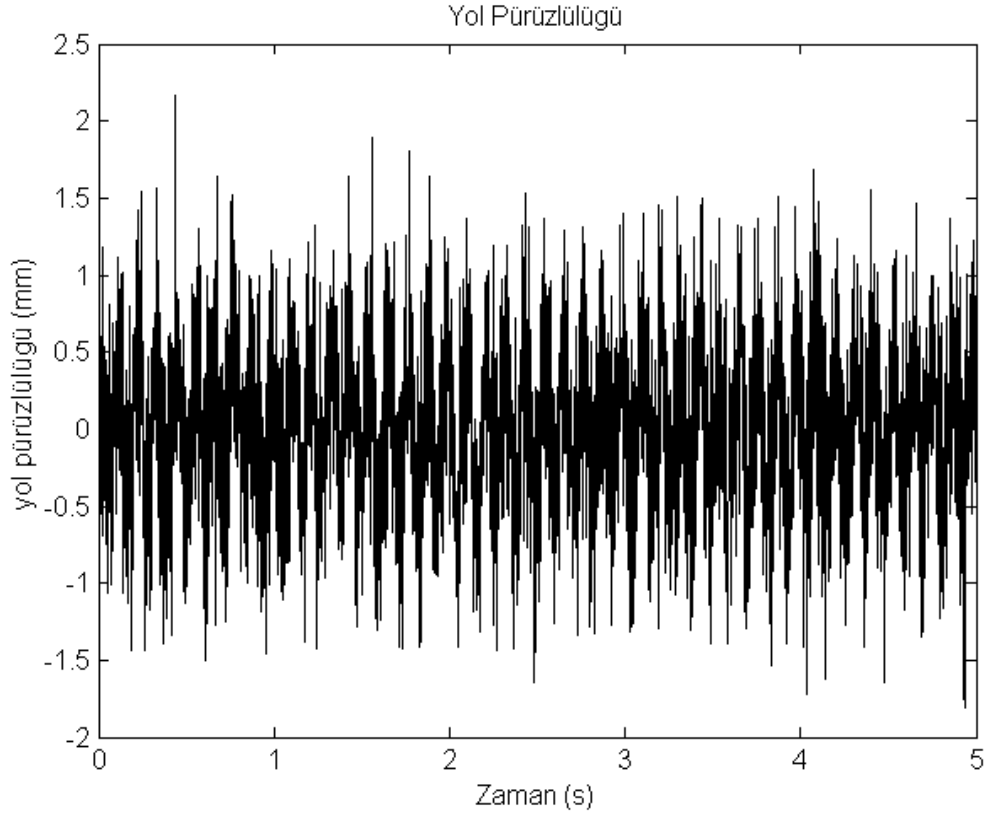
$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_{14}} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_{14}} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{14}} &= 0 \\ \Rightarrow m_{14} \cdot \ddot{x}_{14} + k_{14}(x_{14} - x_{13}) - k_1(x_1 - x_{14}) + b_{14}(\dot{x}_{14} - \dot{x}_{13}) - b_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_{14}) &= 0 \end{aligned} \quad (4.46)$$

Yukarıda elde edilen hareket denklemleri matlab simulink aracılığıyla simüle edilirse aşağıdaki blok diyagramı oluşturulmalıdır. Oluşturulan blok diyagramı Tablo 3.1'deki gibidir.

**Tablo 4.1** Matlab'te çeyrek taşıt ve insan modeli için hazırlanmış blok diyagramı

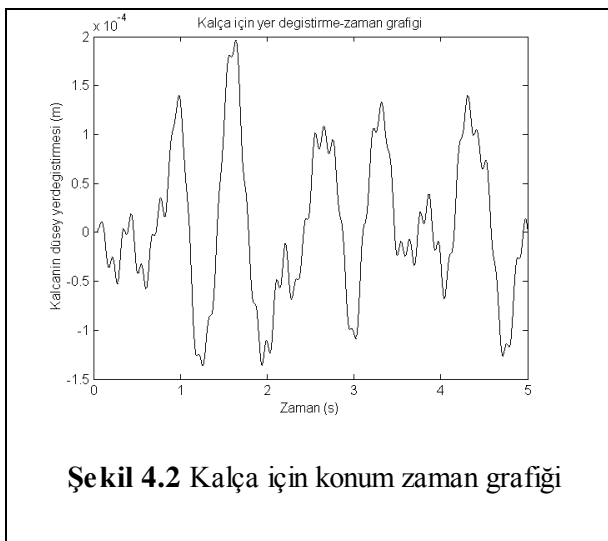


Taşıtm aşağıda verilen grafikteki gibi bir yol pürüzlülüğüne maruz kaldığı düşünölsün. Bu durumda aşağıdaki grafik modele girdi olarak girilecektir.

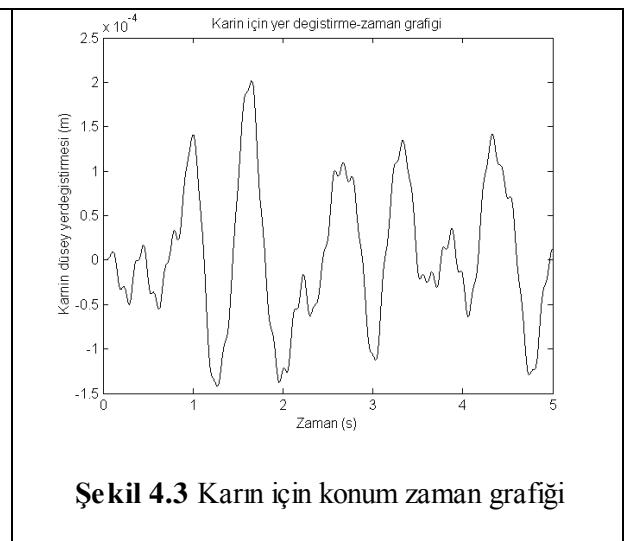


Şekil 4.1 Sistem girişı

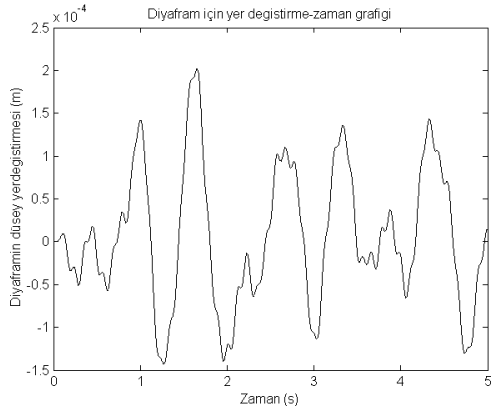
Sonuçta matlab simulinkte ilgili parametreler [EK A1] girilip simölasyon yapılır ise aşağıdaki zaman ve frekans cevapları elde edilir.



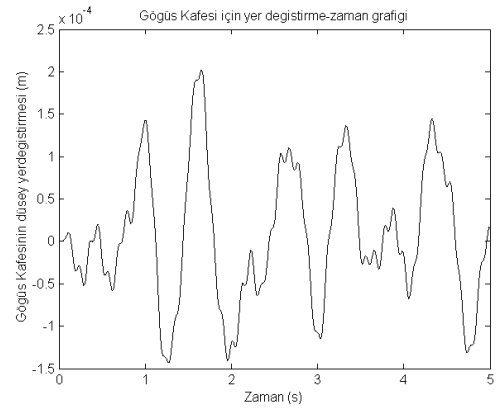
Şekil 4.2 Kalça için konum zaman grafiği



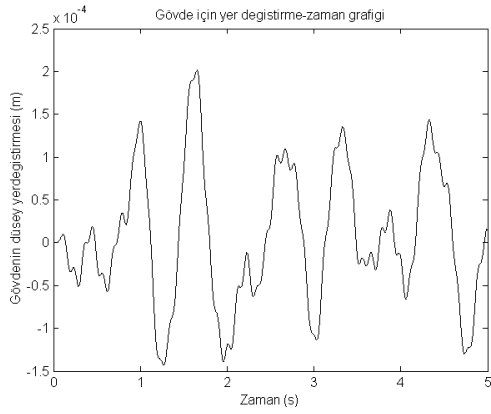
Şekil 4.3 Karn için konum zaman grafiği



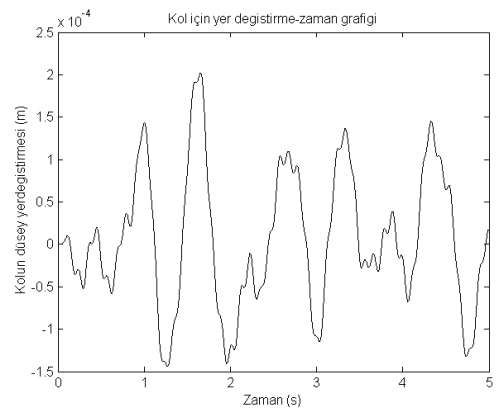
**Şekil 4.4** Diyafram için konum zaman grafiği



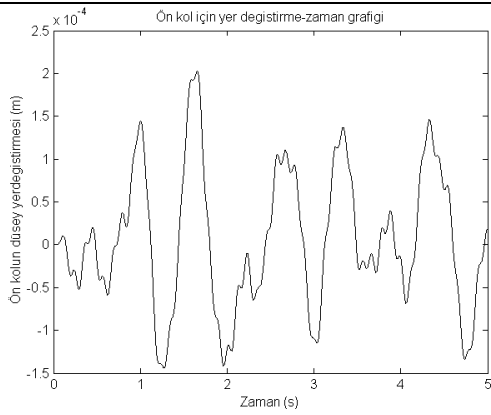
**Şekil 4.5** Göğüs Kafesi için konum zaman grafiği



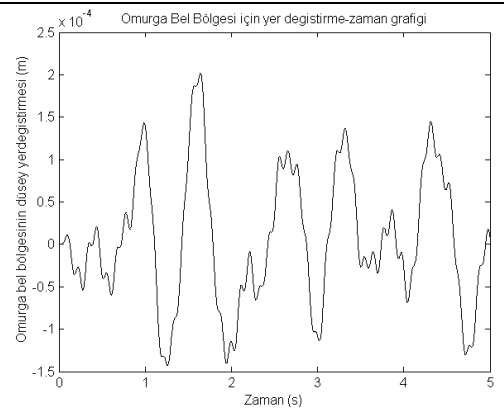
**Şekil 4.6** Gövde için konum zaman grafiği



**Şekil 4.7** Kol için konum zaman grafiği

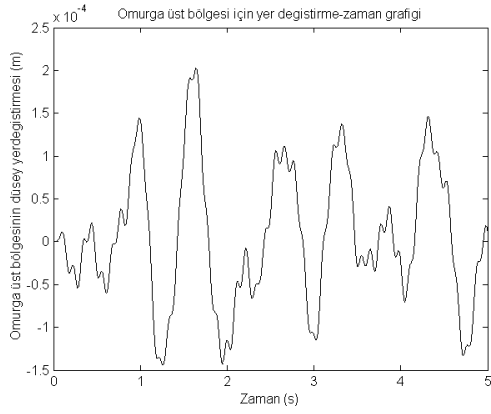


**Şekil 4.8** Ön kol için konum zaman grafiği

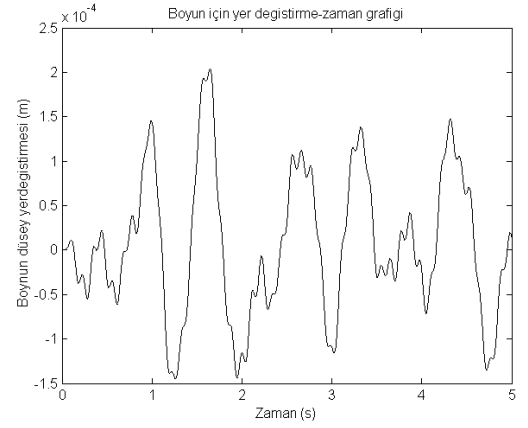


**Şekil 4.9** Omurga bel bölgesi için konum zaman grafiği

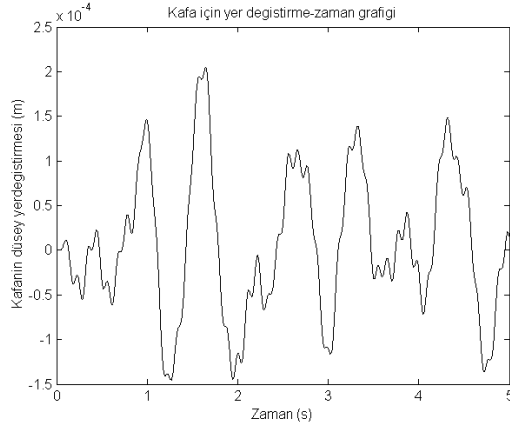




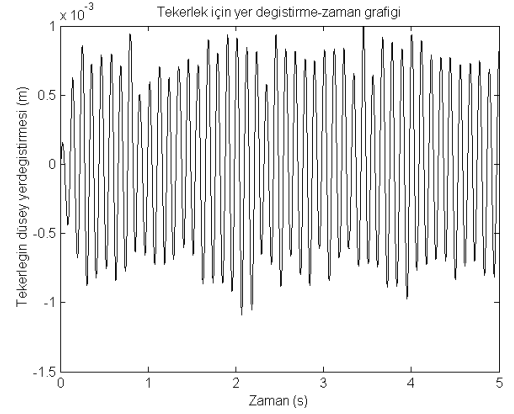
**Şekil 4.10** Omurga üst bölge için konum zaman grafiği



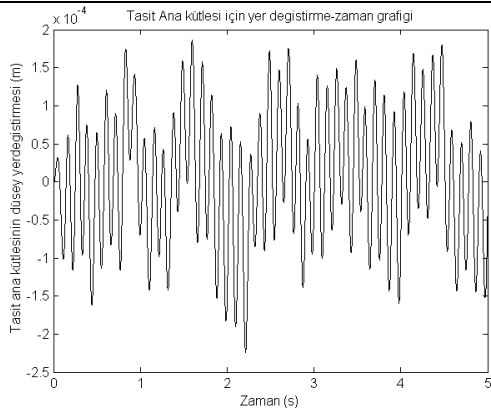
**Şekil 4.11** Boyun için konum zaman grafiği



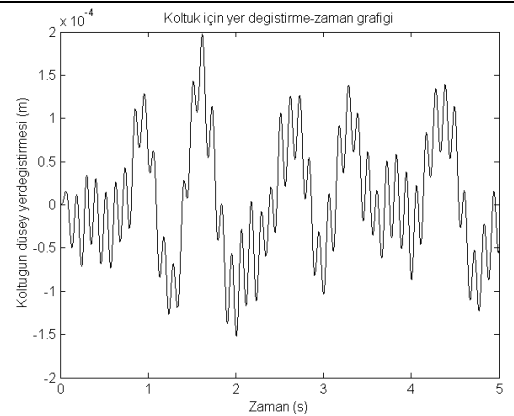
**Şekil 4.12** Kafa için konum zaman grafiği



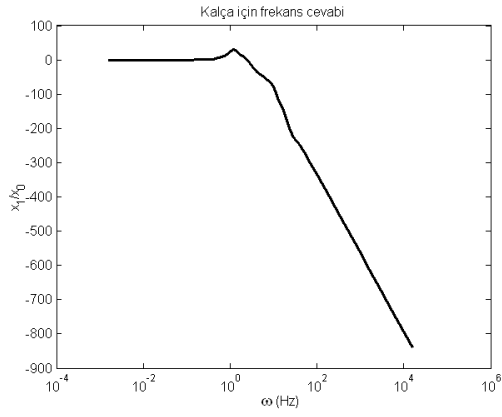
**Şekil 4.13** Tekerlek için konum zaman grafiği



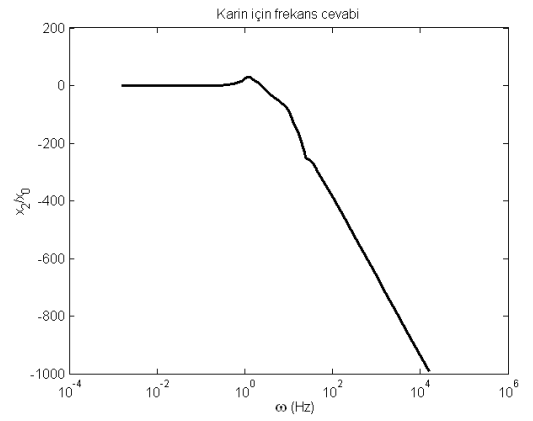
**Şekil 4.14** Taşıt ana gövdesi için konum zaman grafiği



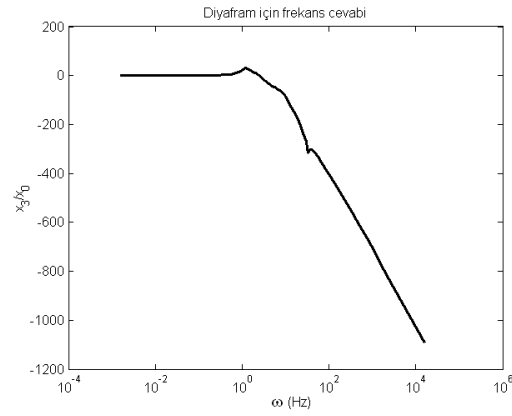
**Şekil 4.15** Koltuk için konum zaman grafiği



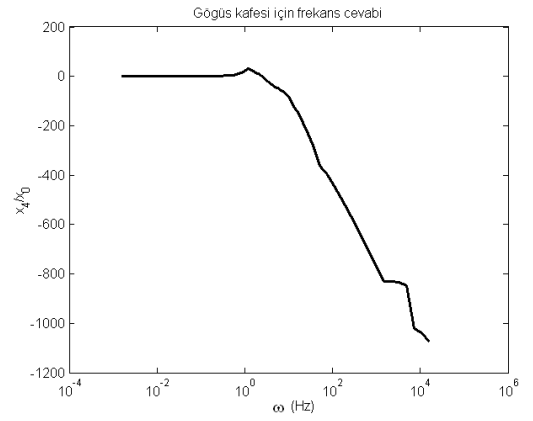
**Şekil 4.16** Kalça için frekans cevabı



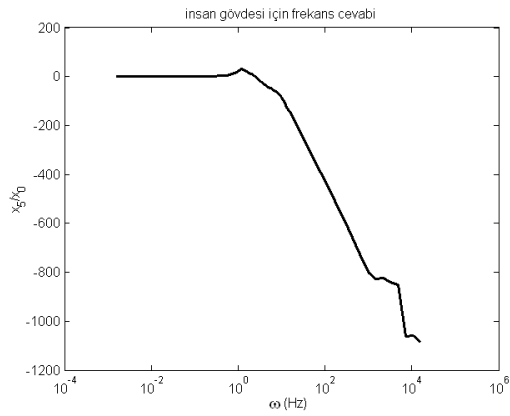
**Şekil 4.17** Karın için frekans cevabı



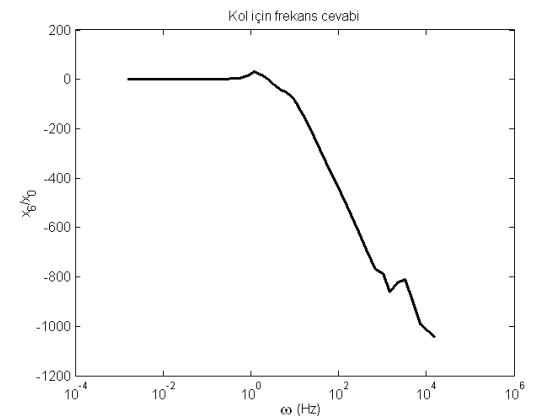
**Şekil 4.18** Diyafram için frekans cevabı



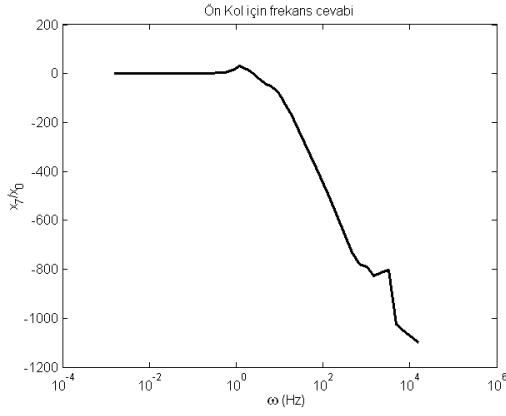
**Şekil 4.19** Göğüs Kafesi için frekans cevabı



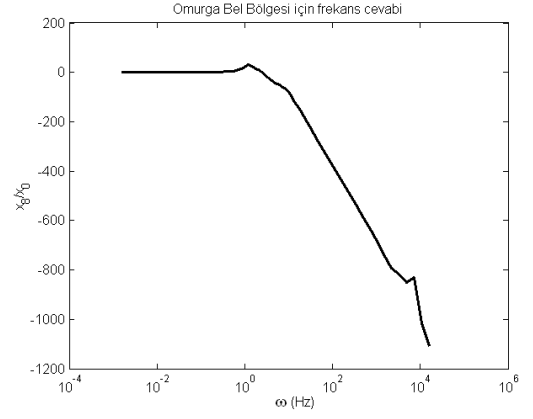
**Şekil 4.20** İnsan Gövdesi için frekans cevabı



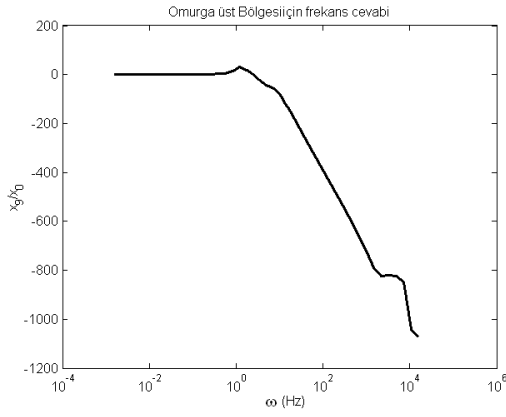
**Şekil 4.21** Kol için frekans cevabı



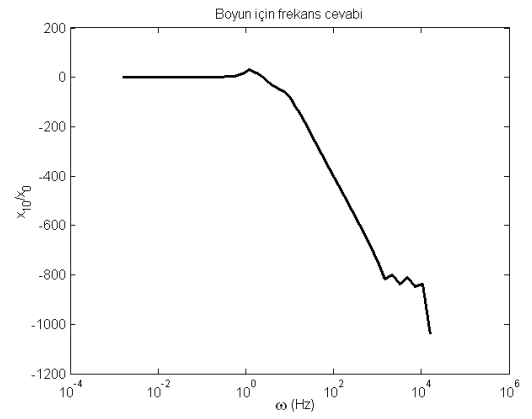
Şekil 4.22 Ön kol için frekans cevabı



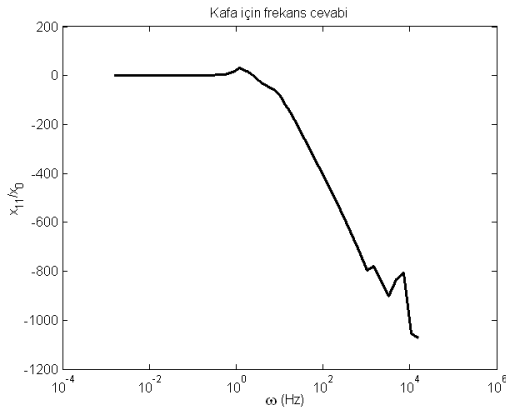
Şekil 4.23 Omurga bel bölgesi için frekans cevabı



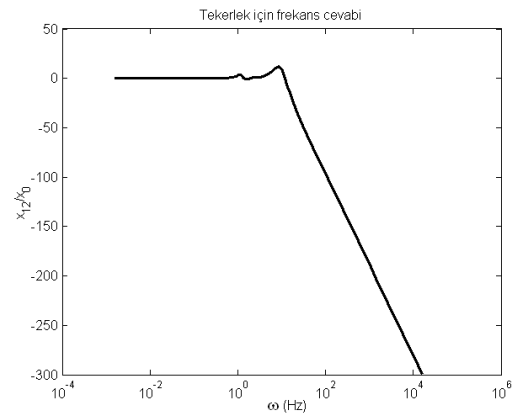
Şekil 4.24 Omurga üst bölge için frekans cevabı



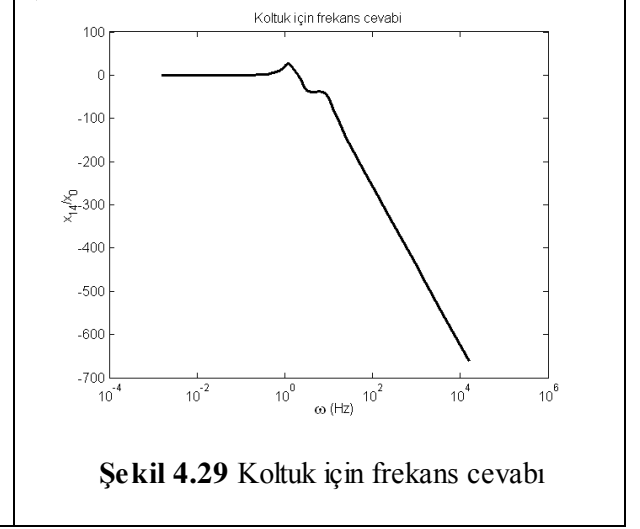
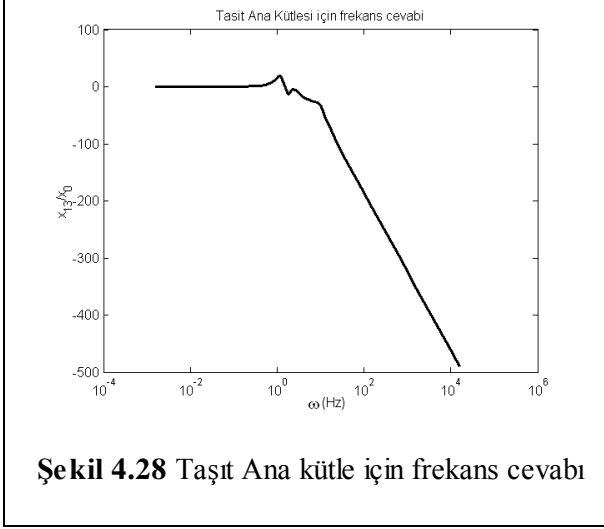
Şekil 4.25 Boyun için frekans cevabı



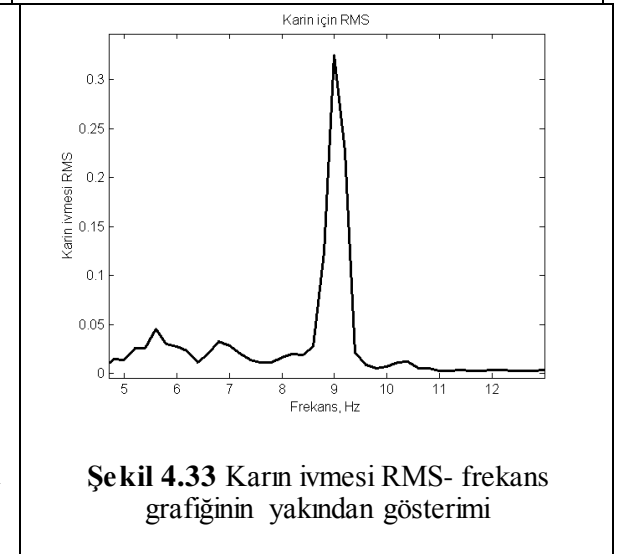
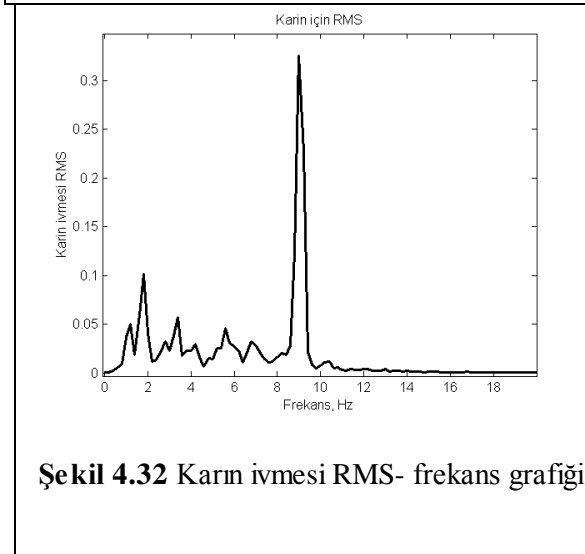
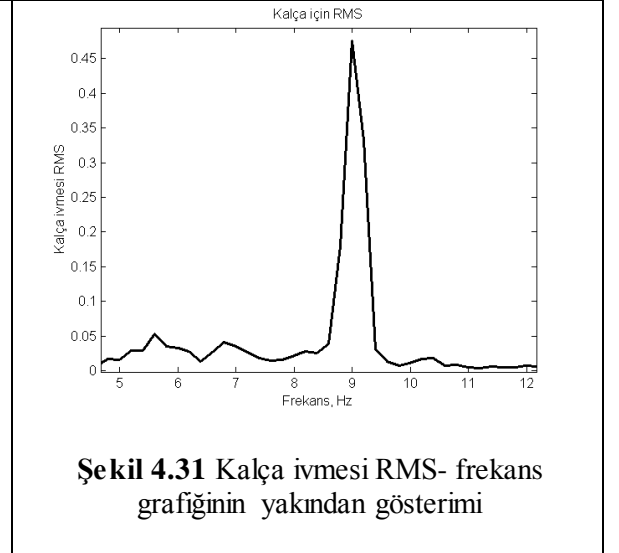
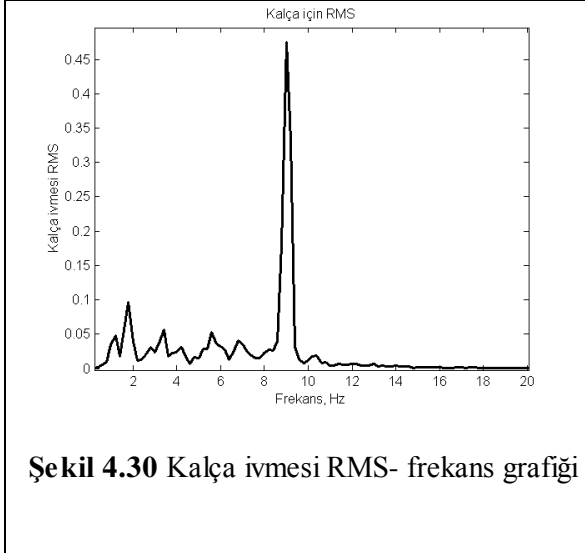
Şekil 4.26 Kafa için frekans cevabı

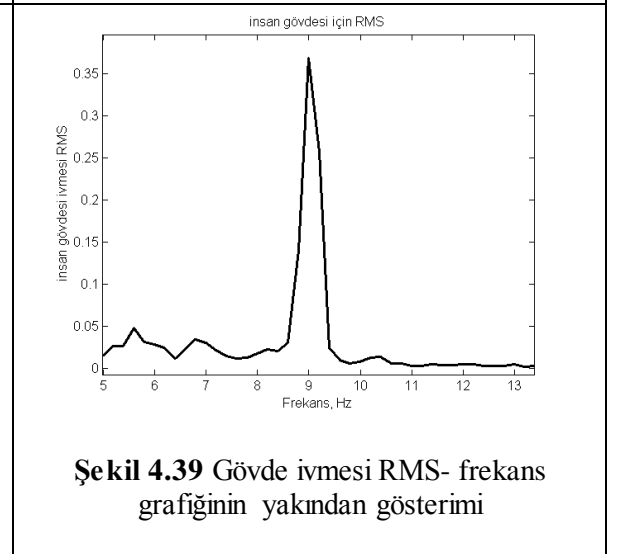
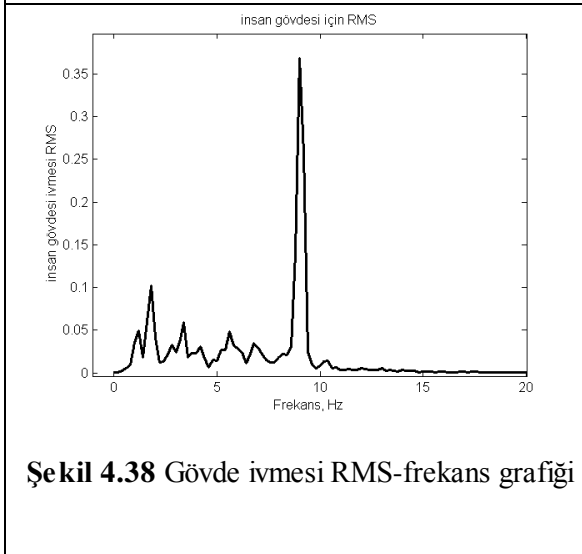
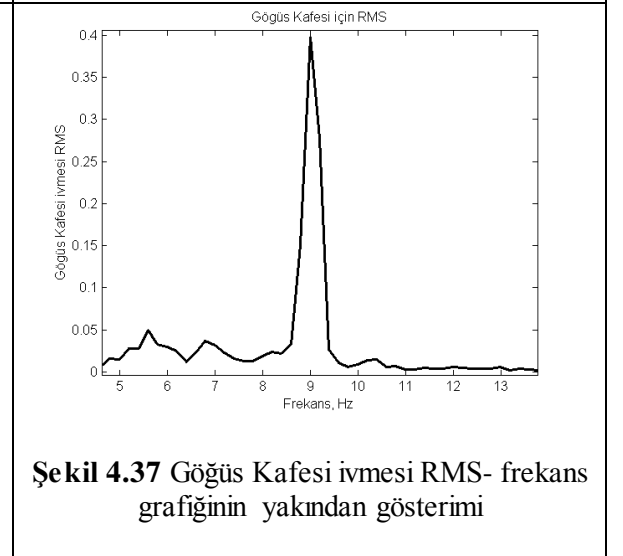
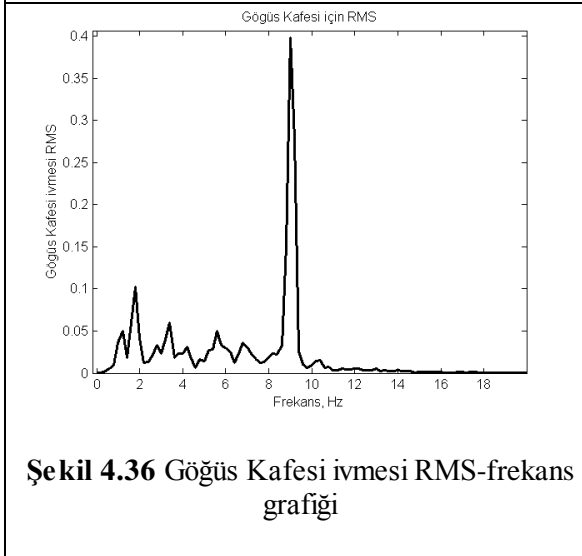
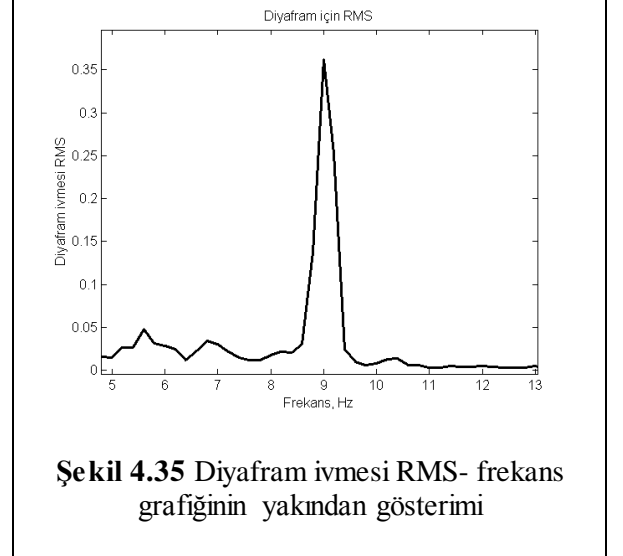
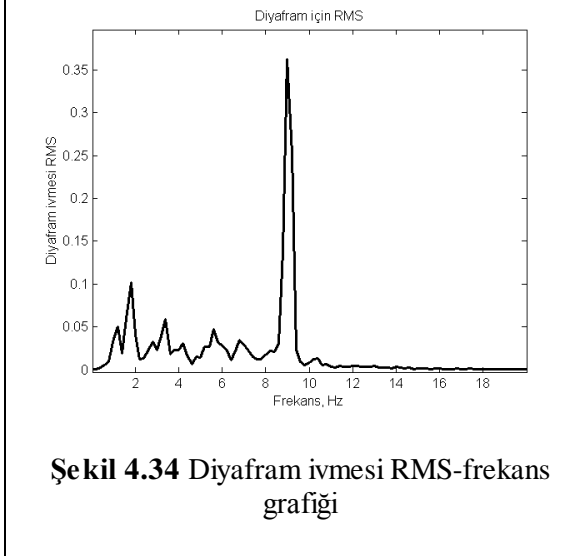


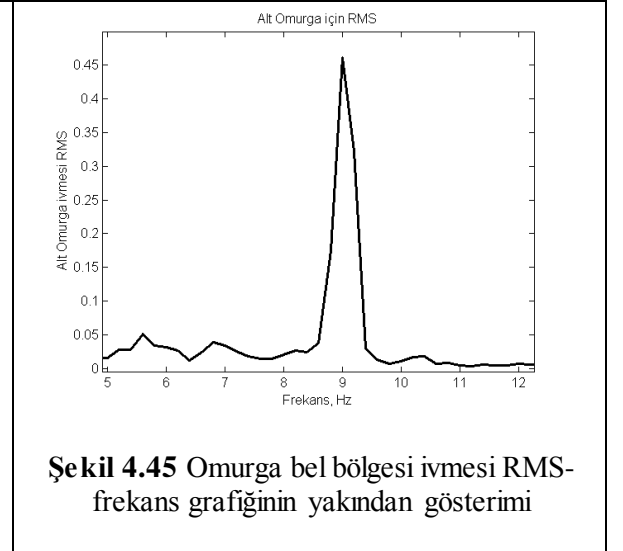
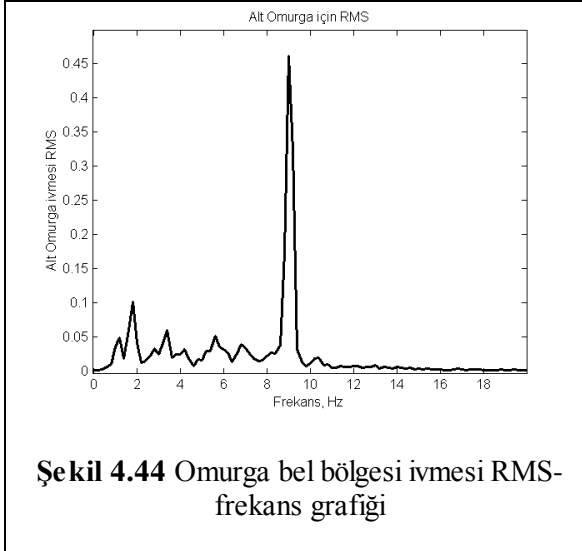
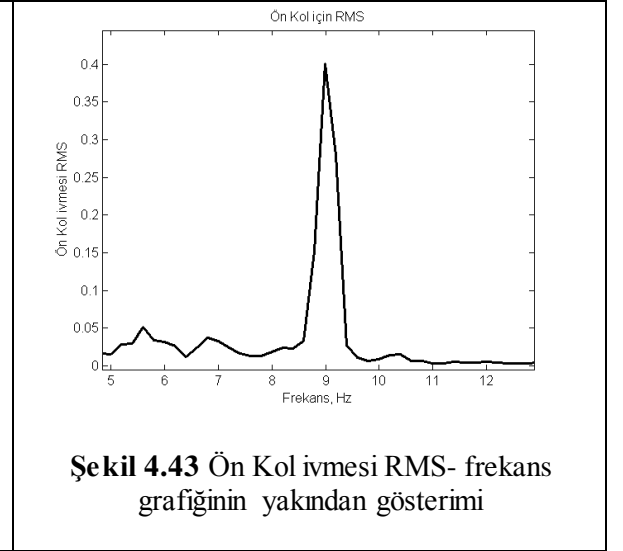
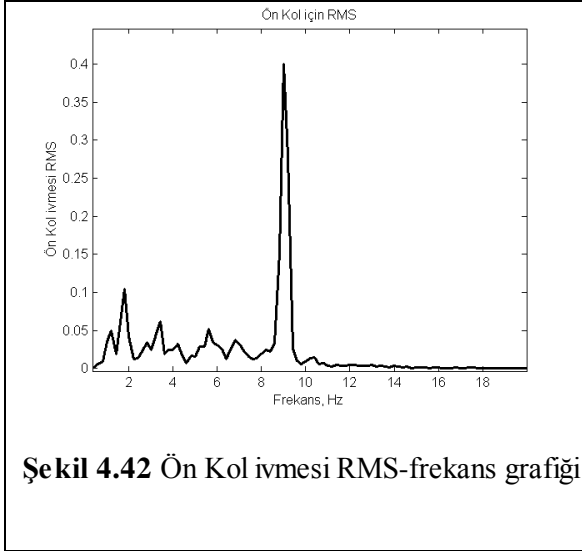
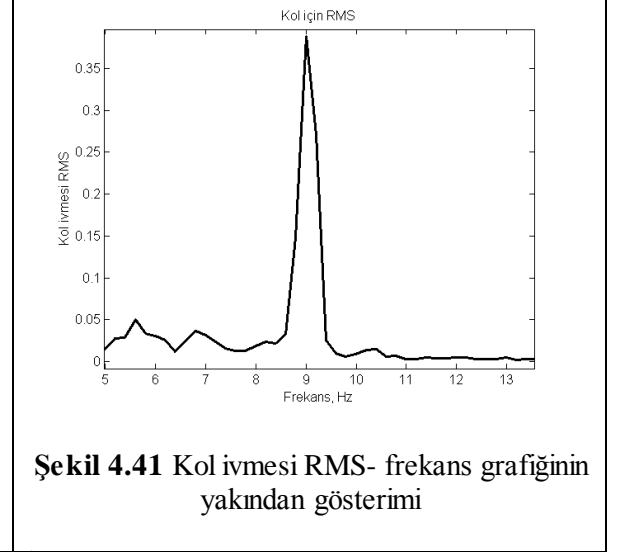
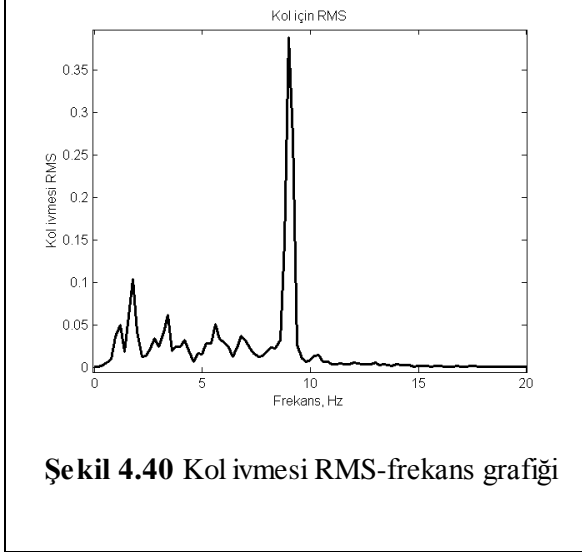
Şekil 4.27 Tekerlek için frekans cevabı

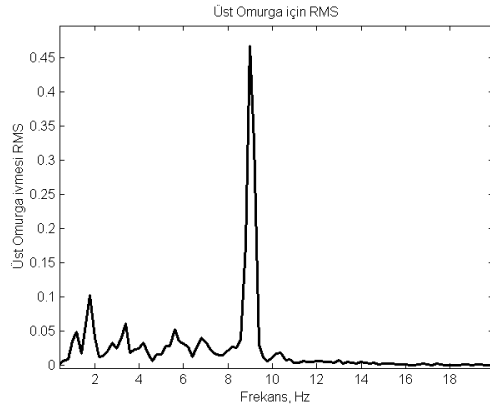


Elde edilen grafikleri ilgili ISO standardındaki ile karşılaştırmak için bu grafiklerin ivme RMS-frekans cevapları halindeki gösterimleri aşağıdaki gibidir.

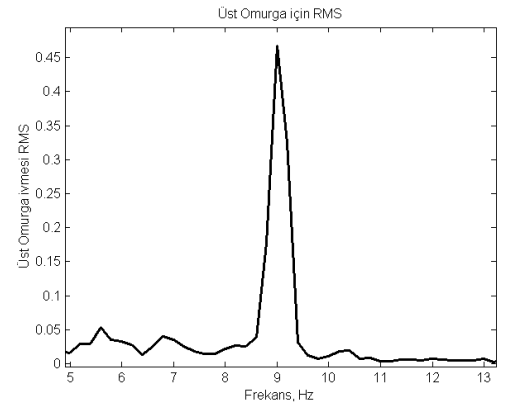




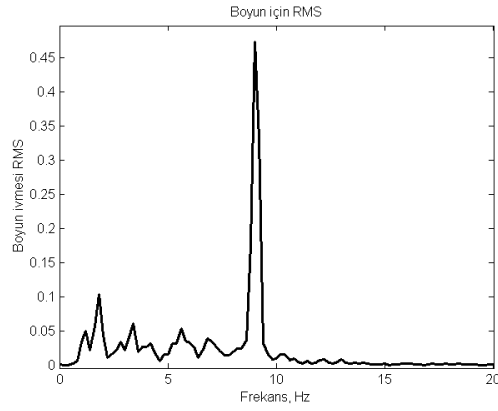




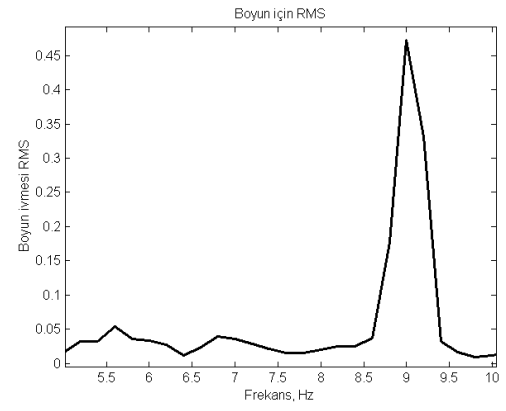
**Şekil 4.46** Omurga üst bölgesi ivmesi RMS-frekans grafiği



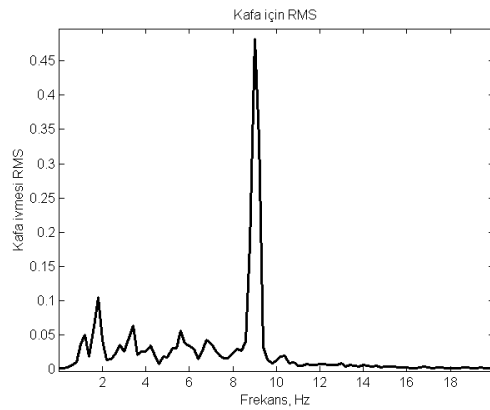
**Şekil 4.47** Omurga üst bölgesi ivmesi RMS-frekans grafiğinin yakından gösterimi



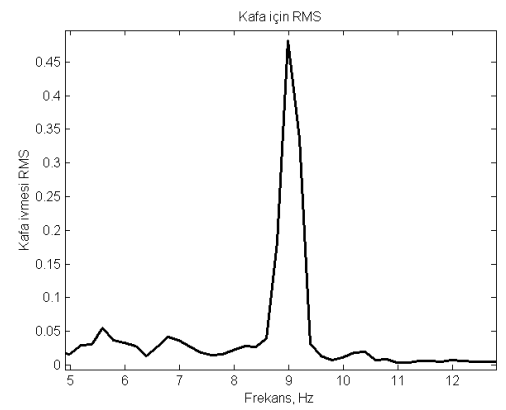
**Şekil 4.48** Boyun ivmesi RMS-frekans grafiği



**Şekil 4.49** Boyun ivmesi RMS-frekans grafiğinin yakından gösterimi



**Şekil 4.50** Kafa ivmesi RMS-frekans grafiği



**Şekil 4.51** Kafa ivmesi RMS-frekans grafiğinin yakından gösterimi

## 4.2. YARIM TAŞIT İLE SÜRÜCÜ

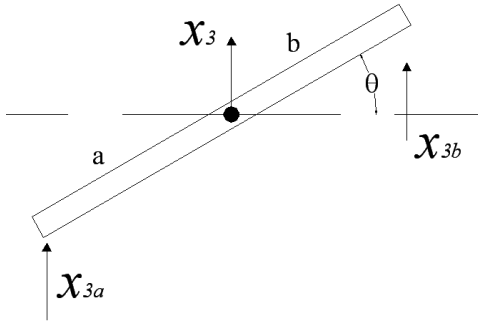
Yukarıda fiziksel modeli gösterilmiş olan yarım taşıt model ile birleştirilmiş olan insan modelinin Lagrange denklemleri kullanılarak hareket denklemleri elde edilmeye çalışılırsa aşağıdaki sonuçlar ortaya çıkmaktadır.

$$\begin{aligned}
K &= \frac{1}{2}m_1 \cdot \dot{x}_1^2 + \frac{1}{2}m_2 \cdot \dot{x}_2^2 + \frac{1}{2}m_3 \cdot \dot{x}_3^2 + \frac{1}{2}m_4 \cdot \dot{x}_4^2 + \frac{1}{2}m_5 \cdot \dot{x}_5^2 \\
&+ \frac{1}{2}m_6 \cdot \dot{x}_6^2 + \frac{1}{2}m_7 \cdot \dot{x}_7^2 + \frac{1}{2}m_8 \cdot \dot{x}_8^2 + \frac{1}{2}m_9 \cdot \dot{x}_9^2 + \frac{1}{2}m_{10} \cdot \dot{x}_{10}^2 \\
&+ \frac{1}{2}m_{11} \cdot \dot{x}_{11}^2 + \frac{1}{2}m_{12} \cdot \dot{x}_{12}^2 + \frac{1}{2}m_{13} \cdot \dot{x}_{13}^2 + \frac{1}{2}m_{14} \cdot \dot{x}_{14}^2 \\
&+ \frac{1}{2}m_{15} \cdot \dot{x}_{15}^2 + \frac{1}{2}I \cdot \dot{\theta}^2
\end{aligned} \tag{4.47}$$

$$\begin{aligned}
D &= \frac{1}{2}b_{31}(\dot{x}_{3b} - \dot{x}_1)^2 + \frac{1}{2}b_{32}(\dot{x}_{3a} - \dot{x}_2)^2 + \frac{1}{2}b_4(\dot{x}_4 - \dot{x}_{3b})^2 \\
&+ \frac{1}{2}b_5(\dot{x}_5 - \dot{x}_4)^2 + \frac{1}{2}b_6(\dot{x}_6 - \dot{x}_5)^2 + \frac{1}{2}b_7(\dot{x}_7 - \dot{x}_6)^2 + \frac{1}{2}b_8(\dot{x}_8 - \dot{x}_7)^2 \\
&+ \frac{1}{2}b_9(\dot{x}_9 - \dot{x}_8)^2 + \frac{1}{2}b_{10}(\dot{x}_{10} - \dot{x}_5)^2 + \frac{1}{2}b_{11}(\dot{x}_{11} - \dot{x}_{10})^2 + \frac{1}{2}b_{12}(\dot{x}_{12} - \dot{x}_{11})^2 \\
&+ \frac{1}{2}b_{13}(\dot{x}_{13} - \dot{x}_{12})^2 + \frac{1}{2}b_{137}(\dot{x}_{13} - \dot{x}_7)^2 + \frac{1}{2}b_{14}(\dot{x}_{14} - \dot{x}_{13})^2 + \frac{1}{2}b_{15}(\dot{x}_{15} - \dot{x}_{14})^2
\end{aligned} \tag{4.48}$$

$$\begin{aligned}
P &= \frac{1}{2}k_1(x_1 - x_{10})^2 + \frac{1}{2}k_2(x_2 - x_{20})^2 + \frac{1}{2}k_{31}(x_{3b} - x_1)^2 \\
&+ \frac{1}{2}k_{32}(x_{3a} - x_2)^2 + \frac{1}{2}k_4(x_4 - x_{3b})^2 + \frac{1}{2}k_5(x_5 - x_4)^2 + \frac{1}{2}k_6(x_6 - x_5)^2 \\
&+ \frac{1}{2}k_7(x_7 - x_6)^2 + \frac{1}{2}k_8(x_8 - x_7)^2 + \frac{1}{2}k_9(x_9 - x_8)^2 + \frac{1}{2}k_{10}(x_{10} - x_5)^2 \\
&+ \frac{1}{2}k_{11}(x_{11} - x_{10})^2 + \frac{1}{2}k_{12}(x_{12} - x_{11})^2 + \frac{1}{2}k_{13}(x_{13} - x_{12})^2 \\
&+ \frac{1}{2}k_{137}(x_{13} - x_7)^2 + \frac{1}{2}k_{14}(x_{14} - x_{13})^2 + \frac{1}{2}k_{15}(x_{15} - x_{14})^2
\end{aligned} \tag{4.49}$$





$$x_{3a} = x_3 - a \cdot \sin \theta \Rightarrow \dot{x}_{3a} = \dot{x}_3 - a \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta \quad (4.50)$$

$$x_{3b} = x_3 + b \cdot \sin \theta \Rightarrow \dot{x}_{3b} = \dot{x}_3 + b \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta \quad (4.51)$$

$$I = \frac{1}{2} m_3 l^2 = \frac{1}{2} m_3 (a + b)^2 \quad (4.52)$$

$$\begin{aligned} D = & \frac{1}{2} b_{31} (\dot{x}_3 + b \dot{\theta} \cos \theta - \dot{x}_1)^2 + \frac{1}{2} b_{32} (\dot{x}_3 - a \dot{\theta} \cos \theta - \dot{x}_2)^2 \\ & + \frac{1}{2} b_4 (\dot{x}_4 - \dot{x}_3 - b \dot{\theta} \cos \theta)^2 + \frac{1}{2} b_5 (\dot{x}_5 - \dot{x}_4)^2 + \frac{1}{2} b_6 (\dot{x}_6 - \dot{x}_5)^2 \\ & + \frac{1}{2} b_7 (\dot{x}_7 - \dot{x}_6)^2 + \frac{1}{2} b_8 (\dot{x}_8 - \dot{x}_7)^2 + \frac{1}{2} b_9 (\dot{x}_9 - \dot{x}_8)^2 + \frac{1}{2} b_{10} (\dot{x}_{10} - \dot{x}_9)^2 \\ & + \frac{1}{2} b_{11} (\dot{x}_{11} - \dot{x}_{10})^2 + \frac{1}{2} b_{12} (\dot{x}_{12} - \dot{x}_{11})^2 + \frac{1}{2} b_{13} (\dot{x}_{13} - \dot{x}_{12})^2 \\ & + \frac{1}{2} b_{137} (\dot{x}_{13} - \dot{x}_7)^2 + \frac{1}{2} b_{14} (\dot{x}_{14} - \dot{x}_{13})^2 + \frac{1}{2} b_{15} (\dot{x}_{15} - \dot{x}_{14})^2 \end{aligned} \quad (4.53)$$

$$\begin{aligned} P = & \frac{1}{2} k_1 (x_1 - x_{10})^2 + \frac{1}{2} k_2 (x_2 - x_{20})^2 + \frac{1}{2} k_{31} (x_3 + b \sin \theta - x_1)^2 \\ & + \frac{1}{2} k_{32} (x_3 - a \sin \theta - x_2)^2 + \frac{1}{2} k_4 (x_4 - x_3 - b \cos \theta)^2 + \frac{1}{2} k_5 (x_5 - x_4)^2 \\ & + \frac{1}{2} k_6 (x_6 - x_5)^2 + \frac{1}{2} k_7 (x_7 - x_6)^2 + \frac{1}{2} k_8 (x_8 - x_7)^2 + \frac{1}{2} k_9 (x_9 - x_8)^2 \\ & + \frac{1}{2} k_{10} (x_{10} - x_5)^2 + \frac{1}{2} k_{11} (x_{11} - x_{10})^2 + \frac{1}{2} k_{12} (x_{12} - x_{11})^2 + \frac{1}{2} k_{13} (x_{13} - x_{12})^2 \\ & + \frac{1}{2} k_{137} (x_{13} - x_7)^2 + \frac{1}{2} k_{14} (x_{14} - x_{13})^2 + \frac{1}{2} k_{15} (x_{15} - x_{14})^2 \end{aligned} \quad (4.54)$$

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}_1}\right) &= I \cdot \ddot{\theta}, & \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial K}{\partial \dot{x}_1}\right) &= m_1 \cdot \ddot{x}_1, & \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial K}{\partial \dot{x}_2}\right) &= m_2 \cdot \ddot{x}_2, \\
\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial K}{\partial \dot{x}_3}\right) &= m_3 \cdot \ddot{x}_3, & \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial K}{\partial \dot{x}_4}\right) &= m_4 \cdot \ddot{x}_4, & \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial K}{\partial \dot{x}_5}\right) &= m_5 \cdot \ddot{x}_5, \\
\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial K}{\partial \dot{x}_6}\right) &= m_6 \cdot \ddot{x}_6, & \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial K}{\partial \dot{x}_7}\right) &= m_7 \cdot \ddot{x}_7, & \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial K}{\partial \dot{x}_8}\right) &= m_8 \cdot \ddot{x}_8, \\
\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial K}{\partial \dot{x}_9}\right) &= m_9 \cdot \ddot{x}_9, & \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial K}{\partial \dot{x}_{10}}\right) &= m_{10} \cdot \ddot{x}_{10}, & \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial K}{\partial \dot{x}_{11}}\right) &= m_{11} \cdot \ddot{x}_{11}, \\
\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial K}{\partial \dot{x}_{12}}\right) &= m_{12} \cdot \ddot{x}_{12}, & \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial K}{\partial \dot{x}_{13}}\right) &= m_{13} \cdot \ddot{x}_{13}, & \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial K}{\partial \dot{x}_{14}}\right) &= m_{14} \cdot \ddot{x}_{14}, \\
\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial K}{\partial \dot{x}_{15}}\right) &= m_{15} \cdot \ddot{x}_{15}
\end{aligned} \tag{4.55}$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_1} = -b_{31}(\dot{x}_3 + b\dot{\theta}\cos\theta - \dot{x}_1) \tag{4.56}$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_2} = b_{32}(\dot{x}_3 - a\dot{\theta}\cos\theta - \dot{x}_2) \tag{4.57}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_3} &= b_{31}(\dot{x}_3 + b\dot{\theta}\cos\theta - \dot{x}_1) + b_{32}(\dot{x}_3 - a\dot{\theta}\cos\theta - \dot{x}_2) \\
&- b_4(\dot{x}_4 - \dot{x}_3 - b\dot{\theta}\cos\theta)
\end{aligned} \tag{4.58}$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_4} = b_4(\dot{x}_4 - \dot{x}_3 - b\dot{\theta}\cos\theta) - b_5(\dot{x}_5 - \dot{x}_4) \tag{4.59}$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_5} = b_5(\dot{x}_5 - \dot{x}_4) - b_6(\dot{x}_6 - \dot{x}_5) - b_{10}(\dot{x}_{10} - \dot{x}_5) \tag{4.60}$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_6} = b_6(\dot{x}_6 - \dot{x}_5) - b_7(\dot{x}_7 - \dot{x}_6) \tag{4.61}$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_7} = b_7(\dot{x}_7 - \dot{x}_6) - b_8(\dot{x}_8 - \dot{x}_7) - b_{137}(\dot{x}_{13} - \dot{x}_7) \tag{4.62}$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_8} = b_8(\dot{x}_8 - \dot{x}_7) - b_9(\dot{x}_9 - \dot{x}_8) \tag{4.63}$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_9} = b_9(\dot{x}_9 - \dot{x}_8) \tag{4.64}$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{10}} = b_{10}(\dot{x}_{10} - \dot{x}_5) - b_{11}(\dot{x}_{11} - \dot{x}_{10}) \quad (4.65)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{11}} = b_{11}(\dot{x}_{11} - \dot{x}_{10}) - b_{12}(\dot{x}_{12} - \dot{x}_{11}) \quad (4.66)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{12}} = b_{12}(\dot{x}_{12} - \dot{x}_{11}) - b_{13}(\dot{x}_{13} - \dot{x}_{12}) \quad (4.67)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{13}} = b_{13}(\dot{x}_{13} - \dot{x}_{12}) - b_{137}(\dot{x}_{13} - \dot{x}_7) - b_{14}(\dot{x}_{14} - \dot{x}_{13}) \quad (4.68)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{14}} = b_{14}(\dot{x}_{14} - \dot{x}_{13}) - b_{15}(\dot{x}_{15} - \dot{x}_{14}) \quad (4.69)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{15}} = b_{15}(\dot{x}_{15} - \dot{x}_{14}) \quad (4.70)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial \theta} &= k_{31}b \cos \theta (x_3 + b \sin \theta - x_1) - k_{32}a \cos \theta (x_3 - a \sin \theta - x_2) \\ &\quad - k_4 b \cos \theta (x_4 - x_3 - b \sin \theta) \end{aligned} \quad (4.71)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_1} = k_1(x_1 - x_0) - k_{31}(x_3 + b \sin \theta - x_1) \quad (4.72)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_2} = k_2(x_2 - x_{0r}) - k_{32}(x_3 - a \sin \theta - x_2) \quad (4.73)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_3} = k_{31}(x_3 + b \sin \theta - x_1) + k_{32}(x_3 - a \sin \theta - x_2) - k_4(x_4 - x_3 - b \sin \theta) \quad (4.74)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_4} = k_4(x_4 - x_3 - b \sin \theta) - k_5(x_5 - x_4) \quad (4.75)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_5} = k_5(x_5 - x_4) - k_6(x_6 - x_5) - k_{10}(x_{10} - x_5) \quad (4.76)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_6} = k_6(x_6 - x_5) - k_7(x_7 - x_6) \quad (4.77)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_7} = k_7(x_7 - x_6) - k_8(x_8 - x_7) - k_{137}(x_{13} - x_7) \quad (4.78)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_8} = k_8(x_8 - x_7) - k_9(x_9 - x_8) \quad (4.79)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_9} = k_9(x_9 - x_8) \quad (4.80)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_{10}} = k_{10}(x_{10} - x_5) - k_{11}(x_{11} - x_{10}) \quad (4.81)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_{11}} = k_{11}(x_{11} - x_{10}) - k_{12}(x_{12} - x_{11}) \quad (4.82)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_{12}} = k_{12}(x_{12} - x_0) - k_{13}(x_{13} - x_{12}) \quad (4.83)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_{13}} = k_{13}(x_{13} - x_{12}) - k_{137}(x_{13} - x_7) - k_{14}(x_{14} - x_{13}) \quad (4.84)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_{14}} = k_{14}(x_{14} - x_{13}) - k_1(x_1 - x_{14}) \quad (4.85)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_{15}} = k_{15}(x_{15} - x_{14})$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}} \right) + \frac{\partial P}{\partial \theta} + \frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}} = 0 \quad (4.86)$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow & I\ddot{\theta} + b_{31} \cdot b \cos \theta (\dot{x}_3 + b\dot{\theta} \cos \theta - \dot{x}_1) - b_{32} \cdot a \cos \theta (\dot{x}_3 - a\dot{\theta} \cos \theta - \dot{x}_2) \\ & - b_4 \cdot b \cos \theta (\dot{x}_4 - \dot{x}_3 - b\dot{\theta} \cos \theta) + k_{31} b \cos \theta (x_3 + b \sin \theta - x_1) \\ & - k_{32} a \cos \theta (x_3 - a \sin \theta - x_2) - k_4 b \cos \theta (x_4 - x_3 - b \sin \theta) = 0 \end{aligned}$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_2} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_2} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_2} = 0 \quad (4.87)$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow & m_2 \cdot \ddot{x}_2 - b_{32} (\dot{x}_3 - a\dot{\theta} \cos \theta - \dot{x}_2) + k_2 (x_2 - x_{0t}) \\ & - k_{32} (x_3 - a \sin \theta - x_2) = 0 \end{aligned}$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_3} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_3} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_3} = 0 \quad (4.88)$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow & m_3 \cdot \ddot{x}_3 + b_{31} (\dot{x}_3 + b\dot{\theta} \cos \theta - \dot{x}_1) + b_{32} (\dot{x}_3 - a\dot{\theta} \cos \theta - \dot{x}_2) \\ & - b_4 (\dot{x}_4 - \dot{x}_3 - b\dot{\theta} \cos \theta) + k_{31} (x_3 + b \sin \theta - x_1) \\ & + k_{32} (x_3 - a \sin \theta - x_2) - k_4 (x_4 - x_3 - b \sin \theta) = 0 \end{aligned}$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_4} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_4} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_4} = 0 \quad (4.89)$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow & m_4 \cdot \ddot{x}_4 + b_4 (\dot{x}_4 - \dot{x}_3 - b\dot{\theta} \cos \theta) - b_5 (\dot{x}_5 - \dot{x}_4) \\ & + k_4 (x_4 - x_3 - b \sin \theta) - k_5 (x_5 - x_4) = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_5} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_5} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_5} &= 0 \\ \Rightarrow m_5 \cdot \ddot{x}_5 + b_5(\dot{x}_5 - \dot{x}_4) - b_6(\dot{x}_6 - \dot{x}_5) - b_{10}(\dot{x}_{10} - \dot{x}_5) \\ + k_5(x_5 - x_4) - k_6(x_6 - x_5) - k_{10}(x_{10} - x_5) &= 0 \end{aligned} \quad (4.90)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_6} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_6} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_6} &= 0 \\ \Rightarrow m_6 \cdot \ddot{x}_6 + b_6(\dot{x}_6 - \dot{x}_5) - b_7(\dot{x}_7 - \dot{x}_6) + k_6(x_6 - x_5) - k_7(x_7 - x_6) &= 0 \end{aligned} \quad (4.91)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_7} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_7} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_7} &= 0 \\ \Rightarrow m_7 \cdot \ddot{x}_7 + b_7(\dot{x}_7 - \dot{x}_6) - b_8(\dot{x}_8 - \dot{x}_7) - b_{137}(\dot{x}_{13} - \dot{x}_7) + k_7(x_7 - x_6) \\ - k_8(x_8 - x_7) - k_{137}(x_{13} - x_7) &= 0 \end{aligned} \quad (4.92)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_8} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_8} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_8} &= 0 \\ \Rightarrow m_8 \cdot \ddot{x}_8 + k_8(x_8 - x_7) - k_9(x_9 - x_8) + b_8(\dot{x}_8 - \dot{x}_7) - b_9(\dot{x}_9 - \dot{x}_8) &= 0 \end{aligned} \quad (4.93)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_9} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_9} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_9} &= 0 \\ \Rightarrow m_9 \cdot \ddot{x}_9 + k_9(x_9 - x_8) + b_9(\dot{x}_9 - \dot{x}_8) &= 0 \end{aligned} \quad (4.94)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_{10}} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_{10}} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{10}} &= 0 \\ \Rightarrow m_{10} \cdot \ddot{x}_{10} + k_{10}(x_{10} - x_5) - k_{11}(x_{11} - x_{10}) \\ + b_{10}(\dot{x}_{10} - \dot{x}_5) - b_{11}(\dot{x}_{11} - \dot{x}_{10}) &= 0 \end{aligned} \quad (4.95)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_{11}} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_{11}} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{11}} &= 0 \\ \Rightarrow m_{11} \cdot \ddot{x}_{11} + k_{11}(x_{11} - x_{10}) - k_{12}(x_{12} - x_{11}) \\ + b_{11}(\dot{x}_{11} - \dot{x}_{10}) - b_{12}(\dot{x}_{12} - \dot{x}_{11}) &= 0 \end{aligned} \quad (4.96)$$

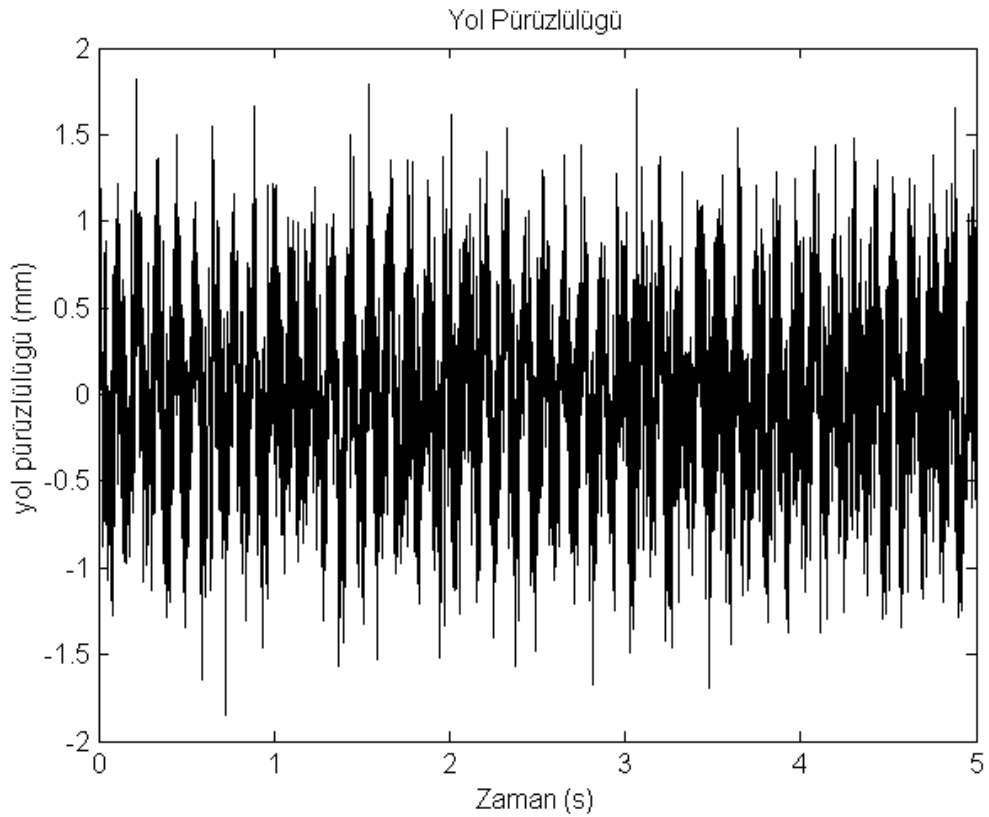
$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_{12}} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_{12}} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{12}} &= 0 \\ \Rightarrow m_{12} \cdot \ddot{x}_{12} + k_{12}(x_{12} - x_{11}) - k_{13}(x_{13} - x_{12}) \\ + b_{12}(\dot{x}_{12} - \dot{x}_{11}) - b_{13}(\dot{x}_{13} - \dot{x}_{12}) &= 0 \end{aligned} \quad (4.97)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_{13}} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_{13}} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{13}} &= 0 \\ \Rightarrow m_{13} \cdot \ddot{x}_{13} + k_{13}(x_{13} - x_{12}) - k_{14}(x_{14} - x_{13}) - k_{137}(x_{13} - x_7) \\ + b_{13}(\dot{x}_{13} - \dot{x}_{12}) - b_{137}(\dot{x}_{13} - \dot{x}_7) - b_{14}(\dot{x}_{14} - \dot{x}_{13}) &= 0 \end{aligned} \quad (4.98)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_{14}} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_{14}} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{14}} &= 0 \\ \Rightarrow m_{14} \cdot \ddot{x}_{14} + k_{14}(x_{14} - x_{13}) - k_{15}(x_{15} - x_{14}) \\ + b_{14}(\dot{x}_{14} - \dot{x}_{13}) - b_{15}(\dot{x}_{15} - \dot{x}_{14}) &= 0 \end{aligned} \quad (4.99)$$

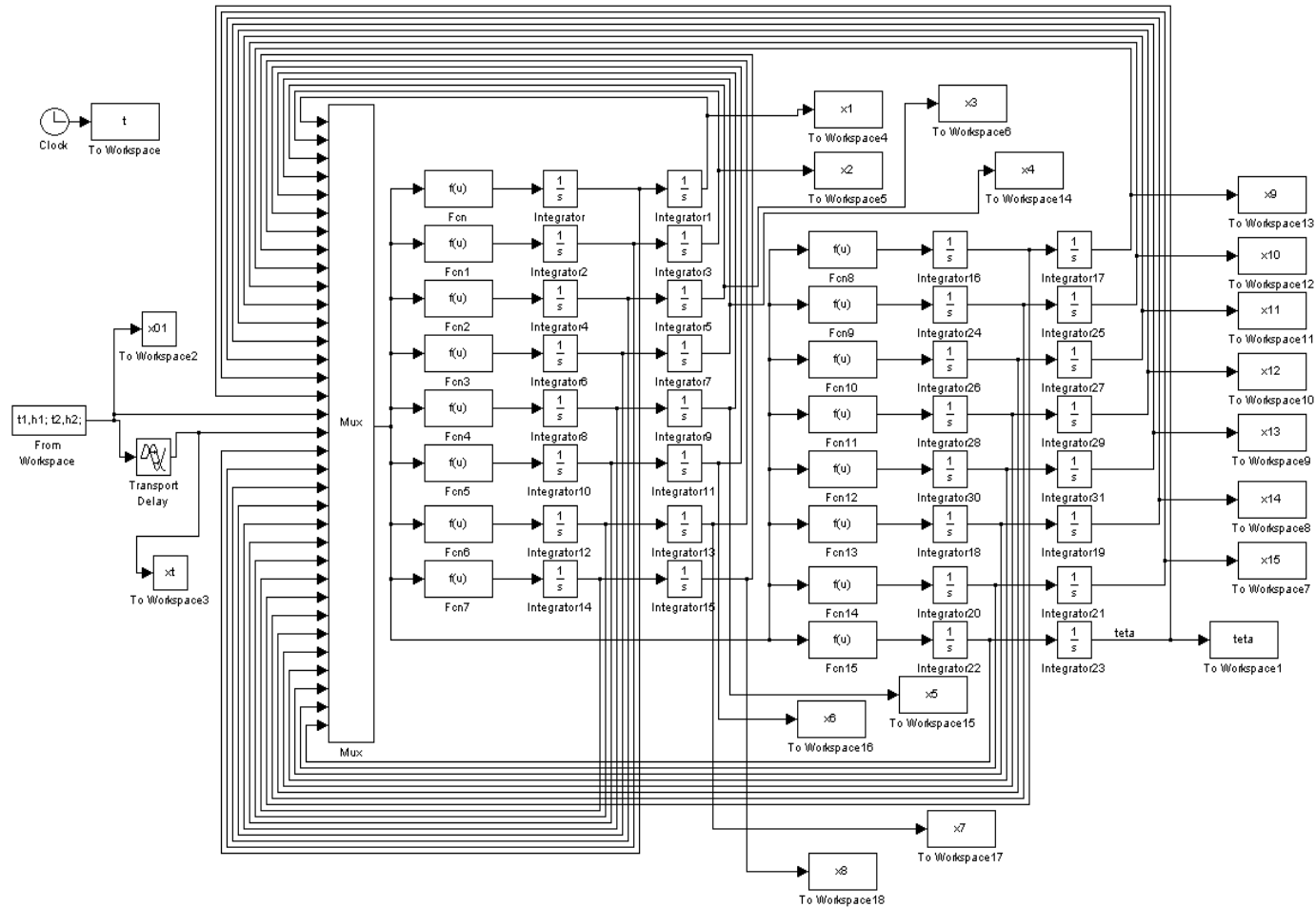
$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_{15}} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_{15}} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{15}} &= 0 \\ \Rightarrow m_{15} \cdot \ddot{x}_{15} + k_{15}(x_{15} - x_{14}) + b_{15}(\dot{x}_{15} - \dot{x}_{14}) &= 0 \end{aligned} \quad (4.100)$$

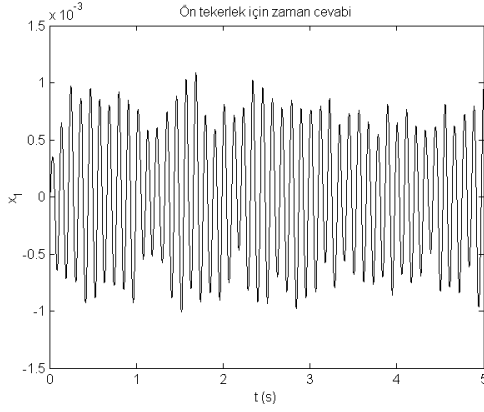
Taşıtm aşağıda verilen grafikteki gibi bir yol pürüzlülüğüne maruz kaldığı düşünölsün. Bu durumda aşağıdaki grafik modele girdi olarak girecektir. Sonuçta matlab simulinkte ilgili parametreler [EK A2] girilip simölasyon yapılır ise aşağıdaki zaman ve frekans cevapları elde edilir.



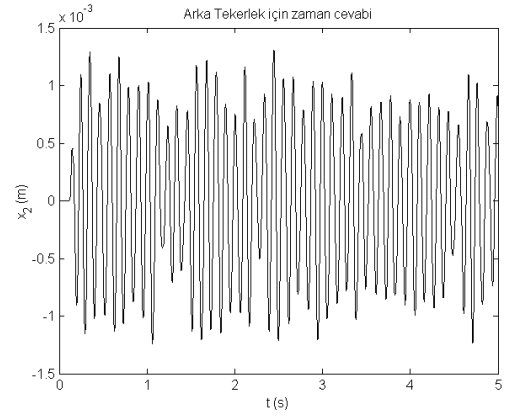
Şekil 4.52 Yarım taşıt ve insan için Sistem girişi

**Tablo 4.2** Matlab'te yarım taşıt ve insan modeli için hazırlanmış blok diyagram

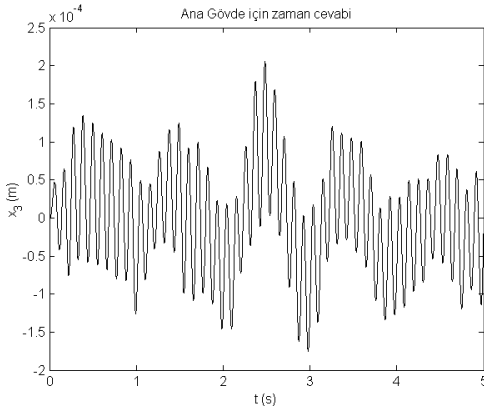




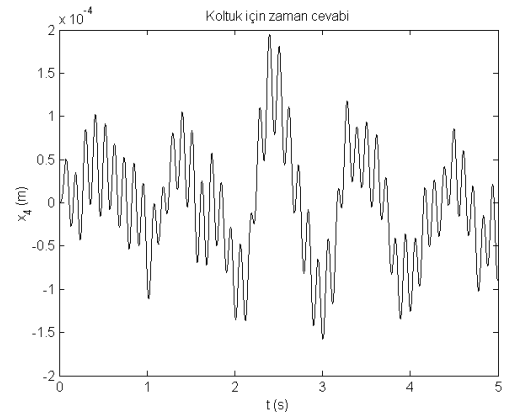
**Şekil 4.53** Ön tekerlek için zaman cevabı



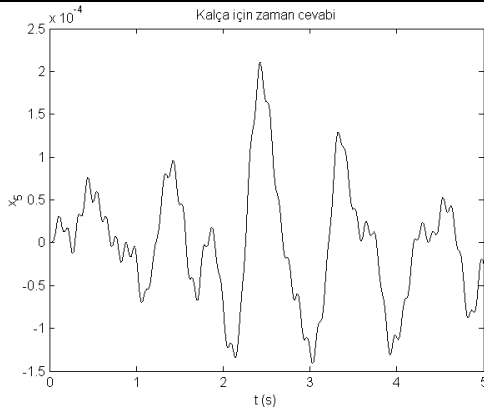
**Şekil 4.54** Arka tekerlek için zaman cevabı



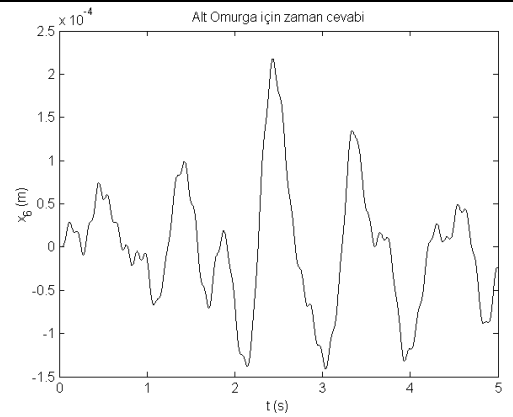
**Şekil 4.55** Ana gövde için zaman cevabı



**Şekil 4.56** Koltuk için zaman cevabı

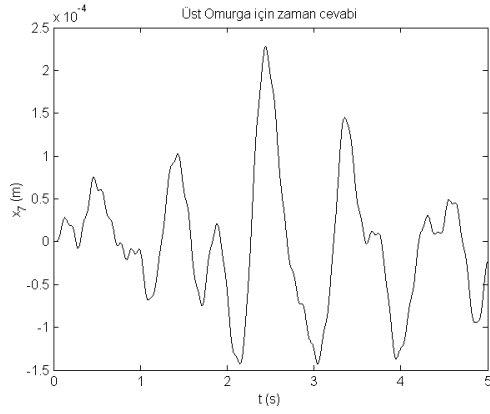


**Şekil 4.57** İnsan kalçası için zaman cevabı

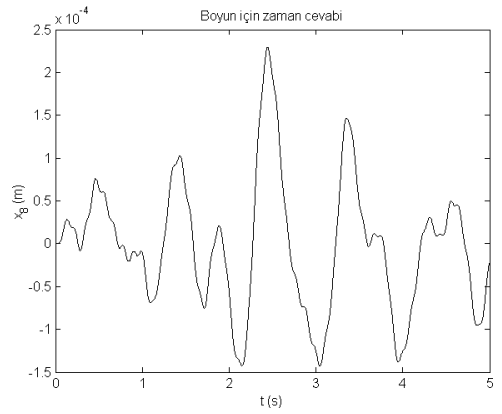


**Şekil 4.58** Alt omurga için zaman cevabı

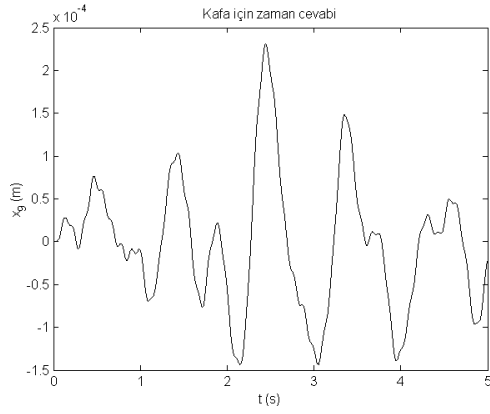




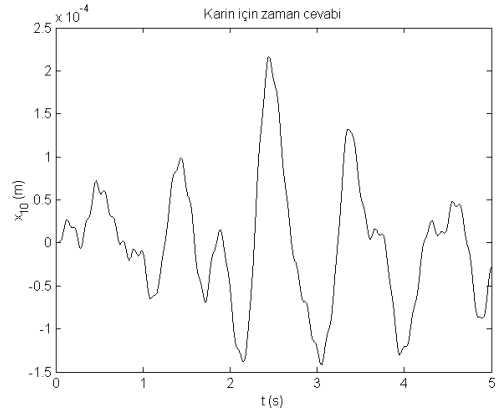
Şekil 4.59 Üst Omurga için zaman cevabı



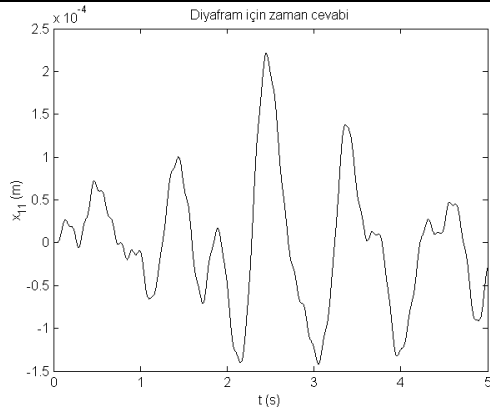
Şekil 4.60 Boyun için zaman cevabı



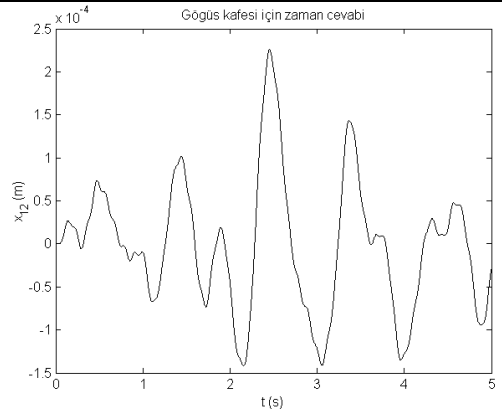
Şekil 4.61 Kafa için zaman cevabı



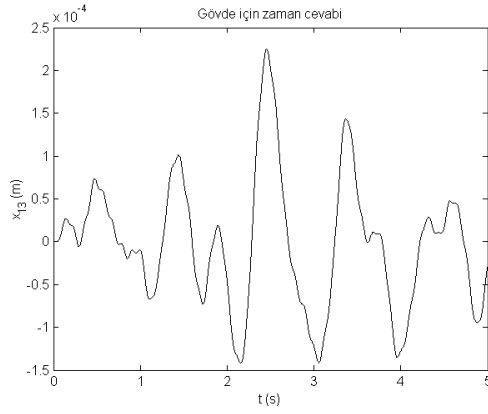
Şekil 4.62 Karın için zaman cevabı



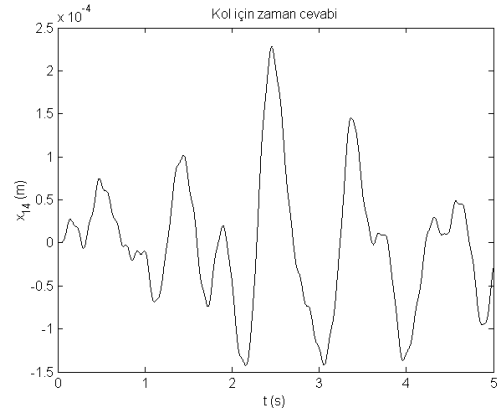
Şekil 4.63 Diyafram için zaman cevabı



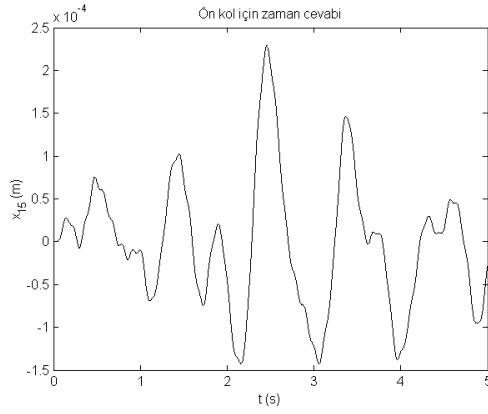
Şekil 4.64 Göğüs kafesi için zaman cevabı



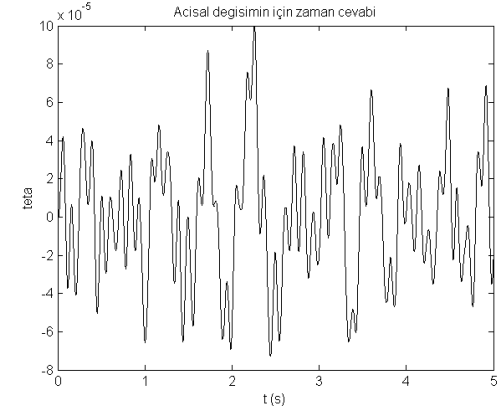
Şekil 4.65 Gövde için zaman cevabı



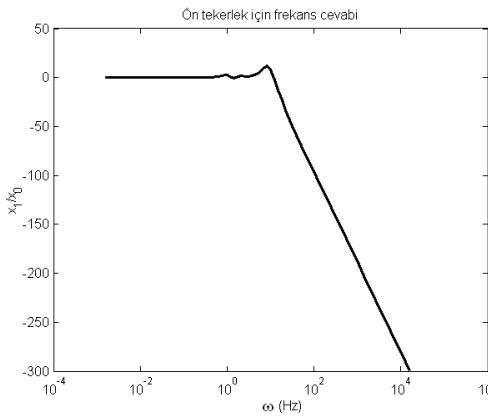
Şekil 4.66 Kol için zaman cevabı



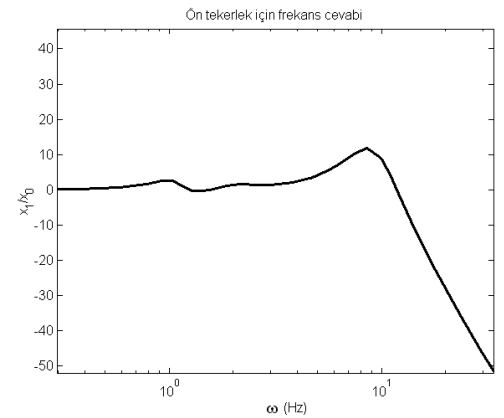
Şekil 4.67 Ön kol için zaman cevabı



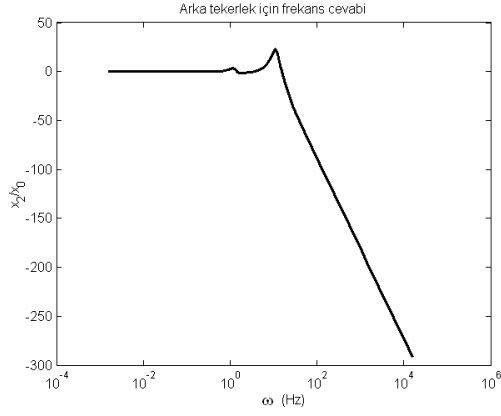
Şekil 4.68 Açısal değişim için zaman cevabı



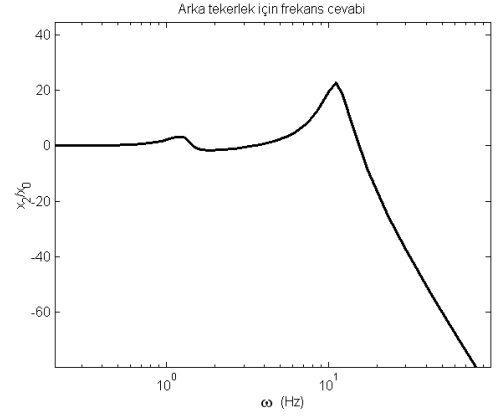
Şekil 4.69 Ön tekerlek için frekans cevabı



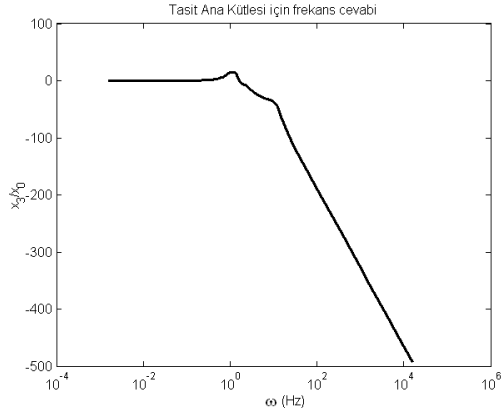
Şekil 4.70 Ön tekerlek için frekans cevabı yakından gösterimi



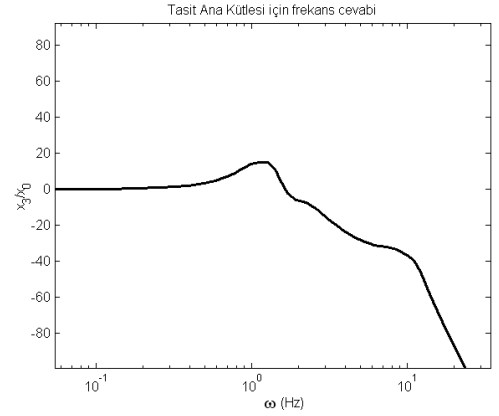
**Şekil 4.71** Arka tekerlek için frekans cevabı



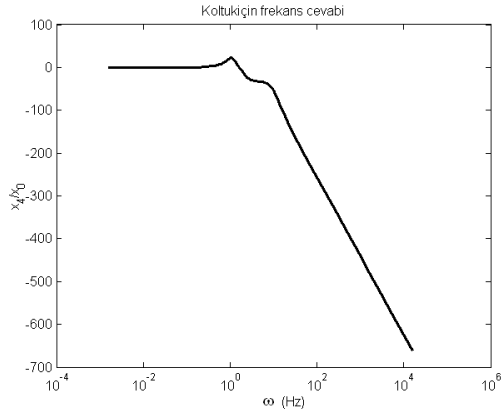
**Şekil 4.72** Arka tekerlek için frekans cevabı yakından gösterimi



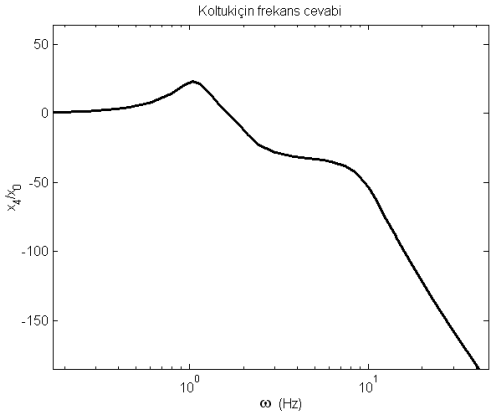
**Şekil 4.73** Taşıt Ana Kütlesi için frekans cevabı



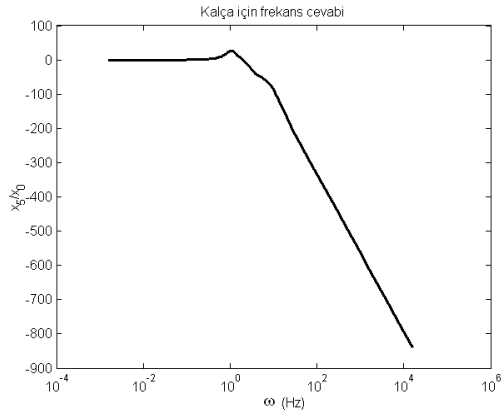
**Şekil 4.74** Taşıt Ana Kütlesi için frekans cevabı yakından gösterimi



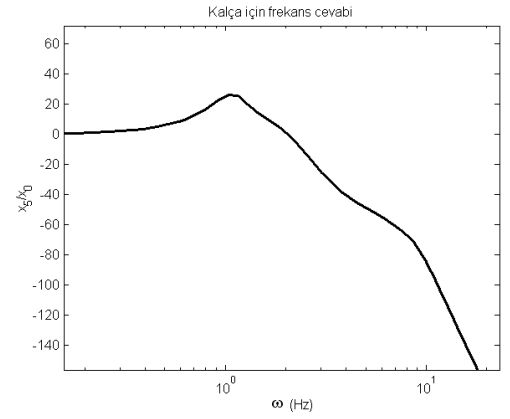
**Şekil 4.75** Koltuk için frekans cevabı



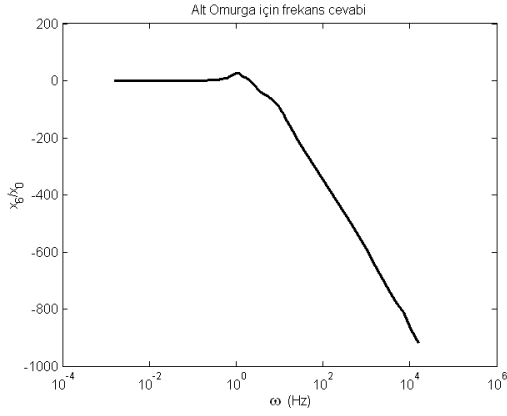
**Şekil 4.76** Koltuk için frekans cevabı yakından gösterimi



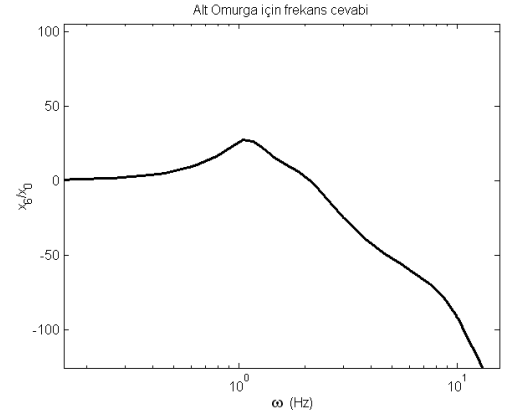
Şekil 4.77 Kalça için frekans cevabı



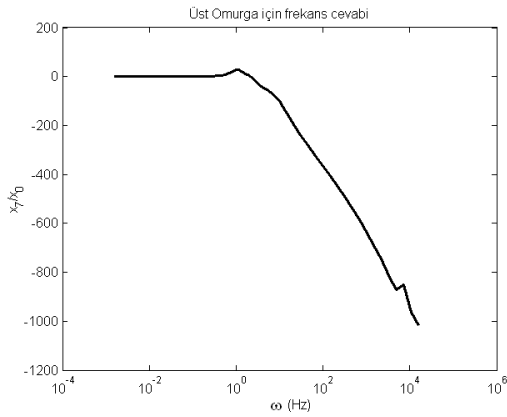
Şekil 4.78 Kalça için frekans cevabı yakından gösterimi



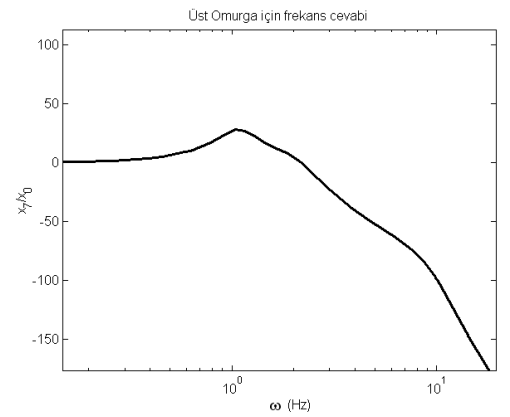
Şekil 4.79 Alt Omurga için frekans cevabı



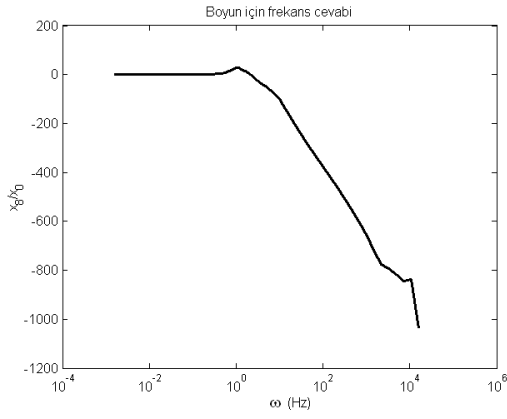
Şekil 4.80 Kalça için frekans cevabı yakından gösterimi



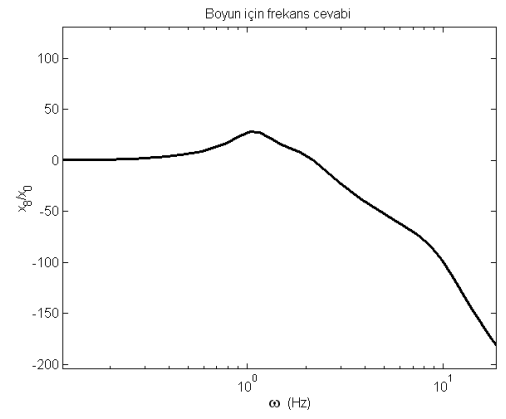
Şekil 4.81 Üst Omurga için frekans cevabı



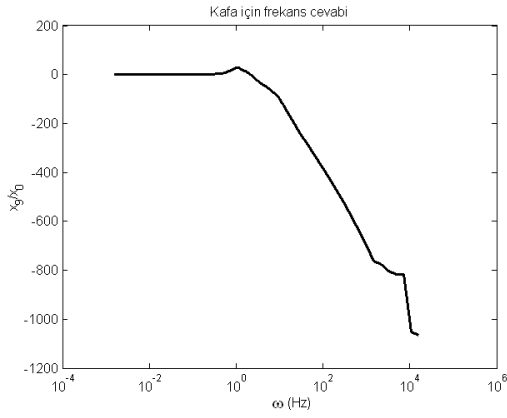
Şekil 4.82 Üst Omurga için frekans cevabı yakından gösterimi



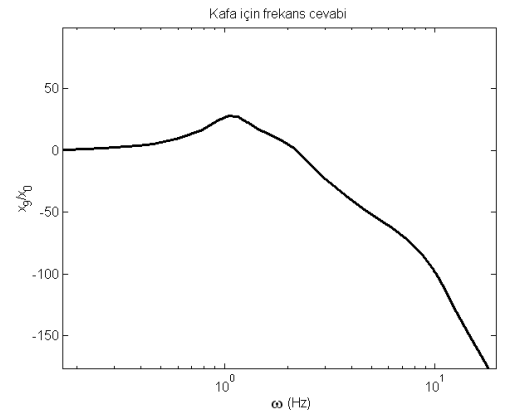
**Şekil 4.83** Boyun için frekans cevabı



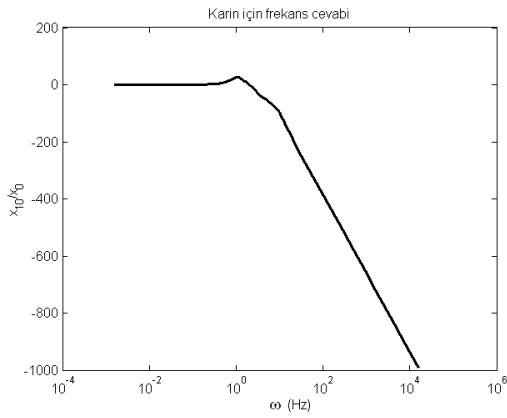
**Şekil 4.84** Boyun için frekans cevabı yakından gösterimi



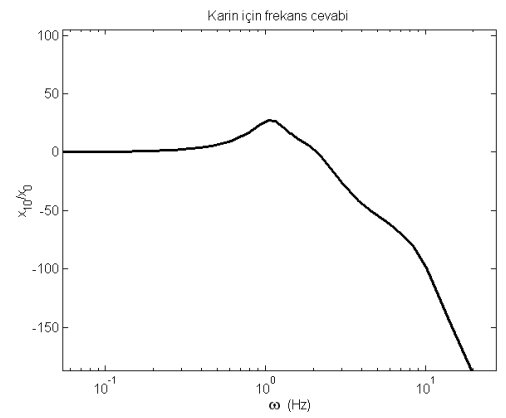
**Şekil 4.85** Kafa için frekans cevabı



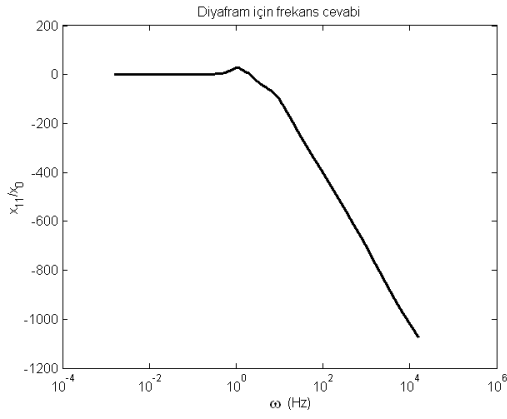
**Şekil 4.86** Kafa için frekans cevabı yakından gösterimi



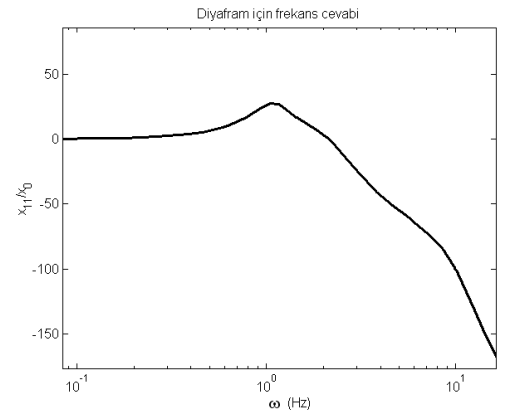
**Şekil 4.87** Karin için frekans cevabı



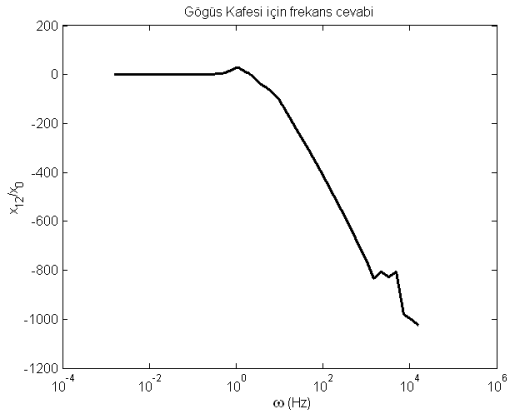
**Şekil 4.88** Karin için frekans cevabı yakından gösterimi



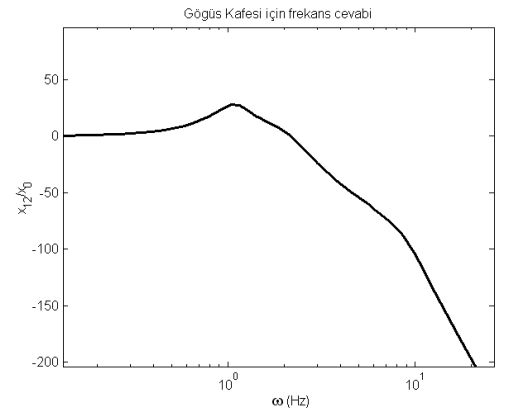
Şekil 4.89 Diyafraam için frekans cevabı



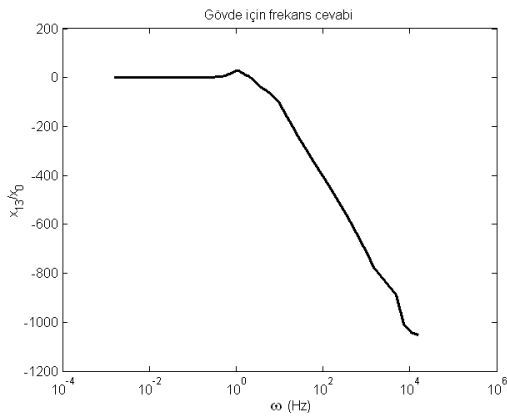
Şekil 4.90 Diyafraam için frekans cevabı yakından gösterimi



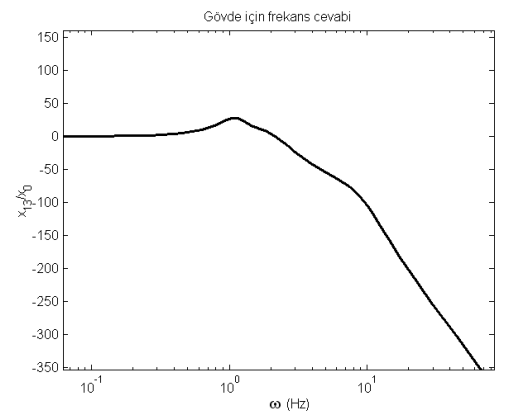
Şekil 4.91 Göğüs kafesi için frekans cevabı



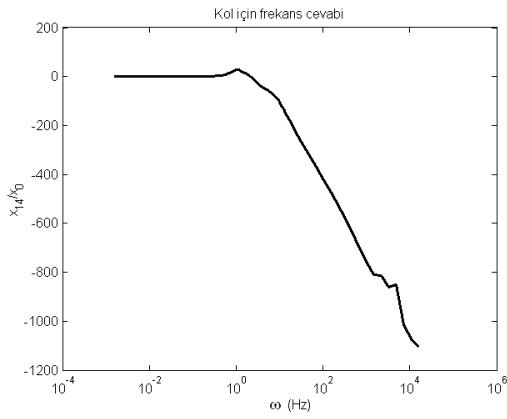
Şekil 4.92 Göğüs kafesi için frekans cevabı yakından gösterimi



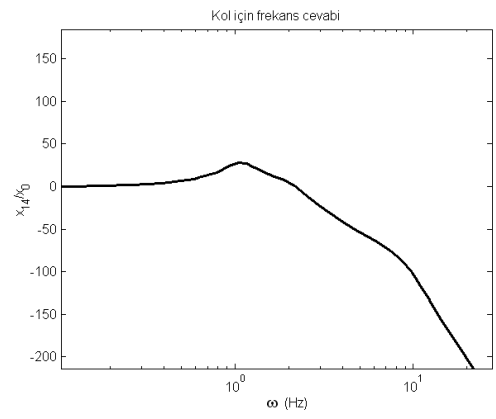
Şekil 4.93 Gövde için frekans cevabı



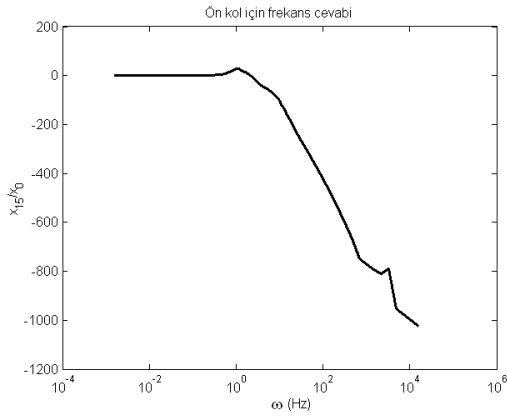
Şekil 4.94 Gövde için frekans cevabı yakından gösterimi



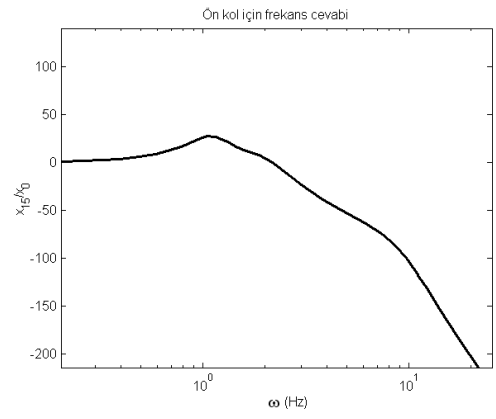
**Şekil 4.95** Kol için frekans cevabı



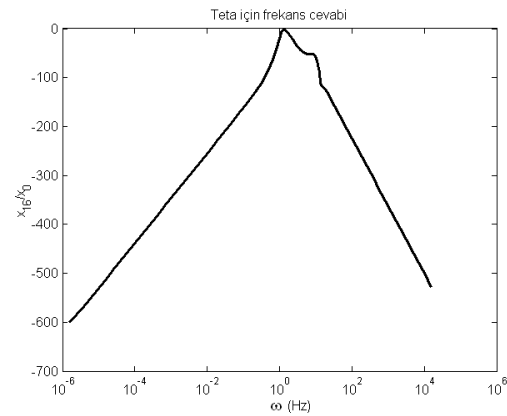
**Şekil 4.96** Kol için frekans cevabı yakından gösterimi



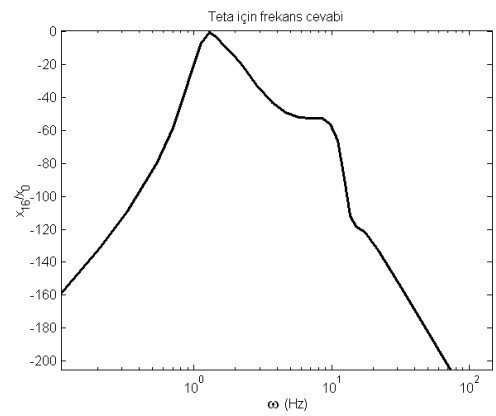
**Şekil 4.97** Ön Kol için frekans cevabı



**Şekil 4.98** Ön kol için frekans cevabı yakından gösterimi

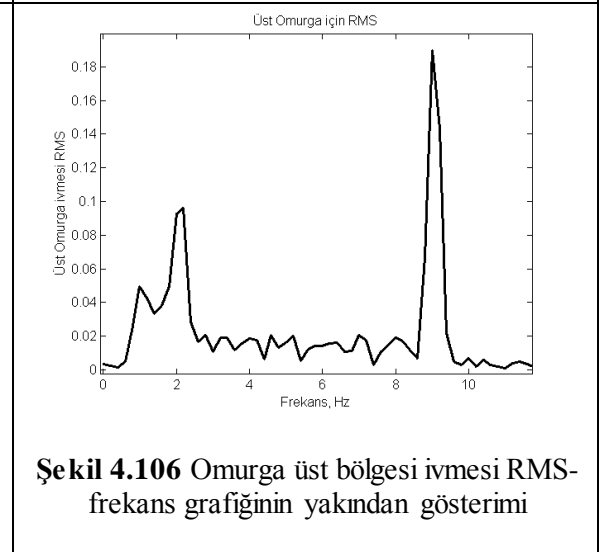
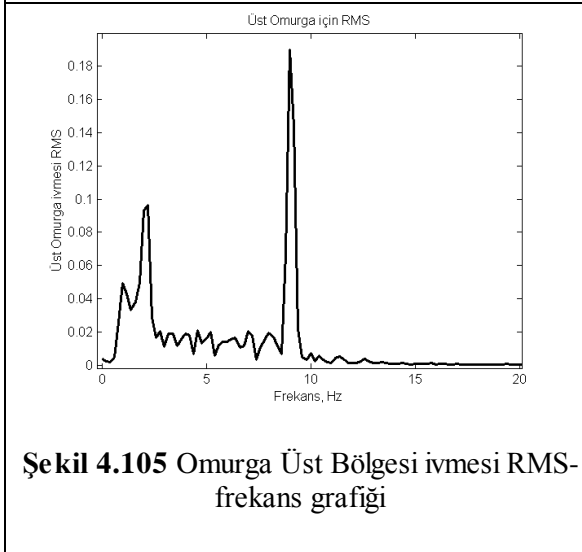
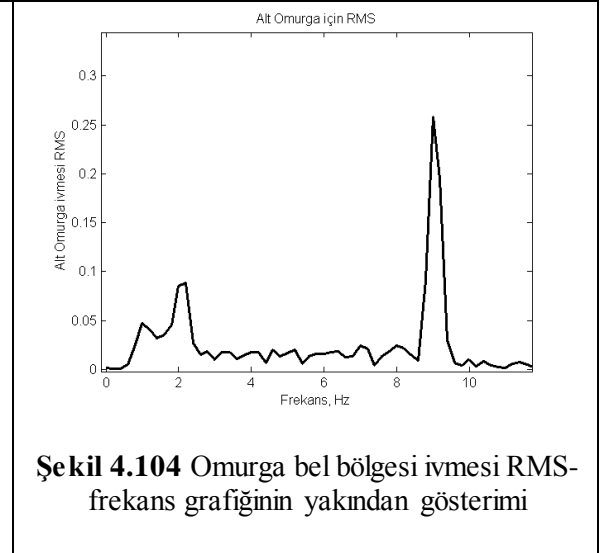
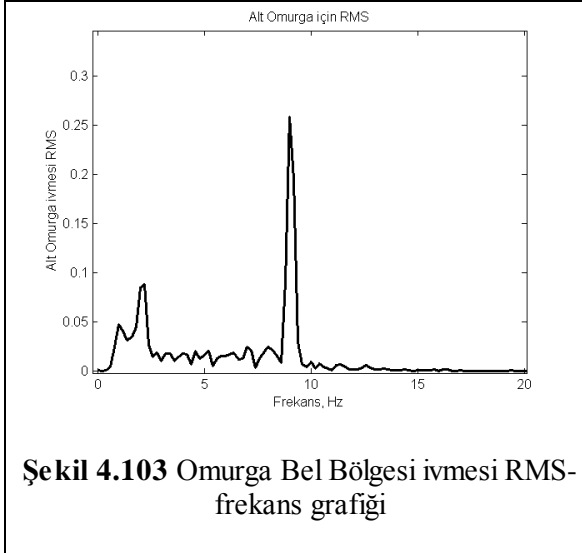
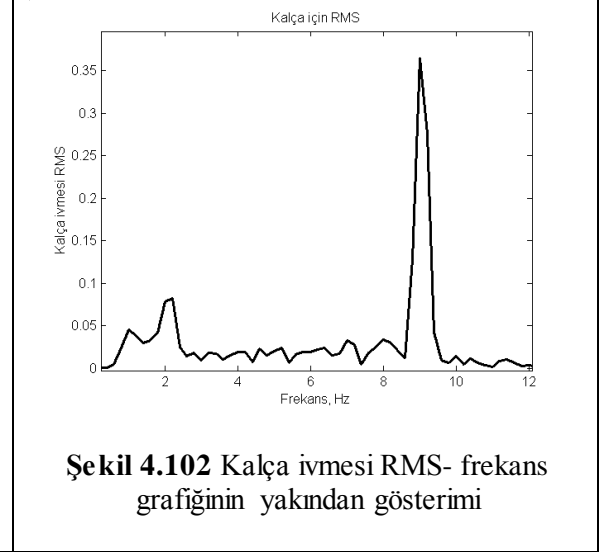
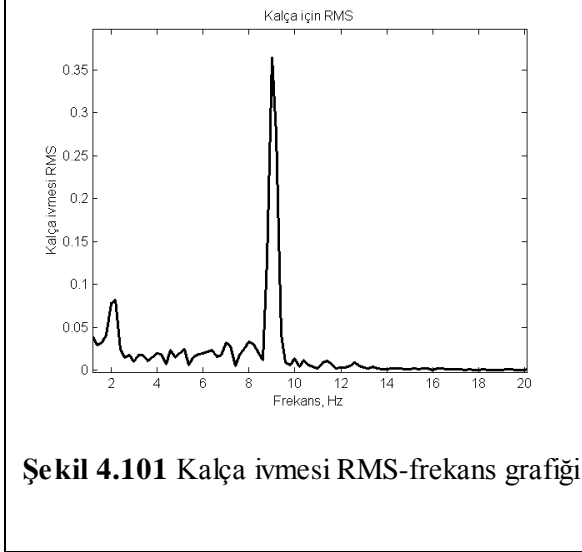


**Şekil 4.99** Teta için frekans cevabı

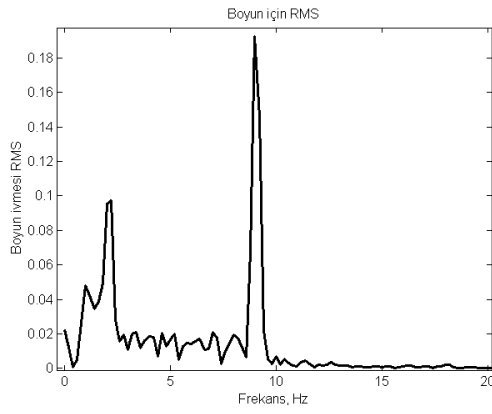


**Şekil 4.100** Teta için frekans cevabı yakından gösterimi

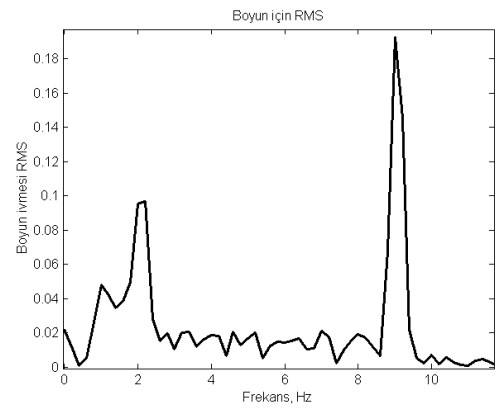
Çeyrek taşıt simülasyonunda yapıldığı gibi benzer şekilde yarım taşıt için de elde edilen grafikleri ilgili ISO standardındaki ile karşılaştırmak için bu grafiklerin ivme RMS-frekans cevapları halindeki gösterimleri aşağıdaki gibidir.



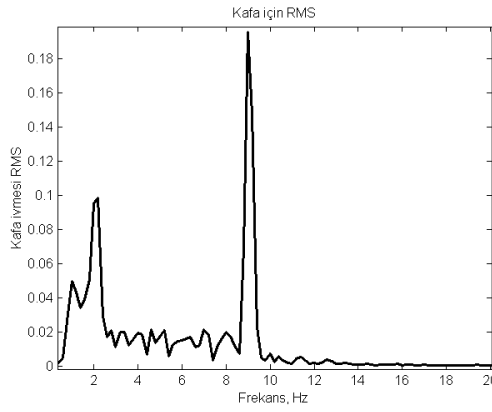




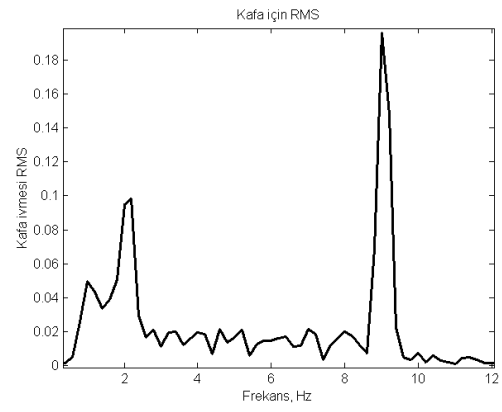
**Şekil 4.107** Boyun ivmesi RMS-frekans grafiği



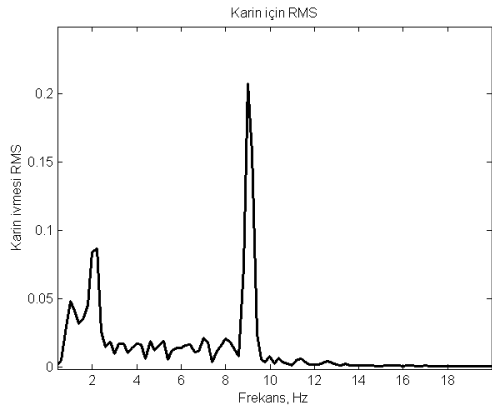
**Şekil 4.108** Boyun ivmesi RMS-frekans grafiğinin yakından gösterimi



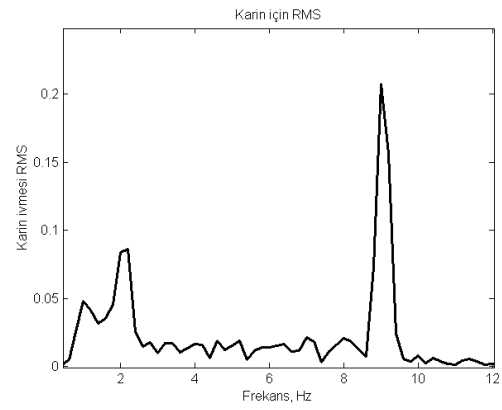
**Şekil 4.109** Kafa ivmesi RMS-frekans grafiği



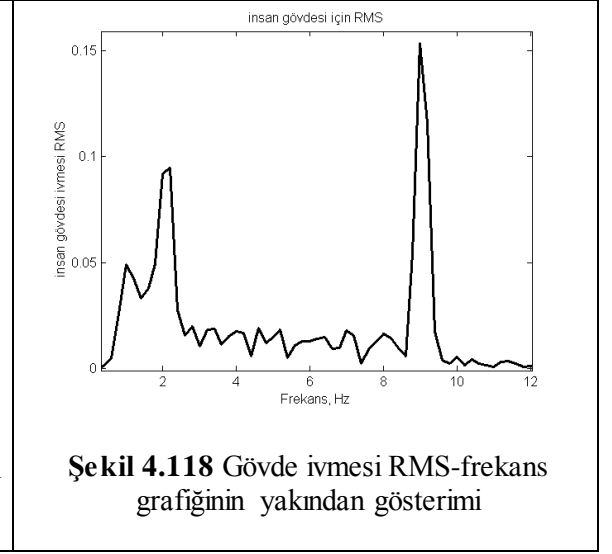
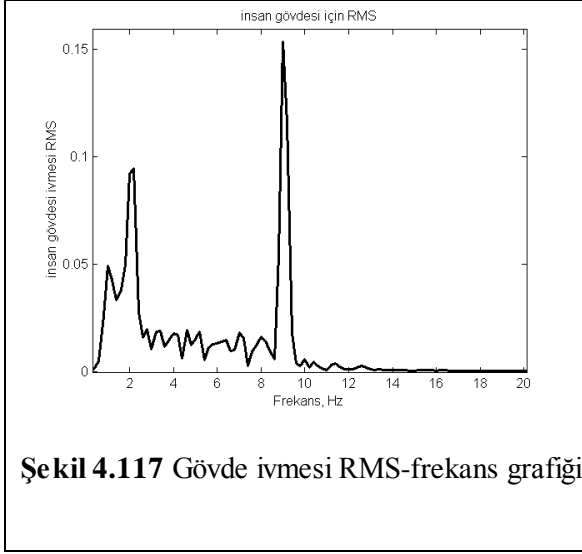
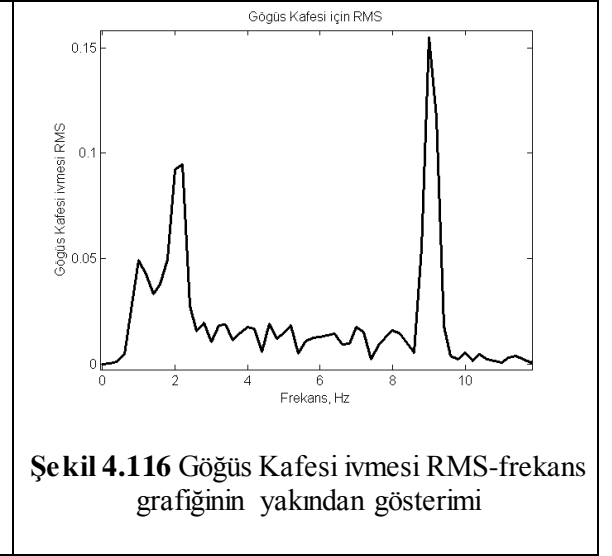
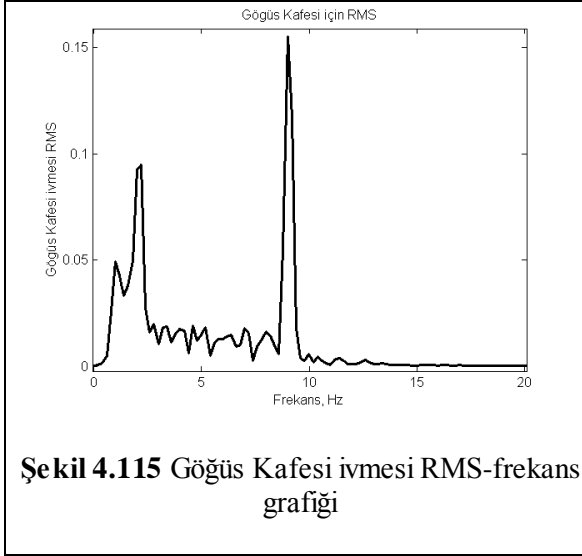
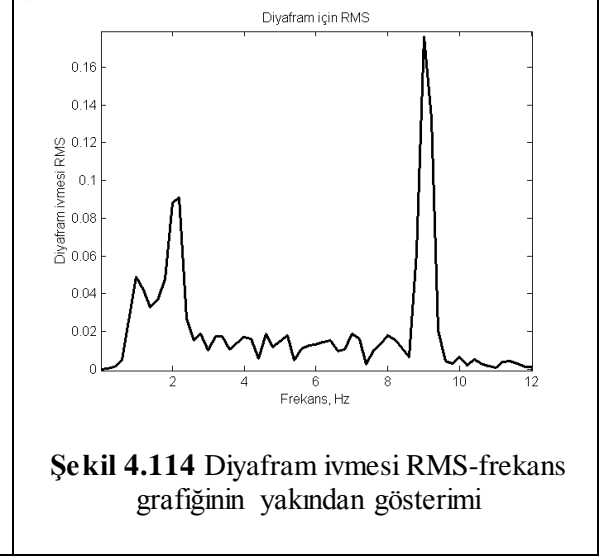
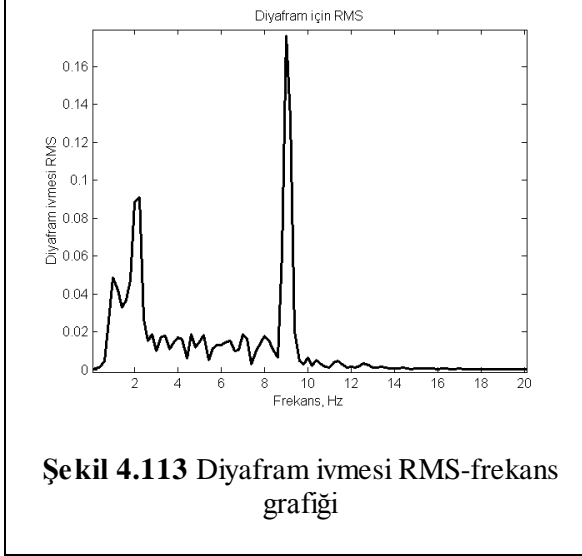
**Şekil 4.110** Kafa ivmesi RMS-frekans grafiğinin yakından gösterimi

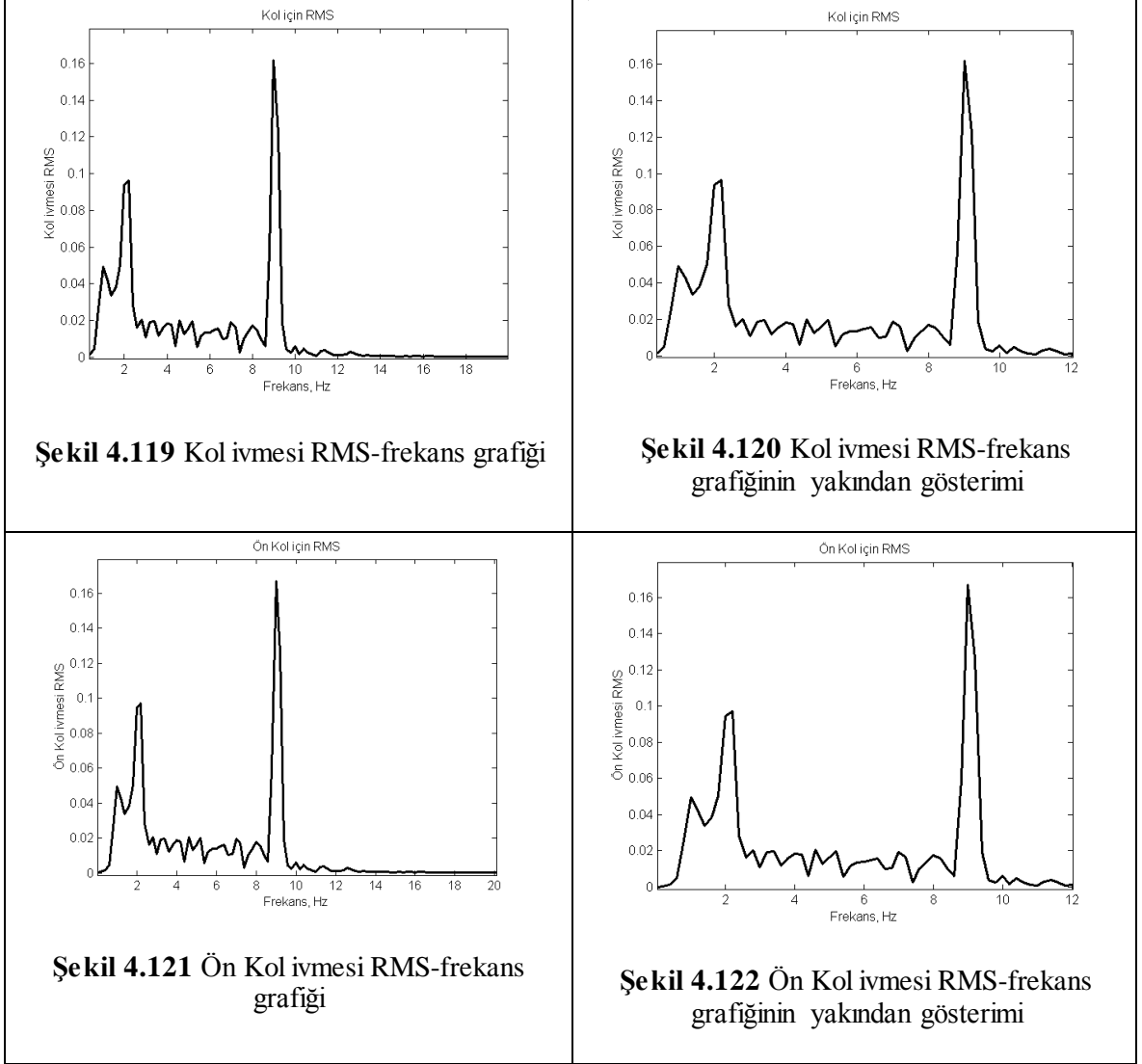


**Şekil 4.111** Karın ivmesi RMS-frekans grafiği



**Şekil 4.112** Karın ivmesi RMS-frekans grafiğinin yakından gösterimi





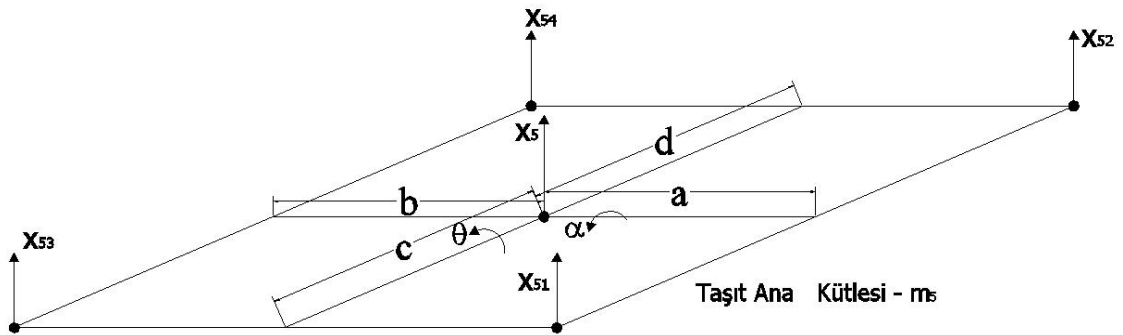
### 4.3. TAM TAŞIT İLE SÜRÜCÜ

Yukarıda fiziksel modeli gösterilmiş olan tam taşıt model ile birleştirilmiş olan insan modelinin Lagrange denklemleri kullanılarak hareket denklemleri elde edilmeye çalışılırsa aşağıdaki sonuçlar ortaya çıkmaktadır.

$$\begin{aligned}
 K = & \frac{1}{2}m_1 \cdot \dot{x}_1^2 + \frac{1}{2}m_2 \cdot \dot{x}_2^2 + \frac{1}{2}m_3 \cdot \dot{x}_3^2 + \frac{1}{2}m_4 \cdot \dot{x}_4^2 + \frac{1}{2}m_5 \cdot \dot{x}_5^2 \\
 & + \frac{1}{2}m_6 \cdot \dot{x}_6^2 + \frac{1}{2}m_7 \cdot \dot{x}_7^2 + \frac{1}{2}m_8 \cdot \dot{x}_8^2 + \frac{1}{2}m_9 \cdot \dot{x}_9^2 + \frac{1}{2}m_{10} \cdot \dot{x}_{10}^2 \\
 & + \frac{1}{2}m_{11} \cdot \dot{x}_{11}^2 + \frac{1}{2}m_{12} \cdot \dot{x}_{12}^2 + \frac{1}{2}m_{13} \cdot \dot{x}_{13}^2 + \frac{1}{2}m_{14} \cdot \dot{x}_{14}^2 \\
 & + \frac{1}{2}m_{15} \cdot \dot{x}_{15}^2 + \frac{1}{2}m_{16} \cdot \dot{x}_{16}^2 + \frac{1}{2}m_{17} \cdot \dot{x}_{17}^2 + \frac{1}{2}I_z \cdot \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}I_x \cdot \dot{\alpha}^2
 \end{aligned} \tag{4.101}$$

$$\begin{aligned}
D = & \frac{1}{2}b_1(\dot{x}_{51} - \dot{x}_1)^2 + \frac{1}{2}b_2(\dot{x}_{52} - \dot{x}_2)^2 + \frac{1}{2}b_3(\dot{x}_{53} - \dot{x}_3)^2 + \frac{1}{2}b_4(\dot{x}_{54} - \dot{x}_4)^2 \\
& + \frac{1}{2}b_6(\dot{x}_6 - \dot{x}_{52})^2 + \frac{1}{2}b_7(\dot{x}_7 - \dot{x}_6)^2 + \frac{1}{2}b_8(\dot{x}_8 - \dot{x}_7)^2 + \frac{1}{2}b_9(\dot{x}_9 - \dot{x}_8)^2 \\
& + \frac{1}{2}b_{10}(\dot{x}_{10} - \dot{x}_9)^2 + \frac{1}{2}b_{11}(\dot{x}_{11} - \dot{x}_{10})^2 + \frac{1}{2}b_{12}(\dot{x}_{12} - \dot{x}_7)^2 \\
& + \frac{1}{2}b_{13}(\dot{x}_{13} - \dot{x}_{12})^2 + \frac{1}{2}b_{14}(\dot{x}_{14} - \dot{x}_{13})^2 + \frac{1}{2}b_{15}(\dot{x}_{15} - \dot{x}_{14})^2 \\
& + \frac{1}{2}b_{159}(\dot{x}_{15} - \dot{x}_9)^2 + \frac{1}{2}b_{16}(\dot{x}_{16} - \dot{x}_{15})^2 + \frac{1}{2}b_{17}(\dot{x}_{17} - \dot{x}_{16})^2
\end{aligned} \tag{4.102}$$

$$\begin{aligned}
P = & \frac{1}{2}k_1(x_1 - z_1)^2 + \frac{1}{2}k_2(x_2 - z_2)^2 + \frac{1}{2}k_3(x_3 - z_3)^2 + \frac{1}{2}k_4(x_4 - z_4)^2 \\
& + \frac{1}{2}k_{51}(x_{51} - x_1)^2 + \frac{1}{2}k_{52}(x_{52} - x_2)^2 + \frac{1}{2}k_{53}(x_{53} - x_3)^2 \\
& + \frac{1}{2}k_{54}(x_{54} - x_4)^2 + \frac{1}{2}k_6(x_6 - x_{52})^2 + \frac{1}{2}k_7(x_7 - x_6)^2 + \frac{1}{2}k_8(x_8 - x_7)^2 \\
& + \frac{1}{2}k_9(x_9 - x_8)^2 + \frac{1}{2}k_{10}(x_{10} - x_9)^2 + \frac{1}{2}k_{11}(x_{11} - x_{10})^2 \\
& + \frac{1}{2}k_{12}(x_{12} - x_7)^2 + \frac{1}{2}k_{14}(x_{14} - x_{13})^2 + \frac{1}{2}k_{15}(x_{15} - x_{14})^2 \\
& + \frac{1}{2}k_{159}(x_{15} - x_9)^2 + \frac{1}{2}k_{16}(x_{16} - x_{15})^2 + \frac{1}{2}k_{17}(x_{17} - x_{16})^2
\end{aligned} \tag{4.103}$$



Şekil 4.123 Tam Taşıt için yardımcı fiziksel model

$$x_{51} = x_5 + a \cdot \sin \theta - c \cdot \sin \alpha \Rightarrow \dot{x}_{51} = \dot{x}_5 + a \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta - c \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha \tag{4.104}$$

$$x_{52} = x_5 + a \cdot \sin \theta + d \cdot \sin \alpha \Rightarrow \dot{x}_{52} = \dot{x}_5 + a \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta + d \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha \tag{4.105}$$

$$x_{53} = x_5 - b \cdot \sin \theta - c \cdot \sin \alpha \Rightarrow \dot{x}_{53} = \dot{x}_5 - b \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta - c \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha \tag{4.106}$$

$$x_{54} = x_5 - b \cdot \sin \theta + d \cdot \sin \alpha \Rightarrow \dot{x}_{54} = \dot{x}_5 - b \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta + d \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha \quad (4.107)$$

$$\begin{aligned} D = & \frac{1}{2} b_1 (\dot{x}_5 + a \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta - c \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha - \dot{x}_1)^2 \\ & + \frac{1}{2} b_2 (\dot{x}_5 + a \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta + d \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha - \dot{x}_2)^2 \\ & + \frac{1}{2} b_3 (\dot{x}_5 - b \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta - c \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha - \dot{x}_3)^2 \\ & + \frac{1}{2} b_4 (\dot{x}_5 - b \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta + d \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha - \dot{x}_4)^2 \\ & + \frac{1}{2} b_6 (\dot{x}_6 - \dot{x}_5 - a \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta - d \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha)^2 \end{aligned} \quad (4.108)$$

$$\begin{aligned} & + \frac{1}{2} b_7 (\dot{x}_7 - \dot{x}_6)^2 + \frac{1}{2} b_8 (\dot{x}_8 - \dot{x}_7)^2 + \frac{1}{2} b_9 (\dot{x}_9 - \dot{x}_8)^2 \\ & + \frac{1}{2} b_{10} (\dot{x}_{10} - \dot{x}_9)^2 + \frac{1}{2} b_{11} (\dot{x}_{11} - \dot{x}_{10})^2 + \frac{1}{2} b_{12} (\dot{x}_{12} - \dot{x}_7)^2 \\ & + \frac{1}{2} b_{13} (\dot{x}_{13} - \dot{x}_{12})^2 + \frac{1}{2} b_{14} (\dot{x}_{14} - \dot{x}_{13})^2 + \frac{1}{2} b_{15} (\dot{x}_{15} - \dot{x}_{14})^2 \\ & + \frac{1}{2} b_{159} (\dot{x}_{15} - \dot{x}_9)^2 + \frac{1}{2} b_{16} (\dot{x}_{16} - \dot{x}_{15})^2 + \frac{1}{2} b_{17} (\dot{x}_{17} - \dot{x}_{16})^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P = & \frac{1}{2} k_1 (x_1 - z_1)^2 + \frac{1}{2} k_2 (x_2 - z_2)^2 + \frac{1}{2} k_3 (x_3 - z_3)^2 + \frac{1}{2} k_4 (x_4 - z_4)^2 \\ & + \frac{1}{2} k_{51} (x_5 + a \cdot \sin \theta - c \cdot \sin \alpha - x_1)^2 \\ & + \frac{1}{2} k_{52} (x_5 + a \cdot \sin \theta + d \cdot \sin \alpha - x_2)^2 \\ & + \frac{1}{2} k_{53} (x_5 - b \cdot \sin \theta - c \cdot \sin \alpha - x_3)^2 \\ & + \frac{1}{2} k_{54} (x_5 - b \cdot \sin \theta + d \cdot \sin \alpha - x_3)^2 \\ & + \frac{1}{2} k_6 (x_6 - x_5 - a \cdot \sin \theta - d \cdot \sin \alpha)^2 + \frac{1}{2} k_7 (x_7 - x_6)^2 \\ & + \frac{1}{2} k_8 (x_8 - x_7)^2 + \frac{1}{2} k_9 (x_9 - x_8)^2 + \frac{1}{2} k_{10} (x_{10} - x_9)^2 \\ & + \frac{1}{2} k_{11} (x_{11} - x_{10})^2 + \frac{1}{2} k_{12} (x_{12} - x_7)^2 + \frac{1}{2} k_{14} (x_{14} - x_{13})^2 \\ & + \frac{1}{2} k_{15} (x_{15} - x_{14})^2 + \frac{1}{2} k_{159} (x_{15} - x_9)^2 + \frac{1}{2} k_{16} (x_{16} - x_{15})^2 \\ & + \frac{1}{2} k_{17} (x_{17} - x_{16})^2 \end{aligned} \quad (4.109)$$

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_1} \right) &= m_1 \cdot \ddot{x}_1, & \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_2} \right) &= m_2 \cdot \ddot{x}_2, & \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_3} \right) &= m_3 \cdot \ddot{x}_3, \\
\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_4} \right) &= m_4 \cdot \ddot{x}_4, & \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_5} \right) &= m_5 \cdot \ddot{x}_5, & \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_6} \right) &= m_6 \cdot \ddot{x}_6, \\
\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_7} \right) &= m_7 \cdot \ddot{x}_7, & \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_8} \right) &= m_8 \cdot \ddot{x}_8, & \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_9} \right) &= m_9 \cdot \ddot{x}_9, \\
\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_{10}} \right) &= m_{10} \cdot \ddot{x}_{10}, & \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_{11}} \right) &= m_{11} \cdot \ddot{x}_{11}, & \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_{12}} \right) &= m_{12} \cdot \ddot{x}_{12}, \\
\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_{13}} \right) &= m_{13} \cdot \ddot{x}_{13}, & \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_{14}} \right) &= m_{14} \cdot \ddot{x}_{14}, & \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_{15}} \right) &= m_{15} \cdot \ddot{x}_{15}, \\
\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_{16}} \right) &= m_{16} \cdot \ddot{x}_{16}, & \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_{17}} \right) &= m_{17} \cdot \ddot{x}_{17}, & \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}} \right) &= I_z \cdot \ddot{\theta}, \\
\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}} \right) &= I_x \cdot \ddot{\alpha}.
\end{aligned} \tag{4.110}$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_1} = -b_1 (\dot{x}_5 + a \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta - c \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha - \dot{x}_1) \tag{4.111}$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_2} = -b_2 (\dot{x}_5 + a \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta + d \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha - \dot{x}_2) \tag{4.112}$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_3} = -b_3 (\dot{x}_5 - b \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta - c \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha - \dot{x}_3) \tag{4.113}$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_4} = -b_4 (\dot{x}_5 - b \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta + d \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha - \dot{x}_4) \tag{4.114}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_5} &= b_1 \begin{pmatrix} \dot{x}_5 + a \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta \\ -c \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha - \dot{x}_1 \end{pmatrix} + b_2 \begin{pmatrix} \dot{x}_5 + a \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta \\ +d \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha - \dot{x}_2 \end{pmatrix} \\
&+ b_3 \begin{pmatrix} \dot{x}_5 - b \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta \\ -c \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha - \dot{x}_3 \end{pmatrix} + b_4 \begin{pmatrix} \dot{x}_5 - b \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta \\ +d \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha - \dot{x}_4 \end{pmatrix} \\
&- b_6 (\dot{x}_6 - \dot{x}_5 - a \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta - d \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha)
\end{aligned} \tag{4.115}$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_6} = b_6 (\dot{x}_6 - \dot{x}_5 - a \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta - d \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha) \tag{4.116}$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_7} = b_7 (\dot{x}_7 - \dot{x}_6) - b_8 (\dot{x}_8 - \dot{x}_7) - b_{12} (\dot{x}_{12} - \dot{x}_7) \tag{4.117}$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_8} = b_8(\dot{x}_8 - \dot{x}_7) - b_9(\dot{x}_9 - \dot{x}_8) \quad (4.118)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_9} = b_9(\dot{x}_9 - \dot{x}_8) - b_{10}(\dot{x}_{10} - \dot{x}_9) - b_{15}(\dot{x}_{15} - \dot{x}_9) \quad (4.119)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{10}} = b_{10}(\dot{x}_{10} - \dot{x}_9) - b_{11}(\dot{x}_{11} - \dot{x}_{10}) \quad (4.120)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{11}} = b_{11}(\dot{x}_{11} - \dot{x}_{10}) \quad (4.121)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{12}} = b_{12}(\dot{x}_{12} - \dot{x}_7) - b_{13}(\dot{x}_{13} - \dot{x}_{12}) \quad (4.122)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{13}} = b_{13}(\dot{x}_{13} - \dot{x}_{12}) - b_{14}(\dot{x}_{14} - \dot{x}_{13}) \quad (4.123)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{14}} = b_{14}(\dot{x}_{14} - \dot{x}_{13}) - b_{15}(\dot{x}_{15} - \dot{x}_{14}) \quad (4.124)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{15}} = b_{15}(\dot{x}_{15} - \dot{x}_{14}) + b_{159}(\dot{x}_{15} - \dot{x}_9) - b_{16}(\dot{x}_{16} - \dot{x}_{15}) \quad (4.125)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{16}} = b_{16}(\dot{x}_{16} - \dot{x}_{15}) - b_{17}(\dot{x}_{17} - \dot{x}_{16}) \quad (4.126)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{17}} = b_{17}(\dot{x}_{17} - \dot{x}_{16}) \quad (4.127)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}} &= b_1 \cdot a \cdot \cos \theta \begin{pmatrix} \dot{x}_5 + a \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta \\ -c \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha - \dot{x}_1 \end{pmatrix} + b_2 \cdot a \cdot \cos \theta \begin{pmatrix} \dot{x}_5 + a \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta \\ +d \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha - \dot{x}_2 \end{pmatrix} \\ &- b_3 \cdot b \cdot \cos \theta \begin{pmatrix} \dot{x}_5 - b \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta \\ -c \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha - \dot{x}_3 \end{pmatrix} - b_4 \cdot b \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta \begin{pmatrix} \dot{x}_5 - b \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta \\ +d \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha - \dot{x}_4 \end{pmatrix} \\ &- b_6 \cdot a \cdot \cos \theta (\dot{x}_6 - \dot{x}_5 - a \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta - d \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha) \end{aligned} \quad (4.128)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial D}{\partial \dot{\alpha}} &= -b_1 \cdot c \cdot \cos \alpha \begin{pmatrix} \dot{x}_5 + a \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta \\ -c \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha - \dot{x}_1 \end{pmatrix} + b_2 \cdot d \cdot \cos \alpha \begin{pmatrix} \dot{x}_5 + a \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta \\ +d \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha - \dot{x}_2 \end{pmatrix} \\ &- b_3 \cdot c \cdot \cos \alpha \begin{pmatrix} \dot{x}_5 - b \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta \\ -c \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha - \dot{x}_3 \end{pmatrix} + b_4 \cdot d \cdot \cos \alpha \begin{pmatrix} \dot{x}_5 - b \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta \\ +d \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha - \dot{x}_4 \end{pmatrix} \\ &- b_6 \cdot d \cdot \cos \alpha (\dot{x}_6 - \dot{x}_5 - a \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta - d \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha) \end{aligned} \quad (4.129)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_1} = k_1(x_1 - z_1) - k_{51}(x_5 + a \cdot \sin \theta - c \cdot \sin \alpha - x_1) \quad (4.130)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_2} = k_2(x_2 - z_2) - k_{52}(x_5 + a \cdot \sin \theta + d \cdot \sin \alpha - x_2) \quad (4.131)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_3} = k_3(x_3 - z_3) - k_{53}(x_5 - b \cdot \sin \theta - c \cdot \sin \alpha - x_3) \quad (4.132)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_4} = k_4(x_4 - z_4) - k_{54}(x_5 - b \cdot \sin \theta + d \cdot \sin \alpha - x_3) \quad (4.133)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial x_5} = & k_{51} \begin{pmatrix} x_5 + a \cdot \sin \theta \\ -c \cdot \sin \alpha - x_1 \end{pmatrix} + k_{52} \begin{pmatrix} x_5 + a \cdot \sin \theta \\ +d \cdot \sin \alpha - x_2 \end{pmatrix} + k_{53} \begin{pmatrix} x_5 - b \cdot \sin \theta \\ -c \cdot \sin \alpha - x_3 \end{pmatrix} \\ & + k_{54} \begin{pmatrix} x_5 - b \cdot \sin \theta \\ +d \cdot \sin \alpha - x_3 \end{pmatrix} - k_6 \begin{pmatrix} x_6 - x_5 - a \cdot \sin \theta \\ -d \cdot \sin \alpha \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4.134)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_6} = k_6(x_6 - x_5 - a \cdot \sin \theta - d \cdot \sin \alpha) - k_7(x_7 - x_6) \quad (4.135)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_7} = k_7(x_7 - x_6) - k_{12}(x_{12} - x_7) - k_8(x_8 - x_7) \quad (4.136)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_8} = k_8(x_8 - x_7) - k_9(x_9 - x_8) \quad (4.137)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_9} = k_9(x_9 - x_8) - k_{10}(x_{10} - x_9) - k_{15}(x_{15} - x_9) \quad (4.138)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_{10}} = k_{10}(x_{10} - x_9) - k_{11}(x_{11} - x_{10}) \quad (4.139)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_{11}} = k_{11}(x_{11} - x_{10}) \quad (4.140)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_{12}} = k_{12}(x_{12} - x_7) - k_{13}(x_{13} - x_{12}) \quad (4.141)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_{13}} = k_{13}(x_{13} - x_{12}) - k_{14}(x_{14} - x_{13}) \quad (4.142)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_{14}} = k_{14}(x_{14} - x_{13}) - k_{15}(x_{15} - x_{14}) \quad (4.143)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_{15}} = k_{15}(x_{15} - x_{14}) + k_{159}(x_{15} - x_9) - k_{16}(x_{16} - x_{15}) \quad (4.144)$$



$$\frac{\partial P}{\partial x_{16}} = k_{16}(x_{16} - x_{15}) - k_{17}(x_{17} - x_{16}) \quad (4.145)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x_{17}} = k_{17}(x_{17} - x_{16}) \quad (4.146)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial \theta} &= k_{51} \cdot a \cdot \cos \theta \begin{pmatrix} x_5 + a \cdot \sin \theta \\ -c \cdot \sin \alpha - x_1 \end{pmatrix} + k_{52} \cdot a \cdot \cos \theta \begin{pmatrix} x_5 + a \cdot \sin \theta \\ +d \cdot \sin \alpha - x_2 \end{pmatrix} \\ &- k_{53} \cdot b \cdot \cos \theta \begin{pmatrix} x_5 - b \cdot \sin \theta \\ -c \cdot \sin \alpha - x_3 \end{pmatrix} - k_{54} \cdot b \cdot \cos \theta \begin{pmatrix} x_5 - b \cdot \sin \theta \\ +d \cdot \sin \alpha - x_3 \end{pmatrix} \\ &- k_6 \cdot a \cdot \cos \theta (x_6 - x_5 - a \cdot \sin \theta - d \cdot \sin \alpha) \end{aligned} \quad (4.147)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial \alpha} &= -k_{51} \cdot c \cdot \cos \alpha \begin{pmatrix} x_5 + a \cdot \sin \theta \\ -c \cdot \sin \alpha - x_1 \end{pmatrix} + k_{52} \cdot d \cdot \cos \alpha \begin{pmatrix} x_5 + a \cdot \sin \theta \\ +d \cdot \sin \alpha - x_2 \end{pmatrix} \\ &- k_{53} \cdot c \cdot \cos \alpha \begin{pmatrix} x_5 - b \cdot \sin \theta \\ -c \cdot \sin \alpha - x_3 \end{pmatrix} + k_{54} \cdot d \cdot \cos \alpha \begin{pmatrix} x_5 - b \cdot \sin \theta \\ +d \cdot \sin \alpha - x_3 \end{pmatrix} \\ &- k_6 \cdot d \cdot \cos \alpha (x_6 - x_5 - a \cdot \sin \theta - d \cdot \sin \alpha) \end{aligned} \quad (4.148)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_1} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_1} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_1} &= 0 \\ \Rightarrow m_1 \cdot \ddot{x}_1 + k_1(x_1 - z_1) - k_{51}(x_5 + a \cdot \sin \theta - c \cdot \sin \alpha - x_1) \\ &- b_1(\dot{x}_5 + a \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta - c \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha - \dot{x}_1) = 0 \end{aligned} \quad (4.149)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_2} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_2} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_2} &= 0 \\ \Rightarrow m_2 \cdot \ddot{x}_2 + k_2(x_2 - z_2) - k_{52}(x_5 + a \cdot \sin \theta + d \cdot \sin \alpha - x_2) \\ &- b_2(\dot{x}_5 + a \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta + d \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha - \dot{x}_2) = 0 \end{aligned} \quad (4.150)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_3} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_3} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_3} &= 0 \\ \Rightarrow m_3 \cdot \ddot{x}_3 + k_3(x_3 - z_3) - k_{53}(x_5 - b \cdot \sin \theta - c \cdot \sin \alpha - x_3) \\ &- b_3(\dot{x}_5 - b \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta - c \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha - \dot{x}_3) = 0 \end{aligned} \quad (4.151)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_4} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_4} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_4} &= 0 \\ \Rightarrow m_4 \cdot \ddot{x}_4 + k_4(x_4 - z_4) - k_{54}(x_5 - b \cdot \sin \theta + d \cdot \sin \alpha - x_3) \\ &- b_4(\dot{x}_5 - b \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta + d \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha - \dot{x}_4) = 0 \end{aligned} \quad (4.152)$$

$$\begin{aligned}
& \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_5} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_5} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_5} = 0 \\
& \Rightarrow m_5 \cdot \ddot{x}_5 + k_{51} \begin{pmatrix} x_5 + a \cdot \sin \theta \\ -c \cdot \sin \alpha - x_1 \end{pmatrix} + k_{52} \begin{pmatrix} x_5 + a \cdot \sin \theta \\ +d \cdot \sin \alpha - x_2 \end{pmatrix} \\
& + k_{53} \begin{pmatrix} x_5 - b \cdot \sin \theta \\ -c \cdot \sin \alpha - x_3 \end{pmatrix} + k_{54} \begin{pmatrix} x_5 - b \cdot \sin \theta \\ +d \cdot \sin \alpha - x_4 \end{pmatrix} \\
& + b_1 \begin{pmatrix} \dot{x}_5 + a \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta \\ -c \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha - \dot{x}_1 \end{pmatrix} - k_6 \begin{pmatrix} x_6 - a \cdot \sin \theta \\ -x_5 - d \cdot \sin \alpha \end{pmatrix} \\
& + b_2 \begin{pmatrix} \dot{x}_5 + a \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta \\ +d \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha - \dot{x}_2 \end{pmatrix} + b_3 \begin{pmatrix} \dot{x}_5 - b \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta \\ -c \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha - \dot{x}_3 \end{pmatrix} \\
& + b_4 \begin{pmatrix} \dot{x}_5 - b \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta \\ +d \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha - \dot{x}_4 \end{pmatrix} - b_6 \begin{pmatrix} \dot{x}_6 - a \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta \\ -\dot{x}_5 - d \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha \end{pmatrix} = 0
\end{aligned} \tag{4.153}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_6} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_6} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_6} = 0 \\
& \Rightarrow m_6 \cdot \ddot{x}_6 + k_6 (x_6 - x_5 - a \cdot \sin \theta - d \cdot \sin \alpha) \\
& - k_7 (x_7 - x_6) + b_6 (\dot{x}_6 - \dot{x}_5 - a \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta - d \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha) = 0
\end{aligned} \tag{4.154}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_7} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_7} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_7} = 0 \\
& \Rightarrow m_7 \cdot \ddot{x}_7 + k_7 (x_7 - x_6) - k_8 (x_8 - x_7) - k_{12} (x_{12} - x_7) \\
& + b_7 (\dot{x}_7 - \dot{x}_6) - b_8 (\dot{x}_8 - \dot{x}_7) - b_{12} (\dot{x}_{12} - \dot{x}_7) = 0
\end{aligned} \tag{4.155}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_8} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_8} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_8} = 0 \\
& \Rightarrow m_8 \cdot \ddot{x}_8 + k_8 (x_8 - x_7) - k_9 (x_9 - x_8) + b_8 (\dot{x}_8 - \dot{x}_7) - b_9 (\dot{x}_9 - \dot{x}_8) = 0
\end{aligned} \tag{4.156}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_9} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_9} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_9} = 0 \\
& \Rightarrow m_9 \cdot \ddot{x}_9 + k_9 (x_9 - x_8) - k_{10} (x_{10} - x_9) - k_{159} (x_{15} - x_9) \\
& + b_9 (\dot{x}_9 - \dot{x}_8) - b_{10} (\dot{x}_{10} - \dot{x}_9) - b_{159} (\dot{x}_{15} - \dot{x}_9) = 0
\end{aligned} \tag{4.157}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_{10}} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_{10}} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{10}} = 0 \\
& \Rightarrow m_{10} \cdot \ddot{x}_{10} + k_{10} (x_{10} - x_9) - k_{11} (x_{11} - x_{10}) \\
& + b_{10} (\dot{x}_{10} - \dot{x}_9) - b_{11} (\dot{x}_{11} - \dot{x}_{10}) = 0
\end{aligned} \tag{4.158}$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_{11}} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_{11}} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{11}} = 0 \quad (4.159)$$

$$\Rightarrow m_{11} \cdot \ddot{x}_{11} + k_{11}(x_{11} - x_{10}) + b_{11}(\dot{x}_{11} - \dot{x}_{10}) = 0$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_{12}} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_{12}} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{12}} = 0 \quad (4.160)$$

$$\Rightarrow m_{12} \cdot \ddot{x}_{12} + k_{12}(x_{12} - x_7) - k_{13}(x_{13} - x_{12}) + b_{12}(\dot{x}_{12} - \dot{x}_7) - b_{13}(\dot{x}_{13} - \dot{x}_{12}) = 0$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_{13}} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_{13}} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{13}} = 0 \quad (4.161)$$

$$\Rightarrow m_{13} \cdot \ddot{x}_{13} + k_{13}(x_{13} - x_{12}) - k_{14}(x_{14} - x_{13}) + b_{13}(\dot{x}_{13} - \dot{x}_{12}) - b_{14}(\dot{x}_{14} - \dot{x}_{13}) = 0$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_{14}} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_{14}} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{14}} = 0 \quad (4.162)$$

$$\Rightarrow m_{14} \cdot \ddot{x}_{14} + k_{14}(x_{14} - x_{13}) - k_{15}(x_{15} - x_{14}) + b_{14}(\dot{x}_{14} - \dot{x}_{13}) - b_{15}(\dot{x}_{15} - \dot{x}_{14}) = 0$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_{15}} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_{15}} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{15}} = 0 \quad (4.163)$$

$$\Rightarrow m_{15} \cdot \ddot{x}_{15} + k_{15}(x_{15} - x_{14}) + k_{159}(x_{15} - x_9) - k_{16}(x_{16} - x_{15}) + b_{15}(\dot{x}_{15} - \dot{x}_{14}) + b_{159}(\dot{x}_{15} - \dot{x}_9) - b_{16}(\dot{x}_{16} - \dot{x}_{15}) = 0$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{\alpha}} \right) + \frac{\partial P}{\partial \alpha} + \frac{\partial D}{\partial \dot{\alpha}} = 0 \quad (4.164)$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow & I\ddot{\alpha} - k_{51} \cdot c \cdot \cos \alpha (x_5 + a \cdot \sin \theta - c \cdot \sin \alpha - x_1) \\ & + k_{52} \cdot d \cdot \cos \alpha (x_5 + a \cdot \sin \theta + d \cdot \sin \alpha - x_2) \\ & - k_{53} \cdot c \cdot \cos \alpha (x_5 - b \cdot \sin \theta - c \cdot \sin \alpha - x_3) \\ & + k_{54} \cdot d \cdot \cos \alpha (x_5 - b \cdot \sin \theta + d \cdot \sin \alpha - x_4) \\ & - k_6 \cdot d \cdot \cos \alpha (x_6 - x_5 - a \cdot \sin \theta - d \cdot \sin \alpha) \\ & - b_1 \cdot c \cdot \cos \alpha (\dot{x}_5 + a \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta - c \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha - \dot{x}_1) \\ & + b_2 \cdot d \cdot \cos \alpha (\dot{x}_5 + a \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta + d \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha - \dot{x}_2) \\ & - b_3 \cdot c \cdot \cos \alpha (\dot{x}_5 - b \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta - c \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha - \dot{x}_3) \\ & + b_4 \cdot d \cdot \cos \alpha (\dot{x}_5 - b \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta + d \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha - \dot{x}_4) \\ & - b_6 \cdot d \cdot \cos \alpha (\dot{x}_6 - \dot{x}_5 - a \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta - d \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha) = 0 \end{aligned}$$

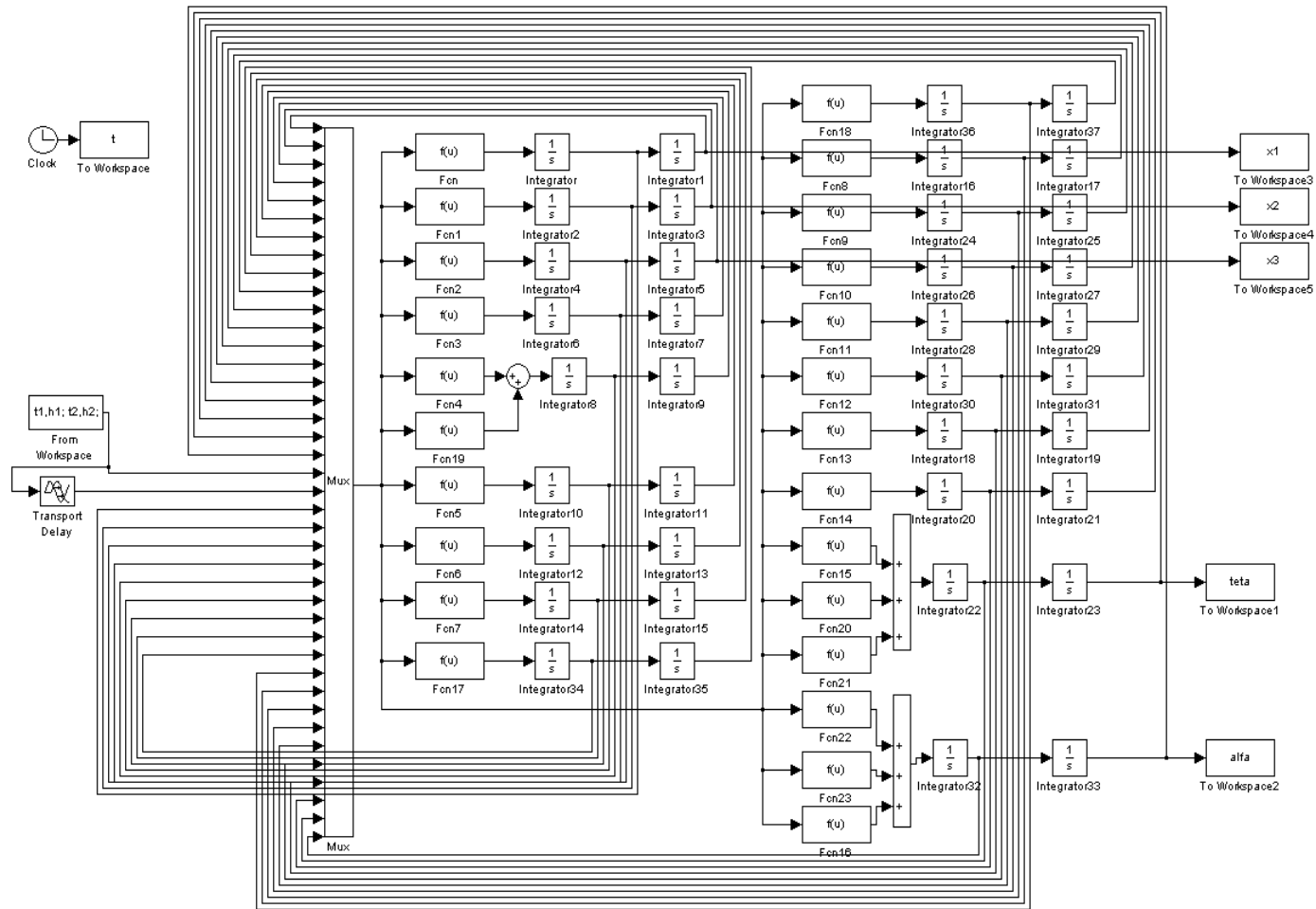
$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_{16}} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_{16}} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{16}} &= 0 \\ \Rightarrow m_{16} \cdot \ddot{x}_{16} + k_{16}(x_{16} - x_{15}) - k_{17}(x_{17} - x_{16}) \\ + b_{16}(\dot{x}_{16} - \dot{x}_{15}) - b_{17}(\dot{x}_{17} - \dot{x}_{16}) &= 0 \end{aligned} \quad (4.165)$$

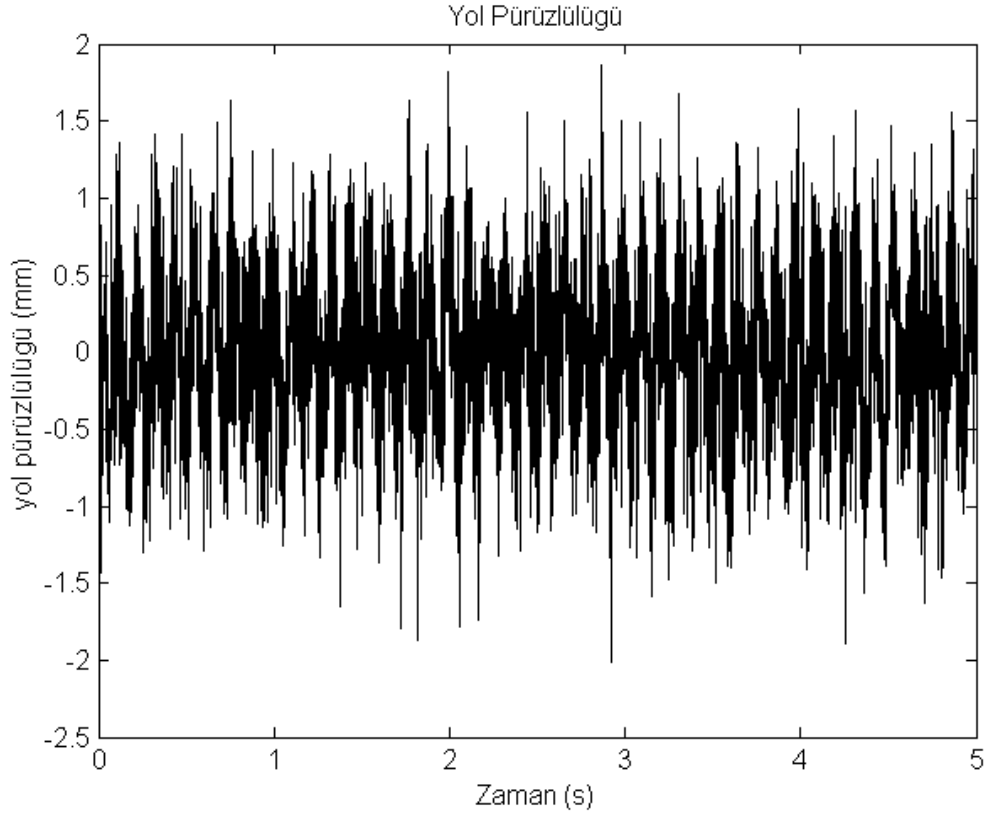
$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{x}_{17}} \right) + \frac{\partial P}{\partial x_{17}} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_{17}} &= 0 \\ \Rightarrow m_{17} \cdot \ddot{x}_{17} + k_{17}(x_{17} - x_{16}) + b_{17}(\dot{x}_{17} - \dot{x}_{16}) &= 0 \end{aligned} \quad (4.166)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}} \right) + \frac{\partial P}{\partial \theta} + \frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}} &= 0 \\ \Rightarrow I\ddot{\theta} + k_{51} \cdot a \cdot \cos\theta(x_5 + a \cdot \sin\theta - c \cdot \sin\alpha - x_1) \\ + k_{52} \cdot a \cdot \cos\theta(x_5 + a \cdot \sin\theta + d \cdot \sin\alpha - x_2) \\ + k_{53} \cdot b \cdot \cos\theta(x_5 - b \cdot \sin\theta - c \cdot \sin\alpha - x_3) \\ - k_{54} \cdot b \cdot \cos\theta(x_5 - b \cdot \sin\theta + d \cdot \sin\alpha - x_4) \\ + k_6 \cdot a \cdot \cos\theta(x_6 - x_5 - a \cdot \sin\theta - d \cdot \sin\alpha) \\ + b_1 \cdot a \cdot \cos\theta(\dot{x}_5 + a \cdot \dot{\theta} \cdot \cos\theta - c \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos\alpha - \dot{x}_1) \\ + b_2 \cdot a \cdot \cos\theta(\dot{x}_5 + a \cdot \dot{\theta} \cdot \cos\theta + d \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos\alpha - \dot{x}_2) \\ - b_3 \cdot b \cdot \cos\theta(\dot{x}_5 - b \cdot \dot{\theta} \cdot \cos\theta - c \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos\alpha - \dot{x}_3) \\ - b_4 \cdot b \cdot \dot{\theta} \cdot \cos\theta(\dot{x}_5 - b \cdot \dot{\theta} \cdot \cos\theta + d \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos\alpha - \dot{x}_4) \\ - b_6 \cdot a \cdot \cos\theta(\dot{x}_6 - \dot{x}_5 - a \cdot \dot{\theta} \cdot \cos\theta - d \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos\alpha) &= 0 \end{aligned} \quad (4.167)$$

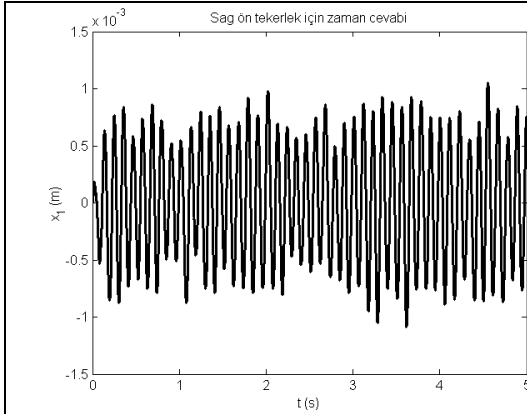
Taşıtın aşağıda verilen grafikteki gibi bir yol pürüzlülüğüne maruz kaldığı düşünülün. Bu durumda aşağıdaki grafik modele girdi olarak girilecektir. Sonuçta matlab simulinkte ilgili parametreler [EK A3] girilip simülasyon yapılır ise aşağıdaki zaman ve frekans cevapları elde edilir.

**Tablo 4.3** Matlab'te tam taşıt ve insan modeli için hazırlanmış blok diyagramı

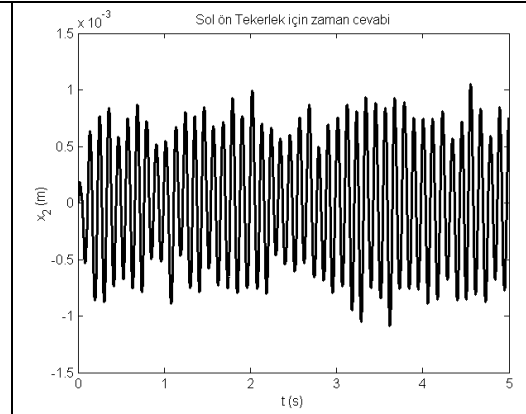




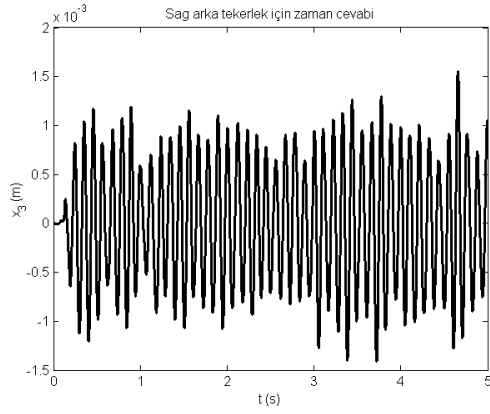
Şekil 4.124 Tam taşıt ve insan modeli için sistem girişi



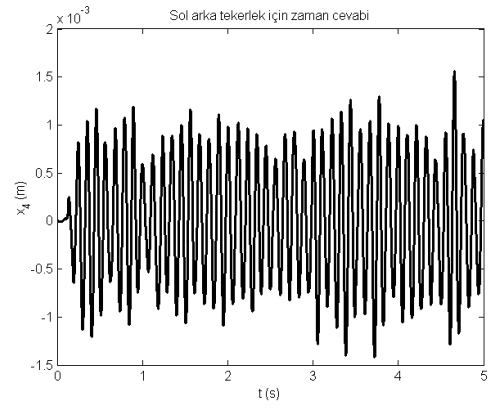
Şekil 4.125 Sağ Ön tekerlek için zaman cevabı



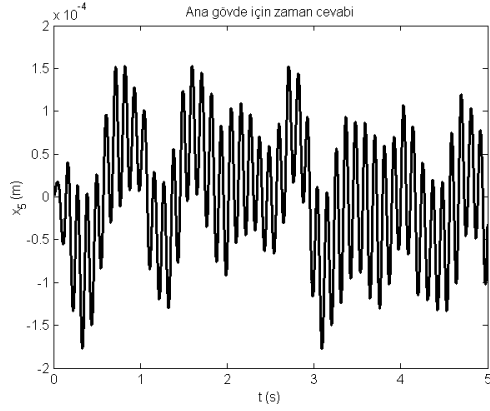
Şekil 4.126 Sol Ön tekerlek için zaman cevabı



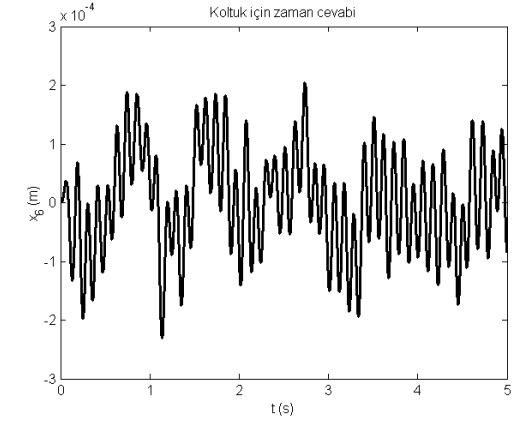
**Şekil 4.127** Sağ arka tekerlek için zaman cevabı



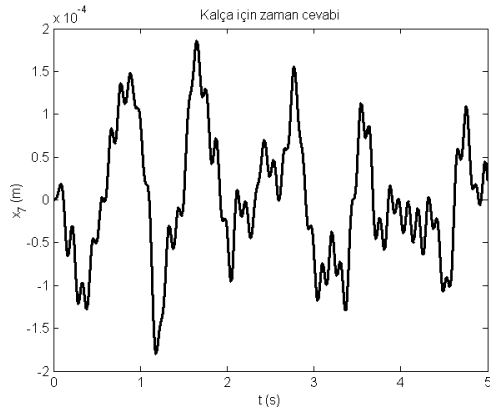
**Şekil 4.128** Sol arka tekerlek için zaman cevabı



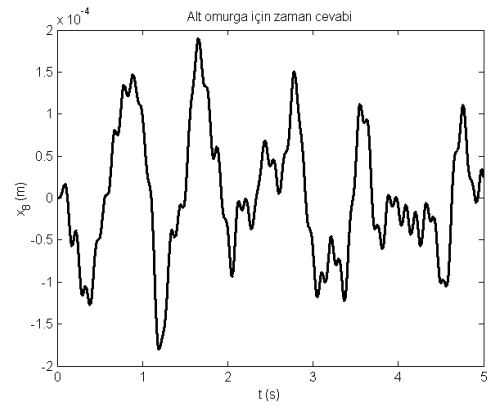
**Şekil 4.129** Ana gövde için zaman cevabı



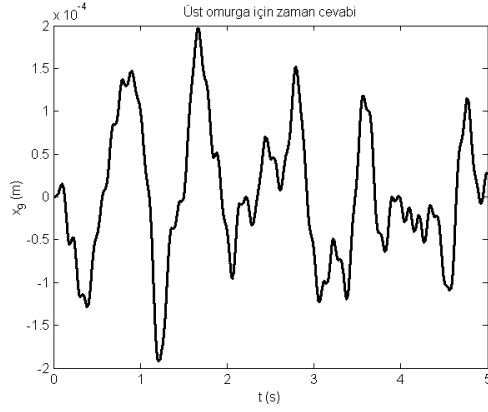
**Şekil 4.130** Koltuk için zaman cevabı



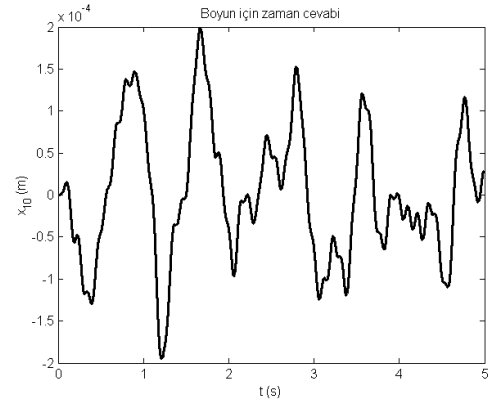
**Şekil 4.131** Kalça için zaman cevabı



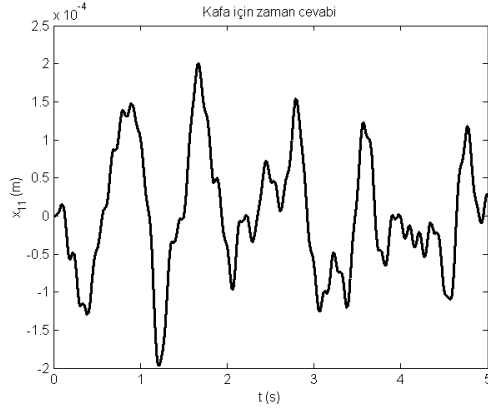
**Şekil 4.132** Alt omurga için zaman cevabı



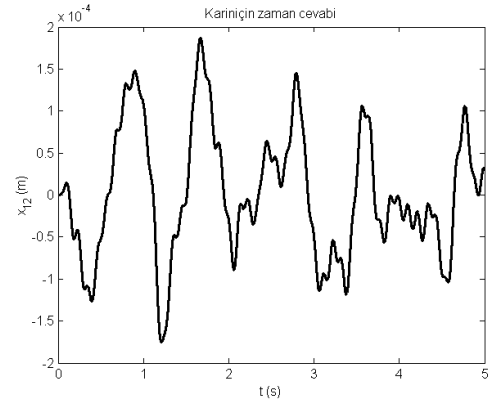
Şekil 4.133 Üst Omurga için zaman cevabı



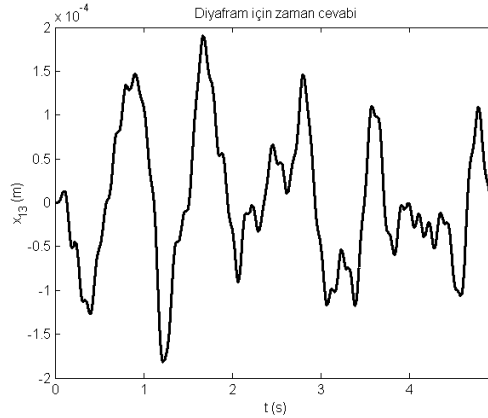
Şekil 4.134 Boyun için zaman cevabı



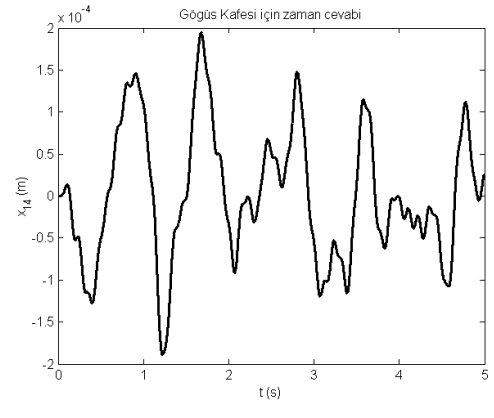
Şekil 4.135 Kafa için zaman cevabı



Şekil 4.136 Karın için zaman cevabı

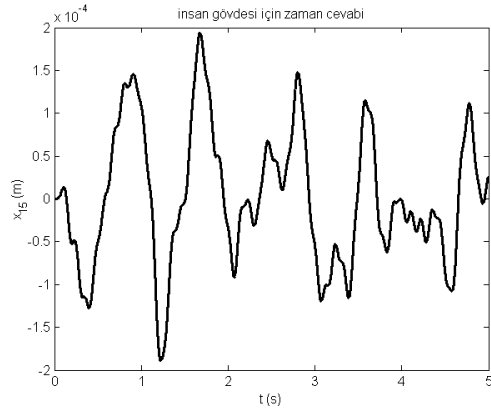


Şekil 4.137 Diyafram için zaman cevabı

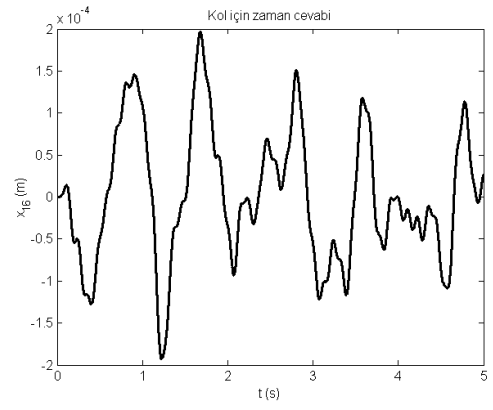


Şekil 4.138 Göğüs Kafesi için zaman cevabı

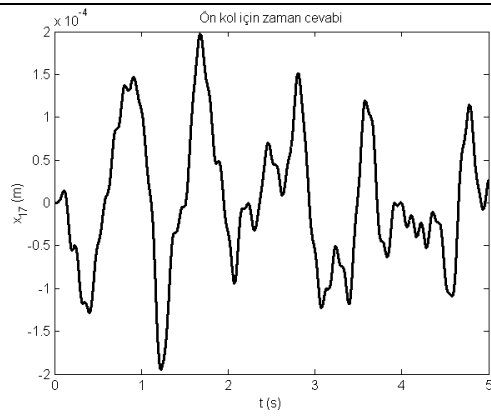




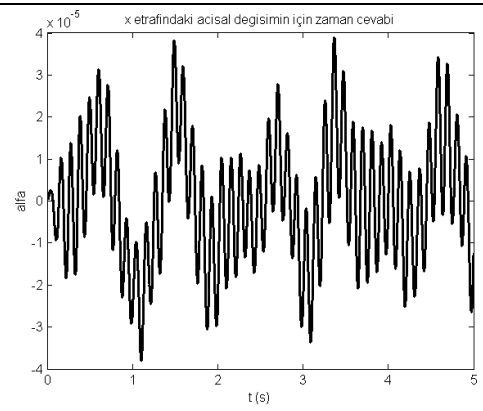
Şekil 4.139 İnsan gövdesi için zaman cevabı



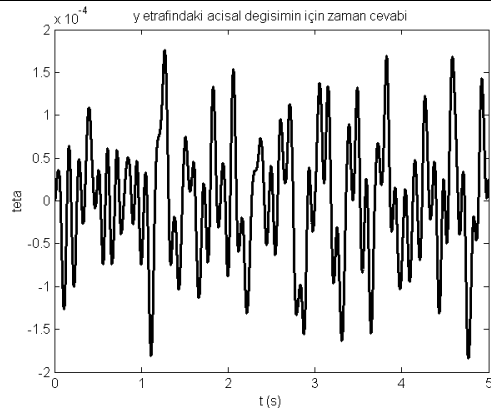
Şekil 4.140 Kol için zaman cevabı



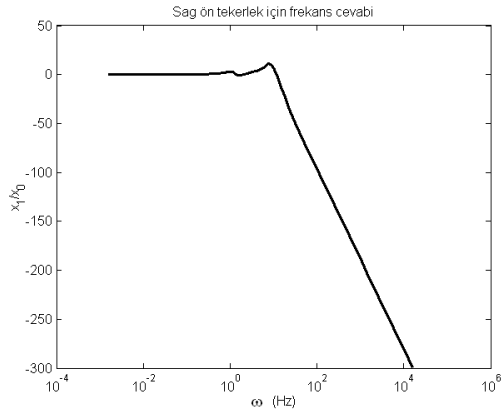
Şekil 4.141 Ön Kol için zaman cevabı



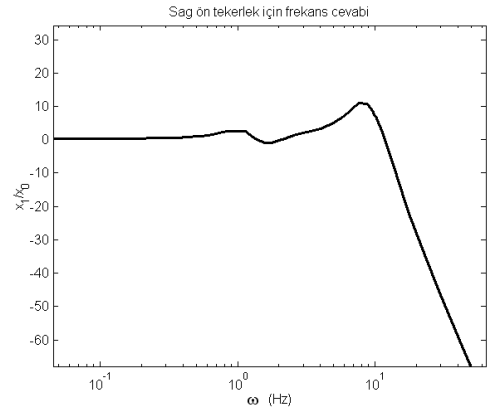
Şekil 4.142 Alfa için zaman cevabı



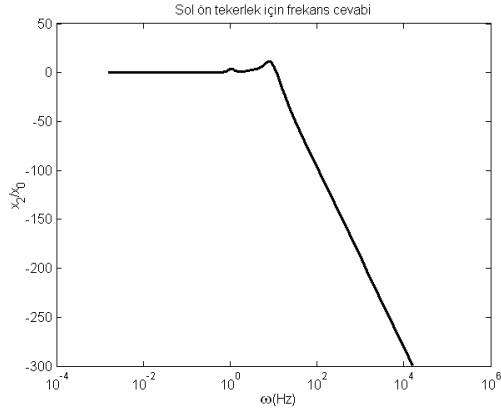
Şekil 4.143 Teta için zaman cevabı



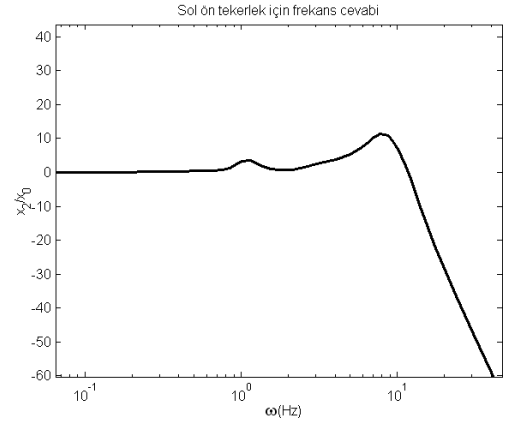
**Şekil 4.144** Sağ Ön tekerlek için frekans cevabı



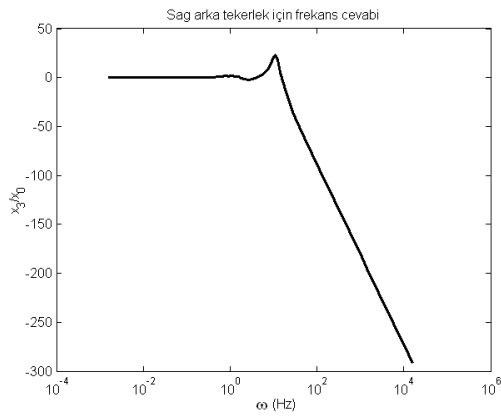
**Şekil 4.145** Sağ Ön tekerlek için frekans cevabı yakından gösterim



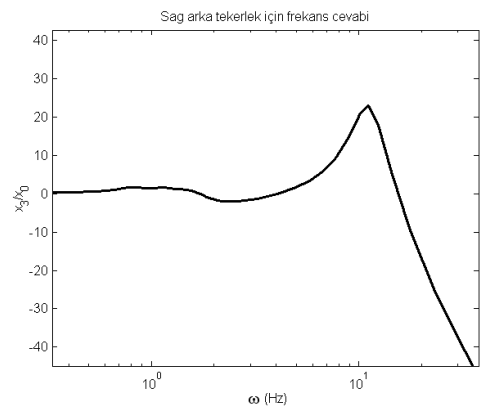
**Şekil 4.146** Sol Ön tekerlek için frekans cevabı



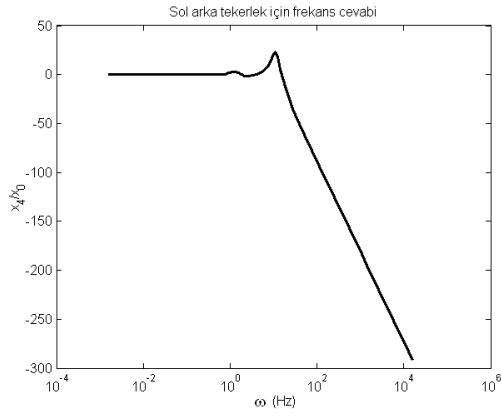
**Şekil 4.147** Sol Ön tekerlek için frekans cevabı yakından gösterim



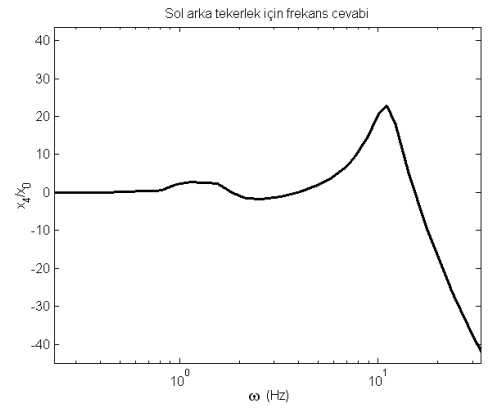
**Şekil 4.148** Sağ arka tekerlek için frekans cevabı



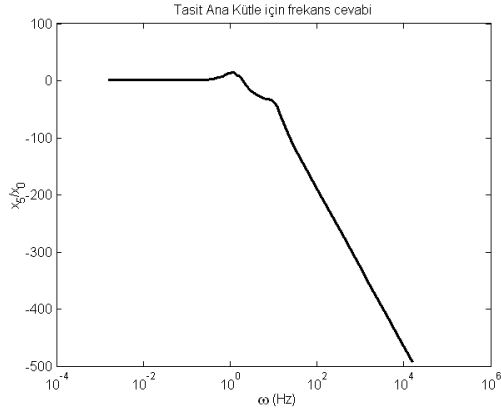
**Şekil 4.149** Sağ arka tekerlek için frekans cevabı yakından gösterim



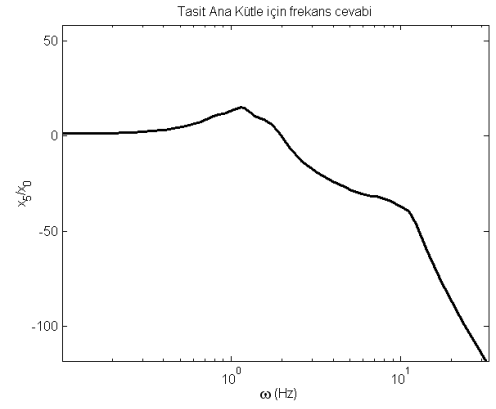
**Şekil 4.150** Sol Arka tekerlek için frekans cevabı



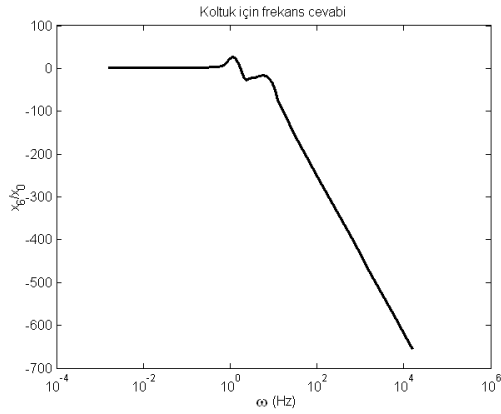
**Şekil 4.151** Sol arka tekerlek için frekans cevabı yakından gösterim



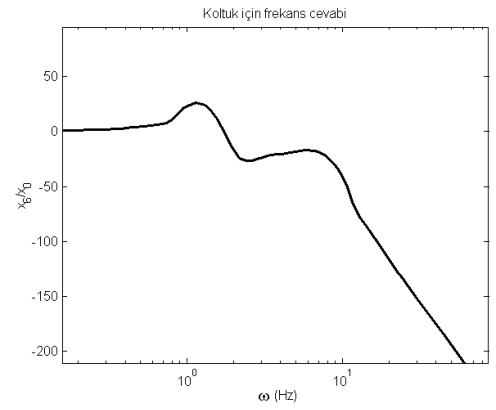
**Şekil 4.152** Taşıt Ana gövdesi için frekans cevabı



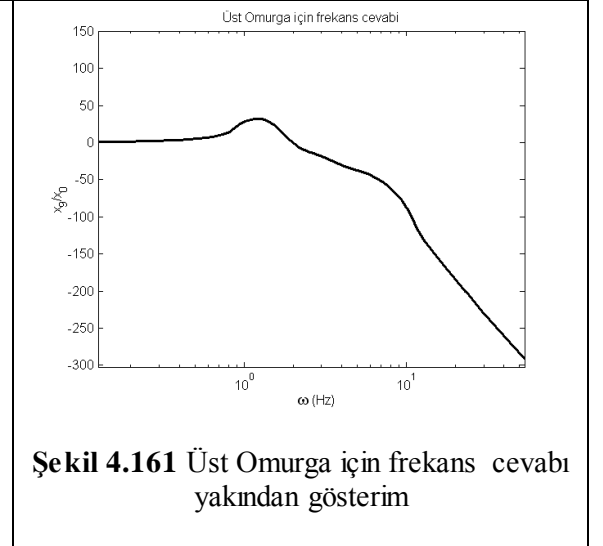
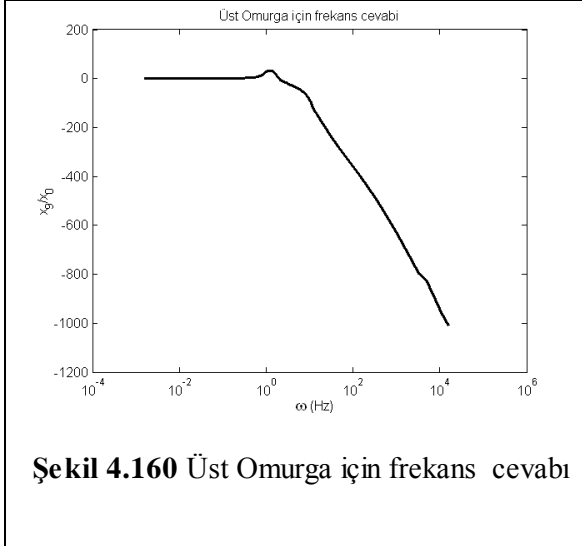
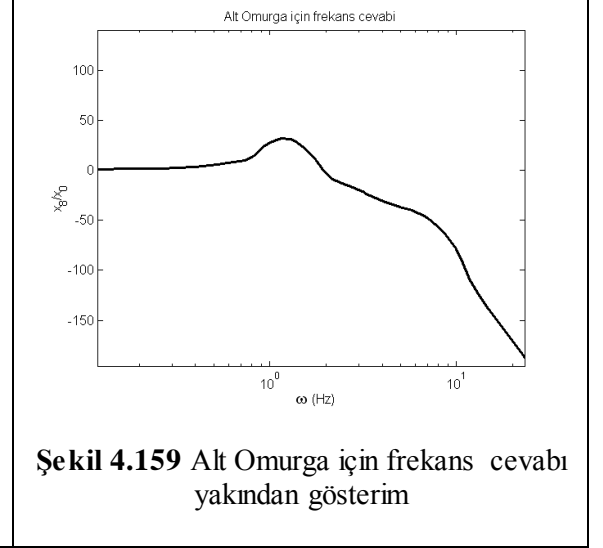
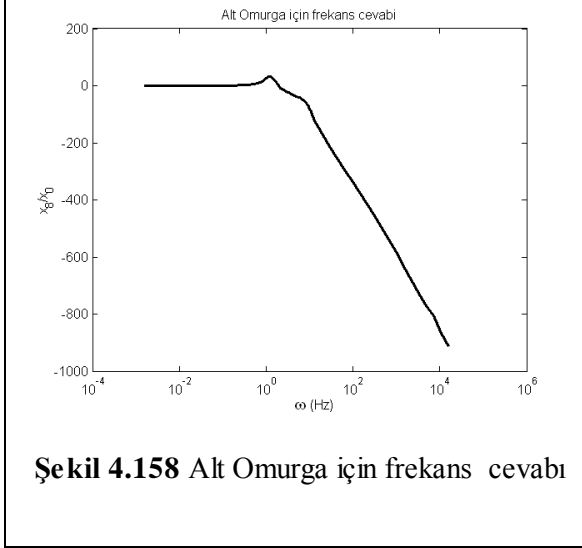
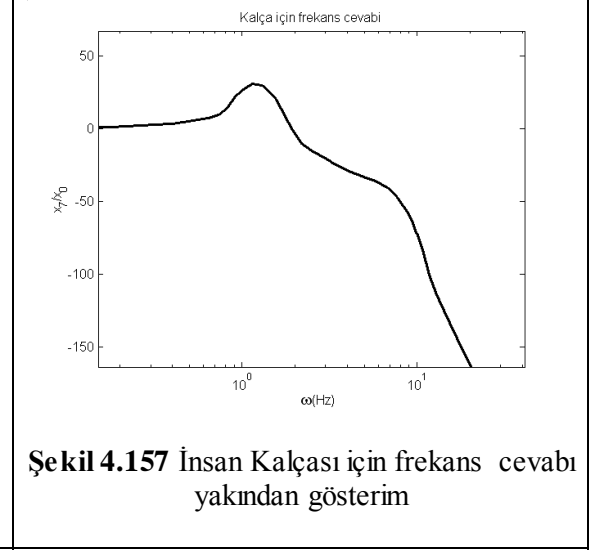
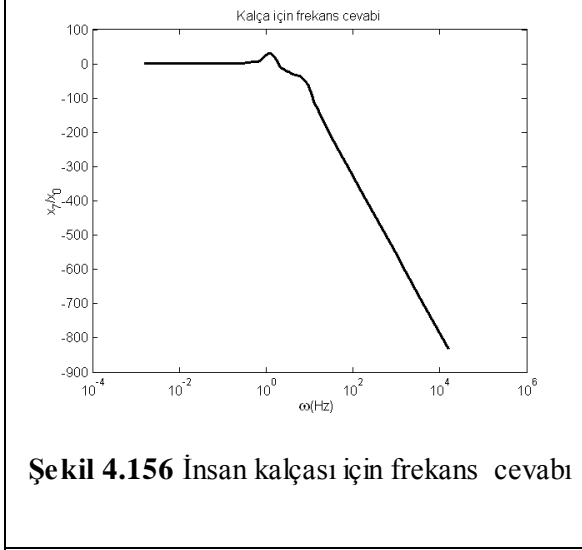
**Şekil 4.153** Taşıt ana gövdesi için frekans cevabı yakından gösterim

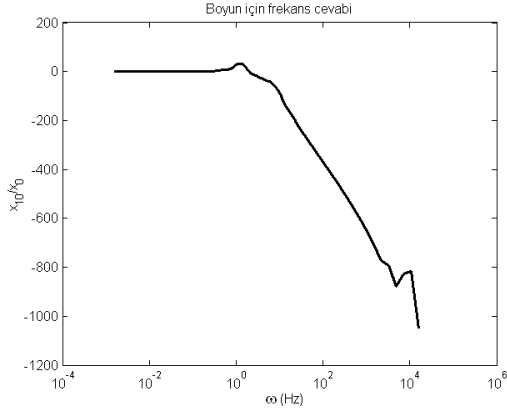


**Şekil 4.154** Koltuk için frekans cevabı

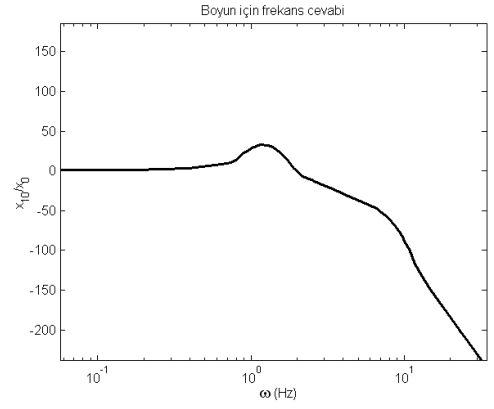


**Şekil 4.155** Koltuk için frekans cevabı yakından gösterim

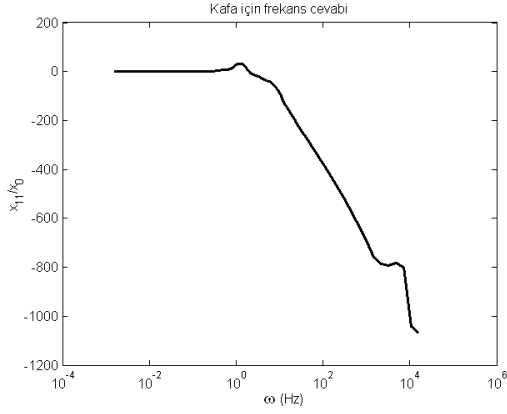




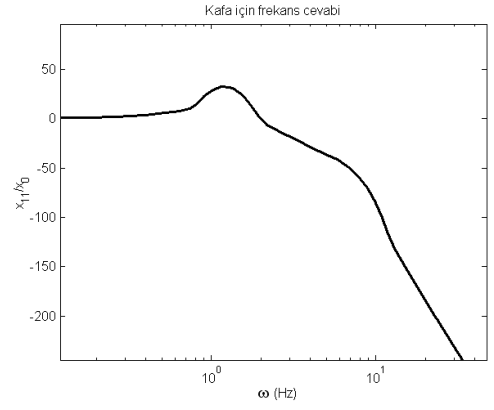
Şekil 4.162 Boyun için frekans cevabı



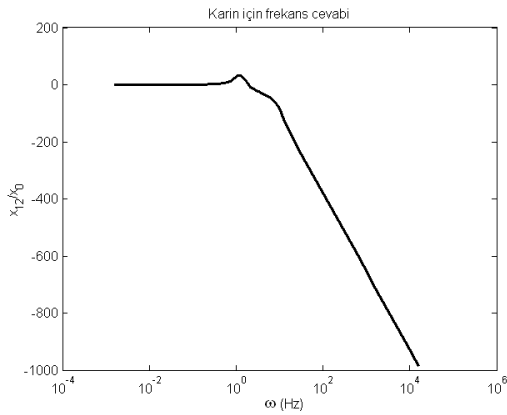
Şekil 4.163 Boyun için frekans cevabı yakından gösterim



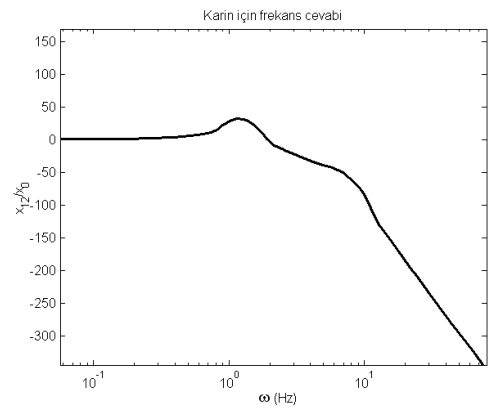
Şekil 4.164 Kafa için frekans cevabı



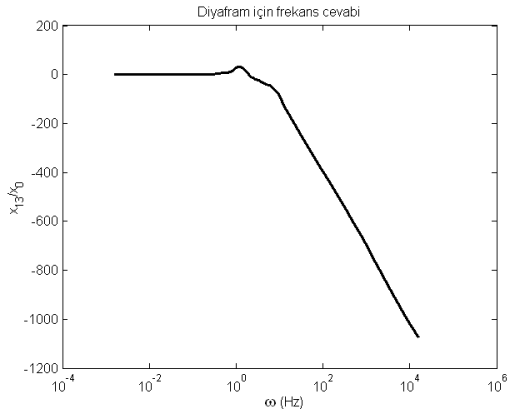
Şekil 4.165 Kafa için frekans cevabı yakından gösterim



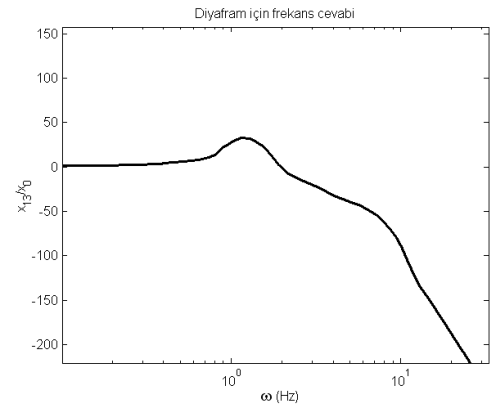
Şekil 4.166 Karın için frekans cevabı



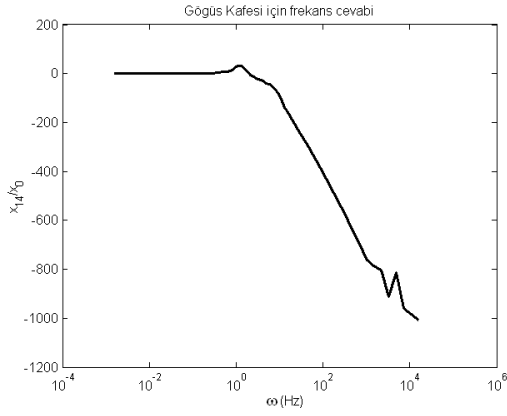
Şekil 4.167 Karın için frekans cevabı yakından gösterim



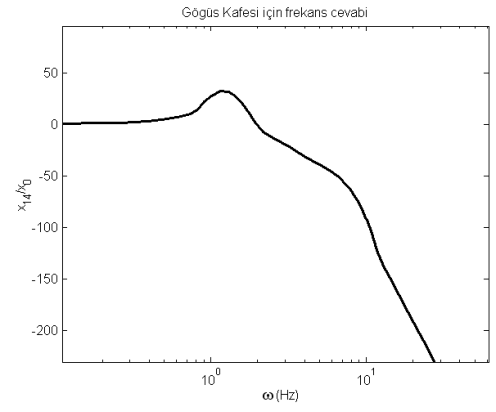
**Şekil 4.168** Diyafram için frekans cevabı



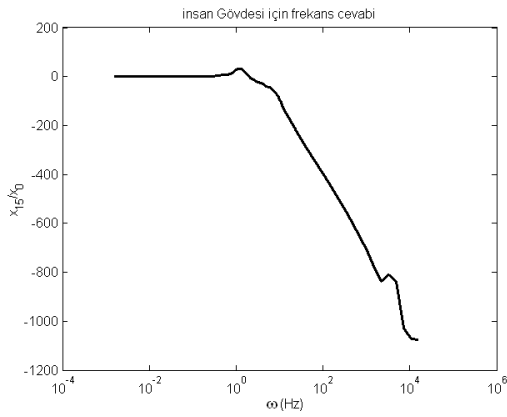
**Şekil 4.169** Diyafram için frekans cevabı yakından gösterim



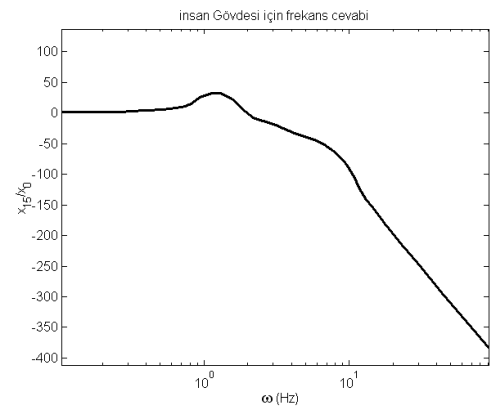
**Şekil 4.170** Göğüs Kafesi için frekans cevabı



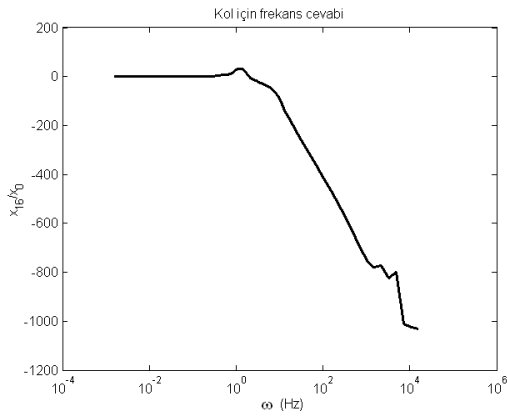
**Şekil 4.171** Göğüs Kafesi için frekans cevabı yakından gösterim



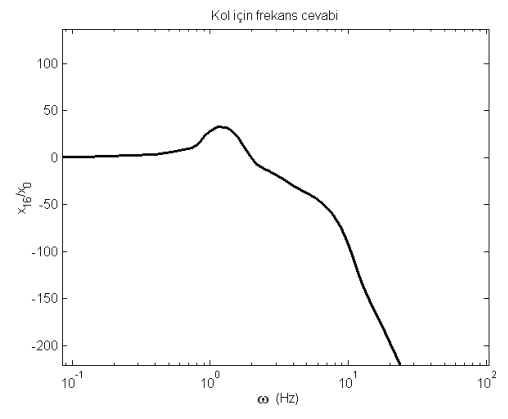
**Şekil 4.172** İnsan Gövdesi için frekans cevabı



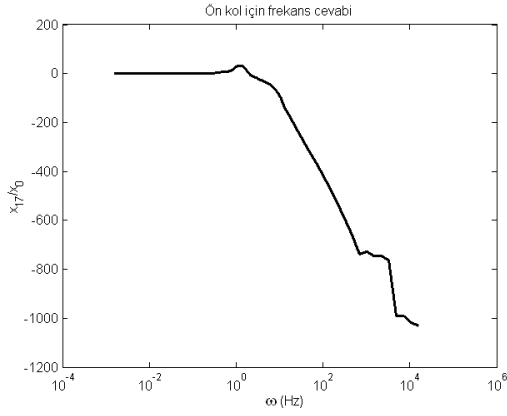
**Şekil 4.173** İnsan Gövdesi için frekans cevabı yakından gösterim



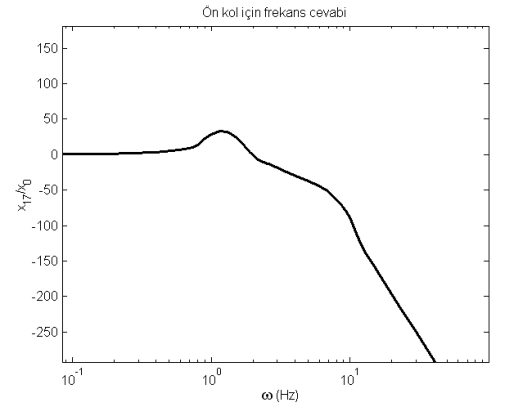
Şekil 4.174 Kol için frekans cevabı



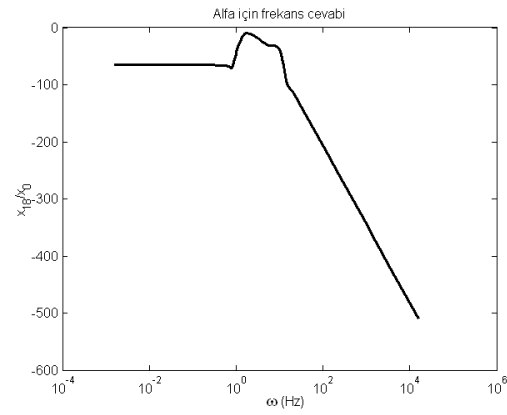
Şekil 4.175 Kol için frekans cevabı yakından gösterim



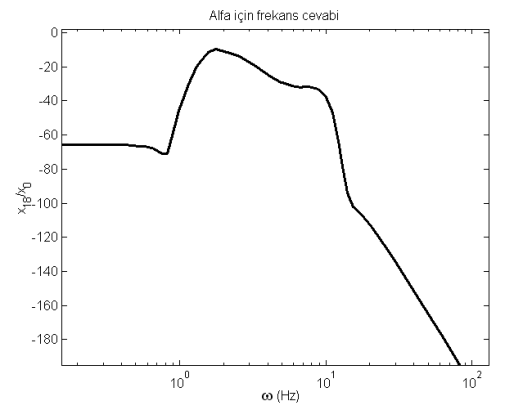
Şekil 4.176 Ön kol için frekans cevabı



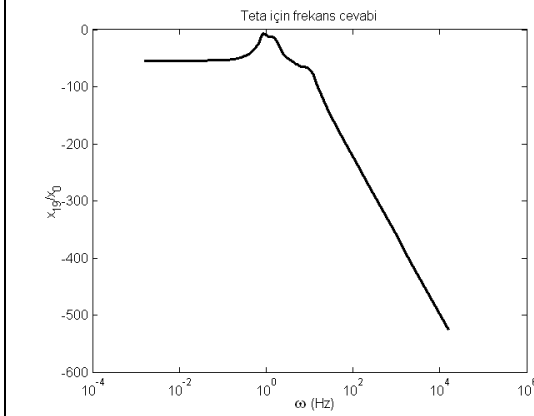
Şekil 4.177 Ön kol için frekans cevabı yakından gösterim



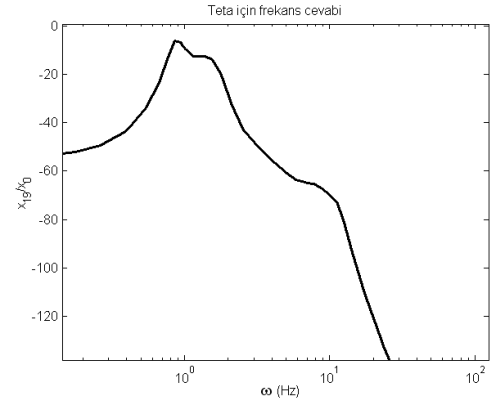
Şekil 4.178 Alfa için frekans cevabı



Şekil 4.179 Alfa için frekans cevabı yakından gösterim

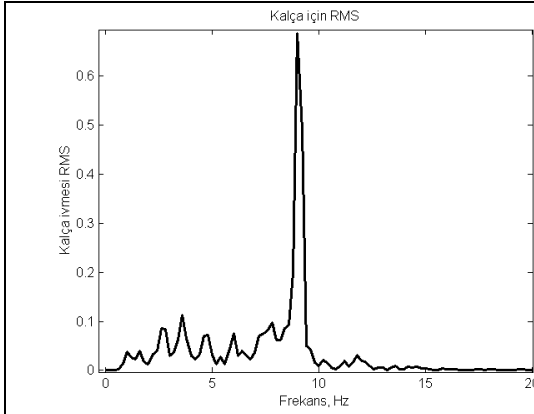


**Şekil 4.180** Teta için frekans cevabı

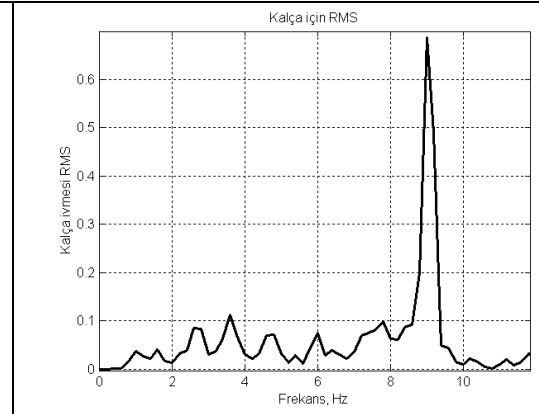


**Şekil 4.181** Teta için frekans cevabı yakından gösterim

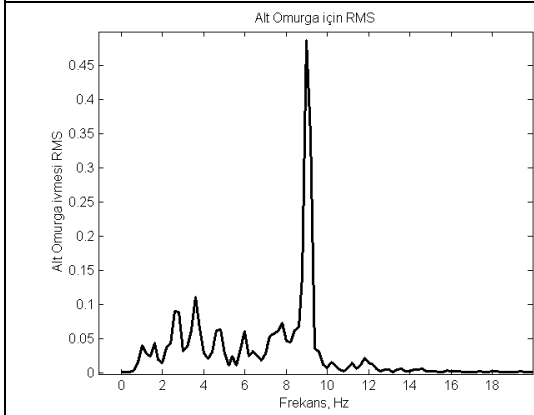
Çeyrek taşıt ve yarım taşıt simülasyonlarında yapıldığı gibi benzer şekilde tam taşıt için de elde edilen grafikleri ilgili ISO standardındaki ile karşılaştırmak için bu grafiklerin ivme RMS-frekans cevapları halindeki gösterimleri aşağıdaki gibidir.



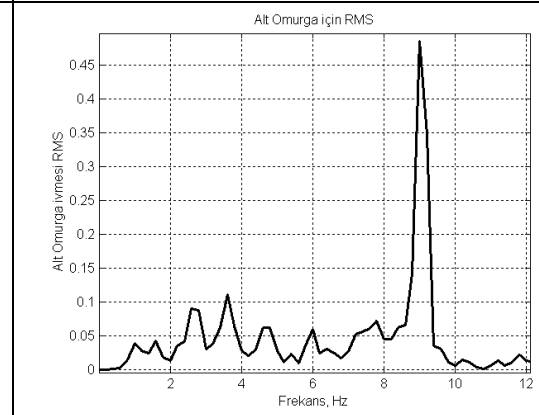
**Şekil 4.182** Kalça ivmesi RMS-frekans grafiği



**Şekil 4.183** Kalça ivmesi RMS-frekans grafiğinin yakından gösterimi

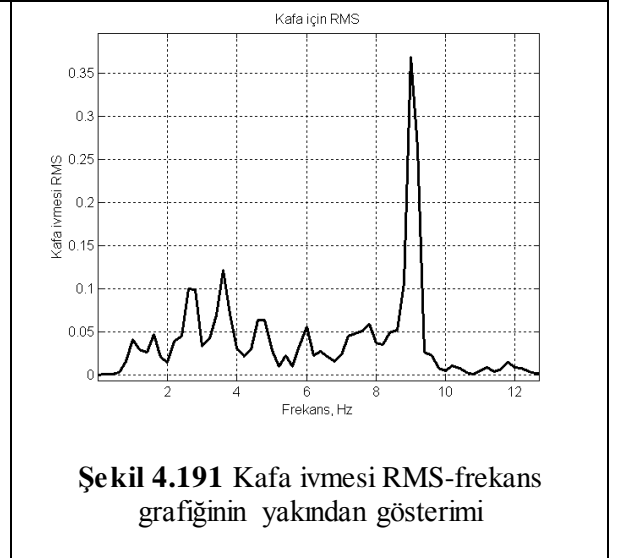
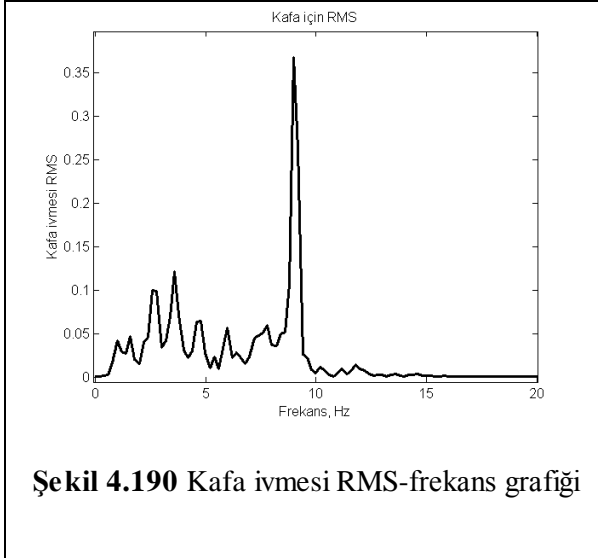
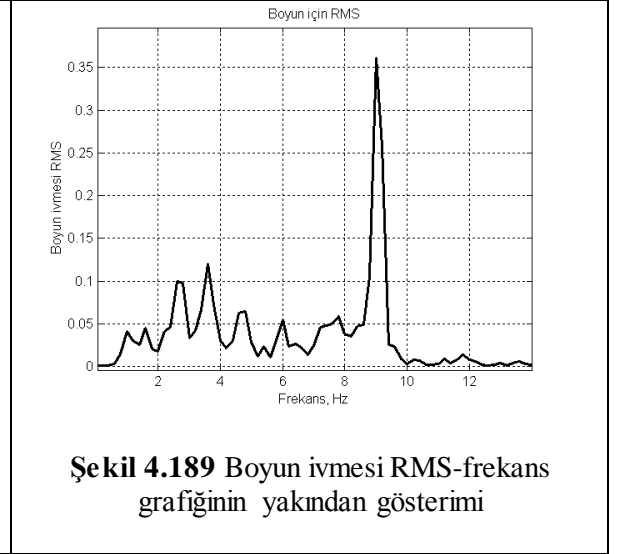
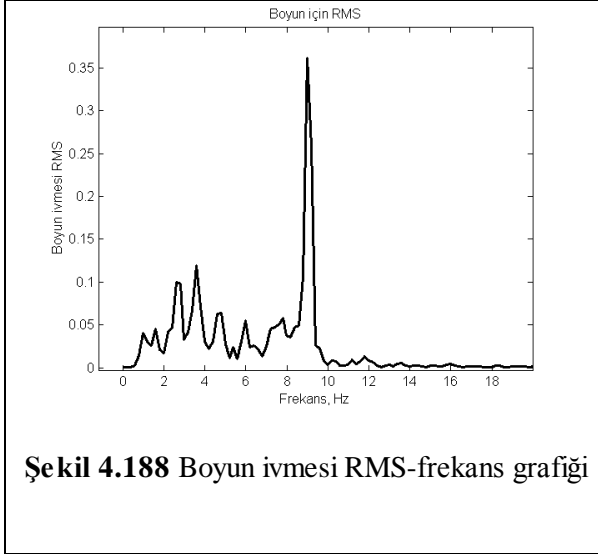
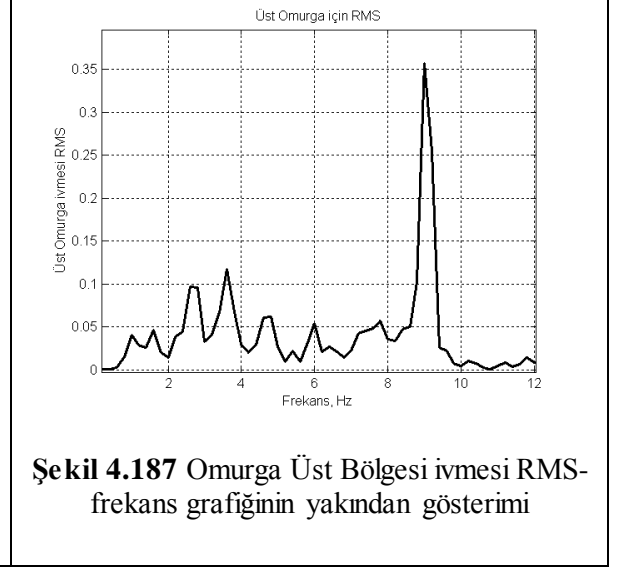
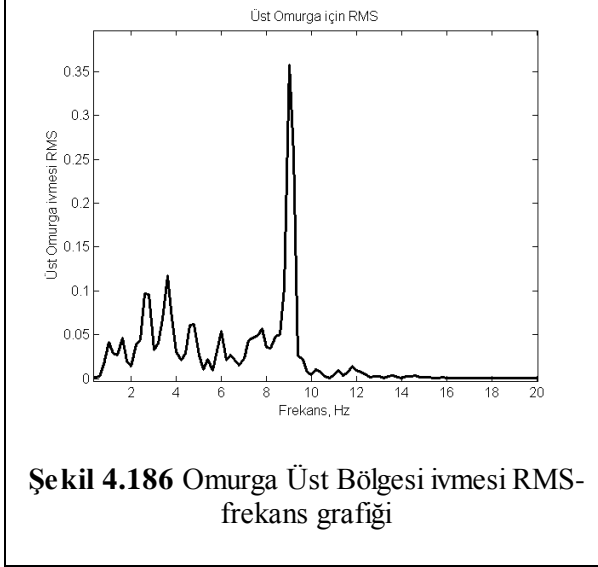


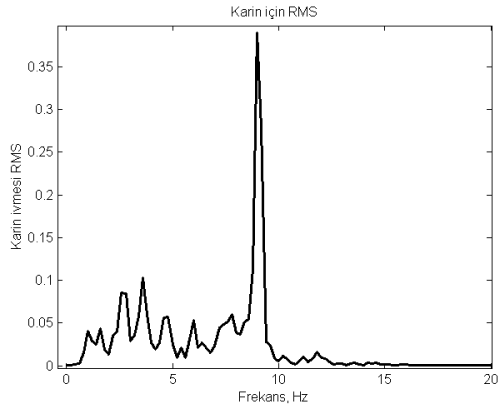
**Şekil 4.184** Omurga bel bölgesi ivmesi RMS-frekans grafiği



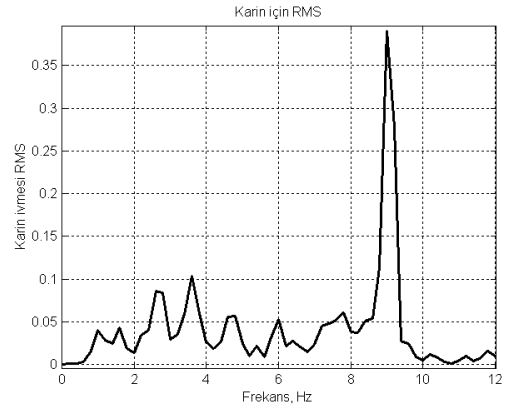
**Şekil 4.185** Omurga Bel Bölgesi ivmesi RMS-frekans grafiğinin yakından gösterimi



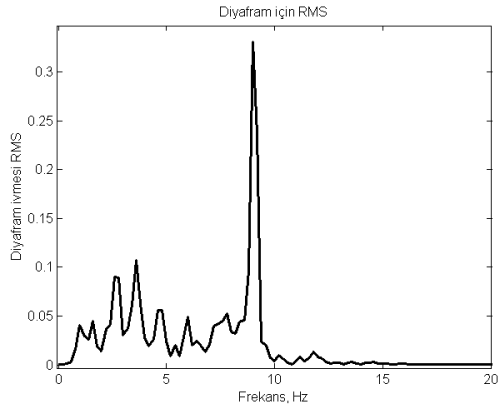




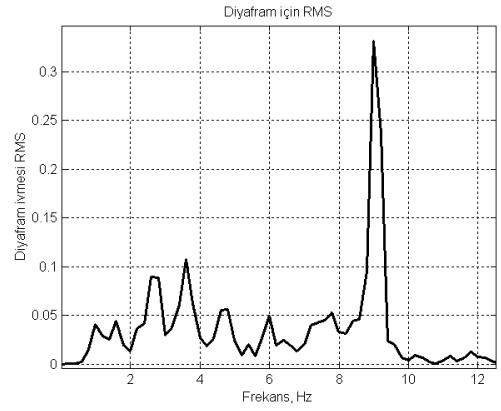
**Şekil 4.192** Karın ivmesi RMS-frekans grafiği



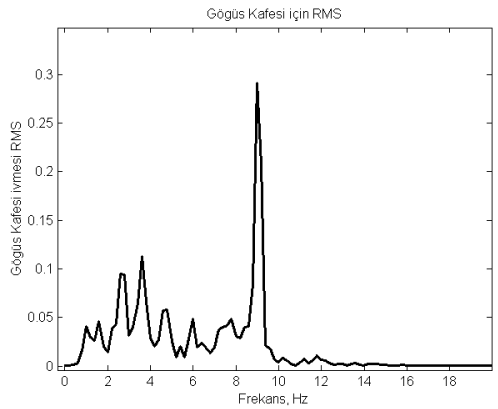
**Şekil 4.193** Karın ivmesi RMS-frekans grafiğinin yakından gösterimi



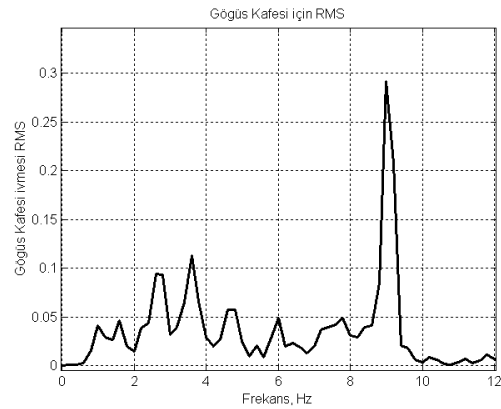
**Şekil 4.194** Diyafram ivmesi RMS-frekans grafiği



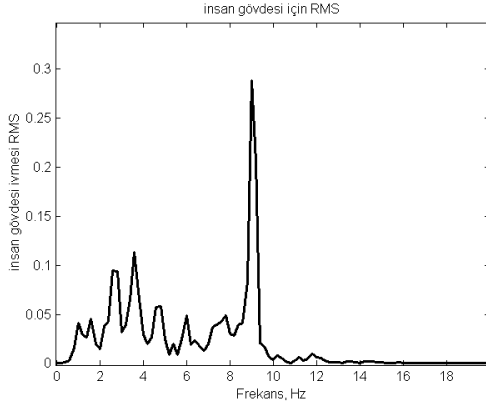
**Şekil 4.195** Diyafram ivmesi RMS-frekans grafiğinin yakından gösterimi



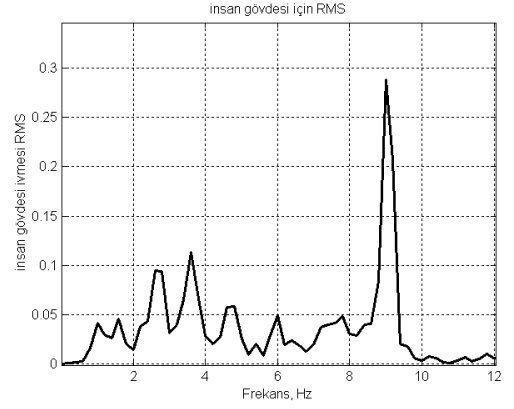
**Şekil 4.196** Göğüs Kafesi ivmesi RMS-frekans grafiği



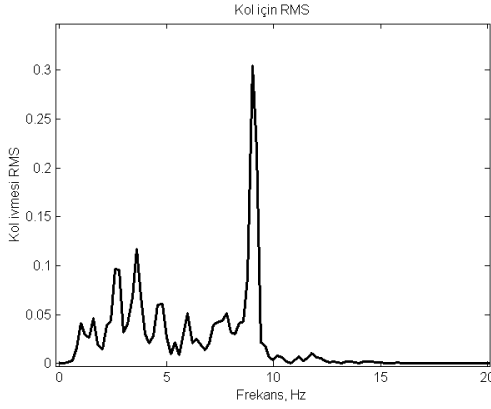
**Şekil 4.197** Göğüs Kafesi ivmesi RMS-frekans grafiğinin yakından gösterimi



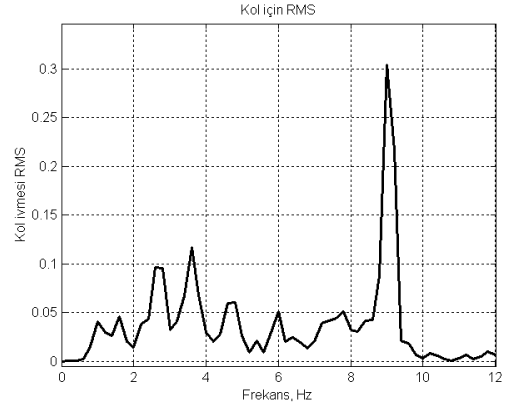
**Şekil 4.198** Gövde ivmesi RMS-frekans grafiği



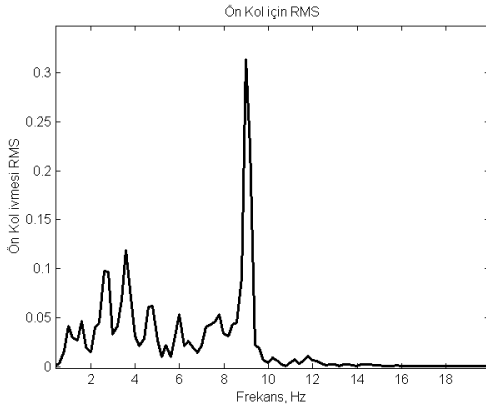
**Şekil 4.199** Gövde ivmesi RMS-frekans grafiğinin yakından gösterimi



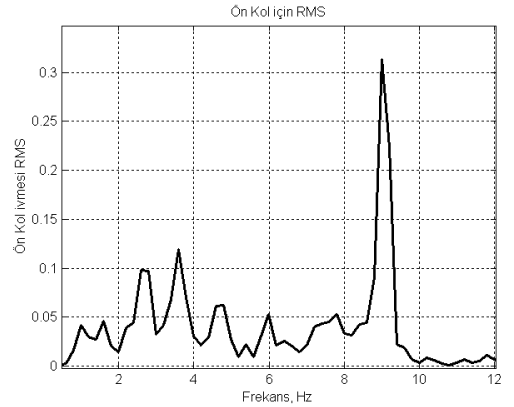
**Şekil 4.200** Kol ivmesi RMS-frekans grafiği



**Şekil 4.201** Kol ivmesi RMS-frekans grafiğinin yakından gösterimi



**Şekil 4.202** Ön Kol ivmesi RMS-frekans grafiği



**Şekil 4.203** Ön Kol ivmesi RMS-frekans grafiğinin yakından gösterimi

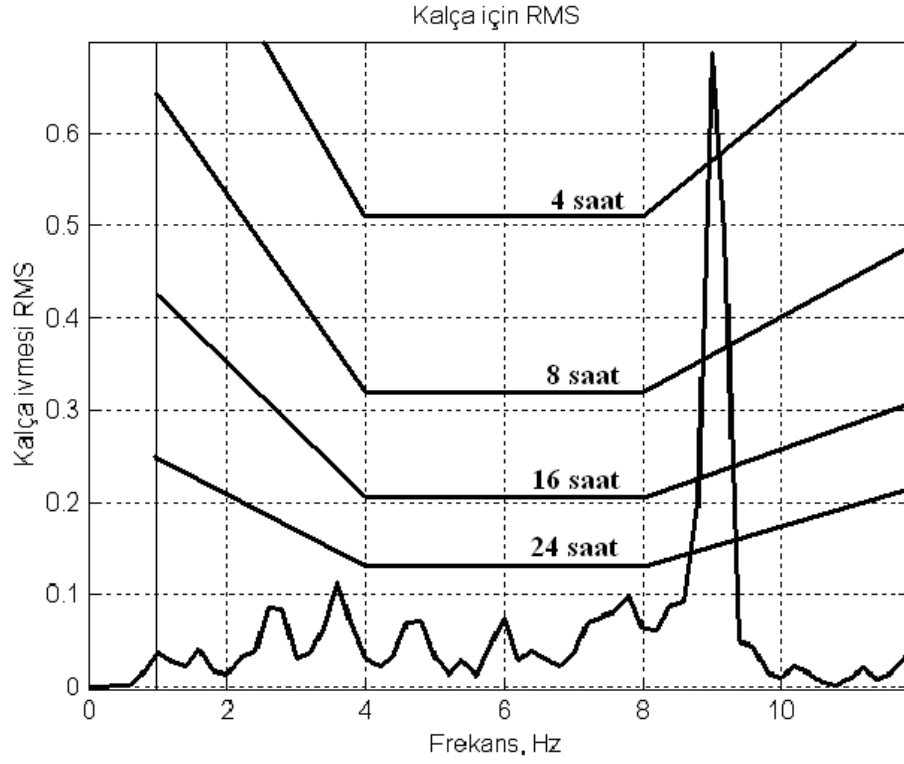
## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Buraya kadar yapılmış olan yol pürüzlülüğünün bir girdi olarak Çeyrek taşıt, Yarım taşıt ve tam taşıt modellerine girilmesi ile elde edilen ivme RMS-frekans grafikleri arasında tam taşıt modelinin daha fazla değişken ve bilgi içerdiği düşünülürse tam taşıt modelinden elde edilen grafiklerin, ISO 2631 standardındaki grafikler ile karşılaştırılmasıyla daha doğru bir sonuç elde edileceği aşıkardır.

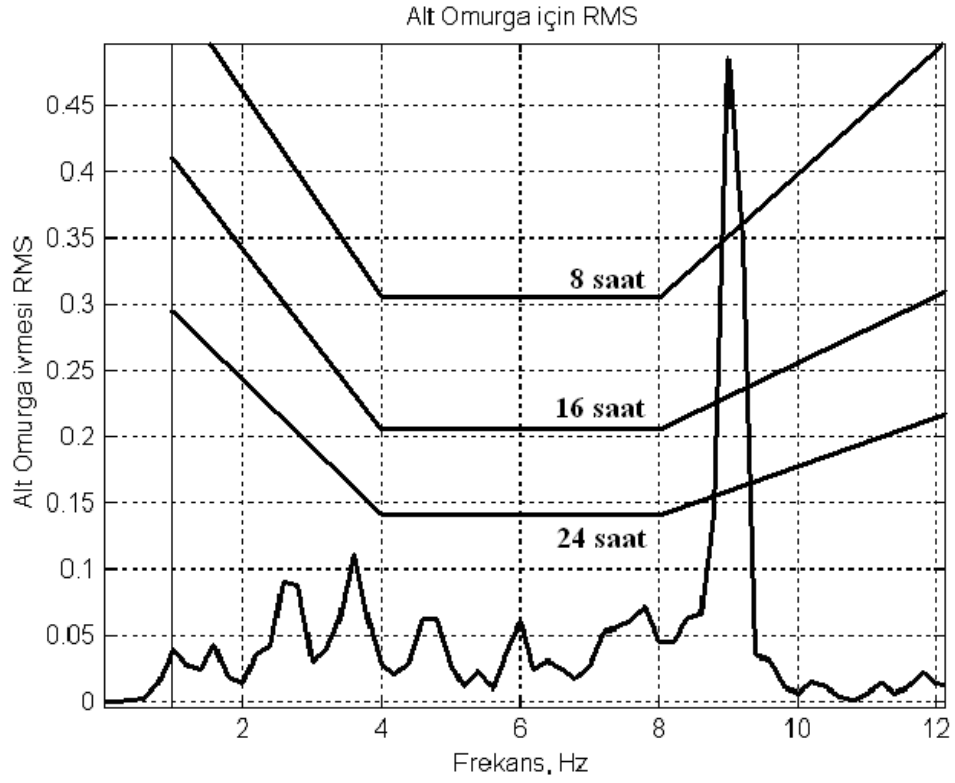
Yukarıda verilen tam taşıt ve insan modeli simülasyonu sonucunda elde edilen grafikler ISO 2631 den alınan grafiklerle üstüste getirildiğinde elde edilen sonuç şekil 4.1-4.11'deki gibidir. Grafiklerde rahatlıkla görülebileceği gibi ISO 2631 deki grafik ile simülasyon sonucunda elde edilen grafik çakışmaktadır. Sonuç olarak 20 m/s (72 km/saat)'lik bir hızla düzgün olarak adlandırılan asfalt bir yolda 5-6 saatlik bir yoculukta dahi rahatsızlık gözlemlenebilmektedir. Burada sürücünün rahatsızlığı ilgili frekans aralığının yoğunluğunun 8-10 Hz olmasından dolayı genel bir rahatsızlık hissini yanı sıra sürücü ayrıca fizyolojik olarak kas kasılmaları, karn ağrıları gibi rahatsızlıklar hissedecektir. Benzer şekilde eğer aynı yolda yolcu daha çok yol alır ise farklı frekanslardaki titreşimlere de maruz kalacağından daha önce de belirtildiği gibi çok çeşitli rahatsızlıklar hissedecektir. Bu durumda saat aralıklarına göre düzgün bir asfalt yolda 20 m/s sabit hız ile yol alan bir sürücünün duyacağı rahatsızlıklar aşağıdaki tablodaki gibi görülebilir.

**Tablo 5.1** Düzgün bir yolda sabit bir hızla giden sürücünün rahatsızlık duyacağı yolculuk süreleri

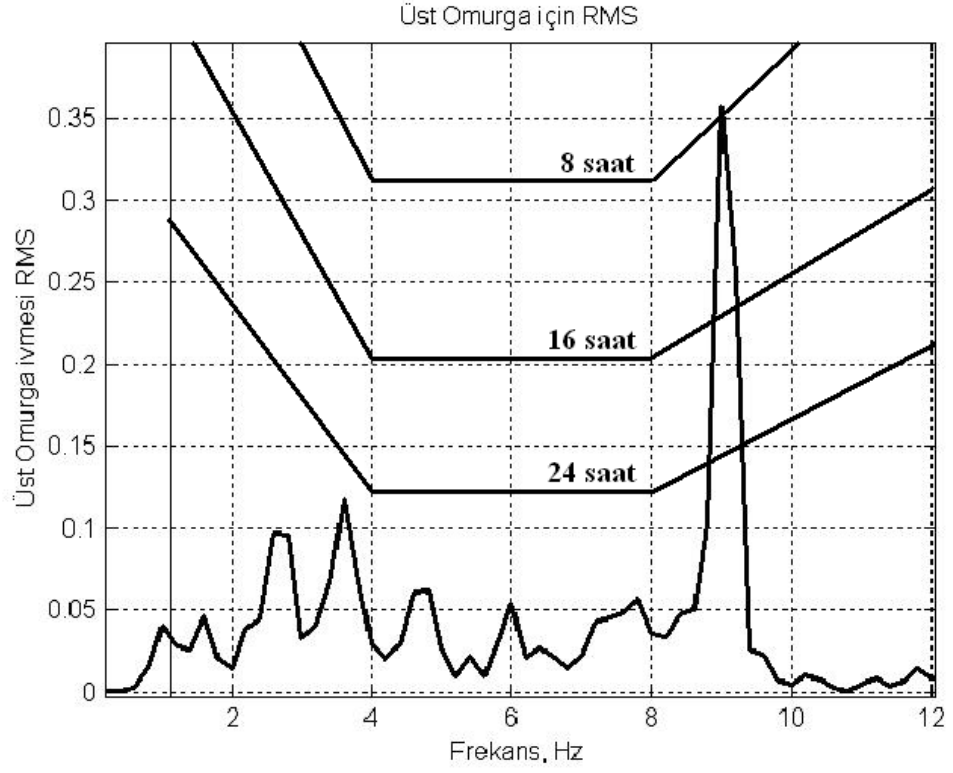
<b>Belirti</b>	<b>Frekans (Hz)</b>	<b>Süre (saat)</b>
Genel rahatsızlık hissi	4-9	25-30
Alt çene belirtileri	6-8	25-30
Göğüş Ağrıları	5-7	25-30
Karn Ağrıları	4-10	4-6
Nefes alma üzerine etkisi	4-8	4-6
Kas kasılmaları	4-9	4-6



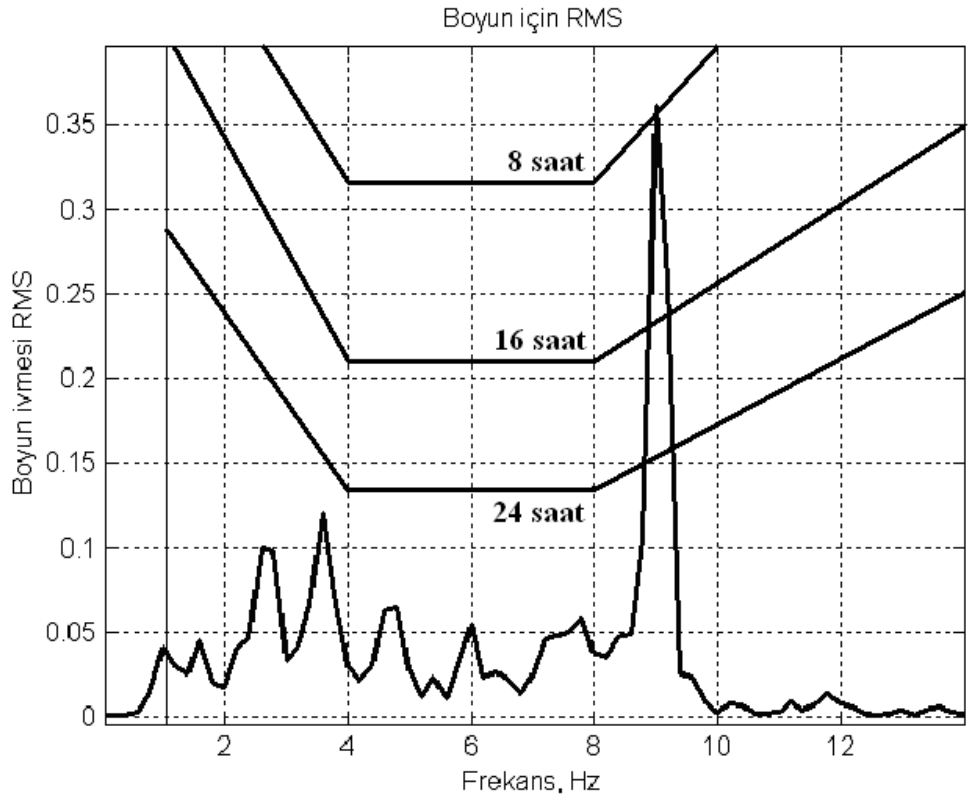
**Şekil 5.1** Kalça ivmesinin ISO 2631 standardındaki ile kıyaslanmalı gösterimi



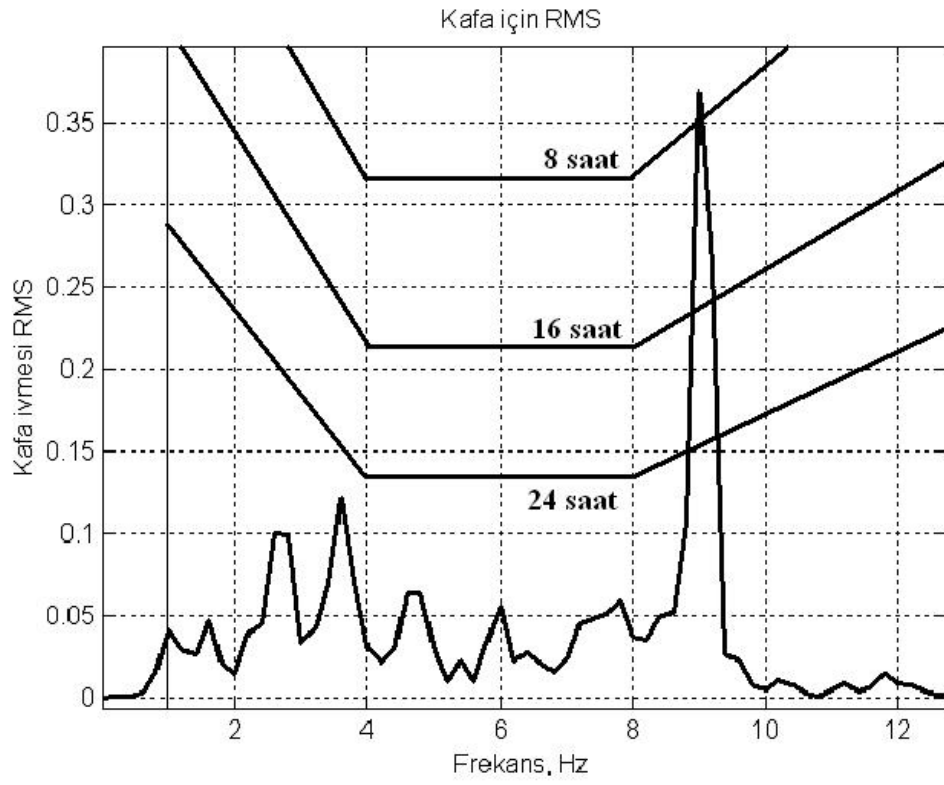
**Şekil 5.2** Alt Omurga ivmesinin ISO 2631 standardındaki ile kıyaslanmalı gösterimi



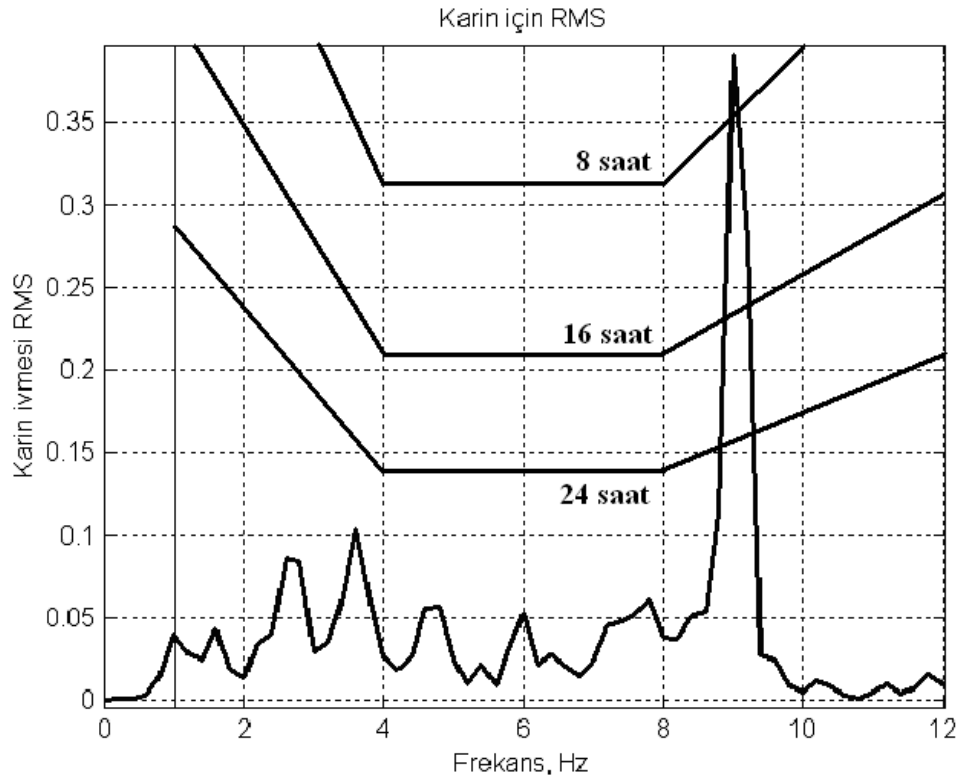
**Şekil 5.3** Üst Omurga ivmesinin ISO 2631 standardındaki ile kıyaslanmalı gösterimi



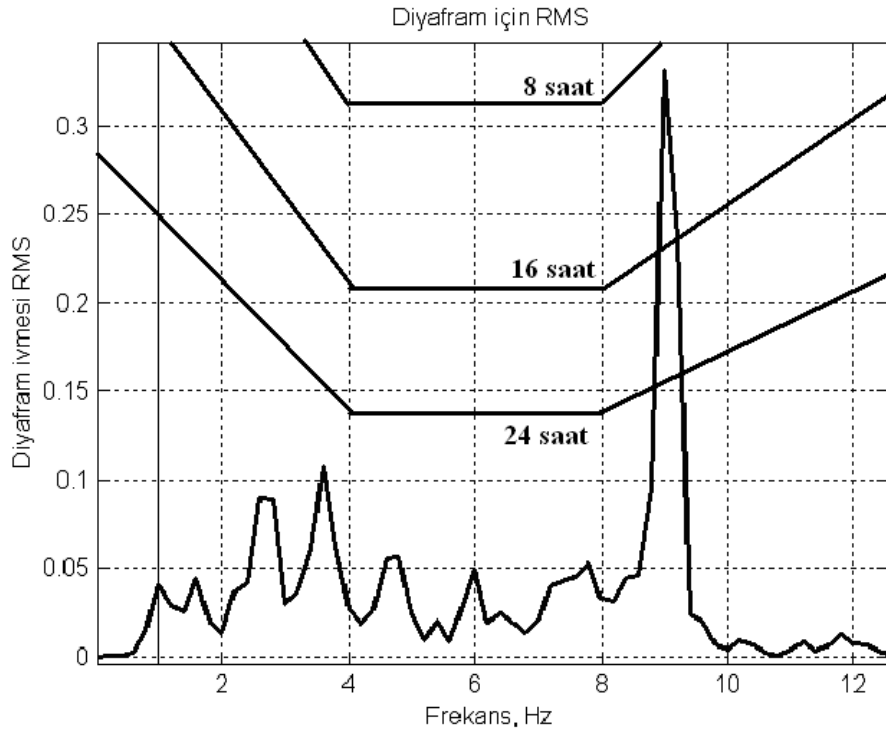
**Şekil 5.4** Boyunun ivmesinin ISO 2631 standardındaki ile kıyaslanmalı gösterimi



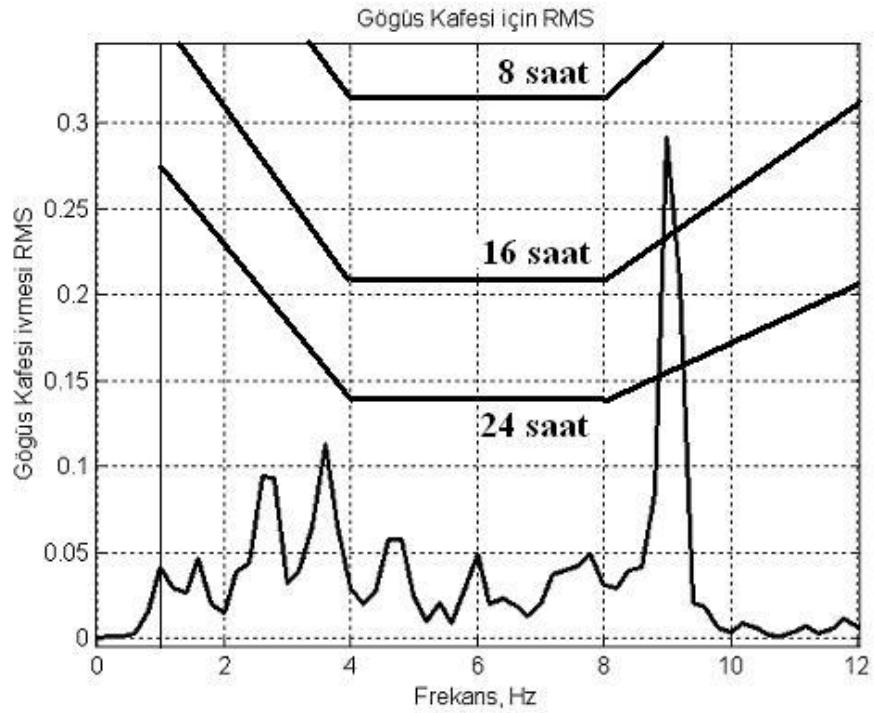
Şekil 5.5 Kafa ivmesinin ISO 2631 standardındaki ile kıyaslanmalı gösterimi



Şekil 5.6 Karının ivmesinin ISO 2631 standardındaki ile kıyaslanmalı gösterimi

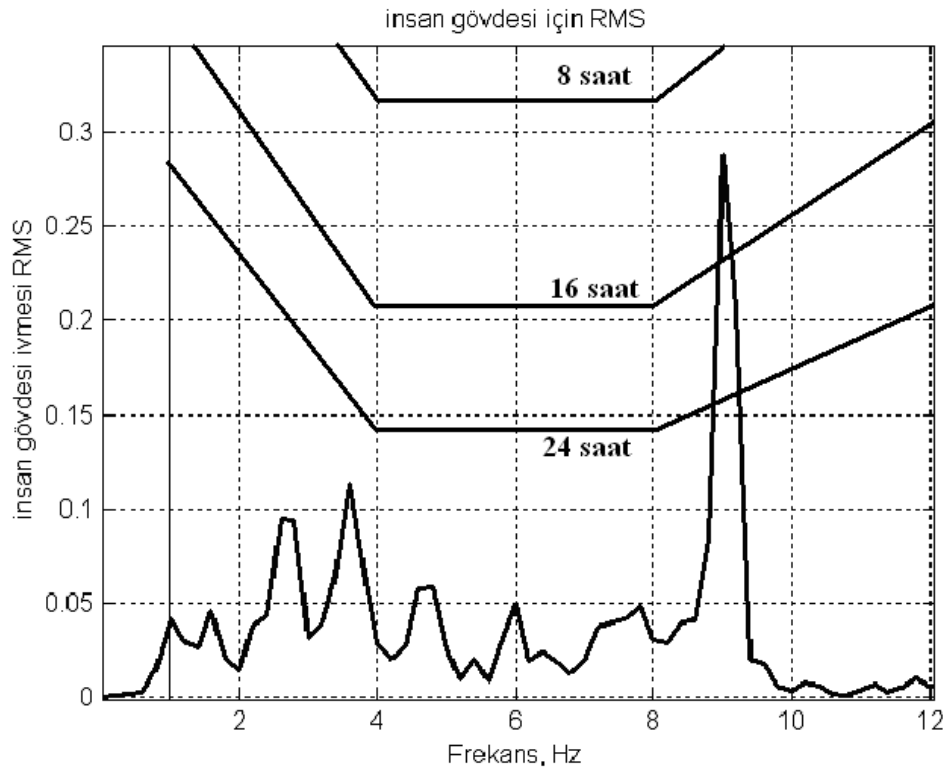


Şekil 5.7 Diyafram ivmesinin ISO 2631 standardındaki ile kıyaslanmalı gösterimi

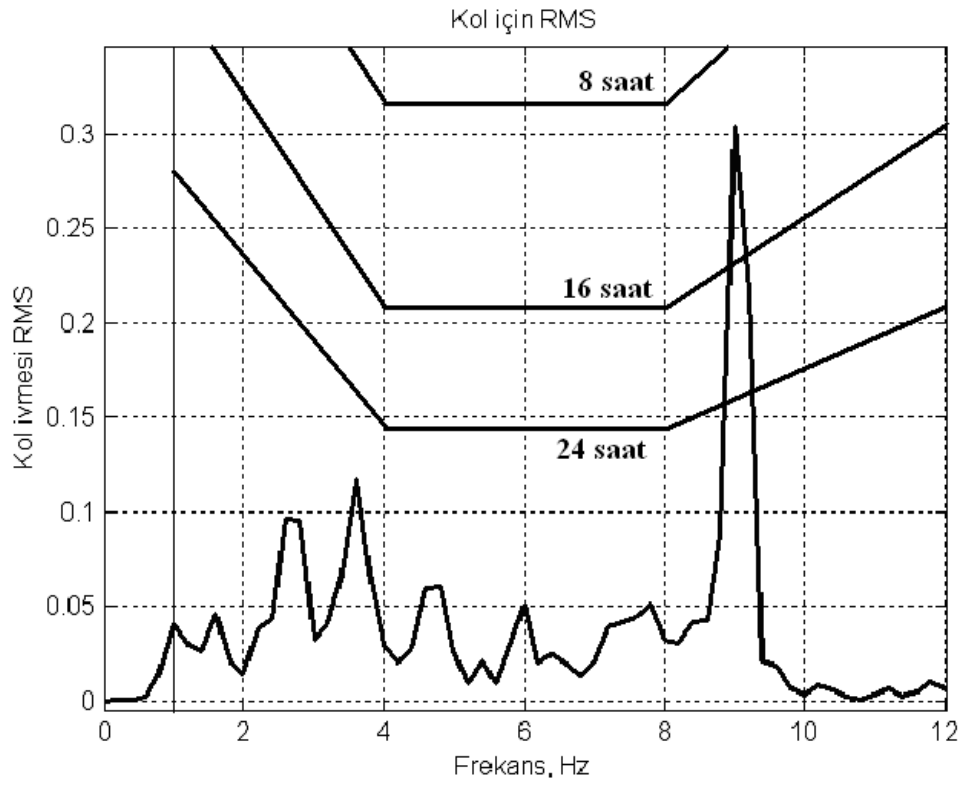


Şekil 5.8 Göğüs Kafesi ivmesinin ISO 2631 standardındaki ile kıyaslanmalı gösterimi

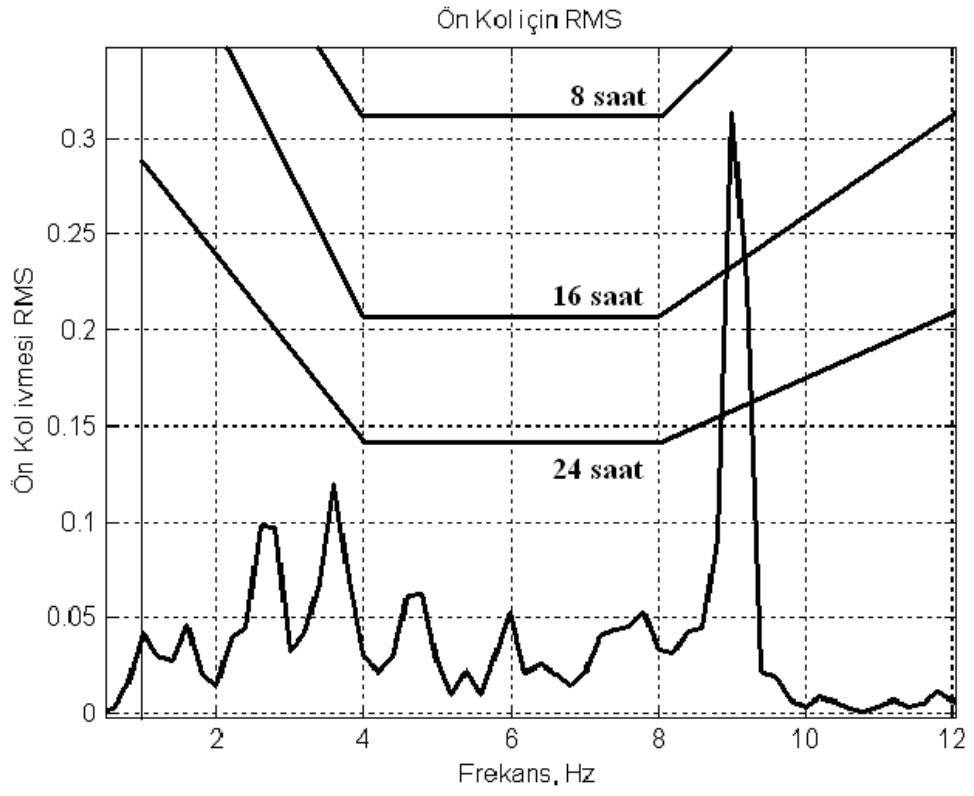




Şekil 5.9 İnsan gövdesi ivmesinin ISO 2631 standardındaki ile kıyaslanmalı gösterimi



Şekil 5.10 İnsan kolunun ivmesinin ISO 2631 standardındaki ile kıyaslanmalı gösterimi



**Şekil 5.11** İnsan ön kolunun ivmesinin ISO 2631 standardındaki ile kıyaslanmalı gösterimi

## KAYNAKLAR

AHN S.J., GRIFFIN M.J., 2008, *Effects of frequency, magnitude, damping, and direction on the discomfort of vertical whole-body mechanical shocks*, Journal of Sound and Vibration, 311, (1-2), 485-497

BALL, W.W.R., 1908, *A Short Account of the History of Mathematics*, [http://en.wikipedia.org/wiki/Joseph\\_Louis\\_Lagrange](http://en.wikipedia.org/wiki/Joseph_Louis_Lagrange) [Ziyaret Tarihi: 4 Nisan 2009].

BOILEAU P.E., RAKHEJA S., WU X., 2002, *A Body Mass Dependent Mechanical Impedance Model For Applications In Vibration Seat Testing*, Journal of Sound and Vibration (2002) 253(1), 243-264

BOUAZARA M., RICHARD M.J., RAKHEJA S., 2006, *Safety and comfort analysis of a 3-D vehicle model with optimal non-linear active seat suspension*, Journal of Terramechanics 43 (2006) 97-118

CHOİ S.B., HAN Y.M., 2007, *Vibration control of electrorheological seat suspension with human-body model using sliding mode control*, Journal of Sound and Vibration 303 (2007) 391-404

EGER T., STEVENSON J., BOILEAU P.E., SALMONI A., VIBRG, 2008, *Predictions of health risks associated with the operation of load-haul-dump mining vehicles: Part 1—Analysis of whole-body vibration exposure using ISO 2631-1 and ISO-2631-5 standards*, International journal of industrial ergonomics ISSN 0169-8141, 2008, 38, 9-10, 726-738

FİGES A.Ş., *Ürünler, Simulink*, <http://www.figes.com.tr/urunler/simulink/simulink.php> [Ziyaret Tarihi: 4 Nisan 2009].

FRITZ M., 1998, *Three-dimensional biomechanical model for simulating the response of the human body to vibration stress*, Med. Biol. Eng. Comput., 1998, 36, 686-692

GILLESPIE, T.D., 1984, *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, Society of Automotive Engineers, Inc., 1-56091-199-9

GUNSTON T.P., REBELLE J., GRIFFIN M.J., 2004, *A comparison of two methods of simulating seat suspension dynamic performance*, Journal of Sound and Vibration 278 (2004) 117-134

GÜRGÖZE, M., 1984, *Analitik Metotlarla Titreşimlerin Etüdü*, İ.T.Ü. Rektörlüğü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yayın No:1.

KROPAC O., MUCKA P., 2005, *Be Careful when using the International Roughness Index as an indicator of the road unevenness*, Journal of Sound and Vibration 287 (2007) 989-1003

LEE C.M., BOGATCHENKOV A.H., GOVERDOVSKIY V.N., SHYNKARENKO Y.V., TEMNIKOV A.I., 2006, *Position control of the seat suspension with minimum stiffness*, Journal of Sound and Vibration 292 (2006) 435-442

LEMERLE P., BOULANGER P., 2006, *Lower limb contribution to the dynamic response of the seated man*, Journal of Sound and Vibration 294 (2006) 1004-1015

LIANG C.C., CHIANG C.F., 2006, *A study on biodynamic models of seated human subjects exposed to vertical vibration*, International Journal of Industrial Ergonomics 36 (2006) 869-890

NISHIYAMA S., UESUGI N., TAKESHIMA T., KANO Y., TOGII H., 2000, *Research On Vibration Characteristics Between Human Body And Seat, Steering Wheel, And Pedals (Effects Of Seat Position On Ride Comfort)*, Journal of Sound and Vibration (2000) 236(1), 1-21

PADDAN G.S., GRIFFIN M.J., 2002, *Effect Of Seating On Exposures To Whole-Body Vibration In Vehicles*, Journal of Sound and Vibration 253(1) (2002), 215-241

PAPALUKOPOULOS C., NATSIAVAS S., 2007, *Nonlinear biodynamics of passengers coupled with quarter car models*, Journal of Sound and Vibration 304 (2007) 50-71

PASIN, F., 1994, *Mekanik Sistemler Dinamiği*, İ.T.Ü. Rektörlüğü, 975-561-028-6.

QIU Y., GRIFFIN M.J., 2005, *Transmission of roll, pitch and yaw vibration to the backrest of a seat supported on a non-rigid car floor*, Journal of Sound and Vibration 288 (2000) 1197-1222

RASMUSSEN G., 1983, *Human Body Vibration Exposure And Its Measurement*, Journal of Acoustical Society of America Volume 73, Issue 6, 2229-2229

REITHMEIER E., LEITMANN G., 2003, *Robust vibration control of dynamical systems based on the derivative of the state*, Archive of Applied Mechanics 72 (2003) 856-894

SETO, W.W., 1983, *Mechanical Vibrations*, SCHAUM'S OUTLINE SERIES, McGraw-Hill International Book Company, 0-07-099065-04

STEIN G.J., MUCKA P., CHMURNY R., 2006, *Preliminary results on an x-direction apparent mass model of human body sitting in a cushioned, suspended seat*, Journal of Sound and Vibration 298 (2006) 688-703

STEIN G.J., MUCKA P., CHMURNY R., HINZ B., BLUTHNER R., 2007, *Measurement and modeling of x-direction apparent mass of the seated human body-cushioned seat system*, Journal of Biomechanics 40 (2007) 1493-1503

YAGIZ, N., 1986, *Effects of Dry friction on Suspension Dynamics and Vehicle Ride*, Thesis (MS). Middle East Technical University.

YAĞIZ N., YÜKSEK İ., “*Sliding Mode Control of Active Suspensions for a Full Vehicle Model*”, International Journal of Vehicle Design, Vol. 26, Nos. 2/3, 2001, pp. 264-276.

YAĞIZ N., “*Comparison and Evaluation of Different Control Strategies on a Full Vehicle Model with Passenger Seat Using Sliding Modes*”, International Journal of Vehicle Design, Vol. 34, No.2, 2004.

YILDIRIM, C., 2005, *Bilim Felsefesi*, Remzi Kitabevi, 975-514-029-48

ZUO L., NAYFEH S.A., 2003, *Low order continuous-time filters for approximation of the ISO 2631-1 human vibration sensitivity weightings*, Journal of Sound and Vibration 265 (2003) 459-465

## EKLER

### EK A : SİMULASYONLARDA KULLANILAN PARAMETRELER

#### EK A1 : Çeyrek Taşıt ile insan modeli

$m_1$	27.230 kg	$m_2$	5.906 kg
$m_3$	0.454 kg	$m_4$	1.362 kg
$m_5$	32.697 kg	$m_6$	5.470 kg
$m_7$	5.297 kg	$m_8$	2.002 kg
$m_9$	4.806 kg	$m_{10}$	1.084 kg
$m_{11}$	5.445 kg	$m_{12}$	66.50 kg
$m_{13}$	277.16 kg	$m_{14}$	28.00 kg
$b_1$	370.8 N.s/m	$b_2$	292.3 N.s/m
$b_3$	292.3 N.s/m	$b_4$	292.3 N.s/m
$b_{54}$	292.3 N.s/m	$b_{59}$	3581.6 N.s/m
$b_6$	3581.6 N.s/m	$b_7$	3581.6 N.s/m
$b_8$	3581.6 N.s/m	$b_9$	3581.6 N.s/m
$b_{10}$	3581.6 N.s/m	$b_{11}$	3581.6 N.s/m
$b_{13}$	2000.0 N.s/m	$b_{14}$	500.0 N.s/m
$k_1$	25016.0 N/m	$k_2$	877 N/m
$k_3$	877 N/m	$k_4$	877 N/m
$k_{54}$	52621.0 N/m	$k_{59}$	877 N/m
$k_6$	67542.0 N/m	$k_7$	67542.0 N/m
$k_8$	52621.0 N/m	$k_9$	52621.0 N/m
$k_{10}$	52621.0 N/m	$k_{11}$	52621.0 N/m
$k_{12}$	211180.0 N/m	$k_{13}$	27000.0 N/m
$k_{14}$	16000.0 N/m		

#### EK A2 : Yarım taşıt ile insan modeli

$m_1$	66.50 kg	$m_2$	45.18 kg
$m_3$	554.32 kg	$m_4$	28.00 kg
$m_5$	27.23 kg	$m_6$	2.002 kg
$m_7$	4.806 kg	$m_8$	1.08 kg
$m_9$	5.445 kg	$m_{10}$	5.906 kg
$m_{11}$	0.454 kg	$m_{12}$	1.362 kg

$m_{13}$	32.697 kg	$m_{14}$	5.47 kg
$m_{15}$	5.297 kg		
$b_{31}$	2015 N.s/m	$b_{32}$	935 N.s/m
$b_4$	500 N.s/m	$b_5$	370.8 N.s/m
$b_6$	3581.6 N.s/m	$b_7$	3581.6 N.s/m
$b_8$	3581.6 N.s/m	$b_9$	3581.6 N.s/m
$b_{10}$	292.3 N.s/m	$b_{11}$	292.3 N.s/m
$b_{12}$	292.3 N.s/m	$b_{13}$	292.3 N.s/m
$b_{137}$	3581.6 N.s/m	$b_{14}$	3581.6 N.s/m
$b_{15}$	3581.6 N.s/m		
$k_1$	211180 N/m	$k_2$	211180 N/m
$k_{31}$	27000 N/m	$k_{32}$	20770 N/m
$k_4$	16000 N/m	$k_5$	25016 N/m
$k_6$	52621.0 N/m	$k_7$	52621.0 N/m
$k_8$	52621.0 N/m	$k_9$	52621.0 N/m
$k_{10}$	877.0 N/m	$k_{11}$	877.0 N/m
$k_{12}$	877.0 N/m	$k_{13}$	877.0 N/m
$k_{137}$	877.0 N/m	$k_{14}$	97542.0 N/m
$k_{15}$	97542.0 N/m		

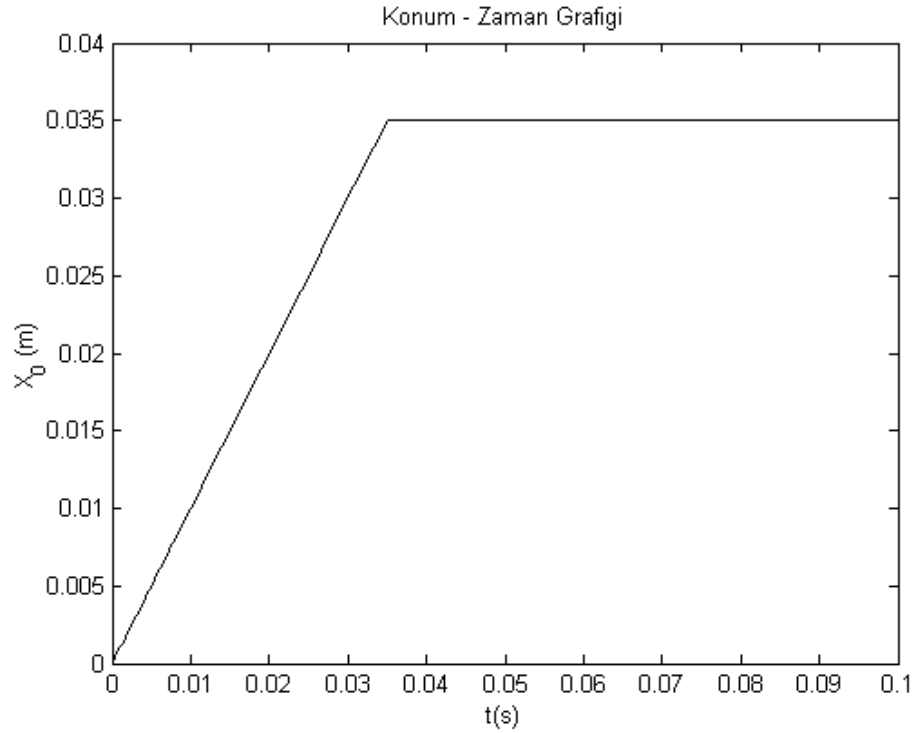
### EK A3 : Tam Taşıt ile İnsan Modeli

V	20 m/s	h	0.035 m
$I_{\text{teta}}$	1480 Nm	$I_{\text{alfa}}$	550 Nm
$m_1$	66.50 kg	$m_2$	66.50 kg
$m_3$	45.18 kg	$m_4$	45.18 kg
$m_5$	1108.64 kg	$m_6$	28.00 kg
$m_7$	27.23 kg	$m_8$	2.002 kg
$m_9$	4.806 kg	$m_{10}$	1.08 kg
$m_{11}$	5.445 kg	$m_{12}$	5.906 kg
$m_{13}$	0.454 kg	$m_{14}$	1.362 kg
$m_{15}$	32.697 kg	$m_{16}$	5.47 kg
$m_{17}$	5.297 kg		
$b_1$	2015 N.s/m	$b_2$	2015 N.s/m
$b_3$	935 N.s/m	$b_4$	935 N.s/m
$b_6$	500 N.s/m	$b_7$	370.8 N.s/m
$b_8$	3581.6 N.s/m	$b_9$	3581.6 N.s/m
$b_{10}$	3581.6 N.s/m	$b_{11}$	3581.6 N.s/m

$b_{12}$	292.3 N.s/m	$b_{13}$	292.3 N.s/m
$b_{14}$	292.3 N.s/m	$b_{15}$	292.3 N.s/m
$b_{16}$	3581.6 N.s/m	$b_{17}$	3581.6 N.s/m
$b_{159}$	3581.6 N.s/m		
$k_1$	211180 N/m	$k_2$	211180 N/m
$k_3$	211180 N/m	$k_4$	211180 N/m
$k_{51}$	27000 N/m	$k_{52}$	27000 N/m
$k_{53}$	20770 N/m	$k_{54}$	20770 N/m
$k_6$	500.0 N/m	$k_7$	370.8 N/m
$k_8$	52621.0 N/m	$k_9$	52621.0 N/m
$k_{10}$	52621.0 N/m	$k_{11}$	52621.0 N/m
$k_{12}$	877.0 N/m	$k_{13}$	877.0 N/m
$k_{14}$	877.0 N/m	$k_{15}$	52621.0 N/m
$k_{159}$	877.0 N/m	$k_{16}$	97542.0 N/m
$k_{17}$	97542.0 N/m		

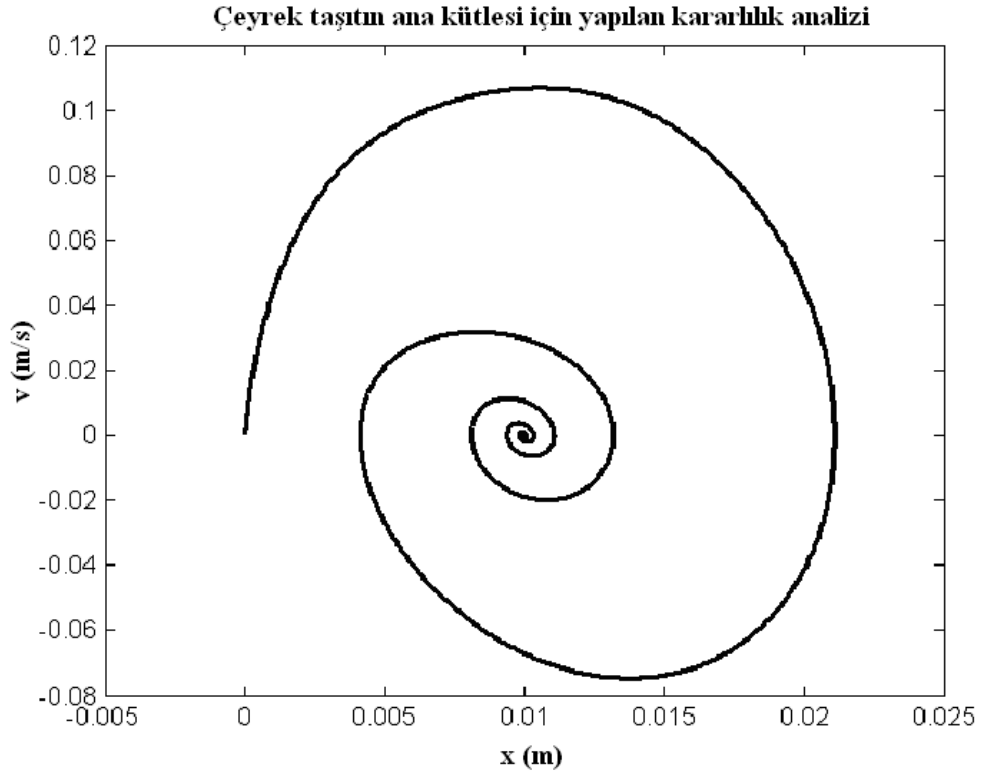
### EK B: Kararlılık Analizi

Sistem kararlılık analizi bir rampa girişi ile yapılmıştır bunun sonucunda elde edilen grafikler ve rampa girişi şekildeki gibidir.

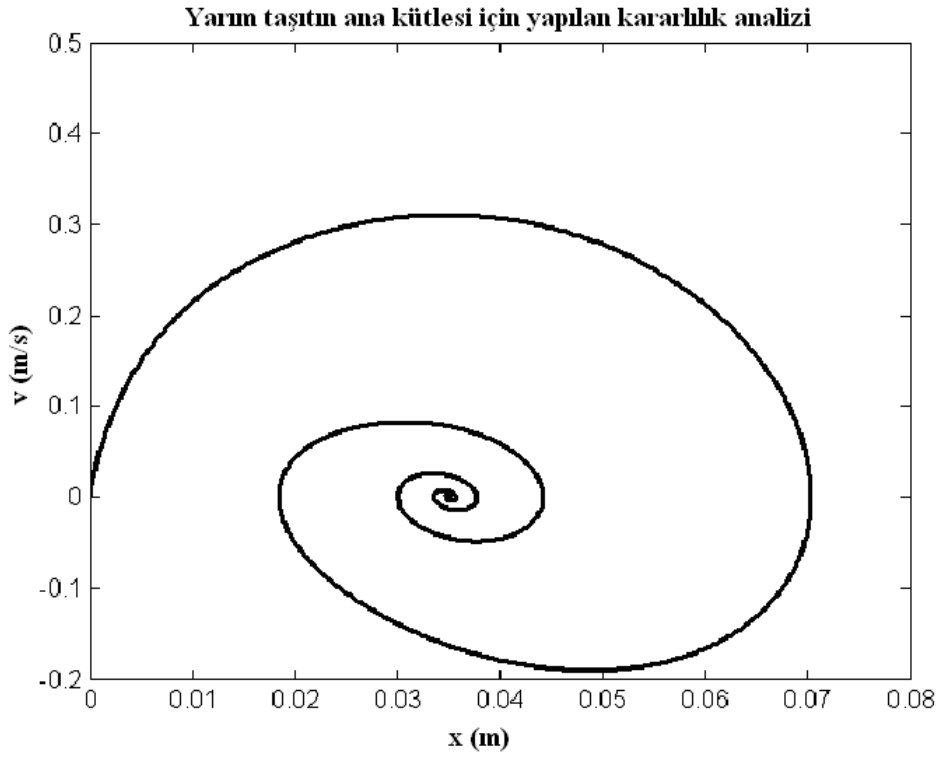


Şekil EK.1 Kararlılık analizi için kullanılan sistem girdisi

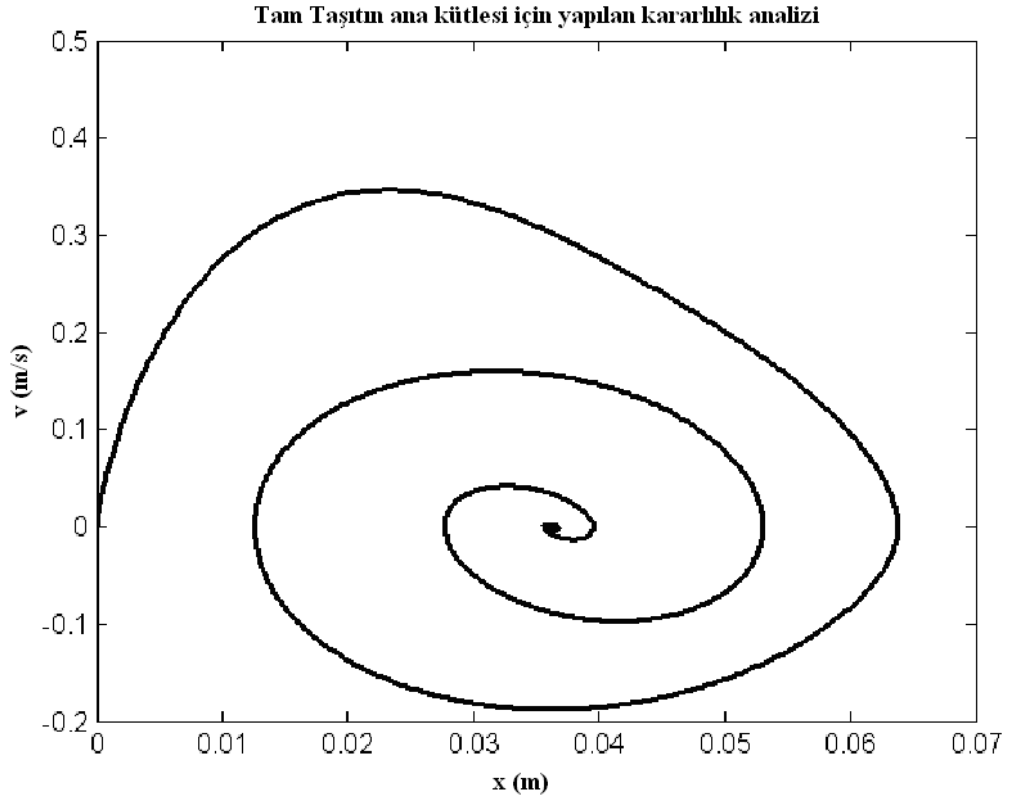




**Şekil EK.2** Çeyrek taşıı modeli için kararlılık analizi



**Şekil EK.3** Yarı taşıı modeli için kararlılık analizi



**Şekil EK.4** Tam taşıt modeli için kararlılık analizi

### **EK C : Yol pürüzlülüğü Parametreleri**

$Sq$	$0,2648 \cdot 10^{-6}$
$l_1$	2,21
$q$	0,1
$w$	2
$L_m$	$2 \cdot \pi / 80$
$L_M$	$2 \cdot \pi / 0,1$

## ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında Samsun'un Kavak İlçesinde doğan Aziz SEZGİN, Ortaöğrenimini Samsun Anadolu Lisesi'nde tamamladıktan sonra 1999 yılında İstanbul Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümüne girdi. Lisans eğitimi esnasında bina titreşimleri ile ilgili iki adet ulusal bildiri yayınladı. 2003 yılında mezun olduktan sonra aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Anabilim Dalı "Makina Dinamiği, Titreşim ve Akustik" Yüksek Lisans Programı'na girdi. 2003 – 2009 yılları arası çeşitli firmalarda Makine Mühendisi ünvanı ile çalıştı. 2005 yılında "Akustik Sanat Evi"ni kurdu. 2006 yılında İstanbul Üniversitesi Makina Mühendisliği Anabilim dalı "Makina Mühendisliği" Yüksek Lisans Programına başladı ve bu tez ile 2009 yılında Yüksek Lisans Eğitimi tamamladı ve aynı yıl doktorasına İstanbul Üniversitesi Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalında başladı.