

**T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KRENLERDE YÜK SALINIMLARININ SEBEP OLDUĞU YATAY KUVVETLERİN  
TESPİTİ İÇİN TEORİK BİR MODELİN GELİŞTİRİLMESİ**

**ERDAL ACAR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
KONSTRÜKSİYON PROGRAMI**

**DANIŞMAN  
YRD. DOC. DR. AHMET SAĞIRLI**

**İSTANBUL, 2011**

**T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KRENLERDE YÜK SALINIMLARININ SEBEP OLDUĞU YATAY KUVVETLERİN  
TESPİTİ İÇİN TEORİK BİR MODELİN GELİŞTİRİLMESİ**

**ERDAL ACAR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
KONSTRÜKSİYON PROGRAMI**

**DANIŞMAN  
YRD. DOÇ. DR. AHMET SAĞIRLI**

**İSTANBUL, 2011**

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KRENLERDE YÜK SALINIMLARININ SEBEP OLDUĞU YATAY KUVVETLERİN  
TESPİTİ İÇİN TEORİK BİR MODELİN GELİŞTİRİLMESİ**

Erdal ACAR tarafından hazırlanan tez çalışması 19.10.2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Yrd. Doç. Dr. Ahmet SAĞIRLI

Yıldız Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Yrd. Doç. Dr. Ahmet SAĞIRLI

Yıldız Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Yrd. Doç. Dr. Muharrem E. BOĞOÇLU

Yıldız Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Yrd. Doç. Dr. Fuat ALARÇİN

Yıldız Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

## ÖNSÖZ

---

Bu tez çalışmasında açık çevrim olarak modellenen 5 serbestlik dereceli bir kule tipi kren modelinin, non-lineer karakteristiğe sahip dinamik davranış denklemleri çözümlenerek benimsenen modelleme tekniğinin ve durum değişkenlerinin kule krende meydana getirdiği dinamik etkilerin incelenmesi amaçlanmıştır.

Tez çalışmamı yürüttüğüm süre zarfında, bilgi ve deneyimleriyle benden hiçbir zaman yardımlarını esirgemeyen, başta tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Ahmet SAĞIRLI'ya, Arş. Gör. C. Oktay AZELOĞLU'na, Makine Fakültesi'ne mensup değerli hocalarıma, ayrıca bu tezin hazırlanmasında beni daima teşvik eden, maddi ve manevi olarak her zaman yanımda olan aileme ve sevgili nişanlıma teşekkürü bir borç bilirim.

Ağustos, 2011

Erdal ACAR

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	viii
KISALTMA LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ .....	xi
ÖZET .....	xii
ABSTRACT.....	xiii
BÖLÜM 1 GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti .....	1
1.2 Tezin Amacı .....	3
1.3 Hipotez .....	3
BÖLÜM 2 GENEL TANIMLAR ve SINIFLANDIRMA .....	5
2.1 Kaldırma ve Taşıma Makinelerinin Sınıflandırılması .....	5
2.1.1 Basit Kaldırma Makineleri .....	8
2.1.1.1 Krikolar .....	8
2.1.1.2 Çıkıklar .....	8
2.1.1.3 Palangalar .....	9
2.1.1.4 Vinçler .....	9
2.1.2 FEM ve DIN Normları ile Transport Sistemlerinin Sınıflandırılması .....	10
2.1.3 Kaldırma Makinelerinin Sınıflandırılması .....	10
2.1.3.1 Kullanım Sınıflandırması.....	10
2.1.3.2 Kaldırma Makinelerinin Grup Sınıflandırması .....	11
2.1.3.3 Yük Dağılımı.....	12
BÖLÜM 3 KRENLER.....	14
3.1 Giriş.....	14
3.2 Farklı Kren Uygulamaları .....	14

3.2.1	Köprülü Krenler .....	14
3.2.2	Portal Krenler .....	15
3.2.3	Oklu ve Döner Krenler.....	16
3.2.4	Kablolu Krenler.....	17
3.2.5	Kule Krenleri.....	17
3.2.5.1	Kule Krenlerinin Yapısal Özellikleri.....	17
3.2.5.2	Kule Krenlerinin Genel Kullanım Değerleri .....	19
<b>BÖLÜM 4 KRENLERDE KONSTRÜKSİYON ve ÖLÇÜLENDİRME ESASLARI .....</b>		<b>21</b>
4.1	Konstrüksiyon için Genel Esaslar .....	21
4.2	Ölçülendirme Esasları .....	23
4.3	Kren Seçimi .....	25
<b>BÖLÜM 5 KREN HESABINDA SİSTEME ETKİYEN YÜKLER ve KATSAYILAR .....</b>		<b>27</b>
5.1	Esas (Ana) Yükler .....	27
5.2	Düşey Hareketlerden Gelen Yükler .....	28
5.3	Yatay Hareketlerden Gelen Yükler .....	28
5.4	Hava Şartlarından Meydana Gelen Yüklemeler .....	28
5.5	Yükleme Durumu Grupları ve Genel Gerilme Değerleri.....	29
5.5.1	H (Ana Yük) Yükleme Durumu .....	29
5.5.2	HZ (Ana ve Ek Yükler) Yükleme Durumu.....	29
5.5.3	HS (Ana ve Özel Yükler) Yükleme Durumu .....	30
5.6	Genel Emniyet Gerilme Değerleri .....	30
5.7	Kren Hesabındaki Katsayılar .....	31
5.7.1	Zati Ağırlık Katsayısı ( $\phi$ ) .....	31
5.7.2	Yük Kaldırma Katsayısı ( $\psi$ ) .....	32
<b>BÖLÜM 6 SEÇİLEN BİR KULE KRENİN TANITIMI ve MODELLENMESİ .....</b>		<b>33</b>
6.1	Kule Krenin Tanıtımı .....	33
6.2	Seçilen Krenin Modellenmesi ve Yapılan Kabuller .....	34
6.3	Modelin Dinamik Davranış Denklemleri.....	35
6.3.1	Krenin Konum-Hız Denklemleri.....	35
6.3.2	Lagrange Yöntemiyle Sistemin Enerji Denklemleri.....	36
6.3.3	Sistemin Hareket Denklemlerinin Elde Edilmesi.....	37
6.4	Çeşitli Parametreler Altında Oluşturulan Benzetim Çalışmaları .....	41
6.4.1	1. Senaryo İçin Oluşturulan Grafikler ve Yorumlar .....	42
6.4.2	2. Senaryo İçin Oluşturulan Grafikler ve Yorumlar .....	47
6.4.3	3. Senaryo İçin Oluşturulan Grafikler ve Yorumlar .....	52
6.4.4	4. Senaryo İçin Oluşturulan Grafikler ve Yorumlar .....	57
6.4.5	5. Senaryo İçin Oluşturulan Grafikler ve Yorumlar .....	62
<b>BÖLÜM 7 SONUÇ ve ÖNERİLER.....</b>		<b>67</b>

KAYNAKLAR .....	69
EK-A DENKLEMLERİNİN MATHEMATICA PROGRAMINDA YAZILIMI .....	71
EK-B KULE KREN MODELİNE AİT DİNAMİK DAVRANIŞ DENKLEMLERİNİN MATLAB-SIMULINK ORTAMINA AKTARILMAYA HAZIR YAZILIŞLARI .....	80
EK-C SİSTEMİN MATLAB-SIMULINK ORTAMINDAKİ BLOK DİYAGRAMI .....	82
ÖZGEÇMİŞ .....	83

## SİMGE LİSTESİ

---

A	Rüzgar yönüne dik düzlemdeki taşıyıcı sistem yüzeylerinin izdüşümü
a	Krenin hareketli taban bağlantı platformunun genişliği
c	Aerodinamik bir katsayı
$C_l$	Krendeki yükün bağlandığı halatın sönüm katsayısı
$C_p$	Kren tabanındaki hareketli platformun sönüm katsayısı
F	Krene etkiyen kuvvet
$E_k$	Sistemin kinetik enerjisi
$E_p$	Sistemin potansiyel enerjisi
$E_s$	Sistemin sönüm enerjisi
g	Yerçekimi ivmesi
H	Kren gövdesinin yüksekliği
$K_l$	Krendeki yükün bağlandığı halatın yay katsayısı
$K_p$	Kren tabanındaki hareketli platformun yay katsayısı
$k_p$	Yük dağılım faktörü
L	Kren yük kolu (boom) uzunluğu
$L_h$	Değişken halat boyu
M	Krenin $(x_M, y_M)$ koordinatlarına indirgenmiş dengeleyici yük kütlesi
m	Halatın ucuna asılı yükün kütlesi
p	Rüzgar kuvvetlerinin bileşkesi
q	Dinamik basınç
$V_{rüz}$	Rüzgar hızı
x	Krenin (F) kuvveti etkisi altında x eksenini doğrultusunda aldığı yol
$x_L$	m kütlesinin x eksenini doğrultusundaki koordinatı
$x_M$	M kütlesinin x eksenini doğrultusundaki koordinatı
$y_k$	Kren tabanındaki hareketli platformun denge konumunda y eksenini doğrultusundaki mesafesi
$y_L$	m kütlesinin y eksenini doğrultusundaki koordinatı
$y_M$	M kütlesinin y eksenini doğrultusundaki koordinatı
$\theta_D$	Kren gövdesinin y eksenini ile yaptığı devrilme açısı
$\theta_L$	Yükün asılı olduğu halatın y eksenini ile yaptığı açı
$\mu$	Zati ağırlık katsayısı
$\psi$	Yük kaldırma katsayısı

## KISALTMA LİSTESİ

---

DIN	Deutsches Institut für Normung eV
FEM	Federation Europeenne de la Manutention
Matlab	Matrix Laboratory

## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Kriko çeşitleri..... 8
Şekil 2.2	Çıkırıklar ..... 8
Şekil 2.3	Palangalar..... 9
Şekil 2.4	Vinç tertibatı ..... 9
Şekil 6.1	Kule krenin genel görünümü..... 33
Şekil 6.2	Kren modelinin şematik gösterimi ..... 35
Şekil 6.3	Durum 1 parametreleri altında $x$ değişkeninin karakteristikleri..... 43
Şekil 6.4	Durum 1 parametreleri altında $\theta_D$ ve $\theta_L$ değişkenlerinin karakteristikleri..... 44
Şekil 6.5	Durum 1 parametreleri altında $L_h$ değişkeninin karakteristikleri ..... 45
Şekil 6.6	Durum 1 parametreleri altında $y_k$ değişkeninin karakteristikleri ..... 46
Şekil 6.7	Durum 2 parametreleri altında $x$ değişkeninin karakteristikleri..... 48
Şekil 6.8	Durum 2 parametreleri altında $\theta_D$ ve $\theta_L$ değişkenlerinin karakteristikleri..... 49
Şekil 6.9	Durum 2 parametreleri altında $L_h$ değişkeninin karakteristikleri ..... 50
Şekil 6.10	Durum 2 parametreleri altında $y_k$ değişkeninin karakteristikleri ..... 51
Şekil 6.11	Durum 3 parametreleri altında $x$ değişkeninin karakteristikleri..... 53
Şekil 6.12	Durum 3 parametreleri altında $\theta_D$ ve $\theta_L$ değişkenlerinin karakteristikleri..... 54
Şekil 6.13	Durum 3 parametreleri altında $L_h$ değişkeninin karakteristikleri ..... 55
Şekil 6.14	Durum 3 parametreleri altında $y_k$ değişkeninin karakteristikleri ..... 56
Şekil 6.15	Durum 4 parametreleri altında $x$ değişkeninin karakteristikleri..... 58
Şekil 6.16	Durum 4 parametreleri altında $\theta_D$ ve $\theta_L$ değişkenlerinin karakteristikleri..... 59
Şekil 6.17	Durum 4 parametreleri altında $L_h$ değişkeninin karakteristikleri ..... 60
Şekil 6.18	Durum 4 parametreleri altında $y_k$ değişkeninin karakteristikleri ..... 61
Şekil 6.19	Durum 5 parametreleri altında $x$ değişkeninin karakteristikleri..... 63
Şekil 6.20	Durum 5 parametreleri altında $\theta_D$ ve $\theta_L$ değişkenlerinin karakteristikleri..... 64
Şekil 6.21	Durum 5 parametreleri altında $L_h$ değişkeninin karakteristikleri ..... 65
Şekil 6.22	Durum 5 parametreleri altında $y_k$ değişkeninin karakteristikleri ..... 66

## ÇİZELGE LİSTESİ

---

	Sayfa
Çizelge 2.1	Toplam kullanım süresine göre sınıflandırma..... 11
Çizelge 2.2	Yük dağılım faktörü..... 12
Çizelge 2.3	Kaldırma makinelerinin grup sınıflandırması..... 12
Çizelge 2.4	Kaldırma makinelerinin sınıflandırılması için rehber çizelge..... 13
Çizelge 5.1	St 37 ve St 52-3 malzemeleri gerilme emniyet değerleri..... 31
Çizelge 5.2	Zati ağırlık katsayısı ( $\phi$ ) ..... 31
Çizelge 5.3	Yük kaldırma katsayısı ( $\psi$ )..... 32
Çizelge 5.4	Krenlerin gruplandırılması ve kaldırma sınıfları..... 32

**KRENLERDE YÜK SALINIMLARININ SEBEP OLDUĞU YATAY  
KUVVETLERİN TESPİTİ İÇİN TEORİK BİR MODELİN GELİŞTİRİLMESİ**

Erdal ACAR

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Ahmet SAĞIRLI

Günümüzde endüstrinin sürekli büyümesine paralel olarak yapı sektöründe meydana gelen gelişmeler, yapı krenlerine olan ihtiyacı arttırmıştır. Artık krenlerden beklenen sadece kaldırma ve iletme yetenekleri değil, bu hareketleri mümkün olan en kısa zamanda ve en hassas şekilde yapmalarıdır.

Bu çalışmada genel olarak kaldırma ve iletme makinelerinden, çeşitli kriterlere göre sınıflandırılmalarından, konstrüksiyon ve ölçülendirme esaslarından, krenlerden ve genel özelliklerinden, kren hesabında etkili bazı faktörlerden bahsedilmiştir. Daha sonra 5 serbestlik dereceli örnek bir kule tipi kren modellenmiştir. Bu modelde kullanılan halatın esnek bir yay karakteristiğinde olduğu, kren gövdesinin ve yük kolunun (boom) rijit olduğu ve kren modelinde dönme hareketinin olmadığı, yatay yönde bir kuvvet etkisi altında olduğu kabul edilmiştir. İlk etapta Lagrange yöntemiyle sistemin enerji denklemleri çıkarılmış, Mathematica programı yardımı ile denklemler çözümlenmiş ve kontrolleri yapılmış, son olarak Matlab-Simulink programı ile sistem çözümlenmiştir. Elde edilen grafiklerde sistemin farklı koşullar altında ne tür dinamik davranışlar sergilediği görülmüş ve grafikler yorumlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Kule kren, dinamik davranışlar, açık çevrim, sistem modelleme

## ABSTRACT

---

### DEVELOPMENT A THEORETICAL MODEL OF TOWER CRANES FOR DETERMINATION OF HORIZONTAL FORCES CAUSED BY LOADING SWAY

Erdal ACAR

Department of Mechanical Engineering  
MSc. Thesis

Advisor: Assistant Prof. Dr. Ahmet SAĞIRLI

Today, the industry's continuous growth in line with developments in the construction sector, also brings requirement of building cranes with itself. Nowadays, expectations from cranes are not only lifting and transporting capabilities, but also doing these acts in the fastest time and with the most accurate way.

In this study, lifting and transport machines, their classifications according to some criterias, crane construction and dimensioning principals, cranes and their common specifications, some massive factors for crane design are explained generally. Then a tower crane with 5 degrees of freedom is modelled. The steel rope which is used in the model, is assumed to act as a spring, crane's body and the boom are assumed to be rigid and the crane is assumed to be under a horizontal force without rotation effects. First of all, energy equations of the system are obtained by Lagrange method, then equations are solved and checked with the help of Mathematica program and finally evaluated with the Matlab-Simulink program. In the graphics, it clearly seems that how the crane reacts dynamically under different circumstances and then these are commented.

**Key words:** Tower crane, dynamic reactions, open loop, system modelling

---

YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY  
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

### GİRİŞ

#### 1.1 Literatür Özeti

Daha önce krenler ve özellikle kule krenleri ile ilgili, çoğunluğu yurtdışı kaynaklı pek çok makale, tez v.b. çalışmalar yapılmıştır.

Mustafa KARAMOLLA (2005) kule vinçlerin matematik modellemesi adlı doktora tezinde, sonlu elemanlar metodunun değişken dönüşümü yaklaşımını kullanarak, sistemin bütününe belirlenen modlardaki doğal frekanslarını bulmuş, kule vinçlerin yüklere karşılık gelen deplasman ve titreşim analizini incelemiştir.

Ali Burak ERDİL (2007) portal krenlerin tasarımı ve gerilme analizi konulu çalışmasında, bir kren iskeletini bilgisayarda modellemiş, bu model üzerinde çeşitli analizler gerçekleştirmiş ve dinamik etkilerin değişik durumlar altındaki karşılaştırmaları ile modelin çeşitli özelliklerinin sonuca nasıl etki ettiğini tespit etmiştir.

Mustafa UZUNDAĞ (2009) tarafından yapılan çalışmada, krenlerde dinamik davranışların tasarım üzerindeki etkileri ele alınmıştır. Genel olarak krenlerin sınıflandırmaları, seçim esasları, güvenlik ve bakım esaslarından bahsedilip model olarak ele alınan kule krenin farklı durumlarda ne tür dinamik davranışlar sergilediği irdelenmiştir. Analiz sonucunda elde edilen grafiklerin birbirleriyle kıyaslanmasıyla dinamik davranışların tasarım üzerindeki etkilerinin farkları gözlemlenmiştir.

Kıvanç KAYA (2009) krenlerde duruş hassasiyetinin minimize edilmesi için uygun tasarımların gerçekleştirilmesi konulu tezinde, durum değişkenlerinin sistemdeki yükün duruş hassasiyeti üzerindeki etkilerinden, krenlerin durma karakteristiklerinin tasarım ile ilişkilendirilmesinden, ele alınan bir kule kren sisteminin döndürme momenti etkisi altındaki dinamik davranışlarından ve oluşan değişkenlerin değerlendirilmesinden bahsetmiştir.

Yabancı kaynaklı çalışmalar da Türkiye'deki çalışmalara paralellik göstermekte olup, içeriklerinde daha fazla teorik bilgiye yer verildiği görülmüştür. Yapılan çalışmalardan bazıları aşağıdaki gibidir:

Amjed A. Al-Mousa (2000) döner krenlerde bulanık mantık ile pozisyon belirleme ve durma sürelerinin kontrolü konulu tezinde, dinamik etkilere bağlı yük salınımları için bulanık mantık yönteminden yararlanarak sistem cevaplarını analiz etmiş, sistem karakteristiklerinde zamana bağlı ne gibi değişiklikler meydana geldiğini ortaya koymuş ve son olarak çalışmalarını deneysel bir düzenek oluşturarak gözlemlemiştir.

B.Jerman ve J.Kraman (2004) krenlerin hareketleri esnasındaki titreşimlerin iyileştirilmesine dayalı çalışmalarında, non-lineer davranış altındaki sistemin matematik modellemesini oluşturmuşlar ve meydana gelen eğilme momentlerinin, dinamik kuvvetlerin, açıların ve diğer parametrelerin değerlendirilmesine yönelik analizler gerçekleştirerek sistemde meydana gelen titreşim etkilerini minimize etmeyi amaçlamışlardır.

Hanafy M.Omar ve Ali H.Nayfeh (2003) çalışmalarında, doğrusal ve dönme hareketleri etkisi altındaki kule krenlerde, yüklerin bir noktadan başka bir noktaya taşınması sırasındaki salınımları, sürtünmeyi ve taşıma zamanlarını minimize etmeyi amaçlamışlar ve bu kapsamda sisteme uygulanan kontrolör yardımıyla meydana gelen dinamik etkileri inceleyerek optimizasyon sağlamışlardır.

## 1.2 Tezin Amacı

Bu tezde, Őimdiye kadar yapılan çalışmalardan farklı olarak bir kule tipi kren sisteminin moment etkisi olmadan sadece dışarıdan bir kuvvetin ve hareket esnasında mevcut yüklere bağlı meydana gelen kuvvetlerin etkisi altında; kule ve yk kolu (boom) kısmı rijit, halat kısmı esnek, taban platformu dinamik kabul edilen fiziksel modeli ele alınmıştır. Sistemin matematik modeli oluşturularak, Mathematica ve Matlab-Simulink programları yardımıyla modelin dinamik davranış denklemleri incelenmiş, hareket sırasındaki salınımlar ile diğer etkilere bağlı oluşan dinamik davranışlar analiz edilmiş ve konu üzerinde ileride yapılabilecek çalışmalara zemin hazırlamak üzere yorumlanmıştır.

## 1.3 Hipotez

Son yıllarda teknolojiye meydana gelen hızlı geliŐim ve değişim süreci endüstrinin birçok alanında da kendini göstermiştir. Endüstriyel ve mimari yapıların inŐa süreci içerisinde malzemelerin bir yerden başka bir yere taşınması için kaldırma ve taşıma makinelerine ihtiyaç vardır. Günümüzde özellikle yüksek yapıların inŐasında, yapılara ek yük getirmeden, kullanılacak olan malzemelerin yüksek katlara belirlenen süre dahilinde iş güvenliği Şartları sağlanmış bir Şekilde ulaŐtırılması istenmektedir. Kaldırma ve taşıma makinelerinden kule krenleri bu koşulları sağlayabilmek için her yapıya özel olarak tasarlanıp üretilirler.

Kule krenleri, yatay ve dikey pozisyonda iletim yapabilen, altlarındaki araba sayesinde istenilen yere rahatlıkla taŐınabilen, vinç tertibatları sayesinde kaldırdıkları yükleri yine zerilerinde bulunan diğer hareket elemanları yardımıyla döndürüp teleyebilen ve yükün hassas bir Şekilde hareketine olanak veren, bu sebeplerden dolayı çok çeşitli kullanım alanlarına sahip olan makinelerdir. Büyük yapım yükseklikleri, uzun kol açıklıkları ve aynı zamanda ağırlık tasarrufu nedeniyle kule krenlerin yapısı kafes kiriş taşıyıcı sistemli yapılmaktadır. Bu sebeple kule vinçlerin tasarım ve yapım aŐamalarında matematiksel olarak çok iyi incelenmesi ve çalışma esnasında meydana gelecek olan dinamik davranışların hassasiyetle incelenip en iyi tasarımın gerçekleştirilmesi hedeflenmelidir.

Bu çalışmada kule krenlerin yatay hareketlerinden kaynaklanan dinamik etkilerin oluşturulacak bir matematik modelle gözlemlenebileceği ve model yardımıyla elde edilecek verilerin gerek kren tasarımında, gerekse yük transferi esnasında kren gövdesinde ve yk kolunda oluşan yük salınımlarının kontrolünde kullanılabileceği öngörülmektedir.

### GENEL TANIMLAR ve SINIFLANDIRMA

Yüklerin kaldırma ve taşıma araç veya tesisleriyle yakın mesafelere taşınmasına yakın mesafe transport işleri denir.

Endüstriyel tesisler, mimari yapılar, makine sanayi, depolar, limanlar v.b. yerlerde yapılan taşıma işlemlerinde malların sadece kaldırılmadığı, yatay olarak da taşındığı görülmektedir. Bu nedenle yakın mesafe transport işlerinde kullanılan araç ve tesislere “kaldırma ve taşıma makineleri” veya “transport makineleri” demek doğru olur. Bu makinelerin incelenmesi ile birlikte, malzemelerin depolama tekniklerinin, tesislerin kullanım ve işletim sistemlerinin de bir arada ele alınmasına “transport tekniği” adı verilir.

Kaldırma ve taşıma makinelerini birbirinden ayıran en önemli özellik kesikli çalışma veya sürekli çalışma durumlarıdır. Kesikli çalışmada periyodik olarak yapılan hareketler söz konusudur. Oysa sürekli (kesintisiz) çalışan transport makinelerinde, çalışma ve mal iletimi hep aynı yönde olmaktadır. Kesikli çalışan transport makinelerine kaldırma makineleri, sürekli çalışan transport makinelerine ise taşıma makineleri denir.

Transport makineleri için detaylı sınıflandırma aşağıdaki gibidir:

## 2.1 Kaldırma ve Taşıma Makinelerinin Sınıflandırılması

Kaldırma ve taşıma makineleri her türlü endüstri dalında ve ticari işletmelerde uygulandığından çeşitleri çok fazladır. Bu çeşitliliği doğuran faktörler aşağıdaki gibi yazılabilir (Demirsoy [1]):

- Taşınacak kütlelerin büyüklüğü
- Taşıma mesafesinin büyüklüğü
- Taşınacak malların türü

Kaldırma ve taşıma makinelerinde alt gruplar ise aşağıdaki gibidir:

Transport Makineleri,

- Kesikli çalışanlar – Kaldırma makineleri
- Sürekli çalışanlar – Taşıma makineleri

Kaldırma Makineleri,

- Basit kaldırma makineleri
- Krenler
- Asansörler
- Zemin araçları

Basit Kaldırma Makineleri,

- Krikolar - Kremayerli, Vidalı, Hidrolik
- Çıkırıklar

- Palangalar - Elle çalıştırılanlar (adi palanga, sonsuz vidalı, düz dişli), Elektrikle alıştırılanlar
- Vinçler - El vinçleri, Otomatik kepçe vinçleri, Elektrikli vinçler, Kabestan vinçleri

#### Krenler,

- Köprülü krenler
- Portal krenler
- Oklu ve döner krenler
- Kablolul krenler
- Kule krenleri

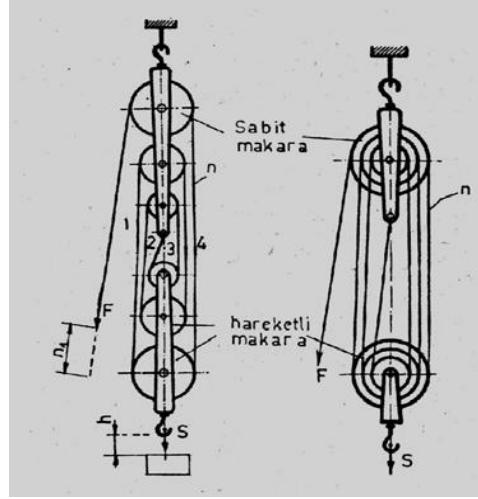
#### Asansörler,

- Yolcu asansörleri
- Yük asansörleri
- Hidrolik asansörler
- Servis asansörleri
- Otopark asansörleri
- Maden kuyusu asansörleri
- Paternosterler



### 2.1.1.3 Palangalar

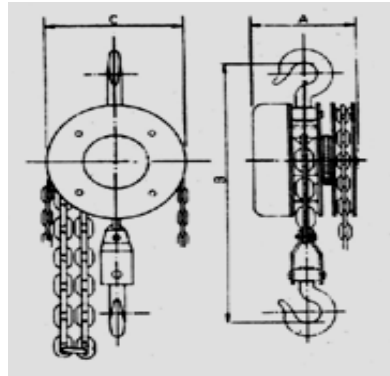
Sabit ve hareketli makaraların birleşmesinden elde edilirler. Yüksek bir yere asılarak yerden kumanda ile yükleri yukarıya doğru kaldırırılar. Yani yüklerin hareketi düşey eksen boyunca gerçekleşmektedir.



Şekil 2.3 Palangalar

### 2.1.1.4 Vinçler

İnsanların kaldıramayacağı ağırlıktaki yükleri bir yerden alarak düşey, yatay ve eğik konumda belirli uzaklığa taşınması için kullanılan makinelerdir. Vinçler incelendiği zaman, palanga zincir ve dişlisi, makaralar, halatlar gibi elemanlardan oluştuğu görülür. Bu kaldırma makineleri de yüklerin kaldırılmasında veya çekilmesinde kullanılırlar. Yüklerin hareketleri tek eksen boyunca olmaktadır [2], [8].



Şekil 2.4 Vinç tertibatı

### **2.1.2 FEM ve DIN Normları ile Transport Sistemlerinin Sınıflandırılması**

Kaldırma makineleri ve parçalarının konstrüksiyonunda, sistemin kullanım süresince istenen performansta görevini yerine getirmesi, dikkate alınması gereken en önemli özelliktir. Bu amaç doğrultusunda ilk olarak tasarımı yapılacak olan kaldırma makinesinin ve parçalarının FEM (Federation Europeenne de la Manutention) standardına göre belirlenen çalışma grubu ve süresi belirlenmelidir. FEM standardına göre kaldırma makinelerinin sınıflandırması 3 gruba göre yapılmıştır [3], [10].

Bunlar ;

- Kaldırma makinesi bütün olarak
- Özel ekipman ve mekanizmalar bütün olarak
- Yapısal ve mekanik parçalar olarak

Bu sınıflandırma yapılırken 2 kriter esas alınmıştır. Bunlar;

- Hesaba katılan parçaların toplam kullanım süresi
- Kanca yükü, yükleme veya herhangi bir parçadaki gerilim dağılımı

### **2.1.3 Kaldırma Makinelerinin Sınıflandırılması**

#### **2.1.3.1 Kullanım Sınıflandırması**

Kullanım sınıflandırmasının anlamı, kaldırma makinesinin çalışma süresi boyunca yapacağı kaldırma iş sayıdır. Kaldırma işi bütün olarak bir dizi operasyonlar içerisinde gerçekleşir. Bunlar kaldırmanın başlaması, hareket yönü ve işlem sonudur.

Toplam kullanım süresi ise makinenin servis dışına alınıncaya kadar yapmış olduğu çalışma süresidir. Bu süre U0, U1,.....U9'a kadar olan 10 sembole göre tasarlanmıştır (Çizelge 2.1).

Çizelge 2.1 Toplam kullanım süresine göre sınıflandırma (Boğoçlu vd. [4])

Sembol	Toplam Kullanım				
U0		$n_{max}$	<	16000	
U1	16000	<	$n_{max}$	<	32000
U2	32000	<	$n_{max}$	<	63000
U3	63000	<	$n_{max}$	<	125000
U4	125000	<	$n_{max}$	<	250000
U5	250000	<	$n_{max}$	<	500000
U6	500000	<	$n_{max}$	<	1000000
U7	1000000	<	$n_{max}$	<	2000000
U8	2000000	<	$n_{max}$	<	4000000
U9	4000000	<	$n_{max}$		

### 2.1.3.2 Yük Dağılımı

Kaldırma makinesinin toplam kullanım süresince kaldırdığı emniyetli çalışma yükü oranı ve toplam kullanım süresi verilerinin oluşturduğu fonksiyondan ortaya çıkan bir  $k_p$  dağılım faktörünün hesaplanmasıyla yük dağılımı kavramı ortaya çıkar.

Kaldırma makinesi yük dağılımına göre Çizelge 2.2’de Q1, Q2, Q3, Q4 ile tanımlanan 4 dağılım sınıfından birine yerleştirilir.

Çizelge 2.2 Yük dağılım faktörü (Boğoçlu vd. [4])

Simge	$k_p$ Yük Dağılım Faktörü				
Q1			$k_p$	<	0.125
Q2	0.125	<	$k_p$	<	0.250
Q3	0.250	<	$k_p$	<	0.500
Q4	0.500	<	$k_p$	<	1.000

### 2.1.3.3 Kaldırma Makinelerinin Grup Sınıflandırması

Kaldırma makineleri Çizelge 2.3'te gösterildiği gibi A1 ile A8 arasında 8 grup halinde sınıflandırılmıştır.

Çizelge 2.3 Kaldırma makinelerinin grup sınıflandırması (Boğoçlu vd. [4])

Yük Dağılım Sınıfı	Kullanım Sınıflandırması									
	U0	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9
Q1	A1	A1	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Q2	A1	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A8
Q3	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A8	A8
Q4	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A8	A8	A8

Aynı tipteki kaldırma makineleri değişik yollarla kullanılabilirler, ancak ayırt etmek için bir gruplandırma yapmak gerekir. Kaldırma makinelerinin sınıflandırmasında kullanılan ve kren tipine göre yapılan sınıflandırma Çizelge 2.4'te görülmektedir.

Çizelge 2.4 Kaldırma makinelerinin sınıflandırılması için rehber çizelge (Boğoçlu vd. [4])

Referans	Kren Tipi	Kaldırma Şekli	Vinç Grubu
1	El ile tahrikli vinçler		A1 - A2
2	Tahrikli krenler		A1 - A2
3	Güç istasyonları için tahrikli krenler		A2 - A4
4	Depolama ve hurda taşıyıcıları	Kancalı	A5
5	Depolama ve hurda taşıyıcıları	Tutucu veya magnet	A6 - A8
6	Atölye krenleri		A3 - A5
7	Gezer köprülü krenler	Tutucu veya magnet	A6 - A8
8	Kepçeli krenler		A6 - A8
9	Yer altı fırın köprüsü		A8
10	Kazıyıcı kren, fırın besleme kreni		A8
11	Demir ocağı krenleri		A6 - A8
12.a	Yük boşaltma ve konteynırlar için köprü krenleri	Kancalı veya gift kancalı	A5 - A6
12.b	Diğer köprü vinçleri	Kancalı	A4
13	Yük boşaltmak için köprü krenleri	Tutucu veya magnet	A6 - A8
14	Havuz krenleri, tersane krenleri (yük boşaltmak için)	Kancalı	A3 - A5
15	Dok vinçleri, yüzer veya sahil krenleri	Kancalı	A5 - A6
16	Dok vinçleri, yüzer veya sahil krenleri	Tutucu veya magnet	A6 - A8
17	Ağır yükler için yüzer veya sahil krenleri		A2 - A3
18	Güverte krenleri	Kancalı	A3 - A4
19	Güverte krenleri	Tutucu veya magnet	A4 - A5
20	İnşaat için kule krenler		A3 - A4
21	Vinçler		A2 - A3
22	Tren rayında çalışan raylı krenler		A4

## BÖLÜM 3

---

### KRENLER

#### 3.1 Giriş

DIN 15001'e göre krenler bir taşıma elemanına asılı olan (genellikle halata), yükü kaldıran ve çeşitli yönlerde hareket ettiren kaldırma ve taşıma makineleridir.

#### 3.2 Farklı Kren Uygulamaları

Aşağıda, kren çeşitlerinden bazılarında söz edilmiştir:

##### 3.2.1 Köprülü Krenler

Zeminden yükseğe yerleştirilmiş iki kren yolu arasında bir köprü konstrüksiyonundan meydana gelmektedir. Yarı ağır endüstriyle ilgili bütün fabrika, mağaza ve makine park salonlarında kullanılırlar. Basit bir operatör kabininden kumanda edilebileceği gibi, gezici operatör kabininden veya uzaktan da kontrol edilebilirler. Köprülü kren tarafından gerçekleştirilmesi gereken hareketler şunlardır;

- Kaldırma ve indirme hareketi
- Köprünün öteleme hareketi
- Arabanın köprü üzerinde yaptığı öteleme hareketi

Bu durumlara göre, bir köprülü krende aşağıdaki mekanizmaların olması öngörülür;

- Tamburlu kaldırma mekanizması
- Araba öteleme mekanizması
- Köprü yürütme mekanizması

Bir köprülü kren;

- Taşınacak yükün maksimum değeri, yani kaldırma kabiliyeti
- Köprü açıklığı

ile karakterize edilir. Bunların yanı sıra;

- Kaldırma hızı
- Köprü öteleme
- Araba öteleme hızı
- Kaldırma yüksekliği
- Köprü gezinme mesafesi

bir köprülü krende dikkate alınması gereken özelliklerdir. Bir köprülü krene ait esas hesapların yapılabilmesi için bütün bu karakteristiklerin bilinmesi gerekir. Köprü açıklığı atölye boyutlarına göre tespit edilir. Kaldırılması istenilen yük verilir. Bu şartlara göre köprü tekerlekleri arasındaki açıklığın belirlenmesi mümkündür (Arıtan ve Köktürk [5]).

### **3.2.2 Portal Krenler**

“Liman krenleri” veya “Sehpalı krenler” olarak da anılırlar. Limanlarda, tersanelerde ve depolarda kullanılırlar. Yapılarında kafes kiriş sistemi veya levhalı kiriş sistemi kullanılabilir.

Genellikle raylar üzerinde hareket ederler, küçük ve orta ağırlıkta yükler için lastik yürüme elemanları kullanması mümkündür. Taşıma kuvvetleri 800 tona, açıklıkları ise 120 metreye kadar çıkabilir.

Tahrik kaynağı olarak elektrik motorları ya da nadiren içten yanmalı kuvvet makineleri kullanılır. Genelde açık havada çalışıklarından fırtınaya karşı emniyetlerinin sağlanması gerekir. Bu yüzden rüzgar basıncı belli bir değeri aşınca kreni durduran ve kısıkaçlarıyla rayı kavramasını sağlayan bir mekanizmaya sahiptirler.

### 3.2.3 Oklu ve Döner Krenler

Liman ve şantiyelerde önemli görev üstlenen ve çok kullanılan kaldırma makineleri arasındadır. Ok adı verilen kiriş, uçlarından birisi aracılığıyla düşey bir eksen etrafında dönme hareketi yapar. Kanca bloğu, okun serbest olan öteki ucu tarafından taşınır. Oklu krenler sınıflandırılırken kancanın hizmet edebildiği, erişebildiği alan dikkate alınır. Bu durumda oklu krenler 3 sınıfa ayrılır:

**Sabit aplik krenler:** Atölye içinde bir duvara veya bir kolona tespit edilir. Okun serbest ucu, yarıçapı ok açıklığına eşit olan bir yarım daire çizebilir.

**Müstakil sabit krenler:** Bir duvar veya bir kolona tespit edilmeden kullanılırlar. Okun serbest ucu tam bir daire yayı çizebilir.

**Hareketli veya mobil krenler:** Raylar veya yollar üzerinde ya da herhangi bir arazide hareket edebilen kaldırma araçlarıdır.

Karakteristikleri;

- Kaldırma kapasitesi veya yeteneği
- Ok açıklığı
- Kaldırma yüksekliği

Krenin sahip olduğu yetenekler;

- Kaldırma hareketi
- Yönelme denilen dönme hareketi
- Mobil krenlerde öteleme veya yürütme hareketi
- Ok açıklığının değiştirilmesi hareketi

### **3.2.4 Kablolu Krenler**

Üzerinde arabanın hareket ettiği bir veya daha fazla tel halatlı (taşıma halatlı) krenleridir. Şantiyelerde ve büyük depolarda kullanılırlar. Açıklık mesafesi 1000 metreye kadar çıkabilir. Halatlar iki devrilebilir (sabit, hareketli veya dönebilir) kule arasına gerilmiştir.

Taşıma halatları olarak yarı veya tam kapalı spiral halatlar kullanılır. Arabanın hareketi çekme halatı üzerinde olurken, yük de kaldırma halatına asılır. Araba, içinde tekerleklerin ve halat makaralarının (kaldırma halatı makaraları) yatakladığı bir kafes kiriş sisteminden ibarettir. Tekerlek adedi, tekerlek yükünün halat çekme kuvvetine oranının 1/50 değerini aşmayacak şekilde seçilmelidir [6], [11].

### **3.2.5 Kule Krenleri**

#### **3.2.5.1 Kule Krenlerinin Yapısal Özellikleri**

Mimari ve endüstriyel yapıların günümüzde devasa boyutlara ulaşması ve bunların mümkün olan en kısa zamanda bitirilmesi gerekliliği kule krenlerinin ortaya çıkmasına, süratle gelişmesine ve bu tür işlerde sıklıkla kullanılmasına neden olmuştur. Kule krenleri çok çeşitli özelliklerine bağlı olarak çok çeşitli şekillerde üretilirler ve sınıflandırılırlar.

Sistem hareketliliğine göre;

- Gezer kule krenleri

- Çalışan yapının çatısına bağlı kule krenleri
- Düşey tırmanan krenleri

Kule tipine göre;

- Döner kuleli krenler
- Sabit kule ile dönen üst bölüme sahip krenler

Yük kolunun hareket tarzına göre;

- Yatay ve düşey düzlemde hareketli yük kolu
- Sadece yatay düzlemde hareketli yük kolu

Kule krenlerinin raylar üzerinde hareket eden çeşitlerinde, tekerlekler motor-redüktör grubu ile tahrik edilir. Durma emniyeti hem motora tatbik edilen bir frenle, hem de ilave durdurma ekipmanları ile sağlanır. Dört veya daha fazla tekerlek bulunabilir. Kulenin alt kısmında bulunan alt platformun üzerinde kule, karşı kütle ve tahrik grupları bulunur. Kule genellikle kare kesitli kafes kiriş sistem olarak imal edilir. Kumanda tertibatı genelde kulenin üst kısmında bir kabin içerisinde yer alır ve kren operatörünün çevreyi tam olarak görebileceği şekilde tasarlanır. Yük kolu, üçgen ya da kare kesitli kafes kiriş sistemi olarak üretilir. Arka tarafından kuleye mafsallı olarak bağlanmıştır. Sadece yatay düzlemde dönen çeşitlerinde yük kolunun uç kısmı kulenin tepesine bağlanır. Üzerinde bulunan raylarda bir vinç arabası çalışır. Yük bu vinç arabasının üzerinde mevcut olan palanga bloğu ile kaldırılır. Yatay ve düşey düzlemde hareketli yük koluna sahip olan vinçlerde ise yük kolunun ucu bir palanga sistemi ve saptırma makaraları ile alt da bulunan platformdan tahrik edilir. Bu tiplerde yük kolunun ucundaki bir palanga tertibatı ile yük kaldırılır. Buradaki yük kaldırma palangası da alt platformda yer alan motor redüktör ve tambur grubu ile tahrik edilir.

### 3.2.5.2 Kule Krenlerinin Genel Kullanım Değerleri

Günümüzde kullanılan ortalama değerler aşağıda verilmiş olup, özel durumlarda bu değerler aşılabilmektedir (İmrak vd. [3]).

Mimari yapılar için kapasiteler;

- Yük kaldırma kapasiteleri : 30 ~ 80 kN
- En fazla yük kolu açıklığı : 25 m
- Yük kaldırma yüksekliği : 30 ~ 50 m
- Yük kaldırma hızları : 0.3 ~ 1.0 m/s
- Vinç seyir hızları : 0.33 ~ 0.5 m/s
- Döner parçanın açısal hızı : 0.5 ~ 0.7 d/d

Endüstriyel kullanım için kapasiteler;

- Yük kaldırma kapasiteleri : 200 kN ve üzeri
- En fazla yük kolu açıklığı : 25 ~ 45 m
- Yük kaldırma yüksekliği : 50 ~ 80 m
- Yük kaldırma hızları : 0.16 ~ 1.0 m/s
- Vinç seyir hızları : 0.16 ~ 0.2 m/s
- Döner parçanın açısal hızı : 0.2 ~ 0.4 d/d

Kule vinçleri çalışılan konstrüksiyonun çatısına bağlanmaları halinde kapasiteleri;

- Yük kaldırma kapasiteleri : 63 ~ 80 ~ 100 ~ 125 kN
- En fazla yük kolu açıklığı : 45 m'ye kadar
- Yük kaldırma yüksekliği : 150 m'ye kadar
- Yük kaldırma hızları : 0.33 ~ 1.5 m/s
- Yük kolu düşey salınım hızı : 0.5 m/s
- Döner parçanın açısal hızı : 0.5 ~ 0.7 d/d

### KRENLERDE KONSTRÜKSİYON ve ÖLÇÜLENDİRME ESASLARI

#### 4.1 Konstrüksiyon İçin Genel Esaslar

Kaldırma makineleri yapımı, konstrüksiyonla uğraşan mühendisler için çok yönlü ve ilginç bir çalışma alanıdır. Genel makine yapımı, çelik, inşaat ve elektroteknik gibi farklı disiplinlerin bir arada uygulama yeri bulmaları ayrıca proje ve yapı şekillerinin çok çeşitli olması bu alanın önde gelen özelliklerindedir.

Krenlerin projelendirilmesi ve şekillendirilmesinin sevk idaresi kren konstrüktörünün görevidir. Bu yüzden bir kren konstrüktörü, ihtiyaçları dikkate alabilecek ve olanaklardan yararlanmasına yetecek kadar diğer bilim dallarından da bilgiye sahip olmalıdır.

Küçük kaldırma makineleri ve sık rastlanmayan bazı normal konstrüksiyon bir tarafa bırakılırsa, kaldırma makineleri yapımında günümüzde münferit üretim hakimdir. Alışılmış olan yürüyen ve döner krenler bile, kaldırma yükü, açıklık, çalışma hızı, kaldırma yüksekliği ve işletme şekline göre çok değişik tiplerde karşımıza çıkabilir. Boşluğu sınırlı olan bir hol ya da bir rıhtımdaki gibi yerel şartlar çoğu zaman normal yapı şekillerinden ayrılan konstrüksiyonlar gerektirir. Her zaman tek ve her seferinde amaca en iyi uyacak şekilde yapılan büyük tesis olarak sayılabilecek yükleme köprüleri, yüzer (dubalı) krenler, tersane krenleri, dok krenleri, özel demiryolu krenleri, doldurma, kısaçlı, blok sıyırma ve dökümhane krenleri gibi bir çok farklı kren çeşidi

sıralanabilir. Bu yüzden çoğu kren konstrüksiyonu her defasında yeniden projelendirilir ve çizilir [7], [12].

Kren yapımında bir konstrüksiyon siparişe yakından ilgilidir, bir dereceye kadar imalatın bir parçasını oluşturur. Teslim süreleri de sınırlı tutulmaktadır. Benzer örneklerden yararlanılamadığı ve yeni projelerin çözümünde yeni konstrüktif çabalara girilmek zorunluluğunda kalındığı için projelerin zorluğu artmaktadır. Bu yüzden kren konstrüktörünün çok defa ön denemeye tabi tutulmadan işletmeye alınan ve pratikte başarı ile çalışması beklenen yeni konstrüksiyonları kısa sürede ortaya koyması gerekir.

Konstrüksiyonlarda problemin doğru bir şekilde ortaya konması uygun bir çözümün ilk şartıdır. Bir krenin çalışmasını doğrudan etkileyen yapısal istekler ön planda tutulmalıdır. Çünkü sonunda ulaşılabilecek pratik başarı bir konstrüksiyon için kesin yargı demektir. İşletme emniyeti, yeteli ömür, kolay bakım ve yağlama, aşınan parçaları kolaylıkla değiştirebilme vb. bir krende bulunması gereken isteklerdir. Bunlardan sonra kren işletmesinde ekonomik istekler ortaya çıkar. Bunların başlıcaları;

- İş kapasitesinin yüksekliği
- Az enerji ve yağ sarfiyatı
- Düşük bakım ve onarım giderleri
- Düşük personel ve satın alma masrafları

Fakat bütün isteklerin aynı anda karşılanması mümkün değildir. Bir kren tesisinin kapasitesi arttığı oranda o tesis daha çok pahalılaşmaktadır [8], [14].

Kaldırma makineleri üretiminde ekonomik şekilde planlamada en etkin çare standartlaştırmaktır. Bu, farklı krenlere aynı parçaları (tekerlekler, halat makaraları, halatlar, kavramalar, yataklar, fren kasnakları, dişli kutuları vb.) kullanma imkanı verir. Böylece parça sayısı artması sonucunda bir elemanın imalatı ucuzlamış olur.

Standartlaştırma bazen konstrüktörün proje içerisindeki hareket kabiliyetini sınırladığı için kullanışsız olarak nitelendirilse bile konstrüksiyonu kolaylaştırdığı montaj kolaylığı sağladığı ve ucuzluk elde edildiği unutulmamalıdır. Diğer taraftan, çok yönlü kullanabilmeyi sağlayabilmek için kren yapımı standardizasyonu yeteri kadar esnek olmalıdır.

Son olarak, görev ve etken görüşlerin önem sırası açıklandıktan ve amaç tespit edildikten sonra taslaklar yardımıyla en iyi çözüm bulunur. Unutulmamalıdır ki mümkün gözüken pek çok çözümden sadece birkaç tanesi en iyidir. Çözümlerin karşılaştırılmalarından ve ortaya konulan isteklerle uyumlarından dolayı ortaya bir biçim çıkar. Ancak bunun üzerine proje adım hesapla kontrol edilir. Bu sırada başlangıçta tespit edilen düzenin kısmen ve bazen de tamamen değiştirilmesi zorunlu olabilir. Fakat burada başlangıçta verilen görevi ve ana görüşleri göz önünden uzak tutmamaya dikkat etmek gerekir. Konstrüktör benzer yapılardan, standardizasyonun getirdiği avantajlardan, kendi deneyim ve bilgisinden mutlaka faydalanacaktır ama her şeyden önemlisi konstrüktörün kritik ve ön yargısız temel görüşe sahip olmasıdır [5], [9].

## **4.2 Ölçülendirme Esasları**

Krenlerin çelik konstrüksiyonları için geçerli ölçülendirme esasları DIN 15018'de verilmiştir ama kren konstrüktörü mekanik kısımlar için gerilmelerin seçiminde hareket serbestliğine sahiptir.

Kaldırma makineleri çokça yer değiştiren makineler oldukları için mümkün olduğunca hafif yapılmalıdır. Ancak temel yapısal görüşlerin önem sırasına göre hafif yapı isteği ilk planda gelmez. Buna verilen önem bazı kren parçalarında ve değişik kren tiplerinde çok farklıdır. Örneğin yürüyen bir döner kren, yükün devirme momentine karşı stabilite emniyeti sağlayabilmek için belli bir ağırlığa sahip olmak zorundadır. Devirme momenti oluşturan elemanların (ok ve okun ucundaki makara takımı vb.) hafif yapılmasına bağlı olarak krenin ağırlığı azaltılabilir. Ancak, krenin emniyetini sağlayan parçalardan hafif yapı esaslarını uygulayarak mümkün olan büyük ağırlıkları çıkartıp, sonra bunları gerekli

olan stabilite emniyetini dengelemek amacıyla tekrar ilave etmek gereksizdir. Bu yüzden hafif yapı ilk olarak diğer konstrüksiyon ve bunun ağırlıkları üzerinde bir etkisinin bulunduğu yerlerde uygulanmalıdır. Örneğin bir döner krenin ok veya özellikle de ucunda tasarruf edilen ağırlık, karşıt ağırlıktan yani yükten 3-4 kat tasarruf edilmesini sağlar. Büyük açıklıklı köprülerde kren arabasında yapılacak ağırlık tasarrufları da benzer oranda önem kazanacaktır. Burada kren arabası ağırlığı, köprü konstrüksiyonunun kendi ağırlığını ve daha önemli olan köprü yürütme mekanizması ile kren yollarının ağırlığını da etkiler. Kepçeler ve diğer istif kaplarında ağırlık tasarrufu çok daha önemlidir. Bu çeşit yük tutma düzenlerinin ağırlıklarının azaltılması gerekli olan kaldırma kuvvetinin azalmasını sağlayacaktır. Burada kullanılan yapı şekli ve malzeme (alüminyum vs.) krenin diğer parçalarında ekonomik olmayabilir. Önemli olan, kullanılan malzemelerin, miktarlarının ve maliyetlerinin, toplam ağırlığı uygun şekilde etkileyerek dengelemesidir.

Krenlerin diğer parçalarında da fazla ağırlıktan kaçınmak gerekir. Fakat ekonomik sınır daha dardır. Örneğin döküm bir dişli kutusu yerine bundan daha pahalı olan kaynaklı bir yapı kullanmak uygun olmaz. Uzun millerde ise kaliteli malzeme söz konusu olmaz. Bunlarda sadece deformasyon önemlidir. Genellikler kren yapımında orta mukavemetli malzemeler kullanılır.

Sınırlamalara rağmen kren yapımcısı konstrüksiyonunu ağırlıktan tasarruf sağlayacak şekilde biçimlendirmede çok sayıda imkana sahiptir. Önemli olan şekil değiştirme ve sürekli mukavemet üzerindeki bugünkü bilgilere dayanarak münferit elemanların doğru olarak şekillendirilmesidir. Uygun olmayan bir şekillendirmenin sonucunda ortaya çıkan büyük boyutlar ve gereksiz ağırlıklar yerine, kren yapımcısı aynı emniyet ve sağlamlıktaki yapıyı daha uygun şekil verme ve boyutları küçük tutarak da sağlayabilir.

Boyutların belirlenmesinde emniyetli gerilmelerin seçilebilmesi için işletme şartları en ince ayrıntılarına kadar incelenmeli ve kontrol edilmelidir. İşletme şartları özellikle kren yapımında büyük farklılıklar gösterir. Bu sadece kren tipinde değil, bir krenin farklı tahrik mekanizmalarında da ortaya çıkar. Buna uygun olarak gerilmeler için de çok farklı değerler kullanılır. Tam hesaplanan yüklemenin ne kadar oluşacağı, hangi ölçüde

aşırı yüklemelerin beklendiği, artı veya eksi ivmelenme, darbeler sonucunda hangi ek kuvvetlerin oluşacağı, kullanma sıklığı vb. gibi unsurlar sürekli olarak kontrol edilmelidir. Her bir yapı elemanının önem derecesi ve bir kopma veya kırılmanın ortaya çıkaracağı sonuçlar dikkatle tahmin edilmeli ve ölçülendirme de göz önüne alınmalıdır. Sonuç olarak hesaplama sonuçlarının güvenilir olup olmadığına dikkat edilmelidir. Hesap yöntemleri ne kadar yaklaşık ve güvensiz olursa, emniyet gerilmeleri o kadar düşük alınmalıdır [10], [15], [17].

#### **4.3 Kren Seçimi**

Bir krenin seçiminde emniyetli çalışma için temel özelliklerden biri yapılacak işin gereksinimlerine uygun makine seçimidir. Şayet kren gereksinimlerin çoğunu karşılamıyorsa, iş personelinin zorlanması veya yapmak için zorlama birçok kazalara yol açabilir. Spesifik bir işte kaldırma operasyonlarında boyut ve karakteristikler bilinince makine seçimi yapılır [11]. Bunlar ;

- Ağırlıklar, boyutlar ve büyük boyutlu ağır yüklerin kaldırma radüsleri
- Maksimum kaldırma yüksekliği ve maksimum kaldırma radüsü, bu pozisyondaki yüklerin ağırlığı
- Kaldırma işleminin sayısı ve hangi frekansta olduğu
- Kaldırma işleminin türü (Örneğin; hassas kaldırma v.b.)
- Kren taşıyıcısının türü. (Bu zemin şartlarına ve makinenin kapasitesine bağlıdır. Kren taşıyıcısı üzerinde yük kolu döndüğü zaman kapasite taşıyıcıya göre değişecektir. Maksimum kapasite taşıyıcısının arka tarafından yapılan kaldırma işleminde olacaktır. Yan yüzlerde kapasite düşebilir. Bu kren stabilitesi ile ilişkilidir. Bir çok kren, taşıyıcısının ön tarafından yük kaldırmayacak şekilde imal edilir.)
- İşletme bünyesindeki yüklü ve yüksüz taşımalar

- Çalışma yeri şartları, makinenin yerleştirildiği zemin şartları, giriş yolları ve rampalar
- Servis ve fiyat durumları
- Montaj, demontaj ve transport gibi işlemlerin fiyatları

### KREN HESABINDA SİSTEME ETKİYEN YÜKLER ve KATSAYILAR

Gezer ve portal krenlerin hesabında DIN 15018'e göre esaslar gözetilir. Taşıyıcı sistemlerin hesaplanmasında, bir krenin işletmesi sırasında meydana gelen zorlamalar göz önünde bulundurulmalıdır. Bu zorlamalar aşağıda belirtilen yüklerin sonucunda ortaya çıkar [12], [14].

- Duruş halindeki krenin taşıyıcı sisteminin (en uygunsuz yükleme durumundaki) esas yükler
- Düşey hareketten meydana gelen yükler
- Yatay hareketten meydana gelen yükler
- Hava şartlarından "iklim etkisi ile" meydana gelen yükler

#### 5.1 Esas (Ana) Yükler

Taşıyıcı sistem elemanlarının kendi ağırlığından gelen yükler ve işletme yükü (hareketten doğan) yüklerdir. Sabit yükün bir kısmı üniform yayılı yük olarak kabul edilir, diğer kısmı (makine sepeti, karşı ağırlık vb.) münferit yük olarak etki eder.

## 5.2 Düşey Hareketlerden Gelen Yükler

İşletme yükünün (kaldırılan yük) az veya çok sarsıntılı olmasından ve kaldırma hareketinin ivmeli bir hareket oluşundan ortaya çıkan ilave yüklerdir. İşletme yükünün büyütülmesi için kullanılan yük kaldırma katsayısı ( $\psi$ ) ile çubuk kuvvetleri, kesme kuvvetleri ve eğilme momentleri çarpılır.

## 5.3 Yatay Hareketlerden Gelen Yükler

Hareket eden kısımların hareketinden ya da frenlemesinden meydana gelen ivmeli hareketlerin (atalet kuvvetlerinin), çeşitli taşıyıcı sistem elemanları üzerine gelen ilave yan yüklerdir.

## 5.4 Hava Şartlarından Meydana Gelen Yüklemeler

Rüzgar, kar ve sıcaklık değişimleri nedeniyle meydana gelir. Rüzgarın bütün yönlerden esmesi hallerinde dahi yatay olarak etki yaptığı kabul edilir. Rüzgarın etkisi krenin yapı şekline bağlıdır. Bir taşıyıcı sistem elemanının üzerine düşen rüzgarın etkisi bir kuvvettir.

Bunun rüzgar yönündeki bileşeni:

$$p = c \cdot A \cdot q \quad (5.1)$$

$p$  : Rüzgar kuvvetinin bileşkesi [daN]

$c$  : Aerodinamik bir katsayısı (Bu katsayı taşıyıcı sistem elemanların şekline bağlıdır.  $c$  katsayıları; kafes kirişlerde  $c=1,6$ ; dolu gövdeli veya kutu kirişlerde  $c =1,2 \sim 1,6$ ; boru kafes kirişlerde ve daire kesitli elemanlarda  $c=0,7$  civarlarında alınır.)

$A$  : Rüzgar yönüne dik düzlemdeki taşıyıcı sistem yüzeylerinin izdüşümü [ $m^2$ ]

$q$  : Dinamik basınç  $q=(V_{rüz})^2 / 16$  [ $daN/m^2$ ]

$V_{rüz}$  : Rüzgar hızı [ $m/s$ ]

Sıcaklık değişimi, yalnızca özel hallerde dikkate alınır. Örneğin, kiriş sistem elemanlarının serbest olarak uzamalarının mümkün olmadığı yerlerde dikkate alınabilir. Açık havada çalışacak tesislerde sıcaklık değişimlerinin sınırı  $-20^{\circ}\text{C} \sim +45^{\circ}\text{C}$ 'dir.

## **5.5 Yükleme Durumu Grupları ve Genel Gerilme Değerleri**

Krenlerin hesaplanmasında ilk adım yükleme durumuna göre grubun seçilmesidir. Buna göre eğilme gerilmesi hesapları yapılır. DIN 15018 standardına göre yükleme 3 grupta incelenmektedir. Bunlar;

- Yüklemenin H (ana yük) hali
- Yüklemenin HZ (ana ve ek yükler) hali
- Yüklemenin HS (ana ve özel yükler) hali

### **5.5.1 H (Ana Yük) Yükleme Durumu**

Ana yük denilince anlaşılması gereken kısımlar ve kuvvetler;

- Kaldırma makinesinin öz ağırlığının kuvveti (Kiriş, araba, kanca, travers, elik halatlar, kepçe ve magnetler vb.)
- Kaldırma yükü kuvveti
- Tahrik ivmesi ve frenlemesinden kaynaklanan kütle kuvvetleri
- Yük darbeleri sonucu oluşan kuvvet
- Platform z ağırlığından ileri gelen kuvvet

### **5.5.2 HZ (Ana ve Ek Yükler) Yükleme Durumu**

Ek yük denilince anlaşılması gereken kuvvetler;

- Rüzgar kuvveti

- Kasılmadan ve çarpık hareketlerden ileri gelen kuvvetler
- Isıdan ileri gelen kuvvetler
- Kar yükünden ileri gelen kuvvetler
- Merdivenler, raflar ve korkulukların yük ağırlığından ileri gelen kuvvetler

### **5.5.3 HS (Ana ve Özel Yükler) Yükleme Durumu**

Özel yük denilince anlaşılması gereken kuvvetler;

- Kaldırma makinesini işletmeye alırken kullanılan kontrol yüklerinden ileri gelen kuvvetler
- Tampon kuvvetleri
- İki araba veya vinç beraberce bir rayda çalışıyorlarsa, bunların çarpışma kuvveti

### **5.6 Genel Emniyet Gerilme Değerleri**

DIN 15018'de yükleme durumları (H ve Hz) gruplarına göre genel emniyet gerilme değerleri verilmiştir. St 37 ve St 52-3 malzemeleri gerilme emniyet değerleri Çizelge 5.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1 St 37 ve St 52-3 malzemeleri gerilme emniyet değerleri (Boğoçlu vd. [4])

Malzeme	DIN	Yükleme Durumu	Çekme Emniyet Gerilmesi $\sigma_{em}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Basma Emniyet Gerilmesi $\sigma_{em}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Kayma Emniyet Gerilmesi $\tau_{em}$ (N/mm <sup>2</sup> )
St 37	DIN 17100	H	160	140	92
St 37	DIN 17100	HZ	180	160	104
St 52-3	DIN 17100	H	240	210	138
St 52-3	DIN 17100	HZ	270	240	156

## 5.7 Kren Hesabındaki Katsayılar

### 5.7.1 Zati Ağırlık Katsayısı ( $\phi$ )

Krenlerin taşıyıcı elemanlarının yürüme yolları üzerinde hareketleri sırasında, seyir hızlarına (m/dak) ve hareket yollarının pürüzlülük durumlarında göre, kendi “zati” ağırlıklarından meydana gelen kuvvet ve momentlerin zati ağırlık ( $\phi$ ) ile çarpılması gerekir (Çizelge 5.2).

Çizelge 5.2 Zati ağırlık katsayısı ( $\phi$ ) (Boğoçlu vd. [4])

Hareket Hızı v (m/dak)		Zati Ağırlık Katsayısı
Hareket Yolları Rayları		
Düzensiz olmayan veya pürüzlü	Düzensiz veya kaynaklı (işlenmiş)	
≤ 60	≤ 90	1.1
60 - 200	91 - 300	1.2
> 200	-	≥ 1.2

### 5.7.2 Yük Kaldırma Katsayısı ( $\psi$ )

Bu yükler işletme yükünün (kaldırılan yükün) az veya çok sarsıntılı olmasından ve kaldırma hareketinin ivmeli bir hareket olmasından meydana gelen ek yüklerdir. DIN 15018'den, Çizelge 5.3'te yük kaldırma hızlarına ve kaldırma sınıflarına göre yük kaldırma katsayıları verilmiştir. İşletme yükünün büyütülmesi için kullanılan bu ( $\psi$ ) katsayısı ile çubuk kuvvetleri, kesme kuvvetleri veya eğilme momentleri çarpılır.

Çizelge 5.3 Yük kaldırma katsayısı ( $\psi$ ) (Boğoçlu vd. [4])

Kaldırma Sınıfı	Kaldırma Hızları $V_k$ (m/dak)	
	$\leq 90$ m/dak	$> 90$ m/dak
H1	$1.1 + 0.0022.V_k$	1.3
H2	$1.2 + 0.0044.V_k$	1.6
H3	$1.3 + 0.0066.V_k$	1.9
H4	$1.4 + 0.0066.V_k$	2.2

Çizelge 5.3'te bahsedilen kaldırma sınıfları; relatif işletme süresi, yükleme durumu ve tekrarına göre Çizelge 5.4'te dört grup halinde verilmiştir.

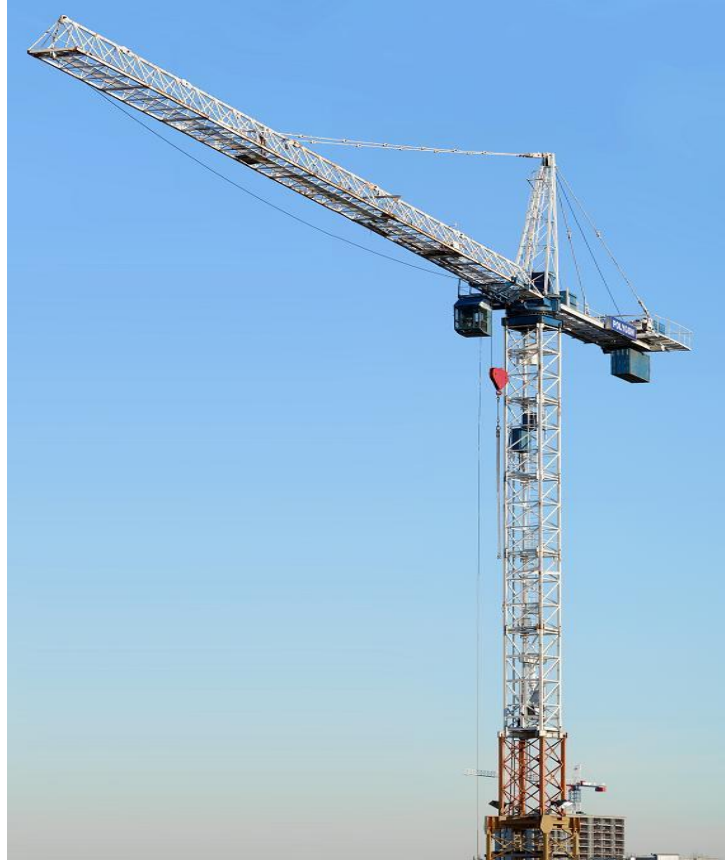
Çizelge 5.4 Krenlerin gruplandırılması ve kaldırma sınıfları (Boğoçlu vd. [4])

Gruplar	Relatif İşletme Süresi	Relatif Yük	Yük Tekrarı
1	Küçük	Küçük	Normal
2	Büyük	Küçük	Normal
	Küçük	Büyük	Normal
	Küçük	Küçük	Kuvvetli
3	Büyük	Küçük	Normal
	Büyük	Büyük	Kuvvetli
	Küçük	Küçük	Kuvvetli
4	Büyük	Büyük	Kuvvetli

### SEÇİLEN BİR KULE KRENİN TANITIMI ve MODELLENMESİ

#### 6.1 Kule Krenin Tanıtımı

Bu tez çalışmasında model olarak kren tiplerinden, kule yapı kreni çeşidi ele alınmıştır (Şekil 6.1).



Şekil 6.1 Kule krenin genel görünümü

## 6.2 Seçilen Krenin Modellenmesi ve Yapılan Kabuller

İncelemiş olduğum kule tipi kren sisteminde Lagrange yöntemi ve enerji denklemleri kullanılarak, non-linear bir yapının matematiksel olarak modellenmesi ve bu modelleme sayesinde sistemin bilgisayar ortamında benzetim çalışmaları yapılmış ve dinamik davranışları incelenmiştir. Bu çalışmalara ait verilerden bir sonraki aşamada bahsedilmiştir.

Açık çevrim olarak ele alınan sistemde modelleme ve dinamik davranışlar aşaması hazırlanırken bazı kabuller yapılmıştır:

- Kren gövdesi ve yük kolu (boom) rijit kabul edilmiştir.
- Krenin ve yük kolunun ağırlıkları noktasal kütle olarak ele alınmış olup, karşı ağırlıkla birlikte sistemin geometrik ağırlık merkezine indirgenmişlerdir.
- Halat visko-elastik olarak ele alınmıştır.
- Krenin taşıdığı yük ( $m$ ), halatın ucuna noktasal kütle olarak etki ettirilmiştir.
- Sistem düzlemsel olarak modellenmiş olup, dışarıdan bir ( $F$ ) kuvveti etkisi altındadır. Dönme etkileri modele katılmamıştır, sadece krenin hareketi esnasında meydana gelen dinamik etkiler göz önüne alınmıştır.
- Krenin üzerinde hareket ettiği rayın yeterince düzgün olduğu kabul edilmiş olup, hareket boyunca sürtünme etkileri göz ardı edilmiştir.

Seçilen kren modelinin şematik gösterimi Şekil 6.2'deki gibidir.



$$\Delta L = L_h - L_o \quad (6.1)$$

$(x_L, y_L)$  koordinatlarına sahip m kütesinin açısal koordinatlardaki ifadeleri;

$$x_L = x + H \cdot \sin\theta_D + L \cdot \cos\theta_D - L_h \cdot \sin\theta_L \quad (6.2)$$

$$y_L = y_k + H \cdot \cos\theta_D - L \cdot \sin\theta_D - L_h \cdot \cos\theta_L \quad (6.3)$$

$(x_M, y_M)$  koordinatlarına sahip M kütesinin açısal koordinatlardaki ifadeleri;

$$x_M = x + f \cdot \sin\theta_D - e \cdot \cos\theta_D \quad (6.4)$$

$$y_M = y_k + f \cdot \cos\theta_D + e \cdot \sin\theta_D \quad (6.5)$$

$(x_L, y_L)$  koordinatlarının zamana göre birinci türevleri (hızları);

$$x_L' = x' + H \cdot \theta_D' \cdot \cos\theta_D - L \cdot \theta_D' \cdot \sin\theta_D - L_h' \cdot \sin\theta_L - L_h \cdot \theta_L' \cdot \cos\theta_L \quad (6.6)$$

$$y_L' = y_k' - H \cdot \theta_D' \cdot \sin\theta_D - L \cdot \theta_D' \cdot \cos\theta_D - L_h' \cdot \cos\theta_L + L_h \cdot \theta_L' \cdot \sin\theta_L \quad (6.7)$$

$(x_M, y_M)$  koordinatlarının zamana göre birinci türevleri (hızları);

$$x_M' = x' + f \cdot \theta_D' \cdot \cos\theta_D + e \cdot \theta_D' \cdot \sin\theta_D \quad (6.8)$$

$$y_M' = y_k' - f \cdot \theta_D' \cdot \sin\theta_D + e \cdot \theta_D' \cdot \cos\theta_D \quad (6.9)$$

### 6.3.2 Lagrange Yöntemiyle Sistemin Enerji Denklemleri

Sistemin kinetik enerji denklemi [13], [17];

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot [m \cdot ((x_L')^2 + (y_L')^2) + M \cdot ((x_M')^2 + (y_M')^2)] \quad (6.10)$$

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot M \cdot ((x' + f \cdot (\theta_D)') \cdot \cos\theta_D + e \cdot (\theta_D)' \cdot \sin\theta_D)^2 + (y_k' + e \cdot (\theta_D)' \cdot \cos\theta_D - f \cdot (\theta_D)' \cdot \sin\theta_D)^2 + \frac{1}{2} \cdot m \cdot ((x' - (L_h)') \cdot \sin\theta_L + H \cdot (\theta_D)' \cdot \cos\theta_D - L \cdot (\theta_D)' \cdot \sin\theta_D - L_h \cdot (\theta_L)' \cdot \cos\theta_L)^2 + (-L_h)' \cdot \cos\theta_L + y_k' - L \cdot (\theta_D)' \cdot \cos\theta_D - H \cdot (\theta_D)' \cdot \sin\theta_D + L_h \cdot (\theta_L)' \cdot \sin\theta_L)^2 \quad (6.11)$$

Sistemin potansiyel enerji denklemi;

$$E_p = m \cdot g \cdot L_h \cdot (1 - \cos\theta_L) + M \cdot g \cdot (e \cdot \sin\theta_D) + (K_p \cdot y_k^2) + (K_p \cdot (\frac{1}{4} \cdot a^2 \cdot (\sin\theta_D)^2)) + \frac{1}{2} \cdot K_l \cdot (\Delta L)^2 \quad (6.12)$$

Sistemin sönüm enerjisi denklemi;

$$E_s = C_p \cdot (y_k')^2 + \frac{1}{2} \cdot C_l \cdot (L_h')^2 + \frac{1}{4} \cdot a^2 \cdot C_p \cdot (\cos\theta_D)^2 \cdot (\theta_D')^2 \quad (6.13)$$

### 6.3.3 Sistemin Hareket Denklemlerinin Elde Edilmesi

Sistemin genelleştirilmiş yer değiştirme vektörleri;

$$\vec{q} = \{x, \theta_D, \theta_L, L_h, y_k\} \quad (6.14)$$

Elde edilen enerji denklemleri Lagrange denkleminde kullanılarak sistemin genelleştirilmiş hareket denklemleri elde edilir (Omar ve Nayfeh [15]).

#### F<sub>x</sub> Kuvvetinin Denklemi:

Krenin aldığı yola (x) bağlı olarak meydana gelen F<sub>x</sub> kuvveti ifadesini veren denklem aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{\delta}{\delta t} \left( \frac{\delta E_k}{\delta x'} \right) - \frac{\delta E_k}{\delta x} + \frac{\delta E_p}{\delta x} + \frac{\delta E_s}{\delta x'} = F_x \quad (6.15)$$

Sistemdeki Lagrange denklemi ifadeleri Mathematica programında çözdürülmüştür. Aşağıda F kuvvetine ait denklemlerin Mathematica programı dilinde yazılmış formatı bulunmaktadır:

$$F_x = D[D[E_k, D[x[t], t]], t] - D[E_k, x[t]] + D[E_s, D[x[t], t]] + D[E_p, x[t]] \quad (6.16)$$

Elde edilen F kuvvetine ait denklemi çözdürebilmek için, F herhangi bir sayıyı ifade eden AA'ya eşitlenerek x'' terimi yalnız bırakılır. Elde edilen denklem Matlab-Simulink programına (x'')'nü tanımlayan denklem olarak yazılır.

$$\{x''[t] \rightarrow \frac{1}{m+M} (AA + (Lm - eM + (Hm + fM)\theta_D[t])(\theta_D)')[t]^2 + 2m(L_h)'[t](\theta_L)'[t] - mL_h[t]\theta_L[t](\theta_L)'[t]^2 + m\theta_L[t](L_h)''[t] - Hm(\theta_D)''[t] - fM(\theta_D)''[t] + Lm\theta_D[t](\theta_D)''[t] - eM\theta_D[t](\theta_D)''[t] + mL_h[t](\theta_L)''[t])\} \quad (6.17)$$

Böylece  $x''$  ifadesi elde edilmiş olur.

#### **M<sub>d</sub> Momentinin Denklemleri:**

Kren gövdesinin devrilme açısına ( $\theta_D$ ) bağlı olarak oluşan M<sub>d</sub> momenti ifadesini veren denklem aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{\delta}{\delta t} \left( \frac{\delta E_k}{\delta \theta_D'} \right) - \frac{\delta E_k}{\delta \theta_D} + \frac{\delta E_p}{\delta \theta_D} + \frac{\delta E_s}{\delta \theta_D'} = M_d \quad (6.18)$$

Bu denklemin Mathematica programında yazılmış ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$M_d = D[D[E_k, D[\theta_D[t], t]], t] - D[E_k, \theta_D[t]] + D[E_s, D[\theta_D[t], t]] + D[E_p, \theta_D[t]] \quad (6.19)$$

Elde edilen M<sub>d</sub> momentine ait denklemi çözdürebilmek için, M<sub>d</sub> momenti 0'a eşitlenerek  $\theta_D''$  terimi yalnız bırakılır. Elde edilen denklem Matlab-Simulink programına ( $\theta_D''$ )'nü tanımlayan denklem olarak yazılır.

$$\{(\theta_D)''[t] \rightarrow \frac{1}{2((H^2 + L^2)m + (e^2 + f^2)M)(1 + \theta_D[t]^2)} (-a^2 Cp(\theta_D)'[t] - 2(egM + m(\theta_L)'[t](-2(H + L\theta_L[t])(L_h)'[t] + L_h[t](-L + H\theta_L[t])(\theta_L)'[t]) + (Hm + fM)x''[t] - 2m(L - H\theta_L[t])(L_h)''[t] + 2(-eM + Lm)(y_k)''[t] + 2mL_h[t](H + L\theta_L[t])(\theta_L)''[t] + \theta_D[t](-a^2 Kp - 4m(L - H\theta_L[t])(L_h)'[t](\theta_L)'[t] + 2((Lm - eM)x''[t] - m(H + L\theta_L[t])(L_h)''[t] + (fM + Hm)(y_k)''[t] + mL_h[t](H + L\theta_L[t])(\theta_L)'[t]^2 + (-L + H\theta_L[t])(\theta_L)''[t])))\} \quad (6.20)$$

Böylece  $\theta_D''$  ifadesi elde edilmiş olur.

### **M<sub>L</sub> Momentinin Denklemi:**

Halatın y eksenini ile yaptığı salınım açısına ( $\theta_L$ ) bağlı olarak oluşan  $M_L$  momenti ifadesini veren denklem aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{\delta}{\delta t} \left( \frac{\delta E_k}{\delta \theta_L'} \right) - \frac{\delta E_k}{\delta \theta_L} + \frac{\delta E_p}{\delta \theta_L} + \frac{\delta E_s}{\delta \theta_L'} = M_L \quad (6.21)$$

Bu denklemin Mathematica programında yazılmış ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$M_L = D[D[E_k, D[\theta_L[t], t]], t] - D[E_k, \theta_L[t]] + D[E_s, D[\theta_L[t], t]] + D[E_p, \theta_L[t]] \quad (6.22)$$

Elde edilen  $M_L$  momentine ait denklemi çözdürebilmek için,  $M_L$  momenti 0'a eşitlenerek  $\theta_L''$  terimi yalnız bırakılır. Elde edilen denklem Matlab-Simulink programına ( $\theta_L''$ )'nü tanımlayan denklem olarak yazılır.

$$\left\{ \left\{ \frac{((\theta_L)''[t] - (L + H\theta_D[t])(\theta_D)'[t])^2 - 2(L_h)'[t](\theta_L)'[t] + x''[t] - \theta_L[t](g + (-H + L\theta_D[t])(\theta_D)'[t])^2 + 2\theta_L[t](L_h)'[t](\theta_L)'[t] + (y_k)''[t]) + (H - L\theta_D[t] + (L + H\theta_D[t])\theta_L[t])(\theta_D)''[t]}{L_h[t](1 + \theta_L[t]^2)} \right\} \right\} \quad (6.23)$$

Böylece  $\theta_L''$  ifadesi elde edilmiş olur.

### **F<sub>Lh</sub> Kuvvetinin Denklemi:**

Yük taşıyan değişken halat boyuna bağlı ( $L_h$ ) olarak oluşan  $F_{Lh}$  kuvveti ifadesini veren denklem aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{\delta}{\delta t} \left( \frac{\delta E_k}{\delta L_h'} \right) - \frac{\delta E_k}{\delta L_h} + \frac{\delta E_p}{\delta L_h} + \frac{\delta E_s}{\delta L_h'} = F_{Lh} \quad (6.24)$$

Bu denklemin Mathematica programında yazılmış ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$F_{L_h} = D[D[E_k, D[L_h[t], t]], t] - D[E_k, L_h[t]] + D[E_s, D[L_h[t], t]] + D[E_p, L_h[t]] \quad (6.25)$$

Elde edilen  $F_{Lh}$  kuvvetine ait denklemi çözdürebilmek için,  $F_{Lh}$  kuvveti 0'a eşitlenerek  $L_h''$  terimi yalnız bırakılır. Elde edilen denklem Matlab-Simulink programına  $(L_h'')$ 'nü tanımlayan denklem olarak yazılır.

$$\left\{ \left\{ (L_h'')[t] \right. \right. \\ \left. \left. \begin{aligned} & KLo - Cl(L_h)'[t] + L_h[t](-Kl + m(1 + \theta_L[t]^2)(\theta_L)'[t]^2) + m(-H - L\theta_D[t] + (L + H\theta_D[t]) \\ & \theta_L[t])(\theta_D)'[t]^2 + \theta_L[t]x''[t] + (y_k)''[t] - (L - H\theta_L[t] + \theta_D[t](H + L\theta_L[t]))(\theta_D)''[t] \end{aligned} \right. \right\} \\ \rightarrow \frac{\quad}{m(1 + \theta_L[t]^2)} \quad \left. \right\} \quad (6.26)$$

Böylece  $L_h''$  ifadesi elde edilmiş olur.

### $F_{yk}$ Kuvvetinin Denklemi:

Kren tabanındaki platformun y eksenini doğrultusundaki düşey mesafesine ( $y_k$ ) bağlı olarak meydana gelen  $F_{yk}$  kuvveti ifadesini veren denklem aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{\delta}{\delta t} \left( \frac{\delta E_k}{\delta y_k'} \right) - \frac{\delta E_k}{\delta y_k} + \frac{\delta E_p}{\delta y_k} + \frac{\delta E_s}{\delta y_k'} = F_{yk} \quad (6.27)$$

Bu denklemin Mathematica programında yazılmış ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$F_{y_k} = D[D[E_k, D[y_k[t], t]], t] - D[E_k, y_k[t]] + D[E_s, D[y_k[t], t]] + D[E_p, y_k[t]] \quad (6.28)$$

Elde edilen  $F_{yk}$  kuvvetine ait denklemi çözdürebilmek için,  $F_{yk}$  kuvveti 0'a eşitlenerek  $y_k''$  terimi yalnız bırakılır. Elde edilen denklem Matlab-Simulink programına  $(y_k'')$ 'nü tanımlayan denklem olarak yazılır.

$$\left\{ \left\{ (y_k)''[t] \rightarrow \frac{1}{M + m} \left( -2Kpy_k[t] - 2Cp(y_k)'[t] + (M(f + e\theta_D[t]) + m(H \right. \right. \\ \left. \left. - L\theta_D[t]))(\theta_D)'[t]^2 + M(-e + f\theta_D[t])(\theta_D)''[t] + m(-L_h[t](\theta_L)'[t]^2 \right. \right. \\ \left. \left. + (L_h)''[t] + (L + H\theta_D[t])(\theta_D)''[t] - \theta_L[t](2(L_h)'[t](\theta_L)'[t] \right. \right. \\ \left. \left. + L_h[t](\theta_L)''[t])) \right) \right\} \right\} \quad (6.29)$$

Böylece  $y_k''$  ifadesi elde edilmiş olur.

Yukarıdaki denklemler elde edilirken Mathematica programında çözümlenen diğer ara işlemler EK-A'da gösterilmiştir. Bu denklemlerden elde edilen  $(x'')$ ,  $(\theta_D'')$ ,  $(\theta_L'')$ ,  $(L_n'')$  ve  $(y_k'')$  ifadelerinin Matlab-Simulink programında kullanılmaya uygun yazılışları da EK-B'de yer almaktadır [16], [18].

#### 6.4 Çeşitli Parametreler Altında Oluşturulan Benzetim Çalışmaları

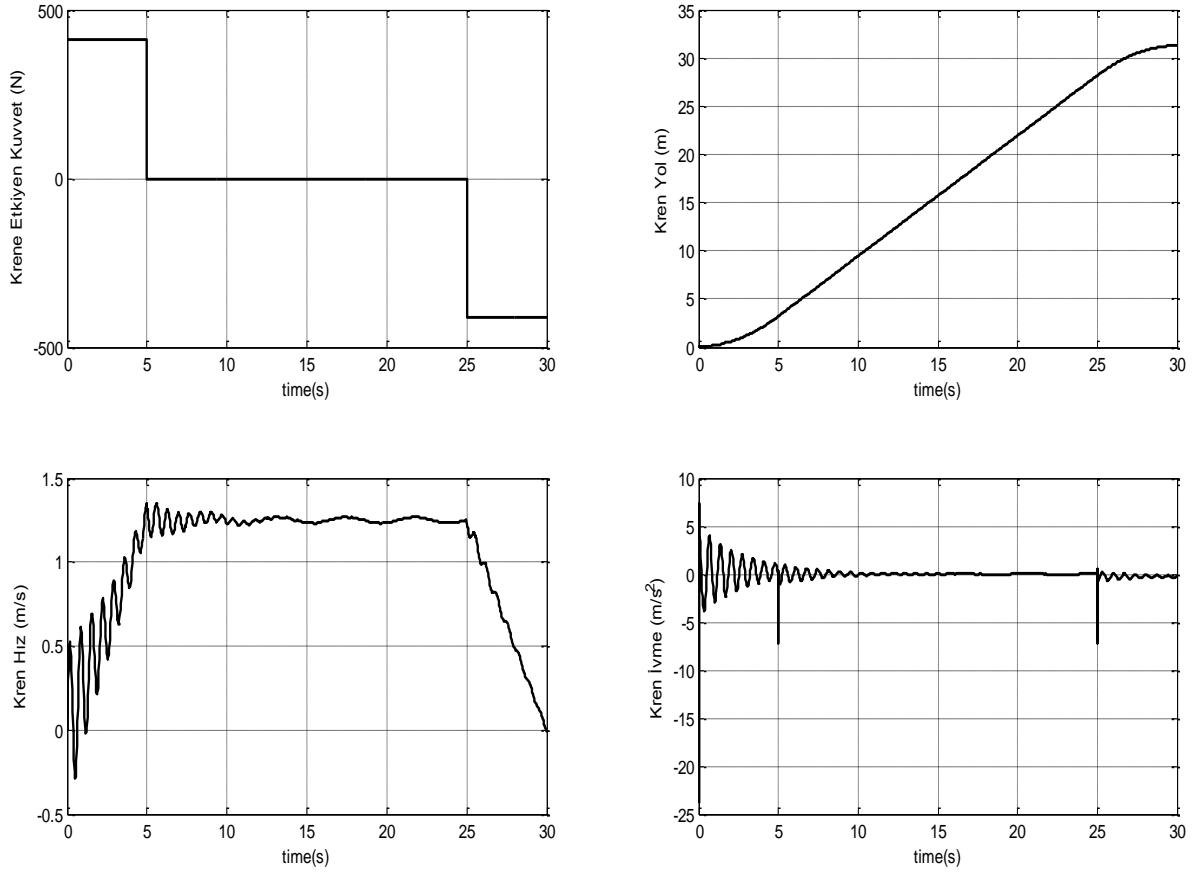
Bu bölümde, daha önce yapılan kabuller ve oluşturulan denklemlere ek olarak, bazı parametreler değiştirilerek çeşitli senaryolar oluşturulmuştur. Bu durumlar altında Matlab programının Simulink modülünde sistemin blok diyagramı oluşturulup simule edilmiştir (EK-C). Simülasyon sonucunda tüm durumlar için grafiksel sonuçlar elde edilmiştir.

Sistemin çeşitli parametrelerdeki koşulları ve bu koşullar altındaki  $(x'')$ ,  $(\theta_D'')$ ,  $(\theta_L'')$ ,  $(L_n'')$  ve  $(y_k'')$  ifadelerinin konum-hız-ivme değerleri, açısal değişimler, yer değiştirmeler ile kuvvetlerde meydana gelen değişikliklerin gözlemlendiği grafikleri ve yorumları içeren senaryolar aşağıdaki gibidir:

#### 6.4.1 1. Senaryo İçin Oluşturulan Grafikler ve Yorumlar

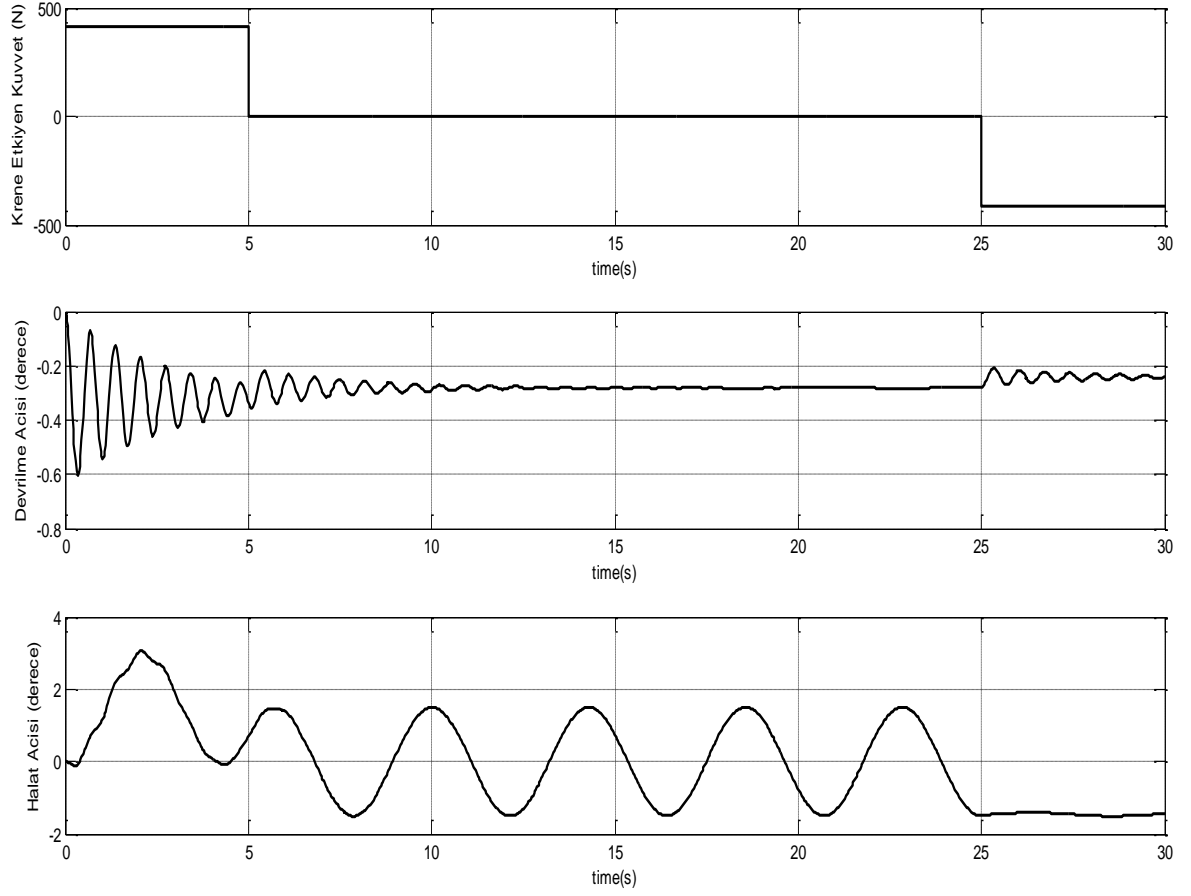
Burada model aşağıdaki parametre değerleri ve (F) kuvveti etkisi altında incelenmiştir:

M: 1500	(kg)
m: 150	(kg)
L <sub>o</sub> : 5	(m)
H: 12	(m)
L: 20	(m)
e: 2	(m)
f: 10	(m)
a: 4	(m)
K <sub>p</sub> : 750000	(N/m)
K <sub>i</sub> : 150000	(N/m)
C <sub>p</sub> : 6000	(N.s/m)
C <sub>i</sub> : 2000	(N.s/m)
g: 9,81	(m/s <sup>2</sup> )



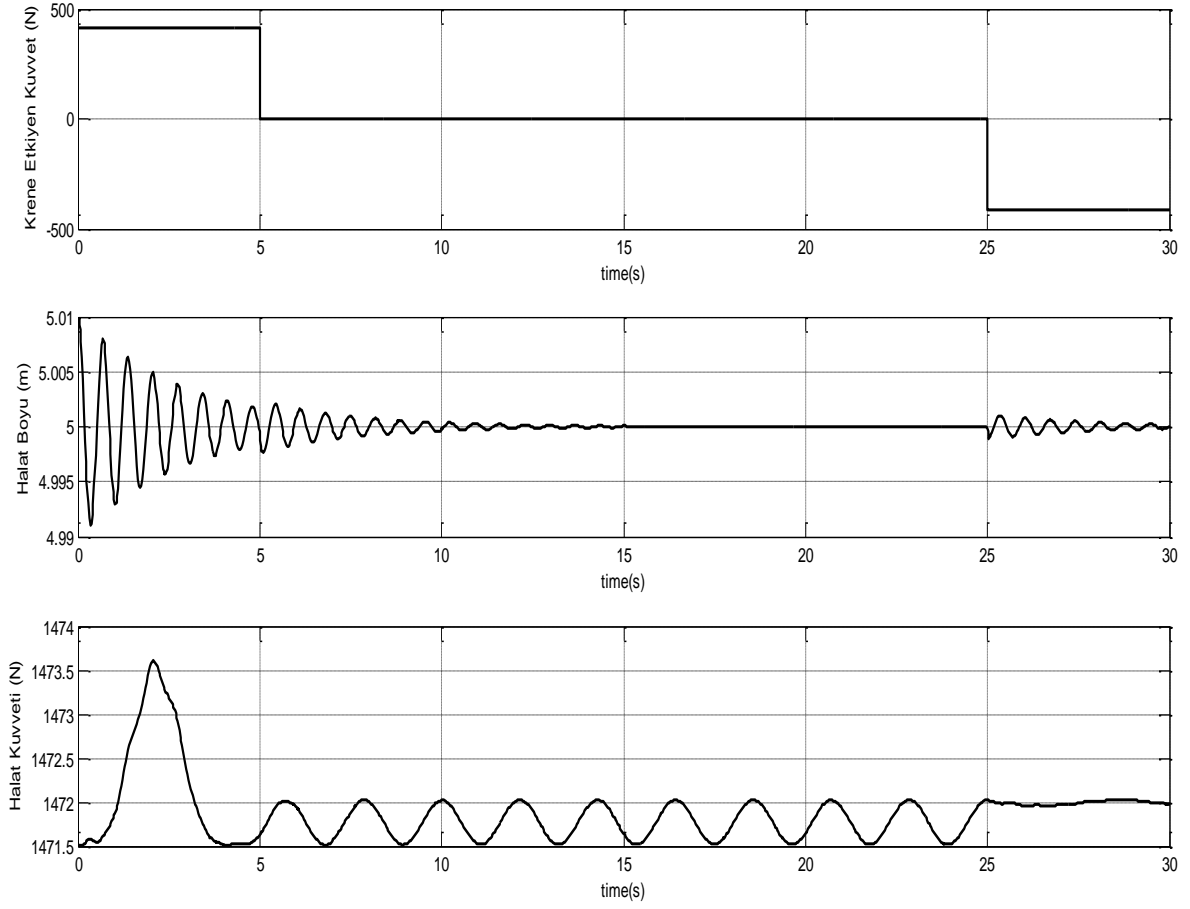
Şekil 6.3 Durum 1 parametreleri altında  $x$  değişkeninin karakteristikleri

Durum 1 verilerine göre krenin ( $F$ ) kuvveti etkisi altında  $x$  doğrultusundaki mesafesi, hızı ve ivme değerleri Şekil 6.3'te gözlemlenmiştir. Sisteme etkiyen kuvvet basamak fonksiyonu şeklinde olup, uygulanan bu kuvvet ile krenin yatay doğrultuda önce sabit ivme ile hızlanması, daha sonra sabit hızla hareket etmesi ve hareketin son kısmında da sabit ivme ile yavaşlayarak durması hedeflenmiştir. Dolayısıyla krenin aldığı yol ( $x$ ) artarak devam etmiş, son kısımda azalarak sabit eğriye yönelmiştir. Hız ve ivme değerleri ilk harekette yüksek genlikte başlamış, sonrasında daha kararlı hale gelmiştir. İlk hareketle beraber kren hızı küçük bir zaman aralığında negatif ( $-$ ) değere ulaştığından, krenin geriye doğru harekete maruz kalmaması için kuvvetin daha yüksek bir ivmelenme değeri ile uygulanması veya sistemdeki yüklerle bağlı salınımların giderilmesi gerektiği görülmektedir.



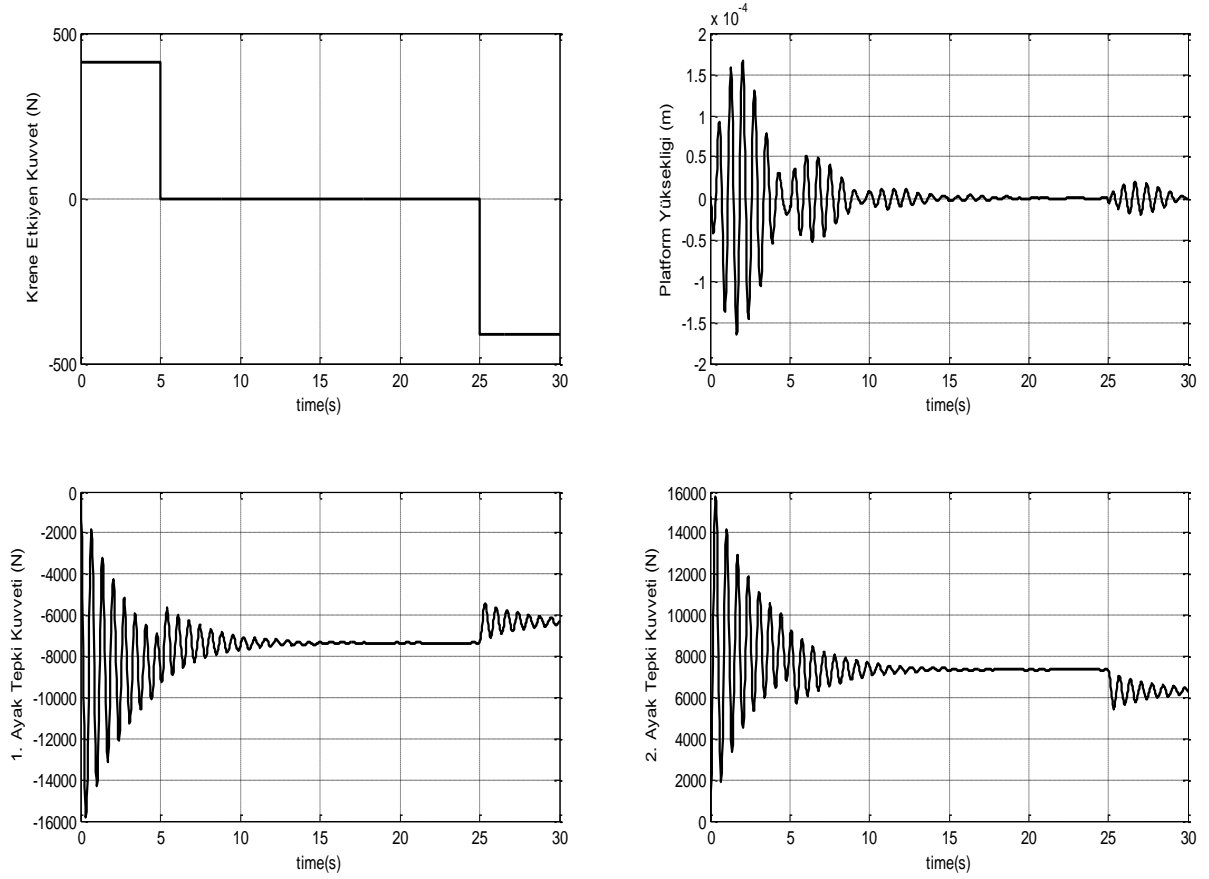
Şekil 6.4 Durum 1 parametreleri altında  $\theta_D$  ve  $\theta_L$  değişkenlerinin karakteristikleri

Durum 1 verilerine göre kren gövdesinin y eksenini ile yaptığı devrilme açısında ( $\theta_D$ ) ve yükün asılı olduğu halatın y eksenini ile yaptığı açıda ( $\theta_L$ ) meydana gelen değişimler Şekil 6.4'te gözlemlenmiştir. Devrilme açısı ( $\theta_D$ ); kuvvetin ilk uygulandığı anlarda genliği yüksek, 10-25 saniyeleri aralığında sabit ve sonrasında düşük salınımlarla devam etmiştir. Halat açısı ( $\theta_L$ ); ivmenin arttığı ilk periyotta pozitif değerler almış, sabit ivmeli hareketle beraber (5. – 25. saniyeler aralığında) yaklaşık +2 ve -2 derecelik aralıklarda salınım yapmış ve ivmenin azaldığı son periyotta negatif (-) sabit bir açı değerinde kalmıştır.



Şekil 6.5 Durum 1 parametreleri altında  $L_h$  değişkeninin karakteristikleri

Durum 1 verilerine göre değişken halat boyunda ( $L_h$ ) meydana gelen değişimler Şekil 6.5'te gözlemlenmiştir. Yay karakteristiği sergileyen esnek halat, ucunda asılı olan (m) yükünün ve (F) kuvvetinin etkisi ile belirli bir süre yüksek genliklerde salınım yapmış, sonrasında kuvvet etkisinin azalması ile ilk boy değeri olan  $L_0=5$  m'ye ulaşarak kararlı hale gelmiştir. Yük salınımlarından kaynaklanan halat kuvvetinin değeri artan ivme ile yükselmiş, sonrasında genliği azalarak sabit periyotlarda ( $m \times g$ ) değerinde salınım yapmaya devam etmiştir.



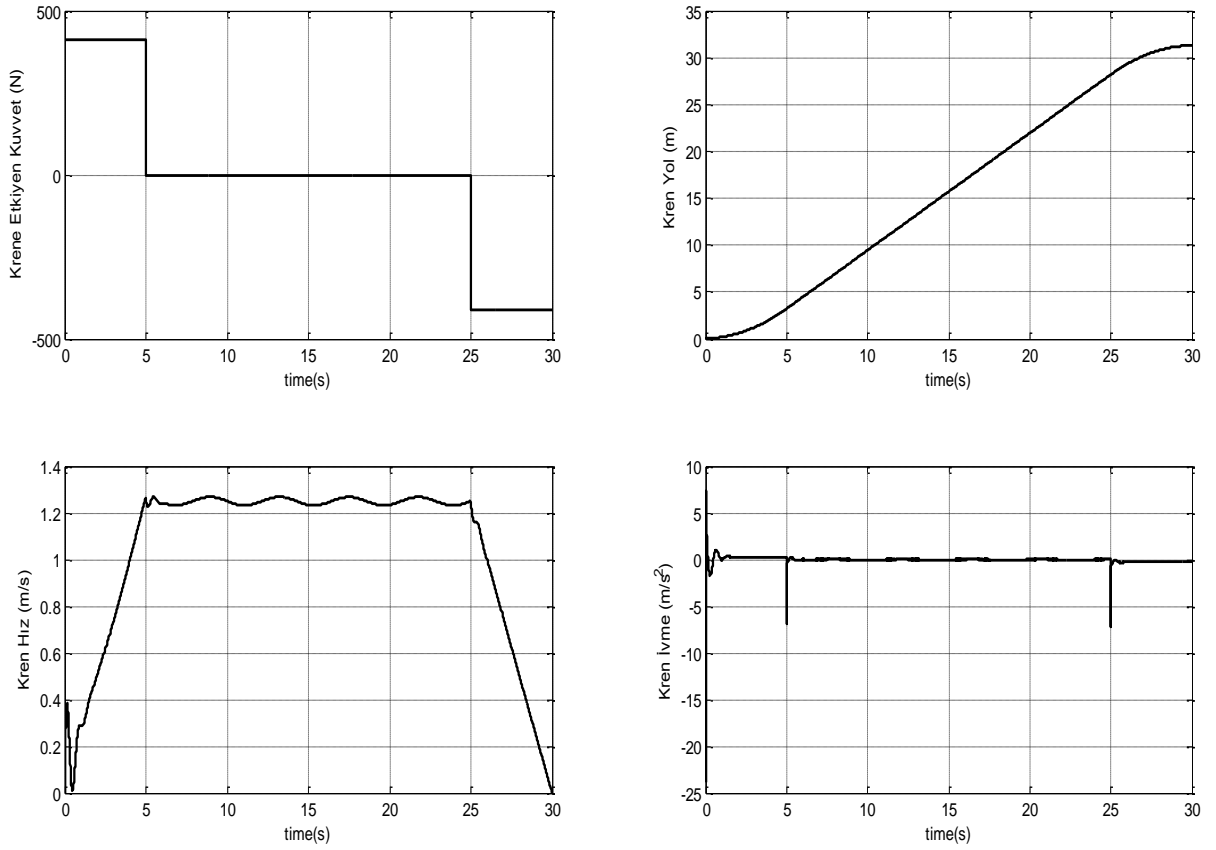
Şekil 6.6 Durum 1 parametreleri altında  $y_k$  değişkeninin karakteristikleri

Durum 1 verilerine göre kren tabanındaki hareketli platformun  $y$  eksenine doğrultusundaki mesafesinde ( $y_k$ ) meydana gelen değişimler Şekil 6.6'da gözlemlenmiştir. Buna göre platform yüksekliği ilk etapta pozitif-negatif değerlerde ve yüksek genlikli salınımlar gerçekleştirmiş, 10. Saniyeden itibaren azalan genliklerde ve 0'a çok yakın değerlerde devam etmiştir. Platformun bir ucu yay ve sönüm elemanın etkisiyle referans noktasından yukarıda ve pozitif (+) değerde, diğer ucu ise referans noktasının altında ve negatif (-) değerde olacaktır. Bu yükseklik değerleri  $K_p$  ile çarpıldığında platformdaki 1. ve 2. Ayak tepki kuvvet değerleri ortaya çıkmaktadır.

#### 6.4.2 2. Senaryo İçin Oluşturulan Grafikler ve Yorumlar

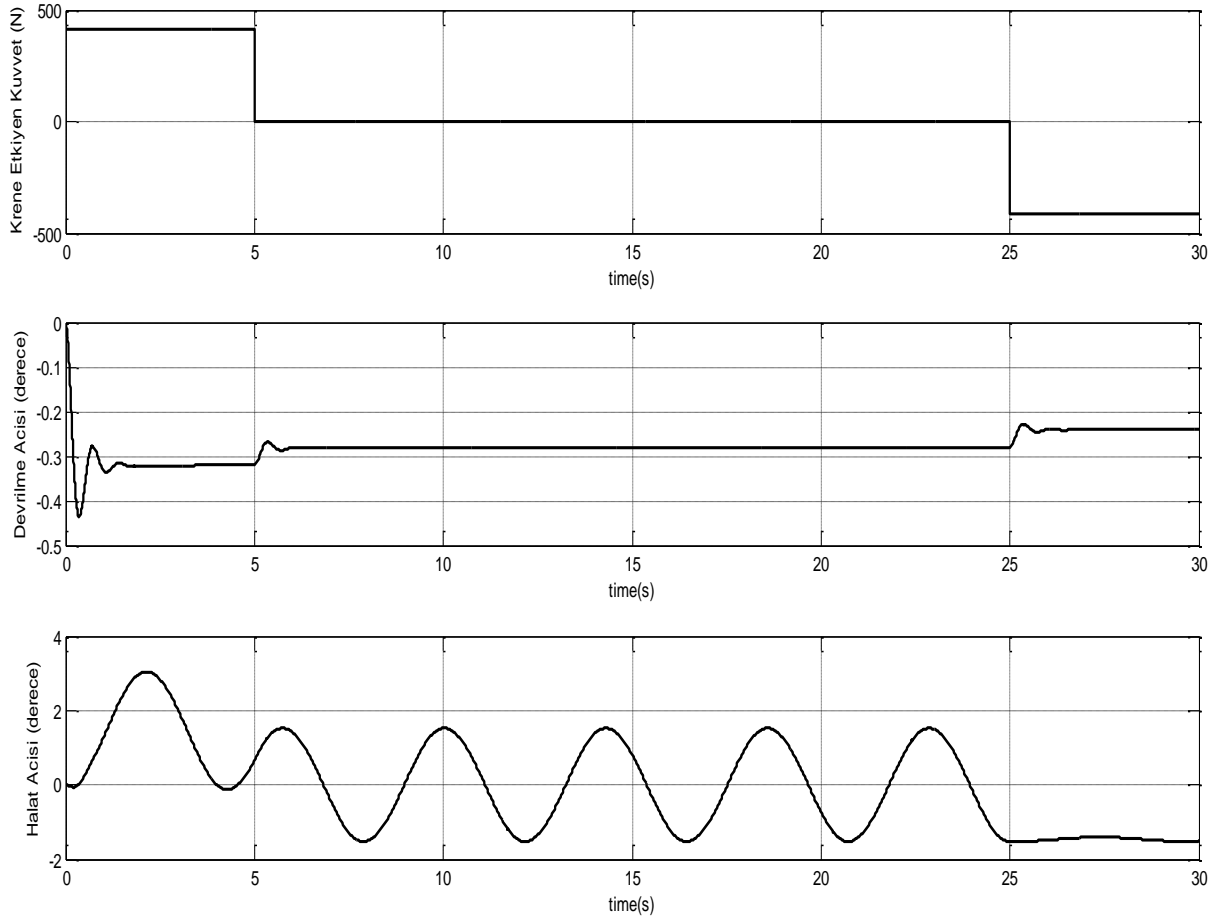
Burada model aşağıdaki parametre değerleri ve (F) kuvveti etkisi altında incelenmiştir:

M: 1500	(kg)
m: 150	(kg)
L <sub>0</sub> : 5	(m)
H: 12	(m)
L: 20	(m)
e: 2	(m)
f: 10	(m)
a: 4	(m)
K <sub>p</sub> : 750000	(N/m)
K <sub>i</sub> : 150000	(N/m)
C <sub>p</sub> : 50000	(N.s/m)
C <sub>i</sub> : 10000	(N.s/m)
g: 9,81	(m/s <sup>2</sup> )



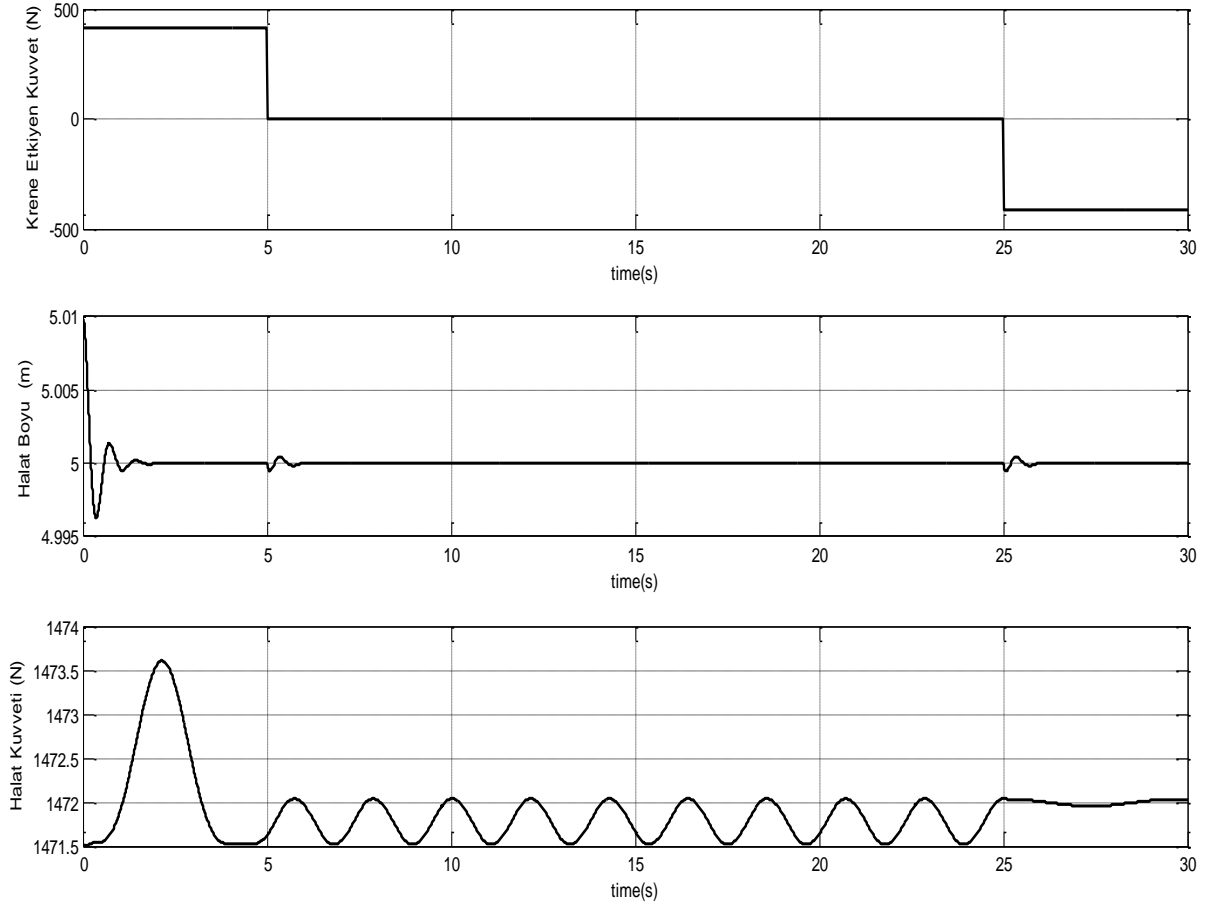
Şekil 6.7 Durum 2 parametreleri altında  $x$  değişkeninin karakteristikleri

Durum 2 verilerine göre krenin (F) kuvveti etkisi altında  $x$  doğrultusundaki mesafesi, hızı ve ivme değerleri Şekil 6.7'de gözlemlenmiştir. Sisteme etkiyen kuvvet basamak fonksiyonu şeklinde olup, uygulanan bu kuvvet ile krenin yatay doğrultuda önce sabit ivme ile hızlanması, sonrasında belirli bir süre sabit hızla hareket etmesi ve hareketin son kısmında da sabit ivme ile yavaşlayarak durması öngörülmüştür. Krenin aldığı yol ( $x$ ) Durum 1'dekine benzerdir. Hız ve ivme değerlerinin ilk hareketteki yüksek genlikleri, kren tabanındaki platformun sönüm katsayısının ( $C_p$ ) artırılması sonucu azalmış, krenin hareketi daha kararlı hale gelmiştir ve 1. Durum'da gözlenen ilk hareketle beraber geriye kayma durumu engellenmiştir. Krenin tüm yol boyunca 0'a çok yakın bir ivme değeri ile hareketine devam ettiği görülmektedir.



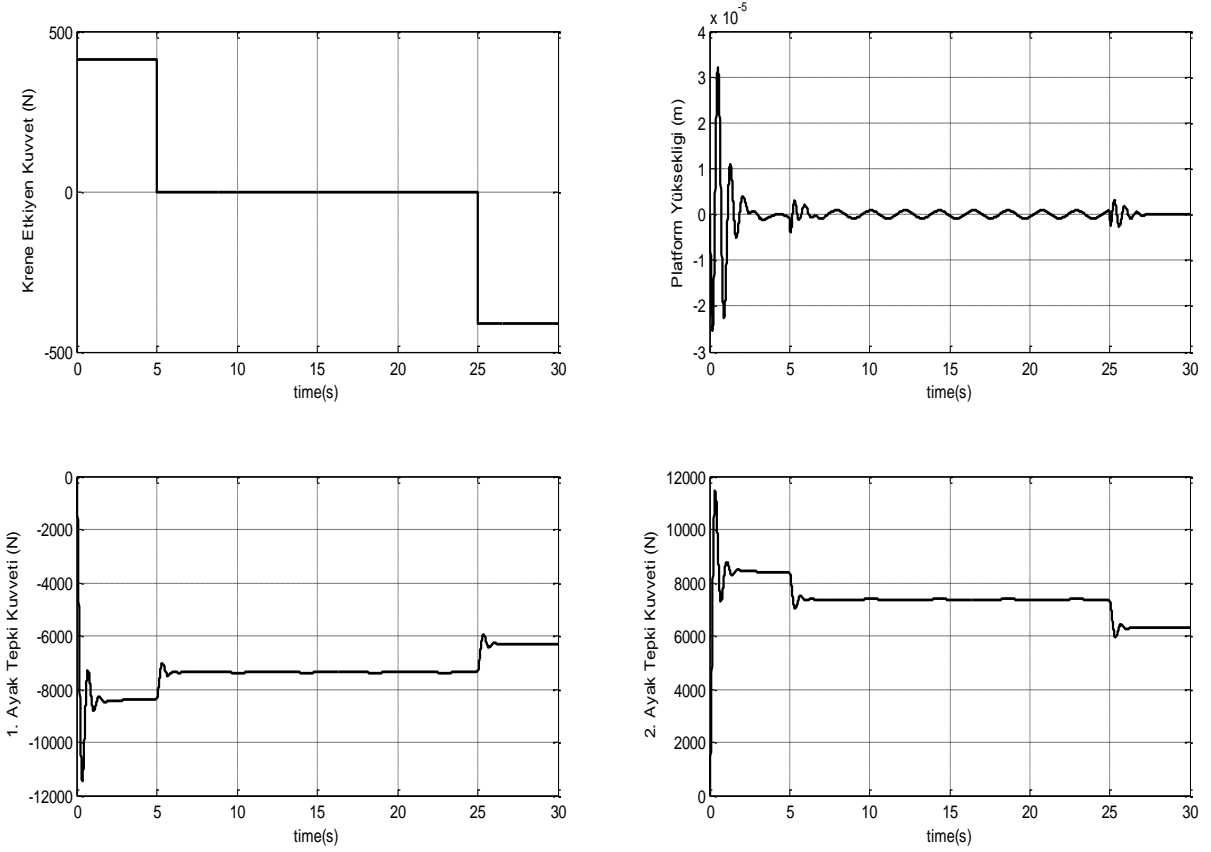
Şekil 6.8 Durum 2 parametreleri altında  $\theta_D$  ve  $\theta_L$  değişkenlerinin karakteristikleri

Durum 2 verilerine göre kren gövdesinin y eksenini ile yaptığı devrilme açısında ( $\theta_D$ ) ve yükün asılı olduğu halatın y eksenini ile yaptığı açıda ( $\theta_L$ ) meydana gelen değişimler Şekil 6.8’de gözlemlenmiştir. Devrilme açısı ( $\theta_D$ ); durum 1’den farklı olarak yüksek değerde seçilen platform sönüm katsayısı ( $C_p$ ) etkisi ile ilk hareketle beraber kararlı ve düzgün olarak ortalama -0,3 dereceye yakın bir açı değerinde seyretmiştir. Halat açısı ( $\theta_L$ ); Durum 1’dekine benzer bir salınım gerçekleştirmiştir.



Şekil 6.9 Durum 2 parametreleri altında  $L_h$  değişkeninin karakteristikleri

Durum 1 verilerine göre değişken halat boyunda ( $L_h$ ) meydana gelen değişimler Şekil 6.9'da gözlemlenmiştir. Yay karakteristiği sergileyen halat, ucunda asılı olan (m) yükünün ve (F) kuvvetinin etkisi ile çok kısa bir süre yüksek genlikte salınım yaptıktan sonra kuvvet etkisinin azalması ve yüksek halat sönüm katsayısı ( $C_l$ )'nin etkisi ile kararlı hale gelmiş ve halat ilk boyu olan  $L_0=5$  m değerine kısa sürede ulaşmıştır. Yük salınımlarından kaynaklanan halat kuvvet değeri Durum 1'deki gibi gözlenmiştir.



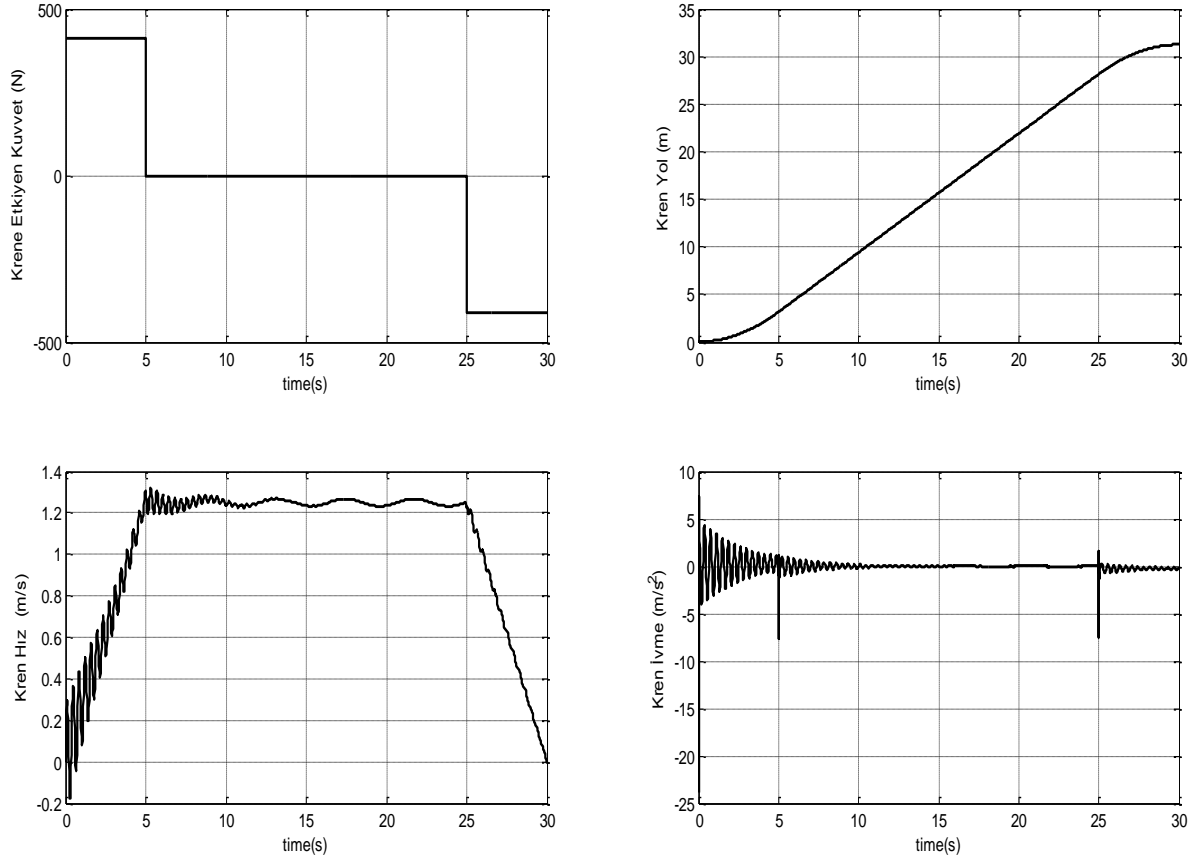
Şekil 6.10 Durum 2 parametreleri altında  $y_k$  değişkeninin karakteristikleri

Durum 2 verilerine göre kren tabanındaki hareketli platformun  $y$  eksenine doğrultusundaki mesafesinde ( $y_k$ ) meydana gelen değişimler Şekil 6.10'da gözlemlenmiştir. Buna göre platform yüksekliği ilk harekette çok kısa bir süre için pozitif-negatif değerlerde ve yüksek genlikli salınımlar gerçekleştirmiş, sonrasında yüksek seçilen platform sönüm katsayısı ( $C_p$ ) etkisi ile çok düşük genliklerde 0'a yakın değerlerde seyretmiştir. Platformun iki ucuna etkiyen ayak kuvvetleri de Durum 1'dekine göre daha kararlı ve düşük kuvvet değerlerinde meydana gelmişlerdir.

### 6.4.3 3. Senaryo İçin Oluşturulan Grafikler ve Yorumlar

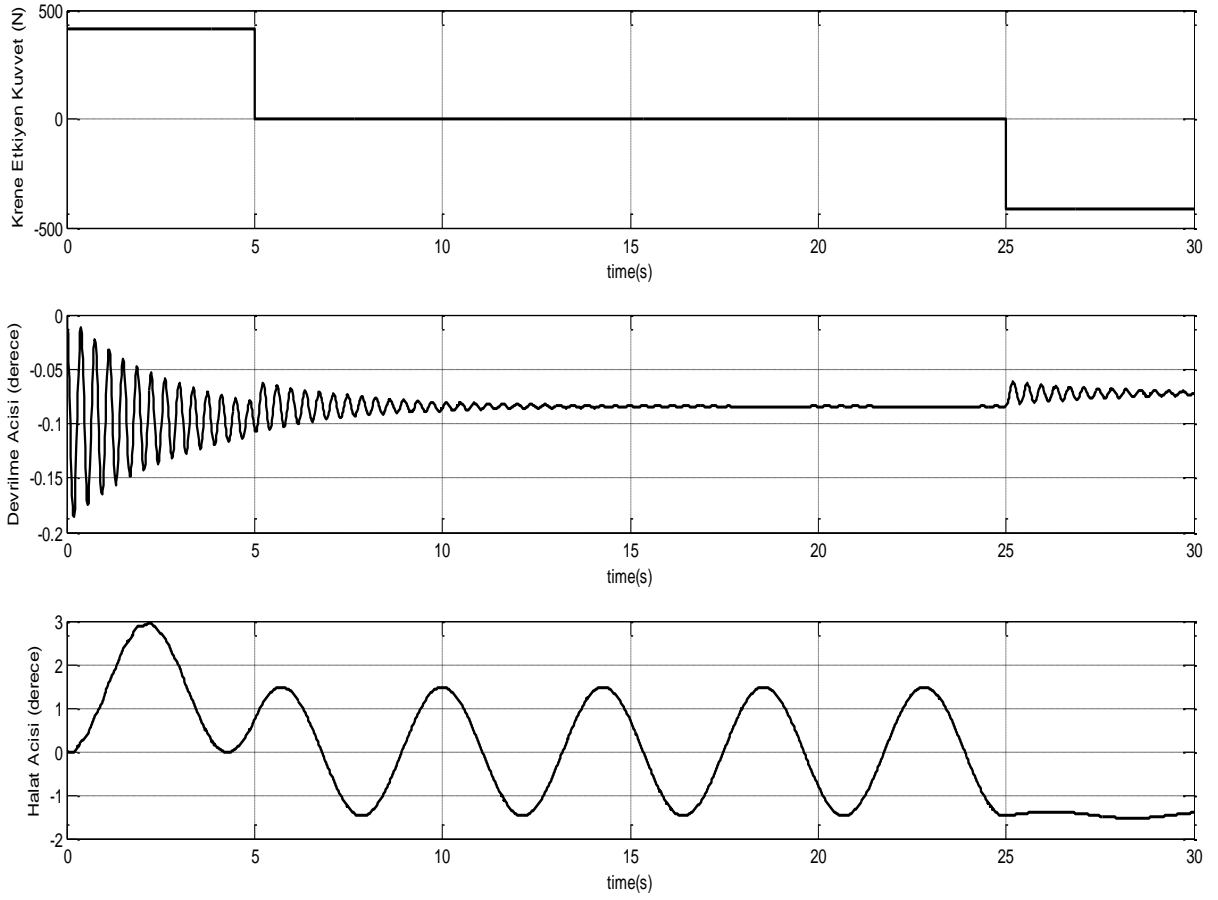
Burada model aşağıdaki parametre değerleri ve (F) kuvveti etkisi altında incelenmiştir:

M: 1500	(kg)
m: 150	(kg)
L <sub>0</sub> : 5	(m)
H: 12	(m)
L: 20	(m)
e: 2	(m)
f: 10	(m)
a: 4	(m)
K <sub>p</sub> : 2500000	(N/m)
K <sub>i</sub> : 500000	(N/m)
C <sub>p</sub> : 6000	(N.s/m)
C <sub>i</sub> : 2000	(N.s/m)
g: 9,81	(m/s <sup>2</sup> )



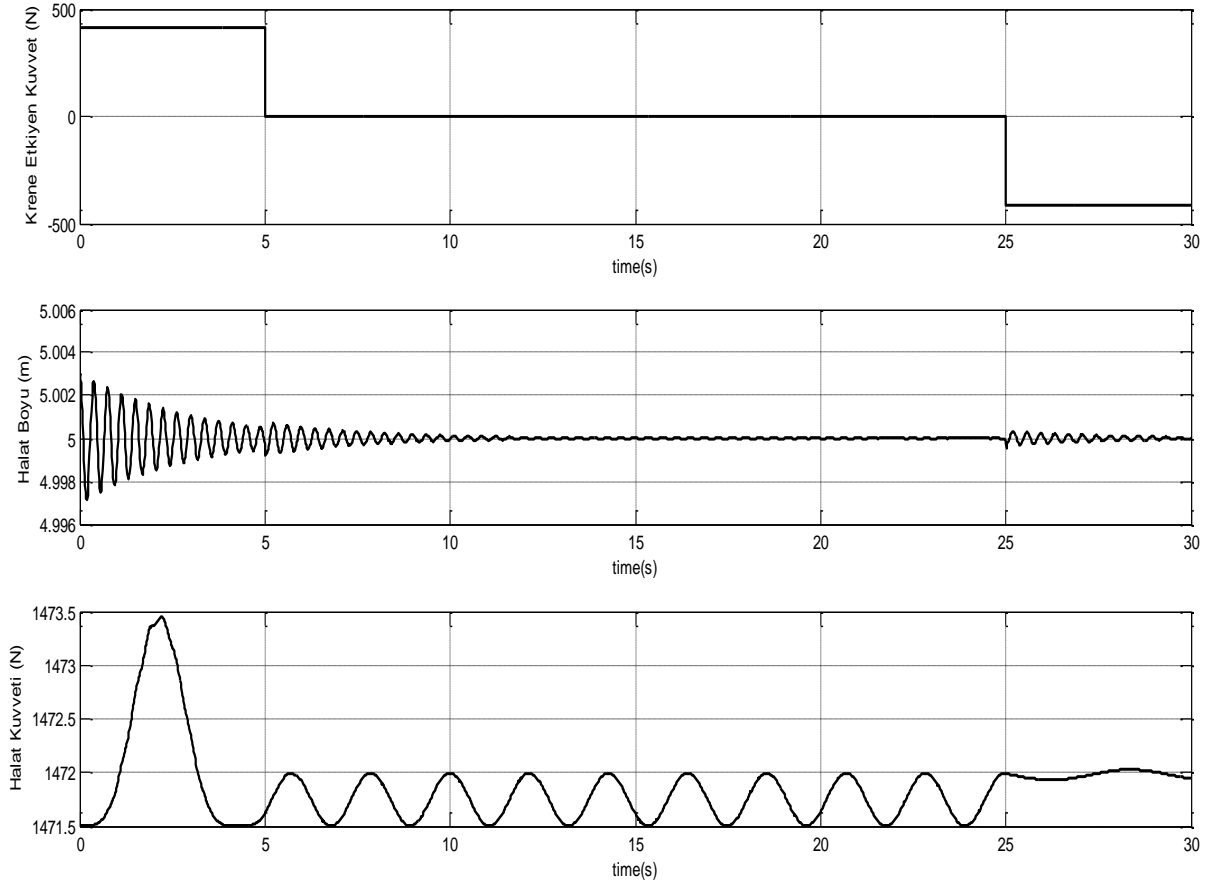
Şekil 6.11 Durum 3 parametreleri altında  $x$  değişkeninin karakteristikleri

Durum 3 verilerine göre krenin (F) kuvveti etkisi altında  $x$  doğrultusundaki mesafesi, hızı ve ivme değerleri Şekil 6.11’de gözlemlenmiştir. Sisteme etkiyen kuvvet basamak fonksiyonu şeklinde olup, uygulanan bu kuvvet ile krenin yatay doğrultuda önce sabit ivme ile hızlanması, sonra sabit hızla hareket etmesi ve hareketin son kısmında da sabit ivme ile yavaşlayarak durması hedeflenmiştir. Krenin aldığı yol ( $x$ ); Durum 1 ve Durum 2’dekine benzer şekilde devam etmiştir. Hız ve ivme değerleri de ilk iki durumla aynı karakterde gözlemlenmiştir, sadece daha yüksek seçilen platform yay katsayısı ( $K_p$ ) sayesinde salınım periyotları diğer durumlara göre oldukça sıklaşmıştır.



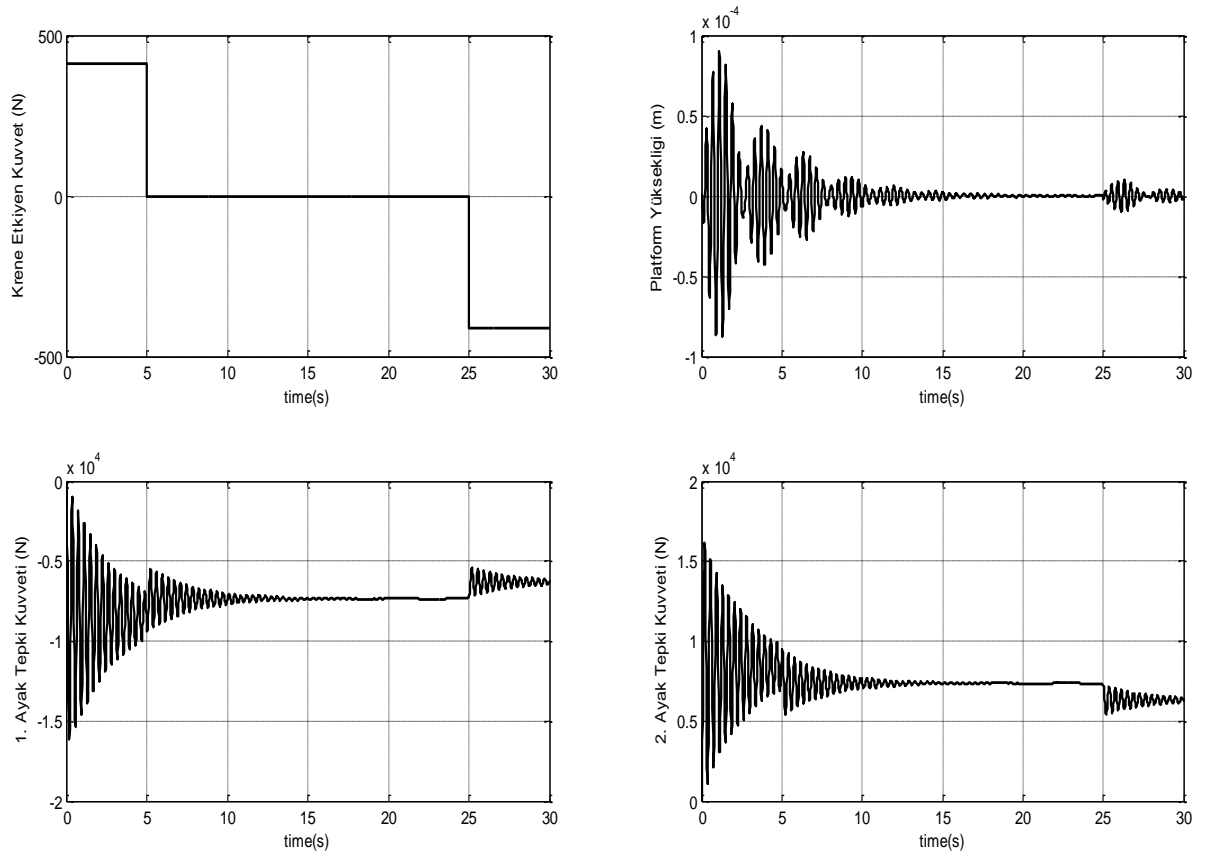
Şekil 6.12 Durum 3 parametreleri altında  $\theta_D$  ve  $\theta_L$  değişkenlerinin karakteristikleri

Durum 3 verilerine göre kren gövdesinin y eksenini ile yaptığı devrilme açısında ( $\theta_D$ ) ve yükün asılı olduğu halatın y eksenini ile yaptığı açıda ( $\theta_L$ ) meydana gelen değişimler Şekil 6.12’de gözlemlenmiştir. Devrilme açısı ( $\theta_D$ ); Durum 1’dekine benzer şekilde gözlemlenmiştir ancak yüksek seçilen platform yay katsayısı ( $K_p$ ) etkisi ile daha düşük periyot değerleri ile daha sık salınımlara sahiptir. Halat açısı Durum 1 ve Durum 2’dekine benzer şekilde gözlemlenmiştir.



Şekil 6.13 Durum 3 parametreleri altında  $L_h$  değişkeninin karakteristikleri

Durum 3 verilerine göre değişken halat boyunda ( $L_h$ ) meydana gelen değişimler Şekil 6.13'te gözlemlenmiştir. Halat boyu Durum 1 ve Durum 2'dekine benzer şekilde gözlemlenmiştir, sadece yüksek seçilen halat yay katsayısı ( $K_f$ ) etkisi ile daha sık ve düşük periyotlu salınımlara ve daha az boy değişimine sahiptir. Halat kuvvetinde meydana gelen değişim ise, Durum 1 ve Durum 2'dekine benzer şekilde meydana gelmiştir.



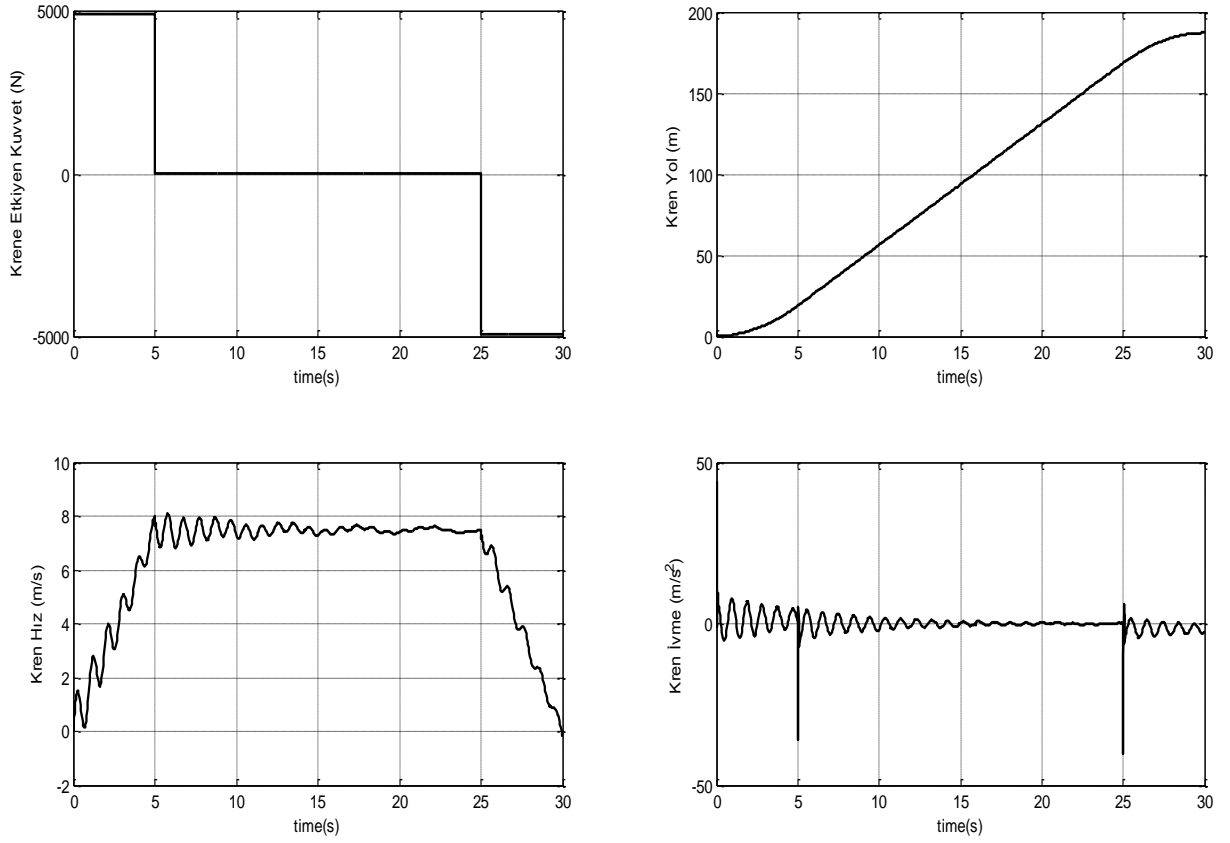
Şekil 6.14 Durum 3 parametreleri altında  $y_k$  değişkeninin karakteristikleri

Durum 3 verilerine göre kren tabanındaki hareketli platformun  $y$  eksenine doğrultusundaki mesafesinde ( $y_k$ ) meydana gelen değişimler Şekil 6.14'te gözlemlenmiştir. Buna göre platform yüksekliği ve platformun iki ucuna etkiyen kuvvetler Durum 1'dekine benzer davranışlar sergilemiştir ancak yüksek seçilen platform yay katsayısı ( $K_p$ ) etkisi ile salınımlar çok sık ve düşük periyotlarda meydana gelmiştir.

#### 6.4.4 4. Senaryo İçin Oluşturulan Grafikler ve Yorumlar

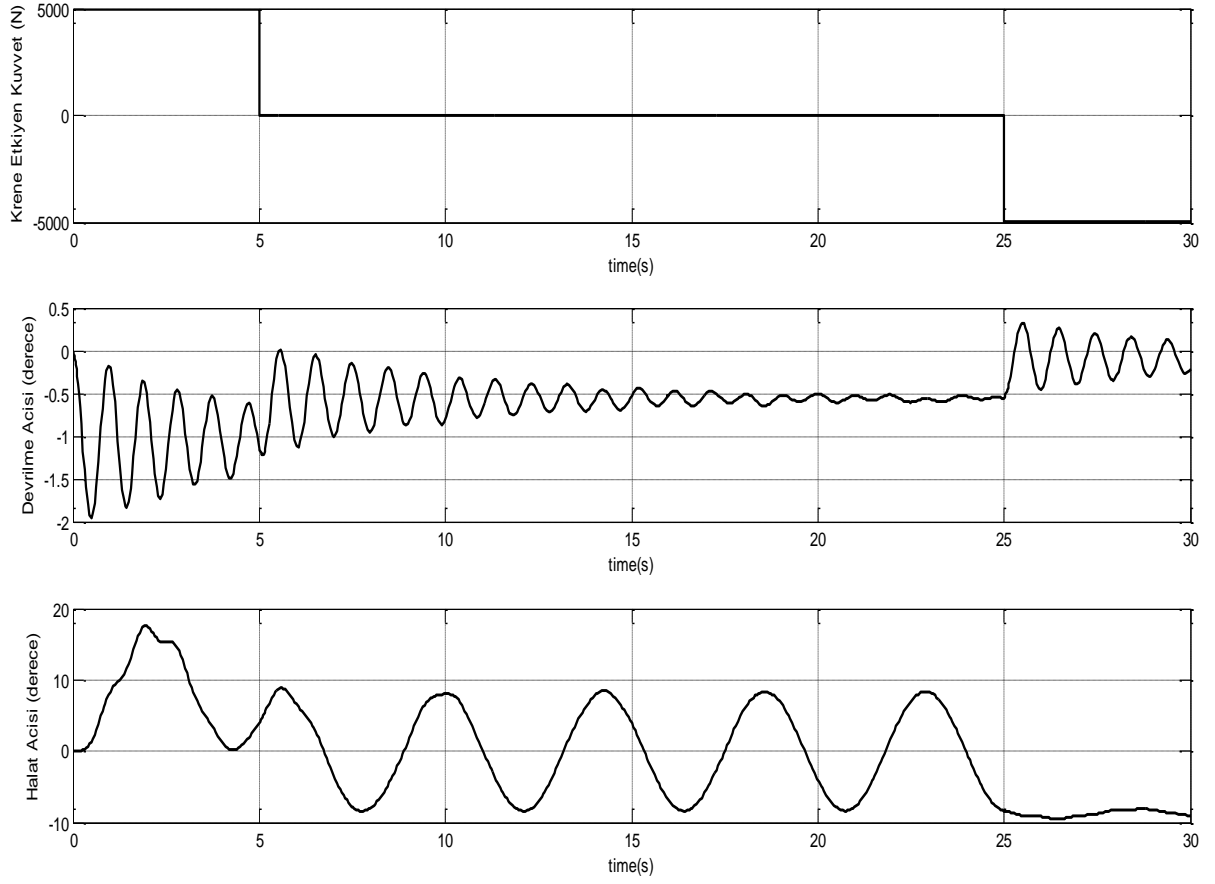
Burada model aşağıdaki parametre değerleri ve (F) kuvveti etkisi altında incelenmiştir:

M: 3000	(kg)
m: 300	(kg)
L <sub>0</sub> : 5	(m)
H: 12	(m)
L: 20	(m)
e: 2	(m)
f: 10	(m)
a: 4	(m)
K <sub>p</sub> : 2500000	(N/m)
K <sub>i</sub> : 500000	(N/m)
C <sub>p</sub> : 6000	(N.s/m)
C <sub>i</sub> : 2000	(N.s/m)
g: 9,81	(m/s <sup>2</sup> )



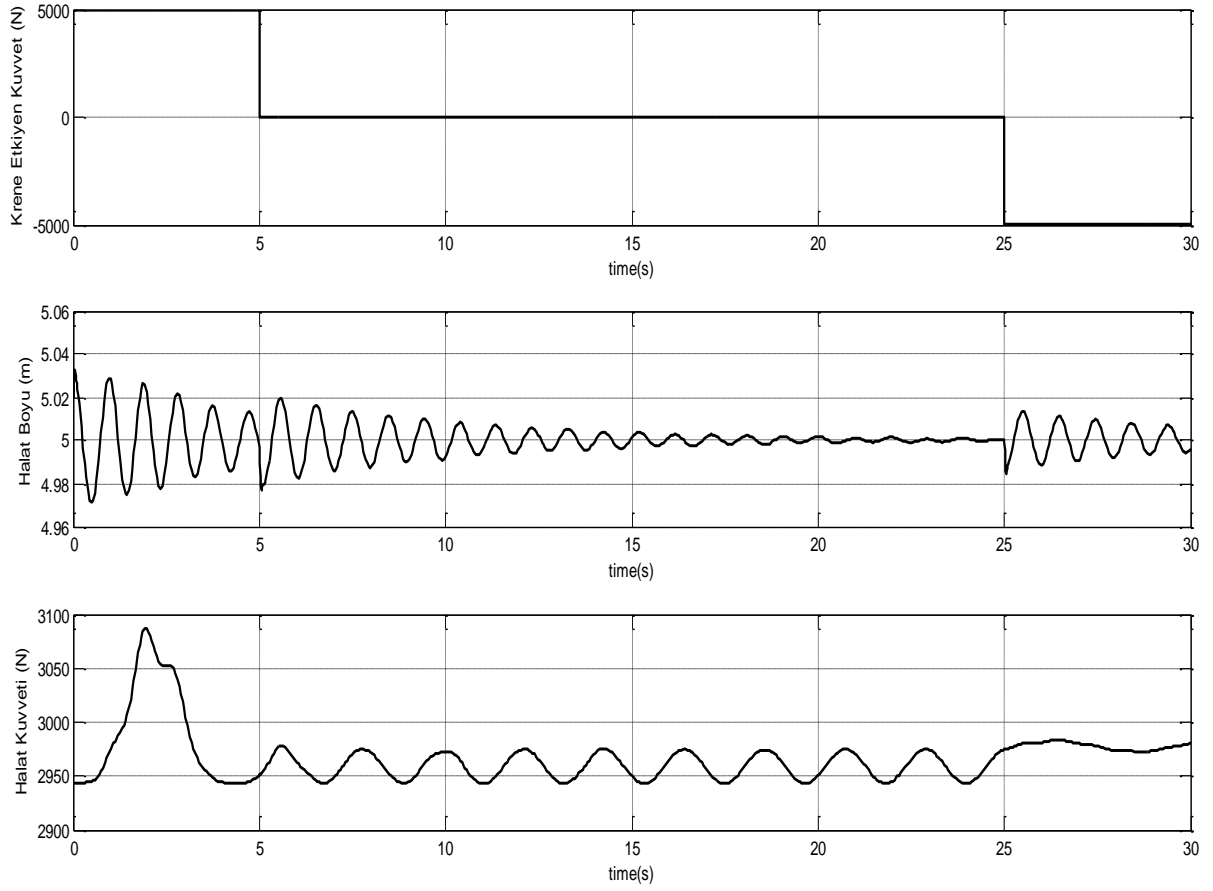
Şekil 6.15 Durum 4 parametreleri altında  $x$  değişkeninin karakteristikleri

Durum 4 verilerine göre krenin (F) kuvveti etkisi altında  $x$  doğrultusundaki mesafesi, hızı ve ivme değerleri Şekil 6.15'te gözlemlenmiştir. Sisteme etkiyen kuvvet basamak fonksiyonu şeklinde olup (diğer durumlara göre kütle değerleri arttığından dolayı daha yüksek değerde) uygulanan bu kuvvet ile krenin yatay doğrultuda önce sabit ivme ile hızlanması, daha sonra sabit hızla hareket etmesi ve son bölümde de sabit ivme ile yavaşlayarak durması öngörülmüştür. Krenin aldığı yol ( $x$ ), hız ve ivme değerleri Durum 2'dekine benzer şekilde gözlemlenmiştir. Ancak halatın ucuna asılı yükün daha ağır olması, dolayısıyla sistemdeki dengeleyici ağırlık değerinin daha yüksek seçilmesi neticesinde krene etkiyen kuvvetin değeri büyümüş, meydana gelen salınım periyotları artmıştır.



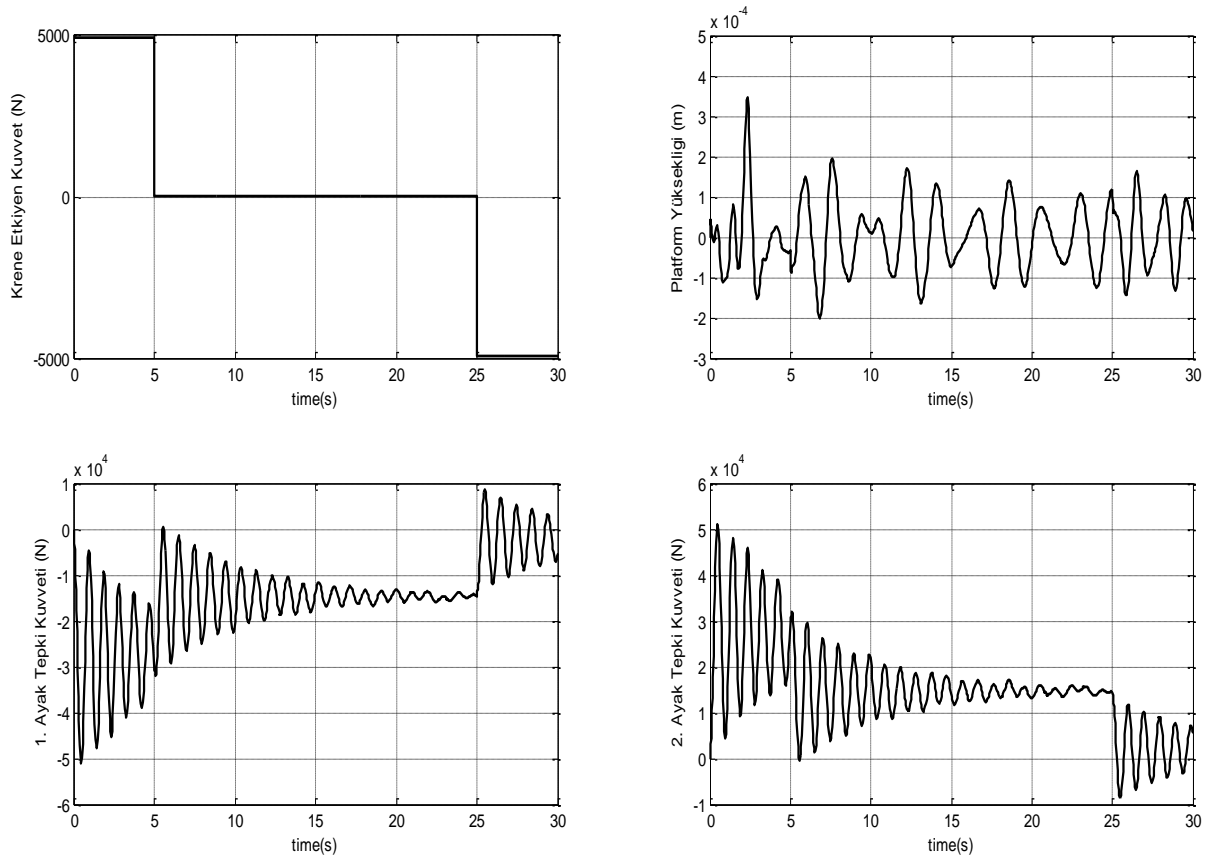
Şekil 6.16 Durum 4 parametreleri altında  $\theta_D$  ve  $\theta_L$  değişkenlerinin karakteristikleri

Durum 4 verilerine göre kren gövdesinin y eksenine yaptığı devrilme açısında ( $\theta_D$ ) ve yükün asılı olduğu halatın y eksenine yaptığı açıda ( $\theta_L$ ) meydana gelen değişimler Şekil 6.16'da gözlemlenmiştir. Devrilme açısı ( $\theta_D$ ) ve halat açısı ( $\theta_L$ ) karakteristikleri diğer durumlar gibidir ancak yükte meydana gelen artışlar salınım periyotlarını arttırmıştır. Halatın ucuna bağlı yükte meydana gelen artış neticesinde halat açısı 20 dereceye yakın değişimler göstermiştir.



Şekil 6.17 Durum 4 parametreleri altında  $L_n$  değişkeninin karakteristikleri

Durum 4 verilerine göre değişken halat boyunda ( $L_n$ ) meydana gelen değişimler Şekil 6.17’de gözlemlenmiştir. Yay karakteristiği sergileyen halat, ucunda asılı olan daha ağır (m) yükünün ve daha yüksek (F) kuvvetinin etkisi ile belirli bir süre yüksek genliklerde salınım yapmış, sonrasında kuvvet etkisinin azalması ile kararlı hale gelmiştir. Yük salınımlarından kaynaklanan kuvvet değeri, diğer durumlara kıyasla (m) kütlesinin değeri arttığından 3000 N’a yakın değerlerde salınım yapmaya devam etmiştir. Benzer şekilde halat boyunda da ilk boya göre 0,3 m’ye yakın değişimler dikkat çekmektedir.



Şekil 6.18 Durum 4 parametreleri altında  $y_k$  değişkeninin karakteristikleri

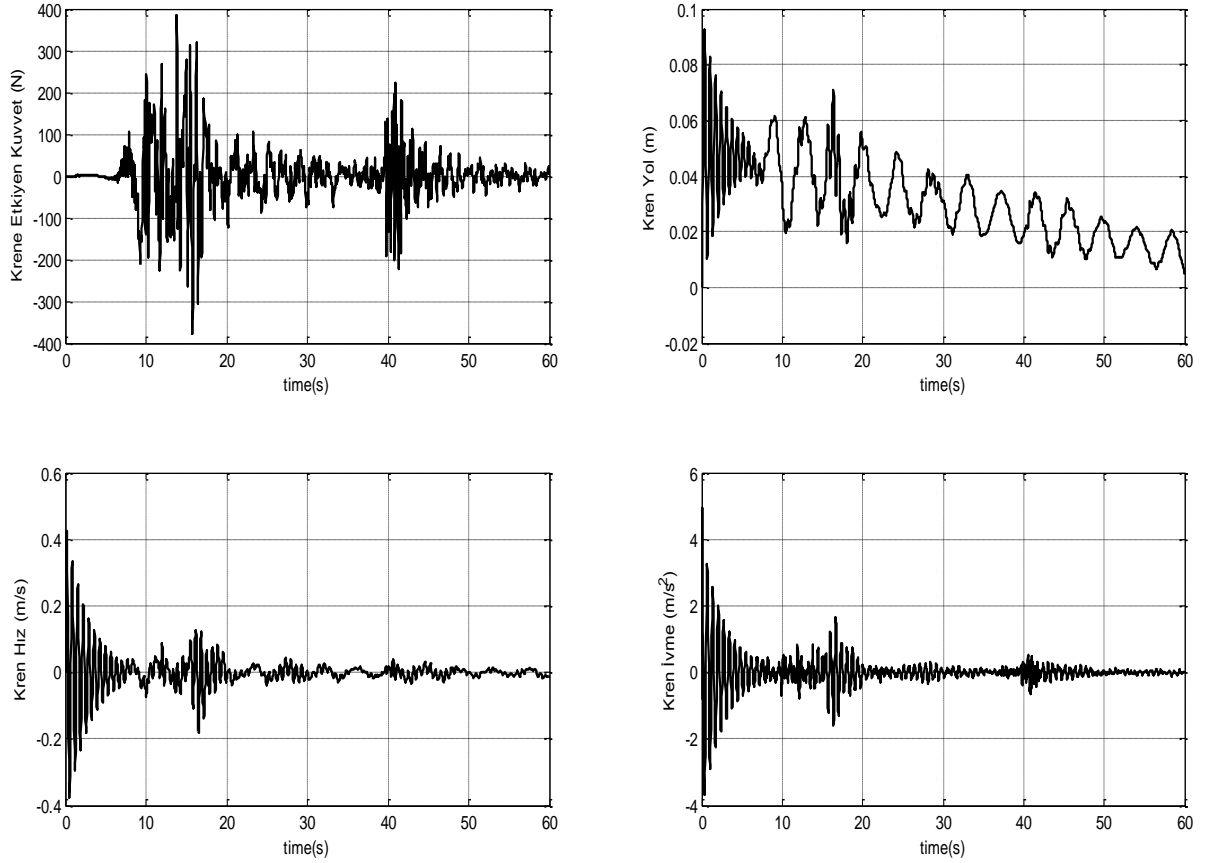
Durum 4 verilerine göre kren tabanındaki hareketli platformun  $y$  eksenine doğrultusundaki mesafesinde ( $y_k$ ) meydana gelen değişimler Şekil 6.18’de gözlemlenmiştir. Buna göre platform yüksekliği, krene etkiyen büyük kuvvetlerin etkisi sonucu tüm hareket boyunca pozitif-negatif değerlerde, yüksek genlikte salınımlar gerçekleştirmiştir. Platformun iki ucuna etkiyen kuvvetler de ağırlıklarda meydana gelen artışların etkisiyle yüksek genliklerde gerçekleşmiş, grafik değerlerinde pozitif (+) değerlerden negatif (-) değerlere veya tam tersine geçişler söz konusu olduğundan ve sistem kararsız hale gelmiştir. Dolayısıyla bu senaryoda kren tekerleklerinin yer ile teması kesilmekte ve tehlikeli bir durum söz konusu olmaktadır.

#### 6.4.5 5. Senaryo İçin Oluşturulan Grafikler ve Yorumlar

Burada model aşağıdaki parametre değerleri ve (F) kuvveti etkisi altında incelenmiştir:

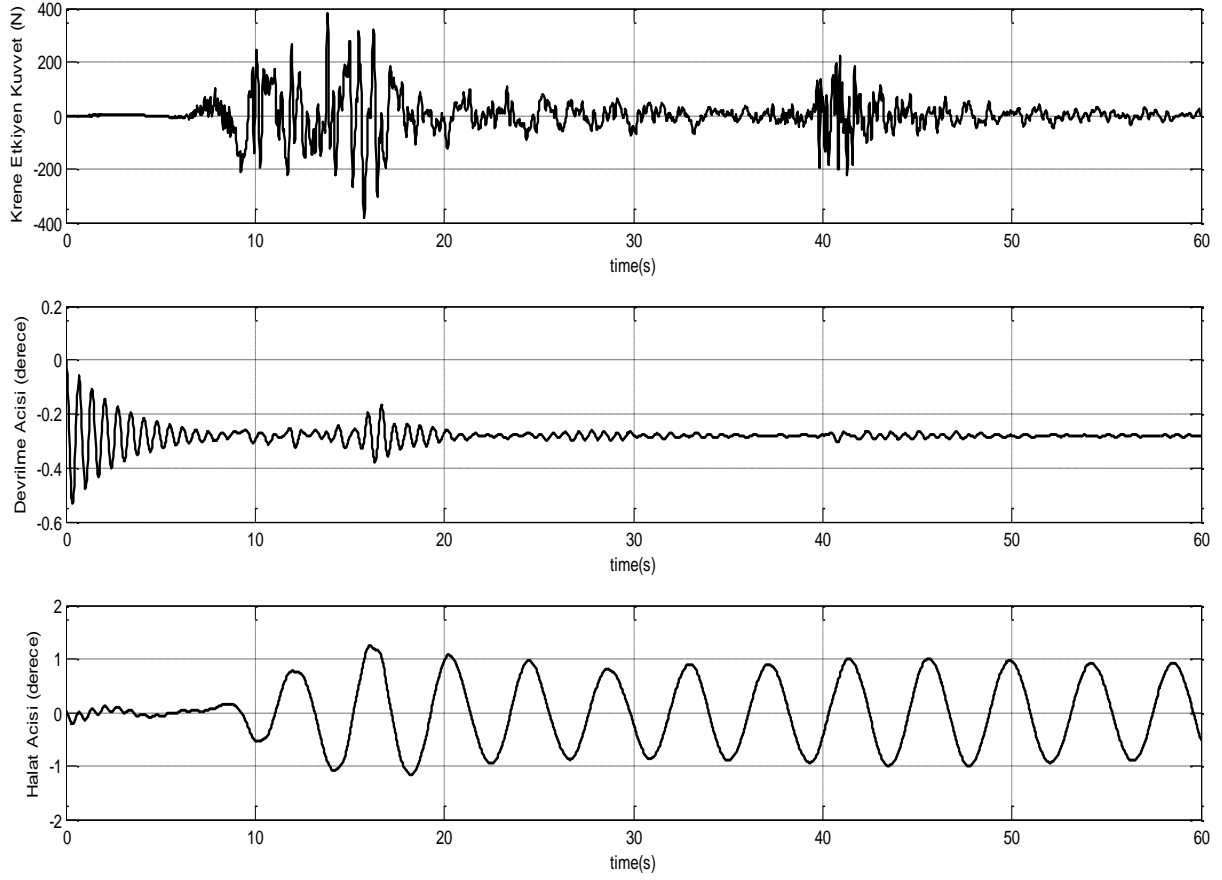
M: 1500	(kg)
m: 150	(kg)
L <sub>o</sub> : 5	(m)
H: 12	(m)
L: 20	(m)
e: 2	(m)
f: 10	(m)
a: 4	(m)
K <sub>p</sub> : 750000	(N/m)
K <sub>i</sub> : 150000	(N/m)
C <sub>p</sub> : 6000	(N.s/m)
C <sub>i</sub> : 2000	(N.s/m)
g: 9,81	(m/s <sup>2</sup> )

Bu senaryodaki (F) kuvveti; 1999 yılında gerçekleşen Marmara Depremi esnasında meydana gelen titreşim büyüklüklerinin, sisteme ivme girişi olarak etki ettirilmesi sonucu ortaya çıkan değerlerde incelenmiştir. Böylece krende örnek bir deprem esnasında meydana gelen çeşitli dinamik davranışların gözlemlenmesi şansı doğmuştur.



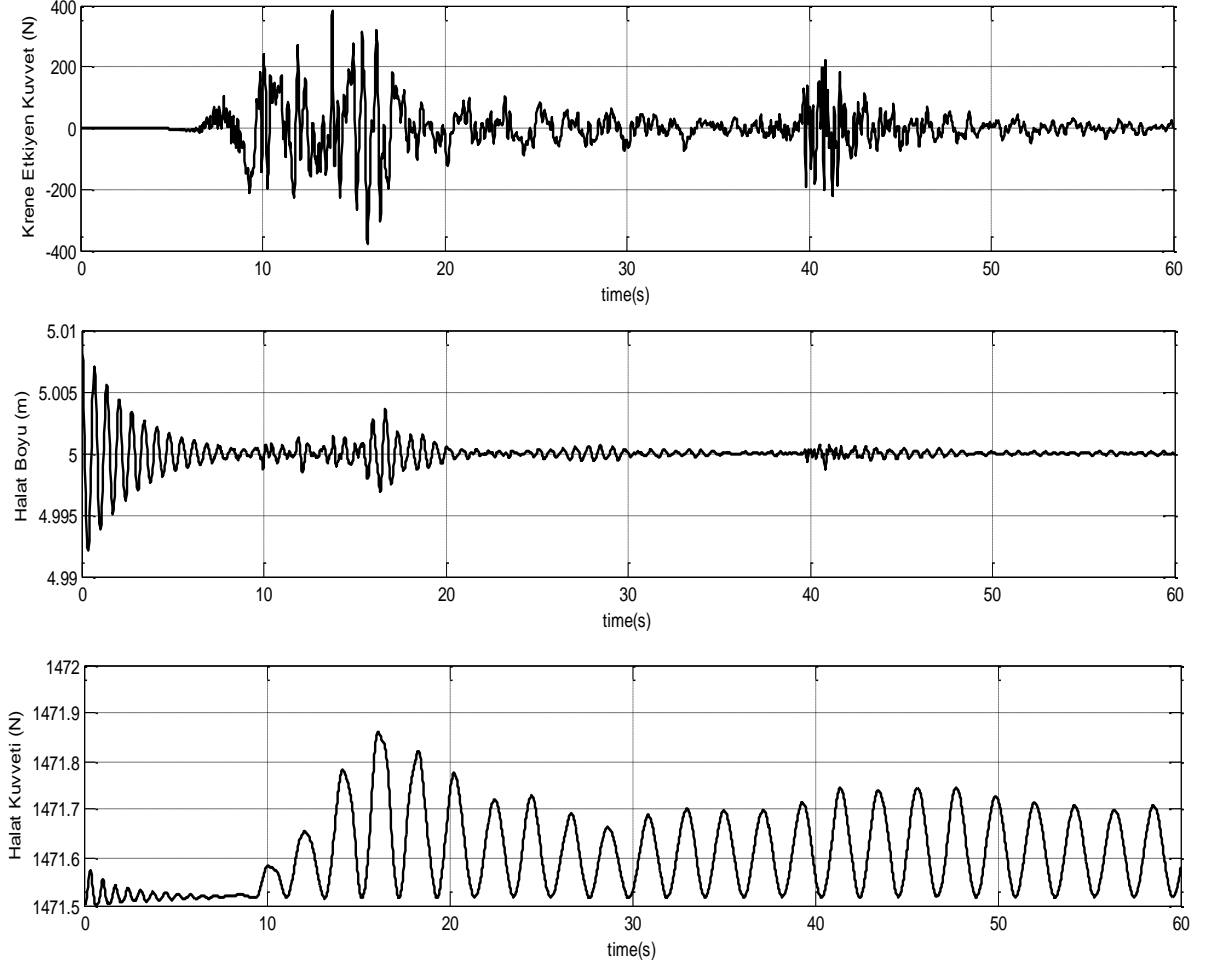
Şekil 6.19 Durum 5 parametreleri altında  $x$  değişkeninin karakteristikleri

Durum 5 verilerine göre krenin (F) kuvveti etkisi altında  $x$  doğrultusundaki mesafesi, hızı ve ivme değerleri Şekil 6.19’da gözlemlenmiştir. Sisteme etkileyen kuvvet (F) ifadesi için, Marmara Depremine ait giriş sinyalleri ivme değeri olarak kabul edilmiş; bu değer sistemin toplam kütlesi ile çarpılarak kuvvet değeri elde edilmiştir. Kuvvetin yüksek değerlere ulaştığı noktalarda krende meydana gelen yer değiştirmeler artmış, depremin bittiği anda ise toplamda başlangıç konumuna yakın çok az bir yer değiştirme meydana gelmiştir. Deprem boyunca krene ait hız ve ivme değişimleri de, deprem giriş sinyali büyüklüğüne bağlı olarak yukarıdaki gibi gözlemlenmiştir.



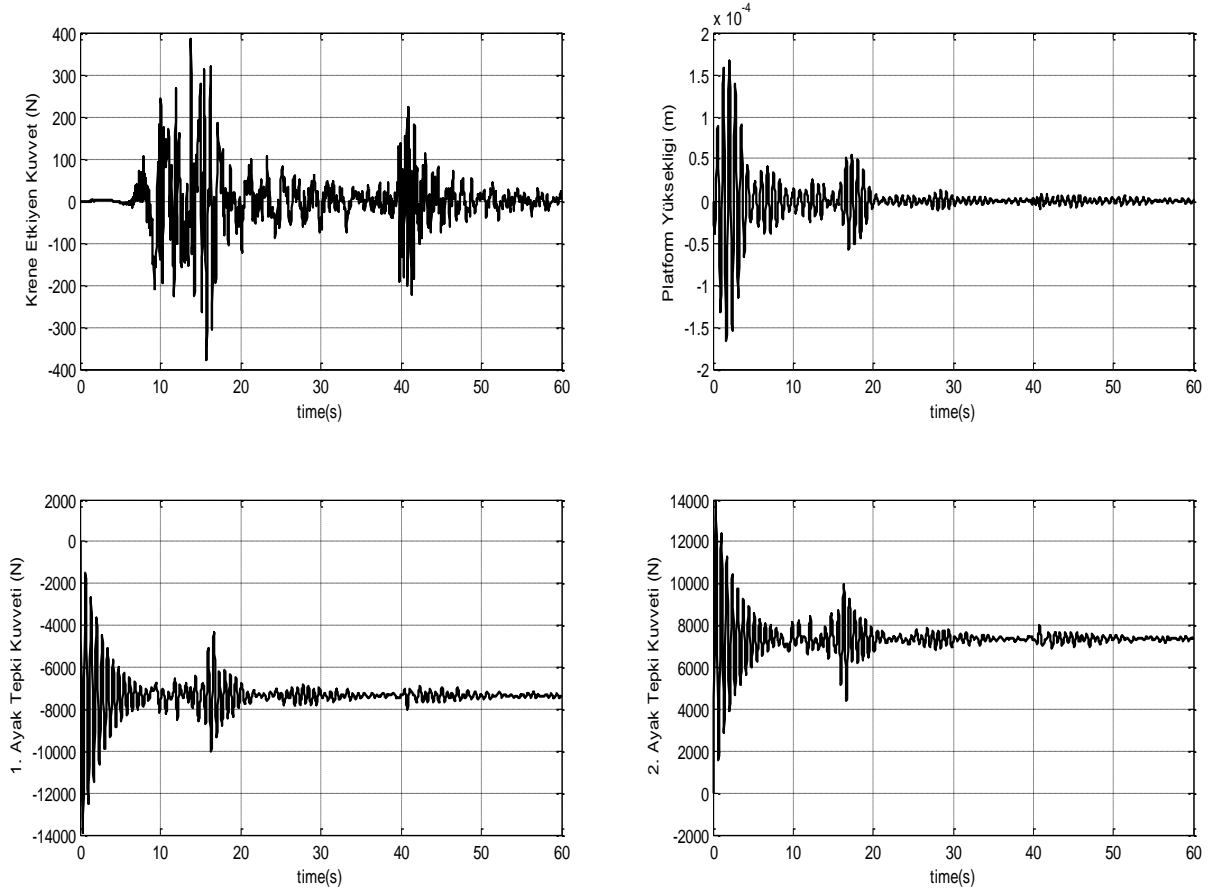
Şekil 6.20 Durum 5 parametreleri altında  $\theta_D$  ve  $\theta_L$  değişkenlerinin karakteristikleri

Durum 5 verilerine göre kren gövdesinin y eksenini ile yaptığı devrilme açısında ( $\theta_D$ ) ve yükün asılı olduğu halatın y eksenini ile yaptığı açıda ( $\theta_L$ ) meydana gelen değişimler Şekil 6.20’de gözlemlenmiştir. Devrilme açısı ( $\theta_D$ ) ve halat açısı ( $\theta_L$ ) karakteristikleri diğer durumlarla benzerdir, deprem sinyali etkisine göre kren gövdesinin ve halatın çok küçük açı değerlerinde salınımlar yaptığı gözlemlenmektedir.



Şekil 6.21 Durum 5 parametreleri altında  $L_n$  değişkeninin karakteristikleri

Durum 5 verilerine göre değişken halat boyunda ( $L_n$ ) meydana gelen değişimler Şekil 6.21’de gözlemlenmiştir. Yay karakteristiği sergileyen halat, deprem sinyalinin arttığı anlarda daha fazla uzamaya maruz kalmış, sonrasında deprem etkisinin azalması ile daha kararlı hale gelmiştir. Yük salınımlarından kaynaklanan kuvvet değeri, depremin en şiddetli olduğu anlarda maksimum değerlere ulaşmış, depremin etkisi azaldıkça halata etkiyen kuvvetin de azaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 6.22 Durum 5 parametreleri altında  $y_k$  değişkeninin karakteristikleri

Durum 5 verilerine göre kren tabanındaki hareketli platformun  $y$  eksenini doğrultusundaki mesafesinde ( $y_k$ ) meydana gelen değişimler Şekil 6.22’de gözlemlenmiştir. Buna göre platform yüksekliği, depremin en etkili olduğu 20 saniye boyunca pozitif-negatif değerlerde ve yüksek genliklerde salınımlar gerçekleştirmiş, sonrasında daha stabil hale gelmiştir. Platformun iki ucuna etkiyen kuvvetler de deprem sinyallerinin etkisiyle yüksek genliklerde gerçekleşmiş ancak sistem kararsız hale geçmemiştir. Dolayısıyla meydana gelen bu depremin kren sistemini devirmek için yeterli olmadığı görülmektedir.

### SONUÇ ve ÖNERİLER

Şekil 6.2’de şematik görünümü verilen kren modelinin bilgisayar ortamında benzetim çalışması yapılmıştır. 5 serbestlik dereceli modelde  $(x'')$ ,  $(\theta_D'')$ ,  $(\theta_L'')$ ,  $(L_h'')$  ve  $(y_k'')$  ifadelerinin konum-hız-ivme değerleri, açısal değişimler, yer değiştirmeler ile kuvvetlerde meydana gelen değişiklikler, bazı parametrelere farklı değerler verilerek oluşturulan 5 farklı durum için bilgisayar ortamında açık çevrim olarak analiz edilmiştir.

Bu çalışmada incelenmiş olan kren modelinde, sistemin matematik modelinin oluşturularak farklı parametreler altında incelenip, bu farklı koşullar altında ne tür dinamik davranışlar sergilediğinin görülmesi amaçlanmıştır. Sistem üzerinde etkili yük salınımlarının sebep olduğu yatay kuvvetler ve krende bununla ilişkili diğer dinamik etkilerin elde edilmesi amacıyla, seçilen parametrelerin değiştirilmesi sonucunda sistem üzerinde oluşturdukları etkilerin nasıl bir çizgide seyrettiği gözlemlenmiştir.

Krenin aldığı yol olan  $x$  mesafesi, uygulanan kuvvetin büyüklüğüne göre değişkenlik göstermekle beraber genelde doğrusal artan bir grafik şeklinde gözlemlenmiştir. Hız ve ivme değişimleri de büyük oranda kuvvet karakteristiğine göre şekillenmiş, çeşitli parametrelerin değiştirilmesi sonucu büyüklüklerinde değişimler meydana gelmiştir.

Kren gövdesinin devrilme açısı  $\theta_D$ , krenin ilk hareketinde meydana gelen ivmelenme etkisi sonucu hareket boyunca aldığı en yüksek değerlere ulaşmış, sonrasında daha

düşük ve sabit açılarda devam ederek hareket sonunda denge konumuna yaklaştığı görülmüştür.

Yükün asılı olduğu halatın yaptığı açı olan  $\theta_L$ , hareket boyunca düzgün salınımlar gerçekleştirmiş, halatın ucuna asılı yük veya sisteme uygulanan kuvvet büyüklükleri arttığında daha büyük açı değerlerine ulaşmıştır.

Değişken halat boyu  $L_h$  için, rijit değil aksine bir yay karakteristiği sergilediği kabul edilmiştir. Seçilen halat uzama katsayısı ( $K_1$ ) parametresi yardımıyla halatın esnemesi belirli sınırlar içerisinde tutulabilmesine rağmen, yerçekimi ivmesi etkisinde sürekli bir uzama eğilimindedir. İlk hareketle beraber ivmelenme değerleri arttığından halatta meydana gelen uzamalar ve salınımlar sonucu halatta oluşan kuvvetler de artmış, sonrasında stabil hale gelmişlerdir.

Kren tabanındaki platform yüksekliği olan  $y_k$ , sisteme uygulanan kuvvet ve toplam ağırlıkların etkisinde, seçilen platform esneme katsayısı ( $K_p$ ) ve platform sönümlenme katsayısı ( $C_1$ ) parametreleri altında değişkenlik göstermiştir. Platformun iki ucundaki ayaklarda meydana gelen kuvvetlerden biri referans noktasının altındaki (-), diğeri referans noktası üzerindeki (+) değerlerde seyretmiştir. Aksi durumda krenin devrilmesi söz konusudur.

Krenin bilgisayar ortamında çalıştırılacak modeli oluşturulurken benimsenen modelleme tekniği ile durum değişkenlerinin kabulünün, benzetim çalışmaları esnasında elde edilen sonuçlar üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Sistem açık çevrim olarak incelenmiştir ancak sistemin birden çok bağımsız değişkene bağlı olması ve bazı durumlarda karasız hale geçmesi nedeniyle gelecekte yapılan çalışmalarda sisteme eklenecek kontrolör yardımıyla kapalı çevrim olarak modelleme yapılmasının daha faydalı olacağı kanaatindeyim. Bununla beraber düzlemsel olarak modellenen sistemde daha detaylı ve kesin davranış sonuçlarının tespiti için, sistem x-y-z koordinatlarında modellenmeli ve krendeki döndürme etkileri göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca modelin deneysel bir düzeneğinin oluşturulması suretiyle elde edilen verilerin günlük hayattaki kullanılabilirliği tartışılabilir.

## KAYNAKLAR

---

- [1] Demirsoy, M., (1995). Kaldırma Makinaları, 3.Baskı, D.E.Ü. Müh. Fak. Yayın No.113, İzmir.
- [2] Aslan, R., (2007). Transport Tekniği Problemleri, Yapım Tanıtım Yayıncılık, İstanbul.
- [3] İmrak, C.E., Kurt, S., Gerdemeli, İ., Erdil, A., ve Özer, D., (2007). Kaldırma ve İletme Makinaları, TMMOB Makine Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, İstanbul.
- [4] Boğoçlu, M.E., Sağırlı A. ve Azeloğlu O., Transport Tekniği, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- [5] Arıtan, T. ve Köktürk, U., (1973). Kaldırma ve Taşıma Makinaları 2, İnkılap ve Aka Basımevi, İstanbul.
- [6] Akkurt, M. ve Savcı, M., (1972). Makina Elemanları, Şirketi Mürettibiye Basımevi, İstanbul.
- [7] Dosdoğru, G., (2003). Kaldırma Makinaları, 2.Baskı, İTÜ Yayınları, İstanbul.
- [8] Tahralı, N., Kaya, F., Yüksek, İ., ve Güçlü, R., (2007). Makine Dinamiği, Yıldız Teknik Üniversitesi Basım Yayın Merkezi, İstanbul.
- [9] İmrak, C.E. ve Fetvacı, M.C., (2004). "Krenlerin (Vinçlerin) Periyodik Koruyucu Bakım Esasları", Mühendis ve Makine, 45:34-40.
- [10] Kaya, K., (2009). Krenlerde Duruş Hassasiyetinin Minimize Edilmesi İçin Uygun Tasarımların Gerçekleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [11] Uzundağ, M., (2009). Krenlerde Dinamik Davranışların Tasarım Üzerindeki Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [12] Erdil, A., (2007). Portal Krenlerin Tasarımı ve Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Gerilme Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [13] Karamolla, M., Kule Vinçlerin Matematik Modellemesi, Doktora Tezi, CBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- [14] Erdil, A.B., (2007). Portal Krenlerin Tasarımı ve Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Gerilme Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [15] Omar, H.M., and Nayfeh, A.H., (2002). "Gain Scheduling Feedback Control of Tower Cranes with Friction Compensation", *Journal of Vibration and Control*, 10:269-289.
- [16] Al Mousa, A. (2000). Control of Rotary Cranes Using Fuzzy Logic and Time-Delayed Position Feedback Control, Master of Science in Electrical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia.
- [17] Jerman, B., (2006). "An Enhanced Mathematical Model for Investigating The Dynamic Load of A Slewing Crane", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 220:421-433.
- [18] Jerman, B., Kramar, J., and Podrzaj, P., (2004). "An Investigation of Slewing Crane Dynamics During Slewing Motion Development Verification of A Mathematical Model", *International Journal of Mechanical Science*, 46:729-750.

---

**DENKLEMLERİN MATHEMATICA PROGRAMINDA YAZILIMI**

```

symbol[m];
symbol[M];
symbol[Lo];
symbol[H];
symbol[L];
symbol[e];
symbol[f];
symbol[a];
symbol[Kp];
symbol[Kl];
symbol[Cp];
symbol[Cl];
symbol[g];

```

```

x[t];
θD[t];
θL[t];
Lh[t];
yk[t];

```

$$\Delta l[t] = L_h[t] - L_0 - L_0 + L_h[t]$$

$$\vec{r}_L = \{x[t] + H * \text{Sin}[\theta_D[t]] + L * \text{Cos}[\theta_D[t]] - L_h[t] * \text{Sin}[\theta_L[t]], y_k[t] + H * \text{Cos}[\theta_D[t]] - L * \text{Sin}[\theta_D[t]] - L_h[t] * \text{Cos}[\theta_L[t]]\}$$

$$\{L\text{Cos}[\theta_D[t]] + H\text{Sin}[\theta_D[t]] + x[t] - \text{Sin}[\theta_L[t]]L_h[t], H\text{Cos}[\theta_D[t]] - L\text{Sin}[\theta_D[t]] - \text{Cos}[\theta_L[t]]L_h[t] + y_k[t]\}$$

$$\vec{r}_M = \{x[t] + f * \text{Sin}[\theta_D[t]] - e * \text{Cos}[\theta_D[t]], y_k[t] + f * \text{Cos}[\theta_D[t]] + e * \text{Sin}[\theta_D[t]]\}$$

$$\{-e\text{Cos}[\theta_D[t]] + f\text{Sin}[\theta_D[t]] + x[t], f\text{Cos}[\theta_D[t]] + e\text{Sin}[\theta_D[t]] + y_k[t]\}$$

$$\dot{r}_L = D[\vec{r}_L, t]$$

$$\{x'[t] - \text{Sin}[\theta_L[t]](L_h)'[t] + H\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] - L\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] - \text{Cos}[\theta_L[t]]L_h[t](\theta_L)'[t], -\text{Cos}[\theta_L[t]](L_h)'[t] + (y_k)'[t] - L\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] - H\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] + \text{Sin}[\theta_L[t]]L_h[t](\theta_L)'[t]\}$$

$$\dot{r}_M = D[\vec{r}_M, t]$$

$$\{x'[t] + f\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] + e\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t], (y_k)'[t] + e\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] - f\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t]\}$$

$$E_k = \frac{1}{2} * m * \dot{r}_L \cdot \dot{r}_L + \frac{1}{2} * M * \dot{r}_M \cdot \dot{r}_M$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} M ((x'[t] + f\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] + e\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t])^2 \\ & + ((y_k)'[t] + e\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] - f\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t])^2) \\ & + \frac{1}{2} m ((x'[t] - \text{Sin}[\theta_L[t]](L_h)'[t] + H\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] \\ & - L\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] - \text{Cos}[\theta_L[t]]L_h[t](\theta_L)'[t])^2 \\ & + (-\text{Cos}[\theta_L[t]](L_h)'[t] + (y_k)'[t] - L\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] \\ & - H\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] + \text{Sin}[\theta_L[t]]L_h[t](\theta_L)'[t])^2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_p = & m * g * L_h[t] * (1 - \text{Cos}[\theta_L[t]]) + M * g * (e * \text{Sin}[\theta_D[t]]) + (\text{Kp} * (y_k[t]^2)) \\ & + (\text{Kp} * (\frac{1}{4} * a^2 * (\text{Sin}[\theta_D[t]])^2)) + \frac{1}{2} * \text{Kl} * (\Delta l[t]^2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & egM\text{Sin}[\theta_D[t]] + \frac{1}{4} a^2 \text{Kp} \text{Sin}[\theta_D[t]]^2 + gm(1 - \text{Cos}[\theta_L[t]])L_h[t] \\ & + \frac{1}{2} \text{Kl} (-L_o + L_h[t])^2 + \text{Kp} y_k[t]^2 \end{aligned}$$

$$E_s = C_p * (D[y_k[t], t]^2) + C_p * \left(\frac{1}{4} * a^2 * (D[\sin[\theta_D[t]], t]^2)\right) + \frac{1}{2} * Cl * (D[\Delta l[t], t]^2)$$

$$\frac{1}{2} Cl(L_h)'[t]^2 + C_p(y_k)'[t]^2 + \frac{1}{4} a^2 C_p \cos[\theta_D[t]]^2 (\theta_D)'[t]^2$$

$$F_x = D[D[E_k, D[x[t], t]], t] - D[E_k, x[t]] + D[E_s, D[x[t], t]] + D[E_p, x[t]]$$

$$\begin{aligned} M(e \cos[\theta_D[t]] (\theta_D)'[t]^2 - f \sin[\theta_D[t]] (\theta_D)'[t]^2 + x''[t] + f \cos[\theta_D[t]] (\theta_D)''[t] \\ + e \sin[\theta_D[t]] (\theta_D)''[t] + m(-L \cos[\theta_D[t]] (\theta_D)'[t]^2 \\ - H \sin[\theta_D[t]] (\theta_D)'[t]^2 - 2 \cos[\theta_L[t]] (L_h)'[t] (\theta_L)'[t] \\ + \sin[\theta_L[t]] L_h[t] (\theta_L)'[t]^2 + x''[t] - \sin[\theta_L[t]] (L_h)''[t] \\ + H \cos[\theta_D[t]] (\theta_D)''[t] - L \sin[\theta_D[t]] (\theta_D)''[t] \\ - \cos[\theta_L[t]] L_h[t] (\theta_L)''[t]) \end{aligned}$$

$$F_{xSimplified} = F_x / \{ \sin[\theta_D[t]] \rightarrow \theta_D[t], \cos[\theta_D[t]] \rightarrow 1, \sin[\theta_L[t]] \rightarrow \theta_L[t], \cos[\theta_L[t]] \rightarrow 1 \}$$

$$\begin{aligned} M(e (\theta_D)'[t]^2 - f \theta_D[t] (\theta_D)'[t]^2 + x''[t] + f (\theta_D)''[t] + e \theta_D[t] (\theta_D)''[t] \\ + m(-L (\theta_D)'[t]^2 - H \theta_D[t] (\theta_D)'[t]^2 - 2 (L_h)'[t] (\theta_L)'[t] \\ + L_h[t] \theta_L[t] (\theta_L)'[t]^2 + x''[t] - \theta_L[t] (L_h)''[t] + H (\theta_D)''[t] \\ - L \theta_D[t] (\theta_D)''[t] - L_h[t] (\theta_L)''[t]) \end{aligned}$$

$$M_d = D[D[E_k, D[\theta_D[t], t]], t] - D[E_k, \theta_D[t]] + D[E_\square, D[\theta_D[t], t]] + D[E_p, \theta_D[t]]$$

$$\begin{aligned}
& egM\text{Cos}[\theta_D[t]] + \frac{1}{2}a^2Kp\text{Cos}[\theta_D[t]]\text{Sin}[\theta_D[t]] + \frac{1}{2}a^2Cp\text{Cos}[\theta_D[t]]^2(\theta_D)'[t] \\
& - \frac{1}{2}M(2(x'[t] + f\text{Cos}[\theta_D[t]])(\theta_D)'[t] \\
& + e\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t])(e\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] - f\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t]) \\
& + 2(-f\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] - e\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t])(y_k)'[t] \\
& + e\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] - f\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t]) \\
& - \frac{1}{2}m(2(-L\text{Cos}[\theta_D[t]])(\theta_D)'[t] - H\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t])(x'[t] \\
& - \text{Sin}[\theta_L[t]](L_h)'[t] + H\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] - L\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] \\
& - \text{Cos}[\theta_L[t]]L_h[t](\theta_L)'[t] + 2(-H\text{Cos}[\theta_D[t]])(\theta_D)'[t] \\
& + L\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t])(-\text{Cos}[\theta_L[t]](L_h)'[t] + (y_k)'[t] \\
& - L\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] - H\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] \\
& + \text{Sin}[\theta_L[t]]L_h[t](\theta_L)'[t]) + \frac{1}{2}M(2(x'[t] + f\text{Cos}[\theta_D[t]])(\theta_D)'[t] \\
& + e\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t])(e\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] - f\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t]) \\
& + 2(-f\text{Cos}[\theta_D[t]])(\theta_D)'[t] - e\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t])(y_k)'[t] \\
& + e\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] - f\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] + 2(f\text{Cos}[\theta_D[t]] \\
& + e\text{Sin}[\theta_D[t]])(e\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t]^2 - f\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t]^2 + x''[t] \\
& + f\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)''[t] + e\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)''[t] + 2(e\text{Cos}[\theta_D[t]] \\
& - f\text{Sin}[\theta_D[t]])(-f\text{Cos}[\theta_D[t]])(\theta_D)'[t]^2 - e\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t]^2 \\
& + (y_k)''[t] + e\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)''[t] - f\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)''[t]) \\
& + \frac{1}{2}m(2(-L\text{Cos}[\theta_D[t]])(\theta_D)'[t] - H\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t])(x'[t] \\
& - \text{Sin}[\theta_L[t]](L_h)'[t] + H\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] - L\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] \\
& - \text{Cos}[\theta_L[t]]L_h[t](\theta_L)'[t] + 2(-H\text{Cos}[\theta_D[t]])(\theta_D)'[t] \\
& + L\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t])(-\text{Cos}[\theta_L[t]](L_h)'[t] + (y_k)'[t] \\
& - L\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] - H\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] \\
& + \text{Sin}[\theta_L[t]]L_h[t](\theta_L)'[t] + 2(H\text{Cos}[\theta_D[t]] \\
& - L\text{Sin}[\theta_D[t]])(-L\text{Cos}[\theta_D[t]])(\theta_D)'[t]^2 - H\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t]^2 \\
& - 2\text{Cos}[\theta_L[t]](L_h)'[t](\theta_L)'[t] + \text{Sin}[\theta_L[t]]L_h[t](\theta_L)'[t]^2 + x''[t] \\
& - \text{Sin}[\theta_L[t]](L_h)''[t] + H\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)''[t] - L\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)''[t] \\
& - \text{Cos}[\theta_L[t]]L_h[t](\theta_L)''[t] + 2(-L\text{Cos}[\theta_D[t]] \\
& - H\text{Sin}[\theta_D[t]])(-H\text{Cos}[\theta_D[t]])(\theta_D)'[t]^2 + L\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t]^2 \\
& + 2\text{Sin}[\theta_L[t]](L_h)'[t](\theta_L)'[t] + \text{Cos}[\theta_L[t]]L_h[t](\theta_L)'[t]^2 \\
& - \text{Cos}[\theta_L[t]](L_h)''[t] + (y_k)''[t] - L\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)''[t] \\
& - H\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)''[t] + \text{Sin}[\theta_L[t]]L_h[t](\theta_L)''[t])
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_{d\text{Simplified}} &= M_d / \{ \text{Sin}[\theta_D[t]] \rightarrow \theta_D[t], \text{Cos}[\theta_D[t]] \rightarrow 1, \text{Sin}[\theta_L[t]] \\
&\rightarrow \theta_L[t], \text{Cos}[\theta_L[t]] \rightarrow 1 \}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& egM + \frac{1}{2}a^2 Kp\theta_D[t] + \frac{1}{2}a^2 Cp(\theta_D)'[t] - \frac{1}{2}M(2(x'[t] + f(\theta_D)'[t]) \\
& \quad + e\theta_D[t](\theta_D)'[t])(e(\theta_D)'[t] - f\theta_D[t](\theta_D)'[t]) + 2(-f(\theta_D)'[t] \\
& \quad - e\theta_D[t](\theta_D)'[t])(y_k'[t] + e(\theta_D)'[t] - f\theta_D[t](\theta_D)'[t])) \\
& \quad - \frac{1}{2}m(2(-L(\theta_D)'[t] - H\theta_D[t](\theta_D)'[t])(x'[t] - \theta_L[t](L_h)'[t] \\
& \quad + H(\theta_D)'[t] - L\theta_D[t](\theta_D)'[t] - L_h[t](\theta_L)'[t]) + 2(-H(\theta_D)'[t] \\
& \quad + L\theta_D[t](\theta_D)'[t])(-(L_h)'[t] + (y_k)'[t] - L(\theta_D)'[t] - H\theta_D[t](\theta_D)'[t] \\
& \quad + L_h[t]\theta_L[t](\theta_L)'[t])) + \frac{1}{2}M(2(x'[t] + f(\theta_D)'[t] \\
& \quad + e\theta_D[t](\theta_D)'[t])(e(\theta_D)'[t] - f\theta_D[t](\theta_D)'[t]) + 2(-f(\theta_D)'[t] \\
& \quad - e\theta_D[t](\theta_D)'[t])(y_k'[t] + e(\theta_D)'[t] - f\theta_D[t](\theta_D)'[t]) + 2(f \\
& \quad + e\theta_D[t])(e(\theta_D)'[t]^2 - f\theta_D[t](\theta_D)'[t]^2 + x''[t] + f(\theta_D)''[t] \\
& \quad + e\theta_D[t](\theta_D)''[t]) + 2(e - f\theta_D[t])(-f(\theta_D)'[t]^2 - e\theta_D[t](\theta_D)'[t]^2 \\
& \quad + (y_k)''[t] + e(\theta_D)''[t] - f\theta_D[t](\theta_D)''[t])) + \frac{1}{2}m(2(-L(\theta_D)'[t] \\
& \quad - H\theta_D[t](\theta_D)'[t])(x'[t] - \theta_L[t](L_h)'[t] + H(\theta_D)'[t] - L\theta_D[t](\theta_D)'[t] \\
& \quad - L_h[t](\theta_L)'[t]) + 2(-H(\theta_D)'[t] + L\theta_D[t](\theta_D)'[t])(-(L_h)'[t] \\
& \quad + (y_k)'[t] - L(\theta_D)'[t] - H\theta_D[t](\theta_D)'[t] + L_h[t]\theta_L[t](\theta_L)'[t]) + 2(H \\
& \quad - L\theta_D[t])(-L(\theta_D)'[t]^2 - H\theta_D[t](\theta_D)'[t]^2 - 2(L_h)'[t](\theta_L)'[t] \\
& \quad + L_h[t]\theta_L[t](\theta_L)'[t]^2 + x''[t] - \theta_L[t](L_h)''[t] + H(\theta_D)''[t] \\
& \quad - L\theta_D[t](\theta_D)''[t] - L_h[t](\theta_L)''[t]) + 2(-L - H\theta_D[t])(-H(\theta_D)'[t]^2 \\
& \quad + L\theta_D[t](\theta_D)'[t]^2 + 2\theta_L[t](L_h)'[t](\theta_L)'[t] + L_h[t](\theta_L)'[t]^2 \\
& \quad - (L_h)''[t] + (y_k)''[t] - L(\theta_D)''[t] - H\theta_D[t](\theta_D)''[t] \\
& \quad + L_h[t]\theta_L[t](\theta_L)''[t]))
\end{aligned}$$

$$M_L = D[D[E_k, D[\theta_L[t], t]], t] - D[E_k, \theta_L[t]] + D[E_s, D[\theta_L[t], t]] + D[E_p, \theta_L[t]]$$

$$\begin{aligned}
& gm\text{Sin}[\theta_L[t]]L_h[t] - \frac{1}{2}m(2(x'[t] - \text{Sin}[\theta_L[t]])(L_h)'[t] + H\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t]) \\
& \quad - L\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] - \text{Cos}[\theta_L[t]]L_h[t](\theta_L)'[t])(-\text{Cos}[\theta_L[t]](L_h)'[t]) \\
& \quad + \text{Sin}[\theta_L[t]]L_h[t](\theta_L)'[t] + 2(\text{Sin}[\theta_L[t]](L_h)'[t] \\
& \quad + \text{Cos}[\theta_L[t]]L_h[t](\theta_L)'[t])(-\text{Cos}[\theta_L[t]](L_h)'[t] + (y_k)'[t]) \\
& \quad - L\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] - H\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] \\
& \quad + \text{Sin}[\theta_L[t]]L_h[t](\theta_L)'[t]) + \frac{1}{2}m(-2\text{Cos}[\theta_L[t]](L_h)'[t](x'[t] \\
& \quad - \text{Sin}[\theta_L[t]](L_h)'[t] + H\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] - L\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] \\
& \quad - \text{Cos}[\theta_L[t]]L_h[t](\theta_L)'[t] + 2\text{Sin}[\theta_L[t]]L_h[t](\theta_L)'[t](x'[t] \\
& \quad - \text{Sin}[\theta_L[t]](L_h)'[t] + H\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] - L\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] \\
& \quad - \text{Cos}[\theta_L[t]]L_h[t](\theta_L)'[t] + 2\text{Sin}[\theta_L[t]](L_h)'[t])(-\text{Cos}[\theta_L[t]](L_h)'[t] \\
& \quad + (y_k)'[t] - L\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] - H\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] \\
& \quad + \text{Sin}[\theta_L[t]]L_h[t](\theta_L)'[t]) \\
& \quad + 2\text{Cos}[\theta_L[t]]L_h[t](\theta_L)'[t])(-\text{Cos}[\theta_L[t]](L_h)'[t] + (y_k)'[t] \\
& \quad - L\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] - H\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] \\
& \quad + \text{Sin}[\theta_L[t]]L_h[t](\theta_L)'[t]) - 2\text{Cos}[\theta_L[t]]L_h[t](-L\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t])^2 \\
& \quad - H\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t]^2 - 2\text{Cos}[\theta_L[t]](L_h)'[t](\theta_L)'[t] \\
& \quad + \text{Sin}[\theta_L[t]]L_h[t](\theta_L)'[t]^2 + x''[t] - \text{Sin}[\theta_L[t]](L_h)''[t] \\
& \quad + H\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)''[t] - L\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)''[t] \\
& \quad - \text{Cos}[\theta_L[t]]L_h[t](\theta_L)''[t]) \\
& \quad + 2\text{Sin}[\theta_L[t]]L_h[t](-H\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t]^2 + L\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t]^2 \\
& \quad + 2\text{Sin}[\theta_L[t]](L_h)'[t](\theta_L)'[t] + \text{Cos}[\theta_L[t]]L_h[t](\theta_L)'[t]^2 \\
& \quad - \text{Cos}[\theta_L[t]](L_h)''[t] + (y_k)''[t] - L\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)''[t] \\
& \quad - H\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)''[t] + \text{Sin}[\theta_L[t]]L_h[t](\theta_L)''[t])
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_{L\text{Simplified}} &= M_L / \{ \text{Sin}[\theta_D[t]] \rightarrow \theta_D[t], \text{Cos}[\theta_D[t]] \rightarrow 1, \text{Sin}[\theta_L[t]] \\
&\quad \rightarrow \theta_L[t], \text{Cos}[\theta_L[t]] \rightarrow 1 \}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& gmL_h[t]\theta_L[t] - \frac{1}{2}m(2(x'[t] - \theta_L[t](L_h)'[t] + H(\theta_D)'[t] - L\theta_D[t](\theta_D)'[t]) \\
& \quad - L_h[t](\theta_L)'[t])(-(L_h)'[t] + L_h[t]\theta_L[t](\theta_L)'[t] + 2(\theta_L[t](L_h)'[t] \\
& \quad + L_h[t](\theta_L)'[t])(-(L_h)'[t] + (y_k)'[t] - L(\theta_D)'[t] - H\theta_D[t](\theta_D)'[t]) \\
& \quad + L_h[t]\theta_L[t](\theta_L)'[t]) + \frac{1}{2}m(-2(L_h)'[t](x'[t] - \theta_L[t](L_h)'[t] \\
& \quad + H(\theta_D)'[t] - L\theta_D[t](\theta_D)'[t] - L_h[t](\theta_L)'[t]) \\
& \quad + 2L_h[t]\theta_L[t](\theta_L)'[t](x'[t] - \theta_L[t](L_h)'[t] + H(\theta_D)'[t] \\
& \quad - L\theta_D[t](\theta_D)'[t] - L_h[t](\theta_L)'[t] + 2\theta_L[t](L_h)'[t])(-(L_h)'[t] \\
& \quad + (y_k)'[t] - L(\theta_D)'[t] - H\theta_D[t](\theta_D)'[t] + L_h[t]\theta_L[t](\theta_L)'[t]) \\
& \quad + 2L_h[t](\theta_L)'[t])(-(L_h)'[t] + (y_k)'[t] - L(\theta_D)'[t] - H\theta_D[t](\theta_D)'[t]) \\
& \quad + L_h[t]\theta_L[t](\theta_L)'[t]) - 2L_h[t](-L(\theta_D)'[t]^2 - H\theta_D[t](\theta_D)'[t]^2 \\
& \quad - 2(L_h)'[t](\theta_L)'[t] + L_h[t]\theta_L[t](\theta_L)'[t]^2 + x''[t] - \theta_L[t](L_h)''[t] \\
& \quad + H(\theta_D)''[t] - L\theta_D[t](\theta_D)''[t] - L_h[t](\theta_L)''[t]) \\
& \quad + 2L_h[t]\theta_L[t](-H(\theta_D)'[t]^2 + L\theta_D[t](\theta_D)'[t]^2 \\
& \quad + 2\theta_L[t](L_h)'[t](\theta_L)'[t] + L_h[t](\theta_L)'[t]^2 - (L_h)''[t] + (y_k)''[t] \\
& \quad - L(\theta_D)''[t] - H\theta_D[t](\theta_D)''[t] + L_h[t]\theta_L[t](\theta_L)''[t])
\end{aligned}$$

$$F_{L_h} = D[D[E_k, D[L_h[t], t]], t] - D[E_k, L_h[t]] + D[E_s, D[L_h[t], t]] + D[E_p, L_h[t]]$$

$$\begin{aligned} & gm(1 - \text{Cos}[\theta_L[t]]) + \text{Kl}(-L_o + L_h[t]) + \text{Cl}(L_h)'[t] \\ & - \frac{1}{2}m(-2\text{Cos}[\theta_L[t]](\theta_L)'[t](x'[t] - \text{Sin}[\theta_L[t]](L_h)'[t]) \\ & + H\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] - L\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t]) \\ & - \text{Cos}[\theta_L[t]]L_h[t](\theta_L)'[t] + 2\text{Sin}[\theta_L[t]](\theta_L)'[t](-\text{Cos}[\theta_L[t]](L_h)'[t] \\ & + (y_k)'[t] - L\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] - H\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] \\ & + \text{Sin}[\theta_L[t]]L_h[t](\theta_L)'[t]) + \frac{1}{2}m(-2\text{Cos}[\theta_L[t]](\theta_L)'[t](x'[t] \\ & - \text{Sin}[\theta_L[t]](L_h)'[t] + H\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] - L\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] \\ & - \text{Cos}[\theta_L[t]]L_h[t](\theta_L)'[t] + 2\text{Sin}[\theta_L[t]](\theta_L)'[t](-\text{Cos}[\theta_L[t]](\theta_h)'[t] \\ & + (y_k)'[t] - L\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] - H\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t] \\ & + \text{Sin}[\theta_L[t]]L_h[t](\theta_L)'[t]) - 2\text{Sin}[\theta_L[t]](-L\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t])^2 \\ & - H\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t]^2 - 2\text{Cos}[\theta_L[t]](L_h)'[t](\theta_L)'[t] \\ & + \text{Sin}[\theta_L[t]]L_h[t](\theta_L)'[t]^2 + x''[t] - \text{Sin}[\theta_L[t]](L_h)''[t] \\ & + H\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)''[t] - L\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)''[t] \\ & - \text{Cos}[\theta_L[t]]L_h[t](\theta_L)''[t] - 2\text{Cos}[\theta_L[t]](-H\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t])^2 \\ & + L\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t]^2 + 2\text{Sin}[\theta_L[t]](L_h)'[t](\theta_L)'[t] \\ & + \text{Cos}[\theta_L[t]]L_h[t](\theta_L)'[t]^2 - \text{Cos}[\theta_L[t]](L_h)''[t] + (y_k)''[t] \\ & - L\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)''[t] - H\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)''[t] \\ & + \text{Sin}[\theta_L[t]]L_h[t](\theta_L)''[t]) \end{aligned}$$

$$F_{L_h\text{Simplified}} = F_{L_h} / \{ \text{Sin}[\theta_D[t]] \rightarrow \theta_D[t], \text{Cos}[\theta_D[t]] \rightarrow 1, \text{Sin}[\theta_L[t]] \rightarrow \theta_L[t], \text{Cos}[\theta_L[t]] \rightarrow 1 \}$$

$$\begin{aligned} & \text{Kl}(-L_o + L_h[t]) + \text{Cl}(L_h)'[t] - \frac{1}{2}m(-2(\theta_D)'[t](x'[t] - \theta_L[t](L_h)'[t] + H(\theta_D)'[t] \\ & - L\theta_D[t](\theta_D)'[t] - L_h[t](\theta_L)'[t] + 2\theta_L[t](\theta_L)'[t](-L_h)'[t] \\ & + (y_k)'[t] - L(\theta_D)'[t] - H\theta_D[t](\theta_D)'[t] + L_h[t]\theta_L[t](\theta_L)'[t]) \\ & + \frac{1}{2}m(-2(\theta_L)'[t](x'[t] - \theta_L[t](L_h)'[t] + H(\theta_D)'[t] - L\theta_D[t](\theta_D)'[t] \\ & - L_h[t](\theta_L)'[t] + 2\theta_L[t](\theta_L)'[t](-L_h)'[t] + (y_k)'[t] - L(\theta_D)'[t] \\ & - H\theta_D[t](\theta_D)'[t] + L_h[t]\theta_L[t](\theta_L)'[t] - 2\theta_L[t](-L(\theta_D)'[t])^2 \\ & - H\theta_D[t](\theta_D)'[t]^2 - 2(L_h)'[t](\theta_L)'[t] + L_h[t]\theta_L[t](\theta_L)'[t]^2 + x''[t] \\ & - \theta_L[t](L_h)''[t] + H(\theta_D)''[t] - L\theta_D[t](\theta_D)''[t] - L_h[t](\theta_L)''[t] \\ & - 2(-H(\theta_D)'[t])^2 + L\theta_D[t](\theta_D)'[t]^2 + 2\theta_L[t](L_h)'[t](\theta_L)'[t] \\ & + L_h[t](\theta_L)'[t]^2 - (L_h)''[t] + (y_k)''[t] - L(\theta_D)''[t] - H\theta_D[t](\theta_D)''[t] \\ & + L_h[t]\theta_L[t](\theta_L)''[t]) \end{aligned}$$

$$F_{y_k} = D[D[E_k, D[y_k[t], t]], t] - D[E_k, y_k[t]] + D[E_s, D[y_k[t], t]] + D[E_p, y_k[t]]$$

$$\begin{aligned}
& 2Kpy_k[t] + 2Cp(y_k)'[t] + M(-f\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t]^2 - e\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t]^2 \\
& \quad + (y_k)''[t] + e\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)''[t] - f\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)''[t]) \\
& \quad + m(-H\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t]^2 + L\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)'[t]^2 \\
& \quad + 2\text{Sin}[\theta_L[t]](L_h)'[t](\theta_L)'[t] + \text{Cos}[\theta_L[t]]L_h[t](\theta_L)'[t]^2 \\
& \quad - \text{Cos}[\theta_L[t]](L_h)''[t] + (y_k)''[t] - L\text{Cos}[\theta_D[t]](\theta_D)''[t] \\
& \quad - H\text{Sin}[\theta_D[t]](\theta_D)''[t] + \text{Sin}[\theta_L[t]]L_h[t](\theta_L)''[t])
\end{aligned}$$

$$F_{y_k\text{Simplified}} = F_{y_k} / \{ \text{Sin}[\theta_D[t]] \rightarrow \theta_D[t], \text{Cos}[\theta_D[t]] \rightarrow 1, \text{Sin}[\theta_L[t]] \rightarrow \theta_L[t], \text{Cos}[\theta_L[t]] \rightarrow 1 \}$$

$$\begin{aligned}
& 2Kpy_k[t] + 2Cp(y_k)'[t] + M(-f(\theta_D)'[t]^2 - e\theta_D[t](\theta_D)'[t]^2 + (y_k)''[t] + e(\theta_D)''[t] \\
& \quad - f\theta_D[t](\theta_D)''[t] + m(-H(\theta_D)'[t]^2 + L\theta_D[t](\theta_D)'[t]^2 \\
& \quad + 2\theta_L[t](L_h)'[t](\theta_L)'[t] + L_h[t](\theta_L)'[t]^2 - (L_h)''[t] + (y_k)''[t] \\
& \quad - L(\theta_D)''[t] - H\theta_D[t](\theta_D)''[t] + L_h[t]\theta_L[t](\theta_L)''[t])
\end{aligned}$$

$$\text{FullSimplify}[\text{Solve}[F_{x\text{Simplified}} == AA, x''[t]]]$$

$$\{ \{ x''[t] \rightarrow \frac{1}{m+M} (AA + (Lm - eM + (Hm + fM)\theta_D[t])(\theta_D)'[t]^2 + 2m(L_h)'[t](\theta_L)'[t] - mL_h[t]\theta_L[t](\theta_L)'[t]^2 + m\theta_L[t](L_h)''[t] - Hm(\theta_D)''[t] - fM(\theta_D)''[t] + Lm\theta_D[t](\theta_D)''[t] - eM\theta_D[t](\theta_D)''[t] + mL_h[t](\theta_L)''[t]) \} \}$$

$$\text{FullSimplify}[\text{Solve}[M_{d\text{Simplified}} == 0, \theta_D''[t]]]$$

$$\{ \{ (\theta_D)''[t] \rightarrow \frac{1}{2((H^2 + L^2)m + (e^2 + f^2)M)(1 + \theta_D[t]^2)} (-a^2Cp(\theta_D)'[t] - 2(egM + m(\theta_L)'[t](-2(H + L\theta_L[t])(L_h)'[t] + L_h[t](-L + H\theta_L[t])(\theta_L)'[t]) + (Hm + fM)x''[t] - 2m(L - H\theta_L[t])(L_h)''[t] + 2(-eM + Lm)(y_k)''[t] + 2mL_h[t](H + L\theta_L[t])(\theta_L)''[t] + \theta_D[t](-a^2Kp - 4m(L - H\theta_L[t])(L_h)'[t](\theta_L)'[t] + 2((Lm - eM)x''[t] - m(H + L\theta_L[t])(L_h)''[t] + (fM + Hm)(y_k)''[t] + mL_h[t](H + L\theta_L[t])(\theta_L)'[t]^2 + (-L + H\theta_L[t])(\theta_L)''[t]))) \} \}$$

$$\text{FullSimplify}[\text{Solve}[M_{L\text{Simplified}} == 0, \theta_L''[t]]]$$

$$\{ \{ (\theta_L)''[t] \rightarrow \frac{- (L + H\theta_D[t])(\theta_D)'[t]^2 - 2(L_h)'[t](\theta_L)'[t] + x''[t] - \theta_L[t](g + (-H + L\theta_D[t])(\theta_D)'[t]^2 + 2\theta_L[t](L_h)'[t](\theta_L)'[t] + (y_k)''[t]) + (H - L\theta_D[t] + (L + H\theta_D[t])\theta_L[t])(\theta_D)''[t]}{L_h[t](1 + \theta_L[t]^2)} \} \}$$

FullSimplify[Solve[ $F_{L_h \text{Simplified}} == 0, L_h''[t]$ ]]

$$\left\{ \left\{ \left\{ L_h''[t] \rightarrow \frac{KL_o - Cl(L_h)'[t] + L_h[t](-Kl + m(1 + \theta_L[t]^2)(\theta_L)'[t]^2) + m(-(H - L\theta_D[t] + (L + H\theta_D[t])\theta_L[t])(\theta_D)'[t]^2 + \theta_L[t]x''[t] + (y_k)''[t] - (L - H\theta_L[t] + \theta_D[t](H + L\theta_L[t]))(\theta_D)''[t])}{m(1 + \theta_L[t]^2)} \right\} \right\} \right\}$$

FullSimplify[Solve[ $F_{y_k \text{Simplified}} == 0, y_k''[t]$ ]]

$$\left\{ \left\{ \left\{ y_k''[t] \rightarrow \frac{1}{M + m} \left( -2Kpy_k[t] - 2Cp(y_k)'[t] + (M(f + e\theta_D[t]) + m(H - L\theta_D[t]))(\theta_D)'[t]^2 + M(-e + f\theta_D[t])(\theta_D)''[t] + m(-L_h[t](\theta_L)'[t]^2 + (L_h)''[t] + (L + H\theta_D[t])(\theta_D)''[t] - \theta_L[t](2(L_h)'[t](\theta_L)'[t] + L_h[t](\theta_L)''[t])) \right) \right\} \right\} \right\}$$

---

**KULE KREN MODELİNE AİT DİNAMİK DAVRANIŞ DENKLEMLERİNİN  
MATLAB-SIMULINK ORTAMINA AKTARILMAYA HAZIR YAZILIŞLARI**

$$\begin{aligned}
 x &= u[1], & x' &= u[2], & x'' &= u[3], \\
 \theta_D &= u[4], & \theta_D' &= u[5], & \theta_D'' &= u[6], \\
 \theta_L &= u[7], & \theta_L' &= u[8], & \theta_L'' &= u[9], \\
 L_h &= u[10], & L_h' &= u[11], & L_h'' &= u[12], \\
 y_k &= u[13], & y_k' &= u[14], & y_k'' &= u[15], \\
 F &= u[16]
 \end{aligned}$$

**1. Denklemler:**

$$\begin{aligned}
 x'' &= u[3] = (1/(m+M)) * (u[16] + (L * m - e * M + (H * m + f * M) * u[4]) * u[5]^2 + 2 * m * u[11] * u[8] - \\
 & m * u[10] * u[7] * u[8]^2 + m * u[7] * u[12] - H * m * u[6] - f * M * u[6] + L * m * u[4] * u[6] - e * M * \\
 & u[4] * u[6] + m * u[10] * u[9])
 \end{aligned}$$

## 2.Denklem:

$$\begin{aligned} \theta_D'' = u[6] = & (1/(2*((H^2+L^2)*m+(e^2+f^2)*M)*(1+u[4]^2)))*(-a^2*Cp*u[5]-2* \\ & (e*g*M+m*u[8]*(-2*(H+L*u[7])*u[11]+u[10]*(-L+H*u[7])*u[8])+(H*m+f*M)*u[3])- \\ & 2*m*(L-H*u[7])*u[12]+2*(-e*M+L*m)*u[15]+2*m*u[10]*(H+L*u[7])*u[9]+u[4]* \\ & (-a^2*Kp-4*m*(L-H*u[7])*u[11]*u[8]+2*((L*m-e*M)*u[3]-m*(H+L*u[7])*u[12]+ \\ & (f*M+H*m)*u[15]+m*u[10]*((H+L*u[7])*u[8]^2+(-L+H*u[7])*u[9]))) \end{aligned}$$

## 3.Denklem:

$$\begin{aligned} \theta_L'' = u[9] = & (- (L+H*u[4])*u[5]^2-2*u[11]*u[8]+u[3]-u[7]*(g+(-H+L*u[4])*u[5]^2+2* \\ & u[7]*u[11]*u[8]+u[15]))+(H-L*u[4]+(L+H*u[4])*u[7])*u[6]/(u[10]*(1+u[7]^2)) \end{aligned}$$

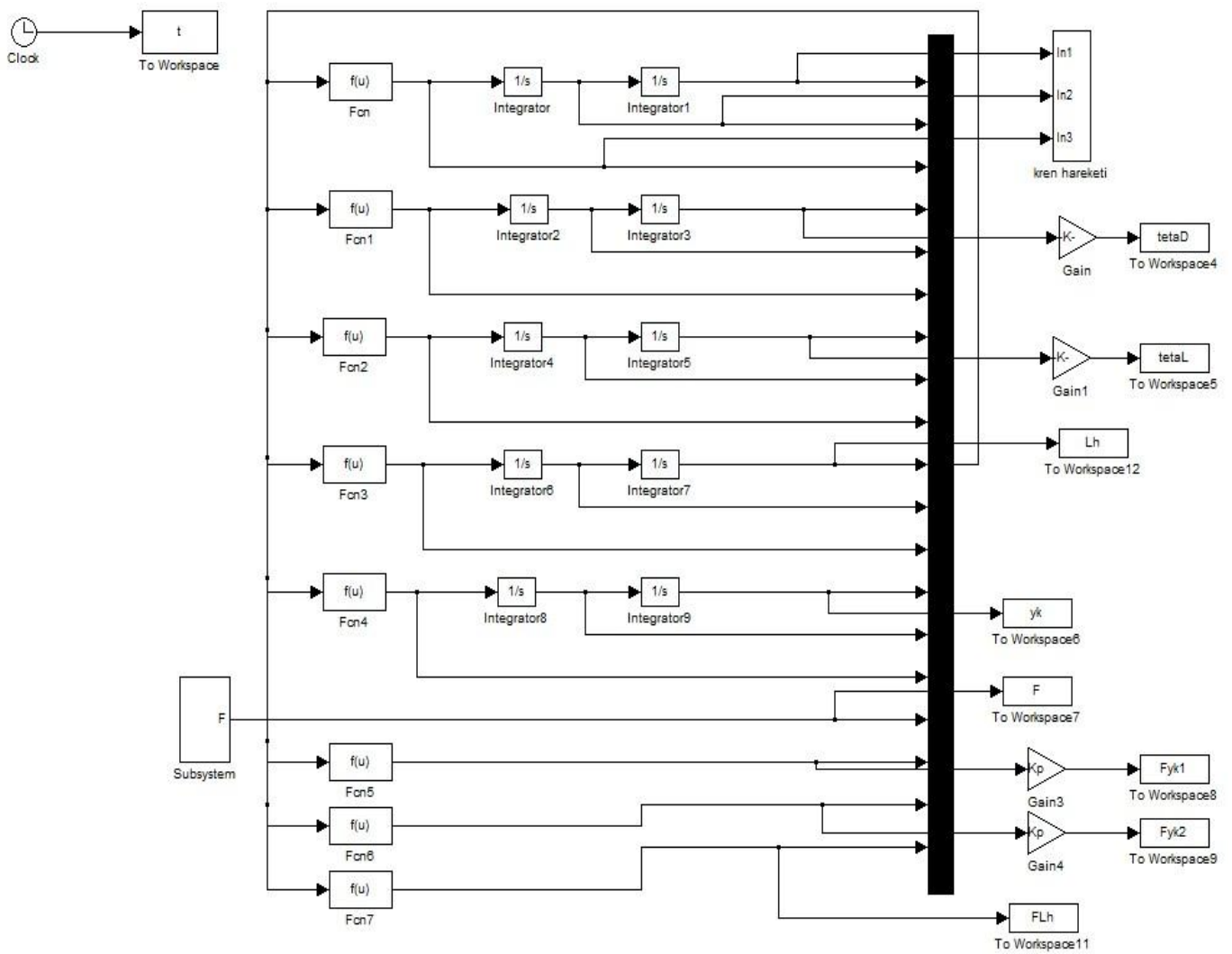
## 4.Denklem:

$$\begin{aligned} L_h'' = u[12] = & (Kl*Lo-Cl*u[11]+u[10]*(-Kl+m*(1+u[7]^2)*u[8]^2)+m*(-(H-L*u[4]+ \\ & (L+H*u[4])*u[7])*u[5]^2+u[7]*u[3]+u[15]- (L-H*u[7]+u[4]*(H+L*u[7]))*u[6])) / \\ & (m*(1+u[7]^2)) \end{aligned}$$

## 5.Denklem:

$$\begin{aligned} y_k'' = u[15] = & (1/(M+m^2))*(-2*Kp*u[13]-2*Cp*u[14]+(M*(f+e*u[4])+m*(H-L*u[4]))* \\ & u[5]^2+M*(-e+f*u[4])*u[6]+m*(-u[10]*u[8]^2+u[12]+(L+H*u[4])*u[6]-u[7]* \\ & (2*u[11]*u[8]+u[10]*u[9]))) \end{aligned}$$

SİSTEMİN MATLAB-SIMULINK ORTAMINDAKİ BLOK DİYAGRAMI



## ÖZGEÇMİŞ

---

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı:** Erdal ACAR

**Doğum Tarihi ve Yeri:** 20.03.1985 / Bakırköy - İSTANBUL

**Yabancı Dili:** İngilizce

**E-posta:** erdal\_acar@msn.com

### ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Makine Mühendisliği	Zonguldak K. Üniversitesi	2007
Lise	Fen Bilimleri	Şehremini Anadolu Lisesi	2003

### İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2011	Elif Plastik Ambalaj San. ve Tic. A.Ş.	Mekanik Bakım Şefi
2009	Altan Hidrolik San. ve Tic. A.Ş.	Üretim Mühendisi
2007	Emita San. ve Tic. Ltd. Şti.	Proje Mühendisi