

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

**UZAYSAL HAREKET EDEN TAŞITLARIN STEWART PLATFORM
MEKANİZMASI İLE TEK NOKTADAN KUVVET GERİ BESLEMELİ KONTROLÜ**

İBRAHİM YILDIZ

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE TEORİSİ VE KONTROL PROGRAMI**

**DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. VASFİ EMRE ÖMÜRLÜ**

İSTANBUL, 2011

Bu çalışma, TÜBİTAK'ın 105M193 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Stewart Platform Mekanizması ilk olarak uçuş simülatörlerinde uzaysal hareketlerin benzetimini yapmak amacıyla geliştirilmiş paralel bir mekanizmadır. Zaman içerisinde bu tip paralel mekanizmalara rağbet artmış, tıp sektöründe, deniz araştırmalarında, yapı sektöründe, uzay araştırmalarında kullanılagelmiştir. Stewart Platformu üzerine yapılan araştırmalar zamanla bu mekanizmanın evrim geçirerek birçok sayıda ve farklı tiplerde paralel mekanizmalar olarak karşımıza çıkmasını sağlamıştır. Bu mekanizmalar üzerinde yapılan teorik ve deneysel çalışmalar, mekanizmanın uzaysal hareketlerini ve dinamiklerini daha iyi anlaşılır bir hale getirmiştir.

Bu çalışmada uzaysal, altı eksenli, hareket yapabilen bir 3x3 Stewart Platformunun kinematik ve dinamik yapısı incelenmiş ve kuvvet geribeslemesi ve kuvvet kontrol algoritmaları kullanılarak dinamik modeli oluşturulan bir hava taşıtının stewart platformu ile kumanda ve kontrolü incelenmiştir.

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde bana her konuda yardımcı olan başta danışmanım sayın Yrd. Doç. Dr. Vasfi Emre ÖMÜRLÜ olmak üzere, Yrd. Doç. Dr. Ahmet SAĞIRLI'ya, Prof.Dr. İbrahim ÖZKOL'a, Yrd.Doç.Dr. Şeref Naci ENGİN'e, Yrd.Doç.Dr. Volkan PATOĞLU'na, ayrıca bana her konuda destek olan sevgili Dr.Zeynep ALTINTAŞ'a teşekkür ederim.

Nisan, 2011

İbrahim YILDIZ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ.....	ix
KISALTMA LİSTESİ	xii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xvii
ÖZET.....	xviii
ABSTRACT	xx
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	5
1.3 Orijinal Katkı.....	6
BÖLÜM 2	
3x3 STEWART PLATFORM MEKANİZMASI	8
2.1 Sistem Yapısı	8
2.2 Sistem Boyutları ve Karakteristiği	10
BÖLÜM 3	
STEWART PLATFORM MEKANİZMASININ KİNEMATİK YAPISI	12
3.1 Mekanizmanın Ters Kinematik Çözümü	15
3.2 Mekanizmanın Düz Kinematik Çözümü.....	16
3.2.1 Newton-Raphson Yöntemi Kullanılarak Düz Kinematik Çözümün Elde Edilmesi	17
3.2.2 Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Düz Kinematik Çözümün Elde Edilmesi	19
3.2.3 Düz Kinematik Çözüm Yöntemlerinin Karşılaştırılması.....	23
3.3 Çalışma Uzayı Analizi	27

BÖLÜM 4

STEWART PLATFORM MEKANİZMASININ DİNAMİĞİ	30
4.1 Modellemede Bağ-grafik Yöntemi	30
4.1.1 Bağ-grafik Yönteminde Fiziksel Sistem Elemanları	30
4.1.1.1 Aktif Elemanlar	31
4.1.1.2 Pasif Elemanlar	31
4.1.1.3 Enerji Kapıları.....	32
4.1.1.4 Enerji Bağları.....	33
4.1.2 Sistem Değişkenlerinin Referans Yönlerinin Tanımlanması ve Nedensellik	33
4.1.2.1 Nedensellik	35
4.1.3 Matematiksel Durum Denklemleri	36
4.2 Bağ-grafik Metodu İle Sistemin Modellenmesi	37
4.2.1 Sistemin Kinematığı ve Kinematik Bağ-grafik Model	38
4.2.2 Fiziksel Elemanların Eklenmesi ve Nedensellik Çalışması.....	41
4.2.3 Motorların Bağ-grafik Modellenmesi	43
4.2.4 Platformu Etkileyen Jirokobik Kuvvetler	44
4.2.5 Dinamik Denklemlerin Oluşturulması	47
4.3 Simülasyon ve Model Analizi	53
4.3.1 SPM Bağ-grafik Modelinin Simülasyonu ve Gerçek Sistemle Karşılaştırılması.	58

BÖLÜM 5

STEWART PLATFORM MEKANİZMASININ “SIM-MECHANICS” MODELİ.....	64
5.1 Prensipite “Sim-Mechanics” blokları	64
5.2 3x3 Stewart Platform Mekanizmasının “Sim-Mechanics” Modeli.....	65
5.3 3x3 Stewart Platformunun Simülasyonu.....	69

BÖLÜM 6

STEWART PLATFORM MEKANİZMASININ POZİSYON KONTROLÜ	71
6.1 SP Mekanizmasının PD Kontrolü	71
6.2 SP Mekanizmasının Bulanık Mantık PD Kontrolü	72
6.2.1 Bulandırma birimi.....	72
6.2.2 Bilgi tabanı	72
6.2.3 Karar Verme Birimi	72
6.2.3.1 “Max-Dot” Yöntemi	72
6.2.3.2 “Min-Max” Yöntemi	72
6.2.3.3 “Tsukamoto” Yöntemi	73
6.2.3.4 “Takagi-Sugeno” Yöntemi	73
6.2.4 Netleştirme Birimi	73
6.2.4.1 Maksimum Üyelik Yöntemi	73
6.2.4.2 Ağırlık Merkezi Yöntemi	73
6.2.4.3 Ağırlık Ortalaması Yöntemi.....	74
6.3 SP Mekanizmasının Kazanç Ayarlamalı Bulanık Mantık Kontrolü.....	77

6.4	SP Mekanizmasının Kazanç Ayarlamalı Bulanık Mantık ve PD Kontrolü ...	79
6.5	Denetleyicilerin Deney Düzenine Uygulanması	80
BÖLÜM 7		
STEWART PLATFORM MEKANİZMASININ KUVVET KONTROLÜ		84
7.1	Katılık Kontrolü.....	87
7.2	Empedans Kontrol	97
7.2.1	Doğrudan (explicit) Kuvvet Kontrolü	103
7.3	Kuvvet Kontrol Algoritmalarının DeneySEL Sisteme Uygulanması ve Analizleri.....	107
7.3.1	Konum Tabanlı Kuvvet Kontrol Yöntemlerinin Adım ve Rampa Cevapları.....	108
7.3.2	Uygulanan Kuvvet Kontrol Yöntemlerinin Değişik Frekanslardaki Kuvvet Girişlerine Karşı Tepkilerinin Karşılaştırılması	111
7.3.3	Uygulanan Kuvvet Kontrol Yöntemlerinin Saydamlıklarının Karşılaştırılması	120
BÖLÜM 8		
UZAYSAL HAREKET EDEBİLEN ARAÇLARIN STEWART PLATFORM MEKANİZMASI İLE KONTROLÜ		123
8.1	Uzaysal Hareket Edebilen Bir Taşıt Olarak 4 Rotorlu Hava Aracı: Quadrotor	124
8.1.1	Taşıt Karakteristikleri	125
8.1.2	Taşıtın Dinamik Modelinin Oluşturulması	127
8.1.3	Taşıtın Konum Kontrolü	134
8.2	Kullanıcı Ara yüzünün Oluşturulması	141
8.3	SPM ile Taşıtın Kontrol Uygulamaları	143
8.4	Uygulama Sonuçlarının İncelenmesi	145
BÖLÜM 9		
SONUÇLAR		154
KAYNAKLAR		156
EK-A		
T_1 VE I MATRİSLERİNİN AÇIK İFADELERİ		161
EK-B		
$[A], [B], [C], [D], [\tilde{I}]^{-1}, [L_a], [U], E, T$ MATRİSLERİNİN AÇIK İFADELERİ		163
EK-C		
SPM BAĞ-GRAFİK MODELİ SİMÜLASYON KODLARI		170
EK-D		

SPM SIM-MECHANICS MODELİ ÖN YÜKLEME PROGRAMI.....	183
EK-E	
KUVVET SENSÖRÜ KALİBRASYON GRAFİKLERİ.....	186
EK-F	
QUADROTOR SİMÜLASYON PROGRAM KODLARI.....	187
EK-G	
BAĞ-GRAFİK DENKLEMLERİNİN ÇIKARTILMASI.....	190
EK-H	
“QUADROTOR” MODELİNE UYGULANAN BOZUCU RÜZGAR KUVVETLERİ	192
ÖZGEÇMİŞ.....	193

SİMGE LİSTESİ

a	Hiperbolik tanjant sigmoid fonksiyonu
${}^B\vec{B}_i$	Alt platform motor bağlantı noktaları vektörü (sabit platforma göre)
$\{B\}$	Sabit alt platform koordinat sistemi
B	Eşik değeri
b	İtme faktörü
c_f	Eklemlerdeki sönüm katsayısı
d	Sürükleme faktörü
$E(n)$	Performans fonksiyonu
F_{si}	Motorların ürettiği kuvvet
F_{Li}	Bacakların üst bağlantı noktalarına uyguladığı kuvvet
F_{Li}^t	Bacakların üst platformda oluşturduğu kuvvet
$F_{\theta i}^t$	Üst platformdaki kuvvetlerin bacaklara aktardığı kuvvet
F_I	Üst platformun atalet elemanlarına aktardığı kuvvet
F_G	Üst platformun jiristör elemanına aktardığı kuvvet
F_{Ri}	Bacaklardaki doğrusal mafsalların viskoz sönümünden kaynaklanan kuvvet
$\vec{F}^q$	“Quadrotor”a etkiyen kuvvetler
$\vec{F}_R^q$	“Quadrotor”a etkiyen dış kuvvetler
g_e	Hataya ait ölçekleme katsayısı
g_{de}	Hatanın değişimine ait ölçekleme katsayısı
g_a	Denetleyici çıkışının ölçekleme katsayısı
$g(n)$	Ağ gradyanı
G	Jiristör elemanı
$H(n)$	Hessian matrisi
I_P	Üst platform atalet matrisi
I_u	Bacakların üst kısmının ataleti
$\tilde{I}$	Virtüel atalet elemanı
I_b	3x3 boyutunda birim matris
i_a	Motor akımı
J	Jakobyen matrisi
$J_{x,y,z}$	“Quadrotor” un x,y ve z eksenlerine göre atalet momentleri
J_R	“Quadrotor” Motorlarının rotor ataletleri
k_p	Oransal katsayı
k_d	Türevsel katsayı
K_t	Motor kuvvet katsayısı
L_a	Motor indüktansı
L_i	Bacak uzunluğu
$\dot{L}_i$	Bacaklara ait doğrusal hız
ℓ	“Quadrotor” pervanelerinin merkeze ulan uzaklığı

m_u	Motor mili ağırlığı
m_d	Motor gövdesi ağırlığı
m_p	Üst platform ağırlığı
m_u	Bacakları oluşturan yapının kütlesi
M_u	Üst platform ağırlığı
$M_{\theta i}$	Bacaklarda oluşan moment
M_{Li}^{ω}	Bacakların üst platformda oluşturduğu moment
M_{ω}	Üst platformdaki jiroskobik kuvvetlere sebep olan momentler
$M_{\theta i}^{\omega}$	Üst platformun hareketinin bacaklara ilettiği momentler
M_I	Üst platformun atalet elemanlarına aktardığı moment
M_G	Üst platformun jiristör elemanına aktardığı moment
M_t	Toplam “Quadrotor” kütlesi
$\{P\}$	Hareketli üst platform koordinat sistemi
${}^P \vec{P}_i$	Üst platform motor bağlantı noktaları vektörü (hareketli platforma göre)
r_p	Üst platform yarıçapı
r_b	Alt platform yarıçapı
R_a	Motor elektriksel direnci
$\mathbf{R}$	Stewart platformu rotasyon matrisi
R_γ	Koordinat sistemini “x” ekseninde döndüren matris
R_β	Koordinat sistemini “y” ekseninde döndüren matris
R_α	Koordinat sistemini “z” ekseninde döndüren matris
R_θ	Açısal hareketli mafsallardaki viskoz sönüm katsayısı
R_L	Doğrusal hareketli mafsallardaki viskoz sönüm katsayısı
R_p	Pervane yarıçapı
$\mathbf{R}_q$	“Quadrotor” Rotasyon matrisi
$\vec{s}_i$	Bacaklara ait birim vektör
$\vec{S}_i$	Bacak vektörü
$\dot{\vec{t}}$	Üst platform doğrusal hız vektörü
$\vec{t}$	Hareketli platform öteleme vektörü
U^{PD}	PD denetleyici çıkışı
U^{bmpd}	Bulanık PD denetleyici çıkışı
U^{kabmpd}	Kazanç ayarlamalı bulanık mantık pd denetleyici çıkışı
V_{exi}	Motor gerilim girişleri
V_L	Endüktans elemanına aktarılan gerilim
V_R	Motor direncine aktarılan gerilim
V_{si}	Motor milinin hareketine aktarılan gerilim
$\vec{V}^q$	“Quadrotor” doğrusal hızı
$W(n)$	Ağın sayısal ağırlıkları
x	Stewart platformunun “x” ekseninde yaptığı öteleme hareketi
y	Stewart platformunun “y” ekseninde yaptığı öteleme hareketi

z	Stewart platformunun “z” ekseninde yaptığı öteleme hareketi
λ_i	Üst bağ noktaları arasındaki açı
Λ_i	Alt bağ noktaları arasındaki açı
ε_b	Alt bağ noktalarının x eksenine ile yaptığı açı
ε_p	Üst bağ noktalarının x eksenine ile yaptığı açı
γ	Stewart platformunun “x” ekseninde yaptığı açısal hareket
β	Stewart platformunun “y” ekseninde yaptığı açısal hareket
α	Stewart platformunun “z” ekseninde yaptığı açısal hareket
ε	Kabul edilebilir minimum hata değeri
μ	Marquardt katsayısı
$\vec{\omega}$	Üst platform açısal hız vektörü
$\dot{\vec{\theta}}_i$	Bacaklara ait açısal hız vektörü
μ_A	A kümesine ait üyelik fonksiyonu
μ_B	B kümesine ait üyelik fonksiyonu
ψ^q	“Quadrotor” “z” eksenindeki açısal yerdeğiştirme miktarı
ϕ^q	“Quadrotor” “x” eksenindeki açısal yerdeğiştirme miktarı
θ^q	“Quadrotor” “y” eksenindeki açısal yerdeğiştirme miktarı
Ω_i	“Quadrotor” motor hızları
$\vec{\omega}^q$	“Quadrotor” açısal hız vektörü
$\vec{\tau}^q$	“Quadrotor”a etkiyen momentler

KISALTMA LİSTESİ

SPM	Stewart Platform Mekanizması
DK	Düz Kinematik
YSA	Yapay Sinir Ağları
PD	Oransal-Türevsel kontrol
BMPD	Bulanık Mantık-PD kontrol
KABMPD	Kazanç ayarlamalı bulanık mantık PD kontrol
KABMPD+PD	Kazanç ayarlamalı bulanık mantık-PD kontrol ve paralel PD kontrol
MSE	Ortalama Karesel Hata

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1	Stewart Platform Mekanizması.5
Şekil 1.2	Çeşitli SPM mimarileri a) 3x3 SPM b) 6x3 SPM c) 6x6 SPM6
Şekil 2.1	Doğrusal DC motor ve 3 serbestlik dereceli mafsalları.....8
Şekil 2.2	Deneysel sistem şeması ve blok diyagramı10
Şekil 2.3	Deneysel sistemin boyutları11
Şekil 3.1	Mafsallık boşluklarının ölçümü13
Şekil 3.2	6x6 Stewart platform mekanizması13
Şekil 3.3	3x3 Stewart platform mekanizması15
Şekil 3.4	3x3 SPM' nin bacak vektör diyagramı.....16
Şekil 3.5	YSA' nın eğitimi için belirlenen çalışma uzayında kullanılan konumlar. .20
Şekil 3.6	YSA Yapısı21
Şekil 3.7	İzlenecek yörünge ile çözüm yöntemlerinin simülasyon sonuçlarının x-y düzleminde karşılaştırılması.23
Şekil 3.8	İzlenecek yörünge ile çözüm yöntemlerinin simülasyon sonuçlarının, ilgili eksenlerde karşılaştırılması.24
Şekil 3.9	Çözüm yöntemlerinin simülasyon sonuçlarından, izlenen yörüngeyi çıkartılması ile elde edilen hata miktarları.24
Şekil 3.10	Çözüm yöntemlerinin deneysel sisteme uygulanması ve sonuçların x-y düzleminde gösterimi.25
Şekil 3.11	Çözüm yöntemlerinin deneysel sisteme uygulanması ve sonuçların zaman cevabı.26
Şekil 3.12	Deneysel sistemde uygulanan düz kinematik yöntemlerin hatalarının karşılaştırılması.26
Şekil 3.13	3x3 Stewart Platform Mekanizmasına ait öteleme çalışma uzayı gösterimleri.28
Şekil 3.14	3x3 Stewart Platform Mekanizmasının Sıfır konumunda Açısal Çalışma Uzayı.....29
Şekil 4.1	Fiziksel sistem elemanlarının sınıflandırılması (Sağırlı, 1996)32
Şekil 4.2	Kütle-yay sistemi ve bağ-grafik modeli37
Şekil 4.3	6x6 Stewart platform mekanizması38
Şekil 4.4	3x3 SPM'nin kinematik vektörel bağ-grafik modeli40
Şekil 4.5	Kinematik modele fiziksel elemanların dâhil edilmesi ve nedensellik çalışması41

Şekil 4.6	Atalet elemanlarının indirgenmesinden sonra sistemin bağ grafik modeli	43
Şekil 4.7	Doğrusal DC motor	43
Şekil 4.8	Doğrusal DC motorun bağ-grafik modeli	44
Şekil 4.9	Bir modüleli jirator elemanı (EJS:MJR).....	44
Şekil 4.10	3x3 Stewart Platform Mekanizmasının bağ-grafik modeli	46
Şekil 4.11	Çalışma uzayı dâhilindeki maksimum ve minimum noktalar.....	55
Şekil 4.12	Karmaşık düzlemdeki sistem kutupları	55
Şekil 4.13	Deney ve simülasyon senaryoları	58
Şekil 4.14	Birinci senaryo için deneysel SPM ve bağ-grafik modelinin karşılaştırılması.....	59
Şekil 4.15	İkinci senaryo için deneysel SPM ve bağ-grafik modelinin karşılaştırılması	60
Şekil 4.16	Üçüncü senaryo için deneysel SPM ve bağ-grafik modelinin karşılaştırılması	61
Şekil 4.17	Dördüncü senaryo için deneysel SPM ve bağ-grafik modelinin karşılaştırılması	62
Şekil 5.1	Örnek sarkaç mekanizmasının modellenmesi.....	65
Şekil 5.2	SPM'nin "Sim-mechanics" modeli	66
Şekil 5.3	"Joint" bloğunun içeriği	67
Şekil 5.4	"Leg" Bloğu içeriği.....	68
Şekil 5.5	DC Motor modeli	69
Şekil 5.6	Stewart Platform Mekanizmasına ait "Sim-mechanics" model ve deneysel sistem.	69
Şekil 5.7	Deneysel 3x3 SP mekanizmasının ve simülasyon ortamındaki benzerinin cevaplarının karşılaştırılması.	70
Şekil 6.1	PD denetleyici blok diyagramı	71
Şekil 6.2	Bulanık Mantık PD denetleyici blok diyagramı.....	74
Şekil 6.3	Hata işaretine ait üyelik fonksiyonu	75
Şekil 6.4	Hatanın değişim işaretine ait üyelik fonksiyonu	75
Şekil 6.5	Kontrol çıkışına ait üyelik fonksiyonu	76
Şekil 6.6	FPD kural yüzeyi	77
Şekil 6.7	KABMPD denetleyici blok diyagramı	77
Şekil 6.8	KABMPD denetleyici çıkışına ait üyelik fonksiyonu.	78
Şekil 6.9	KABMPD denetleyici kural yüzeyi.....	79
Şekil 6.10	KABMPD+PD denetleyiciye ait blok diyagram	80
Şekil 6.11	"NI-Motion PCI-7356" serisi servo PID blok diyagramı	80
Şekil 6.12	Denetleyici Cevaplarının Karşılaştırılması	82
Şekil 7.1	Kuvvet/Tork Sensörü Test düzeneği	84
Şekil 7.2	Kuvvet/Tork Sensörü Test Sonuçları.....	85
Şekil 7.3	Ortalama değer Filtresi, [56]	86
Şekil 7.4	Kuvvet/Tork Sensörü Filtre etkisi	87
Şekil 7.5	Katılık kontrolü için denetleyici katsayılarının belirlenmesi için kullanılan test noktaları ve spiral yörüngeler.....	88
Şekil 7.6	SPM katılık kontrolü blok diyagramı.....	89
Şekil 7.7	Kuvvet hatasının katılık katsayılarının değişimine göre değişimi	89

Şekil 7.8	Moment hatasının katılık katsayılarının değişimine göre değişimi90
Şekil 7.9	9 test noktası için, bütün muhtemel denetleyici katsayı kombinasyonlarının kuvvet hata integraline etkileri.....91
Şekil 7.10	Test noktalarında elde edilen kuvvet hataları.....92
Şekil 7.11	9 test noktasında, en düşük kuvvet hata integrali sonucuna sebep olan, denetleyici katsayıları93
Şekil 7.12	Denetleyicilerin test noktalarına göre kuvvet hata integrali performansları (a) KABMPD+PD denetleyici (b) KABMPD denetleyici (c) PD denetleyici (d) BMPD denetleyici.94
Şekil 7.13	Denetleyicilerin, test noktalarında moment hata integrali performansları (a) KABMPD+PD denetleyici (b) KABMPD denetleyici (c) PD denetleyici (d) BMPD denetleyici95
Şekil 7.14	Çalışma uzayındaki rastgele bir noktada, uzaysal kuvvet/tork girişi için, test edilen denetleyicilerin cevapları.....96
Şekil 7.15	Konum tabanlı empedans kontrol blok diyagramı98
Şekil 7.16	Mekanik empedans katsayılarını tahmin edebilmek için düzenlenen Kütle & Yer değiştirme Grafiği.....99
Şekil 7.17	Mekanik empedans katsayılarını belirlemekte kullanılan $M_e=0,5$ kg için simülasyonu yapılan sistemin kuvvet girişi100
Şekil 7.18	Mekanik empedans katsayılarını belirlemekte kullanılan $M_e=0,5$ kg için simülasyonu yapılan sistemin konum çıkışı.101
Şekil 7.19	Mekanik empedans katsayılarını tahmin edebilmek için düzenlenen Kütle atalet momenti & Yer değiştirme Grafiği.....102
Şekil 7.20	Mekanik empedans katsayılarını belirlemekte kullanılan $J_e=0,01$ kgm ² için simülasyonu yapılan sistemin moment girişi.....102
Şekil 7.21	Mekanik empedans katsayılarını belirlemekte kullanılan $J_e=0,01$ kgm ² için simülasyonu yapılan sistemin açısal konum çıkışı.....103
Şekil 7.22	Genel Doğrudan (explicit) kuvvet kontrolü blok diyagramı, [59].103
Şekil 7.23	SPM'na uygulanan doğrudan (explicit) kuvvet kontrolüne ait blok diyagram105
Şekil 7.24	Doğrudan (explicit) kuvvet kontrolü için PI katsayılarının değişimlerine göre kuvvet giriş değerini gösteren grafikler.106
Şekil 7.25	Konum tabanlı kuvvet kontrol denetleyicilerinin adım ve rampa cevapları.....110
Şekil 7.26	Katılık kontrolü uygulanan sistemin değişik frekanslardaki kuvvet girişlerine verdiği cevaplar.112
Şekil 7.27	Empedans kontrolü uygulanan sistemin değişik frekanslardaki kuvvet girişlerine verdiği cevaplar.113
Şekil 7.28	Doğrudan (explicit) kuvvet kontrolü uygulanan sistemin değişik frekanslardaki kuvvet girişlerine verdiği cevaplar.114
Şekil 7.29	SPM' nın değişik frekanslardaki kuvvet girişlerine göre çizdiği dairelerin yarıçaplarının frekansa göre grafiği.115
Şekil 7.30	Katılık kontrolü uygulanan sistemin sabit frekans ve değişen genlikteki kuvvet girişlerine verdiği cevaplar.....117
Şekil 7.31	Empedans kontrol uygulanan sistemin sabit frekans ve değişen genlikteki kuvvet girişlerine verdiği cevaplar.118

Şekil 7.32	Doğrudan (explicit) kuvvet kontrolü uygulanan sistemin sabit frekans ve değişen genlikteki kuvvet girişlerine verdiği cevaplar.	119
Şekil 7.33	Kuvvet kontrol yöntemlerinin saydamlıklarını test etmek için oluşturulmuş test düzeneği.....	121
Şekil 7.34	Saydamlık Test sonuçları.....	121
Şekil 8.1	(a) Bir helikopterin ve Stewart platformun ön, üst ve yan görünüşü, (b) SP tabanlı bir uçuş kontrolüyle bir helikopterin havalanma, asılı kalma ve inme durumları, (c) SP tabanlı bir uçuş kontrolü ile bir helikopterin sapma hareketi, (d) SP tabanlı uçuş kontrol ünitesi ile bir helikopterin yunuslama ve yalpalama hareketi	124
Şekil 8.2	4 Rotorlu Hava aracı : Quadrotor	125
Şekil 8.3	“Quadrotor”’un şematik gösterimi.....	125
Şekil 8.4	Quadrotora ait bazı hareketlerin rotor hızına göre quadrotora etkisi, [61].....	127
Şekil 8.5	Quadrotor simülasyonu blok diyagramı	135
Şekil 8.6	“ $z_r < 1,2$ m” ve “ $z_r > 1,2$ m” için quadrotor eksenlerinin konum grafikleri.....	138
Şekil 8.7	Optimize edilmiş katsayılarla “ $z_r < 1,2$ m” ve “ $z_r > 1,2$ m” için quadrotor eksenlerinin konum grafikleri.....	140
Şekil 8.8	Stewart Platform Mekanizması, Quadrotor modeli ve görsel arayüz blok diyagramı.....	141
Şekil 8.9	SPM & Quadrotor ara yüzünü test etmek için oluşturulmuş 1. göreve ait sahne.....	142
Şekil 8.10	SPM & Quadrotor ara yüzünü test etmek için oluşturulmuş 2. göreve ait sahne.....	142
Şekil 8.11	SPM ile Quadrotor Manipülasyonu Uygulaması	145
Şekil 8.12	Quadrotora etkiyen bozucu harici kuvvetlerin ihmal edildiği durumda taşıtın SPM ile kontrolü, Kare çizdirme testi	146
Şekil 8.13	Quadrotora etkiyen bozucu harici kuvvetlerin ihmal edilmediği ve SPM’na bu kuvvetlerin geri beslenmediği durumda taşıtın SPM ile kontrolü, Kare çizdirme testi	147
Şekil 8.14	Quadrotora etkiyen bozucu harici kuvvetlerin ihmal edilmediği ve SPM’na bu kuvvetlerin geri beslendiği durumda taşıtın SPM ile kontrolü, kare çizdirme testi	148
Şekil 8.15	Quadrotora etkiyen bozucu harici kuvvetlerin ihmal edildiği durumda taşıtın SPM ile kontrolü, slalom testi	150
Şekil 8.16	Quadrotora etkiyen bozucu harici kuvvetlerin ihmal edilmediği ve SPM’na bu kuvvetlerin geri beslenmediği durumda taşıtın SPM ile kontrolü, slalom testi	151
Şekil 8.17	Quadrotora etkiyen bozucu harici kuvvetlerin ihmal edilmediği ve SPM’na bu kuvvetlerin geri beslendiği durumda taşıtın SPM ile kontrolü, slalom testi	152

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Doğrusal DC motora ait boyut ve performans bilgileri.	9
Çizelge 2.2 3x3 SPM ait fiziksel parametreler	11
Çizelge 3.1 Değişik hücre sayıları ile eğitilmiş YSA yapılarının performanslarının karşılaştırılması	22
Çizelge 4.1 Bağ-grafik elemanlarının gösterimi ve uç denklemleri	34
Çizelge 4.2 Küresel çalışma uzayında seçilen sınır noktaların tanımları	54
Çizelge 4.3 Çalışma uzayına ait noktalardaki sistem kutupları	57
Çizelge 6.1 BMPD denetleyiciye ait kural tablosu	76
Çizelge 6.2 KABMPD denetleyicinin Kazanç Ayarlama kısmına ait kural tablosu	78
Çizelge 7.1 Kuvvet/Tork Sensörü Test Sonuçları	86
Çizelge 8.1 “Quadrotor” a ait büyüklükler, [64].	126
Çizelge 8.2 Quadrotor denetleyici katsayılarının tespiti için koşturulan simülasyonlar serisinde denetleyici aralıkları ve artış değerleri	136
Çizelge 8.3 Optimum kontrolü sağlayan katsayı değerleri ($z > 1,2$ m)	137
Çizelge 8.4 Optimum kontrolü sağlayan katsayı değerleri ($z < 1,2$ m)	139
Çizelge 8.5 SPM & Quadrotor ara yüzünü test etmek için oluşturulmuş 2. parkura ait noktaların koordinatları	143
Çizelge 8.6 Uygulanan Yönlendirme Metotlarının Değerlendirilmesi	153

ÖZET

UZAYSAL HAREKET EDEN TAŞITLARIN STEWART PLATFORM MEKANİZMASI İLE TEK NOKTADAN KUVVET GERİ BESLEMELİ KONTROLÜ

İbrahim YILDIZ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Yrd.Doç. Dr. Vasfi Emre ÖMÜRLÜ

Bu çalışmada uzaysal, altı eksenli, hareket yapabilen bir 3x3 Stewart Platformunun kinematik denklemleri çıkarılmış, bu denklemler Newton-Raphson ve yapay sinir ağları kullanılarak Matlab ve Visual Basic programları kullanılarak çözülmüştür. Ayrıca çözümler deneysel sisteme de uygulanmış, sonuçlar incelenmiştir.

Stewart platformunun kinematiğinin yanı sıra, bu çalışmada, mekanizmanın dinamiği, bağ-grafik modelleme yöntemi ve Matlab-Simmechanics kullanılarak modellenmiş, oluşturulan modellerin doğruluğu deneysel sistem ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca sistemin bağ-grafik modelinden elde edilen durum uzayı denklemlerinden faydalanılarak modellenen sistemin kararlılığı incelenmiştir.

Modellenen sisteme ve deneysel sisteme PD, bulanık mantık PD, kazanç ayarlamalı bulanık mantık PD konum kontrolü uygulanmış, kuvvet sensörü de kullanılarak bu denetleyiciler üzerinden konum kontrolü tabanlı katılık ve empedans kuvvet kontrolü uygulanmıştır. Kuvvet ve moment hataları göz önüne alınarak çalışan kuvvet tabanlı doğrudan (explicit) kuvvet kontrolü deneysel sisteme uygulanan kuvvet kontrol yaklaşımlarından birisidir.

Çalışmanın amacı doğrultusunda, uzaysal hareket edebilen 4 rotorlu hava aracının ("quadrotor"), Newton- euler yöntemi kullanılarak matematik modeli oluşturulmuş, oluşturulan model matlab programı ile simüle edilmiş ve PID tabanlı kontrol yöntemi

kullanılarak kontrolü kontrol katsayılarının optimizasyonu ile beraber gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan model Visual basic programına aktarılmış ve “3d developer studio” kütüphanesi kullanılarak görsel kullanıcı arayüzü inşa edilmiştir.

Oluşturulan arayüz ile, deneysel kuvvet geribeslemeli stewart platform mekanizmasının arayüzünün eşzamanlı çalışması sağlanmış, bu yöntemle kullanıcının sanal olarak oluşturulan “Quadrotor” hava aracını stewart platform mekanizması ile kumanda etmesi sağlanmıştır. “Quadrotor” arayüzünde iki farklı senaryo oluşturularak, çeşitli koşullarda kontrol ve kumanda performansları karşılaştırılmıştır.

ABSTRACT

SINGLE POINT CONTROL OF SPATIALLY MOVING VEHICLES USING STEWART PLATFORM MECHANISM ENABLING FORCE FEEDBACK

İbrahim YILDIZ

Department of Mechanical Engineering

PhD. Thesis

Advisor: Assist.Prof. Dr. Vasfi Emre ÖMÜRLÜ

In this study, kinematic equations of a 3x3 Stewart Platform Mechanism are derived and forward kinematics of these equations are solved by Newton-Raphson and Neural network methods. These solutions are simulated under Visual Basic and Matlab software and are compared with experimental data.

In addition to kinematic solutions, dynamic model of the mechanism is obtained by bond-graph approach and Matlab-Simmechanics program. This study also includes the experimental validation of dynamic models. Stability of the dynamic model which is derived by bond-graph method is investigated using state-space equations of the system.

PD, fuzzy PD and self tuning fuzzy PD type position controllers are applied to both dynamic model and the experimental system. Position based stiffness and impedance control approaches are also applied to the system with the help of 6 axis force sensor. A non position based force control method, explicit force control, is another control algorithm which is successfully implemented to the experimental system.

For the purpose of the study, a spatially moving vehicle called “Quadrotor” is modeled using Newton-Euler approach and it is simulated with Matlab program. A PID based position controller is developed and controller gains are optimised for simulation. Dynamic model of “Quadrotor” is adopted to Visual Basic program for visual

demonstration. User interface of “Quadrotor” is also constructed under Visual Basic using “3d Developer Studio” library.

The interface of the SPM and the interface of the Quadrotor are operated simultaneously with transferring data bilaterally. Virtual Quadrotor model is manipulated with real Stewart Platform Manipulator with force feedback. Applied controller performances are investigated with two different scenarios and results are compared.

Key words: Stewart Platform Mechanism, Force Feedback, Spatially Moving Vehicles, Quadrotor

1.1 Literatür Özeti

SPM Kinematiki Üzerine Yapılmış Çalışmalar

Stewart Platform Mekanizması ve benzer paralel mekanizmaların ters kinematik hesapları (hareketli platform konumlarından bacak boylarının hesaplanması) işlem yükü ve karmaşıklık bakımından daha basit olduğundan dolayı, bu tip mekanizmalar hakkında yapılan hemen her çalışmada ters kinematik hesaplara yer verilmektedir. Düz kinematik (DK) hesap ise daha zor ve karmaşık olduğu için bu konu hakkındaki çalışmalar sınırlıdır.

Stewart Platform Mekanizmasının düz kinematik çözümü için birçok yöntem üzerinde çalışılmıştır. Konuyla ilgili olarak yapılan ilk çalışma Bezout yöntemi kullanılarak yapılan düz kinematik çözümdür,[3]. Bu çalışmada, 3x3 SP için, sistemin geometrik yapısı kullanılarak üst platforma ait 6 tane bilinmeyen konum değişkeni, ikinci dereceden üç bilinmeyenli üç adet denklemle ifade edilmiş, Bezout matrisi kullanılarak bu denklemler 16'ncı dereceden bir bilinmeyenli denkleme indirgenmiştir. Bu denklemin çözümünden hareketli platforma ait 6 konum bilgisi bulunmuştur.

Düz kinematik yöntemlerle ilgili başka bir çalışma da iteratif bir yöntem olarak öne çıkan Newton-Raphson yöntemidir [4]. Bu yöntemde içinde hareketli platforma ait değişkenlerin de bulunduğu 6 adet bacak uzunluğunu veren denklem bulunmuş ve bu denklemlere Newton-Raphson yöntemi uygulanarak bu 6 değişken iterasyonlarla bulunmuştur, [5].

Düz kinematik problemin çözümü için doğrusal olmayan bir gözlemci tasarlanarak sistemin durum değişkenlerinden faydalanılarak 3 eksen öteleme ve dönme miktarı öngörölmeye çalışılmıştır, [6]. Başka bir çalışmada sistemin normalde düz kinematik çözümü için gerekli 30

doğrusal olmayan denklem, 3' e indirilmiş ve bu üç denklem Newron-Rhapson metodu kullanılarak çözülmüştür, [7]. Diğer bir yöntemde ise iki aşamalı bir çözüm yöntemi kullanılmıştır, [8]. Bu yöntemde çevrim içi ve çevrim dışı aşamalar mevcut olup, çevrim dışı çalışma sonucunda bir tablo oluşturup, çevrim içi kısımda bu tablo kullanılarak gerçek zamanlı çözüm elde edilmiştir. Diğer bir çalışmada ise, matematikte "Homotopi" hipotezine dayanılarak bir sayısal yöntem oluşturulmuş ve bu yöntemle problem çözülmüştür, [9].

Genetik algoritma, bağışıklık algoritması ve bulanık mantık kullanılarak oluşturulan melez bir yöntemle düz kinematik problemin çözümü gerçekleştirilmiştir, [10]. 3x6 SPM için sistemin tetrahedral yapısı kullanılarak işlem yükünü azaltacak şekilde bir çalışma da mevcuttur, [11]. İterasyon vasıtası ile çözülen düz kinematik yöntemin iterasyon süresini azaltmaya yönelik olarak öz-ayarlamalı (Self Tuning) bir yöntem oluşturulmuştur, [12]. 6x6 bir SPM için geliştirilmiş farklı bir yöntemde de, "Sylvester" matrisi kullanılarak oluşturulan bir algoritmada sistem 14'üncü dereceden tek değişkenli bir denkleme indirgenmiş ve çözülmüştür, [13].

Yapay sinir ağları (YSA) kullanılarak yapılmış pek çok çalışma mevcuttur. İleri beslemeli bir ağ kullanılarak sistem giriş ve çıkışları arasındaki ilişki kurulmuş ve bu yöntemle düz kinematik problem çözülmüştür, [14]. Yine ileri beslemeli bir ağ kullanılarak 6x3 SPM'nın öteleme, dönme ve uzaysal verilerle eğitilmesi ile sistemin düz kinematiği çözülmüştür, [15]. Belirli bir seviyede kesinliğe sahip bir çözüm yöntemi olarak da YSA ve iteratif yöntemler kullanılmıştır, [16].

SPM Dinamiği Üzerine Yapılmış Çalışmalar

Stewart Platform Mekanizmasının dinamiği üzerine pek çok çalışma mevcuttur. Newton-Euler metodu kullanılarak yapılan ters dinamik çalışmada bacakların kütesiz ve eklemlerin sürtünmesiz olduğu farz edilerek hesaplamalar yapılmıştır, [17]. Yine aynı metot yardımıyla, eklemlerin sürtünmeleri ve bacak ataletleri de hesaba katılarak bir çalışma ortaya konulmuştur, [18].

Diğer bir yöntem olarak Lagrange denklemleri kullanılarak sistem dinamikleri ifade edilmiştir, [19]. Başka bir çalışmada da aynı yöntemle sistemin modellenmesi ve kontrolü gerçekleştirilmiştir, [20].

Paralel mekanizmaların katılık ve katılık sınırlarının belirlenmesi için sonlu eleman yöntemi kullanılarak bir çalışma gerçekleştirilmiştir, [21].

Virtuel iş ve jakobiyen matrisleri kullanılarak dinamik hareket denklemleri türetilmiş ve denklemler ayık olarak çözülmüştür, [22].

Yüksek hızlı paralel bir robot, sonlu eleman yöntemi tüm uzuvların elastik olduğu varsayılarak modellenmiş ve yüksek hızdan kaynaklı elastik titreşimler incelenmiştir, [23].

Denklemlerin ve değişkenlerin çokluğundan dolayı oluşan hataların giderilmesi amacıyla, Newton-Raphson ve Lagrange yöntemleri kullanılarak SPM'nin dinamik denklemlerini sembolik olarak üretilmesi amacıyla bir prosedür oluşturulmuştur, [24].

Genelleştirilmiş momentum yaklaşımı kullanılarak bir SPM'nin dinamik modeli oluşturulmuş, atalet, koriolis ve merkezci ivmelerin analitik ifadeleri elde edilmiştir, [25].

Konum Kontrolü Çalışmaları

Birbirine paralel kinematik bir zincir şeklinde bağlanmış tahrik elemanları sistemin kinematikliğini bir hayli karmaşıklştırdığından, bu mekanizmanın kontrolü üzerine çok sayıda algoritmalar ortaya konulmuştur.

Temel bir kontrol metodu olan PID, 6x3 SPM için her bir bacak için ayrı ayrı olmak üzere uygulanmış, genetik algoritma kullanılarak katsayılar optimize edilmiştir, [26]. Hidrolik bir 6x6 SPM, yine bu yöntemle kontrol edilmiştir, [27]. Bacaklarını motorlu bir kablo sisteminin oluşturduğu bir SPM için uygulanan PID kontrole ek olarak referans girişlerine öteleme, dönme ve bozucu etkiler geri beslenerek bir kontrol yöntemi uygulanmıştır, [28]. Hidrolik bir hareket sistemine sahip SPM için PD tabanlı bir denetleyicinin yanı sıra yüksek hassasiyet için bozucu etkilere dayanıklı bir denetleyici uygulanmıştır, [29].

Bulanık mantık metodu L.A. Zadeh tarafından ortaya konulmasından sonra pek çok alana uygulanmıştır, [30]. 6x6 hidrolik tahrikli bir SPM için 25 elemandan oluşan bir kural tablosu düzenlenmiş ve bulanık mantık denetleyici sisteme uygulanmıştır, [31]. Piezo-elektrik tahrik elemanlarına sahip bir başka 6x6 SPM ise geri besleme lineerleştirmesini yapan ve 81 elemandan oluşan bir bulanık mantık denetleyici ile 49 elemandan oluşan bulanık mantık denetleyici birlikte kullanılarak hassas kontrolü gerçekleştirilmiştir, [32].

Geleneksel bulanık mantık kontrol metodu, PID tip kontrol yöntemi ile birleştirilerek daha verimli ve dayanıklı denetleyiciler ortaya konmuştur, [33]. Benzer olarak denetleyici giriş ve çıkış katsayıları bulanık mantık ile ayarlanan iki kural tabanına sahip bulanık denetleyici, modelden bağımsız sistemi dayanıklı bir şekilde kontrol etmesi için geliştirilmiştir, [34].

Yapay sinir ağları kullanılarak SPM'nin düz kinematiği ve kontrolü üzerine çalışmalar ortaya konulmuştur, [35]. Ayrıca SPM'nin Bulanık Mantık kontrolörünün kural tabanını değiştirmeden daha doğru sonuçlar elde edilebilmesi açısından hat üzerinde eğitim yapabilen bir YSA algoritması geliştirilmiştir, [36].

Kuvvet Kontrolü Çalışmaları

İnsan ve robot etkileşimi zamanla yeni kontrol gereksinimleri getirmiş ve getirmektedir. Bunlardan birisi de kuvvet kontrolüdür. En basitinden en karmaşığına kadar birçok yöntem üzerinde inceleme ve karşılaştırmalar yapılmıştır, [37].

Kuvvet kontrol yöntemlerinden birisi olan aktif katılık kontrolü 3 öteleme ve 3 dönme eksenini için program yardımıyla katılığın büyüklüğü değiştirilebilecek şekilde uygulanmıştır, [38]. Sistemin hızı ile sisteme etkiyen kuvvet arasındaki ilişki matematiksel olarak ifade edilmiştir, [39]. Sistem hızının kuvvete oranı olarak ifade edilen mekanik empedansın tersi olarak Admitans kuvvet kontrol yöntemi ortaya konmuştur, [40].

Endoskopik cerrahi için pnömatik bir manipülatör olarak 6x6 SPM geliştirilmiş, endoskop ile yüzey arasındaki ilişki kuvvet kontrol algoritması ile sağlanmıştır, [41].

Mikro cerrahi için de endüstriyel bir robot koluna 6 eksenli paralel bir robotun eklenmesiyle oluşturulan sistem, yine bir başka paralel manipülatör vasıtası ile haptik (dokunsal) kontrol uygulaması yapılmıştır, [42].

Kuvvet kontrolü ve dokunsal kontrol yöntemleri insan-makine ilişkisi teşkil ettiğinden rehabilitasyon sistemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Ayak bileği rehabilitasyonu için pnömatik 6x6 SPM, kullanıcı ara yüzü ile birlikte kullanılmıştır, [43]. Bilek rehabilitasyonu için de 3 eksenli paralel bir robot geliştirilmiş, terapist etkisi de eklenerek sistemin performansı incelenmiştir, [44], [45].

Kuvvet kontrol algoritmaları çeşitli sistemlere uygulanırken bu yöntemlerinin kararlılıkları da incelenmiştir. Katı satırlarla temas halinde bulunan ve kuvvet kontrol algoritmaları ile kontrol edilen robotlar genellikle kararsız hale geçebilmektedirler. Robotların çevreleriyle

olan ilişkilerinin kuvvet kontrolünün kararlılığına olan etkileri tek eklemlili bir robot kullanılarak incelenmiştir, [46]. Başka bir çalışmada da dokunsal ara yüzler için çeşitli performans ölçütleri ortaya konmuştur, [47].

1.2 Tezin Amacı

Uç işlemcinin (hareketli platformun) en az iki bağımsız eleman ile sabit bir koordinat sistemine bağlanmasıyla oluşan kinematik zincire paralel mekanizma adı verilir. Bu tür kinematik zincirlerden en çok kullanım alanı bulan Stewart'ın geliştirdiği mekanizmadır [1].

Paralel mekanizmalar ilk kez ortaya çıkışından itibaren birçok kullanım alanı bulmuştur. Çoğunlukla uçuş simülatörlerinde kullanılmakla beraber, titreşim sönümleyici olarak, büyük teleskoplarda teleskop aynasının hassas olarak konumlandırılmasında, uydularda ve tıp sektöründeki birçok robot destekli cerrahi alanda kullanılmaya devam edilmektedir. Kullanım alanları her geçen gün ilerleyen teknoloji ile birlikte çoğalmaktadır.

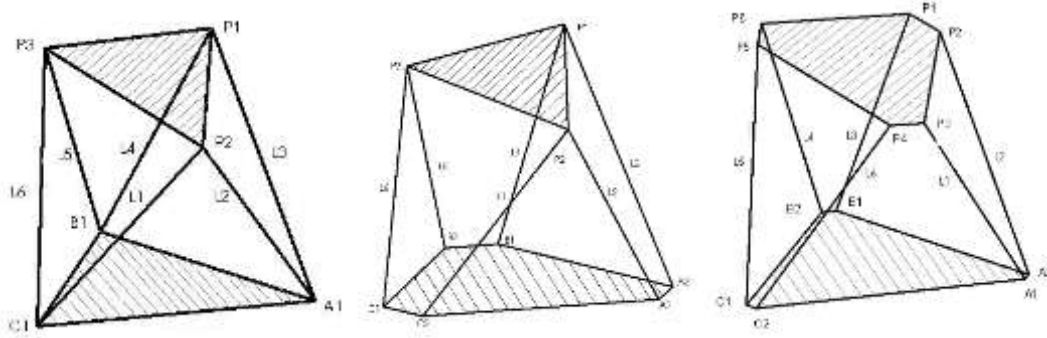
Paralel mekanizmaların serbestlik derecesi, eyleyici tipi ve sayısı ile direkt olarak ilişkilendirilemez. Serbestlik derecesi eyleyicilerin bağlanma şekli, bağlantılarda kullanılan yatak tipi ve çoğunlukla da sistem geometrisine bağlı olarak değişir.

Paralel mekanizmalara örnek olarak 105M192 no'lu Tübitak projesi kapsamında üretilen 3x3 Stewart Platform Mekanizması (SPM) , (Şekil 1.1), gösterilebilir.



Şekil 1. 1 Stewart Platform Mekanizması.

Paralel mekanizmaların uçuş simülatörlerinde kullanılması fikri ilk olarak 1965 yılında D.Stewart tarafından ortaya atılmıştır. Bu mekanizma altı serbestlik dereceli (üç öteleme, üç dönme) olmak üzere sabit bir alt platforma 6 adet tahrik elemanının bağlanması ve bu eyleyicilerin de hareketli bir üst platforma bağlanmasıyla oluşur. Stewart bu mekanizmanın eksenleri aktifken bütün serbestlik derecelerinin kontrol edilebileceğini, bu elemanlar sabitken platformun sabit konumda kalacağını ispatlamıştır [2] . D.Stewart'ın geliştirdiği bu mekanizma üstteki ve alttaki eklem sayılarına göre adlandırılırlar. Örneğin eyleyiciler üst platforma 3 noktadan alt platforma da 6 noktadan bağlı iseler bu mekanizmaya 6x3 SPM adı verilir. Çeşitli SPM mimarileri Şekil 1.2' de verilmiştir.



Şekil 1. 2 Çeşitli SPM mimarileri a) 3x3 SPM b) 6x3 SPM c) 6x6 SPM

Kullanım alanı olarak ise, uçuş simülatörlerinin yanı sıra uydu sistemlerinde vericilerin hassas olarak konumlandırılmasında, aynı şekilde uzay gözlem istasyonlarındaki büyük çaplı teleskopların aynalarının konumlandırılmasında kullanılmaktadır. Sanayide ise çeşitli parça işleme tezgâhlarında kesme takımlarının konumlandırılmasında kullanım alanı mevcuttur.

Bütün bu kullanım alanlarının yanı sıra askeri alandaki araştırma faaliyetlerinde ve tıp sahasında ise mikro cerrahi alanı bu mekanizmanın rağbet gördüğü alanlardır.

Bu çalışmada bir 3x3 Stewart Platform Mekanizması kullanılarak uzaysal hareket edebilen araçların tek noktadan manipülasyon ve kontrolü amaçlanmaktadır.

1.3 Orijinal Katkı

Bilindiği üzere uzaysal hareket eden araçlardan uçaklar ve helikopterler tek noktadan kontrol edilmemektedir. Kontrol ve manipülasyon için levye ve pedallardan faydalanılır. İlerleyen teknoloji ile bu tarz kumanda edilen sistemlerde elektronik tabanlı kumanda sistemleri kullanılmaya başlanmışsa da tek noktadan kontrol gerçekleştirilmemiştir. Bu çalışmada, 6 eksenli hareket edebilen bir paralel mekanizma olarak Stewart Platform Mekanizması, hali

hazırda çok noktadan kumanda edilen sistemlerde kumandayı tek noktadan sağlamak için kuvvet geribeslemesi de kullanılarak geliştirilmiştir.

BÖLÜM 2

3x3 STEWART PLATFORM MEKANİZMASI

2.1 Sistem Yapısı

3x3 Stewart Platform Mekanizması Şekil 1.1' de verildiği gibi üstte 3, altta 3 bağlantı noktasına sahip paralel bir mekanizmadır. Kinematik hesaplarda kolaylık sağlaması ve işlem yüklerinin diğer kombinasyonlarına göre daha az olması 3x3 SPM' in bir avantajı olurken, tek eksende simetrik olması, bağlantılar için özel mesnet gerektirmesi bir dezavantaj teşkil etmektedir.

Şekil 2.1' de kullanılan doğrusal DC motor ve özel olarak hazırlanmış 3 serbestlik derecesine sahip mafsal görülmektedir.



Şekil 2. 1 Doğrusal DC motor ve 3 serbestlik dereceli mafsal

Kullanılan motor sürekli mıknatıstan oluşan hareketli kısım (Motor Mili) ve statordan oluşmaktadır. Motorda enerji yokken hareketli kısım rahatlıkla çekilip çıkartılabilir. Motora ait performans ve boyut bilgileri Çizelge 2.1' de verilmektedir.

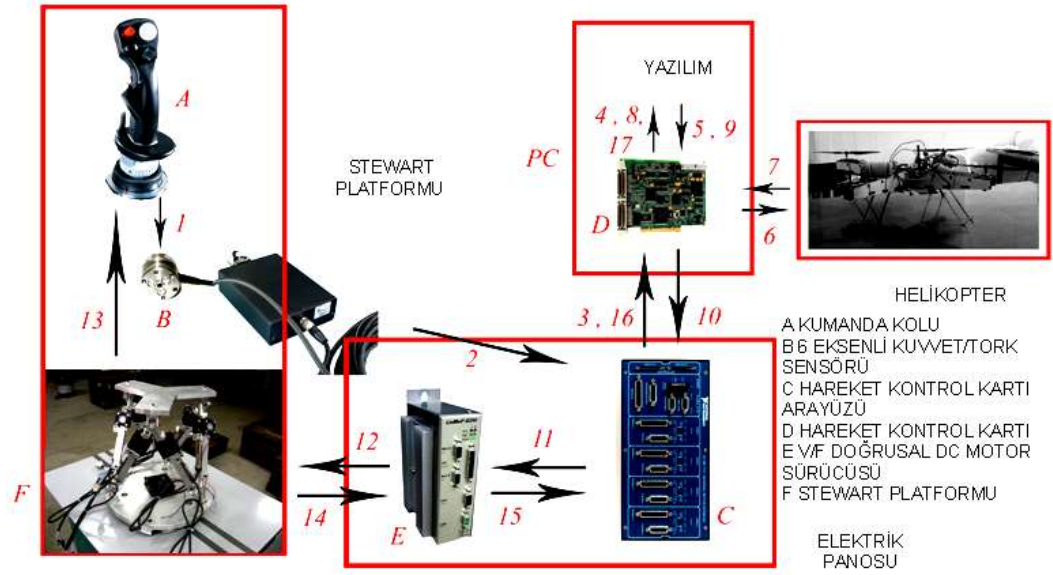
Mafsallar ise Şekil 2.1’ de görüldüğü gibi iki motoru birbirine aynı eksenle olma ve bağımsız hareket edebilme koşulları göz önünde bulundurularak özel olarak imal edilmiş 3 serbestlik derecesine sahip mafsallardır. Mafsalın orta noktasında bulunan ve motorların bağlandığı küp yüksek mukavemet gereksiniminden dolayı çelikten imal edilmiş, iki tarafından geçen millerden karşılıklı olan ikisine motorlar sürtünmeli yatak ile bağlanmıştır.

Çizelge 2. 1 Doğrusal DC motora ait boyut ve performans bilgileri.

Stator Uzunluğu	177 mm
Stator Yarıçapı	23 mm
Stator Kütlesi	265 g
Motor Mil Çapı	12 mm
Motor Mil Kütlesi	135 g
Motor Mil Boyu	190 mm
Maksimum Kuvvet	33 N
Maksimum Strok	100 mm
Sıfır konumu	50 mm
Maksimum ivme	245 m/s ²
Maksimum Hız	3.4 m/s

Şekil 2.2’ de görüldüğü üzere, deneysel sistem bir adet kumanda kolu, (A), ATI Nano25 altı eksenli kuvvet/tork algılayıcısı, (B), NI UMI-7774 hareket kontrol kartı ara yüzü, (C), NI PCI-7356 altı eksenli hareket kontrol kartı, (D), E210-VF doğrusal motor sürücüleri, (E), ve 3x3 SPM içermektedir. Kuvvet/tork algılayıcısı, kumanda koluna ve üst platforma rijit olarak bağlı olduğundan, kumanda kolu ile üst platform arasındaki kuvvet/tork geçişi ölçülebilmektedir. Kumanda koluna kullanıcı tarafından uygulanan kuvvet/tork değerleri her eksen için $\pm 10V$ aralığında kontrol kartına gitmekte ve 16 bit çözünürlükle dijital veriye çevrilmektedir.

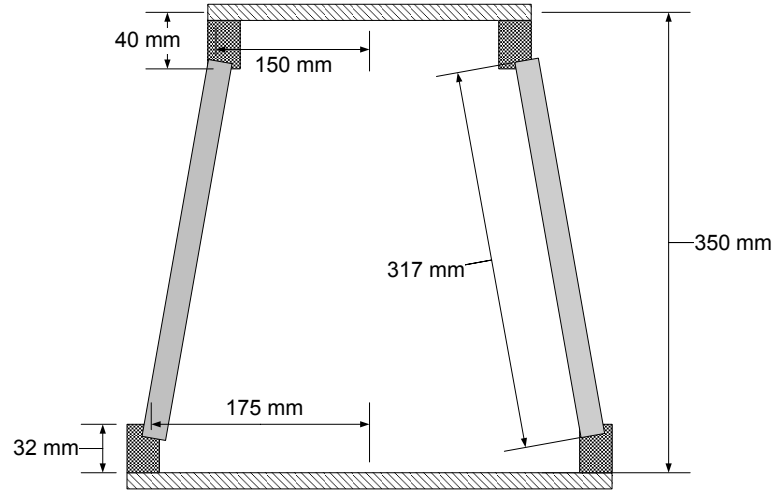
Sistem için gerekli yazılım ve yazılımların tümü “Visual Basic” programlama dili vasıtası ile hazırlanmıştır.



Şekil 2. 2 Deneysel sistem şeması ve blok diyagramı

2.2 Sistem Boyutları ve Karakteristiği

Şekil 1.1' de verilen deneyisel sistem için hazırlanmış 3x3 SPM'na ait boyutlar şematik olarak Şekil 2.3' de görülebilir.



Şekil 2. 3 Deneysel sistemin boyutları

Şekil 2.3' de düz renkte gösterilen kısım motorlarla birlikte bağlantı elemanlarını sembolize etmektedir. Verilen boyut ise, motorlar pasif durumda iken alınmış bacak uzunluğudur. Bacak uzunluğu alt mafsalları bağlantı noktasından, üst mafsalları bağlantı noktasına kadar olan uzunluktur. Noktalı olarak gösterilen kısım ise mafsalları temsil etmektedir. Verilen ölçüler alt/üst platform bağlantı noktaları ile mafsalları merkez noktasındaki küpün merkezi arasındaki uzunluğun ölçüsüdür. Çizgili kısımlar ise alt ve üst platformu göstermektedir. Verilen ölçüler ise bağlantı noktalarını içine alan bir çemberin yarıçapını işaret etmektedir. Mekanizmanın fiziksel parametreleri Çizelge 2.2' de verilmiştir.

Çizelge 2. 2 3x3 SPM ait fiziksel parametreler

Üst platform ağırlığı	M_u	1.387 kg
Motor mil ağırlığı	m_u	0.135 kg
Motor gövde ağırlığı	m_d	0.44 kg
Üst platform yarıçapı	r_u	0.15 m
Alt platform yarıçapı	r_b	0.175 m
Eklemlerdeki sönüm katsayısı	c_f	0.03 Nm.s/deg
Motor indüktansı	L_a	1.5 mH
Motor elektriksel direnci	R_a	10 ohm
Motor kuvvet katsayısı	K_t	11 N/A
Uygulayabileceği maksimum Kuvvet	F_z	177.3 N

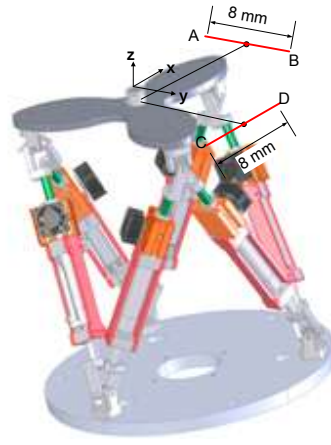
BÖLÜM 3

STEWART PLATFORM MEKANİZMASININ KİNEMATİK YAPISI

Paralel ve seri mekanizmaların kinematik denklemlerinin çıkarılmasında genelde iki yola başvurulur. Bunlardan birisi düz kinematik yöntem, diğeri de ters kinematik yöntemdir. Düz kinematik yöntem seri mekanizmalarda kolaylıkla uygulanabilmesine rağmen paralel mekanizmalara uygulamak zordur ve beraberinde işlem yükü ve birden fazla sonuç bulmak gibi durumları ortaya çıkarır. Düz kinematik yöntemde amaç verilen eyleyici parametrelerinden yola çıkarak uç işlemcinin konumunu bulmaktır. Ters kinematik yöntemde ise amaç verilen uç işlemci konumundan eyleyicilerin parametrelerinin bulunmasıdır.

Mafsallar özel olarak imal edildiğinden, oluşturduğu boşluk kinematik hesaplarda bir dezavantaj olarak ortaya çıkmaktadır. Bu boşlukların ölçülmesi ve kinematik hesaplara ne kadar tesir ettiğinin öğrenilmesi için bir deney yapılmıştır.

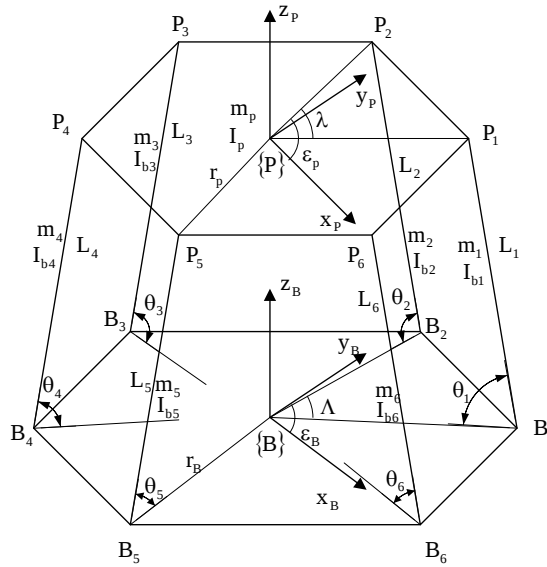
Deneyde SPM' nin "x" ve "y" eksenlerine dik olacak şekilde tabelalar konulmuş, yine "x" ve "y" eksenini doğrultusunda hareketli platforma bu tabelalardaki kağıtları işaretlemek üzere kalem monte edilmiştir, (Şekil 3.1). Motorlar sıfır konumu olan 50 mm' de enerjili durumda iken, mobil platform "x" ve "y" eksenlerinde zorlanmış ve kalemlerin tabelalara çizdiği doğru ölçülmüştür. İki ekseninde de 8 mm boşluk olduğu deney sonucunda görülmüştür.



Şekil 3. 1 Mafsal boşluklarının ölçümü

Şekil 3.1’de pembe renk ile gösterilen bağlantı elemanları, üst platform, alt platform, motoru mafsallara bağlayan elemanlar alüminyumdan imal edilmiştir. Motor performansı sıcaklık ile ters orantılı olduğundan Şekil 3.1’ de turuncu ile gösterilen soğutucular ve ilave olarak her motora fan monte edilmiştir.

Genel olarak bir 6x6 SPM’ nın şematik gösterimi aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 3. 2 6x6 Stewart platform mekanizması

Burada sabit alt platformun koordinat sistemi $\{B\}$ ve hareketli üst platformun koordinat sistemi $\{P\}$ ile ifade edilmiştir. P_i ve B_i ($i=1..6$) sırasıyla bacakların üst ve alt platformdaki bağlantı noktalarını ifade etmektedir. L_i , m_i , I_{bi} terimleri sırasıyla; bacağın toplam uzunluğu, kütlesi ve atalet momentini göstermektedir. θ_i terimi ise bacakların yatay düzlem ile yaptığı açıyı ifade etmektedir. λ_i ve Λ_i terimleri ise sırasıyla; üst ve alt platform bağlantı noktalarının yarıçapları sırasıyla r_p ve r_b olan daireler üzerindeki faz farklarının açı cinsinden

değerleridir. Örneğin P_1 ve P_2 noktası r_p dairesi üzerindedir ve daire merkezinden bu noktalara çizilen doğrular arasında λ kadar faz farkı vardır. ε_p ve ε_b ise bağlantı noktalarının x eksenine ile yaptıkları açı değerleridir.

Alt ve üst platformdaki λ_i ve Λ_i açıları bağlantı noktalarını şekil 3.2'deki çember üzerine düzgün ve simetrik bir şekilde dağıtmak için, aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\lambda_i = \frac{i\pi}{3} - \frac{\varepsilon_p}{2}, \Lambda_i = \frac{i\pi}{3} - \frac{\varepsilon_b}{2}, i = 1,3,5 \text{ (i : bacak numarası)} \quad (3.1)$$

$$\lambda_i = \lambda_{i-1} + \varepsilon_p, \Lambda_i = \Lambda_{i-1} + \varepsilon_b, i = 2,4,6 \quad (3.2)$$

Üst ve alt platforma ait köşe noktalarının konum vektörleri aşağıdaki denklemler yardımıyla hesaplanabilir:

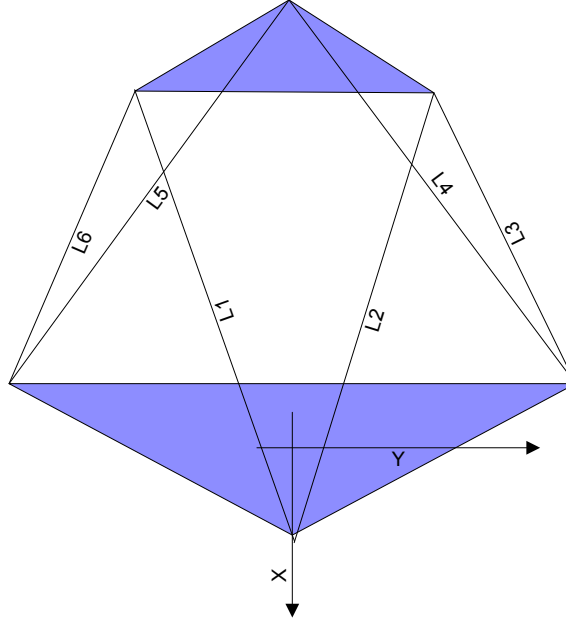
$${}^P \vec{P}_i = \begin{bmatrix} P_{ix} \\ P_{iy} \\ P_{iz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_p \cos(\lambda_i) \\ r_p \sin(\lambda_i) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$${}^B \vec{B}_i = \begin{bmatrix} B_{ix} \\ B_{iy} \\ B_{iz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_b \cos(\Lambda_i) \\ r_b \sin(\Lambda_i) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Üst ve alt platforma ait bu konum vektörleri her iki platformun kendi koordinat sistemleri üzerinde tanımlanmıştır.

Şekil 3.2' de 6x6 bir SPM verilmiştir. Şekilden de açıkça görülecektir ki: P_1 ve P_6 , P_2 ve P_3 , P_4 ve P_5 noktaları birleştirildikleri zaman platform 6x6'dan 3x6 'ya dönüşmüş olur. Bu işlem eşitlik (3.1) ve (3.2)'de verilen ε_p açısı 120° olarak belirlendiğinde sağlanabilir.

Aynı şekilde alt platformun bağlantı noktaları da ε_b açısı değiştirilerek istenilen noktalara taşınabilir. Öyle ki; B_1 ve B_2 , B_3 ve B_4 , B_5 ve B_6 noktalarının birleştirilmesi ve platformun alt plakasının 6 bağlantı noktasından 3 bağlantı noktasına dönüştürülmesi için ε_b açısının 0° olarak tespit edilmesi yeterli olacaktır.



Şekil 3. 3 3x3 Stewart platform mekanizması

3.1 Mekanizmanın Ters Kinematik Çözümü

Şekil 3.2' de gösterilen {P} koordinat sisteminin {B} koordinat sistemine göre konumu, üst platformun x eksenini etrafında yapmış olduğu dönme açısı γ , y eksenini etrafında β ve z eksenini etrafında yapmış olduğu dönme açısı α 'nın bilindiği varsayılarak aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_\alpha \mathbf{R}_\beta \mathbf{R}_\gamma =$$

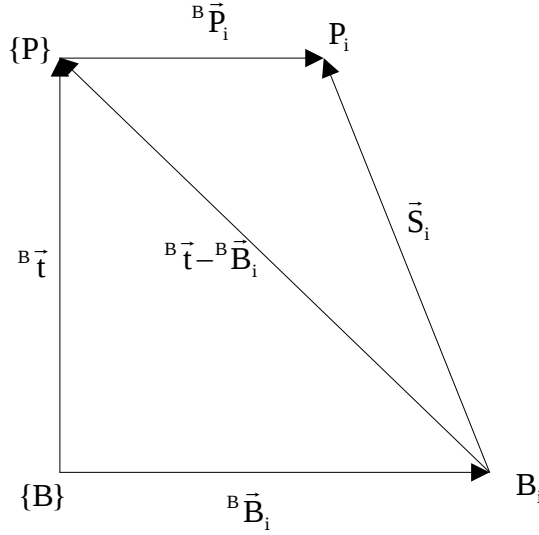
$$\begin{bmatrix} \cos(\alpha) \cos(\beta) & \cos(\alpha) \sin(\beta) \sin(\gamma) + \sin(\alpha) \cos(\gamma) & \sin(\alpha) \sin(\gamma) - \cos(\gamma) \sin(\beta) \cos(\alpha) \\ -\sin(\alpha) \cos(\beta) & \cos(\alpha) \cos(\gamma) - \sin(\alpha) \sin(\beta) \sin(\gamma) & \sin(\alpha) \sin(\beta) \cos(\gamma) + \cos(\alpha) \sin(\gamma) \\ \sin(\beta) & -\cos(\beta) \sin(\gamma) & \cos(\beta) \cos(\gamma) \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$\mathbf{R}_\alpha = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_\beta = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_\gamma = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) \\ 0 & \sin(\gamma) & \cos(\gamma) \end{bmatrix}$$

Bacak vektörlerini bulabilmek için öncelikle, üst platformun bacak bağlantı noktalarını alt platformun koordinat sisteminde ifade etmemiz gerekir. Bu ifade de üst platformun bacak bağlantı noktalarının konum vektörlerini (kendi koordinat sisteminde) (3.5) denkleminde bulunan rotasyon matrisi ile çarparak elde edilir. Şekil 3.4' te bacak vektörlerinin yerleşimi görülmektedir.



Şekil 3. 4 3x3 SPM' nın bacak vektör diyagramı

Şekil 3.4' te de görüldüğü gibi bacak vektörü $\vec{S}_i$, aşağıdaki yöntemle hesaplanabilir:

$$\vec{S}_i = {}^B\vec{P}_i + {}^B\vec{t} - {}^B\vec{B}_i \quad (3.6)$$

$${}^B\vec{P}_i = \mathbf{R}^P \vec{P}_i \quad (3.7)$$

Burada $\vec{t}$ vektörü hareketli üst platformun öteleme vektörüdür.

Bacak uzunlukları ise (3.6) ifadesinde bulunan bacak vektörlerinin normu alınarak bulunur:

$$L_i = |\vec{S}_i| \quad (3.8)$$

3.2 Mekanizmanın Düz Kinematik Çözümü

Sistemin düz kinematik çözümü yani, sistemin bacak uzunluklarından yola çıkılarak hareketli platformun konumunun bulunması, ters kinematiğe göre daha karmaşıktır. Sayısal bir yöntem olarak Newton-Raphson yöntemi ve yapay sinir ağları yöntemi ile sistemin düz kinematik çözümleri elde edilmiş ve gerçek sistemden alınan verilerle yöntemler karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar 7 ms'lik örnekleme periyodunda yapıldığı için ve uygulanan

Newton Raphson yöntemi iterasyona dayalı olduğundan, yöntemin yakınsaması bu bağlamda değerlendirilmelidir.

3.2.1 Newton-Raphson Yöntemi Kullanılarak Düz Kinematik Çözümün Elde Edilmesi

Bir bilinmeyenli doğrusal olmayan bir denklem, Newton yöntemi ile çözülmeden önce denklem (3.9) daki gibi ifade edilmelidir.

$$F(X) = 0 \quad (3.9)$$

Bu şekilde ifade edilen denklemde herhangi bir “ X_0 ” noktası, başlangıç noktası olarak kabul edildiği takdirde, “ F ” fonksiyonunun “ X_0 ” da türevi vardır ve “ F ” fonksiyonunun bu noktadaki tanjantı,

$$Y = F'(X_0).(X - X_0) + F(X_0) \quad (3.10)$$

şeklinde ifade edilebilir. İkinci iterasyondaki “ X_1 ” değeri (3.10) denklemindeki “ X ” yerine “ X_1 ” , “ Y ” yerine de “0” getirilerek bulunabilir. Bu durumda “ X_1 ” değeri,

$$X_1 = X_0 - \frac{F(X_0)}{F'(X_0)} \quad (3.11)$$

şeklinde olacaktır ve “ X_1 ” değeri çözüme “ X_0 ” başlangıç değerinden daha yakın olacaktır. Her bir iterasyonda çözüme daha da yaklaşılır ve iterasyonlar belirli, kabul edilebilir bir hata miktarına ulaştığında durdurulur.

3x3 SPM’nin düz kinematiğinin Newton-Raphson yöntemi ile çözümünde, sistemin bacak boyları (3.8) denkleminde yola çıkılarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$L_i = \sqrt{S_{ix}^2 + S_{iy}^2 + S_{iz}^2} \quad (3.12)$$

Bulmaya çalıştığımız bacak boyu hesabı için kullanılan (3.12) denkleminde, (3.6) numaralı denklem yerine konulursa, üst platformun öteleme ve dönmesine göre bacak boyları hesaplanmış olur. (3.5) de ifade edilen rotasyon matrisi (3.13) de gösterildiği gibi kısaltıldıktan ve gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra bacak boylarının hesaplanabileceği nihai denklem (3.14)’deki gibi ifade edilir.

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$L_i^2 = x^2 + y^2 + z^2 + r_p^2 + r_b^2 + 2.(r_{11}^P P_{ix} + r_{12}^P P_{iy}).(x - {}^B B_{ix}) + 2.(r_{21}^P P_{ix} + r_{22}^P P_{iy}).(y - {}^B B_{iy}) + 2.z.(r_{31}^P P_{ix} + r_{32}^P P_{iy}) - 2.(x.{}^B B_{ix} + y.{}^B B_{iy}) \quad (3.14)$$

Burada “x,y,z” olarak ifade edilen ve denklemin 6 bilinmeyeninden 3’ünü oluşturan değişkenler hareketli platforma ait öteleme değerleridir. Bilinmeyen diğer 3 değişken olarak platforma ait dönme değerlerini simgeleyen değişkenler, rotasyon matrisine ait değerlerin içindedir.

Denklem (3.14) de bilinmeyenler “x,y,z, γ, β, α ” olarak alındığında ve “ L_i ” (Bacak uzunluğu) denklemin sağ tarafına geçirilip denklem sıfıra eşitlendiğinde, Newton-Raphson çözümü için denklem (3.9) da verilen formata uygun bir denklem elde edilmektedir.

$$F_i(X) = x^2 + y^2 + z^2 + r_p^2 + r_b^2 + 2.(r_{11}^P P_{ix} + r_{12}^P P_{iy}).(x - {}^B B_{ix}) + 2.(r_{21}^P P_{ix} + r_{22}^P P_{iy}).(y - {}^B B_{iy}) + 2.z.(r_{31}^P P_{ix} + r_{32}^P P_{iy}) - 2.(x.{}^B B_{ix} + y.{}^B B_{iy}) - L_i^2 = 0 \quad (3.15)$$

$$\{X(x, y, z, \gamma, \beta, \alpha)\}, (i = 1..6)$$

Denklem (3.15) de verilen “F” fonksiyonu Denklem (3.9)’ dan farklı olarak 6 adet bilinmeyen terim içermektedir. Bu bilinmeyen değişkenlerin bulunması için verilen “F” fonksiyonunun her bir bilinmeyen değişkene göre türevinin alınması gereklidir.

$$J_{ij}(X) = \frac{dF_i}{dX_j}(X), \forall \{i, j\} \in \{1, \dots, 6\} \quad (3.16)$$

Denklem (3.11) ve (3.16) türevleri kullanılarak bilinmeyenler (3.17) denkleminde göre iteratif olarak bulunur.

$$X^{(n+1)} = X^{(n)} - [J(X^{(n)})]^{-1}.F(X^{(n)}) \quad (3.17)$$

Burada başlangıç koşulu olarak “ $X^{(0)} = x_0, y_0, z_0, \gamma_0, \beta_0, \alpha_0$ ” değerleri mutlaka verilmelidir. Bu çalışmada “0” konumu olarak “ $X^{(0)} = 0, 0, 0.4m, 0, 0, 0$ ” değerleri başlangıç koşulu olarak verilmiş ve her bir iterasyon bu başlangıç değerleri kullanılarak yapılmıştır.

Denklem (3.17) de verilen bilinmeyenlerin doğru sonuca yakınsamaları için iterasyonlar uygulanır. Belirlenen bir “ ε ” hata değerine ulaşıldığında iterasyonların durması için (3.15) denkleminde verilen ifadenin hatadan küçük olup olmadığına bakılır. Bu hata değeri m cinsinden konumun karesi olduğundan, $\sqrt{\varepsilon}$ değeri “m” cinsinden konum hesaplama hassasiyetini ifade etmektedir.

$$|F_i(X)| \leq \varepsilon \quad (3.18)$$

(3.18) eşitsizliği sağlandığında iterasyonlar durur ve o andaki “X” değerleri çözüm olarak kabul edilir.

3.2.2 Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Düz Kinematik Çözümün Elde Edilmesi

Yapay sinir ağları yöntemi ile düz kinematik hesabında;

- Çevrimdışı hazırlık,
- Çevrimiçi çalışma,

olmak üzere iki kademe bulunmaktadır. Çevrimdışı hazırlık bölümünde YSA’nın eğitimi hedeflenmektedir ki;

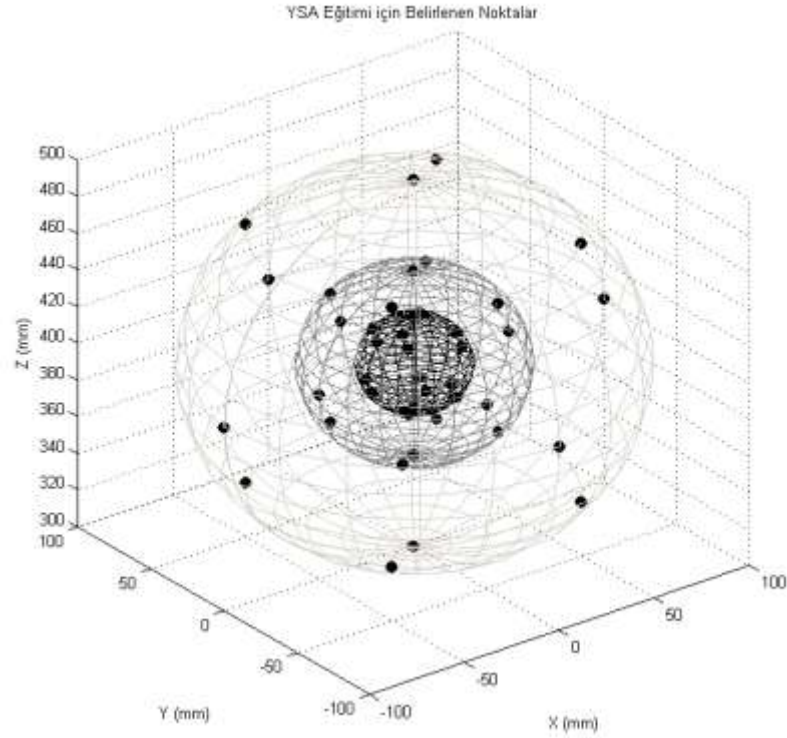
- Ters kinematik kullanılarak çalışma uzayına ait sınır noktalardan eğitim verilerinin alınması, YSA’nın saklı katman ve hücre sayılarının belirlenmesi,
- Elde edilen eğitim verileriyle YSA’nın eğitilmesi,

alt başlıklarında ifade edilebilir. Çevrimiçi çalışma ise çevrimdışı hazırlıktan elde edilen ağırlıkların sinir hücrelerine uygulanarak sonuçların elde edildiği kısımdır.

Çevrimdışı hazırlık kısmı maddeler halinde aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

- Çalışma uzayına ait sınır noktalardan ters kinematik yöntem kullanılarak eğitim verilerinin alınması.
- YSA yapısının oluşturulması.
- Elde edilen eğitim verileri ile oluşturulan ağın eğitilmesi.

Küresel bir çalışma uzayına ait 14 sınır nokta ve eğitim verisini arttırmak için noktalardan merkeze doğru çizilen hayâlî doğru üzerindeki %50 ve %75 içerdeki noktalarla beraber, toplam 42 adet noktaya ait konum ve ayrıca her bir noktada üst platforma ait “ γ, β, α ” rotasyon açılarının 30’ar derece içinde taranması ile toplam 1134 (42x3x3x3) eğitim verisi elde edilmiştir. Eğitim noktalarının dağılımı Şekil 3.5’te gösterilmiştir.

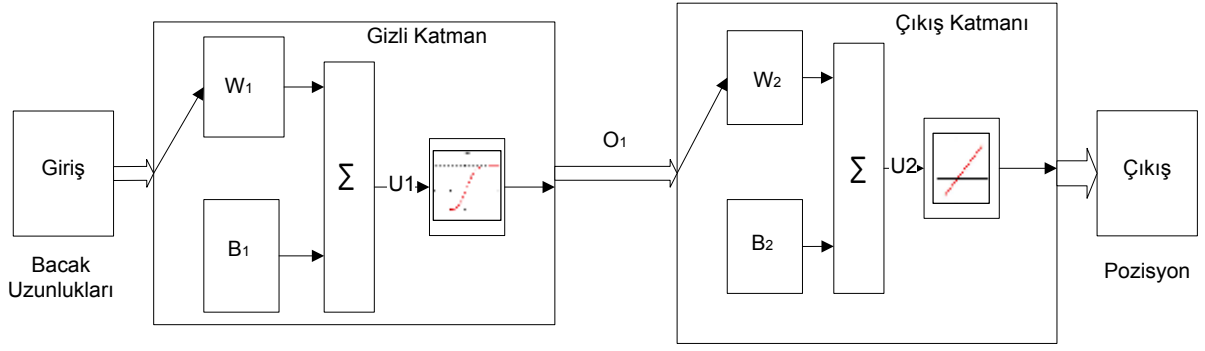


Şekil 3. 5 YSA' nın eğitimi için belirlenen çalışma uzayında kullanılan konumlar.

YSA yapısı olarak Şekil 3.6' da temsil edildiği üzere iki katmanlı, ileri beslemeli yapı kullanılmıştır. Burada gizli katmanda 40 sinir hücresi ve bunun çıkışında denklem (3.19) da verilen 'Hiperbolik Tanjant Sigmoid' fonksiyonu kullanılmıştır.

$$a = \frac{2}{(1 + e^{-2n})} - 1 \quad (3.19)$$

Çıkış katmanında ise $x = y$ şeklinde doğrusal bir fonksiyon kullanılmıştır. Eğitim algoritması olarak "Lavenberg-Marquardt" geriye yayılım algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma Newton ve Gradyen Azalması algoritmalarının pozitif özellikleri kullanılarak oluşturulmuş bir algoritmadır, [48]. Hessian matrisinin kullanılması Newton yöntemine ait bir özellikken, ileride bahsedilecek olan Marquardt katsayısının büyük olduğu durumlarda, Newton algoritması küçük adımlı Gradyen Azalması yöntemi haline gelir.



Şekil 3. 6 YSA Yapısı

Newton yönteminde Hessian matrisinin oluşturulması, eğitimin temel adımını oluşturur. Hessian matrisi,

$$H(n) = \frac{dE(n)}{dW^2(n-1)} \quad (3.20)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada “E” performans fonksiyonu, “W” ağıın sinir bağlantı ağırlığıdır. Performans fonksiyonu olarak ortalama karesel hata kullanılmıştır. Normalde Hessian matrisi ileri beslemeli ağılar için çok karmaşık olduğundan Lavanberg-Marquardt algoritmasında bu matrisin aşağıdaki yaklaşık değeri kullanılmıştır.

$$H(n) = J^T(n) \cdot J(n) + \mu \cdot I \quad (3.21)$$

Burada, “J”, jakobiyeen matrisi, “μ” Marquardt katsayısı, “I” birim matristir. Jakobiyeen Matrisi (3.22) numaralı denklem ile hesaplanmaktadır. Ağ gradyanı ise (3.23) formülü ile belirlenebilmektedir.

$$J(n) = \frac{\partial e(n)}{\partial W(n)} \quad (3.22)$$

$$g(n) = J^T(n) \cdot e(n) \quad (3.23)$$

Ağa ait ağırlıklar denklem (3.24) belirtildiği gibi değiştirilir.

$$W(n+1) = W(n) - [H(n)]^{-1} \cdot g(n) \quad (3.24)$$

Sayısal bir büyüklük olan μ, Marquardt katsayısı, başarılı her adımdan sonra azaltılır. Böylece bu yöntemde her iterasyon sonrasında performans fonksiyonu azaltılmış olur. Performans fonksiyonu olarak ortalama karesel hata kullanıldığı için her iterasyon sonunda ortalama karesel hata azalacaktır. Bu da ağırlıklardaki değişimi bir süre sonra minimum seviyeye getirecek ve ağ eğitimi tamamlanmış olacaktır.

Şekil 3.6 'da oluşturulan YSA yapısı yukarıda bahsedilen yöntemle Matlab Neural Networks Toolbox kullanılarak eğitilmiştir. Eğitim sonucunda elde edilen ağırlık ve eşik değerleri ağ yapıda yerine konulur.

Çevrimdışı olarak elde edilen ağırlıklar, çevrim içi çalıştırılmak üzere Şekil 3.6' da yerine konulursa aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$\mathbf{L} = [\mathbf{L}_1 \quad \mathbf{L}_2 \quad \mathbf{L}_3 \quad \mathbf{L}_4 \quad \mathbf{L}_5 \quad \mathbf{L}_6] \text{ olmak üzere,}$$

$$\vec{U}_1 = \mathbf{L} \cdot \vec{W}_1 + \vec{B}_1 \quad (3.25)$$

$$\vec{O}_1 = \frac{2}{1 + e^{-2\vec{U}_1}} \quad (3.26)$$

$$\begin{aligned} \vec{U}_2 &= \vec{O}_1 \cdot \vec{W}_2 + \vec{B}_2 \\ \vec{X} &= \vec{U}_2 \end{aligned} \quad (3.27)$$

Denklem (3.25) ve denklem (3.26), Denklem (3.27) de yerine konulursa YSA çıkışı aşağıdaki şekilde çevrimiçi olarak hesaplanabilir.

$$\begin{aligned} \vec{X} &= \frac{2}{1 + e^{-2(\mathbf{L} \cdot \vec{W}_1 + \vec{B}_1)}} \cdot \vec{W}_2 + \vec{B}_2 \\ \vec{X} &= (x, y, z, \alpha, \beta, \gamma) \end{aligned} \quad (3.28)$$

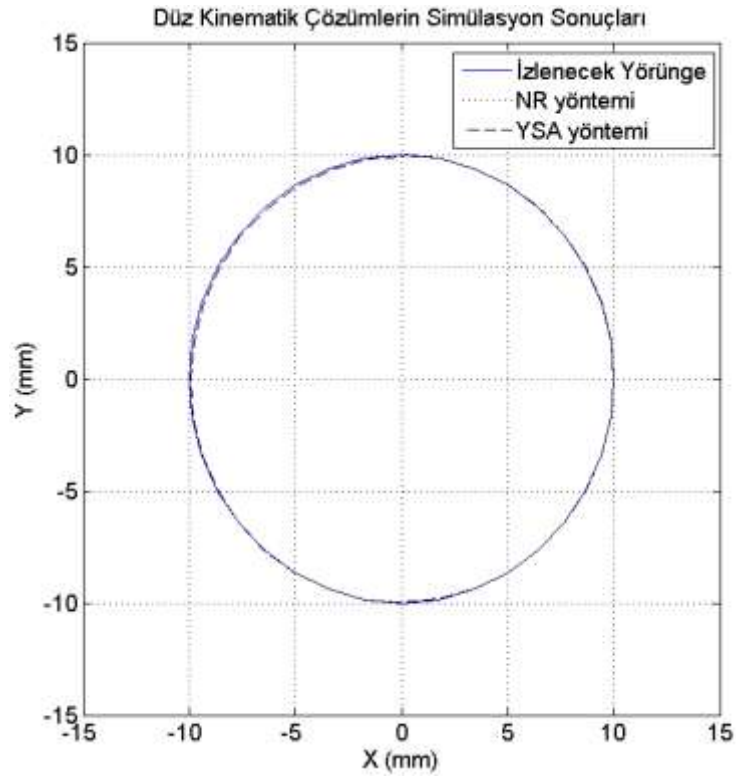
Gizli katmanda bulunan hücre sayısı ile YSA performansının değişimini görmek için eşit eğitim verileri kullanılarak ağ 40, 20 ve 10 sinir hücresiyle test edilmiştir. Çizelge 3.1' de belirtilen sayıda gizli katman hücresinden oluşan YSA yapılarının eğitim zamanı performansı ve marquard katsayısı verilmektedir.

Çizelge 3. 1 Değişik hücre sayıları ile eğitilmiş YSA yapılarının performanslarının karşılaştırılması

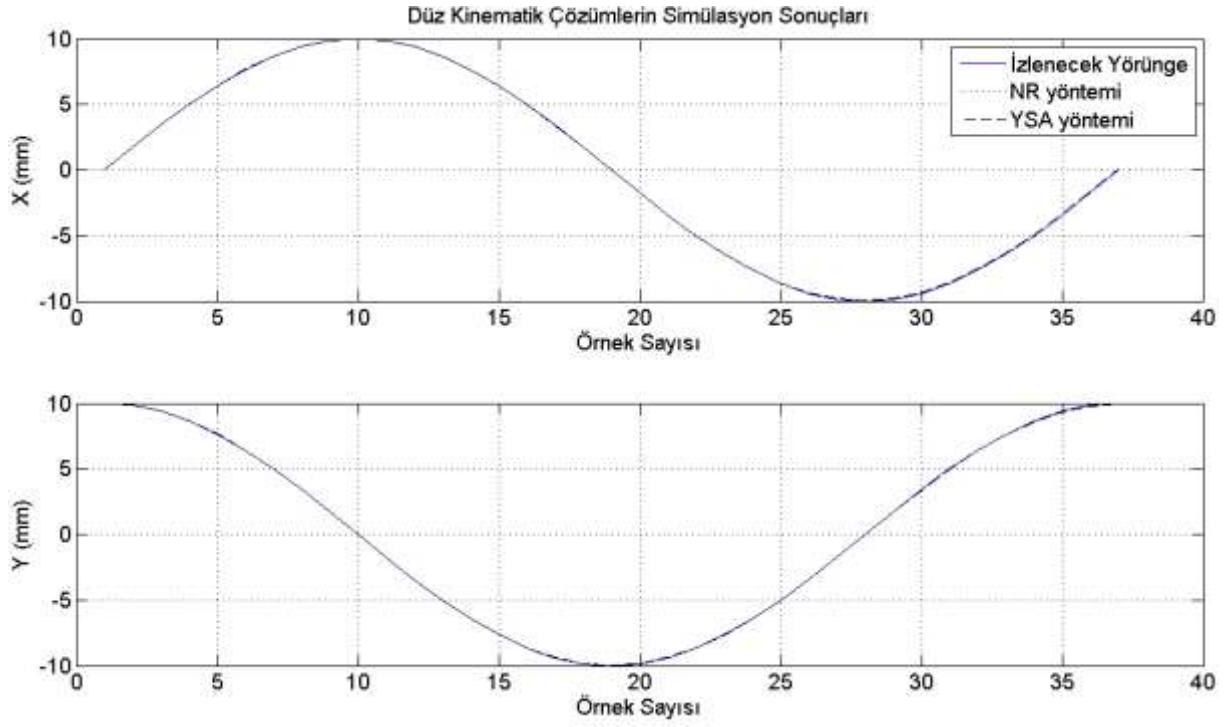
Hücre Sayısı	Eğitim Zamanı	Performans (MSE)	Marquard Katsayısı (μ)
40 hücre	611 s	$1,91 \times 10^{-8}$	10^{-6}
20 hücre	282 s	$4,28 \cdot 10^{-7}$	10^{-6}
10 hücre	190 s	$4,82 \cdot 10^{-6}$	10^{-7}

3.2.3 Düz Kinematik Çözüm Yöntemlerinin Karşılaştırılması

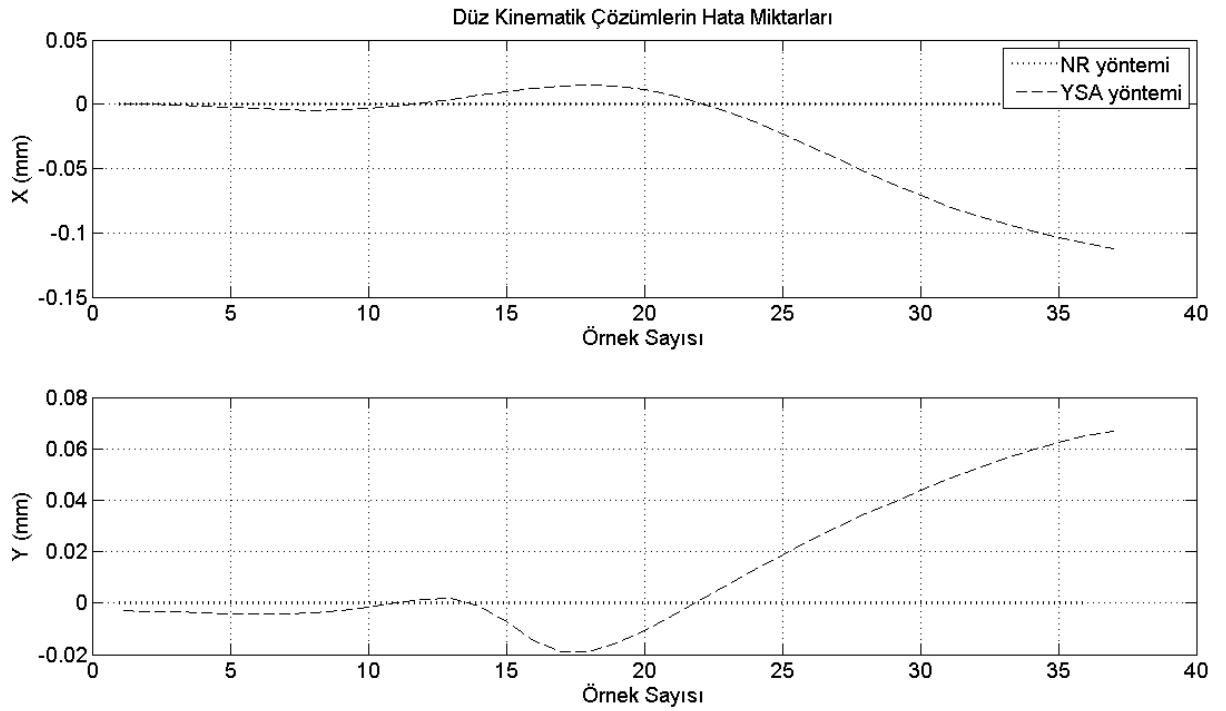
Düz kinematik çözümlerin benzetiminde, Şekil 3.7’ deki 10 mm yarıçaplı daire şeklinde bir yörünge kullanılmıştır. Şekil 3.8’ de görüleceği gibi düz kinematik çözümlerin hata miktarları çok düşük olmakla birlikte yörüngeden herhangi bir sapma olmamaktadır. Şekil 3.9’ da düz kinematik yöntemlerin hata miktarları verilmektedir. Grafiklerden de görüleceği gibi Newton Raphson yöntemi YSA yöntemine göre çok az farklı sonuç vermektedir.



Şekil 3. 7 İzlenecek yörünge ile çözüm yöntemlerinin simülasyon sonuçlarının x-y düzleminde karşılaştırılması.



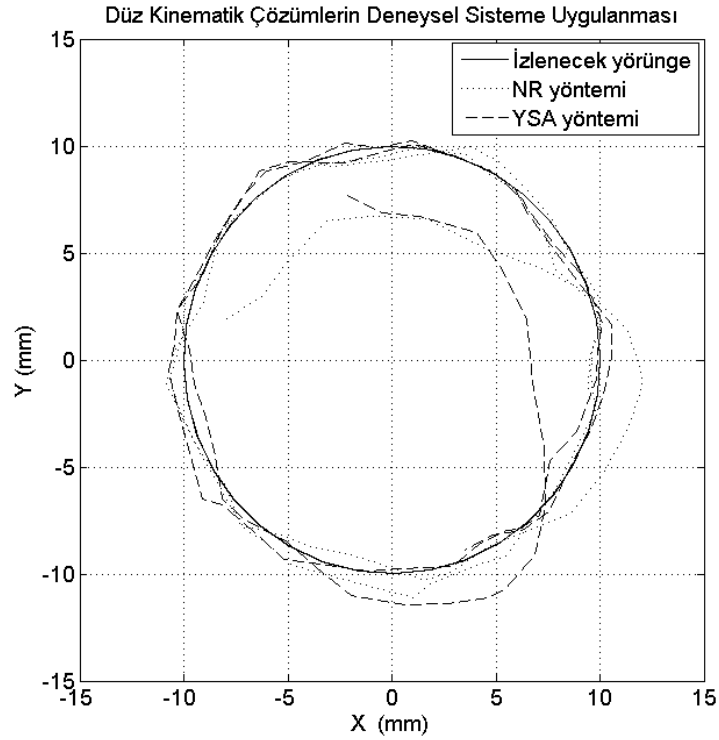
Şekil 3. 8 İzlenecek yörünge ile çözüm yöntemlerinin simülasyon sonuçlarının, ilgili eksenlerde karşılaştırılması.



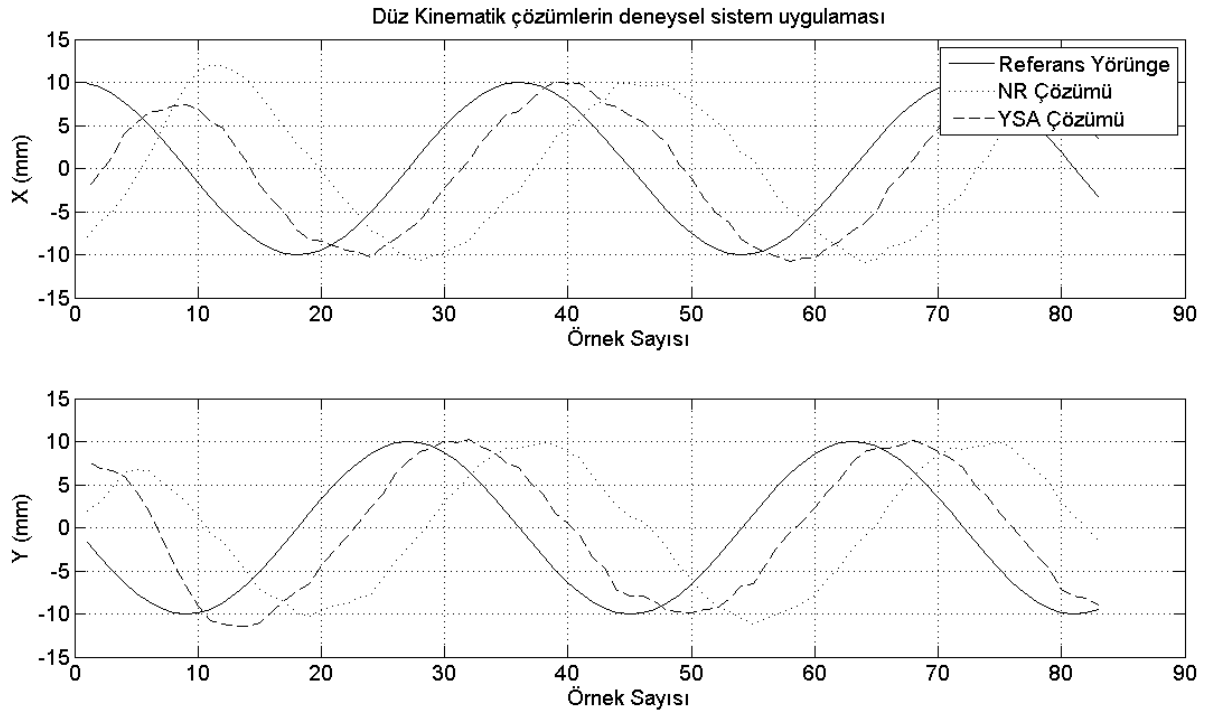
Şekil 3. 9 Çözüm yöntemlerinin simülasyon sonuçlarından, izlenen yörünge ile elde edilen hata miktarları.

Deneyisel uygulamada da sisteme Şekil 3.10' da görüldüğü gibi 10 mm yarıçaplı bir daire yörünge olarak verilmiştir. Deney yapılırken iki çözüm yöntemi de aynı anda çalışmak suretiyle veriler alınmıştır. Şekil 3.11' de iki eksene ait deney sonuçları verilmektedir. Bu

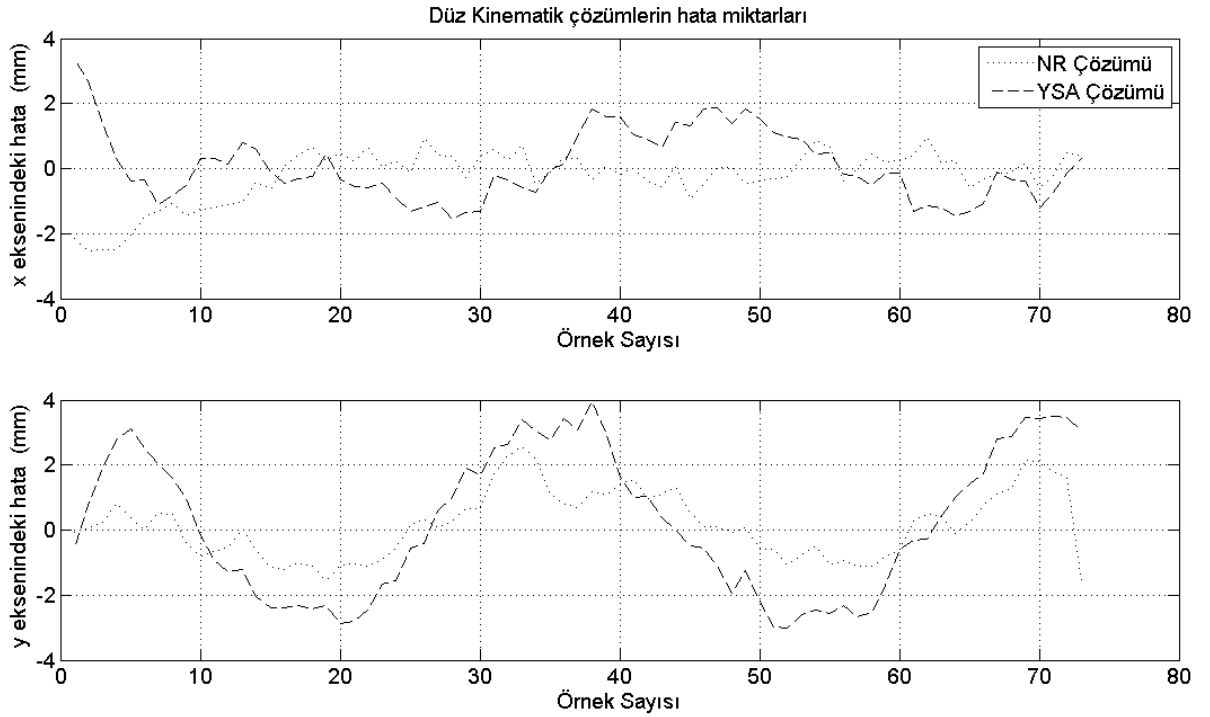
grafikte düz kinematik çözüm yöntemleri, yörüngeyi, sabit zaman aralıklarıyla geriden takip etmektedir. Bunun birinci sebebi, deneysel sistemin kontrol çevrimini de içermesidir. Dolayısıyla kontrol çevrimi de aynı süreçte yer aldığı için bir gecikmeye sebep olmaktadır. Newton-Raphson yönteminin YSA yönteminden daha geç cevap vermesinin sebebi, iteratif bir yöntem olması ve iterasyon miktarının değişken olması olarak özetlenebilir. Şekil 3.12’de verilen hata miktarlarına bakıldığı zaman simülasyonlarından farklı olarak hata miktarları oldukça yüksek ve Newton-Raphson’a ait hata miktarları YSA’ya göre daha düşüktür.



Şekil 3. 10 Çözüm yöntemlerinin deneysel sisteme uygulanması ve sonuçların x-y düzleminde gösterimi.



Şekil 3. 11 Çözüm yöntemlerinin deneysel sisteme uygulanması ve sonuçların zaman cevabı.



Şekil 3. 12 Deneysel sistemde uygulanan düz kinematik yöntemlerin hatalarının karşılaştırılması.

Hata miktarlarının yüksekliğine sebep olarak yatak boşluklarının ve platform esnekliği toplamının, x ve y eksenlerinde 8 mm ye kadar çıkması gösterilebilir. Yatak boşlukları hareketli platforma x ve y eksenlerine bir işaretleyici sabitlenmesi ve işaretleyicinin önüne de yere sabit bir plaka konularak, tüm motorlar enerjili halde iken platformun bu eksenler

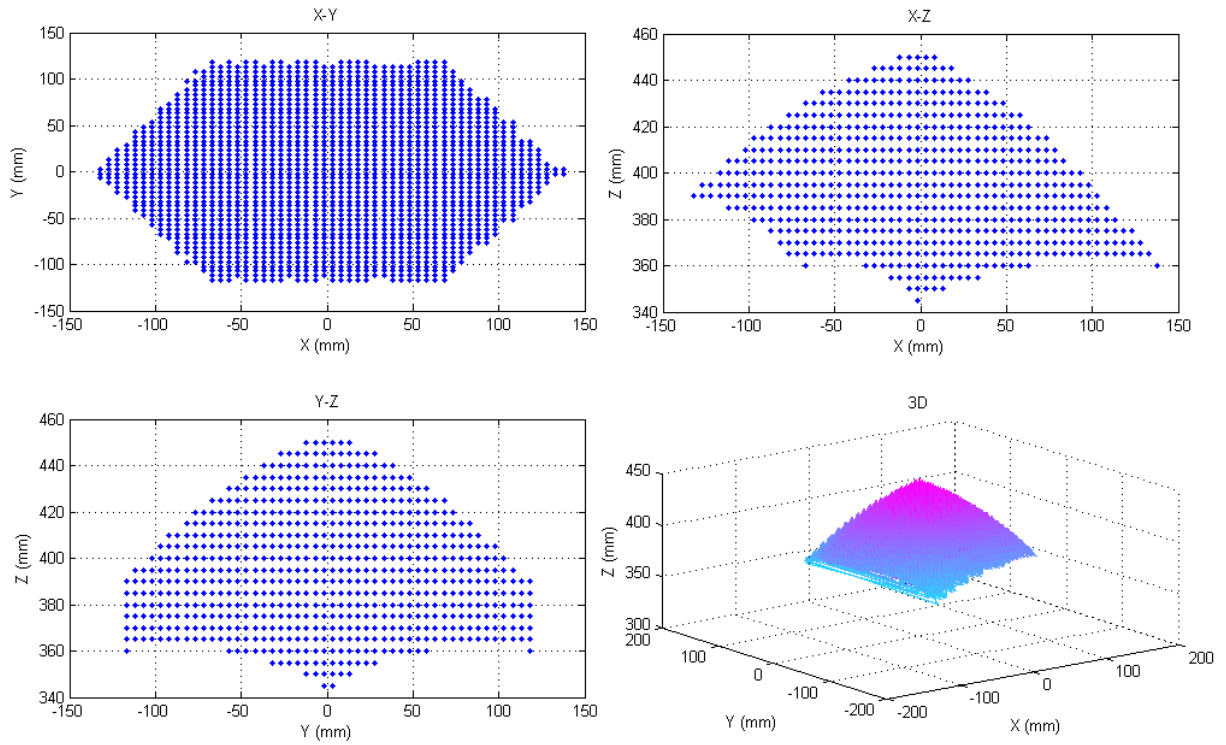
dâhilinde zorlanması suretiyle işaretleyicilerin plakalar üzerine çizdikleri çizgilerin ölçülmesi ile tespit edilmiştir. Şekil 3.1' de görüldüğü gibi x eksenindeki eklem boşluğunu ve esnekliğini ölçmek için işaretçi y eksenine paralel yerleştirilmiş ve şekildeki 8 mm'lik CD doğru parçasını çizdiği gözlenmiştir. Aynı düşünceyle y eksenindeki eklem boşluğunu ve esnekliğini ölçmek için ise işaretçi x eksenine paralel yerleştirilmiş ve şekildeki 8 mm'lik AB doğru parçasını çizdiği gözlenmiştir. Yatak boşlukları ve sistem esnekliği göz önüne alındığında hata miktarları her iki yöntem için de kabul edilebilir olmakla beraber, çevrim içi hız olarak YSA yöntemi Newton-Raphson yönteminden daha hızlı yanıt vermektedir.

3.3 Çalışma Uzayı Analizi

Çalışma uzayı aktif ve pasif birleşme noktaları ile bacak boylarına bağlı olarak hareketli platformun ağırlık merkezinin ulaşabileceği yer olarak tanımlanabilir. Çalışma uzayını etkileyen bazı kısıtlar vardır. Bunlar; bacak boylarının limitleri, bağların hareket limitleri, bacakların çarpışması ve oluşabilecek tekilliklerdir. Yapılan çalışma uzayı analizinde sadece bacak limitleri göz önünde bulundurulmuştur.

Yapılan çalışmada ters kinematik yöntemle çalışma uzayı analizi, öteleme ve dönme çalışma uzayı olarak iki bölümde yapılmıştır.

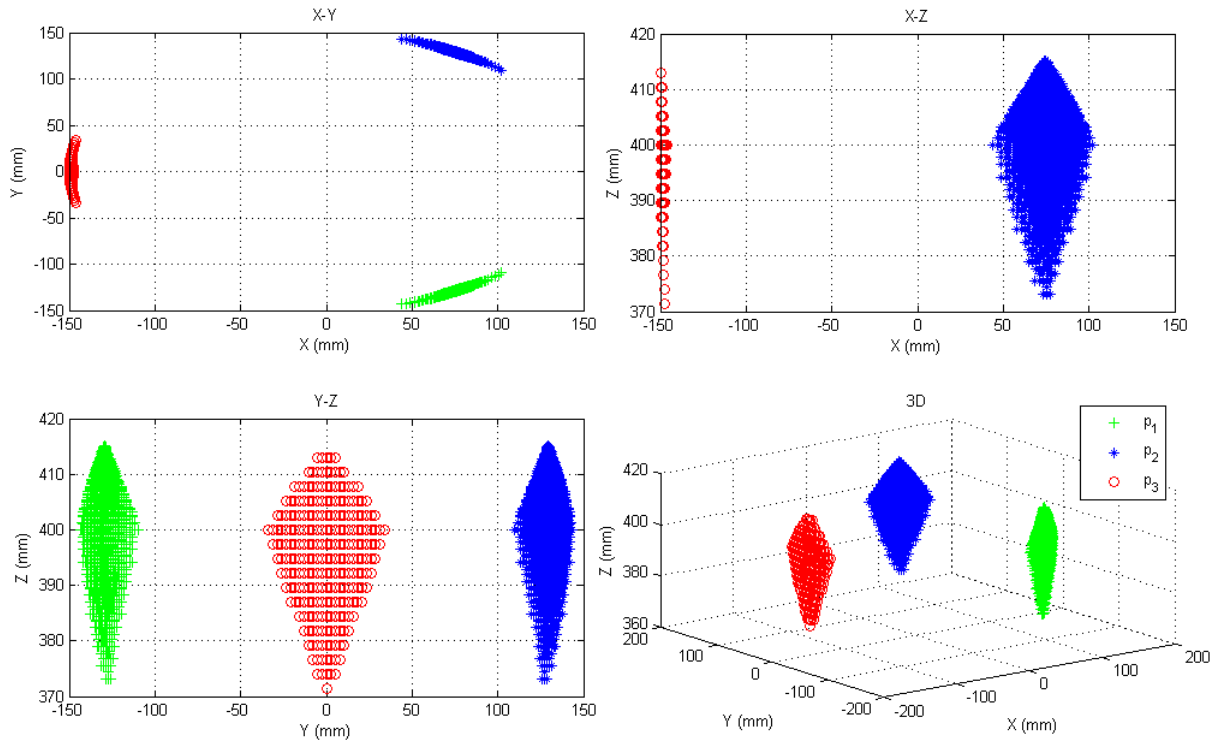
SPM' nın öteleme limitlerini çalışma uzayı olarak ifade etmek için, platformun ağırlık merkezinin koordinatları "x, y, z" eksenlerinde maksimum bacak uzunluğundan minimum bacak uzunluğuna kadar ters kinematik denklemler ile "5 mm" aralıklarla taranmıştır. Her bir adımda hesaplanan bacak boylarının bacak limitlerini aşıp aşmadığına bakılmış ve sağlayan noktalar bir matrise toplanmıştır. Burada çalışma uzayını etkileyen en önemli faktör olan bacak limitleri dikkate alınmıştır. Bölüm 2.2' de verilen ölçülerdeki 3x3 SPM' nın öteleme çalışma uzayı Şekil 3.13' de verilmiştir.



Şekil 3. 13 3x3 Stewart Platform Mekanizmasına ait öteleme çalışma uzayı gösterimleri.

Şekil 3.13’ de gösterilen grafiklerde bulunan noktalar kümesi 3x3 SPM’ nin sadece 3 eksenle öteleme yaparak bacak limitleri dâhilinde uzayda gidebileceği noktaları göstermektedir. Sıfır konumu olarak “z” ekseninde 400 mm yükseklik değeri kabul edildiği takdirde, “x” ekseninde -117 mm’den +93 mm’ye kadar ; “y” ekseninde ise -102 mm’ den +102 mm’ye kadar yer değiştirme yapabileceği, “z” ekseninde ise 345 mm’den 450 mm’ye kadar yükselebileceği görülmektedir.

Sistemin açısal limitlerini bulmak için ise “x” ve “y” ekseninde maksimum ötelemeye sahip “z=400 mm” konumu sıfır konumu yani sistemin 3 eksenle de maksimum öteleme yapabileceği konum olarak seçilmiştir. Sistem “x=0, y=0, z=400 mm” sıfır konumunda iken yine ters kinematik denklemler kullanılarak üç rotasyon eksenini olan “ γ, β, α ” açıları -45 dereceden +45 dereceye 1 derecelik adımlarla bacak limitleri göz önünde bulundurularak taranmıştır. Bacak limitlerini aşmayan üst platform bağlantı noktalarının konumları kaydedilmiş ve Şekil 3.14’ de gösterilmektedir.



Şekil 3. 14 3x3 Stewart Platform Mekanizmasının Sıfır konumunda Açısal Çalışma Uzayı.

Şekil 3.14' de "+,*," ile gösterilen noktalar kümesi sırasıyla " p_1, p_2, p_3 " bağlantı noktalarını göstermektedir. Şekil 3.13' e göre sistem " $x=0, y=0, z=400$ mm" sıfır konumunda iken " z " ekseninde 26 derece, " x, y " eksenlerinde ise yaklaşık 32 derecelik açısal hareket yapabilmektedir. Sıfır konumu sistemin en fazla açısal hareket yapabildiği konumu oluşturmaktadır. Çünkü bu konumdayken bacaklardaki doğrusal motorların mili motor gövdesinin yarı hızındadır ve bu sebeple üst platformun açısal hareket kabiliyeti bu konumda iken en yüksek seviyededir.

BÖLÜM 4

STEWART PLATFORM MEKANİZMASININ DİNAMİĞİ

Genel olarak mekanik sistemlerin dinamik modellenmesinde Newton metodu veya Lagrange metodu kullanılmıştır. Mekanik sistemlerin dinamik modellenmesinde bu iki metoda alternatif olarak Bağ-grafik metodu da kullanılmaktadır.

4.1 Modellemede Bağ-grafik Yöntemi

Bağ-grafik metodu ilk olarak 1959’ da Prof.H. M. Paynter tarafından ortaya konulmuştur. Bu metod sistemi oluşturan fiziksel elemanlar arasındaki güç veya enerji akışını enerji bağlarını kullanarak tanımlayan bir matematik modelleme yöntemidir.

Bu metod üzerine birçok araştırmacı çalışmalarda bulunmuştur. Bunlardan Karnopp (1975), Rosenberg (1975), Thoma (1990) bağ-grafik metodunu hidrolik, mekatronik ve termodinamik sistemlere uygulamışlardır [49-50-51].

Bu çalışmada bir 3x3 Stewart Platform Mekanizmasının bağ-grafik yöntemi ile modellenmesi ele alınmıştır.

4.1.1 Bağ-grafik Yönteminde Fiziksel Sistem Elemanları

Diğer grafik yöntemler gibi bağ-grafik yönteminde de mekanik veya elektriksel sistem elemanlarının basite indirgenerek sembolize edilmesi önemlidir. Bu elemanlar sistemlerdeki güç akışı karşısındaki eğilimlerine göre uçları birbirine paralel veya seri bağlı farzedilir. Sistemlerde iki uçlu elemanlar olabileceği gibi ikiden fazla ucu olan elemanlar da mevcut olabilir.

Sistem elemanları güç akışına göre birbirlerine enerji kapıları ile bağlıdır. Enerji akışının gerçekleşmesini sağlayan iki temel değişken vardır. Bu değişkenlere iç ve uç değişken adı verilir. Bu değişkenler arasındaki matematiksel bağıntıya ise elemanların uç denklemi adı verilir.

Fiziksel sistem elemanları Şekil 4.1' de sınıflandırılmıştır.

4.1.1.1 Aktif Elemanlar

Ürettikleri enerji ile sistemi tahrik eden elemanlardır. İç değişken kaynağı ve uç değişken kaynağı olmak üzere iki tip aktif eleman mevcuttur.

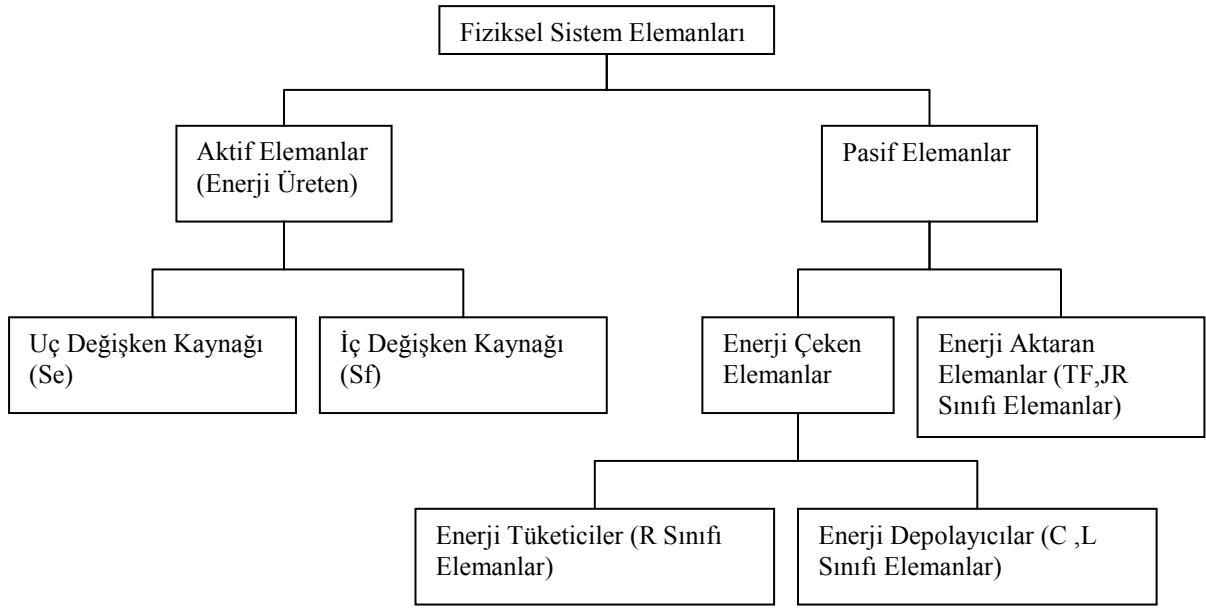
Mekanik sistemlerde uç değişken kaynağı hız veya açısal hız olarak seçilebilir. İç değişken kaynağı olarak da kuvvet ve moment seçilir.

4.1.1.2 Pasif Elemanlar

Sisteme verilen veya bağlı bulundukları enerji kapılarından gelen enerjiyi kullanan elemanlardır. Mekanik sistemlerde sürtünme ve sönüm, elektriksel sistemlerde ise elektriksel direnç pasif elemanları temsil eder.

Enerji depolayan elemanlar sisteme verilen veya bağlı bulundukları enerji kapılarından aldıkları enerjiyi depolayan elemanlardır. Bu tip elemanlar da kendi içinde endüktans ve kapasite sınıfı elemanlar olarak ikiye ayrılır. Mekanik sistemlerde kütle ve atalet kapasite sınıfı elemanları oluşturur. Yay ise endüktans sınıfı elemandır.

Enerji aktaran elemanlar sisteme verilen veya bağlı bulundukları enerji kapısından aldıkları enerjiyi başka bir enerji kapısına aktarırlar. İki tip enerji aktaran eleman vardır. Trafo (TF) sınıfı elemanlar aldıkları enerjiyi aktarırken aynı tip değişkenler arasında belirli bir oranda aktarılmasını sağlar. Jirator (JR) sınıfı elemanlar ise enerjiyi aktarırken farklı tip değişkenler arasında belirli bir oranda aktarılmasını sağlar. Mekanik sistemlerde dişli kutusu bir uçdeğişkeni başka bir uç değişkene dönüştürdüğünden trafo sınıfı elemana, mekanik piston ise bir uç değişkeni bir içdeğişkene dönüştürdüğünden jiratore örnek olarak gösterilebilir.



Şekil 4. 1 Fiziksel sistem elemanlarının sınıflandırılması (Sağırlı, 1996)

4.1.1.3 Enerji Kapıları

Sistem elemanlarının enerji alış verişinde bulunduğu düğüm noktalarına enerji kapısı adı verilir. İki tip enerji kapısı mevcuttur.

Seri “1” enerji kapılarında iç değişkenler ortaktır ve birbirine eşittir. Paralel “0” enerji kapılarında ise uç değişkenler ortaktır. Mekanik sistemlerde “v” uç değişken “f” iç değişken olmak üzere “1” kapısında;

$$f_1 = f_2 = \dots = f_n$$

ve

$$v_1 + v_2 + \dots + v_n = 0$$

bağıntıları kurulabilir. “0” kapısında ise;

$$f_1 + f_2 + \dots + f_n = 0$$

ve

$$v_1 = v_2 = \dots = v_n$$

bağıntıları mevcuttur.

4.1.1.4 Enerji Bağları

Enerji kapıları ve sistem elemanları arasındaki enerji akışını enerji bağları sağlar. Enerjinin pozitif akış yönünü göstermek için enerji bağının ucuna yarım ok konulur (Çizelge 4.1).

4.1.2 Sistem Değişkenlerinin Referans Yönlerinin Tanımlanması ve Nedensellik

Fiziksel sistemlerde sistem değişkenlerinin referans yönlerinin tanımlanması önemlidir. Bağ-Grafik modellemede sistem değişkenlerinin yönlerini göstermek üzere enerji bağlarında nokta ve çizgi kullanılır. Enerji bağının ucuna çizilen dik çizgi uç değişkenin pozitif yönünü gösterir. İç değişkenin pozitif yönü ise enerji bağının çizgisiz olan kısmı olacaktır ve nokta ile ifade edilir (Çizelge 4.1).

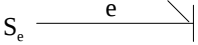
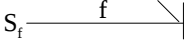
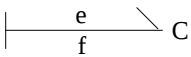
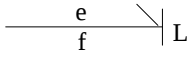
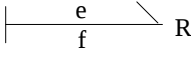
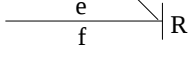
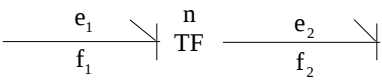
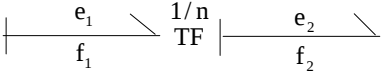
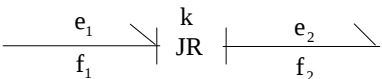
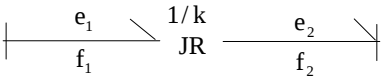
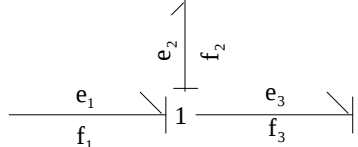
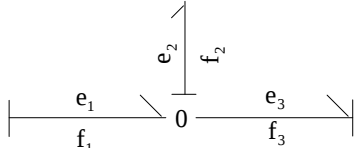
Bir enerji kapısına giren değişken bağımsız değişken olarak tanımlanır. Kapıdan ayrılan değişken ise bağımlı değişkendir. Matematik model oluşturulurken iç bağ değişkenleri yok edilerek model dış bağların bağımsız değişkenleri cinsinden ifade edilir.

Sistemde nokta ve çizgi seçimine ait kurallar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Uç değişken kaynağı enerji kapısına çizgi şeklinde girer.
- İç değişken kaynağı enerji kapısına nokta şeklinde girer.
- Trafo sınıfı elemanlara enerji nokta şeklinde giriyorsa nokta şeklinde çıkar, çizgi şeklinde giriyorsa çizgi şeklinde çıkar.
- “1” kapısına ancak bir tek nokta girebilir.
- “0” kapısına ancak bir tek çizgi girebilir.

Bağ-grafik elemanlarına ait nokta, çizgi yaklaşımı ve uç denklemler “Çizelge 4.1” de verilmiştir.

Çizelge 4. 1 Bağ-grafik elemanlarının gösterimi ve uç denklemleri

Fiziksel Sistem Elemanları	Bond-Graph modeli	Uç Denklemi
Uç Değişken Kaynağı		$S_e = e(t)$
İç Değişken Kaynağı		$S_f = f(t)$
Kapasite Sınıfı Eleman		$e = 1/C \int f \cdot dt$
Endüktans Sınıfı Eleman		$f = 1/C \int e \cdot dt$
Direnç Sınıfı Eleman		$e = R \cdot f$
		$f = 1/R \cdot e$
Trafo Sınıfı Eleman		$f_1 = n \cdot f_2$ $e_2 = n \cdot e_1$
		$f_2 = (1/n) f_1$ $e_1 = (1/n) e_2$
Jirator Sınıfı Eleman		$f_1 = k \cdot e_2$ $f_2 = k \cdot e_1$
		$e_1 = (1/k) f_2$ $e_2 = (1/k) f_1$
Seri Kapısı		$e_1 - e_2 = e_3$ $f_1 = f_2 = f_3$
Paralel Kapısı		$e_1 = e_2 = e_3$ $f_1 - f_2 = f_3$

4.1.2.1 Nedensellik

Nedensellik bir sisteme etki eden gücün etkileri arasındaki sebep ve sonuç ilişkisi olarak görülebilir. Bir motor ve motora bağlı bir yükten oluşan mekanik bir sistem göz önüne alınırsa, motorda üretilen gücün yüke doğru akması esnasında motor için gerekli tork miktarını yükün belirlemesi, buna paralel olarak motorun da hızını bu torka göre ayarlaması sistemlerdeki nedenselliğe bir örnek olarak verilebilir.

Dinamik sistem elemanlarından endüktans “L” sınıfı elemanda iç değişken, uç değişkenin integrali ile orantılıdır. Bu elemanın bir yay olduğu düşünülürse yayın hızı (sebep) bir kuvvet üretmesine (sonuç) neden oluyor denilebilir. Aynı şekilde kapasite “C” sınıfı elemanda ise uç değişken, iç değişkenin integrali ile orantılıdır. Bu elemanın bir kütle olduğu düşünülürse kütle üzerine etkiyen kuvvet kütle üzerinde hızlanmaya neden oluyor denilebilir. Bu tip nedenselliklere “integral nedensellik” denilir.

Direnç sınıfı elemanlarda zaman integrali söz konusu olmadığı için nedensellik söz konusu değildir. Nedensellik enerji depolayan elemanlarda söz konusudur.

Paralel bağlantı noktalarında (“0”) sadece bir eleman iç değişken bilgisini taşımaktadır. Bunu belirtmek için bu eleman paralel enerji kapısında kapalı uçlu ya da çizgi şeklinde gösterilir. Seri enerji kapısında (“1”) ise sadece bir eleman uç değişken bilgisini taşımaktadır. Bunu belirtmek için ise bu eleman seri enerji kapısında açık uçlu ya da nokta şeklinde gösterilir.

Bağ-grafik modellemede depo tipi elemanlar (C ve L) için uygun nedensellik integral nedenselliktir. Ancak bazen nedenselliğin ters çevrilmesi gerekebilir. Yani dinamik elemanın ilişkisini diferansiyel denklemler ile yazmak gerekebilir. Örneğin bir yayın hızı, yaya etkiyen kuvvetin zamana göre türevinin yay katsayısına oranıdır. Bu duruma ise “Türevsel nedensellik” denilir. İntegral nedensellik geçmişten şimdiye kadar olan bilgilere dayanmaktadır. Ancak türevsel nedensellikte bilginin şimdiye ve geleceğe ait olması gerekmektedir ki bu da mümkün olmadığından türevsel nedensellik sistemi geleceğe bağımlı kılar.

Mekanik sistemlerin bağ-grafik modellenmesinde sistemdeki atalet elemanlarının sayısı, sistemin serbestlik derecesinden fazla ise türevsel nedensellik problemi ortaya çıkmaktadır. Bu problem, atalet elemanlarının sayısının serbestlik derecesinin sayısına eşitlenerek çözülebilir. Örneğin, rijit bir sisteme elastiklik ekleyerek atalet elemanlarının sayısı sabit

tutulabilir ve serbestlik derecesi artırılabilir. Bu yöntemin dezavantajı durum değişkenlerinin sayısının artmasıdır. Diğer bir yöntem ise atalet elemanlarının hızları arasındaki bağıntıdan faydalanılarak sanal bir atalet elemanı oluşturulur ve atalet elemanlarının sayısı azaltılarak serbestlik derecesine eşitlenir.

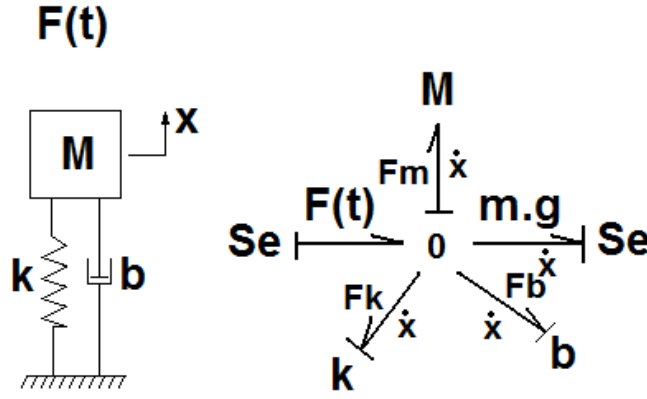
4.1.3 Matematiksel Durum Denklemleri

Sistemlerin bağ-grafik modellerinde durum değişkenleri kapasite sınıfı elemanların uç değişkenleri ile endüktans sınıfı elemanların iç değişkenleri arasından seçilir. Durum denklemlerinin çıkarılabilmesi için öncelikle sistemin bağ-grafik modeli çıkartılır ve enerji bağlarının güç akış yönleri tespit edilir. Nokta, çizgi seçimi de yapıldıktan sonra durum değişkenleri tespit edilir. Durum değişkenlerinden başlamak üzere sistemdeki bağımlı değişkenler, bağımsız değişkenler cinsinden ifade edilir. Enerji kapılarında denklemler yazılarak durum denklemleri elde edilir.

Fiziksel sistemin bağ-grafik modeli oluşturulurken enerji bağlarının yönü ve işareti önemlidir. Mekanik sistemlerde enerji bağlarının işaret seçimi aşağıdaki maddeler dikkate alınarak yapılmalıdır.

- Doğrusal hız veya açısal hız kaynakları çizgi şeklinde girmelidir.
- Kuvvet veya moment kaynakları nokta şeklinde girmelidir.
- Kütle veya atalet elemanı çizgide olmalıdır.
- Yay elemanı noktada olmalıdır.
- İki kapılı elemanlarda giriş çizgide ise çıkış noktada veya tersi olacak şekilde seçilmelidir.
- Bu işlemlerden sonra sönüm elemanlarının ve enerji kapılarının işaretleri “Çizelge 4.1” dikkate alınarak konulmalıdır.

Durum denklemlerinin çıkarılmasına dair bir örnek olarak şekil 4.2’deki kütle yay sistemi verilebilir.



Şekil 4. 2 Kütle-yay sistemi ve bağ-grafik modeli

Şekil 4.2 de verilen modelde tüm dinamik elemanların hızları birbirine eşit olup $\dot{x}$ olarak gösterilmektedir. Eşit uç değişken kavramı, burada kullanılacak enerji kapısının paralel olması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu durumda bu kapıya ait iç değişkenlerin toplamı sıfır olmalıdır. Şekil 4.2 de verilen modelin bağ-grafik denklemlerinin çıkartılması ayrıntılı olarak Ek-7 de verilmektedir.

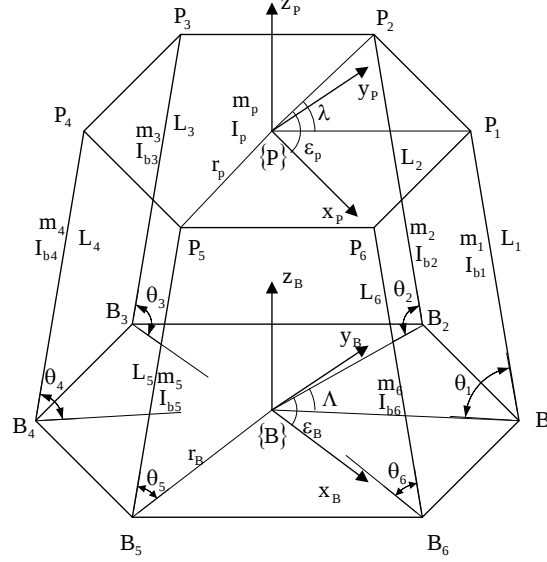
4.2 Bağ-grafik Metodu İle Sistemin Modellenmesi

Stewart Platform Mekanizması uzaysal hareket edebilen bir sistem olmasından dolayı bağ-grafik modellenmesi oldukça karmaşıktır. Sistem modellenirken bölüm 3.1’ de değinilen ters kinematik denklemlerden yararlanılmıştır. Stewart Platform Mekanizmasının bağ-grafik modeli, “Enerjinin sistem değişkenleri vasıtasıyla tahrik elemanlarından bacaklara ve bacaklardan hareketli üst platforma aktarıldığı” şeklindeki kinematik zincir göz önüne alınarak oluşturulmuştur. Modellemede bağ grafik yöntemin tercih edilmesinin sebeplerinden birisi, bağ grafik yöntemde sistemdeki enerji dönüşüm ve akışının çok daha net görülmesi ve anlaşılmasıdır. Modellemede kullanılan varsayımlar aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Hareketli platformun ağırlık merkezi üst platforma ait eksen takımının merkezi olarak belirlenmiştir.
- Platform bacaklarının ağırlık merkezi alt bağlantı noktasından bacak uzunluğunun 2/3’ü kadar yukarıda olacak şekilde tespit edilmiştir.
- Harici kuvvet ve moment girişleri ihmal edilmiştir.

- Yatak sürtünmeleri ve yerçekimi etkisi sisteme dahil edilmiş, bacak elastikliği ihmal edilmiştir.

4.2.1 Sistemin Kinematiği ve Kinematik Bağ-grafik Model



Şekil 4. 3 6x6 Stewart platform mekanizması

Bir bacağına ait doğrusal hız bacakların eksen takımına ait birim vektör ile bacağın vektörel hızının çarpımı ile (4.1) de verildiği gibi bulunabilir.

$$\dot{\vec{L}}_i = \vec{s}_i \bullet \dot{\vec{S}}_i \quad (4.1)$$

Burada bacaklara ait vektörel hız ise bacakların üst platforma bağlandıkları noktanın açısal hızı ile doğrusal hızının toplamı yolu ile aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

$$\dot{\vec{S}}_i = \vec{\omega} \times^B \vec{P}_i + \dot{\vec{t}} \quad (4.2)$$

Bu denklem (4.1) eşitliğinde yerine konulursa bacak için doğrusal hız (4.3)' de verildiği gibi olacaktır.

$$\dot{\vec{L}}_i = \vec{s}_i \left(\vec{\omega} \times \vec{q}_i + \dot{\vec{t}} \right) \quad (4.3)$$

(4.3) ifadesinin açık hali (4.4)'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} \dot{\vec{L}}_i = & \omega_y s_{ix} q_{iz} - \omega_z s_{ix} q_{iy} + \dot{t}_x s_{ix} + \omega_z s_{iy} q_{ix} - \omega_x s_{iy} q_{iz} + s_{iy} \dot{t}_y \\ & + \omega_x s_{iz} q_{iy} - \omega_y s_{iz} q_{ix} + s_{iz} \dot{t}_z \end{aligned} \quad (4.4)$$

Bu ifade hareketli platformun hızları cinsinden aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\dot{\mathbf{L}}_i = \underbrace{\begin{bmatrix} s_{iz}q_{iy} - s_{iy}q_{iz} & s_{ix}q_{iz} - s_{iz}q_{ix} & s_{iy}q_{ix} - s_{ix}q_{iy} & s_{ix} & s_{iy} & s_{iz} \end{bmatrix}}_{\mathbf{K}^{Li}} \cdot \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \\ \dot{t}_x \\ \dot{t}_y \\ \dot{t}_z \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

(4.5) ifadesi aşağıdaki şekilde kısaltılabilir.

$$\dot{\mathbf{L}}_i = \mathbf{K}^{Li} \begin{bmatrix} \vec{\omega} \\ \dot{\mathbf{t}} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Bacaklara ait açısal hız (4.7) denkleminde verildiği üzere bulunabilir.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_{ix} \\ \dot{\theta}_{iy} \\ \dot{\theta}_{iz} \end{bmatrix} = \left(\mathbf{s}_i \times \dot{\mathbf{S}}_i \right) / L_i \quad (4.7)$$

Bu ifade daha açık bir şekilde (4.8) eşitliğinde verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_{ix} \\ \dot{\theta}_{iy} \\ \dot{\theta}_{iz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_x s_{iy} q_{iy} - \omega_y s_{iy} q_{ix} + s_{iy} \dot{t}_z - \omega_z s_{iz} q_{ix} + \omega_x s_{iz} q_{iz} - s_{iz} \dot{t}_y \\ \omega_y s_{iz} q_{iz} - \omega_z s_{iz} q_{iy} + s_{iz} \dot{t}_x - \omega_x s_{ix} q_{iy} + \omega_y s_{ix} q_{ix} - s_{ix} \dot{t}_z \\ \omega_z s_{ix} q_{ix} - \omega_x s_{ix} q_{iz} + s_{ix} \dot{t}_y - \omega_y s_{iy} q_{iz} + \omega_z s_{iy} q_{iy} - s_{iy} \dot{t}_x \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{L_i} \quad (4.8)$$

(4.8) ifadesi hareketli üst platformun hızları cinsinden aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{\theta}_{ix} \\ \dot{\theta}_{iy} \\ \dot{\theta}_{iz} \end{bmatrix}}_{\dot{\boldsymbol{\theta}}_i} = \frac{1}{L_i} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} s_{iy}q_{iy} + s_{iz}q_{iz} & -s_{iy}q_{ix} & -s_{iz}q_{ix} & 0 & -s_{iz} & s_{iy} \\ -s_{ix}q_{iy} & s_{ix}q_{ix} + s_{iz}q_{iz} & -s_{iz}q_{iy} & s_{iz} & 0 & -s_{ix} \\ -s_{ix}q_{iz} & -s_{iy}q_{iz} & s_{ix}q_{ix} + s_{iy}q_{iy} & -s_{iy} & s_{ix} & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{K}^{0i}} \cdot \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \\ \dot{t}_x \\ \dot{t}_y \\ \dot{t}_z \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}_i = \mathbf{K}^{0i} \cdot \begin{bmatrix} \vec{\omega} \\ \dot{\mathbf{t}} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

(4.9) ifadesi (4.10) da gösterildiği üzere kısaltılabilir.

Bacakların açılal ve doğrusal hırları (4.6) ve (4.10) eşitliklerinde platformun açılal ve doğrusal hırları cinsinden ifade edilmiştir. (4.5) eşitliğinde görülmektedir ki K_{Li} katsayı matrisinin baştan ilk üç sütunu platformun açılal hırları ile çarpılır, son üç sütun ise platformun doğrusal hırları ile çarpılır. Daha kısa bir ifadeyle (4.6) eşitliği aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\dot{L}_i = \begin{bmatrix} K_{[1,3]}^{Li} & K_{[4,6]}^{Li} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{\omega} \\ \dot{t} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

(4.11) denklemini aşağıdaki şekilde de yazılabilir.

$$\dot{L}_i = \underbrace{K_{[1,3]}^{Li}}_{L_i^\omega} \vec{\omega} + \underbrace{K_{[4,6]}^{Li}}_{L_i^t} \dot{t} \quad (4.12)$$

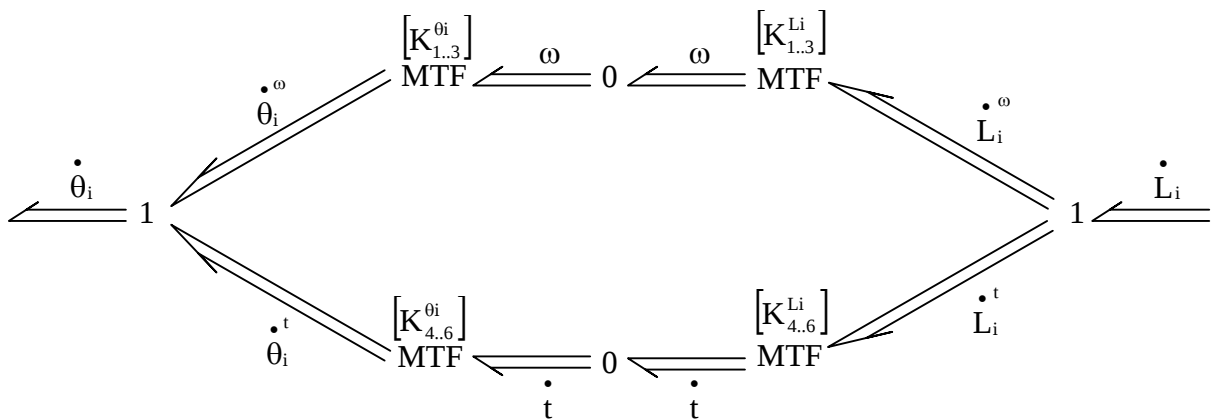
Aynı şekilde (4.10) eşitliği aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\dot{\theta}_i = \begin{bmatrix} K_{[1,3]}^{\theta i} & K_{[4,6]}^{\theta i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{\omega} \\ \dot{t} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Bu ifade de aşağıdaki şekilde düzenlenebilir.

$$\dot{\theta}_i = \underbrace{K_{[1,3]}^{\theta i}}_{\dot{\theta}_i^\omega} \vec{\omega} + \underbrace{K_{[4,6]}^{\theta i}}_{\dot{\theta}_i^t} \dot{t} \quad (4.14)$$

(4.12) ve (4.14) eşitliklerinden hareketli platformun doğrusal ve açılal hızının bacakların doğrusal ve açılal hızlarına katkısı katsayılar cinsinden ifade edilmiştir. Sistemin kinematik bağ-grafik düzenlemesi (4.12) ve (4.14) eşitlikleri kullanılarak şekil 4.4' de gösterildiği gibi  zilebilir.



şekil 4. 4 3x3 SPM'nın kinematik vektörel bağ-grafik modeli

açısal hızlar seçilirse, bağımsız hız olarak hareketli platformun doğrusal ve açısal hızları seçilebilir. Atalet hızları ise bağımlı ve bağımsız hızlardan oluşacaktır.

Bağımlı hızlar:

$$\dot{q}_b = \begin{bmatrix} \dot{L}_1 & \dot{\theta}_1 & \dot{L}_2 & \dot{\theta}_2 & \dot{L}_3 & \dot{\theta}_3 & \dot{L}_4 & \dot{\theta}_4 & \dot{L}_5 & \dot{\theta}_5 & \dot{L}_6 & \dot{\theta}_6 \end{bmatrix}^T$$

Şeklinde 1x24 'lük bir kolon matris şeklinde ifade edilebilir. Bağımlı hızlardan bacaklara ait açısal hızların üç bileşeninin olduğu unutulmamalıdır. Aynı şekilde bağımsız hızlar:

$$\dot{q}_i = \begin{bmatrix} \omega_x & \omega_y & \omega_z & \dot{t}_x & \dot{t}_y & \dot{t}_z \end{bmatrix}^T$$

Şeklinde olacaktır. Atalet hızları ise aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\dot{q}_I = \begin{bmatrix} \dot{q}_b \\ \dot{q}_i \end{bmatrix}$$

Atalet hızları ile bağımsız hızlar arasındaki T_I matrisi aşağıdaki şekilde bulunabilir.

$$\dot{q}_I = T_I \cdot \dot{q}_i \quad (4.15)$$

T_I matrisinin açık ifadesi Ek-A' da verilmiştir.

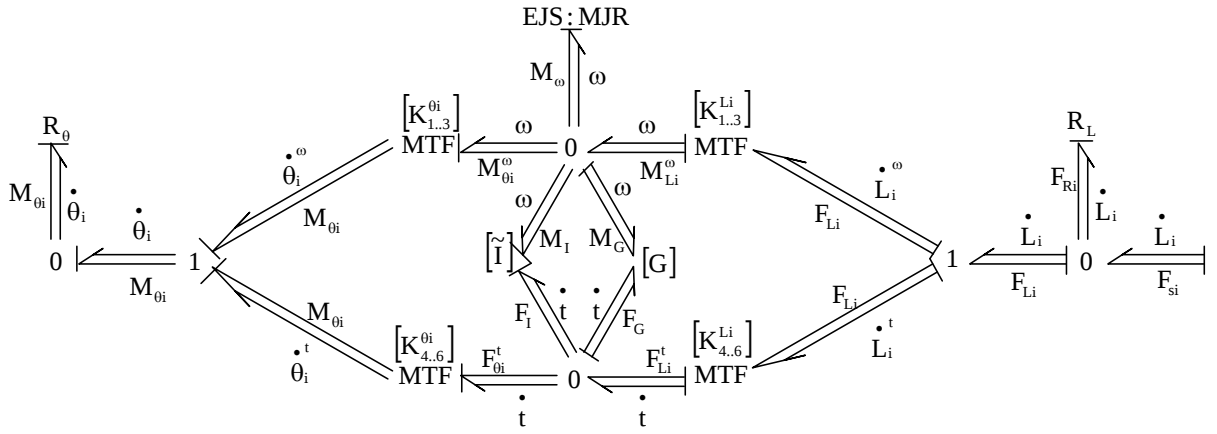
Virtüel atalet matrisinin ve jiristör elemanına ait matrisin oluşturulabilmesi için sisteme ait atalet elemanlarının atalet hızlarının dağılımına göre bir matris altında toplanması gerekmektedir. Atalet elemanlarına ait diyagonal I matrisinin açık ifadesi Ek-A' da verilmiştir. Bu durumda Virtüel atalet elemanına ait matris aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$[\tilde{I}] = [T_I]^T \cdot [I] \cdot [T_I] \quad (4.16)$$

Jiristör elemanı ise aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$[G] = [T_I]^T \cdot [I] \cdot \begin{bmatrix} \dot{t}_x \\ \dot{t}_y \\ \dot{t}_z \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Atalet elemanlarının indirgenmesinden sonra sistemin bağ-grafik modeli Şekil 4.6' da verildiği gibi olacaktır.

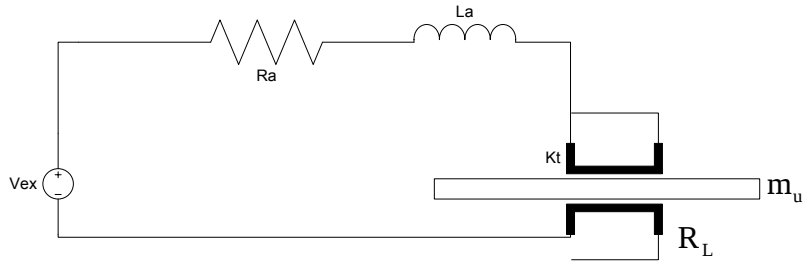


Şekil 4. 6 Atalet elemanlarının indirgenmesinden sonra sistemin bağ grafik modeli

Şekil 4.6' dan de anlaşılacağı gibi atalet elemanları virtüel atalet elamanına ve jiristör elemanına indirgendirikten sonra türevsel nedensellik durumu ortadan kalkmaktadır. Ayrıca Şekil 4.6' da jiroskobik kuvvetleri de sisteme dâhil etmek için açısız hızların girdiği "0" kapısına modüleli jirator elemanı eklenmiştir.

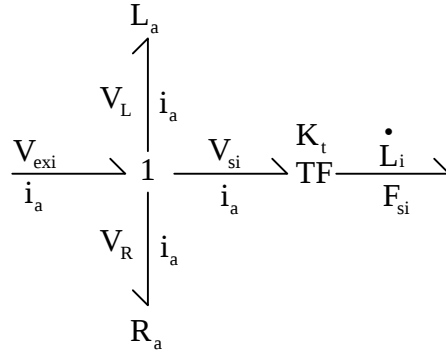
4.2.3 Motorların Bağ-grafik Modellenmesi

Tahrik elemanı olarak Şekil 2.1'de resmi verilen doğrusal hareket edebilen doğru akım motorları kullanılmıştır. Bu motorun şematik gösterimi Şekil 4.7' de verilmiştir.



Şekil 4. 7 Doğrusal DC motor

Şekil 4.7' de görüleceği gibi motorun armatür direnci, R_a ile, endüktansı, L_a ile ifade edilmiştir. Motorun kuvvet katsayısı K_t (N/A) ile belirtilmiştir. Bu sistemin bağ-grafik modeli Şekil 4.8' de verilmiştir.

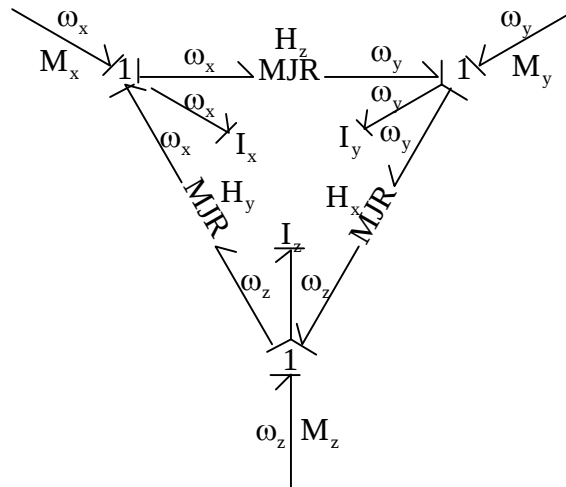


Şekil 4. 8 Doğrusal DC motorun bağ-grafik modeli

Şekil 4.8’ de görüleceği üzere giriş gerilimi bir katsayı artışı ile doğrusal hıza dönüşmektedir. Şekil 4.6’ daki sistemde doğrusal kuvvet girişinin yapıldığı “0” enerji kapısına, elde edilen bu model bağlanarak sistemin bağ-grafik modeli elde edilmiş olur. Elde edilen yeni modelde (Şekil 4.10) nedensellik çalışması sonucunda herhangi bir türevsel nedensellik olmadığı görülmektedir. Şekil 4.10’ da bacağın ağırlığı “Mekanik Kısım” olarak belirtilen “0” paralel enerji kapısına iç değişken kaynağı olarak ilave edilmiştir. Aynı şekilde hareketli platformun ağırlığı “Platform Hareketleri” olarak ifade edilen kısmın “0” paralel enerji kapısına ilave edilmiştir. Bacağın ağırlığından kaynaklanan moment etkisi ise “Bacağın Açısal Hareketi” olarak ifade edilen kısımda “0” paralel enerji kapısına iç değişken kaynağı olarak ilave edilmiştir.

4.2.4 Platformu Etkileyen Jirokobik Kuvvetler

Şekil 4.10’ da hareketli platformu etkileyen jirokobik kuvvetler modüleli jiratör ile modellenmişti (EJS:MJR) . Bu elemanın açık hali Şekil 4.9’ da verilmiştir.



Şekil 4. 9 Bir modüleli jiratör elemanı (EJS:MJR)

Şekil 4.9’ da paralel enerji kapılarına giren açısal hızlar Şekil 4.10’ da “EJS:MJR” elemanına bağlı olan “0” kapısından jirator elemanına giren hızlardır. Buradaki atalet elemanları da Şekil 4.10’ da ifade edilen virtüel atalet elemanına ait matrisin içinde tanımlıdır ve dinamik hesaplar yapılırken jiratorün elemanı olarak hesaba katılmayacaktır.

Bu elemana ait uç denklemler;

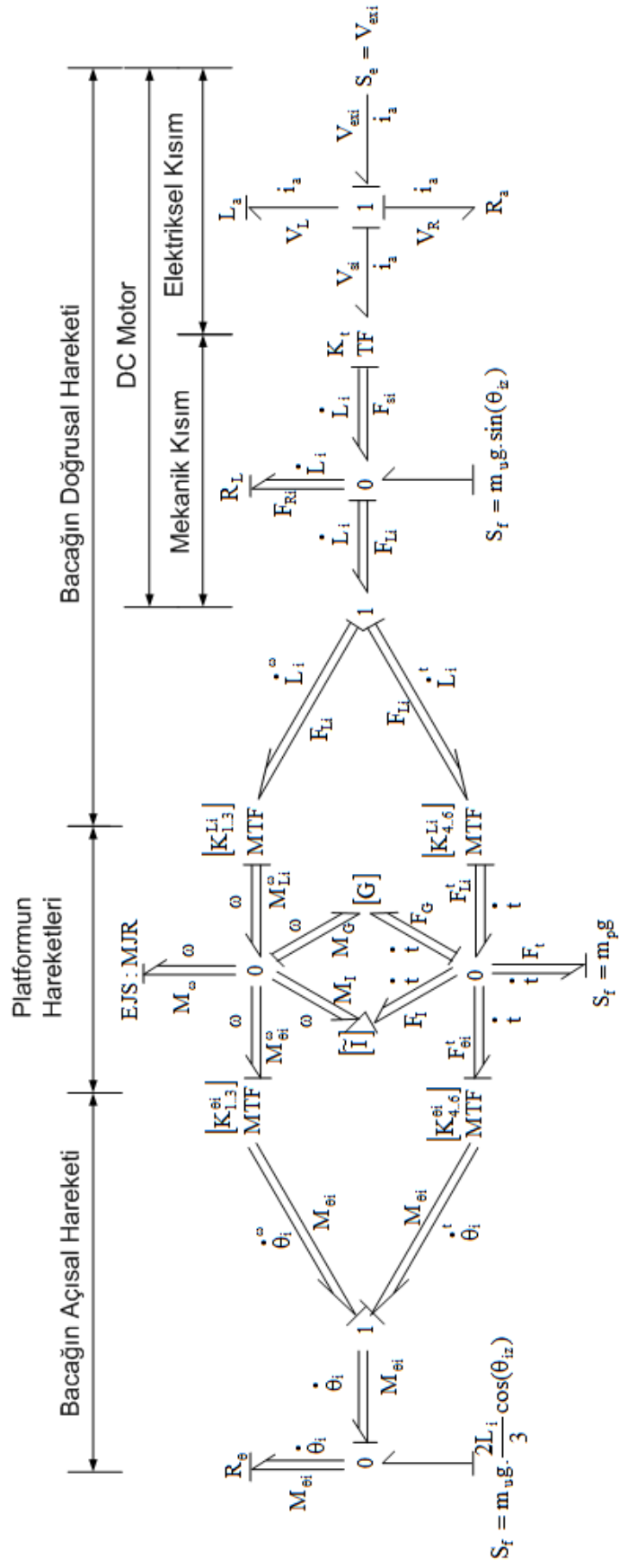
$$M_x = H_z \omega_y - H_y \omega_z \quad (4.18)$$

$$M_y = -H_z \omega_x + H_x \omega_z \quad (4.19)$$

$$M_z = -H_x \omega_y + H_y \omega_x \quad (4.20)$$

şeklinde olup,

$H_x = I_x \omega_x, H_y = I_y \omega_y, H_z = I_z \omega_z$ şeklindedir.



Şekil 4. 10 3x3 Stewart Platform Mekanizmasının bağ-grafik modeli

4.2.5 Dinamik Denklemlerin Oluşturulması

Dinamik denklemler oluşturulmadan önce sistemin durum değişkenleri belirlenmelidir. Enerji kapısına çizgi olarak giren kapasite sınıfı elemanların uç değişkenleri ve nokta olarak giren elemanların iç değişkenleri durum değişkeni olarak tayin edilir. Şekil 4.10' dan da anlaşılacağı gibi $\tilde{I}, G$ elemanlarına ait enerji kapılarında, bu enerji kapılarına nokta halinde girenlerin uç değişkenleri "0" kapısında $\vec{\omega}$ ve $\dot{\vec{t}}$ durum değişkenleri olacaktır. Ayrıca motorun elektriksel kısmında ifade edilen "1" kapısına nokta halinde giren L_a elemanının iç değişkeni i_a da durum değişkeni olacaktır.

Durum değişkenli elemanlardan başlamak üzere bağımlı değişkenler, bağımsız değişkenler cinsinden ifade edilir ve enerji kapılarındaki denklemler yazılarak sistemin durum denklemleri elde edilir.

Durum değişkenli elemanlara ait denklemler;

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \\ \dot{t}_x \\ \dot{t}_y \\ \dot{t}_z \end{bmatrix} = [\tilde{I}]^{-1} \begin{bmatrix} M_{Ix} \\ M_{Iy} \\ M_{Iz} \\ F_{Ix} \\ F_{Iy} \\ F_{Iz} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

$$\frac{d}{dt}(i_{a(i)}) = L_a V_{L(i)}, (i=1..6)$$

şeklindedir. Bu aşamadan sonra paralel ve seri enerji kapılarına ait denklemler yazılarak (4.21) eşitliğinin sağ tarafı durum değişkenleri cinsinden ifade edilecektir. Ayrıca jiristör elemanına ait denklemler (4.22) deki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} M_{Gx} \\ M_{Gy} \\ M_{Gz} \\ F_{Gx} \\ F_{Gy} \\ F_{Gz} \end{bmatrix} = [G] \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \\ \dot{t}_x \\ \dot{t}_y \\ \dot{t}_z \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Şekil 4.10' da platforma ait hareketler kısmında, ω uç değişkeninin bağlandığı "0" paralel enerji kapısına ait enerji bağlarının akış yönünden aşağıdaki eşitlik oluşturulabilir.

$$\vec{M}_I = \sum_{i=1}^6 \vec{M}_{L(i)}^\omega - \sum_{i=1}^6 \vec{M}_{\theta(i)}^\omega - \vec{M}_G - \vec{M}_\omega \quad (4.23)$$

(4.23) denklemindeki elemanların üç bileşeni bulunmaktadır. Başka bir deyişle (4.23) ifadesi aşağıdaki biçimde yazılabilir.

$$M_{Ix} = \sum_{i=1}^6 M_{L(i)}^{\omega x} - \sum_{i=1}^6 M_{\theta(i)}^{\omega x} - M_{Gx} - M_x \quad (4.24)$$

Daha açık bir ifadeyle (4.24) denklemi

$$M_{Ix} = \sum_{i=1}^6 (K_{11}^{L(i)} F_{L(i)}) - \sum_{i=1}^6 \left\{ \begin{bmatrix} K_{11}^{\theta(i)} & K_{12}^{\theta(i)} & K_{13}^{\theta(i)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{\theta x}^{(i)} \\ M_{\theta y}^{(i)} \\ M_{\theta z}^{(i)} \end{bmatrix} \right\} - G_{[1,6]} \begin{bmatrix} \vec{\omega} \\ \dot{\cdot} \\ t \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

$$- (H_z \omega_y - H_y \omega_z)$$

Şeklinde ifade edilebilir.

Aynı şekilde,

$$M_{Iy} = \sum_{i=1}^6 (K_{12}^{L(i)} F_{L(i)}) - \sum_{i=1}^6 \left\{ \begin{bmatrix} K_{21}^{\theta(i)} & K_{22}^{\theta(i)} & K_{23}^{\theta(i)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{\theta x}^{(i)} \\ M_{\theta y}^{(i)} \\ M_{\theta z}^{(i)} \end{bmatrix} \right\} - G_{[2,6]} \begin{bmatrix} \vec{\omega} \\ \dot{\cdot} \\ t \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

$$- (-H_z \omega_x + H_x \omega_z)$$

$$M_{Iz} = \sum_{i=1}^6 (K_{13}^{L(i)} F_{L(i)}) - \sum_{i=1}^6 \left\{ \begin{bmatrix} K_{31}^{\theta(i)} & K_{32}^{\theta(i)} & K_{33}^{\theta(i)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{\theta x}^{(i)} \\ M_{\theta y}^{(i)} \\ M_{\theta z}^{(i)} \end{bmatrix} \right\} - G_{[3,6]} \begin{bmatrix} \vec{\omega} \\ \dot{\cdot} \\ t \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

$$- (-H_x \omega_y + H_y \omega_x)$$

olacaktır.

(4.25), (4.26) ve (4.27) denklemlerinde $F_{L(i)}$ ve M_θ değerleri de durum değişkenleri cinsinden ifade edilmelidir.

Şekil 4.10' da DC motorun mekanik kısmındaki "0" paralel enerji kapısına ait denklemler yardımıyla (4.25), (4.26) ve (4.27) denklemlerinde belirtilen $F_{L(i)}$ değerleri durum değişkenleri cinsinden ifade edilmeye çalışılacaktır.

Bu kapıya ait iç değişkenlerin denklemleri,

$$F_{s(i)} = F_{R(i)} + F_{L(i)} + m_u g \sin(\theta_{iz}), (i = 1..6) \quad (4.28)$$

şeklindedir. Bu ifadede,

$$F_{R(i)} = R_L \dot{L}_{(i)} = R_L K^{L(i)} \begin{bmatrix} \vec{\omega} \\ \dot{t} \end{bmatrix}$$

şeklinde verilebilir. (4.28) denklemi,

$$F_{L(i)} = F_{s(i)} - R_L K^{L(i)} \begin{bmatrix} \vec{\omega} \\ \dot{t} \end{bmatrix} - m_u g \sin(\theta_{iz}) \quad (4.29)$$

haline gelecektir. Burada durum değişkenleri cinsinden ifade edilmeyen $F_{s(i)}$ terimi S_{mi} kapısında durum değişkenleri cinsinden ifade edilebilecektir, (Şekil 4.10). Ayrıca,

$R_L = \frac{1}{C_p}$ olmalıdır. Burada C_p prizmatik eklemdaki sürtünme katsayısını göstermektedir.

Şekil 4.9' da, bacakların açısal hareketlerinin ifade edildiği kısımda bulunan "0" paralel enerji kapısına ait denklemlerin yardımıyla (4.25), (4.26) ve (4.27) denklemlerinde belirtilen M_θ değerleri durum değişkenleri cinsinden ifade edilmeye çalışılacaktır. Bu kapıda,

$$M_{\theta x}^{(i)} = R_\theta \dot{\theta}_{(i)x} = R_\theta K_{[1,6]}^{\theta(i)} \begin{bmatrix} \vec{\omega} \\ \dot{t} \end{bmatrix}, (i = 1..6) \quad (4.30)$$

$$M_{\theta y}^{(i)} = R_\theta \dot{\theta}_{(i)y} = R_\theta K_{[2,6]}^{\theta(i)} \begin{bmatrix} \vec{\omega} \\ \dot{t} \end{bmatrix}, (i = 1..6) \quad (4.31)$$

$$M_{\theta z}^{(i)} = R_\theta \dot{\theta}_{(i)z} - m_u g \frac{2L_{(i)}}{3} \cos(\theta_{iz}) = R_\theta K_{[3,6]}^{\theta(i)} \begin{bmatrix} \vec{\omega} \\ \dot{t} \end{bmatrix} - m_u g \frac{2L_{(i)}}{3} \cos(\theta_{iz}) \quad (4.32)$$

, (i = 1..6)

Şeklinde olacaktır. Burada,

$$R_\theta = \frac{1}{C_s}$$

şeklinde olmalıdır. C_s hareketli paltform ile bacak arasındaki sürtünmeyi göstermektedir.

(4.30), (4.31), (4.32) eşitliklerinden de görüldüğü gibi M_θ değeri durum değişkenleri cinsinden ifade edilmiştir.

Şekil 4.10' da platforma ait hareketler kısmında, $\dot{t}$ uç değişkeninin bağlandığı "0" paralel enerji kapısına enerji bağlarının akış yönünden aşağıdaki eşitlik oluşturulabilir.

$$F_I = \sum_{i=1}^6 F_{L(i)}^t - \sum_{i=1}^6 F_{\theta(i)}^t - F_G - m_p g \quad (4.33)$$

Daha açık bir ifadeyle,

$$F_{I_x} = \sum_{i=1}^6 (K_{14}^{L(i)} F_{L(i)}) - \sum_{i=1}^6 \left\{ \begin{bmatrix} K_{14}^{\theta(i)} & K_{15}^{\theta(i)} & K_{16}^{\theta(i)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{\theta x}^{(i)} \\ M_{\theta y}^{(i)} \\ M_{\theta z}^{(i)} \end{bmatrix} \right\} - G_{[4,6]} \begin{bmatrix} \vec{\omega} \\ \dot{t} \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

$$F_{I_y} = \sum_{i=1}^6 (K_{15}^{L(i)} F_{L(i)}) - \sum_{i=1}^6 \left\{ \begin{bmatrix} K_{24}^{\theta(i)} & K_{25}^{\theta(i)} & K_{26}^{\theta(i)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{\theta x}^{(i)} \\ M_{\theta y}^{(i)} \\ M_{\theta z}^{(i)} \end{bmatrix} \right\} - G_{[5,6]} \begin{bmatrix} \vec{\omega} \\ \dot{t} \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

$$F_{I_z} = \sum_{i=1}^6 (K_{16}^{L(i)} F_{L(i)}) - \sum_{i=1}^6 \left\{ \begin{bmatrix} K_{34}^{\theta(i)} & K_{35}^{\theta(i)} & K_{36}^{\theta(i)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{\theta x}^{(i)} \\ M_{\theta y}^{(i)} \\ M_{\theta z}^{(i)} \end{bmatrix} \right\} - G_{[6,6]} \begin{bmatrix} \vec{\omega} \\ \dot{t} \end{bmatrix} - m_p g \quad (4.36)$$

şeklinde olacaktır.

Şekil 4.10'da verilen motorun elektriksel kısmına ait seri "1" kapısındaki enerji bağlarının yönleri itibariyle denklemler,

$$V_{L(i)} = V_{ex(i)} - V_{s(i)} - V_{R(i)}, (i=1..6) \quad (4.37)$$

şeklindedir.

Burada,

$$V_{s(i)} = \dot{L}_i K_t = K^{L1} \begin{bmatrix} \vec{\omega} \\ \dot{t} \end{bmatrix} K_t \quad (4.38)$$

$$F_{s(i)} = K_t i_{a(i)} \quad (4.39)$$

$$V_{R(i)} = i_{a(i)} R_a \quad (4.40)$$

olacaktır.

(4.37) denklemi düzenlenirse,

$$V_{L(i)} = V_{ex(i)} - K^{L(i)} \begin{bmatrix} \vec{\omega} \\ \dot{\cdot} \\ t \end{bmatrix} K_t - i_{a(i)} R_a, (i=1..6) \quad (4.41)$$

şeklinde ifade edilebilir. Endüktans değeri,

$$L_a = \frac{1}{L_{mot}}$$

olmalıdır. Burada L_{mot} motorun endüktans değerini göstermektedir.

(4.39) denklemi (4.29) da yerine konulursa $F_{L(i)}$ terimi durum değişkenleri cinsinden ifade edilmiş olacak ve bu şekilde (4.21) denkleminin sağ tarafı durum değişkenleri cinsinden ifade edilmiş olacaktır.

(4.23) ve (4.33) denklemleri durum değişkenleri cinsinden aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} M_{I_x} = & \omega_x E_{\omega x}^{mx} + \omega_y E_{\omega y}^{mx} + \omega_z E_{\omega z}^{mx} + \dot{t}_x E_{tx}^{mx} + \dot{t}_y E_{ty}^{mx} + \dot{t}_z E_{tz}^{mx} + i_{a1} E_{i1}^{mx} + i_{a2} E_{i2}^{mx} \\ & + i_{a3} E_{i3}^{mx} + i_{a4} E_{i4}^{mx} + i_{a5} E_{i5}^{mx} + i_{a6} E_{i6}^{mx} + T_{L1}^{mx} + T_{L2}^{mx} + T_{L3}^{mx} + T_{L4}^{mx} + T_{L5}^{mx} + T_{L6}^{mx} \\ & + T_{\theta 1}^{mx} + T_{\theta 2}^{mx} + T_{\theta 3}^{mx} + T_{\theta 4}^{mx} + T_{\theta 5}^{mx} + T_{\theta 6}^{mx} \end{aligned} \quad (4.42)$$

$$\begin{aligned} M_{I_y} = & \omega_x E_{\omega x}^{my} + \omega_y E_{\omega y}^{my} + \omega_z E_{\omega z}^{my} + \dot{t}_x E_{tx}^{my} + \dot{t}_y E_{ty}^{my} + \dot{t}_z E_{tz}^{my} + i_{a1} E_{i1}^{my} + i_{a2} E_{i2}^{my} \\ & + i_{a3} E_{i3}^{my} + i_{a4} E_{i4}^{my} + i_{a5} E_{i5}^{my} + i_{a6} E_{i6}^{my} + T_{L1}^{my} + T_{L2}^{my} + T_{L3}^{my} + T_{L4}^{my} + T_{L5}^{my} + T_{L6}^{my} \\ & + T_{\theta 1}^{my} + T_{\theta 2}^{my} + T_{\theta 3}^{my} + T_{\theta 4}^{my} + T_{\theta 5}^{my} + T_{\theta 6}^{my} \end{aligned} \quad (4.43)$$

$$\begin{aligned} M_{I_z} = & \omega_x E_{\omega x}^{mz} + \omega_y E_{\omega y}^{mz} + \omega_z E_{\omega z}^{mz} + \dot{t}_x E_{tx}^{mz} + \dot{t}_y E_{ty}^{mz} + \dot{t}_z E_{tz}^{mz} + i_{a1} E_{i1}^{mz} + i_{a2} E_{i2}^{mz} \\ & + i_{a3} E_{i3}^{mz} + i_{a4} E_{i4}^{mz} + i_{a5} E_{i5}^{mz} + i_{a6} E_{i6}^{mz} + T_{L1}^{mz} + T_{L2}^{mz} + T_{L3}^{mz} + T_{L4}^{mz} + T_{L5}^{mz} + T_{L6}^{mz} \\ & + T_{\theta 1}^{mz} + T_{\theta 2}^{mz} + T_{\theta 3}^{mz} + T_{\theta 4}^{mz} + T_{\theta 5}^{mz} + T_{\theta 6}^{mz} \end{aligned} \quad (4.44)$$

$$\begin{aligned} F_{I_x} = & \omega_x E_{\omega x}^{Fx} + \omega_y E_{\omega y}^{Fx} + \omega_z E_{\omega z}^{Fx} + \dot{t}_x E_{tx}^{Fx} + \dot{t}_y E_{ty}^{Fx} + \dot{t}_z E_{tz}^{Fx} + i_{a1} E_{i1}^{Fx} + i_{a2} E_{i2}^{Fx} \\ & + i_{a3} E_{i3}^{Fx} + i_{a4} E_{i4}^{Fx} + i_{a5} E_{i5}^{Fx} + i_{a6} E_{i6}^{Fx} + T_{L1}^{Fx} + T_{L2}^{Fx} + T_{L3}^{Fx} + T_{L4}^{Fx} + T_{L5}^{Fx} + T_{L6}^{Fx} \\ & + T_{\theta 1}^{Fx} + T_{\theta 2}^{Fx} + T_{\theta 3}^{Fx} + T_{\theta 4}^{Fx} + T_{\theta 5}^{Fx} + T_{\theta 6}^{Fx} \end{aligned} \quad (4.45)$$

$$\begin{aligned} F_{I_y} = & \omega_x E_{\omega x}^{Fy} + \omega_y E_{\omega y}^{Fy} + \omega_z E_{\omega z}^{Fy} + \dot{t}_x E_{tx}^{Fy} + \dot{t}_y E_{ty}^{Fy} + \dot{t}_z E_{tz}^{Fy} + i_{a1} E_{i1}^{Fy} + i_{a2} E_{i2}^{Fy} \\ & + i_{a3} E_{i3}^{Fy} + i_{a4} E_{i4}^{Fy} + i_{a5} E_{i5}^{Fy} + i_{a6} E_{i6}^{Fy} + T_{L1}^{Fy} + T_{L2}^{Fy} + T_{L3}^{Fy} + T_{L4}^{Fy} + T_{L5}^{Fy} + T_{L6}^{Fy} \\ & + T_{\theta 1}^{Fy} + T_{\theta 2}^{Fy} + T_{\theta 3}^{Fy} + T_{\theta 4}^{Fy} + T_{\theta 5}^{Fy} + T_{\theta 6}^{Fy} \end{aligned} \quad (4.46)$$

$$\begin{aligned}
F_{Lz} = & \omega_x E_{\omega x}^{Fz} + \omega_y E_{\omega y}^{Fz} + \omega_z E_{\omega z}^{Fz} + \dot{t}_x E_{tx}^{Fz} + \dot{t}_y E_{ty}^{Fz} + \dot{t}_z E_{tz}^{Fz} + i_{a1} E_{i1}^{Fz} + i_{a2} E_{i2}^{Fz} \\
& + i_{a3} E_{i3}^{Fz} + i_{a4} E_{i4}^{Fz} + i_{a5} E_{i5}^{Fz} + i_{a6} E_{i6}^{Fz} + T_{L1}^{Fz} + T_{L2}^{Fz} + T_{L3}^{Fz} + T_{L4}^{Fz} + T_{L5}^{Fz} + T_{L6}^{Fz} \\
& + T_{\theta 1}^{Fz} + T_{\theta 2}^{Fz} + T_{\theta 3}^{Fz} + T_{\theta 4}^{Fz} + T_{\theta 5}^{Fz} + T_{\theta 6}^{Fz} - T_{mp}^{Fz}
\end{aligned} \tag{4.47}$$

$$\begin{aligned}
V_{L(i)} = & \omega_x E_{\omega x}^{v(i)} + \omega_y E_{\omega y}^{v(i)} + \omega_z E_{\omega z}^{v(i)} + \dot{t}_x E_{tx}^{v(i)} + \dot{t}_y E_{ty}^{v(i)} + \dot{t}_z E_{tz}^{v(i)} \\
& + i_{a(i)} E_{i(i)}^{v(i)} + T_{ex}^{v(i)}, (i=1..6)
\end{aligned} \tag{4.48}$$

Bu denklemlerdeki E ve T katsayılarına ait açık ifadeler Ek-B' de detaylı olarak verilmiştir.

(4.42), (4.43), (4.44), (4.45), (4.46), (4.47), (4.48) denklemlerinde verilen ifadeler (4.21) denkleminde yerine konulursa,

$$\frac{d}{dt} \omega_x = \tilde{I}_{11}^{-1} M_{Lx} + \tilde{I}_{12}^{-1} M_{Ly} + \tilde{I}_{13}^{-1} M_{Lz} + \tilde{I}_{14}^{-1} F_{Lx} + \tilde{I}_{15}^{-1} F_{Ly} + \tilde{I}_{16}^{-1} F_{Lz} \tag{4.49}$$

$$\frac{d}{dt} \omega_y = \tilde{I}_{21}^{-1} M_{Lx} + \tilde{I}_{22}^{-1} M_{Ly} + \tilde{I}_{23}^{-1} M_{Lz} + \tilde{I}_{24}^{-1} F_{Lx} + \tilde{I}_{25}^{-1} F_{Ly} + \tilde{I}_{26}^{-1} F_{Lz} \tag{4.50}$$

$$\frac{d}{dt} \omega_z = \tilde{I}_{31}^{-1} M_{Lx} + \tilde{I}_{32}^{-1} M_{Ly} + \tilde{I}_{33}^{-1} M_{Lz} + \tilde{I}_{34}^{-1} F_{Lx} + \tilde{I}_{35}^{-1} F_{Ly} + \tilde{I}_{36}^{-1} F_{Lz} \tag{4.51}$$

$$\frac{d}{dt} \dot{t}_x = \tilde{I}_{41}^{-1} M_{Lx} + \tilde{I}_{42}^{-1} M_{Ly} + \tilde{I}_{43}^{-1} M_{Lz} + \tilde{I}_{44}^{-1} F_{Lx} + \tilde{I}_{45}^{-1} F_{Ly} + \tilde{I}_{46}^{-1} F_{Lz} \tag{4.52}$$

$$\frac{d}{dt} \dot{t}_y = \tilde{I}_{51}^{-1} M_{Lx} + \tilde{I}_{52}^{-1} M_{Ly} + \tilde{I}_{53}^{-1} M_{Lz} + \tilde{I}_{54}^{-1} F_{Lx} + \tilde{I}_{55}^{-1} F_{Ly} + \tilde{I}_{56}^{-1} F_{Lz} \tag{4.53}$$

$$\frac{d}{dt} \dot{t}_z = \tilde{I}_{61}^{-1} M_{Lx} + \tilde{I}_{62}^{-1} M_{Ly} + \tilde{I}_{63}^{-1} M_{Lz} + \tilde{I}_{64}^{-1} F_{Lx} + \tilde{I}_{65}^{-1} F_{Ly} + \tilde{I}_{66}^{-1} F_{Lz} \tag{4.54}$$

$$\frac{d}{dt} (i_{a(i)}) = L_a V_{L(i)}, (i=1..6) \tag{4.55}$$

(4.49~4.55) denklemlerinde verilen ifadeler durum değişkenlerinin çekilmesi ile matris şeklinde ifade edilebilir.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \\ \dot{t}_x \\ \dot{t}_y \\ \dot{t}_z \\ i_{a1} \\ i_{a2} \\ i_{a3} \\ i_{a4} \\ i_{a5} \\ i_{a6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A]_{6 \times 6} & [B]_{6 \times 6} \\ [C]_{6 \times 6} & [D]_{6 \times 6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \\ \dot{t}_x \\ \dot{t}_y \\ \dot{t}_z \\ i_{a1} \\ i_{a2} \\ i_{a3} \\ i_{a4} \\ i_{a5} \\ i_{a6} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [\tilde{I}^{-1}]_{6 \times 6} & 0 \\ 0 & [L_a]_{6 \times 6} \end{bmatrix} [U]_{12 \times 6} \quad (4.56)$$

(4.56) eşitliğinde kullanılan katsayılar matrislerinin açık ifadeleri Ek-B' de verilmiştir.

4.3 Simülasyon ve Model Analizi

Sistemin (4.56) denkleminde verilen durum uzayı denklemi kullanılarak Matlab komut satırında oluşturulan programla, açık çevrim simülasyon gerçekleştirilmiştir. Simülasyon ayrık zamanlı olarak, “0.0001 sn” örnekleme zamanında gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar 32 bit işletim sistemi, 1.73 GHz Pentium çift çekirdekli işlemciye ve 2 GB hafızaya sahip bilgisayarda yapılmıştır. Simülasyon kodları EK C de verilmiştir.

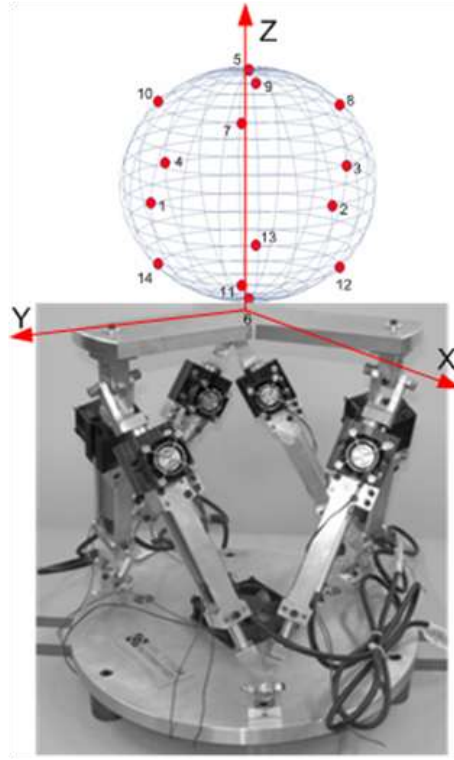
Sistemi durum uzayı formatında ifade etmenin bazı avantajları mevcuttur. Bunlardan birisi durum matrisinin kullanılması ile sistemin kutuplarının bulunması ve bu kutupların yerlerine bakılarak sistemin analiz edilmesidir. Buradaki modelde, sistem doğrusal olmadığından durum matrisi değişkendir. Durum matrisini oluşturan elemanlardan bazıları sistemin konumuna bağlı olduğundan SPM' nın çalışma uzayı içinde durum matrisi değişik değerler alabilmektedir.

Sistemi analiz edebilmek için durum matrisinin kutupları, çalışma uzayı dâhilindeki maksimum ve minimum konumlarda bulunmuştur. Bu noktaları şekil 4.11' de görmek mümkündür. Ayrıca bu noktaların tanımları çizelge 4.2' de verilmektedir.

Analiz yapılırken mekanizmanın belirtilen çalışma uzayı noktalarındaki anlık durum matrisleri kullanılmıştır. Matris anlık olarak hesaplandığından matrisi oluşturan temel hız ve akım nicelikleri de anlık olarak hesaplanmıştır.

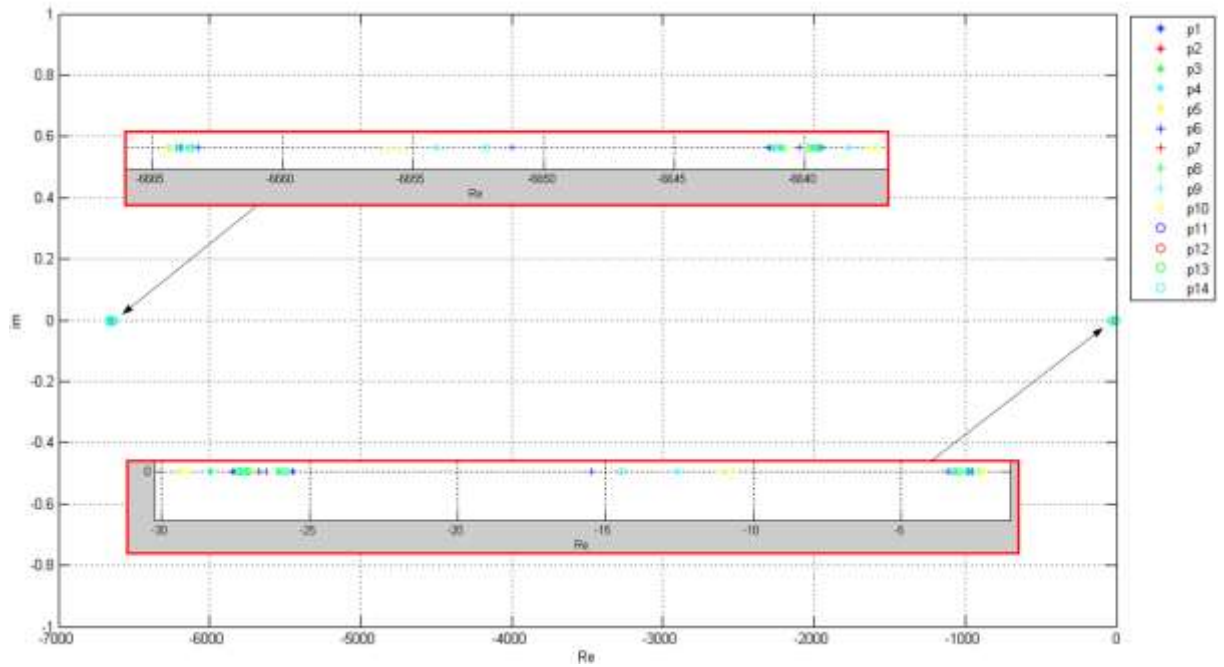
Çizelge 4. 2 Küresel çalışma uzayında seçilen sınır noktaların tanımları

Nokta	Yerleşim
1	$(+)y,z$ düzleminde en uzak nokta
2	$(+)x,z$ düzleminde en uzak nokta
3	$(-)y,z$ düzleminde en uzak nokta
4	$(-)x,z$ düzleminde en uzak nokta
5	Erişilebilecek en yüksek nokta
6	Erişilebilecek en alçak nokta
7	$(+)x,(+)y,(+)z$ çeyrek uzayında en uzak nokta
8	$(+)x,(-)y,(+)z$ çeyrek uzayında en uzak nokta
9	$(-)x,(-)y,(+)z$ çeyrek uzayında en uzak nokta
10	$(-)x,(+)y,(+)z$ çeyrek uzayında en uzak nokta
11	$(+)x,(+)y,(-)z$ çeyrek uzayında en uzak nokta
12	$(+)x,(-)y,(-)z$ çeyrek uzayında en uzak nokta
13	$(-)x,(-)y,(-)z$ çeyrek uzayında en uzak nokta
14	$(-)x,(+)y,(-)z$ çeyrek uzayında en uzak nokta



Şekil 4. 11 Çalışma uzayı dâhilindeki maksimum ve minimum noktalar.

Bulunan sistem kutuplarının karmaşık düzlemde gösterimi şekil 4.12 de, sayısal değerleri ise Çizelge 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4. 12 Karmaşık düzlemdeki sistem kutupları

Şekil 4.12 ve Çizelge 4.3’de görüleceği üzere, karmaşık düzlemin gerçekte ekseninde 12 adet kutup bulunmaktadır. Çalışma uzayındaki noktalarda bu kutup değerleri küçük değişimler

sergilemekle beraber her zaman karmaşık düzlemin sol yarısında olduğu görülmektedir. Bu sebeple oluşturulan model, belirtilen küresel çalışma uzayı dâhilinde kararlı bir hal sergilemektedir. Bununla birlikte sistemin belirtilen noktaların herhangi birinden serbest bırakıldığında düzlemsel olarak denge noktası olan “x” ve “y” ekseninde sıfır noktasına gitmesi model kararlılığını kanıtlar bir gözlem olarak değerlendirilebilir.

Şekil 4.12’de sistem kutuplarının sıfıra yakın ve uzak iki nokta etrafında yoğunlaştığı görülmektedir. Bu kutup noktalarından yüksek değere sahip olanların sistem dinamiğine tesirinin az olduğu göz önüne alınırsa, geriye kalan ve sıfır noktasına yakın altı kökün her birinin gerçek ekseninde olması aşırı sönümlü sistem karakteristiğine işaret ettiği söylenebilir. Ayrıca büyük değerli kökler elektriksel dinamiğe, küçük değerli kökler mekanik dinamiğe karşılık gelmektedir.

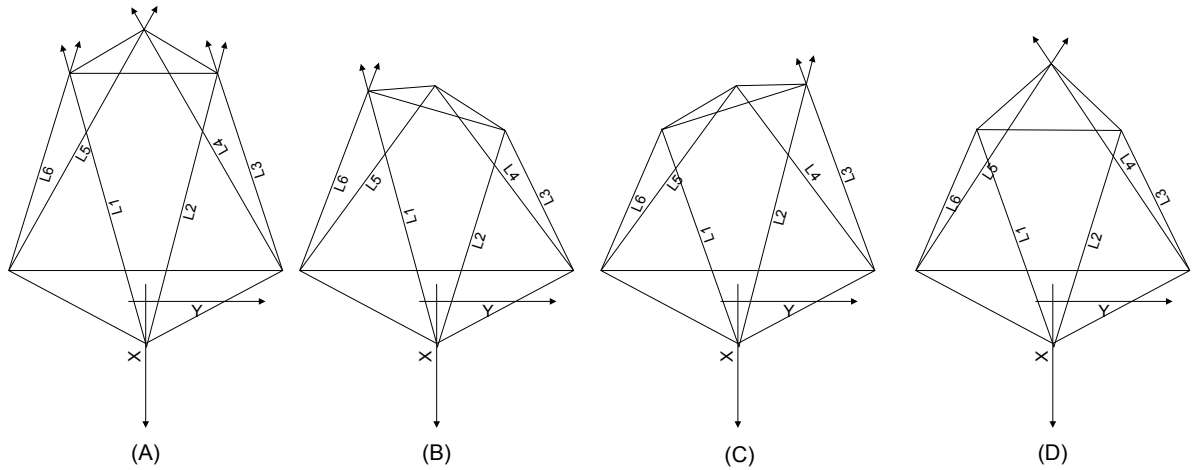
Çizelge 4. 3 Çalışma uzayına ait noktalardaki sistem kutupları

P14	P13	P12	P11	P10	P9	P8	P6	P5	P4	P3	P2	P1	Nokta
0,025	-0,025	-0,025	0,025	0,025	-0,025	-0,025	0	0	0	-0,05	0	0,05	x (m)
-0,025	-0,025	0,025	0,025	-0,025	-0,025	0,025	0	0	-0,05	0	0,05	0	y(m)
0,365	0,365	0,365	0,365	0,435	0,435	0,435	0,35	0,45	0,4	0,4	0,4	0,4	z(m)
-26,02	-25,83	-25,83	-26,02	-29,13	-26,13	-26,13	-3,41	-6640,2	-25,76	-6654,1	-25,76	-12,56	Kutuplar
-27,32	-27,41	-27,41	-27,32	-27,07	-27,21	-27,21	-3,41	-6637,3	-27,37	-6640,9	-27,37	-27,59	
-27,03	-27,13	-27,13	-27,03	-26,28	-29,12	-29,12	-15,47	-6640,2	-28,36	-6663,9	-28,36	-2,61	
-14,47	-14,46	-14,46	-14,47	-11,16	-11,16	-11,16	-26,71	-6656	-12,56	-6638,3	-12,56	-25,57	
-3,06	-3,08	-3,08	-3,06	-2,29	-2,38	-2,38	-26,71	-6664,4	-2,59	-6639,9	-2,59	-28,34	
-3,24	-3,22	-3,22	-3,24	-2,39	-2,3	-2,3	-26,46	-6664,4	-2,76	-6664,1	-2,76	-2,73	
-6639,5	-6641,1	-6641,1	-6639,5	-6637,5	-6640,8	-6640,8	-6651,2	-26,74	-6641,2	-12,56	-6641,2	-6654,1	
-6639,8	-6639,6	-6639,6	-6639,8	-6639,9	-6639,7	-6639,7	-6663,2	-26,74	-6639,6	-26,03	-6639,6	-6664	
-6640,9	-6639,5	-6639,5	-6640,9	-6640,7	-6637,5	-6637,5	-6663,2	-29,37	-6638,3	-2,78	-6638,3	-6639,3	
-6652,2	-6652,2	-6652,2	-6652,2	-6655,5	-6655,5	-6655,5	-6640,2	-10,68	-6654,1	-27,08	-6654,1	-6663,9	
-6663,6	-6663,4	-6663,4	-6663,6	-6664,4	-6664,3	-6664,3	-6640,2	-2,23	-6664,1	-28,37	-6664,1	-6641,4	
-6663,4	-6663,6	-6663,6	-6663,4	-6664,3	-6664,3	-6664,3	-6640,2	-2,23	-6663,9	-2,56	-6663,9	-6638,3	

4.3.1 SPM Bağ-grafik Modelinin Simölasyonu ve Gerçek Sistemle Karşılaştırılması.

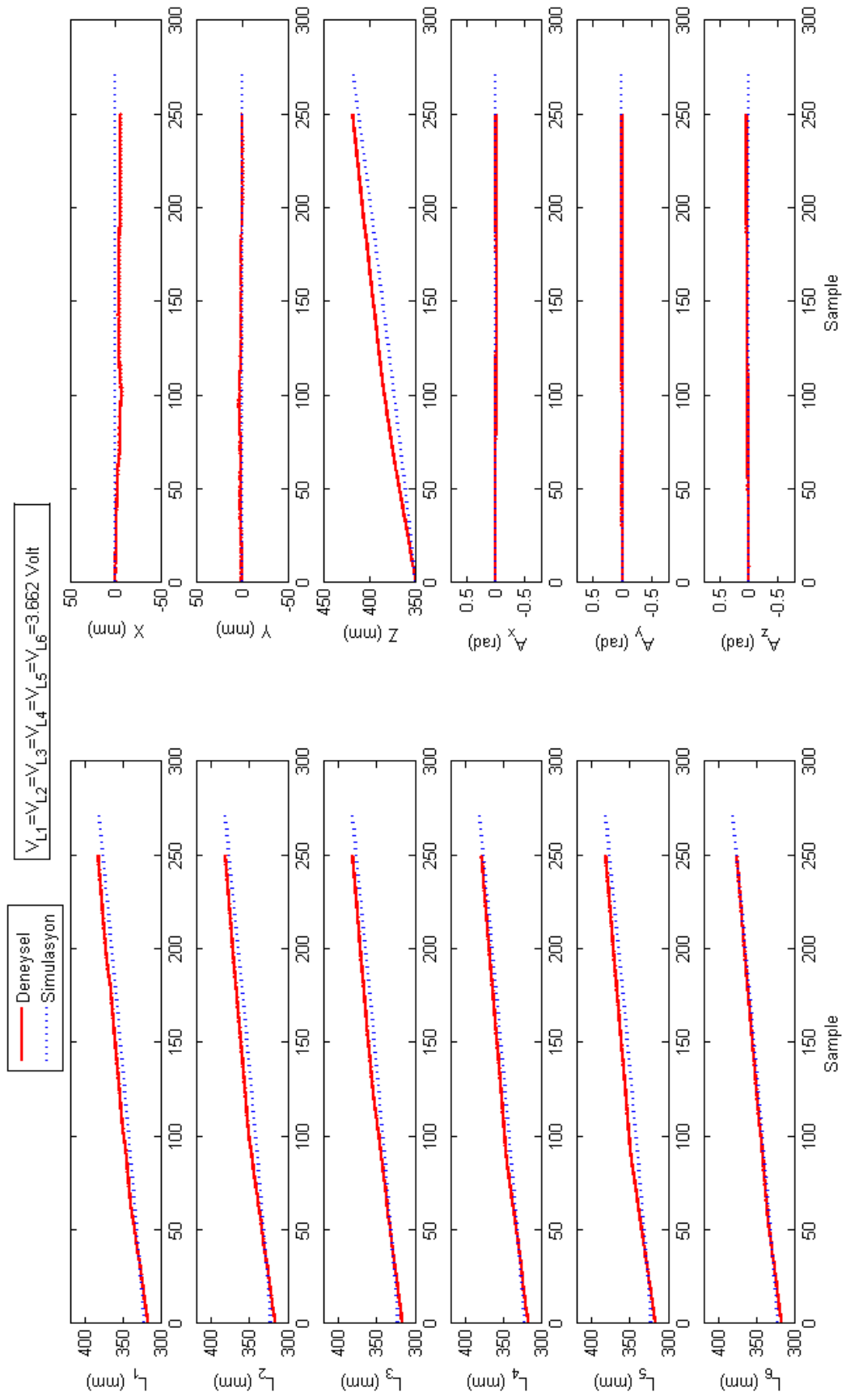
Sistemin Bağ-grafik modelinden elde edilen (4.56) denkleminin simölasyonu için 4 ayrı senaryo belirlenmiştir. Belirlenen senaryolarda denetleyici etkisini model karşılaştırmasına katmamak için üst platforma aynı mafsallarla bağlanmış motor çiftlerine enerji verilerek düz kinematik hesaplamaların da yardımı ile platform konumları elde edilmiş ve gerçek sistemde de aynı metot kullanılarak karşılaştırmalar yapılmıştır.

Birinci senaryoda 6 bacağa da aynı değerde “3.662 Volt” gerilim verilerek platform hareketi incelenmiştir. Diğer üç senaryoda ise sırası ile 1-6, 2-3, 4-5 motor çiftlerine “3.662 Volt” gerilim verilmiş, bunlar haricinde kalan 4 motora ise mevcut konumlarını korumaları için “3.357 volt” gerilim uygulanmıştır. Simölasyon senaryoları ve platformun olası hareketleri şekil 4.13’ de gösterilmektedir.

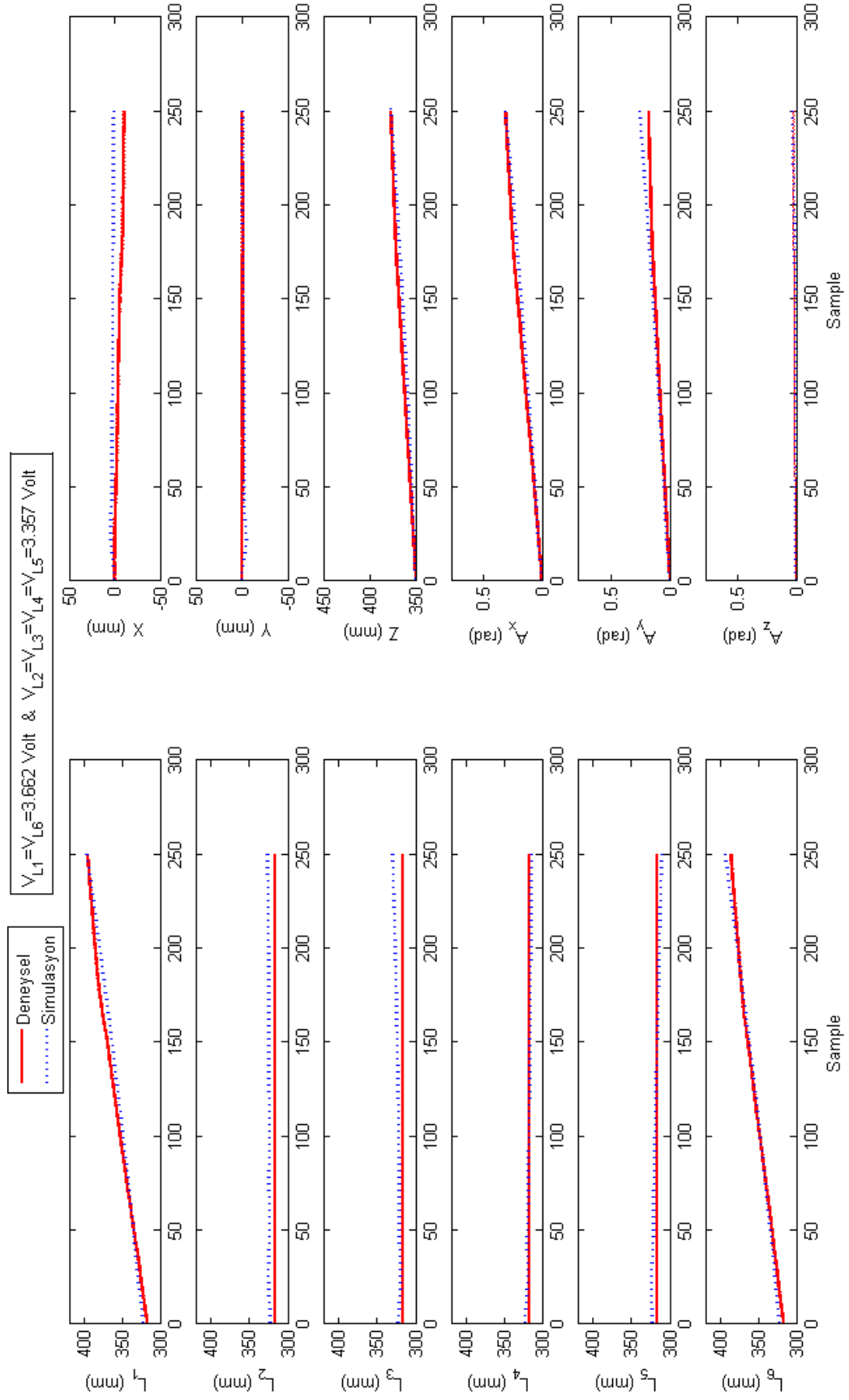


Şekil 4. 13 Deney ve simölasyon senaryoları

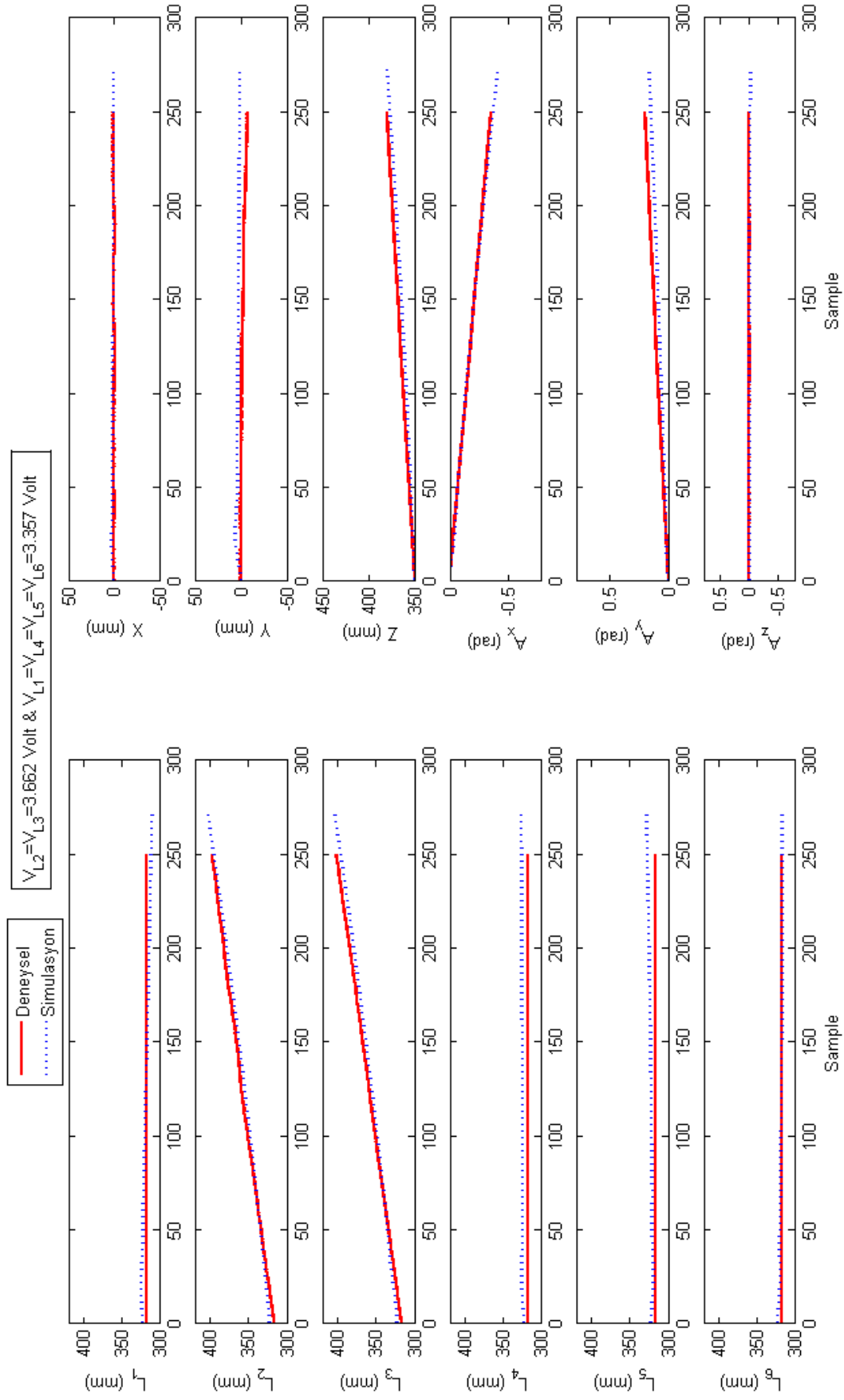
Deneyssel sisteme ve Bağ-grafik modele uygulanan senaryolar sonucu bacak uzunlukları ve platform konumlarını gösteren grafikler karşılaştırma için şekil 4.14-15-16-17’ de verilmiştir.



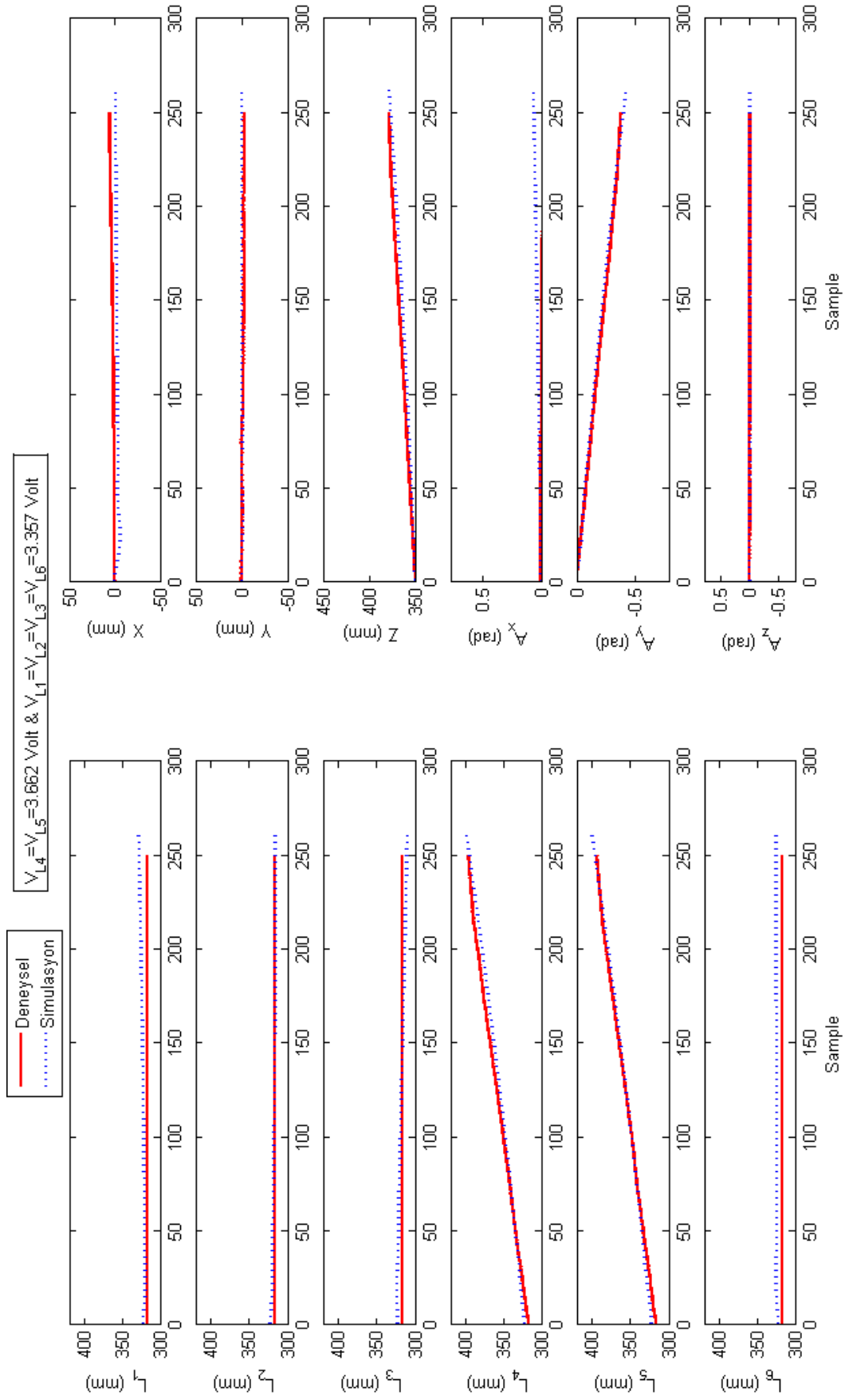
Şekil 4. 14 Birinci senaryo için deneysel SPM ve bağ-grafik modelinin karşılaştırılması



Şekil 4. 15 İkinci senaryo için deneysel SPM ve bağ-grafik modelinin karşılaştırılması



Şekil 4. 16 Üçüncü senaryo için deneysel SPM ve bağ-grafik modelinin karşılaştırılması



Şekil 4. 17 Dördüncü senaryo için deneysel SPM ve bağ-grafik modelinin karşılaştırılması

Şekil 4.14-15-16-17' den de görüleceği gibi deneysel sisteme ait bacak uzunlukları ile simülasyona ait bacak uzunlukları ve deneysel sisteme ait platform konumları ile simülasyona ait platform konumları büyük ölçüde örtüşmektedir. Model ve gerçek sistem cevaplarının örtüşmesi modelin büyük ölçüde doğru olduğunu göstermektedir.

Sonuçların gerçek sistemle örtüşmesi ve sistemin kararlılığı hakkında bilgi edinilmesi SPM' nin Bağ-grafik modelinin bir avantajı olmasına rağmen, işlem yükü ve yüksek frekansta çalışması zorunluluğu modelin simülasyonunun çok yavaş çalışmasına sebep olmakta, bu da kontrol çalışmalarını olumsuz etkilemektedir. Bu sebeple Matlab programı altında sim-mechanics blokları kullanılarak SPM' nin modeli oluşturulmuş ve takip eden bölümlerdeki kontrol çalışmaları bu model üzerinde yapılmıştır.

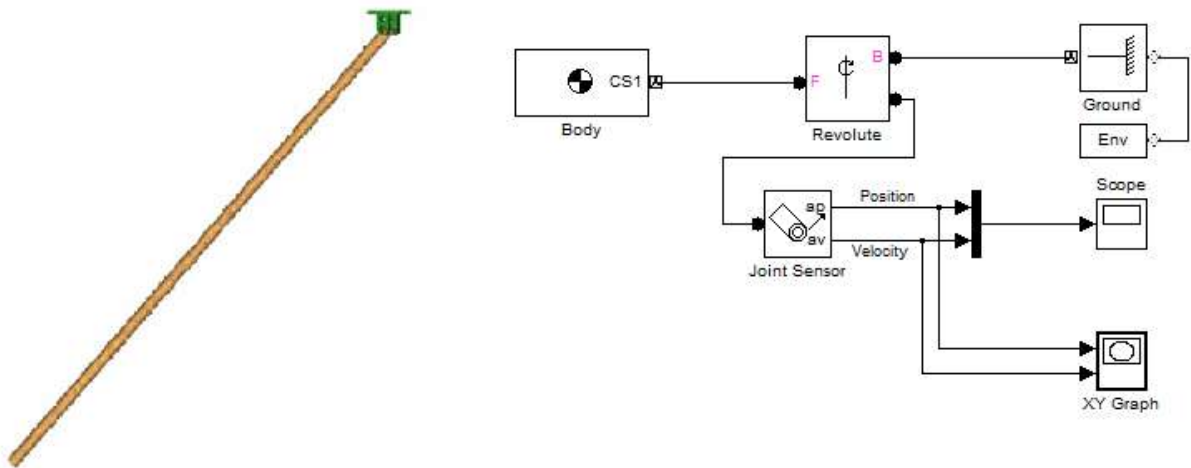
BÖLÜM 5

STEWART PLATFORM MEKANİZMASININ “SIM-MECHANICS” MODELİ

“Sim-mechanics” “Matlab-Simulink” altında çalışan ve mekanik sistemlerin dinamik modellerinin oluşturulmasına yarayan blok topluluğudur. Bu blok topluluğu temelinde, modellenecek sisteme ait kuvvet ve momentlerin Newton dinamikleri ile üç boyutlu uzaydaki hareket ve davranışlarını belirleyen alt fonksiyonlara bağlı programcıklardan oluşmaktadır.

5.1 Prensipde “Sim-Mechanics” blokları

“Sim-mechanics” modelleme blok diyagramlarla model oluşturulması prensibine dayalıdır. Görsel olarak mekanizmanın modelinin iyi bir şekilde anlaşılmasını sağlamakla beraber, sanal gerçeklikte, sistemin motorlar, eklemler ve sensörler kullanarak yeniden oluşturulması, modelin gerçek sisteme uyumu açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Blok içeriklerinin tam olarak hangi dinamik öğeleri içerdiğinin çok iyi görülememesi, dinamik modelin matematiksel karakteristiğini anlamak açısından önemlidir. Bu sebeple, sistemin matematiği, blokların içerisinde saklıdır denilebilir.



Şekil 5. 1 Örnek sarkaç mekanizmasının modellenmesi

Örnek olarak şekil 5.1’de verilen sarkaç mekanizmasında “body” bloğu sarkaç gövdesini temsil etmektedir. Bu blokta kullanıcının; kütleyi, referans eksen takımına göre atalet matrisini ve ağırlık merkezinin koordinatlarını girmesi gerekmektedir. Girilen koordinatlar başlangıç konumu olacaktır. Modelin en kritik elemanlarından birisi olan ve “Revolute” olarak gösterilen blok sistemin başka bir sisteme veya sabit bir düzleme bağlandığı mafsallı veya eklemi temsil etmektedir. Bu blokta kullanıcı, eklemin hangi ekseninde serbestliği olduğunu girmelidir. “Ground” bloğu ise mekanizmanın bağlandığı sabit bir noktayı ifade etmektedir. Kullanıcı diğer bloklarda olduğu gibi burada da bu noktanın koordinatlarını girmelidir. “Env” bloğu ise başta yerçekimi vektörünün tanımlanması olmak üzere, mekanizmanın kaç boyutlu bir ortamda tanımlandığı, analiz metodu, doğrusallık ve görsellik bakımından mekanizmanın bulunduğu sanal ortamı temsil eder. Bloklar birbirine bağlandıktan sonra oluşturulan yapı fiziksel bir sistemin matematiksel bir modeli olduğundan bu modelin simülasyonu için matematiksel denklemlerin çözülmesi gerekmektedir. Bunun için ise simülasyon zamanı ve bir çözümleyici ,“solver”, tanımlanır.

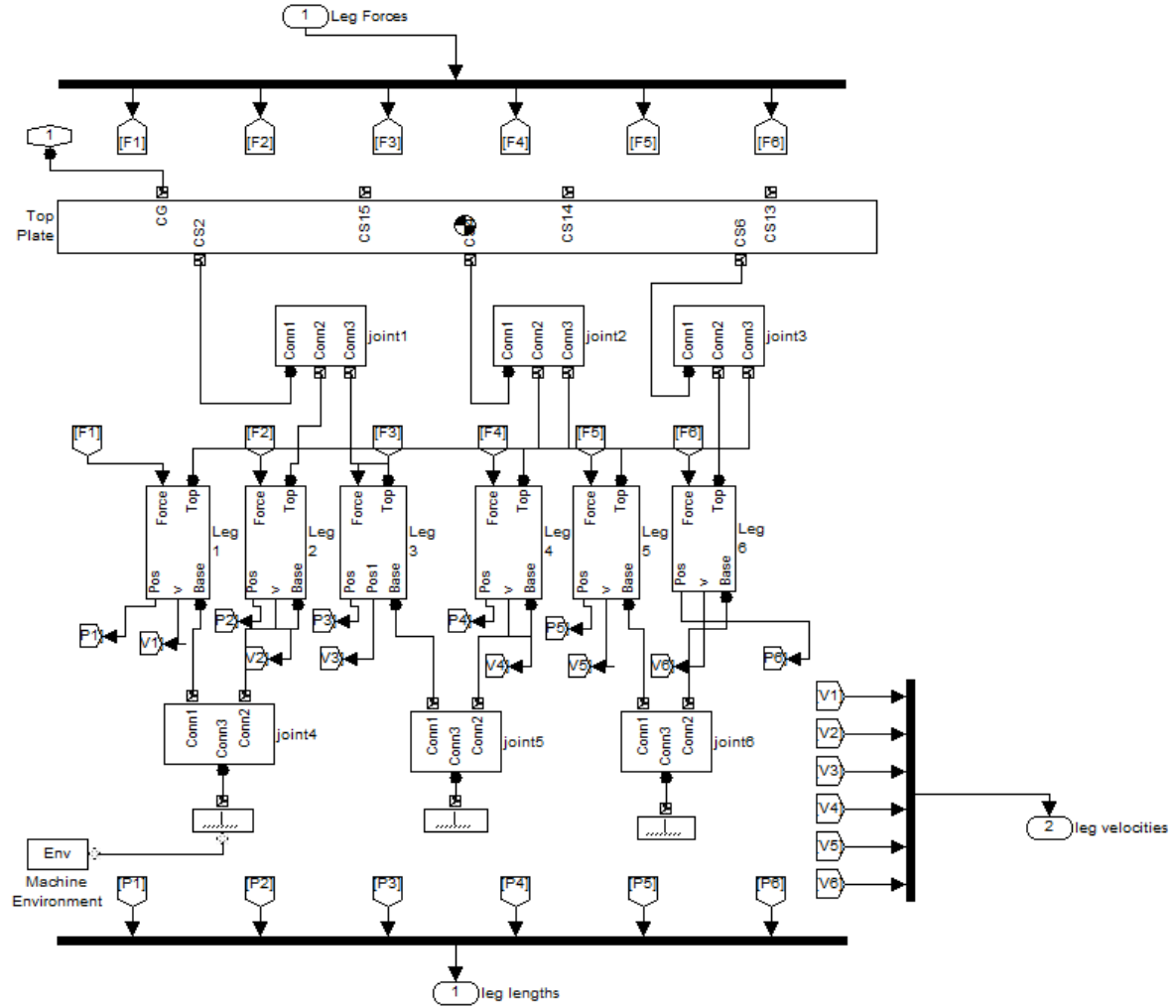
Özetlemek gerekirse sim-mechanics modelde kritik noktalar “body” , “joint” blokları ve çözümleyici “solver” tipidir. Simülasyon esnasında sistemin hareketlerini bir animasyon penceresinden izlemek mümkündür. Ayrıca ilave bloklar yardımı ile mekanik sistemin istenilen herhangi bir noktasından hız, ivme kuvvet gibi değerleri okumak ve grafiğe dökmek oldukça kolaydır.

Blok diyagram ile sistemi kolay anlaşılır bir şekilde ifade etmesi, simülasyon esnasında modeli görsel olarak izlemenin mümkün olması ve modellerin çok çabuk ve hızlı bir şekilde oluşturulması “sim-mechanics” ile modellemenin bir avantajı olmasına rağmen simülasyonun bütün matematik alt yapısının blokların ardında kalması ve gözlemlenememesi bir dezavantajdır.

5.2 3x3 Stewart Platform Mekanizmasının “Sim-Mechanics” Modeli

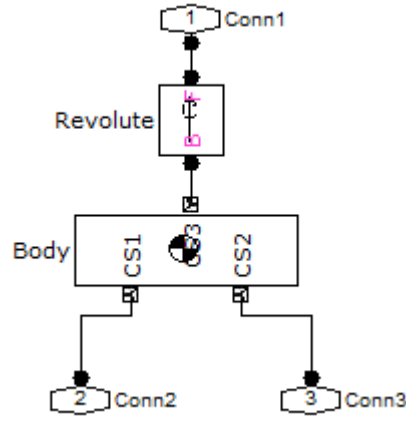
Stewart Platform Mekanizmasının “sim-mechanics” de oluşturulan modeli şekil 5.2 de görülmektedir. Burada “Leg Forces” ile gösterilen giriş motorlardan bacaklara aktarılan kuvvet girişini ifade etmektedir. “Top Plate” bloğu platformun mobil kısmını ifade etmekle

birlikte kütle ve atalet girdileri modeldeki diğer kullanıcı girdileri ile birlikte bir ön yükleme dosyası ile verilmektedir. Bu dosya Ek-D de verilmektedir.



Şekil 5. 2 SPM'nin "Sim-mechanics" modeli

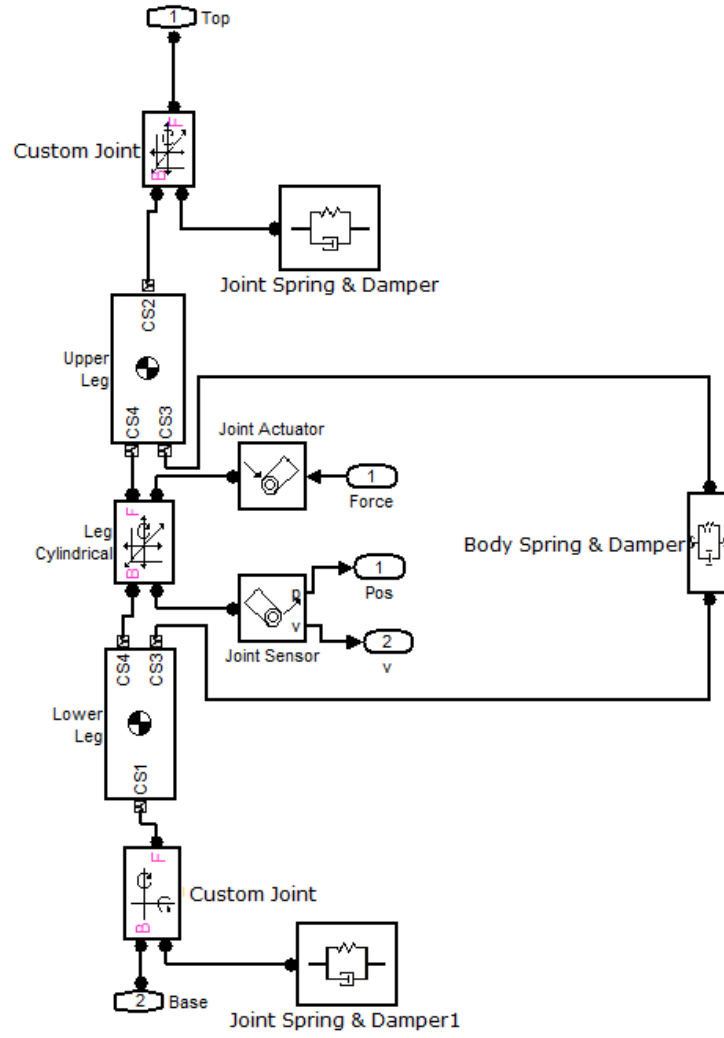
"Top plate" bloğunun "CG" bağlantı noktasına bağlanan giriş ise hareketli platformun hareketli üst kısımdan konum bilgisi almak için oluşturulmuş sensör girişidir. Bloğun diğer bağlantı noktalarına ise "joint" adlı bloklar bağlanmaktadır. Bu bloklar ise gerçek sistemdeki eklemlerin "z" eksenindeki serbestliğini ifade etmektedir. Bloğun detayı şekil 5.3' de verilmektedir.



Şekil 5. 3 “Joint” bloğunun içeriği

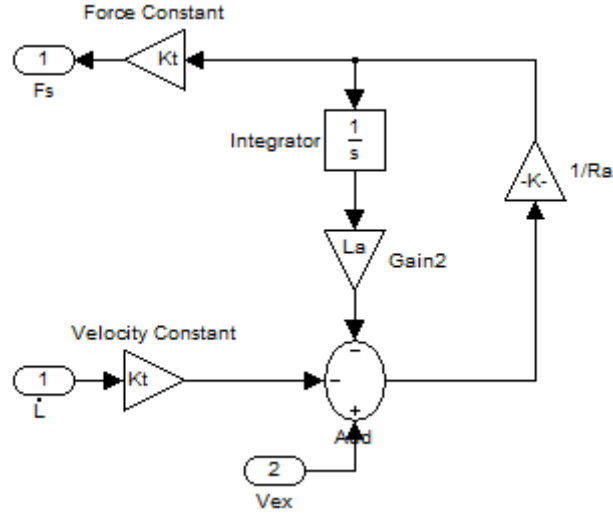
Şekil 5.3’ de verilen “joint” bloklarında ağırlığı ve ataleti ihmal edilse dahi “sim-mechanics” blokları bir eklemin başka bir ekleme arada bir “body” bloğu olmadan bağlanmasına izin vermemektedir. “joint” bloğu gerçek sistemde üç ekseninde de hareket edebilen eklemin sadece bir eksenindeki serbestliğini ifade ettiği için burada kullanılan “body” bloğuna kütle ve atalet bilgisi yüklenmemiştir. “joint” bloğu içeriği şekil 5.4’ de verilen “Leg” bloğuna bağlanır.

“Leg” bloğu Stewart Platform Mekanizmasının motorlarının bağlandığı her bir bacağı temsil etmektedir. Şekil 5.4 de gösterilen “Leg” bloğunda “Custom Joint” ile ifade edilen blok “x” ve “y” eksenlerinde dönme serbestliği olan 2 eksenli mafsala temsil eder. Bu mafsala bağlı “Upper Leg” bloğu gerçekte motorun doğrusal hareket etmesini sağlayan motor milinin kütle ve atalet etkisini ifade etmektedir. “Joint Spring&Damper” bloğu ise bu mafsaldaki sürtünme ve elastisite etkisini modele dâhil etmektedir. Bu modelde mafsala elastikliği ihmal edilmiş ancak sürtünmesi dâhil edilmiştir. “Leg Cylindrical” bloğu ise bacağın doğrusal hareket etmesi için bacak eksenine göre sadece “z” ekseninde öteleme serbestliği olan bir yataktır. Bu yatak, bacağın sadece açısal hareket eden alt kısmının kütle ve atalet etkisini gösteren “Lower Leg” bloğunu “Upper Leg” bloğuna bağlamaktadır. “Joint Actuator” bloğu ise modellenen bacağın doğrusal hareketini yapabilmesi için “Upper Leg” bloğuna aktarılması gereken kuvvet girişini sağlamaktadır. Bu kuvvet girişi doğrudan yapılabileceği gibi, bu modelde de kullanıldığı üzere Şekil 5.5’de gösterilen dc motor modelinden faydalanılarak elde edilebilir. “Joint Sensor” bloğu ise bacağın konum ve hızını gözlemlemek için kullanılan bir bloktur. “Body Spring&Damper” bloğu ise doğrusal yatak için sürtünmenin tanımlandığı bloğu temsil etmektedir.



Şekil 5. 4 “Leg” Bloğu içeriği

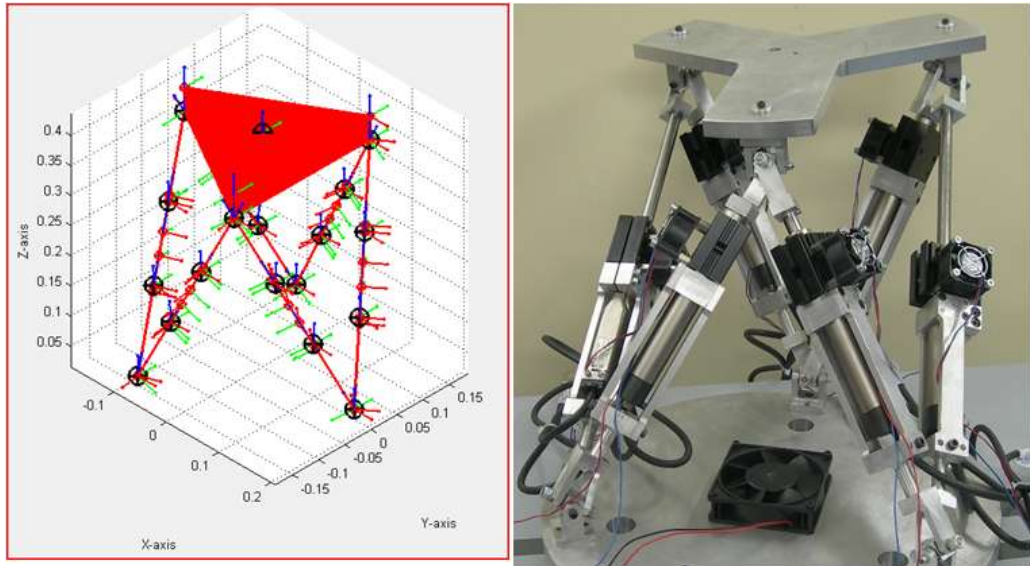
Şekil 5.5 de ise mekanizmada kullanılan dorusal motor modeli verilmektedir. Bu modelde “Force Constant” motorun kuvvet katsayısı olmakla beraber hız katsayısına “Velocity Constant” eşittir. “ V_{ex} ” girişi motor tahrik gerilimini, “ L_a ” motor endüktansını ve “ R_a ” ise motorun elektriksel direncini ifade etmektedir. Burada üretilen “ F_s ” kuvvet çıkışı Şekil 5.4 de gösterilen “Leg” bloğuna doğrusal hareketi tahrik etmek maksadıyla bağlanmaktadır. “ $\dot{L}$ ” ise yine Şekil 5.4 de verilen “joint sensör” bloğundan geri beslenen motor hızıdır.



Şekil 5. 5 DC Motor modeli

5.3 3x3 Stewart Platformunun Simülasyonu

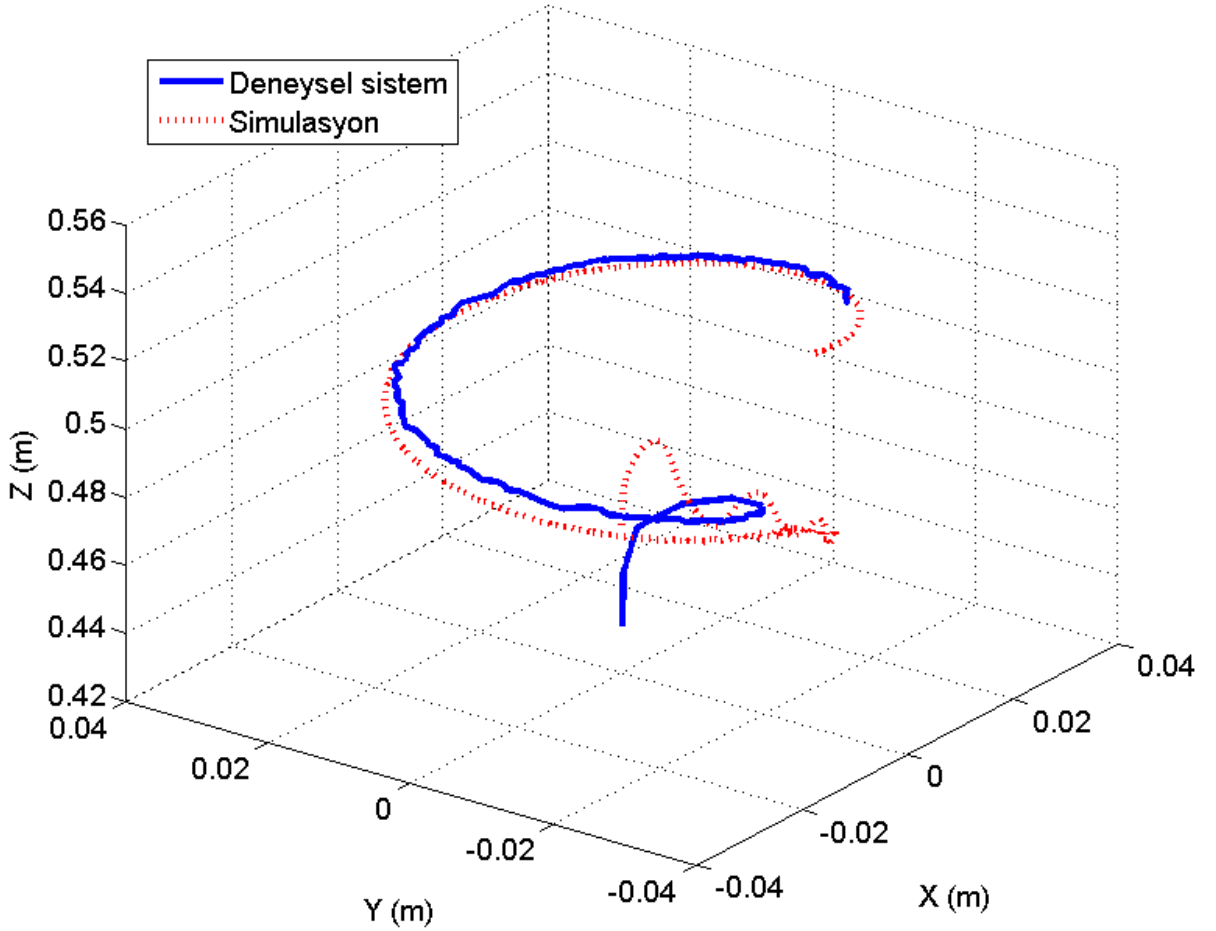
Bölüm 5.2 de “Sim-Mechanics” modeli oluşturulan stewart platform mekanizmasının sabit adımlı (“Fixed Step”) çözümleyici tipi (“solver type”) ile, Runge kutta çözümünü kullanarak (“ode3”), 0.001 sn örnekleme periyodu ile simülasyonu yapılmıştır. Modelin animasyonundan alınan bir görüntü ve deneysel sistem şekil 5.6 da görülmektedir.



Şekil 5. 6 Stewart Platform Mekanizmasına ait “Sim-mechanics” model ve deneysel sistem.

Tasarlanan denetleyicilerin deneneceği ve karşılaştırılacağı simülasyon ortamı ve gerçek sistemin uyumluluğu açısından, bir ön karşılaştırma olarak, iki sisteme de oransal kontrol tabanlı katılık kontrolü uygulanmıştır, Şekil 7.6. Bu kontrolde, kuvvet/tork sensörüne her altı ekseninde de bağlanmış ve katsayısı önceden belirlenmiş, sanal bir yayın varlığı kabul

edilmiştir. Kullanıcı, kuvvet/tork uyguladığı zaman bu sanal yay üzerinde bir yer değiştirmeye sebep olacağından, denetleyici bu yerdeğiştirmenin miktarını referans olarak kontrolü gerçekleştirmektedir. Uygulanan bu kuvvet/tork miktarı, modelde simüle edilmiştir. Farklı eksenlerde uygulanan kuvvet profiline mukabil, elde edilen iki sistemin yer değişimi cevapları, uyumluluk olduğunu ve modelin kontrol tasarımında kullanılabileceğini göstermektedir, Şekil 5.7.



Şekil 5. 7 Deneysel 3x3 SP mekanizmasının ve simülasyon ortamındaki benzerinin cevaplarının karşılaştırılması.

STEWART PLATFORM MEKANİZMASININ POZİSYON KONTROLÜ

SP mekanizması, çalışma uzayı içinde doğrusal olmayan bir dinamik yapıya sahip olduğundan, bu uzay içinde tekdüze bir kontrol uygulanması ve dolayısıyla sabit bir kontrol performansı beklenmesi manasız olacaktır.

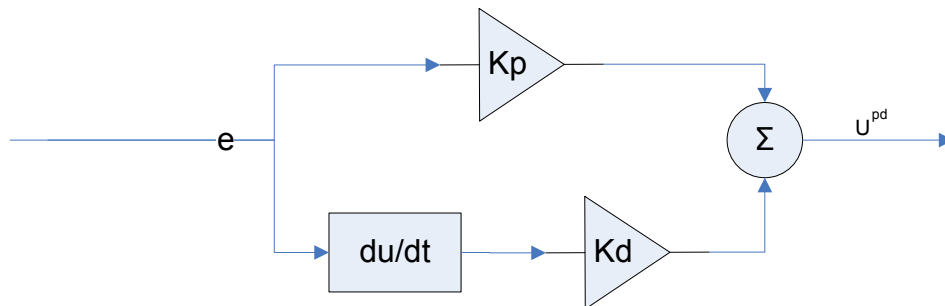
Mekanizmanın konum kontrolü incelenirken, sisteme dört farklı denetleyici uygulanmıştır. Bunlar PD kontrol, Bulanık Mantık-PD kontrol (BMPD), Kazanç ayarlamalı bulanık mantık PD kontrol (KABMPD), Kazanç ayarlamalı bulanık mantık-PD kontrol ve paralel PD kontrol (KABMPD+PD).

6.1 SP Mekanizmasının PD Kontrolü

Bilindiği üzere bir oransal-türevsel (PD) denetleyicinin yapısı,

$$U^{PD} = k_p \cdot e + k_d \cdot \dot{e} \quad (6.1)$$

şeklinde dir.



Şekil 6. 1 PD denetleyici blok diyagramı

Şekil 6.1’ de klasik bir PD denetleyicinin blok diyagramı verilmiştir. Bu ve takip eden denetleyiciler SPM’ na her bir bacak için ayrı uygulanmıştır. Yani 6 bacak için 6 adet aynı tip denetleyici kullanılmıştır.

6.2 SP Mekanizmasının Bulanık Mantık PD Kontrolü

Bulanık mantık denetleyiciler; bulandırma, bilgi tabanı, karar verme ve netleştirme birimlerinden oluşmaktadır, [53].

6.2.1 Bulandırma birimi

Giriş bilgilerini üyelik fonksiyonlarını kullanarak girişi, büyük, orta ve küçük gibi dilsel değişkenlere atayarak bulandıran kısımdır.

6.2.2 Bilgi tabanı

Karar verme biriminin kullandığı kural tabanı ve veri tabanından oluşmaktadır.

6.2.3 Karar Verme Birimi

Bu birim çıkarım motoru olarak da adlandırılır. Giriş bilgilerinin bilgi tabanı ile yorumlanıp kararların verildiği kısımdır. “Mamdani” bulanık içermesi çıkarım metodlarında sık kullanılan bir yöntem olup bu içirme aşağıdaki eşitlikte verilmektedir.

$$R_C = A \times B = \int_{U \times V} \mu_A(U) \cap \mu_B(V)$$

Bulanık çıkarım için bir çok farklı yapı mevcuttur. Bu yöntemler aşağıda kısaca açıklanmıştır.

6.2.3.1 “Max-Dot” Yöntemi

Bu yöntemde bulanık küme giriş değerlerine bağlı olarak yeniden ölçeklenir ve bu ölçeklemeler sonunda maksimum değeri alan küme çıkış olarak belirlenir.

6.2.3.2 “Min-Max” Yöntemi

Bu yöntemde, giriş değerleri ile birlikte üyelik derecesine bağlı olarak ilgili bulanık kümenin bu değer üzerindeki kısmı atılır. Bu atılan maksimum noktalardan ortak bir minimum nokta

elde edilir. Çıkış değeri genelde elde edilen kümelerle ağırlık ortalaması yönteminin uygulanması ile bulunur. Bu çalışmada bu yöntem kullanılmıştır.

6.2.3.3 “Tsukamoto” Yöntemi

Bu yapıda çıkış fonksiyonu tek yönlü artan bir fonksiyon olarak seçilir. Giriş değerine göre her bir bulanık kümenin çıkışı bulunur ve bunların ağırlık ortalaması alınarak çıkış fonksiyonu ile sonuca ulaşılır.

6.2.3.4 “Takagi-Sugeno” Yöntemi

Bu yöntemde ise her bir kümenin çıkışı giriş değeriyle olan lineer birleşiminden bulunur.

6.2.4 Netleştirme Birimi

Netleştirme biriminde bulanık çıkarımdan gelen ve hala bulanık olan verilerin sisteme tekrar dâhil edilebilmesi için gerekli sayısallaştırma işlemleri yapılır. Bu işlem birkaç farklı yöntemle yapılabilir.

6.2.4.1 Maksimum Üyelik Yöntemi

Bu yöntemde sonuç ilgili üyelik derecelerinin en büyüğüne eşittir.

6.2.4.2 Ağırlık Merkezi Yöntemi

En yaygın olarak kullanılan netleştirme yöntemlerinden birisidir. Aşağıdaki eşitlikte gösterildiği gibi ifade edilmektedir.

$$z^* = \frac{\int \mu_C(z).z.dz}{\int \mu_C(z).dz}$$

Üyelik derecelerinin çıkış fonksiyonu üzerinde oluşturduğu düzlemsel şeklin alan ağırlık merkezi çıkış olarak alınmaktadır.

Ağırlık merkezi bulunmasında kimi durumlarda integral kullanmak gerektiğinden bu çalışmada hız bakımından ağırlık ortalaması yöntemi tercih edilmiştir.

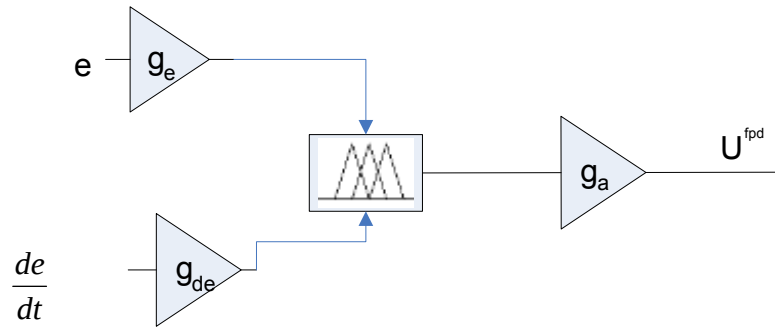
6.2.4.3 Ağırlık Ortalaması Yöntemi

Bu yöntemde, bulanık kümenin merkezi ile yüksekliği çarpılıp bulanık kümelerin toplam yüksekliğine bölünmesi ile çıkış elde edilir. Aşağıda verilen eşitlikte gösterildiği gibi ifade edilmektedir.

$$z^* = \frac{\sum \mu_c(\bar{z}).\bar{z}}{\sum \mu_c(\bar{z})}$$

Burada, $\bar{z}$ bulanık kümenin merkezini, $\mu_c(\bar{z})$ yüksekliğini göstermektedir. Hesaplanmasının kolay olması sebebiyle tercih edilen bir yöntemdir.

Stewart Platformunun bulanık mantık kontrolünde ise, integral etkinin, sistemde kararsızlığa yakın, istenmeyen cevaplara sebep olması dolayısıyla, bulanık PD denetleyici algoritması kullanılmıştır. Denklem 6.1 de verilen PD denetleyicide hata ve hatanın türevi belirli katsayılarla ölçeklendikten sonra bulanık mantık denetleyicide bir kontrol çıkışı elde edilmesiyle Bulanık Mantık PD kontrolü elde edilmiş olunur, (şekil 6.2).

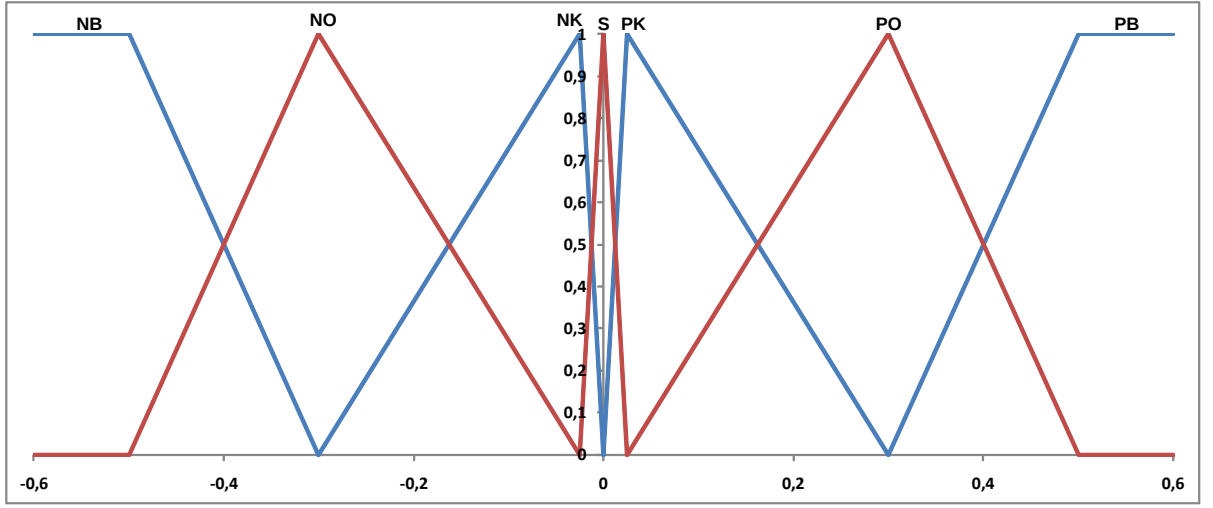


Şekil 6. 2 Bulanık Mantık PD denetleyici blok diyagramı

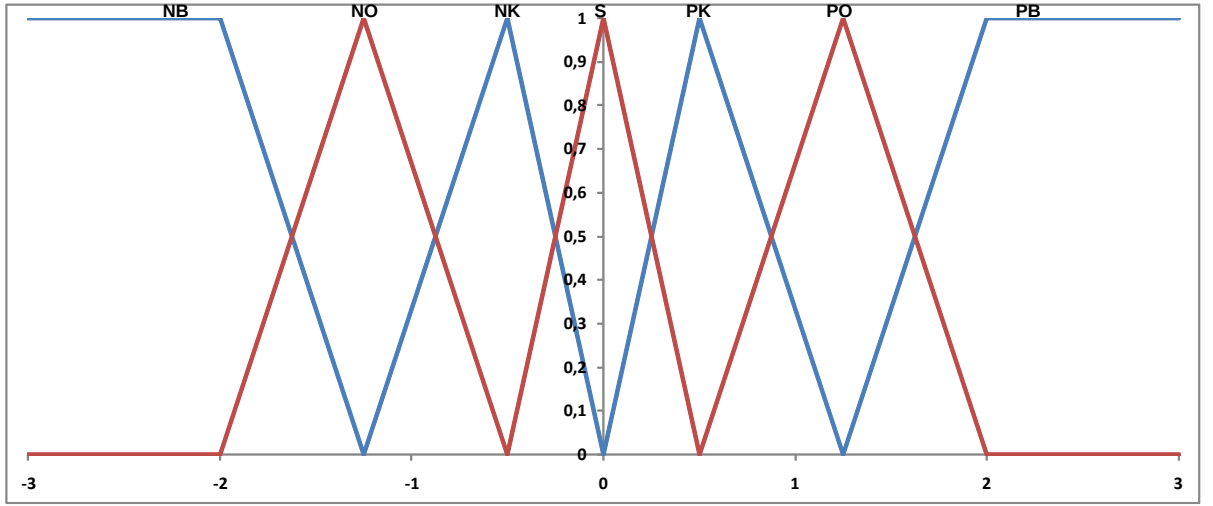
Şekil 6.2' de verilen denetleyicide “ g_e ” ve “ g_{de} ” sırasıyla hataya ve hatanın değişimine ait ölçekleme katsayılarıdır. “ g_a ” ise denetleyici çıkışı için tespit edilen ölçekleme katsayısıdır. Bununla yola çıkılarak, kontrol işareti 6.2 denkleminde verildiği gibi ifade edilebilir.

$$U^{b_{mpd}} = g_a . F\{g_e . e, g_{de} . \dot{e}\} \quad (6.2)$$

Bu denklemde $F\{ \}$ ifadesi bulanıklaştırma işlemini göstermektedir.



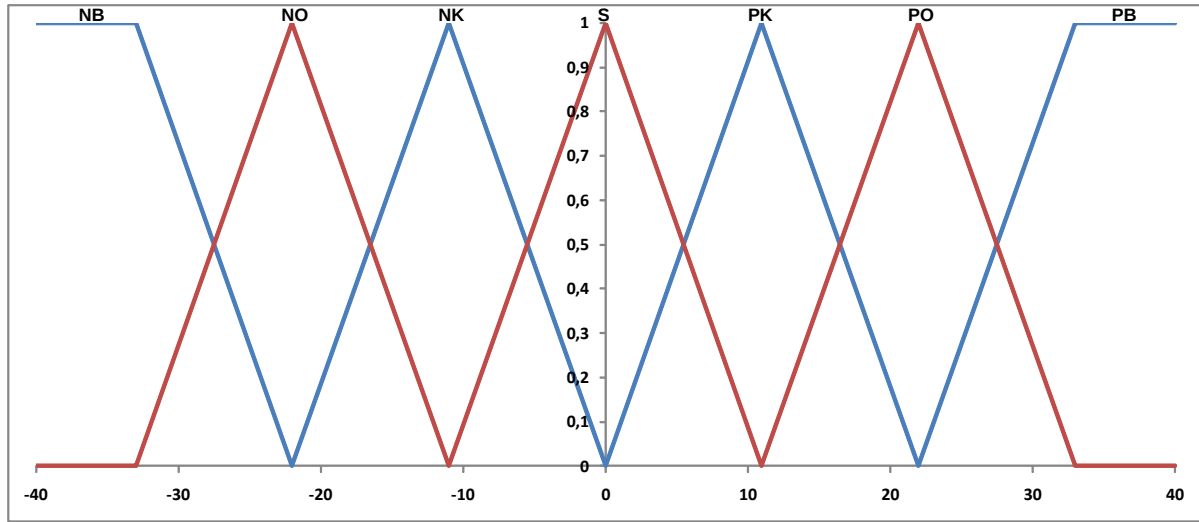
Şekil 6. 3 Hata işaretine ait üyelik fonksiyonu



Şekil 6. 4 Hatanın değişim işaretine ait üyelik fonksiyonu

Şekil 6.3 ve 6.4 de bulanık mantık denetleyiciye ait üyelik fonksiyonları verilmektedir. Bu fonksiyon grafiklerinde hataya ait fonksiyondaki yatay eksen metre cinsinden hatayı ifade etmektedir. Hatanın değişimine ait fonksiyonda ise m/s cinsinden hızı ifade etmektedir. Bu üyelik fonksiyonları Stewart Platform mekanizması kontrolüne uygulanacağı için ayrı ayrı her bir motoru kontrol etmekte kullanılacaktır. Grafik oluşturulurken yatay eksenindeki değerler motor limitleri ile belirlenmektedir. Bu projede kullanılan motorlarda mil değişik büyüklüklerde seçilebildiğinden sınırlar yüksek tutulmuştur. Sınırların yüksek tutulması ayrıca herhangi bir ölçekleme hatasından kaynaklanacak aşırı yüklenmeleri de kontrol altında tutmaktadır.

Daha hassas bir konum kontrolü için şekil 6.3 de verilen hataya ait üyelik fonksiyonunda hatanın sıfıra yaklaştığı kısımdaki üçgen dar olarak seçilmiştir. Bu bulanık mantık denetleyicinin çok küçük hatalarda bile etkili bir kontrol çıkışı üretmesini sağlar.



Şekil 6. 5 Kontrol çıkışına ait üyelik fonksiyonu

Şekil 6.5’de kontrol çıkışına ait üyelik fonksiyonu verilmektedir. Bu fonksiyonun çıkış değerleri ise yine motorlara ait maksimum Kuvvet değerleri verilerek oluşturulmuştur.

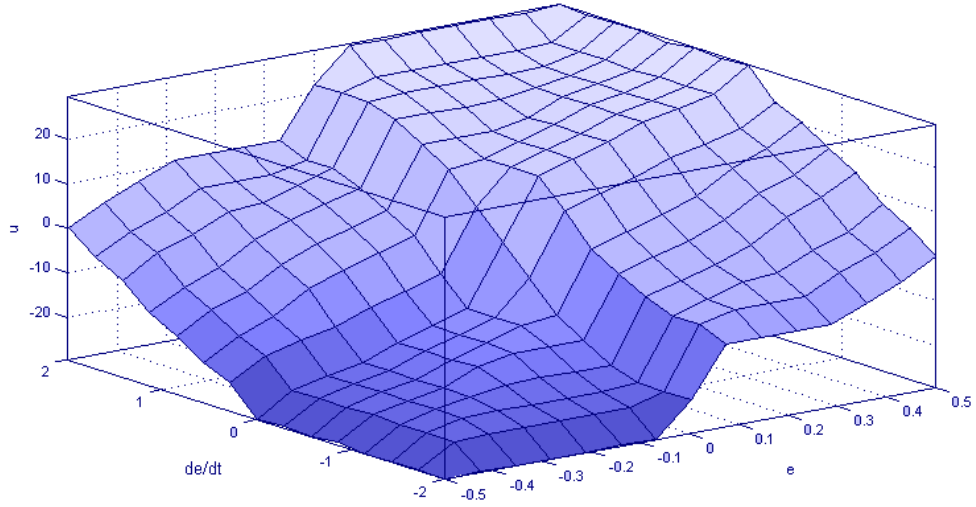
Çizelge 6. 1 BMPD denetleyiciye ait kural tablosu

$\Delta e/e$	NB	NO	NK	S	PK	PO	PB
NB	NB	NB	NB	NO	NK	NK	S
NO	NB	NO	NO	NO	NK	S	PK
NK	NB	NO	NK	NK	S	PK	PO
S	NB	NO	NK	S	PK	PO	PB
PK	NO	NK	S	PK	PK	PO	PB
PO	NK	S	PK	PO	PO	PO	PB
PB	S	PK	PK	PO	PB	PB	PB

Çizelge 6.1’ de Bulanık Mantık denetleyiciye ait kural tablosu verilmiştir. Bu kural tablosu iki fazlı (hata ve hatanın değişimi) düzlem kullanılarak tasarlanmıştır ve sık kullanılan bir kural tablosu olduğu için bu tablonun kullanılması uygun görülmüştür, [54]. Bu kural tablosunda kurallar aşağıda verilen şekilde tanımlanırsa, bulanık denetleyici PI ve PD denetleyici gibi davranır, (R.K.Mudi, N.R.Pal, 1999).

PI kuralı: Eğer “e”, “E” ise ve “ Δe ”, “ ΔE ” ise “ Δu ”, “ ΔU ” dur.

PD kuralı: Eğer “e”, “E” ise ve “ Δe ”, “ ΔE ” ise “u”, “U” dur.



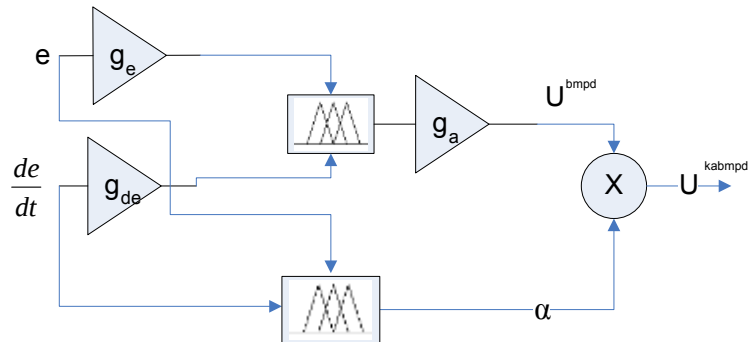
Şekil 6. 6 FPD kural yüzeyi

Şekil 6.6’da, bahsedilen bulanık denetleyiciye ait kural yüzeyi görülmektedir. Şekil 6.3 ve 6.4 de verilen üyelik fonksiyonlarında yedi tane farklı üyelik kümesi vardır. Bu kümeler ve çizelge 6.1 de verilen kural tablosu yardımıyla 49 tane kural yazılır. Kural yüzeyinden de hangi tip girişlerde ne tür bir çıkış verileceği görülebilir.

Çizelge 6.1’de PB; pozitif büyük, PO; pozitif orta, PK; pozitif küçük, S; sıfır, NK; negatif küçük, NO;negatif orta, NB; negatif büyük olarak kısaltılmıştır.

6.3 SP Mekanizmasının Kazanç Ayarlamalı Bulanık Mantık Kontrolü

Kazanç ayarlamalı bulanık denetleyicinin çıkışı, denklem 6.2’de verilen denetleyici çıkış sinyali, paralel bir bulanık denetleyici ile belirlenen bir ölçekleme faktörü ile çarpılarak, elde edilir.

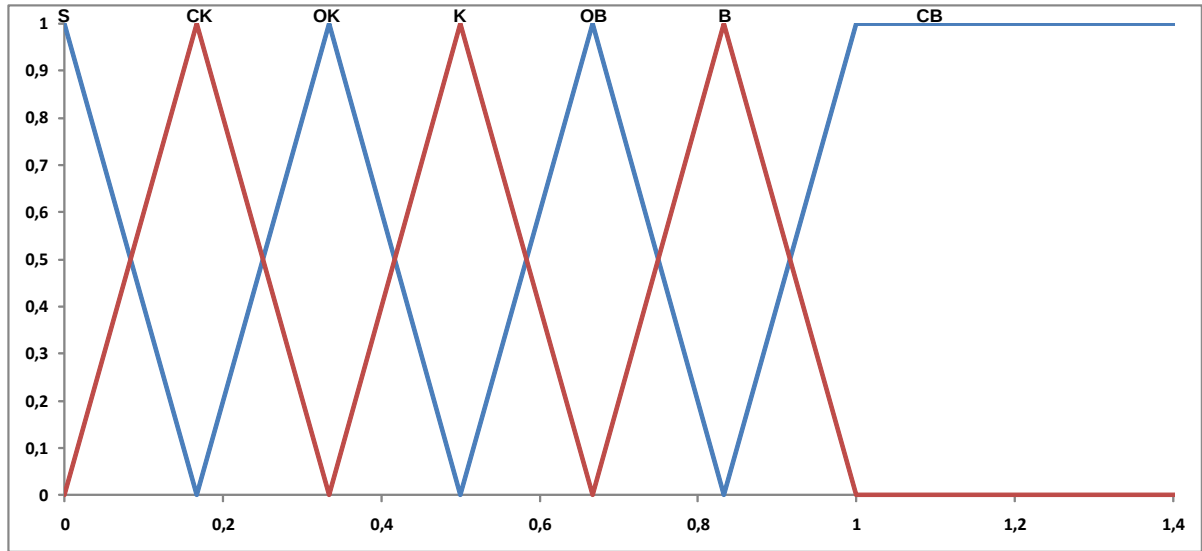


Şekil 6. 7 KABMPD denetleyici blok diyagramı

Bu denetleyici aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$U^{kabmpd} = U^{bmpd} \cdot F\{\alpha\} \quad (6.3)$$

Burada α ölçekleme faktörü olup, 0 ile 1 arasında farklı bir bulanık denetleyici aracılığıyla değişmektedir. Bu denetleyiciye ait üyelik giriş fonksiyonları aynen BMPD denetleyicide olduğu gibidir, (Şekil 6.3,6.4). Çıkış fonksiyonu ise Şekil 6.8’ de verilmektedir.

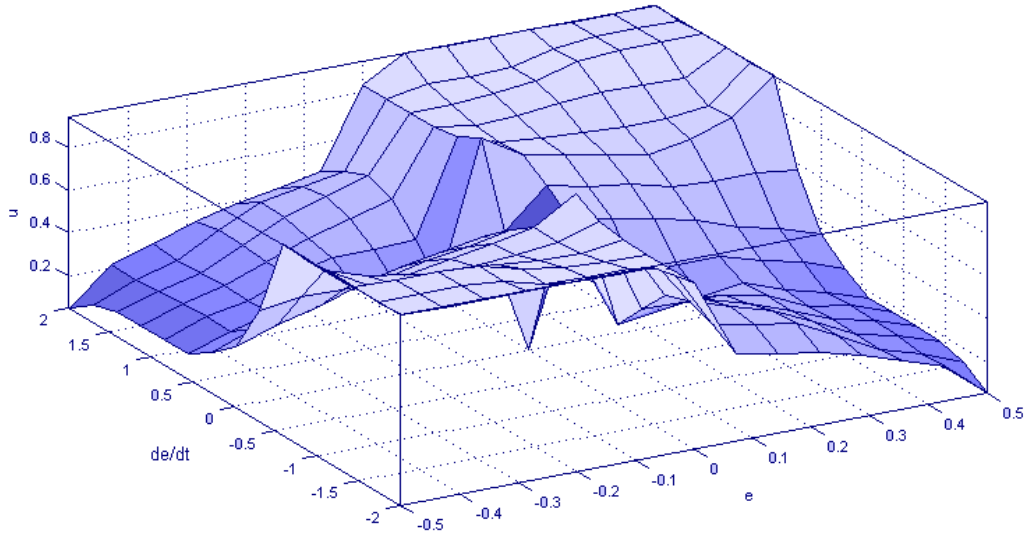


Şekil 6. 8 KABMPD denetleyici çıkışına ait üyelik fonksiyonu.

Çizelge 6. 2 KABMPD denetleyicinin Kazanç Ayarlama kısmına ait kural tablosu

$\Delta e/e$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	CB	CB	CB	B	K	OK	S
NM	CB	CB	B	B	OB	OK	CK
NS	CB	OB	B	CB	CK	OK	CK
Z	OK	K	OB	S	OB	K	OK
PS	CK	OK	CK	CB	B	OB	CB
PM	CK	OK	OB	B	B	CB	CB
PB	S	OK	OB	B	CB	CB	CB

Çizelge 6.2 de KABMPD denetleyicinin kazanç ayarlama kısmının kural tablosu verilmektedir. Kural tanımlamaları BMPD denetleyici ile aynı mantıktadır. Kural yüzeyi ise şekil 6.9 da verilmektedir.



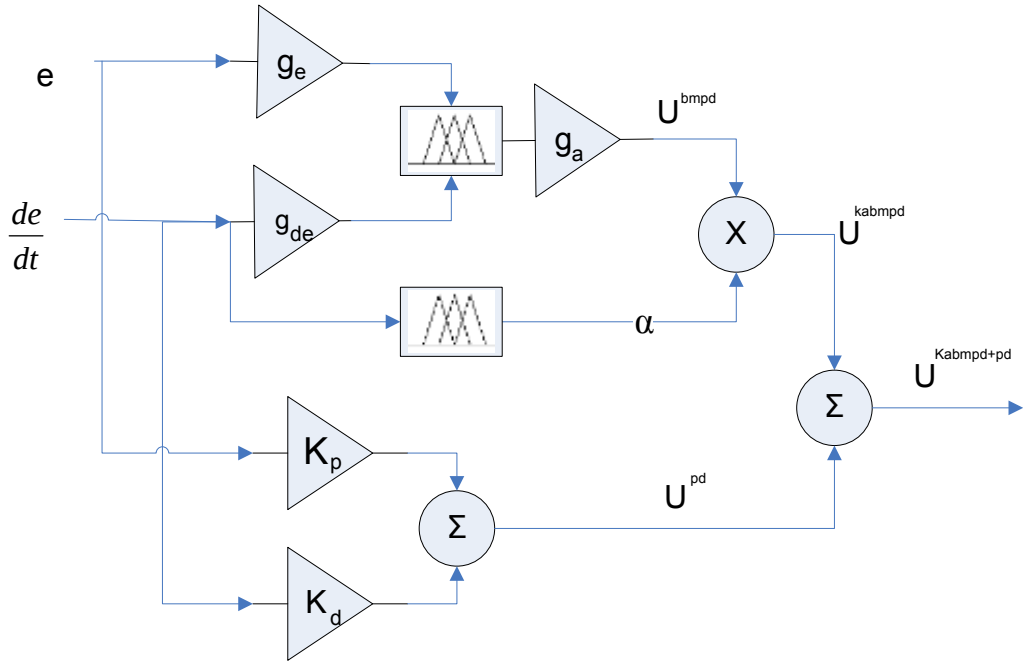
Şekil 6. 9 KABMPD denetleyici kural yüzeyi

Gerek verilen kural tablolarından, gerekse kural yüzeyinin görünümünden de anlaşılacağı üzere yüksek hata miktarlarında ölçekleme faktörü “ α ” en yüksek değeri olan 1 değerini almakta, düşük hata değerlerinde ise 0 değerini almaktadır.

Verilen iki bulanık denetleyicide de bulanıklaştırma kısımlarında “mamdani gerçekleştirilmesi” kullanılmıştır. Mamdani gerçeklemeleri, bulanık kontrol sistemlerinde sık kullanılan bir yöntemdir, [55]. Netleştirme kısımlarında ise “Ağırlık ortalamasını bulma” yöntemi kullanılmıştır. Ağırlık merkezini bulma yöntemi uygulamadaki güçlüklerden dolayı pratikte fazla kullanılmamaktadır.

6.4 SP Mekanizmasının Kazanç Ayarlamalı Bulanık Mantık ve PD Kontrolü

Kazanç ayarlamalı bulanık mantık denetleyicinin performansını artırmak amacıyla, bu denetleyiciye bağımsız bir PD denetleyici Şekil 6.10 da gösterildiği gibi ilave edilmiştir.



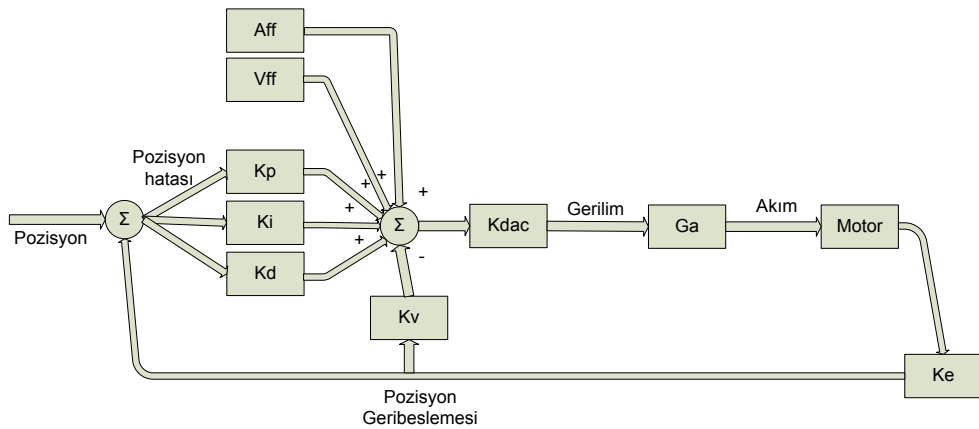
Şekil 6. 10 KABMPD+PD denetleyiciye ait blok diyagram

Bu tip bir denetleyici aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$U^{kabmpd+pd} = g_a \cdot F\{g_e \cdot e, g_{de} \cdot \dot{e}\} \cdot F\{e, \dot{e}\} + e \cdot K_p + \dot{e} \cdot K_d \quad (6.4)$$

6.5 Denetleyicilerin Deney Düzenneğine Uygulanması

Denetleyicilerin gerçek sisteme uygulanmasından önce kullanılan hareket kontrol kartının kontrol çevrimi devre dışı bırakılmalıdır. Fakat bu donanım olarak mümkün olsa da ileriki bölümlerde, kuvvet geri beslemesi için gerekli 6 analog girişin kullanımını kısıtlayacağı için, yazılımsal olarak devre dışı bırakılmıştır. Kontrol kartına ait servo çevrimi şekil 6.11 de gösterilmektedir.



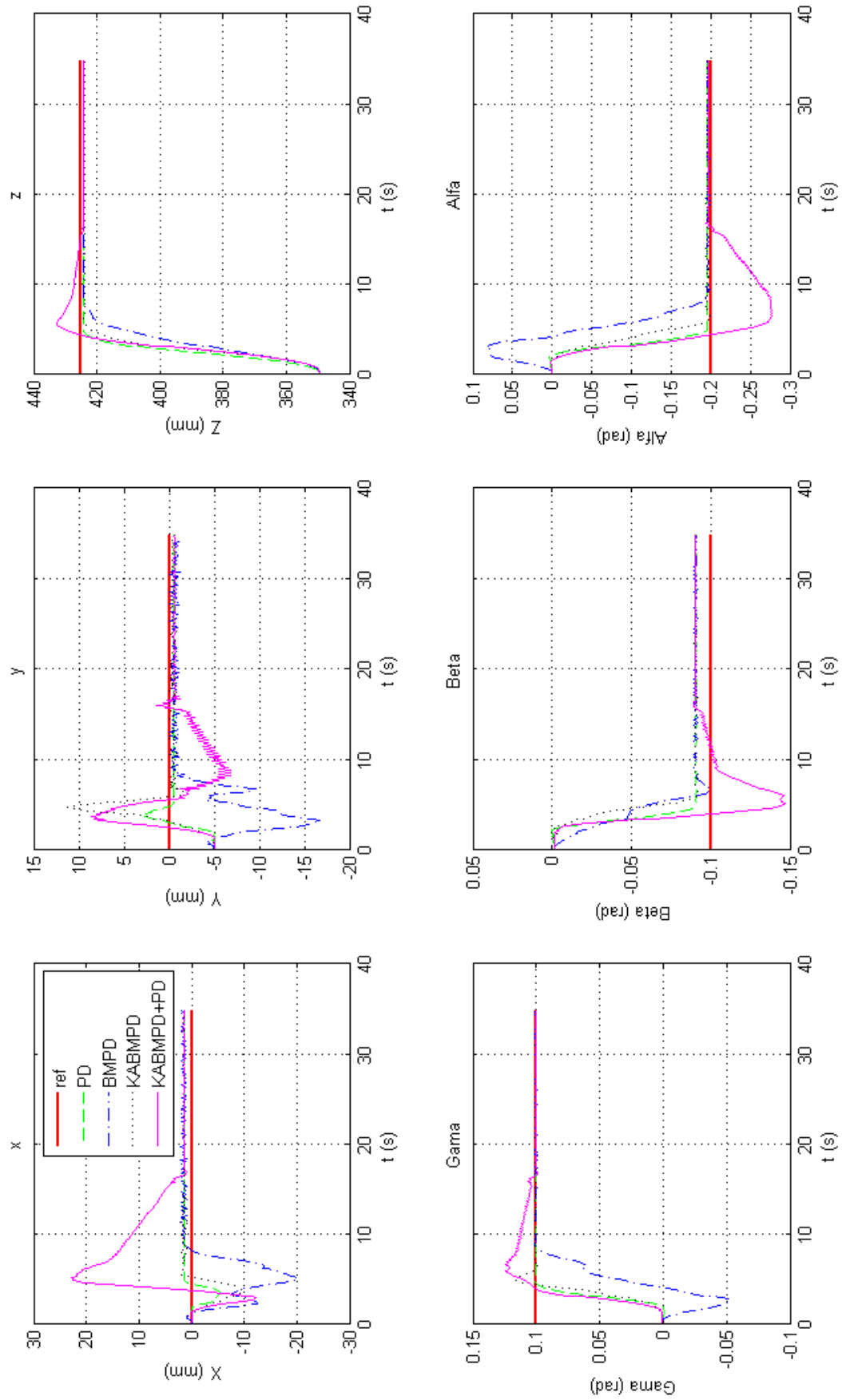
Şekil 6. 11 “NI-Motion PCI-7356” serisi servo PID blok diyagramı

Şekil 6.11’de “K_p” “K_i” ve “K_d” Katsayıları PID katsayılarını göstermekte olup döngüyü yazılımsal olarak bertaraf etmek için K_i ve K_d katsayıları “0” olarak tespit edilmiş K_p katsayısı “1000” olarak alınmıştır. Burada konum girişi 50 µm hassasiyetlidir ve basamak şeklindedir. Konum geri beslemesi, oluşturulan denetleyicilerde kullanıldığı için bu döngüden çıkartılması gerekmektedir. Bu sebeple motorlardan gelen konum bilgisi döngüye ileri beslenmektedir. “Aff” ve “Vff” katsayıları sırasıyla ivme ve hız ileri besleme katsayılarıdır ve sistem kararlılığını etkilemeyen açık çevrim kompanzasyon tekniğidir. “Kv” Katsayısı hız geri besleme katsayısı olup sıfırdan farklı bir değer aldığı anda ikincil enkoder devreye girerek hız geri beslemesi bu katsayı ile çarpılarak sisteme dahil olur. Burada bu katsayı “0” olarak tespit edilmiştir. “Kdac” katsayısı dijital/analog çeviriciye (D/A converter) ait katsayı olup (6.5) de verildiği gibi hesaplanır.

$$K_{dac} = \frac{20V}{2^{16}} \quad (6.5)$$

Burada, 20 Volt ±10 Volt değerini temsil etmektedir. “G_a” yükseltici katsayısıdır.

Denetleyiciler gerçek sisteme uygulanırken, her bir denetleyici karşılaştırılacağı için çalışma uzayının (0,0,400) “mm” noktası öteleme referansı olarak verilmiş ve bu noktada da (0,1 -0,1 -0.2) “rad” açıları ise dönme referansı olarak verilmiştir. Burada platformun 6 serbestlik derecesinin kontrolü ele alınmış olup denetleyiciler her bir bacak için uygulanmıştır. Alınan veriler bölüm 3.2.2 de anlatılan YSA düz kinematik yöntemiyle elde edilmiş konum verileridir. Şekil 6.12’ de belirtilen başlangıç noktasında denetleyicilerin karşılaştırmalı cevapları verilmektedir.



Şekil 6. 12 Denetleyici Cevaplarının Karşılaştırılması

Şekil 6.12' de verilen grafikten de anlaşılacağı üzere denetleyiciler arasında PD denetleyici diğer denetleyicilere nazaran daha iyi bir performans göstermektedir. Unutulmamalıdır ki denetleyiciler bacaklara uygulanmaktadır. Bir bacak referans değere ulaştığında paralel mekanizmanın gereği olarak başka bir bacağın mevcut konum değerini etkilemektedir. Bu sebeple denetleyiciler bacaklarda ayrı olarak iyi performans verseler dahi gerçek sisteme uygulandıklarında amaç 6 serbestlik derecesini aynı anda kontrol etmek olduğu için normalden biraz daha geç cevap vermektedirler.

Denetleyiciler gerçek sisteme uygulanırken “Visual Basic” tabanlı bir arayüz oluşturulmuş ve bütün kontrol algoritmaları bu dil ile yazılmıştır. Karşılaşılan güçlüklerden biri ise hareket kontrol kartına ait komutların işlem sürelerinin çok uzun olması ve bu komutlara dışarıdan müdahalenin mümkün olamamasıdır. Her bir komutun icra süresi yaklaşık 2 ms kadar sürmekte ve ne kadar çok kart komutu kullanılırsa örnekleme zamanı artmaktadır. Bu kuvvet kontrolü için istenmeyen bir etkidir. Bu sebeple kuvvet kontrolü ekseriyetle konum tabanlı olarak uygulanmıştır.

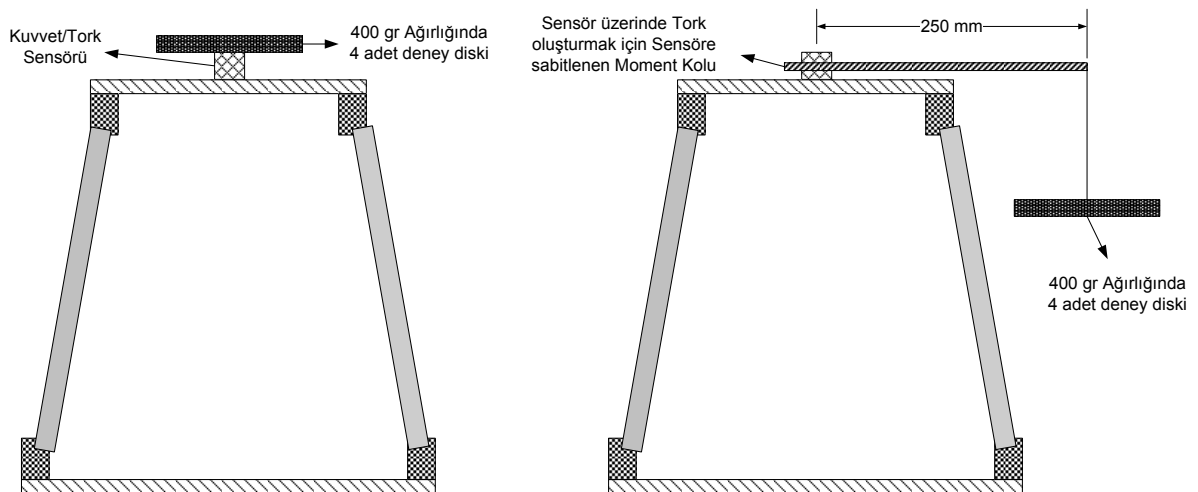
BÖLÜM 7

STEWART PLATFORM MEKANİZMASININ KUVVET KONTROLÜ

Robotik sistemlerin insan hayatına dâhil olmaya başlamalarından bu yana kontrol yöntemleri de bu etkileşime paralel bir şekilde genişlemektedir. Konum kontrolüne ilave olarak robotların çevreleri ile etkileşimini de kontrol altında tutma gerekliliği doğmuş ve kuvvet kontrol algoritmaları üretilmiştir, (G.Zeng, A.Hemami, 1996). En sık rastlanan kuvvet kontrol yöntemleri katılık ve empedans kontrolüdür.

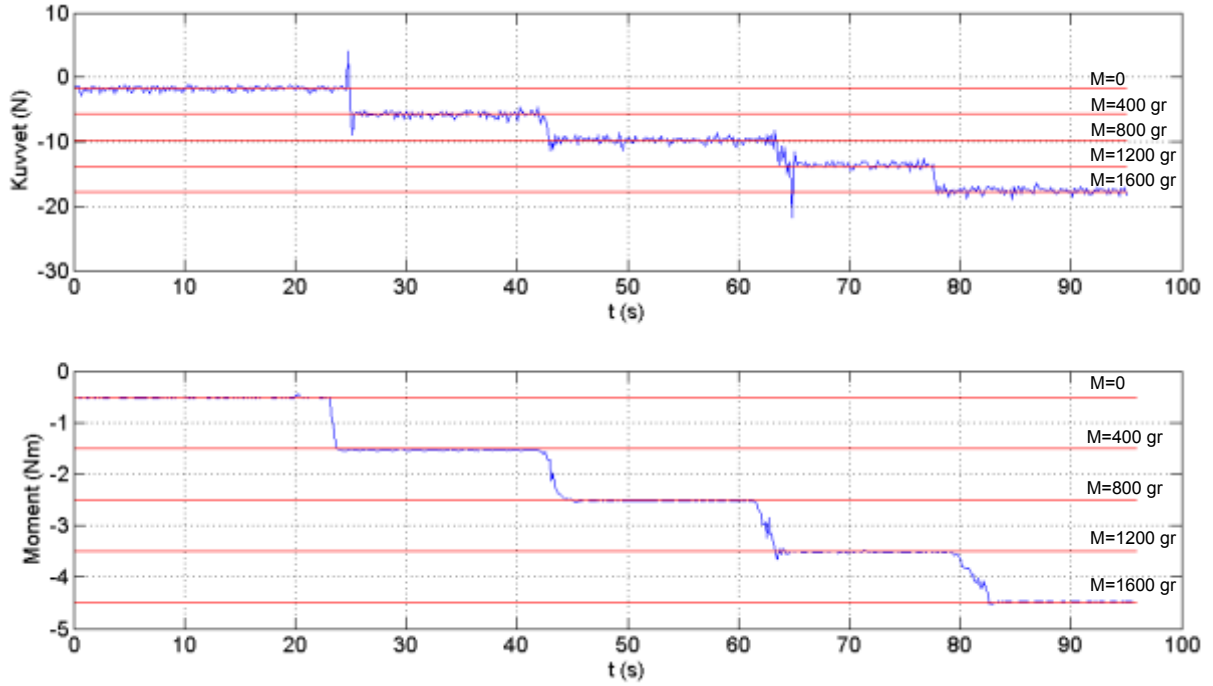
Kuvvet kontrolünün vazgeçilmeyen parçası kuvvet geri beslemesidir. Bu çalışmada SPM üzerine monte edilen ve 3 eksende kuvvet, 3 eksende tork ölçebilen 6 eksenli analog “ATI nano 25” kuvvet/tork sensörü kullanılmıştır.

Sensörden gelen verilerin doğruluğunu ve sensör kalibrasyonunu test etmek üzere Şekil 7.1’de verilen test düzeneği kurulmuştur.



Şekil 7. 1 Kuvvet/Tork Sensörü Test düzeneği

Şekil 7.1’ de görüleceği üzere platform sabitlendikten sonra sırasıyla “Z” eksenine etkiyen kuvvetleri gözlemlemek için her biri 400 gr ağırlığında olan yükler, aralıklarla sensörün üzerine konulmuştur. Moment ölçümü için ise sensöre 250 mm boyunda bir moment kolu bağlanarak aynı diskler moment kolunun ucuna takılarak sensör üzerinde değerini hesaplayabileceğimiz momentler oluşturulmuştur. Şekil 7.2’de verilen grafikte, etkiyen kuvvet ve momentler ile birlikte ölçülen değerler kıyaslama yapmak için birlikte verilmiştir.



Şekil 7. 2 Kuvvet/Tork Sensörü Test Sonuçları

Şekil 7.2’ de başlangıç değerleri, sensör ve üzerindeki manipülatör desteğinin ağırlığından dolayı sıfır olmamaktadır. Sensör, çıkış olarak, yüksüz durumda iken Çizelge 7.1’ de verilen değerleri vermektedir. Sensöre ait kalibrasyon grafiği Ek-E de verilmektedir.

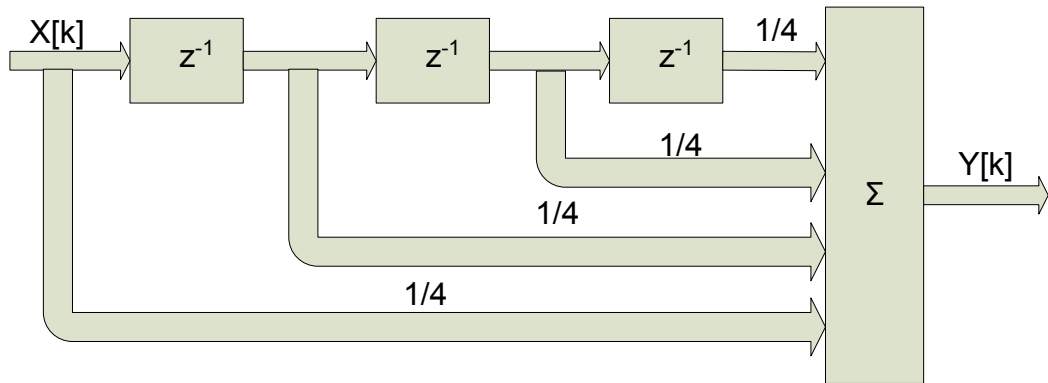
Çizelge 7. 1 Kuvvet/Tork Sensörü Test Sonuçları

Kütle (kg)	Beklenen Kuvvet (N)	Ölçülen Kuvvet (N)	Beklenen Moment (Nm)	Ölçülen Moment (Nm)
M=0	-1,75	-1,716	-0,5	-0,514
M=0,4	-5,75	-5,7	-1,5	-1,54
M=0,8	-9,75	-9,59	-2,5	-2,54
M=1,2	-13,75	-13,5	-3,5	-3,55
M=1,6	-17,75	-17,37	-4,5	-4,56

Şekil 7.2 ve Çizelge 7.1 den de görüleceği üzere sensör doğru ölçüm vermektedir. Kalibrasyonda hata olmadığı sonucuna varılmakla beraber kuvvet değerlerindeki gürültü miktarı moment değerlerine nazaran daha fazladır. Sistem hareket etmeye başladığında oluşan titreşimlerden dolayı gürültü miktarı artacağı için tüm girişlere 4. dereceden ortalama değer filtresi uygulanmıştır.

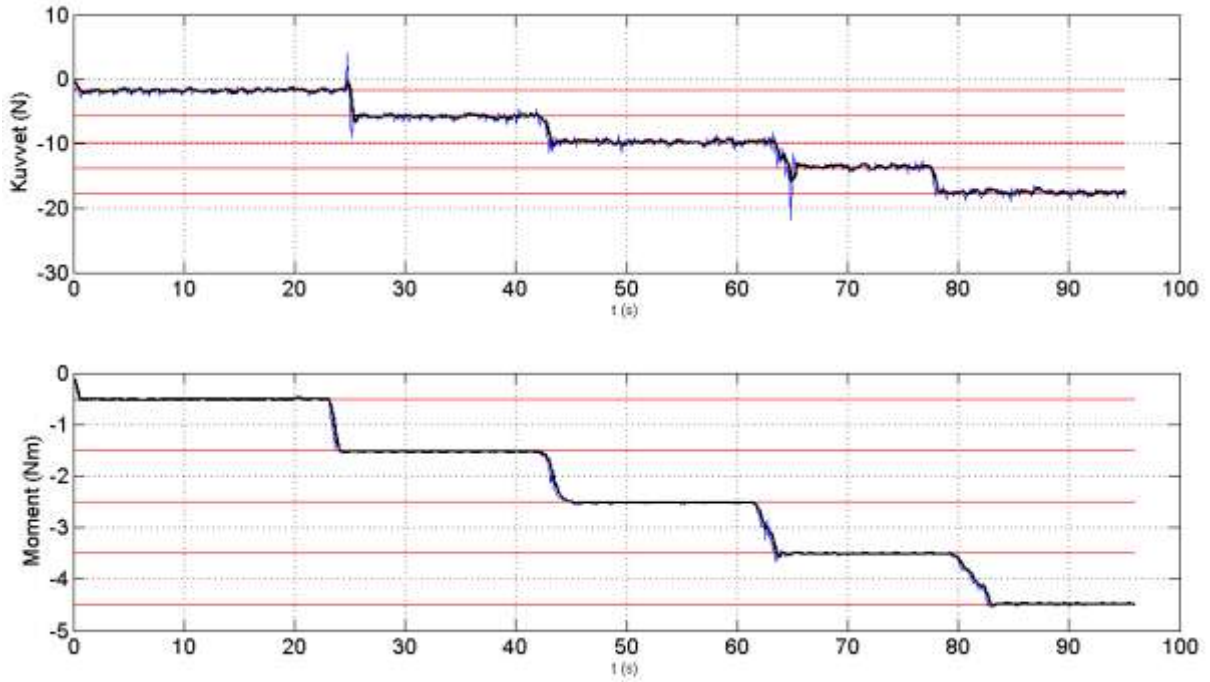
Ortalama değer filtresi, sensörden gelen verilerin aritmetik ortalamaları alınarak bulunur. Filtre 4. dereceden ise sensörden gelen son 4 değerın ortalaması alınır ve bu değer işlenecek kuvvet değeri olarak değerlendirilir. Şekil 7.3'de uygulanan dijital filtreye ait blok diyagram verilmektedir.

Ortalama değer filtresinin sensör gürültüsünü gidermesi bir avantaj olurken, sistemin örnekleme zamanını derecesi kadar azalttığından düşük örnekleme zamanlı sistemlerde band genişliğini azalttığından bir dezavantaja yol açmaktadır.



Şekil 7. 3 Ortalama değer Filtresi, [56]

Filtre uygulandıktan sonra sensör cevabı şekil 7.4’ de verilen grafikte gösterilen kalın çizgi şeklinde olacaktır.



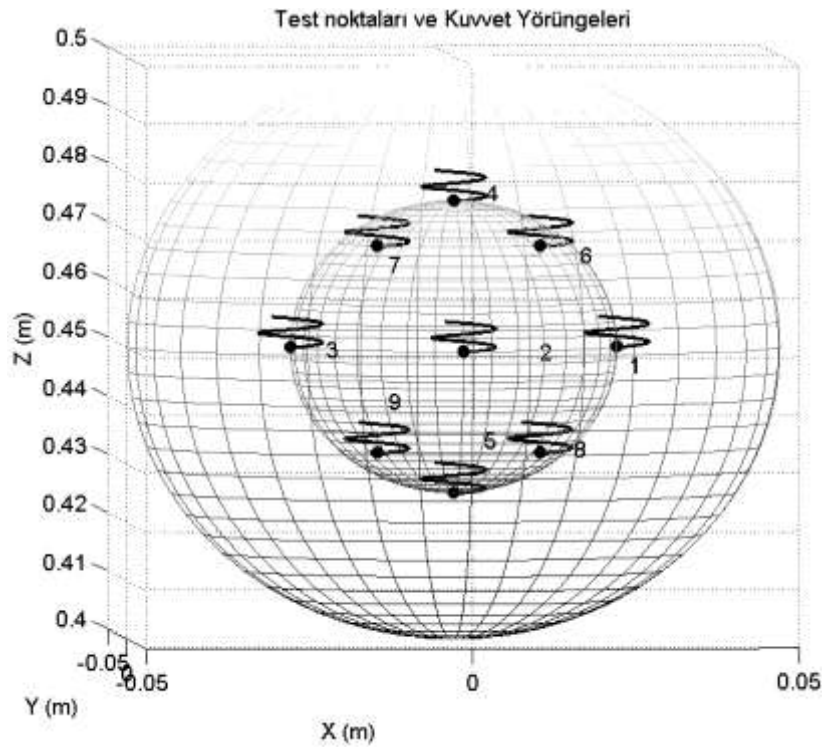
Şekil 7. 4 Kuvvet/Tork Sensörü Filtre etkisi

7.1 Katılık Kontrolü

Katılık kontrolü robot ve çevre etkileşiminde, çevrenin katılığının robot tarafından algılanıp, kontrolü, bu katılık parametresini gözeterek uygulamasına denilir. Katılık kontrolü, aktif veya pasif olabilir. Pasif katılık kontrolünde robota ait uç işlemci yay gibi mekanik elemanlarla donatılmıştır. Aktif katılık kontrolünde ise bu eleman programsal olarak sisteme dâhil olur, (G.Zeng, A.Hemami, 1997). Bu çalışmada aktif katılık kontrolü işlenecektir.

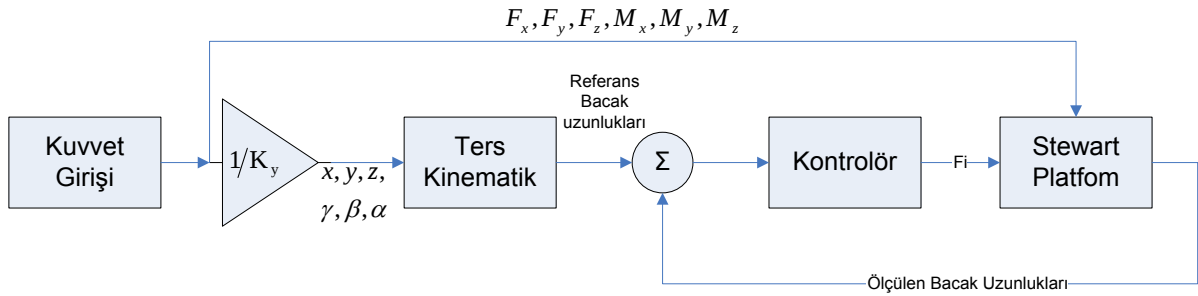
Saydamlık, kuvvet geri beslemesi veya başka bir deyişle dokunsal sistem uygulamalarında kullanılagelmiş, kullanıcıya, gerek uzaktan yönetim ve gerekse sanal gerçeklik uygulamalarında, aksettirilmesi hedeflenen ve aksettirilebilen kuvvet arasındaki farkı ifade eden bir kavramdır, [57]. Tabiidir ki, kullanıcının hissetmesi istenen kuvvet ile, mekanik ve kontrol kısıt ve zafiyetlerinden kaynaklanan eksiklikler dolayısıyla, hissettiği kuvvet arasında fark olacaktır. Bu çalışmada saydamlık dediğimiz zaman, sürtünmesiz uzay simülasyonu hedeflendiğinden, kullanıcının, platformu hareket ettirirken, çalışma uzayı boyunca sıfır kuvvet/tork hissetmesi, kontrolcünün mükemmelliğini gösterecektir ki buna yaklaşmak hedef

alınmıştır. Dolayısıyla, farklı kontrol algoritmaları, çalışma uzayı boyunca test edilmeli ve uygun performansı sağlayan kontrol katsayıları, ilgili denetleyici algoritmaları için bulunmalıdır. Bu sebepten, SP mekanizmasının simetrik yapısından faydalanılarak, sadece x ekseninin bir tarafında ve küresel çalışma uzayının içinde kalacak şekilde, dokuz nokta seçilmiş ve bu noktalardan başlamak üzere, spiral bir kuvvet yörüngesi referans alınarak, kuvvet hatası integralini küçülten denetleyici katsayıları aranmıştır, Şekil 7.5. Yine aynı şekilde, bu noktalar için, tork uygulanarak minimum tork hatasına sebep olacak kontrol katsayıları aranmıştır. Bulunacak katsayıların, yörünge, çalışma uzayının içinde kalacak şekilde, uç noktaları temsil etmesi gerektiğinden, küresel çalışma uzayının simetrik yarısında, z ve x eksenindeki uç noktalar (4 adet), y eksenindeki uç nokta, ve x/y/z eksenlerine $\pm 45^\circ$ açılı noktalar seçilmiştir (4 adet).



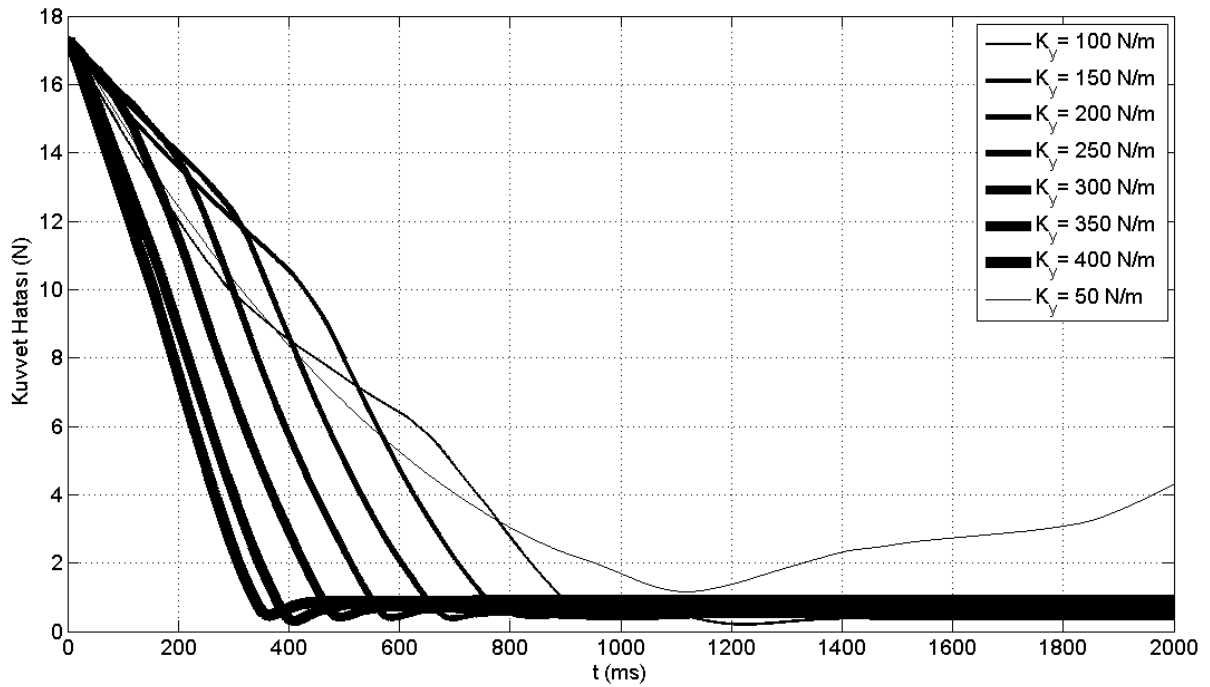
Şekil 7. 5 Katılık kontrolü için denetleyici katsayılarının belirlenmesi için kullanılan test noktaları ve spiral yörüngeler.

Katılık kontrolü konum bazlı uygulanacağından, bölüm 6 da verilen denetleyicilerin katsayıları, yukarıda belirtilen yöntem kullanılarak, Matlab Simmechanics programı ile bölüm 2' de tanıtılan deneysel sistem temel alınarak oluşturulan model aracılığı ile, tespit edilecektir. Uygulanacak olan katılık kontrolünün blok diyagramı, şekil 7.6'da görülmektedir.



Şekil 7. 6 SPM katılık kontrolü blok diyagramı

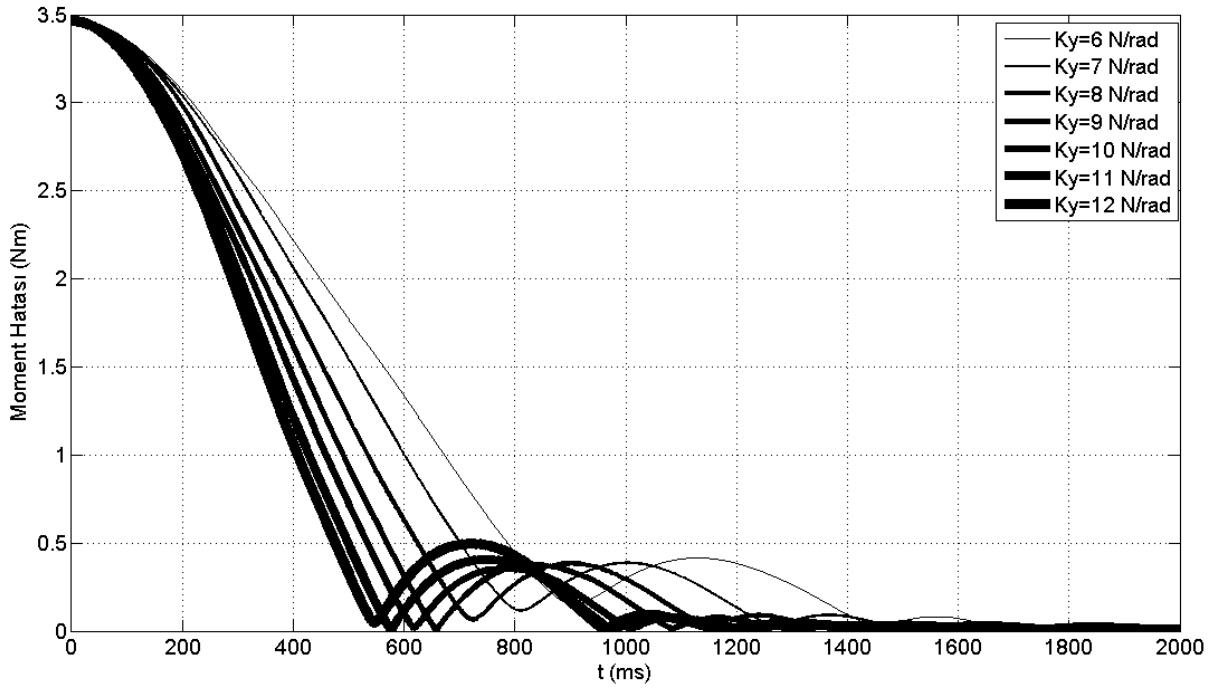
Şekil 7.6’da verilen “ K_y ” katsayısı kuvvet kontrolünde kullanılan katılık katsayısını göstermektedir. Bu katsayı tespit edilirken yine simülasyon aracılığı ile kuvvet ve moment girişleri ayrı olarak tespit edilmiştir. Kuvvet girişi için katılık katsayısı tespit edilirken her üç ekseninde de 10 N’luk sabit kuvvet girişi uygulanmış ve katılık katsayısı 50 N/m den başlayarak 400 N/m’ye kadar 50 N/m lik artımlarla simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Her bir simülasyon bitiminde kuvvet hataları kaydedilmiştir. Şekil 7.7’ de katılık katsayısının değişimine göre kuvvet hatasının değişimi görülmektedir. Burada üç ekseninde de kuvvetler aynı anda tatbik edildiği için uygulanan kuvvetlerin bileşkesi alınmıştır.



Şekil 7. 7 Kuvvet hatasının katılık katsayılarının değişimine göre değişimi

Moment girişi için katılık katsayısı tespit edilirken üç ekseninde de 2 Nm’lik momentler simülasyon boyunca uygulanmış ve moment hataları değişen katılık katsayılarına göre her simülasyondan sonra kaydedilmiştir. Katılık katsayısı 6 Nm/rad ile 12 Nm/rad arasında 1Nm/rad’lık artımlarla belirlenmiştir. Kuvvet girişinde olduğu gibi moment girişi ile yapılan

simülasyon sonuçları da, kıyaslama yapılabilmesi açısından, moment hataları üç eksenin bileşkesi alınarak grafiğe konulmuştur, Şekil 7.8.

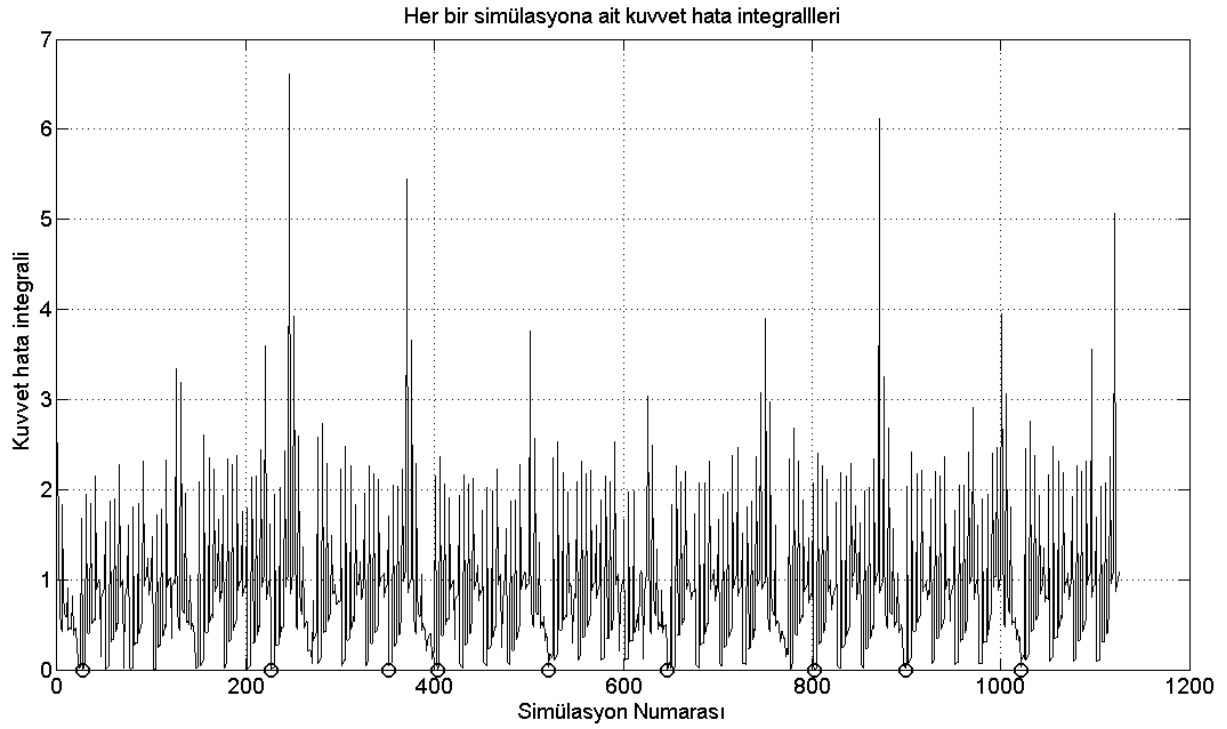


Şekil 7. 8 Moment hatasının katılık katsayılarının değişimine göre değişimi

Şekil 7.7' de katılık katsayısının değeri arttıkça cevap süresinin arttığı görülmektedir. Ancak katılığın artması pratikte platformun hareket kabiliyetini azaltmaktadır. Uzaysal hareket eden nesnelerin manipülasyonu amaç olduğu için, ileride yapılacak çalışmalara ışık tutması açısından, değişken katılık katsayısı opsiyonu, uzaysal hareket eden aracın hızının arttığı durumlarda veya yüksek hızlı uzaysal hareket eden taşıtlarda kontrolün kolaylaştırılmasını sağlayabilecek bir seçenek olarak not düşülebilir. Bu çalışmada sabit katılık katsayısı uygulanacağı için kuvvet girişinde uygulanan katılık katsayısı 150 N/m olarak tespit edilmiştir. Şekil 7.8' de aynı şekilde moment girişinde uygulanan katılık katsayısı 10 N/rad olarak tespit edilmiştir. Katsayı aralıkları ise kuvvet girişi için ± 20 N da ± 0.05 m yer değiştirme yapacak şekilde, Moment girişinde ise ± 5 Nm de ± 0.4 rad açısal yer değiştirme yapacak şekilde, $F=k.\Delta x$ formülünde yerine konularak tespit edilmiştir.

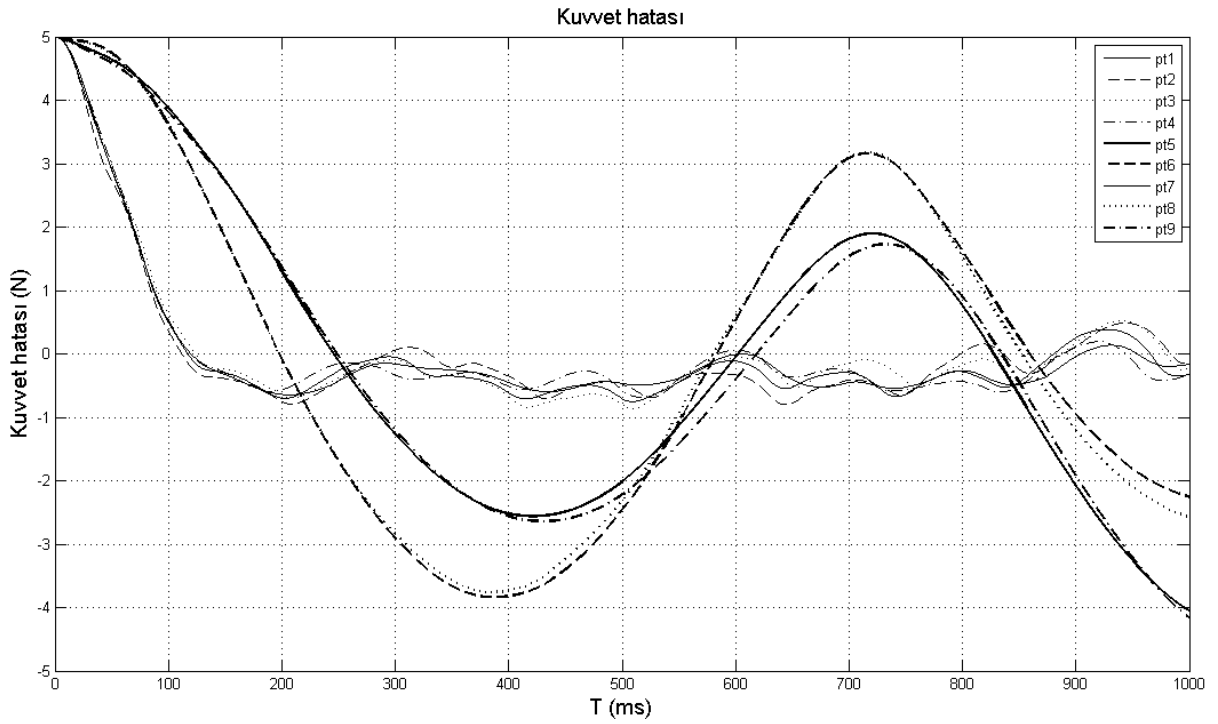
Belirlenen katılık katsayılarından sonra, şekil 7.6'da verilen "denetleyici" bloğunun içeriğini teşkil eden konum denetleyicilerinin katsayı analizi, yine sürtünmesiz uzay simülasyonunda Şekil 7.5 de verilen noktaların her birinde, denetleyici katsayılarının 1:5:21 aralığında taranması ve kuvvet hata integralinin sıfıra yaklaştığı noktalarda bu katsayılar incelenip nihai

olarak belirlenmesi şeklinde yapılmıştır. Simülasyon serilerinin sonucunda, kuvvet hata integrali şekil 7.9’da verildiği gibi değişmektedir.



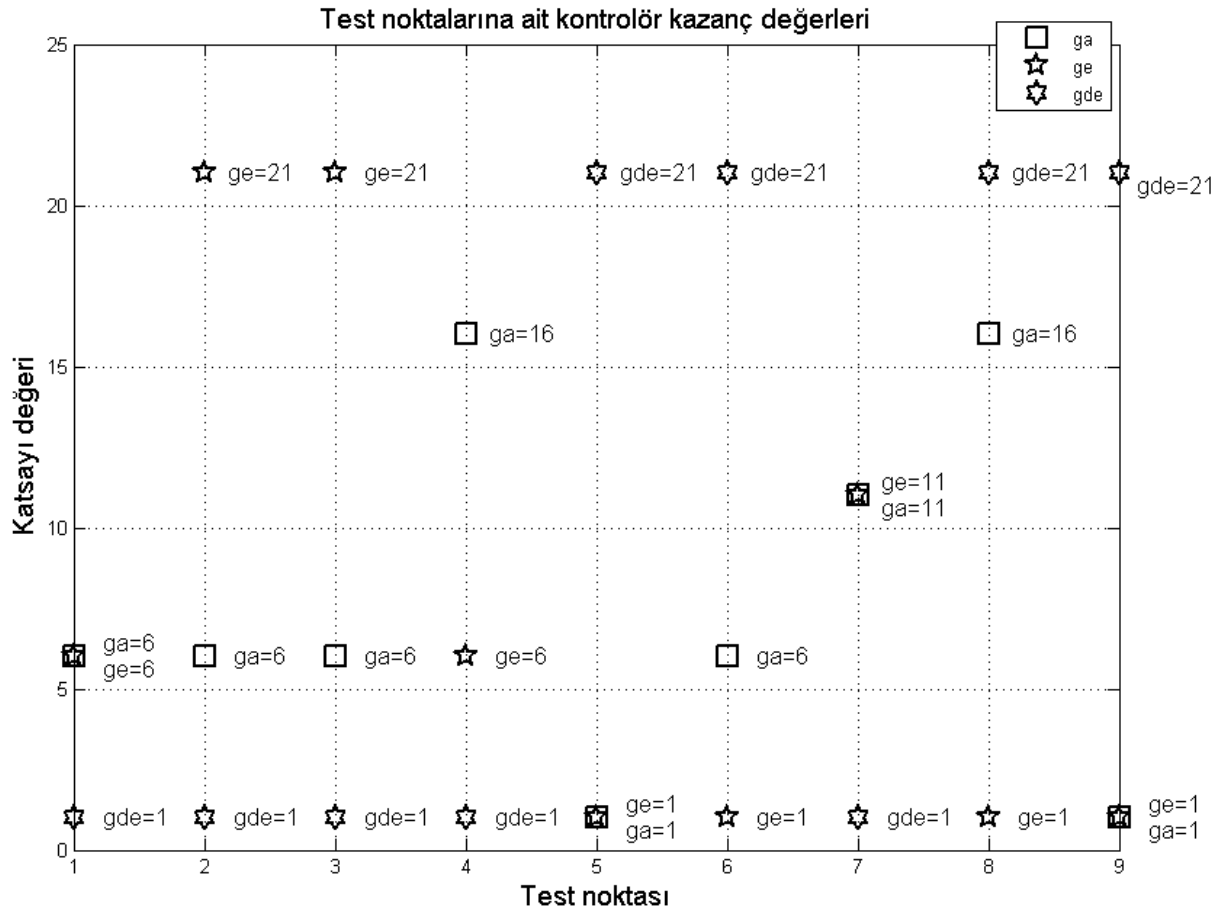
Şekil 7. 9 9 test noktası için, bütün muhtemel denetleyici katsayı kombinasyonlarının kuvvet hata integraline etkileri

Şekil 7.9’da kuvvet hata integralinin her bir simülasyonda ulaştığı değerler verilmiştir. Şekil 7.5’de verilen noktalardaki minimum değerleri ise grafikte yuvarlak içine alınarak gösterilmiştir. Bu noktalarda elde edilen kuvvet hatalarını gösteren grafik Şekil 7.10’da verilmektedir.



Şekil 7. 10 Test noktalarında elde edilen kuvvet hataları

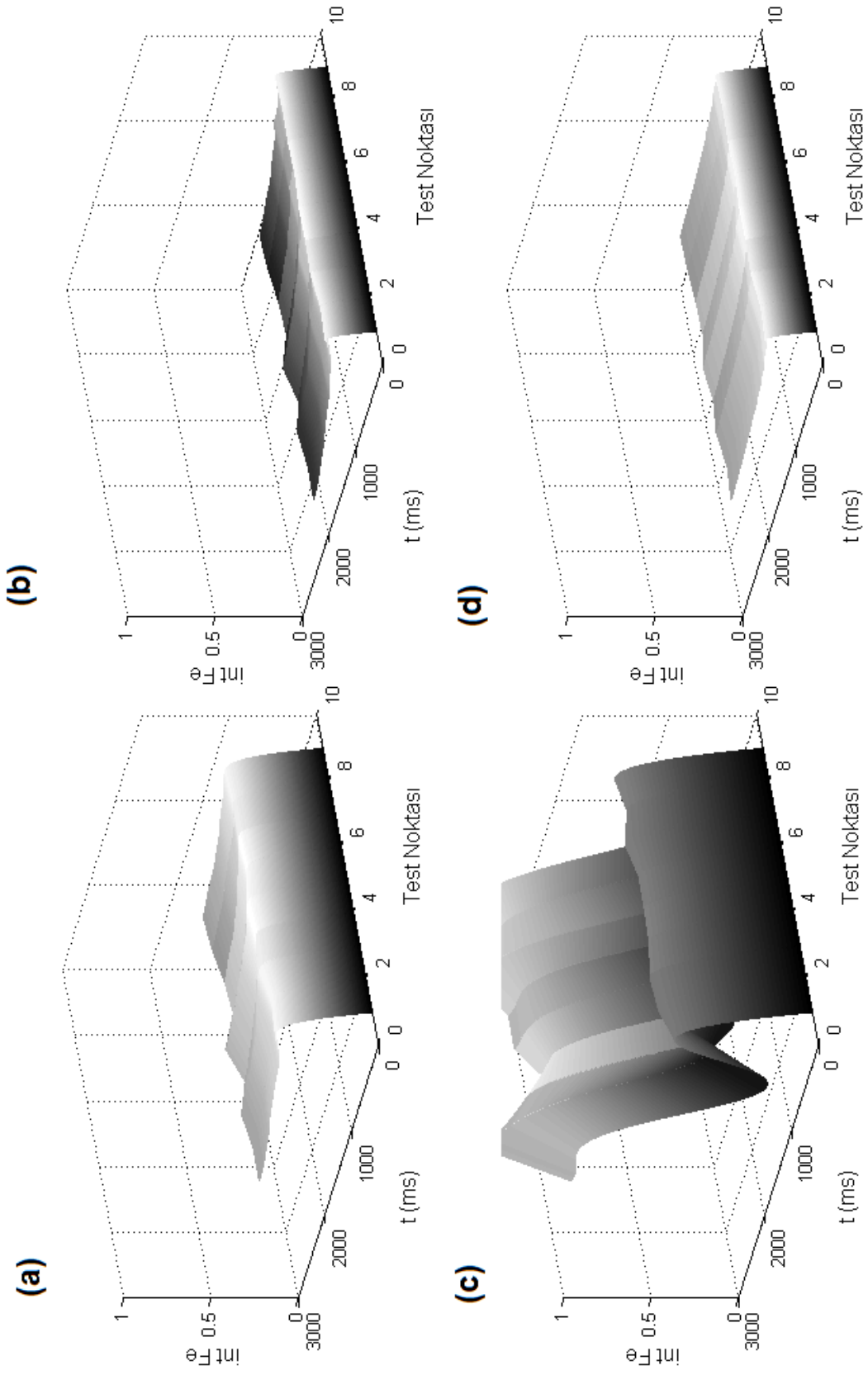
Şekil 7.10 da, test noktalarında minimum kuvvet hata integrali veren kuvvet hata verileri görülmektedir. 5, 6, 8 ve 9. test noktalarında kuvvet hataları azalma eğiliminde olmadığı görülmektedir. Bu durum denetleyici katsayıları ve test noktalarının gösterildiği grafikte de kendini göstermektedir, şekil 7.11. Bu durum, adı geçen test noktalarında, şekil 7.11' de verilen katsayıların, kontrolü olumlu bir şekilde etkilemediğini göstermektedir. Kuvvet hatalarının azalma eğiliminde olduğu diğer test noktalarında belirlenen katsayıların ortalaması alınarak bölüm 6 de bahsedilen konum denetleyicilerinin katsayıları belirlenmiş olur. Bu katsayılar BMPD, KABMPD, KABMPD+PD denetleyiciler için $g_a=9$, $g_e=13$, $g_{de}=1$ olarak hesaplanabilir.



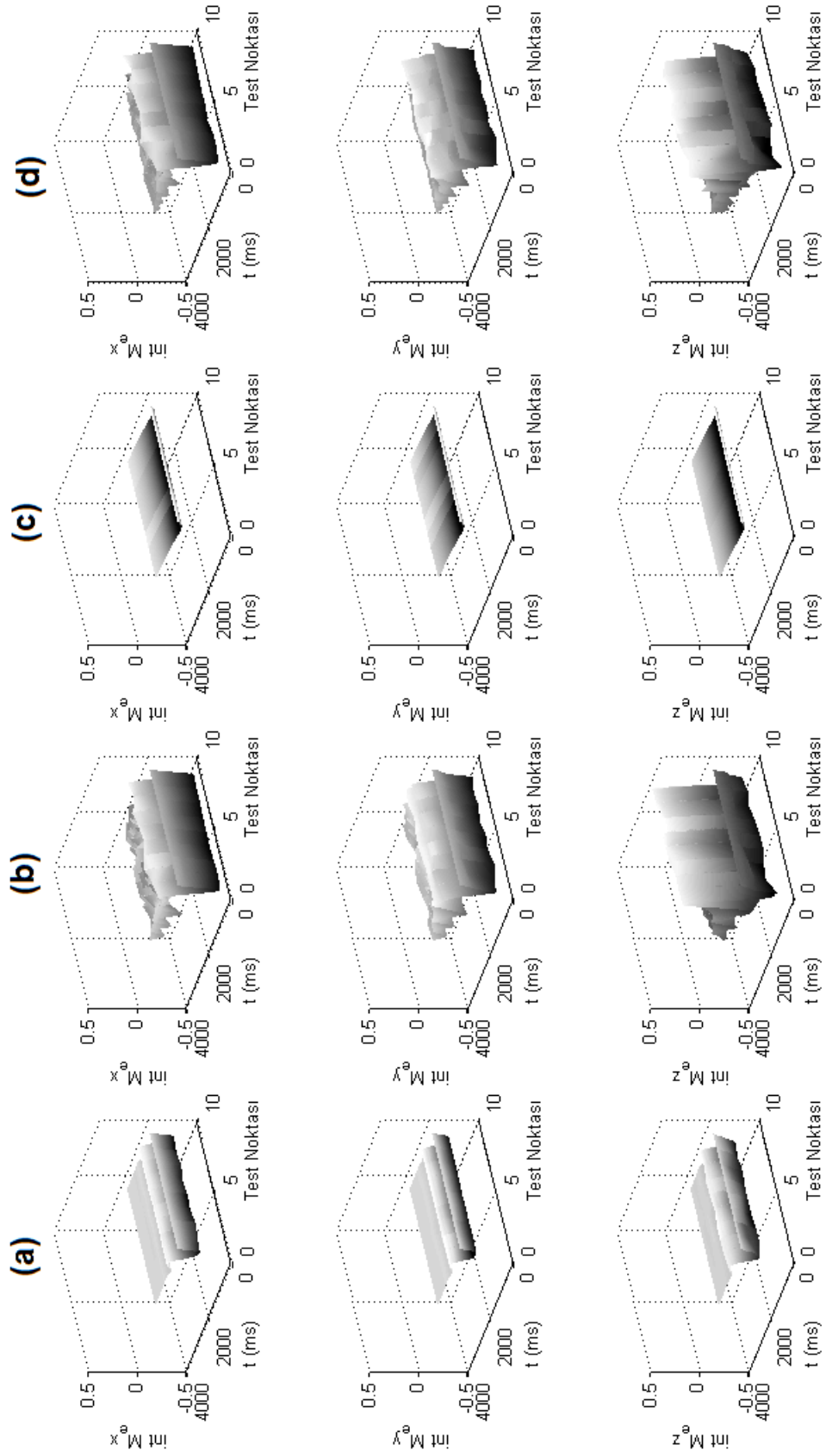
Şekil 7. 11 9 test noktasında, en düşük kuvvet hata integrali sonucuna sebep olan, denetleyici katsayıları

Şekil 7.12 de, denetleyicilerin test noktalarına göre kuvvet hata integrali performansları verilmektedir. Burada kuvvet hata integrali en küçük değerlerde seyreden KABMPD denetleyicisinin performansı, diğer denetleyicilere nazaran bütün test noktalarında daha iyi görünmektedir. PD kontrolün, tek başına, sistemi bütün noktalarda kararsızlığa sürüklediği gözlemlenmekte, KABMPD+PD denetleyicinin ise hata miktarlarının yüksek olmasına rağmen iyi cevap verdiği görülmektedir.

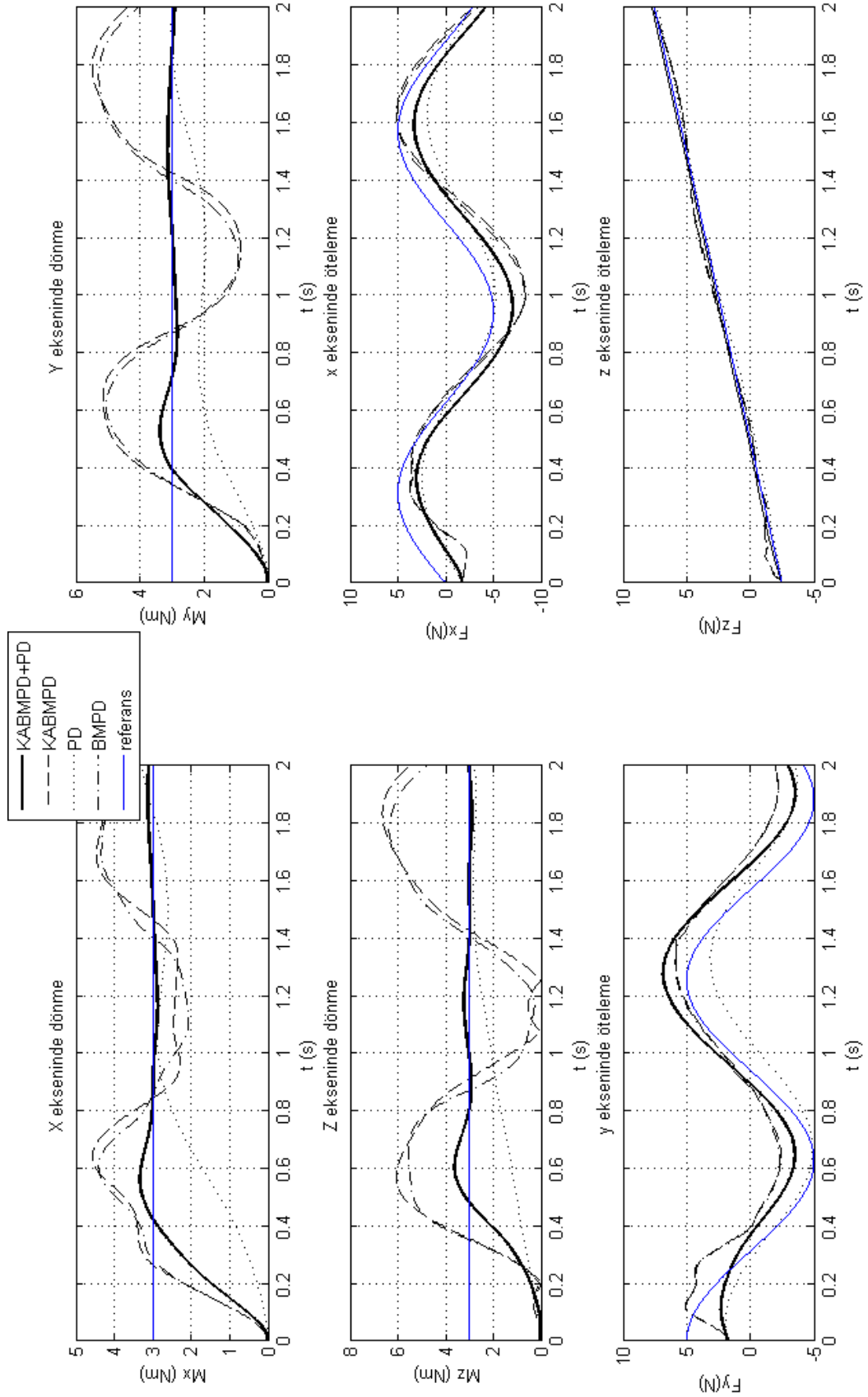
Şekil 7.13 de, kontrolörlerin, test noktalarında, her bir ekseninde 3 Nm lik tork girişine karşılık olarak, moment hata integrali performansları verilmektedir. KABMPD+PD ve PD kontrolörlerin verdiği cevaplar burada makul görülmektedir. Ancak PD kontrolör, KABMPD +PD kontrolöre nazaran daha geç cevap vermektedir. Ayrıca salt BMPD veya KABMPD denetleyicilerde de salınımlar kayda değer seviyededir.



Şekil 7. 12 Denetleyicilerin test noktalarına göre kuwet hata integrali performansları (a) KAMMPD+PD denetleyici (b) KAMMPD denetleyici (c) PD denetleyici (d) BMPD denetleyici.



Şekil 7. 13 Denetleyicilerin, test noktalarında moment hata integrali performansları (a) KABMPD+PD denetleyici (b) KABMPD denetleyici (c) PD denetleyici (d) BMPD denetleyici



Şekil 7. 14 Çalışma uzayındaki rastgele bir noktada, uzaysal kuvvet/tork girişi için, test edilen denetleyicilerin cevapları

Kuvvet ve tork geri beslenmesinde, farklı denetleyicilerin iyi performans göstermesinden dolayı, çalışma uzayında rastgele bir noktada uzaysal kuvvet/tork girişi uygulanmış ve sonuçlar şekil 7.14 de verilmiştir. Buradan hareketle, STFPD+PD denetleyicinin sistemde bütün eksenlerde uygun performans verdiği görülmektedir.

Sonuç olarak, denetleyici katsayıları, simülasyon ortamında belirlenmiş ve gerçek sisteme uygulanabilir hale getirilmiştir. Simülasyonlar KABMPD+PD denetleyicinin daha iyi performans verdiğini göstermektedir.

Katılık kontrolünün deneysel sisteme uygulanması ve cevapların analizi ileriki bölümlerde diğer kuvvet kontrol yaklaşımları ile birlikte karşılaştırılmalı olarak verileceğinden bu bölümde ele alınmamıştır.

7.2 Empedans Kontrol

Empedans kontrolde temel prensip manipülatör kontrol sistemi sadece yörünge takip etmek üzere değil aynı zamanda çevrenin mekanik empedansını da ayarlayacak şekilde tasarlanmalıdır, (N. Hogan, 1985). Mekanik empedans hız ile uygulanan kuvvet arasındaki ilişki olarak tarif edilebilir. Doğrusal sistemlerde mekanik empedans “Z(s)” denklem 7.1’de verildiği gibi tanımlanır.

$$\frac{F(s)}{\dot{X}(s)} = Z(s) \quad (7.1)$$

Hızdan konuma geçildiği takdirde 7.1 denklemi 7.2 de verildiği gibi düzenlenebilir.

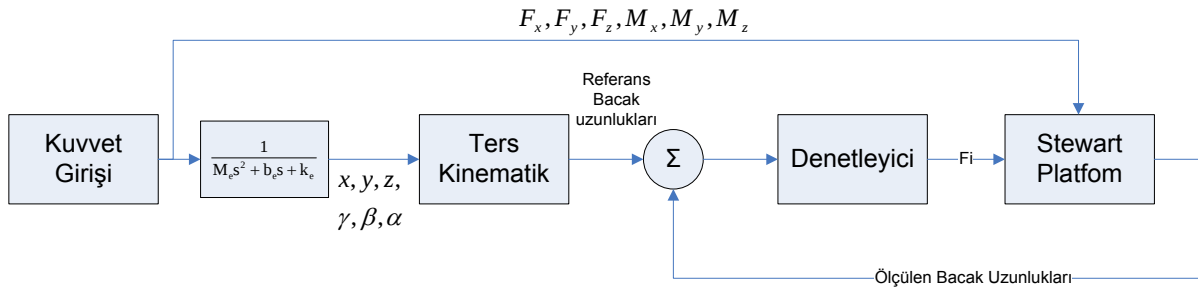
$$\frac{F(s)}{X(s)} = s.Z(s) \quad (7.2)$$

Konum tabanlı empedans kontrolde temas yüzeyinin mekanik empedansı denklem 7.3 de verildiği gibi düşünülebilir, (G.Zeng, A.Hemami, 1997).

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{M_e s^2 + b_e s + k_e} \quad (7.3)$$

Stewart Platform mekanizması doğrusal olmamasına rağmen empedans kontrolde temas yüzeyinin mekanik empedansı doğrusal olarak kabul edilebilir. Temas yüzeyinin mekanik empedansına ait katsayılardan “M_e” temas yüzeyinin istenen kütesini, “b_e” istenen sürtünmeyi, “k_e” ise istenen elastikliği ifade etmektedir.

Stewart platform mekanizmasına uygulanan konum tabanlı empedans kontrole ait blok diyagram şekil 7.15 'de görülmektedir.



Şekil 7. 15 Konum tabanlı empedans kontrol blok diyagramı

Şekil 7.15 de verilen konum tabanlı empedans kuvvet kontrolünde, temas yüzeyine ait mekanik empedans, kuvvet için alçak geçiren bir filtre gibi davranır. Bu sebeple kuvvet girişinden sonra bir ön denetleyici gibi davranan empedans yüzeyinin katsayıları, kuvvet sensöründen gelen verileri referans konum verisine dönüştüreceği için 2. dereceden bir denetleyici tasarlanırmış gibi bulunabilir.

Bilinmeyen ve tespit edilmesi gereken üç adet kuvvet girişi ve üç adet moment girişi için olmak üzere, toplam 6 adet mekanik empedans katsayısı vardır. Yukarıda bahsedildiği üzere bu katsayılar arasında denetleyici tasarımı yapılarak ilişki kurulabilir ve sadece istenen kütle “ M_e ” ve istenen atalet momenti “ J_e ” cinsinden ifade edilebilir.

İkinci dereceden sistemler için aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$s^2 + \frac{b_e}{M_e} s + \frac{k_e}{M_e} = s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \quad (7.4)$$

Bu durumda eşitlik gereği istenen mekanik empedans katsayıları doğal frekans ve sönüm oranı cinsinden ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} \frac{b_e}{M_e} &= 2\zeta\omega_n \\ \frac{k_e}{M_e} &= \omega_n^2 \end{aligned} \quad (7.5)$$

Denklem 7.4 de verilen eşitliğin sol tarafı uygulanan kuvvet ile referans giriş olacak konum değeri arasındaki transfer fonksiyonudur. Bu sebeple kuvvet uygulandıktan çok kısa bir süre içinde referans konum değeri elde edilmelidir. Oturma zamanı “ T_s ” çok küçük seçilerek bu

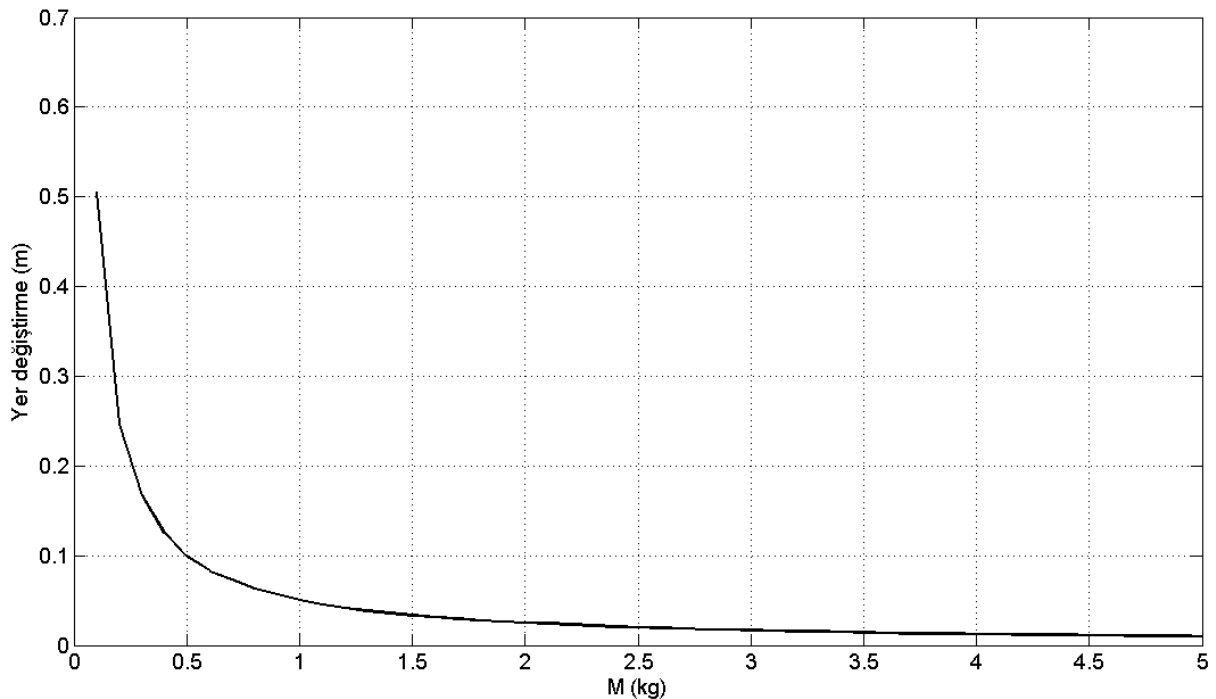
süre mümkün olduğu kadar kısaltılır. Oturma zamanı ile sönüm ve doğal frekans arasındaki formül denklem 7.6’ da verilmektedir.

$$T_s = \frac{4}{\zeta \omega_n} \quad (7.6)$$

Oturma zamanı olarak, mantıklı herhangi bir değer verilerek sönüm oranı ve doğal frekans çarpımı denklem 7.6’dan bulunur. Oturma zamanı çok küçük seçilir ve sönüm oranı da 1’den küçük seçilir ise 7.4 sistemi kararsızlaşmaktadır. Bu sebeple sönüm oranı minimum 1 yani sistem kritik sönümlü olarak seçilmelidir. Eğer kuvvet girişinde gürültü fazla ise bu değer 1’den daha yüksek seçilebilir. Ancak bu cevabı geciktirecektir.

Gerekli oturma zamanı ve sönüm oranı seçildikten sonra istenen mekanik empedans katsayıları 7.5 denklemi aracılığı ile tek değişkene “ M_e ” bağlı hale gelir. Eşitlik 7.4’de verilen sistem değişik “ M_e ” katsayıları ile tarandıktan sonra uygun katsayı seçimi yapılır.

Bu çalışmada oturma zamanı olarak 0,1 sn ve sönüm oranı olarak 2 seçilmiştir. Mekanik empedansta istenen kütle değeri “ M_e ” 0,1 ile 5 kg arasında 0,1 kg’lık artırımlarla tarandığı zaman 7.16’da verilen Kütle & Yer değiştirme grafiği elde edilir.

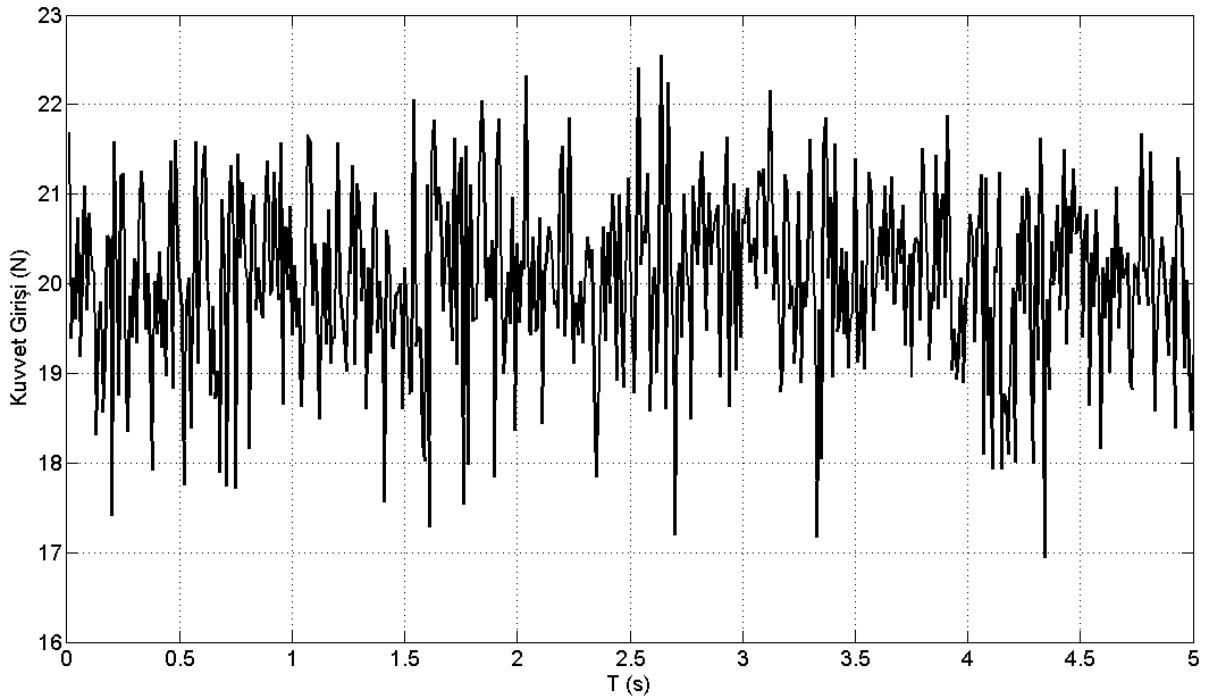


Şekil 7. 16 Mekanik empedans katsayılarını tahmin edebilmek için düzenlenen Kütle & Yer değiştirme Grafiği

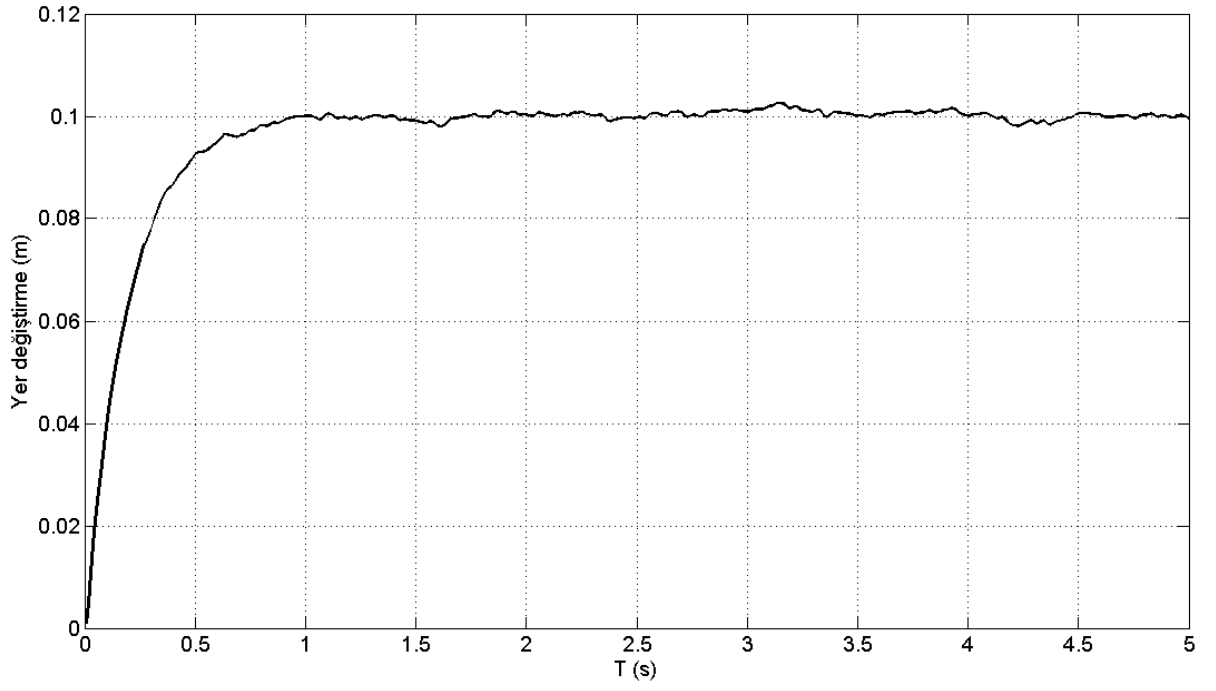
Mekanik empedanstan istenen sönüm katsayısı ve yay katsayısı denklem 7.5’ de verilen formüller kullanılarak denklem 7.7’den bulunabilir.

$$\begin{aligned} b_e &= 80.M_e \\ k_e &= 400M_e \end{aligned} \quad (7.7)$$

Şekil 7.16’dan da anlaşılacağı üzere mekanik empedans için istenen kütle değerinin düşük tutulması referans konum girişini artırmaktadır. Bu durumda eğer istenen kütle olarak 0,5 kg seçilirse Şekil 7.17’de verilen kuvvet girişine karşılık Şekil 7.18’de verilen konum çıkışı elde edilir.

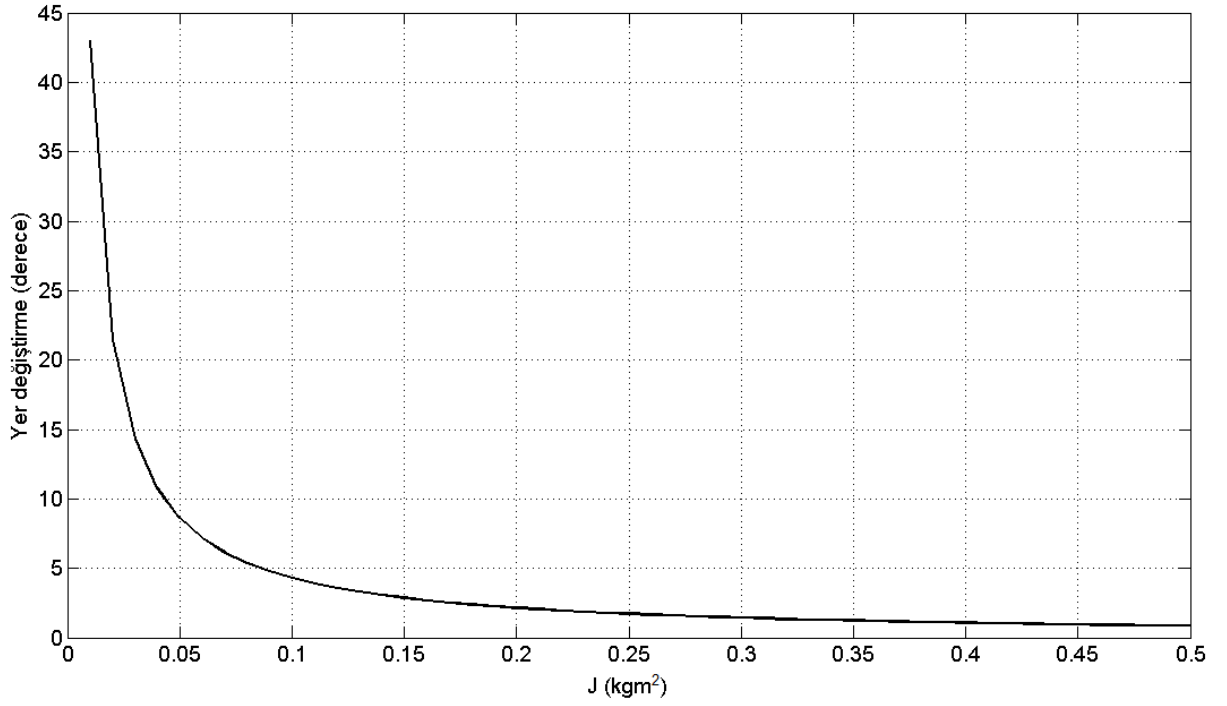


Şekil 7. 17 Mekanik empedans katsayılarını belirlemekte kullanılan $M_e=0,5$ kg için simülasyonu yapılan sistemin kuvvet girişi



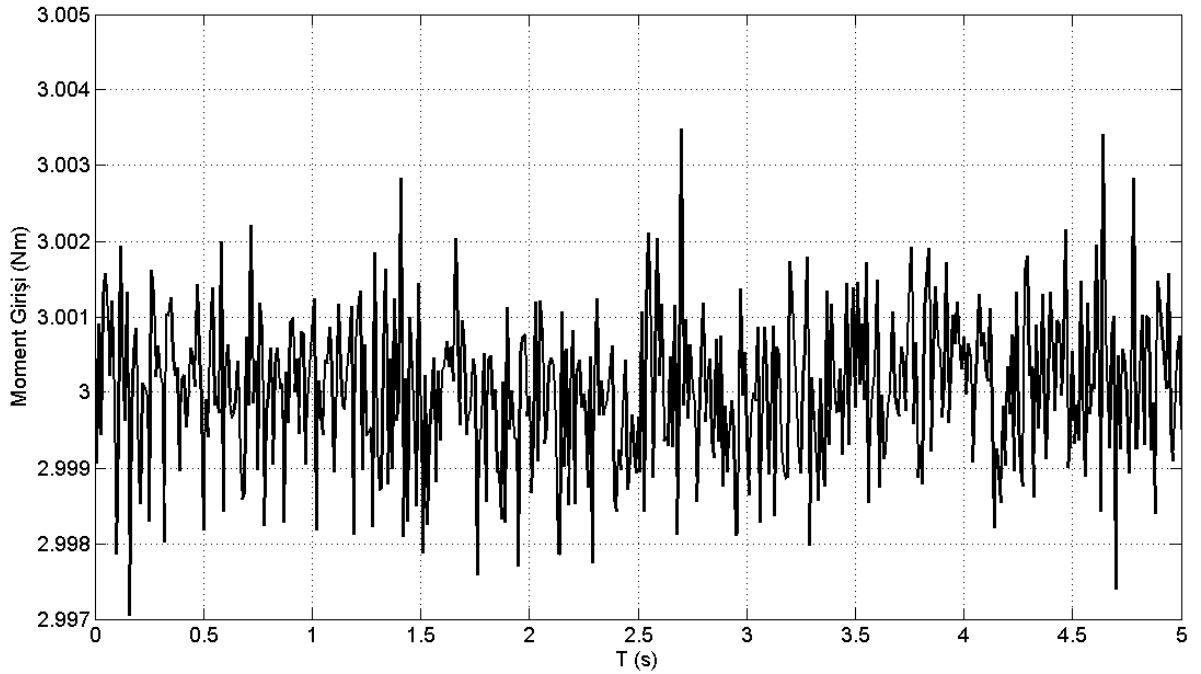
şekil 7. 18 Mekanik empedans katsayılarını belirlemede kullanılan $M_e=0,5$ kg için simülasyonu yapılan sistemin konum çıkışı.

şekil 7.18'den de görüleceği üzere gürültülü bir kuvvet girişi neredeyse gürültüsüz bir konum çıkışı olarak elde edilebilmektedir. Bu durumda empedansın doğal frekansı 20 Hz olacaktır. Aynı şekilde moment girişi için de yukarıdaki işlemler tekrarlanır ise kütle atalet momenti ile açısıl konum çıkışı arasında şekil 7.19'da verilen grafik oluşturulabilir. Bu durumda da empedansın doğal frekansı 20 Hz olacaktır.

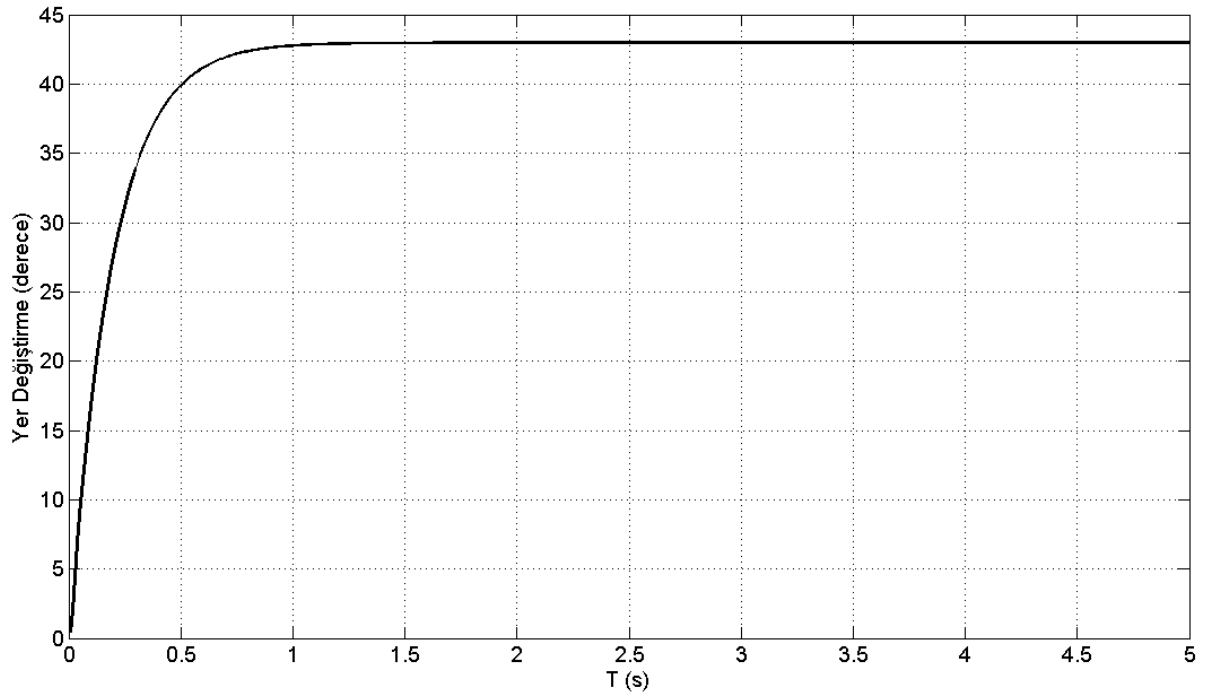


Şekil 7. 19 Mekanik empedans katsayılarını tahmin edebilmek için düzenlenen Kütle atalet momenti & Yer değıştirme Grafiğı

İstenen mekanik empedans ataleti olarak " $J_e=0,01 \text{ kgm}^2$ " seçilirse şekil 7.20’de verilen moment girişine karşılık şekil 7.21’de verilen açısai yer değıştirme çıkışı elde edilir.



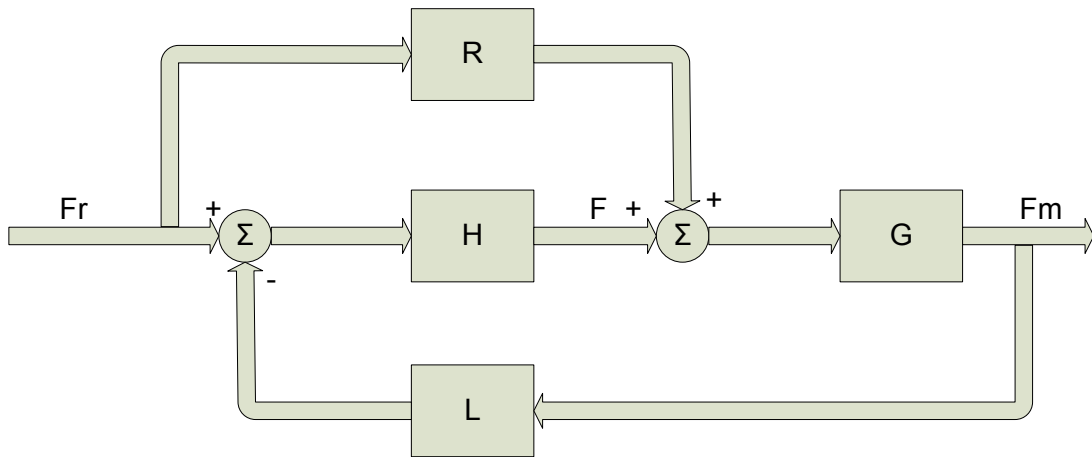
Şekil 7. 20 Mekanik empedans katsayılarını belirlemede kullanılan $J_e=0,01 \text{ kgm}^2$ için simülasyonu yapılan sistemin moment girişı



Şekil 7. 21 Mekanik empedans katsayılarını belirlemede kullanılan $J_e=0,01 \text{ kgm}^2$ için simülasyonu yapılan sistemin açısal konum çıkışı.

7.2.1 Doğrudan (explicit) Kuvvet Kontrolü

Doğrudan (explicit) kuvvet kontrolü direkt olarak kuvvetin ölçülmesi ve kumanda edilmesi ile sistem çıkışının girişini olabildiğince yakın takip etmesini sağlayan kuvvet kontrol metodudur, [58]. Bu metot kuvvet tabanlı ve konum tabanlı olmak üzere ikiye ayrılır. Yaygın şekilde kullanılanı kuvvet tabanlı Doğrudan (explicit) kontroldür.



Şekil 7. 22 Genel Doğrudan (explicit) kuvvet kontrolü blok diyagramı, [59].

Şekil 7.22’de genel doğrudan (explicit) kuvvet kontrolüne ait blok diyagram görülmektedir. Burada “G” kontrol edilecek sistemi, “H” denetleyici, “R” ileri besleme transfer fonksiyonu, “L” Kuvvet geri besleme filtresini ifade etmektedir.

Denetleyici PID’ nin çeşitli varyasyonlarından seçilebileceği gibi daha üst düzey denetleyiciler de seçilebilir. PID ve varyasyonları seçilmesinin sebebi denetleyicinin sistemi nasıl etkilediğini görmek ve doğrudan (explicit) kuvvet kontrolün sistemi nasıl etkilediğini anlamak içindir.

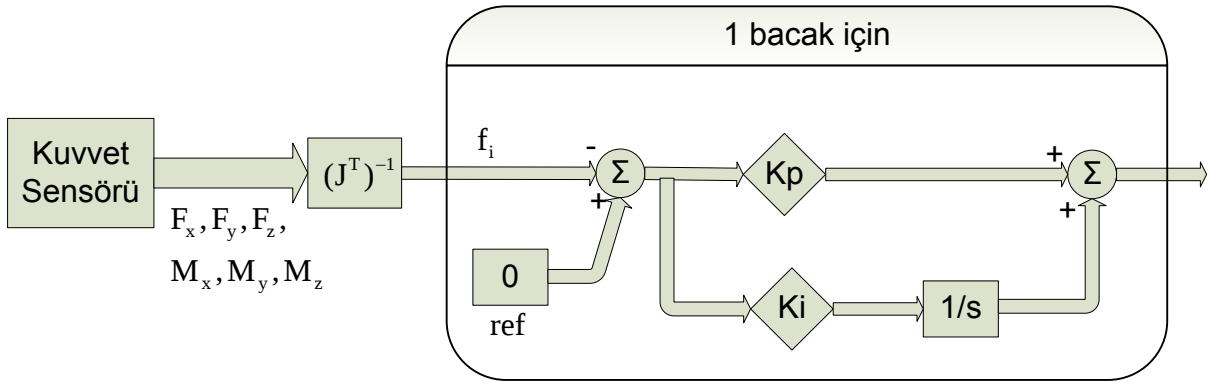
Şekil 7.22 de verilen sisteme ait transfer fonksiyonu denklem 7.8’de verilmiştir.

$$\frac{F_m}{F_r}(s) = \frac{G(s)[H(s) + R(s)]}{1 + G(s)H(s)L(s)} \quad (7.8)$$

Denklem 7.8 de sisteme ileri besleme transfer fonksiyonu eklendiği takdirde karmaşık düzlemde sisteme sıfır eklenmiş olacaktır. Benzer şekilde sisteme kuvvet geri beslemesi için filtre eklendiği zaman, derecesine göre karakteristik denkleme kutup eklenecektir. Doğrusal sistemler için doğrudan (explicit) kuvvet kontrolü tasarımı yapılırken bu faktörler göz önünde bulundurulmalıdır.

Yapılan çalışmalarda doğrudan (explicit) kuvvet kontrolü için en iyi performansı integral kontrol vermektedir, (R.Volpe, P.Khosla, 1993). Bunun sebebi olarak da integral kontrolün alçak geçiren bir filtre gibi davranması ve sistemde oluşabilecek rezonans titreşimleri ile karşılaşılması olasılığını azaltması olarak gösterilmektedir. Oransal ve integral kontrolün aynı anda uygulandığı sistemlerde ise sistem her iki denetleyicinin bir kombinasyonunu oluşturmaktadır.

Bu çalışmada SPM’nin doğrudan (explicit) kuvvet kontrolünde oransal ve integral denetleyiciler uygulanmıştır. Denetleyiciler diğer kontrol algoritmalarında olduğu gibi her bir bacak için aynı tip toplam 6 kuvvet kontrolü olarak uygulanmıştır. Uygulanan denetleyiciye ait blok diyagram Şekil 7.23 de verilmiştir.



Şekil 7. 23 SPM’na uygulanan doğrudan (explicit) kuvvet kontrolüne ait blok diyagram

Şekil 7.23 de görüleceği üzere kuvvet sensöründen gelen veriler, jakobiyen matrisinin transpozunun tersi ile çarpılarak, etki eden kuvvetler bacak üzerine etkiyen değerlere dönüştürülmüştür. Bu çalışmada SPM kullanıcıya manipülasyon sırasında eşlik edeceği için denetleyicinin bacaklara gelen kuvvet değerlerini sıfıra götürmesi gerekmektedir. Bu sebeple denetleyici için referans girişi “0 N” olarak belirlenmiştir.

Jakobiyen matrisi boyut değiştirmek için kullanılan bir tensördür. SPM mobil platformun hızları ile bacak hızları arasında sistemin modellenmesi sırasında kullanılan ve denklem 4.5 de ifade edilen “ K^{Li} ” ifadesi sistemin hızlarını mobil eksen takımından bacak hızlarına dönüştürdüğü için kullanacağımız jakobiyen matrisini ifade etmektedir, denklem 7.9.

$$J_{SP} = [K^{L1} \quad K^{L2} \quad K^{L3} \quad K^{L4} \quad K^{L5} \quad K^{L6}]^T \quad (7.9)$$

Çizelge 4.1’e göre trafo sınıfı elemanlarda denklem 7.10 eşitlikleri mevcuttur.

$$\begin{aligned} f_1 &= n.f_2 \\ e_2 &= n.e_1 \end{aligned} \quad (7.10)$$

Hızlar birer uç değişken, kuvvetler ise iç değişken olduklarına göre denklem 7.10 da “ e_2 ” bacak hızlarını, “ e_1 ” ise platform hızlarını temsil etmektedir. Bu durumda “ f_2 ” bacak kuvvetleri ve momentleri, “ f_1 ” ise platform kuvvetlerini ifade eder. Bacak kuvvetleri “ F_{Li} ” ile, platform kuvvetleri “ F_P ” ile gösterilirse 7.10 da ifade edilen iç değişken bağıntısı denklem 7.11de gösterildiği gibi yazılabilir.

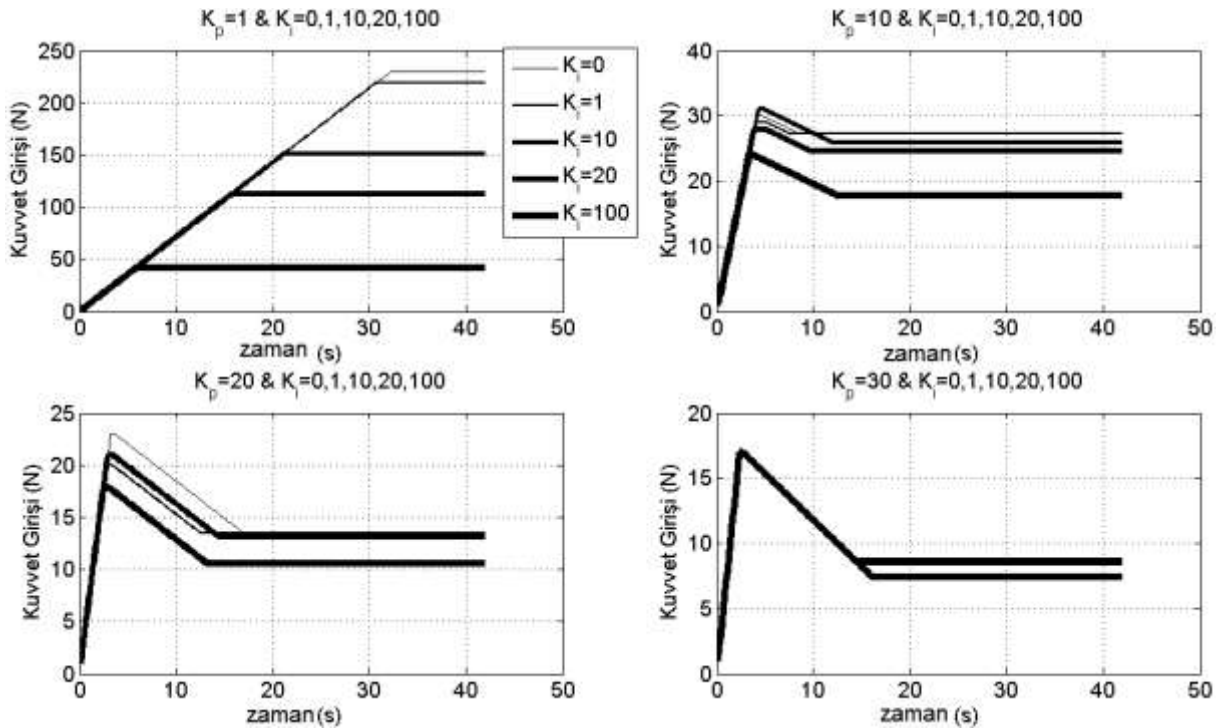
$$\vec{F}_P = J_{SP} \cdot \vec{F}_{Li} \quad (7.11)$$

Bacak kuvvetleri ise 7.12 eşitliğinden bulunabilir.

$$\vec{F}_{Li} = (J_{SP}^T)^{-1} \cdot \vec{F}_{SP} \quad (7.12)$$

PI denetleyici katsayıları deneysel sistem üzerinde belirlenmiştir. Kuvvet sensörü ile katsayı tespiti amacıyla deney yapılabilmesi için her bir deneyde katsayılar hariç bütün verilerin aynı tutulması gerekmektedir. Kuvvet sensörü kullanıldığı takdirde bu mümkün olamamaktadır. Bu sebeple kuvvet girişi program aracılığı ile yapılmıştır. Program aracılığı ile verilecek sabit bir kuvvet bacalarda sürekli bir kuvvet hatasına sebep olacağı için sistemin aşırı yüklenmesine ve bir süre sonra çalışma uzayı dışına çıkmasına sebep olacaktır. Bu sebeple katsayı belirlenmesinde kullanılacak deneyde sistem $z=395$ mm oluncaya kadar $F_z=1$ N'luk artırımlarla kuvvet girişi yapılmıştır. Sistem 395 ile 405 mm arasında iken F_z hangi değere ulaşırsa o değerde sabit kalması sağlanmış, sistem eğer 405 mm'yi geçerse $F_z=0,1$ N' luk azaltmalarla 405 mm'ye indirilmesi sağlanmıştır. Bu algoritma sistem manipülasyonu sırasında kuvvet sensörü kullanılırken uygulanan manipülasyonun sensörsüz benzetimi niteliğindedir. Burada amaç katsayılar dışında bütün değişkenleri eşit tutmaktır ki buna kuvvet girişi de dâhildir.

Oransal katsayı " K_p " 1,10,20,30 değerleri için Integral katsayı " K_i " 0,1,10,20,100 değerleri ile taranarak toplam 20 adet deney yapılmıştır. Şekil 7.24 de deney sonucu çizilen grafikler görülmektedir.



Şekil 7. 24 Doğrudan (explicit) kuvvet kontrolü için PI katsayılarının değişimlerine göre kuvvet girişi değerini gösteren grafikler.

Şekil 7.24 de görüleceği üzere K_p katsayısı 1 iken sistem belirlenen konuma herhangi bir kuvvet azaltması olmadan gitmektedir. Ancak Kuvvet giriş değerleri çok yüksek olmakla birlikte K_i katsayısı artırımı ile birlikte kuvvet giriş değeri de azalmaktadır. Bunun yanında sistem diğer kombinasyonlara göre daha geç istenen konuma gitmektedir.

K_p katsayısı 10 iken sistem daha erken ve çok az bir kuvvet azaltması ile istenen konuma gitmektedir. K_i katsayısı 0,1 ve 20 için az bir kuvvet azaltmasına yol açarken 10 ve 100 değerleri için sistemin oturmasını geciktirmektedir. K_p katsayısı 20 ve 30 için sistem her ne kadar az kuvvete ihtiyaç duysa da oturma zamanı artmaktadır. Buradan yola çıkılarak $K_p=10$ ve $K_i=1$ için sistem cevabının hızı ve kuvvet gereksinimi tatminkâr bulunmuştur.

7.3 Kuvvet Kontrol Algoritmalarının Deneysel Sisteme Uygulanması ve Analizleri

Kullanılan bütün denetleyiciler gerçek sisteme uygulanırken ayrı olarak uygulamak durumunda olduğu için ve deneysel sistemde hareket kontrol kartının komut işletme süresinden kaynaklanan sorunlar nedeniyle mecburen örnekleme zamanı 0.14 s olarak tespit edilmiştir. Önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere deneysel sistem üzerinde yapılan çalışmalardan örnekleme zamanını bu kadar düşüren sebep, hareket kontrol kartına ait komutların kullanılması ve kullanılan bu komutlara ait kütüphanelere müdahale edilememesidir. Bu sorunun aşılabilmesi maksadı ile LabView programında da denemesi yapılan sistemin yine aynı örnekleme zamanı problemi çıkardığı yapılan denemelerle gözlemlenmiştir. Bu sebeple sistem bu haliyle test ve deneylere tabii tutulmuştur.

Ayrı olarak hazırlanan gerek denetleyici alt programlarında gerekse ters ve düz kinematik hesapların yapıldığı alt programlarda gerekli türev ve integraller ayrı olarak hesaplanmaktadır.

Türev almak için " U_{t-1} " t-1 zamanındaki ve " U_t " t zamanındaki veriler olmak üzere " U " fonksiyonunun türevi denklem 7.13 de verildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$\frac{dU}{dt} = \frac{U_t - U_{t-1}}{T_s} \quad (7.13)$$

İntegral almak için ise fonksiyon verilerinin oluşturduğu dik yamuğun alanı hesaplanmış ve bir önceki hesaplanan toplam alana eklenerek integral alma işlemi gerçekleştirilmiştir. " T_s "

örnekleme zamanı olmak üzere denklem 7.14 de, uygulanan bu işlemin formülü verilmektedir.

$$\int U_t = \sum \frac{(U_t + U_{t-1}) \cdot T_s}{2} \quad (7.14)$$

Uygulanan kuvvet kontrol yöntemleri üç farklı yöntem ile karşılaştırılmıştır. Konum tabanlı kuvvet denetleyicilerinin adım ve rampa cevapları karşılaştırılmıştır. Ayrıca Uygulanan 3 farklı kuvvet kontrol yöntemini, saydamlığı karşılaştırmak için bir test düzeneği hazırlanmış ve denetleyiciler bu düzenekte karşılaştırılmıştır. Bunların yanı sıra uygulanan kuvvet kontrol yöntemleri değişik frekanstaki kuvvet girişlerine göre verdikleri cevaplar incelenmiştir.

7.3.1 Konum Tabanlı Kuvvet Kontrol Yöntemlerinin Adım ve Rampa Cevapları

DeneySEL sisteme konum tabanlı uygulanan katılık ve empedans kuvvet kontrolü yöntemleri adım ve rampa kuvvet ve moment girişi verilerek test edilmiştir. Kuvvet kontrol yöntemlerinin performansları karşılaştırılacağı için, kuvvet sensörü, kuvvet girişlerinin bütün denetleyiciler üzerinde eşdeğer olması amacı ile devre dışı bırakılmış, kuvvet girişleri program içinden verilmiştir. Konum tabanlı denetleyicilerin kuvvet kontrol performansları karşılaştırılacağı için simülasyonlarda iyi performans verdiği gözlemlenen KABMPD+PD konum denetleyicisi kullanılmıştır.

Yapılan deneyde her bir ekseninde ayrı ayrı olmak üzere 10 N'luk adım ve rampa girişi 100 örneklik yani 14 sn'lik bir gecikme ile verilmiştir. Aynı şekilde 1 Nm'lik moment girişi de üç eksenine ayrı ayrı ve benzer şekilde uygulanmıştır. Toplamda her bir kuvvet kontrol yöntemi için 6 olmak üzere 12 test yapılmıştır.

Uygulanan kuvvete karşı katılık kuvvet denetleyicisinin ürettiği kuvvetler düz kinematik yöntemden elde edilen veriler ile katılık katsayısı " K_y " çarpılarak elde edilmiştir. " F_{KD} " katılık kuvvet kontrolünün sisteme aktardığı kuvvet ve " P_{SP} " düz kinematik yöntemden elde edilen SPM'nin 6 eksenindeki yer değiştirmeleri olmak üzere denetleyicinin ürettiği kuvvetler denklem 7.15'den hesaplanabilir.

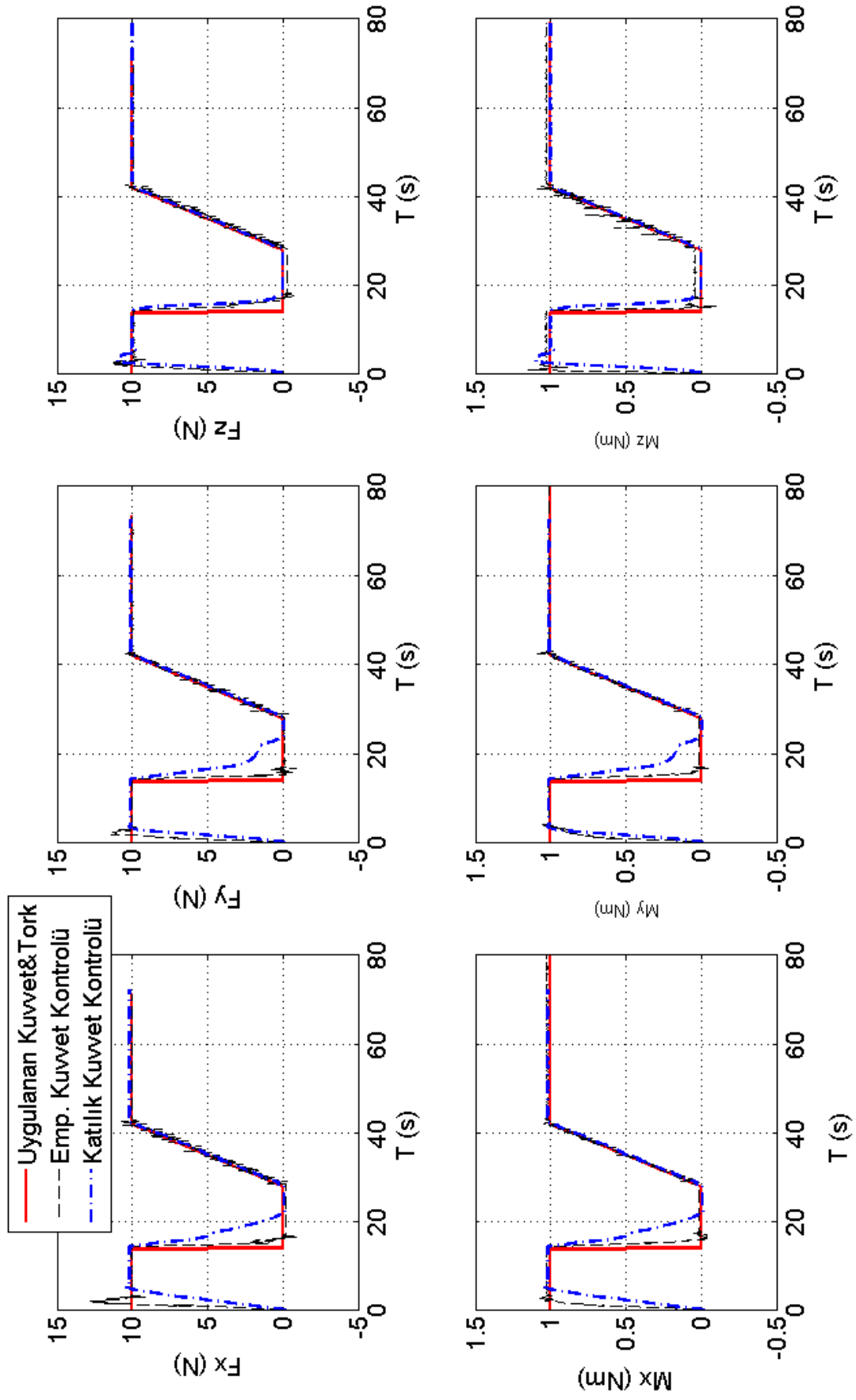
$$F_{KD} = K_y \cdot P_{SP} \quad (7.15)$$

Uygulanan kuvvete karşı empedans kuvvet kontrolünün ürettiği kuvvetler yine düz kinematik yöntemden elde edilen konum verileri ile hız ve ivme değerleri bulunduğundan sonra mekanik

empedansı ifade eden katsayılar kullanılarak bir nevi sağlaması yapılarak 7.16 denklemi ile bulunabilir.

$$F_{ED} = \ddot{P}_{SP} \cdot M_e + \dot{P}_{SP} \cdot b_e + P_{SP} \cdot k_e \quad (7.16)$$

Denetleyicilerin kuvvet değerleri hesaplanırken kullanılan düz kinematik yöntem, 3. bölümde bahsedilen YSA ile oluşturulmuş düz kinematik yöntemdir. Deney sonuçları şekil 7.25 de verilen grafikte görülmektedir.



Şekil 7. 25 Konum tabanlı kuvvet kontrol denetleyicilerinin adım ve rampa cevapları.

Şekil 7.25 de kuvvet kontrol yöntemlerinden empedans kontrol, katılık kontrolüne göre daha hızlı cevap vermesine rağmen öngörülen kuvvet değerine ulaştığında üst aşım vermekte ve rampa girişinde ise katılık kontrolüne göre daha titreşimli cevap vermektedir. Rampa girişindeki titreşimlerin sebebi ise girişin kademe ile verilmesinden dolayı her bir noktada empedans kontrolün üst aşım yapması olarak düşünülebilir. Üst aşımın sebebi olarak ise empedans kontrolde şekil 7.15’den de görüleceği üzere çevresel mekanik empedansın kuvvet girişine integral alan bir denetleyici gibi davranması olarak gösterilebilir.

7.3.2 Uygulanan Kuvvet Kontrol Yöntemlerinin Değişik Frekanslardaki Kuvvet Girişlerine Karşı Tepkilerinin Karşılaştırılması

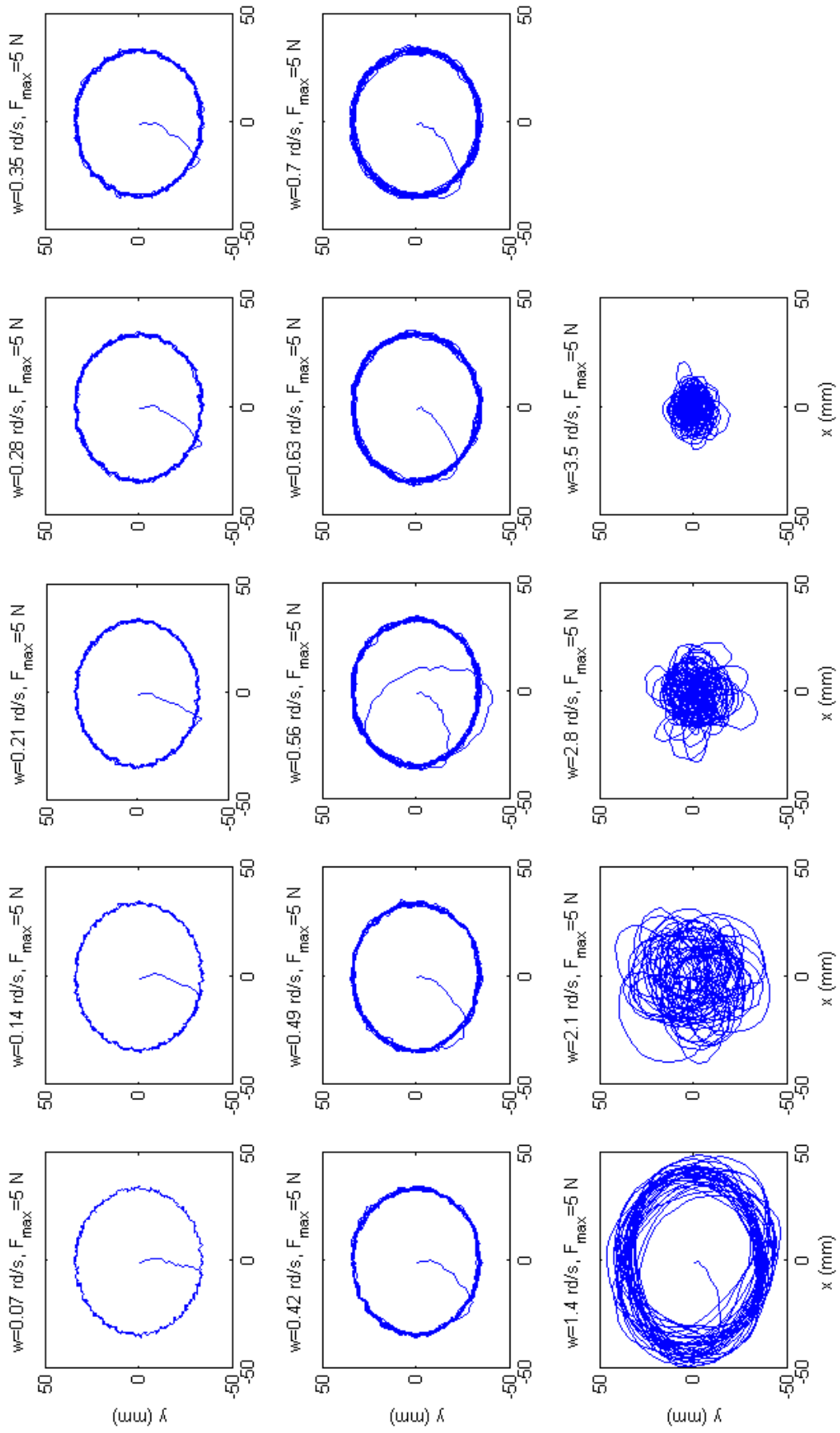
Bir kuvvet kontrol yönteminin basamak ve rampa şeklindeki kuvvet girişlerine karşı verdiği cevapların yanı sıra giriş olarak verilen kuvvetin frekansı da önemlidir ve sistemin değişik frekanslardaki girişlere karşı cevabını belirler. Bu sebeple tüm SPM’nın ve kuvvet kontrollerinin hangi frekanstaki kuvvet girişine nasıl cevap verdiğini ve sistemin frekans sınırlarını öğrenmek için sistem değişik frekansta ve genlikte kuvvetlerle test edilmiştir.

Karşılaştırma yapılması bakımından bölüm 7.4.1’de olduğu gibi kuvvet sensörü devre dışı bırakılarak denklem 7.17’de verilen kuvvet ve frekanslarda tahrik edilmiştir.

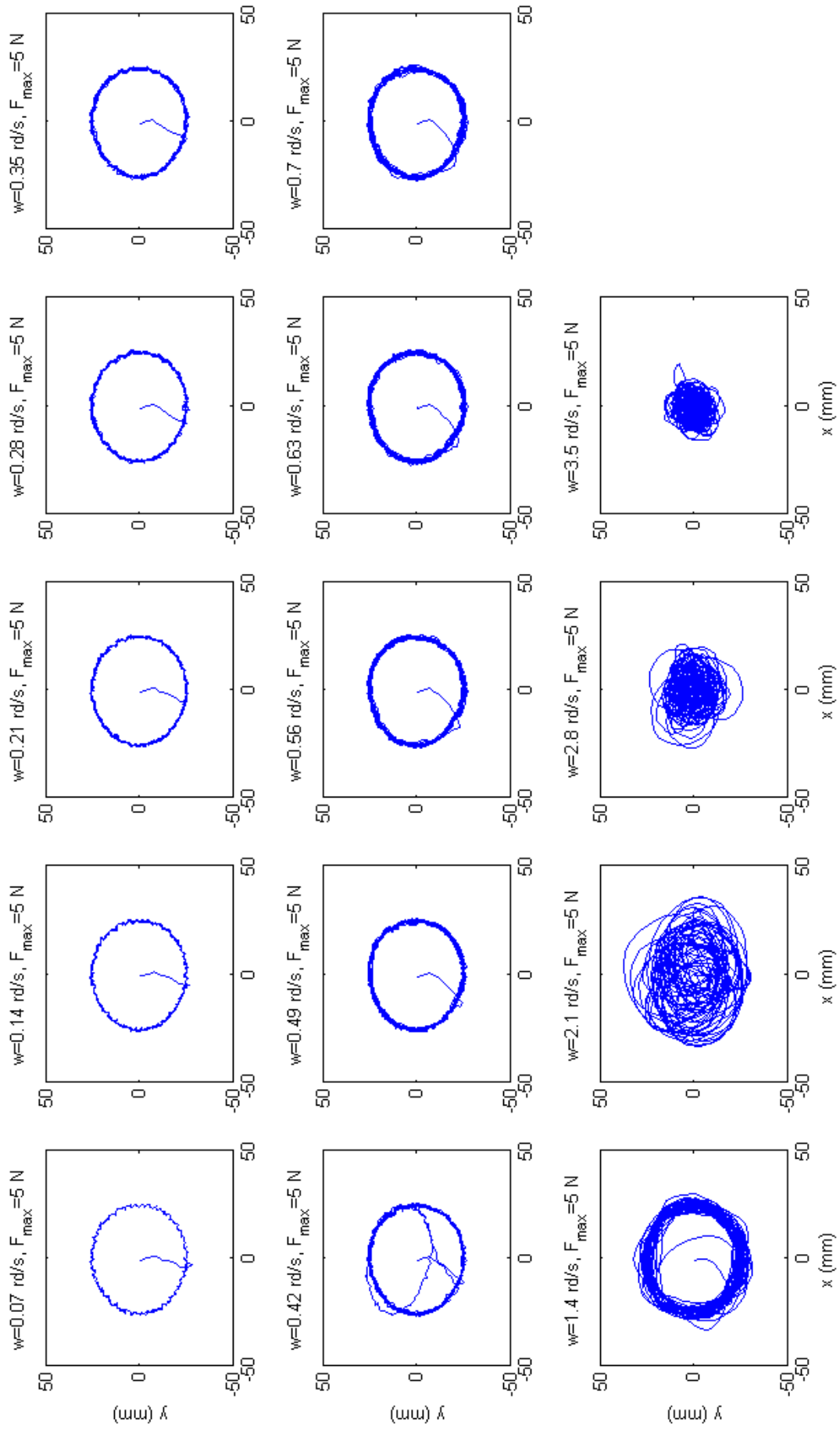
$$\begin{aligned} F_x &= 5 \cdot \sin(\omega t) \\ F_y &= 5 \cdot \cos(\omega t) \end{aligned} \tag{7.17}$$

Bu tip kuvvet girişlerine karşı sistemden düzgün bir daire çizmesi beklenir. Denklem 7.17 de belirtilen frekans “ ω ” , 0.07 rad/s ‘den başlayarak 1.44 rad/s’ye kadar 10 frekans düzeyi taranmıştır. 1.44 rad/s ‘den sonra ise 0.7 rad/s ‘ lik artırımlarla 4 frekans düzeyi olmak üzere toplam 14 farklı frekansta sisteme kuvvet girişi yapılmış ve kuvvet kontrol yöntemlerine göre karşılaştırılmışlardır.

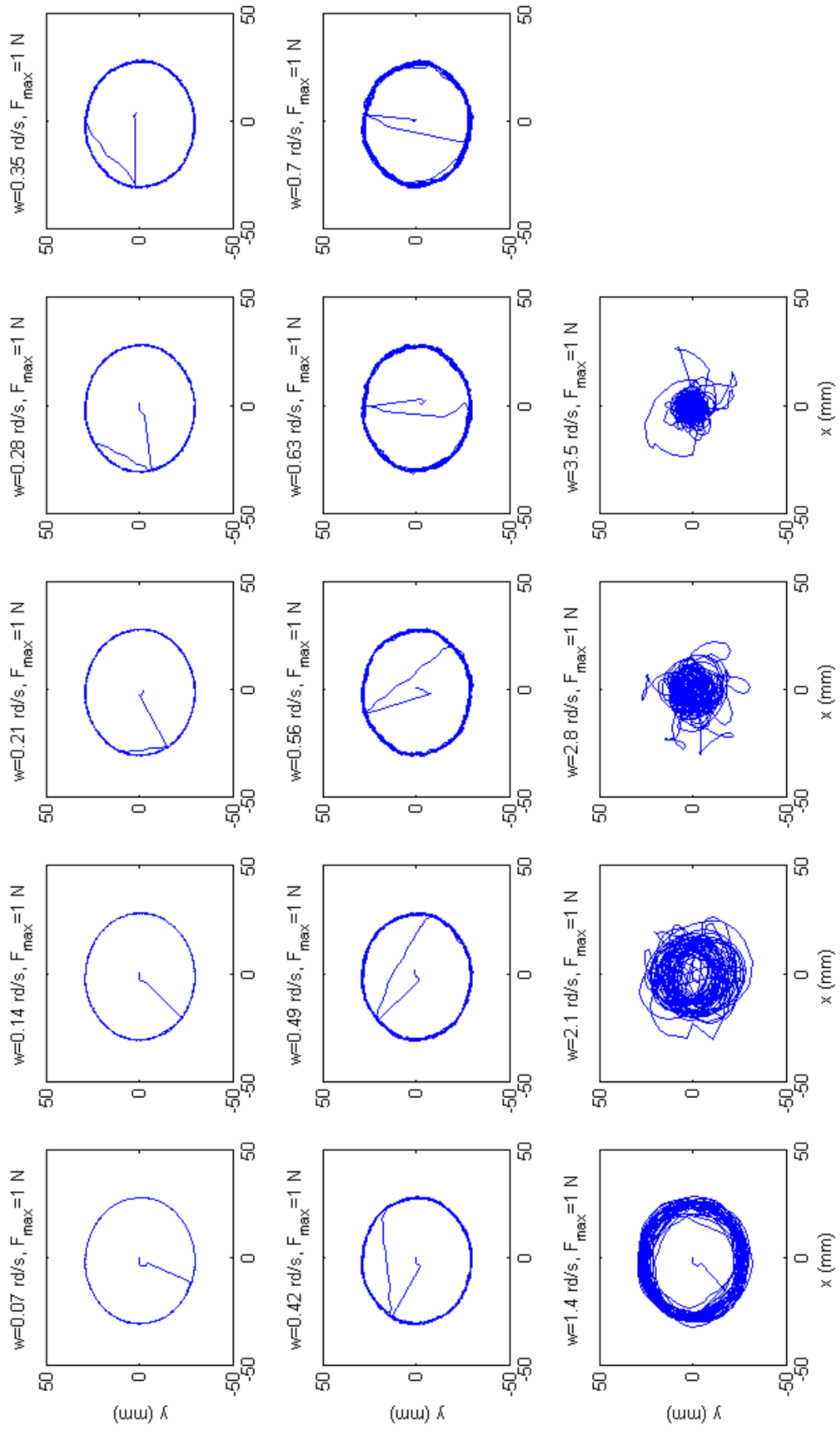
Katılık ve empedans kontrolü uygulanan sistemin denklem 7.17 de verilen frekanstaki kuvvet girişlerine verdiği cevap sırasıyla şekil 7.26 ve 7.27 de görülmektedir. Doğrudan (explicit) kuvvet kontrolü kuvvet girişine diğer denetleyicilerden daha duyarlı olduğu için genliği 1 N olan frekans aralıkları taranmış ve cevapları Şekil 7.28 de verilmiştir.



Şekil 7. 26 Katılık kontrolü uygulanan sistemin değişik frekanslardaki kuvvet girişlerine verdiği cevaplar.



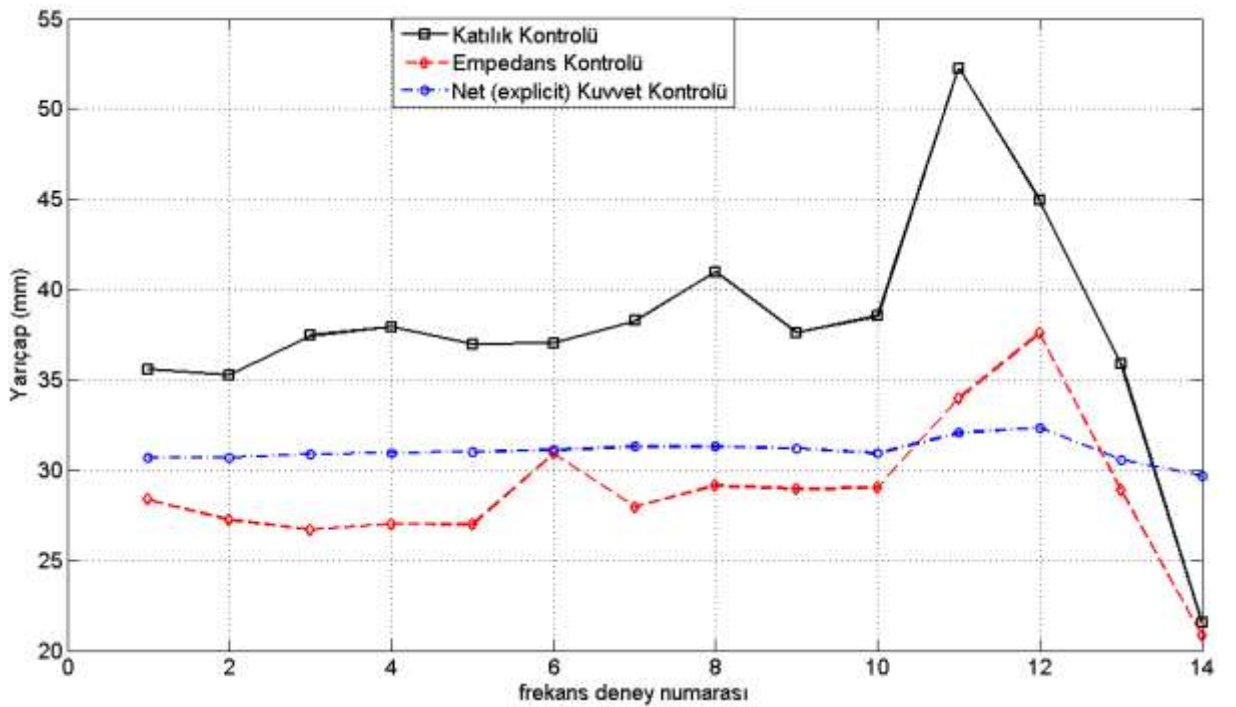
Şekil 7. 27 Empedans kontrolü uygulanan sistemin değişik frekanslardaki kuvvet girişlerine verdiği cevaplar.



Şekil 7. 28 Doğrudan (explicit) kuvvet kontrolü uygulanan sistemin değişik frekanslardaki kuvvet girişlerine verdiği cevaplar.

Şekil 7.26, 7.27 ve 7.28 de görülmektedir ki sistem 1.4 rad/s frekans ve üzerindeki kuvvet girişlerini takip edememektedir. Bütün kuvvet kontrol yöntemlerinde bu frekans ve üzerinde kontrol sağlayamamaları tüm sistemin band genişliği hakkında bilgi vermektedir. Ayrıca doğrudan (explicit) kontrol altındayken SPM' nın çizdiği dairelerin 0.7 rad/s ve altındaki frekanslardaki kuvvet girişlerinde, diğer konum tabanlı kuvvet kontrol yöntemlerine göre daha kesin ve pürüzsüz olduğu görülmektedir. Bu denetleyicinin diğer kontrol yöntemlerine göre daha az titreşime sebep olduğunu ve bu şartlar altında daha kararlı olduğunu bir göstergesidir.

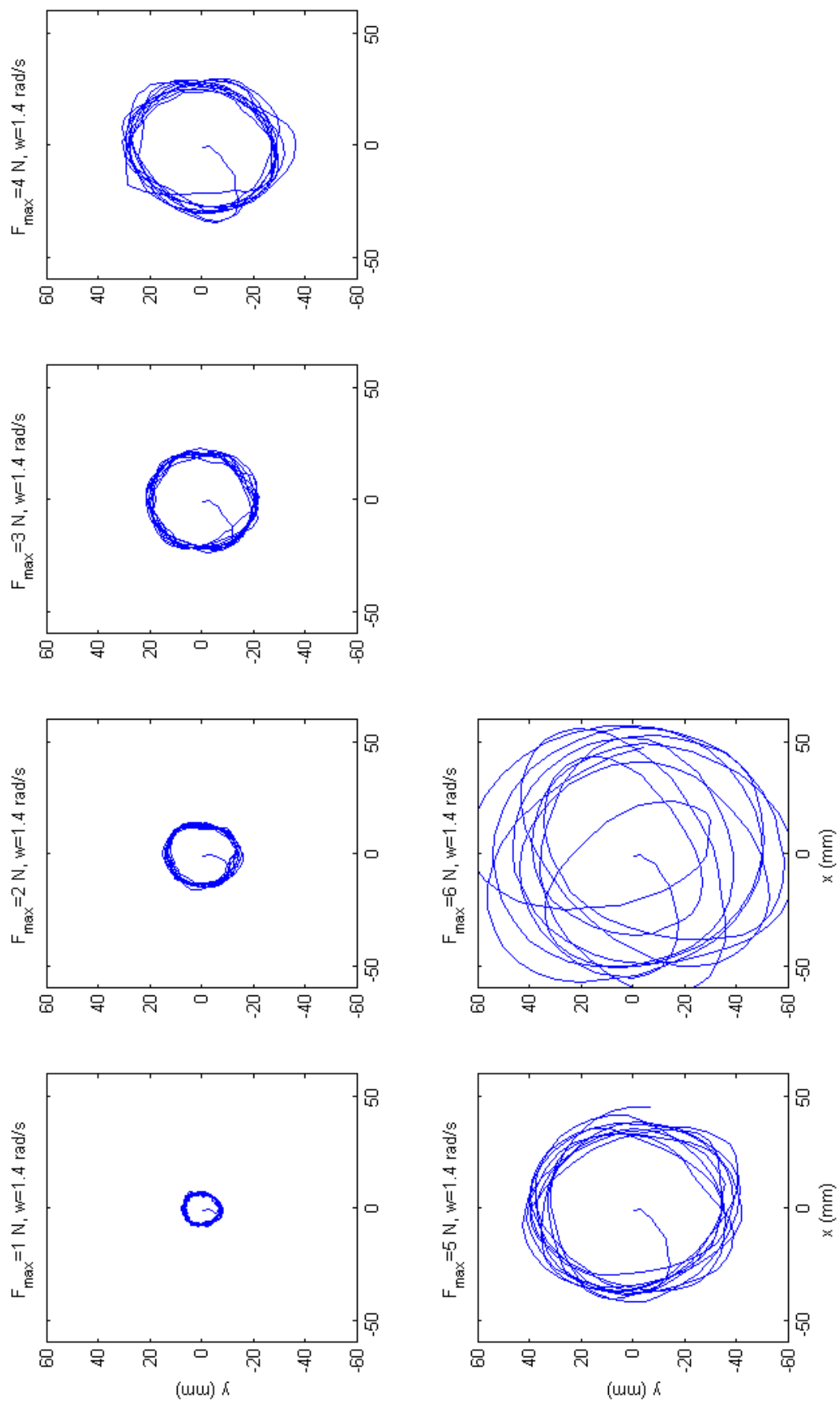
SPM' nın çizdiği dairelerin yarıçaplarının frekansa göre değişimi eğer sistem mevcut frekanstaki kuvvet girişini takip edebiliyorsa sabit kalmalı ya da çok az değişim göstermelidir. Şekil 7.29 da frekansa göre SPM'nın çizdiği dairelerin yarıçaplarından oluşturulmuş grafik görülmektedir. Bu grafiğe göre taranan 10. frekans düzeyi olan 0.7 rad/s den sonra yarıçaplarda büyük farklılaşmalar gözlemlenmektedir. Yukarıda da bahsedildiği gibi doğrudan (explicit) kuvvet kontrolünde 0.7 ve altındaki frekanslarda yarıçap oldukça sabit bir çizgi izlemektedir.



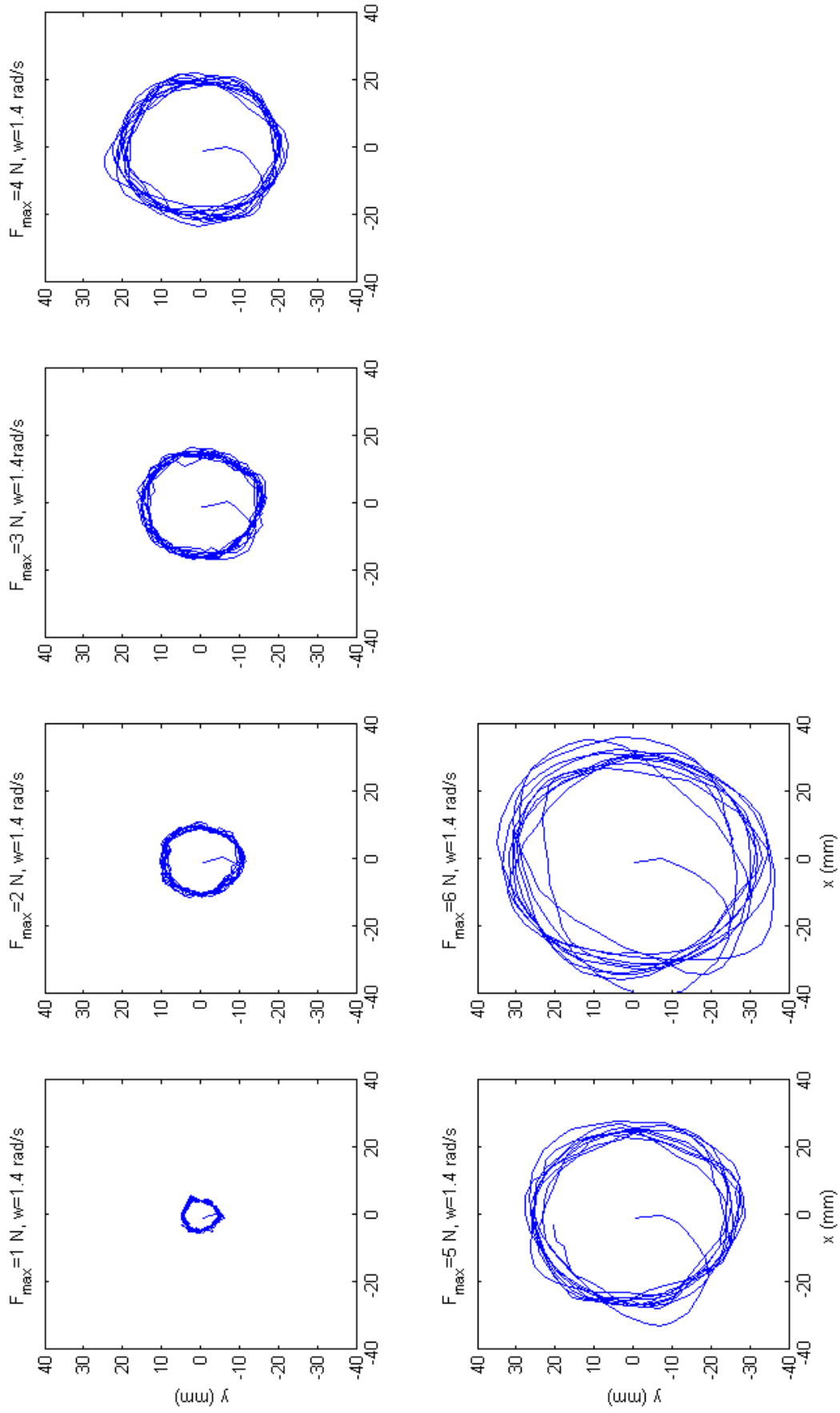
Şekil 7. 29 SPM' nın değişik frekanslardaki kuvvet girişlerine göre çizdiği dairelerin yarıçaplarının frekansa göre grafiği.

Sistemin değişen frekanslardaki davranışı kadar değişen genlikteki davranışları da sistem karakteristiğini belirlemek açısından önemlidir. Sistemin kritik frekans değeri olan 1.4 rad/s

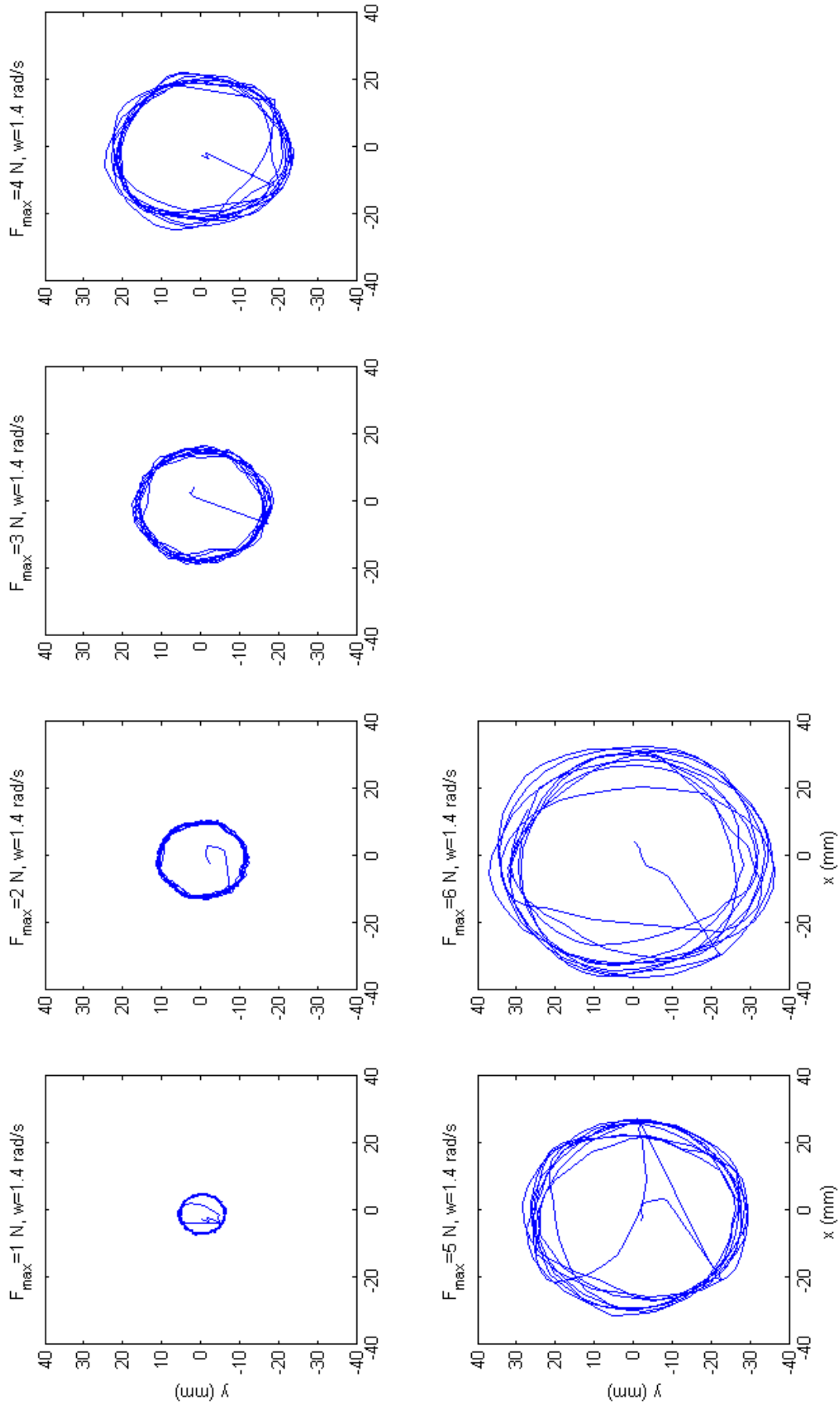
de değişen genliklerde kuvvet girişı uygulandığında sistem yanıtı incelenmiştir. Kritik frekans değerinin seçilmesinin sebebi değişen genliğin bu frekansta sistem üzerine olumlu ve olumsuz etkilerini daha iyi gözlemleyebilmek içindir. Sistemin değişik genliklere sabit frekansta verdiği yanıtlar katılık kontrolü için Şekil 7.30, empedans kontrol için Şekil 7.31, doğrudan (explicit) kuvvet kontrolü için Şekil 7.32 de verilmiştir.



Şekil 7. 30 Katılık kontrolü uygulanan sistemin sabit frekans ve değişen genlikteki kuvvet girişlerine verdiği cevaplar.



Şekil 7. 31 Empedans kontrol uygulanan sistemin sabit frekans ve değişen genlikteki kuvvet girişlerine verdiği cevaplar.



Şekil 7. 32 Doğrudan (explicit) kuvvet kontrolü uygulanan sistemin sabit frekans ve değişen genlikteki kuvvet girişlerine verdiği cevaplar.

Şekil 7.30 ve 7.31 den katılık kontrolündeki sistemin çizdiği daireler 4N ve sonrasında bozulmaktadır. Empedans kontrol uygulanan sistemde de bozulmalar bu genliklerde başlamasına rağmen 6N da katılık kontrolüne göre bozulma daha azdır. Bunun sebebi olarak da 6 N genlikte uygulanan kuvvet, katılık kontrolü altındaki sistemi hareket sınırlarına diğerlerinden daha fazla yaklaştırdığı gösterilebilir. Doğrudan (explicit) kuvvet kontrolü de diğer kuvvet kontrol yöntemlerinde olduğu gibi 4 N ve üzerindeki genlik değerlerinde çizdiği yörüngede bozulmalar olmaktadır.

SPM' nın düşük genliklerde daha iyi sonuç vermesinin sebebi olarak mekanizmanın çalışma uzayı sınırlarına yaklaşması gösterilebilir. Veriler YSA kullanılarak oluşturulan düz kinematik yöntemle hesaplanmıştır. Unutulmamalıdır ki YSA çalışma uzayı dahilinde belirlenen noktalar kullanılarak eğitilmiş ve çalışma uzayının sınırına yaklaştıkça hata miktarı da paralel olarak artmaktadır.

7.3.3 Uygulanan Kuvvet Kontrol Yöntemlerinin Saydamlıklarının Karşılaştırılması

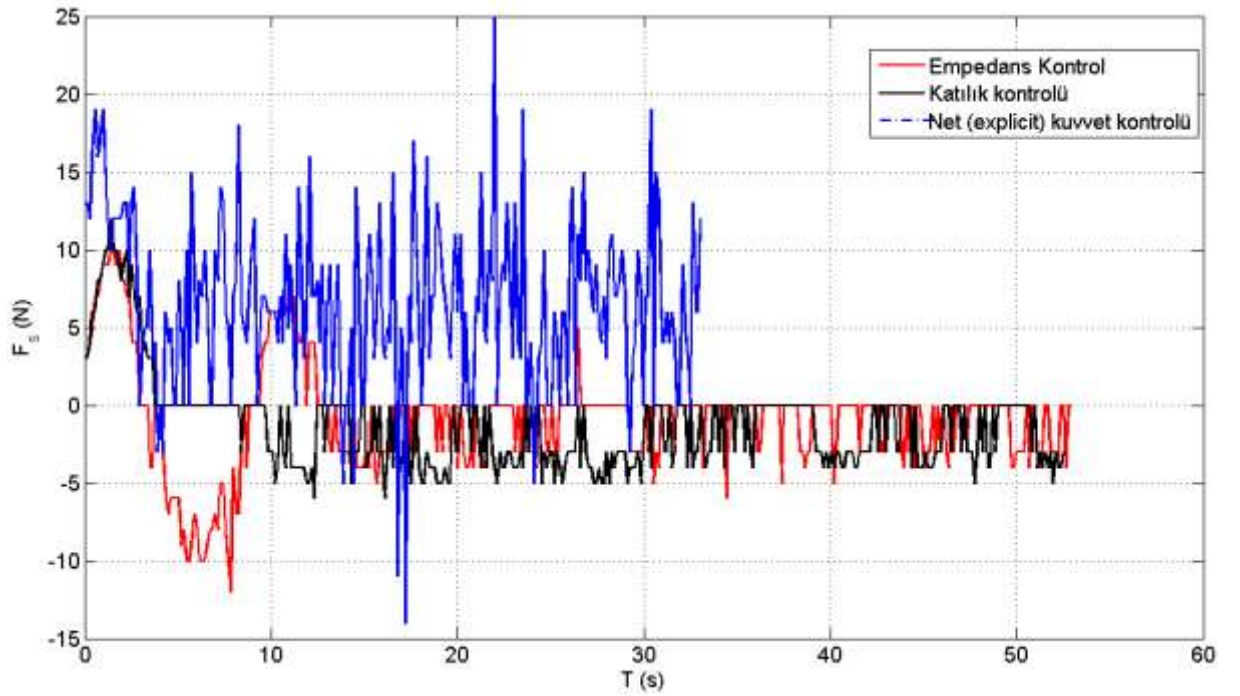
Saydamlık (*Transparency*), başka bir deyişle sisteme yapılan kuvvet girişi ile sistemden alınan kuvvet arasındaki fark kuvvet kontrolü denetlenen sistemler için özellikle de teleoperasyon ve manipülasyon gerektiren kuvvet kontrollü sistemler için bir performans kriteridir. Deneysel sisteme uygulanan kuvvet kontrol yöntemleri için de bir karşılaştırma tablosu oluşturması açısından önemlidir.

Sistemin kuvvet kontrolü performansının saydamlıklarının ölçülmesinde kuvvet/tork sensöründen gelen veriler sensör dinamiklerinin de etkisinin görülmesi açısından önemlidir. Denetleyicilerin saydamlıkları hakkında bilgi sahibi olmak için SPM üzerine sabit ve her denetleyiciye kıyaslanmaları açısından eşit kuvvet verebilecek bir düzenek kurulmuştur. Bu düzende benzer deneyler için kullanılan bir yay SPM üzerine sabitlenmiştir. Deney başlatıldığı anda yaydaki gerilme SPM'na "Z" eksen yönünde kuvvet uygulayacak ve o an çalışan kuvvet kontrol algoritması ise platformu kuvvet uygulanan yönde hareket ettirecektir. Deney düzeneği Şekil 7.33'de görülmektedir.



Şekil 7. 33 Kuvvet kontrol yöntemlerinin saydamlıklarını test etmek için oluşturulmuş test düzeneği

Manipülâtörün kullanıcıya hareket boyunca eşlik etmesi istendiğinden sensörün hareket tamamlandığında “0” değerini göstermesi beklenmektedir. Deney sonuçları Şekil 7.34 deki grafikte karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 7. 34 Saydamlık Test sonuçları

Şekil 7.34 de görüldüğü üzere katılık kontrolü ve empedans kontrolü kuvvet hatasını sıfıra götürdüğü halde doğrudan (explicit) kuvvet kontrolü titreşimli bir yanıt vermektedir. Bölüm 7.4.2’de iyi bir performans sergilemesine karşılık, sensör devreye girdiği zamanki performans bozukluğu akla sensör dinamiklerini getirmektedir.

Empedans kontrolü altındayken sistemin önce 10 N’luk hata ardından da -10 N’luk hatadan sonra kuvvet hatasının sıfıra gittiği görülmektedir. Bunun sebebi olarak da empedans kontrol bölüm 7.4.1 de bahsedildiği üzere kuvvet değişikliklerine daha hızlı yanıt vermekte ancak üst aşım yapmakta olduğu gösterilebilir. Öyle ki üst aşım yay kullanılarak hazırlanan deney düzeneğinde yayı sıkıştırmakta ve bundan kaynaklanan ters bir kuvvet oluşturmaktadır.

BÖLÜM 8

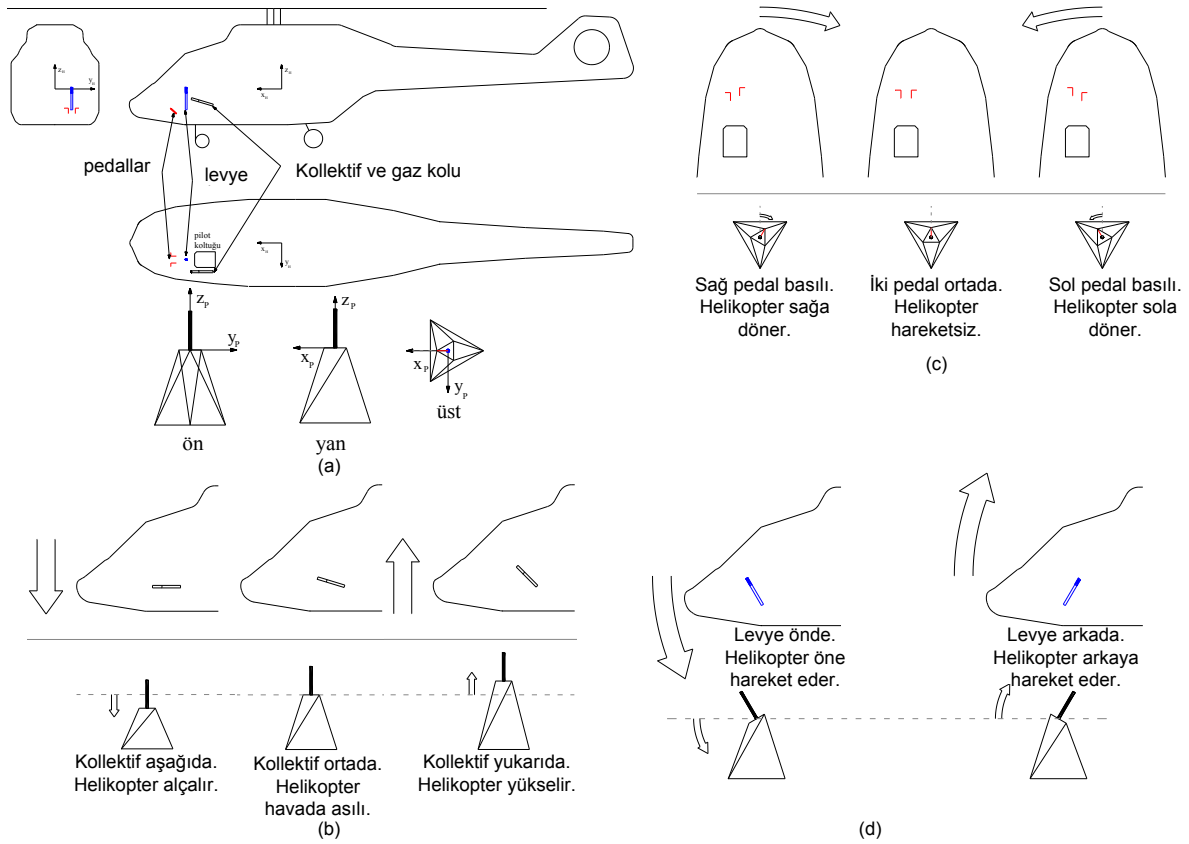
UZAYSAL HAREKET EDEBİLEN ARAÇLARIN STEWART PLATFORM MEKANİZMASI İLE KONTROLÜ

Stewart Platform Mekanizmasında üst tabla uzaysal hareket edebilme yeteneğine sahip olduğundan, mekanizma uzaysal hareket eden herhangi bir aracı yönlendirmek maksadıyla uzaysal bir kumanda kolu olarak kullanılabilir. Herhangi bir uçuş esnasında farklı durumlar ve manevralar olabileceğinden, aracın bütün hareket kabiliyetinin tek elde toplanması önemli olacaktır. Tabiidir ki, kumanda kolunun çalışma uzayının, kumanda edilmek istenen aracın konum/hız hareket kabiliyetine nazaran uygun olması beklenir. Uzaysal hareket eden araçların kumanda kollarının çalışma uzaylarına ilişkin yeterli çalışma olmadığından, bu konuda atıf verilmesi mümkün gözükmemekle birlikte, tasarlanan kumanda kolu için yapılan çalışma uzayı analizleri, güncel kullanılan cihazlara nazaran, tasarlanan kolun yeterliliğini göstermektedir, [60].

Uzaysal hareket eden araçların kumandasında kullanıcılar genelde birden fazla kumandaya hükmetmek durumundadır. Örneğin bir helikopterin yönlendirilmesi düşünüldüğünde, kolektif, kol ve pedalın beraber kullanılması gerekmektedir, Şekil 8.1-a. Kolektif, z yönünde alçalma ve yükselmeyi, Şekil 8.1-b, pedallar dikey eksen etrafında dönmeyi, Şekil 8.1-c, ve kol da yunuslama ve yalpalama hareketini sağlar, Şekil 8.1-d.

Bütün bu hareketlerin SP uzaysal kumanda kolu ile yaptırılması durumunda, en azından, kullanıcının platformun ağırlığını elinde hissetmemesi için, kuvvet/tork geri beslemesi zorunlu olmaktadır. Buna ek olarak aracın üzerine etkiyen ataletsel kuvvetler, rüzgar, vs. nin de pilot tarafından hissedilmesi, hakimiyet kolaylığı sağlayacaktır. Bu çalışmada kuvvet/tork geri beslemesinden amaç olarak kullanıcının, platformu kumanda etmesi sırasında, elinde

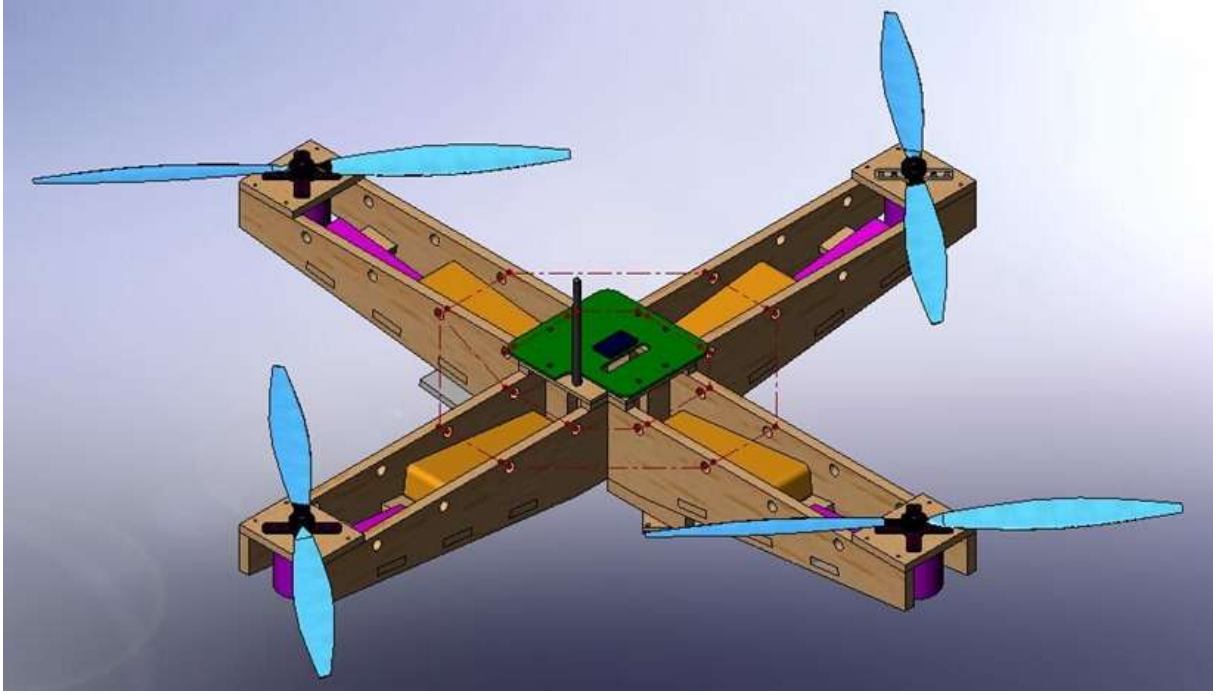
platform ağırlığı ve sürtünmesini hissetmemesi ve kullanıcının el hareketlerini takip edecek şekilde, motorların bağımsız kontrolüdür.



Şekil 8. 1 (a)Bir helikopterin ve stewart platformun ön, üst ve yan görünüşü, (b) SP tabanlı bir uçuş kontrolüyle bir helikopterin havalanma, asılı kalma ve inme durumları, (c) SP tabanlı bir uçuş kontrolü ile bir helikopterin sapma hareketi, (d) SP tabanlı uçuş kontrol ünitesi ile bir helikopterin yunuslama ve yalpalama hareketi

8.1 Uzaysal Hareket Edebilen Bir Taşıt Olarak 4 Rotorlu Hava Aracı: Quadrotor

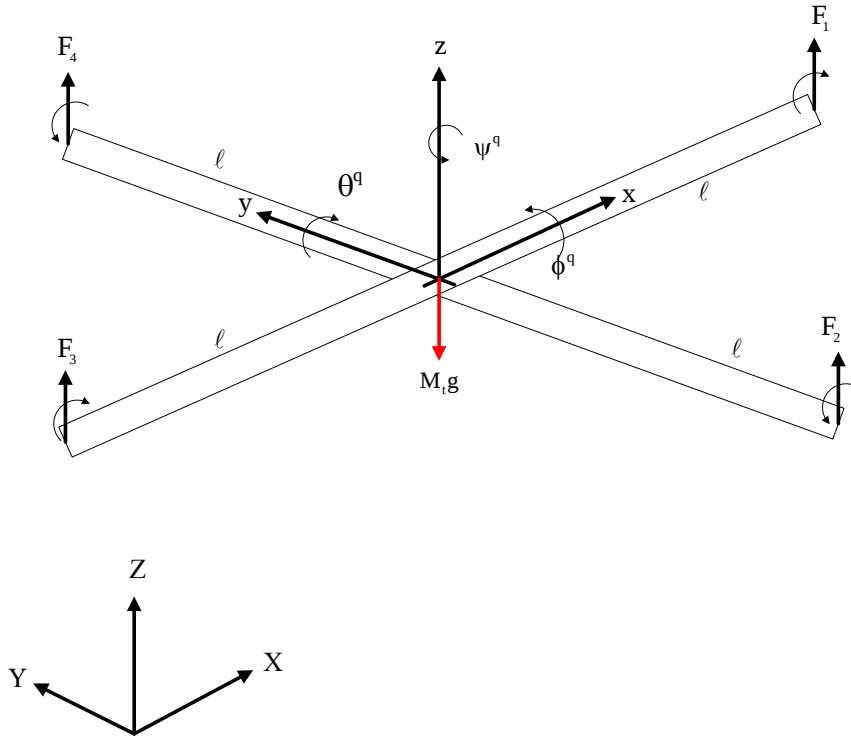
İnsansız hava taşıtları gerek askeri, gerek arama kurtarma ve gerekse uzay araştırmalarında bir çekim merkezi haline gelmiştir. Sahip olduğu 4 serbestlik derecesi ve 6 eksenle hareket kabiliyeti ile 4 rotorlu bir hava aracı olan “Quadrotor”, araştırma geliştirme faaliyetlerinde önemli bir yer kaplamaktadır. İnsansız hava aracı olarak dört rotorlu helikopter, diğer birçok hava aracına göre farklı üstünlüklere sahiptir. Dar alanlarda dikey kalkış ve iniş yapabilmesi, havada asılı kalabilmesi ve manevra kabiliyetinin yüksek olması bu üstünlüklerin birkaçıdır. Son yıllarda insansız hava araçları üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Dört rotorlu insansız hava aracının matematiksel modeli doğrusal olmayan özellikler içermektedir ve modellenmesi ile ilgili yapılan çalışmalarda genel olarak Newton-Euler metodu kullanılmıştır, [61].



Şekil 8. 2 4 Rotorlu Hava aracı : Quadrotor

Şekil 8.2’de bir 4 rotorlu helikopter “*Quadrotor*” görülmektedir. Dinamik modeli oluşturulacak bu araca ait şematik diyagram Şekil 8.3’ de verilmiştir.

8.1.1 Taşıt Karakteristikleri

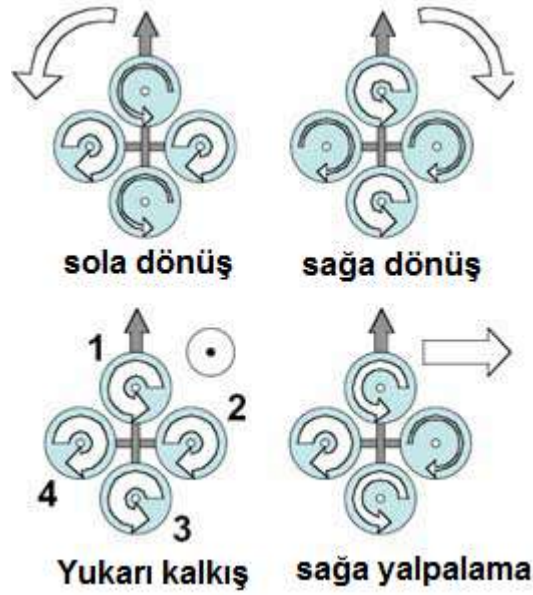


Şekil 8. 3 “Quadrotor” un şematik gösterimi.

Bir quadrotor mekanizması, birbirine dik ve eşit uzunluklarda iki, çubuğun birbirine dik ve ortalanmış olarak birleştirilip, çubukların boşta kalan uçlarına motor ve pervanelerin takılması ile oluşturulur. Şekil 8.3 de serbest cisim diyagramı verilen quadrotor modelinde, motorların oluşturduğu kaldırma kuvvetleri “F” ile gösterilmektedir. Yan yana bulunan motorların dönüş yönleri şekilde de görüldüğü gibi farklıdır. Bunun sebebi motorların dönmesi ile oluşacak zıt torkun, “quadrotor”un kendi etrafında döndürmesini engellemek içindir. Bu etki, karşılıklı motorların dönüş yönlerini ters ayarlayarak da giderilebilir. İleriki bölümlerde modellenecek sistem ile ilgili bazı büyüklükler çizelge 8.1 de verilmektedir.

Çizelge 8. 1 “Quadrotor”a ait büyüklükler, [64].

X eksenindeki atalet momenti	J_x	$8,1.10^{-3} \text{ Nms}^2$
Y eksenindeki atalet momenti	J_y	$8,1.10^{-3} \text{ Nms}^2$
Z eksenindeki atalet momenti	J_z	$14,2.10^{-3} \text{ Nms}^2$
Rotor atalet momenti	J_r	$71,88.10^{-6} \text{ Nms}^2$
Toplam kütle	M_t	1 kg
Rotorların merkeze uzaklığı	ℓ	0,24 m
Pervane yarıçapı	R_p	155.10^{-3} m
İtme faktörü	b	$54,2.10^{-3} \text{ Ns}^2$
Sürüklenme faktörü	d	$1,1.10^{-3} \text{ Nms}^2$



Şekil 8. 4 Quadrotora ait bazı hareketlerin rotor hızına göre quadrotora etkisi, [61].

Şekil 8.4 de rotor hızlarının quadrotoru nasıl hareketlendirdiğine dair temsili bir gösterim verilmektedir. Buna göre 2 ve 4 numaralı motorların hızları eşit ve 1 ve 3 numaradan büyükse quadrotor kendi eksenini etrafında sola dönecektir ($-\psi^q$). Bunun tersi durumda ise sağa dönecektir ($+\psi^q$). Bütün rotorlar eşit hızda dönüyor ise quadrotor yukarı doğru hareketlenecektir ($+z$). Eğer 4. rotorun hızı 1. ve 3. rotorun hızından büyükse ve 1. ve 3. rotorun hızı da 2. rotorun hızından büyükse quadrotor sağa doğru yalpalama hareketi yapacak ve quadrotor sağa doğru hareket edecektir, ($-\phi^q, -y$). Eğer 3. rotorun hızı 2. ve 4. rotorun hızından büyükse ve 2. ve 4. rotorun hızı da 1. rotorun hızından büyükse quadrotor öne doğru yunuslama hareketi yapacak dolayısıyla da öne hareketlenecektir, ($+\theta^q, +x$).

8.1.2 Taşıtın Dinamik Modelinin Oluşturulması

Uzaysal hareket eden taşıtlardan özellikle havada serbest hareket eden helikopter ve benzeri mekanizmalar aerodinamik, atalet, yerçekimi, jiroskobik kuvvetler ve sürtünme gibi çeşitli fiziksel etkilere maruz kalmaktadır. Bu etkilerden bazıları modelleme yapılırken ihmal edilmiştir. Modellemede kullanılan varsayımlar aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

- Öteleme hareketinde gövde momentleri ihmal edilmiştir.
- Yer etkisi ihmal edilmiştir.
- Pervane bıçaklarının esnemesi ihmal edilmiştir.

- Sürtünme, sadece quadrotor z eksenini etrafında dönerken ihmal edilmemiştir.
- Konstrüksiyon rijit ve simetrik olarak kabul edilmiştir.
- İtme kuvveti ve sürüklenme momenti, pervane hızlarının karesiyle orantılı olarak kabul edilmiştir.

Yukarıda bahsedilen varsayımlardan yer etkisi, aracın yere yaklaşması ile birlikte aracın kaldırma kuvvetinin artması olarak tanımlanabilir. Bu etki kendisini kabaca pervane çapının yarısı kadar yaklaştığı zaman gösterir. Bu durum zeminin engebeliğine ve rotorun hava akış biçimine bağlı olmakla birlikte zemine yaklaşıldıkça daha belirginleşir. Yer etkisi altında artan kanatçık verimliliği aerodinamik bir olaya dayanır.

Bu olay indüklenen hava akım hızının azalmasıdır. Araç yere yaklaşınca zeminden yere doğru akan hava akımını keser ve tüm akış değişir. Bu indüklenen hava akışının aşağı doğru olan hızını düşürür. Sonuç olarak sürüklenme kuvveti azalır ve dikey kaldırma kuvveti artar. Bu durumda havada asılı kalma kanatçıkların hücum açısının azaltılması yada rotor gücünün azaltılması ile mümkün olabilir, [62-63].

Dinamik model oluşturulurken Newton-Euler yöntemi kullanılmıştır, [61]. Harici kuvvet etkisi altında bulunan şekil 8.3 de verilen sisteme ait dinamik eşitlik Newton-Euler formülasyonuna göre denklem 8.1 de verildiği gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_t \cdot \mathbf{I}_b & 0 \\ 0 & \mathbf{J}_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\vec{V}}^q \\ \dot{\vec{\omega}}^q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \vec{\omega}^q \times \mathbf{M}_t \cdot \vec{V}^q \\ \vec{\omega}^q \times \mathbf{J}_q \cdot \vec{\omega}^q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{F}^q \\ \vec{\tau}^q \end{bmatrix} \quad (8.1)$$

Denklem 8.1’de “ $\mathbf{I}_b$ ” 3x3 birim matrisi ifade etmektedir. “ $\mathbf{J}_q$ ” quadrotor kütle atalet momentini gösterir ve “ J_x, J_y, J_z ” den oluşan 3x3’lük bir matristir. Şekil 8.3 de Quadrotora ait koordinat düzlemi “B” üst indisi ile, yere sabitlenen ana eksen takımı ise “E” üst indisi ile gösterilecektir. Denklem 8.1 de “ $\vec{V}^q$ ” quadrotorun doğrusal hızını, “ $\vec{\omega}^q$ ” ise açısal hızını ifade etmektedir. Ayrıca “ $\vec{F}^q$ ” kuvvetleri ve “ $\vec{\tau}^q$ ” da momentleri ifade etmektedir.

“ q ” quadrotorun doğrusal konumunu, “ $\vec{V}^q$ ” quadrotorun doğrusal hızını göstermek üzere 8.2 deki dinamik bağıntılar yazılabilir.

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_t \cdot \dot{\vec{V}}^q &= \mathbf{R}_q \cdot \vec{F}^q \\ \mathbf{J}_q \cdot \dot{\vec{\omega}}^q &= -\vec{\omega}^q \times \mathbf{J}_q \vec{\omega}^q + \vec{\tau}^q \end{aligned} \quad (8.2)$$

Dinamik denklem takımı 8.2 de “ $\mathbf{R}_q$ ” rotasyon matrisini ifade etmektedir. Açık ifadesi 8.3 deki eşitlikte gösterilmektedir. Denklem 8.2.4 de verilen vektörel çarpım “ $-\vec{\omega}^q \times \mathbf{J}_q \vec{\omega}^q$ ” ifadesi quadrotor gövdesinin açısal hareketinden kaynaklanan jiroskobik kuvvetleri ifade etmektedir.

$$\mathbf{R}_q = \begin{bmatrix} C_\psi C_\theta & C_\psi S_\theta S_\phi - S_\psi C_\phi & C_\psi S_\theta C_\phi + S_\psi S_\phi \\ S_\psi C_\theta & S_\psi S_\theta S_\phi + C_\psi C_\phi & S_\psi S_\theta C_\phi - C_\psi S_\phi \\ -S_\theta & C_\theta S_\phi & C_\theta C_\phi \end{bmatrix} \quad (8.3)$$

Şekil 8.3 ve denklem 8.3 de geçen “ ϕ^q ” x eksenindeki dönmeyi, “ θ^q ” y eksenindeki dönmeyi, “ ψ^q ” ise z eksenindeki dönmeyi ifade etmektedir.

Sisteme etki eden kuvvetler ana eksen takımına göre 8.4 denklemi ile ifade edilebilir.

$$\mathbf{R}_q \cdot \vec{F}^q = -M_t \cdot g \cdot \vec{e}_3 + \vec{R}_{E3} \left(\sum_1^4 b \cdot \Omega_i^2 \right) \quad (8.4)$$

8.4 denkleminde verilen “ $\vec{e}_3$ ” ifadesi ana eksen takımının üçüncü eksen olan “Z” ekseninin birim vektörünü ifade etmektedir. “ $\vec{R}_{E3}$ ” ise rotasyon matrisinin üçüncü sütununu ifade eder. Bunun sebebi ise motorların oluşturduğu itme kuvvetlerinin quadrotor eksen takımına göre “z” ekseninde olması ve ana eksen takımına geçilirken rotasyon matrisinin son sütunu ile çarpılması gerekliliğindendir. Ayrıca denklemde verilen “ Ω_i ” ifadesi her bir rotorun açısal hızını, “i” indisi ise motor numarasını ifade eder. Bu durumda 8.4 denklemi daha açık bir ifadeyle (8.5) de verildiği gibi gösterilebilir.

$$\mathbf{R}_q \cdot \vec{F}^q = -M_t \cdot g \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_{13} \\ r_{23} \\ r_{33} \end{bmatrix} \left(\sum_1^4 b \cdot \Omega_i^2 \right) = \begin{bmatrix} (C\psi^q S\theta^q C\phi^q + S\psi^q S\phi^q) \cdot \sum_1^4 b \Omega_i^2 \\ (S\psi^q S\theta^q C\phi^q - C\psi^q S\phi^q) \cdot \sum_1^4 b \Omega_i^2 \\ (C\theta^q C\phi^q) \cdot \sum_1^4 b \Omega_i^2 - M_t g \end{bmatrix} \quad (8.5)$$

Denklem 8.2 deki kuvvet eşitliğinden toplam kütle çekilirse 8.6 eşitliği elde edilir.

$$\dot{\vec{V}}^q = \frac{\mathbf{R}_q \cdot \vec{F}^q}{M_t} \quad (8.6)$$

Denklem 8.5 ve 8.6 birleştirilirse 8.7 de verilen durum denklemi ortaya çıkar.

$$\dot{\vec{V}}^q = \begin{bmatrix} \dot{V}_x \\ \dot{V}_y \\ \dot{V}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (C\psi^q S\theta^q C\phi^q + S\psi^q S\phi^q) \cdot \sum_{i=1}^4 \frac{b}{M_t} \Omega_i^2 \\ (S\psi^q S\theta^q C\phi^q - C\psi^q S\phi^q) \cdot \sum_{i=1}^4 \frac{b}{M_t} \Omega_i^2 \\ (C\theta^q C\phi^q) \cdot \sum_{i=1}^4 \frac{b}{M_t} \Omega_i^2 - g \end{bmatrix} \quad (8.7)$$

Sisteme etki eden momentler ise denklem (8.8) da verildiği gibi ifade edilebilir.

$$\vec{\tau}^q = -\sum_{i=1}^4 J_R (\vec{\omega}^q \times \vec{e}_3) \Omega_i + \vec{\tau}_c \quad (8.8)$$

Quadrotor gövdesi açısal bir yer değiştirme gerçekleştirdiğinde doğal olarak motorlar da açısal olarak yer değiştirme gerçekleştirecektir. Denklem 8.8 da verilen vektörel çarpım “ $\vec{\omega}^q \times \vec{e}_3$ ” ifadesi bu yer değiştirme bağlantısından kaynaklanan gövde açısal hızlarının motor açısal hızlarına etkisini göstermektedir. Bu çarpımın açık ifadesi 8.9 da verilmektedir.

$$\vec{\omega}^q = \begin{bmatrix} \dot{\phi}^q \\ \dot{\theta}^q \\ \dot{\psi}^q \end{bmatrix}, \vec{e}_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8.9)$$

$$\vec{\omega}^q \times \vec{e}_3 = \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ -\dot{\phi} \\ 0 \end{bmatrix}$$

Denklem 8.9 da verilen çarpım vektörünün son satırının “0” çıkması quadrotorun “z” eksenini etrafında dönmesi rotorların hız farklarından kaynaklanması sebebiyle manidardır. Çünkü quadrotoru kendi eksenini etrafında döndüren momentin kaynağı şekil 8.4 de ifade edilen rotorların hız farkıdır. Ayrıca denklem 8.8 de verilen “ $J_R (\vec{\omega}^q \times \vec{e}_3) \Omega_i$ ” ifadesi rotorların quadrotor hareketinden kaynaklanan yer değiştirmesinden doğan jirokobik etkiyi göstermektedir. “ $\vec{\tau}_c$ ” ifadesi ise motorlar tarafından üretilen kontrol momentini ifade etmektedir. Bu durumda 8.8 denklemini daha açık bir ifadeyle 8.10 da verildiği gibi yazılabilir.

$$\vec{\tau}^q = \begin{bmatrix} -\sum_{i=1}^4 J_R \cdot \dot{\theta}^q \cdot \Omega_i \\ \sum_{i=1}^4 J_R \cdot \dot{\phi}^q \cdot \Omega_i \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tau_{cx} \\ \tau_{cy} \\ \tau_{cz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -J_R \cdot \dot{\theta}^q \sum_{i=1}^4 \Omega_i + \tau_{cx} \\ J_R \cdot \dot{\phi}^q \sum_{i=1}^4 \Omega_i + \tau_{cy} \\ \tau_{cz} \end{bmatrix} \quad (8.10)$$

Denklem 8.10 da görülen “ $\sum_{i=1}^4 \Omega_i$ ” ifadesi rotorlara ait toplam hızları ifade eder ki dönüş yönleri de göz önüne alındığı takdirde açık ifadesi denklem 8.11 de verilmiştir.

$$\Omega_t = \sum_{i=1}^4 \Omega_i = -\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4 \quad (8.11)$$

Denklem 8.11 den sistem havada asılı dururken “ Ω_t ” ifadesinin değeri sıfır veya sıfıra çok yakın olmalıdır. “x” veya “y” ekseninde yapılacak herhangi bir açısal hareket bu ifadenin değerini değiştirecek ve denklem 8.10 dan da görüleceği gibi jiroskobik kuvvetlerin oluşmasına sebep olacaktır. Denklem 8.10 da verilen kontrol moment giriş değerleri ise motor itme kuvvetlerinin itme faktörü ve moment kolu olan çubukların çarpılması ile bulunabilir.

$$\begin{aligned} \tau_{cx} &= \ell.b.(\Omega_4^2 - \Omega_2^2) \\ \tau_{cy} &= \ell.b.(\Omega_3^2 - \Omega_1^2) \\ \tau_{cz} &= d.(\Omega_4^2 + \Omega_2^2 - \Omega_1^2 - \Omega_3^2) \end{aligned} \quad (8.12)$$

Denklem 8.12 de geçen itme faktörü “b”, pervanelerin itme kuvvetlerinin hesaplanması için gerekli bir katsayıdır. Pervanelerin itme kuvvetleri aerodinamik bir kuvvet olup pervane dönüş hareketine dik ve yukarı doğrudur. Bu kuvvet, aracı havalandırmak için sürüklenme kuvvetini ve ağırlıkları yenmek durumundadır. Sürüklenme momenti de pervanenin hareketinin aerodinamik etkisinden kaynaklanan ve rotor milinin dönme yönüne ters olan bir momenttir. İtme kuvveti ve sürüklenme momentinin hesaplanması için birkaç yaklaşım mevcuttur, [64]. Bu çalışmada bu kuvvet ve momentlerin rotor hızlarının karesiyle doğru orantılı olduğu ve itme kuvveti ile rotor hızlarının oranının itme faktörü “b” kadar olduğu, sürüklenme momentin ile rotor hızlarının oranının sürüklenme faktörü “d” kadar olduğu varsayılacaktır. Kontrol momentleri de denklem 8.10 da yerlerine yazılırsa, denklem 8.13 elde edilir.

$$\bar{\tau}^q = \begin{bmatrix} -J_R \dot{\theta}^q \Omega_t + \ell.b.(\Omega_4^2 - \Omega_2^2) \\ J_R \dot{\phi}^q \Omega_t + \ell.b.(\Omega_3^2 - \Omega_1^2) \\ d.(\Omega_4^2 + \Omega_2^2 - \Omega_1^2 - \Omega_3^2) \end{bmatrix} \quad (8.13)$$

Denklem 8.13 de verilen “ $\bar{\tau}^q$ ” ifadesi denklem 8.2 de yerine yazılırsa denklem 8.14 elde edilir.

$$J_q \dot{\vec{\omega}}^q = J_q \cdot \begin{bmatrix} \ddot{\phi}^q \\ \ddot{\theta}^q \\ \ddot{\psi}^q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_x \ddot{\phi}^q \\ J_y \ddot{\theta}^q \\ J_z \ddot{\psi}^q \end{bmatrix} = -\vec{\omega}^q \times J_q \vec{\omega}^q + \begin{bmatrix} -J_R \dot{\theta}^q \Omega_t + \ell.b.(\Omega_4^2 - \Omega_2^2) \\ J_R \dot{\phi}^q \Omega_t + \ell.b.(\Omega_3^2 - \Omega_1^2) \\ d.(\Omega_4^2 + \Omega_2^2 - \Omega_1^2 - \Omega_3^2) \end{bmatrix} \quad (8.14)$$

Denklem 8.14 de verilen ve quadrotor gövdesinin açılal hareketlerinden oluşlan jiroskobik kuvvetleri ifade etmekte kullanılan “ $-\vec{\omega}^q \times J_q \vec{\omega}^q$ ” ifadesi 8.15 de gösterildiğı gibi hesaplanabilir.

$$J_q \vec{\omega}^q = \begin{bmatrix} J_x & 0 & 0 \\ 0 & J_y & 0 \\ 0 & 0 & J_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\phi}^q \\ \dot{\theta}^q \\ \dot{\psi}^q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_x \dot{\phi}^q \\ J_y \dot{\theta}^q \\ J_z \dot{\psi}^q \end{bmatrix} \quad (8.15)$$

$$-\vec{\omega}^q \times J_q \vec{\omega}^q = \begin{bmatrix} -\dot{\phi}^q \\ -\dot{\theta}^q \\ -\dot{\psi}^q \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} J_x \dot{\phi}^q \\ J_y \dot{\theta}^q \\ J_z \dot{\psi}^q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}^q \dot{\psi}^q (J_y - J_z) \\ \dot{\phi}^q \dot{\psi}^q (J_z - J_x) \\ \dot{\theta}^q \dot{\phi}^q (J_x - J_y) \end{bmatrix}$$

Bu durumda 8.14 denkleminin açık hali 8.16’daki gibi verilebilir.

$$\begin{bmatrix} J_x \ddot{\phi}^q \\ J_y \ddot{\theta}^q \\ J_z \ddot{\psi}^q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}^q \dot{\psi}^q (J_y - J_z) \\ \dot{\phi}^q \dot{\psi}^q (J_z - J_x) \\ \dot{\theta}^q \dot{\phi}^q (J_x - J_y) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -J_R \dot{\theta}^q \Omega_t + \ell.b.(\Omega_4^2 - \Omega_2^2) \\ J_R \dot{\phi}^q \Omega_t + \ell.b.(\Omega_3^2 - \Omega_1^2) \\ d.(\Omega_4^2 + \Omega_2^2 - \Omega_1^2 - \Omega_3^2) \end{bmatrix} \quad (8.16)$$

Denklem 8.16 daki açılal ivmeler denklemin sol tarafında kalacak şekilde yalnız bırakıldığında 8.16 denklemi 8.17 haline gelir.

$$\begin{bmatrix} \ddot{\phi}^q \\ \ddot{\theta}^q \\ \ddot{\psi}^q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}^q \dot{\psi}^q \left(\frac{J_y - J_z}{J_x} \right) - \frac{J_R}{J_x} \dot{\theta}^q \Omega_t + \frac{\ell.b.}{J_x} .(\Omega_4^2 - \Omega_2^2) \\ \dot{\phi}^q \dot{\psi}^q \left(\frac{J_z - J_x}{J_y} \right) + \frac{J_R}{J_y} \dot{\phi}^q \Omega_t + \frac{\ell.b.}{J_y} .(\Omega_3^2 - \Omega_1^2) \\ \dot{\theta}^q \dot{\phi}^q \left(\frac{J_x - J_y}{J_z} \right) + \frac{d}{J_z} .(\Omega_4^2 + \Omega_2^2 - \Omega_1^2 - \Omega_3^2) \end{bmatrix} \quad (8.17)$$

Denklem 8.7 de verilen denklemlerle birlikte denklem 8.17 de verilen eşitlikler sistemin 6 hareketini de ifade eden doğrusal olmayan dinamik denklemlerdir.

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \dot{v}_x \\ \dot{v}_y \\ \dot{v}_z \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} (C\psi^q S\theta^q C\phi^q + S\psi^q S\phi^q) \cdot \sum_1^4 \frac{b}{M_t} \Omega_i^2 \\ (S\psi^q S\theta^q C\phi^q - C\psi^q S\phi^q) \cdot \sum_1^4 \frac{b}{M_t} \Omega_i^2 \\ (C\theta^q C\phi^q) \cdot \sum_1^4 \frac{b}{M_t} \Omega_i^2 - g \end{bmatrix} \\
\begin{bmatrix} \ddot{\phi}^q \\ \ddot{\theta}^q \\ \ddot{\psi}^q \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \dot{\theta}^q \dot{\psi}^q \left(\frac{I_y - I_z}{I_x} \right) - \frac{J_R}{I_x} \dot{\theta}^q \Omega_t + \frac{\ell \cdot b}{I_x} \cdot (\Omega_4^2 - \Omega_2^2) \\ \dot{\phi}^q \dot{\psi}^q \left(\frac{I_z - I_x}{I_y} \right) + \frac{J_R}{I_y} \dot{\phi}^q \Omega_t + \frac{\ell \cdot b}{I_y} \cdot (\Omega_3^2 - \Omega_1^2) \\ \dot{\theta}^q \dot{\phi}^q \left(\frac{I_x - I_y}{I_z} \right) + \frac{d}{I_z} \cdot (\Omega_4^2 + \Omega_2^2 - \Omega_1^2 - \Omega_3^2) \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{8.18}$$

Denklem 8.18 ile modellenen quadrotor hava aracı rüzgar gibi dış kuvvetlere de maruz kalacaktır. Rüzgar kuvvetinin quadrotoru ağırlık merkezinden etkilediği ve quadrotora herhangi bir moment etkisinin olmadığı varsayılırsa “ $\vec{F}_R^q$ ” ile ifade edilen bu dış kuvvet modele 8.20’de de gösterildiği gibi dahil edilebilir. Ayrıca hava direncinin dinamik modele eklenmesi de mümkündür. Quadrotor hızının yüksek olduğu iki eksen olan “x” ve “y” eksenlerinde hava direncinin olduğu kabul edilirse 8.19’ da verilen Rayleigh denkleminde quadrotora etki eden hava direnci hesaplanabilir, [65].

$$F_h = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \dot{v}^2 \cdot A_k \cdot C_a \tag{8.19}$$

Bu denklemde “ ρ ” havanın yoğunluğunu, “ A_k ” hava içinde hareket eden taşıtın hareket yönüne göre izdüşüm alanını, “ C_a ” ise taşıt ile hava arasındaki aerodinamik katsayıyı ifade etmektedir.

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \dot{v}_x \\ \dot{v}_y \\ \dot{v}_z \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} (C\psi^q S\theta^q C\phi^q + S\psi^q S\phi^q) \cdot \sum_1^4 \frac{b}{M_t} \Omega_i^2 + \frac{F_{Rx}^q}{M_t} + \frac{F_{hx}}{M_t} \\ (S\psi^q S\theta^q C\phi^q - C\psi^q S\phi^q) \cdot \sum_1^4 \frac{b}{M_t} \Omega_i^2 + \frac{F_{Ry}^q}{M_t} + \frac{F_{hy}}{M_t} \\ (C\theta^q C\phi^q) \cdot \sum_1^4 \frac{b}{M_t} \Omega_i^2 - g + \frac{F_{Rz}^q}{M_t} \end{bmatrix} \\
\begin{bmatrix} \ddot{\phi}^q \\ \ddot{\theta}^q \\ \ddot{\psi}^q \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \dot{\theta}^q \dot{\psi}^q \left(\frac{I_y - I_z}{I_x} \right) - \frac{J_R}{I_x} \dot{\theta}^q \Omega_t + \frac{\ell \cdot b}{I_x} \cdot (\Omega_4^2 - \Omega_2^2) \\ \dot{\phi}^q \dot{\psi}^q \left(\frac{I_z - I_x}{I_y} \right) + \frac{J_R}{I_y} \dot{\phi}^q \Omega_t + \frac{\ell \cdot b}{I_y} \cdot (\Omega_3^2 - \Omega_1^2) \\ \dot{\theta}^q \dot{\phi}^q \left(\frac{I_x - I_y}{I_z} \right) + \frac{d}{I_z} \cdot (\Omega_4^2 + \Omega_2^2 - \Omega_1^2 - \Omega_3^2) \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{8.20}$$

8.1.3 Taşıtın Konum Kontrolü

Önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere quadrotor mekanizması 6 serbestlik derecesine sahip 4 kontrol girişi bulunan bir sistemdir. Mekanizmanın hareketleri incelendiğinde (Şekil 8.4) aracın “x” ve “y” eksenlerindeki hareketi “ ϕ^q ” ve “ θ^q ” açılarına bağlıdır. Araç eğer otonom olarak kontrol edilmek isteniyorsa bu iki eksen için de denetleyici tasarlanmalıdır. Bu çalışmada amaç aracın SPM ile manipülasyonu olduğu için sadece “ $\phi^q, \theta^q, \psi^q, z$ ” eksenleri için denetleyici tasarlanmıştır.

Taşıtın konum kontrolü rotorların hızlarını kontrol etmekle mümkün olduğu için 4 adet kontrol girişi mevcuttur. Denetleyici girişi konum/açı hatası “e” ve denetleyici çıkışı da açısal hız olmak üzere her bir eksenin konum kontrolü için bir PID denetleyici denklem 8.21-22-23-24 deki gibi tasarlanabilir.

$$\Omega_{cz} = kp_z \cdot e_z + kd_z \cdot \dot{e}_z + ki_z \cdot \int e_z \tag{8.21}$$

$$\Omega_{c\phi} = kp_\phi \cdot e_\phi + kd_\phi \cdot \dot{e}_\phi + ki_\phi \cdot \int e_\phi \tag{8.22}$$

$$\Omega_{c\theta} = kp_\theta \cdot e_\theta + kd_\theta \cdot \dot{e}_\theta + ki_\theta \cdot \int e_\theta \tag{8.23}$$

$$\Omega_{c\psi} = kp_\psi \cdot e_\psi + kd_\psi \cdot \dot{e}_\psi + ki_\psi \cdot \int e_\psi \tag{8.24}$$

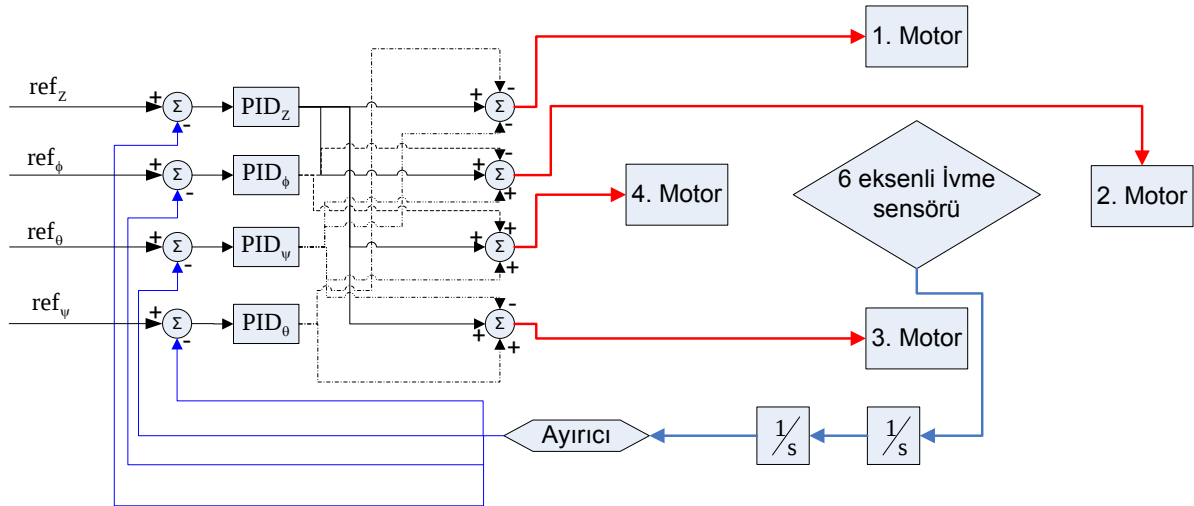
Quadrotorun “z” eksenindeki kontrolünde bütün motorlar eşit şekilde katkıda bulunduğu için her motorun açısal hızına bu eksenin denetleyicisinin katkısı olan “ Ω_{cz} ” ilave edilmelidir.

Aracın “ ϕ^q ” eksenindeki hareketinde 2 ve 4 numaralı motorlar etkili olduğu için hareket yönü itibariyle 2. motorun açısal hızından “ $\Omega_{c\phi}$ ” denetleyici katkısı çıkarılır, 4. motorun açısal hızına ilave edilir. Aynı şekilde aracın “ θ^q ” eksenindeki hareketinde 1 ve 3 numaralı motorlar etkili olduğu için hareket yönü itibariyle 1. motorun açısal hızından “ $\Omega_{c\theta}$ ” denetleyici katkısı çıkarılır, 3. motorun açısal hızına ilave edilir. Aracın “ ψ^q ” eksenindeki hareketinde bütün motorlar etkilidir. Ancak hareket yönü dikkate alındığı takdirde bütün motorların açısal hızlarına eklenemez. Aynı yönde dönen 1 ve 3 numaralı motorun hızından “ $\Omega_{c\psi}$ ” denetleyici katkısı çıkarılırken 2 ve 4 numaralı motorun hızına ilave edilir ve denklem 8.25 deki motor hızları elde edilir.

$$\begin{aligned}\Omega_1 &= \Omega_{cz} - \Omega_{c\theta} - \Omega_{c\psi} \\ \Omega_2 &= \Omega_{cz} - \Omega_{c\phi} + \Omega_{c\psi} \\ \Omega_3 &= \Omega_{cz} + \Omega_{c\theta} - \Omega_{c\psi} \\ \Omega_4 &= \Omega_{cz} + \Omega_{c\phi} + \Omega_{c\psi}\end{aligned}\quad (8.25)$$

Simülasyon ve Katsayı Tespiti

Sistemin kontrollü simülasyonu matlab altında yazılan bir program vasıtası ile yapılmıştır (EK-F) . Simülasyon yapılırken 8.20 denkleminde verilen model ve 8.25 denkleminde verilen denetleyici ayırık olarak hesaplanmıştır. Simülasyonun blok diyagram olarak gösterimi şekil 8.5 de verilmiştir.



Şekil 8. 5 Quadrotor simülasyonu blok diyagramı

Şekil 8.5 de verilen 6 eksenli ivme sensörü quadrotorun merkezine sabitlendiği ve varsayılan kontrol için gerekli geri beslemenin yapıldığı sanal yapıdır. Burada ve denetleyicilerde

kullanılan türev ve integraller 0.01s örnekleme zamanı kullanılarak 7.13 ve 7.14 denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır.

Denetleyici katsayıları tespit edilirken rüzgar kuvvetinin etkisi ihmal edilmiştir. Sabit bir referans girdisi için ($z_r = 7\text{m}, \psi_r = 30^\circ, \phi_r = -10^\circ, \theta_r = 10^\circ$) denetleyici katsayıları çizelge 8.2 de verilen aralıklarla taranmıştır. Açılar kontrol eden denetleyicide integral kontrol kullanılmamıştır. Başlangıç ve son değerler ise bir seri simülasyonun ardından belirlenmiştir.

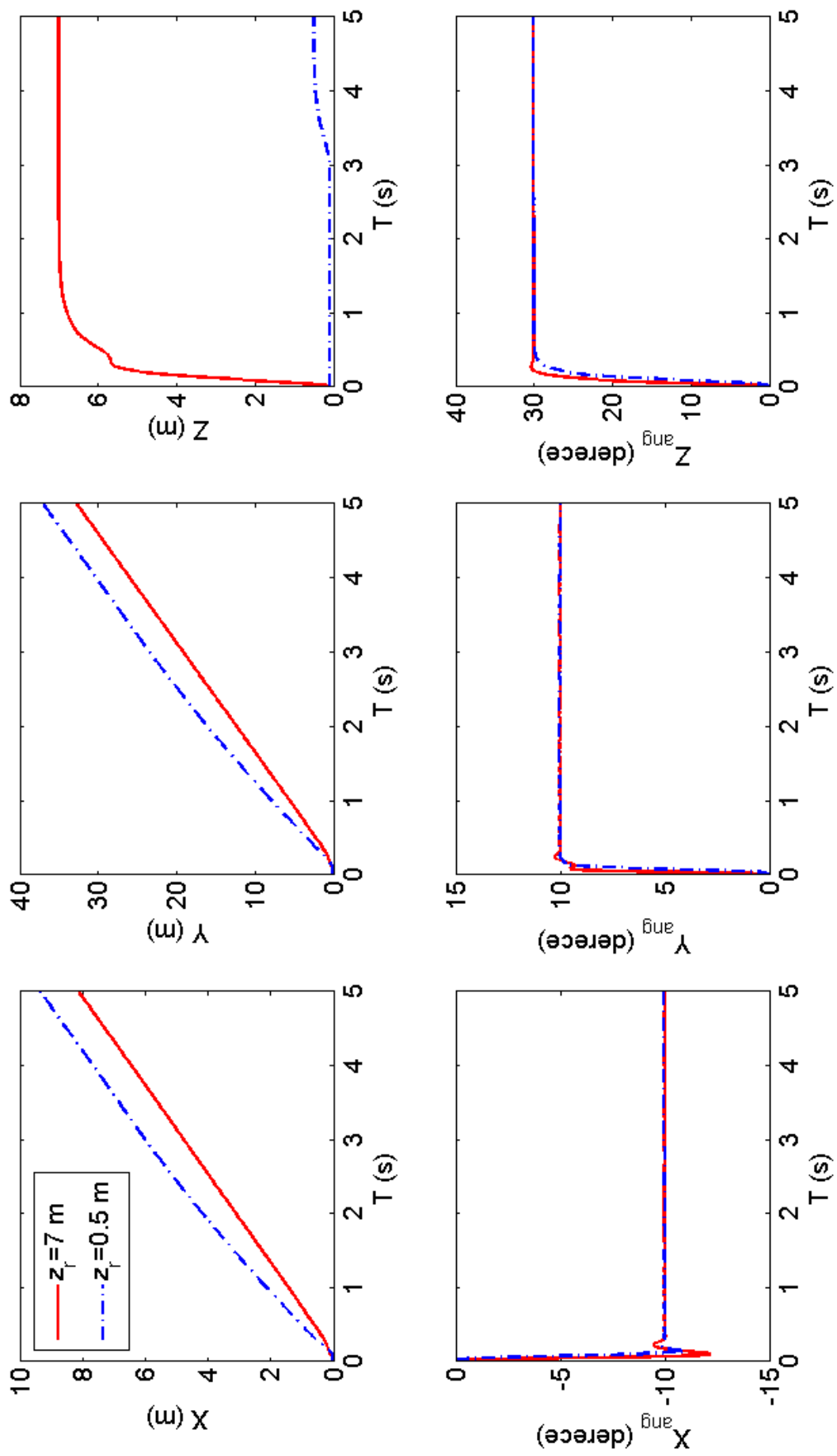
Çizelge 8. 2 Quadrotor denetleyici katsayılarının tespiti için koşturulan simülasyonlar serisinde denetleyici aralıkları ve artış değerleri

Katsayılar	Başlangıç değeri	Artış değeri	Son değer
kp_z	50	5	100
kd_z	0	10	100
ki_z	0	1	5
$kp_\phi, kp_\theta, kp_\psi$	0	1	5
$kd_\phi, kd_\theta, kd_\psi$	0	1	5

Simülasyonlar serisi tamamlandıktan sonra, kontrol edilecek 4 konum için en az üst aşımı, an çabuk oturma zamanını ve en az kararlı hal hatasını veren katsayılar tespit edilmiştir. Katsayıların dağılımı çizelge 8.3 de verilmektedir. Sistemi optimum bir şekilde kontrol etmek için bulunan katsayı değerlerinin ortalaması alınmış ve bu ortalama değerler kullanılmıştır. Katsayıların doğruluğunu kontrol için belirlenen optimum katsayılarla yapılan simülasyonlarda z eksenini için 1,2 m den daha az referans girişlerinde daha sistemin geç oturma zamanı verdiği gözlemlenmiştir. Başlangıçtaki hatanın az olması PID denetleyicinin çıkışının küçük olmasına bu da sistemin daha geç istenen referans noktasına gitmesine sebep olmaktadır. “ $z < 1,2\text{ m}$ ” ve “ $z > 1,2\text{ m}$ ” için belirlenen katsayılarla simülasyon cevabı şekil 8.6’ da verilmiştir.

Çizelge 8. 3 Optimum kontrolü sağlayan katsayı değerleri ($z > 1,2$ m)

	kp_z	kd_z	ki_z	$kp_\phi, kp_\theta, kp_\psi$	$kd_\phi, kd_\theta, kd_\psi$
z	50	50	20	1	2
ϕ^q	50	50	10	2	1
θ^q	50	50	10	2	1
ψ^q	50	50	10	5	1
Ortalama Katsayı değerleri	50	50	12.5	2.5	1.25

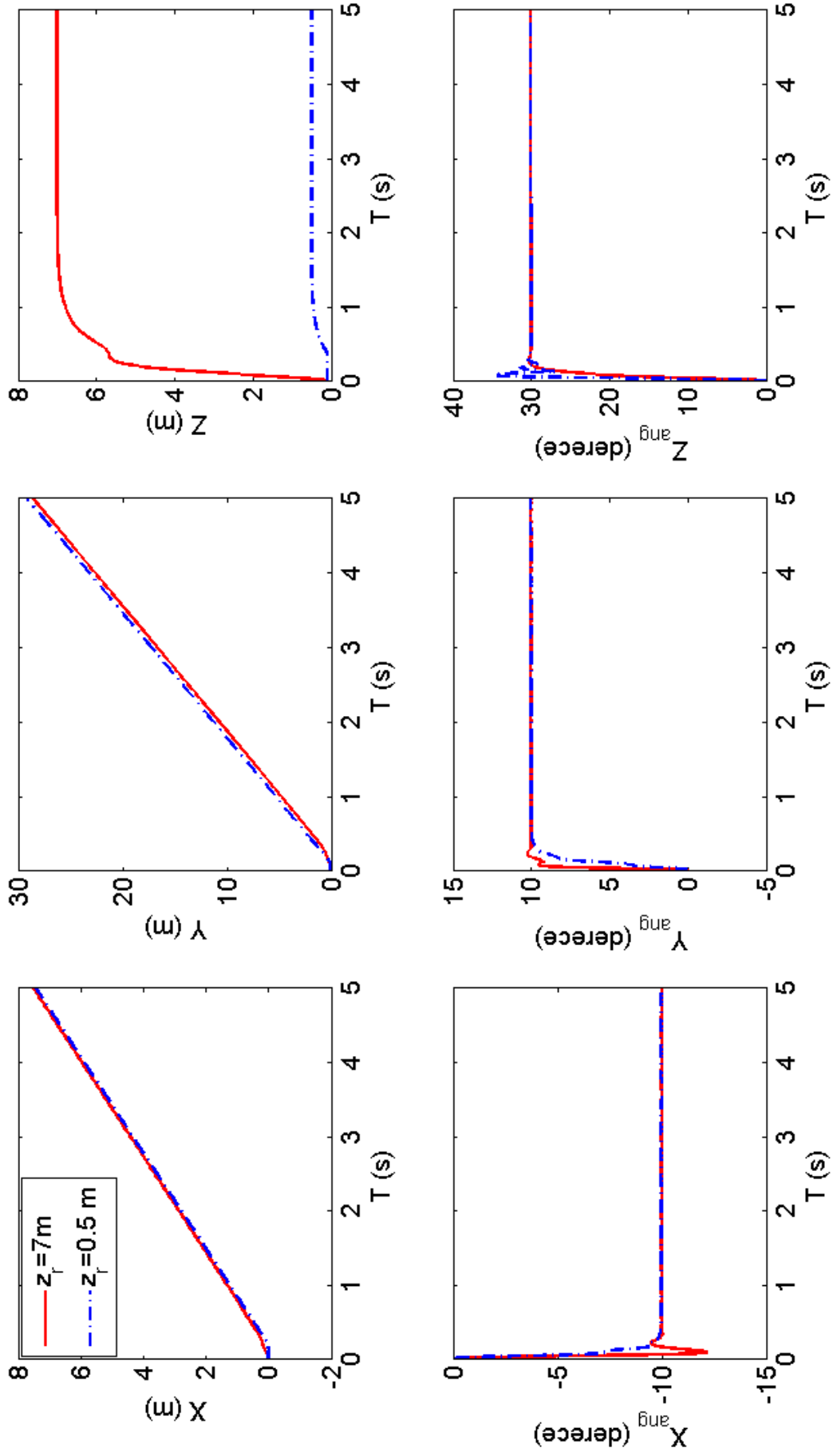


Şekil 8. 6 “ $z_r < 1,2$ m” ve “ $z_r > 1,2$ m” için quadrotor eksenlerinin konum grafikleri

Şekil 8.6 da verilen grafiklerden de anlaşılacağı üzere quadrotor mevcut denetleyici katsayılarıyla açısal konumu başarıyla kontrol etmesine karşın “z” ekseninde 0,12 m’lik seviyenin altında başarısız olmaktadır. Katsayı optimizasyon deneyi referans giriş olarak $z_r = 0,5\text{m}$, $\psi_r = 30^\circ$, $\phi_r = -10^\circ$, $\theta_r = 10^\circ$ değerleri ile tekrarlandığında çizelge 8.4 de verilen katsayı tablosu karşımıza çıkmaktadır. “ $z < 1,2\text{ m}$ ” için çizelge 8.3 deki değerler, “ $z > 1,2\text{ m}$ ” için çizelge 8.4 deki değerler kullanılırsa quadrotor konum kontrolü simülasyon cevapları şekil 8.7 de verildiği gibi olmaktadır.

Çizelge 8. 4 Optimum kontrolü sağlayan katsayı değerleri ($z < 1,2\text{ m}$)

	kp_z	kd_z	ki_z	$kp_\phi, kp_\theta, kp_\psi$	$kd_\phi, kd_\theta, kd_\psi$
z	225	75	75	1	3
ϕ^q	225	75	75	3	2
θ^q	225	75	75	3	2
ψ^q	225	75	75	2	1
Ortalama Katsayı değerleri	225	75	75	2,25	2

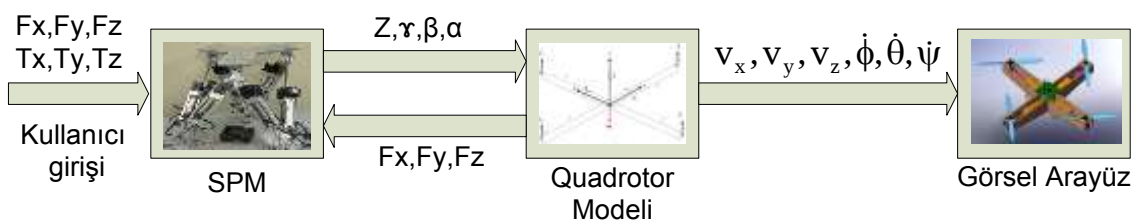


Şekil 8. 7 Optimize edilmiş katsayılarla " $z_r < 1,2\text{ m}$ " ve " $z_r > 1,2\text{ m}$ " için quadrotor eksenlerinin konum grafikleri

Şekil 8.7 de de görüldüğü gibi optimize edilen 2 tip katsayının ortak kullanılması sonucu 1,2 m'den daha az referanslı girişlerde dahi quadrotor denetleyicileri hızlı cevaplar vermektedir.

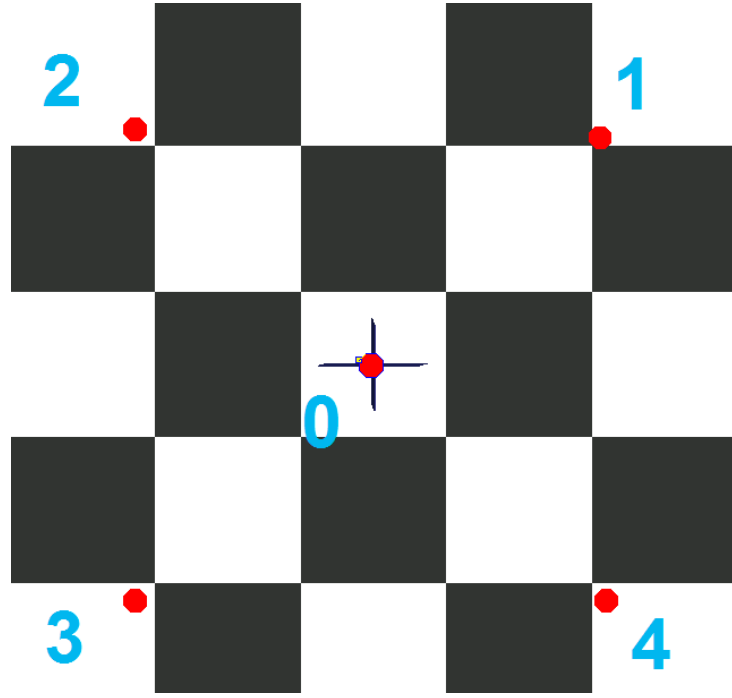
8.2 Kullanıcı Ara yüzünün Oluşturulması

Quadrotor kullanıcı arayüzü “Visual Basic 6.0” programı ve “3D Developer Studio” kütüphanesi kullanılarak hazırlanmıştır. Prensip olarak SPM’ nin YSA algoritması ile oluşturulmuş düz kinematik hesaplamalardan gelen 4 konum verisi quadrotor modelinin ilgili konum denetleyicilerine referans giriş olarak verilmektedir. Ayrıca quadrotor modelinden gelen kuvvet bilgileri de SPM’na geri beslenmekte ve böylece kullanıcı quadrotor modeline etkiyen sanal kuvvetleri elinde hissedebilmektedir. Görsel arayüz için de yukarıda bahsedilen “3D Developer Studio” kütüphanesi kullanılmıştır. Bu kısımda SPM’ na uygulanan denetleyicileri SPM’nın asıl amacı olan Quadrotor modelinin manipülasyonunda test etmektir. Bu yüzden gerekli testler için adı geçen kütüphane kullanılarak 3 boyutlu “sahneler” oluşturulmuştur. Ayrıca Quadrokopteri temsil etmek üzere oluşturulan sahnelerin içine çapraz iki çubuğun birleştirildiği bir nesne oluşturulmuştur. Kütüphane komutları adı geçen nesneyi dinamik olarak sahnenin içinde hareket ettirebilmesi için ilgili hız değerlerine ihtiyaç duyduğu için 8.20 denklemiyle ifade edilen ve Visual basic dilinde programa dökülen modelden quadrotorun 6 eksenine ait hız verileri görsel ara yüze aktarılmıştır. Şekil 8.8’de prosese ait blok diyagram görülmektedir.

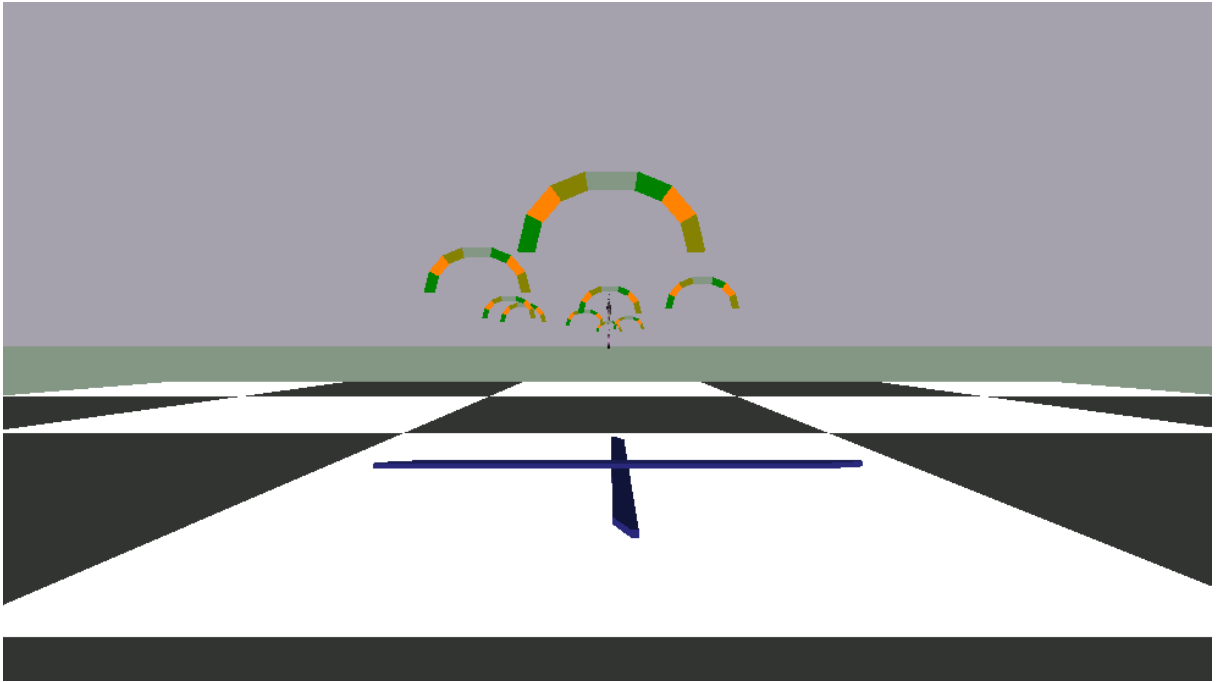


Şekil 8. 8 Stewart Platform Mekanizması, Quadrotor modeli ve görsel arayüz blok diyagramı

Şekil 8.8 de görülen sistemi test etmek için görsel ara yüzde 2 farklı sahne ve senaryo oluşturulmuştur. Oluşturulan 1. senaryo şekil 8.9 da görülmektedir. Bu şeklin merkezinde quadrotor bulunmaktadır. Senaryoya göre quadrotor kalkıştan sonra sırasıyla 1,2,3,4 ve tekrar 1 numaralı noktalardan geçmeli ve kapalı bir kare oluşturmalıdır. Burada performans faktörü en düzgün şekilde kareyi oluşturmaktır. Şekildeki kare 16x16 m’dir.



Şekil 8. 9 SPM & Quadrotor ara yüzünü test etmek için oluşturulmuş 1. göreve ait sahne



Şekil 8. 10 SPM & Quadrotor ara yüzünü test etmek için oluşturulmuş 2. göreve ait sahne

Şekil 8.10'da test için oluşturulmuş 2. senaryoya ait sahne görülmektedir. Bu görevde quadrotor kalkışını yaptıktan sonra şekle görülen kemerlerin içinden sırayla geçmek durumundadır. Kemerlerin genişliği 2 m' dir. Parkurda toplam 9 kemer ve sonda 1 adet bayrak direği olmak üzere toplam geçilmesi gereken 10 nokta vardır. Performans kriteri olarak quadrotor belirtilen noktaların ± 1 m yakınından geçtiğinde 1 puan alacaktır ve parkur

tamamlandığında toplam puan ne kadar fazla ise uygulamanın o derece başarılı olduğu anlaşılabacaktır. Bu parkur için geçilmesi gereken noktaların koordinatları çizelge 8.5 de verilmiştir.

Çizelge 8. 5 SPM & Quadrotor ara yüzünü test etmek için oluşturulmuş 2. parkura ait noktaların koordinatları

Nokta numarası	X (m)	Y (m)	Z (m)
P1	20	0	7
P2	40	-10	7
P3	60	10	7
P4	70	0	7
P5	85	-15	7
P6	100	-15	7
P7	120	-5	7
P8	150	5	7
P9	180	0	7
P10	200	0	7

8.3 SPM ile Taşıtın Kontrol Uygulamaları

Quadrotor hava taşıtının SPM ile kontrolünde bölüm 8.2 de bahsedilen iki farklı senaryo, 4 farklı manipülasyon yöntemi için, 3 farklı koşulda test edilmiştir. Toplamda 28 test yapılmıştır. Manipülasyon yöntemleri aşağıda sıralanmıştır.

- *SPM' nin düz kinematik yöntemi kullanılarak Quadrotorun manipülasyonu:* Bu yöntemde SPM' nin motorlarına güç verilmemiş ancak motor enkoderleri açık tutularak YSA yöntemi kullanılarak oluşturulan düz kinematik hesaplamalarla Quadrotora referans konum bilgisi gönderilmektedir. Ayrıca kuvvet sensörü de devre dışı bırakılmıştır. Bu yöntemde kullanıcı SPM' nin bütün ağırlığını atalet kuvvetlerini kendisi taşımak durumundadır.

- *SPM' nın katılık kuvvet kontrolü altındayken Quadrotorun manipülasyonu:* Bu yöntemde SPM önceki bölümlerde bahsedilen konum tabanlı katılık kuvvet kontrolü altındayken quadrotorun manipülasyonu hedef alınmıştır. Kuvvet sensörü devrede olmakla birlikte quadrotora girilen referans bilgisi düz kinematik yöntemle gönderilmektedir. Bu yöntemde katılık kontrolü kullanıcıya manipülasyon esnasında eşlik edeceğinde kullanıcının SPM' nın ağırlığını elinde hissetmemesi beklenmektedir.

- *SPM' nın empedans kuvvet kontrolü altındayken Quadrotorun manipülasyonu:* Bu yöntemde SPM konum tabanlı empedans kuvvet kontrolü altındayken quadrotorun manipülasyonu amaçlanmıştır. Kuvvet sensörü devrede olmakla birlikte katılık kontrolünde olduğu gibi quadrotor referans bilgisi YSA düz kinematik yöntemle elde edilmiştir. Bu yöntemde kullanıcı kuvvet geribeslemesi sebebiyle SPM' nın ağırlığını elinde hissetmemesi beklenmektedir.

- *SPM' nın doğrudan (explicit) kuvvet kontrolü altındayken Quadrotorun manipülasyonu :* Bu yöntemde SPM doğrudan (explicit) kuvvet kontrolü altındayken Quadrotor manipülasyonu hedeflenmiştir. Diğer yöntemlerde de olduğu gibi quadrotor referans bilgisi YSA düz kinematik yöntemle elde edilmektedir. Ancak bu yöntemde SPM kuvvet kontrolü kuvvet hatasına dayandığı için sistem boşta iken kuvvet hatasını "0" olarak gördüğü için denetleyici çıkışları da 0 olmakta, bu sebeple sistem boşta ike motorlar "0" konumuna hareketlenmektedir. Bu durumda kullanıcının tahrik ettiği mobil platformu hareket ettirebilmek için belirli bir yükseklikte tutması gerektiğinden "z" eksen yönünde sürekli bir kuvvet uygulaması gerekecektir.

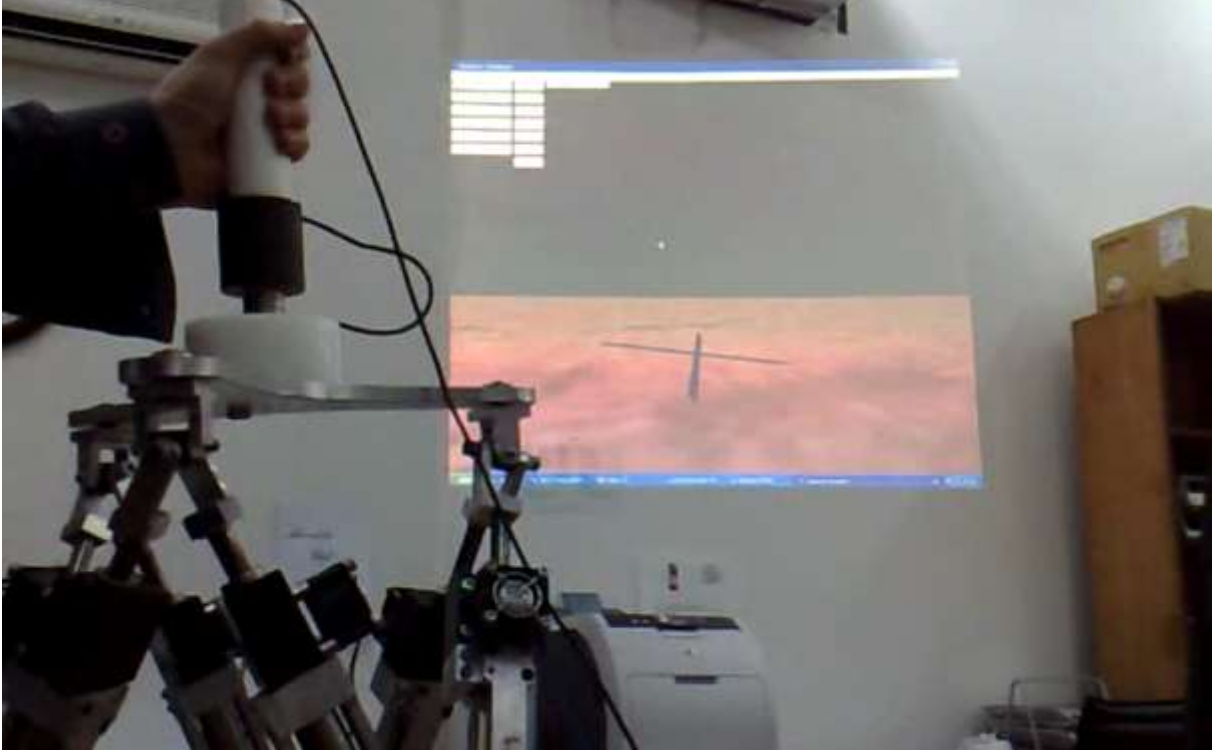
Yukarıda bahsedilen manipülasyon yöntemleri 3 farklı koşulda test edilmiştir. Bu koşullar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- *Quadrotora etkiyen bozucu harici kuvvetlerin ihmal edildiği durum:* Bu koşulda quadrotor üzerine rüzgar gibi herhangi bozucu bir kuvvetin etki etmediği varsayılmıştır.

- *Quadrotora etkiyen bozucu harici kuvvetlerin ihmal edilmediği ve SPM'na geri beslenmediği durum:* Bu koşulda quadrotor bozucu kuvvetlerin etkisi altındadır. Ancak SPM' na bu kuvvetler geri beslenmediği için kullanıcı bu kuvvetleri elinde hissetmeyecektir. Bozucu kuvvet girişi olarak "Quadrotor"a etkiyen rüzgar kuvvetleri Ek-H'da verilmektedir.

- *Quadrotora etkiyen bozucu harici kuvvetlerin ihmal edilmediği ve SPM'na geri beslendiği durum:* Bu koşulda bozucu kuvvetler SPM'na geri beslenmekte ve kullanıcı bu kuvvetleri elinde hissetmektedir.

Şekil 8.11 de SPM ve quadrotor kullanıcı arayüzü uygulaması verilmiştir.



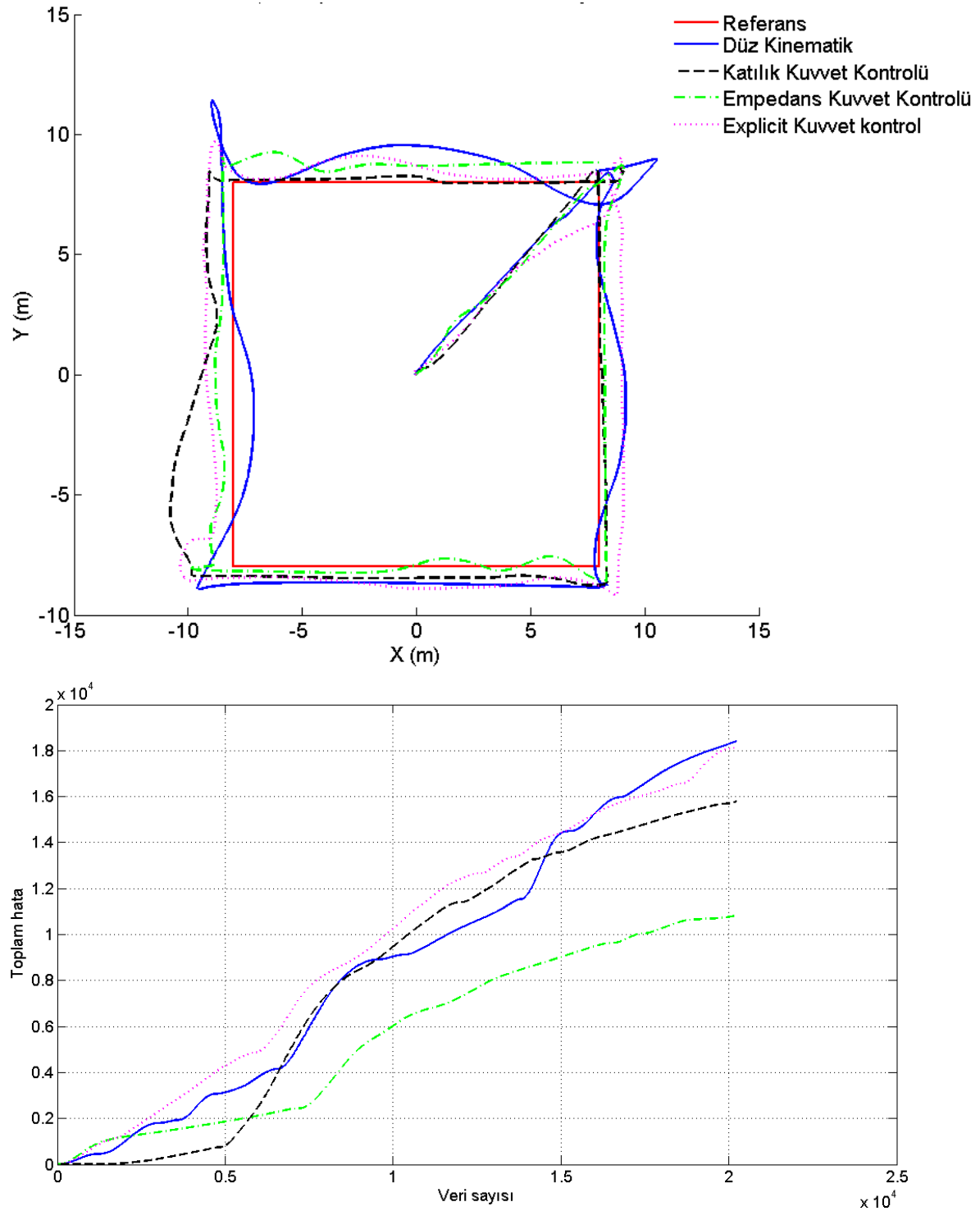
Şekil 8. 11 SPM ile Quadrotor Manipülasyonu Uygulaması

8.4 Uygulama Sonuçlarının İncelenmesi

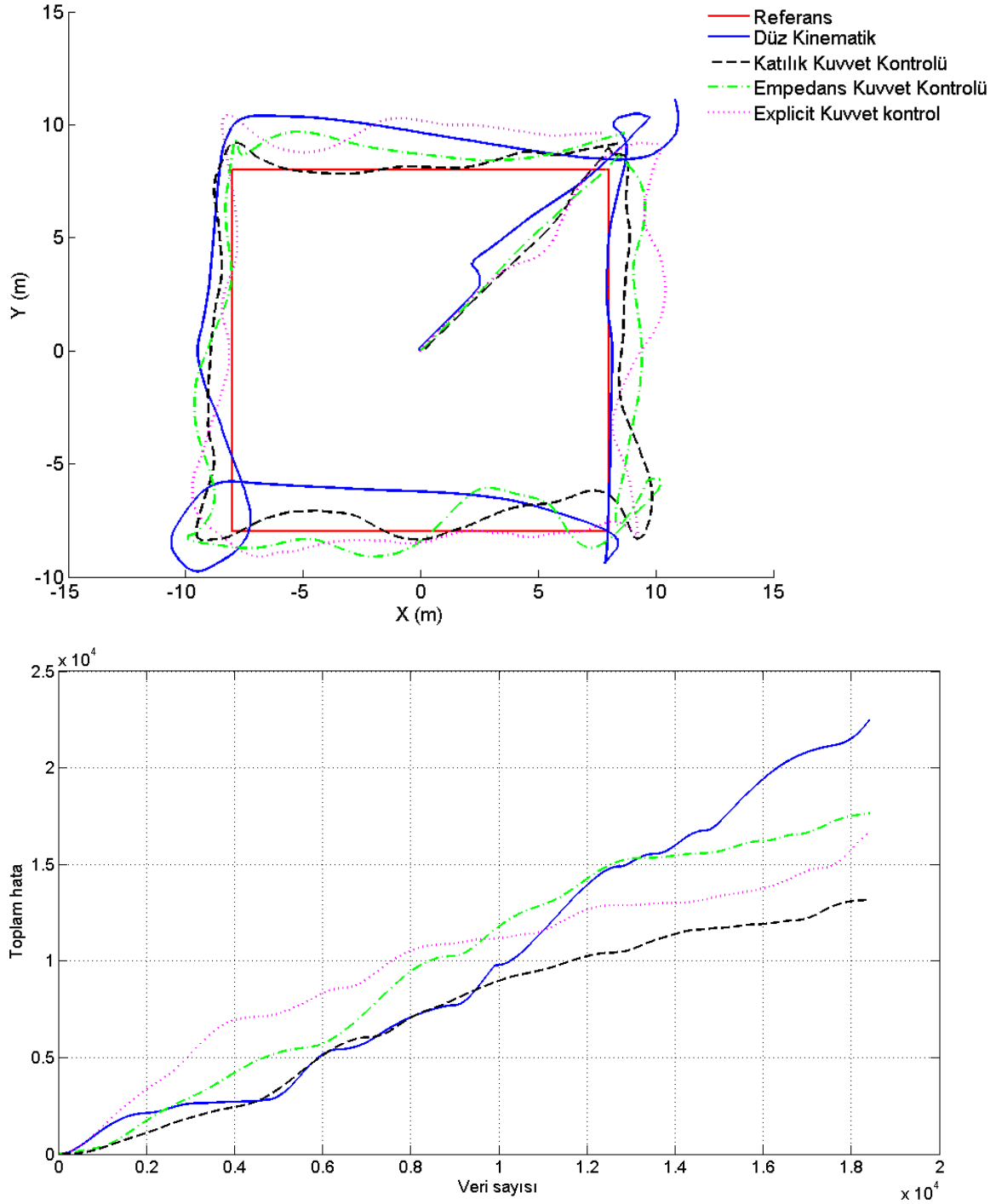
Bölüm 8.2 de ifade edilen senaryolardan birincisi olan kare parkur için uygulama sonuçları grafiksel olarak elde edilmiştir. Bölüm 8.3'te de ifade edildiği gibi 4 farklı kontrol yöntemi 3 koşul için test edilmiştir. Bu koşullardan ilki olan “quadrotora etkiyen harici bozucu kuvvetlerin etkisinin ihmal edilmesi” ile yapılan uygulamanın sonucu şekil 8.12 de görülmektedir.

Şekil 8.12'de sadece düz kinematik yöntemin kullanıldığı uygulamadaki referans yörüngeden sapmalar diğer yöntemlere göre daha fazla olduğu görülmektedir. Katılık kontrol, empedans kontrol ve doğrudan (explicit) kuvvet kontrolü birbirine yakın sonuç vermekle birlikte bunlardan katılık kontrollü sistemin quadrotora çizdirdiği yörünge daha düz ve kesindir. İstenilen yörüngeden sapma miktarları toplamı kullanılarak oluşturulan hata grafiğinde,

kuvvet kontrol yöntemlerinin performansları sırasıyla; empedans kuvvet kontrolü, katılık kuvvet kontrolü, doğrudan (explicit) kuvvet kontrolü ve düz kinematik yöntem olarak görülmektedir.



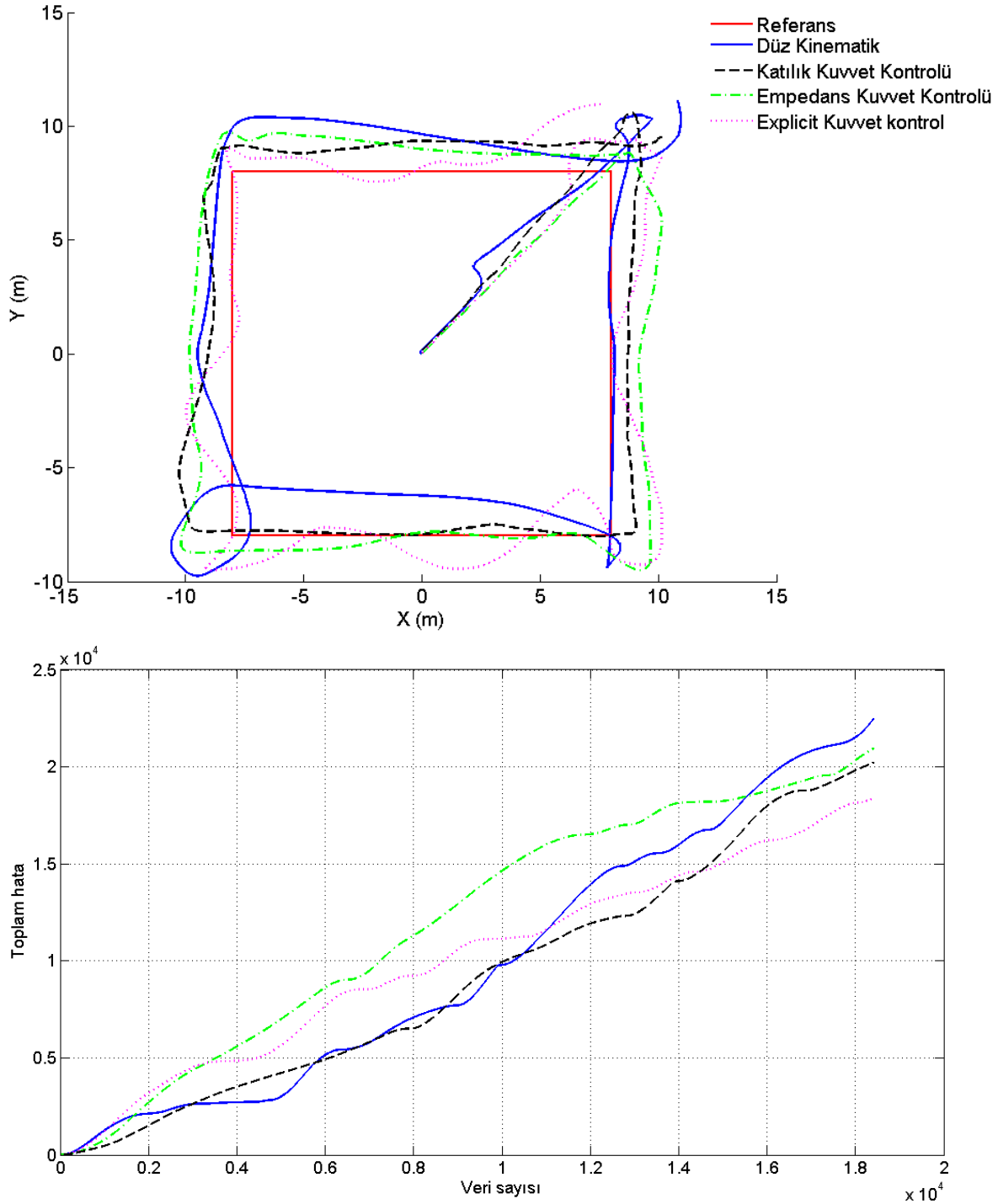
Şekil 8. 12 Quadrotora etkiyen bozucu harici kuvvetlerin ihmal edildiği durumda taşıtın SPM ile kontrolü, Kare çizdirme testi



Şekil 8. 13 Quadrotora etkiyen bozucu harici kuvvetlerin ihmal edilmediği ve SPM'na bu kuvvetlerin geri beslenmediği durumda taşıtın SPM ile kontrolü, Kare çizdirme testi

Şekil 8.13 de harici bozucu kuvvetlerin ki bu uygulamada bu rüzgârdır, quadrotoru etkilediği ancak SPM'na geri beslemesinin yapılmadığı duruma ait uygulama sonucu görülmektedir. Burada sadece kinematik yöntem ile yapılan manipülasyonun daha başarısız olduğu görülmektedir. Diğer kuvvet kontrol yöntemleri de birbirine benzer sonuçlar ortaya koymakla beraber bozucu kuvvetlerin etkisinin kontrolü zorlaştırdığı şekil 8.12 de verilen grafikte

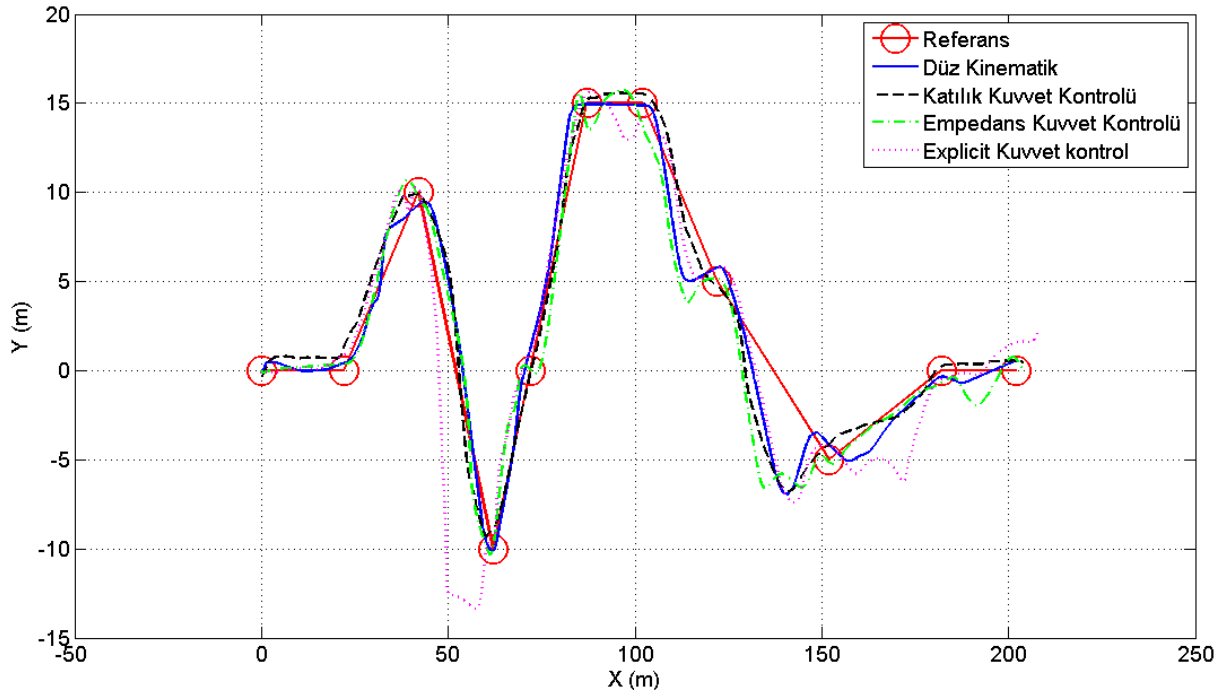
kiyaslandığında açıkça görülmektedir. Hata analizine bakıldığında ise en az sapmayı katılık kuvvet kontrolü sağlamış, bunu doğrudan (explicit) kuvvet kontrolü, empedans kuvvet kontrolü ve kinematik yöntem takip etmiştir.



Şekil 8. 14 Quadrotora etkiyen bozucu harici kuvvetlerin ihmal edilmediği ve SPM'na bu kuvvetlerin geri beslendiği durumda taşıtın SPM ile kontrolü, kare çizdirme testi

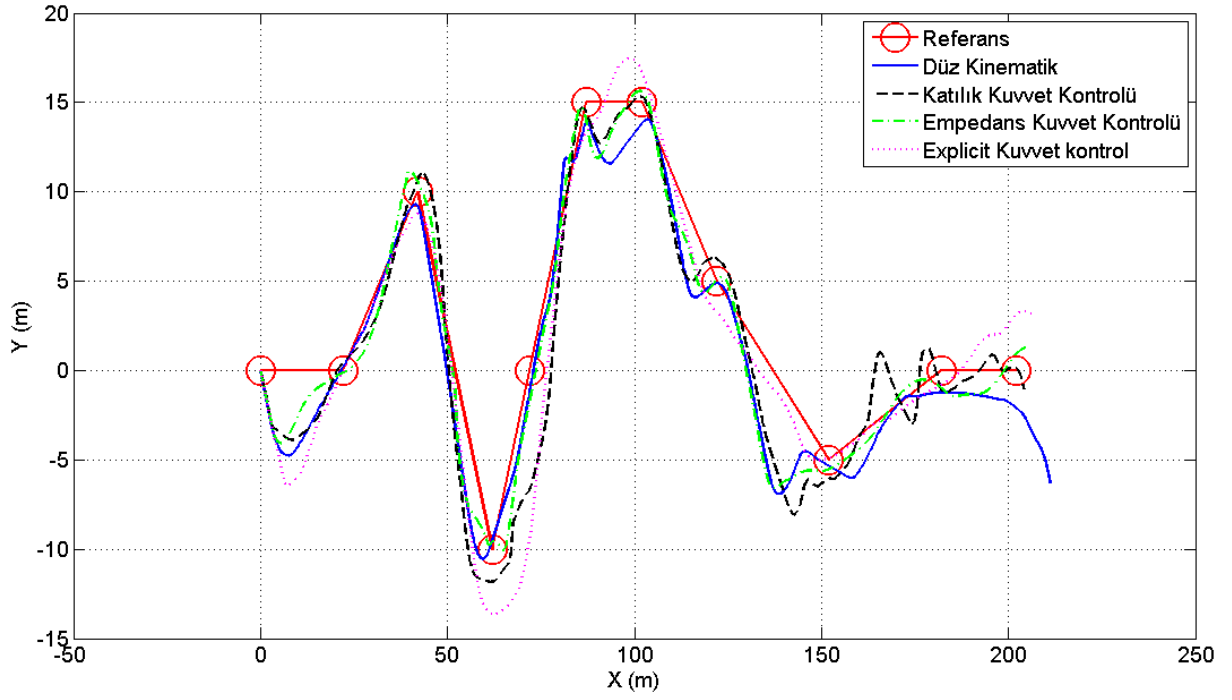
Şekil 8.14 de harici kuvvetlerin quadrotora etkidiği ve bu kuvvetlerin aynı zamanda SPM'na geri beslendiği duruma ait uygulamanın grafiği görülmektedir. Kinematik yöntem kullanılarak yapılan kontrol uygulamasında şekil 8.13' e göre çok büyük bir fark yoktur. Bunun sebebi bu yöntemde motorlar çalışmadığı için kullanıcının quadrotora etkiyen bozucu kuvvetleri hissetmesi ve quadrotoru buna göre manipüle etmesi söz konusu değildir. Ancak diğer kuvvet kontrol uygulamalarında harici kuvvetlerin SPM'na geri beslenmesi şekil 8.13 ile kıyaslama yapıldığı zaman göz ile görülür derecede kontrolü iyileştirdiği gözlemlenmektedir. Bu şartlar altında şekil 8.14 ten katılık kuvvet kontrolü ile yapılan uygulamanın sırasıyla empedans ve doğrudan (explicit) kuvvet kontrolüne göre daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Hata analiz grafiğinde ise istenen yörüngeden sapma miktarları bütün kuvvet kontrol yaklaşımlarında birbirine yakın olmakla beraber en az hata doğrudan (explicit) kuvvet kontrolü vermiştir. Sırasıyla katılık ve empedans kuvvet kontrol yöntemlerinin hata performansları birbirine yakın olduğu görülmektedir. Kinematik yöntem ise en fazla sapma yapan yöntem olmuştur.

Bölüm 8.2 de ifade edilen ve 2. senaryoyu oluşturan parkur üzerinde belirlenen 10 noktadan geçme ve puan alma uygulaması yapılmış ve sonuçlar grafiklere dökülmüştür. Bu senaryo da öncekinde olduğu gibi 4 farklı kontrol yöntemi 3 değişik şartta uygulanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.



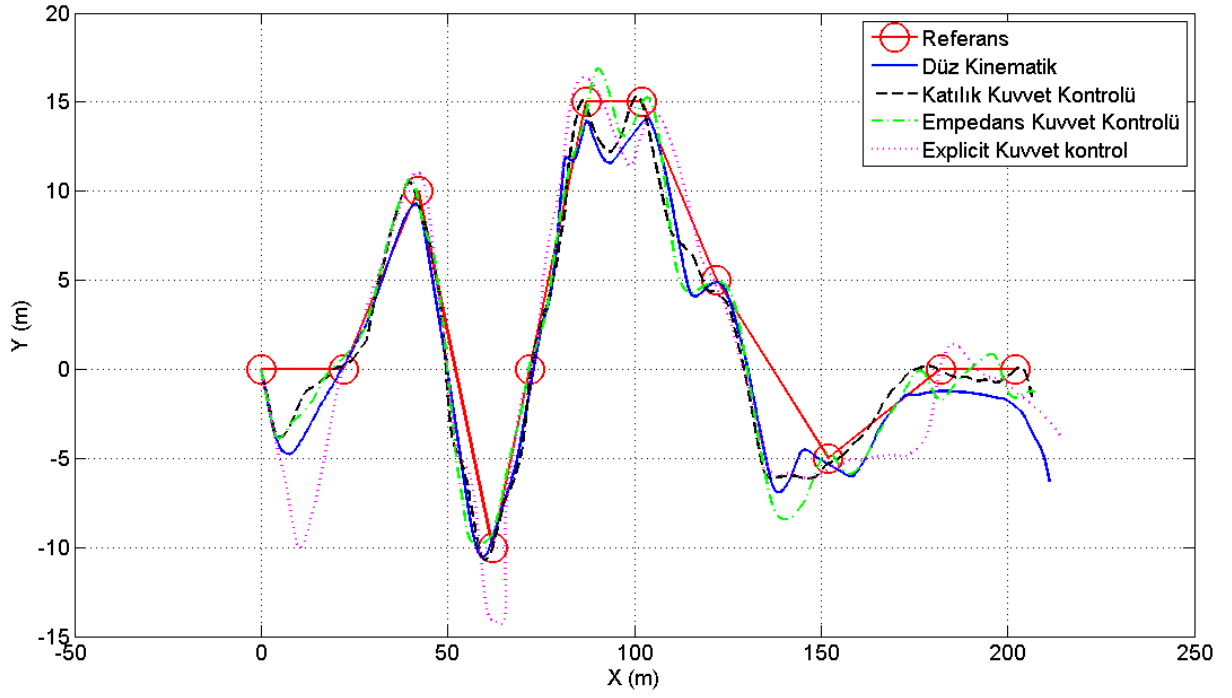
Şekil 8. 15 Quadrotora etkiyen bozucu harici kuvvetlerin ihmal edildiği durumda taşıtın SPM ile kontrolü, slalom testi

Şekil 8.15 de harici bozucu etkiler olmadan quadrotorun çizdiği yörüngeler görülmektedir. Daire içine alınmış noktalar geçilmesi gereken noktalardır. Şekil 8.15 de, verilen kontrol yöntemlerinden düz kinematik ile yapılan uygulamada 10 noktanın tamamından geçmiştir. Katılık kuvvet kontrolü ve empedans kuvvet kontrolü ile manipülasyonu sağlanan quadrotor ise 10 noktanın tamamından geçmiştir. Doğrudan (explicit) kuvvet kontrolü ile kontrol edilen SPM quadrotor ara yüzünü belirlenen 10 noktadan 9'unda başarı sağlamıştır. Şekil 8.15 de verilen quadrotor yörüngelerinden de başarı durumunun benzer olduğu kinematik yöntem, katılık kontrol ve empedans kontrol için görülmektedir. Şekil 8.15 'de doğrudan (explicit) kuvvet kontrolünün son noktayı kaçırdığı ve bazı noktalardan geçerken de diğer yöntemlere göre daha az kontrol sağladığı görülmektedir.



Şekil 8. 16 Quadrotora etkiyen bozucu harici kuvvetlerin ihmal edilmediği ve SPM'na bu kuvvetlerin geri beslenmediği durumda taşıtın SPM ile kontrolü, slalom testi

Şekil 8.16 harici bozucu etkilerin quadrotoru etkilediği ancak kullanıcıya hissettirilmeyen durum için yapılmış uygulamaların sonucunu gösteren grafikdir. Bu grafik 8.15 ile karşılaştırıldığında rüzgâr etkisi açıkça görülmektedir. Bu şartlar altında kinematik yöntem kullanılarak manipüle edilen quadrotor 5, katılık kontrolü ile 6, empedans kontrolü ile 9, doğrudan (explicit) kuvvet kontrolü ile 3 noktadan geçirilebilmiştir. Empedans kontrol yöntemi ile yönlendirilen quadrotor katılık kontrolü ile olana göre daha fazla noktadan başarıyla geçmesine rağmen şekil 8.16 da katılık kontrolü ile yapılan yönlendirme son üç nokta hariç en az empedans kontrol ile yapılan kadar iyidir.



Şekil 8. 17 Quadrotora etkiyen bozucu harici kuvvetlerin ihmal edilmediği ve SPM'na bu kuvvetlerin geri beslendiği durumda taşıtın SPM ile kontrolü, slalom testi

Şekil 8.17 de ise harici kuvvetlerin kullanıcıya SPM aracılığı ile aktarıldığı yönlendirme yöntemlerinin quadrotora çizdirdiği yörüngeler görülmektedir. Bu şartlar altında Kinematik yöntem ile yapılan yönlendirmede quadrotor 5, katılık kuvvet kontrolü ile yapılan yönlendirmede 10, empedans kuvvet kontrolü ile yapılan yönlendirmede 8, doğrudan (explicit) kuvvet kontrolü ile yapılan yönlendirmede ise 7 noktadan başarıyla geçmiştir. Bu durum kullanıcının quadrotor üzerine etki eden kuvvetleri hissetmesi kontrolü kolaylaştırdığı sonucunu ortaya çıkarmaktadır.

Sonuç olarak uygulanan yönlendirme metotlarından en iyi olanı belirlemek için kare parkur için 3, slalom parkuru için 3 olmak üzere toplam 6 testten en iyi yönlendirme metodunun hanesine 1 yazılmak ve herhangi bir testte eğer yöntemler eşit başarı göstermişler her birinin hanesine 1 yazılmak üzere çizelge 8.6 oluşturulmuştur.

Çizelge 8. 6 Uygulanan Yönlendirme Metotlarının Değerlendirilmesi

Test Yöntemi	Düz Kinematik	Katılık Kuvvet Kontrolü	Empedans Kuvvet Kontrolü	Doğrudan (explicit) Kuvvet Kontrolü
Kare parkur 1	0	0	1	0
Kare parkur 2	0	1	0	0
Kare parkur 3	0	0	0	1
Slalom parkur1	1	1	1	0
Slalom parkur 2	0	0	1	0
Slalom parkur 3	0	1	0	0
Toplam	1	3	3	1

Çizelge 8.6' ya göre en başarılı yönlendirme metodu katılık kuvvet kontrolü ve empedans kuvvet kontrolü altındaki SPM ile yapılan yönlendirme olduğu görülmektedir. Ancak diğer yönlendirme metotları da quadrotorun yönlendirmesini başarı ile gerçekleştirmişlerdir.

BÖLÜM 9

SONUÇLAR

Her gün yeni bir kullanım alanı bulan 6 serbestlik dereceli Stewart Platform Mekanizmasının ters kinematik hesabı ve ters kinematik hesap ile ortaya çıkarılan mekanizmanın çalışma uzayı başta olmak üzere mekanizmanın düz kinematiği derinlemesine incelenmiş, iki farklı düz kinematik metot uygulamalı olarak karşılaştırılmıştır.

Stewart Platform Mekanizmasının dinamik modeli ilk defa bondgraf modelleme yöntemi ile modellenmiş, böylece doğrusal olmayan bir sistemin durum uzayı denklemleri elde edilmiştir. Elde edilen dinamik denklemlerin simülasyon verileri ile gerçek sistem verileri karşılaştırılmış ve model doğrulanmıştır. Ayrıca elde edilen durum uzayı denklemlerinden sistemin kutupları bulunmuş ve model kararlılığı hakkında bilgi verilmiştir.

SPM' nın konum kontrolü incelenmiş bulanık mantık yöntemi kullanılarak denetleyiciler tasarlanmış, gerçek sisteme uygulaması yapılarak karşılaştırılmıştır.

İlk kez uzaysal hareket eden bir taşıtın yönlendirilmesi için tasarlanmış bu sistem üzerine konum tabanlı kuvvet kontrol yöntemlerinden katılık kuvvet kontrolü ve empedans kuvvet kontrolü başarılı bir şekilde deneysel sisteme uygulanmıştır. Bununla beraber konum tabanlı olmayan kuvvet tabanlı bir kuvvet kontrol yöntemi olan doğrudan (explicit) kuvvet kontrolü de deneysel sisteme başarı ile uygulanmıştır. Deneysel olarak uygulanan bu kuvvet kontrol yöntemlerinin basamak ve rampa girişlerine karşılık verdiği cevaplar incelenmiştir. Ayrıca kuvvet giriş frekans ve genliğinin kuvvet kontrol algoritmalarına göre mekanizmayı nasıl etkilediği yapılan deneylerle incelenmiştir. Kuvvet kontrol yöntemlerinin saydamlıkları yapılan deneylerle karşılaştırılmıştır.

Çalışmada amaç uzaysal hareket eden bir taşıtı SPM ile yönetmek olduğu için uzaysal hareket edebilen bir taşıt olarak 4 rotorlu helikopter (quadrotor) incelenmiş ve Newton-Euler metodu kullanılarak dinamik modeli oluşturulmuştur. Dinamik modele hava direnci ve rüzgâr etkisi gibi etkenler ilave edilmiş ve elde edilen modelin konum kontrolü yapılmıştır. Uygulanan konum kontrolü için denetleyici katsayıları optimize edilmiştir.

Modellenmesi ve kontrolü yapılan quadrotor için “Visual Basic 6.0” programı kullanılarak görsel bir ara yüz hazırlanmış ve hazırlanan bu ara yüzün SPM ile veri alış verişi sağlanmıştır. Oluşturulan ara yüz ortamında kullanıcının SPM’ nı kullanarak quadrotor modelini yönlendirmesi için iki farklı senaryo oluşturulmuş ve en iyi manipülasyon yöntemini belirlemek için deneysel olarak uygulanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Stewart D., (1965). "A Platform with Six Degrees of Freedom", UK Institution of Mechanical Engineers Proceedings, 180:1:15.
- [2] Elmas Anlı, Hüseyin Alp, Sait N. Yurt ve İbrahim Özkol, (2005). "Paralel Mekanizmaların Kinematiği, Dinamiği ve Çalışma Uzayı", Havacılık ve Uzak Teknolojileri Dergisi 2(1):19- 36.
- [3] Nanua P. ,Waldron K.J. and Murthy V. (1990). "Direct Kinematic Solution Of A Stewart Platform", IEEE Transactions on Robotics and Automation, 6:438-444.
- [4] Harib K. and Srinivasan K.,(2003). "Kinematic and Dynamic Analysis of Stewart Platform Based Machine Tool Structures", Robotica, 21:541-554.
- [5] Comin F., (2006). "Elbow Joint Measurement Using Stewart Paralel Mechanism", Brunel University, Master Thesis .
- [6] Chen S-H, Huang C-I and Fu L-C, (2008). "Applying a Nonlinear Observer to Solve Forward Kinematics of a Stewart Platform" , IEEE International Conference on Control Applications, 1183-1188.
- [7] Liu K., Fitzgerald J.M. and Lewis F.L., (1993). "Kinematic Analysis of a Stewart Platform Manipulator", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 40(2).
- [8] Tarokh M., (2007). "Real Time Forward Kinematics Solutions for General Stewart Platforms", IEEE International Conference on Robotics and Automation ,901-906.
- [9] Mu Z. and Kazerounian K., (2002). "A Real Parameter Continuation Method for Complete Solution of Forward Position Analysis of the General Stewart" Transactions of the ASME, 124:236-244.
- [10] Sheng L., Wan-Long L., Yang-Chun D. and Liang F., (2006). "Forward kinematics of the Stewart platform using hybrid immune genetic algorithm",IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2330-2335.
- [11] Song S-K. and Kwon D-S, (2001). " Efficient Formulation Approach for the Forward Kinematics of the 3-6 Stewart Gough Platform", IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1688-1693.

- [12] Ren L., Feng Z. and Mills J.K., (2006). "A Self-Tuning Iterative Calculation Approach for the Forward Kinematics of a Stewart-Gough Platform", IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2018-2023.
- [13] Huang X., Liao Q. and Wei S., (2010). "Closed-form forward kinematics for a symmetrical 6-6 Stewart platform using algebraic elimination", Mechanism and Machine Theory, 45: 327–334.
- [14] Yee C.S. and Lim K., (1997). "Forward kinematics solution of Stewart platform using neural networks", Neurocomputing, 16: 333-349.
- [15] Yurt S.N., Anlı E. and Ozkol I., (2007). "Forward kinematics analysis of the 6-3 SPM by using neural networks", Meccanica, 42:187–196.
- [16] Parikh P.J. and Lam S.S., (2009). "Solving the forward kinematics problem in parallel manipulators using an iterative artificial neural network strategy", Int. J. Adv.Manuf. Technol., 40:595–606.
- [17] Do, W. Q. D. , Yang, D. C. H., (1988). "Inverse dynamic analysis and simulation of a platform type of robot", Journal of Robotic Systems, 5(3): 209–227.
- [18] Dasgupta B. and Mruthyunjaya T.S. , (1998). "A Newton-Euler Formulation For The Inverse Dynamics Of The Stewart Platform Manipulator.", Mechanism and Machine Theory, 33:1135-1152.
- [19] Geng, Z., Haynes, L. S., Lee, J. D. and Carroll, R. L., (1992). "On the dynamic model and kinematic analysis of a class of Stewart platforms", Robotics and Autonomous Systems , 9(4): 237-254.
- [20] Liu, K., Fitzgerald, M., Dawson, D. W. and Lewis, F. L., (1991). "Modeling and control of a Stewart platform manipulator", ASME Control of Systems with Inexact Dynamic Models, 33: 83-89.
- [21] El-Khasawneh B.S. and Ferreira P.M., (1999). "Computation of stiffness and stiffness bounds for Parallel link manipulators", International Journal of Machine Tools & Manufacture, 39:321–342.
- [22] Tsai L-W.,(2000). "Solving the Inverse Dynamics of a Stewart-Gough Manipulator by the Principle of Virtual Work", ASME Journal of Mechanic Design, 122.
- [23] Piras G., Cleghorn W.L. and Mills J.K., (2005). "Dynamic finite-element analysis of a planar high-speed, high-precision parallel manipulator with flexible links", Mechanism and Machine Theory, 40: 849–862.
- [24] Lin J., Chen C.-W. ,(2009). "Computer-aided-symbolic dynamic modeling for Stewart-platform manipulator", Robotica, 27: 331–341.
- [25] Lopes A.M., (2009). "Dynamic modeling of a Stewart platform using the generalized momentum approach", Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simulat., 14:3389–3401.
- [26] Yurt S.N., Özkol I., Kaya M. O. and Hacıyev C., (2002). "Optimization of the PD coefficient in a flight simulator control via genetic algorithms", Aircraft Engineering and Aerospace Technology , 74(2): 147–153.

- [27] Li D., Salcudean S.E., (1997). "Modeling, Simulation, and Control of a Hydraulic Stewart Platform", Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 3360-3366.
- [28] Yingjie L., Wenbai Z. and Gexue R., (2006). "Feedback Control of a Cable-Driven Gough–Stewart Platform", IEEE Transactions on Robotics, 22(1):198-202.
- [29] Su Y. X., Duan B. Y., Zheng C. H., . Zhang Y. F, Chen G. D.ve Mi J. W.,(2004). "Disturbance-Rejection High-Precision Motion Control of a Stewart Platform", IEEE Transactions on Control Systems Technology, 12(3):364-374.
- [30] Zadeh L.A,(1965). "Fuzzy Sets", Inf. Control. 31(6) 338-353.
- [31] Chung I-F., Chang H-H. and Lin C-T., (1999). "Fuzzy Control of a Six-degree Motion Platform with Stability Analysis", IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics,325-330.
- [32] Lin L-C. and Tsay M-U.,(2000). "Modeling and Control of Micropositioning Systems Using Stewart Platforms", Journal of Robotic Systems 17(1): 17-52.
- [33] Li H-X. and Gatland H.B.,(1996). "Conventional Fuzzy Control and Its Enhancement", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part-B: Cybernetics, 26(5).
- [34] Mudi R.K.and Pal N.R.,(1999). "A Robust Self-Tuning Scheme for PI- and PD-Type Fuzzy Controllers", IEEE Transactions on Fuzzy Systems,7(1).
- [35] Serrano F., Caballero A., Yen K. and Brezina T.,(2007). "Control of a Stewart Platform with Fuzzy Logic and Artificial Neural Network Compensation", Recent Advances in Mechatronics, Springer Berlin Heidelberg , 156-160,.
- [36] Sadjadiyan H., Taghirad H.D. and Fatehi A.,(2005). "Neural Networks Approaches for Computing the Forward Kinematics of a Redundant Parallel Manipulator", International Journal of Computational Intelligence, 2: 40-47.
- [37] Zeng G. and Hemami A., (1997). "An overview of robot force control", Robotica ,15: 473–482.
- [38] Salisbury K.J., (1980). "Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates" The 19th IEEE Conf. on Decision and Control, Albuquerque ,95-100.
- [39] N. Hogan, (1985). "Impedance Control, An Approach to Manipulation: Part I, II" Int. J. of Robotics Res. 107:1-24.
- [40] D. E. Whitney, (1987). "Historical perspective and state of the art in robot force control", International Journal of Robotics Research, 6(1):3-14.
- [41] Benalli A., Richard P. and Bidaud P., (1999). "Design, control and evaluation of a six DOF force feedback interface for virtual reality applications", Proceedings of the 1999 IEEE International Workshop on Robot and Human Interaction, 338-343.
- [42] Kwon D.S., Woo K.Y. and Cho H.S., (1999). "Haptic Control of the Master Hand Controller for a Microsurgical Telerobot System", Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation, 1722-1727.
- [43] Girone M., Burdea G., Bouzit M. and Popescu V., (2001). "A Stewart Platform-Based System for Ankle Telerehabilitation", Autonomous Robots 10: 203–212.

- [44] Gupta A., O'Malley M.K., Patoğlu V. and Bugar C., (2008). "Design, Control and Performance of RiceWrist: A Force Feedback Wrist Exoskeleton for Rehabilitation and Training", *The International Journal of Robotics Research*, 27(2): 233–251.
- [45] Satıcı A.C., Erdoğan A. and Patoğlu V., (2009). "Design of a Reconfigurable Ankle Rehabilitation Robot and Its Use for the Estimation of the Ankle Impedance", *IEEE 11th International Conference on Rehabilitation Robotics*, 257-264.
- [46] An C.H. and Hollerbach J.M., (1987). "Dynamic Stability Issues in Force Control of Manipulators", *American Control Conference*, 821-827.
- [47] Hayward V. and Astley O.R., (1996). "Performance Measures for Haptic Interfaces", *In Robotics Research: The 7th Int. Symposium*. 195-207.
- [48] Bolat S. ve Kalenderli Ö., (2003). "Lavenberg-Marquard Algoritması Kullanılan Yapay Sinir Ağı ile Elektrot Biçim Optimizasyonu", *International XII. Turkish Symposium on Artificial Intelligence and Neural Networks*.
- [49] Karnopp D.C. and Rosenberg R.C., (1975). "System Dynamics: A Unified Approach", *Wiley, New York*.
- [50] Karnopp D.C. and Rosenberg R.C., (1983) "Introduction to Physical System Dynamics", *Mc Graw Hill, Inc., New York*.
- [51] Thoma J.U., (1990), "Simulation By Bond Graphs", *Springer-Verlag, Berlin*.
- [52] Sağırılı A., (1996), "Bond Graf Yöntemi ile Döner Vincin Modelenmesi ve Dinamik Davranışlarının Analizi", *Doktora Tezi, İ.Ü.*
- [53] Elmas Ç., (2003), "Bulanık Mantık Denetleyiciler", *Ankara*.
- [54] Palm R., (1992). "Sliding mode fuzzy control," in *Proc. Fuzz IEEE, San Diego, CA*, 519–526.
- [55] Küçükdemiral İ.B., (2002), "Nöral - genetik tabanlı optimal bulanık kontrolörün gerçekleştirilmesi ve DC servomotorlara uygulanması", *Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi*.
- [56] Rorabaugh C.B., (1992), "Digital Filter Designer's Handbook", *McGraw-Hill*.
- [57] Vlachos K. and Papadopoulos E., (2005). "Force Control Law Design for a Five Degree-of-freedom Haptic Mechanism," *Proc. International Conference on Robotics and Applications, Cambridge, MA, USA*.
- [58] Volpe R. and Khosla P., (1993). "A Theoretical and Experimental Investigation of Explicit Force Control Strategies for Manipulators", *IEEE Transactions on Automatic Control*, 38(11).
- [59] Volpe R. and Khosla P., (1992). "An Experimental Evaluation and Comparison of Explicit Force Control Strategies for Robotic Manipulators", *IEEE International conference on Robotics and Automation*, 1387-1393.
- [60] Ömürlü, V.E. and Yıldız, İ., (2010). "Self-Tuning Fuzzy PD - based Stiffness Controller of a 3x3 Stewart Platform as a Man-Machine Interface", *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, doi:10.3906/elk-1007-581.

- [61] Bouabdallah S., Noth A. and Siegwart R., (2004). "PID vs LQ control techniques applied to an indoor micro quadrotor", *Intelligent Robots and Systems*, 3:2451-2456.
- [62] D.P.Pullu, (2006), "A Study of Helicopter Aerodynamics in Ground Effect", The Ohio State university, Ph.D. thesis.
- [63] Cheseman I.C. and Bennett W.E., (1957). "The Effect of the Ground on a Helicopter Rotor in Forward Flight", *Aeronautical Research Council Reports and Memoranda*.
- [64] T.Bresciani,(2008). "Modelling, Identification and Control of a Quadrotor Helicopter", Department of Automatic Control, Lund University, Master Thesis.
- [65] M.A.Yükselen,(2006). "Aerodinamik",İTÜ Ders Notları.

T_I VE I MATRİSLERİNİN AÇIK İFADELERİ

$$T_I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ K_{11}^{L1} & K_{12}^{L1} & K_{13}^{L1} & K_{14}^{L1} & K_{15}^{L1} & K_{16}^{L1} \\ K_{11}^{01} & K_{12}^{01} & K_{13}^{01} & K_{14}^{01} & K_{15}^{01} & K_{16}^{01} \\ K_{21}^{01} & K_{22}^{01} & K_{23}^{01} & K_{24}^{01} & K_{25}^{01} & K_{26}^{01} \\ K_{31}^{01} & K_{32}^{01} & K_{33}^{01} & K_{34}^{01} & K_{35}^{01} & K_{36}^{01} \\ K_{11}^{L2} & K_{12}^{L2} & K_{13}^{L2} & K_{14}^{L2} & K_{15}^{L2} & K_{16}^{L2} \\ K_{11}^{02} & K_{12}^{02} & K_{13}^{02} & K_{14}^{02} & K_{15}^{02} & K_{16}^{02} \\ K_{21}^{02} & K_{22}^{02} & K_{23}^{02} & K_{24}^{02} & K_{25}^{02} & K_{26}^{02} \\ K_{31}^{02} & K_{32}^{02} & K_{33}^{02} & K_{34}^{02} & K_{35}^{02} & K_{36}^{02} \\ K_{11}^{L3} & K_{12}^{L3} & K_{13}^{L3} & K_{14}^{L3} & K_{15}^{L3} & K_{16}^{L3} \\ K_{11}^{03} & K_{12}^{03} & K_{13}^{03} & K_{14}^{03} & K_{15}^{03} & K_{16}^{03} \\ K_{21}^{03} & K_{22}^{03} & K_{23}^{03} & K_{24}^{03} & K_{25}^{03} & K_{26}^{03} \\ K_{31}^{03} & K_{32}^{03} & K_{33}^{03} & K_{34}^{03} & K_{35}^{03} & K_{36}^{03} \\ K_{11}^{L4} & K_{12}^{L4} & K_{13}^{L4} & K_{14}^{L4} & K_{15}^{L4} & K_{16}^{L4} \\ K_{11}^{04} & K_{12}^{04} & K_{13}^{04} & K_{14}^{04} & K_{15}^{04} & K_{16}^{04} \\ K_{21}^{04} & K_{22}^{04} & K_{23}^{04} & K_{24}^{04} & K_{25}^{04} & K_{26}^{04} \\ K_{31}^{04} & K_{32}^{04} & K_{33}^{04} & K_{34}^{04} & K_{35}^{04} & K_{36}^{04} \\ K_{11}^{L5} & K_{12}^{L5} & K_{13}^{L5} & K_{14}^{L5} & K_{15}^{L5} & K_{16}^{L5} \\ K_{11}^{05} & K_{12}^{05} & K_{13}^{05} & K_{14}^{05} & K_{15}^{05} & K_{16}^{05} \\ K_{21}^{05} & K_{22}^{05} & K_{23}^{05} & K_{24}^{05} & K_{25}^{05} & K_{26}^{05} \\ K_{31}^{05} & K_{32}^{05} & K_{33}^{05} & K_{34}^{05} & K_{35}^{05} & K_{36}^{05} \\ K_{11}^{L6} & K_{12}^{L6} & K_{13}^{L6} & K_{14}^{L6} & K_{15}^{L6} & K_{16}^{L6} \\ K_{11}^{06} & K_{12}^{06} & K_{13}^{06} & K_{14}^{06} & K_{15}^{06} & K_{16}^{06} \\ K_{21}^{06} & K_{22}^{06} & K_{23}^{06} & K_{24}^{06} & K_{25}^{06} & K_{26}^{06} \\ K_{31}^{06} & K_{32}^{06} & K_{33}^{06} & K_{34}^{06} & K_{35}^{06} & K_{36}^{06} \end{bmatrix}$$

$$I = \begin{bmatrix} [I_P]_{3 \times 3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & [m_P]_{3 \times 3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{1u} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & [I_{b1}]_{3 \times 3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_{2u} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & [I_{b2}]_{3 \times 3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{3u} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & [I_{b3}]_{3 \times 3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{4u} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & [I_{b4}]_{3 \times 3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{5u} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & [I_{b5}]_{3 \times 3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & [I_{b6}]_{3 \times 3} \end{bmatrix}_{30 \times 30}$$

$[A], [B], [C], [D], [\tilde{I}]^{-1}, [L_a], [U], E, T$ MATRİSLERİNİN AÇIK İFADELERİ

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \\ \cdot \\ t_x \\ \cdot \\ t_y \\ \cdot \\ t_z \\ i_{a1} \\ i_{a2} \\ i_{a3} \\ i_{a4} \\ i_{a5} \\ i_{a6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A]_{6 \times 6} & [B]_{6 \times 6} \\ [C]_{6 \times 6} & [D]_{6 \times 6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \\ \cdot \\ t_x \\ \cdot \\ t_y \\ \cdot \\ t_z \\ i_{a1} \\ i_{a2} \\ i_{a3} \\ i_{a4} \\ i_{a5} \\ i_{a6} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [\tilde{I}^{-1}]_{6 \times 6} & 0 \\ 0 & [L_a]_{6 \times 6} \end{bmatrix} [U]_{1 \times 12}$$

$$[A]_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & & a_{26} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{61} & a_{62} & & a_{66} \end{bmatrix} \quad [B]_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & & b_{16} \\ b_{21} & b_{22} & & b_{26} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{61} & b_{62} & & b_{66} \end{bmatrix} \quad [C]_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & & c_{26} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{61} & c_{62} & & c_{66} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
a_{11} &= \tilde{\mathbf{I}}_{11}^{-1} \mathbf{E}_{\omega_x}^{m_x} + \tilde{\mathbf{I}}_{12}^{-1} \mathbf{E}_{\omega_x}^{m_y} + \tilde{\mathbf{I}}_{13}^{-1} \mathbf{E}_{\omega_x}^{m_z} + \tilde{\mathbf{I}}_{14}^{-1} \mathbf{E}_{\omega_x}^{F_x} + \tilde{\mathbf{I}}_{15}^{-1} \mathbf{E}_{\omega_x}^{F_y} + \tilde{\mathbf{I}}_{16}^{-1} \mathbf{E}_{\omega_x}^{F_z} \\
a_{12} &= \tilde{\mathbf{I}}_{11}^{-1} \mathbf{E}_{\omega_y}^{m_x} + \tilde{\mathbf{I}}_{12}^{-1} \mathbf{E}_{\omega_y}^{m_y} + \tilde{\mathbf{I}}_{13}^{-1} \mathbf{E}_{\omega_y}^{m_z} + \tilde{\mathbf{I}}_{14}^{-1} \mathbf{E}_{\omega_y}^{F_x} + \tilde{\mathbf{I}}_{15}^{-1} \mathbf{E}_{\omega_y}^{F_y} + \tilde{\mathbf{I}}_{16}^{-1} \mathbf{E}_{\omega_y}^{F_z} \\
&\vdots \\
a_{16} &= \tilde{\mathbf{I}}_{11}^{-1} \mathbf{E}_{t_z}^{m_x} + \tilde{\mathbf{I}}_{12}^{-1} \mathbf{E}_{t_z}^{m_y} + \tilde{\mathbf{I}}_{13}^{-1} \mathbf{E}_{t_z}^{m_z} + \tilde{\mathbf{I}}_{14}^{-1} \mathbf{E}_{t_z}^{F_x} + \tilde{\mathbf{I}}_{15}^{-1} \mathbf{E}_{t_z}^{F_y} + \tilde{\mathbf{I}}_{16}^{-1} \mathbf{E}_{t_z}^{F_z} \\
a_{21} &= \tilde{\mathbf{I}}_{21}^{-1} \mathbf{E}_{\omega_x}^{m_x} + \tilde{\mathbf{I}}_{22}^{-1} \mathbf{E}_{\omega_x}^{m_y} + \tilde{\mathbf{I}}_{23}^{-1} \mathbf{E}_{\omega_x}^{m_z} + \tilde{\mathbf{I}}_{24}^{-1} \mathbf{E}_{\omega_x}^{F_x} + \tilde{\mathbf{I}}_{25}^{-1} \mathbf{E}_{\omega_x}^{F_y} + \tilde{\mathbf{I}}_{26}^{-1} \mathbf{E}_{\omega_x}^{F_z} \\
a_{22} &= \tilde{\mathbf{I}}_{21}^{-1} \mathbf{E}_{\omega_y}^{m_x} + \tilde{\mathbf{I}}_{22}^{-1} \mathbf{E}_{\omega_y}^{m_y} + \tilde{\mathbf{I}}_{23}^{-1} \mathbf{E}_{\omega_y}^{m_z} + \tilde{\mathbf{I}}_{24}^{-1} \mathbf{E}_{\omega_y}^{F_x} + \tilde{\mathbf{I}}_{25}^{-1} \mathbf{E}_{\omega_y}^{F_y} + \tilde{\mathbf{I}}_{26}^{-1} \mathbf{E}_{\omega_y}^{F_z} \\
&\vdots \\
a_{66} &= \tilde{\mathbf{I}}_{61}^{-1} \mathbf{E}_{t_z}^{m_x} + \tilde{\mathbf{I}}_{62}^{-1} \mathbf{E}_{t_z}^{m_y} + \tilde{\mathbf{I}}_{63}^{-1} \mathbf{E}_{t_z}^{m_z} + \tilde{\mathbf{I}}_{64}^{-1} \mathbf{E}_{t_z}^{F_x} + \tilde{\mathbf{I}}_{65}^{-1} \mathbf{E}_{t_z}^{F_y} + \tilde{\mathbf{I}}_{66}^{-1} \mathbf{E}_{t_z}^{F_z}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
b_{11} &= \tilde{\mathbf{I}}_{11}^{-1} \mathbf{E}_{i_1}^{m_x} + \tilde{\mathbf{I}}_{12}^{-1} \mathbf{E}_{i_1}^{m_y} + \tilde{\mathbf{I}}_{13}^{-1} \mathbf{E}_{i_1}^{m_z} + \tilde{\mathbf{I}}_{14}^{-1} \mathbf{E}_{i_1}^{F_x} + \tilde{\mathbf{I}}_{15}^{-1} \mathbf{E}_{i_1}^{F_y} + \tilde{\mathbf{I}}_{16}^{-1} \mathbf{E}_{i_1}^{F_z} \\
b_{12} &= \tilde{\mathbf{I}}_{11}^{-1} \mathbf{E}_{i_2}^{m_x} + \tilde{\mathbf{I}}_{12}^{-1} \mathbf{E}_{i_2}^{m_y} + \tilde{\mathbf{I}}_{13}^{-1} \mathbf{E}_{i_2}^{m_z} + \tilde{\mathbf{I}}_{14}^{-1} \mathbf{E}_{i_2}^{F_x} + \tilde{\mathbf{I}}_{15}^{-1} \mathbf{E}_{i_2}^{F_y} + \tilde{\mathbf{I}}_{16}^{-1} \mathbf{E}_{i_2}^{F_z} \\
&\vdots \\
b_{16} &= \tilde{\mathbf{I}}_{11}^{-1} \mathbf{E}_{i_6}^{m_x} + \tilde{\mathbf{I}}_{12}^{-1} \mathbf{E}_{i_6}^{m_y} + \tilde{\mathbf{I}}_{13}^{-1} \mathbf{E}_{i_6}^{m_z} + \tilde{\mathbf{I}}_{14}^{-1} \mathbf{E}_{i_6}^{F_x} + \tilde{\mathbf{I}}_{15}^{-1} \mathbf{E}_{i_6}^{F_y} + \tilde{\mathbf{I}}_{16}^{-1} \mathbf{E}_{i_6}^{F_z} \\
b_{21} &= \tilde{\mathbf{I}}_{21}^{-1} \mathbf{E}_{i_1}^{m_x} + \tilde{\mathbf{I}}_{22}^{-1} \mathbf{E}_{i_1}^{m_y} + \tilde{\mathbf{I}}_{23}^{-1} \mathbf{E}_{i_1}^{m_z} + \tilde{\mathbf{I}}_{24}^{-1} \mathbf{E}_{i_1}^{F_x} + \tilde{\mathbf{I}}_{25}^{-1} \mathbf{E}_{i_1}^{F_y} + \tilde{\mathbf{I}}_{26}^{-1} \mathbf{E}_{i_1}^{F_z} \\
b_{22} &= \tilde{\mathbf{I}}_{21}^{-1} \mathbf{E}_{i_2}^{m_x} + \tilde{\mathbf{I}}_{22}^{-1} \mathbf{E}_{i_2}^{m_y} + \tilde{\mathbf{I}}_{23}^{-1} \mathbf{E}_{i_2}^{m_z} + \tilde{\mathbf{I}}_{24}^{-1} \mathbf{E}_{i_2}^{F_x} + \tilde{\mathbf{I}}_{25}^{-1} \mathbf{E}_{i_2}^{F_y} + \tilde{\mathbf{I}}_{26}^{-1} \mathbf{E}_{i_2}^{F_z} \\
&\vdots \\
b_{66} &= \tilde{\mathbf{I}}_{61}^{-1} \mathbf{E}_{i_6}^{m_x} + \tilde{\mathbf{I}}_{62}^{-1} \mathbf{E}_{i_6}^{m_y} + \tilde{\mathbf{I}}_{63}^{-1} \mathbf{E}_{i_6}^{m_z} + \tilde{\mathbf{I}}_{64}^{-1} \mathbf{E}_{i_6}^{F_x} + \tilde{\mathbf{I}}_{65}^{-1} \mathbf{E}_{i_6}^{F_y} + \tilde{\mathbf{I}}_{66}^{-1} \mathbf{E}_{i_6}^{F_z}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
c_{11} &= \mathbf{L}_{a_1} \mathbf{E}_{\omega_x}^{v_1}, c_{12} = \mathbf{L}_{a_1} \mathbf{E}_{\omega_y}^{v_1}, c_{13} = \mathbf{L}_{a_1} \mathbf{E}_{\omega_z}^{v_1}, \\
c_{14} &= \mathbf{L}_{a_1} \mathbf{E}_{t_x}^{v_1}, c_{15} = \mathbf{L}_{a_1} \mathbf{E}_{t_y}^{v_1}, c_{16} = \mathbf{L}_{a_1} \mathbf{E}_{t_z}^{v_1} \\
c_{21} &= \mathbf{L}_{a_2} \mathbf{E}_{\omega_x}^{v_2}, c_{22} = \mathbf{L}_{a_2} \mathbf{E}_{\omega_y}^{v_2}, c_{23} = \mathbf{L}_{a_2} \mathbf{E}_{\omega_z}^{v_2}, \\
c_{24} &= \mathbf{L}_{a_2} \mathbf{E}_{t_x}^{v_2}, c_{25} = \mathbf{L}_{a_2} \mathbf{E}_{t_y}^{v_2}, c_{26} = \mathbf{L}_{a_2} \mathbf{E}_{t_z}^{v_2} \\
&\vdots \\
c_{61} &= \mathbf{L}_{a_6} \mathbf{E}_{\omega_x}^{v_6}, c_{62} = \mathbf{L}_{a_6} \mathbf{E}_{\omega_y}^{v_6}, c_{63} = \mathbf{L}_{a_6} \mathbf{E}_{\omega_z}^{v_6}, \\
c_{64} &= \mathbf{L}_{a_6} \mathbf{E}_{t_x}^{v_6}, c_{65} = \mathbf{L}_{a_6} \mathbf{E}_{t_y}^{v_6}, c_{66} = \mathbf{L}_{a_6} \mathbf{E}_{t_z}^{v_6}
\end{aligned}$$

$$[\mathbf{D}]_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{26} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ d_{61} & d_{62} & \dots & d_{66} \end{bmatrix}$$

$$d_{11} = L_{a_1} E_{R_1}^{v_1}, d_{12} = 0, d_{13} = 0, \dots, d_{16} = 0$$

$$d_{21} = L_{a_2} E_{R_2}^{v_2}, d_{22} = 0, d_{23} = 0, \dots, d_{26} = 0$$

$\vdots$

$$d_{61} = L_{a_6} E_{R_6}^{v_6}, d_{62} = 0, d_{63} = 0, \dots, d_{66} = 0$$

$$[\tilde{I}]_{6 \times 6}^{-1} = \begin{bmatrix} \tilde{I}_{11}^{-1} & \tilde{I}_{12}^{-1} & \dots & \tilde{I}_{16}^{-1} \\ \tilde{I}_{21}^{-1} & \tilde{I}_{22}^{-1} & \dots & \tilde{I}_{26}^{-1} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \tilde{I}_{61}^{-1} & \tilde{I}_{62}^{-1} & \dots & \tilde{I}_{66}^{-1} \end{bmatrix}$$

$$[L_a]_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} L_{a_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & L_{a_2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & L_{a_6} \end{bmatrix}$$

$$[U] = [u_1 \quad u_2 \quad u_3 \quad u_4 \quad u_5 \quad u_6 \quad T_{v_{ex}}^{v_1} \quad T_{v_{ex}}^{v_2} \quad T_{v_{ex}}^{v_3} \quad T_{v_{ex}}^{v_4} \quad T_{v_{ex}}^{v_5} \quad T_{v_{ex}}^{v_6}]^T$$

$$u_1 = \sum_{n=1}^6 T_{L_n}^{m_x} + T_{\theta_n}^{m_x}, u_2 = \sum_{n=1}^6 T_{L_n}^{m_y} + T_{\theta_n}^{m_y}$$

$$u_3 = \sum_{n=1}^6 T_{L_n}^{m_z} + T_{\theta_n}^{m_z}, u_4 = \sum_{n=1}^6 T_{L_n}^{F_x} + T_{\theta_n}^{F_x}$$

$$u_5 = \sum_{n=1}^6 T_{L_n}^{F_y} + T_{\theta_n}^{F_y}, u_6 = T_{m_p}^{F_z} + \sum_{n=1}^6 T_{L_n}^{F_z} + T_{\theta_n}^{F_z}$$

$$E_{\omega_x}^{m_x} = \sum_{n=1}^6 \left\{ -R_{L_n} (K_{11}^{L_n})^2 - R_{\theta} \left((K_{11}^{\theta_n})^2 + K_{11}^{\theta_n} K_{21}^{\theta_n} + K_{11}^{\theta_n} K_{31}^{\theta_n} \right) \right\} - \tilde{G}_{11}$$

$$E_{\omega_y}^{m_x} = \sum_{n=1}^6 \left\{ -R_{L_n} K_{11}^{L_n} K_{12}^{L_n} - R_{\theta} \left((K_{12}^{\theta_n})^2 + K_{12}^{\theta_n} K_{22}^{\theta_n} + K_{12}^{\theta_n} K_{32}^{\theta_n} \right) \right\} - \tilde{G}_{12} - H_z$$

$$E_{\omega_z}^{m_x} = \sum_{n=1}^6 \left\{ -R_{L_n} K_{11}^{L_n} K_{13}^{L_n} - R_{\theta} \left((K_{13}^{\theta_n})^2 + K_{12}^{\theta_n} K_{23}^{\theta_n} + K_{12}^{\theta_n} K_{33}^{\theta_n} \right) \right\} - \tilde{G}_{13} + H_y$$

$$E_{t_x}^{m_x} = \sum_{n=1}^6 \left\{ -R_{L_n} K_{11}^{L_n} K_{14}^{L_n} - R_{\theta} \left(K_{11}^{\theta_n} K_{14}^{\theta_n} + K_{11}^{\theta_n} K_{24}^{\theta_n} + K_{11}^{\theta_n} K_{34}^{\theta_n} \right) \right\} - \tilde{G}_{14}$$

$$E_{t_y}^{m_x} = \sum_{n=1}^6 \left\{ -R_{L_n} K_{11}^{L_n} K_{15}^{L_n} - R_{\theta} \left(K_{11}^{\theta_n} K_{15}^{\theta_n} + K_{11}^{\theta_n} K_{25}^{\theta_n} + K_{11}^{\theta_n} K_{35}^{\theta_n} \right) \right\} - \tilde{G}_{15}$$

$$E_{t_z}^{m_x} = \sum_{n=1}^6 \left\{ -R_{L_n} K_{11}^{L_n} K_{16}^{L_n} - R_{\theta} \left(K_{11}^{\theta_n} K_{16}^{\theta_n} + K_{11}^{\theta_n} K_{26}^{\theta_n} + K_{11}^{\theta_n} K_{36}^{\theta_n} \right) \right\} - \tilde{G}_{16}$$

$$E_{\omega_x}^{m_y} = \sum_{n=1}^6 \left\{ -R_{L_n} K_{12}^{L_n} K_{11}^{L_n} - R_{\theta} \left(K_{21}^{\theta_n} K_{11}^{\theta_n} + K_{22}^{\theta_n} K_{21}^{\theta_n} + K_{23}^{\theta_n} K_{31}^{\theta_n} \right) \right\} - \tilde{G}_{21} + H_z$$

$$\begin{aligned}
E_{\omega_y}^{m_y} &= \sum_{n=1}^6 \left\{ -R_{L_n} K_{12}^{L_n} K_{12}^{L_n} - R_{\theta} (K_{21}^{\theta_n} K_{12}^{\theta_n} + K_{22}^{\theta_n} K_{22}^{\theta_n} + K_{23}^{\theta_n} K_{32}^{\theta_n}) \right\} - \tilde{G}_{22} \\
E_{\omega_z}^{m_y} &= \sum_{n=1}^6 \left\{ -R_{L_n} K_{12}^{L_n} K_{13}^{L_n} - R_{\theta} (K_{21}^{\theta_n} K_{13}^{\theta_n} + K_{22}^{\theta_n} K_{23}^{\theta_n} + K_{23}^{\theta_n} K_{33}^{\theta_n}) \right\} - \tilde{G}_{23} - H_x \\
E_{t_x}^{m_y} &= \sum_{n=1}^6 \left\{ -R_{L_n} K_{12}^{L_n} K_{14}^{L_n} - R_{\theta} (K_{21}^{\theta_n} K_{14}^{\theta_n} + K_{22}^{\theta_n} K_{24}^{\theta_n} + K_{23}^{\theta_n} K_{34}^{\theta_n}) \right\} - \tilde{G}_{24} \\
E_{t_y}^{m_y} &= \sum_{n=1}^6 \left\{ -R_{L_n} K_{12}^{L_n} K_{15}^{L_n} - R_{\theta} (K_{21}^{\theta_n} K_{15}^{\theta_n} + K_{22}^{\theta_n} K_{25}^{\theta_n} + K_{23}^{\theta_n} K_{35}^{\theta_n}) \right\} - \tilde{G}_{25} \\
E_{t_z}^{m_y} &= \sum_{n=1}^6 \left\{ -R_{L_n} K_{12}^{L_n} K_{16}^{L_n} - R_{\theta} (K_{21}^{\theta_n} K_{16}^{\theta_n} + K_{22}^{\theta_n} K_{26}^{\theta_n} + K_{23}^{\theta_n} K_{36}^{\theta_n}) \right\} - \tilde{G}_{26} \\
E_{\omega_x}^{m_z} &= \sum_{n=1}^6 \left\{ -R_{L_n} K_{13}^{L_n} K_{11}^{L_n} - R_{\theta} (K_{31}^{\theta_n} K_{11}^{\theta_n} + K_{32}^{\theta_n} K_{21}^{\theta_n} + K_{33}^{\theta_n} K_{31}^{\theta_n}) \right\} - \tilde{G}_{31} - H_y \\
E_{\omega_y}^{m_z} &= \sum_{n=1}^6 \left\{ -R_{L_n} K_{13}^{L_n} K_{12}^{L_n} - R_{\theta} (K_{31}^{\theta_n} K_{12}^{\theta_n} + K_{32}^{\theta_n} K_{22}^{\theta_n} + K_{33}^{\theta_n} K_{32}^{\theta_n}) \right\} - \tilde{G}_{32} + H_x \\
E_{\omega_z}^{m_z} &= \sum_{n=1}^6 \left\{ -R_{L_n} K_{13}^{L_n} K_{13}^{L_n} - R_{\theta} (K_{31}^{\theta_n} K_{13}^{\theta_n} + K_{32}^{\theta_n} K_{23}^{\theta_n} + K_{33}^{\theta_n} K_{33}^{\theta_n}) \right\} - \tilde{G}_{33} \\
E_{t_x}^{m_z} &= \sum_{n=1}^6 \left\{ -R_{L_n} K_{13}^{L_n} K_{14}^{L_n} - R_{\theta} (K_{31}^{\theta_n} K_{14}^{\theta_n} + K_{32}^{\theta_n} K_{24}^{\theta_n} + K_{33}^{\theta_n} K_{34}^{\theta_n}) \right\} - \tilde{G}_{34} \\
E_{t_y}^{m_z} &= \sum_{n=1}^6 \left\{ -R_{L_n} K_{13}^{L_n} K_{15}^{L_n} - R_{\theta} (K_{31}^{\theta_n} K_{15}^{\theta_n} + K_{32}^{\theta_n} K_{25}^{\theta_n} + K_{33}^{\theta_n} K_{35}^{\theta_n}) \right\} - \tilde{G}_{35} \\
E_{t_z}^{m_z} &= \sum_{n=1}^6 \left\{ -R_{L_n} K_{13}^{L_n} K_{16}^{L_n} - R_{\theta} (K_{31}^{\theta_n} K_{16}^{\theta_n} + K_{32}^{\theta_n} K_{26}^{\theta_n} + K_{33}^{\theta_n} K_{36}^{\theta_n}) \right\} - \tilde{G}_{36} \\
E_{\omega_x}^{F_x} &= \sum_{n=1}^6 \left\{ -R_{L_n} K_{14}^{L_n} K_{11}^{L_n} - R_{\theta} (K_{14}^{\theta_n} K_{11}^{\theta_n} + K_{15}^{\theta_n} K_{21}^{\theta_n} + K_{16}^{\theta_n} K_{31}^{\theta_n}) \right\} - \tilde{G}_{41} \\
E_{\omega_y}^{F_x} &= \sum_{n=1}^6 \left\{ -R_{L_n} K_{14}^{L_n} K_{12}^{L_n} - R_{\theta} (K_{14}^{\theta_n} K_{12}^{\theta_n} + K_{15}^{\theta_n} K_{22}^{\theta_n} + K_{16}^{\theta_n} K_{32}^{\theta_n}) \right\} - \tilde{G}_{42} \\
E_{\omega_z}^{F_x} &= \sum_{n=1}^6 \left\{ -R_{L_n} K_{14}^{L_n} K_{13}^{L_n} - R_{\theta} (K_{14}^{\theta_n} K_{13}^{\theta_n} + K_{15}^{\theta_n} K_{23}^{\theta_n} + K_{16}^{\theta_n} K_{33}^{\theta_n}) \right\} - \tilde{G}_{43} \\
E_{t_x}^{F_x} &= \sum_{n=1}^6 \left\{ -R_{L_n} K_{14}^{L_n} K_{14}^{L_n} - R_{\theta} (K_{14}^{\theta_n} K_{14}^{\theta_n} + K_{15}^{\theta_n} K_{24}^{\theta_n} + K_{16}^{\theta_n} K_{34}^{\theta_n}) \right\} - \tilde{G}_{44} \\
E_{t_y}^{F_x} &= \sum_{n=1}^6 \left\{ -R_{L_n} K_{15}^{L_n} K_{15}^{L_n} - R_{\theta} (K_{14}^{\theta_n} K_{15}^{\theta_n} + K_{15}^{\theta_n} K_{25}^{\theta_n} + K_{16}^{\theta_n} K_{35}^{\theta_n}) \right\} - \tilde{G}_{45} \\
E_{t_z}^{F_x} &= \sum_{n=1}^6 \left\{ -R_{L_n} K_{14}^{L_n} K_{16}^{L_n} - R_{\theta} (K_{14}^{\theta_n} K_{16}^{\theta_n} + K_{15}^{\theta_n} K_{26}^{\theta_n} + K_{16}^{\theta_n} K_{36}^{\theta_n}) \right\} - \tilde{G}_{46} \\
E_{\omega_x}^{F_y} &= \sum_{n=1}^6 \left\{ -R_{L_n} K_{15}^{L_n} K_{11}^{L_n} - R_{\theta} (K_{24}^{\theta_n} K_{11}^{\theta_n} + K_{25}^{\theta_n} K_{21}^{\theta_n} + K_{26}^{\theta_n} K_{31}^{\theta_n}) \right\} - \tilde{G}_{51} \\
E_{\omega_y}^{F_y} &= \sum_{n=1}^6 \left\{ -R_{L_n} K_{15}^{L_n} K_{12}^{L_n} - R_{\theta} (K_{24}^{\theta_n} K_{12}^{\theta_n} + K_{25}^{\theta_n} K_{22}^{\theta_n} + K_{26}^{\theta_n} K_{32}^{\theta_n}) \right\} - \tilde{G}_{52}
\end{aligned}$$

$$E_{\omega_z}^{F_y} = \sum_{n=1}^6 \left\{ -R_{L_n} K_{15}^{L_n} K_{13}^{L_n} - R_{\theta} (K_{24}^{\theta_n} K_{13}^{\theta_n} + K_{25}^{\theta_n} K_{23}^{\theta_n} + K_{26}^{\theta_n} K_{33}^{\theta_n}) \right\} - \tilde{G}_{53}$$

$$E_{t_x}^{F_y} = \sum_{n=1}^6 \left\{ -R_{L_n} K_{15}^{L_n} K_{14}^{L_n} - R_{\theta} (K_{24}^{\theta_n} K_{14}^{\theta_n} + K_{25}^{\theta_n} K_{24}^{\theta_n} + K_{26}^{\theta_n} K_{34}^{\theta_n}) \right\} - \tilde{G}_{54}$$

$$E_{t_y}^{F_y} = \sum_{n=1}^6 \left\{ -R_{L_n} K_{15}^{L_n} K_{15}^{L_n} - R_{\theta} (K_{24}^{\theta_n} K_{15}^{\theta_n} + K_{25}^{\theta_n} K_{25}^{\theta_n} + K_{26}^{\theta_n} K_{35}^{\theta_n}) \right\} - \tilde{G}_{55}$$

$$E_{t_z}^{F_y} = \sum_{n=1}^6 \left\{ -R_{L_n} K_{15}^{L_n} K_{16}^{L_n} - R_{\theta} (K_{24}^{\theta_n} K_{16}^{\theta_n} + K_{25}^{\theta_n} K_{26}^{\theta_n} + K_{26}^{\theta_n} K_{36}^{\theta_n}) \right\} - \tilde{G}_{56}$$

$$E_{\omega_x}^{F_z} = \sum_{n=1}^6 \left\{ -R_{L_n} K_{16}^{L_n} K_{11}^{L_n} - R_{\theta} (K_{34}^{\theta_n} K_{11}^{\theta_n} + K_{35}^{\theta_n} K_{21}^{\theta_n} + K_{36}^{\theta_n} K_{31}^{\theta_n}) \right\} - \tilde{G}_{61}$$

$$E_{\omega_y}^{F_z} = \sum_{n=1}^6 \left\{ -R_{L_n} K_{16}^{L_n} K_{12}^{L_n} - R_{\theta} (K_{34}^{\theta_n} K_{12}^{\theta_n} + K_{35}^{\theta_n} K_{22}^{\theta_n} + K_{36}^{\theta_n} K_{32}^{\theta_n}) \right\} - \tilde{G}_{62}$$

$$E_{\omega_z}^{F_z} = \sum_{n=1}^6 \left\{ -R_{L_n} K_{16}^{L_n} K_{13}^{L_n} - R_{\theta} (K_{34}^{\theta_n} K_{13}^{\theta_n} + K_{35}^{\theta_n} K_{23}^{\theta_n} + K_{36}^{\theta_n} K_{33}^{\theta_n}) \right\} - \tilde{G}_{63}$$

$$E_{t_x}^{F_z} = \sum_{n=1}^6 \left\{ -R_{L_n} K_{16}^{L_n} K_{14}^{L_n} - R_{\theta} (K_{34}^{\theta_n} K_{14}^{\theta_n} + K_{35}^{\theta_n} K_{24}^{\theta_n} + K_{36}^{\theta_n} K_{34}^{\theta_n}) \right\} - \tilde{G}_{64}$$

$$E_{t_y}^{F_z} = \sum_{n=1}^6 \left\{ -R_{L_n} K_{16}^{L_n} K_{15}^{L_n} - R_{\theta} (K_{34}^{\theta_n} K_{15}^{\theta_n} + K_{35}^{\theta_n} K_{25}^{\theta_n} + K_{36}^{\theta_n} K_{35}^{\theta_n}) \right\} - \tilde{G}_{65}$$

$$E_{t_z}^{F_z} = \sum_{n=1}^6 \left\{ -R_{L_n} K_{16}^{L_n} K_{16}^{L_n} - R_{\theta} (K_{34}^{\theta_n} K_{16}^{\theta_n} + K_{35}^{\theta_n} K_{26}^{\theta_n} + K_{36}^{\theta_n} K_{36}^{\theta_n}) \right\} - \tilde{G}_{66}$$

$$E_{i_1}^{m_x} = K_{11}^{L_1} K_t, E_{i_2}^{m_x} = K_{11}^{L_2} K_t, E_{i_3}^{m_x} = K_{11}^{L_3} K_t,$$

$$E_{i_4}^{m_x} = K_{11}^{L_4} K_t, E_{i_5}^{m_x} = K_{11}^{L_5} K_t, E_{i_6}^{m_x} = K_{11}^{L_6} K_t$$

$$E_{i_1}^{m_y} = K_{12}^{L_1} K_t, E_{i_2}^{m_y} = K_{12}^{L_2} K_t, E_{i_3}^{m_y} = K_{12}^{L_3} K_t,$$

$$E_{i_4}^{m_y} = K_{12}^{L_4} K_t, E_{i_5}^{m_y} = K_{12}^{L_5} K_t, E_{i_6}^{m_y} = K_{12}^{L_6} K_t$$

$$E_{i_1}^{m_z} = K_{13}^{L_1} K_t, E_{i_2}^{m_z} = K_{13}^{L_2} K_t, E_{i_3}^{m_z} = K_{13}^{L_3} K_t,$$

$$E_{i_4}^{m_z} = K_{13}^{L_4} K_t, E_{i_5}^{m_z} = K_{13}^{L_5} K_t, E_{i_6}^{m_z} = K_{13}^{L_6} K_t$$

$$E_{i_1}^{F_x} = K_{14}^{L_1} K_t, E_{i_2}^{F_x} = K_{14}^{L_2} K_t, E_{i_3}^{F_x} = K_{14}^{L_3} K_t,$$

$$E_{i_4}^{F_x} = K_{14}^{L_4} K_t, E_{i_5}^{F_x} = K_{14}^{L_5} K_t, E_{i_6}^{F_x} = K_{14}^{L_6} K_t$$

$$E_{i_1}^{F_y} = K_{15}^{L_1} K_t, E_{i_2}^{F_y} = K_{15}^{L_2} K_t, E_{i_3}^{F_y} = K_{15}^{L_3} K_t,$$

$$E_{i_4}^{F_y} = K_{15}^{L_4} K_t, E_{i_5}^{F_y} = K_{15}^{L_5} K_t, E_{i_6}^{F_y} = K_{15}^{L_6} K_t$$

$$E_{i_1}^{F_z} = K_{16}^{L_1} K_t, E_{i_2}^{F_z} = K_{16}^{L_2} K_t, E_{i_3}^{F_z} = K_{16}^{L_3} K_t,$$

$$E_{i_4}^{F_z} = K_{16}^{L_4} K_t, E_{i_5}^{F_z} = K_{16}^{L_5} K_t, E_{i_6}^{F_z} = K_{16}^{L_6} K_t$$

$$E_{\omega_x}^{v_1} = -K_{11}^{L_1} K_t, E_{\omega_x}^{v_2} = -K_{11}^{L_2} K_t, E_{\omega_x}^{v_3} = -K_{11}^{L_3} K_t,$$

$$E_{\omega_x}^{v_4} = -K_{11}^{L_4} K_t, E_{\omega_x}^{v_5} = -K_{11}^{L_5} K_t, E_{\omega_x}^{v_6} = -K_{11}^{L_6} K_t$$

$$E_{\omega_y}^{v_1} = -K_{12}^{L_1} K_t, E_{\omega_y}^{v_2} = -K_{12}^{L_2} K_t, E_{\omega_y}^{v_3} = -K_{12}^{L_3} K_t,$$

$$E_{\omega_y}^{v_4} = -K_{12}^{L_4} K_t, E_{\omega_y}^{v_5} = -K_{12}^{L_5} K_t, E_{\omega_y}^{v_6} = -K_{12}^{L_6} K_t$$

$$E_{\omega_z}^{v_1} = -K_{13}^{L_1} K_t, E_{\omega_z}^{v_2} = -K_{13}^{L_2} K_t, E_{\omega_z}^{v_3} = -K_{13}^{L_3} K_t,$$

$$E_{\omega_z}^{v_4} = -K_{13}^{L_4} K_t, E_{\omega_z}^{v_5} = -K_{13}^{L_5} K_t, E_{\omega_z}^{v_6} = -K_{13}^{L_6} K_t$$

$$E_{t_x}^{v_1} = -K_{14}^{L_1} K_t, E_{t_x}^{v_2} = -K_{14}^{L_2} K_t, E_{t_x}^{v_3} = -K_{14}^{L_3} K_t,$$

$$E_{t_x}^{v_4} = -K_{14}^{L_4} K_t, E_{t_x}^{v_5} = -K_{14}^{L_5} K_t, E_{t_x}^{v_6} = -K_{14}^{L_6} K_t$$

$$E_{t_y}^{v_1} = -K_{15}^{L_1} K_t, E_{t_y}^{v_2} = -K_{15}^{L_2} K_t, E_{t_y}^{v_3} = -K_{15}^{L_3} K_t,$$

$$E_{t_y}^{v_4} = -K_{15}^{L_4} K_t, E_{t_y}^{v_5} = -K_{15}^{L_5} K_t, E_{t_y}^{v_6} = -K_{15}^{L_6} K_t$$

$$E_{t_z}^{v_1} = -K_{16}^{L_1} K_t, E_{t_z}^{v_2} = -K_{16}^{L_2} K_t, E_{t_z}^{v_3} = -K_{16}^{L_3} K_t,$$

$$E_{t_z}^{v_4} = -K_{16}^{L_4} K_t, E_{t_z}^{v_5} = -K_{16}^{L_5} K_t, E_{t_z}^{v_6} = -K_{16}^{L_6} K_t$$

$$E_R^{v_1} = R_1, E_R^{v_2} = R_2, E_R^{v_3} = R_3,$$

$$E_R^{v_4} = R_4, E_R^{v_5} = R_5, E_R^{v_6} = R_6$$

$$T_{v_{ex}}^{v_i} = V_{ex_i}, i=1..6$$

$$n_1 = \frac{2}{3}, n_2 = \frac{2}{3}, n_3 = \frac{2}{3}, n_4 = \frac{2}{3}, n_5 = \frac{2}{3}, n_6 = \frac{2}{3}$$

SPM BAĞ-GRAFİK MODELİ SİMÜLASYON KODLARI

```

clear all;
deg2rad = pi/180;
theta_p=0;
theta_b=2*(pi/3);
% giriş olarak verilecek

alfa=0;
beta=0;
gama=0;
ax=gama;
ay=beta;
az=alfa;
eksen1=0;
eksen2=0;
eksen3=0.35;
wx=0;wy=0;wz=0;tx=0;ty=0;tz=0;
V1=4;V2=4;V3=4;V4=4;V5=4;V6=4;% VOLTAJ GİRİŞ YAPILACAK
i1=0;i2=0;i3=0;i4=0;i5=0;i6=0;
X_dot_0=[0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0];
T_I_0=zeros(30,6);
X_0=[wx;wy;wz;tx;ty;tz;i1;i2;i3;i4;i5;i6];
lamda_1=(pi/3)-(theta_p/2);
lamda_3=(3*pi/3)-(theta_p/2);
lamda_5=(5*pi/3)-(theta_p/2);
lamda_2=(lamda_1+theta_p);
lamda_4=(lamda_3+theta_p);
lamda_6=(lamda_5+theta_p);

Blamda_1=(pi/3)-(theta_b/2);
Blamda_3=(3*pi/3)-(theta_b/2);
Blamda_5=(5*pi/3)-(theta_b/2);
Blamda_2=(Blamda_1+theta_b);
Blamda_4=(Blamda_3+theta_b);
Blamda_6=(Blamda_5+theta_b);
rp=0.150;%radius of upper plate
rb=0.175;%radius of lower plate

eksen1r=-0.01;
eksen2r=0;
eksen3r=0.4;
axr=0;
ayr=0;
azr=0;

```

```

Rr=[ (cos(ayr)*cos(azr)) (cos(azr)*sin(ayr)*sin(axr)+sin(azr)*cos(axr)) -
cos(axr)*sin(ayr)*cos(azr)+sin(axr)*sin(azr);
    -(sin(azr)*cos(ayr)) -sin(axr)*sin(ayr)*sin(azr)+cos(axr)*cos(azr)
sin(ayr)*sin(azr)*cos(axr)+cos(azr)*sin(axr);
    (sin(ayr)) -cos(ayr)*sin(axr) (cos(axr)*cos(ayr))] ;%çıkış olarak
verilecek

q2r=Rr*[rp*cos(lamda_2);rp*sin(lamda_2);0]+[eksen1r;eksen2r;eksen3r-0.04];
q3r=Rr*[rp*cos(lamda_3);rp*sin(lamda_3);0]+[eksen1r;eksen2r;eksen3r-0.04];
q1r=Rr*[rp*cos(lamda_5);rp*sin(lamda_5);0]+[eksen1r;eksen2r;eksen3r-0.04];
B1r=[rb*cos(Blamda_1);rb*sin(Blamda_1);0.0352];
B2r=[rb*cos(Blamda_2);rb*sin(Blamda_2);0.0352];
B3r=[rb*cos(Blamda_4);rb*sin(Blamda_4);0.0352];

L1r=norm(q1r-B1r);L2r=norm(q2r-B1r);L3r=norm(q2r-B2r);L4r=norm(q3r-
B2r);L5r=norm(q3r-B3r);L6r=norm(q1r-B3r);

step=0.0001;
simtime=3;
nd=0;
kp=200;kd=10;

e1_0=0;e2_0=0;e3_0=0;e4_0=0;e5_0=0;e6_0=0;

for t=0:step:simtime
    nd=nd+1;
    R=[ (cos(ay)*cos(az)) (cos(az)*sin(ay)*sin(ax)+sin(az)*cos(ax)) -
cos(ax)*sin(ay)*cos(az)+sin(ax)*sin(az);
        -(sin(az)*cos(ay)) -sin(ax)*sin(ay)*sin(az)+cos(ax)*cos(az)
sin(ay)*sin(az)*cos(ax)+cos(az)*sin(ax);
        (sin(ay)) -cos(ay)*sin(ax) (cos(ax)*cos(ay))] ;%çıkış olarak verilecek

    q2=R*[rp*cos(lamda_2);rp*sin(lamda_2);0]+[eksen1;eksen2;eksen3-0.04];
    q3=R*[rp*cos(lamda_3);rp*sin(lamda_3);0]+[eksen1;eksen2;eksen3-0.04];
    q1=R*[rp*cos(lamda_5);rp*sin(lamda_5);0]+[eksen1;eksen2;eksen3-0.04];
    B1=[rb*cos(Blamda_1);rb*sin(Blamda_1);0.0352];
    B2=[rb*cos(Blamda_2);rb*sin(Blamda_2);0.0352];
    B3=[rb*cos(Blamda_4);rb*sin(Blamda_4);0.0352];
    Pi=[q2 q2 q3 q3 q1 q1];
    Bi=[B1 B1 B2 B2 B3 B3];
    l1=(q1-B1);l2=(q2-B1);l3=(q2-B2);l4=(q3-B2);l5=(q3-B3);l6=(q1-B3);
    l=[l1 l2 l3 l4 l5 l6];%bacak vektörleri
    L1=norm(q1-B1);L2=norm(q2-B1);L3=norm(q2-B2);L4=norm(q3-B2);L5=norm(q3-
    B3);L6=norm(q1-B3);
    L=[L1 L2 L3 L4 L5 L6];%bacak uzunlukları
    e1=(L1r-L1);
    e2=(L2r-L2);
    e3=(L3r-L3);
    e4=(L4r-L4);
    e5=(L5r-L5);
    e6=(L6r-L6);
    de1=(e1-e1_0)/step;
    de2=(e2-e2_0)/step;
    de3=(e3-e3_0)/step;
    de4=(e4-e4_0)/step;
    de5=(e5-e5_0)/step;
    de6=(e6-e6_0)/step;
    e1_0=e1;e2_0=e2;e3_0=e3;e4_0=e4;e5_0=e5;e6_0=e6;
    V1=((e1*kp+de1*kd)*1000+11000)*(20/(2^16));

```

```

V2=((e2*kp+de2*kd)*1000+11000)*(20/(2^16));
V3=((e3*kp+de3*kd)*1000+11000)*(20/(2^16));
V4=((e4*kp+de4*kd)*1000+11000)*(20/(2^16));
V5=((e5*kp+de5*kd)*1000+11000)*(20/(2^16));
V6=((e6*kp+de6*kd)*1000+11000)*(20/(2^16));

s1=l1/L1;s2=l2/L2;s3=l3/L3;s4=l4/L4;s5=l5/L5;s6=l6/L6;%bacak birim
vektörleri
tt1=asin(s1);tt2=asin(s2);tt3=asin(s3);tt4=asin(s4);tt5=asin(s5);tt6=asin(s
6);
K_L1=[(s1(3,1)*q1(2,1)-s1(2,1)*q1(3,1)) (s1(1,1)*q1(3,1)-s1(3,1)*q1(1,1))
(s1(2,1)*q1(1,1)-s1(1,1)*q1(2,1)) s1(1,1) s1(2,1) s1(3,1)];
K_L2=[(s2(3,1)*q2(2,1)-s2(2,1)*q2(3,1)) (s2(1,1)*q2(3,1)-s2(3,1)*q2(1,1))
(s2(2,1)*q2(1,1)-s2(1,1)*q2(2,1)) s2(1,1) s2(2,1) s2(3,1)];
K_L3=[(s3(3,1)*q2(2,1)-s3(2,1)*q2(3,1)) (s3(1,1)*q2(3,1)-s3(3,1)*q2(1,1))
(s3(2,1)*q2(1,1)-s3(1,1)*q2(2,1)) s3(1,1) s3(2,1) s3(3,1)];
K_L4=[(s4(3,1)*q3(2,1)-s4(2,1)*q3(3,1)) (s4(1,1)*q3(3,1)-s4(3,1)*q3(1,1))
(s4(2,1)*q3(1,1)-s4(1,1)*q3(2,1)) s4(1,1) s4(2,1) s4(3,1)];
K_L5=[(s5(3,1)*q3(2,1)-s5(2,1)*q3(3,1)) (s5(1,1)*q3(3,1)-s5(3,1)*q3(1,1))
(s5(2,1)*q3(1,1)-s5(1,1)*q3(2,1)) s5(1,1) s5(2,1) s5(3,1)];
K_L6=[(s6(3,1)*q1(2,1)-s6(2,1)*q1(3,1)) (s6(1,1)*q1(3,1)-s6(3,1)*q1(1,1))
(s6(2,1)*q1(1,1)-s6(1,1)*q1(2,1)) s6(1,1) s6(2,1) s6(3,1)];

K_th1=[(s1(2,1)*q1(2,1)+s1(3,1)*q1(3,1)) (-s1(2,1)*q1(1,1)) (-
s1(3,1)*q1(1,1)) 0 -s1(3,1) s1(2,1);
(-s1(1,1)*q1(2,1)) (s1(1,1)*q1(1,1)+s1(3,1)*q1(3,1)) (-
s1(3,1)*q1(2,1)) s1(3,1) 0 -s1(1,1);
(-s1(1,1)*q1(3,1))*0 (-s1(2,1)*q1(3,1))*0
(s1(1,1)*q1(1,1)+s1(2,1)*q1(2,1))*0 -s1(2,1)*0 s1(1,1)*0 0]/L1;
K_th2=[(s2(2,1)*q2(2,1)+s2(3,1)*q2(3,1)) (-s2(2,1)*q2(1,1)) (-
s2(3,1)*q2(1,1)) 0 -s2(3,1) s2(2,1);
(-s2(1,1)*q2(2,1)) (s2(1,1)*q2(1,1)+s2(3,1)*q2(3,1)) (-
s2(3,1)*q2(2,1)) s2(3,1) 0 -s2(1,1);
(-s2(1,1)*q2(3,1))*0 (-s2(2,1)*q2(3,1))*0
(s2(1,1)*q2(1,1)+s2(2,1)*q2(2,1))*0 -s2(2,1)*0 s2(1,1)*0 0]/L2;
K_th3=[(s3(2,1)*q2(2,1)+s3(3,1)*q2(3,1)) (-s3(2,1)*q2(1,1)) (-
s3(3,1)*q2(1,1)) 0 -s3(3,1) s3(2,1);
(-s3(1,1)*q2(2,1)) (s3(1,1)*q2(1,1)+s3(3,1)*q2(3,1)) (-
s3(3,1)*q2(2,1)) s3(3,1) 0 -s3(1,1);
(-s3(1,1)*q2(3,1))*0 (-s3(2,1)*q2(3,1))*0
(s3(1,1)*q2(1,1)+s3(2,1)*q2(2,1))*0 -s3(2,1)*0 s3(1,1)*0 0]/L3;
K_th4=[(s4(2,1)*q3(2,1)+s4(3,1)*q3(3,1)) (-s4(2,1)*q3(1,1)) (-
s4(3,1)*q3(1,1)) 0 -s4(3,1) s4(2,1);
(-s4(1,1)*q3(2,1)) (s4(1,1)*q3(1,1)+s4(3,1)*q3(3,1)) (-
s4(3,1)*q3(2,1)) s4(3,1) 0 -s4(1,1);
(-s4(1,1)*q3(3,1))*0 (-s4(2,1)*q3(3,1))*0
(s4(1,1)*q3(1,1)+s4(2,1)*q3(2,1))*0 -s4(2,1)*0 s4(1,1)*0 0]/L4;
K_th5=[(s5(2,1)*q3(2,1)+s5(3,1)*q3(3,1)) (-s5(2,1)*q3(1,1)) (-
s5(3,1)*q3(1,1)) 0 -s5(3,1) s5(2,1);
(-s5(1,1)*q3(2,1)) (s5(1,1)*q3(1,1)+s5(3,1)*q3(3,1)) (-
s5(3,1)*q3(2,1)) s5(3,1) 0 -s5(1,1);
(-s5(1,1)*q3(3,1))*0 (-s5(2,1)*q3(3,1))*0
(s5(1,1)*q3(1,1)+s5(2,1)*q3(2,1))*0 -s5(2,1)*0 s5(1,1)*0 0]/L5;
K_th6=[(s6(2,1)*q1(2,1)+s6(3,1)*q1(3,1)) (-s6(2,1)*q1(1,1)) (-
s6(3,1)*q1(1,1)) 0 -s6(3,1) s6(2,1);
(-s6(1,1)*q1(2,1)) (s6(1,1)*q1(1,1)+s6(3,1)*q1(3,1)) (-
s6(3,1)*q1(2,1)) s6(3,1) 0 -s6(1,1);
(-s6(1,1)*q1(3,1))*0 (-s6(2,1)*q1(3,1))*0
(s6(1,1)*q1(1,1)+s6(2,1)*q1(2,1))*0 -s6(2,1)*0 s6(1,1)*0 0]/L6;

```

```

T_I=[1 0 0 0 0 0;
0 1 0 0 0 0;
0 0 1 0 0 0;
0 0 0 1 0 0;
0 0 0 0 1 0;
0 0 0 0 0 1;
K_L1;K_th1;K_L2;K_th2;K_L3;K_th3;K_L4;K_th4;K_L5;K_th5;K_L6;K_th6];
T_I_dot=(T_I-T_I_0)/step;
T_I_0=T_I;

%Bacak Ataletleri
r1=0.012;r2=0.023;mp=1.387;md=0.44;mu=0.135;mo=mu+md;
Lxx = 7934128.04 ;Lxy = 9.11 ;Lxz = -0.01;
Lyx = 9.11 ;Lyy = 7936408.64 ;Lyz = -0.37;
Lzx = -0.01 ;Lzy = -0.37 ;Lzz = 15837275.73;
I_b1x=(mu+md)*(3*(r2^2 + r1^2) +
0.2732^2)/12;I_b1y=I_b1x;I_b1z=(mu+md)*(r2^2 + r1^2)/2;
I_b2x=(mu+md)*(3*(r2^2 + r1^2) +
0.2732^2)/12;I_b2y=I_b2x;I_b2z=(mu+md)*(r2^2 + r1^2)/2;
I_b3x=(mu+md)*(3*(r2^2 + r1^2) +
0.2732^2)/12;I_b3y=I_b3x;I_b3z=(mu+md)*(r2^2 + r1^2)/2;
I_b4x=(mu+md)*(3*(r2^2 + r1^2) +
0.2732^2)/12;I_b4y=I_b4x;I_b4z=(mu+md)*(r2^2 + r1^2)/2;
I_b5x=(mu+md)*(3*(r2^2 + r1^2) +
0.2732^2)/12;I_b5y=I_b5x;I_b5z=(mu+md)*(r2^2 + r1^2)/2;
I_b6x=(mu+md)*(3*(r2^2 + r1^2) +
0.2732^2)/12;I_b6y=I_b6x;I_b6z=(mu+md)*(r2^2 + r1^2)/2;
I_b1=[I_b1x 0 0;0 I_b1y 0;0 0 I_b1z];I_b2=[I_b2x 0 0;0 I_b2y 0;0 0
I_b2z];I_b3=[I_b3x 0 0;0 I_b3y 0;0 0 I_b3z];
I_b4=[I_b4x 0 0;0 I_b4y 0;0 0 I_b4z];I_b5=[I_b5x 0 0;0 I_b5y 0;0 0
I_b5z];I_b6=[I_b6x 0 0;0 I_b6y 0;0 0 I_b6z];
% Platform ataleti
I_px=Lxx*10^-9;I_py=Lyy*10^-9;I_pz=Lzz*10^-9;
I_p=[Lxx Lxy Lxz;Lyx Lyy Lyz;Lzx Lzy Lzz]*10^-9;
m_p=[mp 0 0;0 mp 0;0 0 mp];
% Atalet matrisi
II=[I_px I_py I_pz mp mp mp mo I_b1x I_b1y I_b1z mo I_b2x I_b2y I_b2z mo
I_b3x I_b3y I_b3z mo I_b4x I_b4y I_b4z mo I_b5x I_b5y I_b5z mo I_b6x I_b6y
I_b6z];
I=diag(II);
I_bar=(T_I')*I*T_I;
G_bar=(T_I')*I*T_I_dot;
Hx=I_px*wx;Hy=I_py*wy;Hz=I_pz*wz;
RL=0.001;Rt=0.002;Kt=11;g=9.81;La=1/(1.5*10^-3);Ra=10;
E_mx_wx=-RL*K_L1(1,1)*K_L1(1,1)-Rt*K_th1(1,1)*K_th1(1,1)-
Rt*K_th1(1,2)*K_th1(2,1)-Rt*K_th1(1,3)*K_th1(3,1)-RL*K_L2(1,1)*K_L2(1,1)-
Rt*K_th2(1,1)*K_th2(1,1)-Rt*K_th2(1,2)*K_th2(2,1)-Rt*K_th2(1,3)*K_th2(3,1)-
RL*K_L3(1,1)*K_L3(1,1)-Rt*K_th3(1,1)*K_th3(1,1)-Rt*K_th3(1,2)*K_th3(2,1)-
Rt*K_th3(1,3)*K_th3(3,1)-RL*K_L4(1,1)*K_L4(1,1)-Rt*K_th4(1,1)*K_th4(1,1)-
Rt*K_th4(1,2)*K_th4(2,1)-Rt*K_th4(1,3)*K_th4(3,1)-RL*K_L5(1,1)*K_L5(1,1)-
Rt*K_th5(1,1)*K_th5(1,1)-Rt*K_th5(1,2)*K_th5(2,1)-Rt*K_th5(1,3)*K_th5(3,1)-
RL*K_L6(1,1)*K_L6(1,1)-Rt*K_th6(1,1)*K_th6(1,1)-Rt*K_th6(1,2)*K_th6(2,1)-
Rt*K_th6(1,3)*K_th6(3,1)-G_bar(1,1);
E_mx_wy=-RL*K_L1(1,1)*K_L1(1,2)-Rt*K_th1(1,1)*K_th1(1,2)-
Rt*K_th1(1,2)*K_th1(2,2)-Rt*K_th1(1,3)*K_th1(3,2)-RL*K_L2(1,1)*K_L2(1,2)-
Rt*K_th2(1,1)*K_th2(1,2)-Rt*K_th2(1,2)*K_th2(2,2)-Rt*K_th2(1,3)*K_th2(3,2)-
RL*K_L3(1,1)*K_L3(1,2)-Rt*K_th3(1,1)*K_th3(1,2)-Rt*K_th3(1,2)*K_th3(2,2)-
Rt*K_th3(1,3)*K_th3(3,2)-RL*K_L4(1,1)*K_L4(1,2)-Rt*K_th4(1,1)*K_th4(1,2)-
Rt*K_th4(1,2)*K_th4(2,2)-Rt*K_th4(1,3)*K_th4(3,2)-RL*K_L5(1,1)*K_L5(1,2)-

```

$Rt*K_th5(1,1)*K_th5(1,2)-Rt*K_th5(1,2)*K_th5(2,2)-Rt*K_th5(1,3)*K_th5(3,2)-$
 $RL*K_L6(1,1)*K_L6(1,2)-Rt*K_th6(1,1)*K_th6(1,2)-Rt*K_th6(1,2)*K_th6(2,2)-$
 $Rt*K_th6(1,3)*K_th6(3,2)-G_bar(1,2)-Hz;$
 $E_mx_wz=-RL*K_L1(1,1)*K_L1(1,3)-Rt*K_th1(1,1)*K_th1(1,3)-$
 $Rt*K_th1(1,2)*K_th1(2,3)-Rt*K_th1(1,3)*K_th1(3,3)-RL*K_L2(1,1)*K_L2(1,3)-$
 $Rt*K_th2(1,1)*K_th2(1,3)-Rt*K_th2(1,2)*K_th2(2,3)-Rt*K_th2(1,3)*K_th2(3,3)-$
 $RL*K_L3(1,1)*K_L3(1,3)-Rt*K_th3(1,1)*K_th3(1,3)-Rt*K_th3(1,2)*K_th3(2,3)-$
 $Rt*K_th3(1,3)*K_th3(3,3)-RL*K_L4(1,1)*K_L4(1,3)-Rt*K_th4(1,1)*K_th4(1,3)-$
 $Rt*K_th4(1,2)*K_th4(2,3)-Rt*K_th4(1,3)*K_th4(3,3)-RL*K_L5(1,1)*K_L5(1,3)-$
 $Rt*K_th5(1,1)*K_th5(1,3)-Rt*K_th5(1,2)*K_th5(2,3)-Rt*K_th5(1,3)*K_th5(3,3)-$
 $RL*K_L6(1,1)*K_L6(1,3)-Rt*K_th6(1,1)*K_th6(1,3)-Rt*K_th6(1,2)*K_th6(2,3)-$
 $Rt*K_th6(1,3)*K_th6(3,3)-G_bar(1,3)+Hy;$
 $E_mx_tx=-RL*K_L1(1,1)*K_L1(1,4)-Rt*K_th1(1,1)*K_th1(1,4)-$
 $Rt*K_th1(1,2)*K_th1(2,4)-Rt*K_th1(1,3)*K_th1(3,4)-RL*K_L2(1,1)*K_L2(1,4)-$
 $Rt*K_th2(1,1)*K_th2(1,4)-Rt*K_th2(1,2)*K_th2(2,4)-Rt*K_th2(1,3)*K_th2(3,4)-$
 $RL*K_L3(1,1)*K_L3(1,4)-Rt*K_th3(1,1)*K_th3(1,4)-Rt*K_th3(1,2)*K_th3(2,4)-$
 $Rt*K_th3(1,3)*K_th3(3,4)-RL*K_L4(1,1)*K_L4(1,4)-Rt*K_th4(1,1)*K_th4(1,4)-$
 $Rt*K_th4(1,2)*K_th4(2,4)-Rt*K_th4(1,3)*K_th4(3,4)-RL*K_L5(1,1)*K_L5(1,4)-$
 $Rt*K_th5(1,1)*K_th5(1,4)-Rt*K_th5(1,2)*K_th5(2,4)-Rt*K_th5(1,3)*K_th5(3,4)-$
 $RL*K_L6(1,1)*K_L6(1,4)-Rt*K_th6(1,1)*K_th6(1,4)-Rt*K_th6(1,2)*K_th6(2,4)-$
 $Rt*K_th6(1,3)*K_th6(3,4)-G_bar(1,4);$
 $E_mx_ty=-RL*K_L1(1,1)*K_L1(1,5)-Rt*K_th1(1,1)*K_th1(1,5)-$
 $Rt*K_th1(1,2)*K_th1(2,5)-Rt*K_th1(1,3)*K_th1(3,5)-RL*K_L2(1,1)*K_L2(1,5)-$
 $Rt*K_th2(1,1)*K_th2(1,5)-Rt*K_th2(1,2)*K_th2(2,5)-Rt*K_th2(1,3)*K_th2(3,5)-$
 $RL*K_L3(1,1)*K_L3(1,5)-Rt*K_th3(1,1)*K_th3(1,5)-Rt*K_th3(1,2)*K_th3(2,5)-$
 $Rt*K_th3(1,3)*K_th3(3,5)-RL*K_L4(1,1)*K_L4(1,5)-Rt*K_th4(1,1)*K_th4(1,5)-$
 $Rt*K_th4(1,2)*K_th4(2,5)-Rt*K_th4(1,3)*K_th4(3,5)-RL*K_L5(1,1)*K_L5(1,5)-$
 $Rt*K_th5(1,1)*K_th5(1,5)-Rt*K_th5(1,2)*K_th5(2,5)-Rt*K_th5(1,3)*K_th5(3,5)-$
 $RL*K_L6(1,1)*K_L6(1,5)-Rt*K_th6(1,1)*K_th6(1,5)-Rt*K_th6(1,2)*K_th6(2,5)-$
 $Rt*K_th6(1,3)*K_th6(3,5)-G_bar(1,5);$
 $E_mx_tz=-RL*K_L1(1,1)*K_L1(1,6)-Rt*K_th1(1,1)*K_th1(1,6)-$
 $Rt*K_th1(1,2)*K_th1(2,6)-Rt*K_th1(1,3)*K_th1(3,6)-RL*K_L2(1,1)*K_L2(1,6)-$
 $Rt*K_th2(1,1)*K_th2(1,6)-Rt*K_th2(1,2)*K_th2(2,6)-Rt*K_th2(1,3)*K_th2(3,6)-$
 $RL*K_L3(1,1)*K_L3(1,6)-Rt*K_th3(1,1)*K_th3(1,6)-Rt*K_th3(1,2)*K_th3(2,6)-$
 $Rt*K_th3(1,3)*K_th3(3,6)-RL*K_L4(1,1)*K_L4(1,6)-Rt*K_th4(1,1)*K_th4(1,6)-$
 $Rt*K_th4(1,2)*K_th4(2,6)-Rt*K_th4(1,3)*K_th4(3,6)-RL*K_L5(1,1)*K_L5(1,6)-$
 $Rt*K_th5(1,1)*K_th5(1,6)-Rt*K_th5(1,2)*K_th5(2,6)-Rt*K_th5(1,3)*K_th5(3,6)-$
 $RL*K_L6(1,1)*K_L6(1,6)-Rt*K_th6(1,1)*K_th6(1,6)-Rt*K_th6(1,2)*K_th6(2,6)-$
 $Rt*K_th6(1,3)*K_th6(3,6)-G_bar(1,6);$

$E_my_wx=-RL*K_L1(1,2)*K_L1(1,1)-Rt*K_th1(2,1)*K_th1(1,1)-$
 $Rt*K_th1(2,2)*K_th1(2,1)-Rt*K_th1(2,3)*K_th1(3,1)-RL*K_L2(1,2)*K_L2(1,1)-$
 $Rt*K_th2(2,1)*K_th2(1,1)-Rt*K_th2(2,2)*K_th2(2,1)-Rt*K_th2(2,3)*K_th2(3,1)-$
 $RL*K_L3(1,2)*K_L3(1,1)-Rt*K_th3(2,1)*K_th3(1,1)-Rt*K_th3(2,2)*K_th3(2,1)-$
 $Rt*K_th3(2,3)*K_th3(3,1)-RL*K_L4(1,2)*K_L4(1,1)-Rt*K_th4(2,1)*K_th4(1,1)-$
 $Rt*K_th4(2,2)*K_th4(2,1)-Rt*K_th4(2,3)*K_th4(3,1)-RL*K_L5(1,2)*K_L5(1,1)-$
 $Rt*K_th5(2,1)*K_th5(1,1)-Rt*K_th5(2,2)*K_th5(2,1)-Rt*K_th5(2,3)*K_th5(3,1)-$
 $RL*K_L6(1,2)*K_L6(1,1)-Rt*K_th6(2,1)*K_th6(1,1)-Rt*K_th6(2,2)*K_th6(2,1)-$
 $Rt*K_th6(2,3)*K_th6(3,1)-G_bar(2,1)+Hz;$

$E_my_wy=-RL*K_L1(1,2)*K_L1(1,2)-Rt*K_th1(2,1)*K_th1(1,2)-$
 $Rt*K_th1(2,2)*K_th1(2,2)-Rt*K_th1(2,3)*K_th1(3,2)-RL*K_L2(1,2)*K_L2(1,2)-$
 $Rt*K_th2(2,1)*K_th2(1,2)-Rt*K_th2(2,2)*K_th2(2,2)-Rt*K_th2(2,3)*K_th2(3,2)-$
 $RL*K_L3(1,2)*K_L3(1,2)-Rt*K_th3(2,1)*K_th3(1,2)-Rt*K_th3(2,2)*K_th3(2,2)-$
 $Rt*K_th3(2,3)*K_th3(3,2)-RL*K_L4(1,2)*K_L4(1,2)-Rt*K_th4(2,1)*K_th4(1,2)-$
 $Rt*K_th4(2,2)*K_th4(2,2)-Rt*K_th4(2,3)*K_th4(3,2)-RL*K_L5(1,2)*K_L5(1,2)-$
 $Rt*K_th5(2,1)*K_th5(1,2)-Rt*K_th5(2,2)*K_th5(2,2)-Rt*K_th5(2,3)*K_th5(3,2)-$
 $RL*K_L6(1,2)*K_L6(1,2)-Rt*K_th6(2,1)*K_th6(1,2)-Rt*K_th6(2,2)*K_th6(2,2)-$
 $Rt*K_th6(2,3)*K_th6(3,2)-G_bar(2,2);$

$E_my_wz=-RL*K_L1(1,2)*K_L1(1,3)-Rt*K_th1(2,1)*K_th1(1,3)-$
 $Rt*K_th1(2,2)*K_th1(2,3)-Rt*K_th1(2,3)*K_th1(3,3)-RL*K_L2(1,2)*K_L2(1,3)-$

$RL*K_L6(1,3)*K_L6(1,3)-Rt*K_th6(3,1)*K_th6(1,3)-Rt*K_th6(3,2)*K_th6(2,3)-$
 $Rt*K_th6(3,3)*K_th6(3,3)-G_bar(3,3);$
 $E_mz_tx=-RL*K_L1(1,3)*K_L1(1,4)-Rt*K_th1(3,1)*K_th1(1,4)-$
 $Rt*K_th1(3,2)*K_th1(2,4)-Rt*K_th1(3,3)*K_th1(3,4)-RL*K_L2(1,3)*K_L2(1,4)-$
 $Rt*K_th2(3,1)*K_th2(1,4)-Rt*K_th2(3,2)*K_th2(2,4)-Rt*K_th2(3,3)*K_th2(3,4)-$
 $RL*K_L3(1,3)*K_L3(1,4)-Rt*K_th3(3,1)*K_th3(1,4)-Rt*K_th3(3,2)*K_th3(2,4)-$
 $Rt*K_th3(3,3)*K_th3(3,4)-RL*K_L4(1,3)*K_L4(1,4)-Rt*K_th4(3,1)*K_th4(1,4)-$
 $Rt*K_th4(3,2)*K_th4(2,4)-Rt*K_th4(3,3)*K_th4(3,4)-RL*K_L5(1,3)*K_L5(1,4)-$
 $Rt*K_th5(3,1)*K_th5(1,4)-Rt*K_th5(3,2)*K_th5(2,4)-Rt*K_th5(3,3)*K_th5(3,4)-$
 $RL*K_L6(1,3)*K_L6(1,4)-Rt*K_th6(3,1)*K_th6(1,4)-Rt*K_th6(3,2)*K_th6(2,4)-$
 $Rt*K_th6(3,3)*K_th6(3,4)-G_bar(3,4);$
 $E_mz_ty=-RL*K_L1(1,3)*K_L1(1,5)-Rt*K_th1(3,1)*K_th1(1,5)-$
 $Rt*K_th1(3,2)*K_th1(2,5)-Rt*K_th1(3,3)*K_th1(3,5)-RL*K_L2(1,3)*K_L2(1,5)-$
 $Rt*K_th2(3,1)*K_th2(1,5)-Rt*K_th2(3,2)*K_th2(2,5)-Rt*K_th2(3,3)*K_th2(3,5)-$
 $RL*K_L3(1,3)*K_L3(1,5)-Rt*K_th3(3,1)*K_th3(1,5)-Rt*K_th3(3,2)*K_th3(2,5)-$
 $Rt*K_th3(3,3)*K_th3(3,5)-RL*K_L4(1,3)*K_L4(1,5)-Rt*K_th4(3,1)*K_th4(1,5)-$
 $Rt*K_th4(3,2)*K_th4(2,5)-Rt*K_th4(3,3)*K_th4(3,5)-RL*K_L5(1,3)*K_L5(1,5)-$
 $Rt*K_th5(3,1)*K_th5(1,5)-Rt*K_th5(3,2)*K_th5(2,5)-Rt*K_th5(3,3)*K_th5(3,5)-$
 $RL*K_L6(1,3)*K_L6(1,5)-Rt*K_th6(3,1)*K_th6(1,5)-Rt*K_th6(3,2)*K_th6(2,5)-$
 $Rt*K_th6(3,3)*K_th6(3,5)-G_bar(3,5);$
 $E_mz_tz=-RL*K_L1(1,3)*K_L1(1,6)-Rt*K_th1(3,1)*K_th1(1,6)-$
 $Rt*K_th1(3,2)*K_th1(2,6)-Rt*K_th1(3,3)*K_th1(3,6)-RL*K_L2(1,3)*K_L2(1,6)-$
 $Rt*K_th2(3,1)*K_th2(1,6)-Rt*K_th2(3,2)*K_th2(2,6)-Rt*K_th2(3,3)*K_th2(3,6)-$
 $RL*K_L3(1,3)*K_L3(1,6)-Rt*K_th3(3,1)*K_th3(1,6)-Rt*K_th3(3,2)*K_th3(2,6)-$
 $Rt*K_th3(3,3)*K_th3(3,6)-RL*K_L4(1,3)*K_L4(1,6)-Rt*K_th4(3,1)*K_th4(1,6)-$
 $Rt*K_th4(3,2)*K_th4(2,6)-Rt*K_th4(3,3)*K_th4(3,6)-RL*K_L5(1,3)*K_L5(1,6)-$
 $Rt*K_th5(3,1)*K_th5(1,6)-Rt*K_th5(3,2)*K_th5(2,6)-Rt*K_th5(3,3)*K_th5(3,6)-$
 $RL*K_L6(1,3)*K_L6(1,6)-Rt*K_th6(3,1)*K_th6(1,6)-Rt*K_th6(3,2)*K_th6(2,6)-$
 $Rt*K_th6(3,3)*K_th6(3,6)-G_bar(3,6);$

 $E_fx_wx=-RL*K_L1(1,4)*K_L1(1,1)-Rt*K_th1(1,4)*K_th1(1,1)-$
 $Rt*K_th1(1,5)*K_th1(2,1)-Rt*K_th1(1,6)*K_th1(3,1)-RL*K_L2(1,4)*K_L2(1,1)-$
 $Rt*K_th2(1,4)*K_th2(1,1)-Rt*K_th2(1,5)*K_th2(2,1)-Rt*K_th2(1,6)*K_th2(3,1)-$
 $RL*K_L3(1,4)*K_L3(1,1)-Rt*K_th3(1,4)*K_th3(1,1)-Rt*K_th3(1,5)*K_th3(2,1)-$
 $Rt*K_th3(1,6)*K_th3(3,1)-RL*K_L4(1,4)*K_L4(1,1)-Rt*K_th4(1,4)*K_th4(1,1)-$
 $Rt*K_th4(1,5)*K_th4(2,1)-Rt*K_th4(1,6)*K_th4(3,1)-RL*K_L5(1,4)*K_L5(1,1)-$
 $Rt*K_th5(1,4)*K_th5(1,1)-Rt*K_th5(1,5)*K_th5(2,1)-Rt*K_th5(1,6)*K_th5(3,1)-$
 $RL*K_L6(1,4)*K_L6(1,1)-Rt*K_th6(1,4)*K_th6(1,1)-Rt*K_th6(1,5)*K_th6(2,1)-$
 $Rt*K_th6(1,6)*K_th6(3,1)-G_bar(4,1);$
 $E_fx_wy=-RL*K_L1(1,4)*K_L1(1,2)-Rt*K_th1(1,4)*K_th1(1,2)-$
 $Rt*K_th1(1,5)*K_th1(2,2)-Rt*K_th1(1,6)*K_th1(3,2)-RL*K_L2(1,4)*K_L2(1,2)-$
 $Rt*K_th2(1,4)*K_th2(1,2)-Rt*K_th2(1,5)*K_th2(2,2)-Rt*K_th2(1,6)*K_th2(3,2)-$
 $RL*K_L3(1,4)*K_L3(1,2)-Rt*K_th3(1,4)*K_th3(1,2)-Rt*K_th3(1,5)*K_th3(2,2)-$
 $Rt*K_th3(1,6)*K_th3(3,2)-RL*K_L4(1,4)*K_L4(1,2)-Rt*K_th4(1,4)*K_th4(1,2)-$
 $Rt*K_th4(1,5)*K_th4(2,2)-Rt*K_th4(1,6)*K_th4(3,2)-RL*K_L5(1,4)*K_L5(1,2)-$
 $Rt*K_th5(1,4)*K_th5(1,2)-Rt*K_th5(1,5)*K_th5(2,2)-Rt*K_th5(1,6)*K_th5(3,2)-$
 $RL*K_L6(1,4)*K_L6(1,2)-Rt*K_th6(1,4)*K_th6(1,2)-Rt*K_th6(1,5)*K_th6(2,2)-$
 $Rt*K_th6(1,6)*K_th6(3,2)-G_bar(4,2);$
 $E_fx_wz=-RL*K_L1(1,4)*K_L1(1,3)-Rt*K_th1(1,4)*K_th1(1,3)-$
 $Rt*K_th1(1,5)*K_th1(2,3)-Rt*K_th1(1,6)*K_th1(3,3)-RL*K_L2(1,4)*K_L2(1,3)-$
 $Rt*K_th2(1,4)*K_th2(1,3)-Rt*K_th2(1,5)*K_th2(2,3)-Rt*K_th2(1,6)*K_th2(3,3)-$
 $RL*K_L3(1,4)*K_L3(1,3)-Rt*K_th3(1,4)*K_th3(1,3)-Rt*K_th3(1,5)*K_th3(2,3)-$
 $Rt*K_th3(1,6)*K_th3(3,3)-RL*K_L4(1,4)*K_L4(1,3)-Rt*K_th4(1,4)*K_th4(1,3)-$
 $Rt*K_th4(1,5)*K_th4(2,3)-Rt*K_th4(1,6)*K_th4(3,3)-RL*K_L5(1,4)*K_L5(1,3)-$
 $Rt*K_th5(1,4)*K_th5(1,3)-Rt*K_th5(1,5)*K_th5(2,3)-Rt*K_th5(1,6)*K_th5(3,3)-$
 $RL*K_L6(1,4)*K_L6(1,3)-Rt*K_th6(1,4)*K_th6(1,3)-Rt*K_th6(1,5)*K_th6(2,3)-$
 $Rt*K_th6(1,6)*K_th6(3,3)-G_bar(4,3);$
 $E_fx_tx=-RL*K_L1(1,4)*K_L1(1,4)-Rt*K_th1(1,4)*K_th1(1,4)-$
 $Rt*K_th1(1,5)*K_th1(2,4)-Rt*K_th1(1,6)*K_th1(3,4)-RL*K_L2(1,4)*K_L2(1,4)-$
 $Rt*K_th2(1,4)*K_th2(1,4)-Rt*K_th2(1,5)*K_th2(2,4)-Rt*K_th2(1,6)*K_th2(3,4)-$

$$\begin{aligned}
& RL*K_L3(1,4)*K_L3(1,4)-Rt*K_th3(1,4)*K_th3(1,4)-Rt*K_th3(1,5)*K_th3(2,4)- \\
& Rt*K_th3(1,6)*K_th3(3,4)-RL*K_L4(1,4)*K_L4(1,4)-Rt*K_th4(1,4)*K_th4(1,4)- \\
& Rt*K_th4(1,5)*K_th4(2,4)-Rt*K_th4(1,6)*K_th4(3,4)-RL*K_L5(1,4)*K_L5(1,4)- \\
& Rt*K_th5(1,4)*K_th5(1,4)-Rt*K_th5(1,5)*K_th5(2,4)-Rt*K_th5(1,6)*K_th5(3,4)- \\
& RL*K_L6(1,4)*K_L6(1,4)-Rt*K_th6(1,4)*K_th6(1,4)-Rt*K_th6(1,5)*K_th6(2,4)- \\
& Rt*K_th6(1,6)*K_th6(3,4)-G_bar(4,4); \\
& E_fx_ty=-RL*K_L1(1,4)*K_L1(1,5)-Rt*K_th1(1,4)*K_th1(1,5)- \\
& Rt*K_th1(1,5)*K_th1(2,5)-Rt*K_th1(1,6)*K_th1(3,5)-RL*K_L2(1,4)*K_L2(1,5)- \\
& Rt*K_th2(1,4)*K_th2(1,5)-Rt*K_th2(1,5)*K_th2(2,5)-Rt*K_th2(1,6)*K_th2(3,5)- \\
& RL*K_L3(1,4)*K_L3(1,5)-Rt*K_th3(1,4)*K_th3(1,5)-Rt*K_th3(1,5)*K_th3(2,5)- \\
& Rt*K_th3(1,6)*K_th3(3,5)-RL*K_L4(1,4)*K_L4(1,5)-Rt*K_th4(1,4)*K_th4(1,5)- \\
& Rt*K_th4(1,5)*K_th4(2,5)-Rt*K_th4(1,6)*K_th4(3,5)-RL*K_L5(1,4)*K_L5(1,5)- \\
& Rt*K_th5(1,4)*K_th5(1,5)-Rt*K_th5(1,5)*K_th5(2,5)-Rt*K_th5(1,6)*K_th5(3,5)- \\
& RL*K_L6(1,4)*K_L6(1,5)-Rt*K_th6(1,4)*K_th6(1,5)-Rt*K_th6(1,5)*K_th6(2,5)- \\
& Rt*K_th6(1,6)*K_th6(3,5)-G_bar(4,5); \\
& E_fx_tz=-RL*K_L1(1,4)*K_L1(1,6)-Rt*K_th1(1,4)*K_th1(1,6)- \\
& Rt*K_th1(1,5)*K_th1(2,6)-Rt*K_th1(1,6)*K_th1(3,6)-RL*K_L2(1,4)*K_L2(1,6)- \\
& Rt*K_th2(1,4)*K_th2(1,6)-Rt*K_th2(1,5)*K_th2(2,6)-Rt*K_th2(1,6)*K_th2(3,6)- \\
& RL*K_L3(1,4)*K_L3(1,6)-Rt*K_th3(1,4)*K_th3(1,6)-Rt*K_th3(1,5)*K_th3(2,6)- \\
& Rt*K_th3(1,6)*K_th3(3,6)-RL*K_L4(1,4)*K_L4(1,6)-Rt*K_th4(1,4)*K_th4(1,6)- \\
& Rt*K_th4(1,5)*K_th4(2,6)-Rt*K_th4(1,6)*K_th4(3,6)-RL*K_L5(1,4)*K_L5(1,6)- \\
& Rt*K_th5(1,4)*K_th5(1,6)-Rt*K_th5(1,5)*K_th5(2,6)-Rt*K_th5(1,6)*K_th5(3,6)- \\
& RL*K_L6(1,4)*K_L6(1,6)-Rt*K_th6(1,4)*K_th6(1,6)-Rt*K_th6(1,5)*K_th6(2,6)- \\
& Rt*K_th6(1,6)*K_th6(3,6)-G_bar(4,6); \\
& E_fy_wx=-RL*K_L1(1,5)*K_L1(1,1)-Rt*K_th1(2,4)*K_th1(1,1)- \\
& Rt*K_th1(2,5)*K_th1(2,1)-Rt*K_th1(2,6)*K_th1(3,1)-RL*K_L2(1,5)*K_L2(1,1)- \\
& Rt*K_th2(2,4)*K_th2(1,1)-Rt*K_th2(2,5)*K_th2(2,1)-Rt*K_th2(2,6)*K_th2(3,1)- \\
& RL*K_L3(1,5)*K_L3(1,1)-Rt*K_th3(2,4)*K_th3(1,1)-Rt*K_th3(2,5)*K_th3(2,1)- \\
& Rt*K_th3(2,6)*K_th3(3,1)-RL*K_L4(1,5)*K_L4(1,1)-Rt*K_th4(2,4)*K_th4(1,1)- \\
& Rt*K_th4(2,5)*K_th4(2,1)-Rt*K_th4(2,6)*K_th4(3,1)-RL*K_L5(1,5)*K_L5(1,1)- \\
& Rt*K_th5(2,4)*K_th5(1,1)-Rt*K_th5(2,5)*K_th5(2,1)-Rt*K_th5(2,6)*K_th5(3,1)- \\
& RL*K_L6(1,5)*K_L6(1,1)-Rt*K_th6(2,4)*K_th6(1,1)-Rt*K_th6(2,5)*K_th6(2,1)- \\
& Rt*K_th6(2,6)*K_th6(3,1)-G_bar(5,1); \\
& E_fy_wy=-RL*K_L1(1,5)*K_L1(1,2)-Rt*K_th1(2,4)*K_th1(1,2)- \\
& Rt*K_th1(2,5)*K_th1(2,2)-Rt*K_th1(2,6)*K_th1(3,2)-RL*K_L2(1,5)*K_L2(1,2)- \\
& Rt*K_th2(2,4)*K_th2(1,2)-Rt*K_th2(2,5)*K_th2(2,2)-Rt*K_th2(2,6)*K_th2(3,2)- \\
& RL*K_L3(1,5)*K_L3(1,2)-Rt*K_th3(2,4)*K_th3(1,2)-Rt*K_th3(2,5)*K_th3(2,2)- \\
& Rt*K_th3(2,6)*K_th3(3,2)-RL*K_L4(1,5)*K_L4(1,2)-Rt*K_th4(2,4)*K_th4(1,2)- \\
& Rt*K_th4(2,5)*K_th4(2,2)-Rt*K_th4(2,6)*K_th4(3,2)-RL*K_L5(1,5)*K_L5(1,2)- \\
& Rt*K_th5(2,4)*K_th5(1,2)-Rt*K_th5(2,5)*K_th5(2,2)-Rt*K_th5(2,6)*K_th5(3,2)- \\
& RL*K_L6(1,5)*K_L6(1,2)-Rt*K_th6(2,4)*K_th6(1,2)-Rt*K_th6(2,5)*K_th6(2,2)- \\
& Rt*K_th6(2,6)*K_th6(3,2)-G_bar(5,2); \\
& E_fy_wz=-RL*K_L1(1,5)*K_L1(1,3)-Rt*K_th1(2,4)*K_th1(1,3)- \\
& Rt*K_th1(2,5)*K_th1(2,3)-Rt*K_th1(2,6)*K_th1(3,3)-RL*K_L2(1,5)*K_L2(1,3)- \\
& Rt*K_th2(2,4)*K_th2(1,3)-Rt*K_th2(2,5)*K_th2(2,3)-Rt*K_th2(2,6)*K_th2(3,3)- \\
& RL*K_L3(1,5)*K_L3(1,3)-Rt*K_th3(2,4)*K_th3(1,3)-Rt*K_th3(2,5)*K_th3(2,3)- \\
& Rt*K_th3(2,6)*K_th3(3,3)-RL*K_L4(1,5)*K_L4(1,3)-Rt*K_th4(2,4)*K_th4(1,3)- \\
& Rt*K_th4(2,5)*K_th4(2,3)-Rt*K_th4(2,6)*K_th4(3,3)-RL*K_L5(1,5)*K_L5(1,3)- \\
& Rt*K_th5(2,4)*K_th5(1,3)-Rt*K_th5(2,5)*K_th5(2,3)-Rt*K_th5(2,6)*K_th5(3,3)- \\
& RL*K_L6(1,5)*K_L6(1,3)-Rt*K_th6(2,4)*K_th6(1,3)-Rt*K_th6(2,5)*K_th6(2,3)- \\
& Rt*K_th6(2,6)*K_th6(3,3)-G_bar(5,3); \\
& E_fy_tx=-RL*K_L1(1,5)*K_L1(1,4)-Rt*K_th1(2,4)*K_th1(1,4)- \\
& Rt*K_th1(2,5)*K_th1(2,4)-Rt*K_th1(2,6)*K_th1(3,4)-RL*K_L2(1,5)*K_L2(1,4)- \\
& Rt*K_th2(2,4)*K_th2(1,4)-Rt*K_th2(2,5)*K_th2(2,4)-Rt*K_th2(2,6)*K_th2(3,4)- \\
& RL*K_L3(1,5)*K_L3(1,4)-Rt*K_th3(2,4)*K_th3(1,4)-Rt*K_th3(2,5)*K_th3(2,4)- \\
& Rt*K_th3(2,6)*K_th3(3,4)-RL*K_L4(1,5)*K_L4(1,4)-Rt*K_th4(2,4)*K_th4(1,4)- \\
& Rt*K_th4(2,5)*K_th4(2,4)-Rt*K_th4(2,6)*K_th4(3,4)-RL*K_L5(1,5)*K_L5(1,4)- \\
& Rt*K_th5(2,4)*K_th5(1,4)-Rt*K_th5(2,5)*K_th5(2,4)-Rt*K_th5(2,6)*K_th5(3,4)-
\end{aligned}$$

$RL*K_L6(1,5)*K_L6(1,4)-Rt*K_th6(2,4)*K_th6(1,4)-Rt*K_th6(2,5)*K_th6(2,4)-$
 $Rt*K_th6(2,6)*K_th6(3,4)-G_bar(5,4);$
 $E_fy_ty=-RL*K_L1(1,5)*K_L1(1,5)-Rt*K_th1(2,4)*K_th1(1,5)-$
 $Rt*K_th1(2,5)*K_th1(2,5)-Rt*K_th1(2,6)*K_th1(3,5)-RL*K_L2(1,5)*K_L2(1,5)-$
 $Rt*K_th2(2,4)*K_th2(1,5)-Rt*K_th2(2,5)*K_th2(2,5)-Rt*K_th2(2,6)*K_th2(3,5)-$
 $RL*K_L3(1,5)*K_L3(1,5)-Rt*K_th3(2,4)*K_th3(1,5)-Rt*K_th3(2,5)*K_th3(2,5)-$
 $Rt*K_th3(2,6)*K_th3(3,5)-RL*K_L4(1,5)*K_L4(1,5)-Rt*K_th4(2,4)*K_th4(1,5)-$
 $Rt*K_th4(2,5)*K_th4(2,5)-Rt*K_th4(2,6)*K_th4(3,5)-RL*K_L5(1,5)*K_L5(1,5)-$
 $Rt*K_th5(2,4)*K_th5(1,5)-Rt*K_th5(2,5)*K_th5(2,5)-Rt*K_th5(2,6)*K_th5(3,5)-$
 $RL*K_L6(1,5)*K_L6(1,5)-Rt*K_th6(2,4)*K_th6(1,5)-Rt*K_th6(2,5)*K_th6(2,5)-$
 $Rt*K_th6(2,6)*K_th6(3,5)-G_bar(5,5);$
 $E_fy_tz=-RL*K_L1(1,5)*K_L1(1,6)-Rt*K_th1(2,4)*K_th1(1,6)-$
 $Rt*K_th1(2,5)*K_th1(2,6)-Rt*K_th1(2,6)*K_th1(3,6)-RL*K_L2(1,5)*K_L2(1,6)-$
 $Rt*K_th2(2,4)*K_th2(1,6)-Rt*K_th2(2,5)*K_th2(2,6)-Rt*K_th2(2,6)*K_th2(3,6)-$
 $RL*K_L3(1,5)*K_L3(1,6)-Rt*K_th3(2,4)*K_th3(1,6)-Rt*K_th3(2,5)*K_th3(2,6)-$
 $Rt*K_th3(2,6)*K_th3(3,6)-RL*K_L4(1,5)*K_L4(1,6)-Rt*K_th4(2,4)*K_th4(1,6)-$
 $Rt*K_th4(2,5)*K_th4(2,6)-Rt*K_th4(2,6)*K_th4(3,6)-RL*K_L5(1,5)*K_L5(1,6)-$
 $Rt*K_th5(2,4)*K_th5(1,6)-Rt*K_th5(2,5)*K_th5(2,6)-Rt*K_th5(2,6)*K_th5(3,6)-$
 $RL*K_L6(1,5)*K_L6(1,6)-Rt*K_th6(2,4)*K_th6(1,6)-Rt*K_th6(2,5)*K_th6(2,6)-$
 $Rt*K_th6(2,6)*K_th6(3,6)-G_bar(5,6);$

 $E_fz_wx=-RL*K_L1(1,6)*K_L1(1,1)-Rt*K_th1(3,4)*K_th1(1,1)-$
 $Rt*K_th1(3,5)*K_th1(2,1)-Rt*K_th1(3,6)*K_th1(3,1)-RL*K_L2(1,6)*K_L2(1,1)-$
 $Rt*K_th2(3,4)*K_th2(1,1)-Rt*K_th2(3,5)*K_th2(2,1)-Rt*K_th2(3,6)*K_th2(3,1)-$
 $RL*K_L3(1,6)*K_L3(1,1)-Rt*K_th3(3,4)*K_th3(1,1)-Rt*K_th3(3,5)*K_th3(2,1)-$
 $Rt*K_th3(3,6)*K_th3(3,1)-RL*K_L4(1,6)*K_L4(1,1)-Rt*K_th4(3,4)*K_th4(1,1)-$
 $Rt*K_th4(3,5)*K_th4(2,1)-Rt*K_th4(3,6)*K_th4(3,1)-RL*K_L5(1,6)*K_L5(1,1)-$
 $Rt*K_th5(3,4)*K_th5(1,1)-Rt*K_th5(3,5)*K_th5(2,1)-Rt*K_th5(3,6)*K_th5(3,1)-$
 $RL*K_L6(1,6)*K_L6(1,1)-Rt*K_th6(3,4)*K_th6(1,1)-Rt*K_th6(3,5)*K_th6(2,1)-$
 $Rt*K_th6(3,6)*K_th6(3,1)-G_bar(6,1);$
 $E_fz_wy=-RL*K_L1(1,6)*K_L1(1,2)-Rt*K_th1(3,4)*K_th1(1,2)-$
 $Rt*K_th1(3,5)*K_th1(2,2)-Rt*K_th1(3,6)*K_th1(3,2)-RL*K_L2(1,6)*K_L2(1,2)-$
 $Rt*K_th2(3,4)*K_th2(1,2)-Rt*K_th2(3,5)*K_th2(2,2)-Rt*K_th2(3,6)*K_th2(3,2)-$
 $RL*K_L3(1,6)*K_L3(1,2)-Rt*K_th3(3,4)*K_th3(1,2)-Rt*K_th3(3,5)*K_th3(2,2)-$
 $Rt*K_th3(3,6)*K_th3(3,2)-RL*K_L4(1,6)*K_L4(1,2)-Rt*K_th4(3,4)*K_th4(1,2)-$
 $Rt*K_th4(3,5)*K_th4(2,2)-Rt*K_th4(3,6)*K_th4(3,2)-RL*K_L5(1,6)*K_L5(1,2)-$
 $Rt*K_th5(3,4)*K_th5(1,2)-Rt*K_th5(3,5)*K_th5(2,2)-Rt*K_th5(3,6)*K_th5(3,2)-$
 $RL*K_L6(1,6)*K_L6(1,2)-Rt*K_th6(3,4)*K_th6(1,2)-Rt*K_th6(3,5)*K_th6(2,2)-$
 $Rt*K_th6(3,6)*K_th6(3,2)-G_bar(6,2);$
 $E_fz_wz=-RL*K_L1(1,6)*K_L1(1,3)-Rt*K_th1(3,4)*K_th1(1,3)-$
 $Rt*K_th1(3,5)*K_th1(2,3)-Rt*K_th1(3,6)*K_th1(3,3)-RL*K_L2(1,6)*K_L2(1,3)-$
 $Rt*K_th2(3,4)*K_th2(1,3)-Rt*K_th2(3,5)*K_th2(2,3)-Rt*K_th2(3,6)*K_th2(3,3)-$
 $RL*K_L3(1,6)*K_L3(1,3)-Rt*K_th3(3,4)*K_th3(1,3)-Rt*K_th3(3,5)*K_th3(2,3)-$
 $Rt*K_th3(3,6)*K_th3(3,3)-RL*K_L4(1,6)*K_L4(1,3)-Rt*K_th4(3,4)*K_th4(1,3)-$
 $Rt*K_th4(3,5)*K_th4(2,3)-Rt*K_th4(3,6)*K_th4(3,3)-RL*K_L5(1,6)*K_L5(1,3)-$
 $Rt*K_th5(3,4)*K_th5(1,3)-Rt*K_th5(3,5)*K_th5(2,3)-Rt*K_th5(3,6)*K_th5(3,3)-$
 $RL*K_L6(1,6)*K_L6(1,3)-Rt*K_th6(3,4)*K_th6(1,3)-Rt*K_th6(3,5)*K_th6(2,3)-$
 $Rt*K_th6(3,6)*K_th6(3,3)-G_bar(6,3);$
 $E_fz_tx=-RL*K_L1(1,6)*K_L1(1,4)-Rt*K_th1(3,4)*K_th1(1,4)-$
 $Rt*K_th1(3,5)*K_th1(2,4)-Rt*K_th1(3,6)*K_th1(3,4)-RL*K_L2(1,6)*K_L2(1,4)-$
 $Rt*K_th2(3,4)*K_th2(1,4)-Rt*K_th2(3,5)*K_th2(2,4)-Rt*K_th2(3,6)*K_th2(3,4)-$
 $RL*K_L3(1,6)*K_L3(1,4)-Rt*K_th3(3,4)*K_th3(1,4)-Rt*K_th3(3,5)*K_th3(2,4)-$
 $Rt*K_th3(3,6)*K_th3(3,4)-RL*K_L4(1,6)*K_L4(1,4)-Rt*K_th4(3,4)*K_th4(1,4)-$
 $Rt*K_th4(3,5)*K_th4(2,4)-Rt*K_th4(3,6)*K_th4(3,4)-RL*K_L5(1,6)*K_L5(1,4)-$
 $Rt*K_th5(3,4)*K_th5(1,4)-Rt*K_th5(3,5)*K_th5(2,4)-Rt*K_th5(3,6)*K_th5(3,4)-$
 $RL*K_L6(1,6)*K_L6(1,4)-Rt*K_th6(3,4)*K_th6(1,4)-Rt*K_th6(3,5)*K_th6(2,4)-$
 $Rt*K_th6(3,6)*K_th6(3,4)-G_bar(6,4);$
 $E_fz_ty=-RL*K_L1(1,6)*K_L1(1,5)-Rt*K_th1(3,4)*K_th1(1,5)-$
 $Rt*K_th1(3,5)*K_th1(2,5)-Rt*K_th1(3,6)*K_th1(3,5)-RL*K_L2(1,6)*K_L2(1,5)-$
 $Rt*K_th2(3,4)*K_th2(1,5)-Rt*K_th2(3,5)*K_th2(2,5)-Rt*K_th2(3,6)*K_th2(3,5)-$

```

RL*K_L3(1,6)*K_L3(1,5)-Rt*K_th3(3,4)*K_th3(1,5)-Rt*K_th3(3,5)*K_th3(2,5)-
Rt*K_th3(3,6)*K_th3(3,5)-RL*K_L4(1,6)*K_L4(1,5)-Rt*K_th4(3,4)*K_th4(1,5)-
Rt*K_th4(3,5)*K_th4(2,5)-Rt*K_th4(3,6)*K_th4(3,5)-RL*K_L5(1,6)*K_L5(1,5)-
Rt*K_th5(3,4)*K_th5(1,5)-Rt*K_th5(3,5)*K_th5(2,5)-Rt*K_th5(3,6)*K_th5(3,5)-
RL*K_L6(1,6)*K_L6(1,5)-Rt*K_th6(3,4)*K_th6(1,5)-Rt*K_th6(3,5)*K_th6(2,5)-
Rt*K_th6(3,6)*K_th6(3,5)-G_bar(6,5);
E_fz_tz=-RL*K_L1(1,6)*K_L1(1,6)-Rt*K_th1(3,4)*K_th1(1,6)-
Rt*K_th1(3,5)*K_th1(2,6)-Rt*K_th1(3,6)*K_th1(3,6)-RL*K_L2(1,6)*K_L2(1,6)-
Rt*K_th2(3,4)*K_th2(1,6)-Rt*K_th2(3,5)*K_th2(2,6)-Rt*K_th2(3,6)*K_th2(3,6)-
RL*K_L3(1,6)*K_L3(1,6)-Rt*K_th3(3,4)*K_th3(1,6)-Rt*K_th3(3,5)*K_th3(2,6)-
Rt*K_th3(3,6)*K_th3(3,6)-RL*K_L4(1,6)*K_L4(1,6)-Rt*K_th4(3,4)*K_th4(1,6)-
Rt*K_th4(3,5)*K_th4(2,6)-Rt*K_th4(3,6)*K_th4(3,6)-RL*K_L5(1,6)*K_L5(1,6)-
Rt*K_th5(3,4)*K_th5(1,6)-Rt*K_th5(3,5)*K_th5(2,6)-Rt*K_th5(3,6)*K_th5(3,6)-
RL*K_L6(1,6)*K_L6(1,6)-Rt*K_th6(3,4)*K_th6(1,6)-Rt*K_th6(3,5)*K_th6(2,6)-
Rt*K_th6(3,6)*K_th6(3,6)-G_bar(6,6);

E_mx_i1=K_L1(1,1)*Kt;E_mx_i2=K_L2(1,1)*Kt;E_mx_i3=K_L3(1,1)*Kt;E_mx_i4=K_L4
(1,1)*Kt;E_mx_i5=K_L5(1,1)*Kt;E_mx_i6=K_L6(1,1)*Kt;

E_my_i1=K_L1(1,2)*Kt;E_my_i2=K_L2(1,2)*Kt;E_my_i3=K_L3(1,2)*Kt;E_my_i4=K_L4
(1,2)*Kt;E_my_i5=K_L5(1,2)*Kt;E_my_i6=K_L6(1,2)*Kt;

E_mz_i1=K_L1(1,3)*Kt;E_mz_i2=K_L2(1,3)*Kt;E_mz_i3=K_L3(1,3)*Kt;E_mz_i4=K_L4
(1,3)*Kt;E_mz_i5=K_L5(1,3)*Kt;E_mz_i6=K_L6(1,3)*Kt;

E_fx_i1=K_L1(1,4)*Kt;E_fx_i2=K_L2(1,4)*Kt;E_fx_i3=K_L3(1,4)*Kt;E_fx_i4=K_L4
(1,4)*Kt;E_fx_i5=K_L5(1,4)*Kt;E_fx_i6=K_L6(1,4)*Kt;

E_fy_i1=K_L1(1,5)*Kt;E_fy_i2=K_L2(1,5)*Kt;E_fy_i3=K_L3(1,5)*Kt;E_fy_i4=K_L4
(1,5)*Kt;E_fy_i5=K_L5(1,5)*Kt;E_fy_i6=K_L6(1,5)*Kt;

E_fz_i1=K_L1(1,6)*Kt;E_fz_i2=K_L2(1,6)*Kt;E_fz_i3=K_L3(1,6)*Kt;E_fz_i4=K_L4
(1,6)*Kt;E_fz_i5=K_L5(1,6)*Kt;E_fz_i6=K_L6(1,6)*Kt;
% tt'ler giriş olacak
T_mx_l1=-K_L1(1,1)*mu*g*sin(tt1(3,1));
T_mx_l2=-K_L2(1,1)*mu*g*sin(tt2(3,1));
T_mx_l3=-K_L3(1,1)*mu*g*sin(tt3(3,1));
T_mx_l4=-K_L4(1,1)*mu*g*sin(tt4(3,1));
T_mx_l5=-K_L5(1,1)*mu*g*sin(tt5(3,1));
T_mx_l6=-K_L6(1,1)*mu*g*sin(tt6(3,1));

T_my_l1=-K_L1(1,2)*mu*g*sin(tt1(3,1));
T_my_l2=-K_L2(1,2)*mu*g*sin(tt2(3,1));
T_my_l3=-K_L3(1,2)*mu*g*sin(tt3(3,1));
T_my_l4=-K_L4(1,2)*mu*g*sin(tt4(3,1));
T_my_l5=-K_L5(1,2)*mu*g*sin(tt5(3,1));
T_my_l6=-K_L6(1,2)*mu*g*sin(tt6(3,1));

T_mz_l1=-K_L1(1,3)*mu*g*sin(tt1(3,1));
T_mz_l2=-K_L2(1,3)*mu*g*sin(tt2(3,1));
T_mz_l3=-K_L3(1,3)*mu*g*sin(tt3(3,1));
T_mz_l4=-K_L4(1,3)*mu*g*sin(tt4(3,1));
T_mz_l5=-K_L5(1,3)*mu*g*sin(tt5(3,1));
T_mz_l6=-K_L6(1,3)*mu*g*sin(tt6(3,1));

T_fx_l1=-K_L1(1,4)*mu*g*sin(tt1(3,1));
T_fx_l2=-K_L2(1,4)*mu*g*sin(tt2(3,1));
T_fx_l3=-K_L3(1,4)*mu*g*sin(tt3(3,1));

```

```

T_fx_l4=-K_L4(1,4)*mu*g*sin(tt4(3,1));
T_fx_l5=-K_L5(1,4)*mu*g*sin(tt5(3,1));
T_fx_l6=-K_L6(1,4)*mu*g*sin(tt6(3,1));

T_fy_l1=-K_L1(1,5)*mu*g*sin(tt1(3,1));
T_fy_l2=-K_L2(1,5)*mu*g*sin(tt2(3,1));
T_fy_l3=-K_L3(1,5)*mu*g*sin(tt3(3,1));
T_fy_l4=-K_L4(1,5)*mu*g*sin(tt4(3,1));
T_fy_l5=-K_L5(1,5)*mu*g*sin(tt5(3,1));
T_fy_l6=-K_L6(1,5)*mu*g*sin(tt6(3,1));

T_fz_l1=-K_L1(1,6)*mu*g*sin(tt1(3,1));
T_fz_l2=-K_L2(1,6)*mu*g*sin(tt2(3,1));
T_fz_l3=-K_L3(1,6)*mu*g*sin(tt3(3,1));
T_fz_l4=-K_L4(1,6)*mu*g*sin(tt4(3,1));
T_fz_l5=-K_L5(1,6)*mu*g*sin(tt5(3,1));
T_fz_l6=-K_L6(1,6)*mu*g*sin(tt6(3,1));
zf=1;
T_mx_t1=K_th1(1,3)*mu*g*(1*L1/3)*cos(tt1(3,1))*zf;
T_mx_t2=K_th2(1,3)*mu*g*(1*L2/3)*cos(tt2(3,1))*zf;
T_mx_t3=K_th3(1,3)*mu*g*(1*L3/3)*cos(tt3(3,1))*zf;
T_mx_t4=K_th4(1,3)*mu*g*(1*L4/3)*cos(tt4(3,1))*zf;
T_mx_t5=K_th5(1,3)*mu*g*(1*L5/3)*cos(tt5(3,1))*zf;
T_mx_t6=K_th6(1,3)*mu*g*(1*L6/3)*cos(tt6(3,1))*zf;

T_my_t1=K_th1(2,3)*mu*g*(1*L1/3)*cos(tt1(3,1))*zf;
T_my_t2=K_th2(2,3)*mu*g*(1*L2/3)*cos(tt2(3,1))*zf;
T_my_t3=K_th3(2,3)*mu*g*(1*L3/3)*cos(tt3(3,1))*zf;
T_my_t4=K_th4(2,3)*mu*g*(1*L4/3)*cos(tt4(3,1))*zf;
T_my_t5=K_th5(2,3)*mu*g*(1*L5/3)*cos(tt5(3,1))*zf;
T_my_t6=K_th6(2,3)*mu*g*(1*L6/3)*cos(tt6(3,1))*zf;

T_mz_t1=K_th1(3,3)*mu*g*(1*L1/3)*cos(tt1(3,1))*zf*0;
T_mz_t2=K_th2(3,3)*mu*g*(1*L2/3)*cos(tt2(3,1))*zf*0;
T_mz_t3=K_th3(3,3)*mu*g*(1*L3/3)*cos(tt3(3,1))*zf*0;
T_mz_t4=K_th4(3,3)*mu*g*(1*L4/3)*cos(tt4(3,1))*zf*0;
T_mz_t5=K_th5(3,3)*mu*g*(1*L5/3)*cos(tt5(3,1))*zf*0;
T_mz_t6=K_th6(3,3)*mu*g*(1*L6/3)*cos(tt6(3,1))*zf*0;

T_fx_t1=K_th1(1,6)*mu*g*(1*L1/3)*cos(tt1(3,1))*zf;
T_fx_t2=K_th2(1,6)*mu*g*(1*L2/3)*cos(tt2(3,1))*zf;
T_fx_t3=K_th3(1,6)*mu*g*(1*L3/3)*cos(tt3(3,1))*zf;
T_fx_t4=K_th4(1,6)*mu*g*(1*L4/3)*cos(tt4(3,1))*zf;
T_fx_t5=K_th5(1,6)*mu*g*(1*L5/3)*cos(tt5(3,1))*zf;
T_fx_t6=K_th6(1,6)*mu*g*(1*L6/3)*cos(tt6(3,1))*zf;

T_fy_t1=K_th1(2,6)*mu*g*(1*L1/3)*cos(tt1(3,1))*zf;
T_fy_t2=K_th2(2,6)*mu*g*(1*L2/3)*cos(tt2(3,1))*zf;
T_fy_t3=K_th3(2,6)*mu*g*(1*L3/3)*cos(tt3(3,1))*zf;
T_fy_t4=K_th4(2,6)*mu*g*(1*L4/3)*cos(tt4(3,1))*zf;
T_fy_t5=K_th5(2,6)*mu*g*(1*L5/3)*cos(tt5(3,1))*zf;
T_fy_t6=K_th6(2,6)*mu*g*(1*L6/3)*cos(tt6(3,1))*zf;

T_fz_t1=K_th1(3,6)*mu*g*(1*L1/3)*cos(tt1(3,1))*zf;
T_fz_t2=K_th2(3,6)*mu*g*(1*L2/3)*cos(tt2(3,1))*zf;
T_fz_t3=K_th3(3,6)*mu*g*(1*L3/3)*cos(tt3(3,1))*zf;
T_fz_t4=K_th4(3,6)*mu*g*(1*L4/3)*cos(tt4(3,1))*zf;
T_fz_t5=K_th5(3,6)*mu*g*(1*L5/3)*cos(tt5(3,1))*zf;
T_fz_t6=K_th6(3,6)*mu*g*(1*L6/3)*cos(tt6(3,1))*zf;

```

```

T_fz_mp=-mp*g;
E_v1_wx=-K_L1(1,1)*Kt;E_v1_wy=-K_L1(1,2)*Kt;E_v1_wz=-
K_L1(1,3)*Kt;E_v1_tx=-K_L1(1,4)*Kt;E_v1_ty=-K_L1(1,5)*Kt;E_v1_tz=-
K_L1(1,6)*Kt;
E_v2_wx=-K_L2(1,1)*Kt;E_v2_wy=-K_L2(1,2)*Kt;E_v2_wz=-
K_L2(1,3)*Kt;E_v2_tx=-K_L2(1,4)*Kt;E_v2_ty=-K_L2(1,5)*Kt;E_v2_tz=-
K_L2(1,6)*Kt;
E_v3_wx=-K_L3(1,1)*Kt;E_v3_wy=-K_L3(1,2)*Kt;E_v3_wz=-
K_L3(1,3)*Kt;E_v3_tx=-K_L3(1,4)*Kt;E_v3_ty=-K_L3(1,5)*Kt;E_v3_tz=-
K_L3(1,6)*Kt;
E_v4_wx=-K_L4(1,1)*Kt;E_v4_wy=-K_L4(1,2)*Kt;E_v4_wz=-
K_L4(1,3)*Kt;E_v4_tx=-K_L4(1,4)*Kt;E_v4_ty=-K_L4(1,5)*Kt;E_v4_tz=-
K_L4(1,6)*Kt;
E_v5_wx=-K_L5(1,1)*Kt;E_v5_wy=-K_L5(1,2)*Kt;E_v5_wz=-
K_L5(1,3)*Kt;E_v5_tx=-K_L5(1,4)*Kt;E_v5_ty=-K_L5(1,5)*Kt;E_v5_tz=-
K_L5(1,6)*Kt;
E_v6_wx=-K_L6(1,1)*Kt;E_v6_wy=-K_L6(1,2)*Kt;E_v6_wz=-
K_L6(1,3)*Kt;E_v6_tx=-K_L6(1,4)*Kt;E_v6_ty=-K_L6(1,5)*Kt;E_v6_tz=-
K_L6(1,6)*Kt;

```

```

%I_inv=I_bar\eye(6);
I_inv=inv(I_bar);

```

```

E1=[E_mx_wx E_mx_wy E_mx_wz E_mx_tx E_mx_ty E_mx_tz;
E_my_wx E_my_wy E_my_wz E_my_tx E_my_ty E_my_tz;
E_mz_wx E_mz_wy E_mz_wz E_mz_tx E_mz_ty E_mz_tz;
E_fx_wx E_fx_wy E_fx_wz E_fx_tx E_fx_ty E_fx_tz;
E_fy_wx E_fy_wy E_fy_wz E_fy_tx E_fy_ty E_fy_tz;
E_fz_wx E_fz_wy E_fz_wz E_fz_tx E_fz_ty E_fz_tz];
AA=I_inv*E1;

```

```

E2=[E_mx_i1 E_mx_i2 E_mx_i3 E_mx_i4 E_mx_i5 E_mx_i6;
E_my_i1 E_my_i2 E_my_i3 E_my_i4 E_my_i5 E_my_i6;
E_mz_i1 E_mz_i2 E_mz_i3 E_mz_i4 E_mz_i5 E_mz_i6;
E_fx_i1 E_fx_i2 E_fx_i3 E_fx_i4 E_fx_i5 E_fx_i6;
E_fy_i1 E_fy_i2 E_fy_i3 E_fy_i4 E_fy_i5 E_fy_i6;
E_fz_i1 E_fz_i2 E_fz_i3 E_fz_i4 E_fz_i5 E_fz_i6];
BB=I_inv*E2;

```

```

CC=[La*E_v1_wx La*E_v1_wy La*E_v1_wz La*E_v1_tx La*E_v1_ty La*E_v1_tz;
La*E_v2_wx La*E_v2_wy La*E_v2_wz La*E_v2_tx La*E_v2_ty La*E_v2_tz;
La*E_v3_wx La*E_v3_wy La*E_v3_wz La*E_v3_tx La*E_v3_ty La*E_v3_tz;
La*E_v4_wx La*E_v4_wy La*E_v4_wz La*E_v4_tx La*E_v4_ty La*E_v4_tz;
La*E_v5_wx La*E_v5_wy La*E_v5_wz La*E_v5_tx La*E_v5_ty La*E_v5_tz;
La*E_v6_wx La*E_v6_wy La*E_v6_wz La*E_v6_tx La*E_v6_ty La*E_v6_tz];
LA=[La La La La La La];
DD=diag(LA)*-Ra*1;
A=[AA BB;CC DD];

```

```

u1=T_mx_l1+T_mx_t1+T_mx_l2+T_mx_t2+T_mx_l3+T_mx_t3+T_mx_l4+T_mx_t4+T_mx_l5+
T_mx_t5+T_mx_l6+T_mx_t6;
u2=T_my_l1+T_my_t1+T_my_l2+T_my_t2+T_my_l3+T_my_t3+T_my_l4+T_my_t4+T_my_l5+
T_my_t5+T_my_l6+T_my_t6;
u3=T_mz_l1+T_mz_t1+T_mz_l2+T_mz_t2+T_mz_l3+T_mz_t3+T_mz_l4+T_mz_t4+T_mz_l5+
T_mz_t5+T_mz_l6+T_mz_t6;
u4=T_fx_l1+T_fx_t1+T_fx_l2+T_fx_t2+T_fx_l3+T_fx_t3+T_fx_l4+T_fx_t4+T_fx_l5+
T_fx_t5+T_fx_l6+T_fx_t6;
u5=T_fy_l1+T_fy_t1+T_fy_l2+T_fy_t2+T_fy_l3+T_fy_t3+T_fy_l4+T_fy_t4+T_fy_l5+
T_fy_t5+T_fy_l6+T_fy_t6;

```

```

u6=T_fz_l1+T_fz_t1+T_fz_l2+T_fz_t2+T_fz_l3+T_fz_t3+T_fz_l4+T_fz_t4+T_fz_l5+
T_fz_t5+T_fz_l6+T_fz_t6+T_fz_mp;

B=[I_inv zeros(6,6);zeros(6,6) diag(LA)];

U=[u1;u2;u3;u4;u5;u6;V1;V2;V3;V4;V5;V6];

X=[wx;wy;wz;tx;ty;tz;i1;i2;i3;i4;i5;i6];
X_dot=A*X+B*U;

wx=wx+(X_dot(1,1)+X_dot_0(1,1))*step/2;
wy=wy+(X_dot(2,1)+X_dot_0(2,1))*step/2;
wz=wz+(X_dot(3,1)+X_dot_0(3,1))*step/2;
tx=tx+(X_dot(4,1)+X_dot_0(4,1))*step/2;
ty=ty+(X_dot(5,1)+X_dot_0(5,1))*step/2;
tz=tz+(X_dot(6,1)+X_dot_0(6,1))*step/2;
i1=i1+(X_dot(7,1)+X_dot_0(7,1))*step/2;
i2=i2+(X_dot(8,1)+X_dot_0(8,1))*step/2;
i3=i3+(X_dot(9,1)+X_dot_0(9,1))*step/2;
i4=i4+(X_dot(10,1)+X_dot_0(10,1))*step/2;
i5=i5+(X_dot(11,1)+X_dot_0(11,1))*step/2;
i6=i6+(X_dot(12,1)+X_dot_0(12,1))*step/2;
ax=ax+(X(1,1)+X_0(1,1))*step/2;
ay=ay+(X(2,1)+X_0(2,1))*step/2;
az=-az+(X(3,1)+X_0(3,1))*step/2;
eksen1=-eksen1+(X(4,1)+X_0(4,1))*step/2;
eksen2=-eksen2+(X(5,1)+X_0(5,1))*step/2;
eksen3=eksen3+(X(6,1)+X_0(6,1))*step/2;
X_dot_0=X_dot;
X_0=X;
XX(:,nd)=X;
Xv(:,nd)=[ax;ay;az;eksen1;eksen2;eksen3];
VV(:,nd)=[V1;V2;V3;V4;V5;V6];
Xr(:,nd)=[axr;ayr;azr;eksen1r;eksen2r;eksen3r];
End

```

SPM SIM-MECHANICS MODELİ ÖN YÜKLEME PROGRAMI

```
% stewart platformu altprogramı
% Bulanık denetleyicilerin veri dosyalarının yüklenmesi
load('sp9.mat');
load('FGa.mat');
deg2rad = pi/180; % dereceden radyana dönüşüm
x_axis = [1 0 0]; % x ekseninin tanımlanması
y_axis = [0 1 0]; % y ekseninin tanımlanması
z_axis = [0 0 1]; % z ekseninin tanımlanması

% Üst ve alt plakada bağlantı noktalarının tanımlanması
pos_base = [];
pos_top = [];
%Başlangıç konumlarının girilmesi
ic_x=0*-0.025/2;ic_y=0*0.025/2;ic_z=0.4;
Tx=0;
Ty=0;
Tz=0;
%Denetleyici katsayılarının girilmesi
Ge=13;
Gde=1;
Ga=9;
Gi=Ga;
Kp=2000;
Kd=1000;
%Denetleyici opsiyonlarının girilmesi, "1" fonksiyonel, "0" Fonksiyonel
değil
%OP_PD: PD denetleyici
%OP_STFPD: KABMPD denetleyici
OP_PD=1;
OP_STFPD=1;
OP_STFPD_PD=1;
OP_FPD=0;
alpha_b =2*(pi/3); % alt plakada 60 derecelik ofset açısının oluşturulması
için bağlantı açısı
alpha_t =0; % üst plakada 60 derecelik ofset açısının oluşturulması için
bağlantı açısı
height = 0.4; % serbest durumda üst plakanın yüksekliği (0.4 metre)
radius_b = 0.175; % alt plaka yarıçapı(0,175 m)
radius_t = 0.15; % üst plaka yarıçapı (0,15 m)
lamda_l=(pi/3)-(alpha_t/2);
```

```

lamda_3=(3*pi/3)-(alpha_t/2);
lamda_5=(5*pi/3)-(alpha_t/2);
lamda_2=(lamda_1+alpha_t);
lamda_4=(lamda_3+alpha_t);
lamda_6=(lamda_5+alpha_t);

Blamda_1=(pi/3)-(alpha_b/2);
Blamda_3=(3*pi/3)-(alpha_b/2);
Blamda_5=(5*pi/3)-(alpha_b/2);
Blamda_2=(Blamda_1+alpha_b);
Blamda_4=(Blamda_3+alpha_b);
Blamda_6=(Blamda_5+alpha_b);
q2=([radius_t*cos(lamda_2) radius_t*sin(lamda_2) height]);
q3=([radius_t*cos(lamda_4) radius_t*sin(lamda_4) height]);
q1=([radius_t*cos(lamda_6) radius_t*sin(lamda_6) height]);
pos_top=[q2;q2;q3;q3;q1;q1];
b1=[radius_b*cos(Blamda_1) radius_b*sin(Blamda_1) 0.032];
b2=[radius_b*cos(Blamda_3) radius_b*sin(Blamda_3) 0.032];
b3=[radius_b*cos(Blamda_5) radius_b*sin(Blamda_5) 0.032];
pos_base=[b1;b1;b2;b2;b3;b3];
jnt=[0 0 0.04];
jnt2=[0 0 0.0302];

% üst plakanın bağlantı koordinatlarının birleştirilmesi(1,3,5 ve 2,4,6 bağ
% noktaları
pos_top = [pos_top(6,:); pos_top(1:5,:)]; %üstteki 6. nokta alttaki 1.
noktaya bağlanıyor
pos_top(1,:)=pos_top(1,:)-jnt;
pos_top(2,:)=pos_top(2,:)-jnt;
pos_top(3,:)=pos_top(3,:)-jnt;
pos_top(4,:)=pos_top(4,:)-jnt;
pos_top(5,:)=pos_top(5,:)-jnt;
pos_top(6,:)=pos_top(6,:)-jnt;
% Noktaların 3x6 matris normuna dönüştürülmesi
body_pts = pos_top' - height*[zeros(2,6);ones(1,6)];

% eyleyici vektörlerinin hesaplanması
legs = pos_top - pos_base;
leg_length = [ ];
leg_vectors = [ ];
for i = 1:6,
    leg_length(i) = norm(legs(i,:));
    leg_vectors(i,:) = legs(i,:) / leg_length(i);
end

% silindirik ve dönel eksenlerin hesaplanması
for i = 1:6,
    rev1(i,:) = cross(leg_vectors(i,:), z_axis);
    rev1(i,:) = rev1(i,:) / norm(rev1(i,:));
    rev2(i,:) = - cross(rev1(i,:), leg_vectors(i,:));
    rev2(i,:) = rev2(i,:) / norm(rev2(i,:));
    cyl1(i,:) = leg_vectors(i,:);
    rev3(i,:) = rev1(i,:);
    rev4(i,:) = rev2(i,:);
    rev5(i,:) = cross(rev1(i,:), rev2(i,:));
end

% Koordinat sistemleri

```

```

lower_leg = struct('origin', [0 0 0], 'rotation', eye(3), 'end_point', [0 0
0]);
upper_leg = struct('origin', [0 0 0], 'rotation', eye(3), 'end_point', [0 0
0]);

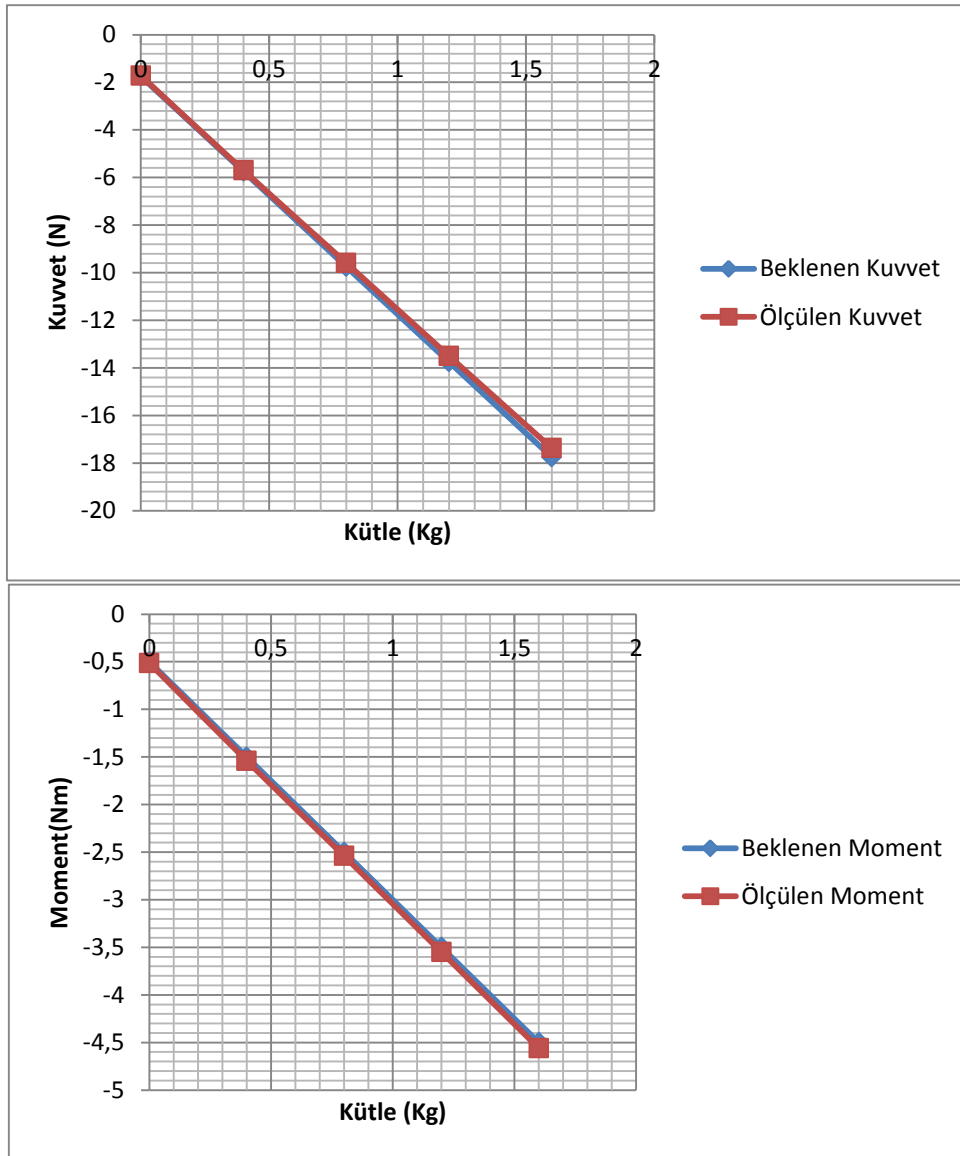
for i = 1:6,
    lower_leg(i).origin = pos_base(i,:) + (3/8)*legs(i,:);
    lower_leg(i).end_point = pos_base(i,:) + (3/4)*legs(i,:);
    lower_leg(i).rotation = [rev1(i,:)', rev2(i,:)', cyl1(i,:)'];
    upper_leg(i).origin = pos_base(i,:) + (1-3/8)*legs(i,:);
    upper_leg(i).end_point = pos_base(i,:) + (1/4)*legs(i,:);
    upper_leg(i).rotation = [rev1(i,:)', rev2(i,:)', cyl1(i,:)'];
end
rp=radius_t;
mu=0.135;md=0.265+0.175;r1=0.012;r2=0.023;mp=(pi*rp^2)*0.001*(76e3/9.81);
% Platform ataleti
Lxx = 7934128.04 ;Lxy = 9.11 ;Lxz = -0.01;
Lyx = 9.11 ;Lyy = 7936408.64 ;Lyz = -0.37;
Lzx = -0.01 ;Lzy = -0.37 ;Lzz = 15837275.73;

% Kütle ve Ataletlerin Hesaplanması
inner_radius = 0.012; % eyleyici iç çapı
outer_radius = 0.023; %eyleyici dış çapı
density = (76e3/9.81); % Çeliğin özkütlesi Kg/m^3

% üst ve alt plakanın kütle ve ataletinin hesabı
top_mass=1.2055;
top_inertia=[Lxx Lxy Lxz;Lyx Lyy Lyz;Lzx Lzy Lzz]*10^-9;
[base_mass, base_inertia] = inertiaCylinder(density, ...
    base_thickness, radius_b, 0);
%eyleyicilerin atalet ve kütlelerinin hesabı
lower_leg_mass = 0.44;
Idx = lower_leg_mass*(3*(outer_radius^2 + inner_radius^2) + 0.2732^2)/12;
Idy = Idx;
Idz = lower_leg_mass*(outer_radius^2 + inner_radius^2)/2;
lower_leg_inertia= [Idx 0 0; 0 Idy 0; 0 0 Idz];
upper_leg_mass = 0.135;
Iux = upper_leg_mass*(3*(outer_radius^2 + 0^2) + 0.2232^2)/12;
Iuy = Iux;
Iuz = upper_leg_mass*(outer_radius^2 + 0^2)/2;
upper_leg_inertia= [Iux 0 0; 0 Iuy 0; 0 0 Iuz];
Ke=1/140;
Kae=1/6;
cf=11;
Cp=0;% viskoz sürtünme katsayısı (prizmatik eklem için)
La=1.5*10^-3;
Ra=10;
Kt=11;
Rt=0.002;
RL=0.001;
Kv=2;

```

KUVVET SENSÖRÜ KALİBRASYON GRAFİKLERİ



QUADROTOR SİMÜLASYON PROGRAM KODLARI

```

clear;
Ix=8.1*10^-3 ; %Nms^2
Iy=8.1*10^-3 ; %Nms^2
Iz=14.2*10^-3 ; %Nms^2
g=9.81 ; %m/s^2
m=1 ; %kg
JR=71.88*10^-6 ; %Nms^2
l=0.48 ; %m
b=54.2*10^-6 ; %Ns^2
d=1.1*10^-6 ; %Nms^2
time=0;
t=10; %sim time
s=0.1; %sample
lim=1000;
k_z=55;d_z=70;i_z=20;
k_phi=2;d_phi=3;i_phi=0;
k_theta=k_phi;d_theta=d_phi;i_theta=i_phi;
k_psi=55;d_psi=70;i_psi=20;
omega_1=0;
omega_2=0;
omega_3=0;
omega_4=0;
x=0;x_d=0;x_dd=0;
y=0;y_d=0;y_dd=0;
z=0;z_d=0;z_dd=0;
theta=0;theta_d=0;theta_dd=0;
phi=0;phi_d=0;phi_dd=0;
psi=0;psi_d=0;psi_dd=0;
z_r=input('ref Z (m) MAX 10 m:');
psi_r=input('ref psi (deg):')*pi/180;
phi_r=input('ref phi (deg):')*pi/180;
theta_r=input('ref theta (deg):')*pi/180;

U1=b*((omega_1^2)+(omega_2^2)+(omega_3^2)+(omega_4^2));
U2=b*((omega_4^2)-(omega_2^2));
U3=b*((omega_3^2)-(omega_1^2));
U4=d*((omega_2^2)+(omega_4^2)-(omega_1^2)-(omega_3^2));
omega=-omega_1+omega_2-omega_3+omega_4;
i=0;e_iz=0;e_iphi=0;e_itheta=0;e_ipsi=0;
for n=0:s:t-s
    i=i+1;

```

```

phi_dd_0=phi_dd;
psi_dd_0=psi_dd;
theta_dd_0=theta_dd;
x_dd_0=x_d;
y_dd_0=y_d;
z_dd_0=z_d;
phi_d_0=phi_d;
psi_d_0=psi_d;
theta_d_0=theta_d;
x_d_0=x_d;
y_d_0=y_d;
z_d_0=z_d;

e_z_0=z_r-z;
e_phi_0=phi_r-phi;
e_theta_0=theta_r-theta;
e_psi_0=psi_r-psi;
Frz=random('normal',0,2);
Fry=random('normal',0,2);
Frz=random('normal',0,2);
if Frx ~=0
    theta_r=-Frx/10;
end
if Fry~=0
    phi_r=-Fry/10;
end
x_dd=((cos(phi)*sin(theta)*cos(psi)+sin(phi)*sin(psi))*U1/m)+(Frz/m);
y_dd=((cos(phi)*sin(theta)*sin(psi)-sin(phi)*cos(psi))*U1/m)+(Fry/m);
z_dd=(-g+(cos(phi)*cos(theta)*(U1/m)))+(Frz/m);

phi_dd=(theta_d*psi_d*((Iy-Iz)/Ix))-((JR*theta_d*omega)/Ix)+(1*U2/Ix);
theta_dd=(phi_d*psi_d*((Iz-Ix)/Iy))-((JR*phi_d*omega)/Iy)+(1*U3/Iy);
psi_dd=(phi_d*theta_d*((Ix-Iy)/Iz))+(1*U4/Iz);
phi_d=phi_d+((phi_dd+phi_dd_0)*s)/2;
psi_d=psi_d+((psi_dd+psi_dd_0)*s)/2;
theta_d=theta_d+((theta_dd+theta_dd_0)*s)/2;
z_d=z_d+((z_dd+z_dd_0)*s)/2;
y_d=y_d+((y_dd+y_dd_0)*s)/2;
x_d=x_d+((x_dd+x_dd_0)*s)/2;
phi=phi+((phi_d+phi_d_0)*s)/2;
psi=psi+((psi_d+psi_d_0)*s)/2;
theta=theta+((theta_d+theta_d_0)*s)/2;
z=z+((z_d+z_d_0)*s)/2;
y=y+((y_d+y_d_0)*s)/2;
x=x+((x_d+x_d_0)*s)/2;
e_z=z_r-z;
e_phi=phi_r-phi;
e_theta=theta_r-theta;
e_psi=psi_r-psi;
e_dz=(e_z-e_z_0)/s;
e_dphi=(e_phi-e_phi_0)/s;
e_dtheta=(e_theta-e_theta_0)/s;
e_dpsi=(e_psi-e_psi_0)/s;
e_iz=e_iz+(((e_z+e_z_0)*s)/2);
e_iphi=e_iphi+(((e_phi+e_phi_0)*s)/2);
e_itheta=e_itheta+(((e_theta+e_theta_0)*s)/2);
e_ipsi=e_ipsi+(((e_psi+e_psi_0)*s)/2);
u1=k_z*e_z+d_z*e_dz+i_z*e_iz;
u2=k_phi*e_phi+d_phi*e_dphi+i_phi*e_iphi;
u3=k_theta*e_theta+d_theta*e_dtheta+i_theta*e_itheta;

```

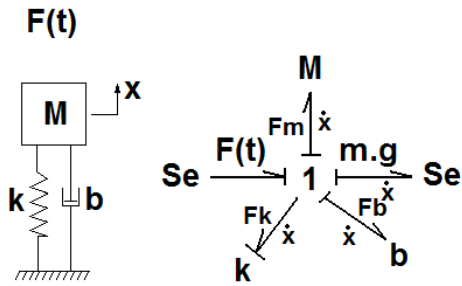
```

u4=k_psi*e_psi+d_psi*e_dpsi+i_psi*e_ipsi;
omega_1=u1-u3-u4;
omega_2=u1-u2+u4;
omega_3=u1+u3-u4;
omega_4=u1+u2+u4;
U1=b*((omega_1^2)+(omega_2^2)+(omega_3^2)+(omega_4^2));
U2=b*((omega_4^2)-(omega_2^2));
U3=b*((omega_3^2)-(omega_1^2));
U4=d*((omega_2^2)+(omega_4^2)-(omega_1^2)-(omega_3^2));
omega=-omega_1+omega_2-omega_3+omega_4;
X(i)=x;
Y(i)=y;
Z(i)=z;
PHI(i)=phi*180/pi;
THETA(i)=theta*180/pi;
PSI(i)=psi*180/pi;
time=time+s;
T(i)=time;

```

end

BAĞ-GRAFİK DENKLEMLERİNİN ÇIKARTILMASI



Şekilde verilen bağ-grafik modelde “1” kapısına ait iç değişkenlerin toplamı sıfır olmalıdır.

$$F(t) - F_m - Mg - F_b - F_k = 0$$

Bu kapiya ait uç değişkenler ise kural gereği birbirine eşittir.

$$v_m = v_b = v_k = \dot{x}$$

Durum değişkenleri kurala göre kapasite sınıfı elemanların uç değişkenleri ile, endüktans sınıfı elemanların iç değişkenleri arasından seçilir. Bu durumda bir kapasite sınıfı elemanı olan “M” atalet elemanının uç değişkeni “ v_m ” ve bir endüktans sınıfı elemanı olan “K” elemanının iç değişkeni “ F_k ” durum değişkeni olarak alınabilir. Durum değişkeni olarak alındıklarından, bu değişkenlerin dışında kalan değişkenler bağımlı değişken olacaktır. Denklemler oluşturulurken bağımlı değişkenler bağımsız değişkenler cinsinden ifade edilir.

$$v_m = \frac{1}{M} \int F_m dt \Rightarrow \ddot{x} = \frac{F_m}{M}$$

$$F_k = \frac{1}{k} \int v_k dt \Rightarrow \dot{F}_k = \frac{1}{k} \dot{x}$$

$$F_b = v_b \cdot b \Rightarrow F_b = \dot{x} \cdot b$$

Bu durumda “1” kapısına ait denklem aşağıda verildiği şekilde yazılabilir.

$$\ddot{x} = \frac{1}{M} F(t) - \frac{1}{M} F_b - \frac{1}{M} F_k - g$$

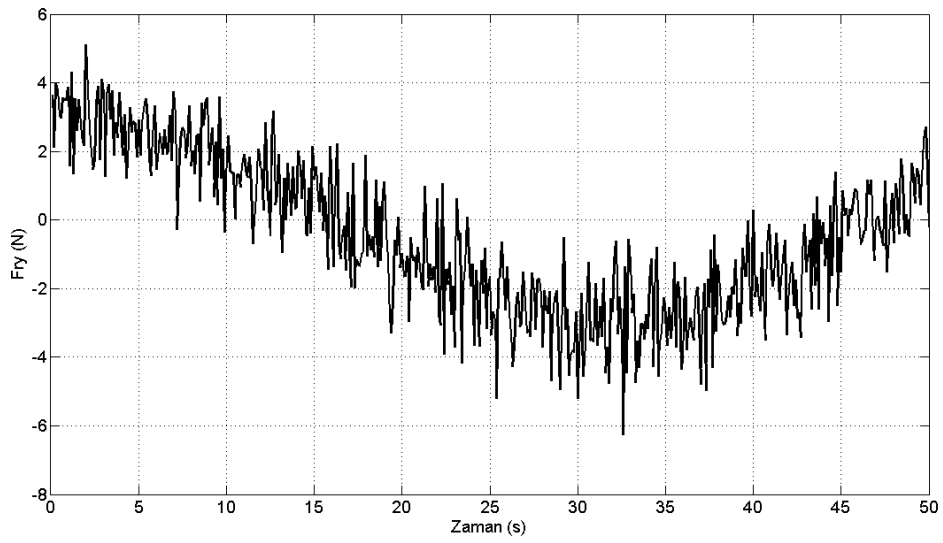
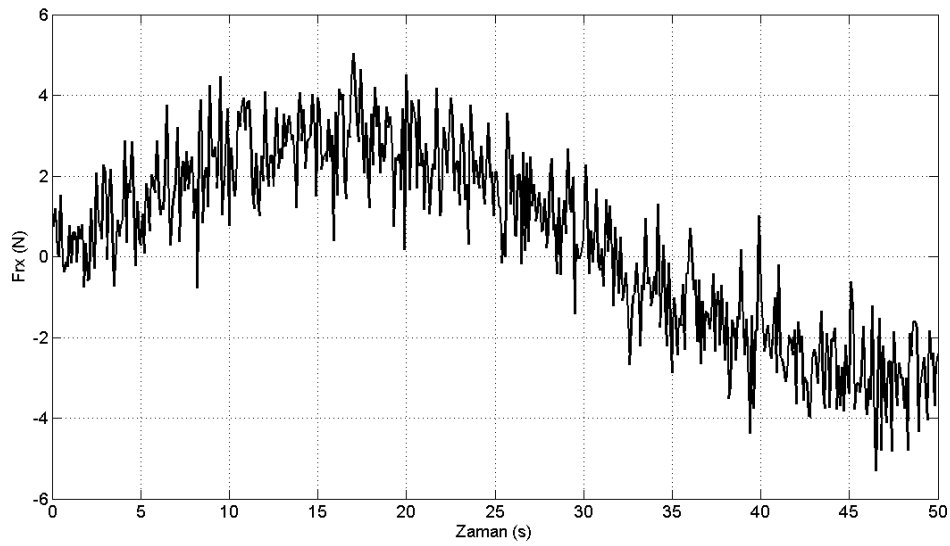
$$\ddot{x} = \frac{1}{M} F(t) - \frac{b}{M} \dot{x} - \frac{1}{M} F_k - g$$

Durum değişkenlerine ait denklem ise durum-uzayı gösteriminde aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ F_k \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} \dot{x} \\ F_k \end{bmatrix} + [B][U]$$

Bağımsız değişkenler cinsinden ifade edilen değişkenler denklemde yerine konulduğunda örnekte verilen sistemin durum uzayı gösterimi aşağıdaki gibi olur.

$$\frac{d}{dt} \underbrace{\begin{bmatrix} \dot{x} \\ F_k \end{bmatrix}}_{\dot{x}} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{b}{M} & -\frac{1}{M} \\ \frac{1}{k} & 0 \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} \dot{x} \\ F_k \end{bmatrix}}_x + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{M} & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}}_B \underbrace{\begin{bmatrix} F(t) \\ g \end{bmatrix}}_U$$

“QUADROTOR” MODELİNE UYGULANAN BOZUCU RÜZGAR KUVVETLERİ

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :İbrahim YILDIZ
Doğum Tarihi ve Yeri :26.08.1981 KONYA
Yabancı Dili :İngilizce
E-posta :iyildiz@yildiz.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Makine Müh.	Yıldız Teknik Üniv.	2007
Lisans	Makine Müh.	İstanbul Üniv.	2004
Lise	Sayısal	Meram Fen Lisesi	2000

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2003	Gürtas Mühendislik A.Ş.	Proje Mühendisi

YAYINLARI

Makale

1. Vasfi Emre ÖMÜRLÜ, İbrahim YILDIZ (2010) “Self-Tuning Fuzzy PD - based Stiffness Controller of a 3x3 Stewart Platform as a Man-Machine Interface”, Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, (doi:10.3906/elk-1007-581).
2. Vasfi Emre ÖMÜRLÜ, İbrahim YILDIZ (2011) “Parallel Self-Tuning Fuzzy PD + PD Controller for a Stewart-Gough Platform Based Spatial Joystick”, Arabian Journal for Science and Engineering.
3. İbrahim YILDIZ, Vasfi Emre ÖMÜRLÜ, Ahmet SAĞIRLI, (2008) , “Dynamic Modeling of a Generalized Stewart Platform by Bond Graph Method Utilizing a Novel Spatial Visualization Technique”, International Review of Mechanical Engineering, Vol:2, No:5, Pages:702-717.

Bildiri

1. İbrahim YILDIZ, Vasfi Emre ÖMÜRLÜ, Ahmet SAĞIRLI, “A novel visualization technique in Bond-Graph method for modeling of a generalized stewart platform”, Robotics and Biomimetics, 2008. IEEE International Conference on 22-25 Feb. 2009 Page(s):780 – 785.
2. Vasfi Emre ÖMÜRLÜ, Utku BÜYÜKŞAHİN, İbrahim YILDIZ, Ahmet ÜNSAL, Ahmet SAĞIRLI, Şeref Naci ENGİN, İbrahim Beklan KÜÇÜKDEMİRAL, “A stewart platform as a FBW flight control unit for space vehicles”, Recent Advances in Space Technologies, 2009. RAST '09. 4th International Conference on 11-13 June 2009 Page(s):716 – 721.
3. Vasfi Emre ÖMÜRLÜ, İbrahim YILDIZ , “Bir Uçuş Kontrol Ünitesi Olarak 3x3 Stewart Platformunun Kazanç Ayarlamalı Bulanık PD Denetleyicisi ile Katılık Kontrolü”, TOK 2009, Sayfa:88.
4. İbrahim YILDIZ, Vasfi Emre ÖMÜRLÜ, Zeynep EKİCİOĞLU, Alper GÜNEY “6 Serbestlik Dereceli Paralel Mekanizmadaki İleri Kinematik Analiz Yöntemleri”, TOK2010.