

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**STAUBLI RX160 MANİPULATÖRÜN MODELLENMESİ,
TANINMASI VE KONTROLÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Egemen ZENGİN

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

EYLÜL 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**STAUBLI RX160 MANİPULATÖRÜN MODELLENMESİ,
TANINMASI VE KONTROLÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Egemen ZENGİN

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Zeki Yağız BAYRAKTAROĞLU

EYLÜL 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 518091044 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Egemen ZENGİN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**STAUBLI RX160 MANİPULATÖRÜN MODELLENMESİ, TANINMASI VE KONTROLÜ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Zeki Yağız BAYRAKTAROĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Şeniz ERTUĞRUL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Zeki Yağız BAYRAKTAROĞLU
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Ertan ÖZNERGİZ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **10 Eylül 2013**
Savunma Tarihi : **13 Eylül 2013**

İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	3
1.2 Bazı Tanımlamalar	4
1.3 Tezin Bölümleri.....	4
1.4 Staubli RX-160 Manipülatör	6
1.4.1 Teknik özellikler	6
1.4.2 Donanım.....	9
1.4.2.1 Manipülatör mekaniği	9
1.4.2.2 Eyleci ve kodlayıcılar.....	10
1.4.2.3 Kontrolör ve el kumandası (pendant).....	10
1.4.2.4 Schunk parça tutucu (gripper).....	11
1.4.2.5 ATI kuvvet tork sensörü	12
1.4.3 Yazılım.....	14
1.4.3.1 Val3 programlama arayüzü	14
1.4.3.2 LLI alt düzey programlama arayüzü	14
2. MODELLEME VE TANIMA.....	17
2.1 Kinematik Model.....	17
2.1.1 İleri kinematik	17
2.1.1.1 Denavit-Hartenberg düzenlemesi ve parametreleri.....	18
2.1.1.2 Eklemlere koordinat takımlarının atanması	19
2.1.1.3 Denavit-Hartenberg parametreleri	20
2.1.1.4 Yalpa, yunus, sapma açısı gösterimi.....	21
2.1.2 Ters kinematik.....	22
2.2 Jacobian ve Ters Jacobian Matrislerinin Hesaplanması.....	23
2.2.1 Jacobian matrisi.....	24
2.2.2 Analitik jacobian	27
2.2.3 Ters jacobian matrisi	30
2.3 Dinamik Model	32
2.3.1 Euler–Lagrange denklemleri.....	32
2.3.2 Newton-Euler denklemleri	33
2.3.3 Paul–Luth–Walker algoritması	37
2.4 Tanıma.....	43
2.4.1 Yay modeli	43
2.4.2 Sürtünme modeli	45
2.4.2.1 Eklem sürtünme modeli	46

2.4.2.2 Klasik sürtünme modeli	47
2.4.2.3 Sürtünme modelinde bilinmeyen parametrelerin tanınması.....	52
3. YÖRÜNGE PLANLAMA VE KONTROL	81
3.1 Yörünge Planlama	81
3.1.1 Beşinci dereceden konum profili.....	81
3.1.2 Bang-bang ivme profili	83
3.1.3 Sabit hız bölgeli süreksiz ivme profili.....	84
3.1.4 Sabit hız bölgeli sürekli ivme profili.....	86
3.1.5 Maniplatr maksimum ivme ve ekivme(jerk).....	87
3.2 Maniplatr Konum Kontrolü.....	89
3.2.1 PD katsayıların manuel ayarlanması	91
3.2.2 Konum hassasiyeti ve tekrarlanabilirlik	114
4. UYGULAMALAR	117
4.1 İki Nokta Arasındaki Hareket.....	117
4.2 Değişken Yükleme Durumunda Hareket.....	124
5. SONUÇLAR	131
KAYNAKLAR.....	135
EKLER.....	137
ZGEÇMİş	289

KISALTMALAR

LLI	: Alt düzey programlama
PD	: Oransal-türevsel kontrol
DH	: Denavit-Hartenberg

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Staubli RX-160 manipülatörün teknik özellikleri [10].	8
Çizelge 1.2 : ATI Delta F/T sensör ölçüm aralığı ve çözünürlüğü [11].	14
Çizelge 2.1 : Staubli RX160 manipülatörün D-H parametreleri.	21
Çizelge 2.2 : Staubli RX160 manipülatörün sürtünme parametreleri.....	55
Çizelge 2.3 : Görev uzayında planlanan yörünge için belirlenen koordinatlar	57
Çizelge 3.1 : Val3 programlama arayüzü üzerinden yaklaşık tespit edilen maksimum ivme ve ekivme değerleri.	88
Çizelge 3.2 : Staubli RX 160 manipülatörün uç noktasının tekrarlanabilirlik ve hassasiyeti.	115
Çizelge 3.3 : Tasarlanan konum kontrolcü performansı.....	115
Çizelge 4.1 : 2 kg iş parçası taşınırken konum kontrolcü performansı	124
Çizelge 4.2 : 5 kg iş parçası taşınırken konum kontrolcü performansı	124

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Endüstriyel Manipülatör(Staubli RX-160).....	2
Şekil 1.2 : RX-160 Manipülatörün mekanik bölümleri [10].	7
Şekil 1.3 : RX-160 Manipülatörün ölçüleri [10].	7
Şekil 1.4 : Staubli RX-160 manipülatörün çalışma uzayı [10].	8
Şekil 1.5 : Manipülatör ana ve yardımcı donanımlar.	9
Şekil 1.6 : RX-160 manipülatörün aktarma organlarının modeli [6].	10
Şekil 1.7 : CS8C manipülatör kontrolörü.	11
Şekil 1.8 : RX-160 manipülatörün el kumandası.	12
Şekil 1.9 : RX-160 manipülatör harici kuvvet-tork sensörü.....	13
Şekil 1.10 : ATI F/T sensör ve kontrolör kutusu [11].	13
Şekil 1.11 : CS8 genel mimarisi [5].....	15
Şekil 1.12 : LLI çalışma yapısı [5].	15
Şekil 1.13 : Staubli manipülatör eklem kontrol çevrimleri [5].	16
Şekil 2.1 : D-H parametrelerinin gösterimi.	19
Şekil 2.2 : Staubli RX160 koordinat takımı atama.	20
Şekil 2.3 : Yalpa, yunus ve sapma açıları.	21
Şekil 2.4 : Staubli RX160 manipülatörün farklı düzenlemeleri	23
Şekil 2.5 : Manipülatör uç noktasının i . eklem göre hareketi.	24
Şekil 2.6 : İleri jacobian ile hesaplanan manipülatör uç nokta hızı	29
Şekil 2.7 : Ters jacobian ile elde edilen manipülatör eklem hız grafiği.	31
Şekil 2.8 : Manipülatör üzerinde kuvvet, tork ve konum vektör gösterimi.	35
Şekil 2.9 : Manipülatör referans eklem konum grafiği.	39
Şekil 2.10 : Manipülatör referans eklem hız grafiği.	40
Şekil 2.11 : Newton-Euler algoritması ile hesaplanan ve manipülatörden ölçülen eklem torku.....	41
Şekil 2.12 : Eklem tork % hata.	42
Şekil 2.13 : Yayın 2. eklemin hareketine bağlı eklem üzerinde oluşturduğu tork.....	44
Şekil 2.14 : Yay modeli ve gerçek veri ile yay modeli arasındaki hata grafiği.	44
Şekil 2.15 : Eklem tork grafiği(yay modele dahil edilmiş).	45
Şekil 2.16 : Eklem tork % hata (yay modele dahil edilmiş).	45
Şekil 2.17 : Coulomb sürtünme modeli.	47
Şekil 2.18 : Coulomb ve viskoz sürtünme torku.....	48
Şekil 2.19 : Coulomb, viskoz ve statik sürtünme modeli.	49
Şekil 2.20 : Sürtünme modelinde Stribeck etkisi.....	49
Şekil 2.21 : 5. ve 6. eklem arasındaki kinematik etkileşim.	51
Şekil 2.22 : 1. ekleme ölçülen ve hesaplanan sürtünme torku ve hatası.....	56
Şekil 2.23 : Sürtünme torkunda Stribeck etkisi.	57
Şekil 2.24 : 1. eklem açısal konum grafiği.	58
Şekil 2.25 : 1. eklem açısal hız grafiği.....	59
Şekil 2.26 : 1. eklem hareket ederken tüm eklemler için tork grafikleri.	60
Şekil 2.27 : 1. eklem hareket ederken tüm eklemler için tork % hata grafiği.	61
Şekil 2.28 : 2. eklem açısal konum grafiği.	62
Şekil 2.29 : 2. eklem açısal hız grafiği.....	62
Şekil 2.30 : 2. eklem hareket ederken tüm eklemler için tork grafikleri.	63
Şekil 2.31 : 2. eklem hareket ederken tüm eklemler için tork % hata grafiği.	64
Şekil 2.32 : 3. eklem açısal konum grafiği.	65

Şekil 2.33 : 3. eklem açısai hız grafiği.	65
Şekil 2.34 : 3. eklem hareket ederken tüm eklemler için tork grafikleri.	66
Şekil 2.35 : 3. eklem hareket ederken tüm eklemler için tork % hata grafiği.	67
Şekil 2.36 : 1. ve 2. eklemlerin açısai konum grafikleri.	68
Şekil 2.37 : 1. ve 2. eklemlerin açısai hız grafikleri.	68
Şekil 2.38 : 1. ve 2. eklemler hareket ederken tüm eklemler için tork grafikleri.	69
Şekil 2.39 : 1. ve 2. eklemler hareket ederken tüm eklemler için tork % hata grafikleri.	70
Şekil 2.40 : 2. ve 3. eklemlerin açısai konum grafikleri.	71
Şekil 2.41 : 2. ve 3. eklemlerin açısai hız grafikleri.	71
Şekil 2.42 : 2. ve 3. eklemler hareket ederken tüm eklemler için tork grafikleri.	72
Şekil 2.43 : 2. ve 3. eklemler hareket ederken tüm eklemler için tork % hata grafikleri.	73
Şekil 2.44 : 1., 2. ve 3. eklemlerin açısai konum grafikleri.	74
Şekil 2.45 : 1., 2. ve 3. eklemlerin açısai hız grafikleri.	74
Şekil 2.46 : 1., 2. ve 3. eklemler hareket ederken tüm eklemler için tork grafikleri.	75
Şekil 2.47 : 1., 2. ve 3. eklemler hareket ederken tüm eklemler için tork % hata grafikleri.	76
Şekil 2.48 : Tüm eklemlerin açısai konum grafikleri.	77
Şekil 2.49 : Tüm. eklemlerin açısai hız grafikleri.	78
Şekil 2.50 : Tüm. eklemler hareket ederken eklem tork grafikleri.	79
Şekil 2.51 : Tüm eklemler hareket ederken eklem tork % hata grafikleri.	80
Şekil 3.1 : Beşinci dereceden konum profili, hız ve ivme grafiği.	82
Şekil 3.2 : Bang-bang ivme profili.	83
Şekil 3.3 : Sabit hız bölgei süreksiz ivme profili.	84
Şekil 3.4 : Senkron hız profilleri.	86
Şekil 3.5 : Sabit hız bölgei sürekli ivme profili.	87
Şekil 3.6 : Staubli RX160 manipölatörün 1. eklem maksimum ivme grafiği.	88
Şekil 3.7 : Staubli RX160 manipölatörün 1. eklem maksimum ekivme grafiği.	88
Şekil 3.8 : Ters dinamik kontrol şeması	90
Şekil 3.9 : 1. eklem açısai konum grafiği.	92
Şekil 3.10 : 1. eklem açısai konum % hata grafiği.	92
Şekil 3.11 : 1. eklem açısai hız grafiği.	93
Şekil 3.12 : 1. eklem tork grafiği.	93
Şekil 3.13 : 2. eklem açısai konum grafiği.	94
Şekil 3.14 : 2. eklem açısai konum % hata grafiği.	94
Şekil 3.15 : 2. eklem açısai hız grafiği.	95
Şekil 3.16 : 2. eklem tork grafiği.	95
Şekil 3.17 : 3. eklem açısai konum grafiği.	96
Şekil 3.18 : 3. eklem açısai konum % hata grafiği.	96
Şekil 3.19 : 3. eklem açısai hız grafiği.	97
Şekil 3.20 : 3. eklem tork grafiği.	97
Şekil 3.21 : 1. ve 2. eklemlerin açısai konum grafikleri.	98
Şekil 3.22 : 1. ve 2. eklemlerin açısai konum % hata grafikleri.	98
Şekil 3.23 : 1. ve 2. eklemlerin açısai hız grafikleri.	99
Şekil 3.24 : 1. ve 2. eklemlerin tork grafikleri.	99
Şekil 3.25 : 2. ve 3. eklemlerin açısai konum grafikleri.	100
Şekil 3.26 : 2. ve 3. eklemlerin açısai konum % hata grafikleri.	100
Şekil 3.27 : 2. ve 3. eklemlerin açısai hız grafikleri.	101
Şekil 3.28 : 2. ve 3. eklemlerin tork grafikleri.	101

Şekil 3.29 : 1.,2. ve 3. eklemlerin açısal konum grafikleri.	102
Şekil 3.30 : 1., 2. ve 3. eklemlerin açısal konum % hata grafikleri.	102
Şekil 3.31 : 1., 2. ve 3. eklemlerin açısal hız grafikleri.	103
Şekil 3.32 : 1., 2. ve 3. eklemlerin tork grafikleri.	103
Şekil 3.33 : Tüm eklemlerin açısal konum grafikleri.	104
Şekil 3.34 : Tüm eklemlerin açısal konum % hata grafikleri.	105
Şekil 3.35 : Tüm eklemlerin açısal hız grafikleri.	106
Şekil 3.36 : Tüm eklemlerin tork grafikleri.	107
Şekil 3.37 : Tüm eklemlerin açısal konum grafikleri.	108
Şekil 3.38 : Tüm eklemlerin açısal hız grafikleri.	109
Şekil 3.39 : Uç nokta konum grafikleri.	110
Şekil 3.40 : Uç nokta konum % hata grafikleri.	111
Şekil 3.41 : Uç nokta hız grafikleri.	112
Şekil 3.42 : Tüm eklemlerin tork grafikleri.	113
Şekil 3.43 : Hassasiyet ve tekrarlanabilirlik için olası durumlar.	114
Şekil 4.1 : Tüm eklemlerin açısal konum grafikleri.	118
Şekil 4.2 : Tüm eklemlerin açısal hız grafikleri.	119
Şekil 4.3 : Uç nokta konum grafikleri.	120
Şekil 4.4 : Uç nokta konum % hata grafikleri.	121
Şekil 4.5 : Uç nokta hız grafikleri.	122
Şekil 4.6 : Tüm eklemlerin tork grafikleri.	123
Şekil 4.7 : Tüm eklemlerin açısal konum grafikleri.	125
Şekil 4.8 : Tüm eklemlerin açısal hız grafikleri.	126
Şekil 4.9 : Uç nokta konum grafikleri.	127
Şekil 4.10 : Uç nokta konum % hata grafikleri.	128
Şekil 4.11 : Uç nokta hız grafikleri.	129
Şekil 4.12 : Tüm eklemlerin tork grafikleri.	130

STAUBLI RX160 MANİPULATÖRÜN MODELLENMESİ, TANINMASI VE KONTROLÜ

ÖZET

Endüstriyel manipülatörler robotik alanında oldukça yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Endüstride üretim maliyetlerini düşürmesinin yanında hassasiyet ve üretkenliği, özel makineler ile kıyaslandığında artan esnekliği ve tehlikeli ortamlarda, tekrarlanan ağır işlerde insanlığa katkı sağlamasıyla ön plana çıkmaktadır.

Günümüzde endüstriyel uygulamalar için tasarlanan kullanıcı arayüzleri kritik gerçek zamanlı uygulamalar için uygun değildir. Çevre cihazlarının manipülatöre adapte edilmesi kolay değildir. Nükleer, biyoloji, uzay gibi yüksek teknolojik gereksinimi olan alanlarda standart endüstriyel manipülatör kullanıcı arayüzü kullanılması mümkün olmamaktadır.

Standart çözümünün yeterli olmadığı durumda tüm uygulamalar için zorunlu olan servo parametrelerin ayarlanması, mekanizmanın kalibrasyonu, güvenlik standartları gibi hazır sistemlerin kullanılması gerekmektedir.

Staubli firmasının sunduğu LLI programlama arayüzü doğrudan manipülatörün eklem konum, hız ve tork değerlerini okumayı ve/veya bu değişkenleri değiştirmeye olanak sağlamaktadır. Arayüz, C programlama dilinin kullanılmasıyla yeni fonksiyonların uygulanmasına açıktır. Ayrıca hazırlanan arayüz WxVorks ve Windows ortamlarında çalışabilecek şekilde düzenlenmiştir. Manipülatöre, uygulamaya göre farklı kinematik, dinamik model ve kontrol yöntemi uygulanabilmektedir.

Üniversitelerde ve uygulamalı araştırma merkezlerindeki mühendislik alanında yapılan çalışmalarda manipülatörlerin kullanılması hem öğrenciler hem de eğitimciler için önemli bir katkı sağlamaktadır. Bu nedenle tezin amacı, İstanbul Teknik Üniversitesi Mekatronik Araştırma Merkezi bünyesindeki Staubli RX160 manipülatör üzerinde gelecekte yapılabilecek araştırmalar için uygun platformun kurulmasıdır. Bunun için ileri ve ters kinematik fonksiyonların oluşturulması,

noktadan noktaya mutlak ve eklem düzeyinde yörünge kontrolü, dinamik modelin hesaplanması, sürtünme modelinin tanınması, sürtünme modelinin dinamik modele eklenmesi, son olarak ters dinamik model kontrolü çalışmaları ortaya konulmaktadır.

Beş ana bölümden oluşan bu tezde ilk bölümde endüstriyel manipülatörlere giriş yapılmış, tezin amacına değinilmiş ve Staubli RX160 manipülatörün teknik özellikleri ve donanımları verilmeye çalışılmıştır. Ayrıca manipülatör üzerinde kullanılan yazılımlara ve bu yazılımların hangi amaç için kullanıldığına değinilmiştir.

İkinci bölümde genel olarak manipülatörün kinematik ve dinamik modellenmekte ve eksik parametreler tanımlanmaktadır. RX160 manipülatörün ileri kinematik denklemleri türetilmektedir. Fakat bu denklemler uç noktanın konumu tespit etmek için değil analitik jacobian ve ters jacobian ifadelerini elde edilmesinde kullanılmaktadır. Jacobian matrisi manipülatörün uç noktasındaki hızı ile eklem arasındaki hızı vermekte ve deneysel sonuçların verilmesinde birçok kez bu kaynağa başvurulmaktadır. İleri ve kinematik dönüşümler için LLI kütüphanesindeki fonksiyonlar kullanılmaktadır.

Robotun dinamik yapısı, manipülatörün yörüngeyi takip ederken çıkmış olduğu yüksek ivmelenmelerin, taşıdığı yükün ağır olmasının ve taşıdığı yükün hassas olması gibi nedenler göz önüne alındığında önem kazanmaktadır. Bu nedenle manipülatörün dinamik modeli oluşturulmaktadır.

Dinamik modelin tanımlanması sırasında uzuv ağırlıkları ve uzunlukları, kütle merkez koordinatları ve kütle atalet momentleri üretici firma tarafından sağlanmıştır. Bu parametrelerin yanında manipülatörün ikinci eklemine bağlı olan fazla ağırlığı karşılayan yayın ve sürtünme momentini oluşturan sürtünme parametreleri deneysel olarak bu tezde ortaya konulmuştur.

Sürtünme modelinin oluşturulması deneysel çalışmaların büyük kısmını oluşturmaktadır. Sürtünme modeli; Stribeck etkisi altında coulomb, viskoz, statik sürtünme modeli olarak tasarlanmaktadır. Dinamik modele sürtünme ve yay etkisinin de dahil olması ile tanımlı referans hareket için tork değerleri hesaplanmaktadır. Aynı referans hareket için manipülatör içinde tanımlı olan dinamik model ve kontrolcü kullanılarak ölçülen tork değerleri elde edilmektedir. Ölçülen ve hesaplanan tork değerleri karşılaştırmalı olarak bu bölümün sonunda her bir eklem

için verilmektedir. Hataların istenilen düzeye gelmesiyle birlikte ters dinamik konum kontrolcü tasarlanabilmektedir.

Üçüncü bölümde manipülatör yörünge planlaması yapılmakta ve konum kontrolü uygulanmaktadır. Manipülatörün uç noktasının istenen bir noktadan diğer bir noktaya taşınması için yörüngeyi sınırlandırılmış veya herhangi bir yol boyunca planlanması gerekmektedir. Her iki durum için de farklı hız profilleri kullanılarak bu yörüngeler planlanmıştır. Bu hız profillerinden biri de sabit hız bölgesi sürekli ivme profilidir. Bu profilin oluşturulurken tüm eklemlerin senkronize olabilmesi için maksimum hız verisinin yanında ivme ve ekivme verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Staubli firmasının sunmuş olduğu robot teknik verilerinde maksimum ivme ve ekivme parametreleri bulunmamaktadır. Bu parametreler manipülatörün standart endüstriyel programlama arayüzü Val3 üzerinden tespit edilmektedir.

Manipülatör konum kontrol için literatürde sıklıkla kullanılan oransal ve türevsel (PD) kontrolcü kullanılarak ters dinamik kontrol yöntemi uygulanmıştır. Katsayılar manuel olarak ayarlanmış, ayarlama yapılırken her bir eklem tek tek hareket ettirilmektedir. Daha sonra ince ayarın yapılması için eklemler ikili ve üçlü gruplandırılarak, sonrasında tüm eklemler birlikte hareket ettirilmektedir.

Dördüncü bölümde manipülatör için oluşturulan model ve tasarlanan konum kontrolcünün performansını analiz edilmektedir. İki nokta arasında tekrarlayan ve değişken yükleme durumunda hareket ettirilerek performansları ortaya konmaktadır. Performans parametresi olarak manipülatör uç nokta hassasiyeti ve tekrarlanabilirlik ölçümleri yapılmış ve aynı ölçüm metodu ile Staubli RX160 manipülatörden elde edilen değerlerle karşılaştırılmaktadır.

Son bölümde yapılan çalışmaların sonuçları özetlenmekte ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar için önerilerde bulunmaktadır.

MODELLING, IDENTIFICATION AND CONTROL OF STAUBLI RX160 MANIPULATOR

SUMMARY

Industrial manipulators have a very common usage in robotic area. Not only it has decreased cost of manufacturing but also with its accuracy and productivity and as compared with special machines its better flexibility and contribution to human in hazardous condition and repetitive tasks it stands out.

Nowadays, a standard user interface, which is designed for manipulators used in industrial applications, is not suitable for critical real-time applications. In addition, it is not easy adaptable for any kind of peripheral devices. Areas that need very high technologies like nuclear, biology, and aerospace areas, standard industrial manipulator user interface may not be used properly.

Cases when applied standard solution is not sufficient, it is necessary to be operated with ready-to-use systems in order to avoid adjusting servo parameters and calibrating mechanics and performing safety standard again.

Thanks to be provided LLI (Low-level interface) user interface by Staubli, it is possible to get feedback and command of position, velocity and torque variables of each joint of manipulator. The interface gives opportunity to be programmed with C program language. Beside one can worked either WxVorks or Windows platform without any effort to make the program been compatible. Regarding to different kind of application variant kinematic, dynamic model and control method can be applied to manipulator.

At studies are related engineering area at university and applied research centers, manipulator contribute both students and educator significantly. Therefore goal of this thesis build up convenient working platform on Staubli RX160 manipulator that is found for applications and research can be applied in the future at Istanbul Technical University.

For that purpose, forward and inverse kinematic functions, point-to-point task space and joint space trajectory planning, dynamic modeling and modeling of friction and identification of unknown parameters of friction and counter weight spring are introduced in this thesis.

Mainly, the thesis is composed of five chapters. At the first chapter, it is given introduction of industrial manipulator, afterward introduced purpose of thesis and stated technical properties and hardware of Staubli RX160 manipulator. Furthermore, it is given software and user interface used by manipulator operator and explanation of that software, its usage area.

At the second chapter, kinematic and dynamic functions of manipulator are derived and unknown parameters of dynamic model are determined. Forward kinematic equations of RX160 manipulator are formed. However this equations are not used in order to figure out position of end effector, is used to find out jacobian and inverse jacobian matrix. Jacobian matrix is giving relation between velocity of joints and velocity of end effector, it is appealed for this source in order to present experimental results, typically. For transformation between forward and inverse kinematics, kinematic functions from LLI library are always utilized.

Due to reasons such as occurred high acceleration while following trajectory, high workpiece payload and fragile manipulated workpiece, dynamic structure of manipulator can be very important. Therefore, it may be necessary of modeling dynamics of manipulator.

Company Staubli supplies some parameters like weight and length of links, coordinate of the center of gravity for links and mass moment of inertias. Besides this parameters, a spring that is working as counter weight connected to link 2 and friction coefficients are identified by experimentally and are given at the thesis. Modeling of frictional torques has most of possession of the experimental procedure. Friction model is composed of static and coulomb friction, viscosity with Stribeck effects. Finally adding friction and spring model into dynamic model gives calculated torque values as applied unique reference trajectory. Measured torques is gathered by using already defined dynamic model and controller at manipulator controller by Staubli for the same reference trajectory. One can compare measured and calculated torques graphics that are given at the end of this section for each joint.

After reducing errors between measured and calculated torques and reaching desired values, it is possible to design inverse dynamic position controller.

At the third section is shown trajectory planning and performed position control to the manipulator. Due to movement of end effector from a desired position to other desired position at task space, trajectory is to be planned by path is defined between two points as free or constraint. In the thesis trajectory is planned with different velocity profile for each case. One of the profiles is continuous an acceleration profile with constant velocity phase. When the trajectory planning is performed, it can be necessary that all joint moves synchronized. For the synchronization, desired acceleration and jerk parameters do not exist at the manipulator catalog. The parameters identified by using manipulator standard controller and user interface Val3.

In literature, inverse dynamic control method with proportional and derivative (PD) is applied frequently when position control of manipulator is considered. Gains of PD controller of each joint are adjusted by manually and experimentally. While experimental results are gathered, each joint has moved separately, and then joints were moved as composed of two and three group joints, finally all joints are controlled at the same time.

At the fourth section, performance of derived manipulator model and position controller is analyzed. Staubli RX160 manipulator has been operated using by two different kind of application. First is represent pick&place application that is defined as repetitive movement and using for handling of workpiece. As trajectory is planned, it is considered that all joints whether move together and sufficient distance to reach maximum velocity and acceleration. Second application is applying different payload at the end effector and analyzing performance under those payload. As performance parameters, manipulator's end effector accuracy and repeatability are considered. These parameters are measured for designed dynamic model, controller and embedded model and controller of Staubli RX160. In addition, performance is compared for same trajectory. It is stated at the end of this chapter.

Consequently, results are summarized at the end of thesis. Possible improvements recommended for the studies can be done in the future and stated incomplete points of this study. Regarding between measurements and simulations that have been

observed are caused by joint friction and controller method. Joint friction model is varied because of different temperature conditions of joints. Beside joint friction model does not involve the pre-sliding friction behavior of the joints precisely. According to friction model error depends on velocity of joints. At low joint velocity has not good result when compared with high velocity. Controller method can be improved if one use signals filter and designing new controller by means of other controller methods.

1. GİRİŞ

Robot, en genel tanımıyla çoğunlukla bilgisayar ile kontrol edilen bağımsız birkaç serbestlik dereceli yönetilen cihazdır [1]. Robotik, geleneksel mühendislik sınırlarıyla kesişen modern teknoloji alanında göreceli olarak yeni bir alandır. Robot ve uygulamalarının doğasını anlamak için elektrik, makine, sistem, endüstri, bilgisayar mühendisliği yanı sıra matematik gibi bilim dallarında bilgi gerektirmektedir [2]. Endüstriyel üretim, sağlık, taşıma, uzay, rehabilitasyon gibi birçok uygulama alanında robotlar insan yaşamına etki etmektedir.

Endüstriyel robotlar ise; otomatik kontrol edilen, tekrar programlanabilen ve üç veya daha fazla eksenle iş yapan, sabit veya hareketli olarak endüstriyel otomasyon uygulamalarında kullanılan manipülatörlerdir [3]. Tezin bu bölümünden itibaren robot yerine manipülatör kelimesi kullanılmaktadır. Şekil 1.1’de Staubli RX160 endüstriyel manipülatör gösterilmektedir.

Endüstriyel manipülatörler robotik alanında oldukça yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Endüstride üretim maliyetlerini düşürmesinin yanında hassasiyet ve üretkenliği, özel makineler ile kıyaslandığında artan esnekliği ve tehlikeli ortamlarda, tekrarlanan ağır işlerde insanlığa katkı sağlamasıyla ön plana çıkmaktadır.

Manipülatörlerin hassas ve güvenilir olabilmesi için, çoğu zaman kolay olmayan, çalışma uzayında kontrol edilebilmesi oldukça önemlidir. Kontrol açısından bakıldığında fazlasıyla etkileşimli lineer olmayan sistemlerden meydana gelmektedir. Kinematik yapı, eksenin sürülmesini sağlayan mekanizmanın yapısı ve gerçek zamanlı kontrolün bir araya gelmesiyle; hassasiyet, çabukluk, taşıma kapasitesi ve ulaşma gibi manipülatörün ana performans karakteristikleri belirlenmektedir. Manipülatörler, robotların otomasyon sistemlerine adapte olmasına izin veren dört temel işlemi sağlayan özelleştirilmiş çok çekirdek işlemcili hesaplama sistemleri tarafından kontrol edilmektedir. Bu dört temel işlem; yörünge üretim ve takip, hareket birleştirme ve sıralama, kullanıcı bütünleştirme, bilgi akışının sağlanmasıdır. Endüstriyel manipülatörler genellikle konumlandırma ve taşıma araçlarıdır. Bu

nedenle kullanışlı manipölatörler, manipölatör ile çevre arasında kuvvet ve tork etkileşimini, kendi hareketini kontrol etmeye yeteneğine sahip olmalıdır. Manipölatör kontrolü, fiziğin temel hareket kanunlarından esas alan manipölatör matematiksel modeline gereksinim duymaktadır. Bu matematiksel modeller kinematik ve dinamik modellerdir. Kinematik model için mekanizmanın ileri ve ters kinematik modelleri kullanılmaktadır. Dinamik model için ise çoğunlukla Newton-Euler veya Euler-Lagrange yöntemleri kullanılmaktadır. Her iki kinematik model ve dinamik model de manipölatörün kontrolü, benzetimi (simülasyon) ve tasarımı için gereklidir [4]. Bu tezde manipölatörün; ileri kinematik model, sürtünme modelini de içeren dinamik model, yörünge planlama ve eklem konum kontrolü yöntemi verilmektedir. Son kısmında ise belirtilen modeller Staubli RX160 endüstriyel manipölatör üzerinde uygulanmakta ve sonuçlar ortaya konulmaktadır.



Şekil 1.1 : Endüstriyel Manipölatör(Staubli RX-160).

1.1 Tezin Amacı

Staubli manipülatörler endüstride montaj, malzeme taşıma, ilaç yapımı boyama, imalat, paketlenme gibi uygulamalarda kullanılmak üzere tasarlanmıştır. ‘C programlama’ diline benzer VAL3 dili manipülatör hareket kontrolü için Staubli tarafından geliştirilmiştir. Bu programlama dili oldukça basittir. Fakat kritik gerçek zamanlı uzaktan kontrol uygulamaları için uygun değildir. Kuvvet/tork sensörü, kamera, heptik cihaz gibi çevre birimlerinin manipülatöre adapte edilmesi bu üst seviye programlama diliyle kolay olmamaktadır.

Robotlar, endüstriyel otomasyon alanında zor görevleri yerine getirerek veya nükleer, biyoloji, uzay alanında yüksek teknolojiyi işlemleri uygulayan önemli bir çevre birimi olarak kilit bir rol oynamaktadır. Bu durumların herhangi birinde standart endüstriyel manipülatörler kullanılması mümkün olmamaktadır. Bu nedenle endüstriyel manipülatörler ya gerekli fonksiyonu sağlamayacak, ya özel bir kontrol modeli gerektirecek ya da mevcut kontrol yazılımının kullanılmasını gerektirecektir [5].

Endüstriyel manipülatör mekanizmasının özel sisteme adapte edilmesi yüksek maliyetli ve belirsiz bir sistemi ortaya çıkarmaktadır. Bu eklemede kontrol sinyali, kullanılan elektronik, güvenlik standartları gibi çoğu zaman manipülatör üreticisinden edinilmesi kolay olmayan bilgilere sahip olmak gerekmektedir [5].

Ayrıca servo parametrelerin ayarlanması, mekanizmanın kalibrasyonu, manipülatör güvenliği gibi önemli konuların çözülmesi gerekmektedir. Buna ilave olarak bu özelliklerle ilişkili bakım araçlarının da geliştirilmesi zorunlu olmaktadır [5].

Üniversitelerde ve uygulamalı araştırma merkezlerindeki mühendislik alanında yapılan çalışmalarda manipülatörlerin kullanılması hem öğrenciler hem de eğitimciler için önemli bir katkı sağlamaktadır [5].

Bu nedenle tezin amacı, İstanbul Teknik Üniversitesi Mekatronik Araştırma Merkezi bünyesindeki Staubli RX160 manipülatör üzerinde gelecekte yapılabilecek araştırmalar için uygun platformun hazırlanmasıdır. Bunun için ileri ve ters kinematik fonksiyonların oluşturulması, noktadan noktaya mutlak ve eklem düzeyinde yörünge kontrolü, dinamik modelin hesaplanması, sürtünme modelinin tanınması, sürtünme modelinin dinamik modele eklenmesi, son olarak ters dinamik model kontrolü çalışmaları ortaya konmaktadır.

1.2 Bazı Tanımlamalar

Bu bölümde robotikte en çok kullanılan tanımlar üzerinde durulacaktır.

- Bağımsız hareket edebilen aygıtların sayısı serbestlik derecesi olarak adlandırılır.
- Manipülatör uç noktası, manipülatörün ucuna takılabilen ve faydalı işleri yerine getiren takım, parça tutucu veya diğer cihazların bulunduğu noktadır.
- Çalışma uzayı, manipülatörün uç noktasının pozisyon ve yönelim olarak uzayda ulaşabildiği hacmi nitelemektedir.
- Pozisyon nesnenin ötelenerek bulunduğu konumdur.
- Yönelim, koordinat takımın sabit orijin noktasında dönerek almış olduğu konumdur. Örneğin bir uçağın yönelimi yalpa (roll), yunus (pitch) ve sapma (yaw) açıları ile ifade edilir.
- Durum ise yönelim ve pozisyonun birlikte verildiği terimdir.
- Uzun eklemleri birbirine bağlayan rijit metalden parçalardır.
- Eklemler manipülatörün eklemlerinin birbirlerine göre hareket etmelerine izin veren kısımlardır.
- Eyleyiciler, manipülatörün eklemlerinin hareketi için kuvvet ve tork sağlayan aygıtlardır.
- Sensor, nesnenin var olup olmadığını veya mevcut durumunu algılayan ve geri beslemeye yarayan cihazlardır. Bunlar, manipülatörün çevresiyle etkileşimini sağlamaktadır.

1.3 Tezin Bölümleri

Bu tezde yapılan çalışmalar beş ana başlıkta toplanmaktadır. İlk bölümde endüstriyel manipülatörün kinematik modeli oluşturulmakta, ikinci bölümde manipülatör modeli Staubli RX160 endüstriyel manipülatörün dinamik modeli sürtünme, kütle, atalet ve geometrik parametrelere bağlı oluşturulmakta, üçüncü bölümde yörünge planlanmakta ve eklem konum kontrolü modeli oluşturulmakta; dördüncü bölümde ilk üç bölümde yapılan çalışmalar endüstriyel manipülatöre uygulanmaktadır. Tezin

son bölümünde ise uygulanan yöntemlerin performans değerlendirmesi ve gelecekte yapılabilecek çalışmalara önerilerde bulunmaktadır. Bu beş bölümün içeriği ile ilgili aşağıda kısaca bilgi verilecektir.

Kinematik problemi, harekete neden olan kuvvet ve tork göz önüne alınmaksızın manipülatör hareketinin tanımlanmasıdır. Bu nedenle kinematik çözüm geometrik çözüm olarak da adlandırılmaktadır. Kinematik problemi iki kısımdan meydana gelmektedir. İleri kinematik problemi, manipülatörün eklem değişkenlerinin değerine bağlı olarak manipülatör uç noktasının konumu ve yöneliminin hesaplanmasıdır. Ters kinematik problemi ise verilen uç nokta konumu ve yönelimi için eklem değişkenlerinin değerlerinin bulunmasıdır. Ters kinematik problemi, ileri kinematik problemine göre çözülmesi daha zordur.

Dinamik model, kuvvet ve hareket arasındaki ilişkiyi tanımlayan dinamik denklemlerdir. Bu denklemler manipülatörün tasarımında, manipülatör hareketinin benzetim ve animasyonunda, kontrol algoritmasının tasarlanmasında dikkate alınması önemlidir [2]. Tekrarlayan Newton-Euler formülasyonu ve Euler-Lagrange denklemleri literatürde manipülatör dinamiğinin modellenmesinde kullanılan iki ana yöntemdir. Tekrarlayan Newton-Euler formülasyonu (Luh et al.,1980) ters dinamik modelin gerçek zamanda hesaplanabilmesi için kullanılan en verimli algoritma olması nedeniyle manipülatör modelinin oluşturulmasında tercih edilen yöntem olmaktadır [6].

Manipülatör görevi, manipülatörün izleyeceği yörüngenin tanımlanmasıyla belirlenmektedir. Yol, mutlak veya eklem koordinat sisteminde tanımlanan sıralı noktaların oluşturduğu geometrik yerdir. Yörünge üretme, manipülatörün takip etmesi istenilen yolun zamana göre fonksiyonun manipülatör kontrol sistemi için hesaplama işidir. Manipülatörün yörüngesini; iki nokta arasında herhangi bir yol, iki nokta arasında istenen bir ara noktadan geçen herhangi bir yol gibi farklı sınıflandırmalar mümkündür [7]. Bu tezde uygulanan yörünge, iki nokta arasında serbest ve sınırlandırılan yolu takip eden yörüngeler olarak planlamaktadır.

Manipülatörde konum kontrolünün amacı tolerans içerisinde aşım yaparak veya aşımız olarak manipülatörün uzuvlarının istenen konuma sürülmesidir. Manipülatör kontrolünün zorluğu, manipülatör dinamiğinin lineer olmaması ve uzuvlar arasındaki etkileşimin ve serbestlik derecesinin belirlediği manipülatör sisteminin karmaşıklığından ileri gelmektedir. Literatürde manipülatör kontrol problemini

çözmek için iki temel yöntem bulunmaktadır. İlk yaklaşım, manipülatörü ikinci dereceden alt lineer sistemler olarak ele alıp mevcut kontrol yöntemlerini uygulamaktır. Diğer yaklaşımda ise manipülatörün dinamik denklemlerini kullanarak modellenmesi ve eyleyicilere uygulanması gerekli torkları bu modelle hesaplanmaktadır. İlk yaklaşımın avantajı kontrol yöntemlerinin kolay uygulamasıdır. Fakat konum hataları oldukça fazla olmaktadır. İkinci yaklaşımda ilk yaklaşımın tam tersine yüksek hızlarda ve farklı ağırlık taşındığı durumlarda kontrolcü performansı daha yüksektir [8]. Bu nedenle ters dinamik kontrol olarak da adlandırılan ikinci yöntem bu tezde kullanılmaktadır.

1.4 Staubli RX-160 Manipülatör

Tezin bu bölümünde modellenmesi, tanınması ve kontrolü yapılacak olan altı serbestlik dereceli Staubli RX-160 manipülatörün ve üzerinde kullanılan ekipmanların detayları yer almaktadır.

İlk olarak teknik özellikleri ve manipülatör elektro-mekaniği, kontrolörü, el kumandası ve kuvvet tork sensörünü gibi ekipmanlar tanıtılacaktır. Bir sonraki adımda, kullanılan yazılım mimarisi ve yazılımlar açıklanacaktır.

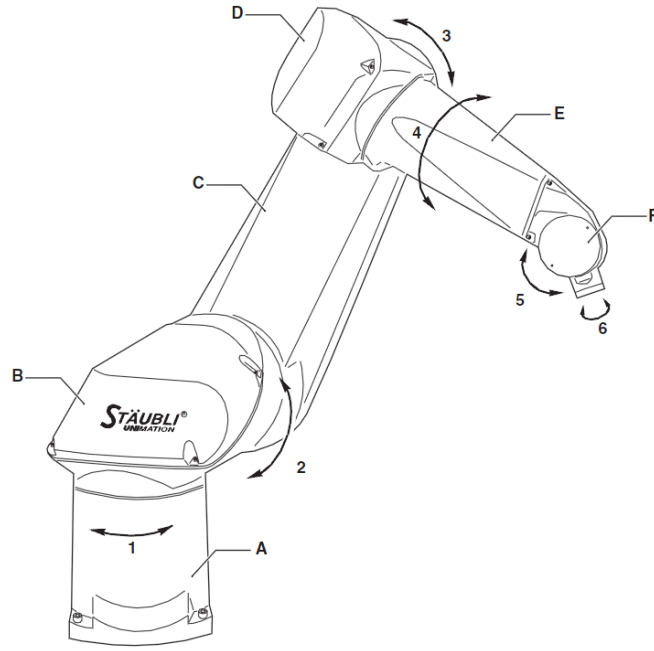
1.4.1 Teknik özellikler

Şekil 1.2’de gösterildiği gibi RX-160 kendi içinde bağlanmış altı adet döner eklemden oluşmaktadır. Bu eklemlerin dönüş yönleri her eklem üzerinde ayrı ayrı belirtilmiştir.

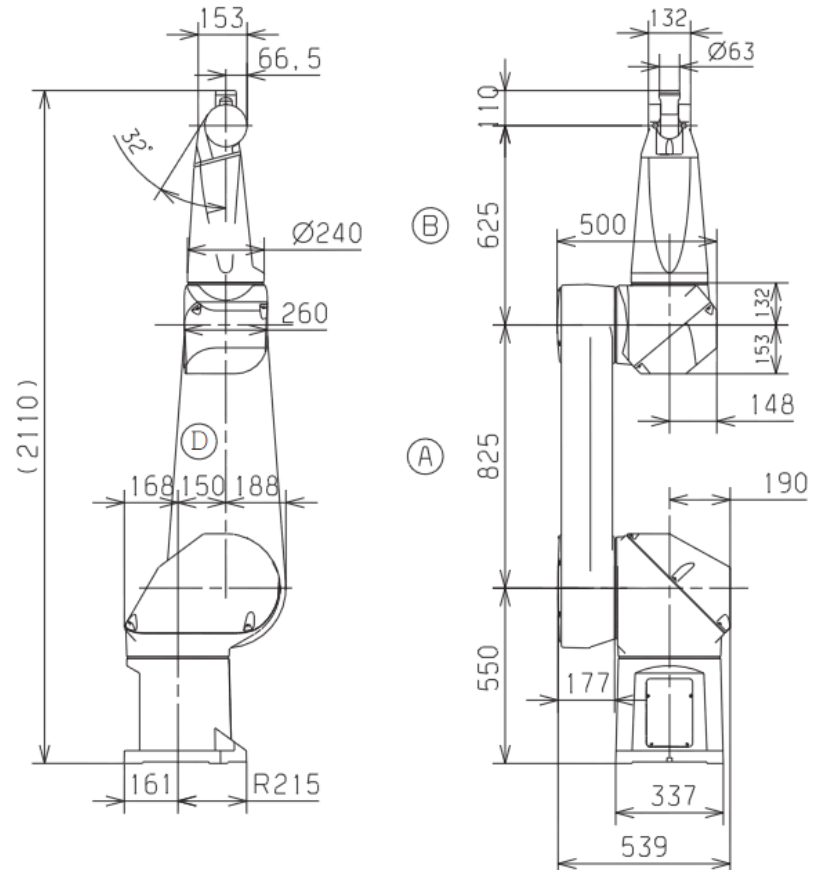
Her bir manipülatör eklemının dönüşü kodlayıcıyla (enkoder) donatılmış fırçasız motorlar vasıtasıyla gerçekleşmektedir. Her bir motor ayrıca mekanik fren ile desteklenmiştir. Manipülatör montajı esnek bir şekilde geniş uygulama alanında çalışabilmesi planlanarak yapılmıştır [9].

Şekil 1.2’ye göre, manipülatörün ana elemanları taban (‘A’ ile gösterilmiş) , omuz (‘B’ ile gösterilmiş), kol (‘C’ ile gösterilmiş), dirsek (‘D’ ile gösterilmiş), önkol (‘E’ ile gösterilmiş) ve bilek (‘F’ ile gösterilmiş) olarak nitelendirilmektedir.

Manipülatörün ölçüleri Şekil 1.3’de verilmiştir. Nominal hız koşullarında taşıyabileceği en fazla ağırlık 20 kg, [10]’de belirtilen konum, atalet ve hızlarda ise 34 kg ‘dır.



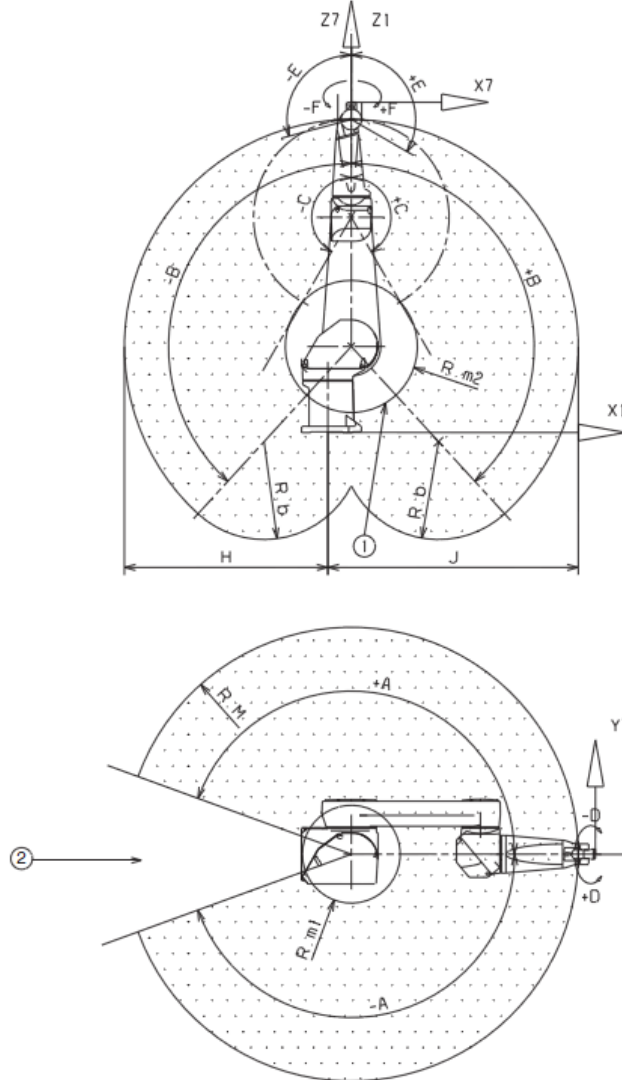
Şekil 1.2 : RX-160 Manipulatörün mekanik bölümleri [10].



Şekil 1.3 : RX-160 Manipulatörün ölçüleri [10].

Manipulatörün çalışma sıcaklığı $+5^{\circ}C$ ile $+40^{\circ}C$ aralığındadır. Çalışma ortamında nem oranı 30% - 95% aralığında müsaade edilmektedir. En yüksek çalışma yüksekliği

2000 metre'dir. Manipülatör ağırlığı 248 kg olup çalışma uzayı Şekil 1.4'de gösterilmiştir. Buna göre manipülatörün ulaşabileceği mesafe 1710 mm.'dir. Ayrıca, uç noktanın tekrarlanabilirliği ± 0.05 mm.'dir [10].



Şekil 1.4 : Staubli RX-160 manipülatörün çalışma uzayı [10].

Eklemlerin çalışma açıları, açısal genlikleri, açısal çözünürlüğü, nominal hız ve çıkabildiği en yüksek hızlar Çizelge 1.1'de verilmiştir.

Çizelge 1.1 : Staubli RX-160 manipülatörün teknik özellikleri [10].

Eksen	1	2	3	4	5	6
Dönme açısı (°)	320	275	300	540	225	540
Çalışma aralığı dağılımı (°)	± 160	± 137.5	± 150	± 270	+120 -105	± 270
Nominal hız (°/s)	165	150	190	295	260	440
Maksimum hız (°/s)	200	200	255	315	390	870
Açısal çözünürlük (°. 10^{-3})	0.042	0.042	0.054	0.062	0.12	0.17

1.4.2 Donanım

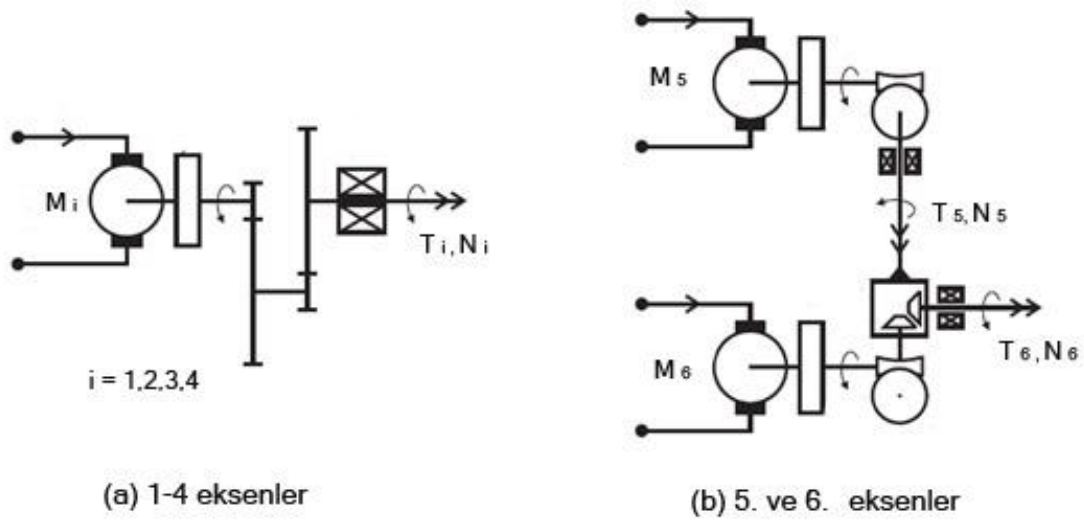
Teknik özellikleri yukarıda verilen Staubli RX160 manipülatörün iş yapabilmesi için gerekli olan donanımlardan ve yardımcı ekipmanlardan detaylı olarak bu bölümde bahsedilmektedir. Manipülatör mekaniği, eyleyiciler (aktüatör) ve kodlayıcı, kontrolör ve el kumandası, parça tutucu (gripper) gibi uç noktada iş yapabilen ekipmanlar gerekli; kuvvet/tork sensörü, kamera ve harici bilgisayar yardımcı ekipmanlardır. Şekil 1.5’de bu ekipmanlar bir arada gösterilmektedir.



Şekil 1.5 : Manipülatör ana ve yardımcı donanımlar.

1.4.2.1 Manipülatör mekaniği

Manipülatör mekaniği motorların, frenlerin, hareket aktarma organlarının, kablo taşıyıcısının, pnömatik ve elektrik kablolarına ilave olarak ağırlığı dengelemek için kullanılan yayın montajından oluşmaktadır. İlk dört eklemden hareketin aktarılması firmanın ‘Staubli Birleştirilmiş Eklem’ (Staubli Combined Joint) adı verdiği yapıyla gerçekleşirken, son iki eklemden aktarma organı etkileşimli (coupled)’dir [6]. Şekil 1.6(a)’da ilk dört eklemden aktarma organı yapısını göstermektedir. Bu yapı, helisel dişli, çevrimsel dişli ve rulmandan oluşmaktadır. Şekil 1.6(b) ise son iki eklemden aktarma organ yapısını ortaya koymaktadır. 5 ve 6. eklemden ortak sonsuz dişli ve rulman, 6. eklemden ayrıca sarmal konik dişli bulunmaktadır [6].



Şekil 1.6 : RX-160 manipülatörün aktarma organlarının modeli [6].

1.4.2.2 Eyleci ve kodlayıcılar

Staubli RX160 manipülatör her bir eksen dişli kutusu üzerinden üç fazlı servo motor ile hareket ettirilmektedir. Motor eksen üzerinde bulunan kodlayıcı sayesinde hız ve konum ölçülmektedir. Eylecinin türü, manipülatör eksenine sağlanabilecek maksimum gücü belirlerken, kodlayıcının çözünürlüğü manipülatörün ulaşabileceği en üst sınırı belirlemektedir.

1.4.2.3 Kontrolör ve el kumandası (pendant)

Şekil 1.7’de gösterilen, RX-160 için kullanılan kontrolör ‘CS8C’ olarak adlandırılmaktadır. Tüm elektriksel bağlantıların gerçekleştiği kontrol paneli içerisinde yer almaktadır.

Kontrolör içerisinde manipülatörün her bir eksenindeki servo motorları sürmek için kullanılan servo güç amplifikatörleri bulunmaktadır. Ayrıca içerisinde bulunan elektronik donanım sayesinde acil durma (emergency stop) gibi manipülatörün güvenlik sistemi kontrol etmekte, servo amplifikatörlere ve motor frenlerine güç sağlamaktadır. Kontrolör içersinde gerçek zamanlı işletim sistemi çalışan çok çekirdekli endüstriyel PC bulunmaktadır [6].

Kontrolör içerisinde elektrik gerilimi, güç kaynağı üzerinden üç fazlı AC gerilimin DC gerilime çevrilmesi ile elde edilmektedir. Kontrolör üzerinde ayrıca mantıksal devreleri beslemek için ARSP güç kaynağı, elektriksel güvenliği sağlamak amaçlı

RSI devre kartı ve ethernet, seri ve USB haberleşme portlarını bulundurmaktadır [9]. Şekil 1.7 ‘de manipölatör kontrolörü gösterilmektedir.



Şekil 1.7 : CS8C manipölatör kontrolörü.

Operatör ile sistem kontrolcüsünü arasındaki iletişim el kumandası ile gerçekleşmektedir. Manipölatöre güç el kumandası üzerinden verilmektedir. El kumandası manipölatörün anlık olarak hareketini kontrol edebileceği gibi, manipölatörün ulaşması gerektiği noktaları tanıtarak manipölatörü programlayabilmektedir. El kumandası üzerinde, kontrol paneli üzerinde olduğu gibi acil durdurma butonu bulunmaktadır. Ayrıca emniyet amaçlı üzerinde bulundurduğu güvenlik anahtarı (deadman switch), kullanıcın manipölatör hücresi içerisinde karşılaşılabileceği bir problemde manipölatörü ani olarak durdurup gücü kesmektedir. Şekil 1.8 ‘de CS8C kontrolörüne ait el kumandası verilmektedir.

1.4.2.4 Schunk parça tutucu (gripper)

Schunk firmasının üretmiş olduğu parça tutucu sayesinde farklı geometrik formdaki iş parçaları bir noktadan bir noktaya taşınabilmektedir. Pnömatik veya elektrikli

tahrikli olabilen parça tutucular, sürtünme veya şekil bağı ile iş parçalarını yakalamaktadır.



Şekil 1.8 : RX-160 manipülatörün el kumandası.

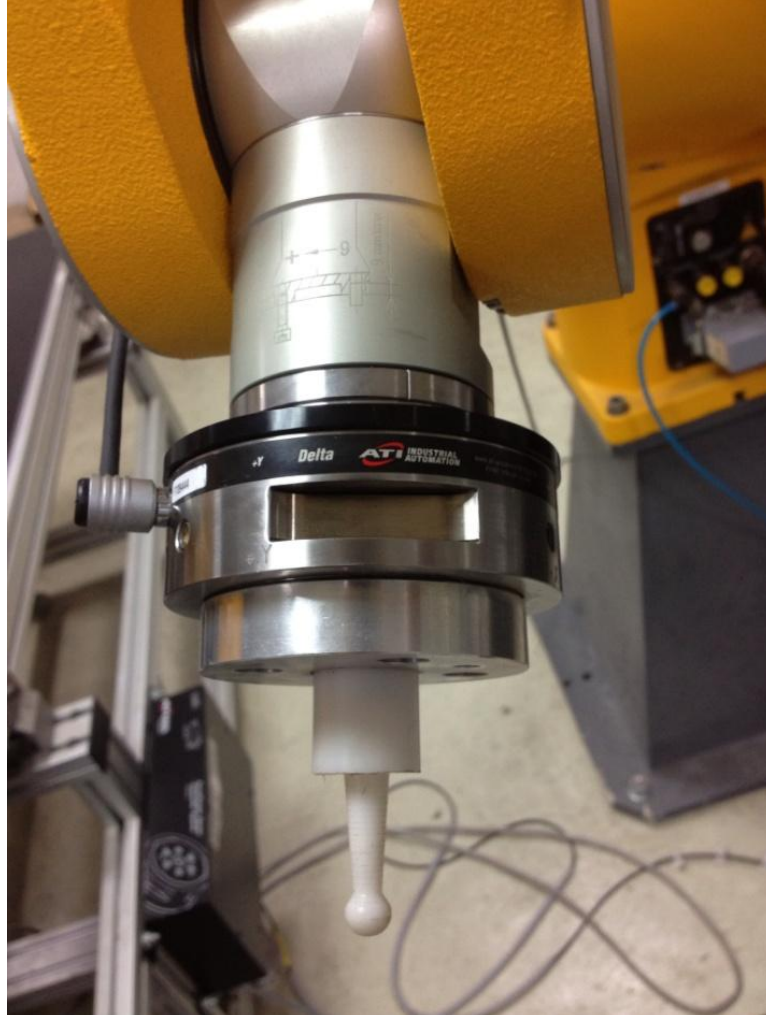
Manyetik veya proksimite sensörü ile manipülatör kontrolörüne dijital çıktı olarak parmaklarının konumunu (açık/kapalı) bildirmektedir. Yine Schunk firmasının üretmiş olduğu çabuk takım değiştirme sistemi (tool changer) ile farklı parça tutucularının veya takımların kolaylıkla değiştirilmesi mümkün olmaktadır.

1.4.2.5 ATI kuvvet tork sensörü

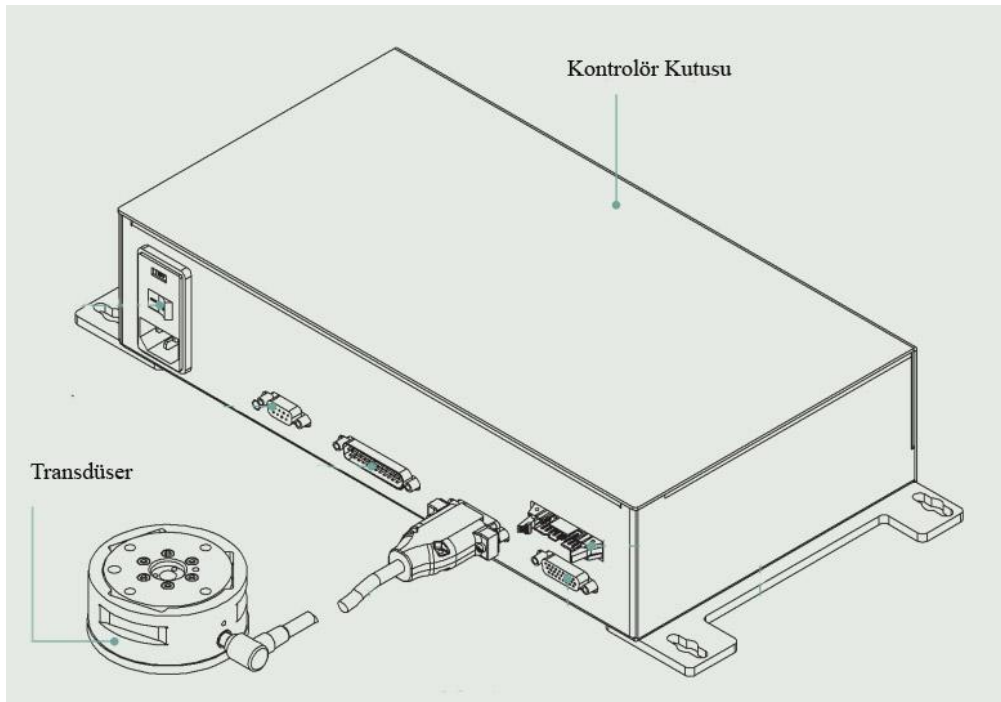
Kuvvet ve tork kontrolü uygulamak gerektiğinde ATI firmasının üretmiş olduğu Delta model kuvvet-tork sensörü (transdüser) kullanılmaktadır. Bu sensor manipülatörün bilek olarak adlandırılan ekleme takılmaktadır. Şekil 1.9’da bu sensörü göstermektedir.

Kuvvet tork sensör sistemi iki ana ekipmandan oluşmaktadır. Transdüser ve kontrolör kutusu (Şekil 1.10)’dur. Kontrol kutusu, çarpma algılama ve takım taşıma gibi üst düzey fonksiyonları içermekte ve transdüserden aldığı sinyali işleyerek kuvvet ve tork verisine dönüştürmektedir.

Delta transdüser, 3 eksenle kuvvet ve 3 eksenle tork olmak üzere toplamda 6 veri toplamaktadır. Bu sensörün kalibrasyonu SI-660-60 aralığına göre yapıldığı için bu aralık için verilen çözünürlük, ölçüm aralık değeri dikkate alınmaktadır. Çizelge 1.2’de Delta transdüserine ait her bir eksen için çözünürlük ve ölçüm aralık değeri yer almaktadır.



Şekil 1.9 : RX-160 manipulatör harici kuvvet-tork sensörü.



Şekil 1.10 : ATI F/T sensör ve kontrolör kutusu [11].

Çizelge 1.2: ATI Delta F/T sensör ölçüm aralığı ve çözünürlüğü [11].

Kalibrasyon	Ölçüm aralığı				Çözünürlük			
	Fx, Fy (N)	Fz (N)	Tx, Ty (Nm)	Tz (Nm)	Fx, Fy (N)	Fz (N)	Tx, Ty (Nm)	Tz (Nm)
SI-165–15	165	495	15	15	1/32	1/16	1/528	1/528
SI-330–30	330	990	30	30	1/16	1/8	5/1333	5/1333
SI-660–60	660	1980	60	60	1/8	1/4	10/1333	10/1333

1.4.3 Yazılım

Staubli firması tarafından kullanıcılara sağlanan ve manipülatörü programlamak için kullanılan iki farklı yazılım bulunmaktadır. VAL3 adı verilen, endüstriyel uygulamalarda manipülatörün programlanması için kullanılan üst seviye programlama dili ve LLI (Low Level Interface) adı verilen alt düzey programlama dilleri bulunmaktadır. Her iki yazılım, içerisinde PENTIUM® Aritmetik birim ve VxWorks® gerçek zamanlı işletim sistemi bulunan CS8C kontrolöründe çalışmaktadır [5].

1.4.3.1 Val3 programlama arayüzü

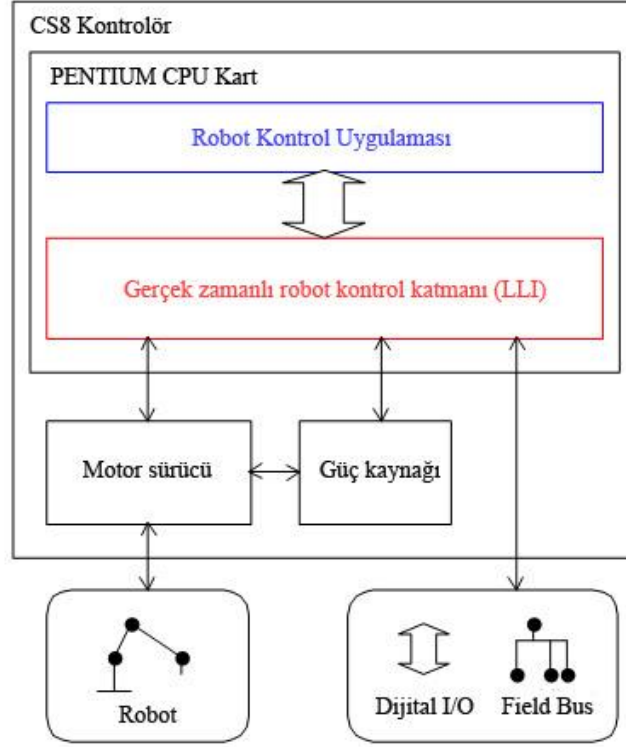
VAL3 programlama arayüzü üst düzey programlama dili olarak kullanıcılara manipülatörü kolaylıkla programlamalarına olanak sağlamaktadır. VAL3 dili sayesinde standart gerçek zamanlı yüksek seviyeli bilgisayar dillerinin temel özellikleriyle endüstriyel manipülatör hücresinin kontrol fonksiyonları bir araya gelmektedir. VAL3 programlama dili gelişmiş kütüphaneleriyle endüstriyel uygulamalarda kullanıcısının manipülatör görevini yerine getirecek şekilde kolaylıkla programlaması mümkündür. Manipülatör programlama dilleri içinde en eski dil olan VAL3 dilinde en sık kullanılan komut ‘MOVE’ komutudur. Bu komutun hız, ivme, referans konum gibi parametreler kullanılarak uç nokta hedefe yönlendirilmektedir.

1.4.3.2 LLI alt düzey programlama arayüzü

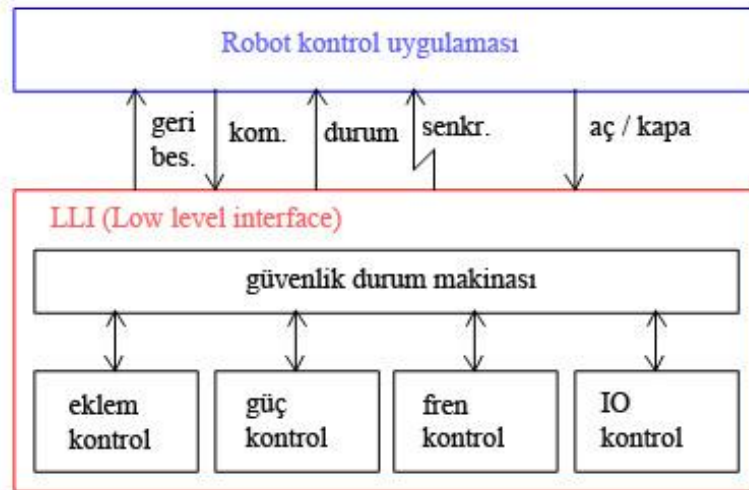
LLI, Staubli endüstriyel manipülatör serisini kontrol etmek için kullanılan bir C/C++ kütüphanesidir. Gerçek zamanlı işletim sistemi olan VxWorks üzerinde çalışan bu kütüphane gelişen uygulamalar için gerekli olan bir altyapıdır. Şekil 1.11’de CS8’in genel mimarisi yer almaktadır. Şekil 1.12’de ise LLI çalışma yapısı gösterilmektedir.

LLI kütüphanesi kullanılarak manipülatör üzerindeki birçok bilgiye ulaşmak ve bunları kontrol etmek mümkündür. Girişlerin/çıkışların okunması ve yazılması,

motorlara güç verilmesi ve gücün kesilmesi ve en önemlisi sensör ile motordaki verilerin geri besleme yoluyla manipülatör kontrolörüne beslenmesi gerçekleşmektedir.

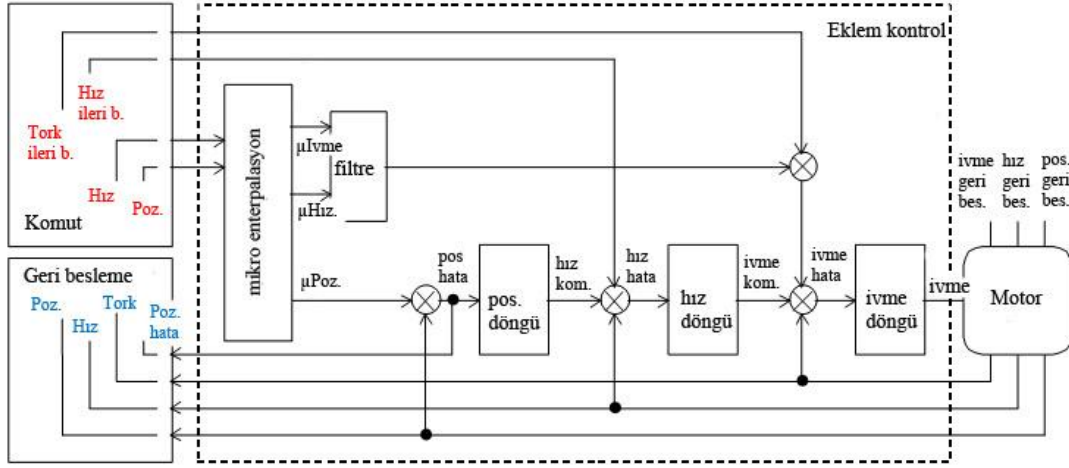


Şekil 1.11 : CS8 genel mimarisi [5].



Şekil 1.12 : LLI çalışma yapısı [5].

Kontrol şeması 3 farklı bölüme ayrılmaktadır. İlk olarak, konum kontrol döngüsü, ikinci olarak hız kontrol döngüsü ve son olarak tork kontrol döngüsü bulunmaktadır. Bu döngüler gerçek zamanlı olarak her 4 ms'de bir güncellenmektedir. Şekil 1.13 'de kontrol çevrimleri gösterilmekte ve yapısı ortaya konmaktadır.



Şekil 1.13 : Staubli manipülatör eklem kontrol çevrimleri [5].

LLI kütüphanesi, her kesmede manipülatörün bütün eklemlerine 4 farklı kontrol sinyalinin gönderilmesine ve geri besleme sinyallerinin alınmasına olanak sağlamaktadır.

Manipülatör kontrolörüne gönderilen sinyaller; açısal konum, açısal hız, ileri beslemeli açısal hız ve ileri beslemeli torktur. Manipülatör kontrolöründen alınan geri besleme sinyalleri; açısal konum, açısal hız, tork ve konum hatası olmak üzere dört geri besleme sinyalinden oluşmaktadır.

Düşük seviyeli manipülatör kontrolü için C programlama dili arayüz olarak tanımlanır. Bu bölümde anlatılan her fonksiyon manipülatöre özgü özelliklere erişebilmek için LLI_construct fonksiyonu ile oluşturulan LLI_RobotID parametresi kullanılmaktadır. Bu parametre doğru tanımlandıysa manipülatör durumunu ayrıntılı olarak ortaya koyan LLI_status fonksiyondan yararlanılmaktadır.

Program arayüzü 4 bölümde incelenmektedir:

- Yapım / Yıkım (kütüphane yöneticisi)
- Sistem programlama arayüzü (sistem parametreleri ve durumları)
- Kontrol programlama arayüzü (manipülatör kontrol fonksiyonları)
- Kinematik programlama arayüzü (kinematik fonksiyonlar)

LLI çalışma yapısı ve kullanılan fonksiyonlarla ilgili detaylı bilgi Ek-A'da bulunmaktadır.

2. MODELLEME VE TANIMA

Robot modelleme problemi iki ana bölüme ayrılabilir: kinematik ve dinamik model. Kinematik model manipülatörün eklemleri ile uç noktası arasındaki durum ilişkisini tanımlamaktadır. Dinamik model ise manipülatörün eyleyicilerine uygulanması gereken tork ve kuvveti, dinamik yapıya bağlı olarak ifade eden modeldir. Her iki model için manipülatörün eksik parametrelerin tanınması gerekmektedir.

Sırada robotun modellenmesinde ve tanınmasında kullanılan değişkenler ve parametreler belirtilmektedir. Değişkenler: konum, hız, ivme ve tork, parametreler ise kütle, kütle merkezi konumları, kütle atalet momenti, uzuvların uzunlukları, yay sabiti, sürtünme parametreleri olarak ifade edilebilmektedir.

2.1 Kinematik Model

Kinematik problemi hareketi oluşturan kuvvet ve torku dikkate almadan hareketi tanımlamak olarak ifade edilmektedir. Bu nedenle kinematik geometrik bir anlam taşımaktadır. Manipülatör uç noktasının konumu ve yöneliminin manipülatörün eklem değişkenlerine göre belirlenmesi problemine ileri kinematik, tam tersi durum için geçerli olana ise ters kinematik problem olarak adlandırılmaktadır. Manipülatör, uzuvların eklemlerle birleşmesiyle oluşan mekanizmadır [2]. Staubli RX-160 manipülatör 6 döner eklemin rijit uzuvları bir araya getirilmesiyle oluşmaktadır. Bu manipülatörün uç noktasının veya üzerindeki herhangi bir noktanın eklem değişkenlerine bağlı olarak ifade edilmesi ancak kinematik modelle mümkün olmaktadır.

2.1.1 İleri kinematik

İleri kinematik modeli, manipülatör manipülatörünün bağımsız eklemleri ile manipülatör uç noktası ve/veya manipülatör üzerinde kullanılan takımın konum ve yönelimi arasındaki ilişkiyi vermektedir. Eklem değişkenleri; eklemler döner olması durumunda uzuvlar arasındaki açı, eklemlerin prizmatik olması durumunda ise

uzuvun uzama hareket miktarıdır. n serbestlik dereceli bir manipülatörün kinematik analizi oldukça zor ve karmaşık olduğu için robotik mühendisleri tarafından manipülatörün uzuvlarını düzenlenmesinde Denavit-Hartenberg (veya D-H) düzenlemesi kullanılmaktadır [2]. DH parametreleri ve düzenlemesi bir sonraki bölümde detaylı olarak verilmektedir.

2.1.1.1 Denavit-Hartenberg düzenlemesi ve parametreleri

Denavit-Hartenberg düzenlemesi manipülatörün ileri kinematik modelini oluştururken robotikte kullanılan standart bir yöntemdir. D-H düzenlemesi, temelden başlayarak uç noktaya kadar koordinat takımların arka arkaya D-H parametreleri dikkate alınarak yerleştirilmesiyle ileri kinematik problemini basite indirgenmektedir [12]. D.H düzenlemesinde, i. uzuv ve eklemler ilişkili θ_i , a_i , d_i , α_i parametrelerine bağlı transformasyon matrislerin çarpımıyla oluşan homojen transformasyon matrisi A_i oluşmaktadır. Denklem (2.1), (2.2) ve (2.3)'de A_i matrisi verilmektedir.

$$A_i = Rot_{z,\theta_i} Trans_{z,d_i} Trans_{x,a_i} Rot_{x,\alpha_i} \quad (2.1)$$

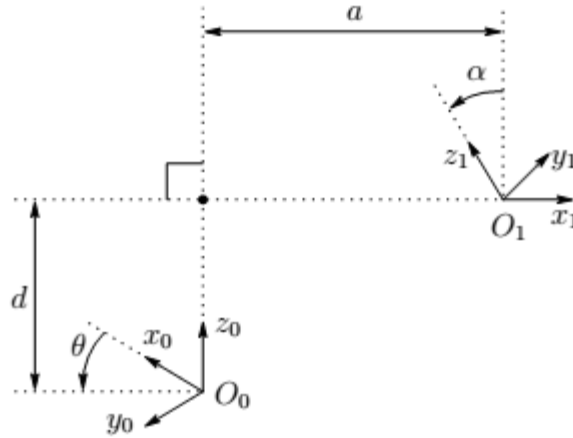
$$= \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i} & 0 & 0 \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$\times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{\alpha_i} & -s_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i}c_{\alpha_i} & s_{\theta_i}s_{\alpha_i} & a_ic_{\theta_i} \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i}c_{\alpha_i} & -c_{\theta_i}s_{\alpha_i} & a_is_{\theta_i} \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Yukarıda verilen dört parametre sırasıyla; eklem değişkeni, uzuv uzunluğu, uzuv ötelemesi ve uzuv dönme açısı olarak adlandırılmaktadır. Bu parametrelerden üçü sabittir ve manipülatör geometrisine ve koordinat takımının yerleşimine göre

parametre değeri belirlenmektedir. Homojen transformasyon matrisi A_i ; döner eklemlerde θ_i değişkenine, prizmatik eklemlerde ise d_i değişkenine bağlı fonksiyondur [2]. A_i transformasyon matrisinin 4. sütunundaki ilk üç eleman konumu, ilk üç satır ve sütundaki 3×3 ölçüsündeki matris ise rotasyon matrisini R_i oluşturmaktadır. Rotasyon matrisi kullanılarak ‘Euler açısı’ veya ‘yalpa-yunus-sapma açısı’ gösterimiyle yönelim ifade edilebilmektedir. Şekil 2.1’de D-H parametrelerinin geometrik olarak ortaya konulmaktadır.



Şekil 2.1 : D-H parametrelerinin gösterimi.

2.1.1.2 Eklemlere koordinat takımlarının atanması

Bir önceki bölümde bahsedildiği gibi Staubli RX160 manipülatördeki her bir ekleme koordinat takımı atamak için Denavit-Hartenberg yöntemi kullanılmaktadır. Koordinat takımlarının atanmasına, manipülatörde üzerinde temel(base) adı verilen ‘0’ no’lu uzuvdan başlanmaktadır. Adım adım, temelden başlayıp manipülatör kolunun uç noktasına doğru gidilmektedir. Uç noktaya gelindiğinde 6. Koordinat takımı yerleştirilmiş olacaktır. Koordinat takımlarını yerleştirilmesi Şekil 2.2’de gösterilmektedir.

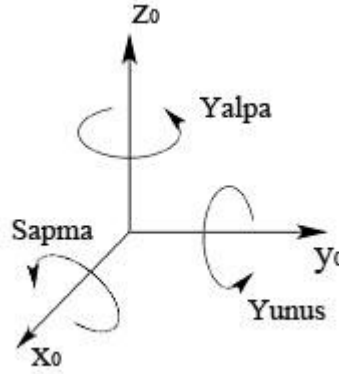
İlk olarak, tüm koordinat takımlarının Z eksenleri eklemlerin dönüş yönünü tanımlayacak şekilde seçilmektedir. Her bir koordinat takımının orijini bir önceki ekleminin Z eksenine ile kesiştiği nokta olarak seçilmektedir. X eksenine, Z eksenine ile bir önceki Z eksenine kesiştiği ortak normali boyunca seçilmektedir. Son olarak Y eksenine, X ve Z eksenine yardımıyla sağ eli kuralı kullanılarak belirlenmektedir.

Çizelge 2.1 : Staubli RX160 manipülatörün D-H parametreleri.

i	α_i (rad)	a_i (m)	d_i (m)	θ_i (rad)
1. Eklem	0	0	0	θ_1
2. Eklem	$-\pi/2$	0.150	0.250	$\theta_2 - \pi/2$
3. Eklem	0	0.825	-0.250	$\theta_3 + \pi/2$
4. Eklem	$\pi/2$	0	0.625	θ_4
5. Eklem	$-\pi/2$	0	0	θ_5
6. Eklem	$\pi/2$	0	0.110	θ_6

2.1.1.4 Yalpa, yunus, sapma açısı gösterimi

Daha önce de ifade edildiği gibi rotasyon matrisi olarak ifade edilen R_i ; x_0 , y_0 ve z_0 eksenlerinde belirli bir sırada dönmesiyle oluşan rotasyon matrislerin çarpımı ile elde edilmektedir. Bu dönme açıları ‘yalpa-yunus-sapma’ açıları olarak ifade edilmektedir. Şekil 2.3 ‘de dönüş açıları ve eksenleri göstermektedir.



Şekil 2.3 : Yalpa, yunus ve sapma açıları.

Yalpa-yunus-sapma açısı gösteriminde sırasıyla x_0 ekseninde φ , y_0 ekseninde θ , z_0 ekseninde ise β kadar bir önceki eksen takımına göre dönmektedir. Dönüş açıları sabit eksen takımına göre tanımlanmak istenseydi matrislerin çarpım sırası değişmekte ve R_z çarpımın başına R_x ise matris çarpımın sonuna gitmektedir. Bu nedenle yönelimi ifade eden açıların seçimi ve matrislerin çarpım sırası önem taşımaktadır. Staubli RX160 manipülatör yönelim açıları Staubli firması tarafından yalpa-yunus-sapma açısı gösterimiyle bir önceki eksen takımına göre tanımlanmaktadır. VAL3 programlama arayüzünde alınan deneysel sonuçları LLI programlama arayüzü yapılan deneysel sonuçlar ile karşılaştırmak için aynı açısal tanımlama seçilmektedir.

$$R_{XYZ} = R_{x,\varphi} R_{y,\theta} R_{z,\beta} \quad (2.4)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_\varphi & -s_\varphi \\ 0 & s_\varphi & c_\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_\theta & 0 & s_\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_\theta & 0 & c_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_\beta & -s_\beta & 0 \\ s_\beta & c_\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$= \begin{bmatrix} c_\beta c_\theta & -c_\theta s_\beta & s_\theta \\ s_\beta c_\theta + c_\beta s_\theta s_\varphi & c_\beta c_\varphi - s_\beta s_\theta s_\varphi & -c_\theta s_\varphi \\ s_\beta s_\varphi - c_\beta c_\varphi s_\theta & c_\beta s_\varphi + s_\beta c_\varphi s_\theta & c_\theta c_\varphi \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

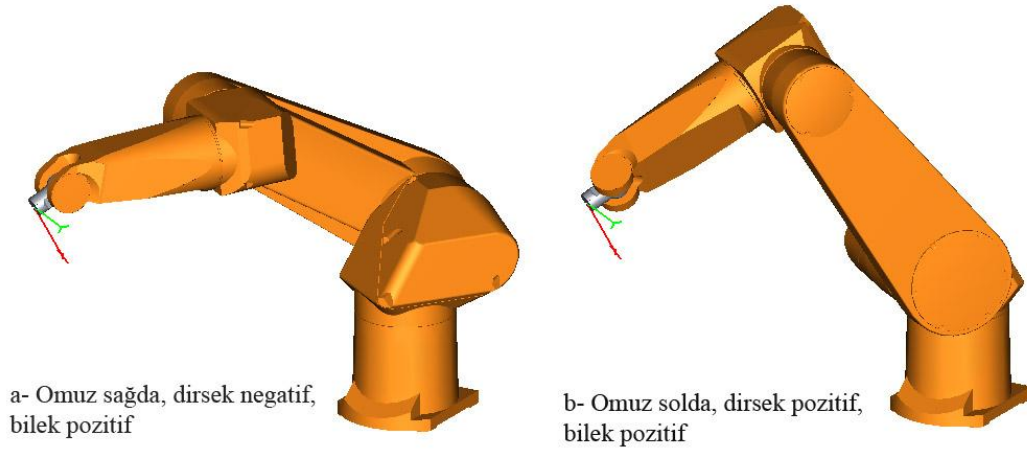
Uç nokta için transformasyon matrisi Matlab programında denklem (2.3) ve Şekil 2.1 kullanılarak hesaplanmıştır. Transformasyon matrisinden 3x3 rotasyon matrisinin elemanları denklem (2.6)'daki matrisin elemanlarına eşitlenerek yönelim açıları bulunmaktadır. Hesaplanan transformasyon matrisi VAL3 programından alınan sonuçlar ile karşılaştırılmaktadır. Aynı eklem açıları için uç noktanın konum ve yönelimi değerleri aynı olduğu görünmüştür.

2.1.2 Ters kinematik

Bir önceki bölümde manipülatörün uç noktasının konumunu ve yönelimini eklem değişkenlerine göre nasıl ifade edileceği verilmiştir. Uç noktanın konum ve yönelimine göre eklem değişkenlerinin hesaplanması ayrı bir problemdir. Tanımlanan bu problem ters kinematik problem denir ve ileri kinematiğe göre hesaplanması daha güçtür. Problem, yüksek dereceden doğrusal olmayan denklemlerinin çözümünü gerektirmektedir.

Ters kinematik problemi uzun zaman boyunca ilgi konusu olmuştur. Pieper(1968) üç eklemi çakışmış manipülatörün ters kinematik problemini analitik olarak çözmüştür. Duffy(1980) daha farklı geometrideki manipülatörün ters kinematik problemini analitik olarak çözmüştür. Bundan sonra, ters kinematik problemi çözmek için birçok yöntem ortaya konulmuştur: Paul(1981) homojen transformasyonla, Lee(1982) geometrik yöntemle, Yang ve Pennock(1985) çift numara yaklaşımı, Tsai ve Morgan(1984) uzatma(continuation) yöntemi ile çözüm sunmaktadır [13]. Bunun yanı sıra Newton-Raphson, periyodik koordinat azaltma (cyclic coordinate descent – CCD) ve Broyden-Fletcher-Shanno (BFS) gibi nümerik yöntemler kullanılarak da ters kinematik problem çözülmektedir [14]. Bu yöntemler geliştirilerek nümerik kararlı ve verimli hesaplamalar ile ters kinematik problem çözülebilmektedir.

Staubli RX160 manipulatörde ters kinematik modelin, tekillik (singularity) durumunda sonsuz çözümü, tekillik dışındaki durumlarda altı farklı çözümü bulunmaktadır. Tekillik durumundan kaçınılması bazı yöntemlerle mümkün olmaktadır. Tekillik durum dışındaki çözümler için manipulatörün düzenlemeleri (configurations) olarak adlandırılmaktadır. Staubli RX160 manipulatör için yapılan tanıma göre; omuz solda veya sağda, dirsek pozitif veya negatif, bilek pozitif veya negatif olarak tanımlanabilmektedir. Şekil 2.4’de manipulatör farklı düzenlemeleri için görünüşleri verilmektedir.



Şekil 2.4 : Staubli RX160 manipulatörün farklı düzenlemeleri

Ters kinematik problemi, bu tezin dışında ayrı bir çalışma konusu olarak değerlendirildiği için bu tezde ters kinematik model türetilmemektedir. Staubli firmasının sağlamış olduğu LLI kütüphanesi içinde yer alan LLI_reverseKine fonksiyonu ters kinematik modelin gerektiği durumlarda kullanılmaktadır.

2.2 Jacobian ve Ters Jacobian Matrislerinin Hesaplanması

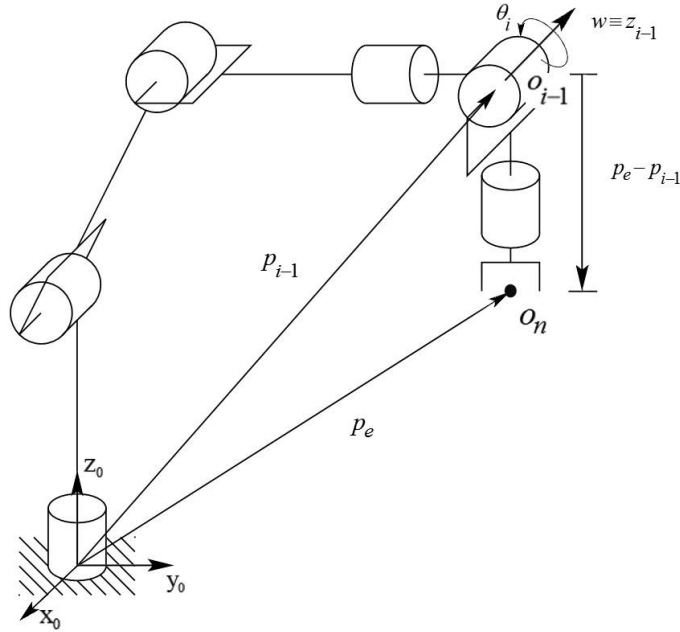
Bir önceki bölümde, manipulatör uç noktasının konumu ve yönelimine göre eklem konumları ileri ve ters konum denklemleri ile ifade edilmiştir. Bu bölümde ise manipulatörün eklem hızlarına göre uç noktanın doğrusal ve açısal hızları arasındaki ilişki verilmektedir. Matematiksel ifade edilecek olunursa, ileri kinematik mutlak konum ve yönelim uzayı ile eklem konumları uzayı arasındaki fonksiyonu ifade eden denklemdir. Hız ilişkisi bu fonksiyonun jacobianı tarafından belirlenmektedir. Jacobian skaler fonksiyonun basit türevi alınarak bulunmuş vektörlerden oluşan matris olarak düşünülebilir. Jacobian manipulatör hareketinin kontrolü ve analizinde kullanılan en önemli niceliklerden biri olmaktadır. Hemen hemen, manipulatör

manipülasyonda her yönden ortaya çıkmaktadır. Düzgün yörüngelerin planlanması ve uygulanması, tekil durumların tespitinde, insan benzeri hareket odaklı uygulamalarda, hareketin dinamik denklemlerinin belirlenmesinde ve kuvvet, torkları manipülâtörün uç noktasından eklemlere taşınmasında kullanılmaktadır.

Devam eden bölümde jacobian üç bölüme ayrılarak incelenmektedir. İlk bölümde jacobian matrisi oluşturulmakta, ikinci bölümde jacobian matrisini tersi alınmaktadır. Son bölümde ise ileri ve ters jacobianın manipülâtör üzerinde uygulaması ve sonuçları verilmektedir.

2.2.1 Jacobian matrisi

Eklem değişkenleri $q_1, q_2, \dots, q_n$ olan n serbestlik dereceli bir manipülâtör göz önüne alınmaktadır. Şekil 2.5’de manipülâtörün uç noktasının hızı i . eklemin hareketine göre vektörel olarak gösterilmektedir. Jacobian ve ters jacobian için verilen denklemler ve açıklamalar [2] referans alınarak verilmektedir.



Şekil 2.5 : Manipülâtör uç noktasının i . ekleme göre hareketi [2].

$$T_n^0(q) = \begin{bmatrix} R_n^0(q) & p_n^0(q) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

denklem (2.7) uç noktadan temele kadar transformasyon matrisini ifade etmektedir.

Bu ifadede $q = (q_1, \dots, q_n)^T$ vektörü eklem değişkenlerini vermektedir.

Diferansiyel kinematiğin amacı eklem hızlarıyla uç noktanın doğrusal ve açısal hızı arasındaki ilişkiyi vermektir. Diğer bir değişle lineer hız $\dot{p}_e$ ve açısal hız ω_e 'yi eklem hızları $\dot{q}$ cinsinden hesaplamaktır.

Jacobian matrisi denklem (2.8) ile (2.9) arasındaki ilişkiyi veren bir operatördür.

$$\dot{p}_e = J_p(q)\dot{q} \quad (2.8)$$

$$\omega_e = J_o(q)\dot{q} \quad (2.9)$$

Jacobian matrisi daha kompakt olarak denklem (2.10)'deki şekliyle ifade edilebilmektedir.

$$\nu_e = \begin{bmatrix} \dot{p}_e \\ \omega_e \end{bmatrix} = J(q) \dot{q} \quad (2.10)$$

Denklem (2.10)'de , $6 \times n$ boyutundaki jacobian matrisi geometrik jacobian olarak adlandırılmaktadır.

$$J(q) = \begin{bmatrix} J_p(q) \\ J_o(q) \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Jacobian matrisini hesaplamak için açısal ve lineer hızları ayrı şekilde ele almak uygun olmaktadır. İlk olarak lineer hız ele alınmaktadır. Eklem i , ötelenen eklem ise jacobian denklem (2.12) ile ifade edilmektedir.

$$J_{p_i} = z_{i-1} \quad (2.12)$$

Eklem i , döner eklem ise jacobian denklem (2.13) ile verilmektedir.

$$J_{p_i} = z_{i-1} \times (p_e - p_{i-1}) \quad (2.13)$$

Bir sonraki adımda açısal hız hesaplanmaktadır. Eklem i ötelenen eklem ise jacobian denklem (2.14) ile ifade edilmektedir.

$$J_{O_i} = 0 \quad (2.14)$$

Eklem i döner eklem ise jacobian denklem (2.15) ile verilmektedir.

$$J_{O_i} = z_{i-1} \quad (2.15)$$

Özetleyecek olursak denklem (2.10)'de ifade edilen jacobian parçalı olarak denklem (2.16) olduğu şekliyle ifade edilmektedir.

$$J = \begin{bmatrix} J_{p_1} & \dots & J_{p_n} \\ J_{O_1} & \dots & J_n \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Parçalanmış jacobianın elemanları denklem (2.17) de verildiği şekilde ele alınmaktadır.

$$\begin{bmatrix} J_{p_i} \\ J_{O_i} \end{bmatrix} = \begin{cases} \begin{bmatrix} z_{i-1} \\ 0 \end{bmatrix} & \text{prizmatik eklem} \\ \begin{bmatrix} z_{i-1} \times (p_e - p_{i-1}) \\ z_{i-1} \end{bmatrix} & \text{döner eklem} \end{cases} \quad (2.17)$$

z_{i-1} terimi denklem (2.18) de hesaplanmaktadır.

$$z_{i-1} = R_1^0(q_1) R_2^1(q_2) \dots R_{i-1}^{i-2}(q_{i-1}) z_0 \quad (2.18)$$

$$z_0 = [0 \ 0 \ 1]^T \quad (2.19)$$

Denklem (2.19), R rotasyon matrisi ile ifade edilmektedir. z_0 terimi ise üçüncü sütunu seçmek için kullanılmaktadır. p_e ve p_{i-1} terimleri denklemler (2.20) ve (2.21) ile hesaplanmaktadır.

$$p_e = A_1^0(q_1) A_2^1(q_2) \dots A_n^{n-1}(q_n) p_0 \quad (2.20)$$

$$p_{i-1} = A_1^0(q_1) A_2^1(q_2) \dots A_{i-1}^{i-2}(q_{i-1}) p_{i-1} \quad (2.21)$$

$$p_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T \quad (2.22)$$

Denklem (2.20) ve (2.21) de yer alan , A ile ifade edilen matris dönüşüm matrisidir. p_0 terimi dördüncü sütunu seçmek için kullanılmaktadır. Yukarıda ifade edilen denklemler ile elde edilen matrisin elemanları Ek B1’de verilmektedir.

2.2.2 Analitik jacobian

Önceki bölümde türetilen jacobian, analitik jacobianı ayırmak için geometrik jacobian olarak adlandırılmaktadır. Bu bölümde, analitik jacobian $J_a(q)$ uç noktanın koordinat takımının yönelim gösterimini en sade şekliyle ifade edebilmek için dikkate alınacaktır. Denklem,

$$X = \begin{bmatrix} d(q) \\ \alpha(q) \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

uç noktanın durumunu göstermekte, $d(q)$ temel koordinat takımının orijininden uç noktanın koordinat takımının ojitine ulaşan vektörü, α temel koordinat takımına göre uç noktanın koordinat takımının en sade yönelimine ifade etmektedir. Örneğin, $\alpha = [\varphi, \theta, \beta]^T$ yalpa-yunus-sapma açısı gösterimini vektörel ifadesi olsun.

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{d} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} = J_a(q)\dot{q} \quad (2.24)$$

Analitik jacobianı denklem (2.24) ile ifade edilmektedir.

$R = R_{x,\varphi} R_{y,\theta} R_{z,\beta}$ yalpa-yunus-sapma açısı transformasyonu ifade etmiş olduğu için denklem (2.25) ile belirtilmektedir.

$$\dot{R} = S(w)R \quad (2.25)$$

S skew simetrik matrisi, w ise denklem (2.26) ve (2.27) 'de verilen açısal hızı göstermektedir.

$$w = \begin{bmatrix} \dot{\varphi} + s_{\theta}\dot{\theta} \\ c_{\varphi}\dot{\theta} - c_{\theta}s_{\varphi}\dot{\beta} \\ s_{\varphi}\dot{\theta} + c_{\theta}c_{\varphi}\dot{\beta} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

$$w = \begin{bmatrix} 1 & 0 & s_{\theta} \\ 0 & c_{\varphi} & -c_{\theta}s_{\varphi} \\ 0 & s_{\varphi} & c_{\theta}c_{\varphi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} = B(\alpha)\dot{\alpha} \quad (2.27)$$

Yukarıdaki ilişkiyi daha önce türetilen jacobian ile birleştirilirse denklem (2.28) ile verilmektedir.

$$\begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{d} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} = J(q)\dot{q} \quad (2.28)$$

Sonuç olarak,

$$J(q)\dot{q} = \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{d} \\ B(\alpha)\dot{\alpha} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

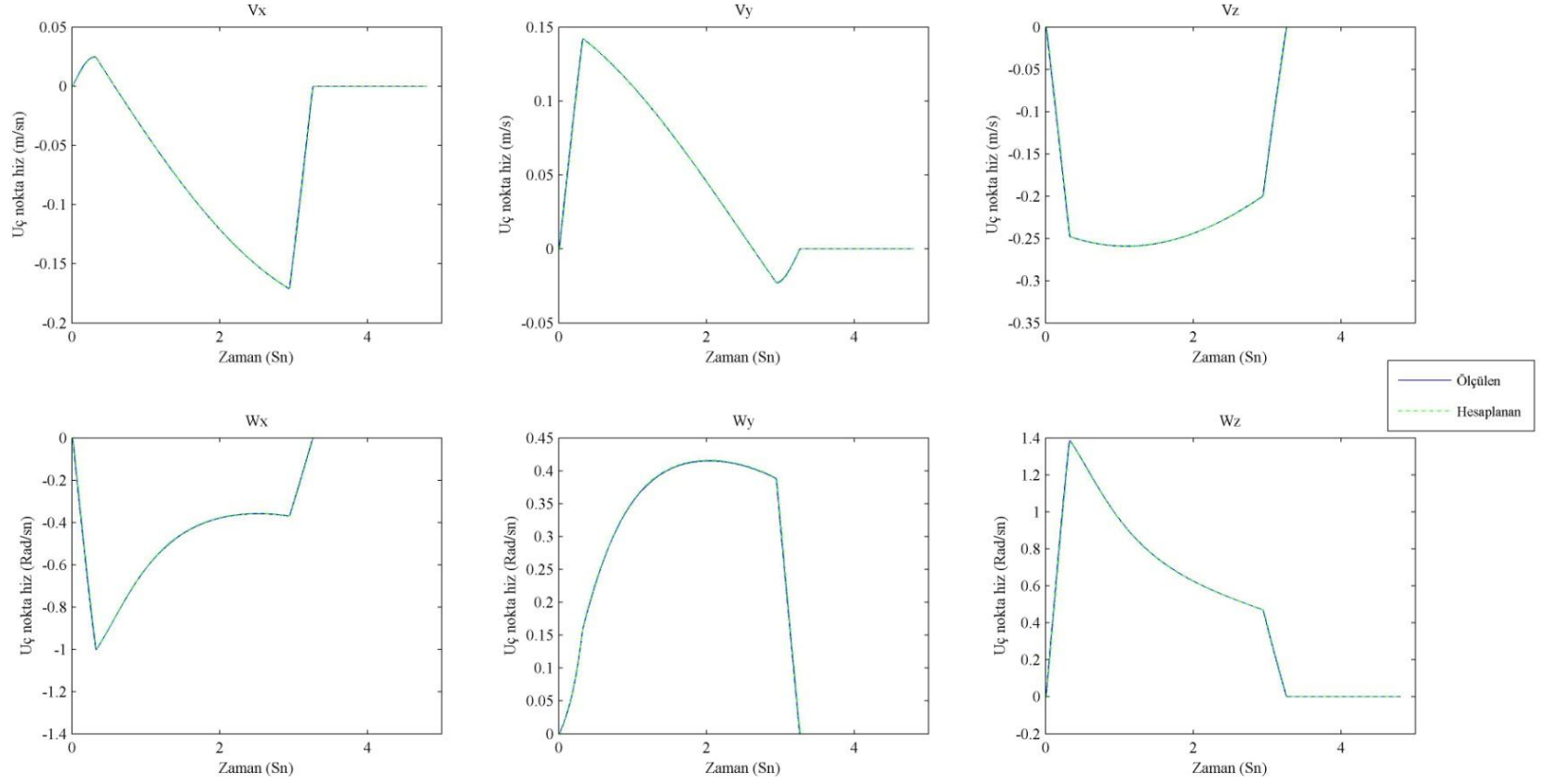
$$= \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & B(\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{d} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

$$= \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & B(\alpha) \end{bmatrix} J_a(q)\dot{q} \quad (2.31)$$

Bu nedenle analitik jacobian $J_a(q)$, $\det B(\alpha) \neq 0$ olduğu sürece geometrik jacobian'dan denklem (2.32) ile hesaplanabilmektedir.

$$J_a(q) = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & B(\alpha)^{-1} \end{bmatrix} J(q) \quad (2.32)$$

LLI programlama arayüzü içersine yukarıda türetilen denklemler C programlama diliyle yazılmış ve WINDOWS® ortamında çalıştırılarak ileri jacobian test edilmektedir. LLI kütüphanesi içerisinde bulunan ileri kinematik fonksiyonu kullanılarak hesaplanarak uç noktanın konumun birinci dereceden sayısal türevi alınarak ileri jacobian ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmaktadır. Şekil 2.6 'de sonuçlar verilmektedir.



Şekil 2.6 : İleri jacobian ile hesaplanan manipülâtör uç nokta hızı

2.2.3 Ters jacobian matrisi

Jacobian ilişkisi,

$$\xi = J\dot{q} \quad (2.33)$$

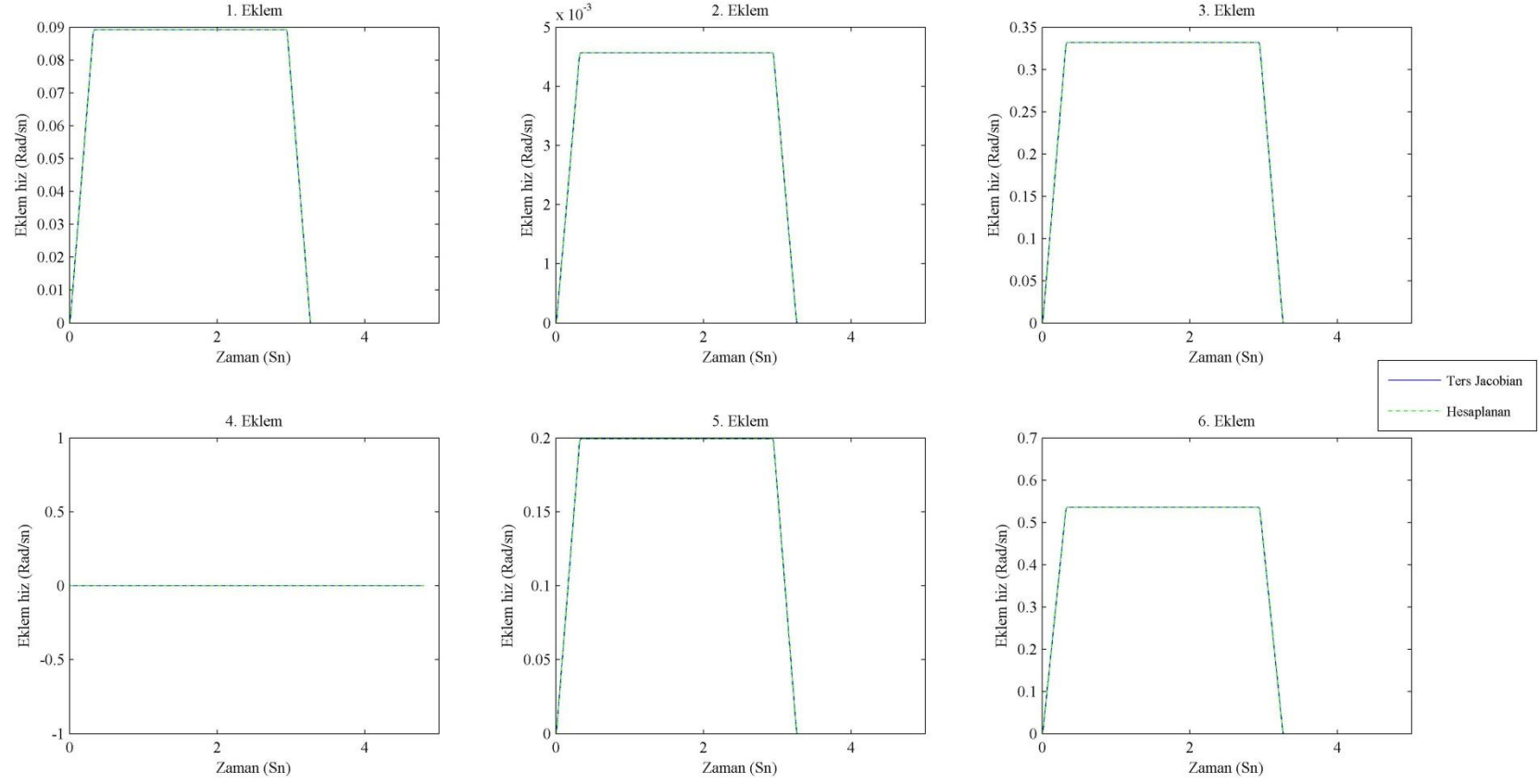
denklem (2.33) ile verilmektedir. ξ eklemler $\dot{q}$ hızıyla hareket ettiğinde uç noktada oluşacak hızı tanımlamaktadır. Bu durumun tersi robotikte daha fazla ihtiyaç duyulan bir ilişki olmaktadır. Bu nedenle tersine bir yaklaşım yapılacak olunursa, uç noktadaki hızın bulunması ters hız problemi olarak tanımlanmaktadır. Ters hız problemi, konsept olarak ters kinematik problemine göre çözümlenmesi daha kolay problemdir. Jacobian kare ($J \in \mathbb{R}^{n \times n}$) matris ise ve tekil değilse bu problem jacobian matrisinin tersinin alınmasıyla kolaylıkla çözümlenmektedir.

$$\dot{q} = J^{-1}\xi \quad (2.34)$$

Denklem (2.34) çözüm denklemini ifade etmektedir. 6 uzuvdan farklı uzuva sahip olan manipölatörlerin jacobian matrisinin tersi alınamamaktadır. Fakat bu durumda basit matris rank testi problemin çözümü hakkında fikir vermektedir.

$$\text{rank}J(q) = \text{rank}[J(q) | \xi] \quad (2.35)$$

Denklem (2.35) eşitliği sağlandığı takdirde ve $n > 6$ olduğu durumda J matrisinin sağ pseudoinverse alınarak, $n < 6$ olduğunda ise gaussian eleme yöntemi gibi algoritmalar kullanılarak çözüm elde edilmektedir. Staubli RX160 manipölatör 6 uzuva sahip olduğundan tekillik durumu dışında jacobian matrisinin tersinin alınması mümkün olmaktadır. Analitik 6×6 jacobian matrisinin tersi Matlab programında alınmakta ve analitik ters jacobian matrisinin elemanları LLI arayüzü içindeki programın içerisine C dilinde aktarılmaktadır. Tüm matris elemanları 2091 adet terimden oluştuğu için tezin ekler bölümünde yer verilememektedir. LLI kütüphanesi içerisinde oluşturulan ters jacobian fonksiyonun kontrolü bir önceki bölümde oluşturulan uç noktanın hız vektörünün ters jacobian ile çarpılması ile başlangıçtaki eklem hızlarının elde edilmesi beklenmektedir. Sonuçlar Şekil 2.7'de gösterilmektedir. Sonuçta başlangıçta tanımlanan referans hız elde edilmektedir.



Şekil 2.7 : Ters jacobian ile elde edilen manipulator eklem hız grafiği.

2.3 Dinamik Model

Kinematik denklemler hareketi kuvvet ve torku dikkate almadan ifade ederken, dinamik denklemler kuvvetle hareket arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir. Hareket denklemleri manipülatörün tasarımı göz önüne alırken, manipülatör hareketin animasyonu ve benzetiminde ve kontrol algoritmasının tasarımı oldukça önem arz etmektedir [2]. Euler-Lagrange yöntemi mekanik sistemlerinin dinamik denklemlerini türetmek için standart kullanılan yöntemdir. Euler-Lagrange yaklaşımında ortaya çıkan matrislerin büyüklüğü ve işlem sayısı sonucun hesaplanmasında uzun zaman almaktadır. Newton-Euler formülasyonu ise manipülatör üzerinde hız, ivme değerlerini temelden uç noktaya ve kuvvetleri uç noktadan temele başarıyla taşıyarak eklemler üzerindeki torklar hesaplanmaktadır. Luh-Paul-Walker'ın çalışmasıyla, Newton-Euler formülasyonu hesaplama performansını artırılacak şekilde düzenlenmektedir. Bu yöntem, Euler-Lagrange yöntemine göre uzuv sayısına paralellik göstererek hesaplama hızında artış sağlamaktadır [15]. Bu bölümün devamında Euler-Lagrange denklemleri, Newton-Euler formülasyonu verilmekte, manipülatör dinamiğinde belirsiz olan yay ve sürtünme modeli tanımlanmaktadır.

2.3.1 Euler–Lagrange denklemleri

Euler–Lagrange yöntemi kullanılarak türetilen n-uzuvlu hareket denklemleri formu denklem (2.36) ile verilmektedir.

$$\sum_j d_{kj}(q)\ddot{q}_j + \sum_{i,j} c_{ijk}(q)\dot{q}_i\dot{q}_j + \phi_k(q) = \tau_k, \quad k = 1, \dots, n \quad (2.36)$$

Denklem (2.36)'daki d_{kj} terimi $D(q)$ atalet matrisinin katsayıları, yerçekimsel kuvvet ve torklar, c_{ijk} coriolis ve merkezkaç terimlerinin katsayıları oluşturmaktadır. Euler – Lagrange denkleminin matris ifadesi denklem (2.37) 'de verilmiştir.

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau \quad (2.37)$$

$C(q, \dot{q})$ matrisinin k, j 'nci elemanları denklem (2.38) ve (2.39) verilmektedir.

$$c_{kj} = \sum_{i=1}^n c_{ijk}(q) \dot{q}_i \quad (2.38)$$

$$= \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial d_{kj}}{\partial q_j} + \frac{\partial d_{ki}}{\partial q_j} - \frac{\partial d_{ij}}{\partial q_k} \right\} \dot{q}_i \quad (2.39)$$

Hesaplama açısından bakıldığında denklem (2.37) 'de verilen $D(q)$ ve $C(q, \dot{q})$ katsayılarının elde edilmesi gerçek zamanlı çalışan manipülatörlerde Newton-Euler gibi formülasyonların kullanılmasını gerektirmektedir. Bir sonraki bölümde Newton-Euler denklemlerinin türetilmesi, hız ve ivmenin manipülatörün ilgili noktalara taşınması ve algoritma verilmektedir.

2.3.2 Newton-Euler denklemleri

Newton-Euler denklemlerini türetmek için D'Alembert's prensibi tüm manipülatör uzuvlarına uygulanmaktadır. Viskoz sönüm terimleri çıkartıldığında eklemlerde oluşan kuvvet ve tork değerleri denklem (2.40) ve (2.41) ile verilmektedir. Bu bölümde verilen tüm denklemler [15]'dan alınmaktadır.

$$F_i = \frac{d(m_i \hat{v}_i)}{dt} = m_i \dot{\hat{v}}_i \quad (2.40)$$

$$N_i = \frac{d(J_i \omega_i)}{dt} = J_i \dot{\omega}_i + \omega_i \times (J_i \omega_i) \quad (2.41)$$

Denklem (2.40) ve (2.41)'de belirtilen parametreler aşağıda verilmektedir:

m_i : i . uzuvun toplam kütlesi, skaler,

$\hat{r}_i$: temel koordinat takımına göre i . uzuvun kütle merkezinin konumu,

$\hat{v}_i = d\hat{r}_i / dt$: kütle merkezinin temel koordinat takımına göre çizgisel hızı;

F_i : i . uzuva dışarıdan uygulanan toplam kuvvet vektörü,

N_i : i . uzuva dışarıdan uygulanan toplam tork vektörü,

J_i : kendi kütle merkezine göre (x_0, y_0, z_0) i . uzuvun kütle atalet moment matrisi.

w_i ve $\dot{w}_i$ manipölatör eklemının sırasıyla açısıl hız ve ivme vektörleridir. Denklem (2.42) ve (2.43) bu vektörleri tanımlamaktadır.

$$w_{i+1} = w_i + z_i \dot{q}_{i+1} \quad (2.42)$$

$$\dot{w}_{i+1} = \dot{w}_i + z_i \ddot{q}_{i+1} + \dot{w}_i \times (z_i \dot{q}_{i+1}) \quad (2.43)$$

z_i , eklem üzerine yerleştirilen i . koordinat takımının birim vektörü; $\dot{q}_{i+1}$, $(i+1)$. eklemının açısıl hız büyüklüğüdür. $\hat{v}_i$, $\dot{\hat{v}}_i$ denklem(2.44) ve (2.45) 'de verilmektedir.

$$\hat{v}_i = w_i \times \hat{s}_i + v_i \quad (2.44)$$

$$\dot{\hat{v}}_i = \dot{w}_i \times \hat{s}_i + w_i \times (w_i \times \hat{s}_i) + \dot{v}_i \quad (2.45)$$

v_{i+1} ve $\dot{v}_{i+1}$ $(i+1)$. eklemının temel koordinat takımına göre çizgisel hız ve ivmesini ifade etmektedir. Denklem (2.46) ve (2.47) bu terimlerin vermektedir.

$$v_{i+1} = w_{i+1} \times p_{i+1}^* + v_i \quad (2.46)$$

$$\dot{v}_{i+1} = \dot{w}_{i+1} \times p_{i+1}^* + w_{i+1} \times (w_{i+1} \times p_{i+1}^*) + \dot{v}_i \quad (2.47)$$

Viskoz kuvvet ve torklar dinamik denklemlere sürtünme modeli tanımlandıktan sonra dahil edilmektedir. Ayrıca yerçekimi ivmesi manipölatör uzuvlarının kütle merkezinde tanımlanan çizgisel ivme terimi içerisine ilave edilmektedir. Şekil 2.8 Staubli RX160 manipölatör görünüşünden alınan uzuvun kuvvet, tork ve konum vektörleri gösterilmektedir. $0'$ ile ifade edilen konum uzuvun kütle merkezidir. Şekil 2.8'de p_{i-1} , p_i , p_i^* , $\hat{r}_i$, ve $\hat{s}_i$ konum vektörleri de ayrıca gösterilmektedir.

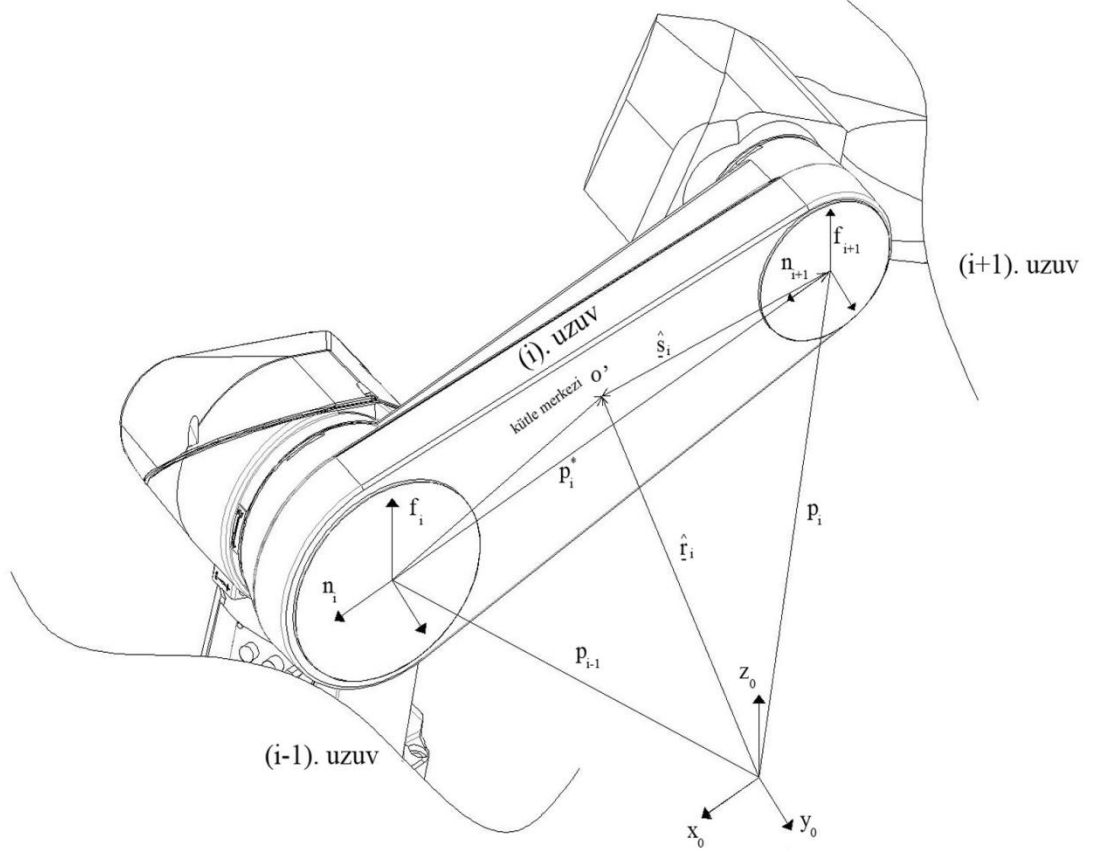
i . uzuva diğeri uzuvlardan etki eden kuvvet ve torklar toplam kuvvet ve tork denklemlerine ilave edildiğinde,

$$f_i = f_{i+1} + F_i \quad (2.48)$$

$$n_i = n_{i+1} + p_i^* \times f_{i+1} + (p_i^* + \hat{s}_i) \times F_i + N_i \quad (2.49)$$

f_i : $i-1$ uzuvun i . uzuva uyguladığı kuvvet,

n_i : $i-1$ uzuvun i . uzuva uyguladığı kuvvet,



Şekil 2.8 : Manipülâtör üzerinde kuvvet, tork ve konum vektör gösterimi.

i . ekleme uygulanması gereken toplam tork denklem (2.50) ile verilmektedir. τ_s , viskoz ve sürtünme kuvvetlerinden oluşan torku ifade etmektedir.

$$\tau_i = n_i^T z_{i-1} + \tau_s \quad (2.50)$$

$w_0, \dot{w}_0$ manipülâtör temel koordinat takımın açısal hız ve ivmesi; $v_0, \dot{v}_0$ ise çizgisel hız ve ivmesidir. Eğer manipülâtör mobil bir platform üzerinde hareket etmiyorsa,

$w_0 = \dot{w}_0 = 0$ ve $v_0 = 0$ 'dır. Fakat yer çekim terimini hareket denklemlere dahil edebilmek için $\dot{v}_0$ denklem (2.51)'deki gibi tanımlanmaktadır.

$$\dot{v}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 9,80621m / s^2 \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

Buraya kadar hareket denklemleri temel koordinat takıma göre tanımlanmaktadır. Fakat bu durumda atalet matrisi J_i , i . uzuvun yönelimine göre değişmektedir. Bu da dinamik denklemlerin hesaplanmasını zorlaştırmaktadır. Eklemlerin kuvvet ve torklarının hesaplanmasındaki daha verimli yöntem hareket denklemlerinin her bir uzuva göre referans alınmasıdır.

A_{i-1}^i 3×3 rotasyon matrisi, (x_i, y_i, z_i) koordinat takıma göre tanımlanmış her hangi bir vektörü yine orijini (x_i, y_i, z_i) 'de olan $(x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1})$ koordinat takımına paralel yeni bir koordinat takımına taşımaktadır. Buradan hareketle,

$$A_0^i = A_0^1 A_1^2 \dots A_{i-1}^i \quad (2.52)$$

her koordinat takımı ortonormal olduğundan,

$$(A_{i-1}^i)^{-1} = (A_{i-1}^i)^T = A_i^{i-1} \quad (2.53)$$

w_{i+1} , $\dot{w}_{i+1}$ hesaplamak yerine; $A_{i+1}^0 w_{i+1}$, $A_{i+1}^0 \dot{w}_{i+1}$ hesaplanmaktadır. Yukarıda daha önce hesaplanan denklemler bu yaklaşımla tekrar ele alınırsa,

$$(2.40) \quad A_i^0 F_i = m_i A_i^0 \hat{v}_i \quad (2.54)$$

$$(2.41) \quad A_i^0 N_i = (A_i^0 J_i A_i^i)(A_i^0 \dot{w}_i) + (A_i^0 w_i) \times [(A_i^0 J_i A_i^i)(A_i^0 w_i)] \quad (2.55)$$

$$(2.42) \quad A_{i+1}^0 w_{i+1} = A_{i+1}^i (A_i^0 w_i + z_0 \dot{q}_{i+1}) \quad (2.56)$$

$$(2.43) \quad A_{i+1}^0 \dot{w}_{i+1} = A_{i+1}^i [A_i^0 \dot{w}_i + z_0 \ddot{q}_{i+1} + (A_i^0 \dot{w}_i) \times (z_0 \dot{q}_{i+1})] \quad (2.57)$$

$$(2.44) \quad A_i^0 \hat{v}_i = (A_i^0 w_i) \times (A_i^0 \hat{s}_i) + A_i^0 v_i \quad (2.58)$$

$$(2.45) \quad A_i^0 \dot{\hat{v}}_i = (A_i^0 \dot{w}_i) \times (A_i^0 \hat{s}_i) + (A_i^0 w_i) \times [(A_i^0 w_i) \times (A_i^0 \hat{s}_i)] + A_i^0 \dot{v}_i \quad (2.59)$$

$$(2.46) \quad A_{i+1}^0 v_{i+1} = (A_{i+1}^0 w_{i+1}) \times (A_{i+1}^0 p_{i+1}^*) + A_{i+1}^i (A_i^0 v_i) \quad (2.60)$$

$$(2.47) \quad A_{i+1}^0 \dot{v}_{i+1} = (A_{i+1}^0 \dot{w}_{i+1}) \times (A_{i+1}^0 p_{i+1}^*) + (A_{i+1}^0 w_{i+1}) \times [(A_{i+1}^0 w_{i+1}) \times (A_{i+1}^0 p_{i+1}^*)] + A_{i+1}^i (A_i^0 v_i) \quad (2.61)$$

$$(2.48) \quad A_i^0 f_i = A_i^{i+1} (A_{i+1}^0 f_{i+1}) + A_i^0 F_i \quad (2.62)$$

$$(2.49) \quad A_i^0 n_i = A_i^{i+1} [A_{i+1}^0 n_{i+1} + (A_{i+1}^0 p_i^*) \times (A_{i+1}^0 f_{i+1})] + (A_i^0 p_i^* + A_i^0 \hat{s}_i) \times (A_i^0 F_i) + A_i^0 N_i \quad (2.63)$$

$$(2.50) \quad \tau_i = (A_i^0 n_i)^T (A_{i+1}^i z_0) + \tau_s \quad (2.64)$$

2.3.3 Paul–Luth–Walker algoritması

Bir önceki bölümde türetilen denklemler Paul-Luth-Walker algoritmasında kullanılmaktadır. Bu algoritmada kullanılan eklem değişkenleri $i=1,2,...,n$ olmak üzere $q_i, \dot{q}_i$ ve $\ddot{q}_i$ 'dir. Eklem üzerinde hesaplanacak değişkenler $i, F_i, N_i, f_i, n_i, \tau_i$ 'dir.

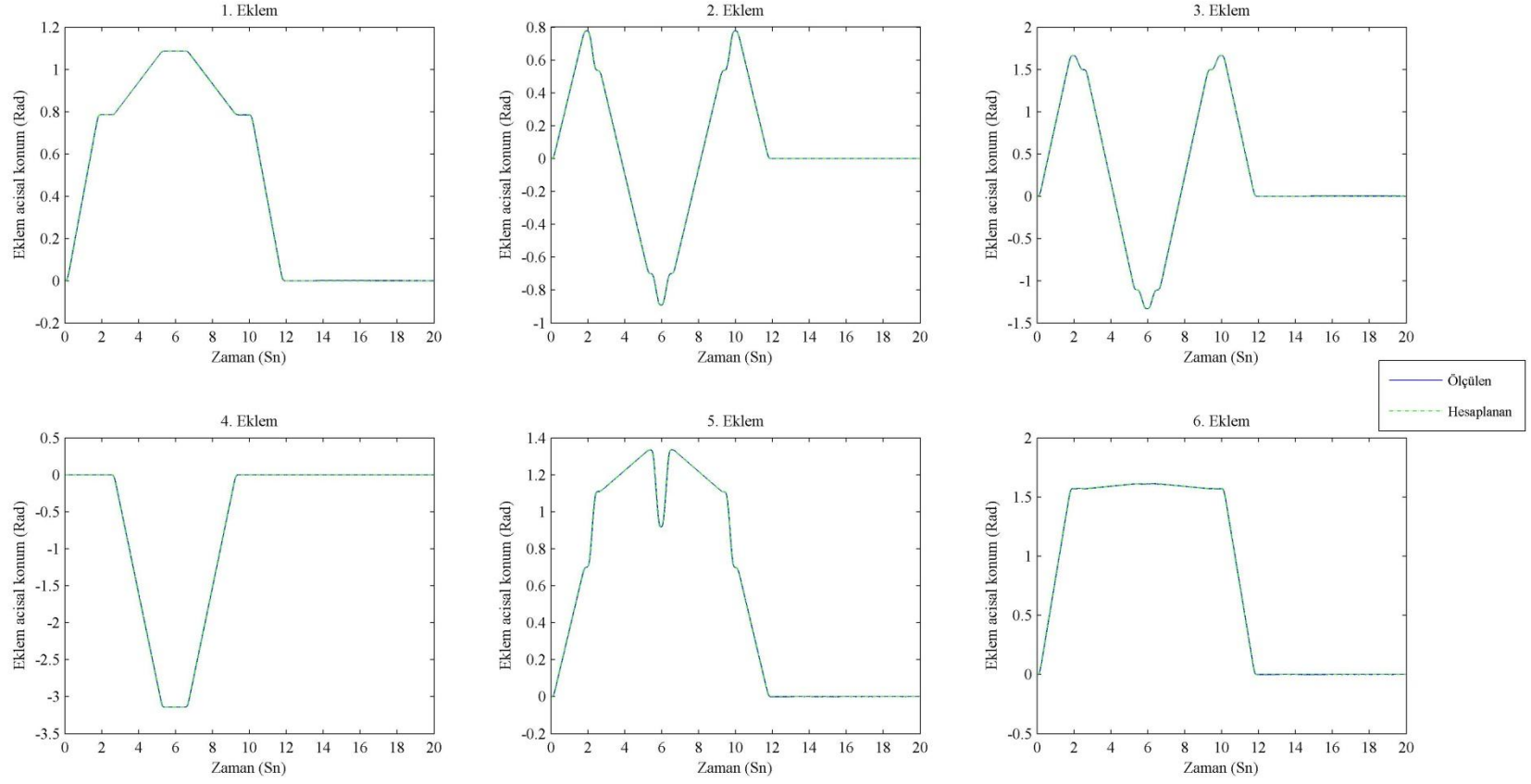
$$\dot{v}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 9,80621m/s^2 \end{bmatrix}, z_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.65)$$

1. Adım. $i=1$ yapılmaktadır.
2. Adım. $A_i^0 w_i, A_i^0 \dot{w}_i, A_i^0 v_i, A_i^0 \dot{v}_i$ denklem (2.56), (2.57), (2.60) ve (2.61) kullanılarak hesaplanmaktadır.
3. Adım. $A_i^0 \hat{v}_i$ ve $A_i^0 \dot{\hat{v}}_i$ denklem (2.58) ve (2.59) kullanılarak hesaplanmaktadır.
4. Adım $A_i^0 F_i$ ve $A_i^0 N_i$ denklem (2.54) ve (2.55) kullanılarak hesaplanmaktadır.

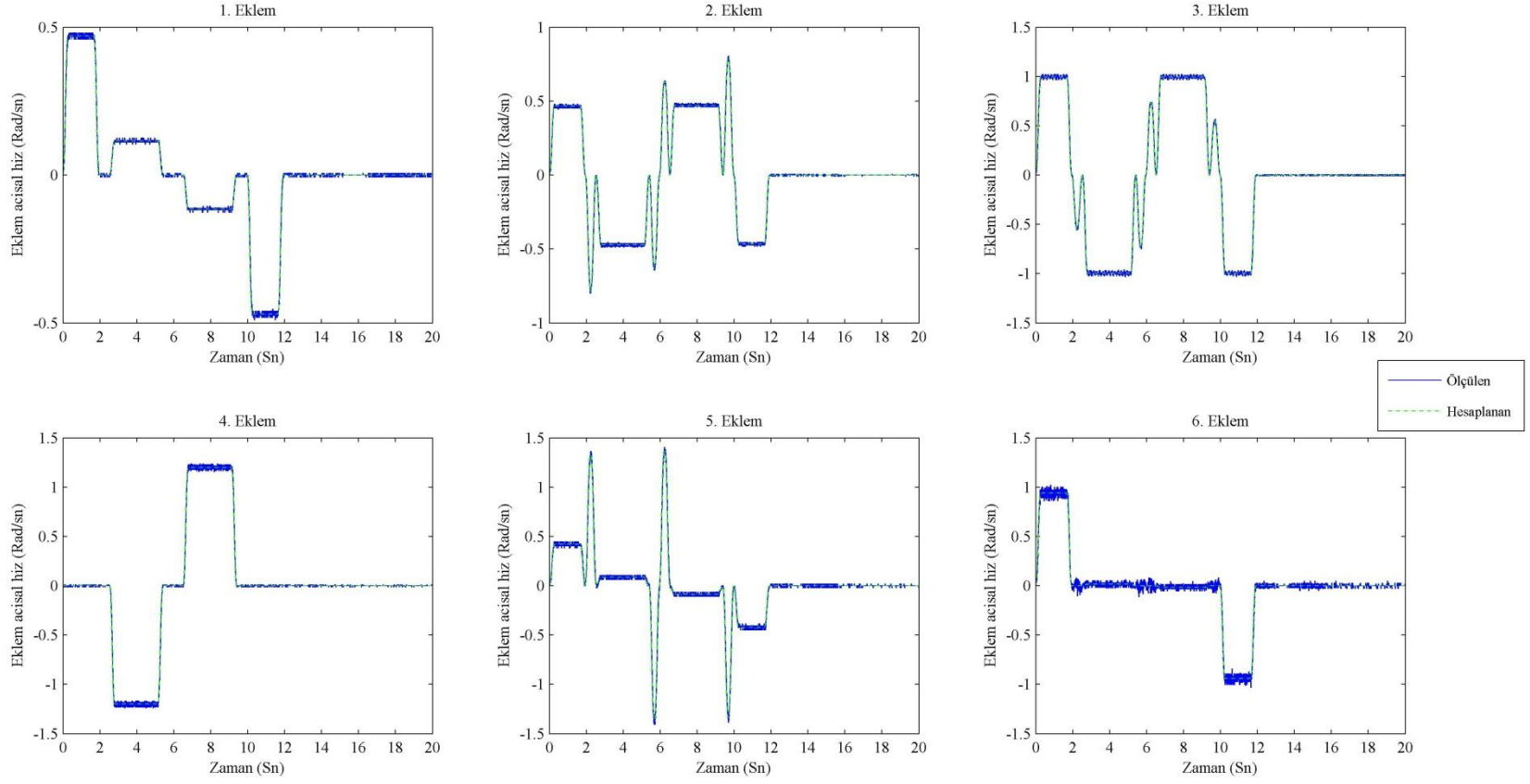
5. Adım $i = n$ ise bir sonraki adıma geçilmekte, değilse $i = i + 1$ yapılmakta ve 2. adıma dönülmektedir.
6. Adım $A_i^0 f_i$ ve $A_i^0 n_i$ denklem (2.62) ve (2.63) kullanılarak hesaplanmaktadır. f_{n+1} ve n_{n+1} sırasıyla n uzuvlu manipülatörün uç kısmındaki taşıdığı yükün yarattığı kuvvet ve torktur.
7. Adım $i = 1$ ise algoritma durdurulmaktadır. Değilse $i = i - 1$ yapılmaktadır ve 6. adıma dönülmektedir.

Robot dinamiğini tanımlamak için gereken parametreler Bölüm 2.1’de verilmektedir. Bu parametrelerden kütle, kütle atalet momenti ve kütle merkezlerinin konumları bu tez çalışması için Staubli firması tarafından temin edilerek Paul-Luth-Walker algoritmasıyla eklem torklarının hesaplanmasında kullanılmaktadır. Staubli RX160 manipülatörün VxWorks® işletim sisteminde LLI arayüzünde çalıştırılan program ile algoritma kontrol edilmektedir. Referans yörünge LLI kütüphanesinde tanımlı dinamik model ve kontrol algoritmasıyla gerçekleştirirken manipülatörün eklemlerinde sensörler üzerinden ölçülen tork verileri sabit diske yazılmaktadır. Oluşturulan dinamik modele de aynı referans yörüngeyi oluşturan hareket denklemleri uygulanmaktadır. Hareketin tamamlanmasıyla hesaplanan ve ölçülen tork diske yazılmaktadır. Her iki veri karşılaştırmalı olarak tüm eklemler için Matlab programı ile çizdirilerek verilmektedir.

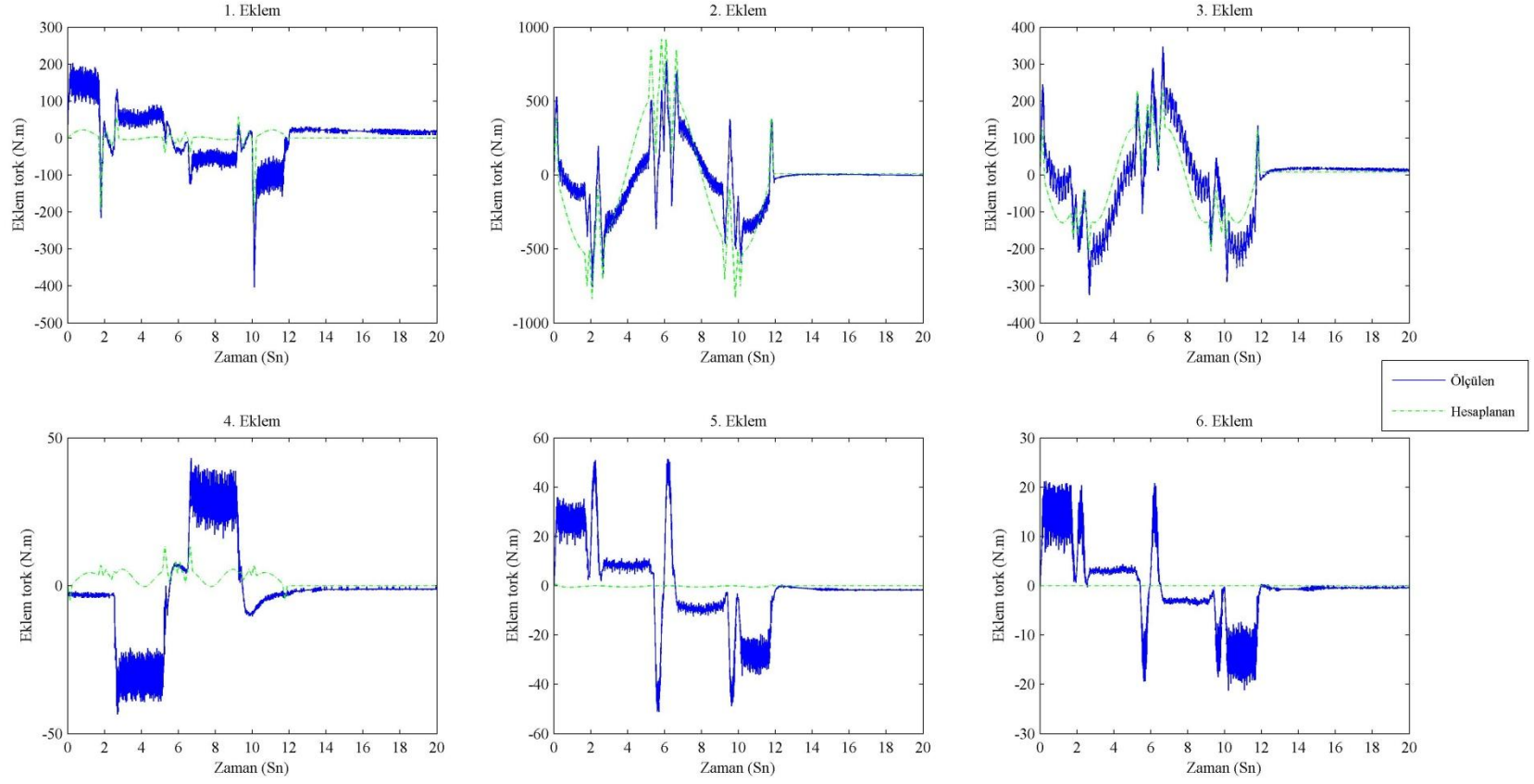
Manipülatör içerisinde kullanılan karşı ağırlığı dengeleyen yay modeli, sürtünme modeli ve son iki eklem arasındaki etkileşim dinamik model dahil edilmediğinden hesaplanan ve ölçülen veriler arasında farklılık bulunmaktadır. Şekil 2.9 ve devamındaki 4 grafik tüm eklemlerin nominal hızının %30’u, maksimum ivmesinin %100’ü ile hareket ettirilmesiyle oluşan sırasıyla referans ve ölçülen konum, hız grafikleri ile ölçülen ve hesaplanan tork ve tork hatası grafiklerini göstermektedir. Tüm % hata grafikleri çizdirilirken gerçek değerlerin sıfıra yaklaştığı durumlarda % hatanın sonsuza gitmemesi için belli değerlerin altı filtrelenmektedir.



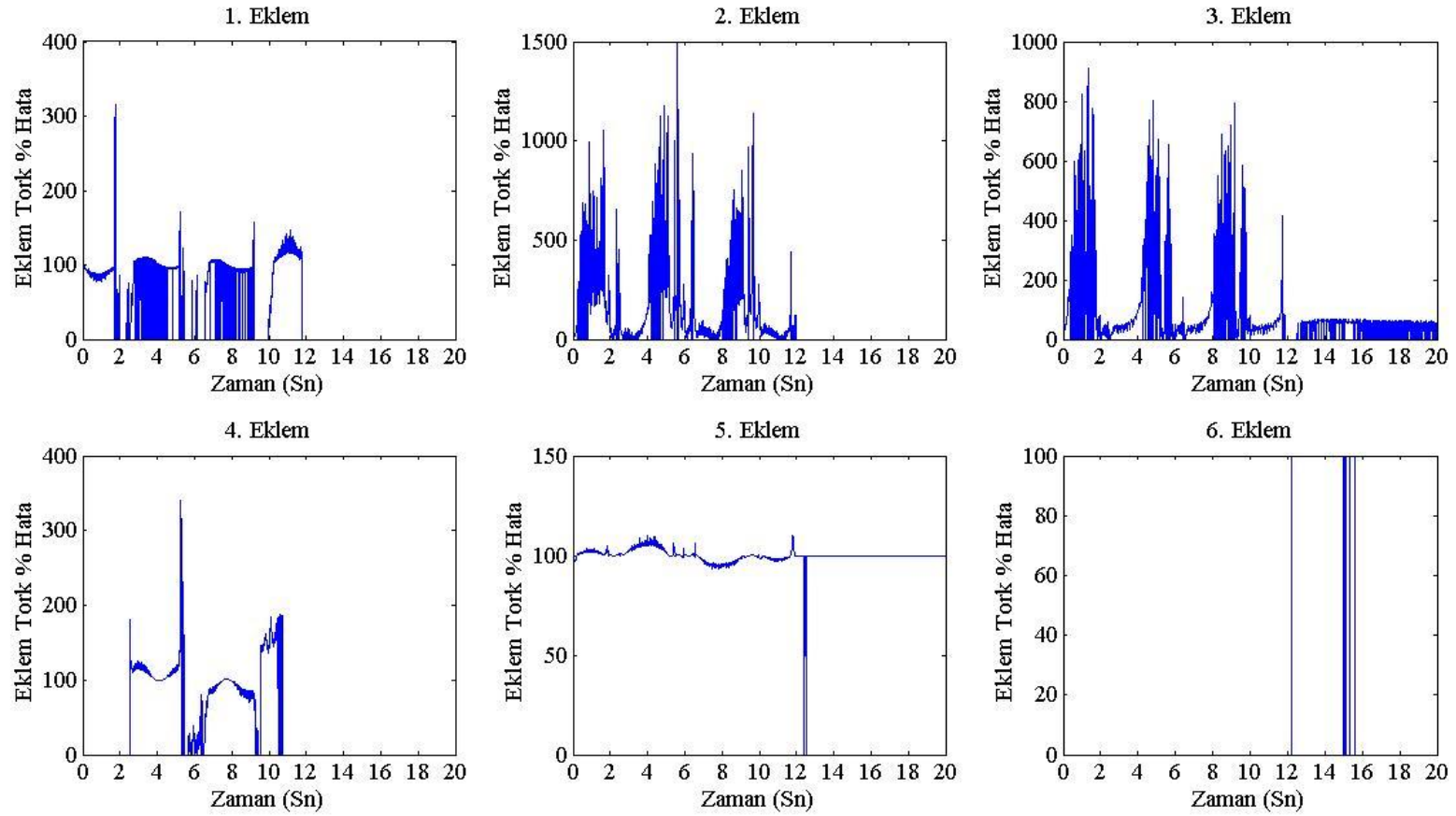
Şekil 2.9 : Manipülör referans eklem konum grafiği.



Şekil 2.10 : Manipülatör referans eklem hız grafiği.



Şekil 2.11 : Newton-Euler algoritması ile hesaplanan ve manipülatörden ölçülen eklem torku.



Şekil 2.12 : Eklem tork % hata.

2.4 Tanıma

Doğrusal olmayan manipülatör kontrolcüsü çoğunlukla manipülatör modeline bağımlıdır ve performansı doğru dinamik parametrelere bağlıdır. Bazı manipülatörlerin yapısal karmaşık olması ve doğrusal olmayan yüklere maruz kalması nedeniyle dinamik parametrelerin belirlenmesi çözülmesi zor bir problem olabilmektedir. Deneysel manipülatör parametrelerin tanınması doğru dinamik parametrelerin (uzuv ve yükün kütle atalet moment gibi) elde edilmesi için gerekli tek verimli yöntemdir. Deneysel manipülatör tanıma, sensörlerinden gerçek zamanlı ölçülen deneysel verilerin kullanılmasına dayanmaktadır [16]. Devam eden bölümde dinamik modelin eksik olan parametrelerine vurgu yapılmakta, eksik parametrelerin deneysel yöntemlerle tanınması ile dinamik modelin gerçek modele ne kadar yakınsadığı verilmektedir.

Robot dinamiğini tanımlamak için gereken parametreler bölüm 2.1’de daha önceden belirtilmiştir. Bu parametrelerden kütle, kütle atalet momenti ve uzuvların boyutları manipülatör firması tarafından sağlanmaktadır. Sürtünme ve yay modelinin parametreleri ve birbiriyle etkileşimli son iki eklem arasındaki ilişki verilmektedir.

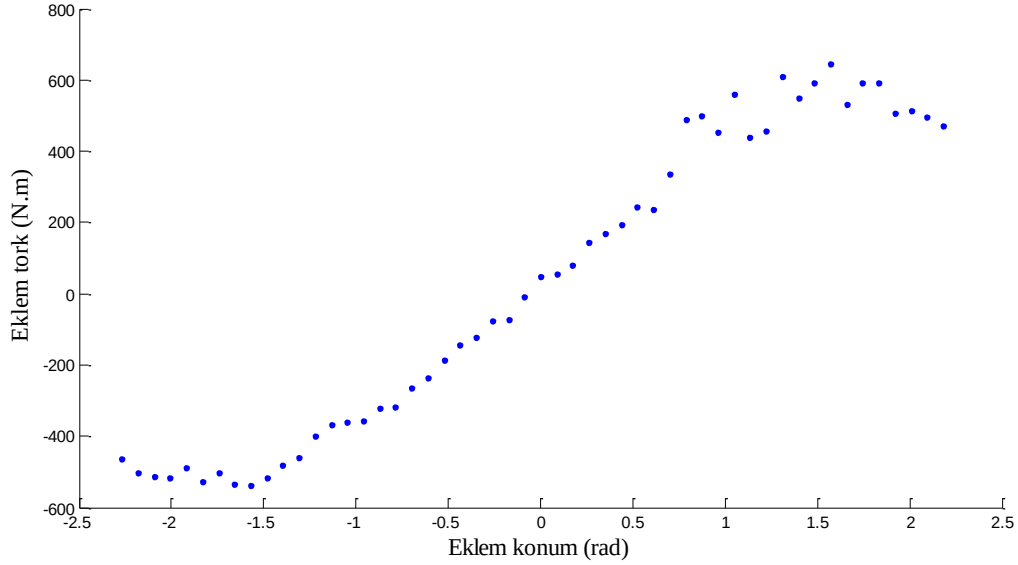
2.4.1 Yay modeli

Staubli RX-160 manipülatörün 2. ekleminde kullanılan ve bu eklemden sonraki mekanizmanın ağırlığı karşılaması için kullanılan yay bulunmaktadır. Bu yayın manipülatörün 2. eklemindeki harekete bağlı olarak verdiği tepki torku Şekil 2.13’de verilmektedir. Alınan eklem tork verileri manipülatörün statik durumunda geçerli olup, dinamik modelin kullanılmasıyla yerçekimi etkisiyle oluşan statik torklar ortadan kaldırılmaktadır. Toplanan 3560 örneklik verinin ortalaması alınarak 2. eklemden oluşan ortalama tork değerleri verilmektedir.

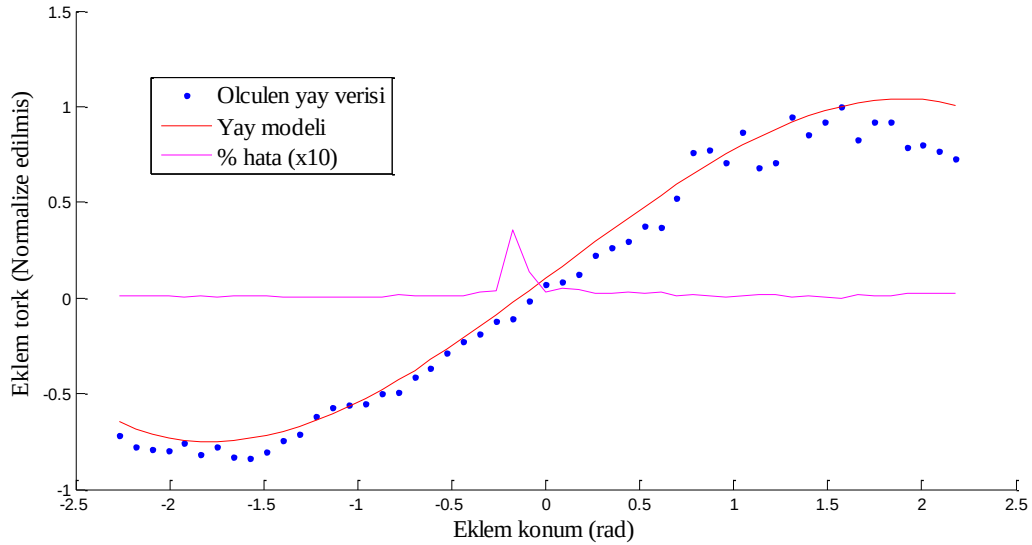
Elde edilen deneysel verilere bakıldığında yayın yaratmış olduğu etki yayın doğrusal olmayan yapısından kaynaklanmaktadır. Uygun modeli seçimi en düşük kareler yöntemi (least square) ile hesaplama yapan Matlab’ın ‘Basic fitting’ aracı kullanılmaktadır. Sonuç denklem (2.66) ile verilmektedir.

$$\tau_y(t) = -46.56 q(t)^3 + 8.07 q(t)^2 + 471.09 q(t) + 66.29 \quad (2.66)$$

Yay modeli ve gerçek durum ile yay modeli arasındaki yüzdesel hata Şekil 2.14’da verilmektedir.



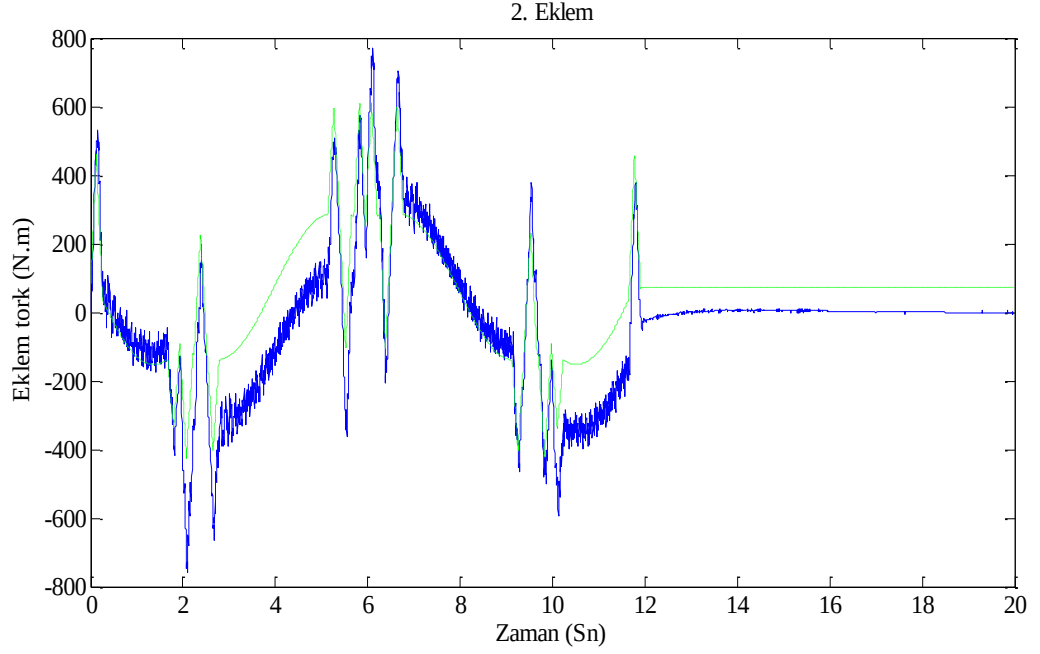
Şekil 2.13 : Yayın 2. eklemin hareketine bağlı oluşturduğu tork



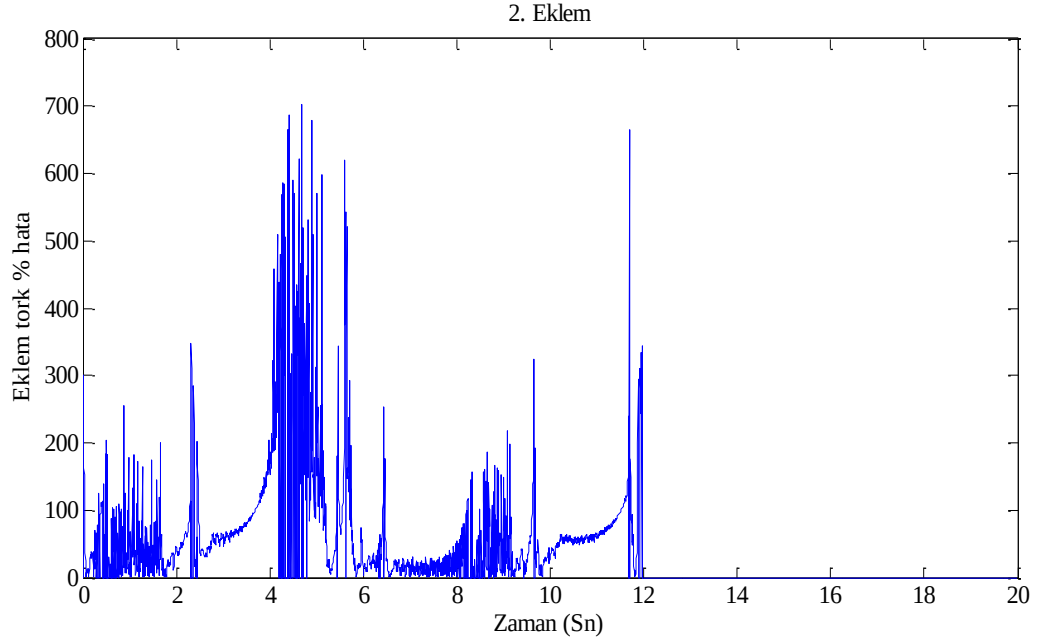
Şekil 2.14 : Yay modeli ve gerçek veri ile yay modeli arasındaki hata grafiği.

Yay modelinin dinamik modele dahil olmasıyla 2. eklemden hesaplanan eklem torku ve eklem torku hatası yukarıda belirtilen referans hareket için tekrar oluşturulmaktadır. Şekil 2.15’de referans hareket sonucu 2. eklemden oluşan tork grafiği manipülatörün Val3 programlama arayüzü kullanılarak ölçülen tork ile dinamik model ve yay modelin hesaplanmasıyla elde edilen tork değerleri karşılaştırılmaktadır. Şekil 2.16’de hesaplanan ve ölçülen tork arasındaki % hata grafiği verilmektedir. Yay modelinin olmadığı duruma göre % hatanın azaldığı

görülmektedir. Özellikle hızın sabit olduğu zaman aralığında ölçülen ve hesaplanan tork arasındaki farklılık sürtünme modelinin genel modele dahil edilmemesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 2.15 : Eklem tork grafiği (yay modele dahil edilmiş).



Şekil 2.16 : Eklem tork % hata (yay modele dahil edilmiş).

2.4.2 Sürtünme modeli

Robot manipülatörleri; eklemlerdeki yataklarda, aktarma organlarında ve sızdırmazlık elemanlarında sürtünmeye maruz kalmaktadır. Diğer bir değişle

birbirine göre göreceli hareket eden ve temas eden iki yüzey arasındaki her noktada sürtünme meydana gelmektedir. Çok sayıda faktör: yüzey pürüzlülüğü ve topolojisi, yağlama viskozitesi, yük, hızdan dolayı etkilenen ortam sıcaklığı sürtünme kuvvetine etki etmektedir. Staubli RX-160 manipülatörün eklemlerinde oluşan sürtünmeyi anlamak için bu manipülatörün eklem yapısına daha yakından bakmak ve eklemlerde kullanılan elemanları detaylıca incelemek gerekmektedir. Daha önceden de ifade edildiği gibi Staubli RX-160 manipülatörün ilk dört ekleminde Staubli birleştirilmiş eklem (JCS) bulunmaktadır. Bu yapı oldukça karmaşık bir yapıya sahip dairesel dişli ve yataklamaları birlikte barındırmaktadır (Gerat, 1994). Dairesel dişli aktarma organı, helisel dişli ve servo motordan oluşmaktadır. Dişliler ve yataklamalar diş boşluğunu (backlash) engellemek için önceden belli bir yük ile yüklenmektedir. Dairesel dişli aktarma organı ve helisel dişli birlikte sürtünme kayıplarını ve aşınmaları azaltmak için sürekli yağlı olarak bulunmaktadır. Son iki eklemden ise birbirine bağlı bir aktarma organı bulunmakta, her iki eklemden de sonsuz dişli çark bulunmanın yanı sıra 6. eklemden sarmal dişli mekanizması kullanılmaktadır. Sürtünme ilgili yapılan çalışmaların tamamında [6] referans alınmaktadır.

2.4.2.1 Eklem sürtünme modeli

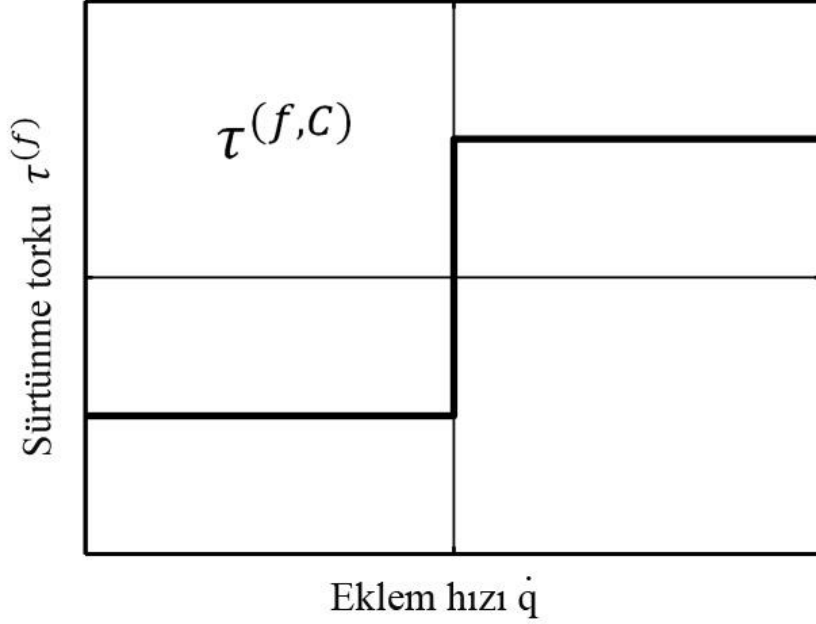
Bu bölümde manipülatör eklemlerinin ve aktarma organlarının ana bileşenlerinin sürtünme karakteristikleri üzerine odaklanılmaktadır. Robota uygulanan sürtünme araştırmaları, genellikle kayma rejimi ve kayma rejimi öncesi şeklinde ayrılmaktadır. Kayma rejiminde, sürtünme kuvveti yüzeyler arasındaki hızlar sıfırdan farklı iken meydana gelmektedir. Kayma rejimi öncesindeki durumda, sürtünme kuvvetleri yüzeyler arasındaki hız sıfır veya sıfıra yakın durumda oluşmaktadır.

Tribolojide sürtünme modeli genellikle fizik prensibine bağlıdır; sürtünme fenomeni tek bir kayar veya döner temas yüzeyi incelenmektedir. Böylece model parametreleri yüzeyin ve uygulanan yağın fiziksel özellikleriyle ilişkili olmaktadır. Bilyalı rulman veya dişli çiftinin temas eden her bir yüzeyindeki kuvvetlerin modellenmesi maliyetli olduğu için uygulanan bir yöntem olmamaktadır. Bu nedenle birçok araştırmacı, servo motor kontrollü mekanizmaların modellenmesinde esas sürtünme modelini ortaya çıkarmaya çalışmaktadır. Bu da model parametrelerinin yüzeyin ve yağın fiziksel özelliklerini yansıtmamaktadır.

2.4.2.2 Klasik sürtünme modeli

Kontrol literatüründe birçok sürtünme modeli klasik modellerinin birleşiminden oluşmaktadır. Sürtünme genel olarak yüzeyde oluşan normal kuvvetin sürtünme katsayısı ile çarpımından oluşmaktadır. Fakat döner eklemlerli manipülatörlerde sürtünme modeli $\tau_j^{(f)}$ çoğunlukla yükten bağımsız ele alınmakta, bu nedenle eklemin açısal hızının $\dot{q}_j$ fonksiyonu olarak verilmektedir. Şekil 2.17 ‘de gösterilen model Coulomb sürtünme modeli olarak bilinmektedir. Sürtünme modeli denklem (2.67) ile verilmektedir.

$$\tau^{(f)} = \text{sign}(\dot{q})\tau^{(f,C)} \quad (2.67)$$



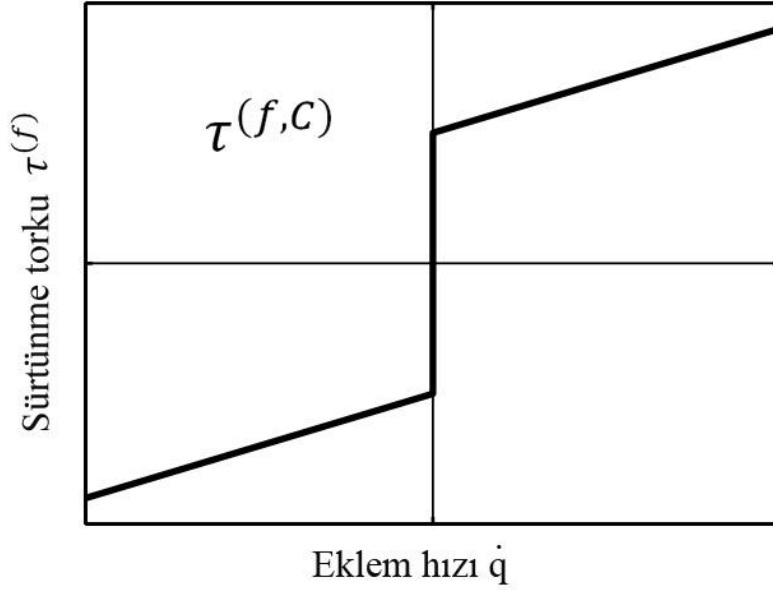
Şekil 2.17 : Coulomb sürtünme modeli.

$\tau^{(f,C)}$ coulomb sürtünme torku ve $\dot{q}$ eklemler hızıdır. Coulomb sürtünme modeli, kuru yüzeylerin birbiri üzerinde kaymasıyla oluşan büyük sürtünme kuvveti olarak ortaya çıkmaktadır. Dikkat edilmesi gereken $\text{sign}(\dot{q})$ sıfır hızlar için tanımlanmamaktadır. Bir başka deyişle, sürtünme modeli hızın sıfır olduğu durumdaki sürtünme torkunu ifade etmemektedir.

Yağlanmış yüzeylerde sürtünme modelinde viskozite terimi ortaya çıkmaktadır. Sürtünme torku denklem (2.68)’deki ifadeye dönüşmektedir.

$$\tau^{(f)} = \text{sign}(\dot{q})\tau^{(f,C)} + c^{(v)}\dot{q} \quad (2.68)$$

$c^{(v)}$ viskoz sürtünme parametresidir. Bu modelde viskoz sürtünme modeli eklem hızının doğrusal fonksiyonu olarak gerçekleştirilmektedir. Şekil 2.18'de coulomb sürtünme modeline etkisi görünmektedir.



Şekil 2.18 : Coulomb ve viskoz sürtünme torku.

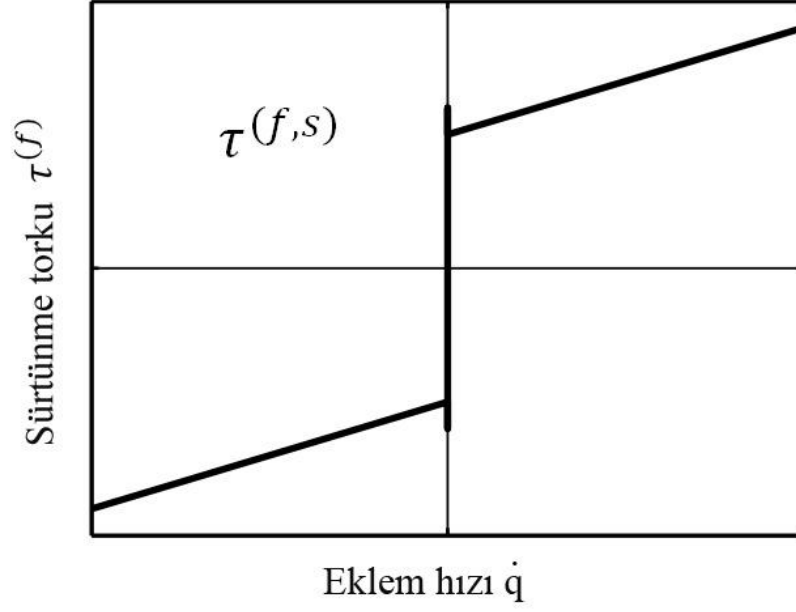
İsviçreli bilim adamı Euler(1707-1783) yüksek sürtünme kuvvetlerinin yüzeyler arasında kayma hareketine neden olduğunu göstermektedir. Statik sürtünme etkisi olarak adlandırılan durum Şekil 2.19'de görünmektedir. Denklem (2.69) bu modeli vermektedir.

$$\tau^{(f)} = \begin{cases} |\tau^{(f)}| \leq \tau^{(f,s)}; & \dot{q} = 0 \text{ ise} \\ \text{sign}(\dot{q})\tau^{(f)} + c^{(v)}\dot{q}; & \dot{q} \neq 0 \text{ ise} \end{cases} \quad (2.69)$$

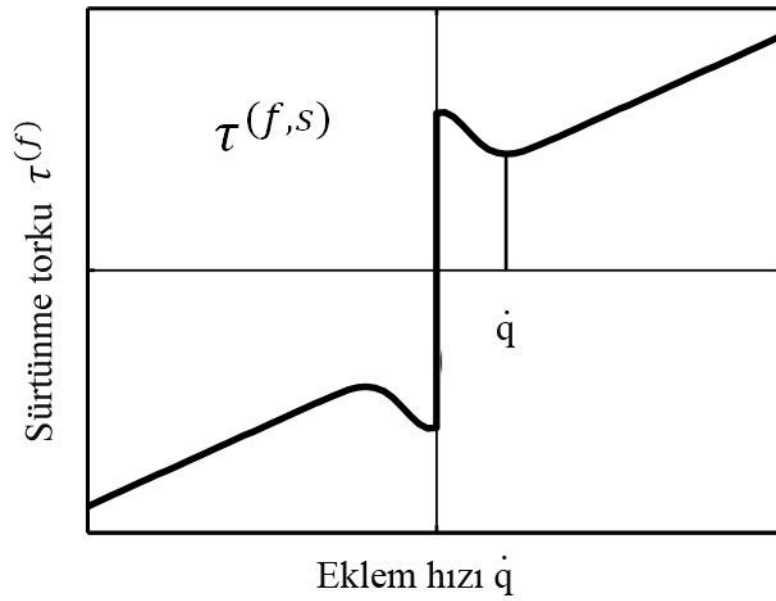
$\tau^{(f,s)}$ statik sürtünme torkudur ve $\tau^{(f,C)} < \tau^{(f,s)}$ olmaktadır. Dikkat edilmesi gereken husus, model eklem hızının sıfır olduğu durumda birden çok çözümü içermektedir. Aynı zamanda hızın sıfır değerinden, sıfırdan farklı duruma geçişte model süreksizdir. Stribeck(1902), yağlanmış yüzeylerde statik sürtünmeden Coulomb sürtünme modeline geçişte fonksiyonun süreksiz olmadığını, eklem hızına bağlı sürekli fonksiyon olduğunu bulmaktadır. Bu nedenle Şekil 2.20'de sürtünme kuvveti ve hız arasında Stribeck eğrisi gösterilmektedir. Bo ve Pavelescu(1982) ortaya

koyduğu, Stribeck etkisini veren bilinen modeli geliştirerek statik sürtünmeden Coulomb sürtünmesindeki düşüşü eksponansiyel veren denklem (2.70)'de gösterilmektedir.

$$\tau^{(f)} = \text{sign}(\dot{q})[\tau^{(f,C)} + (\tau^{(f,s)} - \tau^{(f,C)})e^{-|\dot{q}/\dot{q}^{(s)}|^{\delta(s)}}] \quad (2.70)$$



Şekil 2.19 : Coulomb, viskoz ve statik sürtünme modeli.



Şekil 2.20 : Sürtünme modelinde Stribeck etkisi.

$\dot{q}^{(s)}$ Stribeck hızı olarak bilinmekte ve stribeck etkisinin olduğu hız aralığını göstermektedir. Farklı malzeme koşullarına göre deneye dayalı terim $\delta(s)$ 0.5 ile 1 arasında değişmektedir. Armstrong-Helovury(1991), Stribeck modeline $c^{(v)}\dot{q}$ viskoz terimini dahil etmektedir.

$$\tau^{(f)} = \text{sign}(\dot{q})[\tau^{(f,C)} + (\tau^{(f,s)} - \tau^{(f,C)})e^{-|\dot{q}/\dot{q}^{(s)}|^{\delta(s)}}] + c^{(v)}\dot{q} \quad (2.71)$$

Bu sürtünme modeli birçok araştırmacı tarafından manipülatörün kayma sürtünme modellenmesi için kullanılmaktadır. Fakat bu modellerin eklem içerisindeki tüm sürtünmeye maruz kalan elemanlar için türetilmesi ve bu modellerin bir araya getirilmesi çok fazla parametreye sahip sürtünme modeli oluşturmaktadır. Bunun yerine elemanların sürtünme özellikleri değerlendirilmekte ve sadece en önemli etkiler göz önüne alınmaktadır.

Manipülatörün ilk dört eklemi giriş bölümünde daha önceden belirtildiği gibi helisel dişli, çevrimsel dişli ve rulmanın bulunduğu üç ana elemandan oluşmaktadır. Son iki eklemde sonsuz dişli ve rulman, 6. eklemde sarmal dişli bulunmaktadır. Rulmanlar ön gerilme ile yüklendikleri için sürtünme torkunun pürüzlülükten kaynaklı(aspertiy) bileşenini oluşturan rulmandır. Helisel dişli çifti arasında oluşan viskoz sürtünme torku çevrim oranı yüksek olması nedeniyle rulman üzerinde oluşandan daha büyüktür. Çevrimsel dişlilerde ise düşük açısız hızlarda hareket etmekte olduğu için oluşan viskoz sürtünme torku helis dişlidekine göre daha düşüktür. Bu nedenle sürtünme modeli silindirik rulmanın pürüzlülük etkisini ve helis dişli çiftinin viskoz etkisini bir araya getiren denklem (2.72)'de verilen model göz önüne alınmaktadır.

$$\tau_j^{(f)} = \tau_j^{(a,BL)} e^{-\left(\dot{q}_j/\dot{q}_j^{(s)}\right)^{\delta_j^{(a)}}} + c_j^{(v)}\dot{q}_j^{(1-\delta_j^{(v)})} \quad (2.72)$$

Manipülatör bilek yapısı beşinci ve altıncı eklemi birlikte içermektedir. Dördüncü eklemde içinde yer alan servo motor hareketi aktarma elemanlarıyla beşinci eklem üzerinden altıncı eklem iletmektedir. Bu nedenle beşinci motorla altıncı eklem arasında kinematik etkileşim oluşmaktadır. Bu ilişki Şekil 2.21'de gösterilmektedir. 5 no'lu servo motorun açısız hızı doğrudan $\dot{q}_5$ ile orantılıdır. Fakat 6 no'lu servo motor açısız hızı, $\dot{q}_5$ ve $\dot{q}_6$ hızlarının farkıyla ilişkilidir. Bu nedenle ilave sürtünme

modelinin tanımlanması gerekmektedir. Bu modelle ilişkili $\dot{q}_7$ hızı denklem (2.73) 'de tanımlanmaktadır.

$$\dot{q}_7 = \dot{q}_5 + \dot{q}_6 \quad (2.73)$$

Şekil 2.21'de belirtildiği gibi sürtünme modelleri a,b ve c sürtünme modelleriyle tüm bileğin sürtünme modeli ifade edilmektedir. Denklem (2.74), (2.75) ve (2.76)'de bu modeller verilmektedir.

$$\tau_a^{(f)} = \tau_5^{(a,BL)} e^{-(\dot{q}_5/\dot{q}_5^{(s)})^{\delta_5^{(a)}}} + c_5^{(v)} \dot{q}_5^{(1-\delta_5^{(v)})} \quad (2.74)$$

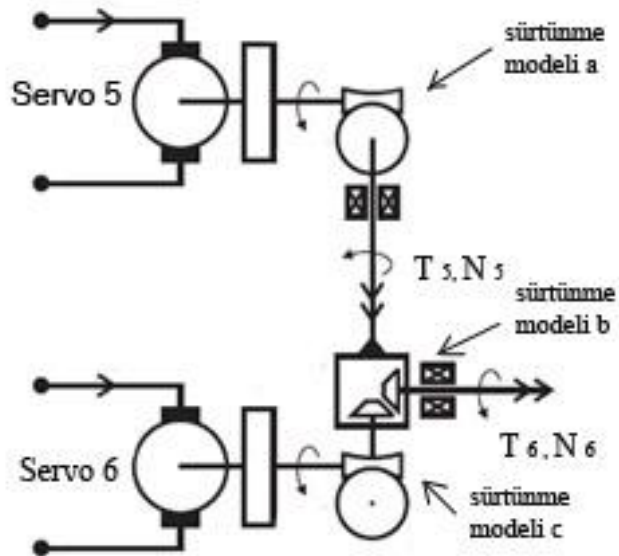
$$\tau_b^{(f)} = \tau_6^{(a,BL)} e^{-(\dot{q}_6/\dot{q}_6^{(s)})^{\delta_6^{(a)}}} + \tau_6^{(v,l)} (1 - e^{-\dot{q}_6/\dot{q}_6^{(l)}}) \quad (2.75)$$

$$\tau_c^{(f)} = \tau_7^{(a,BL)} e^{-(\dot{q}_7/\dot{q}_7^{(s)})^{\delta_7^{(a)}}} + c_7^{(v)} \dot{q}_7^{(1-\delta_7^{(v)})} \quad (2.76)$$

Sürtünme torkları $\tau_a^{(f)}$, $\tau_b^{(f)}$ ve $\tau_c^{(f)}$ eklem düzeyine taşınmaktadır:

$$\tau_5^{(f)} = \tau_a^{(f)} + \tau_c^{(f)} \quad (2.77)$$

$$\tau_6^{(f)} = \tau_b^{(f)} + \tau_c^{(f)} \quad (2.78)$$



Şekil 2.21 : 5. ve 6. eklem arasındaki kinematik etkileşim.

Sürtünme modelleri a, b ve c eklem hızlarının uygun seçilmesi ile bir birinden bağımsız hesaplanmaktadır. $\dot{q}(k)$, Stribeck eğrisini oluşturan deney verileri toplanırken uygulanan eklem açısal hız vektörü olsun.

$$\left. \begin{array}{l} \dot{q}_5 = \dot{q}(k) \\ \dot{q}_6 = -\dot{q}(k) \end{array} \right\} \Rightarrow \tau_5^{(f)} = \tau_a^{(f)}, \quad \tau_6^{(f)} = \tau_b^{(f)}, \quad \tau_c^{(f)} = \text{sabit}, \quad (2.79)$$

$$\left. \begin{array}{l} \dot{q}_5 = \dot{q}(k) \\ \dot{q}_6 = \dot{q}(k) \end{array} \right\} \Rightarrow \tau_5^{(f)} = \tau_a^{(f)} + \tau_c^{(f)}, \quad \tau_6^{(f)} = \tau_b^{(f)} + \tau_c^{(f)}, \quad (2.80)$$

Yukarıda verilen denklemlere göre ilk dört eklem için $\tau^{(f)}$, diğer iki eklem için sırasıyla $\tau_5^{(f)}$ ve $\tau_6^{(f)}$ sürtünme torklarının hesaplanması gerekmektedir. Bir sonraki bölümde hesaplanmanın adımları ve yapılan deney hakkında bilgi verilmektedir.

2.4.2.3 Sürtünme modelinde bilinmeyen parametrelerin tanınması

Denklem (2.71) ile verilen sürtünme modelinin manipülatöre uygunluğunun doğrulanması için Staubli RX160 manipülatörünün birinci ekleminin sürtünme tork verileri kaydedilmekte ve çıkan sonuçla Stribeck modeliyle karşılaştırılmaktadır. Manipülatörün birinci eklemi trapezoid hız profiliyle farklı hızlarda hareket ettirilmektedir. Deneysel olarak, sürtünme tork değerlerinin eklemlerin sıcaklığına ve eklem açısına bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Özdeş sıcaklıkta deney verilerin toplanabilmesi için veriler toplanmadan önce eklem belli başlangıç sıcaklığına ulaşması için çalıştırılmaktadır. Gürültü ve eklem konumun etkisini azaltmak için trapez hız profilinde hızın sabit olduğu aralıkta $n=3$ sürtünme tork ölçümünün ortalaması alınmaktadır.

1. eklemden 4. ekleme ve a, c modelleri $\delta^{(a)}$, $\dot{q}^{(s)}$ ve $\delta^{(v)}$ parametrelerine bağlı doğrusal olmayan $\tau^{(a,BL)}$ ve $c^{(v)}$ parametrelerine bağlı doğrusal denklemlerdir. Sürtünme modeli b ise $\delta^{(a)}$, $\dot{q}^{(s)}$ ve $\dot{q}^{(l)}$ parametreleriyle ilişkili olarak doğrusal olmayan $\tau^{(a,BL)}$ ve $\tau^{(v,l)}$ parametresiyle ilişkili olarak doğrusal denklemdir. Tüm bilinmeyen beş parametreyi bir kerede tahmin etmek doğrusal olmayan optimizasyon tekniği ile mümkün olmaktadır. Fakat çözüm tekniğini kolaylaştırmak için doğrusal en küçük kareler optimizasyon yöntemi tercih edilmektedir. İlk adımda viskoz sürtünme terimi ele alınmaktadır. Üstel terim $1-\delta^{(v)}$ ve viskoz terimin katsayısı $c^{(v)}$

'nin hesaplanmaktadır. Bu nedenle pürüzlülük etkisiyle oluşan sürtünme torkunu ihmal etmek için yüksek hız bölgesindeki deneysel verilerle işlem yapılmaktadır. Eklem sürtünme torklarının ve eklem açısal hızlarının doğal logaritmasının alınabilmesi viskoz parametrelerin bulunabilmesi için en küçük kareler yönteminin kullanılmasına izin vermektedir. Optimizasyon problemi denklem ile tanımlanmaktadır,

$$\hat{p}^{(f,v)} = \arg \min_{p^{(f,v)}} \left\| \ln(\tau^{(f,v)}) - A^{(f,v)} p^{(f,v)} \right\|_2^2 \quad (2.81)$$

parametre vektörü,

$$p^{(f,v)} = \begin{bmatrix} 1 - \delta^{(v)} & \ln(c^{(v)}) \end{bmatrix}^T \quad (2.82)$$

sürtünme torku vektörü,

$$\tau^{(f,v)} = \begin{bmatrix} \tau_1^{(f,v)} & \dots & \tau_n^{(f,v)} \end{bmatrix}^T \quad (2.83)$$

Matris $A^{(f,v)}$ tanımlanmakta,

$$A^{(f,v)} = \begin{bmatrix} \ln(\dot{q}_1) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ \ln(\dot{q}_n) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.84)$$

0.5 ile 2.8 rad/s hız aralığında 6 eklem açısal hız değeri için ($n = 6$), $\tau^{(f,v)}$, $A^{(f,v)}$ 'nin değerleri ölçülmektedir.

Doğrusal en küçük kareler yöntem çözümü denklem (2.85) ile bulunmakta,

$$\hat{p}^{(f,v)} = (A^{(f,v)T} A^{(f,v)})^{-1} A^{(f,v)T} \tau^{(f,v)} \quad (2.85)$$

ve bilinmeyen viskoz sürtünme parametreleri

$$\delta^{(v)} = 1 - \hat{p}_1^{(f,v)} \quad (2.86)$$

$$c^{(v)} = \exp(\hat{p}_2^{(f,v)}) \quad (2.87)$$

bulunmaktadır.

İkinci adımda, üstel terim $\delta^{(a)}$ 'nın uygun değeri seçilmesi gerekmektedir. Mantıklı olabilecek ilk tahmin denklem (2.86)'da hesaplanan $\delta^{(v)}$ 'ye eşit almaktır. Stribeck hızı $\dot{q}^{(s)}$ için en iyi tahmin sürtünme torkunun en düşük olduğu hıza yakın bir değer almaktır.

Üçüncü adımda statik pürüzlülük sürtünme kuvveti $\tau^{(a,BL)}$ en küçük kareler yöntemiyle bulunmaktadır. En iyi model, ancak viskoz sürtünme parametresi $c^{(v)}$ 'nin tahminin içine katılmasıyla elde edilmektedir. Bu terimin, model içinde doğrusal bir parametre olması bu durumu mümkün kılmaktadır. Optimizasyon problemi,

$$\hat{p}^{(f)} = \arg \min_{p^{(f)}} \left\| \tau^{(f)} - A^{(f)} p^{(f)} \right\|_2^2 \quad (2.88)$$

tanımlanmakta; parametre vektörü,

$$p^{(f)} = \left[\tau^{(a,BL)} \quad c^{(v)} \right]^T \quad (2.89)$$

sürtünme tork vektörü,

$$\tau^{(f)} = \left[\tau_1^{(f)} \quad \dots \quad \tau_n^{(f)} \right]^T \quad (2.90)$$

matris $A^{(f)}$,

$$A^{(f)} = \begin{bmatrix} e^{-|\dot{q}_1/\dot{q}^{(s)}|^{\delta^{(a)}}} & \dot{q}_1^{(1-\delta^{(v)})} \\ \vdots & \vdots \\ e^{-|\dot{q}_n/\dot{q}^{(s)}|^{\delta^{(a)}}} & \dot{q}_n^{(1-\delta^{(v)})} \end{bmatrix} \quad (2.91)$$

Bu durumda $\tau^{(f)}$ ve $A^{(f)}$ tam hız aralığında ($n=18$) ölçülmektedir. En küçük kareler yöntemiyle tahmin denklem (2.92)'in hesaplanmasıyla elde edilmektedir.

$$\hat{p}^{(f)} = (A^{(f)T} A^{(f)})^{-1} A^{(f)T} \tau^{(f)} \quad (2.92)$$

Son olarak ikinci adımda uygun seçimi yapılan $\delta^{(a)}$ ve $\dot{q}^{(s)}$ hassas olarak manüel ayarlanmaktadır. Çizelge 2.2 ‘de tüm modeller için parametreler yer almaktadır.

Çizelge 2.2 : Staubli RX160 manipülatörün sürtünme parametreleri

Model	1	2	3	4	a	b	c
$\tau^{(a,BL)}$	55.3234	30.8468	40.4853	168.4421	2.6767	-0.7271	1.0903
$\dot{q}^{(s)}$	0.0710	0.0400	0.0610	0.0200	0.2500	0.3500	0.0800
$\delta^{(a)}$	0.7000	0.8000	0.6000	0.5500	0.7000	0.5000	0.5000
$c^{(v)}$	191.9090	107.0665	59.4372	24.1345	20.0239	—	8.3559
$\delta^{(v)}$	0.3837	-0.1724	0.3739	0.3562	0.3494	—	0.3907
$\tau^{(v,l)}$	—	—	—	—	—	-1.3742	—
$\dot{q}^{(l)}$	—	—	—	—	—	4.6408	—

Birinci eklemin açısal hızı $\dot{q}_1$ ’e göre sürtünme torku Şekil 2.22’da gösterilmektedir. Eklem sürtünme torku, hesaplanan maksimum sürtünme torkuna bölünerek normalize edilmektedir. Stribeck etkisi Şekil 2.23’deki detay gösterimde açık olarak görülmektedir. Diğer eklemler için hesaplanan sürtünme torku ilişkisi ekte bulunmaktadır.

Diğer eklemler için sonuçlar ve grafikler Ek B2’de verilmektedir.

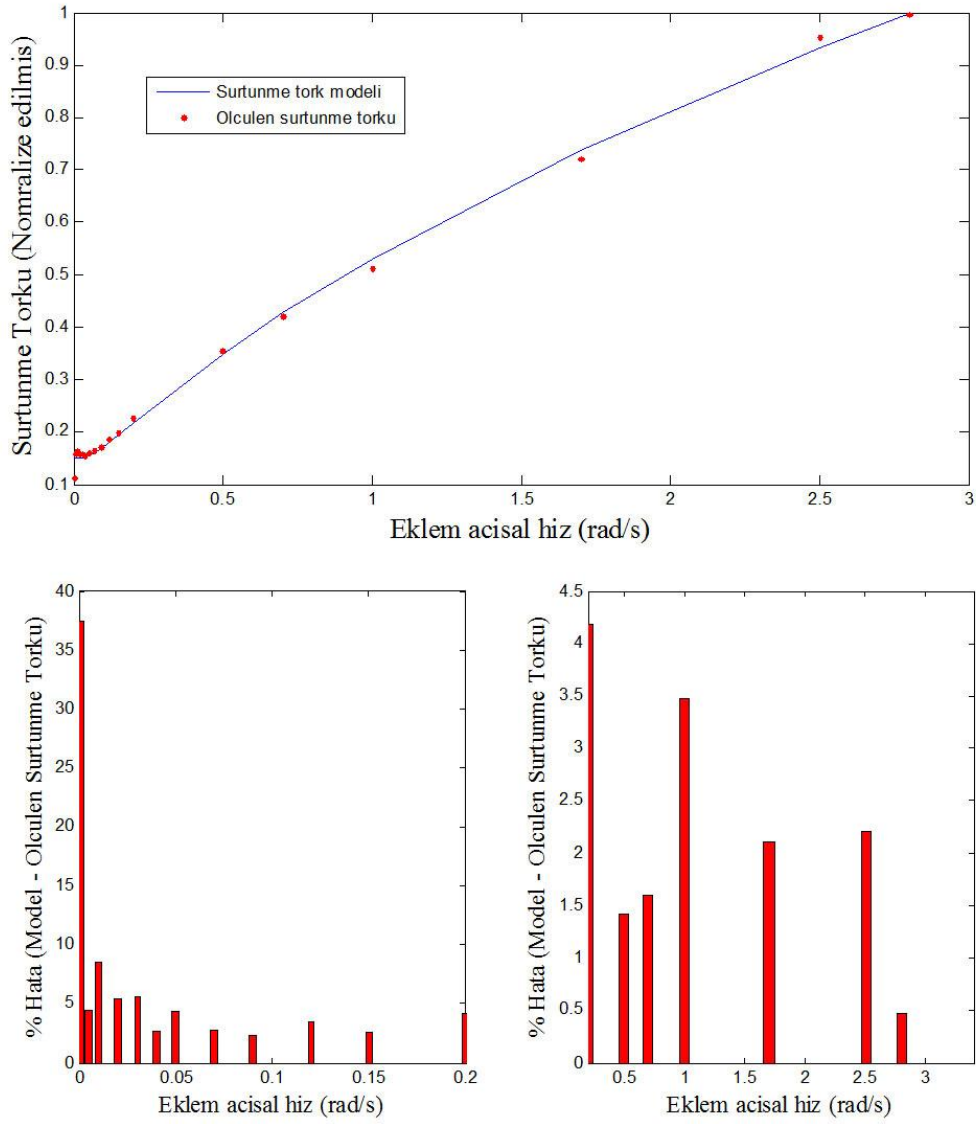
Sürtünme ve yay modelinin manipülatör dinamiğine eklenmesiyle manipülatörün modellenmesi tamamlanmaktadır. Türetilen dinamik modelin son gösterimi son şekliyle denklem (2.93) ‘de verilmektedir. $\tau_s(\dot{q})$ sürtünme torkunu vermektedir.

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + Y(q) = \tau - \tau_s(\dot{q}) \quad (2.93)$$

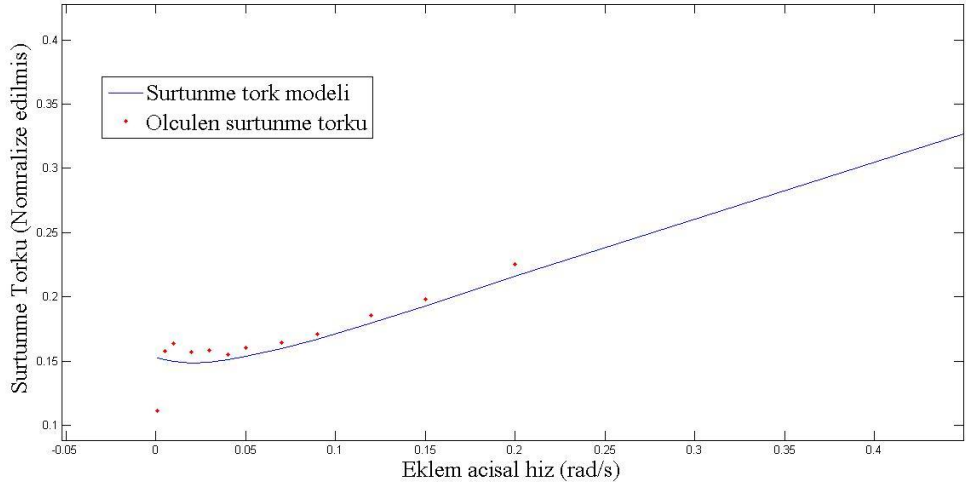
$$Y(q) = \begin{bmatrix} 0 \\ y(q_2) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad y(q_2) = -46.56 q_2^3 + 8.07 q_2^2 + 471.09 q_2 + 66.29 \quad (2.94)$$

Oluşturulan dinamik modelin sonuçlarını Staubli RX160 manipülatörün kontrolcüsü ile karşılaştırılarak türetilen modelin doğruluğu araştırılmaktadır. Sırasıyla 1., 2. ve 3. eklemlerin her birini ayrı hareket ettirilmektedir. 1-2, 2-3 eklemler birlikte hareket

ettirildikten sonra 1-2-3. eklemler ve son olarak tüm eklemler birlikte hareket ettirilmektedir. Tüm hareketlerde yörünge eklem uzayında planlanmaktadır.



Şekil 2.22 : 1. eklemden ölçülen ve hesaplanan sürtünme torku ve hatası.



Şekil 2.23 : Sürtünme torkunda Stribeck etkisi.

Eklem uzayında tanımlanan yörüngede iki nokta arasındaki serbest yol olarak tanımlanmaktadır. Yörünge planlamayla ilgili,- ayrıntılı bilgi gelecek bölümde verilmektedir.

Eklem uzayında oluşturulan yörüngelerde eklemler 50° saat yönü veya tersine hareket etmektedir. Görev uzayında ise öncesinden rastgele seçilmiş noktalar referans seçilmektedir. Manipülatörün nominal hızının %30, %60 ve %100'ünde ve maksimum ivmesin %100'ü kullanılarak yörüngeler oluşturulmaktadır. Tüm hareketler manipülatörün 2. eklem 45° , 3. eklem 90° ve diğer eklemlerin 0° olduğu konumda başlamaktadır. Manipülatör düzenlemesi tüm hareket boyunca omuzun 'solda', dirsek ve bileğin 'pozitif' olarak tanımlanmaktadır. Yapılan çalışmalarda elde edilen ve bu bölümde bulunmayan grafikler Ek B3 bölümünde yer almaktadır.

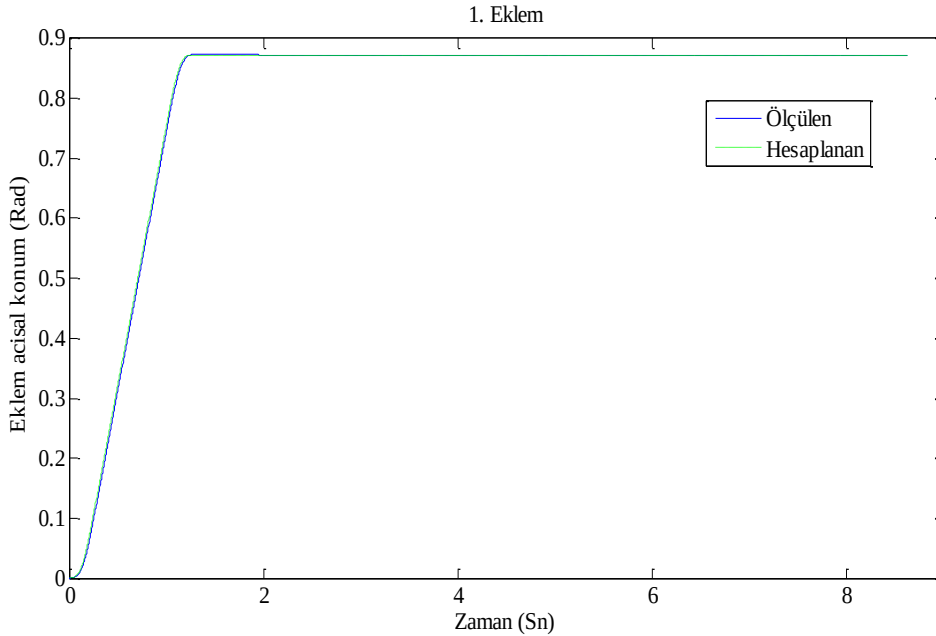
Bu bölümde verilen tüm grafikler manipülatör eklemlerinin nominal hızının %30'u, maksimum ivmesinin %100 olarak tanımlanmaktadır. Görev uzayında tanımlanan noktalar Çizelge 2.3'de verilmektedir. Manipülatör uç noktası sırasıyla 1. nokta, hedef nokta, 2. nokta, hedef nokta ... 10.nokta ve hedef noktayı izlemektedir. Bu noktalar seçiminde manipülatördeki eklemlerin tamamının hareket etmesi farklı konumlardan geçmesi hedeflenmektedir. Manipülatör düzenlemesi ise tüm noktalar için omuz 'solda', dirsek ve bilek 'pozitif' olarak belirlenmektedir.

Çizelge 2.3 : Görev uzayında planlanan yörünge için belirlenen koordinatlar

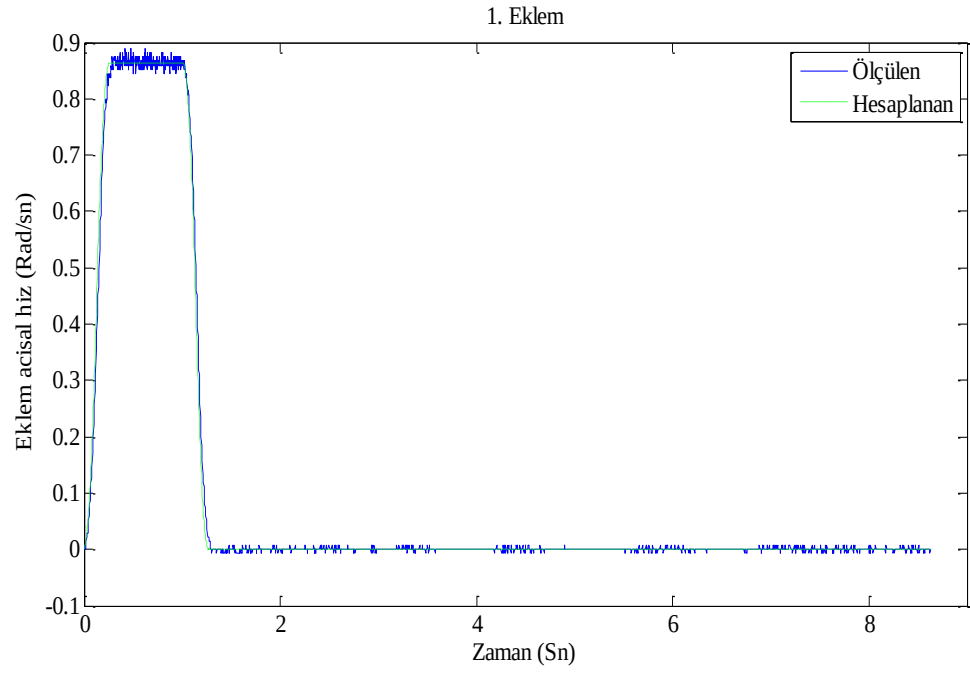
	x(mm)	y (mm)	z(mm)	Rx (°)	Ry(°)	Rz(°)

Hedef n.	211,22	1160,16	85,66	2,79	171,80	-24,83
1. nokta	1080,87	11,28	235,51	-14,46	154,34	3,24
2. nokta	716,94	-793,42	412,60	-29,16	155,83	6,77
3. nokta	745,98	-509,98	368,69	-27,49	165,07	11,67
4. nokta	-375,09	516,10	295,14	-1,83	178,94	12,93
5. nokta	1063,69	824,06	37,81	0,11	178,66	9,25
6. nokta	724,21	-970,04	396,22	-0,11	178,66	9,25
7. nokta	1226,25	334,71	42,56	-0,11	178,66	9,25
8. nokta	1082,29	-550,16	301,49	-6,67	168,76	-0,14
9. nokta	-687,97	959,00	-89,33	-2,20	176,22	6,84
10.nokta	745,98	-509,98	368,69	-27,49	165,07	11,67

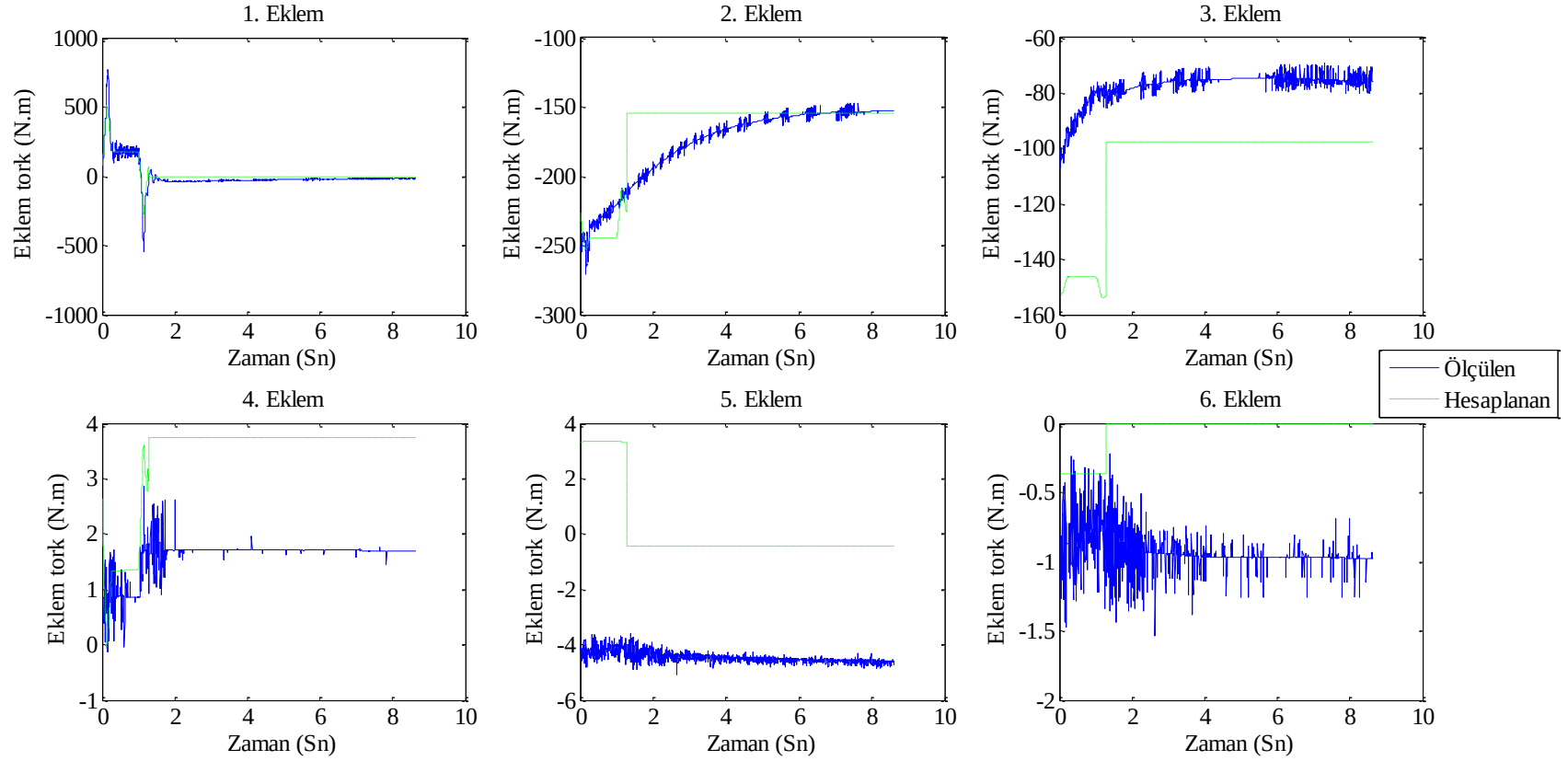
1. eklem 50° hareket ettirilirse Şekil 2.24'de 1. eklem açısı konum grafiği oluşmaktadır. Şekil 2.25 eklem açısı hızı, Şekil 2.26 eklem tork ve Şekil 2.27 eklem tork % hatalarını göstermektedir. Hareketin gerçek zamanda gerçekleşmesi için manipülatör dinamik modeli ve kontrolcüsü kullanılmaktadır. Bunun sonucunda verilen konum, hız ve tork grafiklerinde; konum, hız ve tork sensörlerinden elde edilen değerler 'ölçülen', referans yörünge olarak tanımlanan konum ve hız ile türetilen dinamik modelle hesaplanan eğriler ise 'hesaplanan' olarak tanımlanmaktadır.



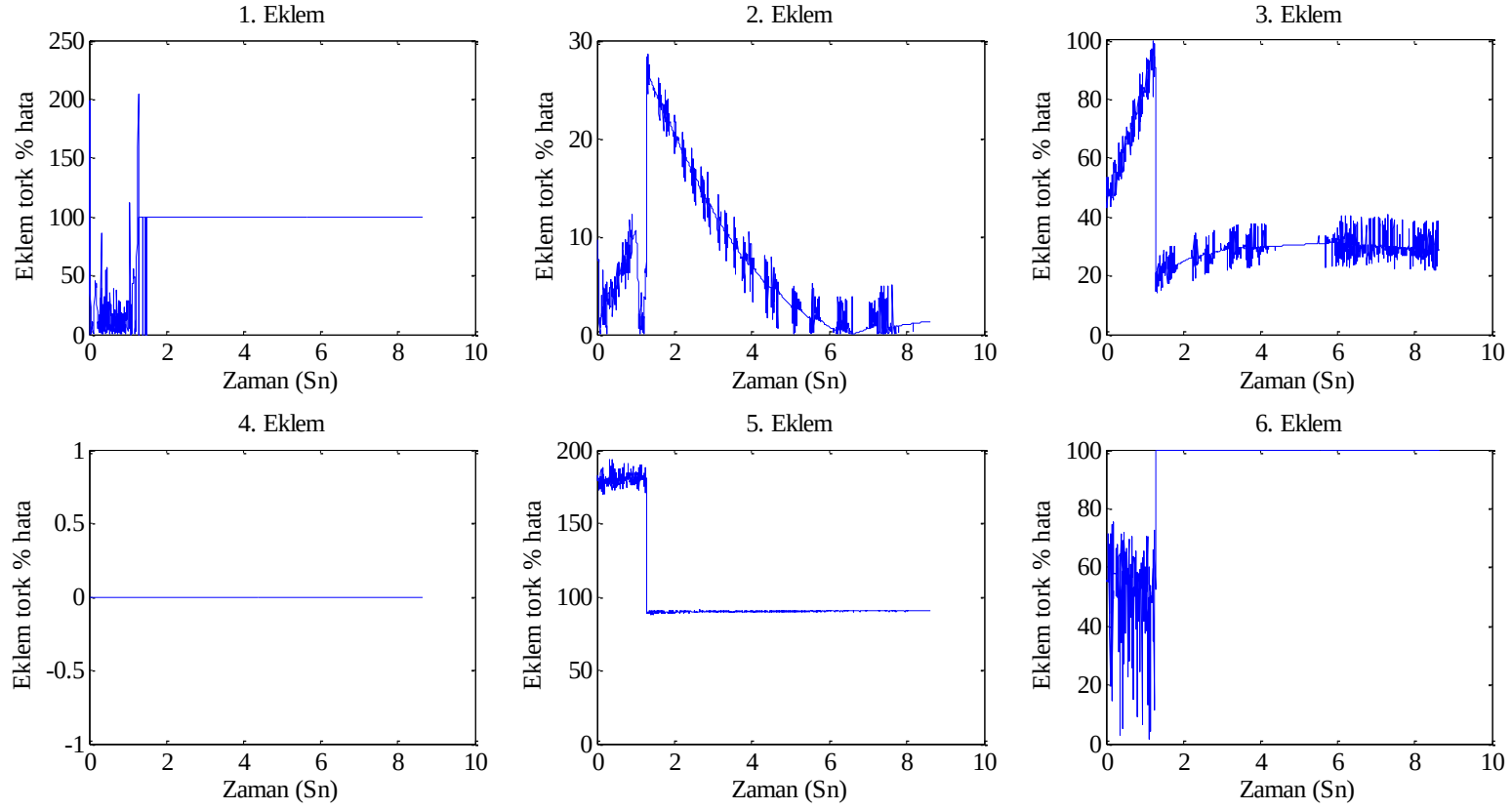
Şekil 2.24 : 1. eklem açısı konum grafiği.



Şekil 2.25 : 1. eklem açısai hız grafiğı.

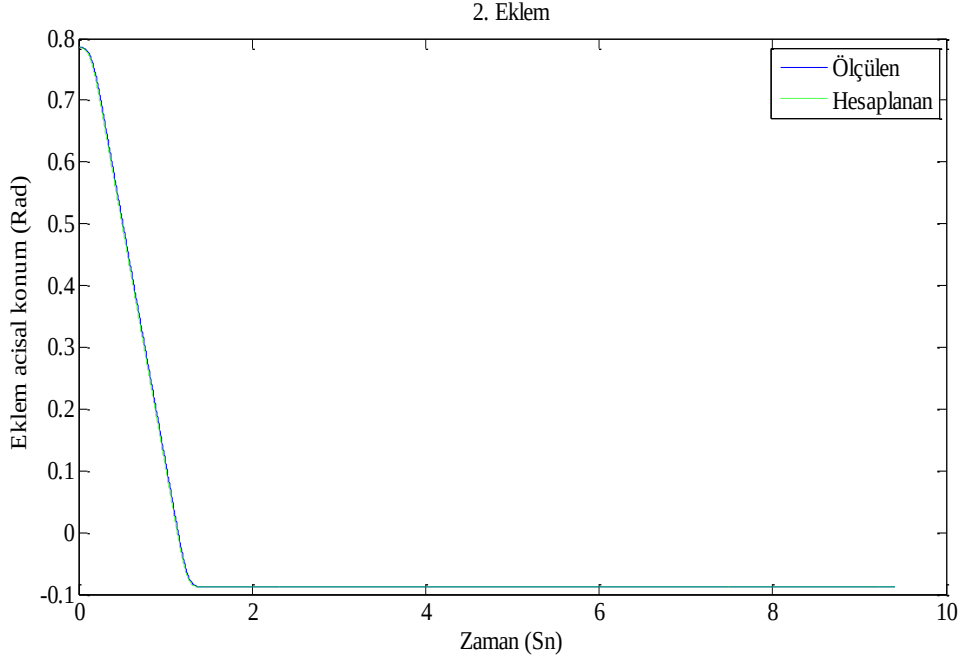


Şekil 2.26 : 1. eklem hareket ederken tüm eklemler için tork grafikleri.

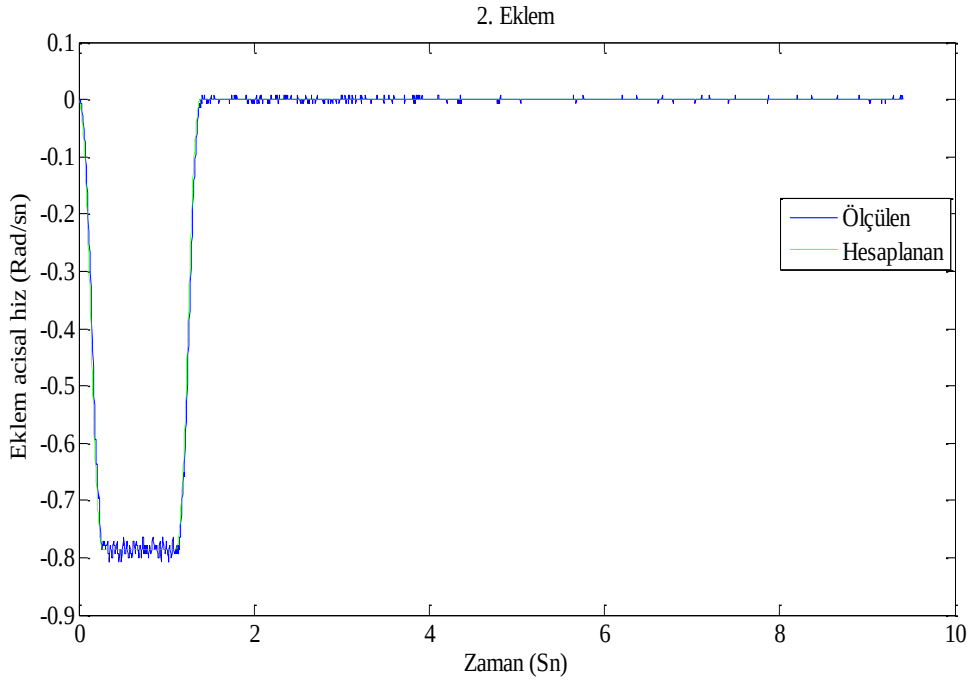


Şekil 2.27 : 1. eklem hareket ederken tüm eklemler için tork % hata grafiği.

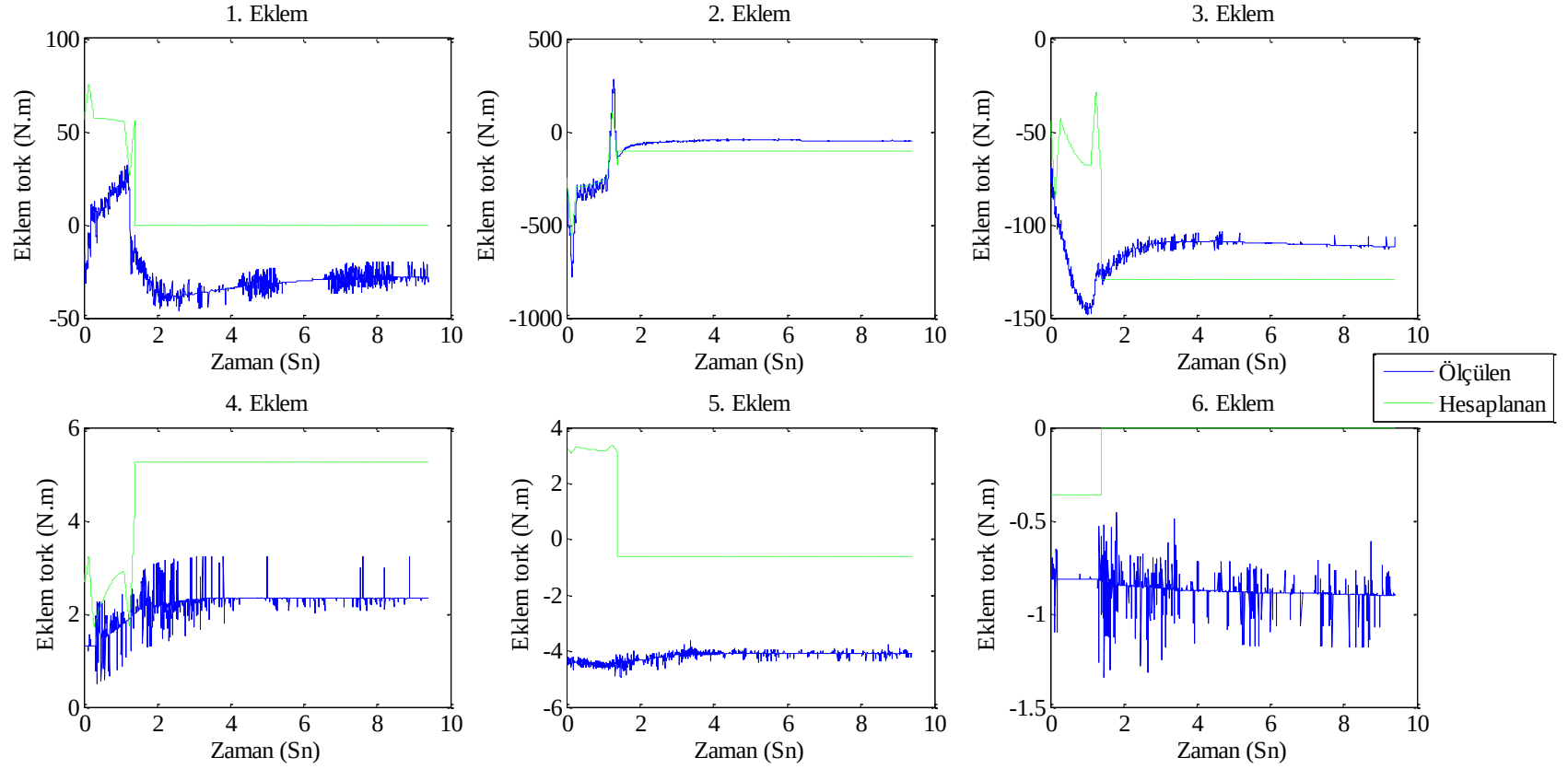
2. eklem 50° hareket ettirilirse Şekil 2.28'de 2. eklem açısai konum grafiği oluşmaktadır. Bunu sırasıyla eklem açısai hızı, eklem tork ve eklem tork % hata grafikleri takip etmektedir. 2. eklem, çalışma uzayının dönüş yönünü sınırlamasından dolayı diğer eklemlerin dönüş yönünün tersine hareket ettirilmektedir.



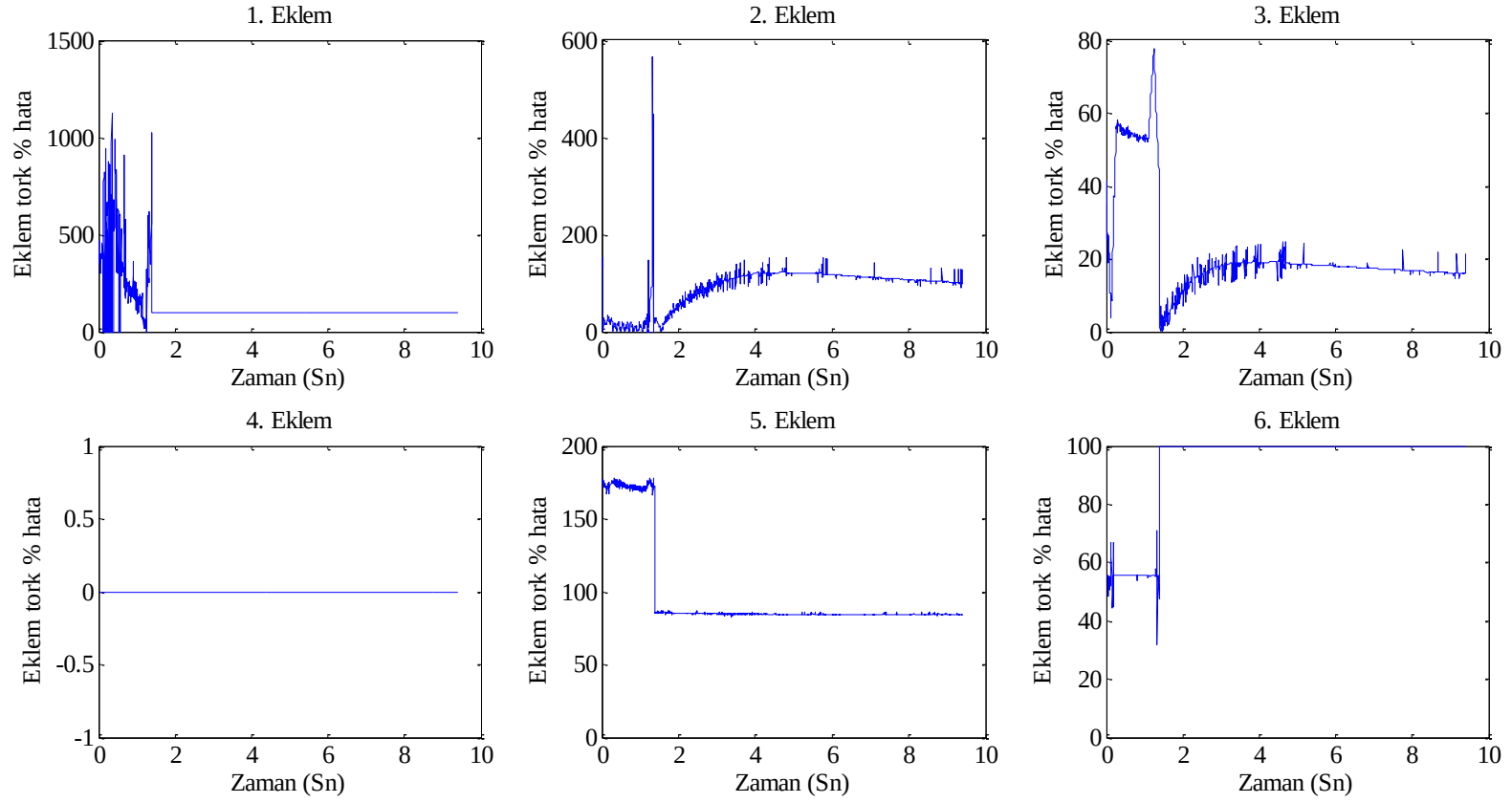
Şekil 2.28 : 2. eklem açısai konum grafiği.



Şekil 2.29 : 2. eklem açısai hız grafiği.

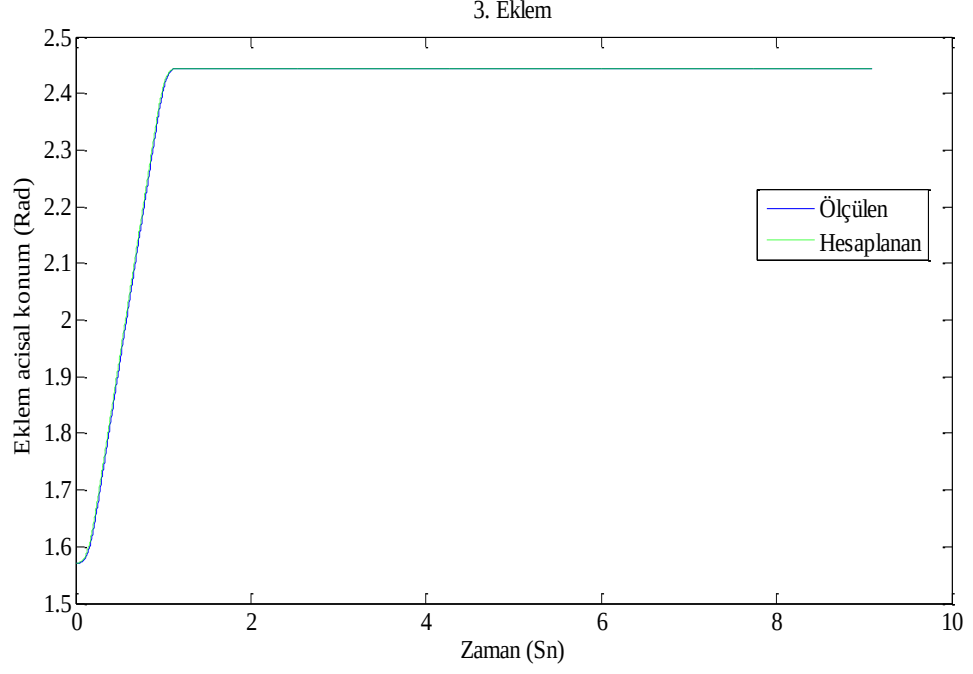


Şekil 2.30 : 2. eklem hareket ederken tüm eklemler için tork grafikleri.

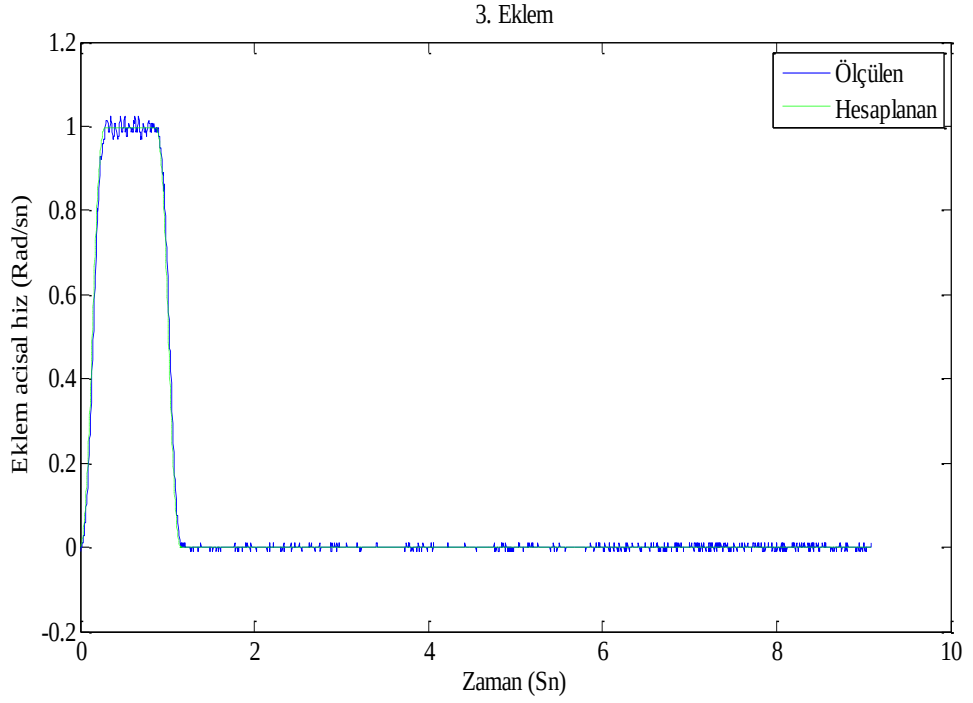


Şekil 2.31 : 2. eklem hareket ederken tüm eklemler için tork % hata grafiği.

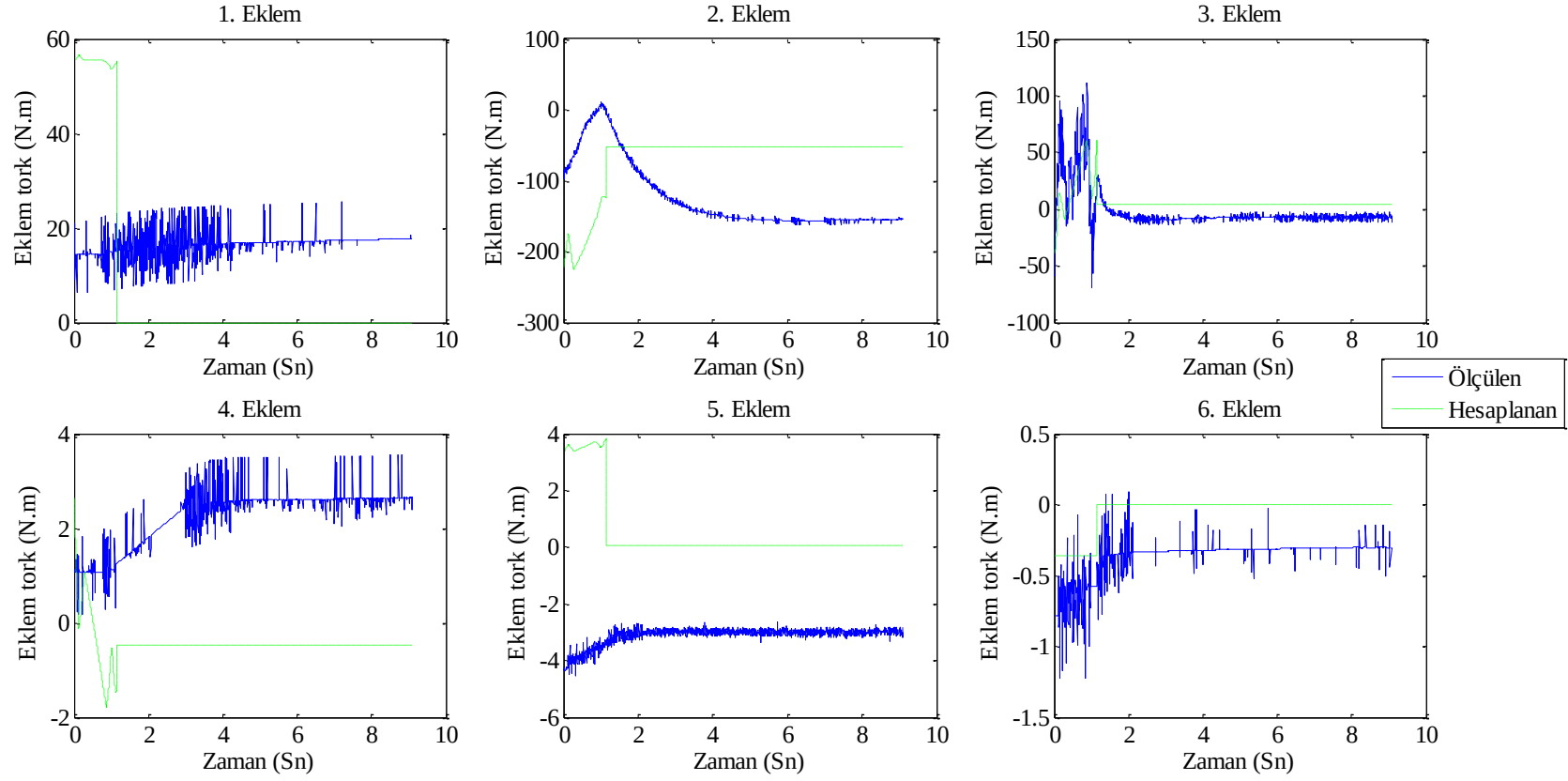
3. eklem 50° hareket ettirilirse Şekil 2.32’de 3. eklem açısal konum grafiği oluşmaktadır. Bunu sırasıyla eklem açısal hızı, eklem tork ve eklem tork % hata grafikleri takip etmektedir



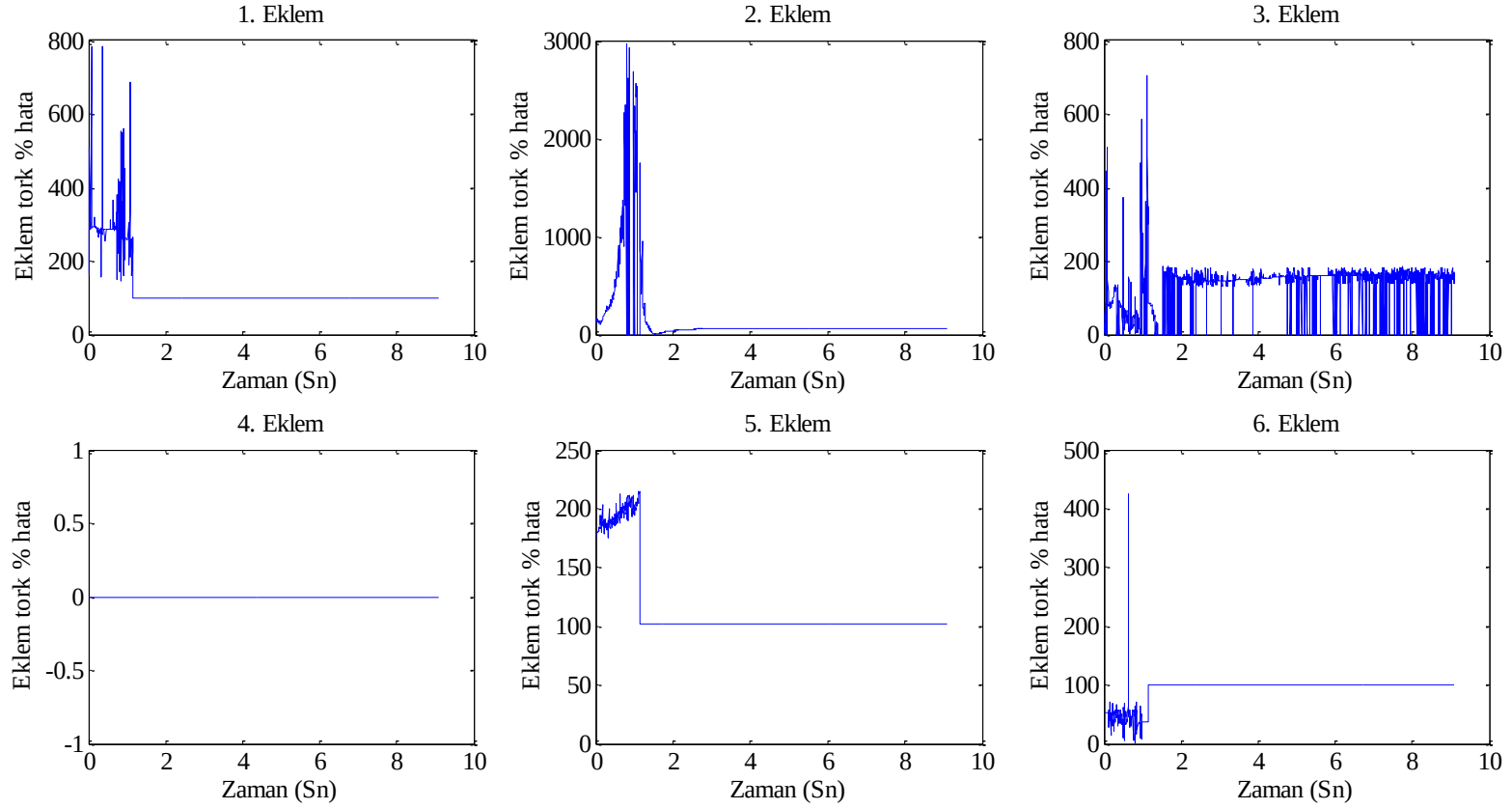
Şekil 2.32 : 3. eklem açısal konum grafiği.



Şekil 2.33 : 3. eklem açısal hız grafiği.

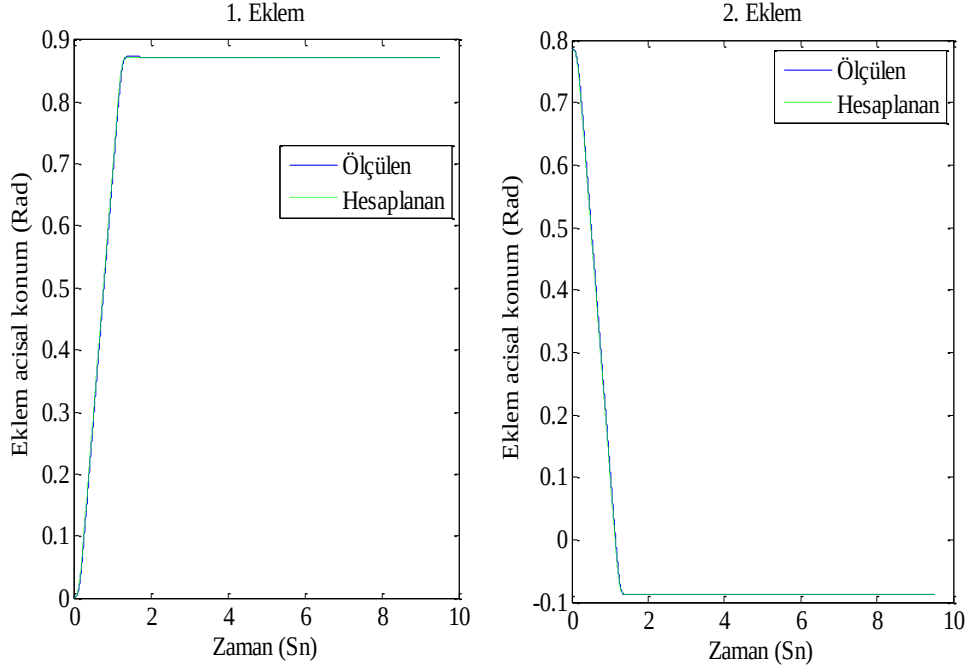


Şekil 2.34 : 3. eklem hareket ederken tüm eklemler için tork grafikleri.

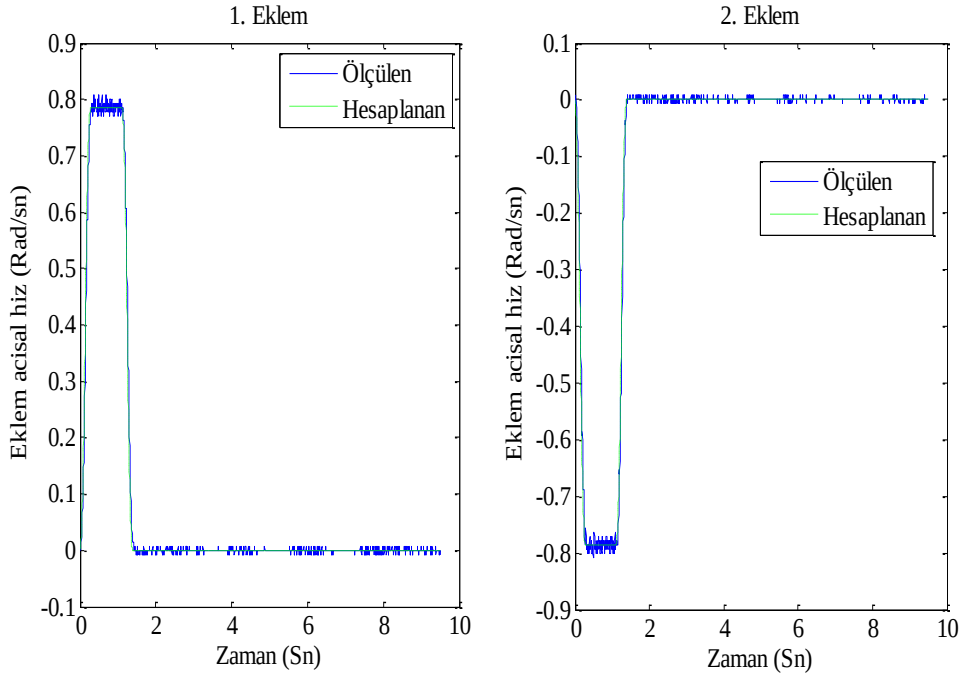


Şekil 2.35 : 3. eklem hareket ederken tüm eklemler için tork % hata grafiği.

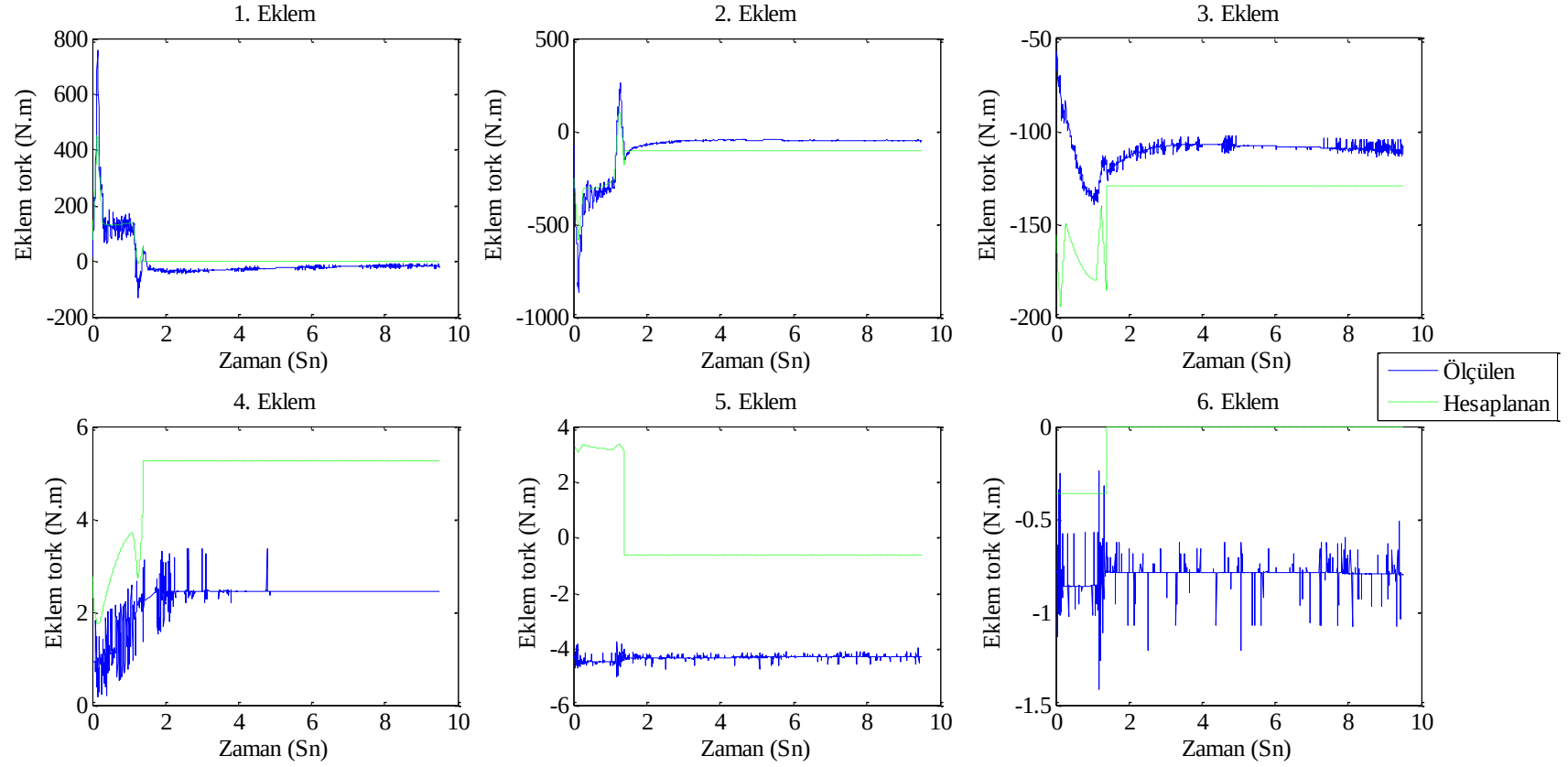
1. ve 2. eklemler eşzamanlı olarak 50° hareket ettirilirse Şekil 2.36'da 1. ve 2. eklemlerin açısal konum grafiği oluşmaktadır. Bunu sırasıyla eklem açısal hızı, eklem tork ve eklem tork % hata grafikleri takip etmektedir.



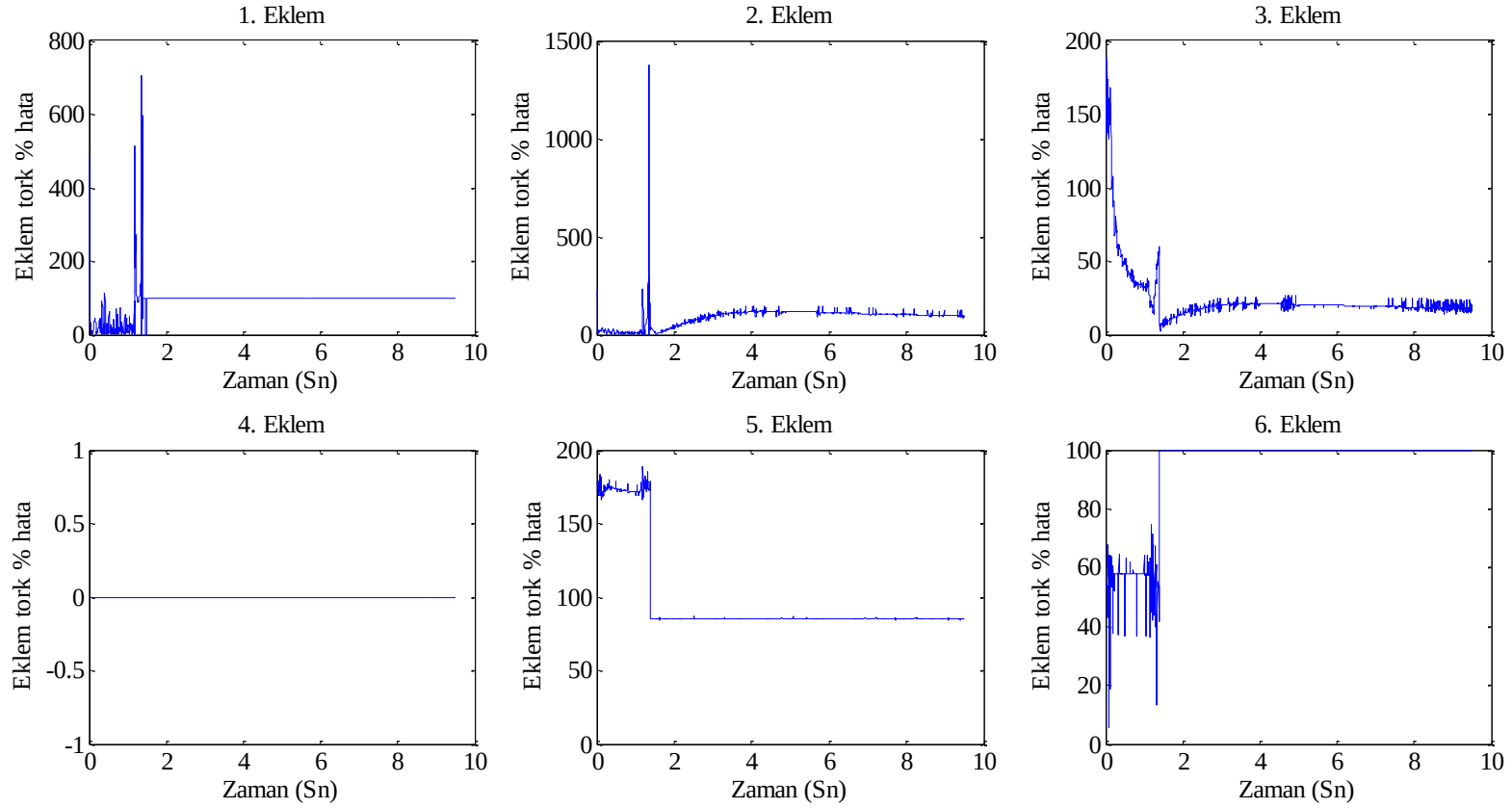
Şekil 2.36 : 1. ve 2. eklemlerin açısal konum grafikleri.



Şekil 2.37 : 1. ve 2. eklemlerin açısal hız grafikleri.

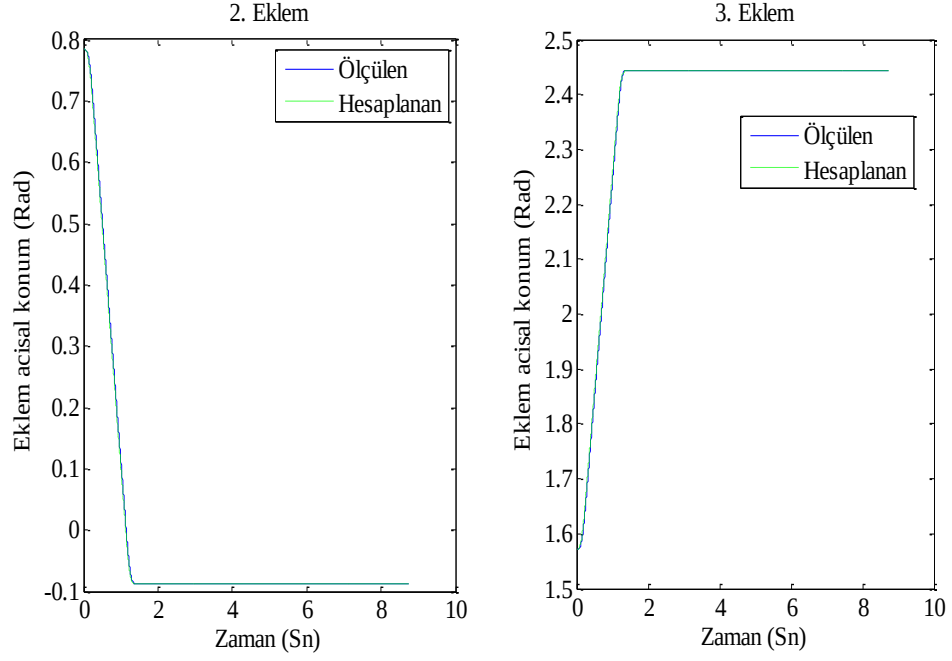


Şekil 2.38 : 1. ve 2. eklemler hareket ederken tüm eklemler için tork grafikleri.

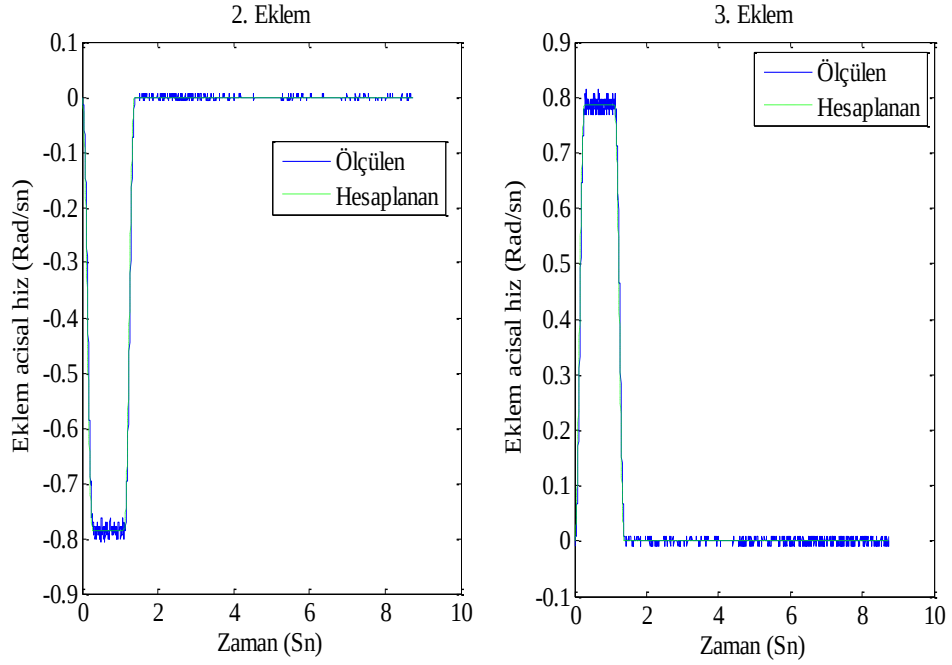


Şekil 2.39 : 1. ve 2. eklemler hareket ederken tüm eklemler için tork % hata grafikleri.

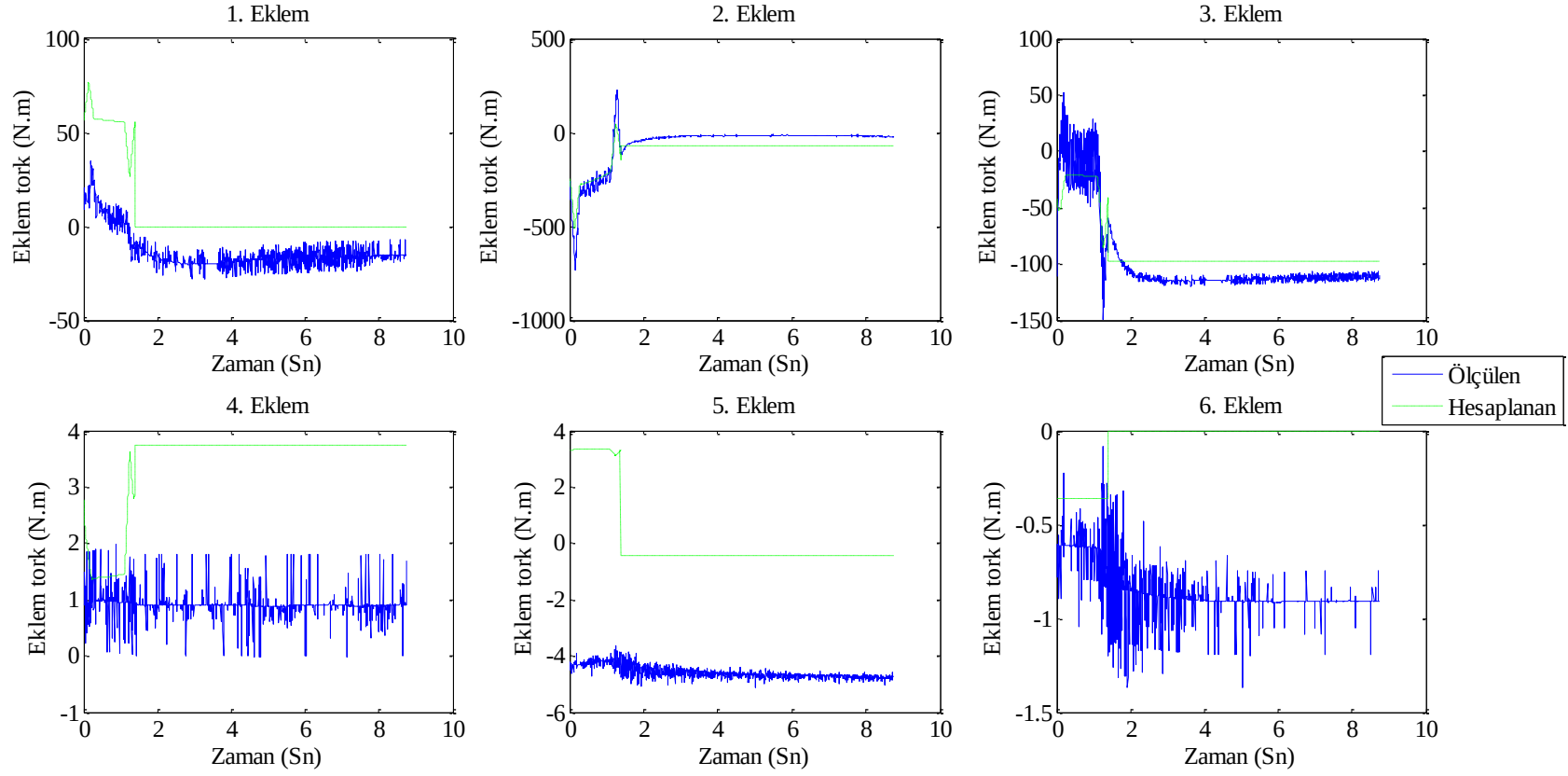
2. ve 3. eklemler eşzamanlı olarak 50° hareket ettirilirse Şekil 2.40'da 2. ve 3. eklemlerin açısal konum grafiği oluşmaktadır. Bunu sırasıyla eklem açısal hızı, eklem tork ve eklem tork % hata grafikleri takip etmektedir.



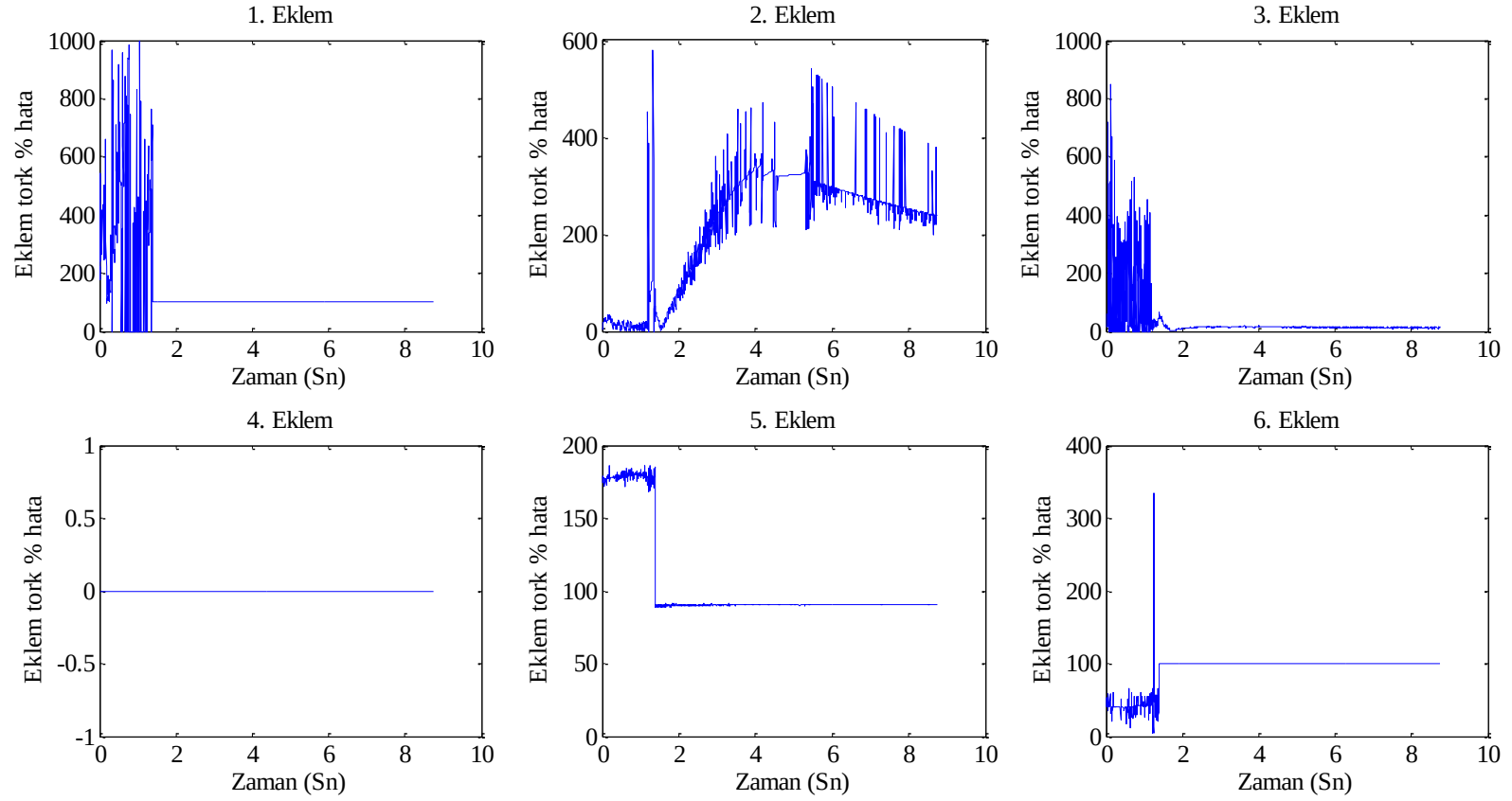
Şekil 2.40 : 2. ve 3. eklemlerin açısal konum grafikleri.



Şekil 2.41 : 2. ve 3. eklemlerin açısal hız grafikleri.

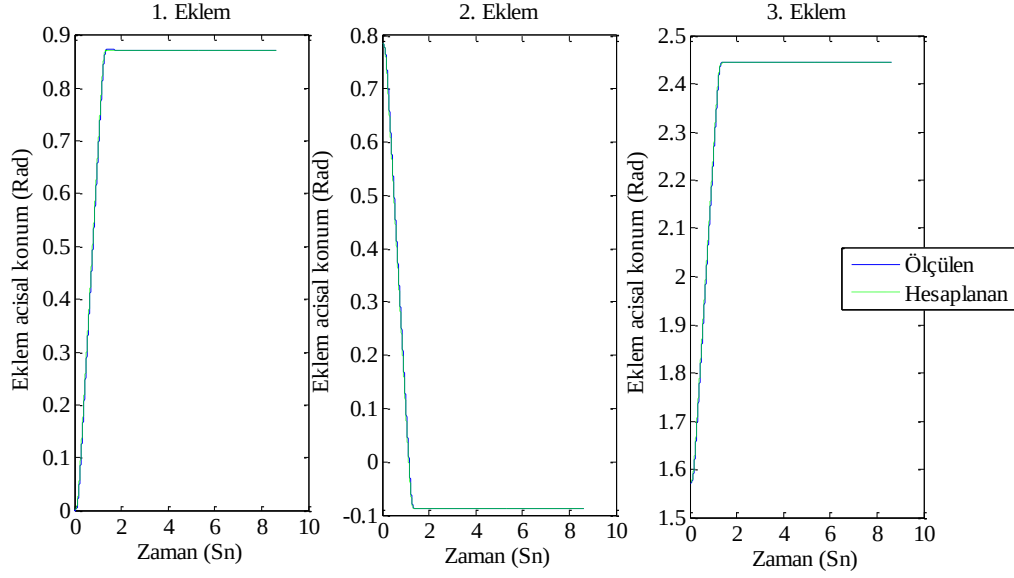


Şekil 2.42 : 2. ve 3. eklemler hareket ederken tüm eklemler için tork grafikleri.

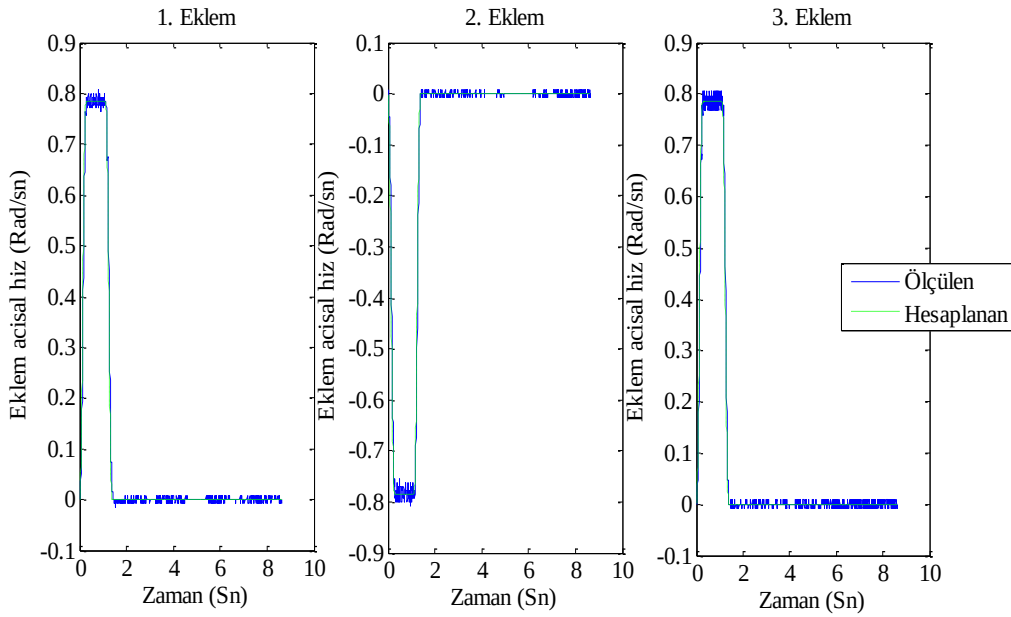


Şekil 2.43 : 2. ve 3. eklemler hareket ederken tüm eklemler için tork % hata grafikleri.

1., 2. ve 3. eklemler eşzamanlı olarak 50° hareket ettirilirse Şekil 2.44'de 1., 2. ve 3. eklemlerin açısal konum grafiği oluşmaktadır. Bunu sırasıyla eklem açısal hızı, eklem tork ve eklem tork % hata grafikleri takip etmektedir.

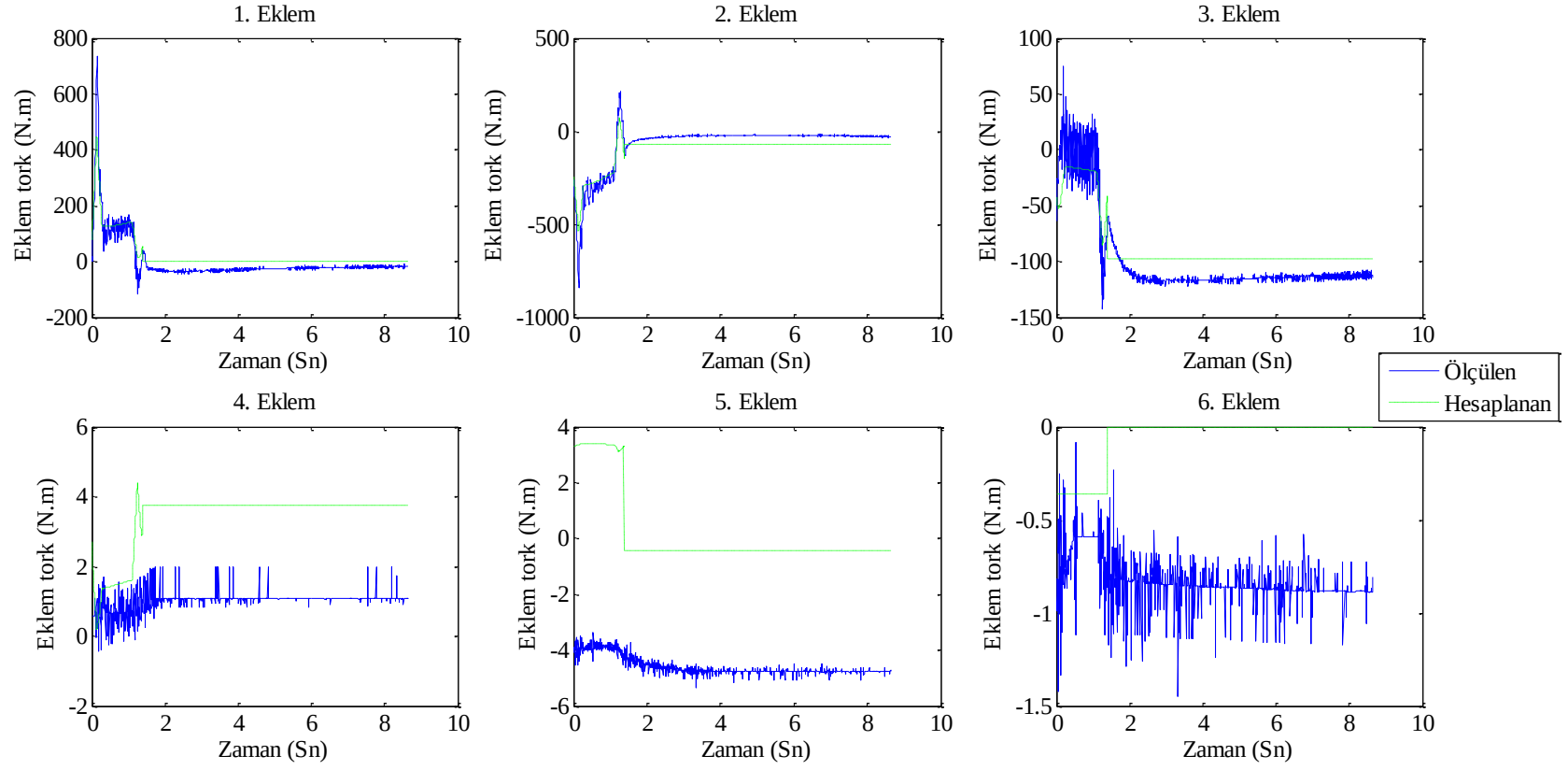


Şekil 2.44 : 1., 2. ve 3. eklemlerin açısal konum grafikleri.

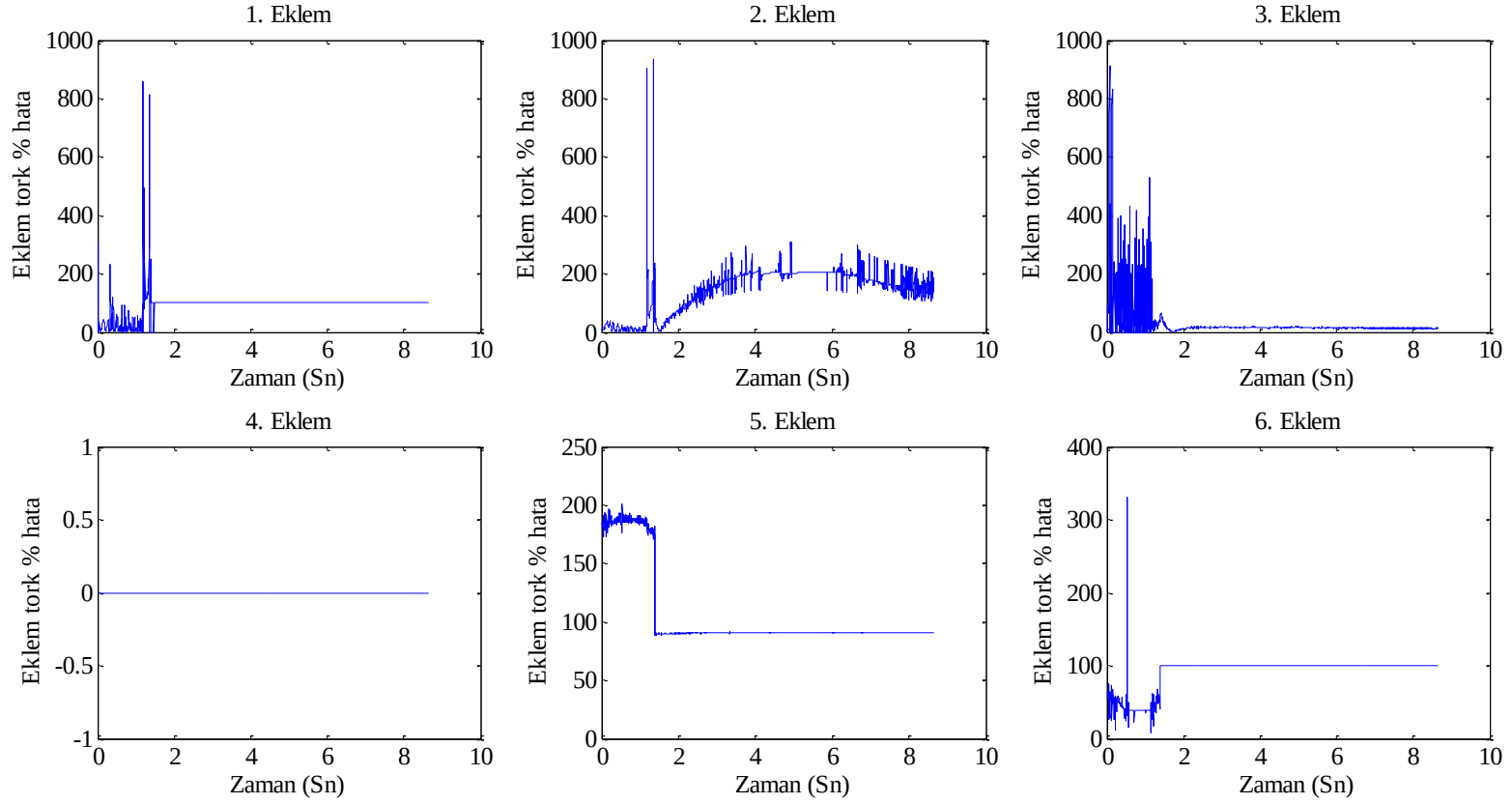


Şekil 2.45 : 1., 2. ve 3. eklemlerin açısal hız grafikleri.

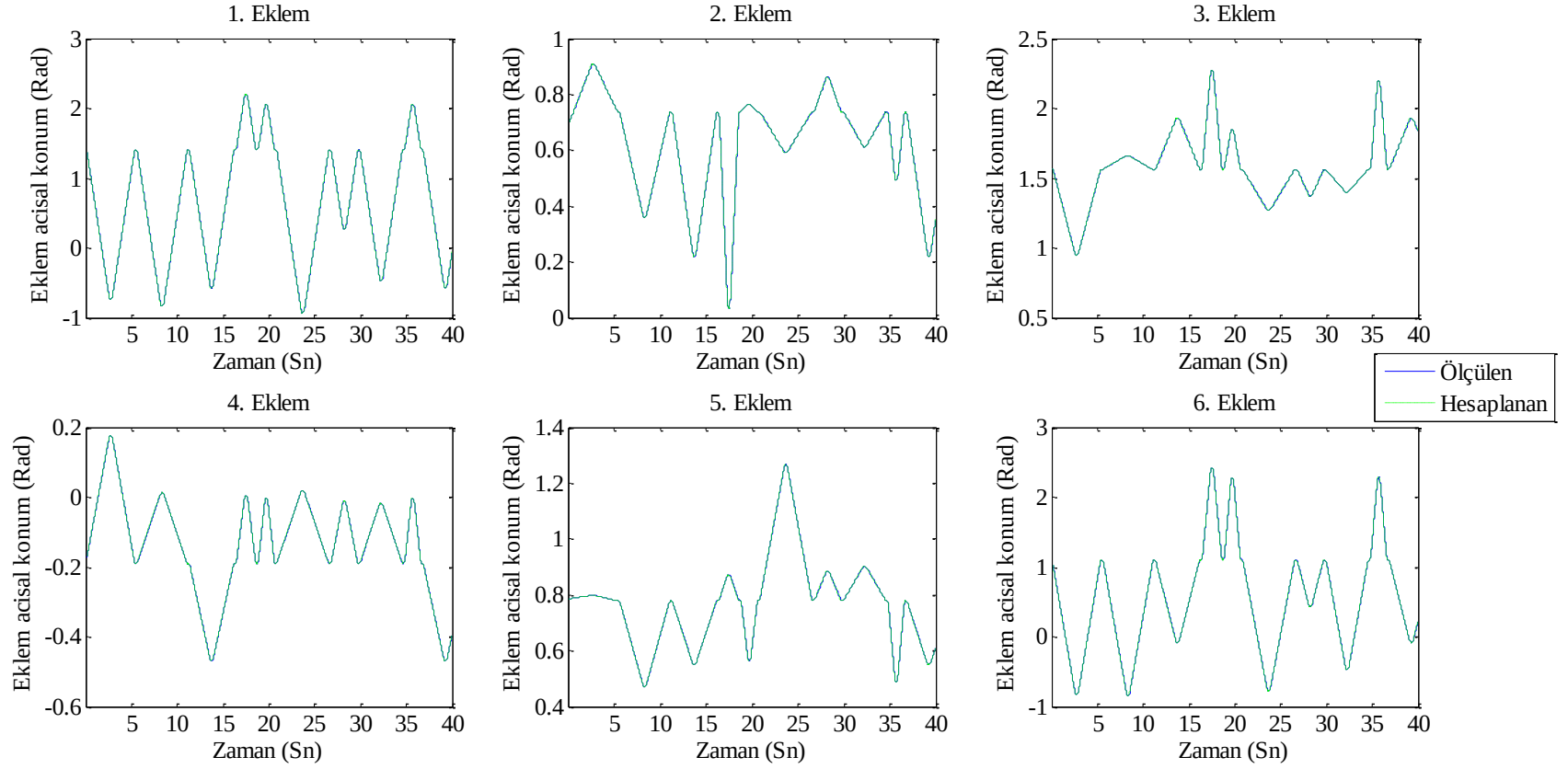
Tüm eklemler eşzamanlı ve rastgele hareket ettirilirse Şekil 2.48'de tüm eklemlerin açısal konum grafiği oluşmaktadır. Bunu sırasıyla eklem açısal hızı, eklem tork ve eklem tork % hata grafikleri takip etmektedir.



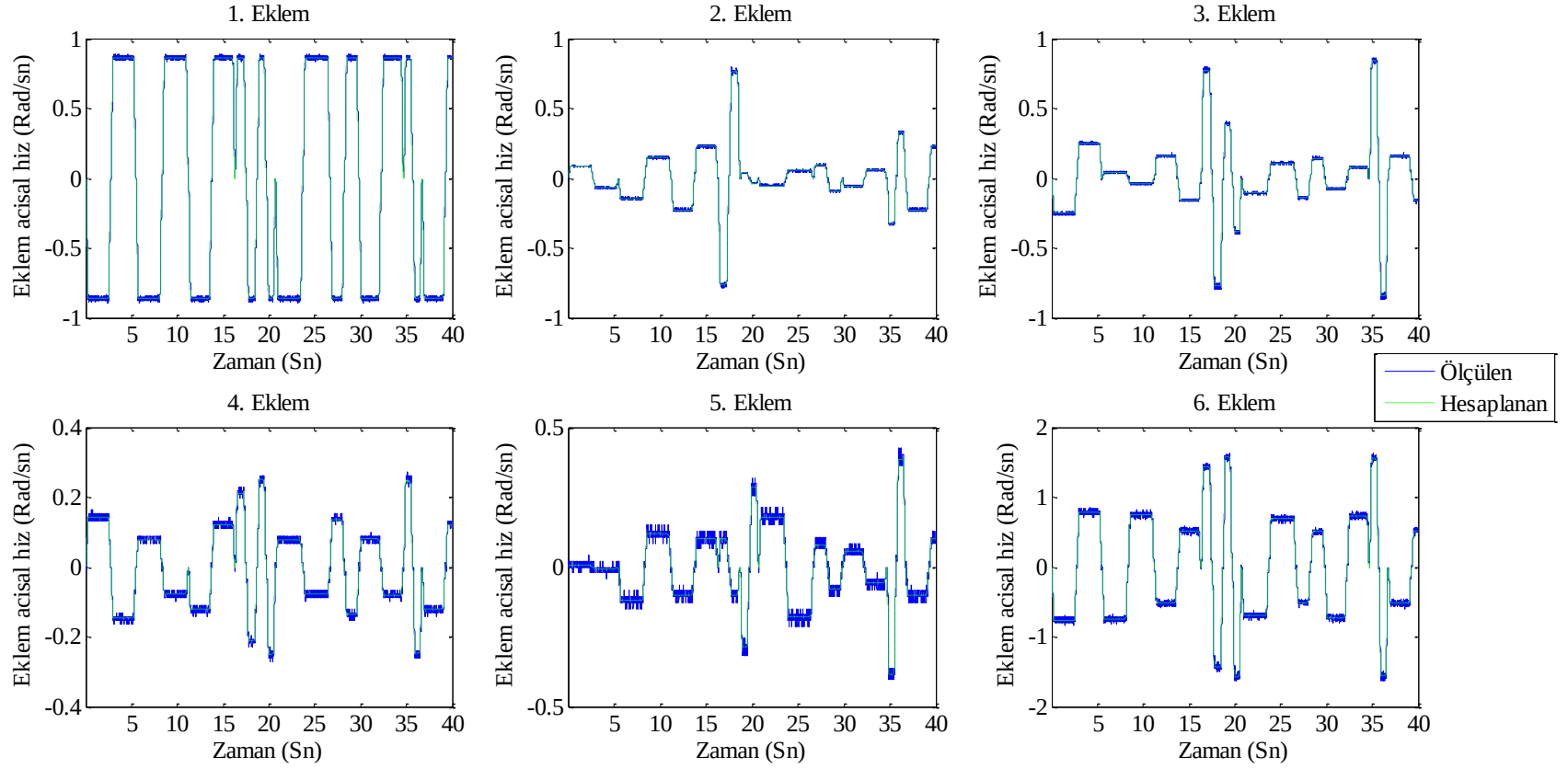
Şekil 2.46 : 1., 2. ve 3. eklemler hareket ederken tüm eklemler için tork grafikleri.



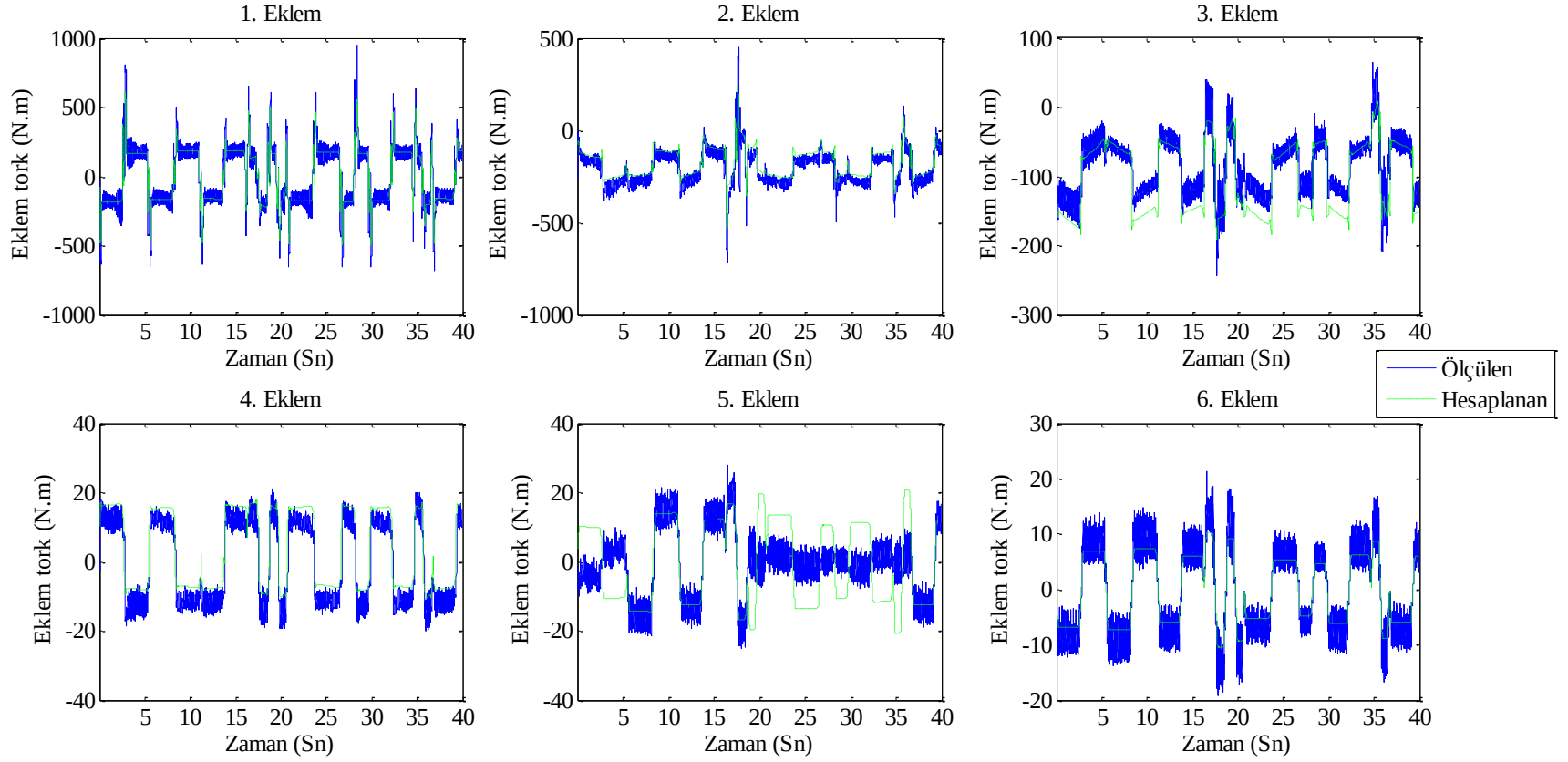
Şekil 2.47 : 1., 2. ve 3. eklemler hareket ederken tüm eklemler için tork % hata grafikleri.



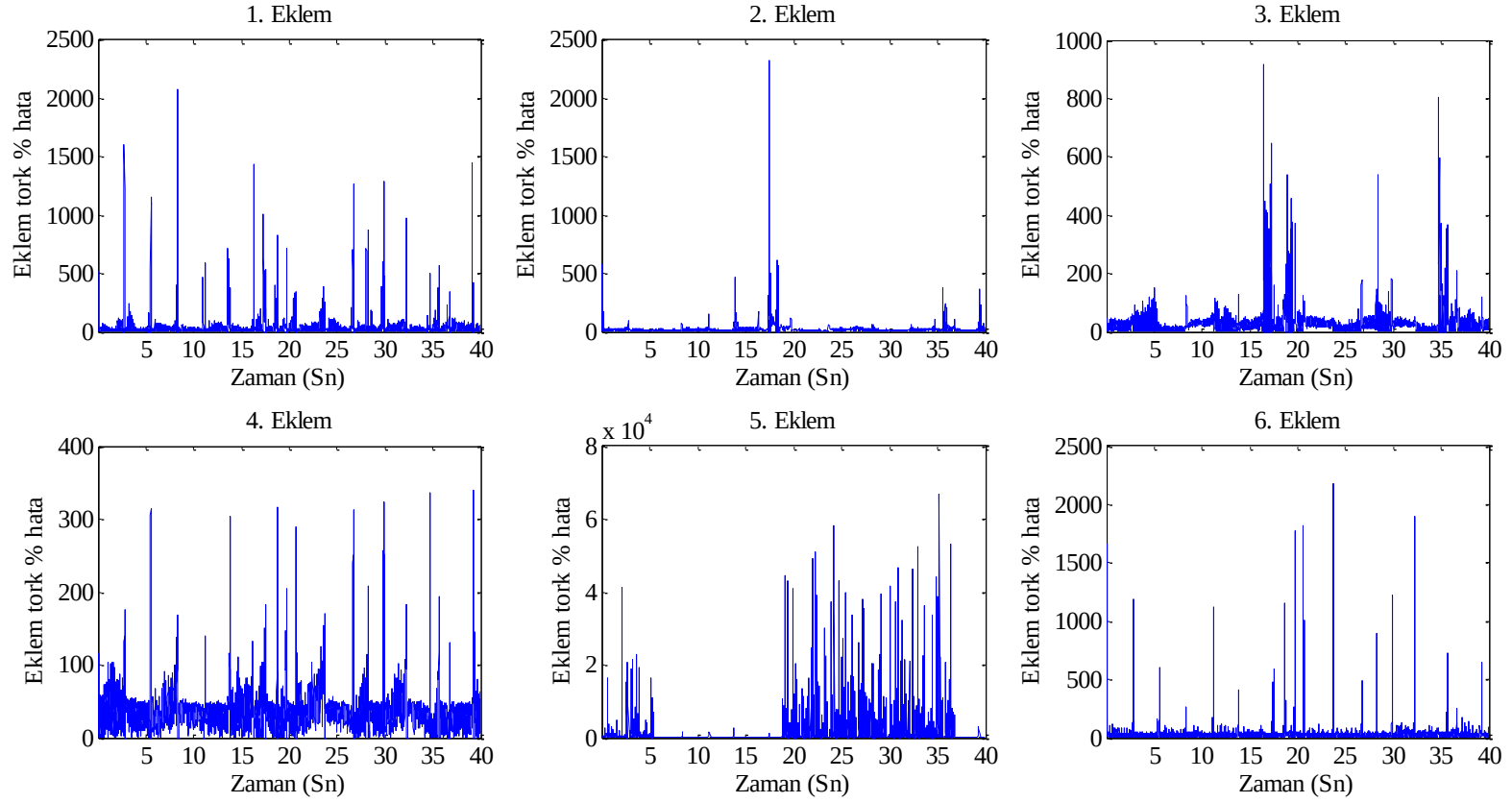
Şekil 2.48 : Tüm eklemlerin açısai konum grafikleri.



Şekil 2.49 : Tüm. eklemelerin açisal hız grafikleri.



Şekil 2.50 : Tüm. eklemler hareket ederken eklem tork grafikleri.



Şekil 2.51 : Tüm eklemler hareket ederken eklem tork % hata grafikleri.

3. YÖRÜNGE PLANLAMA VE KONTROL

3.1 Yörünge Planlama

Manipülatör hareket görevi, manipülatörün hareket etmesi gereken yörünge boyunca tanımlanmasıyla belirlenmektedir. Yol, hem manipülatörün uç noktasının hem eklem açısıl konumun izlemesi gerektiği ardışık noktalar olarak tanımlanmaktadır. Yörünge üretim konusu kontrol sistemi için hesaplanması gereken ve referans eklem açısıl konum veya uç nokta değişkenleri cinsinden zamanın fonksiyonu olarak manipülatörün takip etmesi gereken yolu tanımlamaktadır. Bu yüzden yörünge yolu ve yol boyunca zaman bilgisini işaret etmektedir.

Manipülatör yörüngesi aşağıdaki gibi gruplandırılabilir :

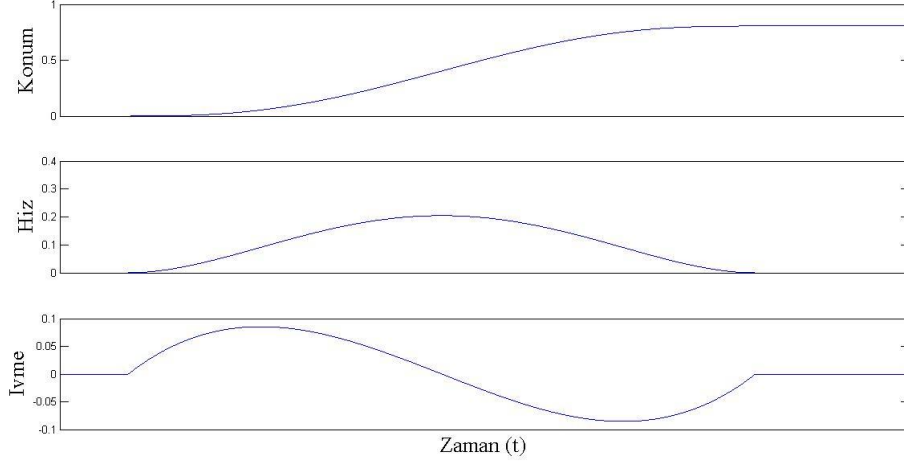
- iki nokta arasındaki serbest bir yolun oluşturan yörünge;
- iki nokta arasında birkaç ara nokta üzerinden geçen serbest yolun oluşturduğu yörünge;
- İki nokta arasında sınırlandırılmış bir yolun oluşturduğu yörünge (örneğin düz bir yol)
- İki nokta arasındaki ve belirlenen belli noktalar üzerinden geçen sınırlandırılmış yolun oluşturduğu yörünge.

İlk iki gruplandırmada, yörünge genellikle eklem uzayında oluşturulmaktadır. Son iki gruplandırmada ise, yörünge manipülatör mutlak uzayında oluşturulmak tercih edilmektedir [7]. Bu tezdeki çalışmada, iki nokta arasında serbest ve sınırlandırılmış bir yolun oluşturduğu yörüngeler oluşturulmaktadır. Devam eden bölümlerde manipülatör yörüngesinin tanımlanmasında en çok kullanılan hız ve ivme profilleri tanımlanmaktadır. Yörünge planlama konusunda verilen tüm denklemler ve bilgiler [7]'den referans alınmaktadır.

3.1.1 Beşinci dereceden konum profili

Manipülatör yüksek hızlarda hareket ettirilmesi gerektiğinde veya ağır bir yük taşınması gerektiğinde mekanizmada meydana gelecek titreşimden kaçınmak için

sürekli ivme profili kullanılması uygun olmaktadır. Beşinci dereceden konum profili bu gereksinimi karşılamaktadır. Şekil 3.1’de konum hız, ivme grafikleri verilmektedir.



Şekil 3.1 : Beşinci dereceden konum profili, hız ve ivme grafiği.

Genel konum denklemi,

$$q(t) = q^i + r(t)(q^f - q^i) \quad (3.1)$$

q^i ilk konumu q^f son konumu ifade etmekte,

$$r(t) = 10\left(\frac{t}{t_f}\right)^3 - 15\left(\frac{t}{t_f}\right)^4 + 6\left(\frac{t}{t_f}\right)^5 \quad (3.2)$$

t_f toplam hareket zamanını vermektedir. Bu durumda maksimum hız ve ivme denklem (3.3) ile verilmektedir.

$$|\dot{q}_{j\max}| = \frac{15|D_j|}{8t_f} \quad (3.3)$$

$$|\ddot{q}_{j\max}| = \frac{10|D_j|}{\sqrt{3}t_f^2}$$

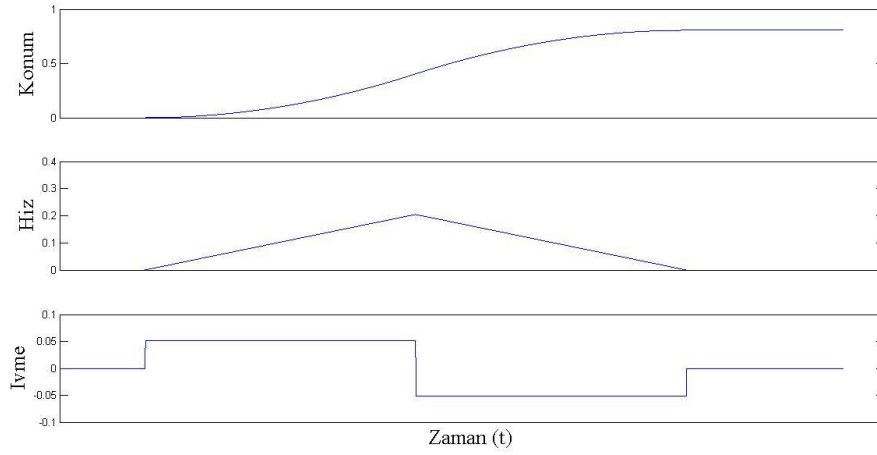
$$D_j = q_j^f - q_j^i \quad (3.4)$$

En düşük hareket süresi denklem (3.5)’deki ifadeyle hesaplanmaktadır. k_{v_j} , k_{a_j} sırasıyla manipülatördeki her bir eklemin çıkabileceği maksimum hız ve ivmedir.

$$t_{f_j} = \max \left[\frac{15|D_j|}{8k_{v_j}}, \sqrt{\frac{10|D_j|}{\sqrt{3}k_{a_j}}} \right] \quad (3.5)$$

3.1.2 Bang-bang ivme profili

Bang-bang ivme profili, hareket süresinin yarısında sabit ivmelenme diğer yarısında ise sabit yavaşlama ivmesinden meydana gelmektedir. İlk ve son hız sıfır değerindedir. Bu yörünge planı konum ve hız için sürekli fakat ivme için süreksizdir. Bu nedenle düşük hızlarda ve hafif yüklerde kullanabilecek profildir.



Şekil 3.2 : Bang-bang ivme profili.

$$\begin{cases} q(t) = q^i + 2\left(\frac{t}{t_f}\right)^2 D & 0 \leq t \leq \frac{t_f}{2} \text{ için} \\ q(t) = q^i + [-1 + 4\left(\frac{t}{t_f}\right) - 2\left(\frac{t}{t_f}\right)^2] D & \frac{t_f}{2} \leq t \leq t_f \text{ için} \end{cases} \quad (3.6)$$

$$D = q^f - q^i \quad (3.7)$$

her bir eklem için ulaşılabilecek maksimum hız ve ivme,

$$\begin{aligned} |\dot{q}_{j\max}| &= \frac{2|D_j|}{t_f} \\ |\ddot{q}_{j\max}| &= \frac{4|D_j|}{t_f^2} \end{aligned} \quad (3.8)$$

En düşük hareket süresi denklem (3.9)'deki ifadeyle hesaplanmaktadır.

$$t_{f_j} = \max \left[\frac{2|D_j|}{k_{v_j}}, 2\sqrt{\frac{|D_j|}{k_{a_j}}} \right] \quad (3.9)$$

3.1.3 Sabit hız bölgesi süreksiz ivme profili

Bang-bang ivme profilinin maksimum hıza ulaştığı noktada sabit hızlı bölgenin hız profiline dahil edilmesi ivmenin de maksimuma çıkması mümkün olabilmektedir. Bu da hareket süresinin kısılmasına olanak tanımaktadır. Oluşan bu ivme profiline sabit hız bölgesi süreksiz ivme profili olarak adlandırılmaktadır. 'de konum,hız ve ivme profili verilmektedir.



Şekil 3.3 : Sabit hız bölgesi süreksiz ivme profili.

Bu ivme profilinin ifadesi denklem (3.10)'de verilmektedir.

$$\begin{cases} q_j(t) = q_j^i + \frac{1}{2}t^2 k_{a_j} \text{sign}(D_j) & 0 \leq t \leq \tau_j \quad \text{icin} \\ q_j(t) = q_j^i + (t - \frac{\tau_j}{2})k_{v_j} \text{sign}(D_j) & \tau_j \leq t \leq t_{f_j} - \tau_j \quad \text{icin} \\ q_j(t) = q_j^f + \frac{1}{2}(t_{f_j} - t)^2 k_{a_j} \text{sign}(D_j) & t_{f_j} - \tau_j \leq t \leq t_{f_j} \quad \text{icin} \end{cases} \quad (3.10)$$

$$\tau_j = \frac{k_{v_j}}{k_{a_j}} \quad (3.11)$$

En kısa hareket zamanı,

$$t_{f_j} = \frac{k_{v_j}}{k_{a_j}} + \frac{|D_j|}{k_{v_j}} = \tau_j + \frac{|D_j|}{k_{v_j}} \quad (3.12)$$

ile verilmektedir. Tüm eklem hareketlerini senkronize edebilmek için tüm eklemlerin ivmelenmesi ve hızlanması aynı sürede gerçekleşecek homojen yörüngeler tanımlanmaktadır. Endüstriyel manipülatörlerde bu yöntem çok sık kullanılmaktadır. j . eklem ile keyfi seçilmiş k ekleminin hızları arasındaki oran α_j olarak kabul edilmektedir. Buna göre,

$$\dot{q}_j(t) = \alpha_j \dot{q}_k(t) \quad j=1,...,n \text{ için} \quad (3.13)$$

olmaktadır. Böylece denklem (3.11)'deki ifade yeniden hesaplanmaktadır.

Varsayalım $\lambda_j k_{v_j}$ senkronize edilmiş j . eklem için maksimum hız, $v_j k_{a_j}$ ise maksimum ivme olsun. En düşük hareket zamanı t_f için optimum τ 'nın iki eklem arasında problemin çözülmesiyle hesaplanmaktadır.

$$\begin{cases} t_{f_1} = \tau_1 + \frac{|D_1|}{k_{v_1}} \\ t_{f_2} = \tau_2 + \frac{|D_2|}{k_{v_2}} \end{cases} \quad (3.14)$$

Eklemlerin senkronize olması için,

$$t_f = \frac{\lambda_1 k_{v_1}}{v_1 k_{a_1}} + \frac{|D_1|}{\lambda_1 k_{v_1}} = \frac{\lambda_2 k_{v_2}}{v_2 k_{a_2}} + \frac{|D_2|}{\lambda_2 k_{v_2}} \quad (3.15)$$

gerekmektedir. Denklem (3.15)'e göre $t_f \geq \max(t_{f_1}, t_{f_2})$ olmaktadır.

$$\tau = \frac{\lambda_1 k_{v_1}}{v_1 k_{a_1}} = \frac{\lambda_2 k_{v_2}}{v_2 k_{a_2}} \quad (3.16)$$

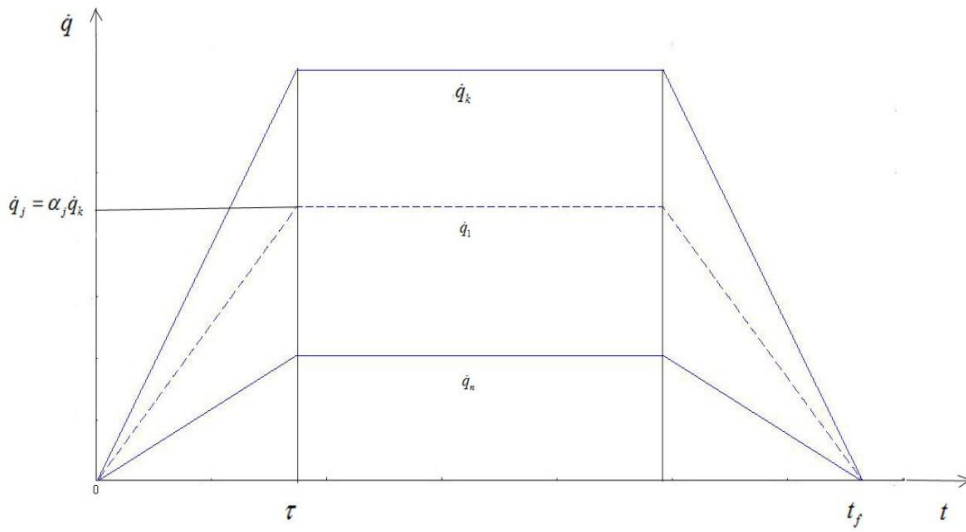
$$\lambda_2 = \lambda_1 \frac{k_{v_1} |D_2|}{k_{v_2} |D_1|} \quad (3.17)$$

$$\nu_2 = \nu_1 \frac{k_{a1}|D_2|}{k_{a2}|D_1|} \quad (3.18)$$

$$\begin{cases} \lambda_1 = \min \left[1, \frac{k_{v2}|D_1|}{k_{v1}|D_2|} \right] \\ \nu_1 = \min \left[1, \frac{k_{a2}|D_1|}{k_{a1}|D_2|} \right] \end{cases} \quad (3.19)$$

Denklem (3.19)'a göre tüm eklemler için ifade genişletilirse,

$$\begin{cases} \lambda_1 = \min \left[1, \frac{k_{vj}|D_1|}{k_{v1}|D_j|} \right] \\ \nu_1 = \min \left[1, \frac{k_{aj}|D_1|}{k_{a1}|D_j|} \right] \end{cases} \quad j = 2, \dots, n \quad \text{için} \quad (3.20)$$

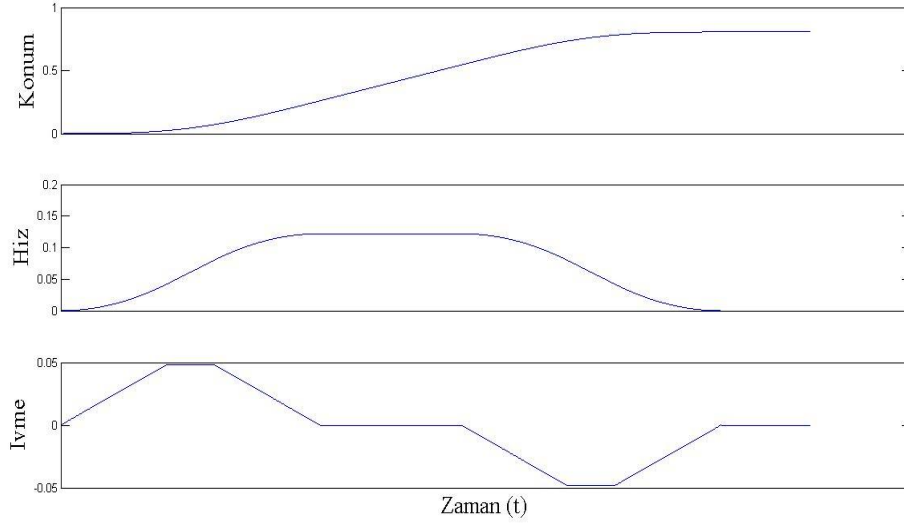


Şekil 3.4 : Senkron hız profilleri.

3.1.4 Sabit hız bölgesi sürekli ivme profili

Bir önceki bölümdeki yöntemi sürekli ivme profilini elde etmek için ivmelenme ve yavaşlama fazlarında trapez ivme profili uygulanmaktadır. Manipülör ile yapılan çalışmalarda yüksek hızlara çıkılması ve ağır yüklerin taşınması amaçlandığından ivmenin sürekli olduğu yörünge planlaması yapılmaktadır. Tüm deney sonuçları üretilen bu ivme profili ile alınmaktadır. Şekil 3.5 bu profili göstermektedir.

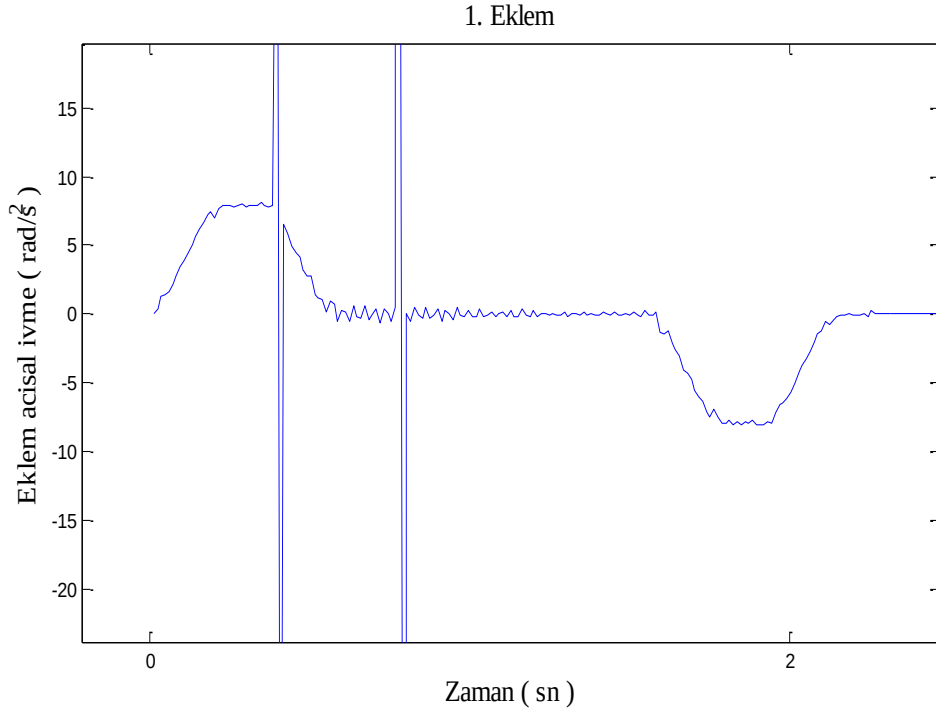
Hız ve ivme profilin oluşmasında olası dört durum vardır. Bunlar her ikisinin sabit olması, yalnızca hızın sabit olması, yalnızca ivmenin sabit olması ve her ikisinin de sabit olmaması durumudur. En genel durum olan her ikisinin de sabit olması sonucu oluşan hız ve ivme profillerinin denklemleri Ek C1’de verilmektedir.



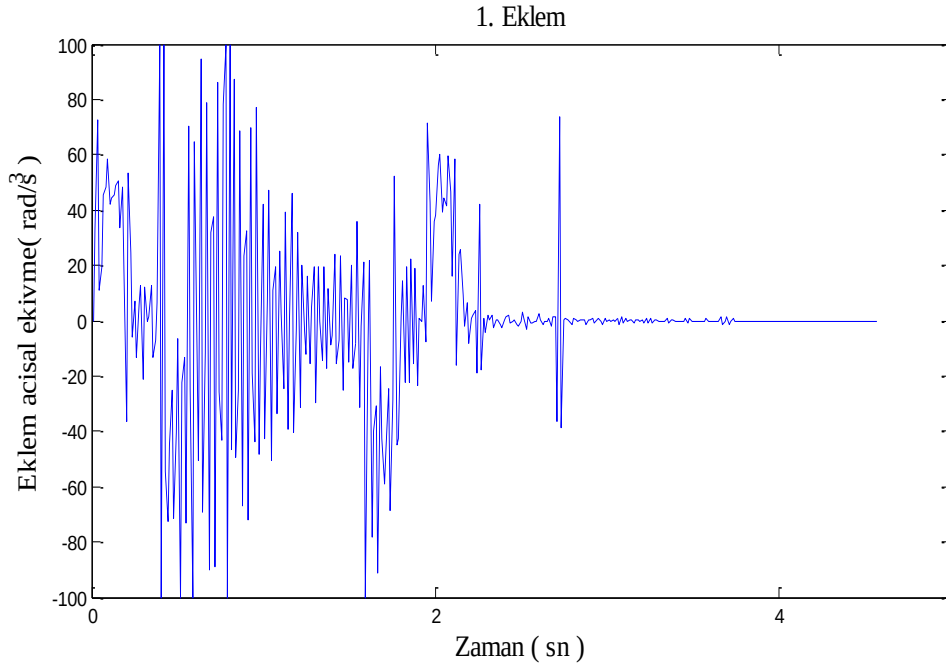
Şekil 3.5 : Sabit hız bölgesi sürekli ivme profili.

3.1.5 Manipülâtör maksimum ivme ve ekivme(jerk)

Önceki bölümde verilen sabit hız bölgesi sürekli ivme profiliyle planlanan yörüngenin tüm eklemlerin senkronize çalışması için maksimum hızın yanı sıra maksimum ivme ve ekivme sabitlerinin de bilinmesi gerekmektedir. Bu sabitler manipülâtör üreticisi tarafından verilmemektedir. Bu sabitler manipülâtörün farklı yörüngelerde hareket ettirilerek izin verilen maksimum değerlerinin tanınması mümkündür. Bu çalışmada manipülâtör üreticisinin Val3 programlama arayüzünde belirlemiş olduğu maksimum ivme ve ekivme değerleri manipülâtör üzerinden elde edilmiştir. Manipülâtör maksimum ivme ile rastgele iki nokta arasında hareket ettirilerek, manipülâtör eklemlerinin açısal hızlarının türevi alınarak yaklaşık maksimum ivme değerleri tespit edilmektedir. her bir eklem için maksimum ekivme değerleri de ivmenin türevi alınarak bulunmaktadır. Yapılan çalışma neticesinde her bir eklem için maksimum ivme ve ekivme grafikleri oluşturulmakta, ivme ve ekivmenin sabit olduğu değerler maksimum değerler olarak kabul edilmektedir. 1. eklem için oluşturulan grafikler Şekil 3.6’de görünmektedir. Diğer eklemler için elde edilen grafikler Ek C2’de bulunmaktadır. Çizelge 3.1’de Val3 arayüzü kullanılarak çıkartılan maksimum ivme ve ekivme değerleri bulunmaktadır.



Şekil 3.6 : Staubli RX160 manipulatörün 1. eklem maksimum ivme grafiği.



Şekil 3.7 : Staubli RX160 manipulatörün 1. eklem maksimum ekivme grafiği.

Çizelge 3.1 : Val3 programlama arayüzü üzerinden yaklaşık tespit edilen maksimum ivme ve ekivme değerleri.

Eklem	1	2	3	4	5	6
İvme(rad / s^2)	7,9	6,5	10,5	25,2	19,6	41,7
Ekivme(rad / s^3)	50	40	60	150	120	250

3.2 Manipülatör Konum Kontrolü

Endüstriyel manipülatörler doğrusal olmayan dinamik sistemlerdir. Endüstriyel görevlerde bu sistemlerden işi gerçekleştirecek dinamik performans beklenirken modellenmeyen dinamik ve bozucu girdiler buna engel olmaktadır. Başta sistemin doğrusal olmaması ve eklemlerin birbirini etkilemesi nedeniyle kontrol mühendisleri tarafından bunlar için ideal kontrolcü tasarlanması gerekmektedir [17]. Bu problemin çözülmesi için günümüze kadar birçok kontrol yöntemi geliştirilmiştir. Mevcut endüstriyel manipülatörlerde sıkça kullanılan yöntem PID (oransal, entegral ve türevsel) kontrol yöntemidir. Bu kontrolcü kullanılarak birçok doğrusal olmayan kontrol şeması (scheme) oluşturulmuştur. Bunlardan biri, bağımsız eklem kontrolü adı verilen yöntemdir. Bu yöntemin uygulanması kolay ve düşük maliyetli olsa da yüksek hızlara çıkıldığında ve manipülatördeki uzuvların düzenlenmesine göre düşük dinamik hassasiyete sahiptirler. Bir diğer yöntem ise karmaşık kontrol şeması olan 'ters dinamik kontrol' veya 'hesaplanmış tork kontrol' olarak adlandırılmaktadır. Bu yöntem hareket denklemlerini doğrusallaştırmakta ve eklemlerin ilişkilerini birbirinden bağımsız duruma getirmektedir. Bu nedenle manipülatörün yörünge takip performansı artmaktadır. Aynı zamanda kontrolcü tasarımı daha basite indirgenmektedir [7].

Bu çalışmada PID kontrolcünden entegral etki çıkarılmış PD kontrol ve ters dinamik kontrol şeması uygulanmaktadır. PD kontrol uygulanmasının nedeni yörünge ve hareket sürelerinin sınırlı olması nedeniyle entegral etkinin kontrolcü performansında etkisiz olmasıdır. Bu bölümde ters dinamik kontrolünün teorisi verilecek ve oransal-türevsel kontrol katsayılarının deneye dayalı değerlerinin nasıl bulunduğu verilmektedir.

Daha öncesinde dinamik modelin kapalı formu denklem (2.37) verilmişti. Bu denklemi daha kompakt olarak ifade etmek istenirse

$$\Gamma = A(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q}) \quad (3.21)$$

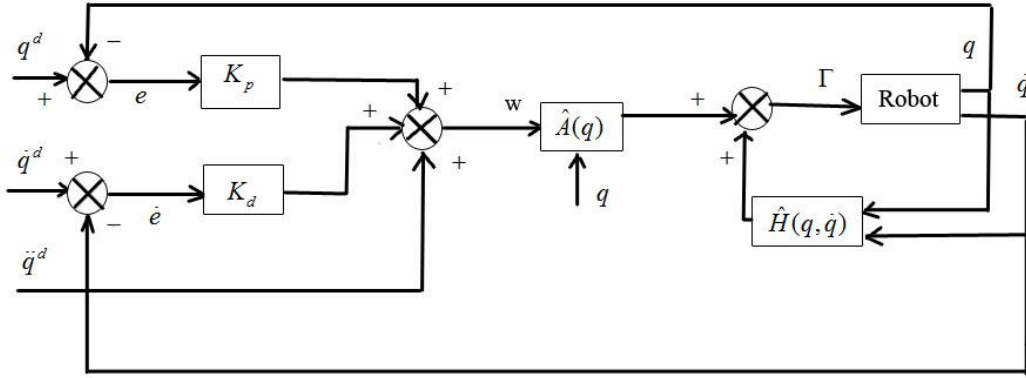
Eklemlerin konumlarının ve hızlarının ölçülebildiği ve bu ölçümlerinin gürültüsüz olduğunu varsayalım ve A ve H matrislerinin tahmin edilmiş matrislerini $\hat{A}$ ve $\hat{H}$ olarak kabul edelim.

$$\Gamma = \hat{A}(q)w(t) + \hat{H}(q, \dot{q}) \quad (3.22)$$

Gürültünün olmadığı ve modellemenin hatasız olduğunu varsayarsak. Denklem (3.22)'den denklem (3.21) çıkarıldığında problem n adet birbirinden bağımsız çift entegratörün doğrusal kontrolüne indirgenmektedir.

$$\ddot{q} = w(t) \quad (3.23)$$

$w(t)$ referans kontrol vektörüdür ve ivme, hız, konum ile tanımlanmış yörünge tarafından oluşturulmaktadır. Ters dinamik kontrol şeması Şekil 3.8'de gösterilmektedir.



Şekil 3.8 : Ters dinamik kontrol şeması

$\ddot{q}^d(t)$, $\dot{q}^d(t)$ ve $q^d(t)$ sırasıyla eklem uzayında tanımlı referans ivme, hız ve konum olsun. Eğer $w(t)$ 'yi tanımlarsak

$$w(t) = \ddot{q}^d + K_d(\dot{q}^d - \dot{q}) + K_p(q^d - q) \quad (3.24)$$

K_p ve K_d (nxn) pozitif tanımlı diyagonal matristir. Denklem (3.24), denklem (3.23) 'e göre düzenlenirse,

$$\ddot{e} + K_d\dot{e} + K_p e = 0 \quad (3.25)$$

$e = q^d - q$ olmaktadır.

Hata fonksiyonu $e(t)$ herkesçe bilindiği gibi eksponansiyel kararlıdır. Katsayı K_{pj} ve K_{dj} 'nin manüel ayarlanmaktadır.

Model hatalarına göre kapalı çevrim denklemi, denklem (3.22) ve (3.21)'nin düzenlenmesiyle,

$$\hat{A}(\ddot{q}^d + K_d \dot{e} + K_p e) + \hat{H} = A\ddot{q} + H \quad (3.26)$$

$$\ddot{e} + K_d \dot{e} + K_p e = \hat{A}^{-1} \left[(A - \hat{A})\ddot{q} + H - \hat{H} \right] \quad (3.27)$$

olmaktadır.

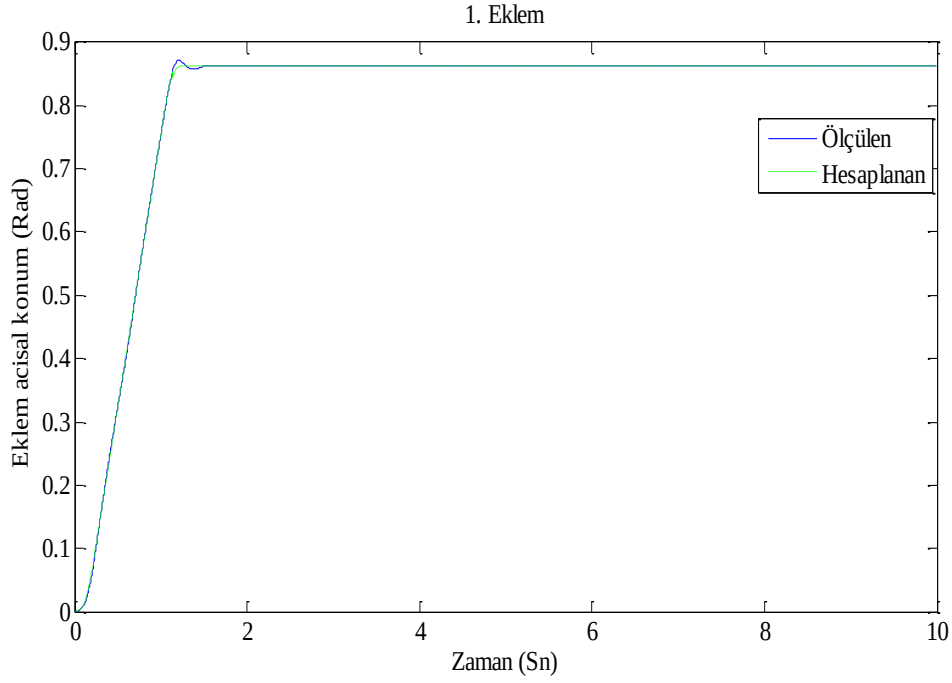
3.2.1 PD katsayıların manuel ayarlanması

İlk olarak manipülatördeki eklem konumları sıfır durumdayken katsayıların ayarlanması her bir eklem için tek tek gerçekleştirilmektedir.

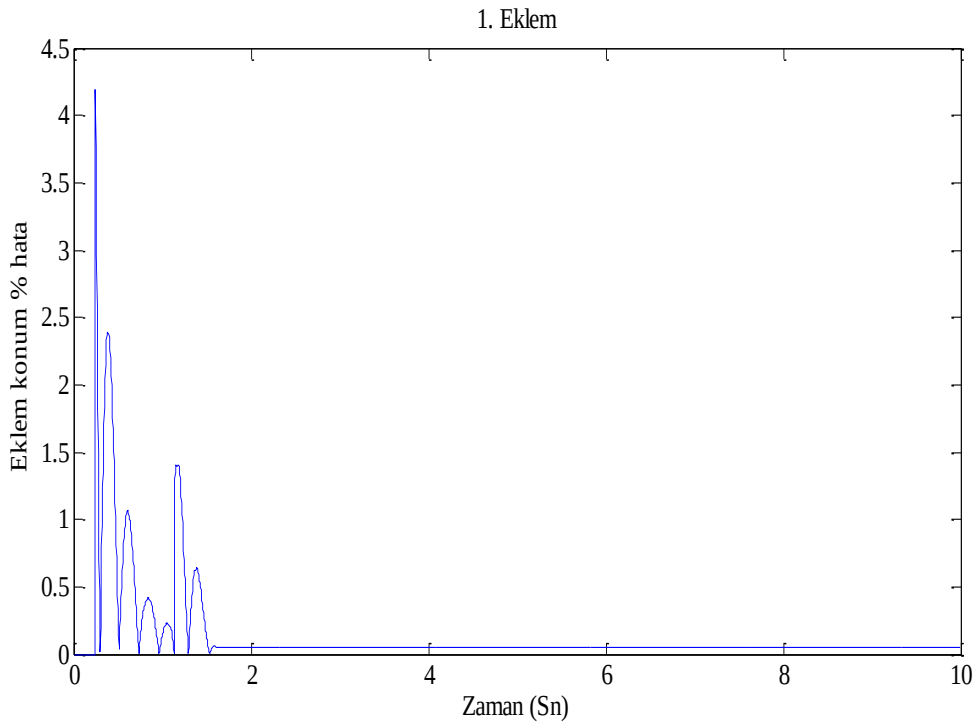
Katsayıların bulunması için 1. eklemden başlanarak 6. ekleme kadar tek tek; 1. ve 2. eklemler, 2. ve 3. eklemler birlikte; 1. , 2. ve 3. eklemler birlikte ve son olarak tüm eklemler birlikte ele alınmaktadır. Her bir eklem 50 derece ve üç farklı hızda (nominal hızının %30 , % 60 ve % 100) ve maksimum ivmede hareket ettirmektedir. Eklemin konum ve hız grafikleri kontrol edilerek ilk tahminler artırılmakta veya azaltılmaktadır. Manipülatörün düzenlemesine bağlı olarak dinamiğinde oluşacak hatalar farklılık göstermektedir. Bu nedenle iki manipülatör konfigürasyonuna göre katsayılar belirlenmektedir.

Katsayılarının belirlenmesinde manipülatörün iki farklı düzenlemesi dikkate alınmaktadır. Bu sayede K_p ve K_d katsayılarının yükselme, yerleşme zamanı ve aşım genlikleri kontrol edilerek katsayının değişim yönü tespit edilmektedir. Artan oransal katsayının yükselme zamanını azaltması, aşım genliğini artırması; artan türevsel katsayının yerleşme zamanı ve aşım genliklerini azaltması fakat sistemi kararsızlığa götürmesi gibi durumları dikkate alınmaktadır. Yapılan deneysel çalışmada eklemlerin bir hız seti için grafikleri bu bölümde verilmekte olup diğer grafikler ise Ek C3'de yer almaktadır.

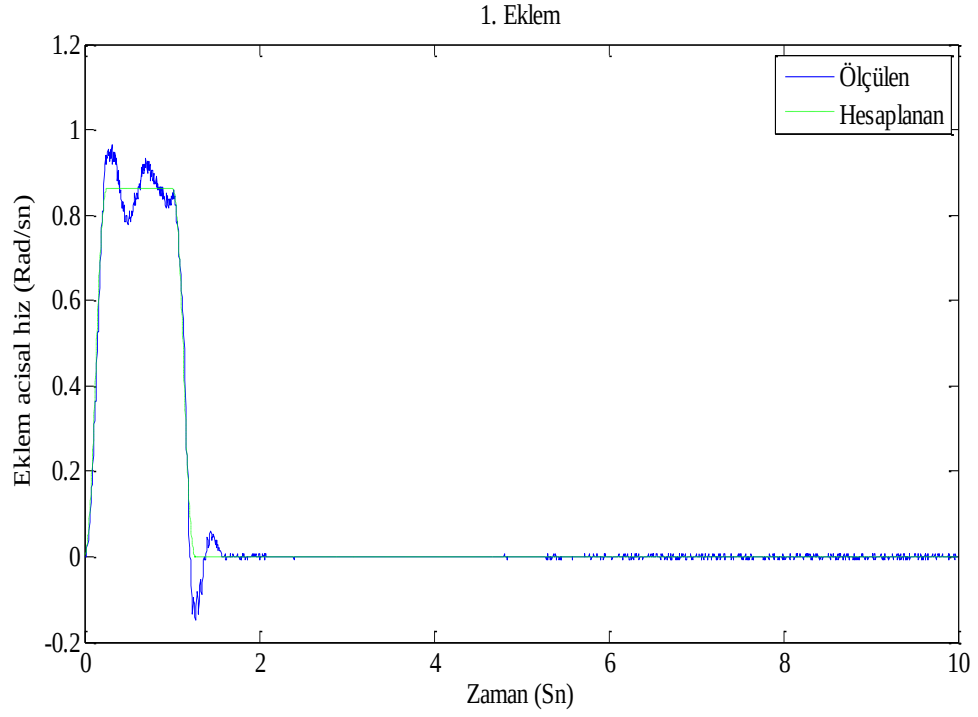
Yalnızca 1. eklem 50 derece ve nominal hızının %30 ile hareket etmesiyle eklem açısıl konum grafiği Şekil 3.9'de gösterilmektedir. Bunu sırasıyla eklem konum % hata, eklem açısıl hızı, eklem tork grafikleri takip etmektedir.



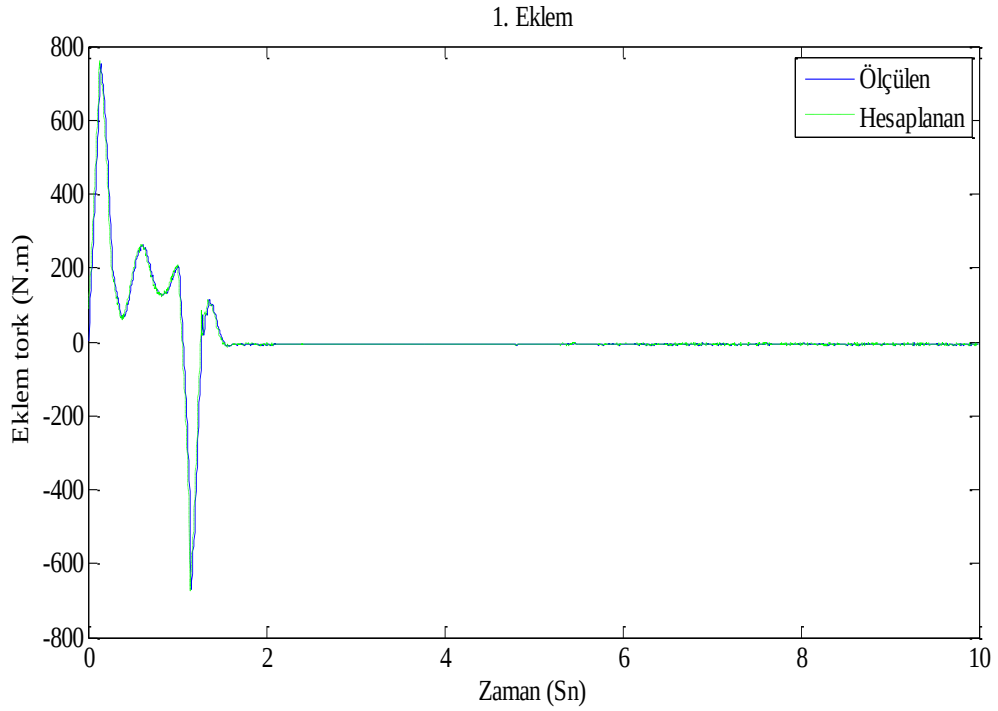
Şekil 3.9 : 1. eklem açısıl konum grafiği.



Şekil 3.10 : 1. eklem açısıl konum % hata grafiği.

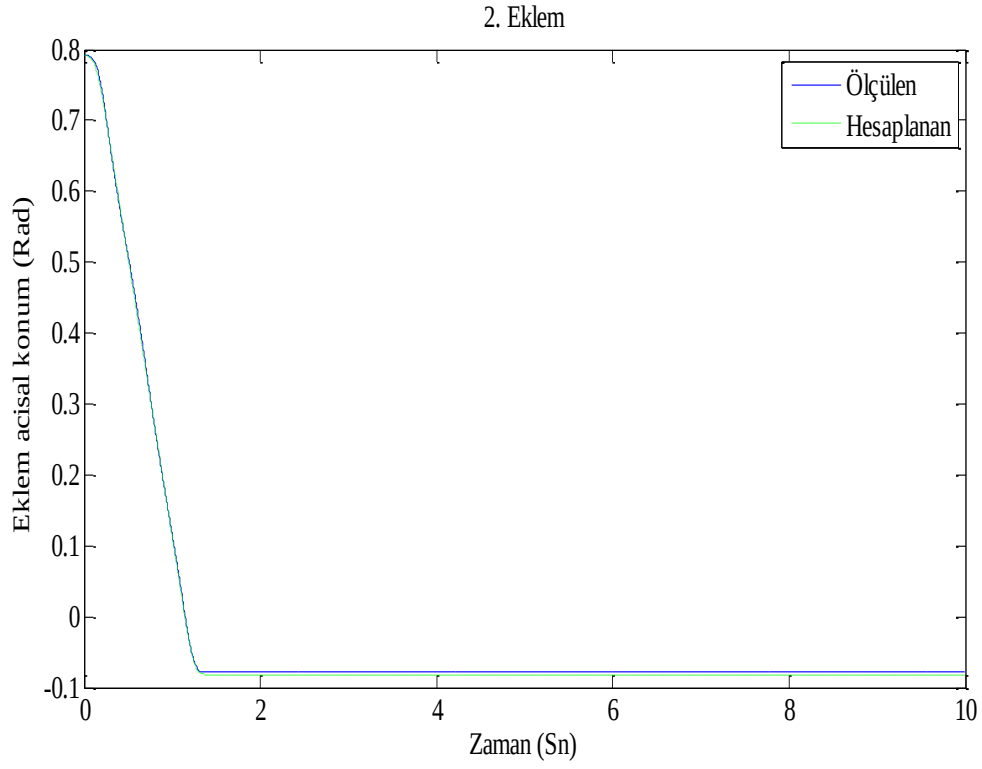


Şekil 3.11 : 1. eklem açısai hız grafiğı.

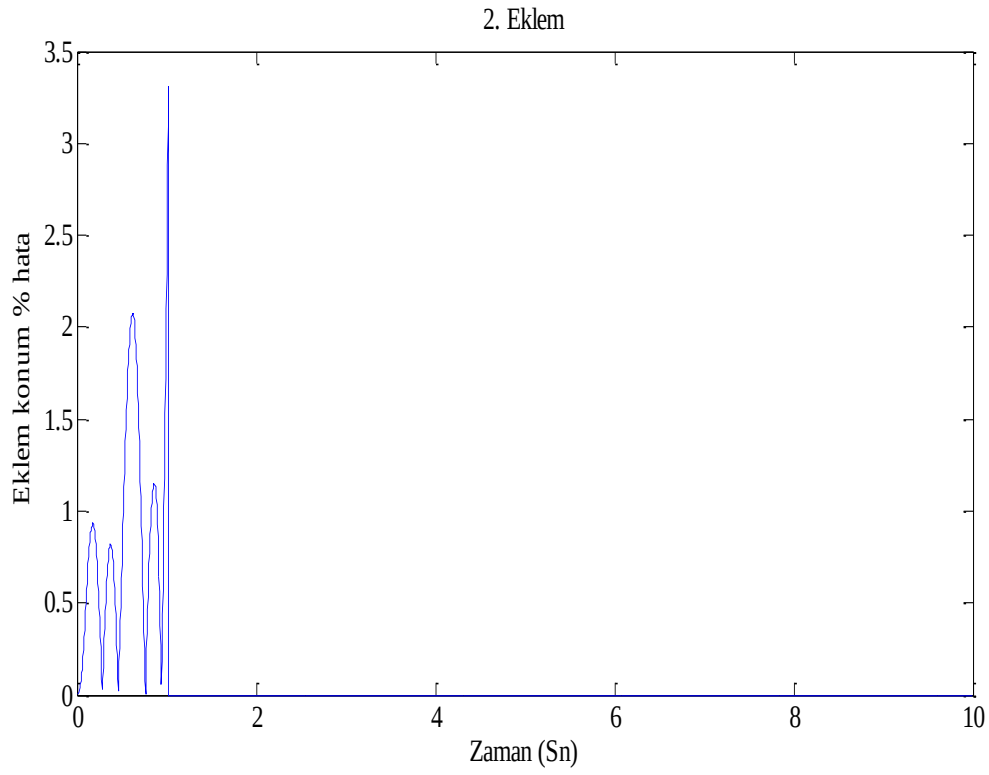


Şekil 3.12 : 1. eklem tork grafiğı.

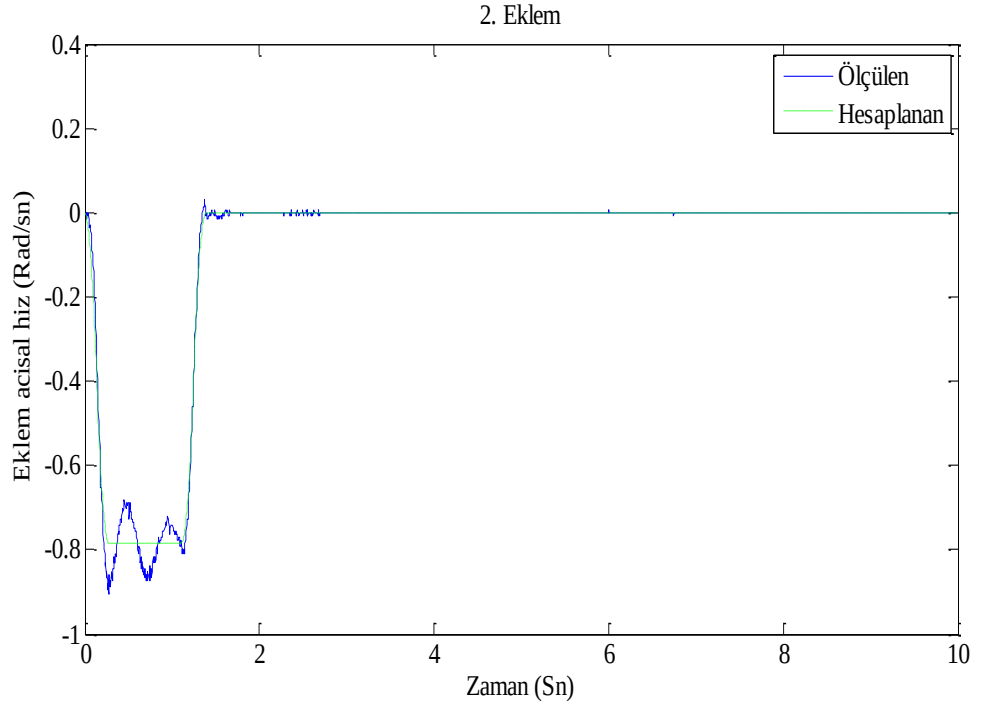
Yalnızca 2. eklem 50 derece ve nominal hızının %30 ile hareket etmesiyle eklem açısai konum grafiğı Şekil 3.13'de gösterilmektedir. Bunu sırasıyla eklem konum % hata, eklem açısai hızı, eklem tork grafikleri takip etmektedir.



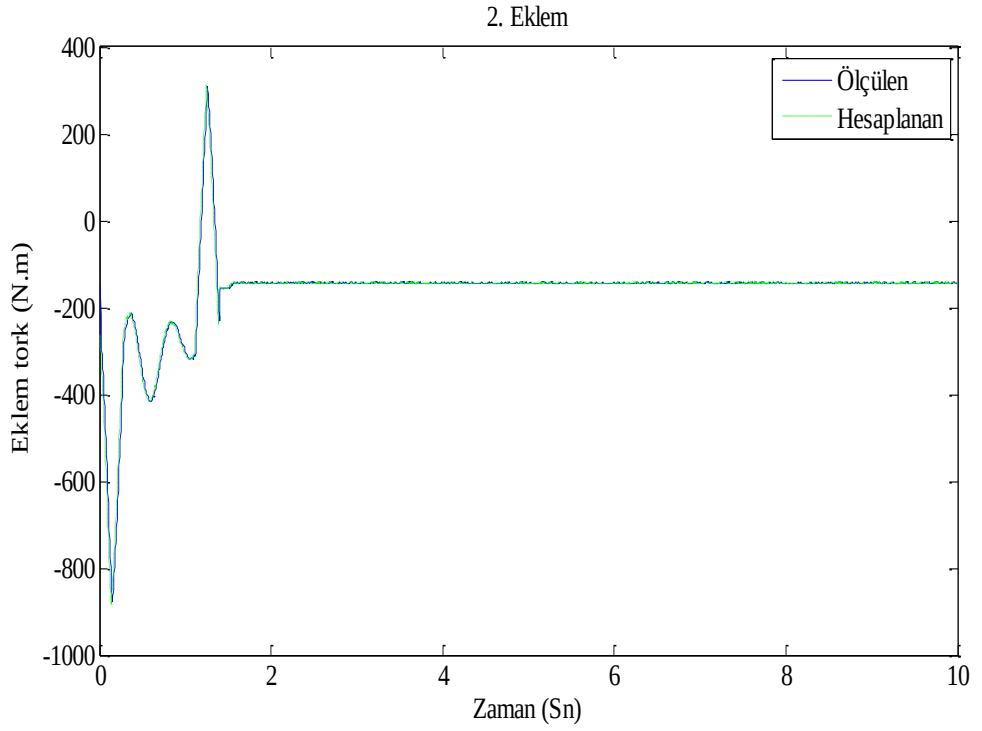
Şekil 3.13 : 2. eklem açısai konum grafiğı.



Şekil 3.14 : 2. eklem açısai konum % hata grafiğı.

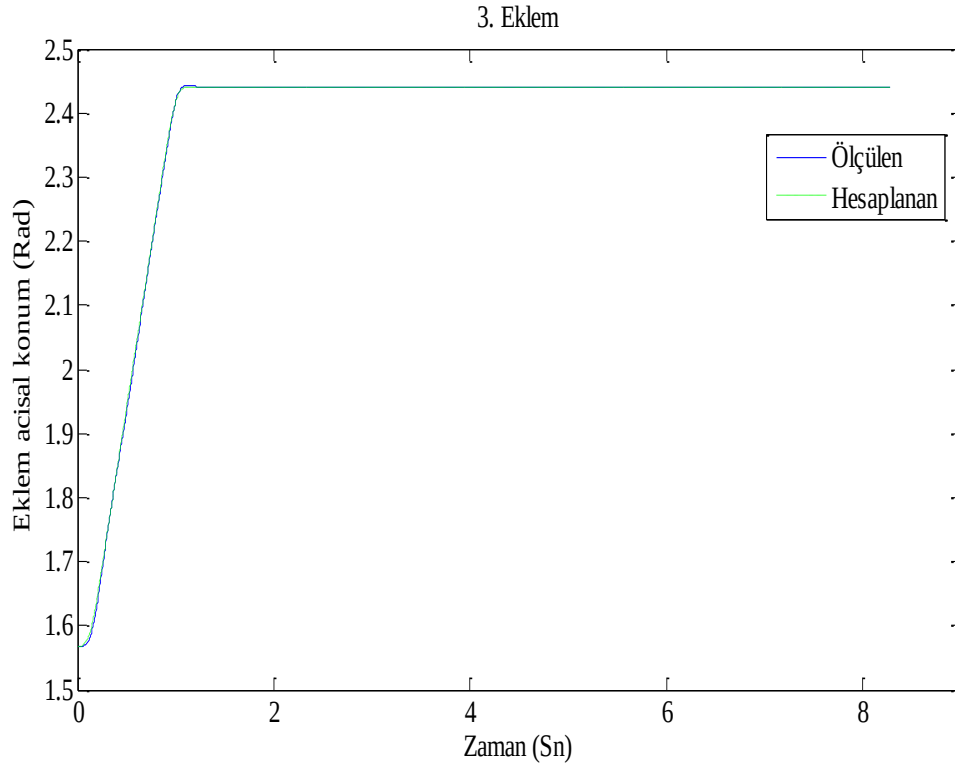


Şekil 3.15 : 2. eklem açısal hız grafiği.

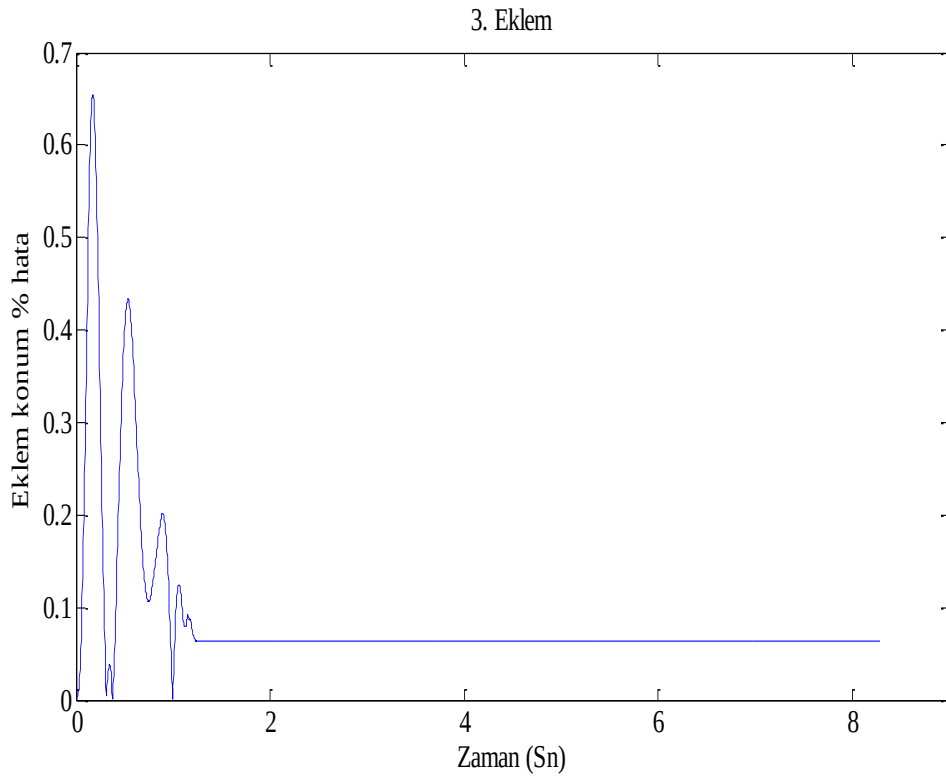


Şekil 3.16 : 2. eklem tork grafiği.

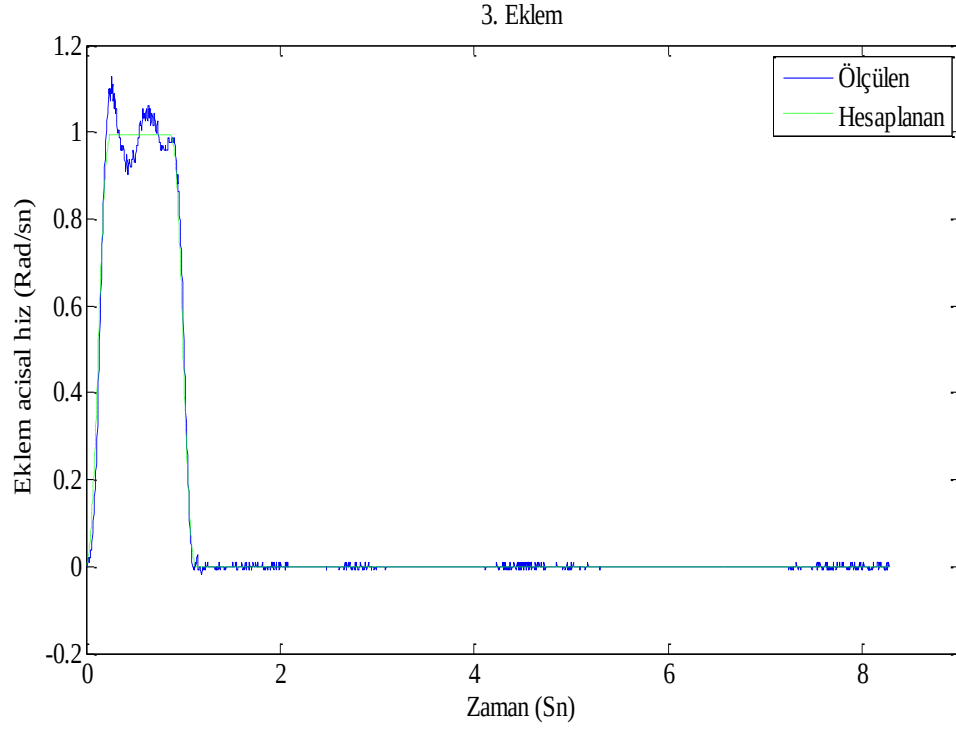
Yalnızca 3. eklemin 50 derece ve nominal hızının %30 ile hareket etmesiyle eklem açısal konum grafiği Şekil 3.17’de gösterilmektedir. Bunu sırasıyla eklem konum % hata, eklem açısal hızı, eklem tork grafikleri takip etmektedir.



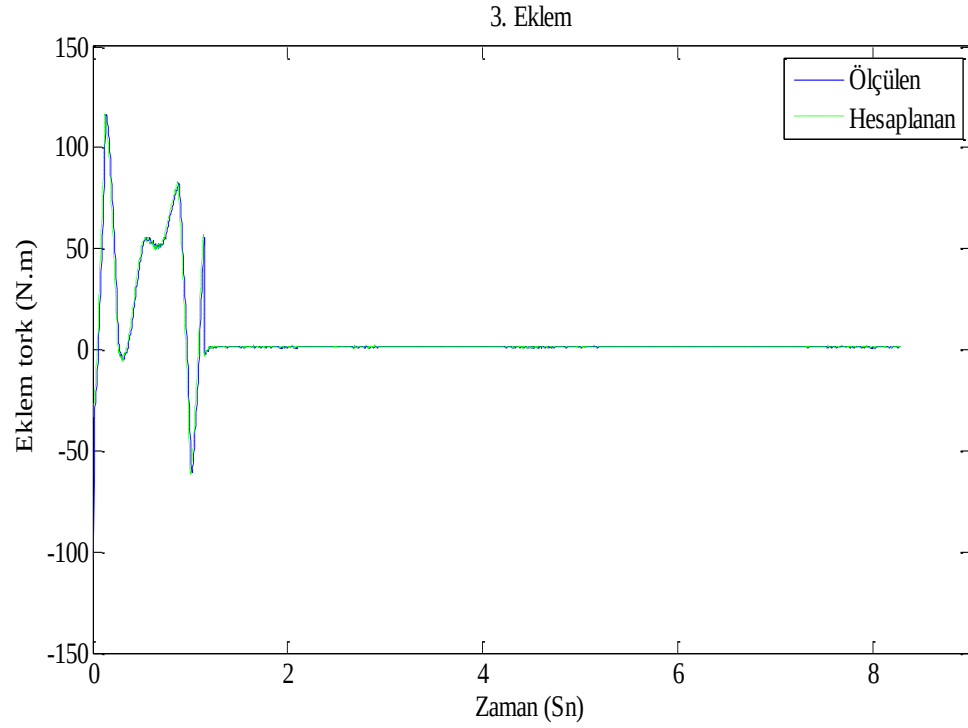
Şekil 3.17 : 3. eklem açısai konum grafiği.



Şekil 3.18 : 3. eklem açısai konum % hata grafiği.

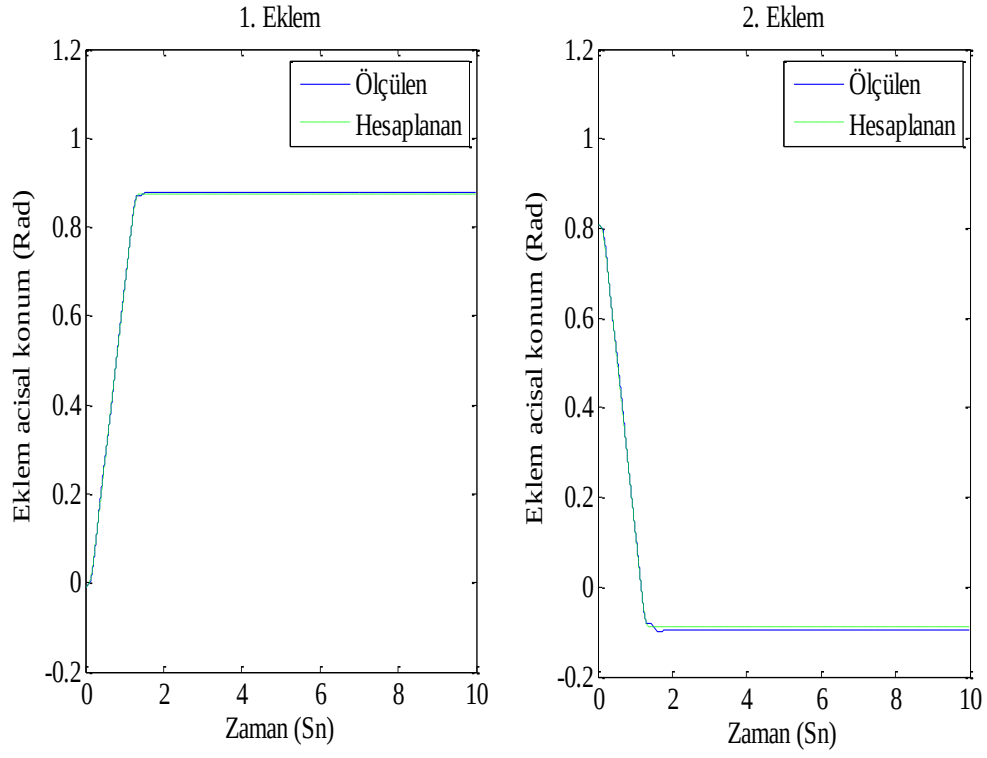


Şekil 3.19 : 3. eklem açısız hız grafiği.

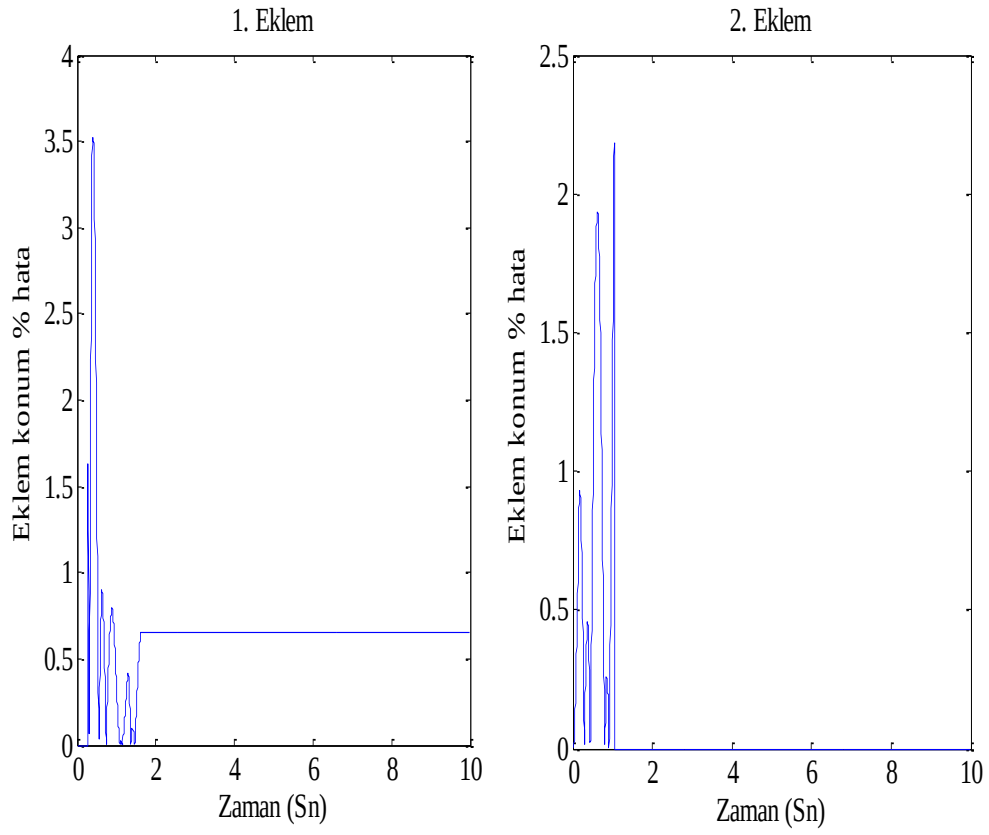


Şekil 3.20 : 3. eklem tork grafiği.

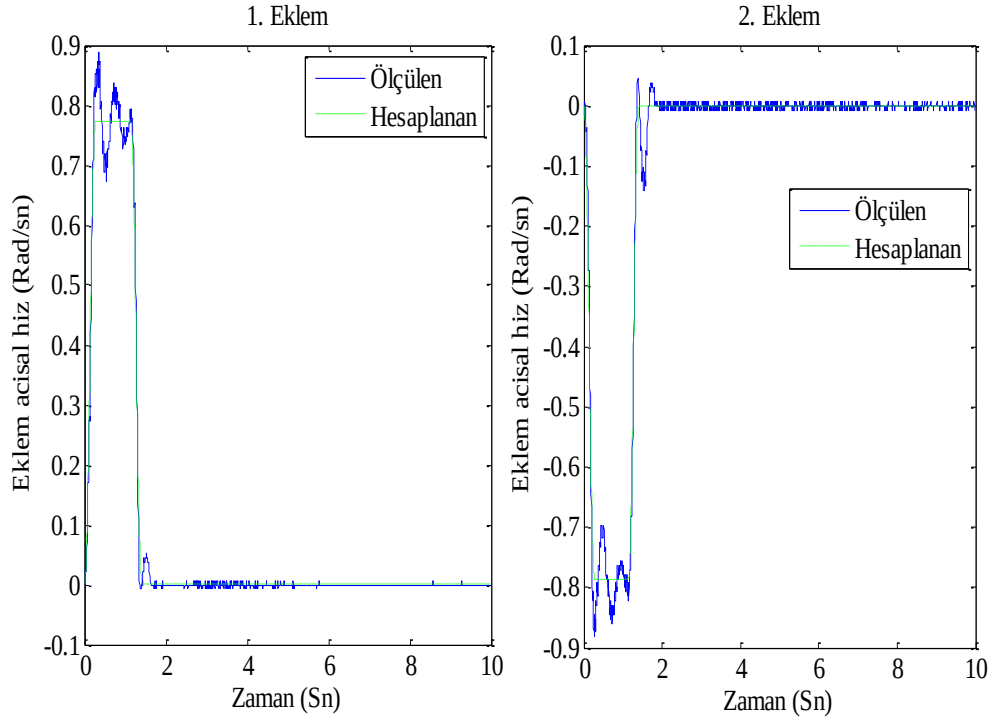
1. ve 2. eklemin 50 derece ve nominal hızının %30 ile hareket etmesiyle eklem açısız konum grafiği Şekil 3.21’da gösterilmektedir. Bunu sırasıyla eklem konum % hata, eklem açısız hızı, eklem tork grafikleri takip etmektedir.



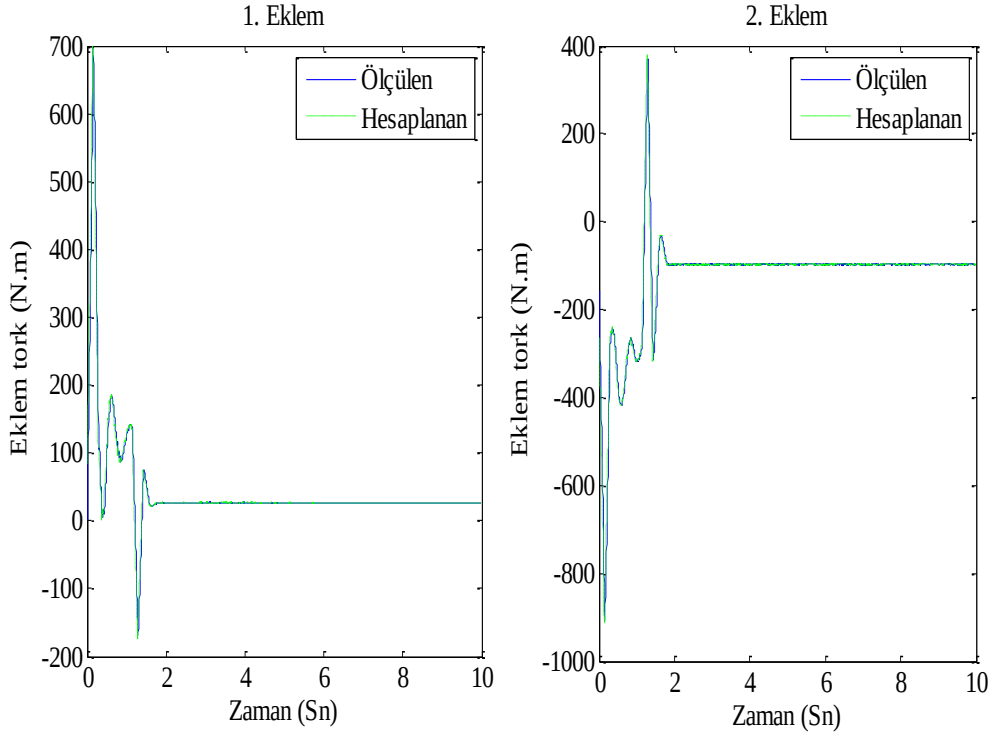
Şekil 3.21 : 1. ve 2. eklemlerin açılma konumu grafikleri.



Şekil 3.22 : 1. ve 2. eklemlerin açılma konumu % hata grafikleri.

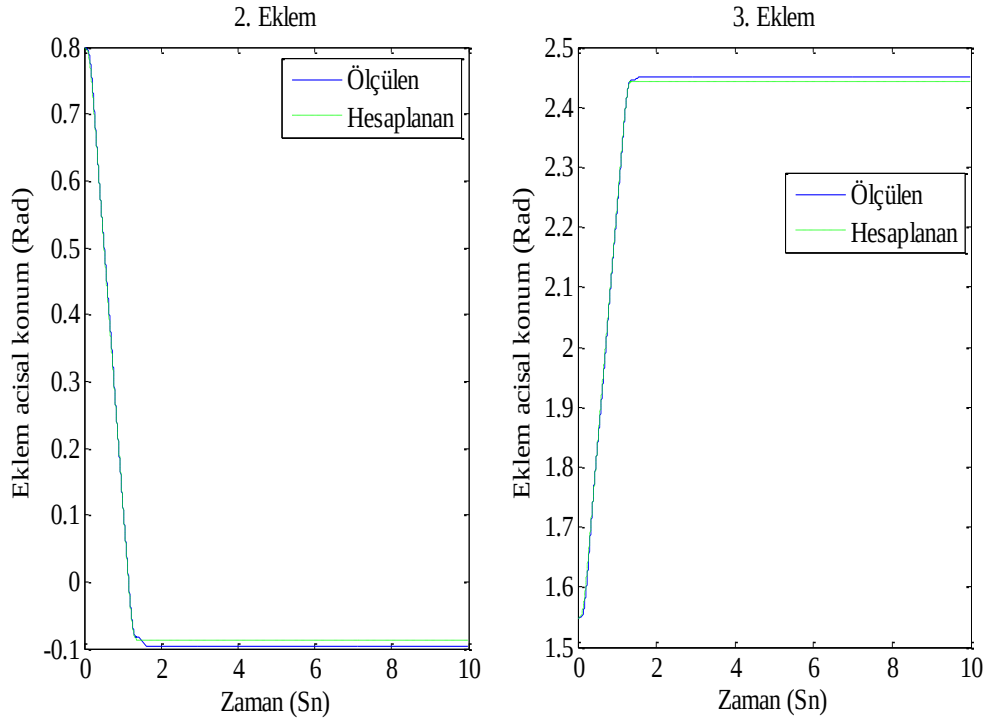


Şekil 3.23 : 1. ve 2. eklemlerin açısai hız grafikleri.

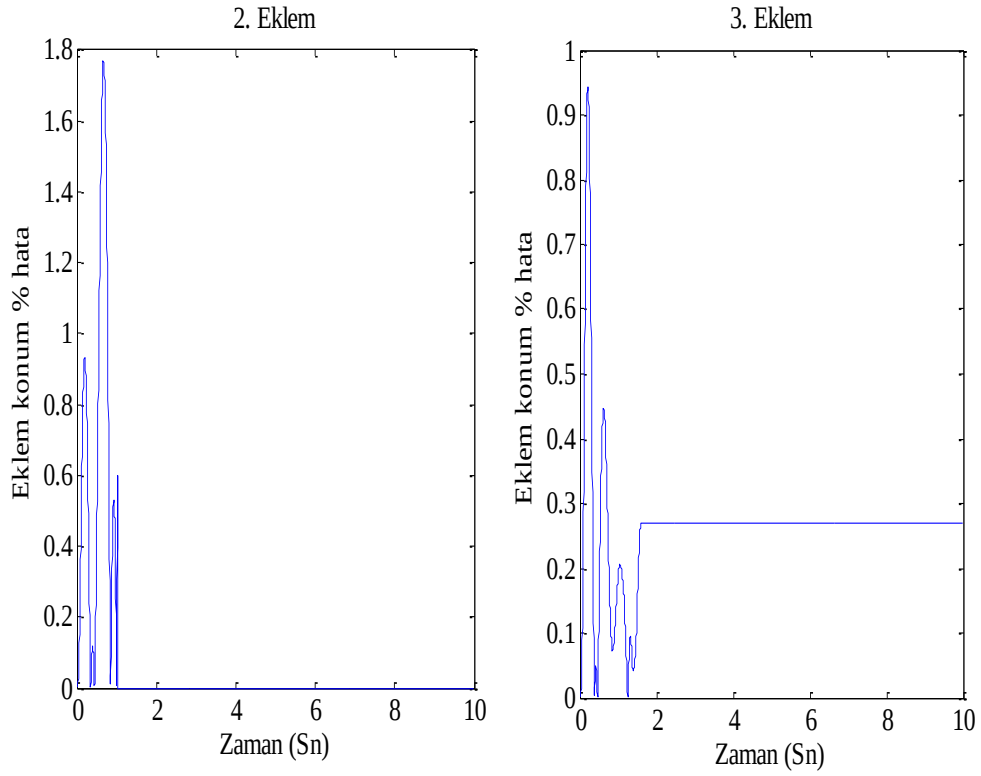


Şekil 3.24 : 1. ve 2. eklemlerin tork grafikleri.

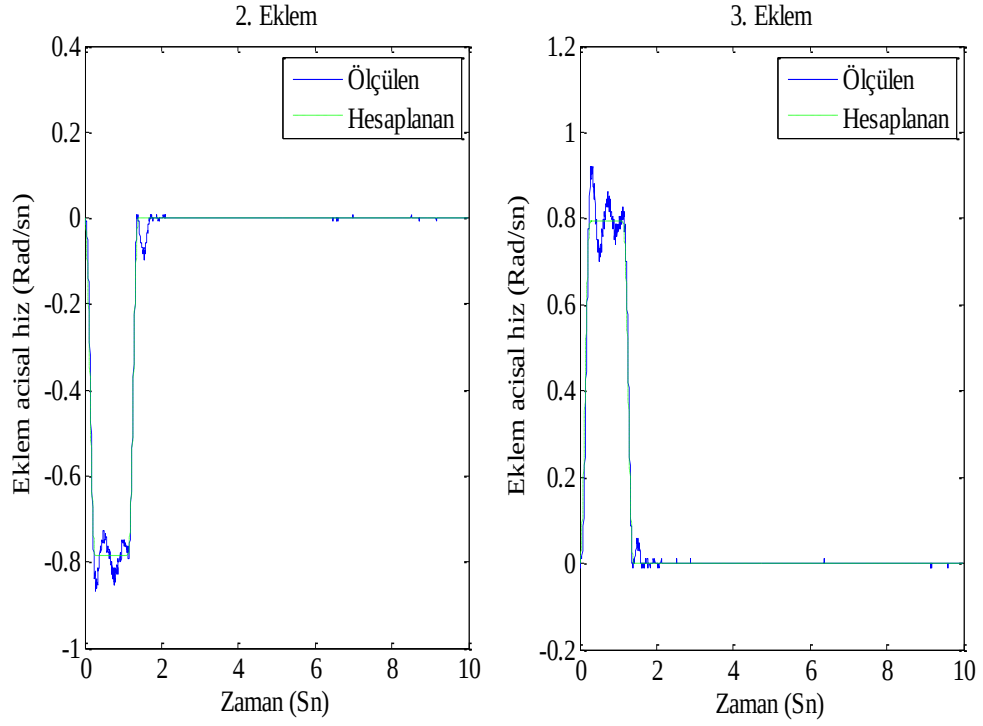
2. ve 3. eklemin 50 derece ve nominal hızının %30 ile hareket etmesiyle ekleme açısai konum grafiğı Şekil 3.25'de gösterilmektedir. Bunu sırasıyla ekleme konum % hata, ekleme açısai hızı, ekleme tork grafikleri takip etmektedir.



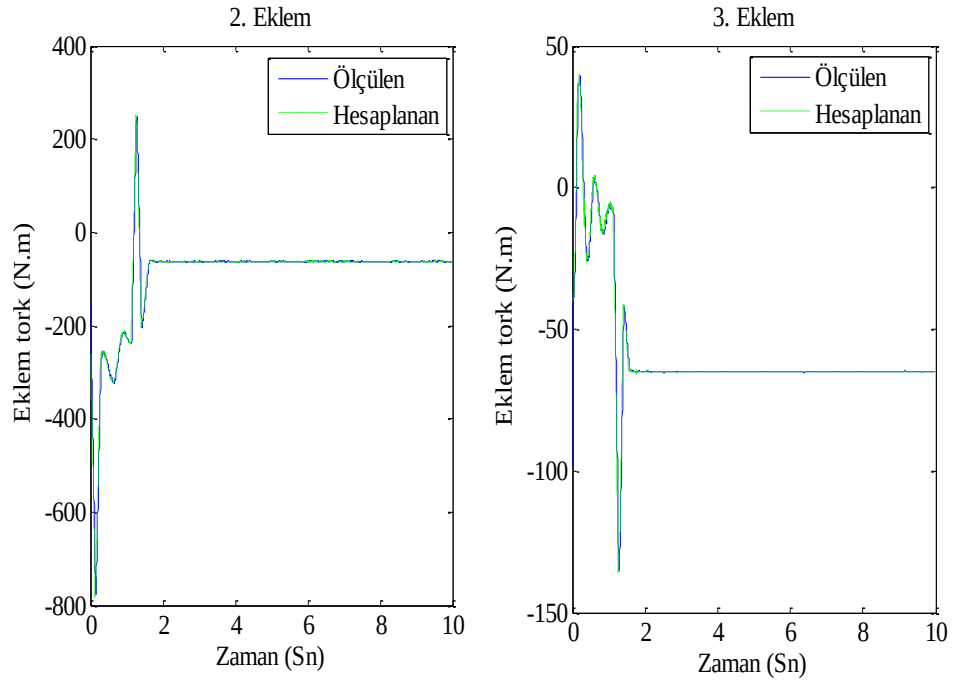
Şekil 3.25 : 2. ve 3. eklemlerin açısıl konum grafikleri.



Şekil 3.26 : 2. ve 3. eklemlerin açısıl konum % hata grafikleri.

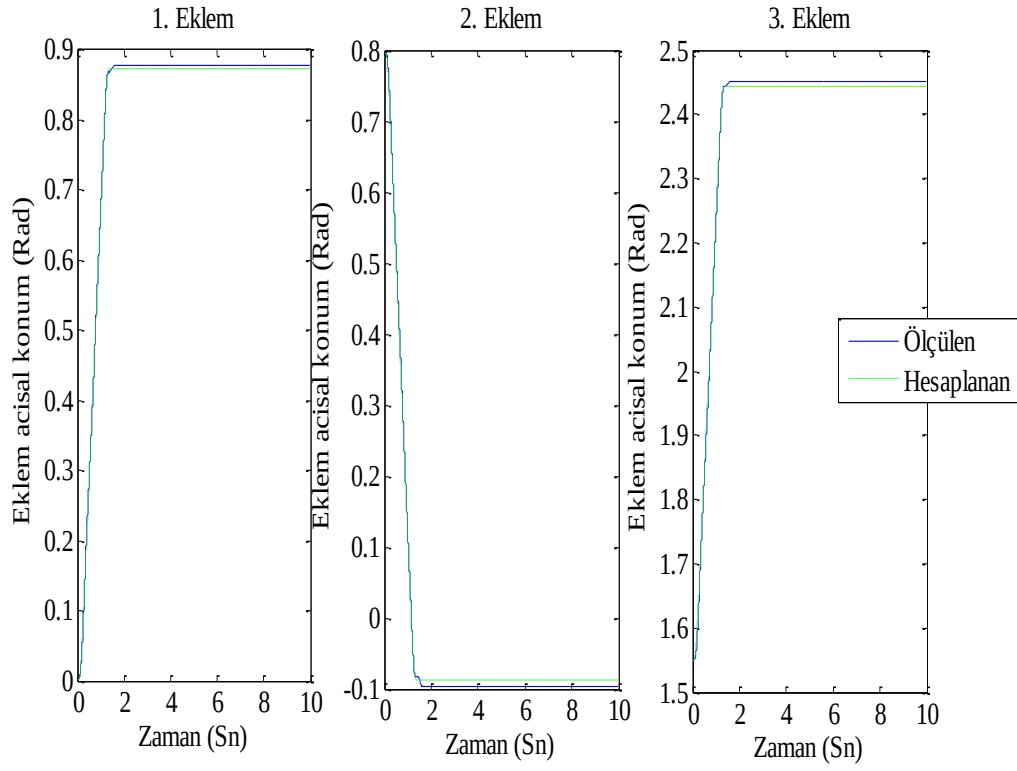


Şekil 3.27 : 2. ve 3. eklemlerin açılma hız grafikleri.

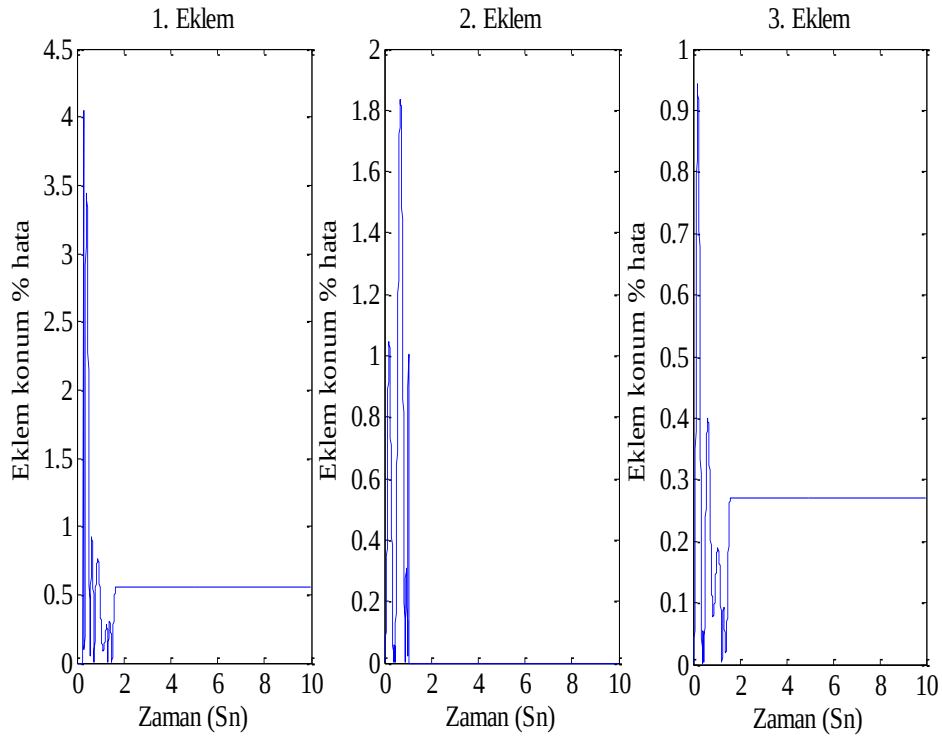


Şekil 3.28 : 2. ve 3. eklemlerin tork grafikleri.

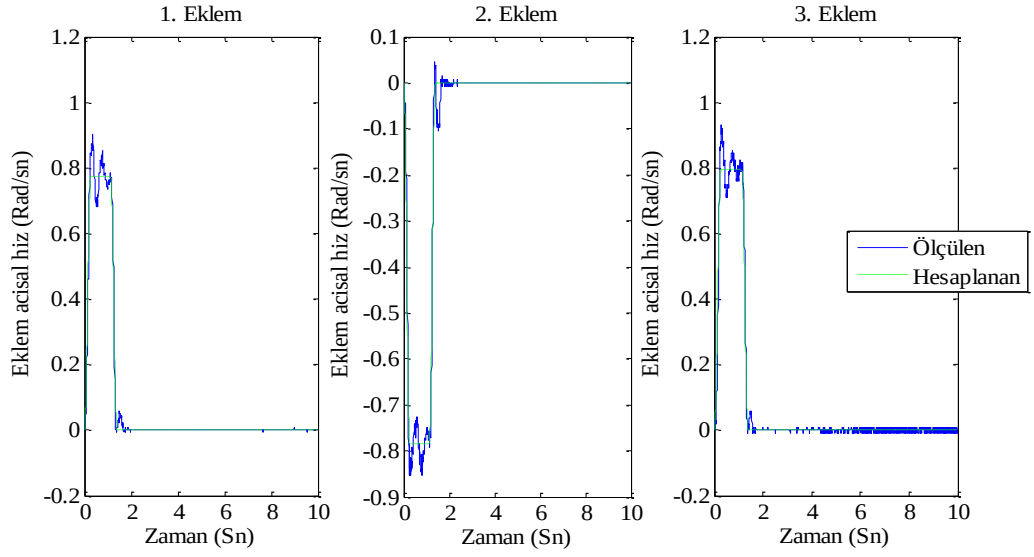
1., 2. ve 3. eklemin 50 derece ve nominal hızının %30 ile hareket etmesiyle eklemler açılma konum grafiği Şekil 3.39'de gösterilmektedir. Bunu sırasıyla eklemler konum % hata, eklemler açılma hızı, eklemler tork grafikleri takip etmektedir.



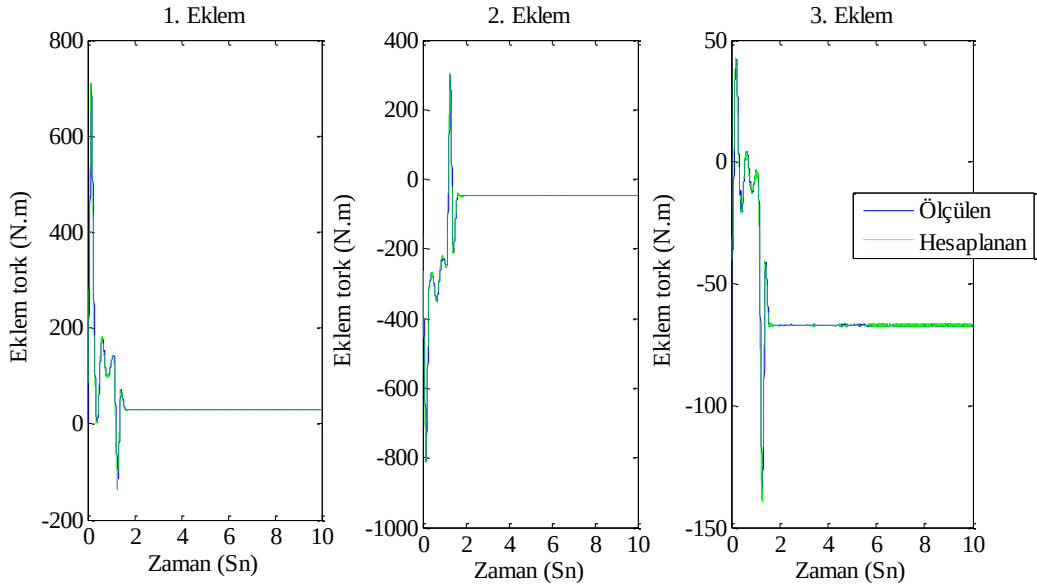
Şekil 3.29 : 1.,2. ve 3. eklemlerin açisal konum grafikleri.



Şekil 3.30 : 1., 2. ve 3. eklemlerin açisal konum % hata grafikleri.



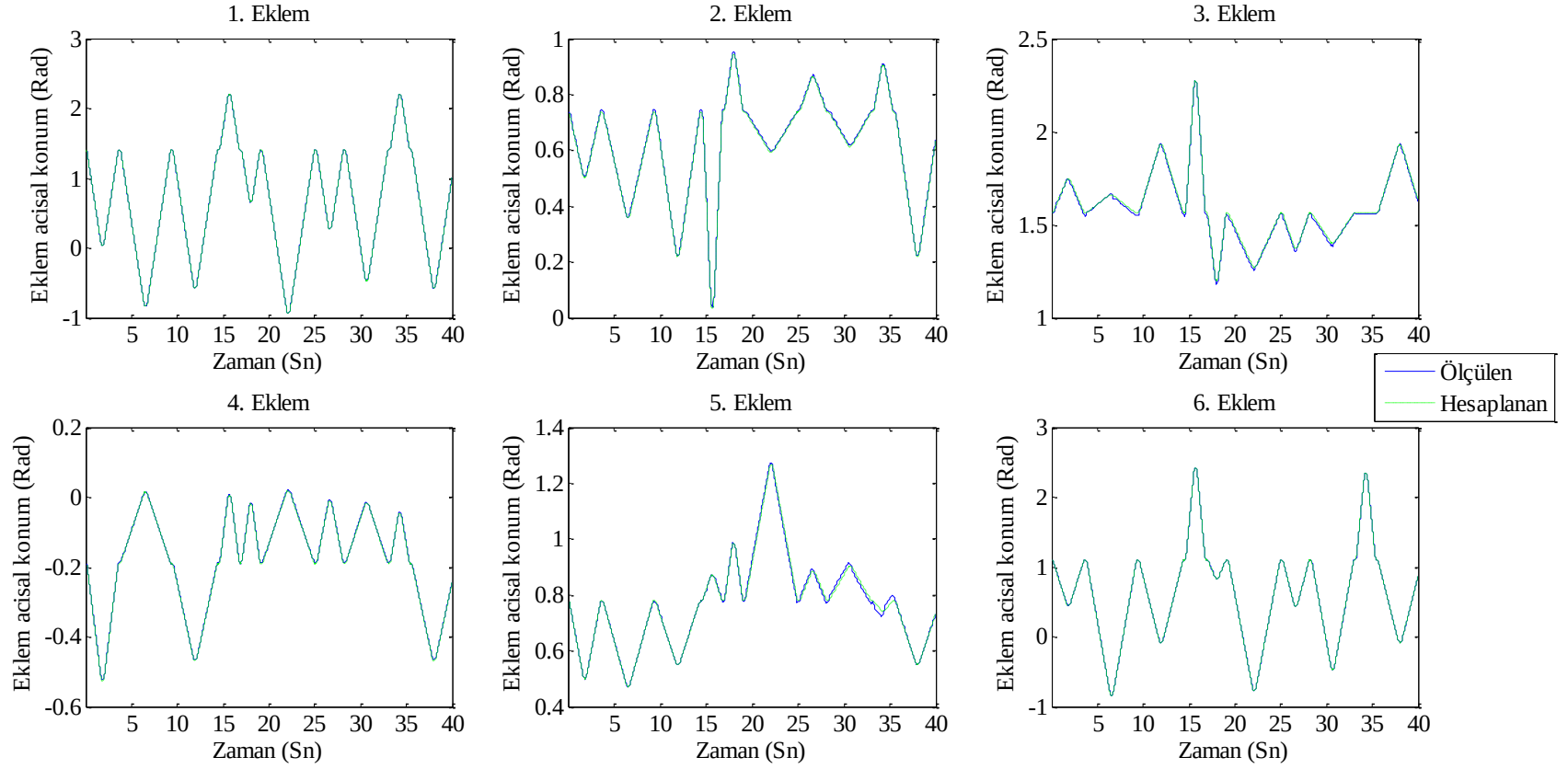
Şekil 3.31 : 1., 2. ve 3. eklemlerin açısal hız grafikleri.



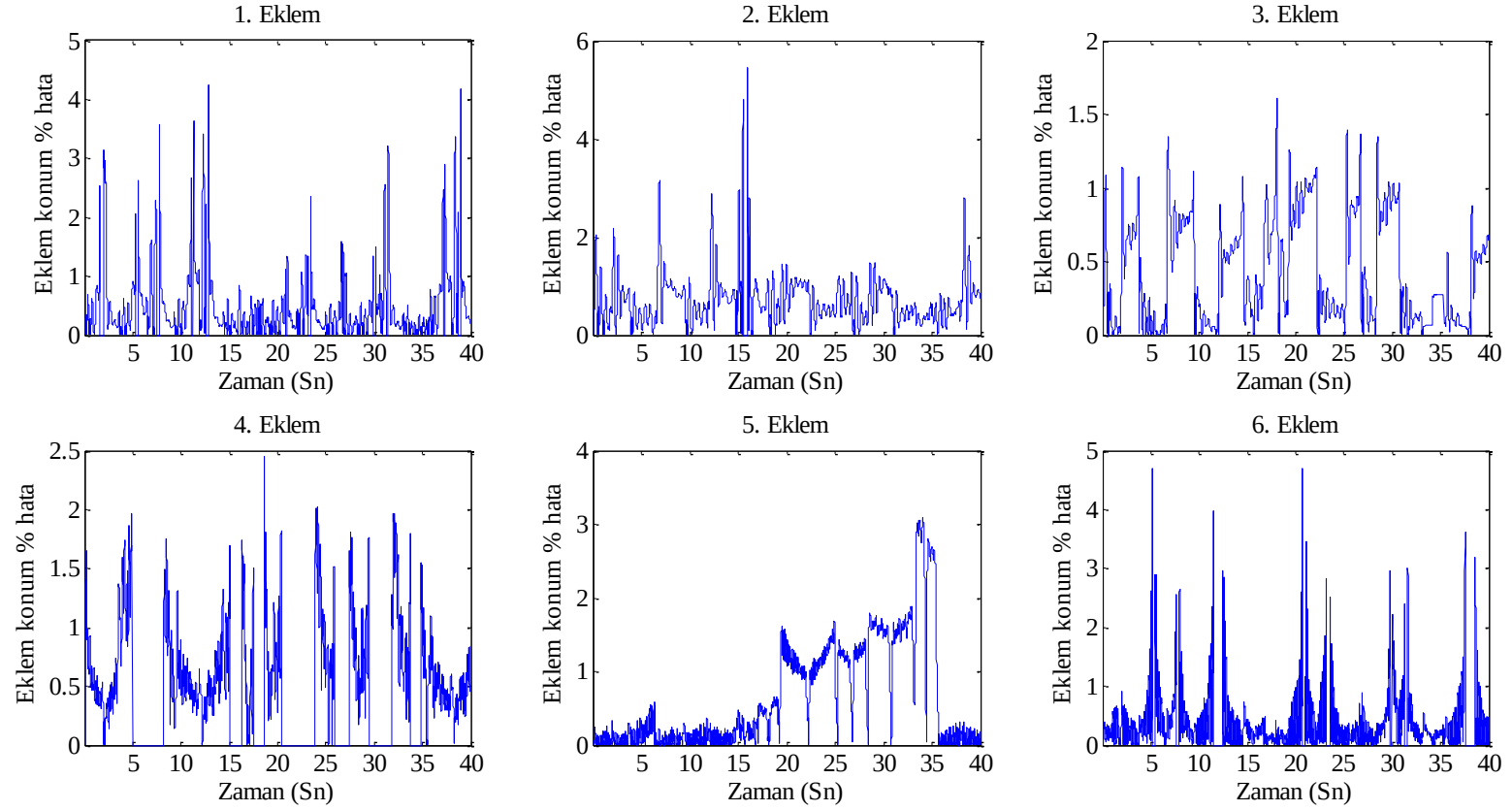
Şekil 3.32 : 1., 2. ve 3. eklemlerin tork grafikleri

Eklem uzayında yörünge planlamasıyla tüm eklemlerin nominal hızının %30 ile hareket etmesiyle eklem açısal konum grafiği Şekil 3.33'de gösterilmektedir. Bunu sırasıyla eklem konum % hata, eklem açısal hızı, eklem tork grafikleri takip etmektedir.

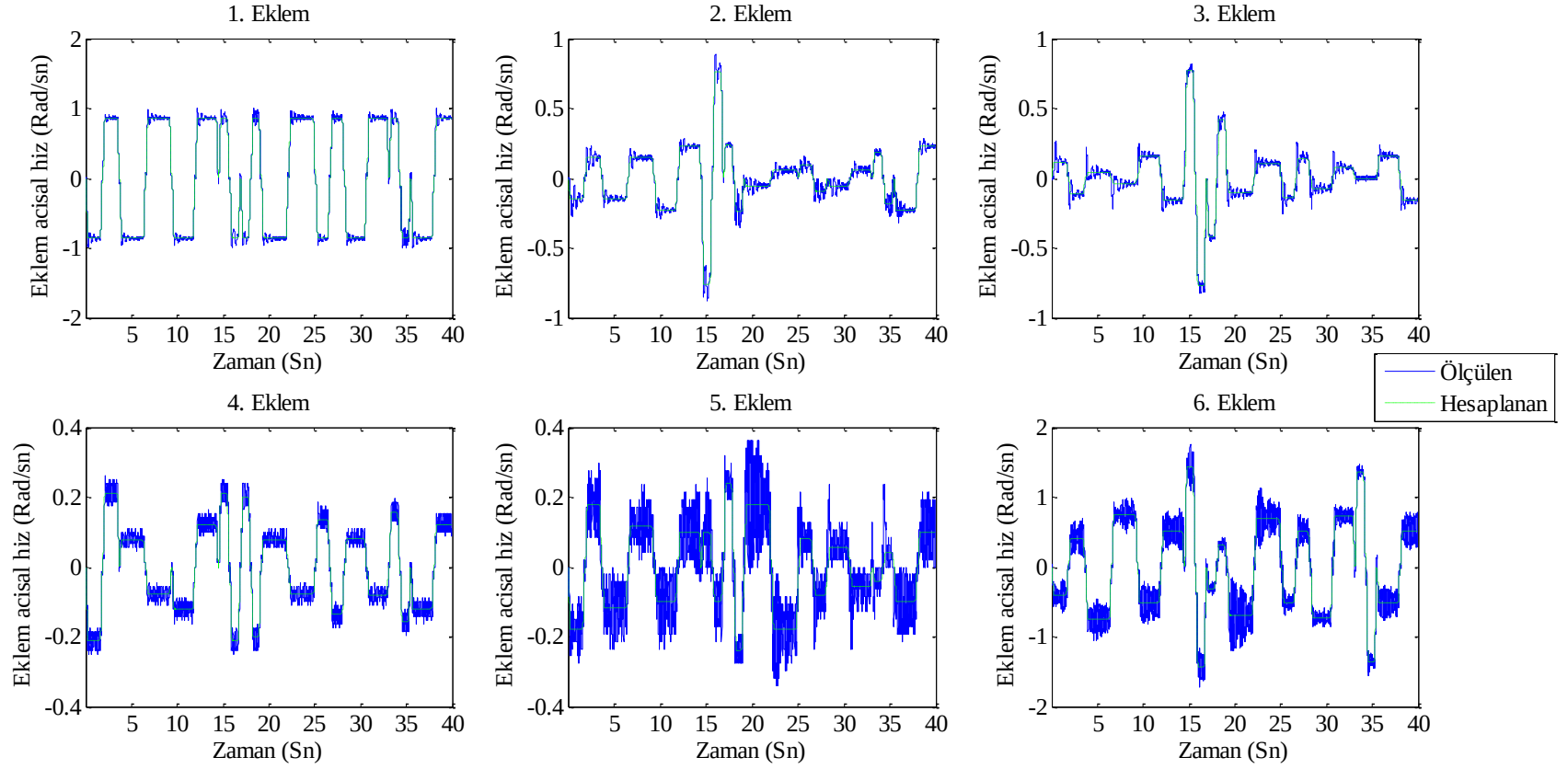
Görev uzayında yörünge planlamasıyla uç nokta maksimum hızının %30'u ile hareket etmesiyle eklem açısal konum grafiği Şekil 3.37'de gösterilmektedir. Bunu sırasıyla eklem açısal hızı, uç nokta konum, uç nokta konum % hata, uç nokta hız ve eklem tork grafikleri takip etmektedir. Uç nokta maksimum hızı, eklem nominal hızları referans alınarak deneysel olarak bulunan hızlardır.



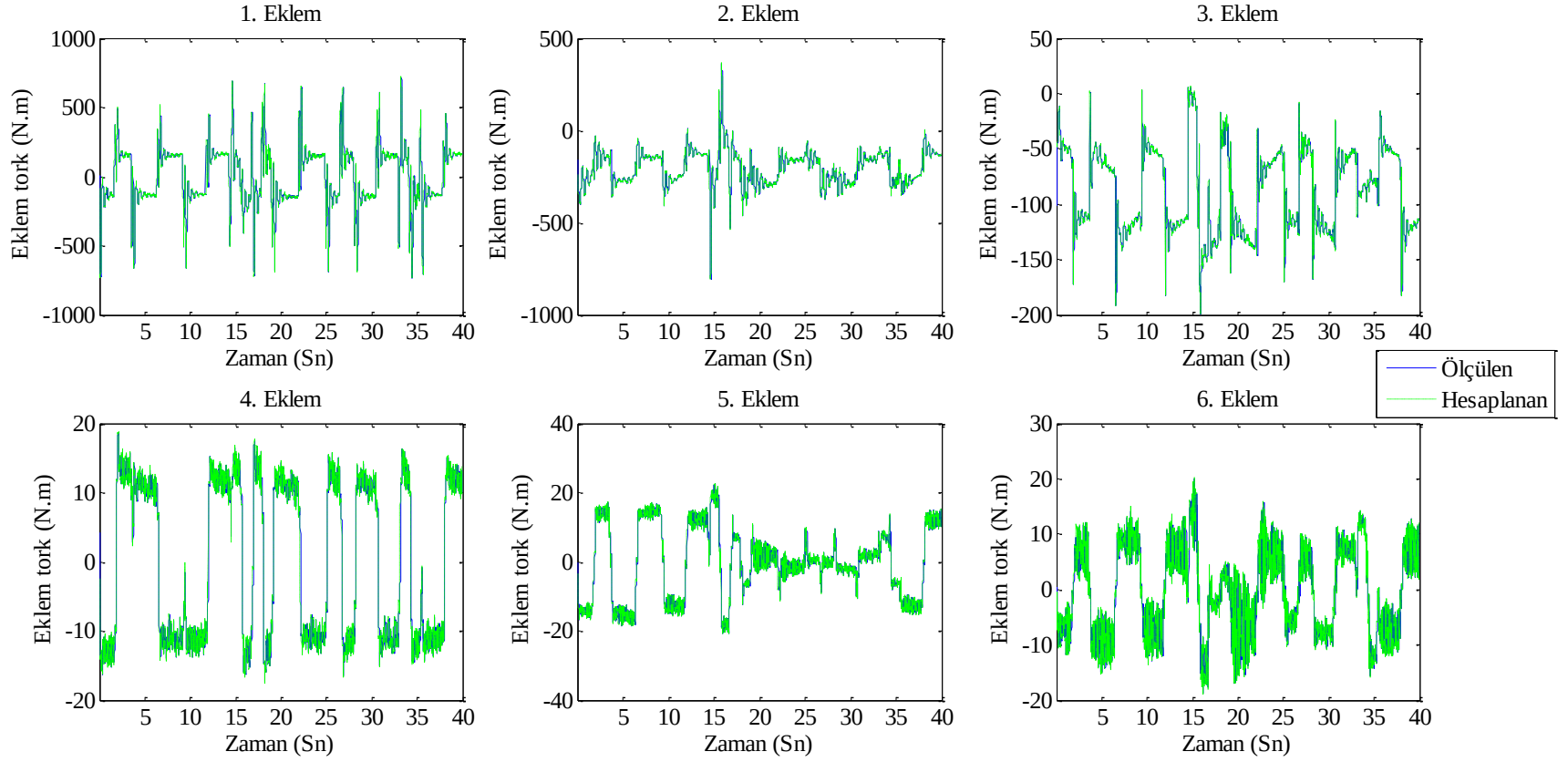
Şekil 3.33 : Tüm eklemlerin açısıl konum grafikleri.



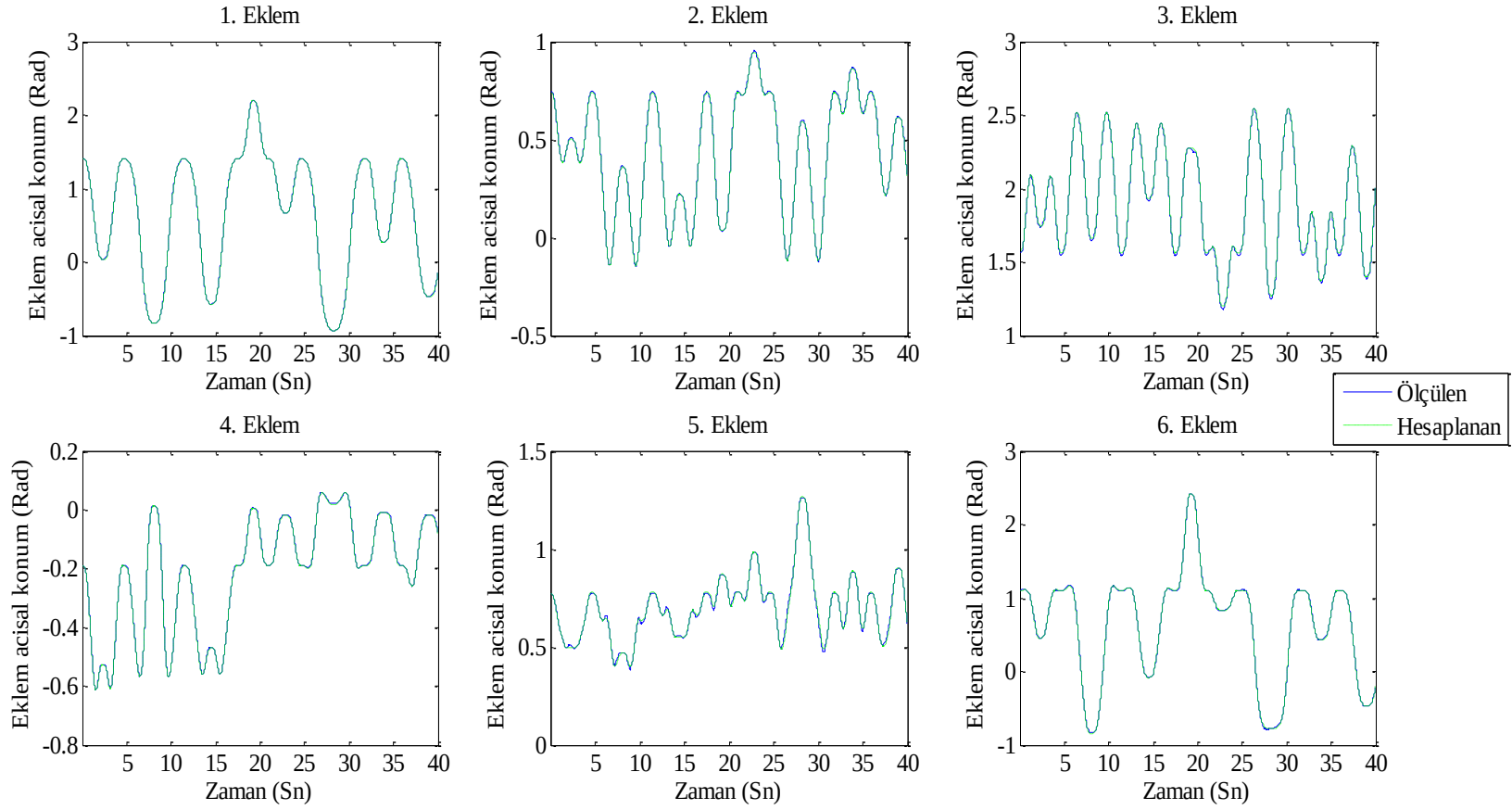
Şekil 3.34 : Tüm eklemlerin açılmal konum % hata grafikleri.



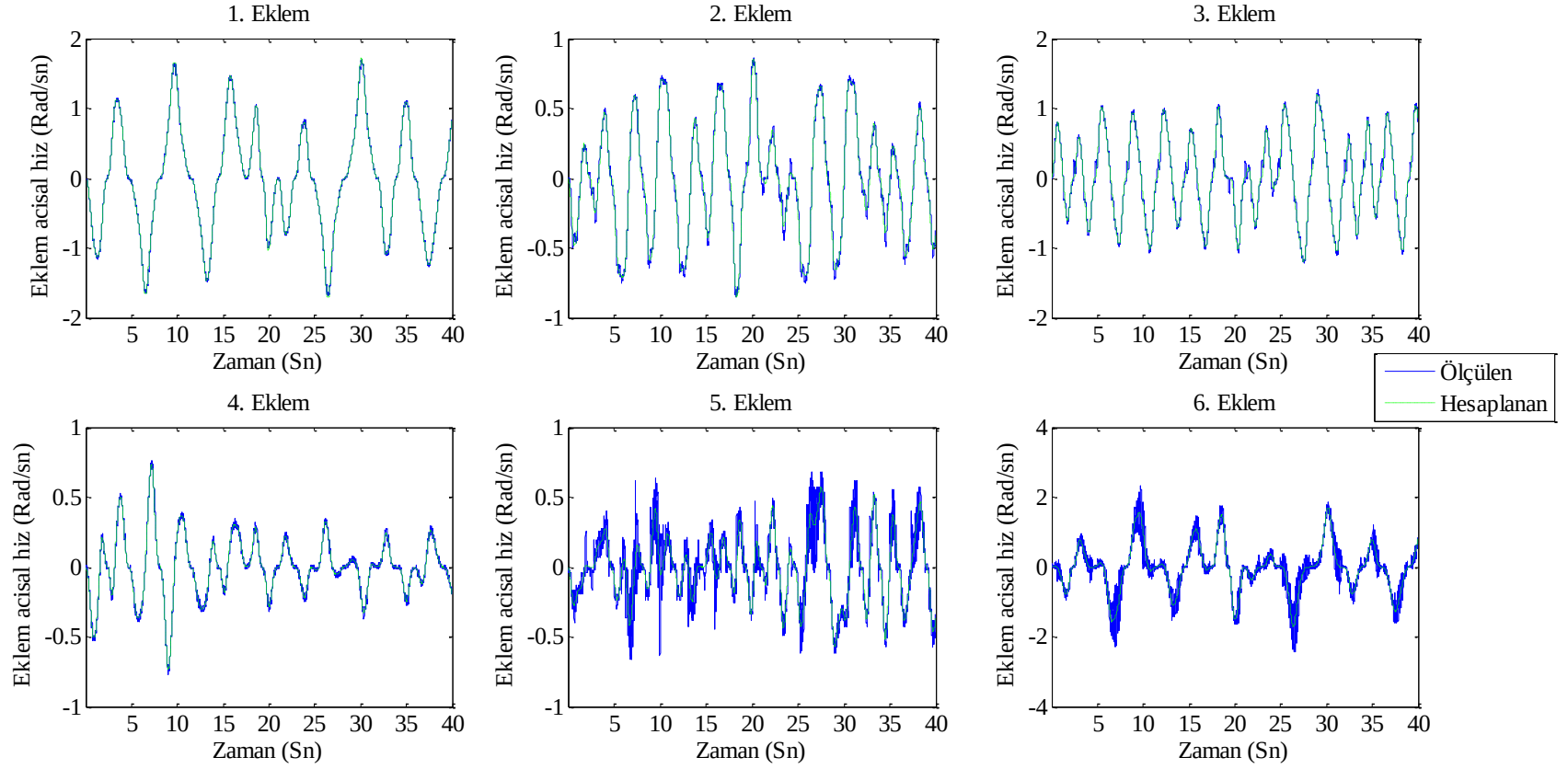
Şekil 3.35 : Tüm eklemlerin açısal hız grafikleri.



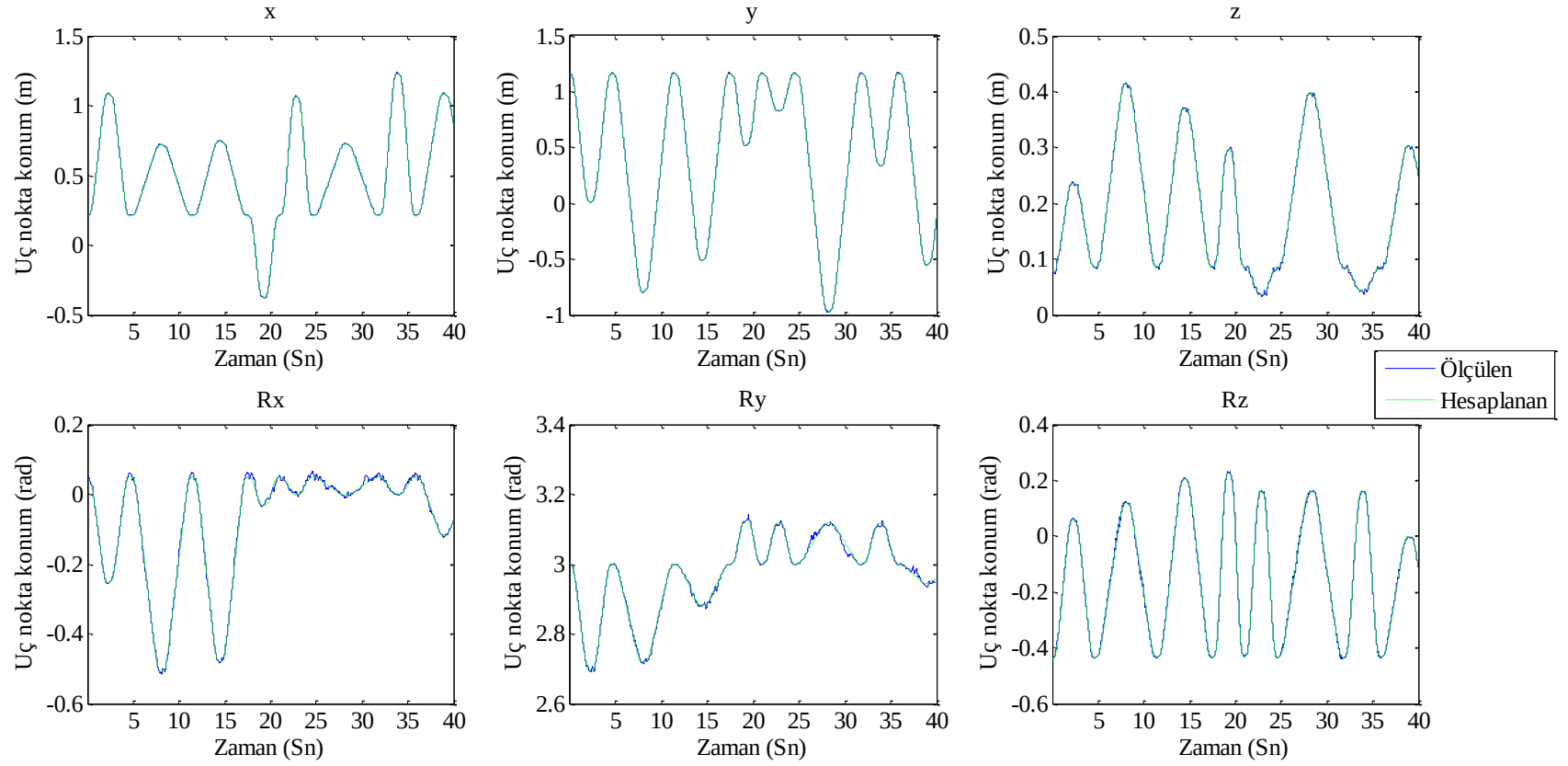
Şekil 3.36 : Tüm eklemlerin tork grafikleri.



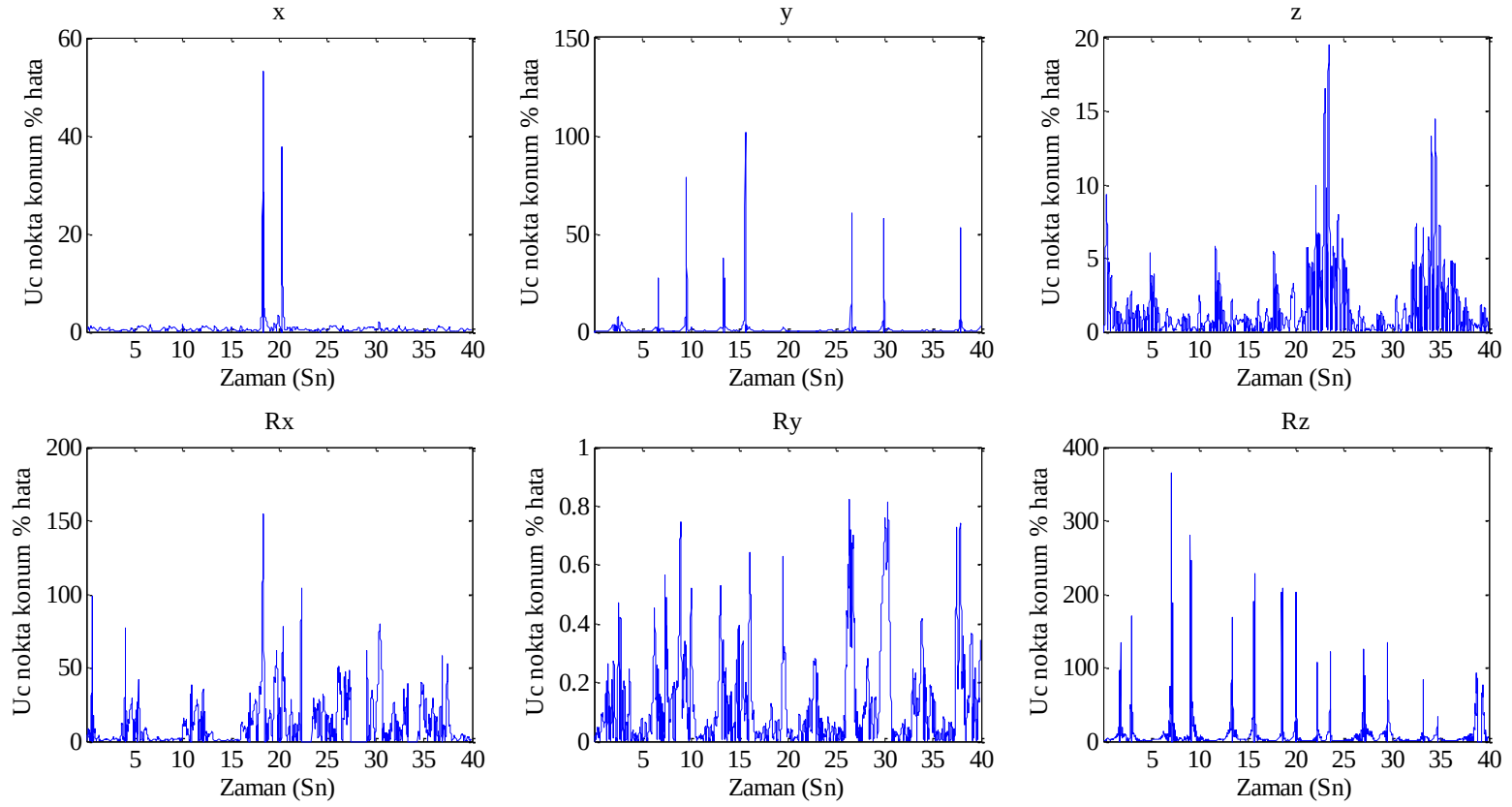
Şekil 3.37 : Tüm eklemlerin açısai konum grafikleri.



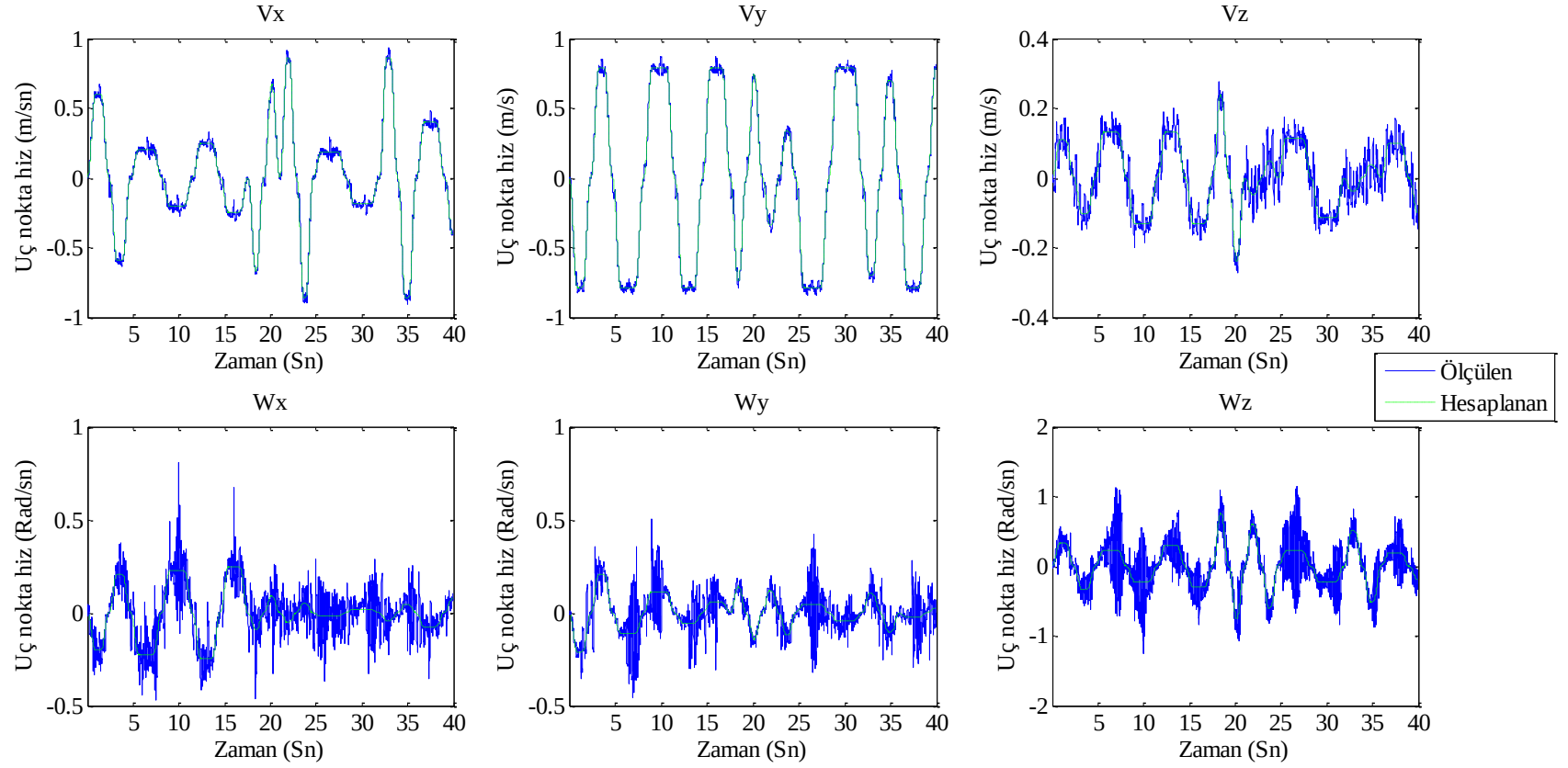
Şekil 3.38 : Tüm eklemlerin açısal hız grafikleri.



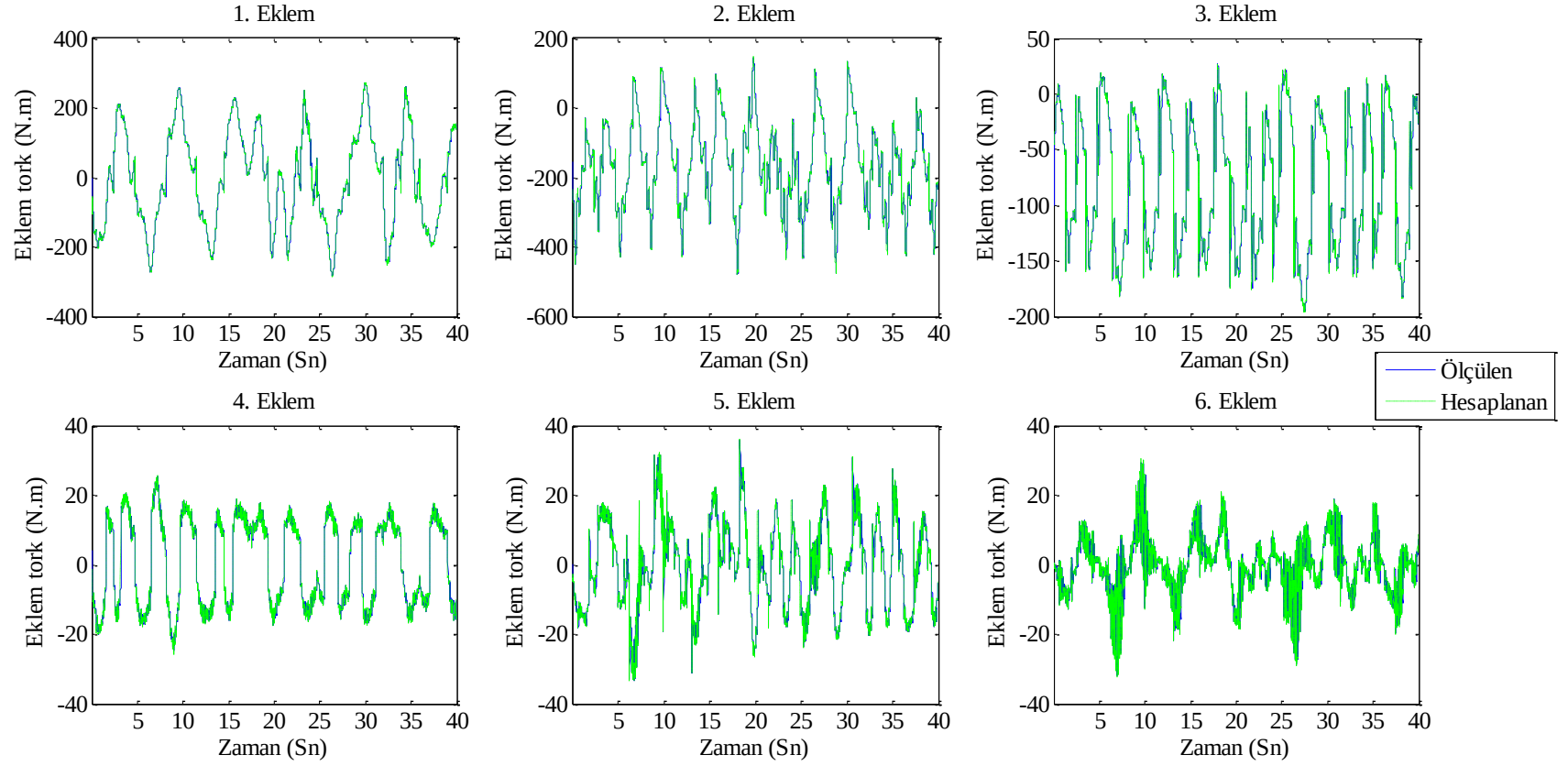
Şekil 3.39 : Uç nokta konum grafikleri.



Şekil 3.40 : Uç nokta konum % hata grafikleri.



Şekil 3.41 : Uç nokta hız grafikleri.



Şekil 3.42 : Tüm eklemlerin tork grafikleri.

3.2.2 Konum hassasiyeti ve tekrarlanabilirlik

Manipülör konum hassasiyeti çalışma uzayında uç noktanın bulunması gereken noktadan olan uzaklığı olarak tanımlanmaktadır. Hassasiyetin ölçümü farklı noktalardan referans konuma gerçekleştirilen hareketlerde atanan noktadan olan mutlak farkın ortalaması alınarak bulunmaktadır.

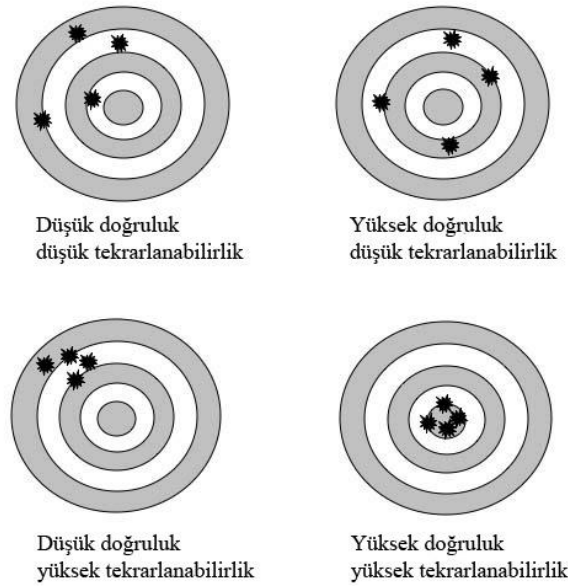
$$hassasiyet = \sum_{j=1}^n \frac{|p_j^a - p^r|}{n}; \quad (3.28)$$

p_j^a : Uç noktanın gerçekleşen konumu $j = 1, \dots, n$

Manipülör tekrarlanabilirliği çalışma uzayında uç noktanın aynı başlangıç noktasından referans noktaya hareketinde aynı noktaya gidebilme yeteneğini tanımlamaktadır. Uç noktanın ortalama bulunduğu konumdan en uzaktaki konum mutlak farkı manipülörün uç noktasının tekrarlanabilirliğini vermektedir.

$$tekrarlanabilirlik = \max \left(\sum_{j=1}^n \left(\frac{|p_j^a - p^r|}{n} \right) - |p_j^a - p^r| \right); \quad (3.29)$$

Şekil 3.43'de hassasiyet ve tekrarlanabilirlik için olası durumlar verilmektedir.



Şekil 3.43 : Hassasiyet ve tekrarlanabilirlik için olası durumlar.

Staubli RX160 manipülatör kontrolcü performansı ile tasarlanan konum kontrolcü performansı karşılaştırmak için eklem ve görev uzayında farklı hız aralıklarında yapılan deneyler sonucu Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3’de verilmektedir. Çizelgede verilen %30, %60 ve %100 ölçülen değerlerin nominal hızın hangi oranında elde edildiğini göstermektedir. Uç noktanın konum hassasiyeti ve tekrarlanabilirliği manipülatör enkoderinden ölçülen eklem açısal konumlardan hesaplanmaktadır. Bu nedenle sensör ve kinematik modeldeki hatalar sonuçlarda göz ardı edilmektedir. Özellikle belirtilmesi gerekmektedir ki, Staubli RX160 manipülatör için verilen sonuçlar sadece tasarlanan kontrolcunun performansını karşılaştırmak için elde edilmiştir ve bu karşılaştırma dışında kesinlikle referans alınmamalıdır.

Çizelge 3.2 : Staubli RX 160 manipülatörün uç noktasının tekrarlanabilirlik ve hassasiyeti.

x,y,z,D -> (mm)		Eklem Uzayında Yörünge Planlama				Görev Uzayında Yörünge Planlama			
		x	y	z	D	x	y	z	D
Hassasiyet	30%	0,354	0,057	0,003	0,359	0,099	0,044	0,004	0,108
	60%	0,795	0,137	0,016	0,807	0,123	0,046	0,006	0,131
	100%	0,958	0,164	0,054	0,973	0,120	0,045	0,007	0,128
Tekrarlanabilirlik	30%	0,005	0,002	0,006	0,008	0,007	0,002	0,003	0,008
	60%	0,014	0,003	0,003	0,015	0,004	0,001	0,002	0,005
	100%	0,015	0,003	0,003	0,016	0,004	0,001	0,003	0,005

Çizelge 3.3 : Tasarlanan konum kontrolcü performansı

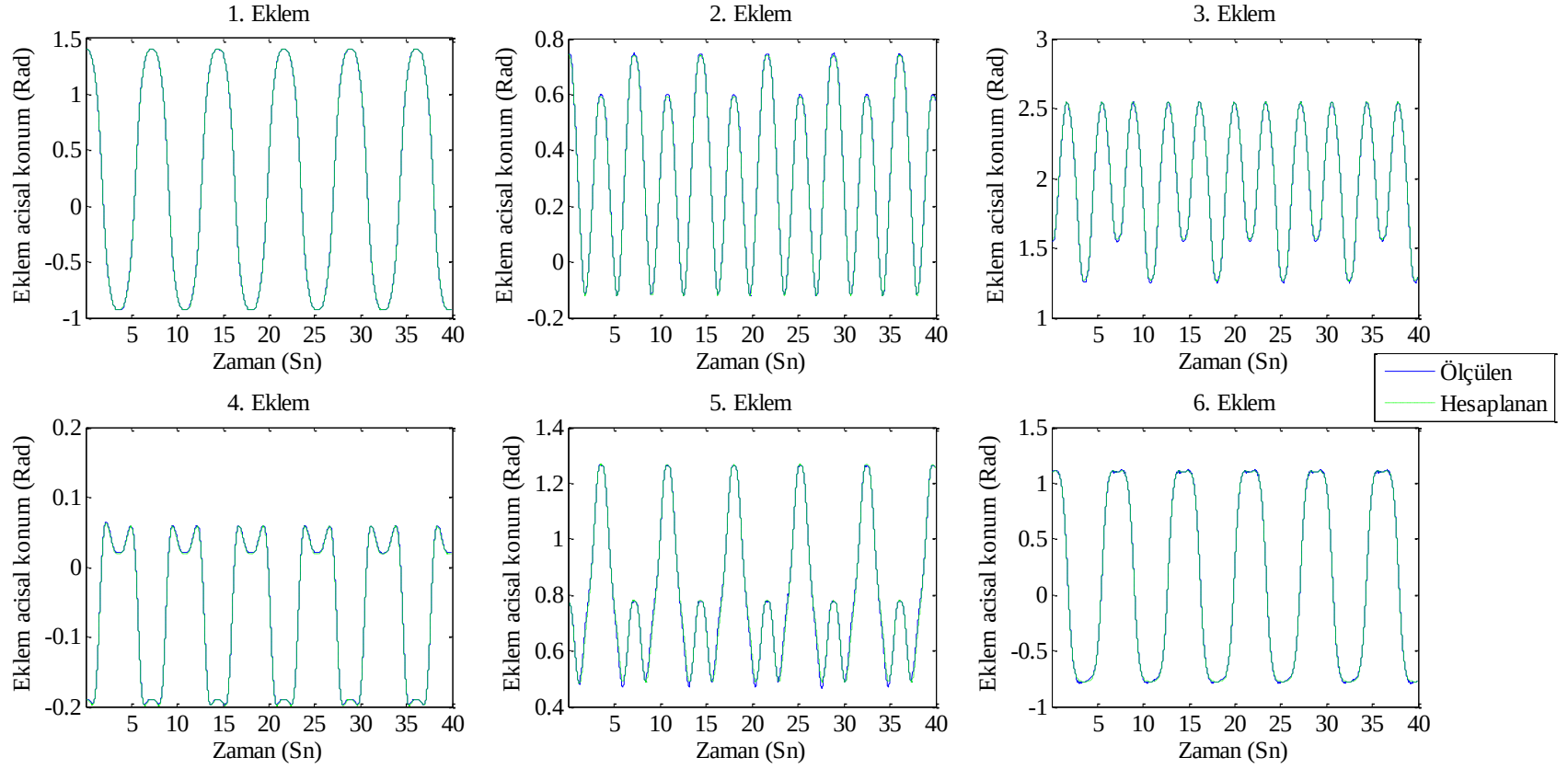
x,y,z,D -> (mm)		Eklem Uzayında Yörünge Planlama				Görev Uzayında Yörünge Planlama			
		x	y	z	D	x	y	z	D
Hassasiyet	30%	1,008	4,874	1,284	5,140	1,319	9,990	0,402	10,085
	60%	5,323	3,521	0,089	6,383	0,290	10,160	0,679	10,187
	100%	8,123	3,060	1,105	8,750	0,314	10,031	0,501	10,048
Tekrarlanabilirlik	30%	0,142	0,077	0,148	0,219	0,180	0,196	0,080	0,278
	60%	0,134	0,116	0,125	0,217	0,211	0,359	0,085	0,425
	100%	0,189	0,540	0,554	0,796	0,126	0,310	0,103	0,350

Yukarıdaki sonuçlar karşılaştırıldığında Staubli RX160 manipülatör ile tasarlanan konum kontrolcüsü arasındaki performans farklılık göstermektedir. Bunun en büyük nedeni kullanılan konum kontrol yönteminin farklılığı, dinamik ve sürtünme modelinin farklılığıdır.

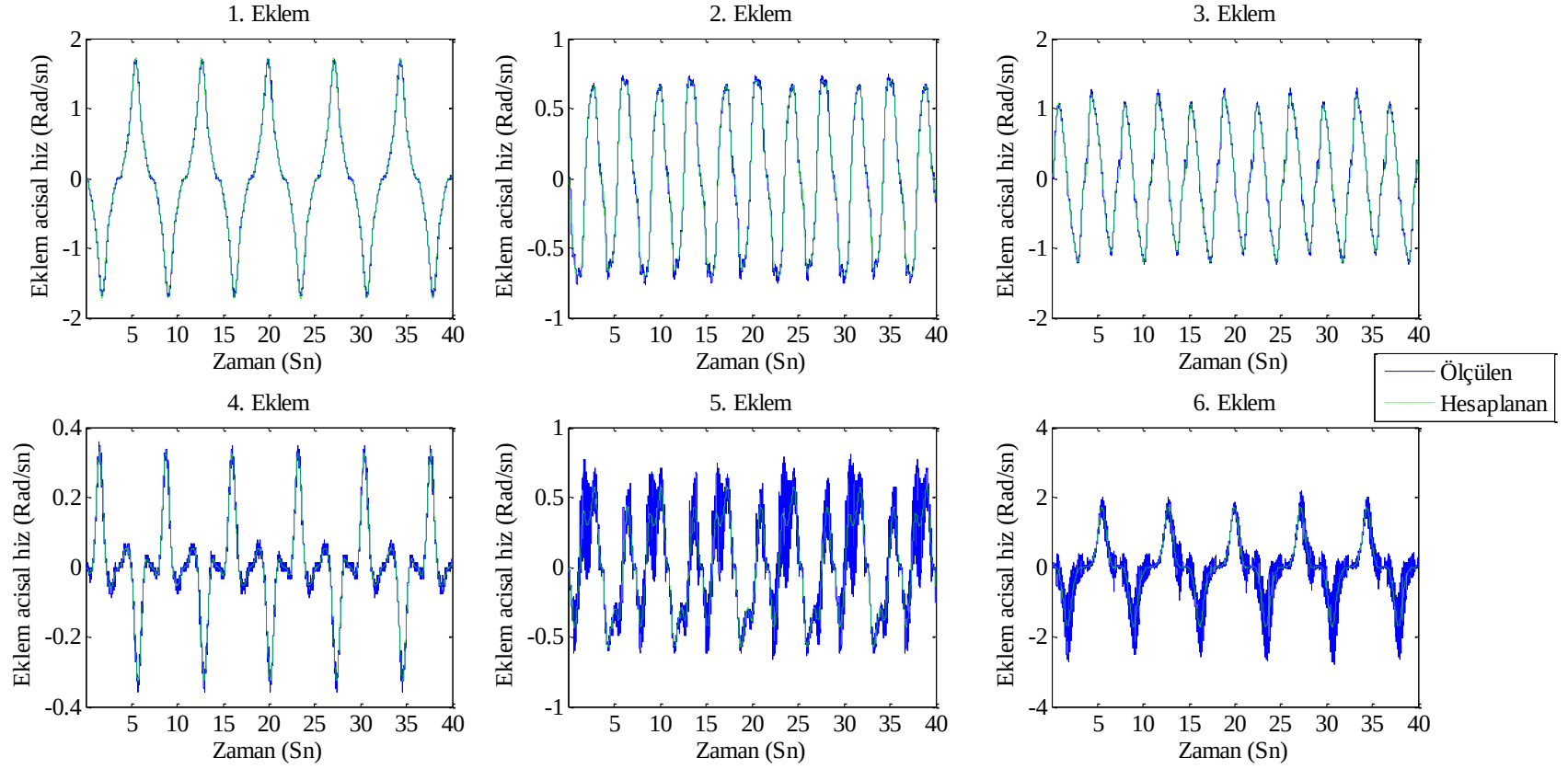
4. UYGULAMALAR

4.1 İki Nokta Arasındaki Hareket

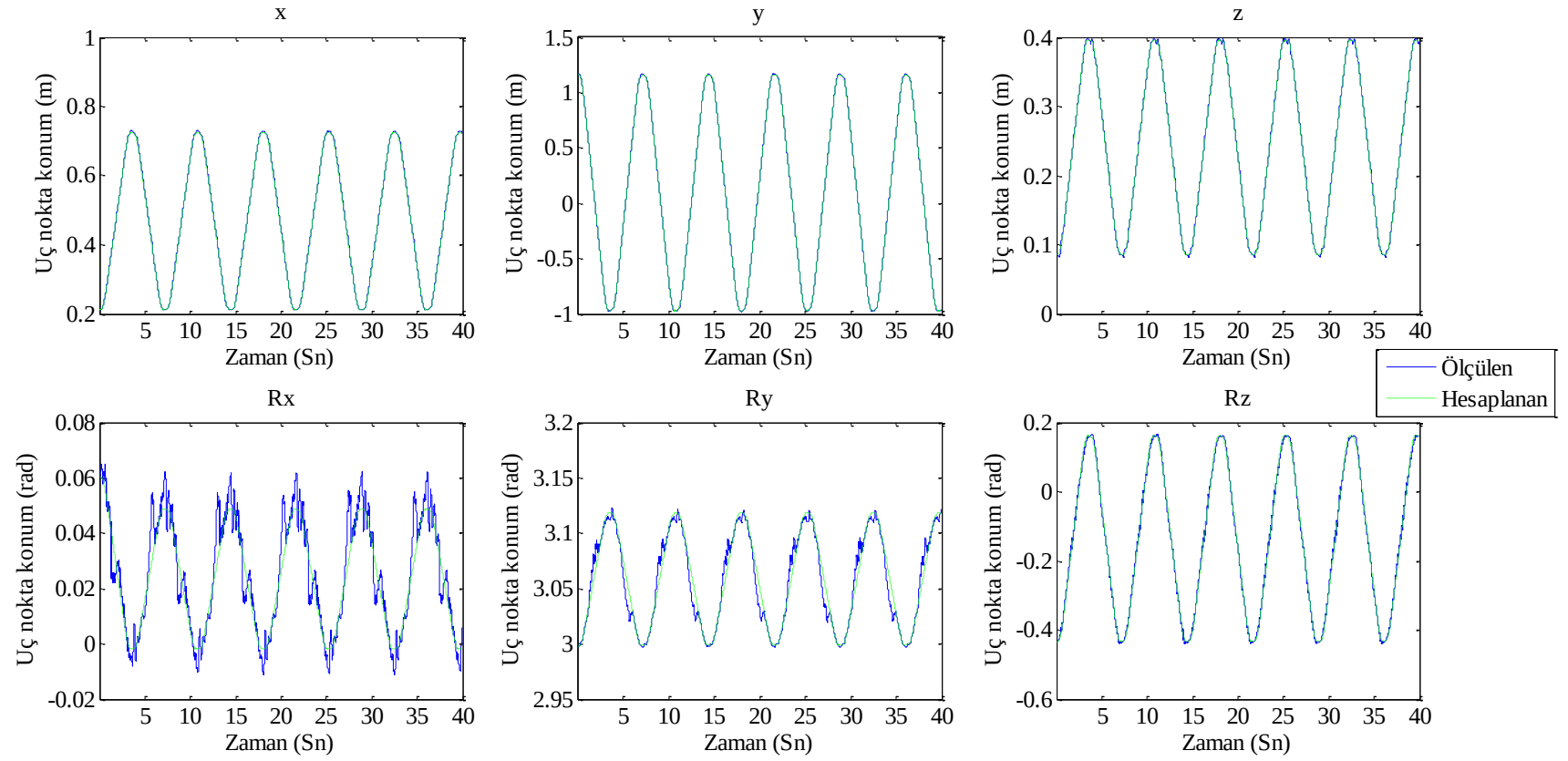
Alma&bırakma(pick&place) uygulamaları manipölatör tarafından iş parçasının bir noktadan alınıp başka bir noktaya bırakılması olarak tanımlanabilir. Bu iki nokta arasındaki hareket, manipölatörün hızı ve yüksek tekrarlanabilirlik hassasiyeti, ortaya çıkan ürünün kalitesini ve üretim hızını artırmaktadır. Staubli RX160 manipölatör ile yapılan uygulamada temsili olarak hareketli bir bant üzerinden alınan iş parçası döner tabla üzerindeki hedef konuma bırakılmaktadır. Bir başka deyişle sabit ve farklı olan iki nokta arasında tekrarlayan hareket yaptırılmaktadır. Yörünge bu iki nokta arasında sınırlandırılmış bir yol oluşturularak planlanmaktadır. Hareket sırasında konum kontrolü uygulanmaktadır. 3 farklı hız yapılan çalışmanın tespit edilen uç nokta hızının %30'u için alınan sonuçları bu bölümde verilmekte diğer sonuçlar Ek D1 'de bulunmaktadır. Ayrıca çalışma sonucu manipölatörün tekrarlanabilirlik sonuçları Çizelge 3.3 'de verilmişti. Görev uzayında yörünge planlamasıyla uç nokta maksimum hızının %30'u ile hareket etmesiyle eklem açısız konum grafiği Şekil 4.1'de gösterilmektedir. Bunu sırasıyla eklem açısız hızı, uç nokta konum, uç nokta konum % hata, uç nokta hız ve eklem tork grafikleri takip etmektedir.



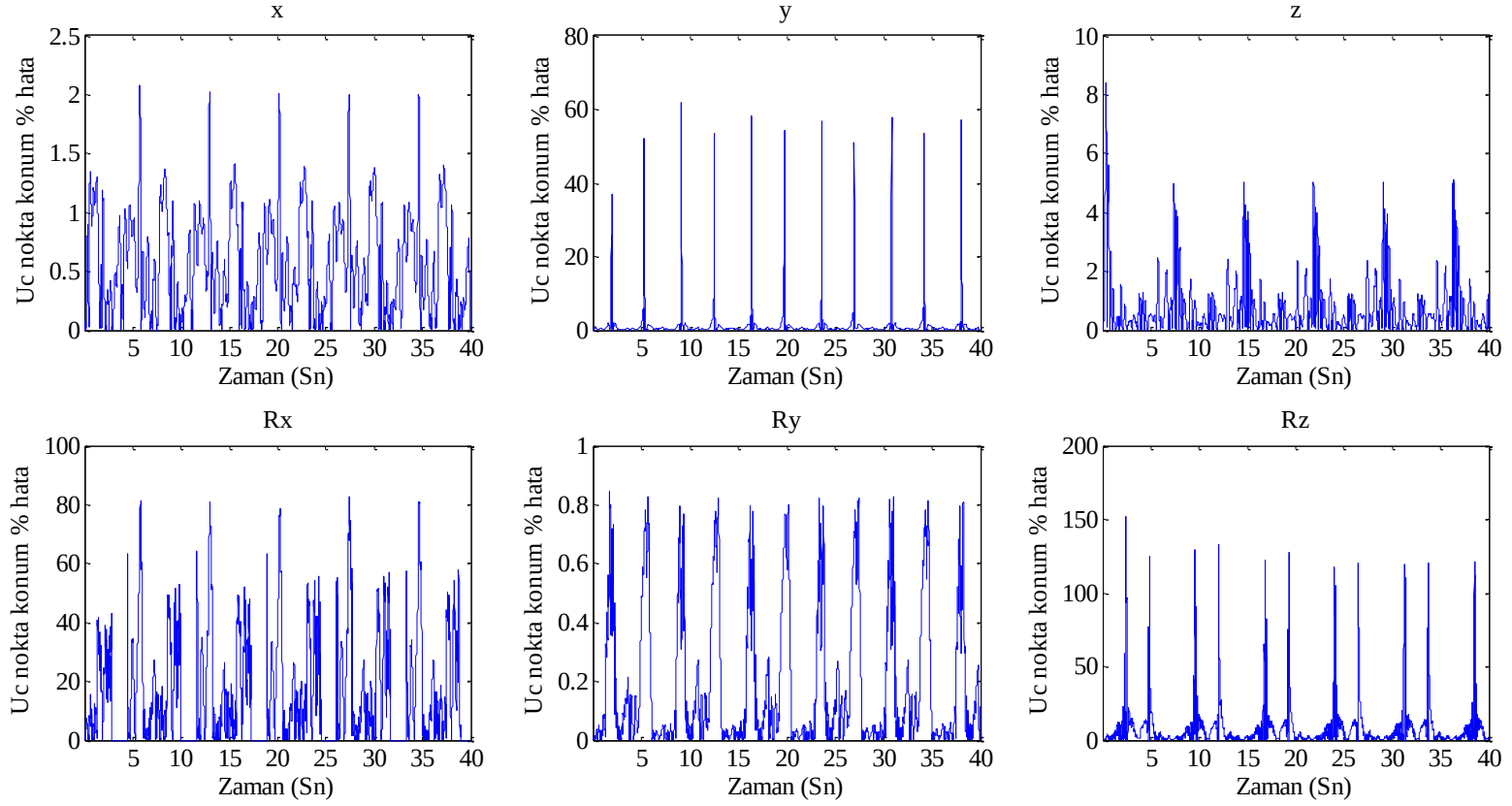
Şekil 4.1 : Tüm eklemlerin açısal konum grafikleri.



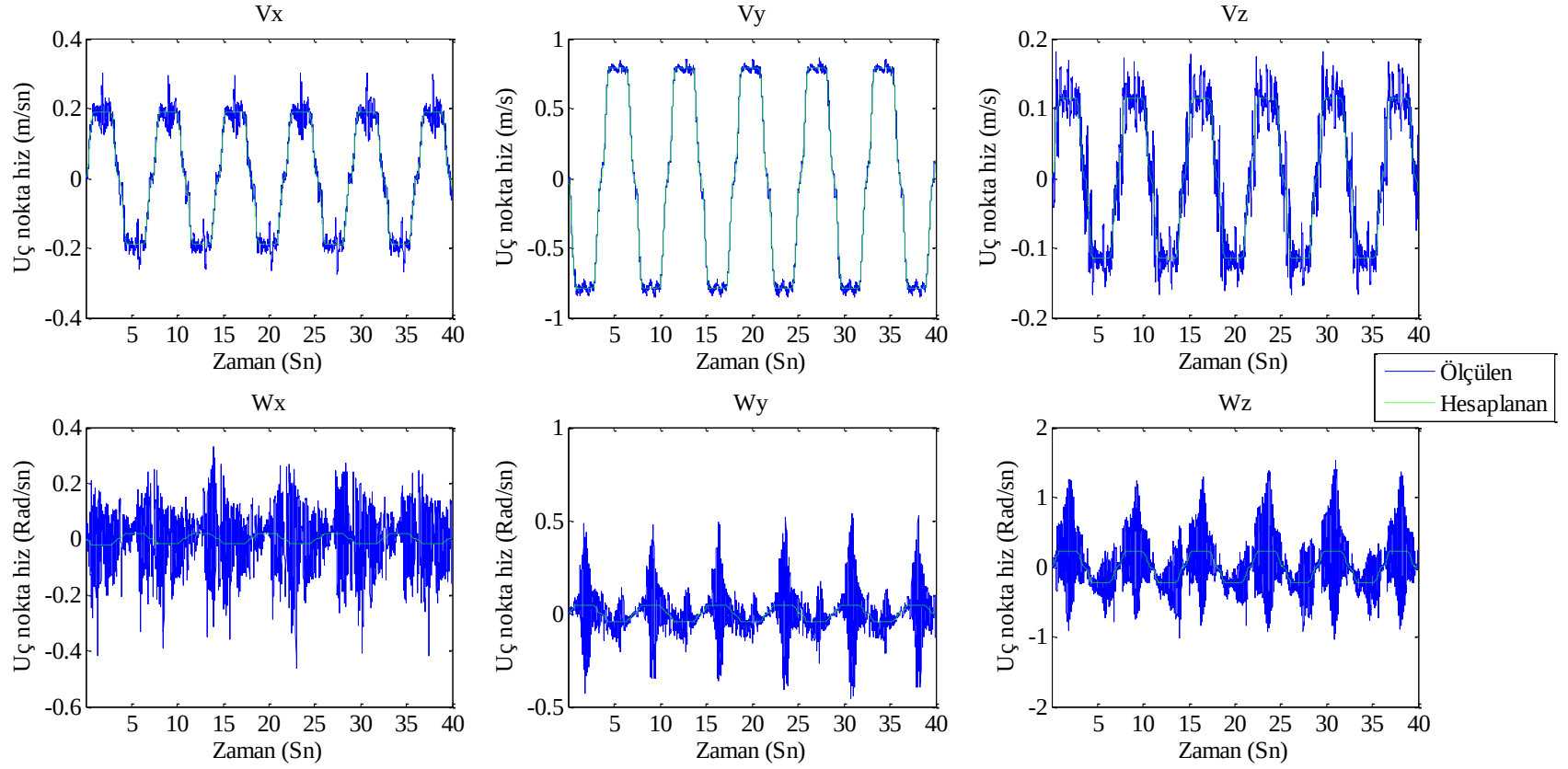
Şekil 4.2 : Tüm eklemlerin açısal hız grafikleri.



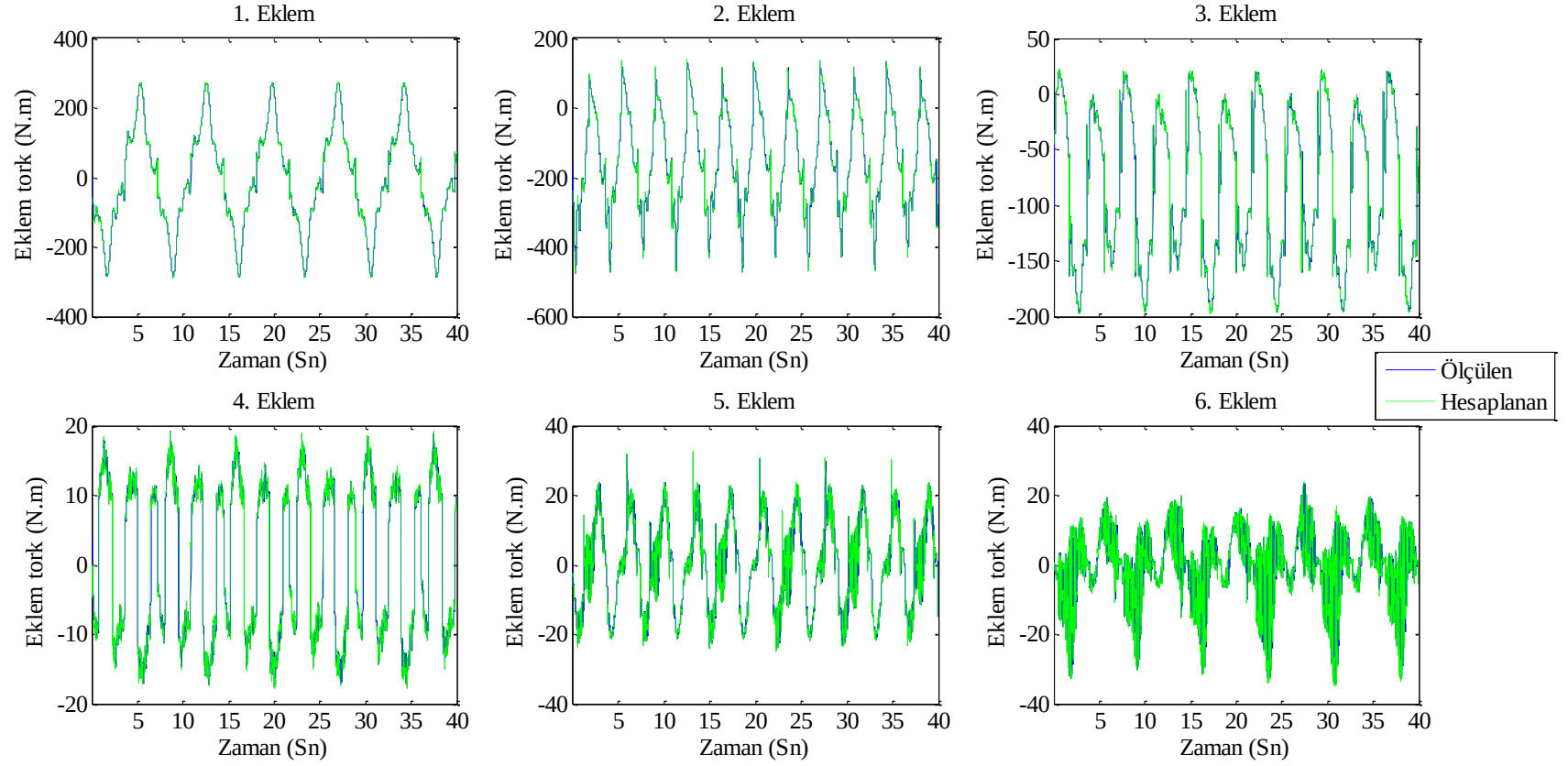
Şekil 4.3 : Uç nokta konum grafikleri.



Şekil 4.4 : Uç nokta konum % hata grafikleri.



Şekil 4.5 : Uç nokta hız grafikleri.



Şekil 4.6 : Tüm eklemlerin tork grafikleri.

4.2 Değişken Yükleme Durumunda Hareket

Manipülatörün konum kontrolcü performansı farklı ağırlıklar taşınması gerektiğinde önem kazanmaktadır. Kontrolcünün bu bozucu girdiye karşı hızlı yükselme ve yerleşme süreleri, düşük aşım değeri ve kalıcı hata gibi performans kriterlerine göre cevap vermelidir. Bu nedenle manipülatör uç noktasına 2 kg ve 5 kg ağırlığındaki iki farklı iş parçası tutturulmaktadır. Staubli RX160 manipülatörün nominal hızlarda taşıyabileceği ağırlık maksimum 20 kg.'dır.

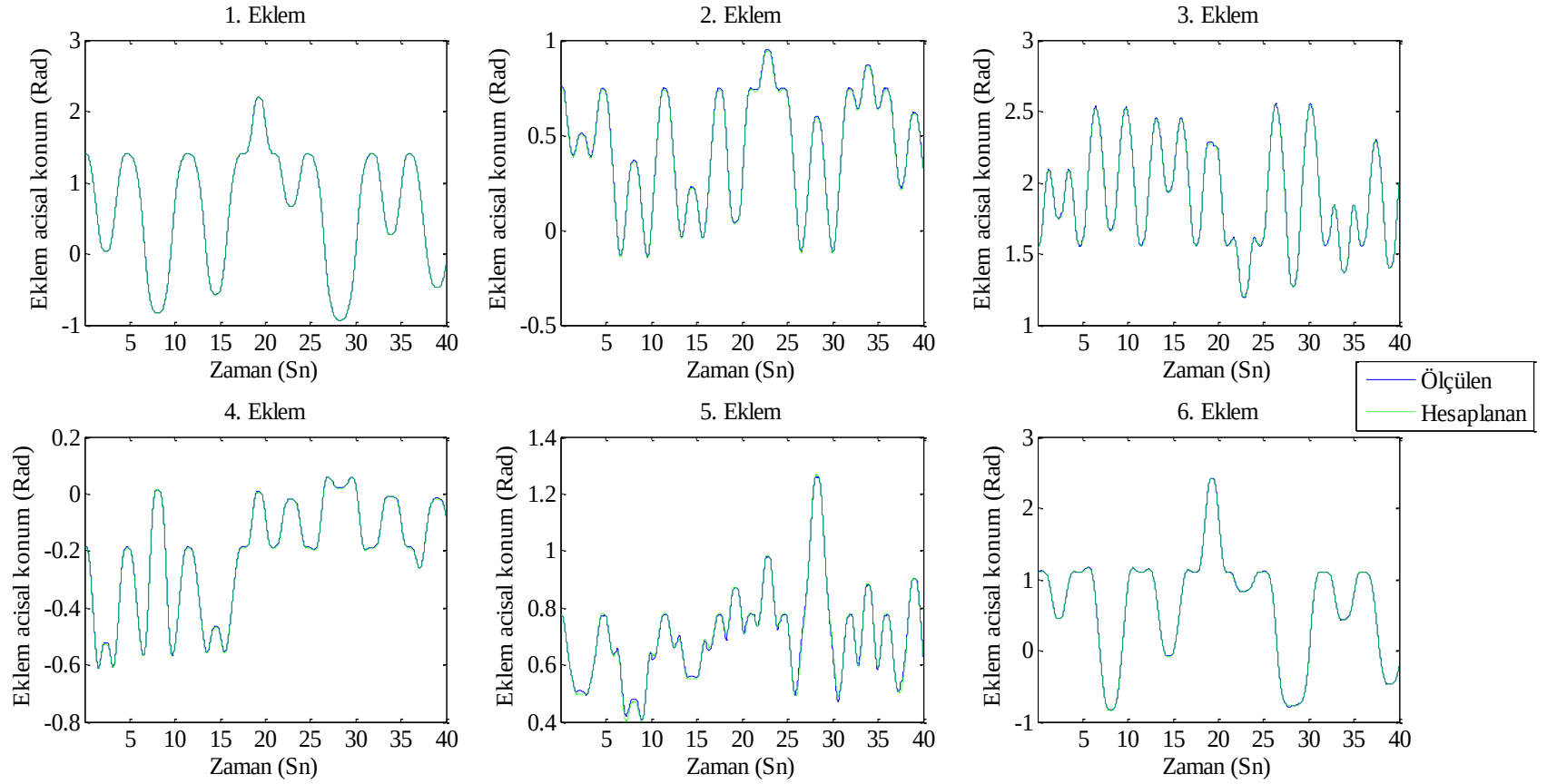
Kontrolcü performansını belirlemek için hassasiyet ve tekrarlanabilirlik değerleri ölçülmektedir. Hassasiyeti belirleyebilmek için uç nokta farklı noktalardan belirli bir noktaya hareket ettirilmektedir. Tekrarlanabilirlik değeri için iki nokta arasında tekrarlayan hareketler yaptırılmaktadır. Yörünge görev uzayında tanımlanmakta ve 3 farklı hız için deneyler tekrarlanmaktadır. Bu bölümde 5 kg ağırlığındaki iş parçasıyla uç noktanın tespit edilen maksimum hızının %30'u için uç noktanın hassasiyetinin belirlenirken elde edilen Şekil 4.7 ve devamında verilmektedir. Diğer grafikler Ek D2'de yer almaktadır. 2 ve 5 kg.'lık iş parçaları taşınırken manipülatör konum kontrolcü performansları Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2'de verilmektedir.

Çizelge 4.1 : 2 kg iş parçası taşınırken konum kontrolcü performansı

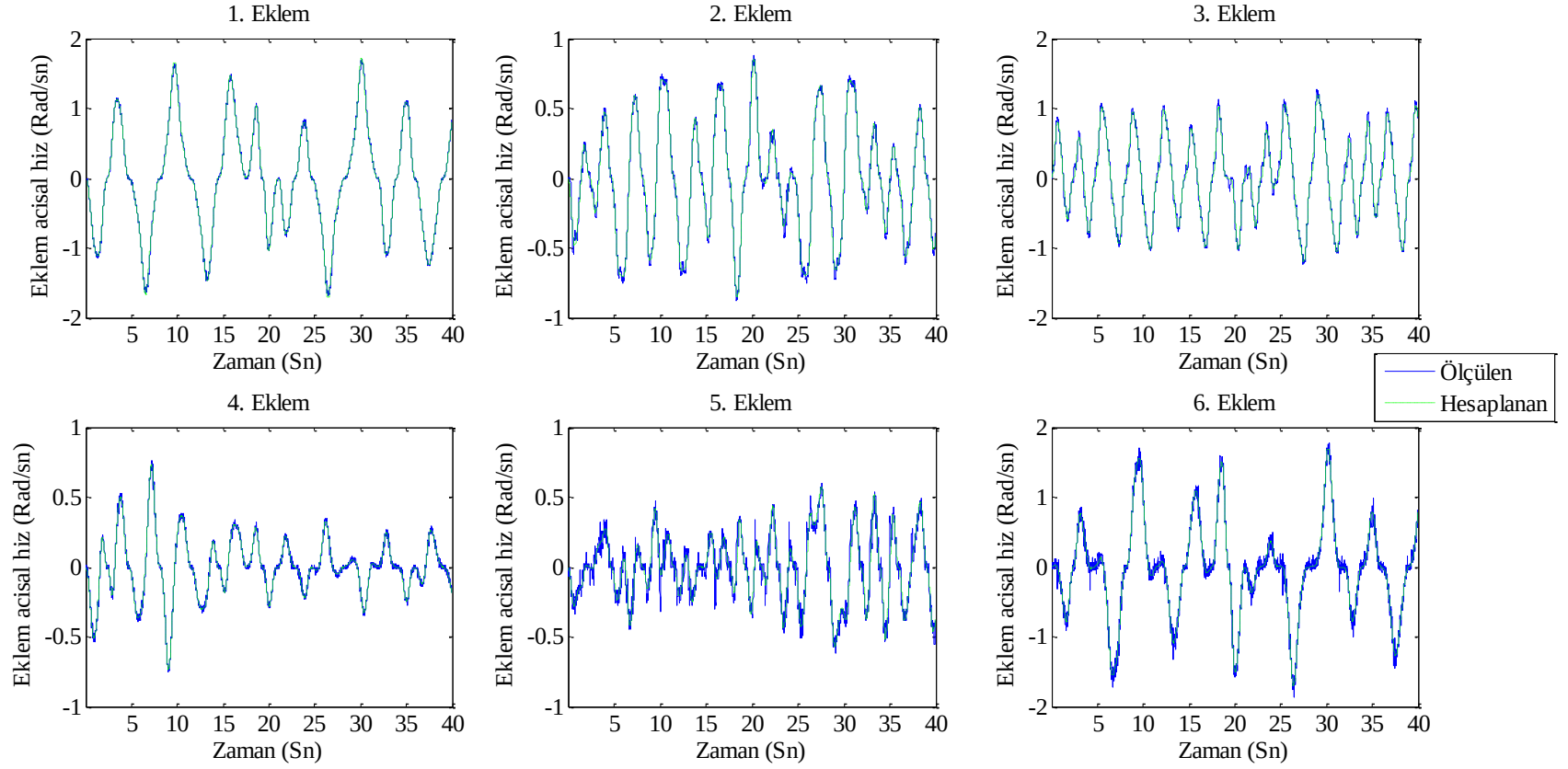
x,y,z,D -> (mm)		Eklem Uzayında Yörünge Planlama				Görev Uzayında Yörünge Planlama			
		x	y	z	D	x	y	z	D
Hassasiyet	30%	1,180	3,425	5,240	6,370	0,797	7,681	4,195	8,788
	60%	2,239	2,022	3,485	4,609	0,074	7,639	4,390	8,811
	100%	8,093	1,005	2,304	8,474	0,172	7,578	4,511	8,821
Tekrarlanabilirlik	30%	0,125	0,041	0,144	0,195	0,068	0,138	0,091	0,179
	60%	0,153	0,102	0,084	0,202	0,422	0,285	0,158	0,533
	100%	0,140	0,135	0,317	0,372	0,175	0,152	0,149	0,276

Çizelge 4.2 : 5 kg iş parçası taşınırken konum kontrolcü performansı

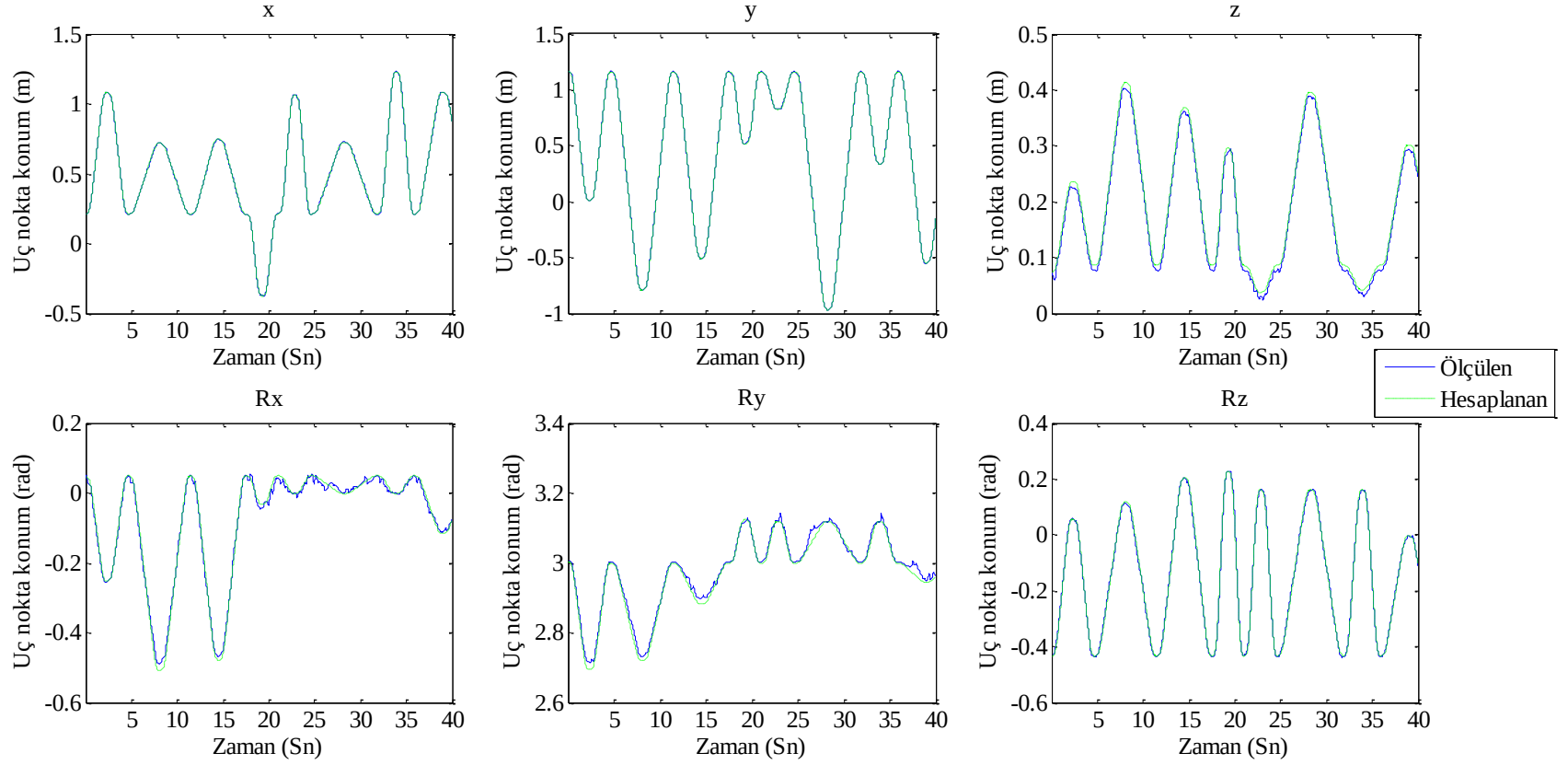
x,y,z,D -> (mm)		Eklem Uzayında Yörünge Planlama				Görev Uzayında Yörünge Planlama			
		x	y	z	D	x	y	z	D
Hassasiyet	30%	4,726	1,906	9,902	11,136	0,036	4,803	8,275	9,568
	60%	1,234	0,647	8,308	8,424	0,341	4,820	8,578	9,845
	100%	8,230	2,225	7,579	11,407	0,278	4,890	8,738	10,017
Tekrarlanabilirlik	30%	0,142	0,191	0,285	0,371	0,162	0,227	0,176	0,330
	60%	0,293	0,170	0,192	0,389	0,350	0,278	0,285	0,530
	100%	0,224	0,283	0,134	0,385	0,176	0,232	0,177	0,341



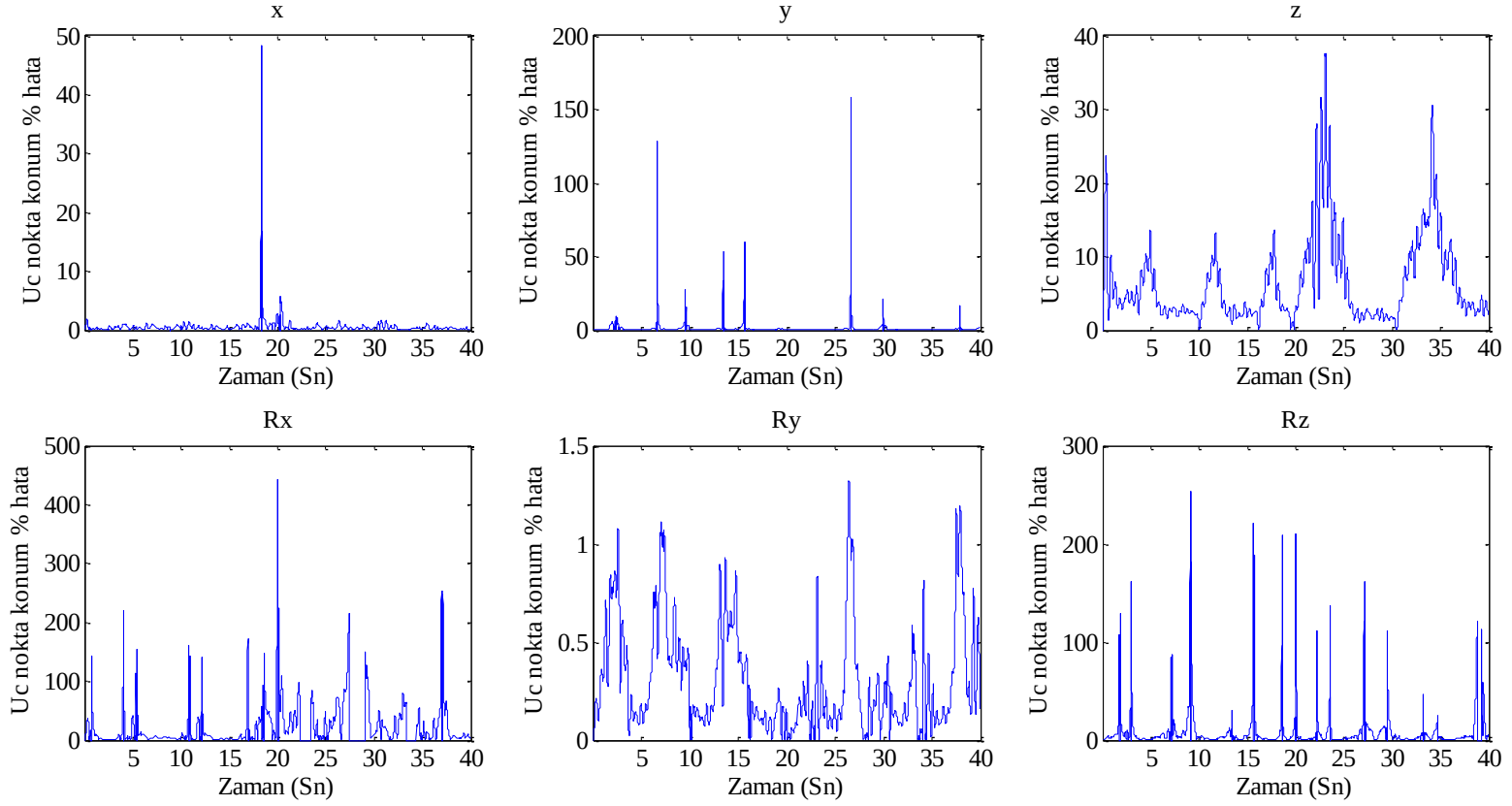
Şekil 4.7 : Tüm eklemlerin açisal konum grafikleri.



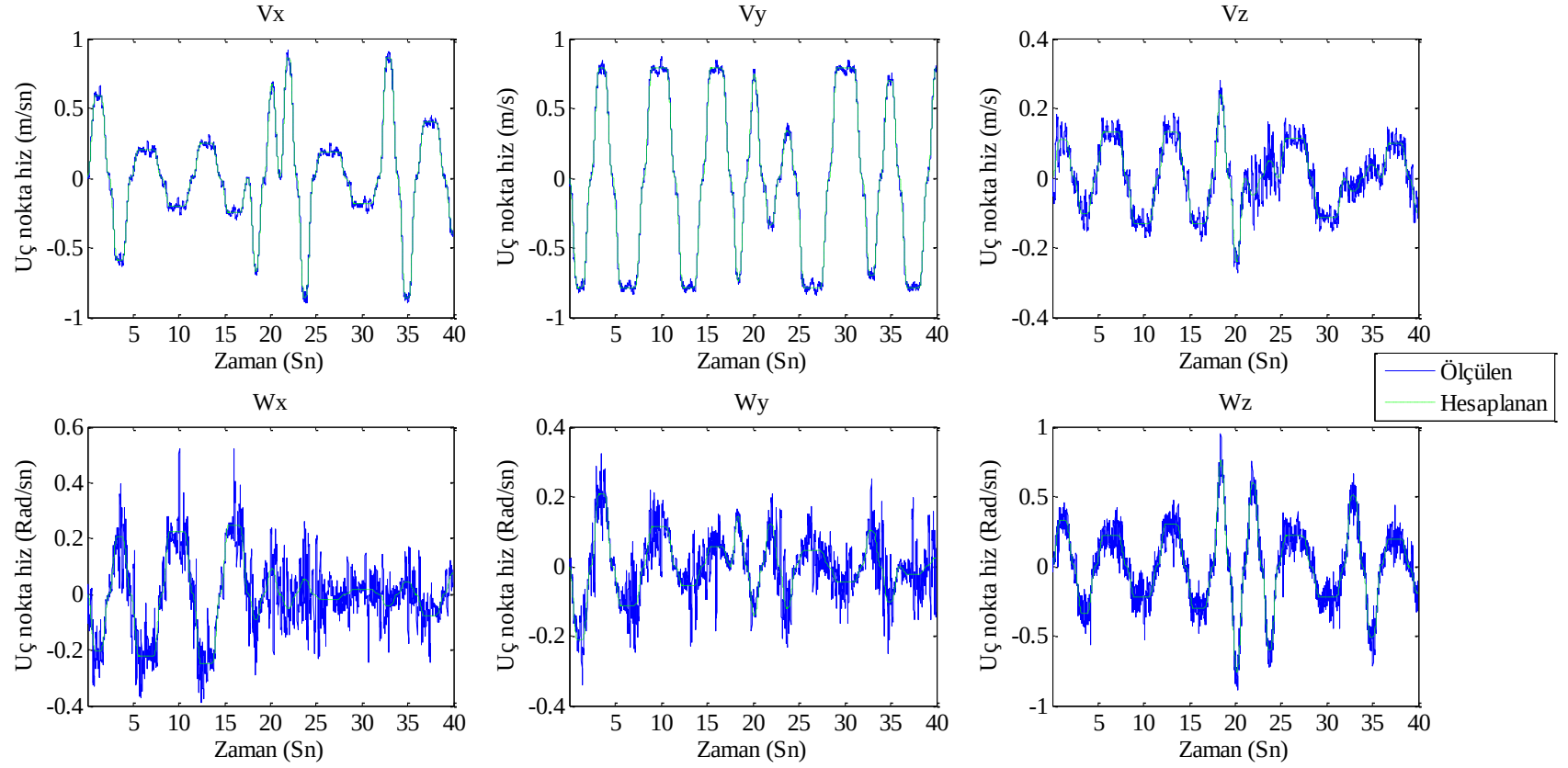
Şekil 4.8 : Tüm eklemlerin açısal hız grafikleri.



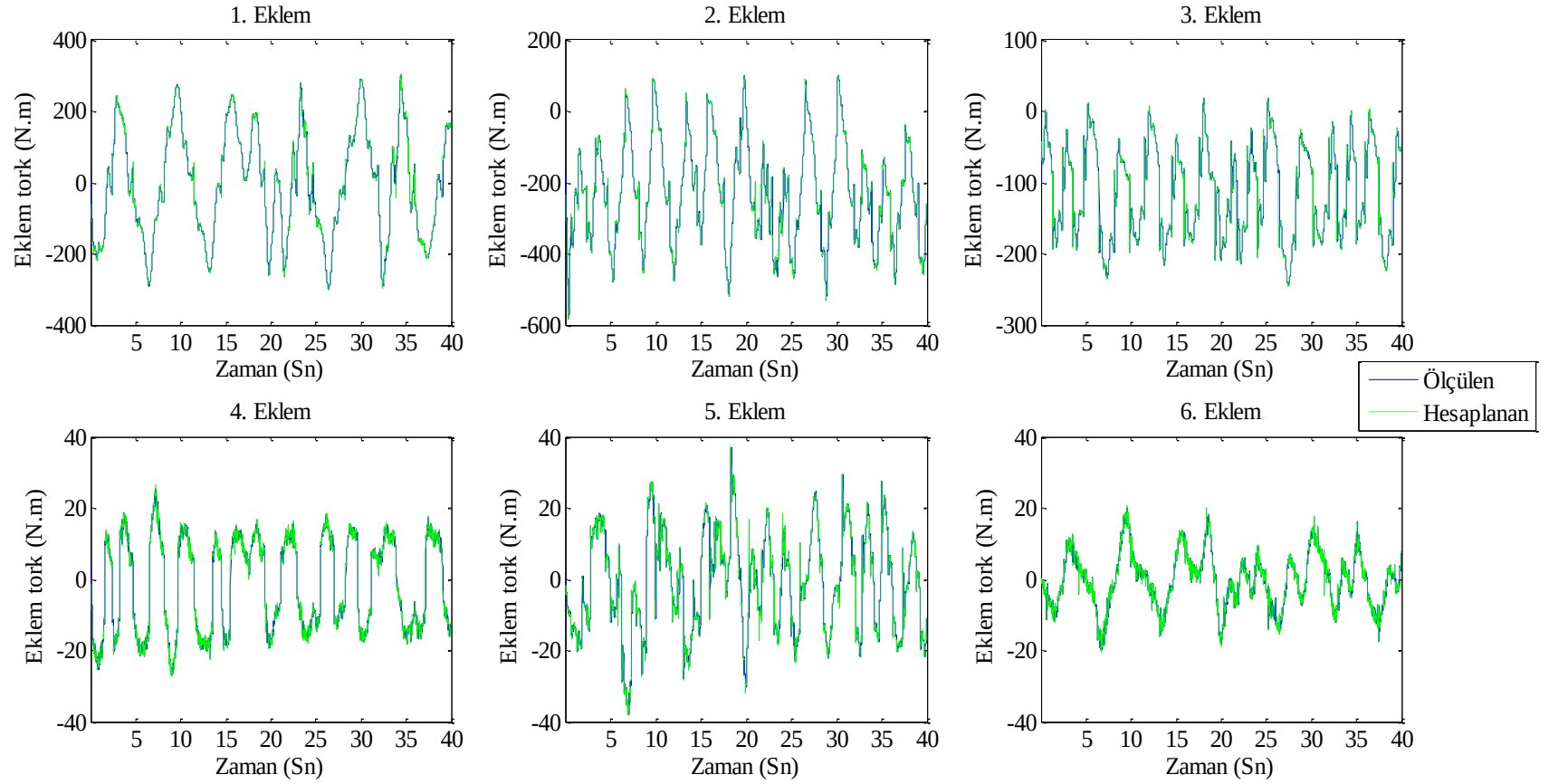
Şekil 4.9 : Uç nokta konum grafikleri.



Şekil 4.10 : Uç nokta konum % hata grafikleri.



Şekil 4.11 : Uç nokta hız grafikleri.



Şekil 4.12 : Tüm eklemlerin tork grafikleri.

5. SONUÇLAR

Bu tezde Staubli RX160 manipülatörün kinematik, dinamik ve sürtünme modelleri oluşturulmuş; yay ve sürtünme parametreleri gibi eksik parametreler tanımlamış ve gerçek zamanlı kontrolcüsü üzerinde manipülatör kontrolü gerçekleştirilmiştir. Gerçek zamanlı uygulamada hassas sonuçların elde edilmesi ve manipülatör performansı, mekanik sistemin fiziksel özellikleri gerçeğine yakın modellenmesine paralel gelişim göstermektedir. Dinamik modelin oluşturulması fiziğin temel yasaları ile birlikte Staubli firmasından temin edilen kütle atalet momenti, kütle ve kütle ağırlık merkezlerinin kullanılmasıyla dinamik model analitik olarak hesaplanmıştır. Bu modele daha sonra yay ve sürtünme modeli deneysel yöntemlerle türetilmiştir. Bu model kullanılarak manipülatöre konum kontrolü uygulanmıştır. Farklı uç nokta hareketleri ve ağırlıkları için elde edilen sonuçlar ortaya konmuştur.

Yapılan çalışmalar dikkate alındığında aşağıdaki sonuçlar çıkarılmaktadır:

- Aynı referans hareket için manipülatörün Val3 arayüzü ölçülen tork değerleri hesaplanan tork değerleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda harekette ivmelenme ve yavaşlamanın gerçekleştiği durumlarda her iki tork değeri arasındaki hatalar hızın sabit olduğu duruma göre fazladır. Bunun da nedeni doğrusal olmayan sistemde model hataların yüksek olmasıdır. Kütle ve kütle atalet değerlerinin tanımlama yapılarak tespit edilmesi modelin iyileştirilmesine ve daha yüksek performanslı konum kontrolü yapılmasına olanak sağlamaktadır.
- Dinamik model üzerinden sürtünme modeli olmaksızın hesaplanan ve ölçülen tork değerleri arasındaki % hata Şekil 2.12’de verilmişti. Sürtünme modeli dinamik modele dahil edildikten sonra hesaplanan %hata ise Şekil 2.51’de verilmiştir. Her iki grafik farklı referans hareketler için elde edilmiş olsa da rastgele yapılan hareketlerin vermiş olduğu sonuca göre sürtünme modeli ortalama hatanın düşmesini sağlamıştır. Buna ilave olarak kütle ve kütle atalet momentlerinin son üç eklemden oluşturduğu tork göreceli olarak

sürtünme torkuna göre daha düşüktür. Bu nedenle sürtünme modeli son üç eklem için sürtünme torku modellemede belirleyici olmaktadır.

- Sürtünme modelinde kayma öncesi sürtünme(pre-sliding) modeli tanımlanmadığı için her bir eklem hareketsizken veya dönüş yönüne ters yönde hareket edildiğinde hesaplanan ve ölçülen sürtünme tork değerleri arasındaki hatalar artmaktadır. Bu sonuç Şekil 2.49 ve Şekil 2.50’de 3. eklem için verilen grafiklerde açıkça görülmektedir. Ayrıca sürtünme modelinde sıcaklığa bağlı sürtünme modeli değişmekte ve bu değişim model de ihmal edilmektedir.
- Yapılan deneysel çalışmalarda manipülatör en yüksek konum kontrol performansını eklem nominal hızının %60 olarak alındığı durumda gerçekleşmektedir. Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2 ‘de görüldüğü gibi eklem düzeyinde yörünge planlamada uç noktanın hassasiyetini %60 hız için elde edilmektedir. Sürtünme modelinde yüksek hızlarda model hatalarının düşük olması bu durumu açıklamaktadır.
- Manipülatörün uç nokta hassasiyeti ve tekrarlanabilirlik değerleri göz önüne alındığında eklem uzayında planlanan yörünge ile alınan sonuçlar görev uzayındakine göre daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Bunun da nedeni kontrolcü katsayılarının ayarlanması eklem uzayındaki planlama sonucu elde edilen yörünge kullanılarak yapılmış olmasıdır.
- Değişken yükler altında elde edilen manipülatör konum kontrolcü performansı Çizelge 3.3, Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de verilmektedir. Sonuçlar arasındaki farklılıklar, dinamik ve sürtünme modeli ile konum kontrolcü katsayılarının uç noktada ağırlık bulunmadığı durumda belirlenmiş olmasıdır. Bu nedenle değişken yükler altında manipülatörün uç nokta performansı farklılık göstermektedir.

Tezin amaç bölümünde de belirtildiği gibi manipülatörün LLI kullanıcı arayüzü geliştirilmeye ve iyileştirmeye açıktır. Bu nedenle gelecekte çalışmalar için aşağıda öneriler ayrıca belirtilmektedir.

- Ağırlık dengeleyici olarak kullanılan yayın 3. eklem ve 2. eklemde sürtünme açısından yataklarda oluşturduğu fiziksel etki inceleyebilir. Yapılan analizlerde

3. eklem sürtünme tork değeri 3. eklemin konumuna bağlı olarak yüksek değerde sapmalar oluşmaktadır.

- Sürtünme modelinin daha geniş bir modelle temsil edilmesi. Kayma ncesi sürtünmenin de modellenmesiyle model hatalarının azaltılması mümkün görünmektedir.
- Kontrol yönteminin değiştirilmesi veya ölçülen konum ve hız sinyalinin filtrelenmesiyle sistemin kararlılığını bozmadan türevsel katsayının artırılması. Yerleşme yükselme zamanları düşük performans gösteren kontrolcü bu sayede bozucu girdilere karşı daha hızlı tepki verebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Danijela Ristić-Durrant, Robotics 1 Lectures Notes, 2009.
- [2] Mark W. Spong, Seth Hutchinson, and M. Vidyasagar, First Edition. Robot Modeling and Control, First Edition.
- [3] International Federation of Robotics, Url-1 <<http://www.ifr.org/industrial-robots>>, 15.06.2013'de girildi.
- [4] Ivan Irgala, Alexander Gmitterko, Róbert Surovec, Martina Vacková, Erik Prada, Mária Kenderová. Manipulator End-Effector Position Control. Procedia Engineering, 48: 684 – 692, 2012.
- [5] F. Pertin and J.-M. Bonnet-des-Tuves. Real time robot controller abstraction layer. In Proc.Int. Symposium on Robots (ISR), Paris, France, March 2004
- [6] Robert Rens Waiboer. Dynamic Modeling, Identification And Simulation Of Industrial Robots, 2007.
- [7] W. Khalil, E. Dombre. Modeling, Identification and Control of Robots. 2002
- [8] Pinghan Shi. Robotic Manipulator Modeling and Control. 1987.
- [9] Url-2 < <http://www.staubli.com/en/robotics/manipulator-support-data> > 11.06.2013'de girildi.
- [10] Staubli. Arm – RX series 160 family Instruction Manuel 01/2008.
- [11] Url-3 < <http://www.ati-ia.com/products/ft/sensors.aspx> > 12.06.2013'de girildi.
- [12] Zafer Bingül, Oğuzhan Karahan. Modeling and Identification of STAUBLI RX60 Robot.-2008
- [13] Serkan Aydın, Bekir Karlik. An improved approach to the solution of inverse kinematics problems for robot manipulators. Engineering Applications of Artificial Intelligence 13: 159-164, 2000.
- [14] Li-Chun Tomy Wang, Chih Cheng Chen. A Combined Optimization Method for Solving the Inverse Kinematics Problem of Mechanical Manipulators. IEEE Transactions on robotics and automation Vol 1, No 4 August, 1991.
- [15] J. Y. S. Luh, M. W. Walker and R. P. C. Paul. On-Line Computational Scheme for Mechanical Manipulators. J. Dyn. Sys. Meas, Control 102(2), 69-76, 1980.
- [16] Zafer Bingül, Oğuzhan Karahan. Dynamic identification of Staubli RX-60 robot using PSO and LS methods. Expert Systems with Applications 38: 4136–4149, 2011.
- [17] Maria Letizia Corradini, Valentino Fossi, Andrea Giantomassi, Gianluca Ippoliti Sauro Longhi, Giuseppe Orlando. Discrete time sliding mode control of robotic manipulators: Development and experimental validation. Control Engineering Practice 20 :816–822, 2012.

EKLER

EK A: LLI programlama arayüzü

EK B1: Jacobian matrisi

EK B2: Sürtünme modeli

EK B3: Dinamik model deneysel sonuçlar

EK C1: Hareket denklemleri

EK C2: Maksimum ivme ve ekivme

EK C3: Konum kontrolü deneysel sonuçlar

EK D1: İki nokta arasındaki hareket sonuçları(nominal hızın %60'ı ve %100'ü için)

EK D2: Değişken yükleme durumunda hareket sonuçları(nominal hızın %60'ı ve %100'ü için)

EK A LLI programlama arayüzü

Yapım / yıkım arayüzü

Manipülâtör kontrolörü içerisinde manipülâtör ve uygulamalarla ilgili bilgileri içeren ‘sys’, ‘usr’ ve ‘log’ dizinleri bulunmaktadır. ‘sys’ dizini içerisinde sistemi tanımlayan ve ayarları yapılandıran parametreleri içermektedir. ‘usr’ dizininde girdi ve çıktılar ve LLI kütüphanesi bulunmaktadır. ‘log’ dizininde ise manipülâtör kontrolü sırasında oluşan hatalar yer almaktadır.

Her yapıcı fonksiyon ‘sys’, ‘usr’ ve ‘log’ dizinlerindeki bilgileri kullanmaktadır. Bu dosyalar içerisindeki parametreler mevcut durumda kullanılmakta olan manipülâtöre ait olmak zorundadır. Farklı bir manipülâtöre ait veya eksik bulunan bir parametre arayüzün doğru kurulmasına engel olacaktır. Yapım sırasında dinamik bellek ayrımı bellek üzerinde yapılmaktadır. Yapım fonksiyonlarının çalışması sırasında oluşabilecek yapım hataları bir dizin altında kaydedilmektedir.

Yapım/ yıkım arayüzünde LLI_construct, LLI_constructKinOnly ve LLI_destroy fonksiyonları bulunmaktadır.

LLI_construct : Bu yapıcı fonksiyon kontrol ve kinematik programlama arayüzlerine erişimi mümkün kılmaktadır. Manipülâtör yapım sonrasında kararlı bir yapıda güvenli durumdadır. CyclicFct fonksiyonu ile bağlantı kurulmaktadır. Eğer yapımcıda herhangi bir meydana gelirse, LLI_init fonksiyonu düzgün olarak çalışmaz ve sadece LLI_state fonksiyonu hatasız olarak çağrılmaktadır.

LLI_constructKinOnly: Bu yapımcı sadece kinematik programlama arayüz girişine izin vermektedir.

LLI_destroy: Tüm dinamik hafıza serbest bırakılmaktadır. Yıkım sonrasında manipülâtör stabil durumdadır. Düzgün yıkım ardından manipülâtör arayüzün tekrar yapılması mümkündür.

Sistem programlama arayüzü

Sistem programlama arayüzünde LLI_state, LLI_ioctl, hata yönetimi (LLI_pluginEventFunc), giriş çıkış fonksiyonları ve kaydetme fonksiyonları yer almaktadır. Bu fonksiyonlar daha önceden çağrılan yapımcıyı kullanmaktadır.

LLI_state: LLI_state fonksiyonu ile sistemin durumu hakkında bilgiye sahip olunur. Senkronize ve senkronize olmayan içeriklerin ikisinde de kullanılabilen bir fonksiyonudur.

Bu fonksiyonla elde edilen bilgiler:

- Başlandı - başlanmadı - lisans yok
- Etkinleştirildi - etkinleştiriliyor- durduruluyor- durduruldu
- Kalibre oldu- kalibre oluyor- kalibre olmadı
- Uyarlandı - uyarlanıyor (örneğin, manipülatör konumu sabit)
- Acil duruş - acil duruş yok

LLI_ioctl: LLI_ioctl fonksiyonu sistem konfigürasyonun okunmasını ve değiştirilmesini sağlamaktadır. İçeriğinde bulunan fonksiyonların bazıları hem senkronize hem de senkronize içeriğe sahip durumlarda kullanılırken bazıları sadece senkronize içeriği olmayan durumlarda kullanılabilmektedir. LLI_ioctl fonksiyonun içeriği:

LLI_GET_SOFTWARE_VERSION: LLI kütüphanesinin yazılım versiyonu hakkında bilgi sahibi olmayı sağlar. Aşağıda bu parametrenin bir kullanışı gösterilmektedir.

LLI_GET_ROBOT_TYPE: Uygulamada kullanılan manipülatör modelinin kontrolörden okunmasını sağlamaktadır.

LLI_GET_JNT_NUMBER: Uygulamada kullanılan manipülatörün kaç eksenli olduğu bilgisi alınmaktadır. İşaretsiz olmayan tam sayı ile belirtilmektedir.

LLI_SET_USER_MARKS: Kullanıcı noktaların ayarlanmasını ve depolanmasını sağlamaktadır.

LLI_GET_USER_MARKS: Kullanıcı noktalarının ayarlanması ve depolanması sağlamaktadır.

LLI_GET_JNT_RANGE: Robot kolunun yazılım eklem limitlerinin alınmasını sağlamakta, minimum ve maksimum değerlerini vermektedir.

LLI_RECOVER_ABS_JNT_POS: CS8 kontrolörler ve senkronize olmayan içerikler için geçerli olan bir fonksiyondur. Kalibrasyon tablosundaki doğru kalibrasyon

parametrelerini yeniden düzenlemektedir. (CS8 DAPS board) Robotun fonksiyona geçilecek olan noktanın yanında olması gerekmektedir. (her bir eklem $\pm 1/2$ motor dönüş açısı kadar döndürülebilir).

LLI_SET_ABS_JNT_POS: Senkronize olmayan içerikler için geçerli olan bir fonksiyondur. Her eksen konumunun geçilecek olan fonksiyonun konumu ile aynı eşleştirmek için değiştirilmesini sağlamaktadır. Her eksenin yeni sıfır noktası sistem konfigürasyon dosyası arm.cfx'de depolanmaktadır.

LLI_GET_CYCLE_TIME: Robotun her iki ana kesmesi arasındaki işlem süresini almayı sağlamaktadır. İşlem süresinin birimi saniyedir.

LLI_GET_SYNCHRO_TASK_PRIORITY: Senkronize görevlere uygulamak için VxWorks görev önceliğini almayı sağlamaktadır.

LLI_SET_TORQUE_MODE: Sadece senkronize olmayan içerikler için geçerli olmaktadır. Standart konum kontrolü modundan tork kontrol moduna geçişi sağlamaktadır.

LLI_SET_POS_VEL_MODE: Sadece senkronize olmayan içerikler için geçerli olmaktadır.

Hata Yönetici (LLI_plugEventFunc): Kontrolör çıkışlarının hataları seri port COM1 bulunmaktadır (115200, 8bit, benzerlik yok, 1 durma biti, VT100 emülasyonu). Hatalar standart olarak error.log dosyasında yer almaktadır. Eğer hataların farklı bir yere kaydedilmesi isteniyorsa LLI_plugEventFunc fonksiyonu kullanılarak kaydedilmek istenilen yer değiştirebilmektedir.

Giriş / Çıkış Fonksiyonları:

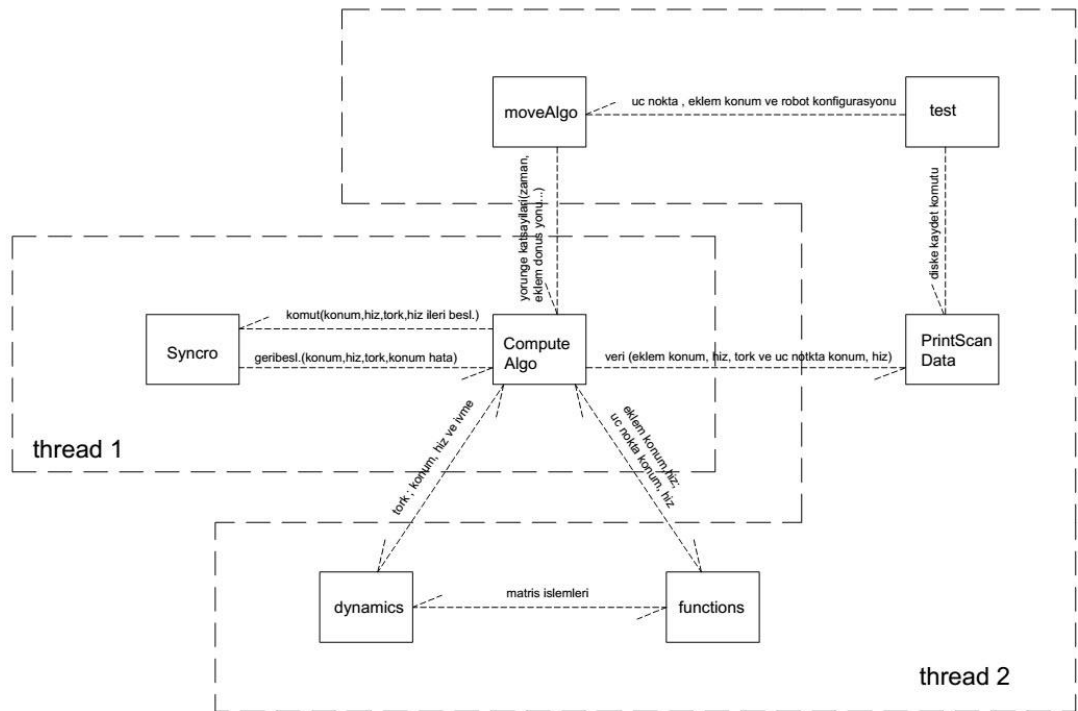
Giriş / çıkışlar kendi ismiyle kaydedilmektedir, bu şekilde kaydedilmesi kullanıcı açısından kolaylık sağlanmaktadır. LLI_getDinId ve LLI_DoutId isimleri hızlı bir giriş çıkış erişimi için sonradan LLI_readDio veya LLI_writeDout tarafından kullanılacak bir tanımlamaya çevirmektedir.

LLI_getDinId: Dijital giriş üzerinde bir tanımlama döndürmekte, giriş parametresi manipülatör kontrolöründe tanımlanan Din'dir. Senkronize olmayan içerikte kullanılmaktadır.

LLI_getDoutId : Dijital çıkış üzerinde bir tanımlama döndürmekte, çıkış parametresi manipölatör kontrolöründe tanımlanan Dout'dur. Senkronize olmayan içeriklerde kullanılmaktadır.

LLI_readDio : Girişin veya çıkışın değerini döndürmektedir. Bu değerler: 0,1 veya tanımlanmamaktadır.

LLI_writeDout : Çıkış 1 veya 0 olarak hazırlamaktadır.



Şekil A.1 : LLI kullanıcı arayüz program akış şeması.

EK B1 Jacobian matrisi

$$J_{11} = - (3*s(\theta_1))/20 - (11*c(\theta_5)*(c(\theta_2 - \pi/2)*s(\theta_1)*s(\pi/2 + \theta_3) + c(\pi/2 + \theta_3)*s(\theta_1)*s(\theta_2 - \pi/2)))/100 - (11*s(\theta_5)*(c(\theta_4)*(c(\theta_2 - \pi/2)*c(\pi/2 + \theta_3)*s(\theta_1) - s(\theta_1)*s(\theta_2 - \pi/2)*s(\pi/2 + \theta_3)) + c(\theta_1)*s(\theta_4)))/100 - (33*c(\theta_2 - \pi/2)*s(\theta_1))/40 - (5*c(\theta_2 - \pi/2)*s(\theta_1)*s(\pi/2 + \theta_3))/8 - (5*c(\pi/2 + \theta_3)*s(\theta_1)*s(\theta_2 - \pi/2))/8;$$

$$J_{12} = -c(\theta_1)*((33*s(\theta_2 - \pi/2))/40 + (5*s(\theta_2 - \pi/2)*s(\pi/2 + \theta_3))/8 + (11*c(\theta_5)*(s(\theta_2 - \pi/2)*s(\pi/2 + \theta_3) - c(\theta_2 - \pi/2)*c(\pi/2 + \theta_3)))/100 - (5*c(\theta_2 - \pi/2)*c(\pi/2 + \theta_3))/8 + (11*c(\theta_4)*s(\theta_5)*(c(\theta_2 - \pi/2)*s(\pi/2 + \theta_3) + c(\pi/2 + \theta_3)*s(\theta_2 - \pi/2)))/100);$$

$$J_{13} = -c(\theta_1)*((5*s(\theta_2 - \pi/2)*s(\pi/2 + \theta_3))/8 + (11*c(\theta_5)*(s(\theta_2 - \pi/2)*s(\pi/2 + \theta_3) - c(\theta_2 - \pi/2)*c(\pi/2 + \theta_3)))/100 - (5*c(\theta_2 - \pi/2)*c(\pi/2 + \theta_3))/8 + (11*c(\theta_4)*s(\theta_5)*(c(\theta_2 - \pi/2)*s(\pi/2 + \theta_3) + c(\pi/2 + \theta_3)*s(\theta_2 - \pi/2)))/100);$$

$$J_{14} = (s(\theta_2 - \pi/2)*s(\pi/2 + \theta_3) - c(\theta_2 - \pi/2)*c(\pi/2 + \theta_3))*((11*c(\theta_5)*(c(\theta_2 - \pi/2)*s(\theta_1)*s(\pi/2 + \theta_3) + c(\pi/2 + \theta_3)*s(\theta_1)*s(\theta_2 - \pi/2)))/100 + (11*s(\theta_5)*(c(\theta_4)*(c(\theta_2 - \pi/2)*c(\pi/2 + \theta_3)*s(\theta_1) - s(\theta_1)*s(\theta_2 - \pi/2)*s(\pi/2 + \theta_3)) + c(\theta_1)*s(\theta_4)))/100) - ((11*c(\theta_5)*(s(\theta_2 - \pi/2)*s(\pi/2 + \theta_3) - c(\theta_2 - \pi/2)*c(\pi/2 + \theta_3)))/100 + (11*c(\theta_4)*s(\theta_5)*(c(\theta_2 - \pi/2)*s(\pi/2 + \theta_3) + c(\pi/2 + \theta_3)*s(\theta_2 - \pi/2)))/100)*(c(\theta_2 - \pi/2)*s(\theta_1)*s(\pi/2 + \theta_3) + c(\pi/2 + \theta_3)*s(\theta_1)*s(\theta_2 - \pi/2));$$

$$J_{15} = ((11*c(\theta_5)*(s(\theta_2 - \pi/2)*s(\pi/2 + \theta_3) - c(\theta_2 - \pi/2)*c(\pi/2 + \theta_3)))/100 + (11*c(\theta_4)*s(\theta_5)*(c(\theta_2 - \pi/2)*s(\pi/2 + \theta_3) + c(\pi/2 + \theta_3)*s(\theta_2 - \pi/2)))/100)*(s(\theta_4)*(c(\theta_2 - \pi/2)*c(\pi/2 + \theta_3)*s(\theta_1) - s(\theta_1)*s(\theta_2 - \pi/2)*s(\pi/2 + \theta_3)) - c(\theta_1)*c(\theta_4)) - s(\theta_4)*(c(\theta_2 - \pi/2)*s(\pi/2 + \theta_3) + c(\pi/2 + \theta_3)*s(\theta_2 - \pi/2))*((11*c(\theta_5)*(c(\theta_2 - \pi/2)*s(\theta_1)*s(\pi/2 + \theta_3) + c(\pi/2 + \theta_3)*s(\theta_1)*s(\theta_2 - \pi/2)))/100 + (11*s(\theta_5)*(c(\theta_4)*(c(\theta_2 - \pi/2)*c(\pi/2 + \theta_3)*s(\theta_1) - s(\theta_1)*s(\theta_2 - \pi/2)*s(\pi/2 + \theta_3)) + c(\theta_1)*s(\theta_4)))/100);$$

$$J_{16} = 0;$$

$$J_{21} = (3*c(\theta_1))/20 + (11*s(\theta_5)*(c(\theta_4)*(c(\theta_1)*c(\theta_2 - \pi/2)*c(\pi/2 + \theta_3) - c(\theta_1)*s(\theta_2 - \pi/2)*s(\pi/2 + \theta_3)) - s(\theta_1)*s(\theta_4)))/100 + (33*c(\theta_1)*c(\theta_2 - \pi/2))/40 + (11*c(\theta_5)*(c(\theta_1)*c(\theta_2 - \pi/2)*s(\pi/2 + \theta_3) + c(\theta_1)*c(\pi/2 + \theta_3)*s(\theta_2 - \pi/2)))/100 + (5*c(\theta_1)*c(\theta_2 - \pi/2)*s(\pi/2 + \theta_3))/8 + (5*c(\theta_1)*c(\pi/2 + \theta_3)*s(\theta_2 - \pi/2))/8;$$

$$J_{22} = -s(\theta_1)*((33*s(\theta_2 - \pi/2))/40 + (5*s(\theta_2 - \pi/2)*s(\pi/2 + \theta_3))/8 + (11*c(\theta_5)*(s(\theta_2 - \pi/2)*s(\pi/2 + \theta_3) - c(\theta_2 - \pi/2)*c(\pi/2 + \theta_3)))/100 - (5*c(\theta_2 - \pi/2)*c(\pi/2 + \theta_3))/8 + (11*c(\theta_4)*s(\theta_5)*(c(\theta_2 - \pi/2)*s(\pi/2 + \theta_3) + c(\pi/2 + \theta_3)*s(\theta_2 - \pi/2)))/100);$$

$$\begin{aligned} J_{24} = & ((11 * c(\theta_5) * (s(\theta_2 - \pi/2) * s(\pi/2 + \theta_3) - c(\theta_2 - \pi/2) * c(\pi/2 + \theta_3))) / 100 + \\ & (11 * c(\theta_4) * s(\theta_5) * (c(\theta_2 - \pi/2) * s(\pi/2 + \theta_3) + c(\pi/2 + \theta_3) * s(\theta_2 - \pi/2))) / 100) * (c(\theta_1) * c(\theta_2 - \\ & \pi/2) * s(\pi/2 + \theta_3) + c(\theta_1) * c(\pi/2 + \theta_3) * s(\theta_2 - \pi/2)) - (s(\theta_2 - \pi/2) * s(\pi/2 + \theta_3) - c(\theta_2 - \\ & \pi/2) * c(\pi/2 + \theta_3)) * ((11 * s(\theta_5) * (c(\theta_4) * (c(\theta_1) * c(\theta_2 - \pi/2) * c(\pi/2 + \theta_3) - c(\theta_1) * s(\theta_2 - \\ & \pi/2) * s(\pi/2 + \theta_3)) - s(\theta_1) * s(\theta_4))) / 100 + (11 * c(\theta_5) * (c(\theta_1) * c(\theta_2 - \pi/2) * s(\pi/2 + \theta_3) + \\ & c(\theta_1) * c(\pi/2 + \theta_3) * s(\theta_2 - \pi/2))) / 100); \end{aligned}$$

$$J_{26} = 0;$$

$$\begin{aligned} J_{32} = & -c(\theta_1) * (s(\theta_1)/4 + (11 * s(\theta_5) * (c(\theta_4) * (c(\theta_1) * c(\theta_2 - \pi/2) * c(\pi/2 + \theta_3) - c(\theta_1) * s(\theta_2 - \pi/2) * s(\pi/2 + \theta_3)) - s(\theta_1) * s(\theta_4))) / 100 + (33 * c(\theta_1) * c(\theta_2 - \pi/2)) / 40 + \\ & (11 * c(\theta_5) * (c(\theta_1) * c(\theta_2 - \pi/2) * s(\pi/2 + \theta_3) + c(\theta_1) * c(\pi/2 + \theta_3) * s(\theta_2 - \pi/2))) / 100 + \\ & (5 * c(\theta_1) * c(\theta_2 - \pi/2) * s(\pi/2 + \theta_3)) / 8 + (5 * c(\theta_1) * c(\pi/2 + \theta_3) * s(\theta_2 - \pi/2)) / 8 - \\ & s(\theta_1) * ((11 * c(\theta_5) * (c(\theta_2 - \pi/2) * s(\theta_1) * s(\pi/2 + \theta_3) + c(\pi/2 + \theta_3) * s(\theta_1) * s(\theta_2 - \pi/2))) / 100 - \\ & c(\theta_1) / 4 + (11 * s(\theta_5) * (c(\theta_4) * (c(\theta_2 - \pi/2) * c(\pi/2 + \theta_3) * s(\theta_1) - s(\theta_1) * s(\theta_2 - \pi/2) * s(\pi/2 + \theta_3)) + c(\theta_1) * s(\theta_4))) / 100 + (33 * c(\theta_2 - \pi/2) * s(\theta_1)) / 40 + (5 * c(\theta_2 - \pi/2) * s(\theta_1) * s(\pi/2 + \theta_3)) / 8 + (5 * c(\pi/2 + \theta_3) * s(\theta_1) * s(\theta_2 - \pi/2)) / 8); \end{aligned}$$

143

$$\theta_3) * s(\theta_1) - s(\theta_1) * s(\theta_2 - \pi/2) * s(\pi/2 + \theta_3)) + c(\theta_1) * s(\theta_4)))/100 + (5 * c(\theta_2 - \pi/2) * s(\theta_1) * s(\pi/2 + \theta_3))/8 + (5 * c(\pi/2 + \theta_3) * s(\theta_1) * s(\theta_2 - \pi/2))/8);$$

$$J_{34} = ((11 * c(\theta_5) * (c(\theta_2 - \pi/2) * s(\theta_1) * s(\pi/2 + \theta_3) + c(\pi/2 + \theta_3) * s(\theta_1) * s(\theta_2 - \pi/2)))/100 + (11 * s(\theta_5) * (c(\theta_4) * (c(\theta_2 - \pi/2) * c(\pi/2 + \theta_3) * s(\theta_1) - s(\theta_1) * s(\theta_2 - \pi/2) * s(\pi/2 + \theta_3)) + c(\theta_1) * s(\theta_4)))/100) * (c(\theta_1) * c(\theta_2 - \pi/2) * s(\pi/2 + \theta_3) + c(\theta_1) * c(\pi/2 + \theta_3) * s(\theta_2 - \pi/2)) - ((11 * s(\theta_5) * (c(\theta_4) * (c(\theta_1) * c(\theta_2 - \pi/2) * c(\pi/2 + \theta_3) - c(\theta_1) * s(\theta_2 - \pi/2) * s(\pi/2 + \theta_3)) - s(\theta_1) * s(\theta_4)))/100 + (11 * c(\theta_5) * (c(\theta_1) * c(\theta_2 - \pi/2) * s(\pi/2 + \theta_3) + c(\theta_1) * c(\pi/2 + \theta_3) * s(\theta_2 - \pi/2)))/100) * (c(\theta_2 - \pi/2) * s(\theta_1) * s(\pi/2 + \theta_3) + c(\pi/2 + \theta_3) * s(\theta_1) * s(\theta_2 - \pi/2)));$$

$$J_{35} = (s(\theta_4) * (c(\theta_2 - \pi/2) * c(\pi/2 + \theta_3) * s(\theta_1) - s(\theta_1) * s(\theta_2 - \pi/2) * s(\pi/2 + \theta_3)) - c(\theta_1) * c(\theta_4)) * ((11 * s(\theta_5) * (c(\theta_4) * (c(\theta_1) * c(\theta_2 - \pi/2) * c(\pi/2 + \theta_3) - c(\theta_1) * s(\theta_2 - \pi/2) * s(\pi/2 + \theta_3)) - s(\theta_1) * s(\theta_4)))/100 + (11 * c(\theta_5) * (c(\theta_1) * c(\theta_2 - \pi/2) * s(\pi/2 + \theta_3) + c(\theta_1) * c(\pi/2 + \theta_3) * s(\theta_2 - \pi/2)))/100) - (c(\theta_4) * s(\theta_1) + s(\theta_4) * (c(\theta_1) * c(\theta_2 - \pi/2) * c(\pi/2 + \theta_3) - c(\theta_1) * s(\theta_2 - \pi/2) * s(\pi/2 + \theta_3))) * ((11 * c(\theta_5) * (c(\theta_2 - \pi/2) * s(\theta_1) * s(\pi/2 + \theta_3) + c(\pi/2 + \theta_3) * s(\theta_1) * s(\theta_2 - \pi/2)))/100 + (11 * s(\theta_5) * (c(\theta_4) * (c(\theta_2 - \pi/2) * c(\pi/2 + \theta_3) * s(\theta_1) - s(\theta_1) * s(\theta_2 - \pi/2) * s(\pi/2 + \theta_3)) + c(\theta_1) * s(\theta_4)))/100));$$

$$J_{36} = 0;$$

$$J_{41} = 0;$$

$$J_{42} = -s(\theta_1);$$

$$J_{43} = -s(\theta_1);$$

$$J_{44} = c(\theta_1) * c(\theta_2 - \pi/2) * s(\pi/2 + \theta_3) + c(\theta_1) * c(\pi/2 + \theta_3) * s(\theta_2 - \pi/2);$$

$$J_{45} = -c(\theta_4) * s(\theta_1) - s(\theta_4) * (c(\theta_1) * c(\theta_2 - \pi/2) * c(\pi/2 + \theta_3) - c(\theta_1) * s(\theta_2 - \pi/2) * s(\pi/2 + \theta_3));$$

$$J_{46} = s(\theta_5) * (c(\theta_4) * (c(\theta_1) * c(\theta_2 - \pi/2) * c(\pi/2 + \theta_3) - c(\theta_1) * s(\theta_2 - \pi/2) * s(\pi/2 + \theta_3)) - s(\theta_1) * s(\theta_4)) + c(\theta_5) * (c(\theta_1) * c(\theta_2 - \pi/2) * s(\pi/2 + \theta_3) + c(\theta_1) * c(\pi/2 + \theta_3) * s(\theta_2 - \pi/2));$$

$$J_{51} = 0;$$

$$J_{52} = c(\theta_1);$$

$$J_{53} = c(\theta_1);$$

$$J_{54} = c(\theta_2 - \pi/2) * s(\theta_1) * s(\pi/2 + \theta_3) + c(\pi/2 + \theta_3) * s(\theta_1) * s(\theta_2 - \pi/2);$$

$$J_{55} = c(\theta_1) * c(\theta_4) - s(\theta_4) * (c(\theta_2 - \pi/2) * c(\pi/2 + \theta_3) * s(\theta_1) - s(\theta_1) * s(\theta_2 - \pi/2) * s(\pi/2 + \theta_3));$$

$$J_{56} = c(\theta_5) * (c(\theta_2 - \pi/2) * s(\theta_1) * s(\pi/2 + \theta_3) + c(\pi/2 + \theta_3) * s(\theta_1) * s(\theta_2 - \pi/2)) + s(\theta_5) * (c(\theta_4) * (c(\theta_2 - \pi/2) * c(\pi/2 + \theta_3) * s(\theta_1) - s(\theta_1) * s(\theta_2 - \pi/2) * s(\pi/2 + \theta_3)) + c(\theta_1) * s(\theta_4));$$

$$J_{61} = 1;$$

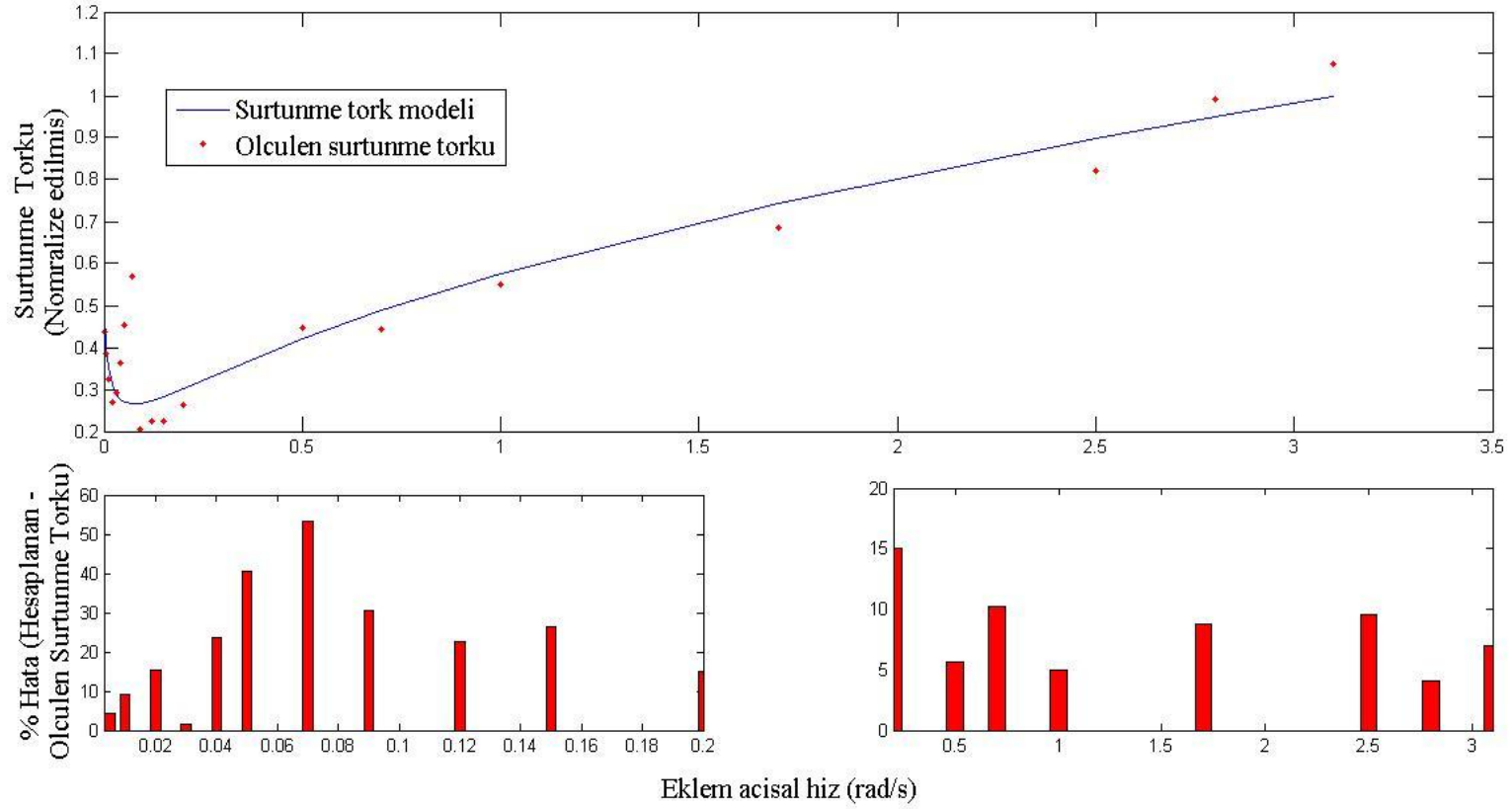
$$J_{62} = 0;$$

$$J_{63} = 0;$$

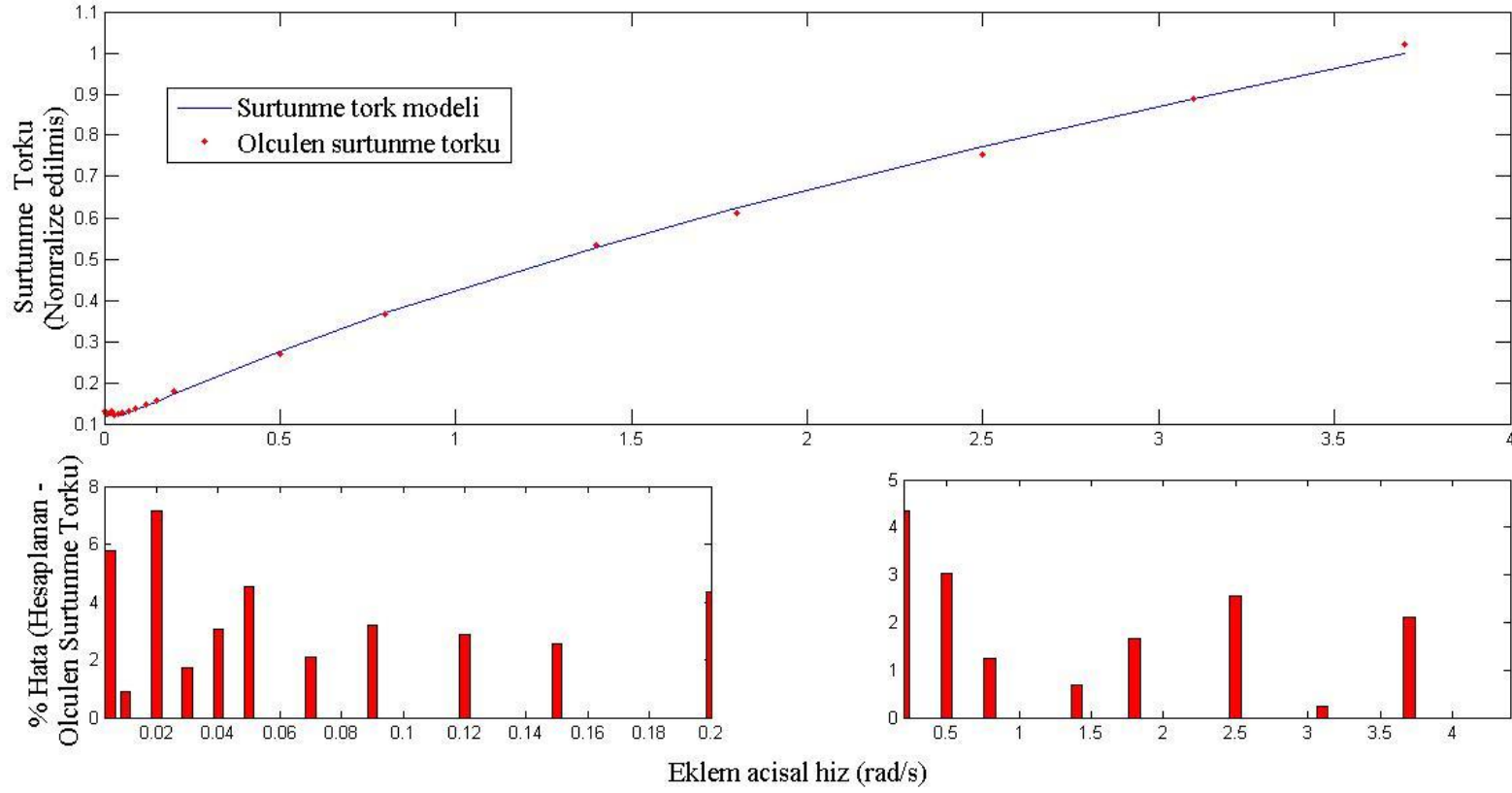
$$J_{64} = c(\theta_2 - \pi/2) * c(\pi/2 + \theta_3) - s(\theta_2 - \pi/2) * s(\pi/2 + \theta_3);$$

$$J_{65} = s(\theta_4) * (c(\theta_2 - \pi/2) * s(\pi/2 + \theta_3) + c(\pi/2 + \theta_3) * s(\theta_2 - \pi/2));$$

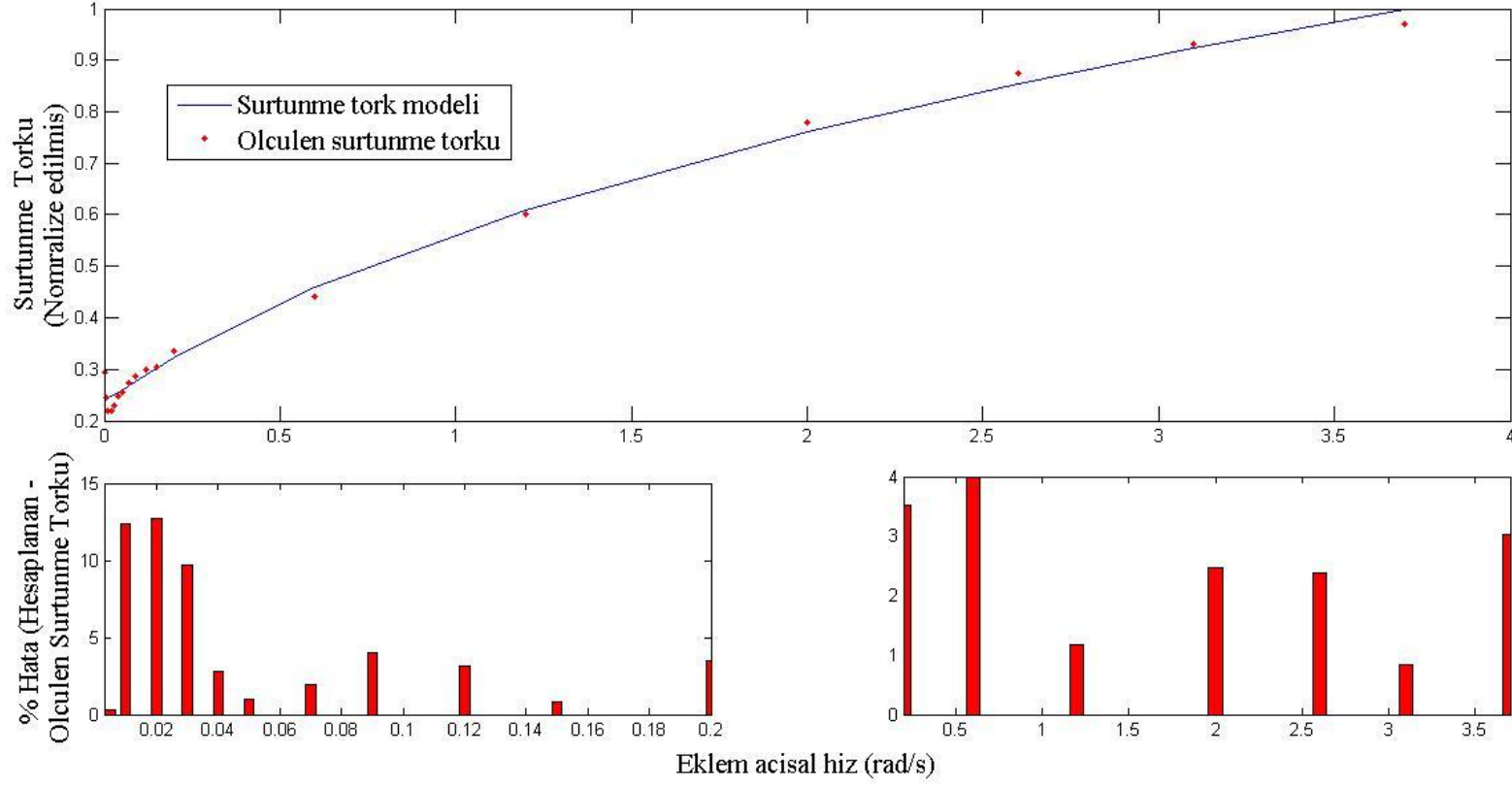
$$J_{66} = -c(\theta_5) * (s(\theta_2 - \pi/2) * s(\pi/2 + \theta_3) - c(\theta_2 - \pi/2) * c(\pi/2 + \theta_3)) - c(\theta_4) * s(\theta_5) * (c(\theta_2 - \pi/2) * s(\pi/2 + \theta_3) + c(\pi/2 + \theta_3) * s(\theta_2 - \pi/2));$$



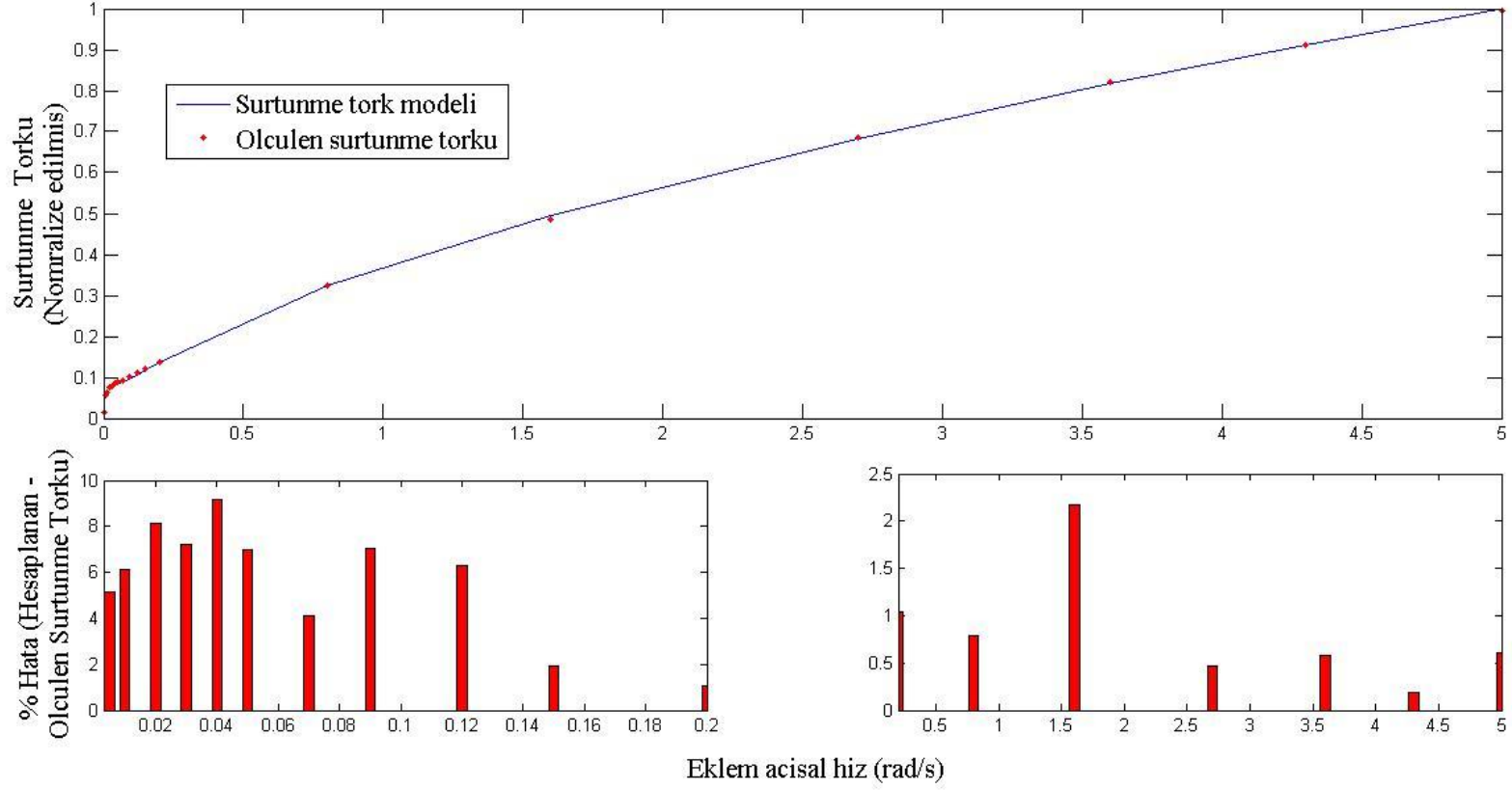
Şekil B 2.1 : 2. eklemden ölçülen ve hesaplanan sürtünme torku ve hatası



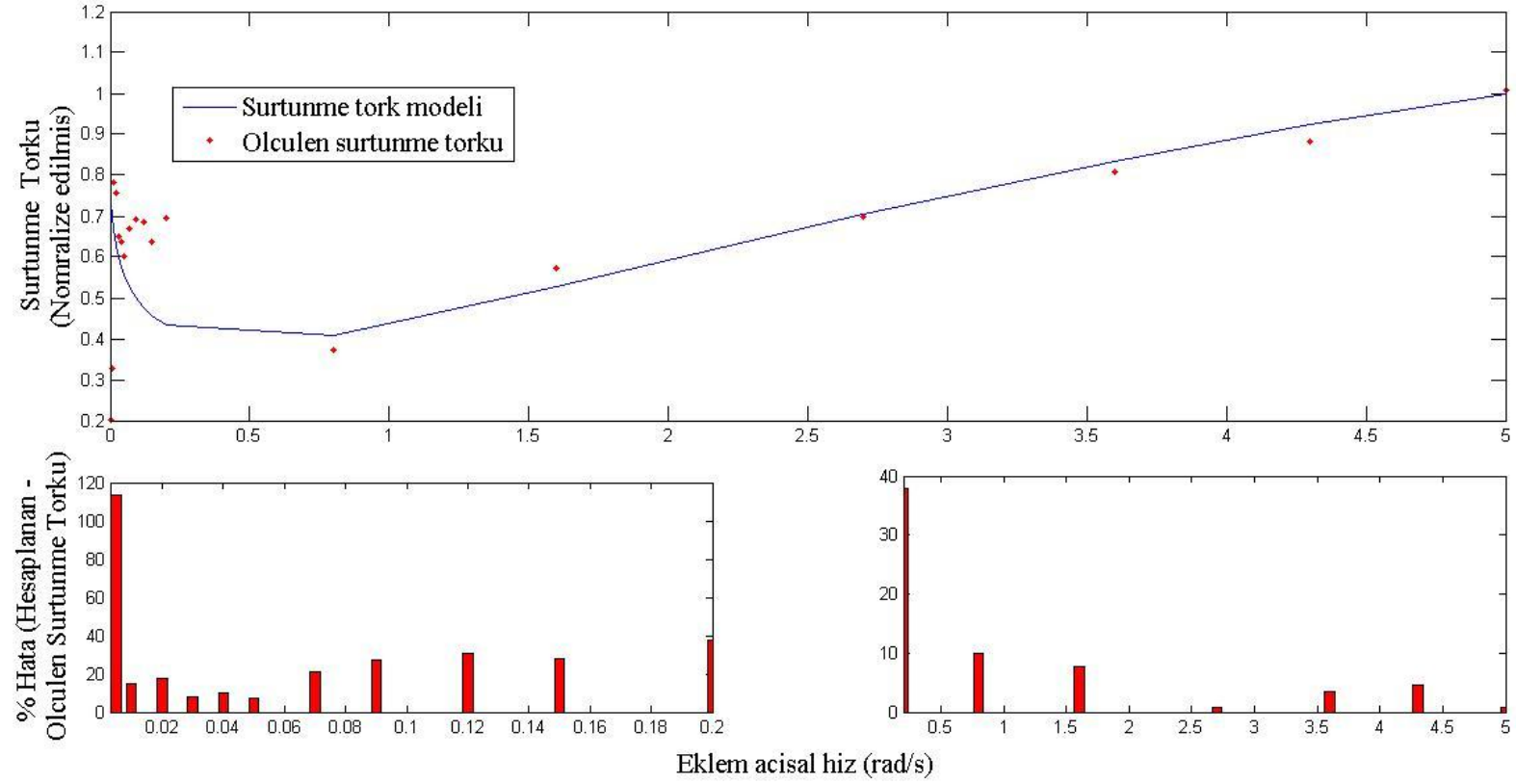
Şekil B 2.2 : 3. eklemden ölçülen ve hesaplanan sürtünme torku ve hatası



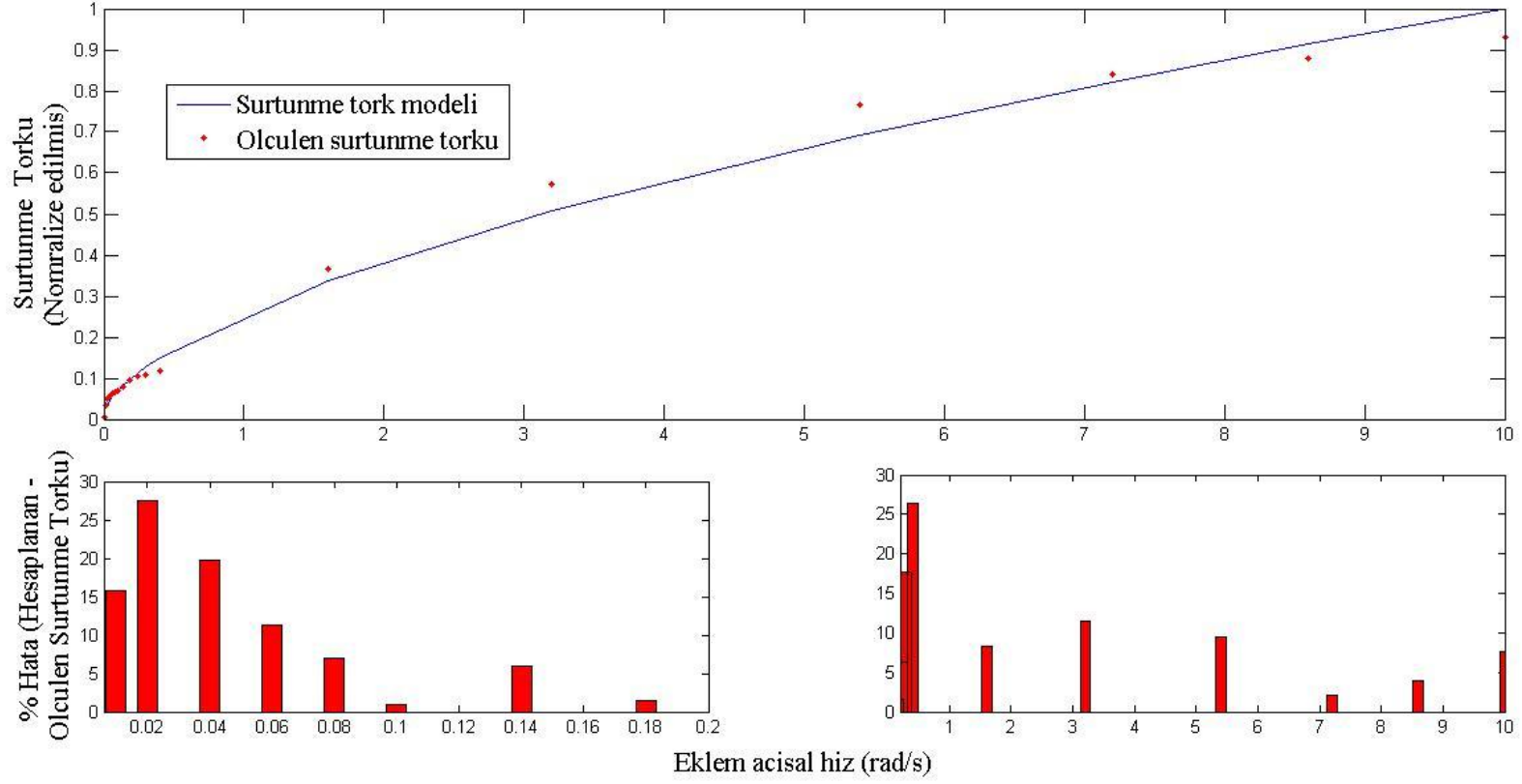
Şekil B 2.3 : 4. eklemden ölçülen ve hesaplanan sürtünme torku ve hatası



Şekil B 2.4 : a modeli için ölçülen ve hesaplanan sürtünme torku ve hatası



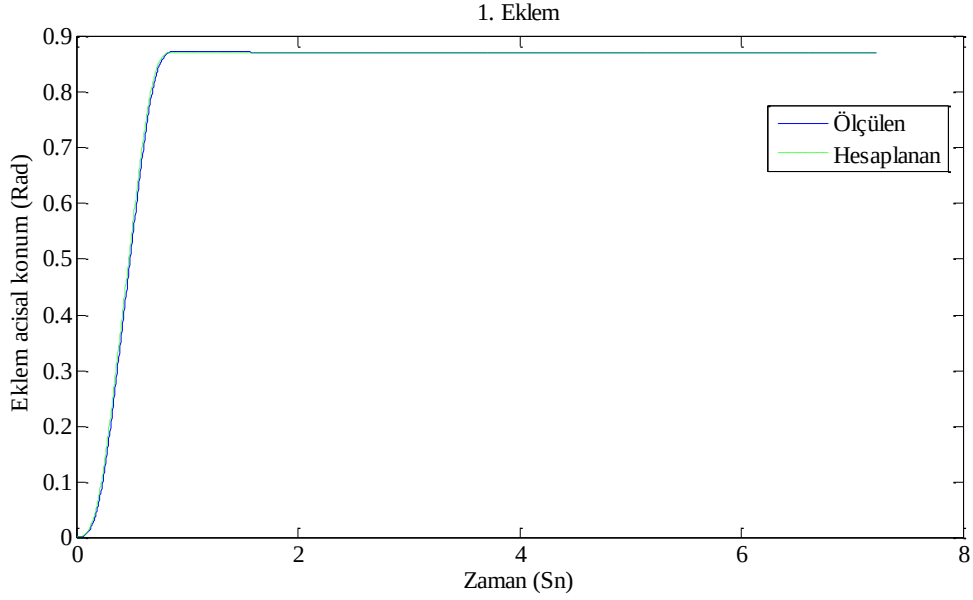
Şekil B 2.5 : b modeli için ölçülen ve hesaplanan sürtünme torku ve hatası



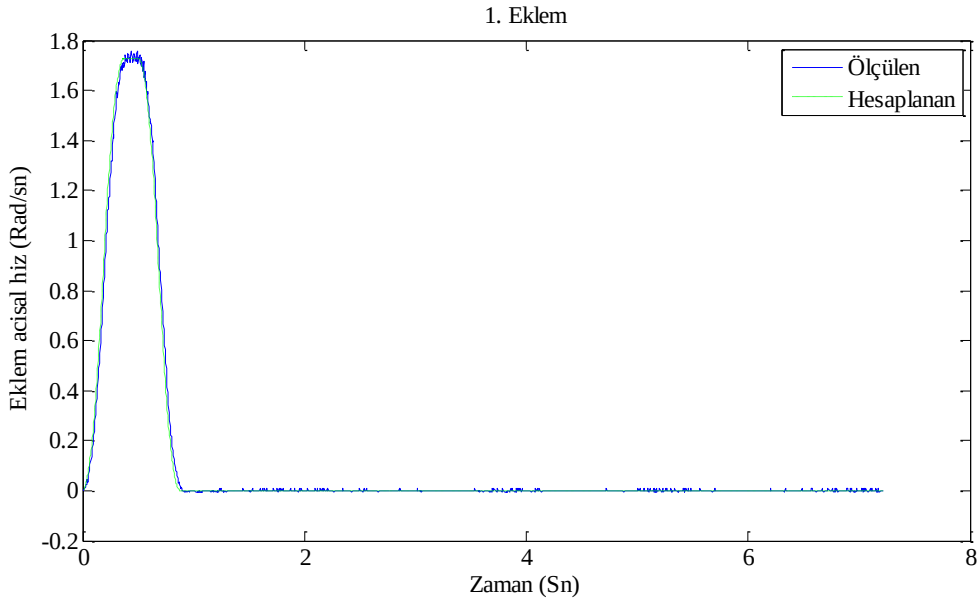
Şekil B 2.6 : c modeli için ölçülen ve hesaplanan sürtünme torku ve hatası.

EK B3 Dinamik model deneysel sonuçlar

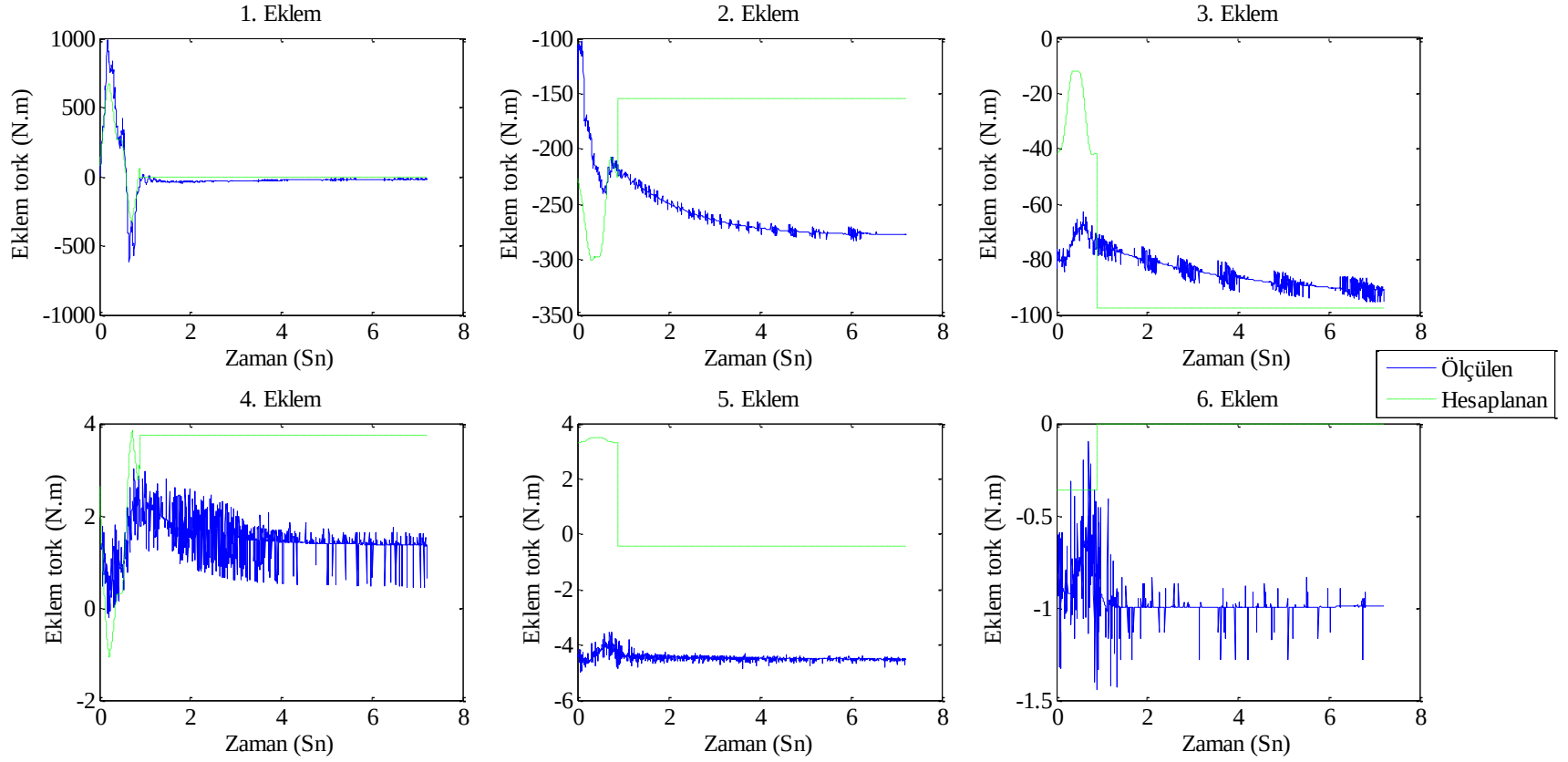
Bu bölümde verilen tüm grafikler manipülatörün nominal hızının %60'ı, maksimum ivmesinin %100 ve eklemlerin harekete başlama konumları- tüm eklemlerin birlikte hareketi dışında- 2. eklemin 45° , 3. eklemin 90° ve diğer eklemlerin '0' olduğu durum için elde edilmektedir. 1. eklem 50° hareket ettirilirse



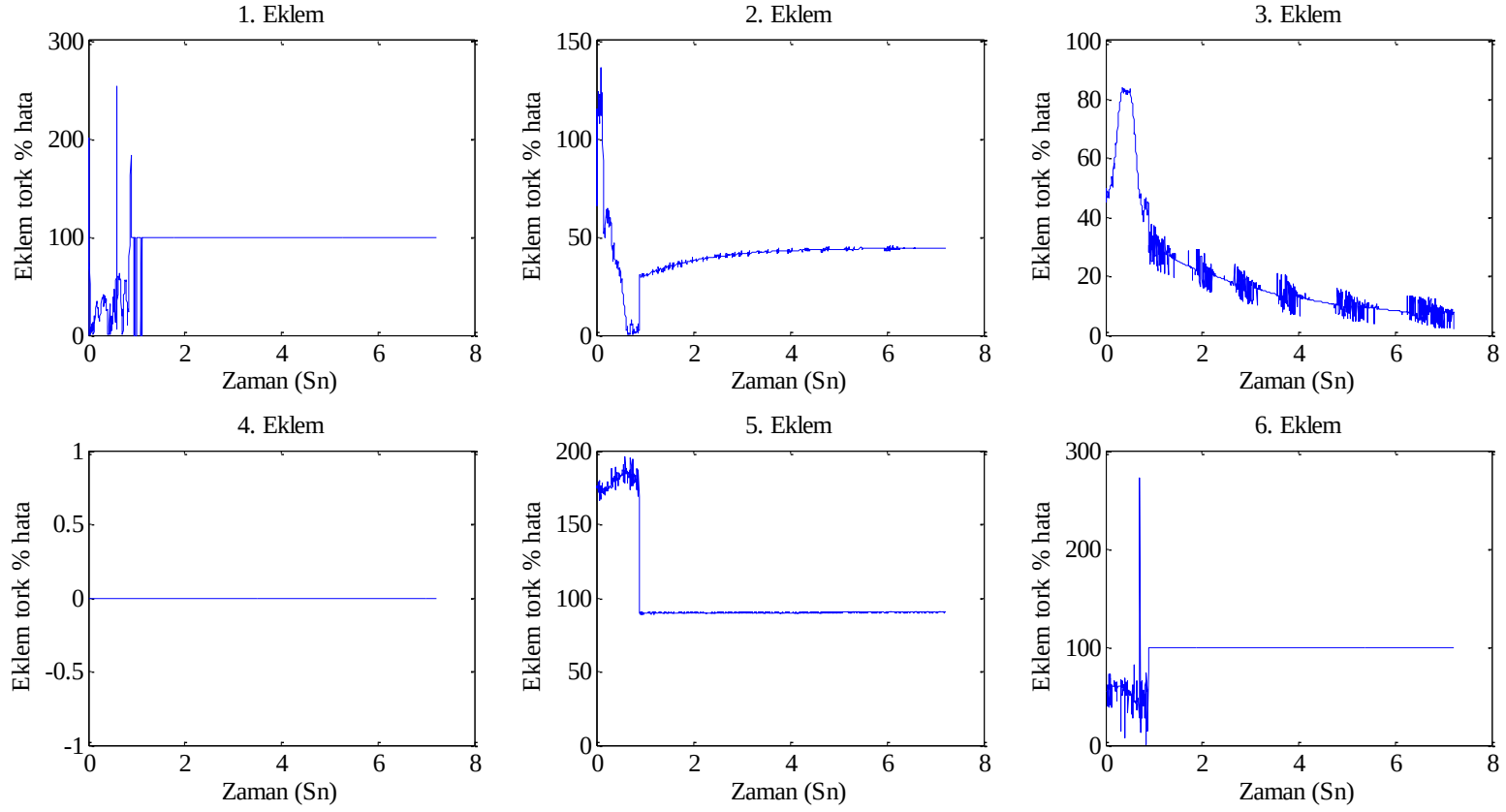
Şekil B 3.1 : 1. eklem açısal konum grafiği.



Şekil B 3.2 : 1. eklem açısal hız grafiği.

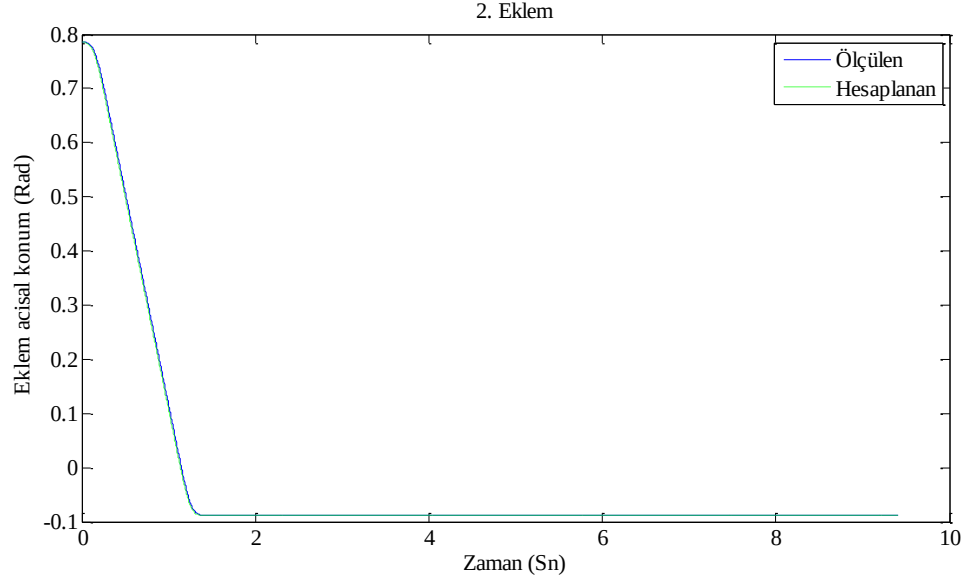


Şekil B 3.3 : 1. eklem hareket ederken tüm eklemler için tork grafikleri.

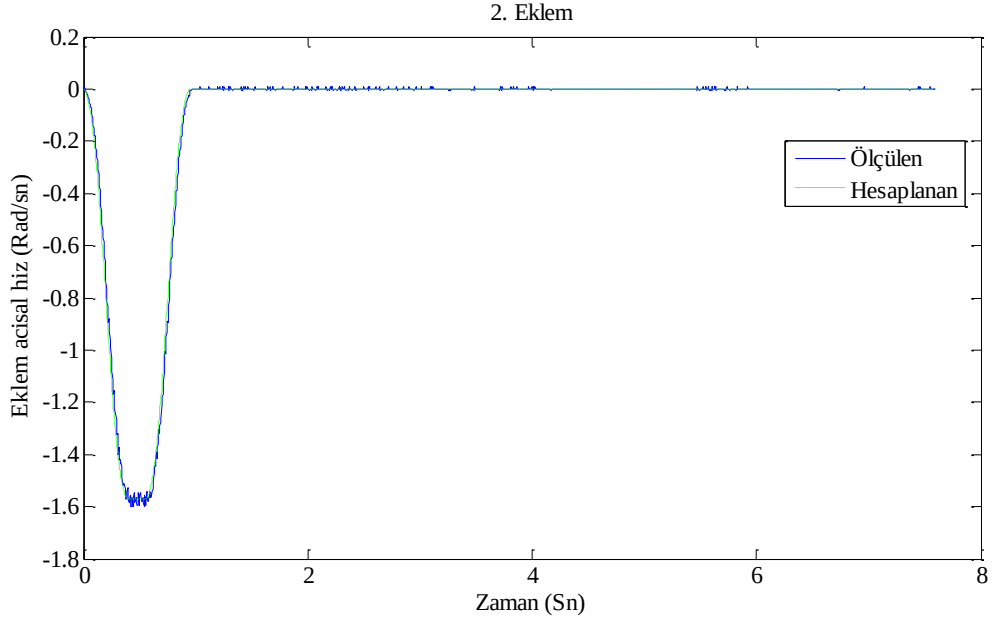


Şekil B 3.4 : 1. eklem hareket ederken tüm eklemler için tork % hata grafiği.

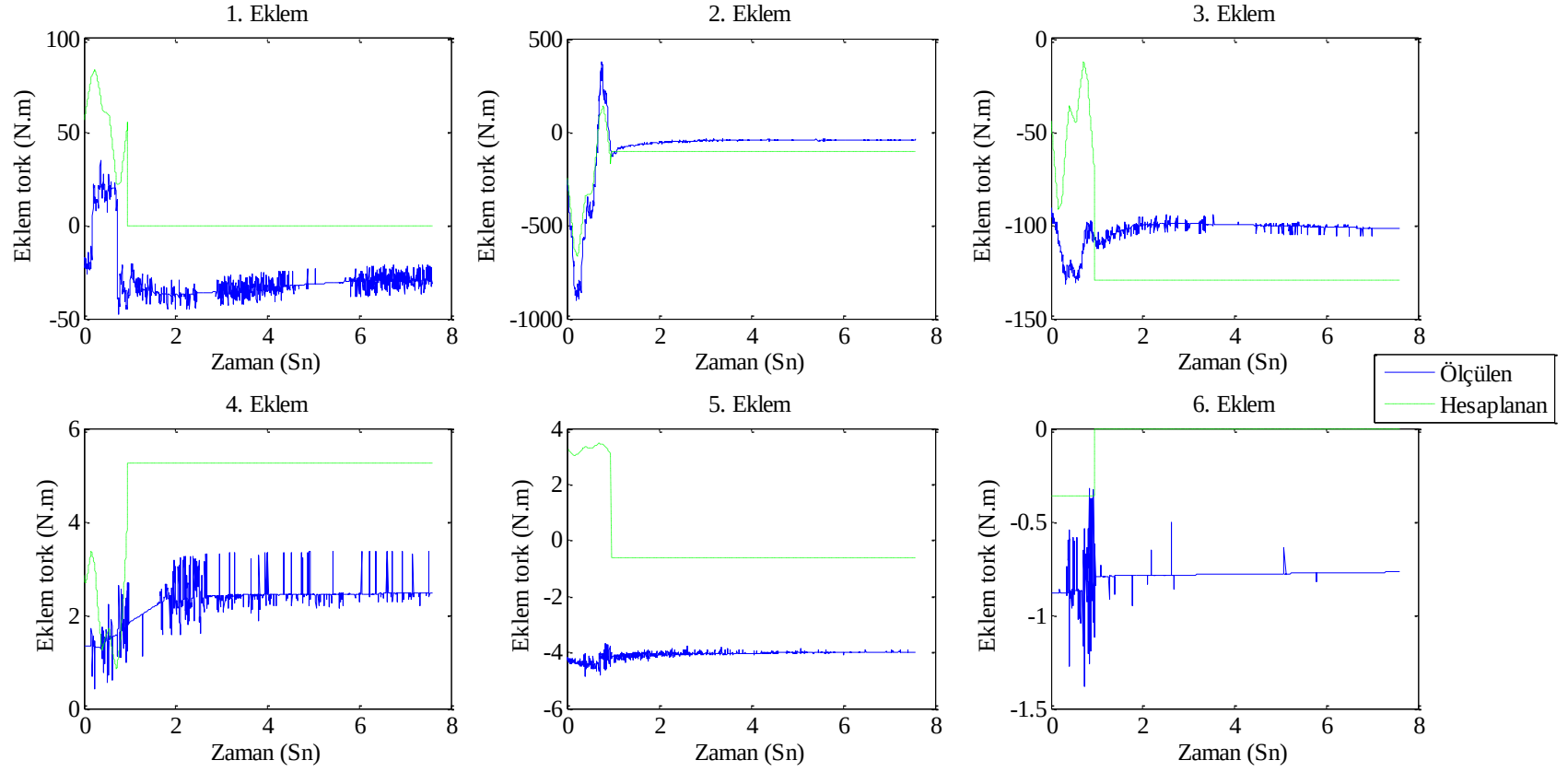
2. eklem 50° hareket ettirilirse Şekil B 3.5’de 2. eklemın açısıl konum grafiği oluşmaktadır. Bunu sırasıyla eklem açısıl hızı, eklem tork ve eklem tork % hata grafikleri takip etmektedir. 2. eklem, çalışma uzayının dönüş yönünü sınırlamasından dolayı diğer eklemlerin dönüş yönünü tersine hareket ettirilmektedir.



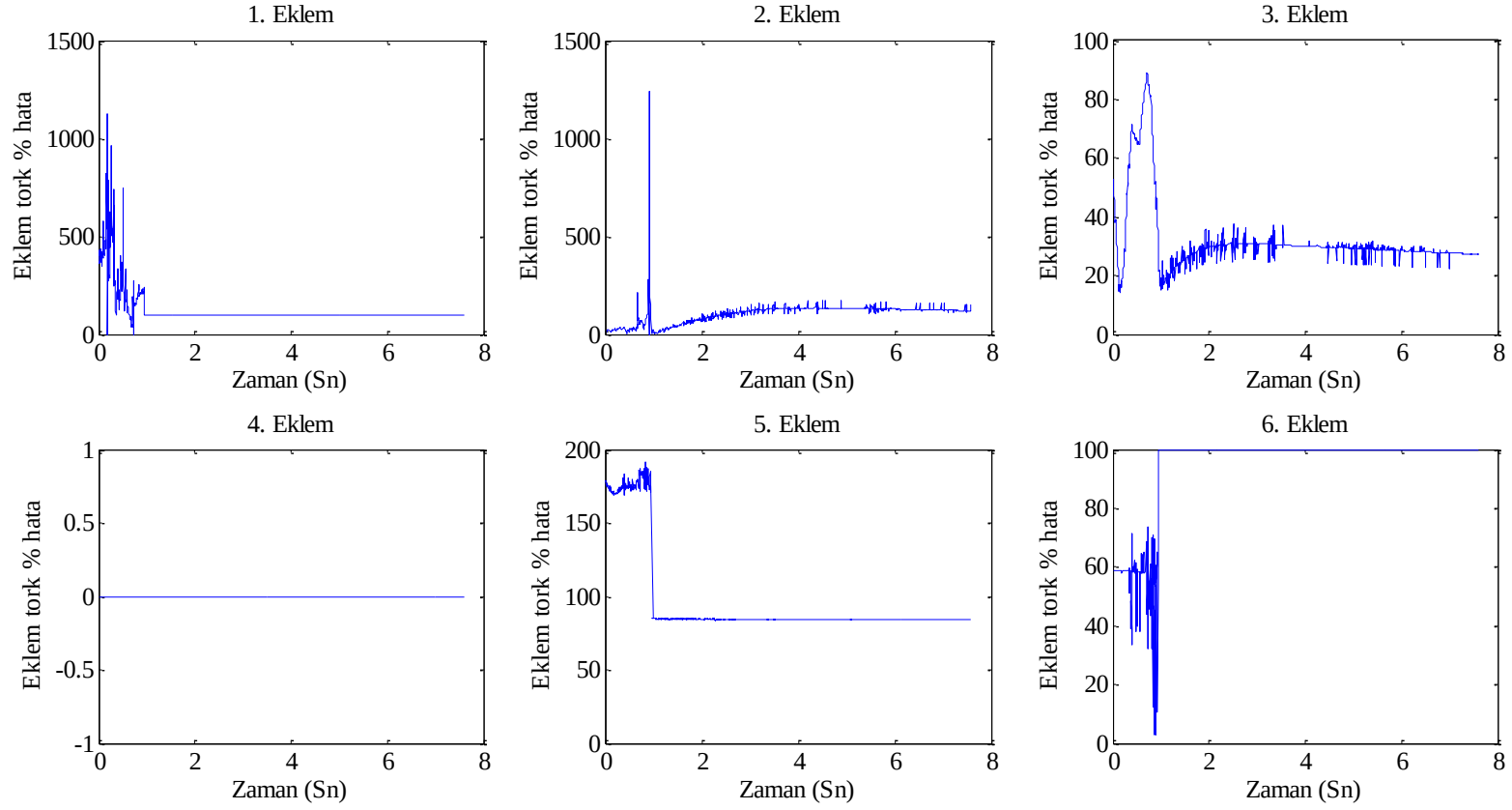
Şekil B 3.5 : 2. eklem açısıl konum grafiği.



Şekil B 3.6 : 2. eklem açısıl hız grafiği.

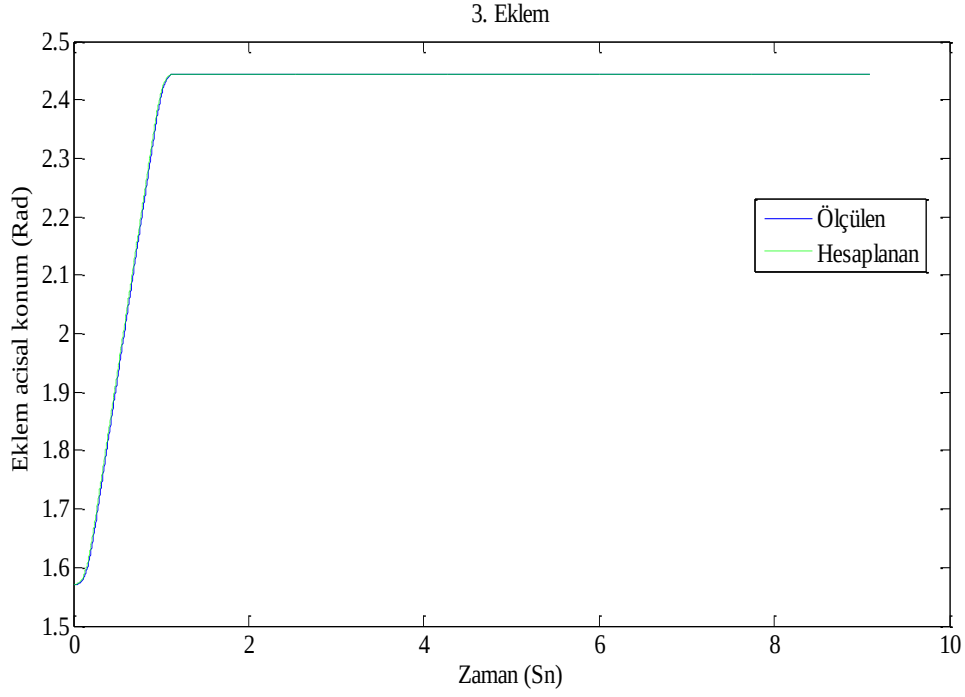


Şekil B 3.7 : 2. eklem hareket ederken tüm eklemler için tork grafikleri.

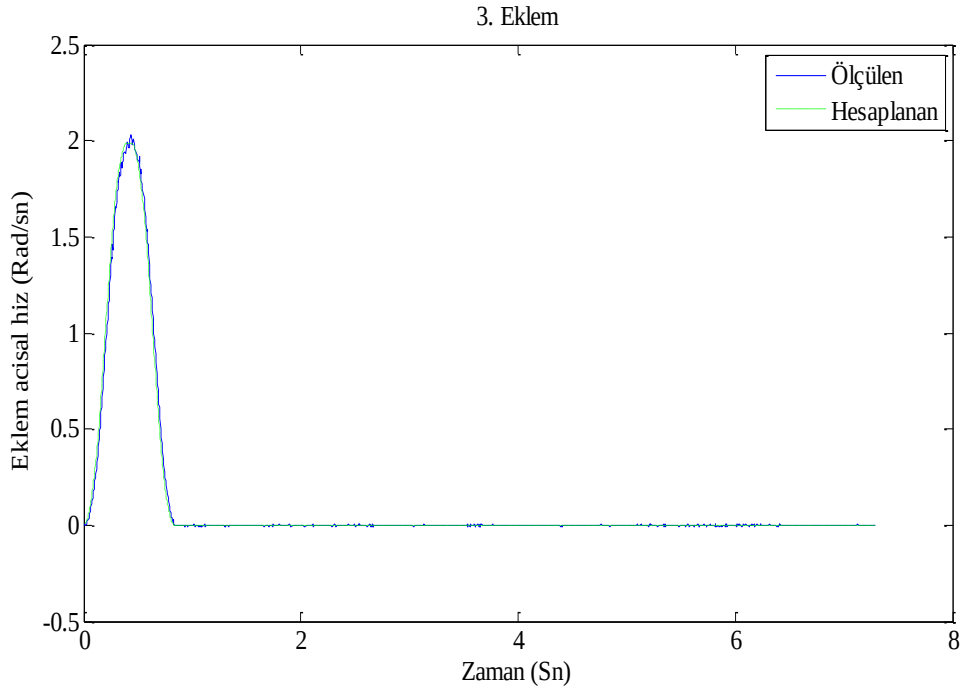


Şekil B 3.8 : 2. eklem hareket ederken tüm eklemler için tork % hata grafiği.

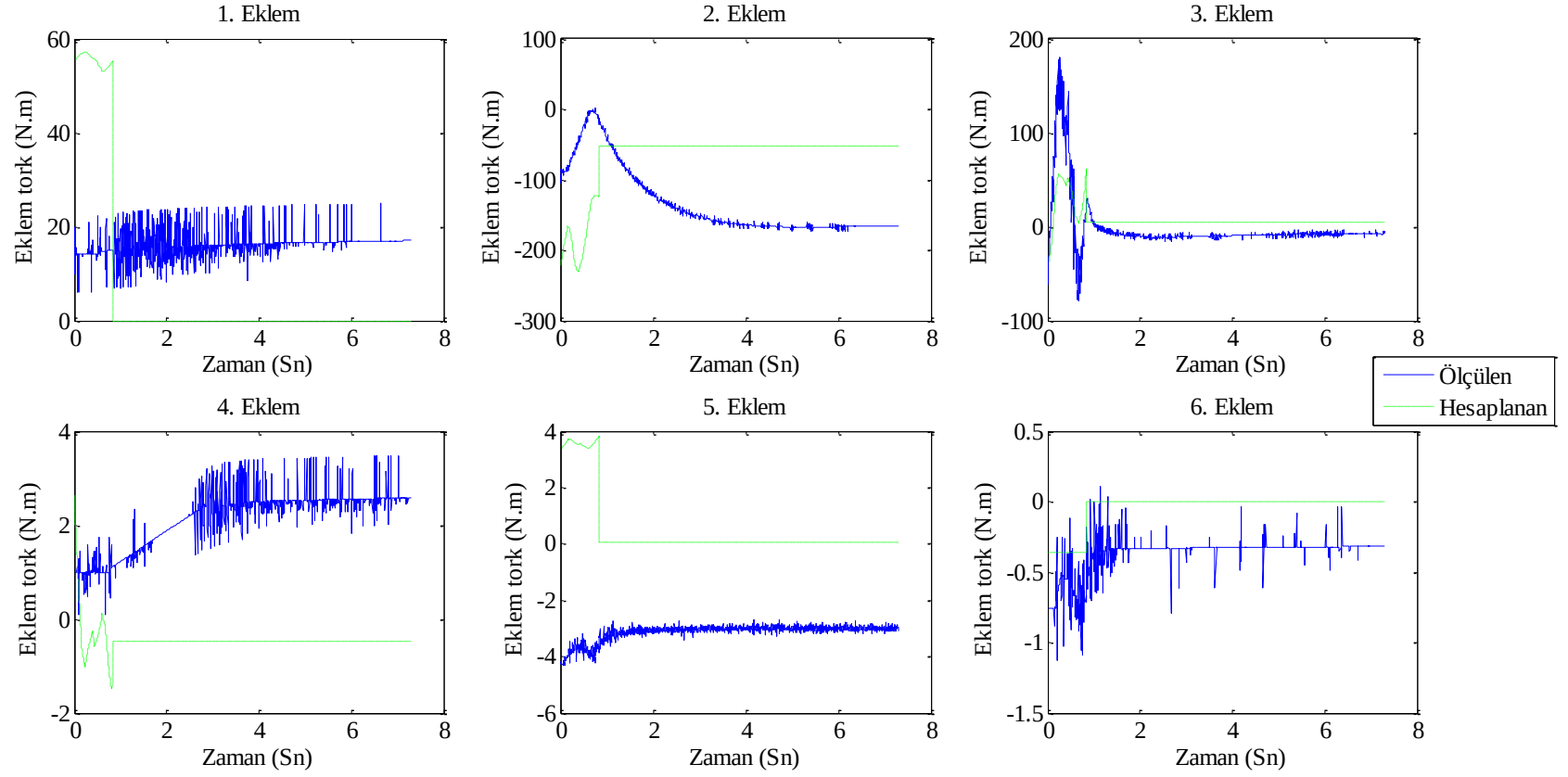
3. eklem 50° hareket ettirilirse Şekil B 3.9'de 3. eklem açısai konum grafiği oluşmaktadır. Bunu sırasıyla eklem açısai hızı, eklem tork ve eklem tork % hata grafikleri takip etmektedir



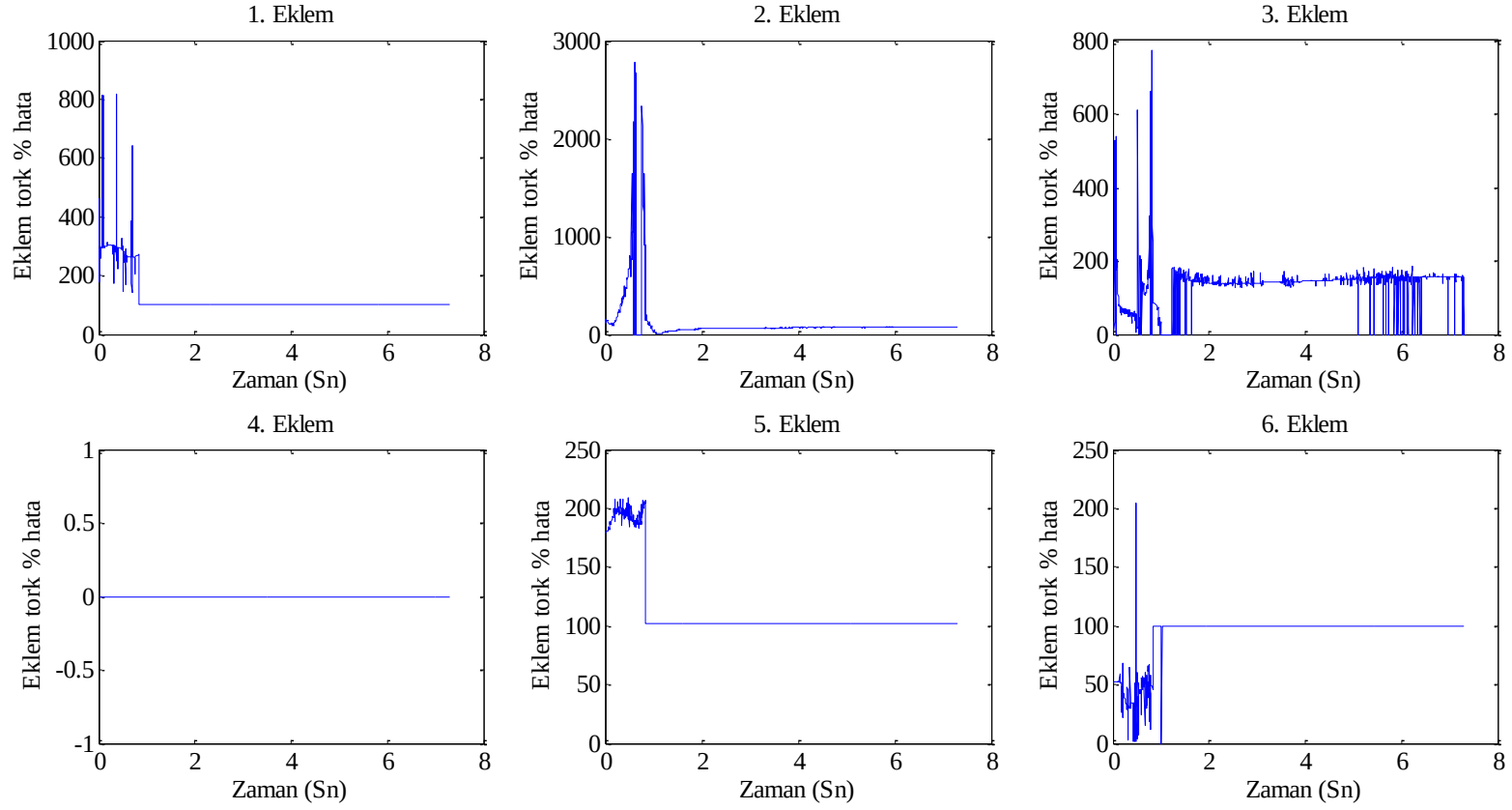
Şekil B 3.9 : 3. eklem açısai konum grafiği.



Şekil B 3.10 : 3. eklem açısai hız grafiği.

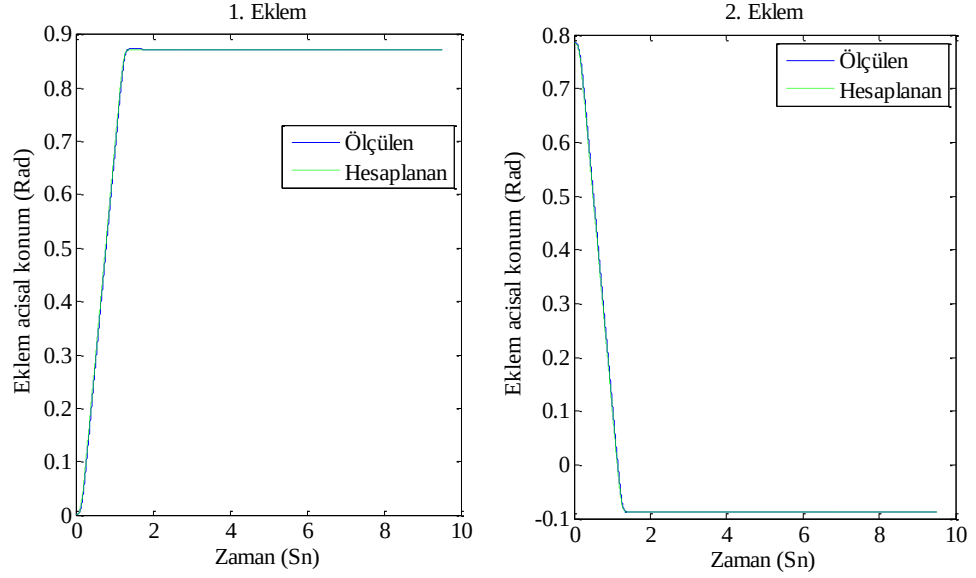


Şekil B 3.11 : 3. eklem hareket ederken tüm eklemler için tork grafikleri.

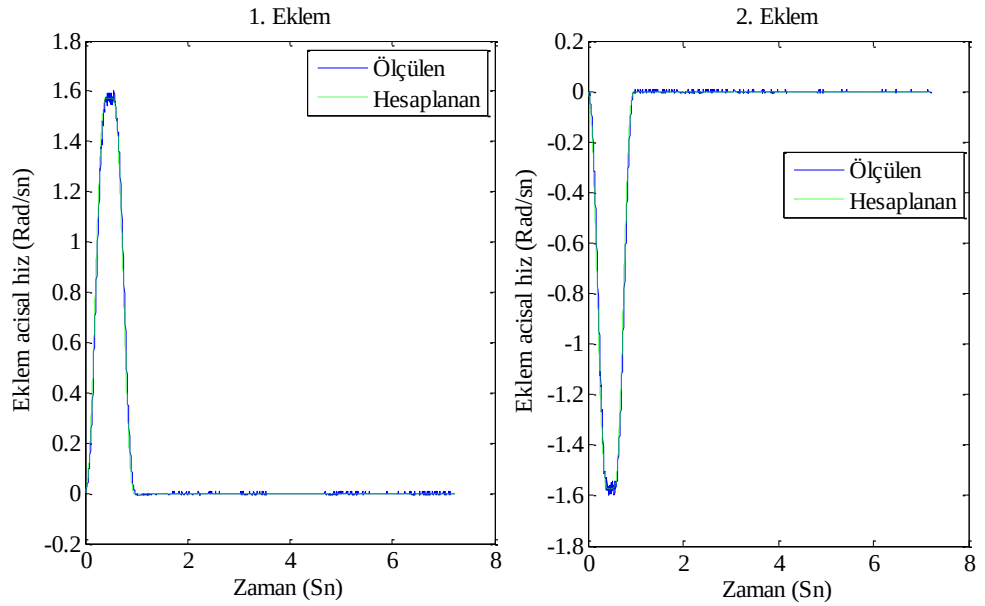


Şekil B 3.12 : 3. eklem hareket ederken tüm eklemler için tork % hata grafiği.

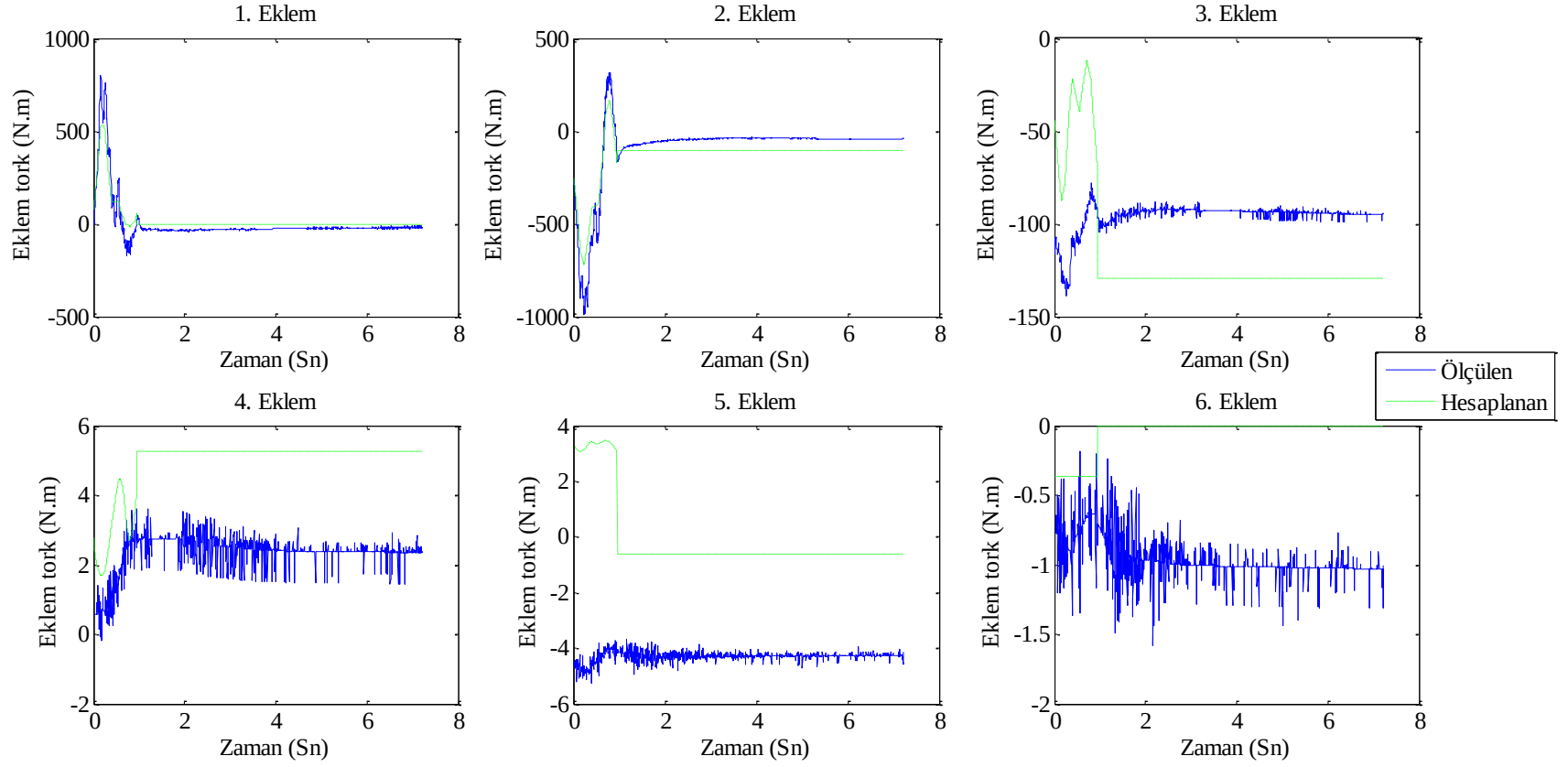
1. ve 2. eklemler eşzamanlı olarak 50° hareket ettirilirse Şekil B 3.13’de 1. ve 2. eklemlerin açısal konum grafiği oluşmaktadır. Bunu sırasıyla eklem açısal hızı, eklem tork ve eklem tork % hata grafikleri takip etmektedir.



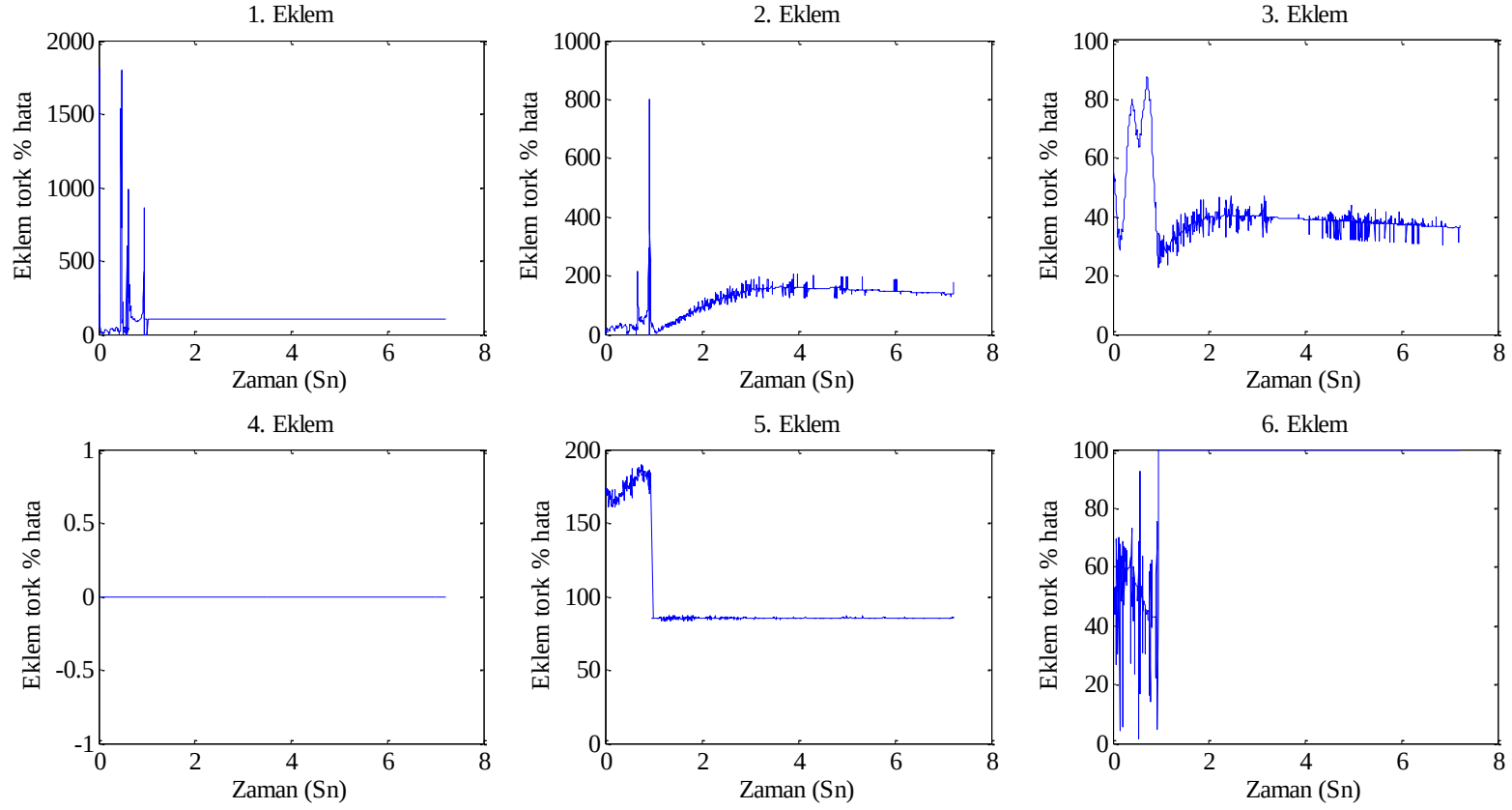
Şekil B 3.13 : 1. ve 2. eklemlerin açısal konum grafikleri.



Şekil B 3.14 : 1. ve 2. eklemlerin açısal hız grafikleri.

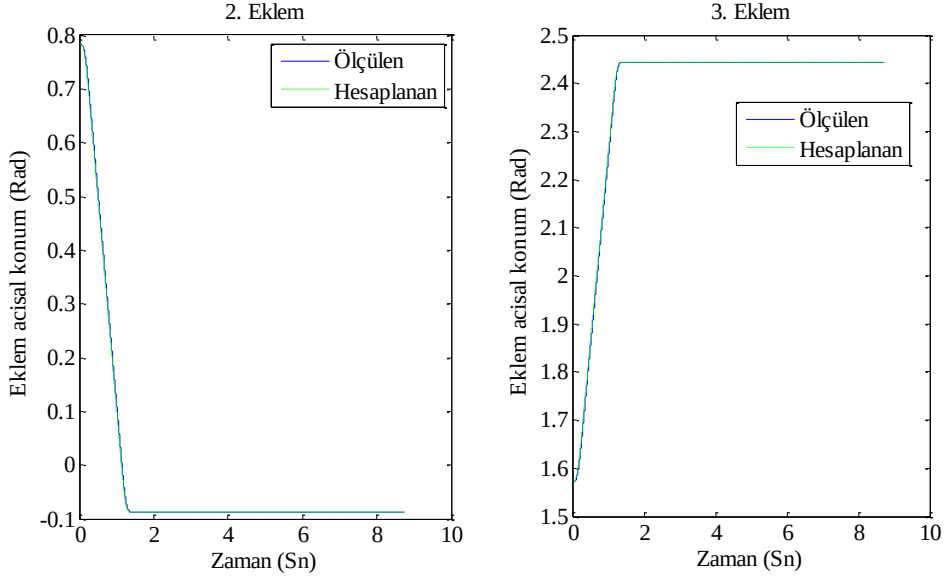


Şekil B 3.15 : 1. ve 2. eklemler hareket ederken tüm eklemler için tork grafikleri.

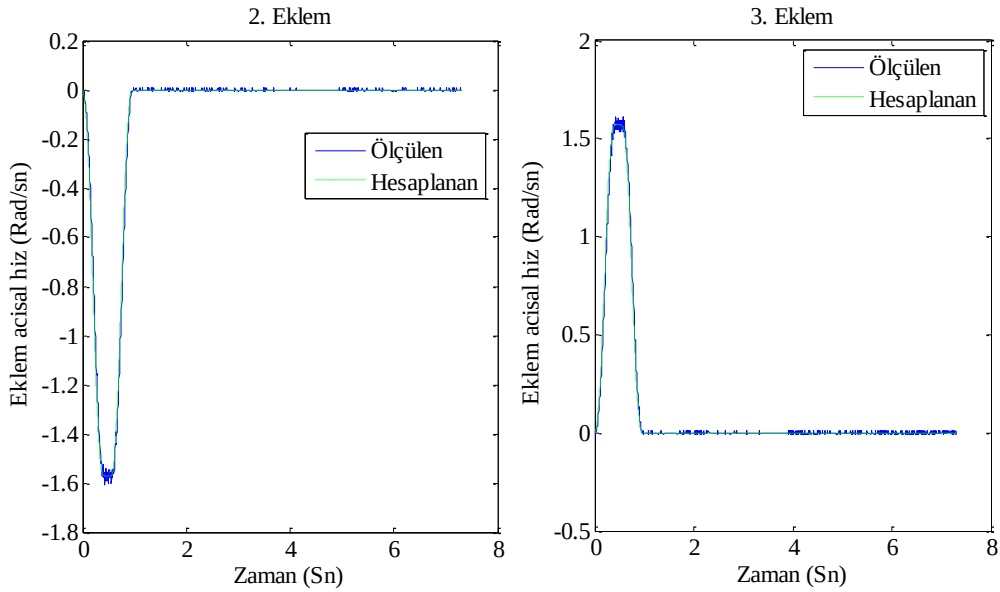


Şekil B 3.16 : 1. ve 2. eklemler hareket ederken tüm eklemler için tork % hata grafikleri.

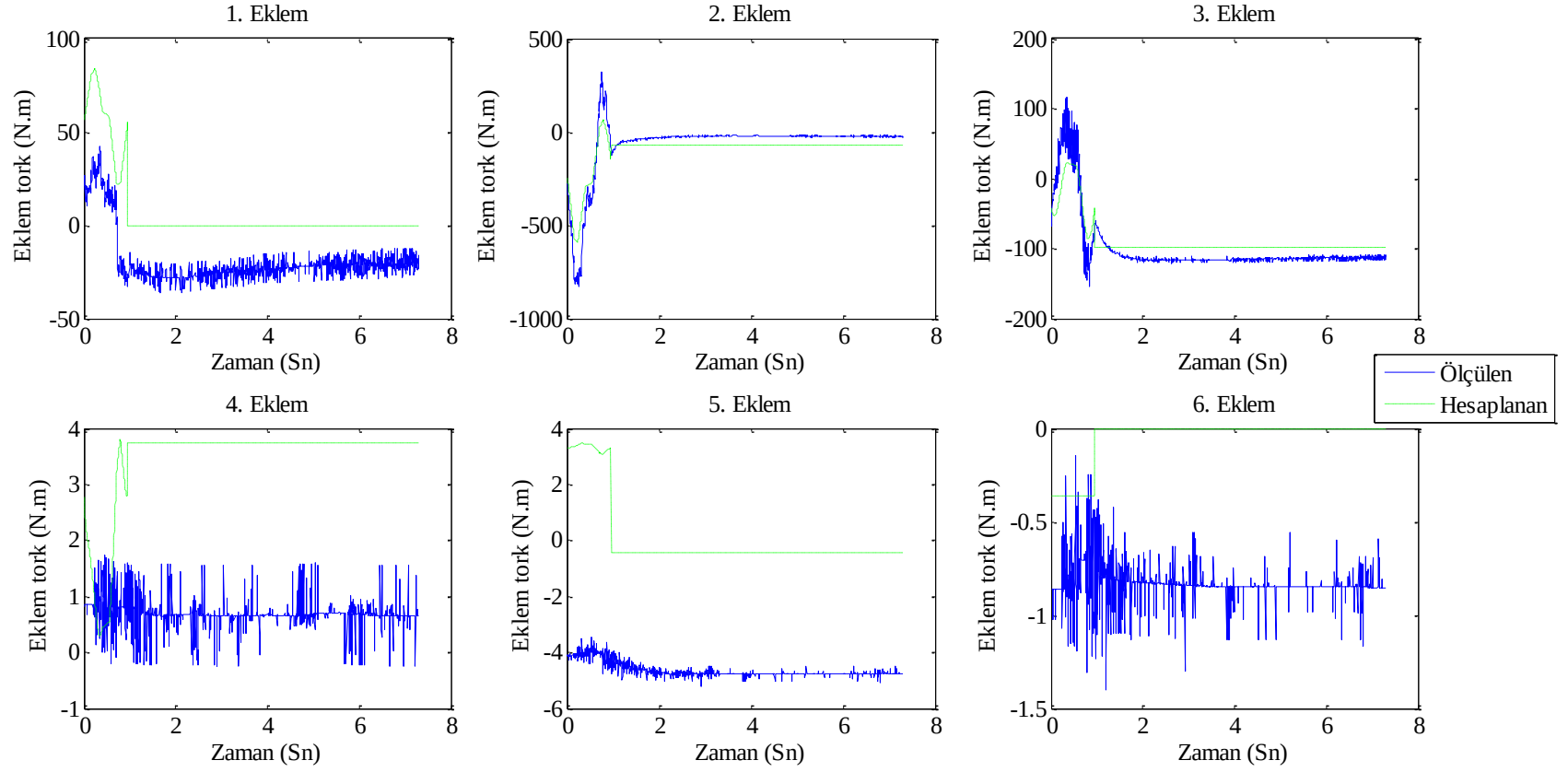
2. ve 3. eklemler eşzamanlı olarak 50° hareket ettirilirse Şekil B 3.17’de 2. ve 3. eklemlerin açısal konum grafiği oluşmaktadır. Bunu sırasıyla eklem açısal hızı, eklem tork ve eklem tork % hata grafikleri takip etmektedir.



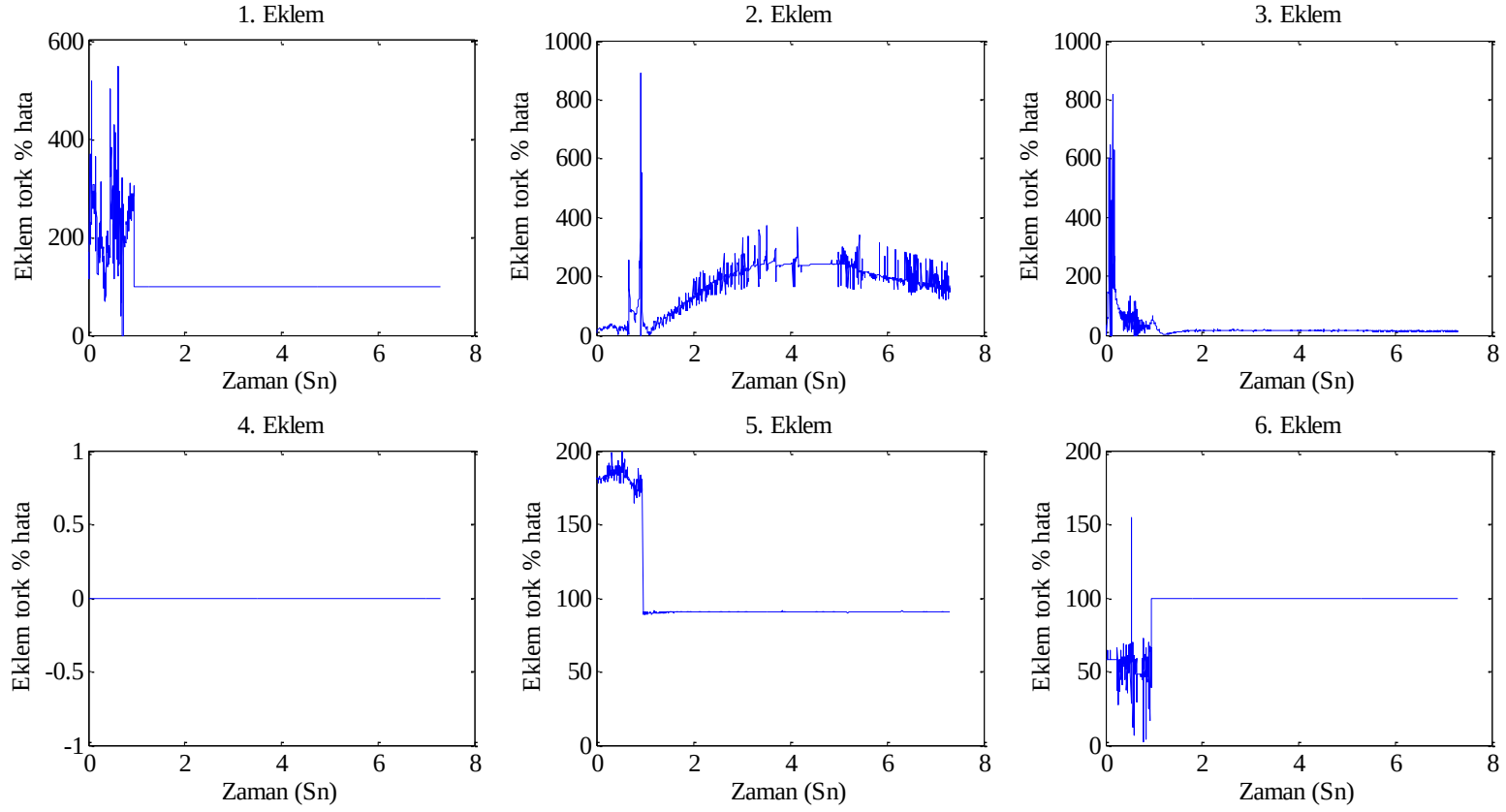
Şekil B 3.17 : 2. ve 3. eklemlerin açısal konum grafikleri.



Şekil B 3.18 : 2. ve 3. eklemlerin açısal hız grafikleri.

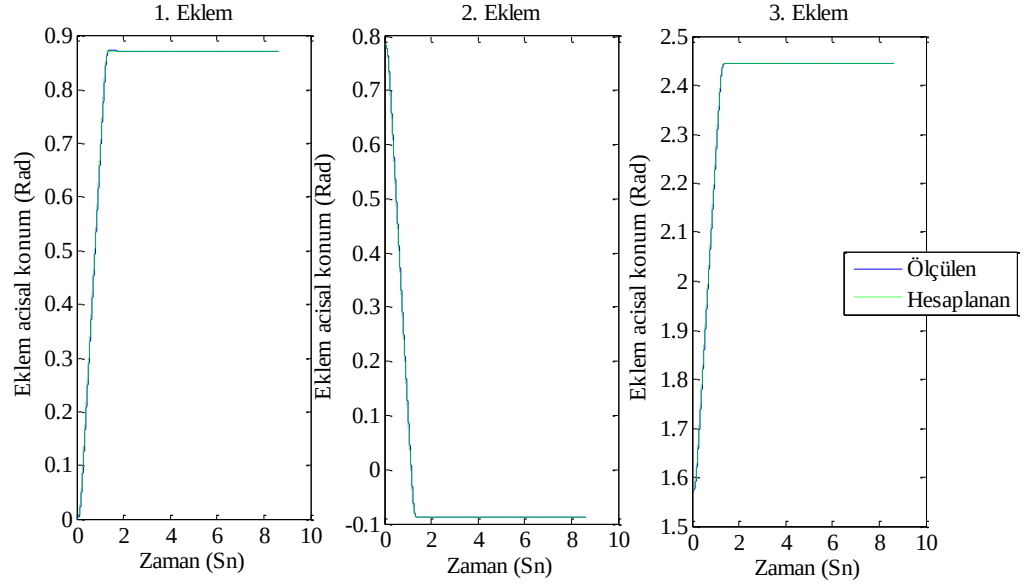


Şekil B 3.19 : 2. ve 3. eklemler hareket ederken tüm eklemler için tork grafikleri.

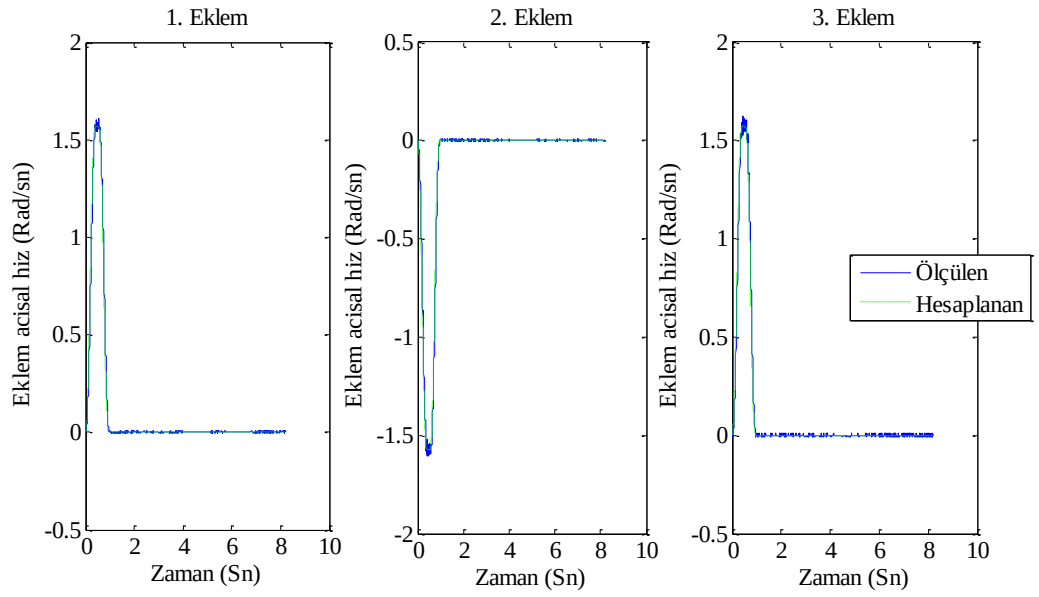


Şekil B 3.20 : 2. ve 3. eklemler hareket ederken tüm eklemler için tork % hata grafikleri.

1., 2. ve 3. eklemler eşzamanlı olarak 50° hareket ettirilirse Şekil B 3.21'de 1., 2. ve 3. eklemlerin açısal konum grafiği oluşmaktadır. Bunu sırasıyla eklem açısal hızı, eklem tork ve eklem tork % hata grafikleri takip etmektedir.

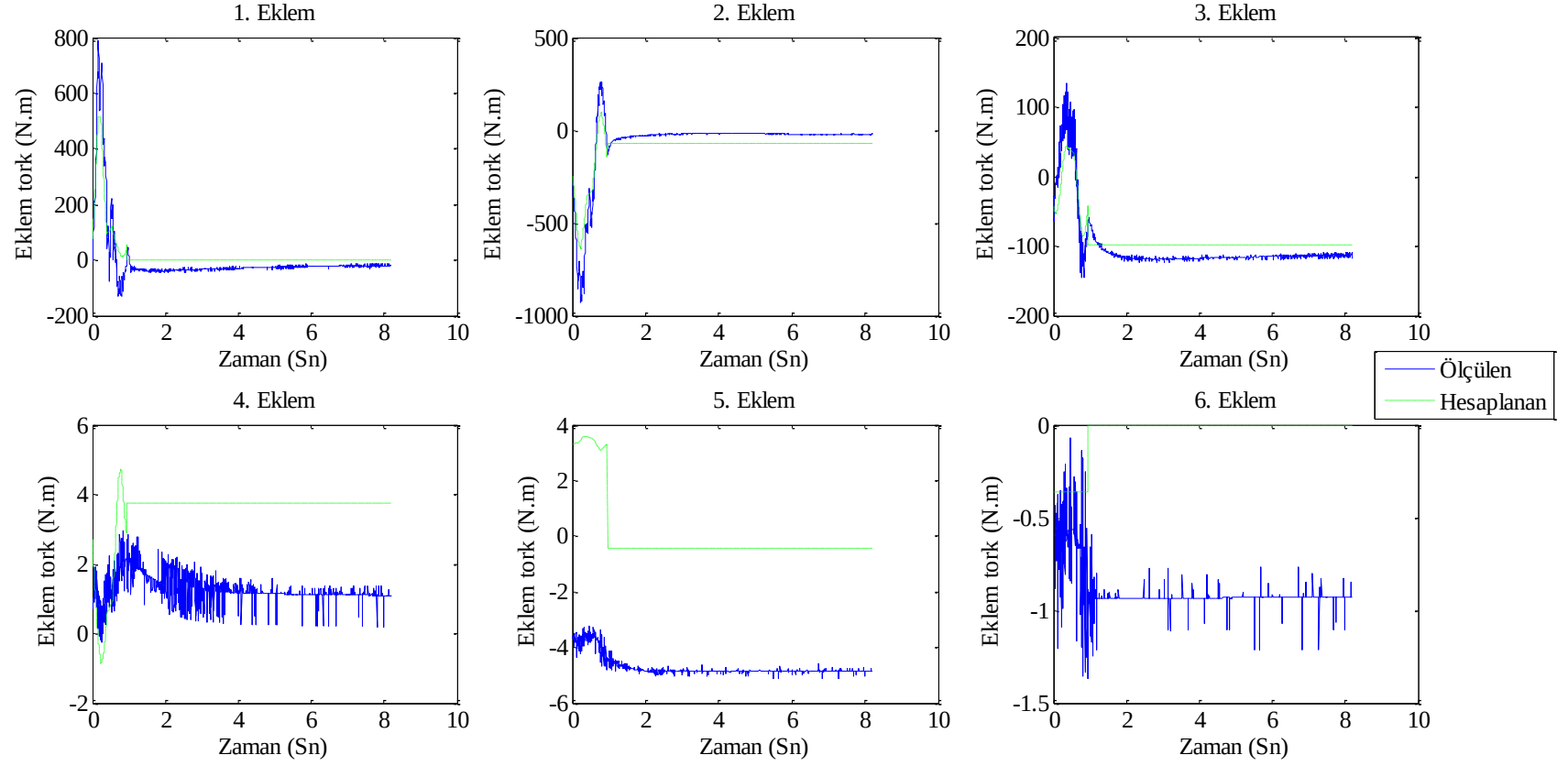


Şekil B 3.21 : 1., 2. ve 3. eklemlerin açısal konum grafikleri.

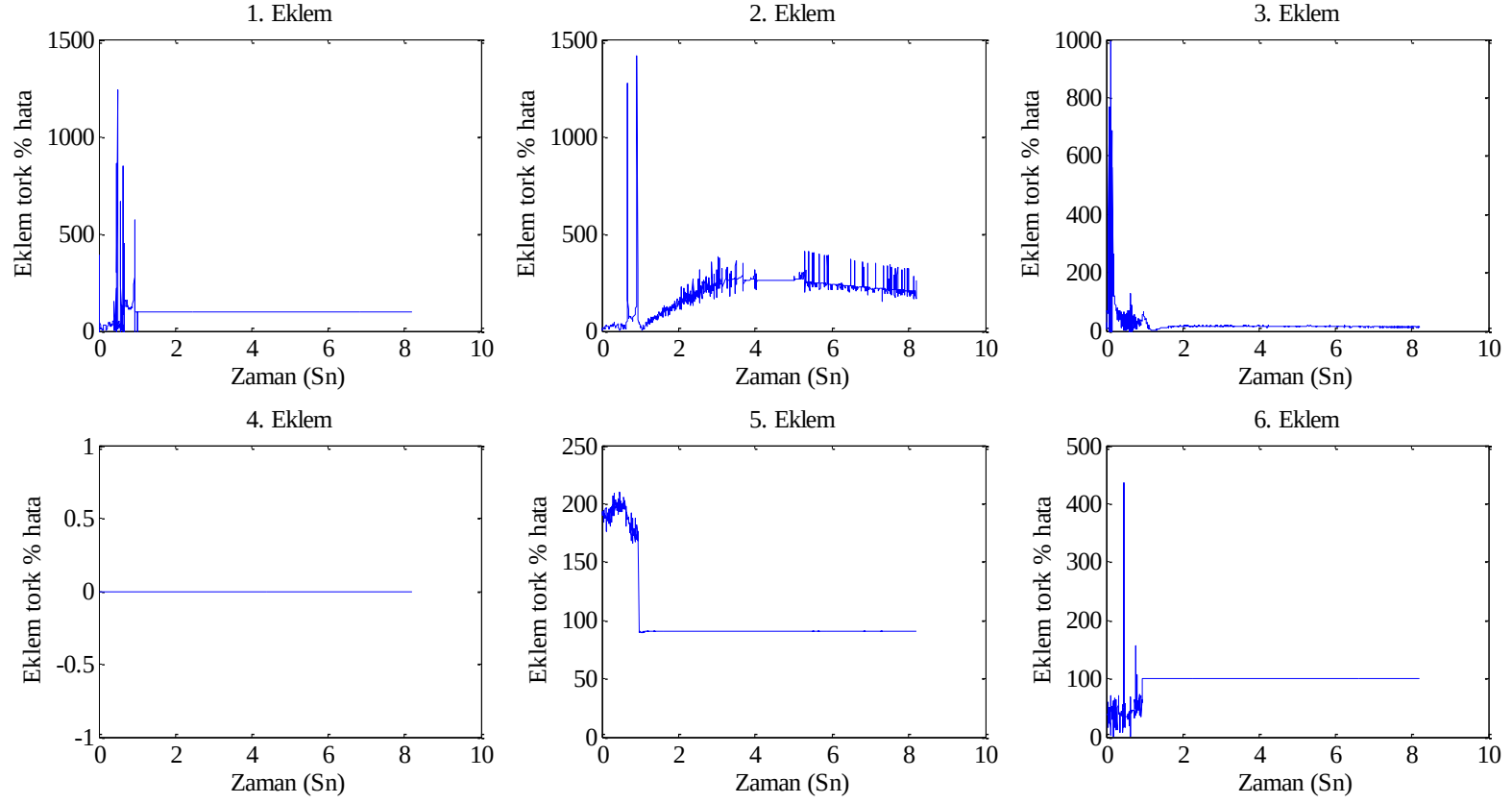


Şekil B 3.22 : 1., 2. ve 3. eklemlerin açısal hız grafikleri.

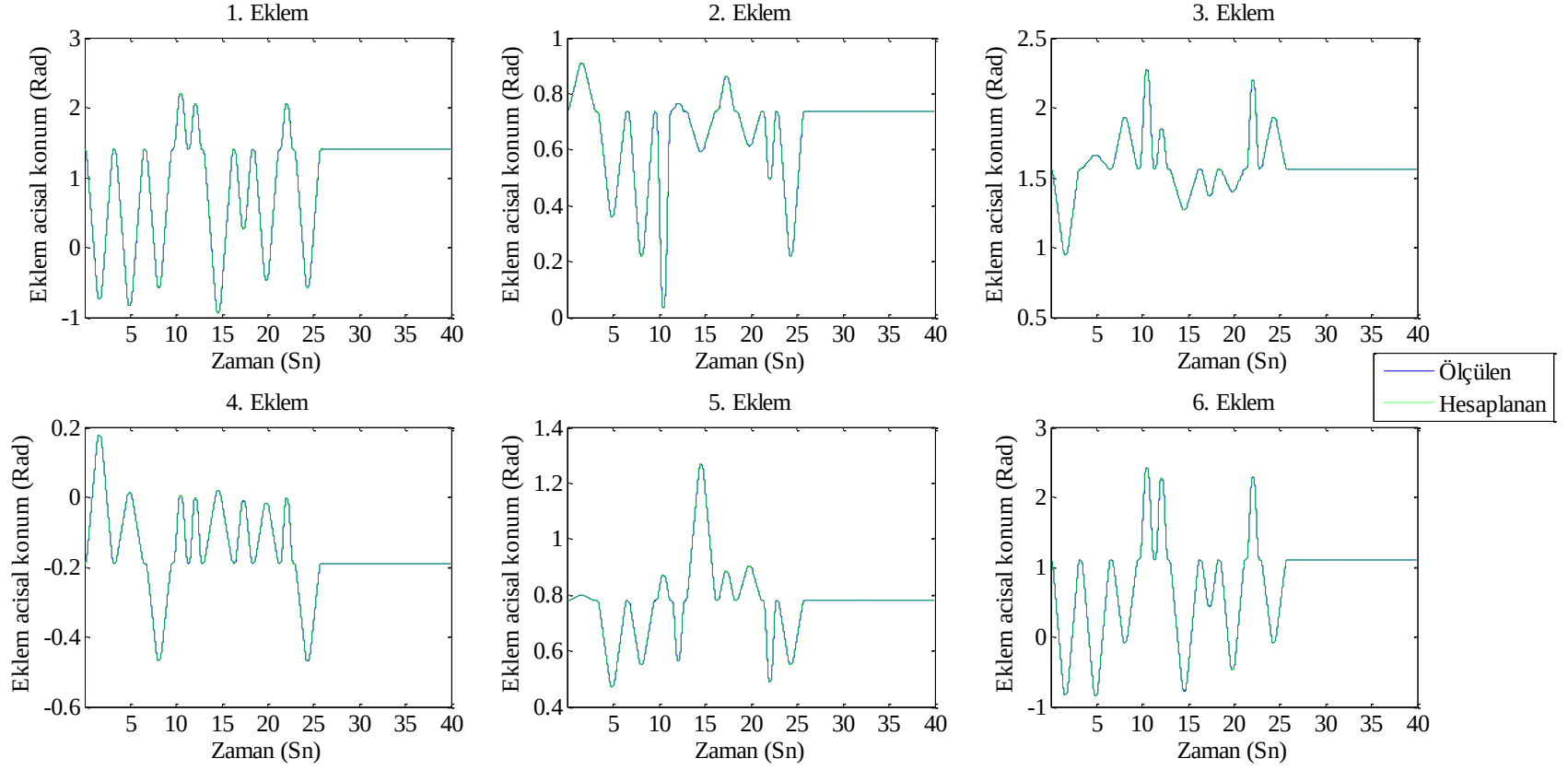
Tüm eklemler eşzamanlı ve rastgele hareket ettirilirse Şekil B 3.25'de tüm eklemlerin açısal konum grafiği oluşmaktadır. Bunu sırasıyla eklem açısal hızı, eklem tork ve eklem tork % hata grafikleri takip etmektedir.



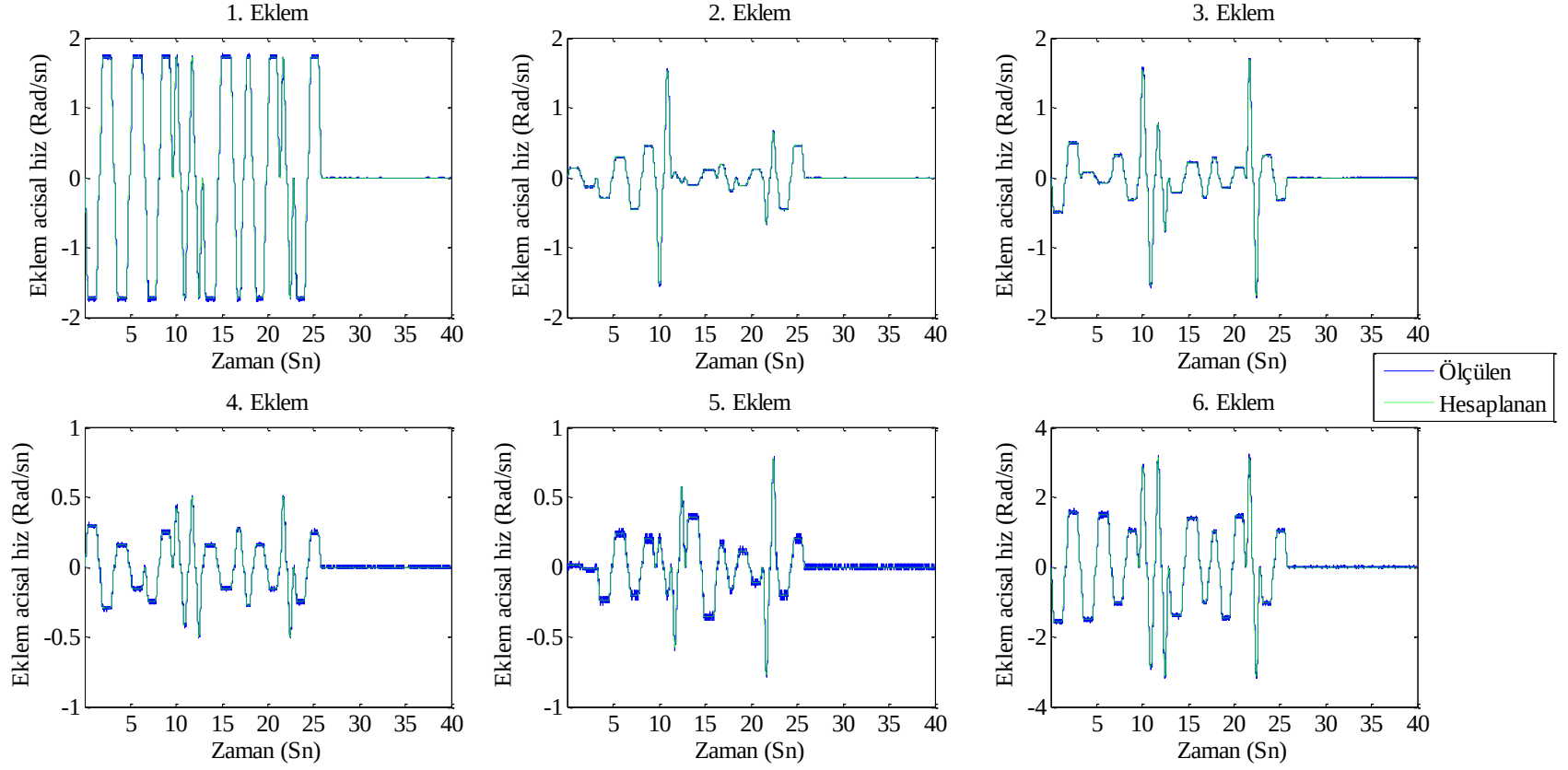
Şekil B 3.23 : 1., 2. ve 3. eklemler hareket ederken tüm eklemler için tork grafikleri.



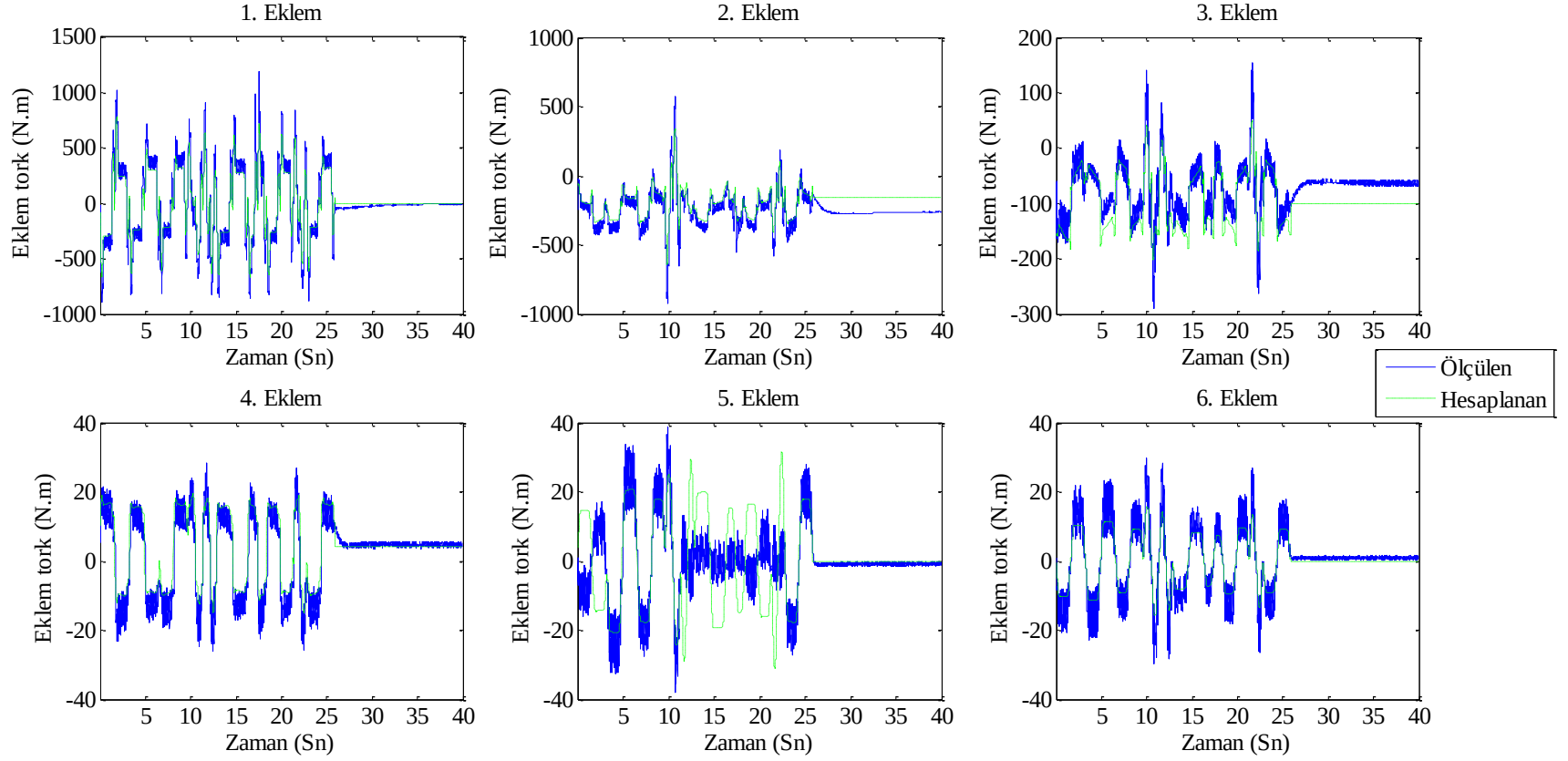
Şekil B 3.24 : 1., 2. ve 3. eklemler hareket ederken tüm eklemler için tork % hata grafikleri.



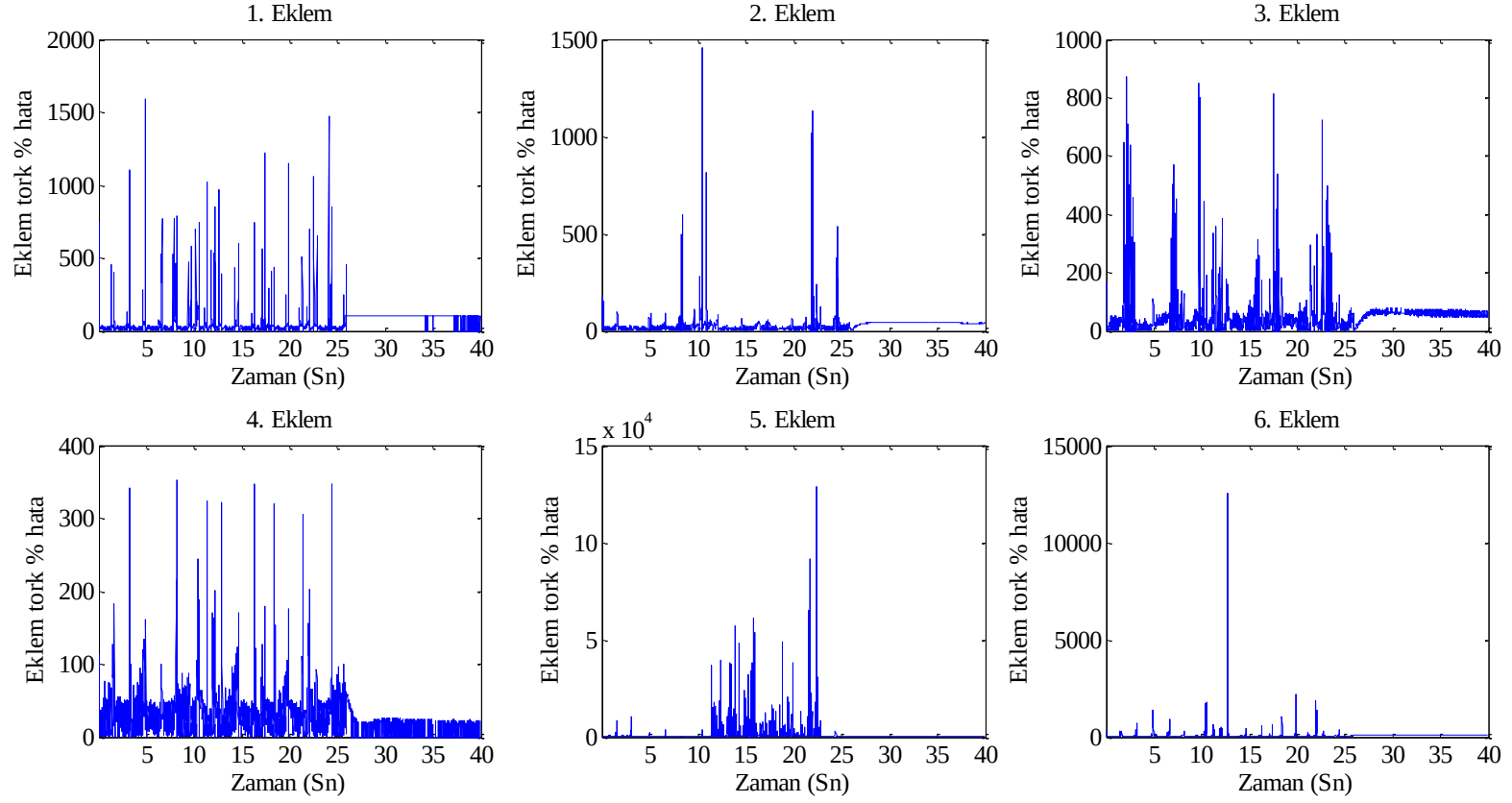
Şekil B 3.25 : Tüm eklemlerin açısai konum grafikleri.



Şekil B 3.26 : Tüm. eklemlerin açısai hız grafikleri.

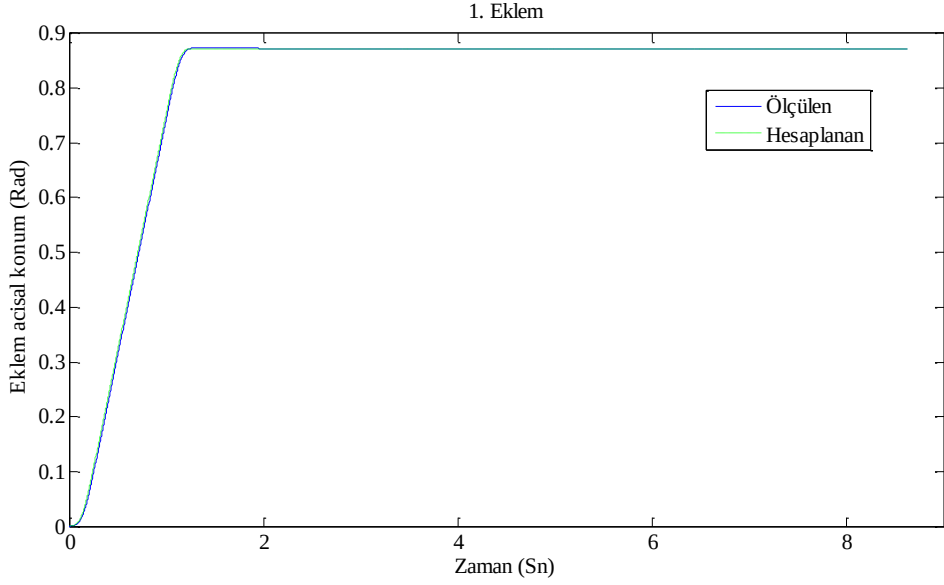


Şekil B 3.27 : Tüm. eklemler hareket ederken eklem tork grafikleri.

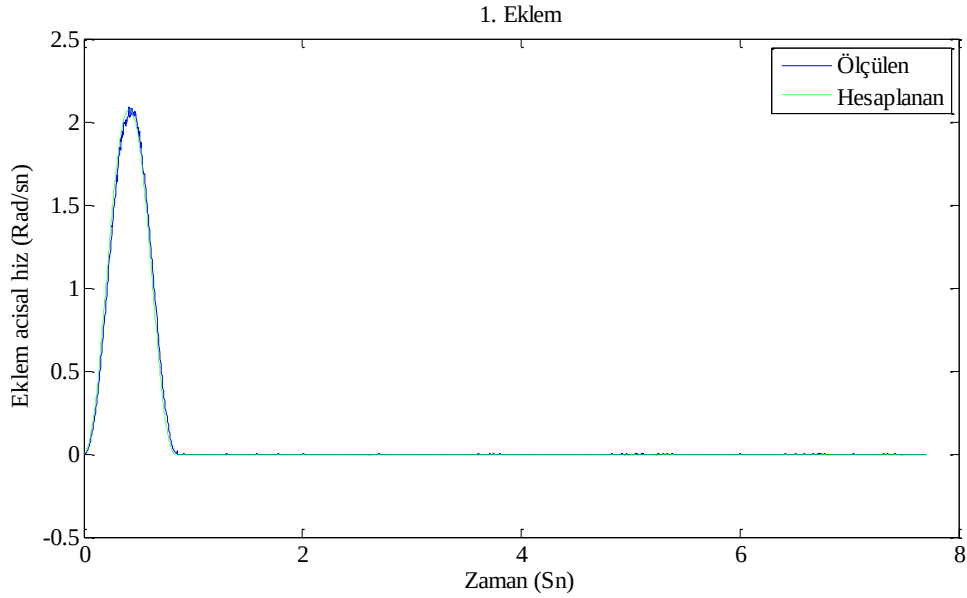


Şekil B 3.28 : Tüm eklemler hareket ederken eklem tork % hata grafikleri.

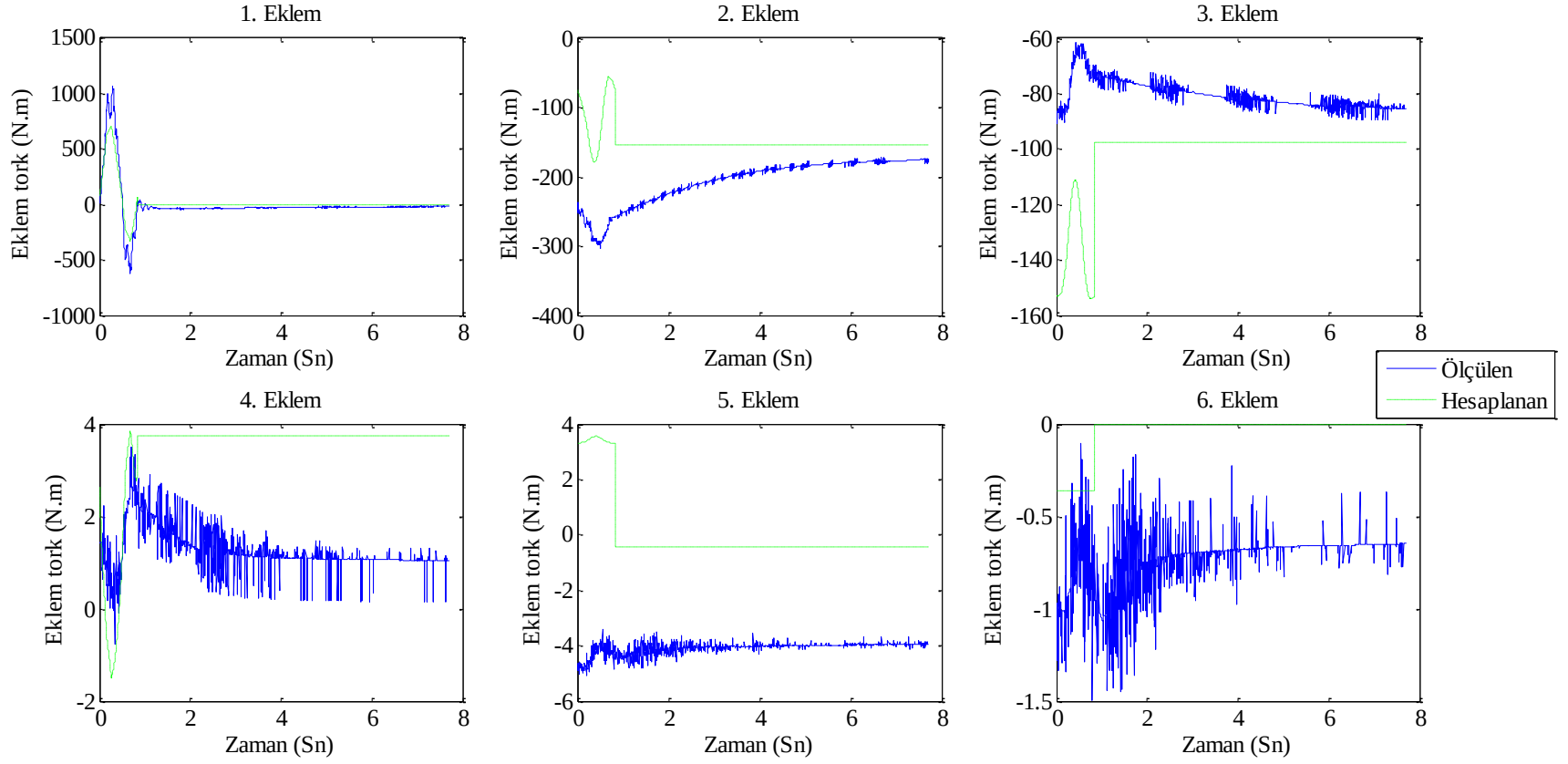
Bu bölümde verilen tüm grafikler manipülatörün nominal hızının %100'ı, maksimum ivmesinin %100 ve eklemlerin harekete başlama konumları- tüm eklemlerin birlikte hareketi dışında- 2. eklem 45°, 3. eklem 90° ve diğer eklemlerin '0' olduğu durum için elde edilmektedir. 1. eklem 50° hareket ettirilirse



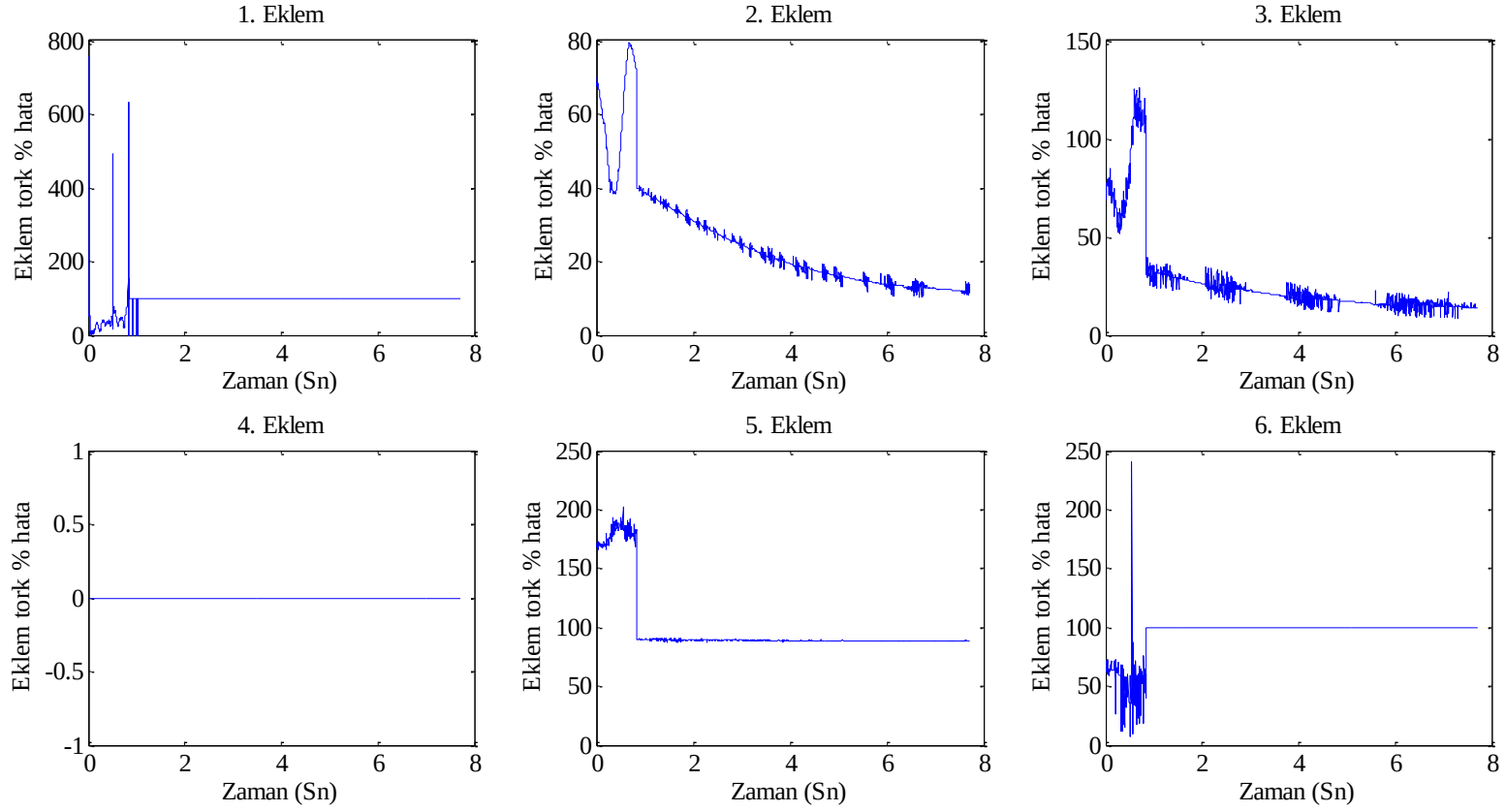
Şekil B 3.29 : 1. eklem açısal konum grafiği.



Şekil B 3.30 : 1. eklem açısal hız grafiği.

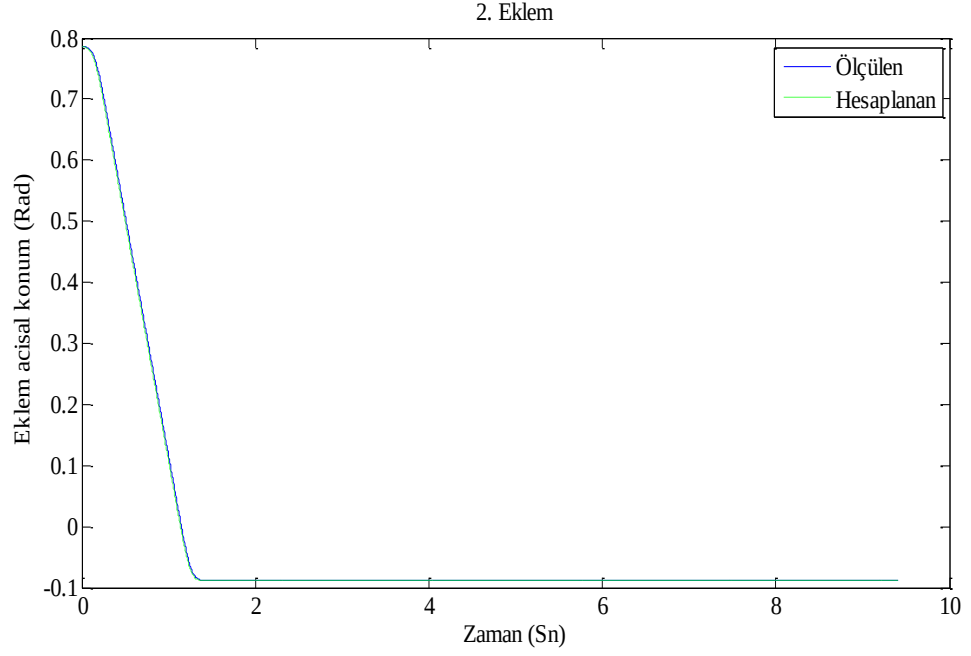


Şekil B 3.31 : 1. eklem hareket ederken tüm eklemler için tork grafikleri.

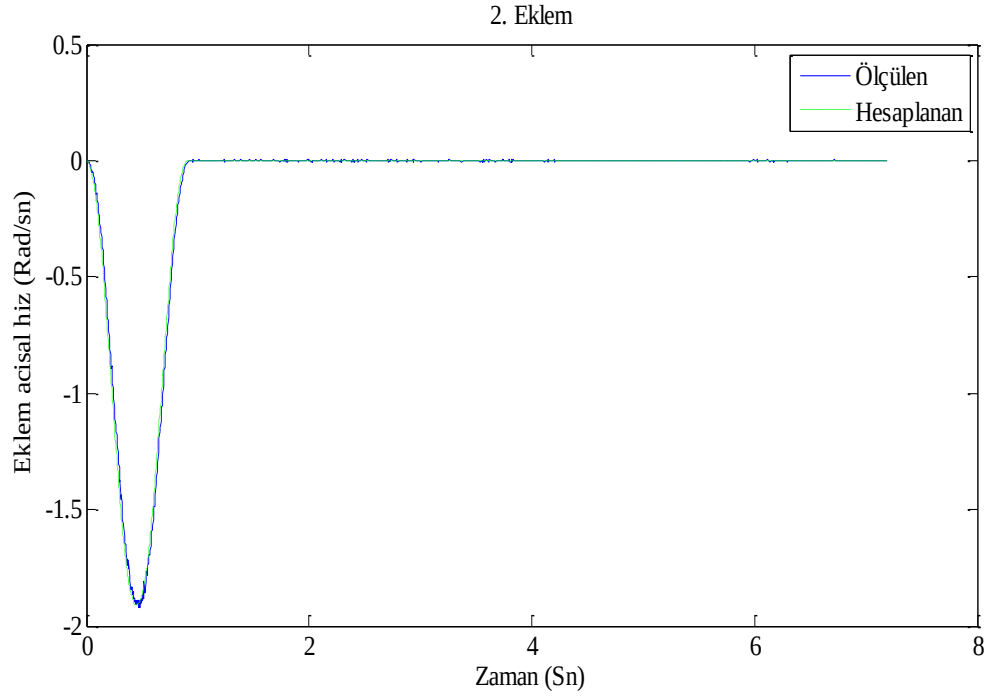


Şekil B 3.32 : 1. eklem hareket ederken tüm eklemler için tork % hata grafiği.

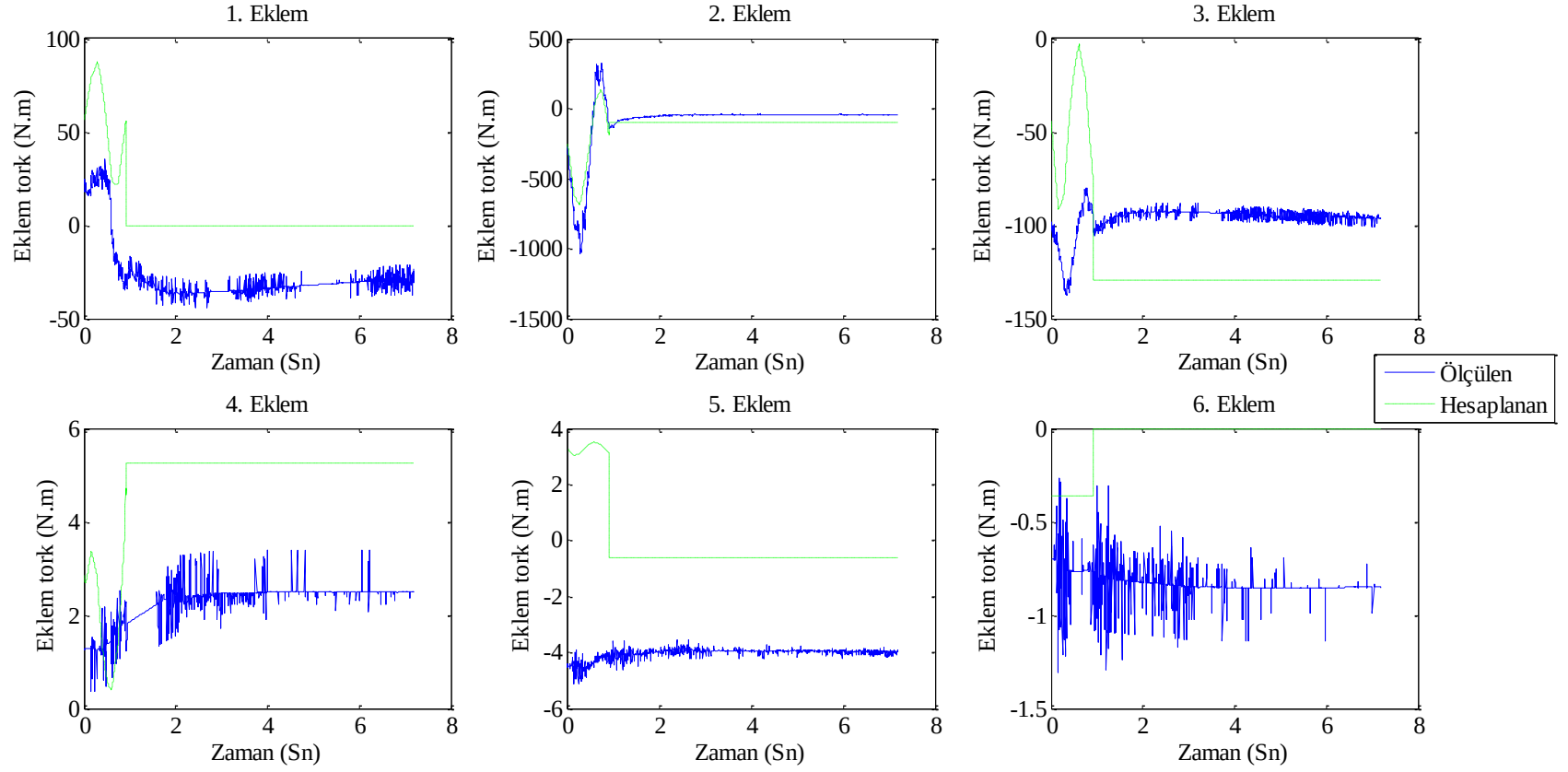
2. eklem 50° hareket ettirilirse Şekil B 3.33’de 2. eklemın açısıl konum grafiği oluşmaktadır. Bunu sırasıyla eklem açısıl hızı, eklem tork ve eklem tork % hata grafikleri takip etmektedir. 2. eklem, çalışma uzayının dönüş yönünü sınırlamasından dolayı diğer eklemlerin dönüş yönünün tersine hareket ettirilmektedir.



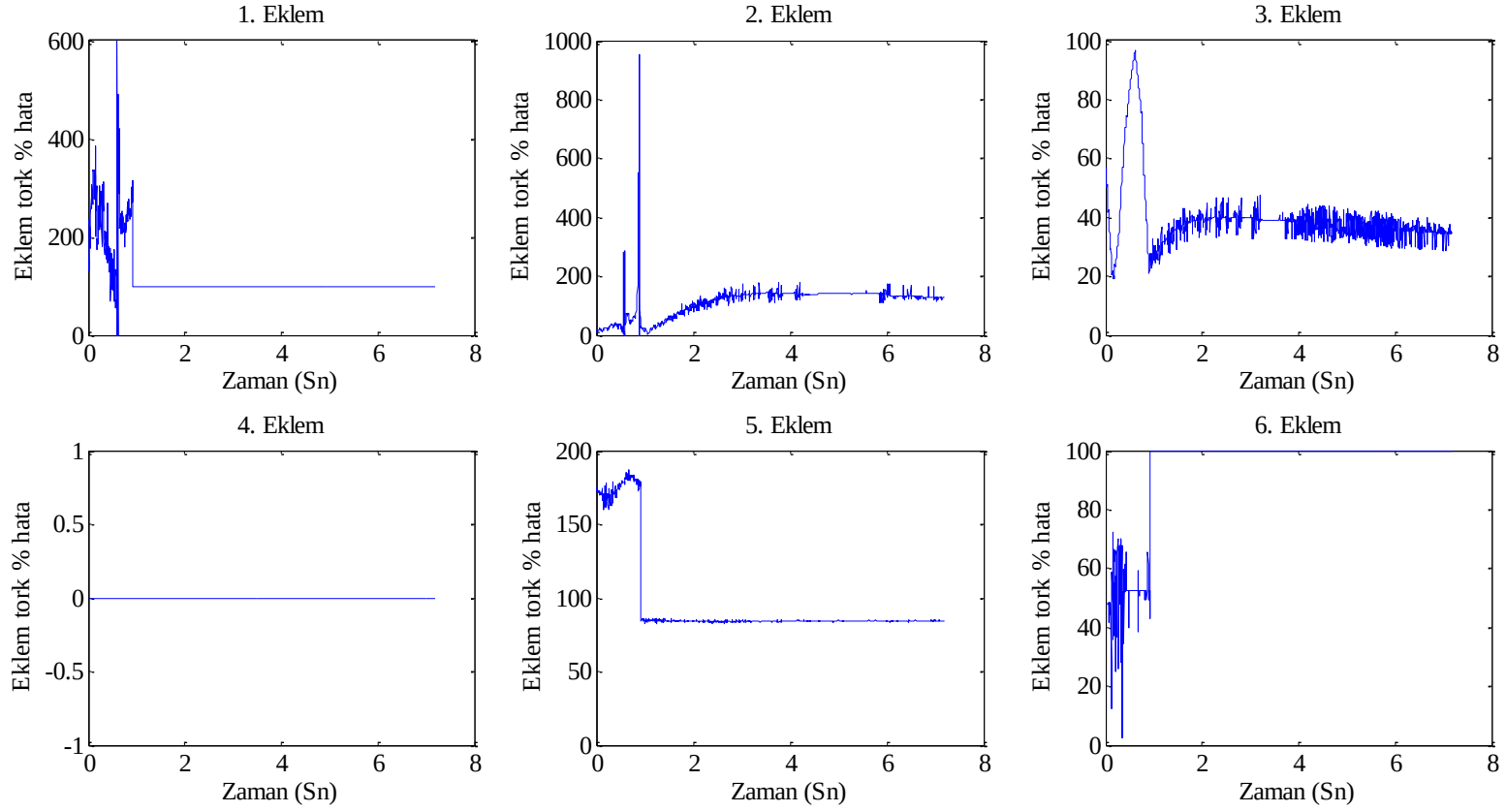
Şekil B 3.33 : 2. eklem açısıl konum grafiği.



Şekil B 3.34 : 2. eklem açısıl hız grafiği.

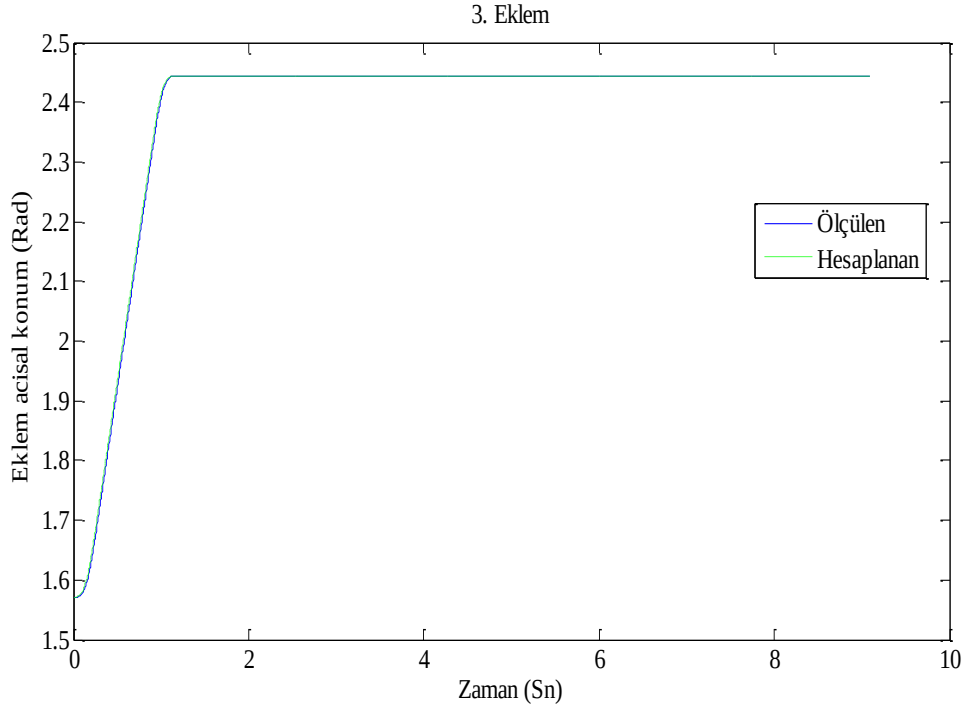


Şekil B 3.35 : 2. eklem hareket ederken tüm eklemler için tork grafikleri.

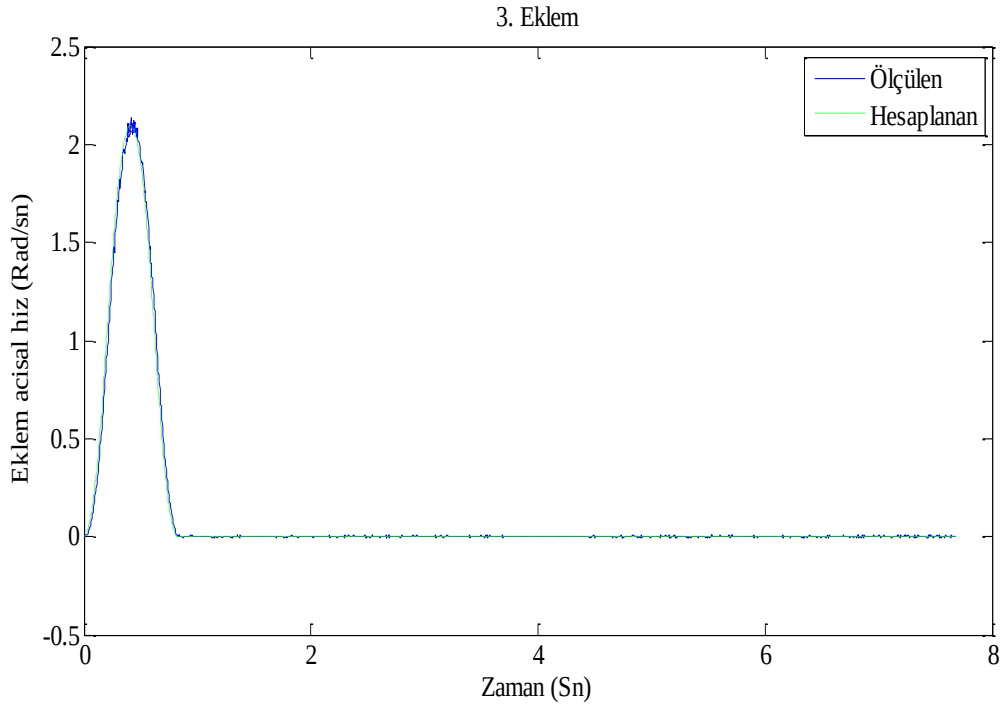


Şekil B 3.36 : 2. eklem hareket ederken tüm eklemler için tork % hata grafiği.

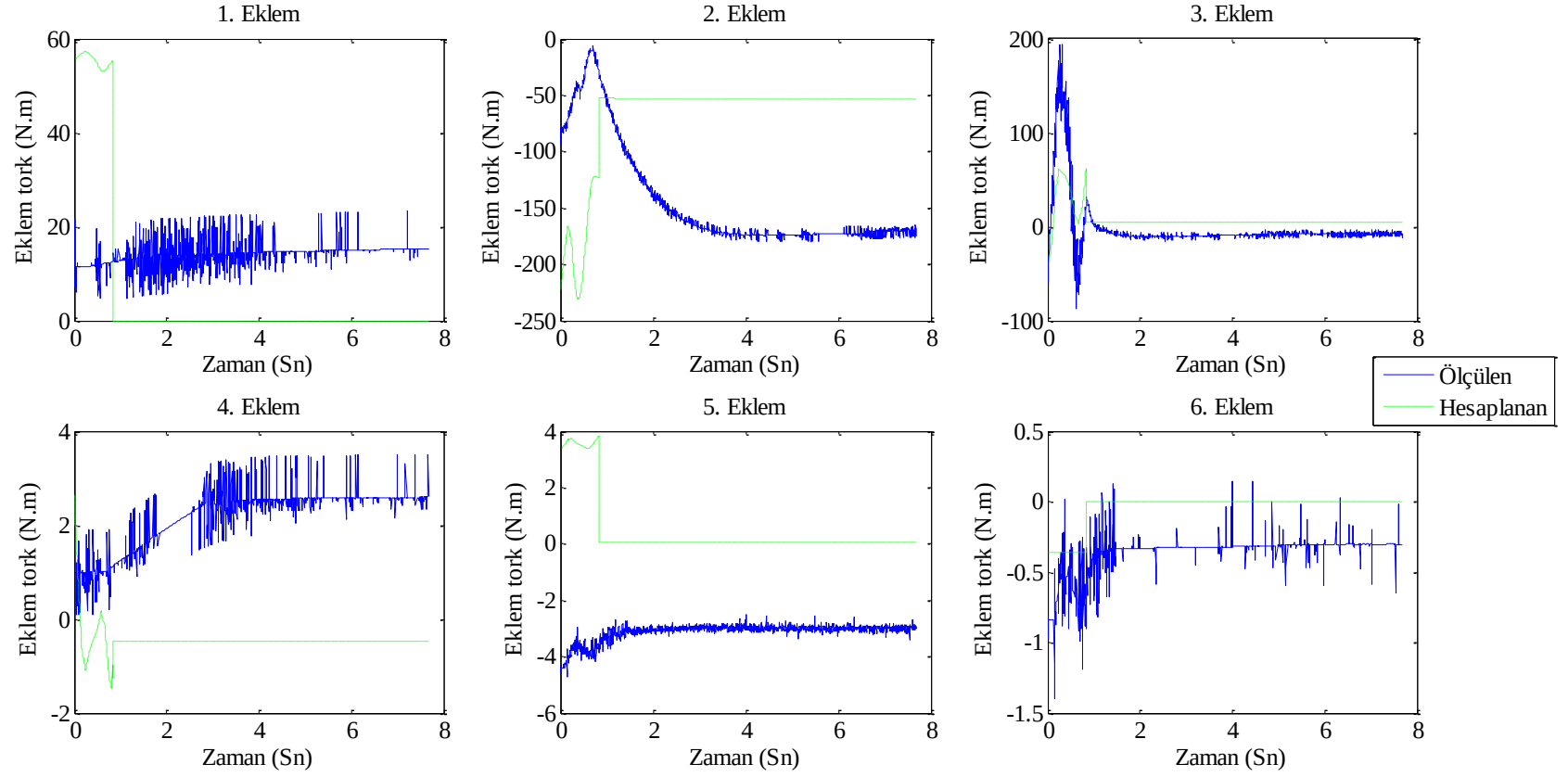
3. eklem 50° hareket ettirilirse Şekil B 3.37’de 3. eklem açısai konum grafiği oluşmaktadır. Bunu sırasıyla eklem açısai hızı, eklem tork ve eklem tork % hata grafikleri takip etmektedir



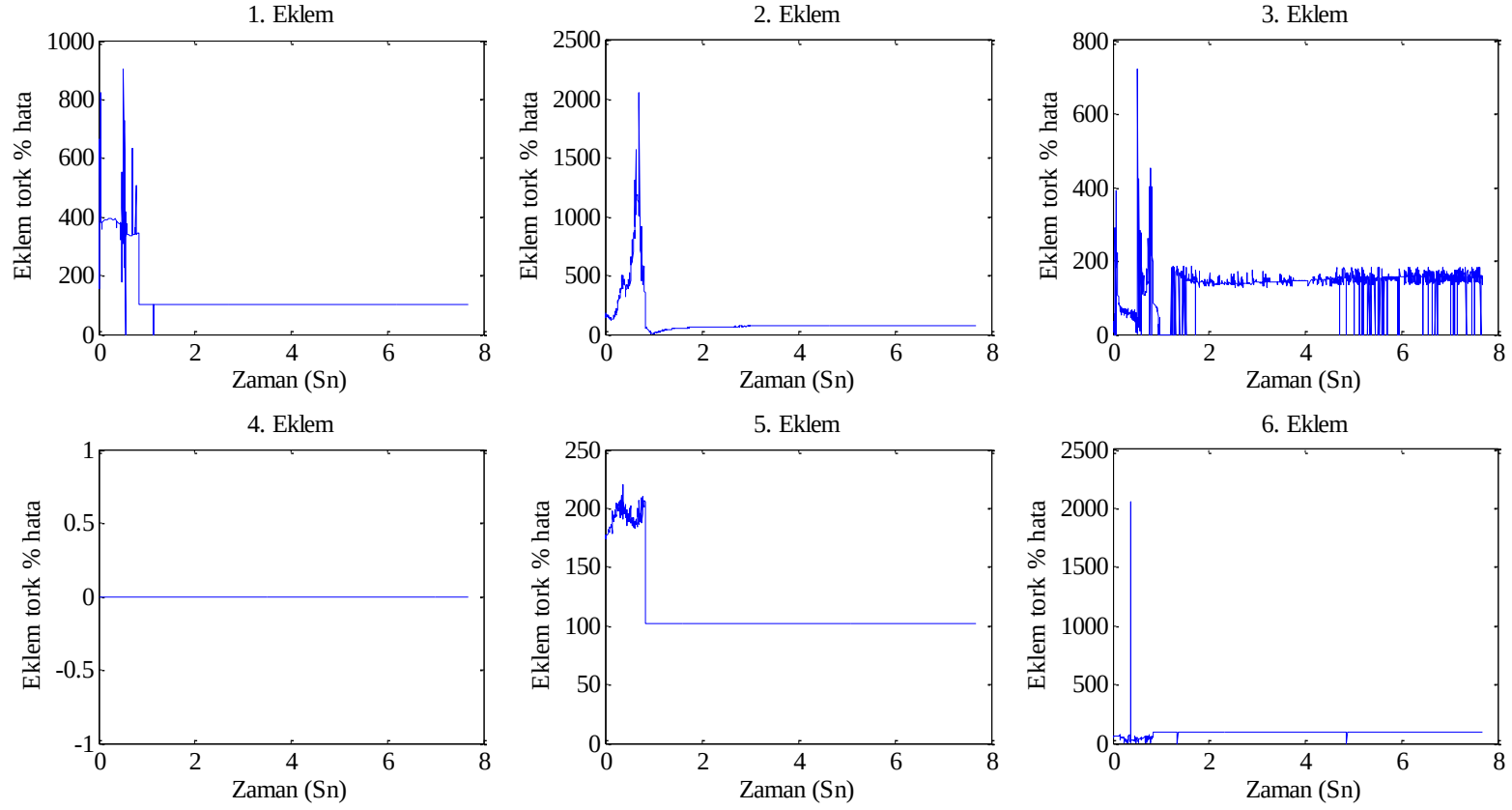
Şekil B 3.37 : 3. eklem açısai konum grafiği.



Şekil B 3.38 : 3. eklem açısai hız grafiği.

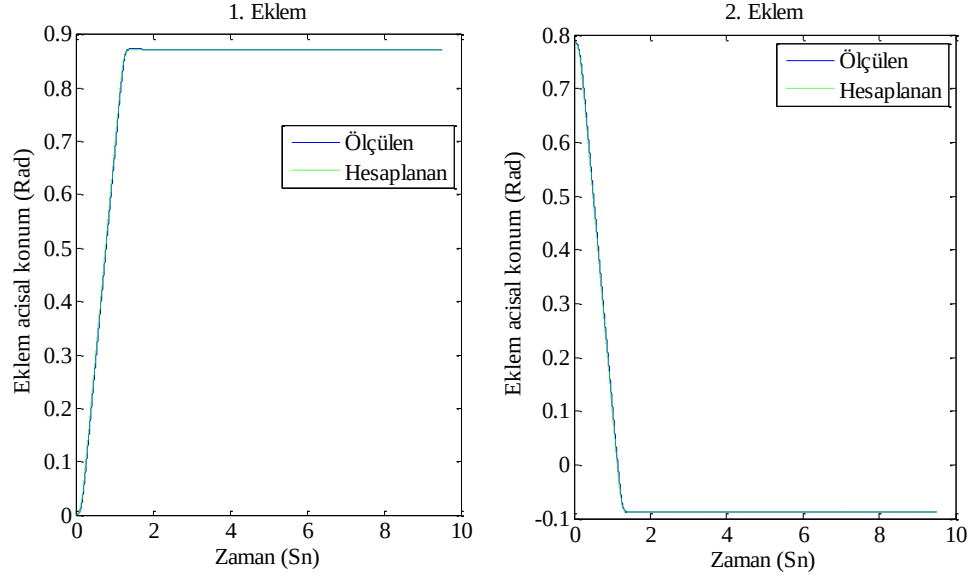


Şekil B 3.39 : 3. eklem hareket ederken tüm eklemler için tork grafikleri.

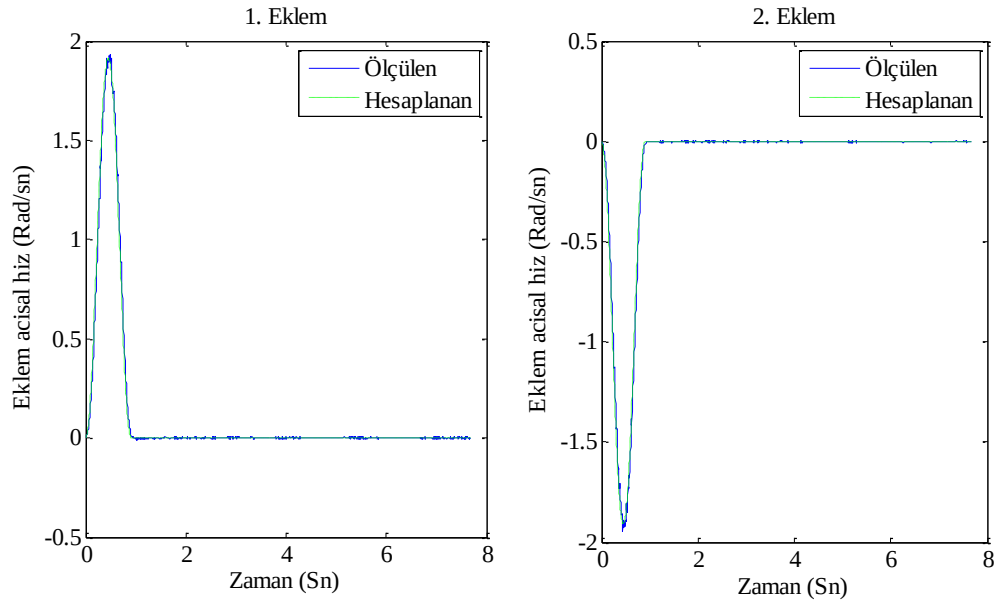


Şekil B 3.40 : 3. eklem hareket ederken tüm eklemler için tork % hata grafiği.

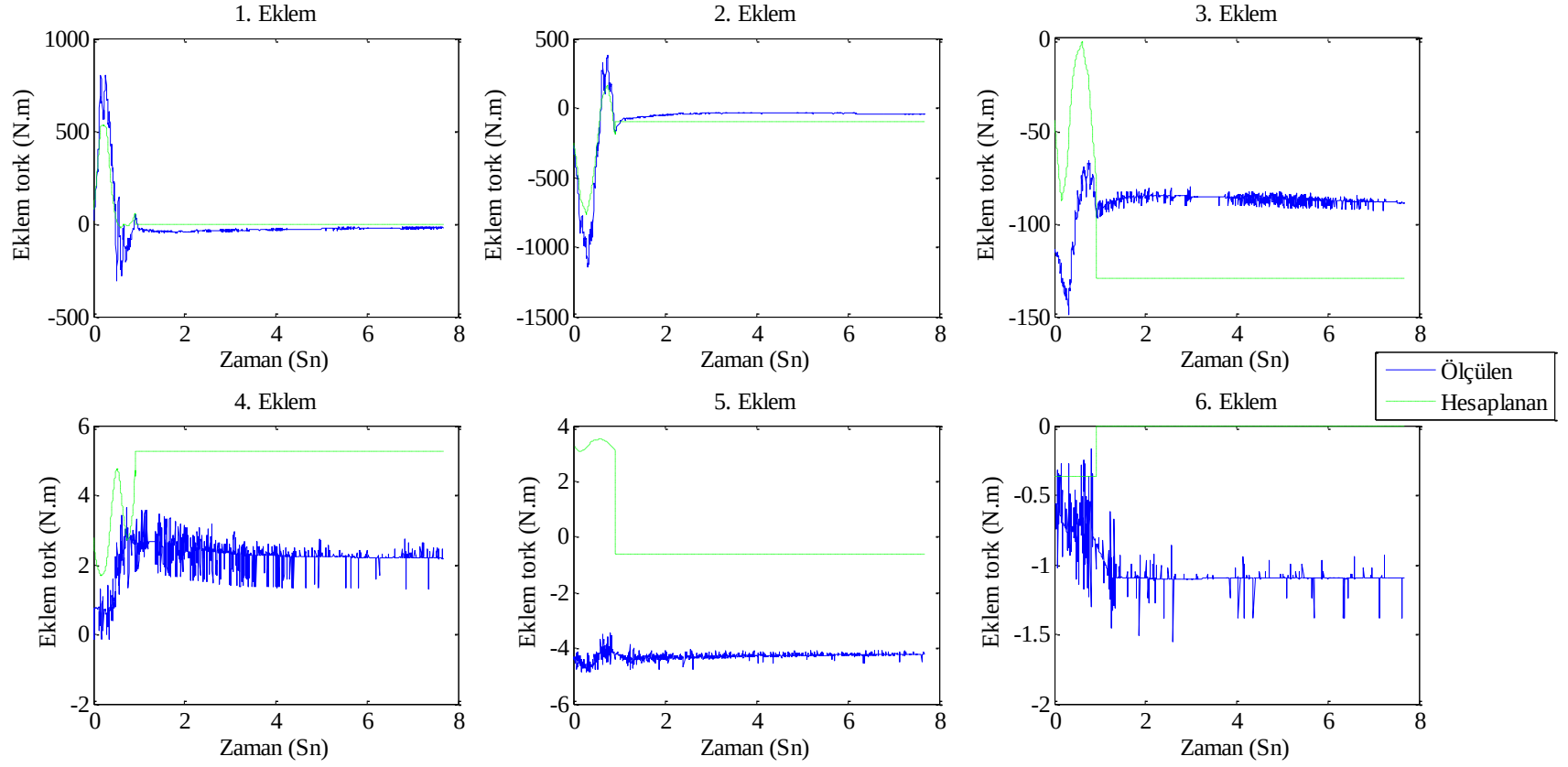
1. ve 2. eklemler eşzamanlı olarak 50° hareket ettirilirse Şekil B 3.41'da 1. ve 2. eklemlerin açısal konum grafiği oluşmaktadır. Bunu sırasıyla eklem açısal hızı, eklem tork ve eklem tork % hata grafikleri takip etmektedir.



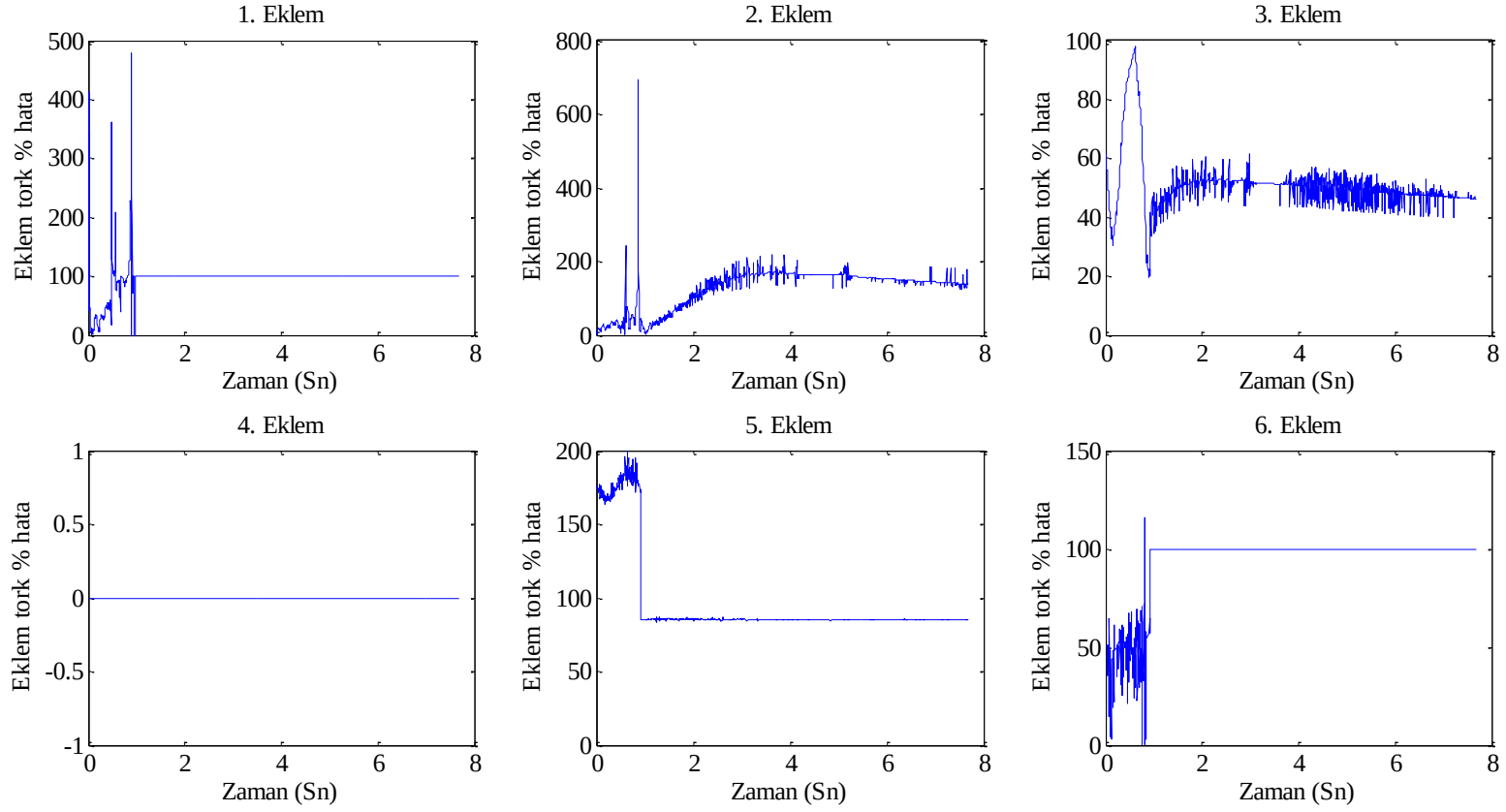
Şekil B 3.41 : 1. ve 2. eklemlerin açısal konum grafikleri.



Şekil B 3.42 : 1. ve 2. eklemlerin açısal hız grafikleri.

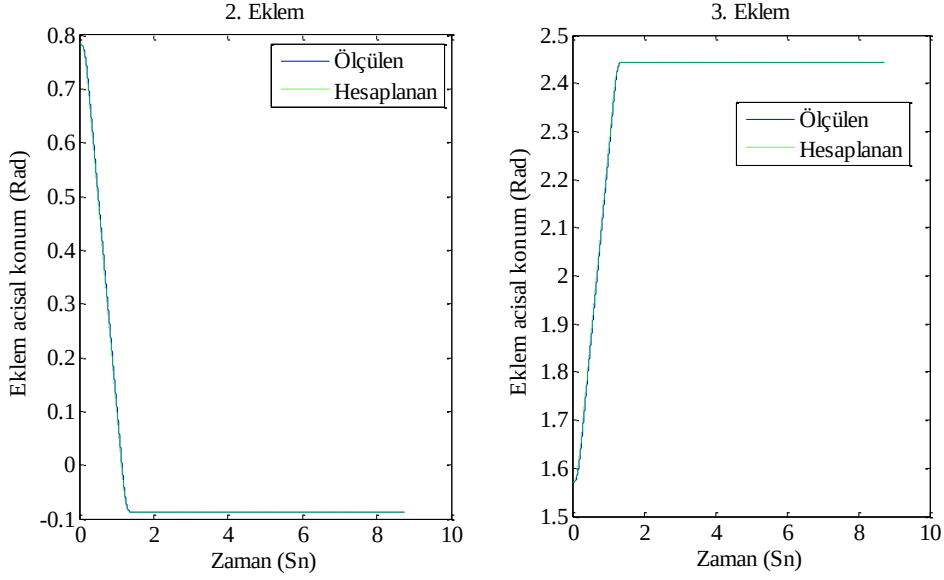


Şekil B 3.43 : 1. ve 2. eklemler hareket ederken tüm eklemler için tork grafikleri.

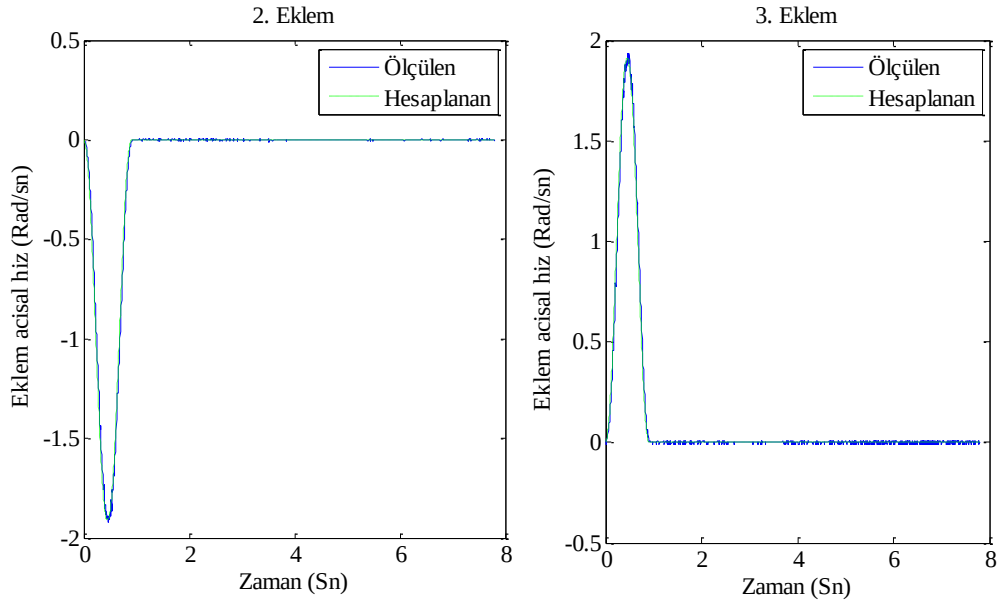


Şekil B 3.44 : 1. ve 2. eklemler hareket ederken tüm eklemler için tork % hata grafikleri.

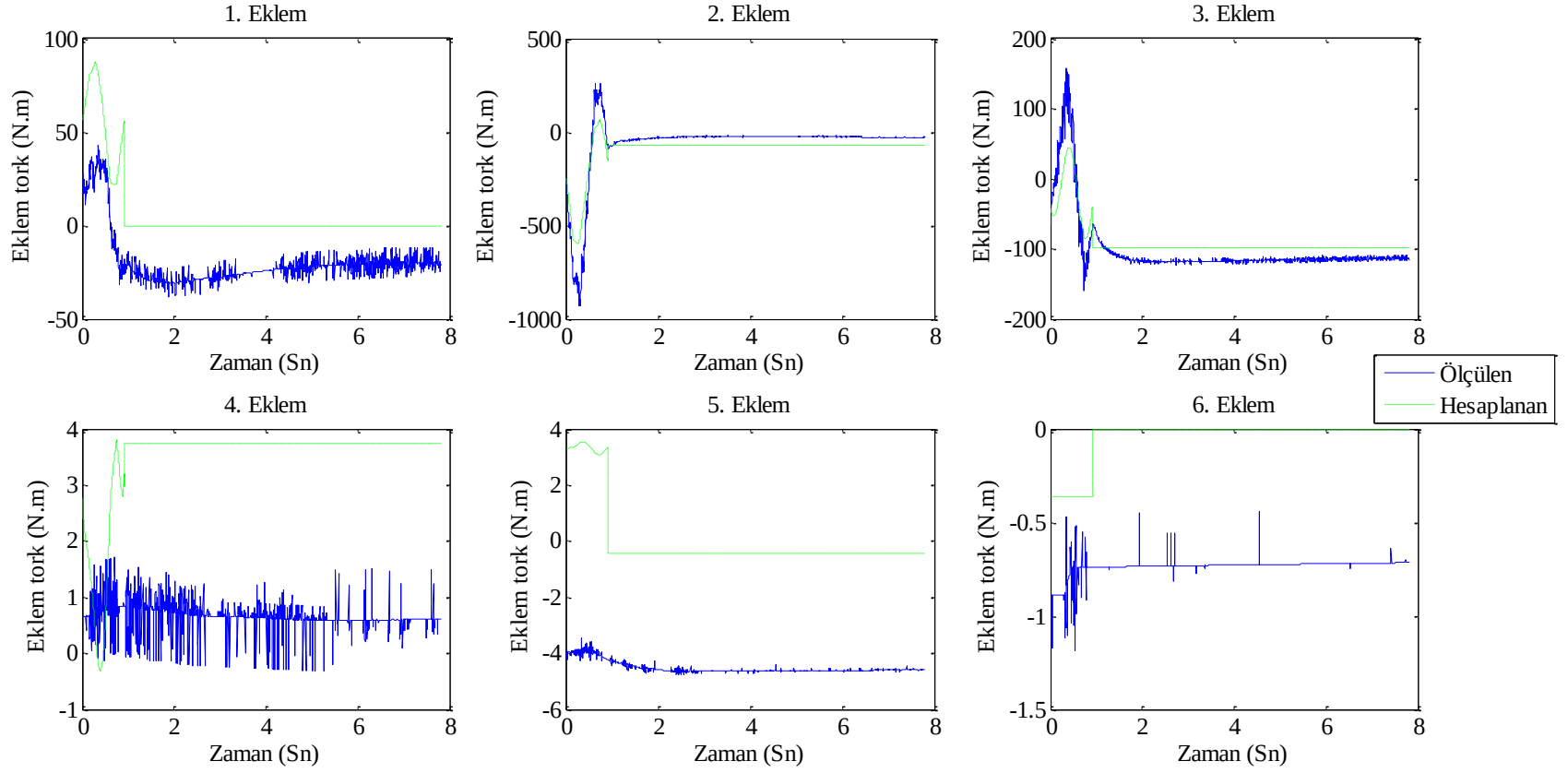
2. ve 3. eklemler eşzamanlı olarak 50° hareket ettirilirse Şekil B 3.45’de 2. ve 3. eklemlerin açısal konum grafiği oluşmaktadır. Bunu sırasıyla eklem açısal hızı, eklem tork ve eklem tork % hata grafikleri takip etmektedir.



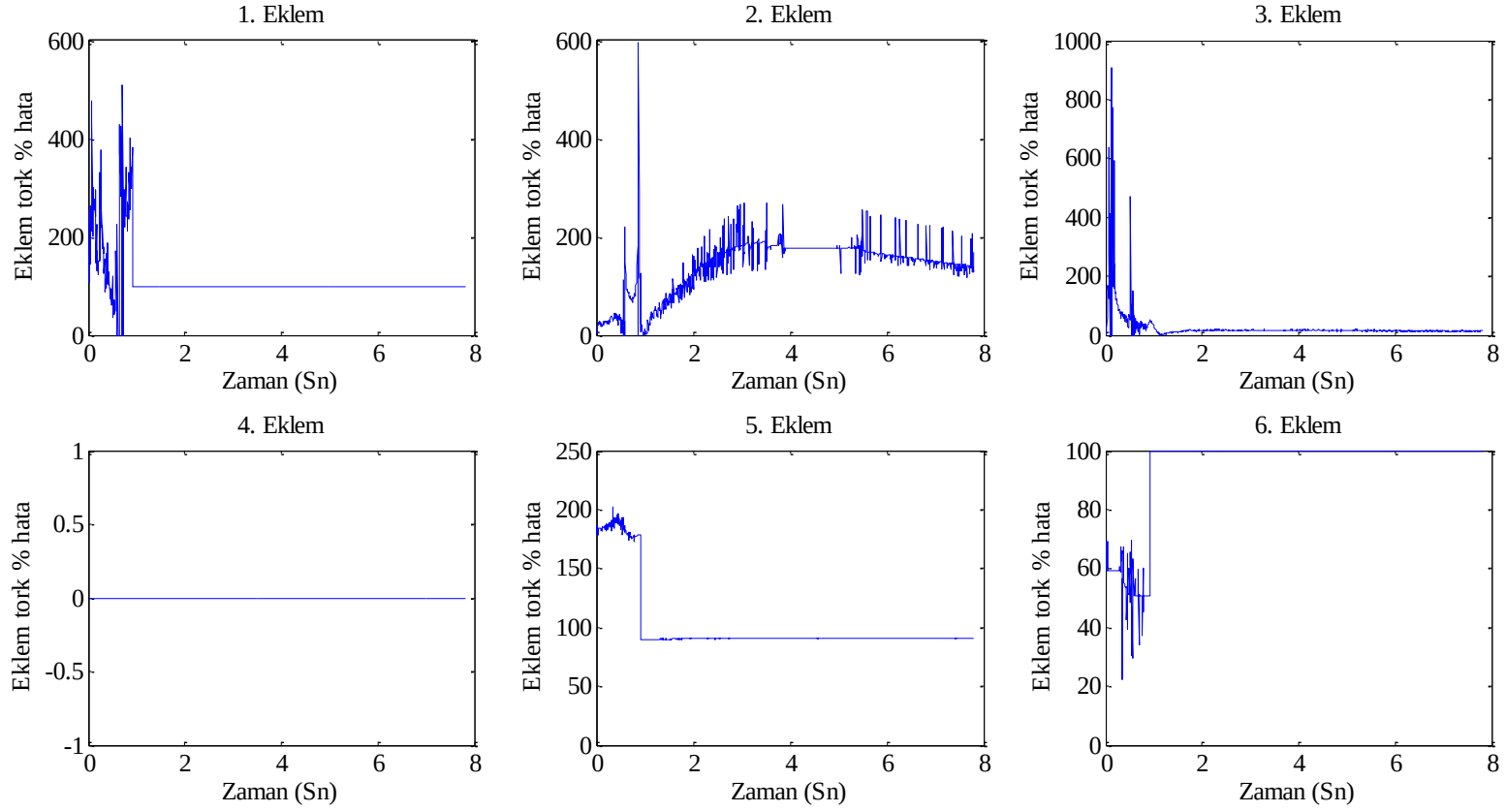
Şekil B 3.45 : 2. ve 3. eklemlerin açısal konum grafikleri.



Şekil B 3.46 : 2. ve 3. eklemlerin açısal hız grafikleri.

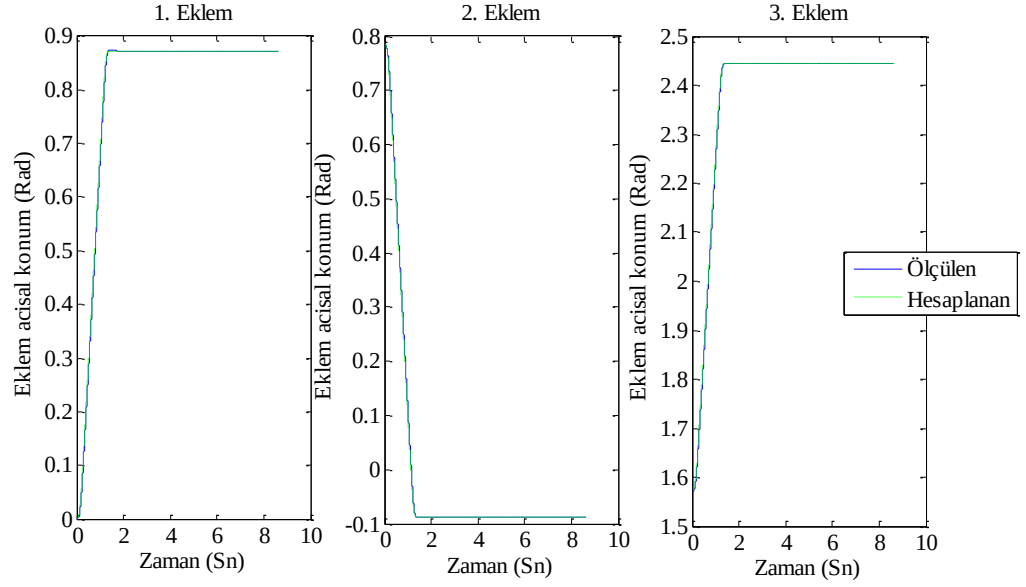


Şekil B 3.47 : 2. ve 3. eklemler hareket ederken tüm eklemler için tork grafikleri.

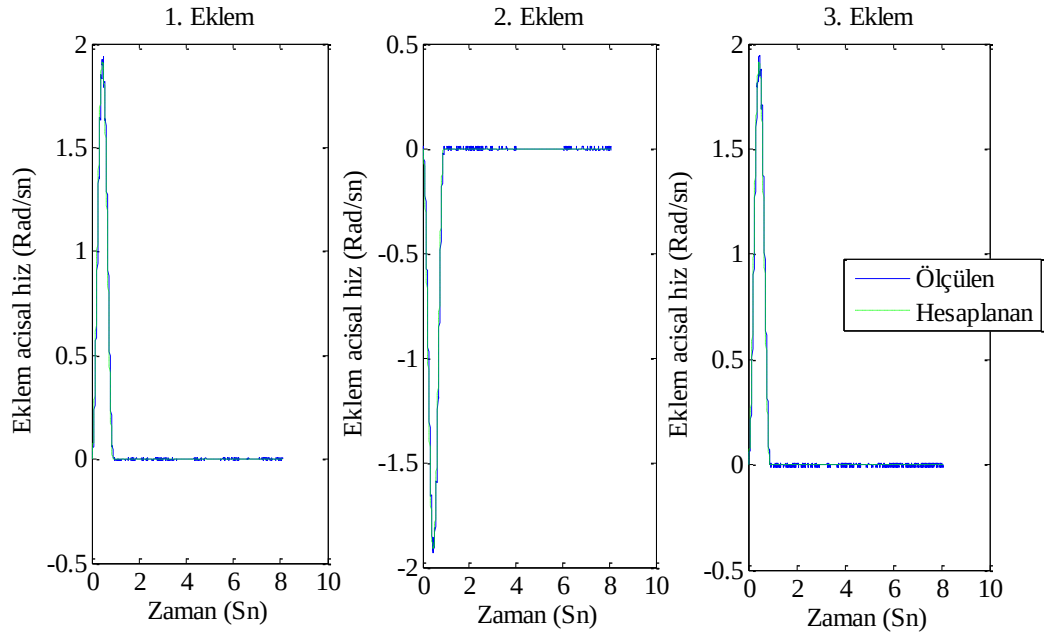


Şekil B 3.48 : 2. ve 3. eklemler hareket ederken tüm eklemler için tork % hata grafikleri.

1., 2. ve 3. eklemler eşzamanlı olarak 50° hareket ettirilirse Şekil B 3.49'da 1., 2. ve 3. eklemlerin açısal konum grafiği oluşmaktadır. Bunu sırasıyla eklem açısal hızı, eklem tork ve eklem tork % hata grafikleri takip etmektedir.

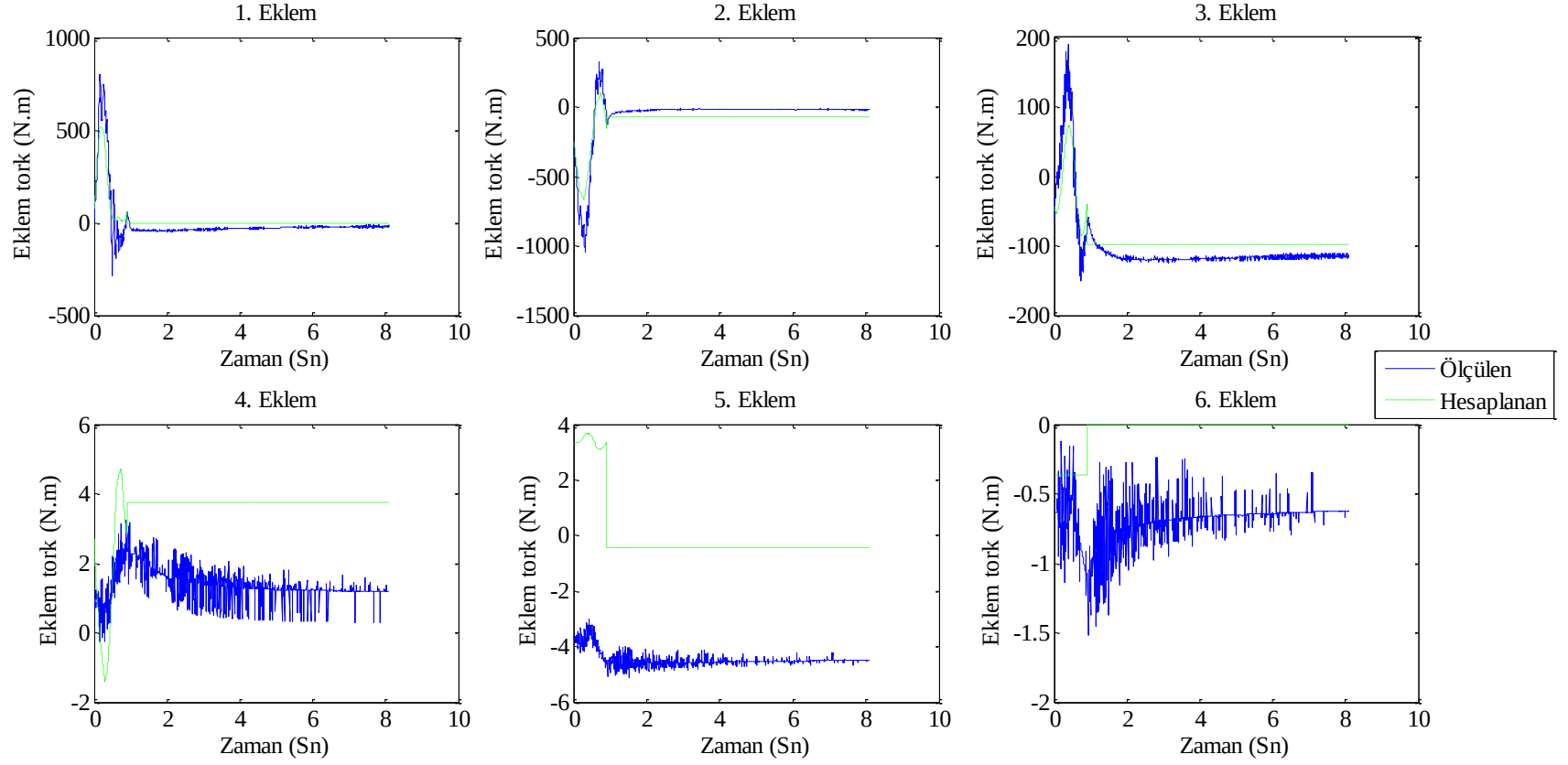


Şekil B 3.49 : 1., 2. ve 3. eklemlerin açısal konum grafikleri.

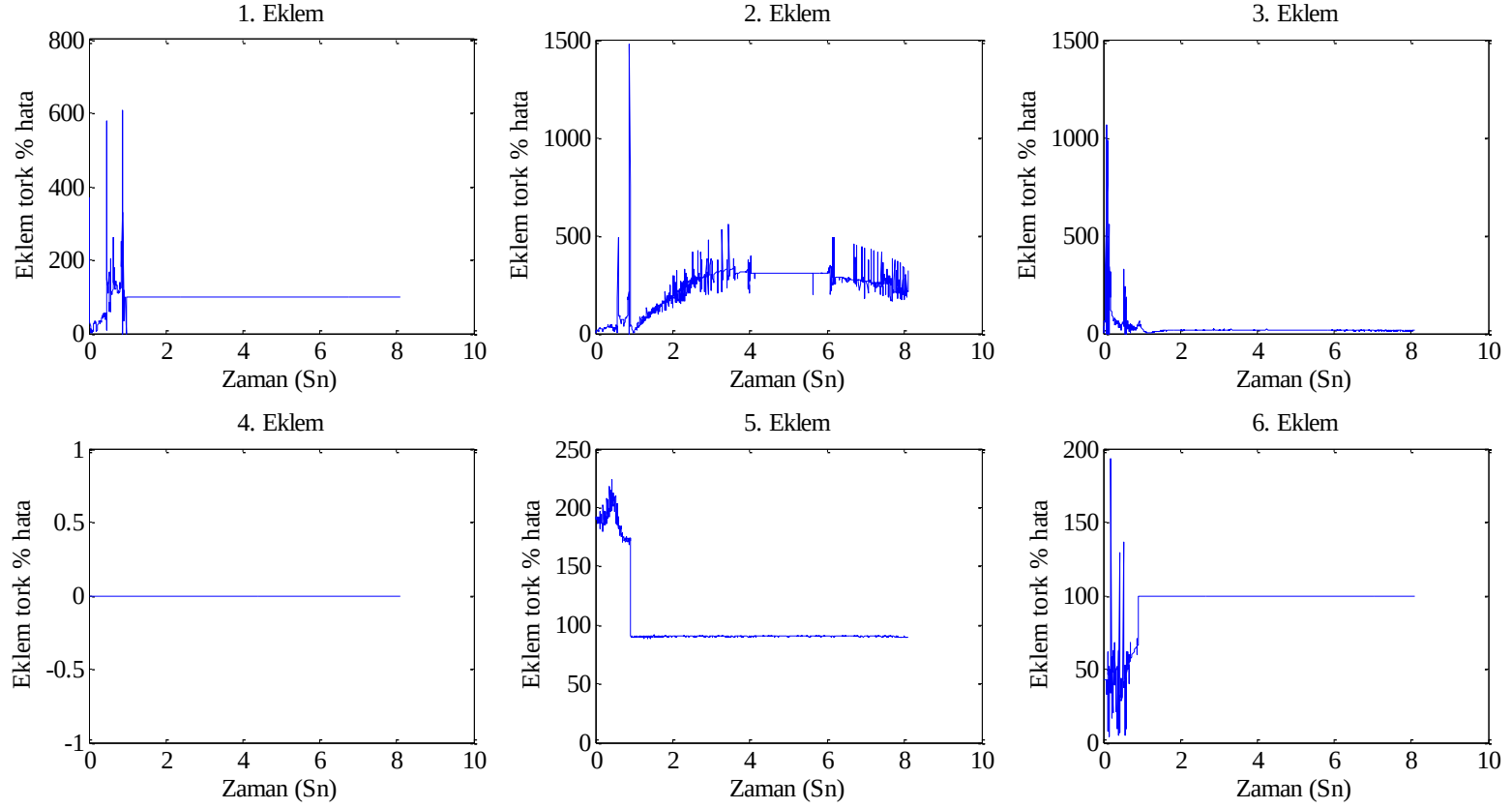


Şekil B 3.50 : 1., 2. ve 3. eklemlerin açısal hız grafikleri.

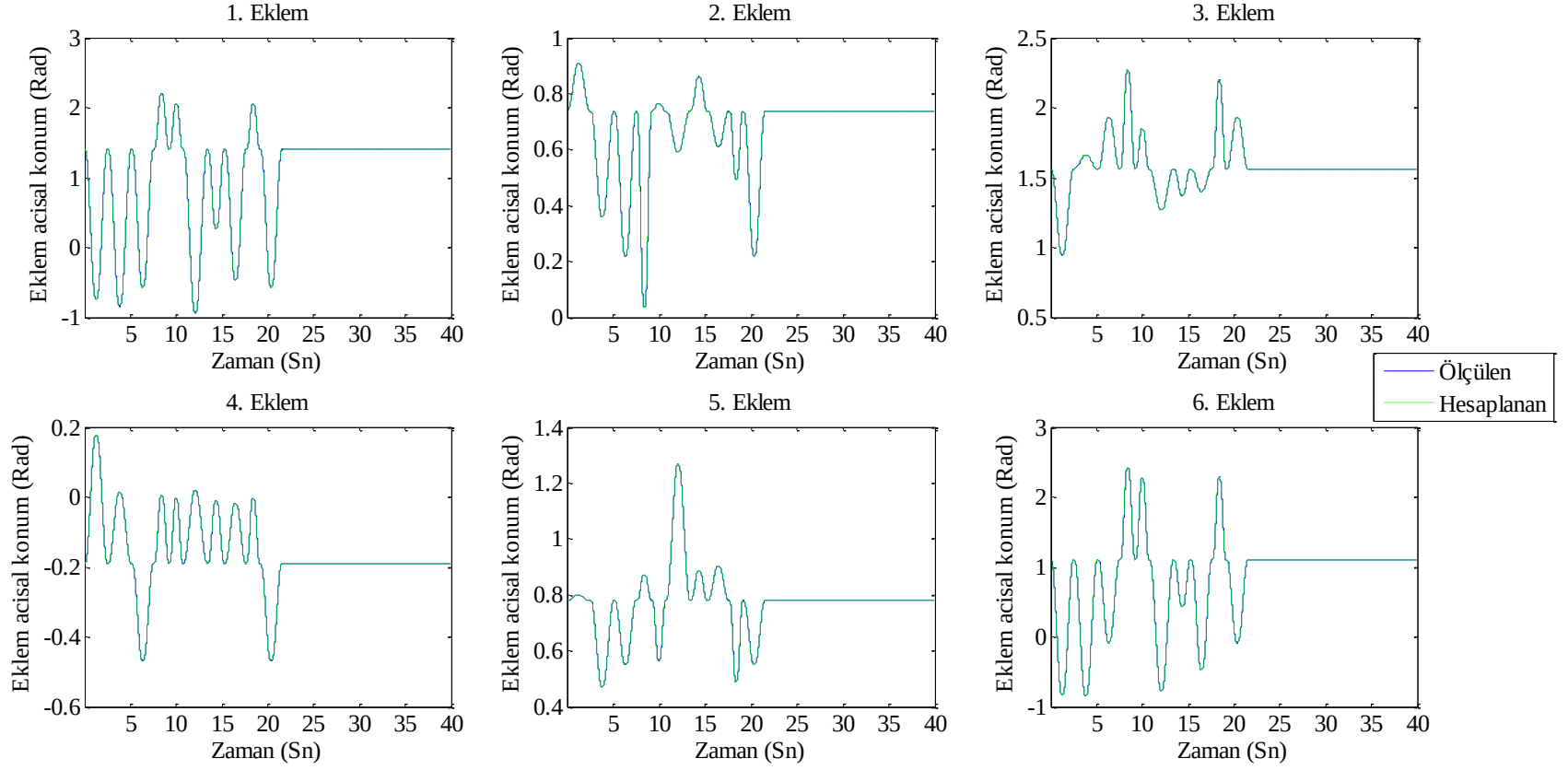
Tüm eklemler eşzamanlı ve rastgele hareket ettirilirse Şekil B 3.53'de tüm eklemlerin açısal konum grafiği oluşmaktadır. Bunu sırasıyla eklem açısal hızı, eklem tork ve eklem tork % hata grafikleri takip etmektedir.



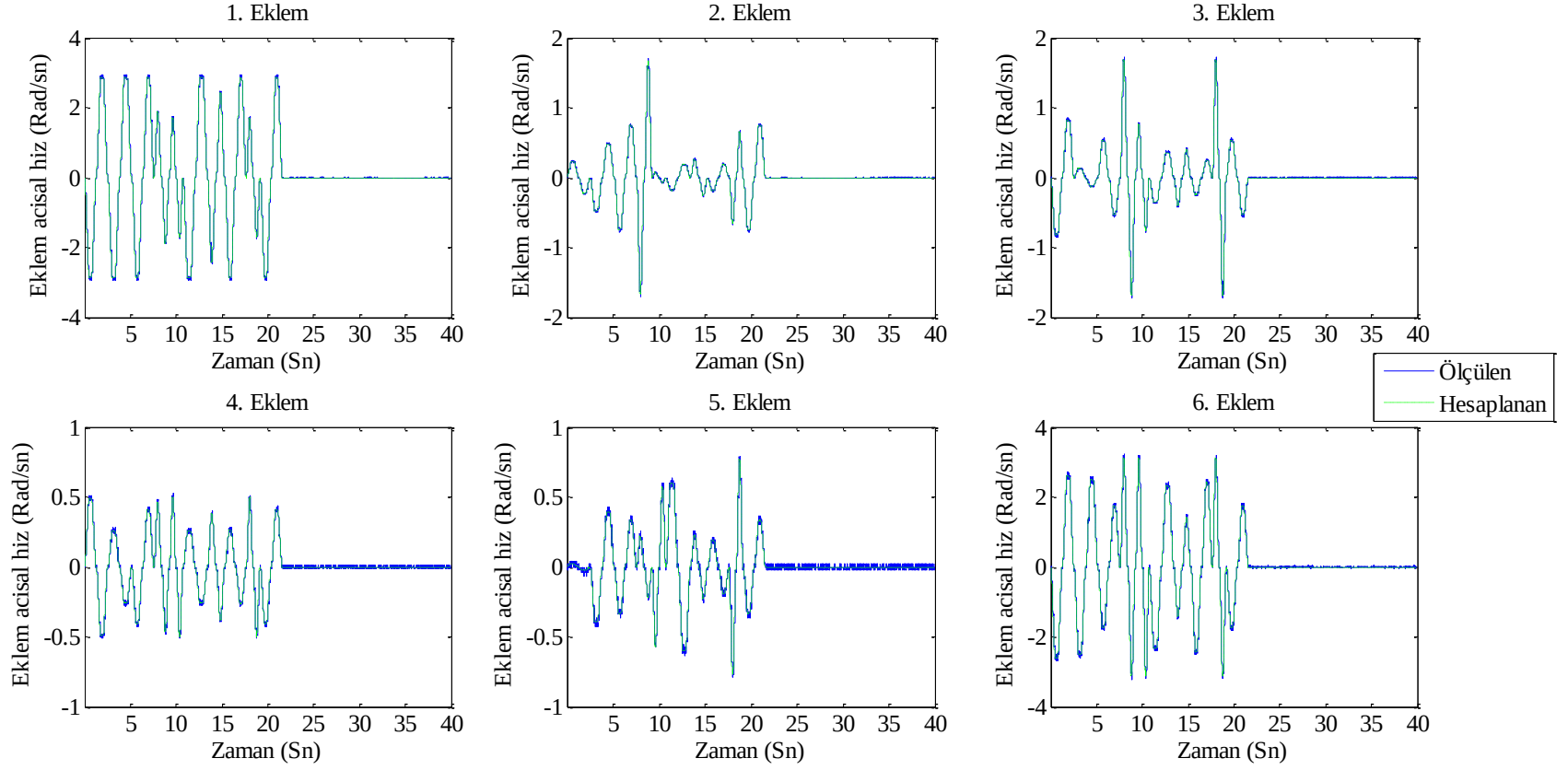
Şekil B 3.51 : 1., 2. ve 3. eklemler hareket ederken tüm eklemler için tork grafikleri.



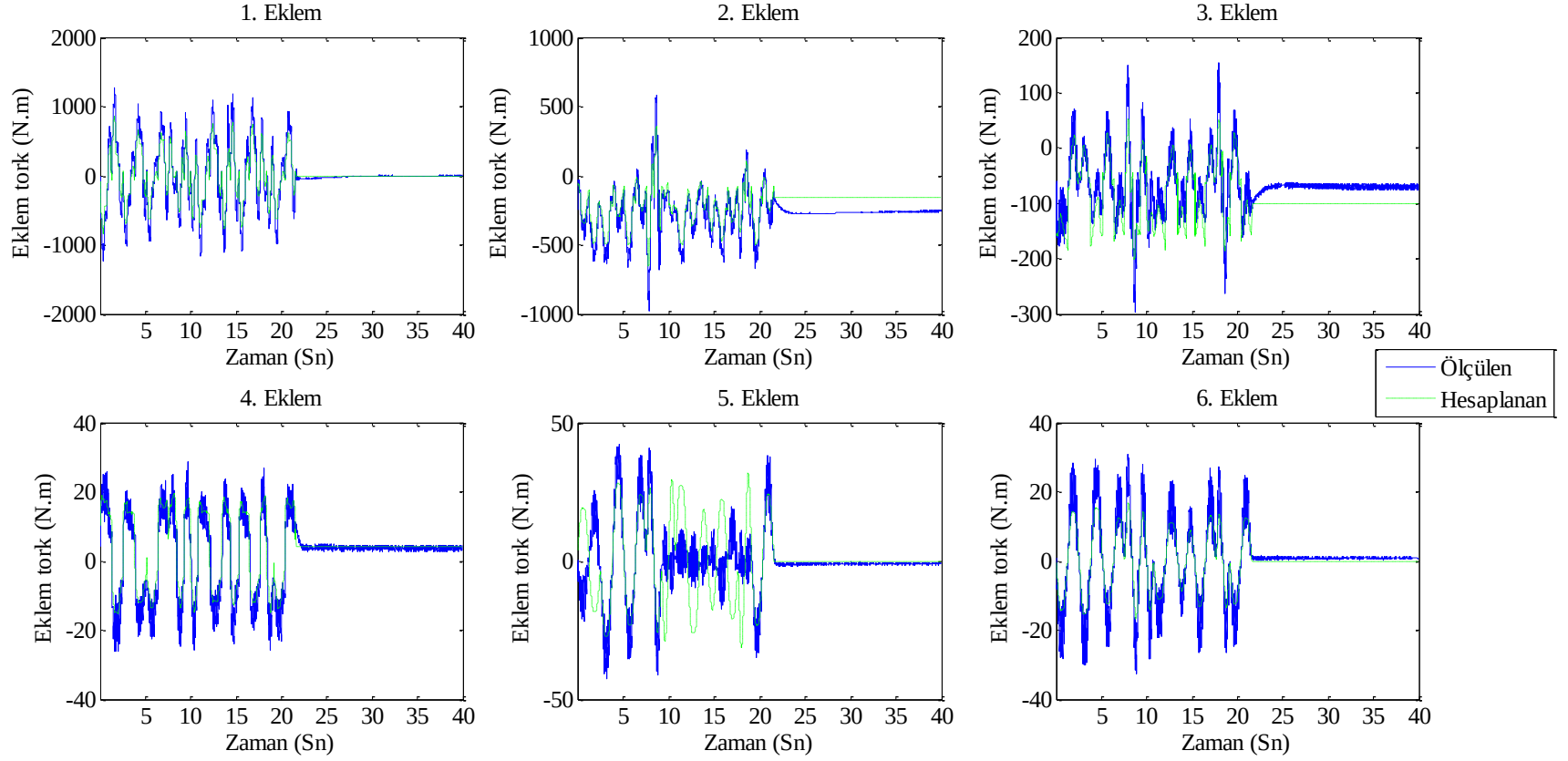
Şekil B 3.52 : 1., 2. ve 3. eklemler hareket ederken tüm eklemler için tork % hata grafikleri.



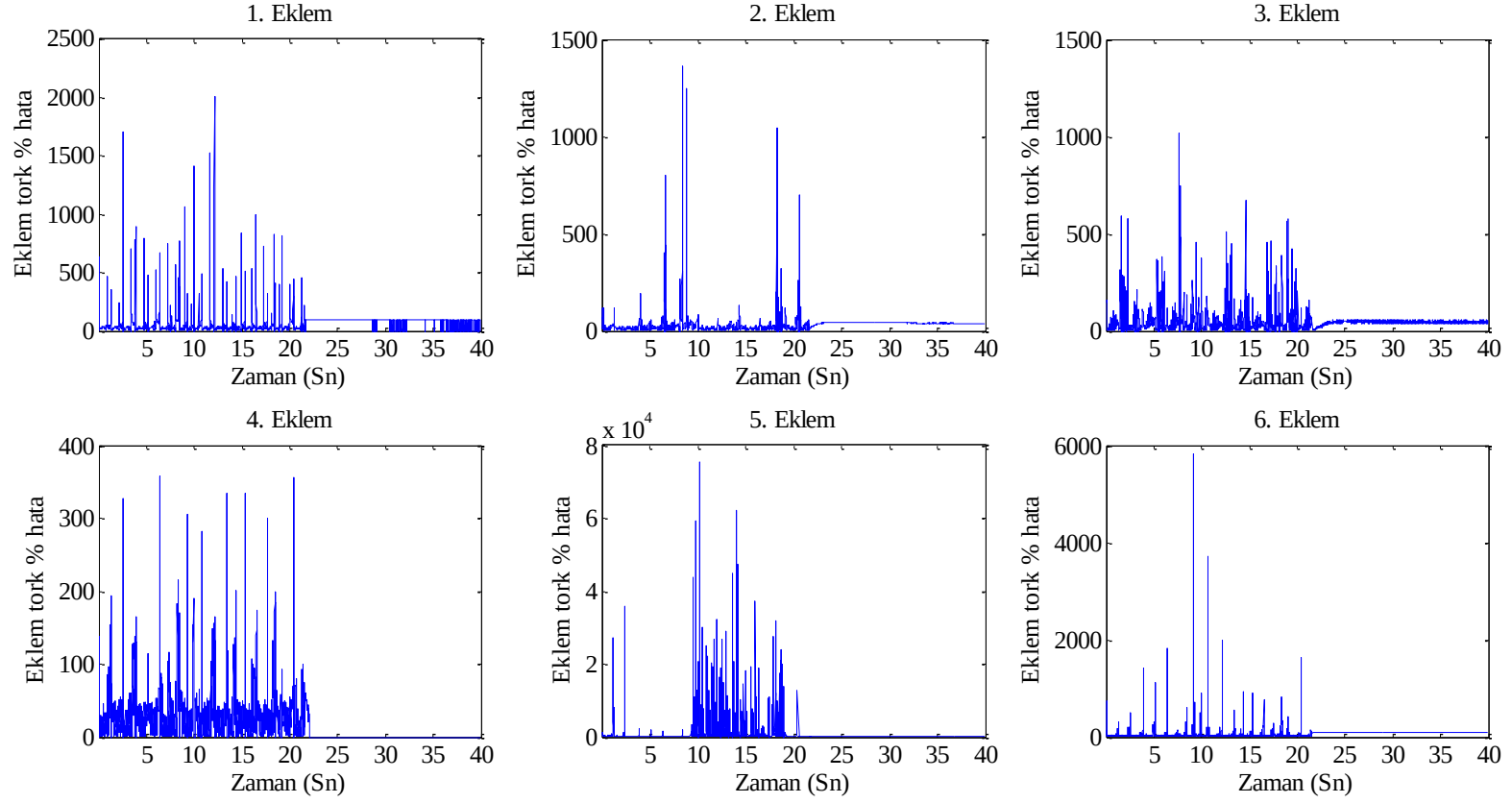
Şekil B 3.53 : Tüm eklemlerin açıl konum grafikleri.



Şekil B 3.54 : Tüm. eklemlerin açısai hız grafikleri.



Şekil B 3.55 : Tüm. eklemler hareket ederken eklem tork grafikleri.



Şekil B 3.56 : Tüm eklemler hareket ederken eklem tork % hata grafikleri

EK C1 Hareket denklemleri

$$q_j = q_j^i + \frac{k_{jj}\beta_j \text{sign}(D_j)t^3}{6} \quad 0 < t < \tau_a \quad (\text{C 1.1})$$

$$\begin{aligned} q_j = q_j^i - k_{aj}\nu_j \text{sign}(D_j)\tau_a t + \frac{(k_{jj}\beta_j \text{sign}(D_j)\tau_a^2)t}{2} + \\ \frac{k_{jj}\beta_j \text{sign}(D_j)\tau_a^3}{6} - \frac{(k_{aj}\nu_j \text{sign}(D_j)\tau_a^2)}{2} + \frac{(k_{aj}\nu_j \text{sign}(D_j)t^2)}{2} + \\ (k_{aj}\nu_j \text{sign}(D_j)\tau_a^2 - \frac{k_{jj}\beta_j \text{sign}(D_j)\tau_a^3}{2}) \quad \tau_a < t < \tau_v - \tau_a \end{aligned} \quad (\text{C 1.2})$$

$$\begin{aligned} q_j = q_j^i + \frac{(2k_{aj}\nu_j \text{sign}(D_j)\tau_a - k_{jj}\beta_j \text{sign}(D_j)\tau_a^2)(\tau_a - \tau_v)}{2} + \\ (2k_{aj}\nu_j \text{sign}(D_j)\tau_a - k_{aj}\nu_j \text{sign}(D_j)\tau_v - k_{jj}\beta_j \text{sign}(D_j)\tau_a^2)(\tau_v - t) + \\ \frac{k_{jj}\beta_j \text{sign}(D_j)(\tau_v - t)^3}{6} - 2k_{aj}\nu_j \text{sign}(D_j)\tau_a^2 + k_{aj}\nu_j \text{sign}(D_j)\tau_a\tau_v + \\ k_{jj}\beta_j \text{sign}(D_j)\tau_a^3 - \frac{k_{aj}\nu_j \text{sign}(D_j)\tau_a^2}{2} + \frac{k_{aj}\nu_j \text{sign}(D_j)(\tau_a - \tau_v)^2}{2} + \\ k_{aj}\nu_j \text{sign}(D_j)\tau_a^2 - \frac{k_{jj}\beta_j \text{sign}(D_j)\tau_a^3}{2} \quad \tau_v - \tau_a < t < \tau_v \end{aligned} \quad (\text{C 1.3})$$

$$\begin{aligned} q_j = q_j^i + \frac{(2k_{aj}\nu_j \text{sign}(D_j)\tau_a - k_{jj}\beta_j \text{sign}(D_j)\tau_a^2)(\tau_a - \tau_v)}{2} - \\ 2k_{aj}\nu_j \text{sign}(D_j)\tau_a^2 - k_{aj}\nu_j \text{sign}(D_j)\tau_a\tau_v + k_{jj}\beta_j \text{sign}(D_j)\tau_a^3 - \\ k_{vj}\lambda_j \text{sign}(D_j)\tau_v + k_{vj}\lambda_j \text{sign}(D_j)t - \frac{k_{aj}\nu_j \text{sign}(D_j)\tau_a^2}{2} + \\ \frac{k_{aj}\nu_j \text{sign}(D_j)(\tau_a - \tau_v)^2}{2} + k_{aj}\nu_j \text{sign}(D_j)\tau_a^2 - \\ \frac{k_{jj}\beta_j \text{sign}(D_j)\tau_a^2}{2} \quad \tau_v < t < t_f - \tau_v \end{aligned} \quad (\text{C 1.4})$$

$$\begin{aligned} q_j = q_j^i + \frac{k_{jj}\beta_j \text{sign}(D_j)(h + \tau_v - t)^3}{6} - k_{vj}\lambda_j \text{sign}(D_j)\tau_v + \\ k_{vj}\lambda_j \text{sign}(D_j)t + \frac{k_{aj}\nu_j \text{sign}(D_j)\tau_v^2}{2} + \frac{k_{jj}\beta_j \text{sign}(D_j)\tau_a^2\tau_v}{2} - \\ k_{aj}\nu_j \text{sign}(D_j)\tau_a\tau_v \quad t_f - \tau_v < t < \tau_v + \tau_a + h \end{aligned} \quad (\text{C 1.5})$$

$$\begin{aligned}
q_j = & q_j^i + k_{vj}\lambda_j \text{sign}(D_j)\tau_v + k_{vj}\lambda_j \text{sign}(D_j)t - \frac{k_{aj}\nu_j \text{sign}(D_j)h^2}{2} + \\
& \frac{k_{jj}\beta_j \text{sign}(D_j)\tau_a^3}{3} - \frac{k_{aj}\nu_j \text{sign}(D_j)\tau_a^2}{2} - \frac{k_{aj}\nu_j \text{sign}(D_j)t^2}{2} + \\
& \frac{k_{jj}\beta_j \text{sign}(D_j)\tau_a^2 h}{2} + k_{jj}\beta_j \text{sign}(D_j)\tau_a^2 \tau_v - \frac{k_{jj}\beta_j \text{sign}(D_j)\tau_a^2 t}{2} - \\
& k_{aj}\nu_j \text{sign}(D_j)\tau_a h - k_{aj}\nu_j \text{sign}(D_j)\tau_v h - 2k_{aj}\nu_j \text{sign}(D_j)\tau_a \tau_v + \\
& k_{aj}\nu_j \text{sign}(D_j)ht + k_{aj}\nu_j \text{sign}(D_j)\tau_a t + k_{aj}\nu_j \text{sign}(D_j)\tau_v t; \\
& \tau_v + \tau_a + h < t < t_f - \tau_a
\end{aligned} \tag{C 1.6}$$

$$q_j = q_j^f - \frac{k_{jj}\beta_j \text{sign}(D_j)(t_f - t)^3}{6} \quad t_f - \tau_a < t < t_f \tag{C 1.7}$$

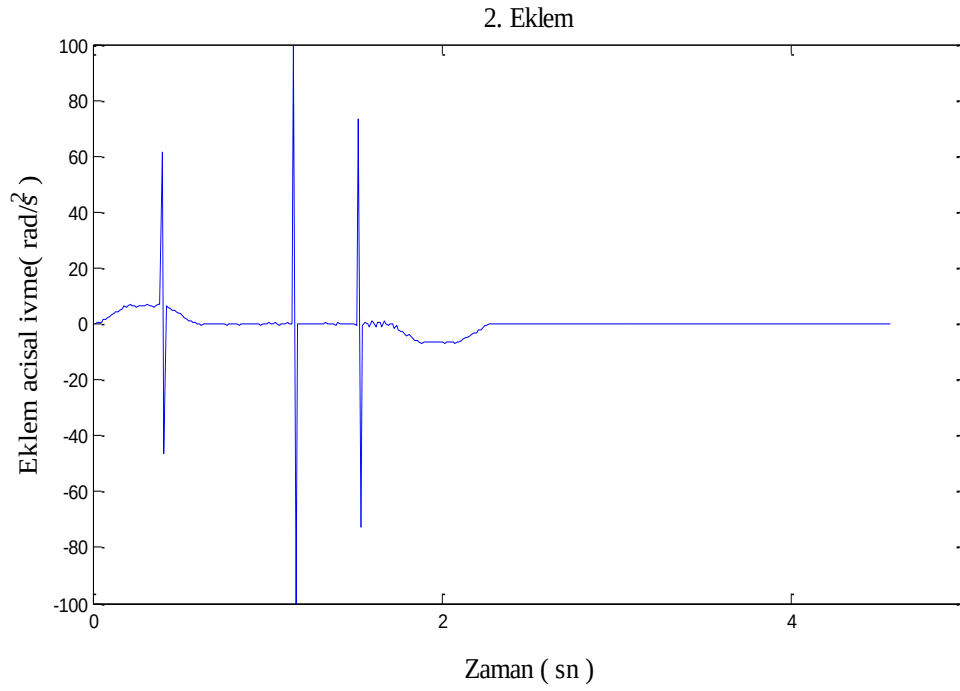
$$\lambda_{j+1} = \lambda_j \frac{k_{vj}}{k_{v(j+1)}} \frac{|D_2|}{|D_1|}; \quad \nu_{j+1} = \nu_j \frac{k_{aj}}{k_{a(j+1)}} \frac{|D_2|}{|D_1|}; \quad \beta_{j+1} = \beta_j \frac{k_{jj}}{k_{j(j+1)}} \frac{|D_2|}{|D_1|}; \tag{C 1.8}$$

$$\tau_a = \frac{\nu_{j,\min} k_{a(j,\min)}}{\beta_{j,\min} k_{j(j,\min)}}; \quad \tau_v = \tau_a + \frac{\lambda_{j,\min} k_{v(j,\min)}}{\nu_{j,\min} k_{a(j,\min)}}; \tag{C 1.9}$$

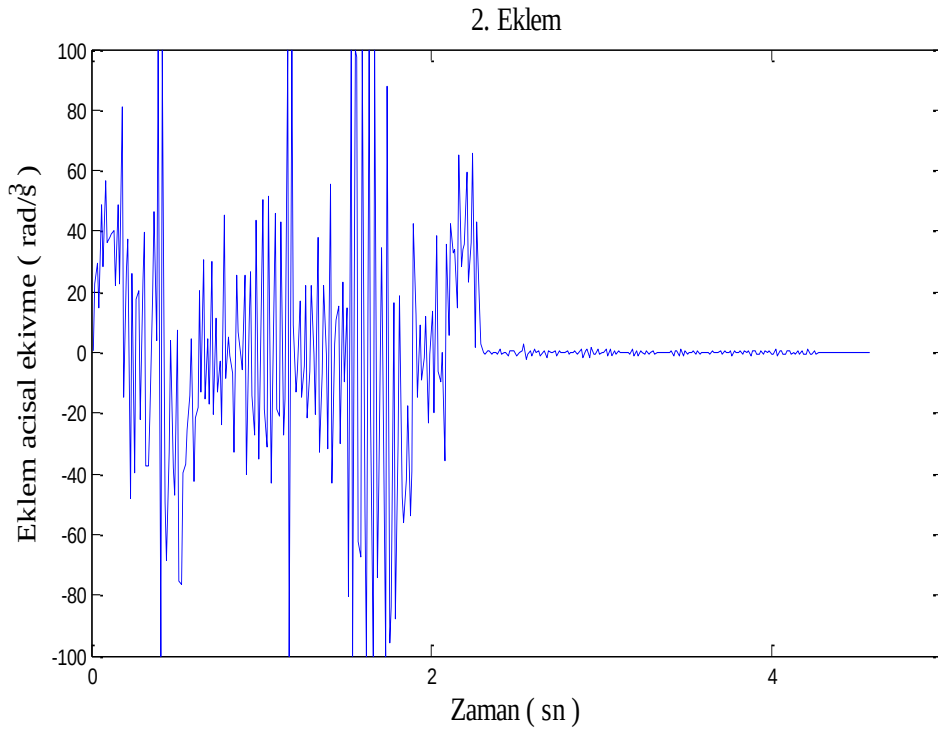
$$h = \frac{|D_{j,\min}| - 2 \left[\frac{k_{j(j,\min)} \tau_a^2 \tau_v}{2} + \frac{k_{a(j,\min)} \tau_v^2}{2} - k_{a(j,\min)} \tau_a \tau_v \right]}{k_{v(j,\min)} \lambda_{j,\min}} \tag{C 1.10}$$

$$t_f = 2\tau_v + h \tag{C 1.11}$$

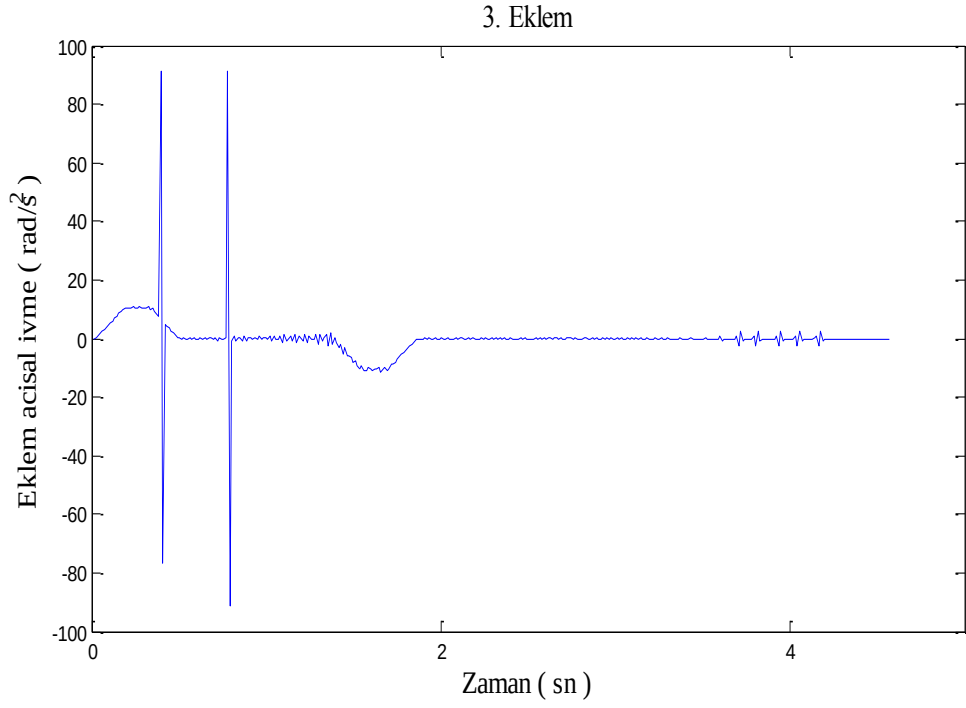
EK C2 Maksimum ivme ve ekivme



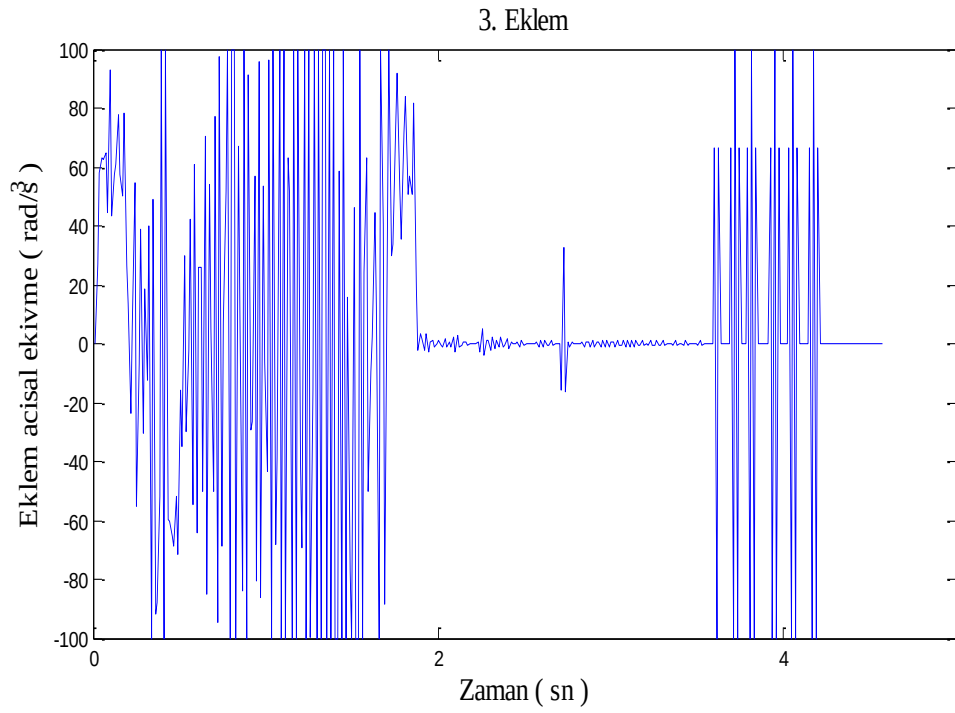
Şekil C 2.1 : Staubli RX160 manipulatörün 2. eklem maksimum ivme grafiği.



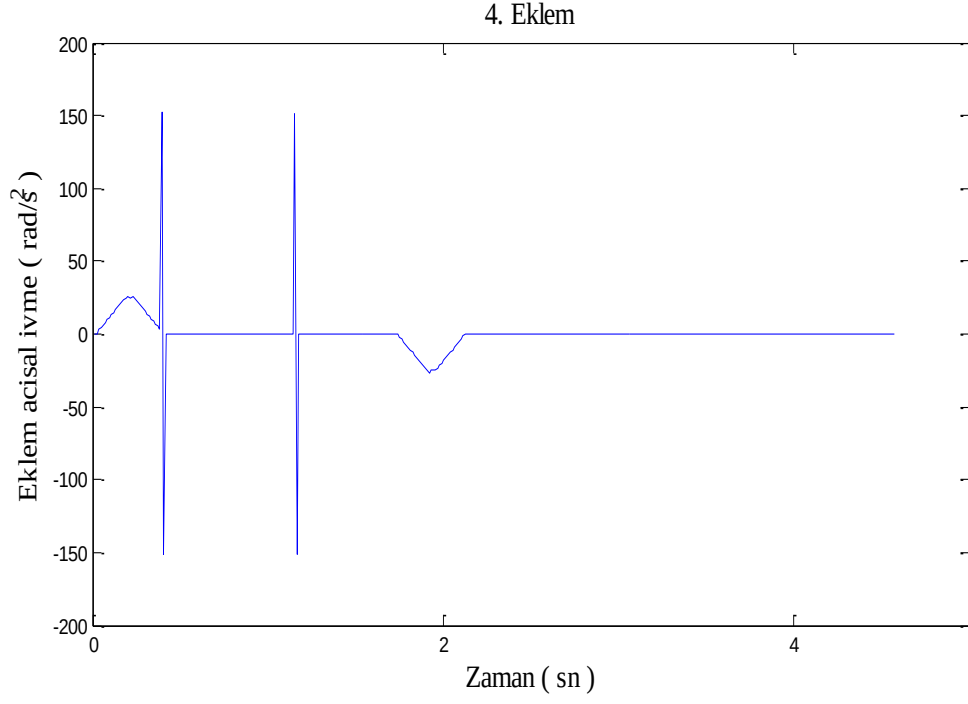
Şekil C 2.2 : Staubli RX160 manipulatörün 2. eklem maksimum ekivme grafiği.



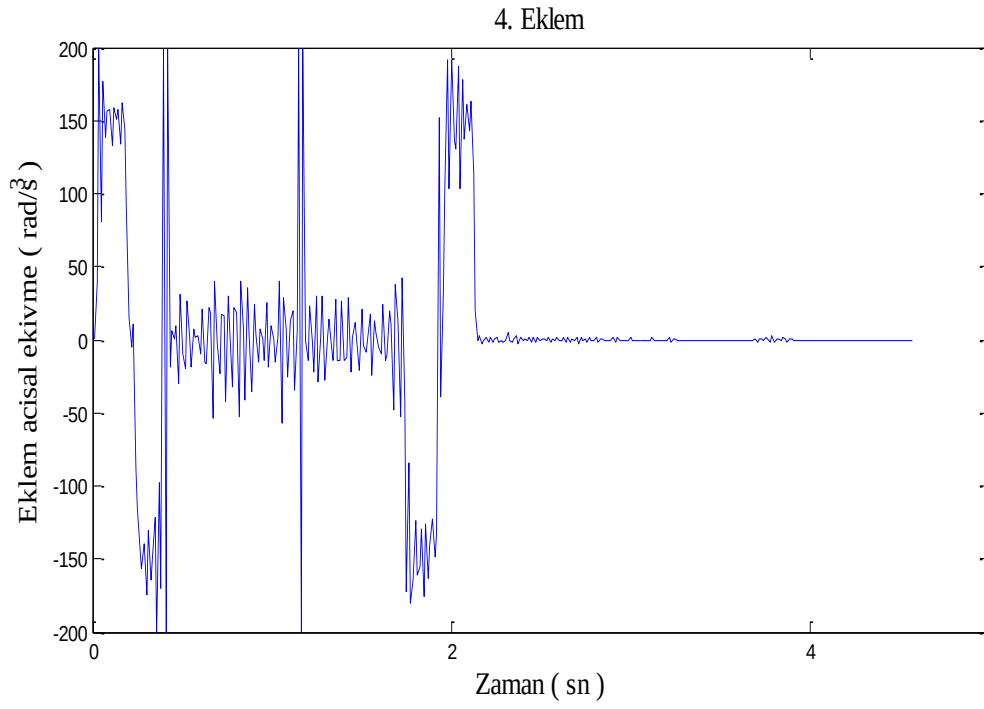
Şekil C 2.3 : Staubli RX160 manipulatorün 3. eklem maksimum ivme grafiği.



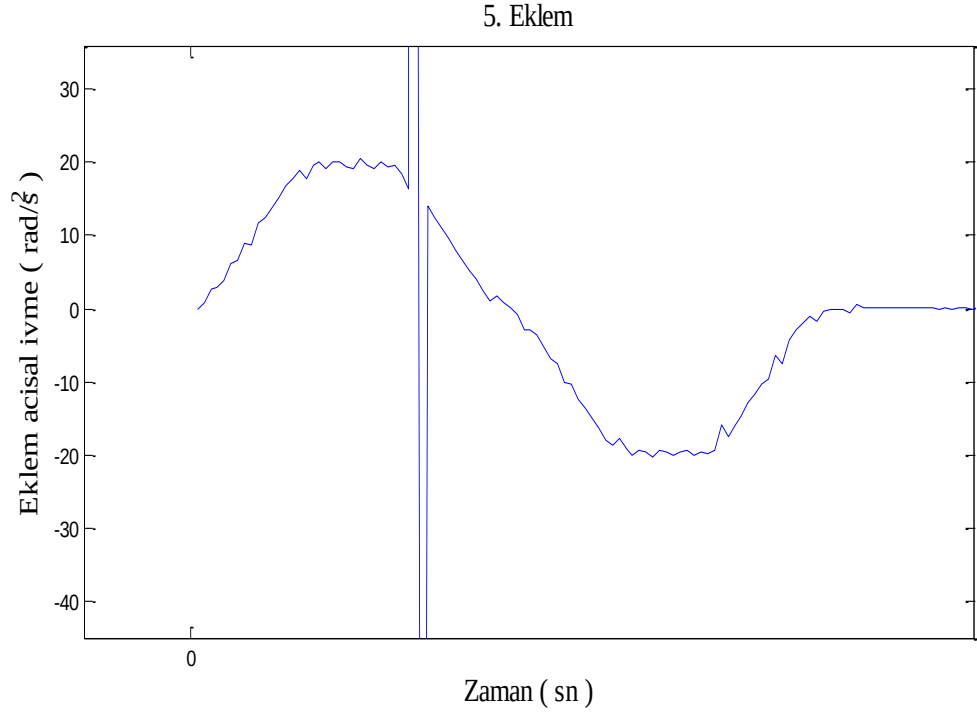
Şekil C 2.4 : Staubli RX160 manipulatorün 3. eklem maksimum ekivme grafiği.



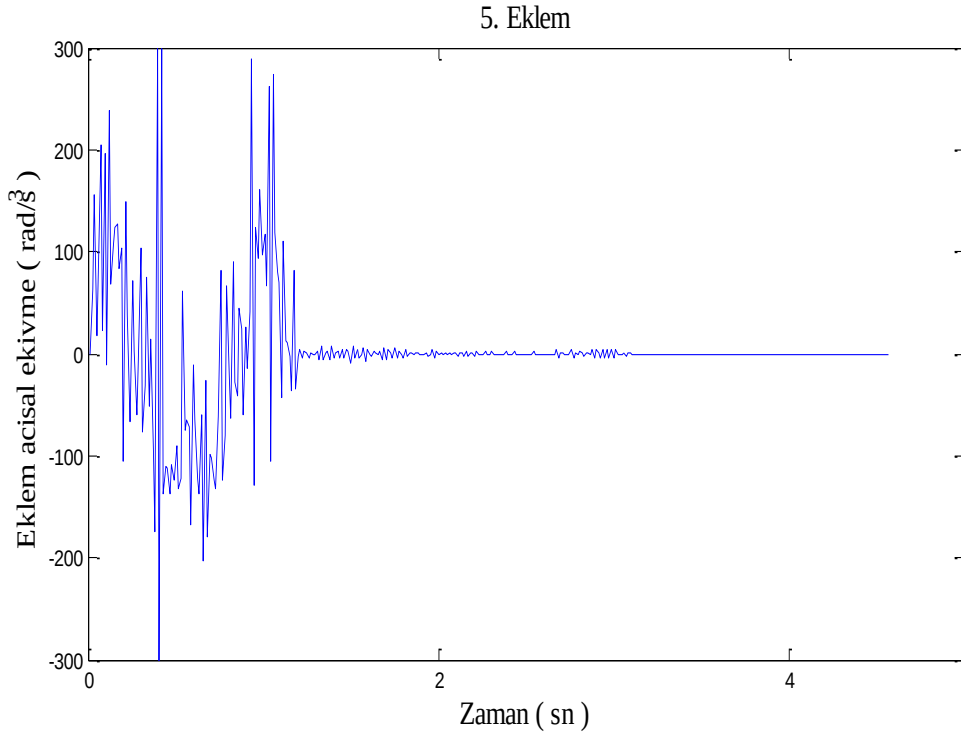
Şekil C 2.5 : Staubli RX160 manipölätörün 4. eklem maksimum ivme grafiği.



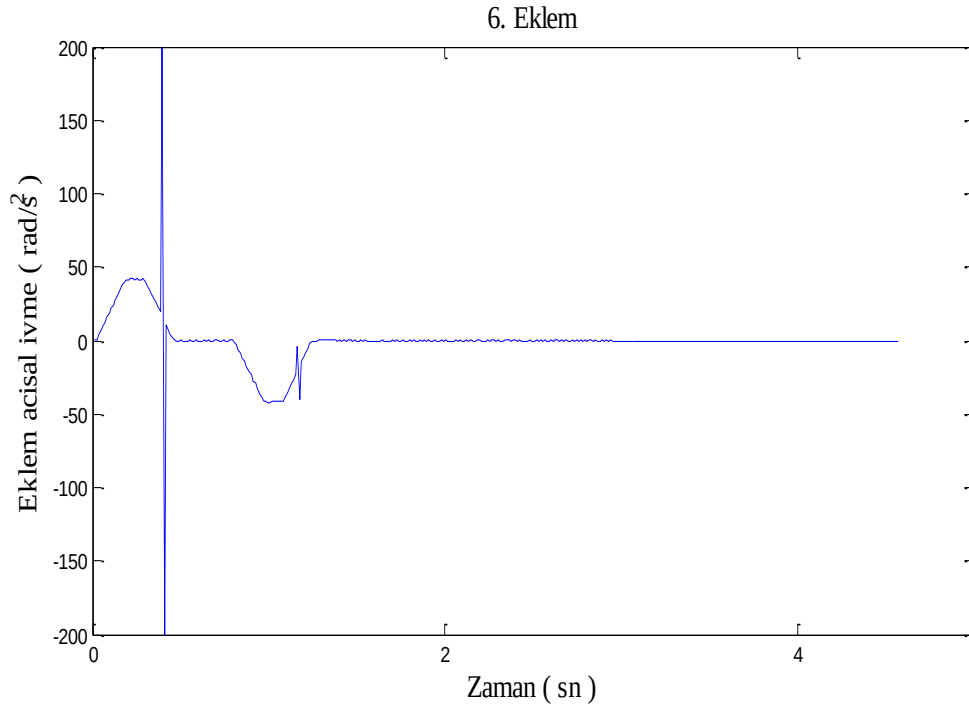
Şekil C 2.6 : Staubli RX160 manipölätörün 4. eklem maksimum ekivme grafiği.



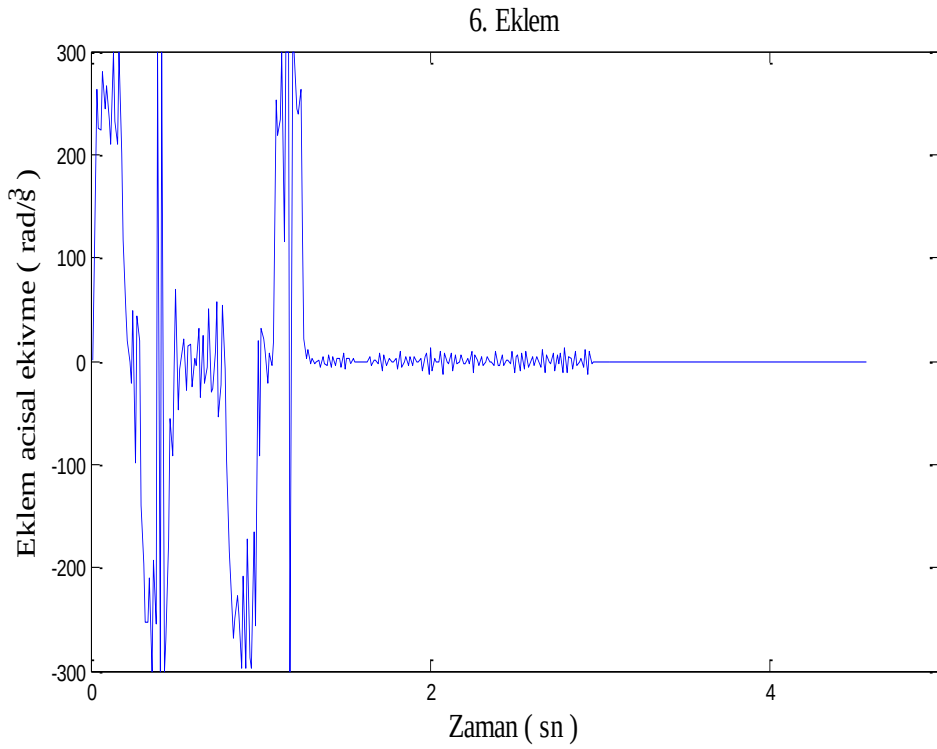
Şekil C 2.7 : Staubli RX160 manipulatorün 5. eklem maksimum ivme grafiği.



Şekil C 2.8 : Staubli RX160 manipulatorün 5. eklem maksimum ekivme grafiği.



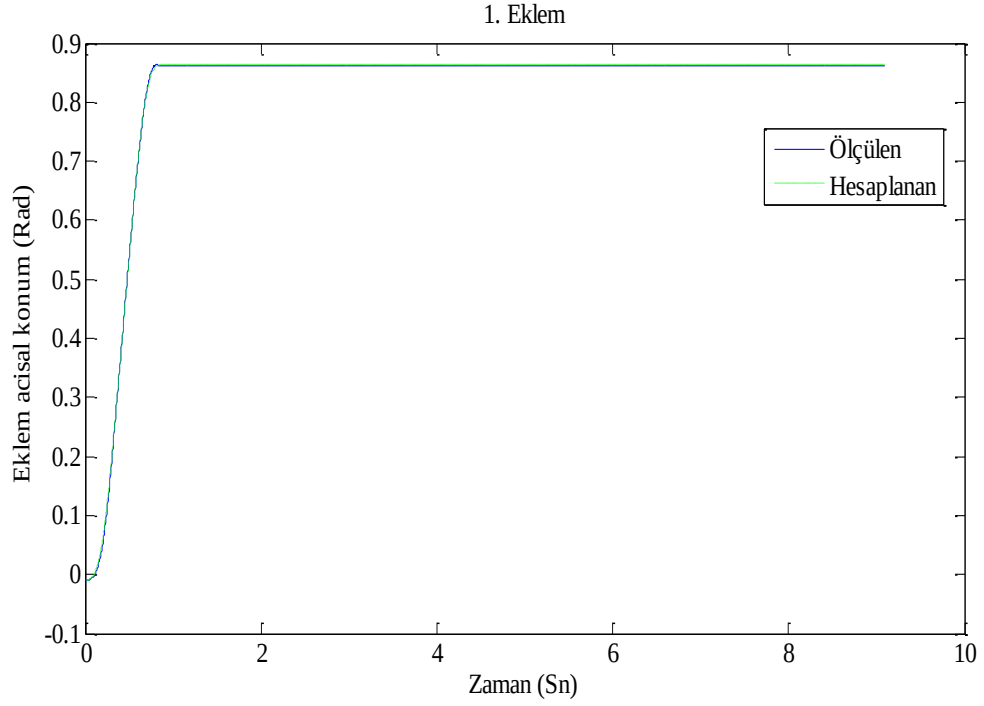
Şekil C 2.9 : Staubli RX160 manipulatörün 6. eklem maksimum ivme grafiği.



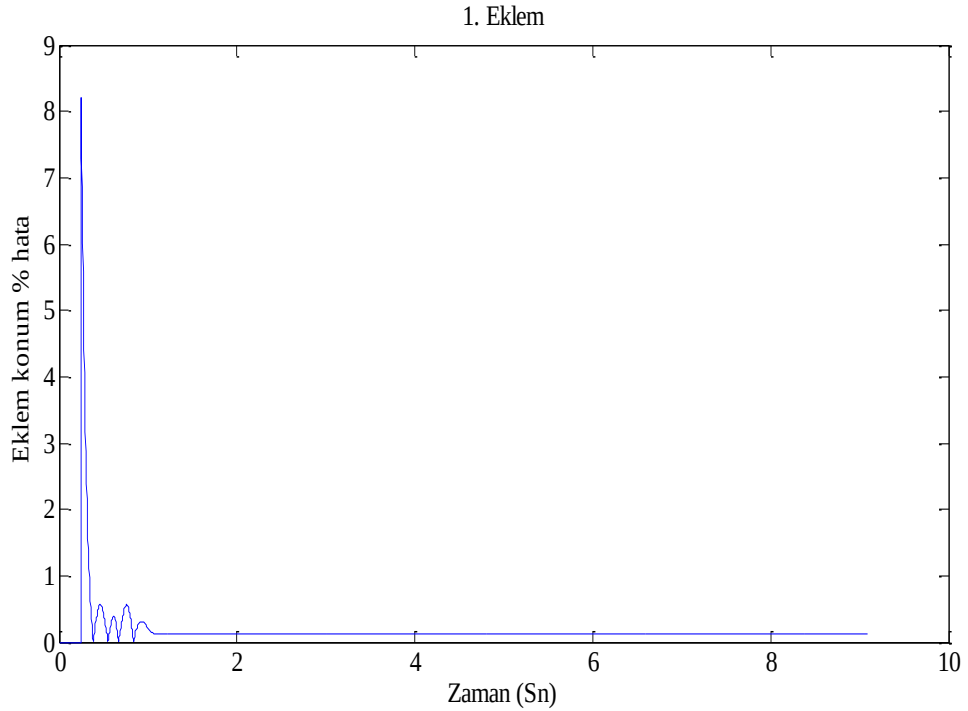
Şekil C 2.10 : Staubli RX160 manipulatörün 6. eklem maksimum ekivme grafiği.

EK C3 Konum kontrolü deneysel sonuçlar

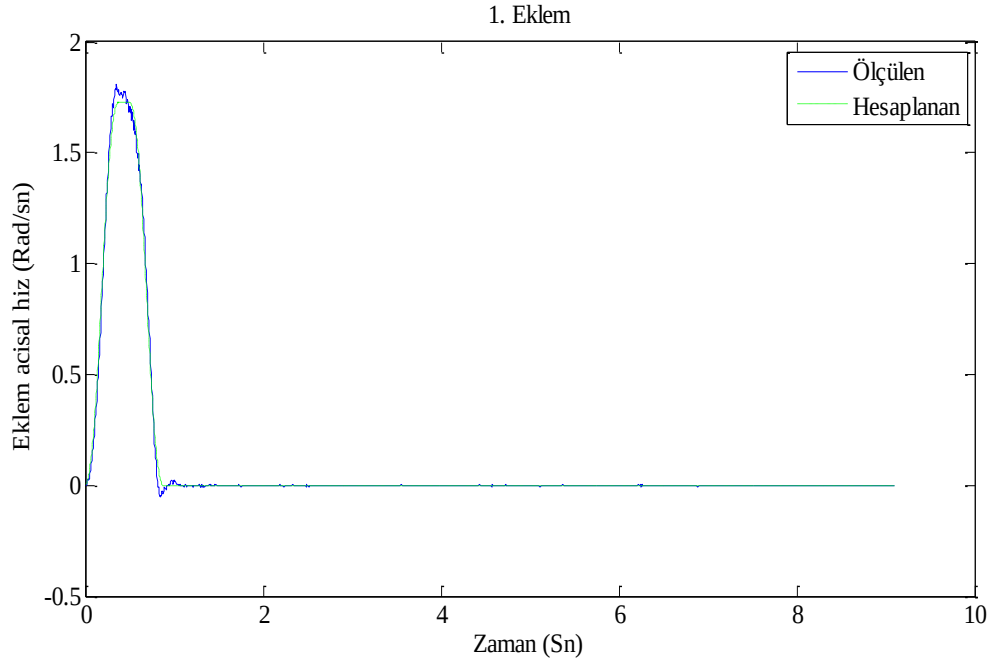
Yalnızca 1. eklem için 50 derece ve nominal hızının %60 ile hareket etmesiyle eklem açısal konum grafiği Şekil C 3.1’de gösterilmektedir. Bunu sırasıyla eklem konum % hata, eklem açısal hızı, eklem tork grafikleri takip etmektedir.



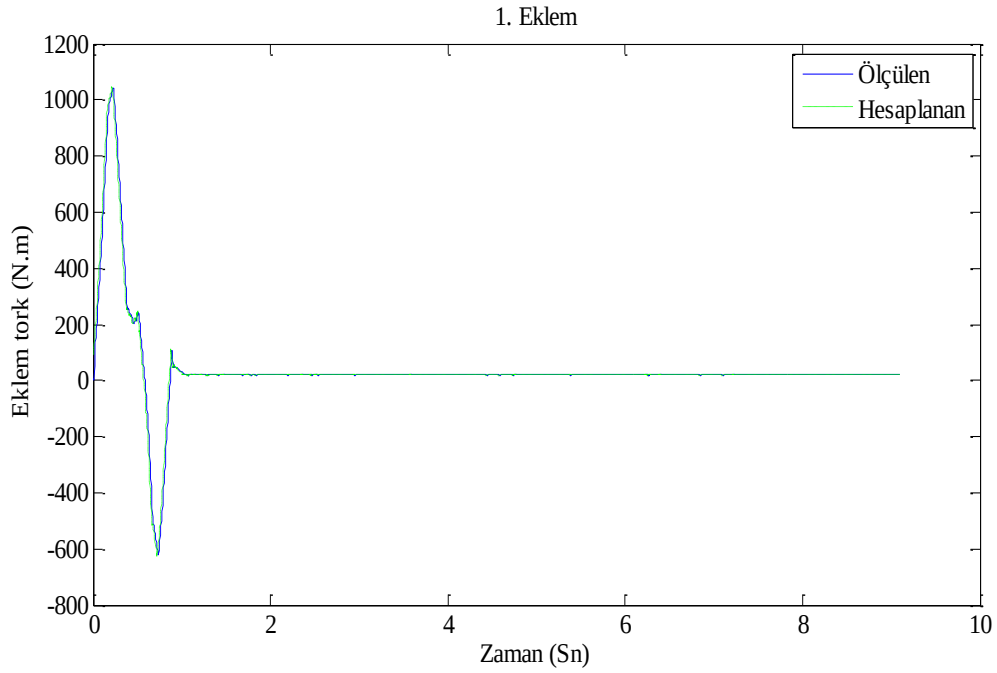
Şekil C 3.1 : 1. eklem açısal konum grafiği.



Şekil C 3.2 : 1. eklem açısal konum % hata grafiği.

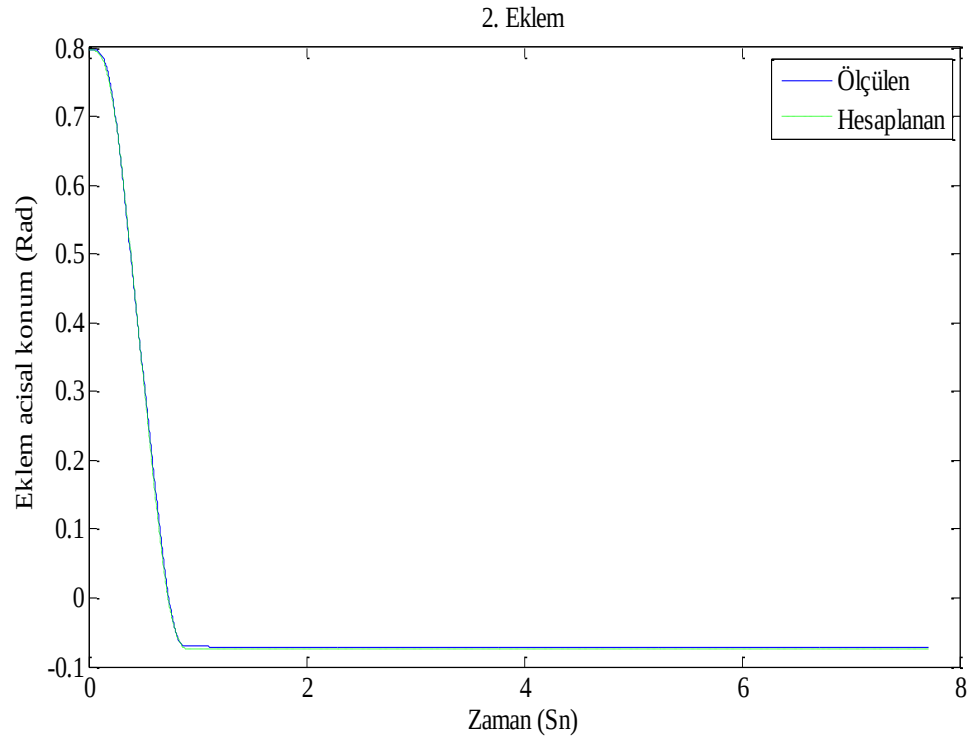


Şekil C 3.3 : 1. eklem açısai hız grafiğı.

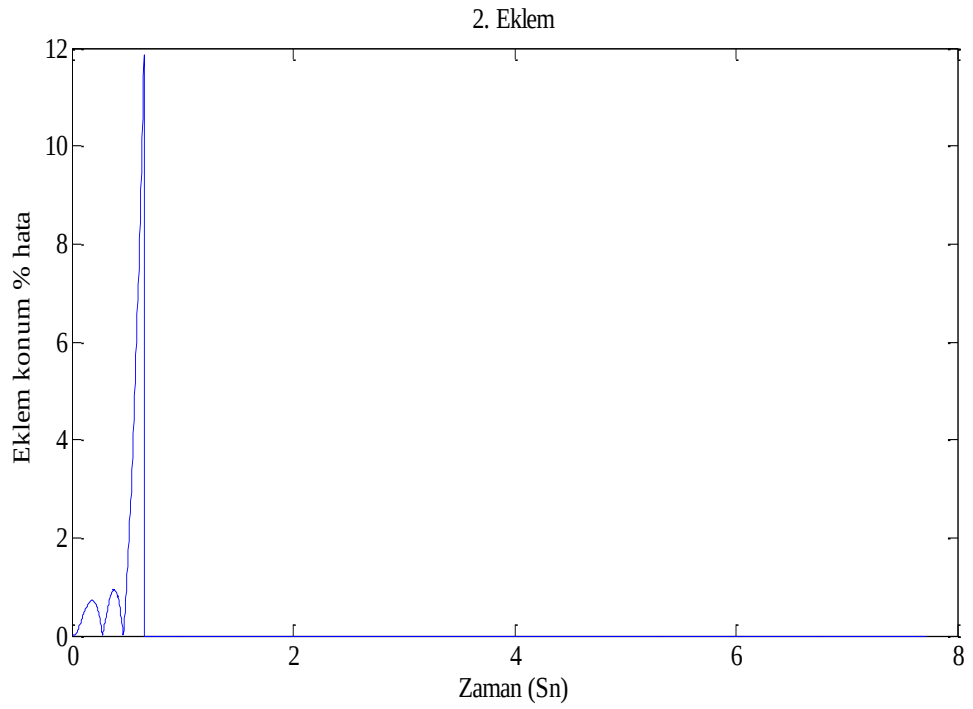


Şekil C 3.4 : 1. eklem tork grafiğı.

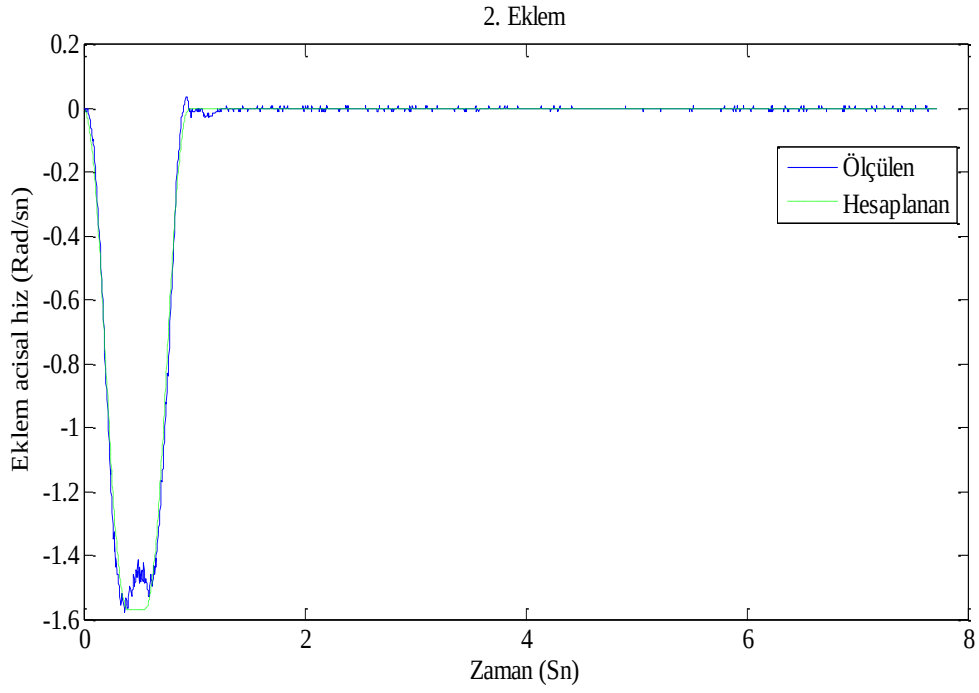
Yalnızca 2. eklemin 50 derece ve nominal hızının %60 ile hareket etmesiyle eklem açısai konum grafiğı Şekil C 3.5'de gösterilmektedir. Bunu sırasıyla eklem konum % hata, eklem açısai hızı, eklem tork grafikleri takip etmektedir.



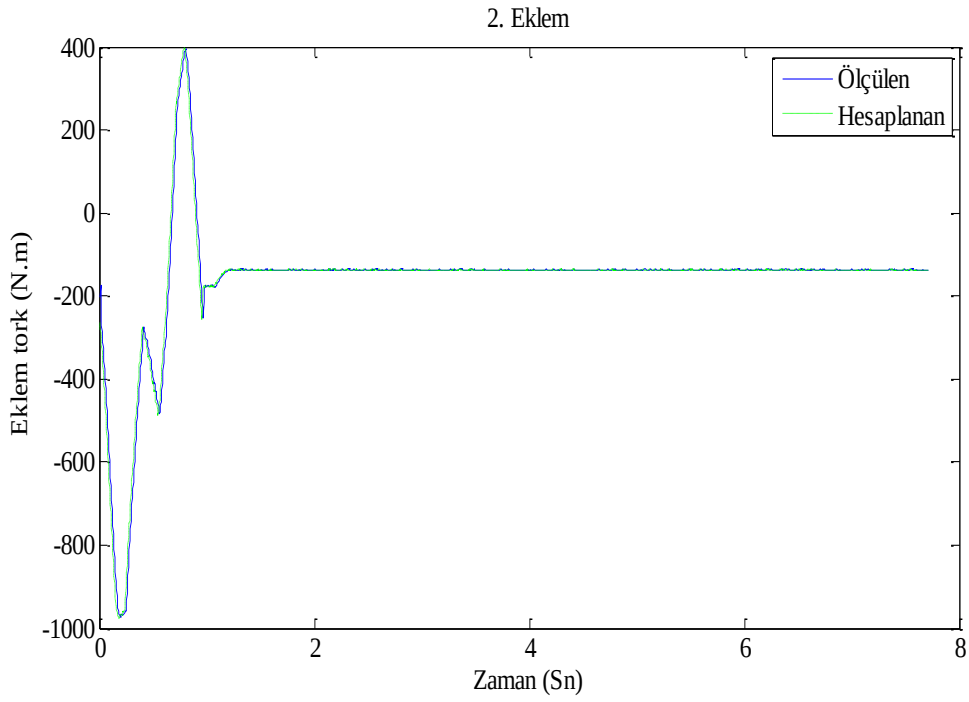
Şekil C 3.5 : 2. eklem açısai konum grafiğı.



Şekil C 3.6 : 2. eklem açısai konum % hata grafiğı.

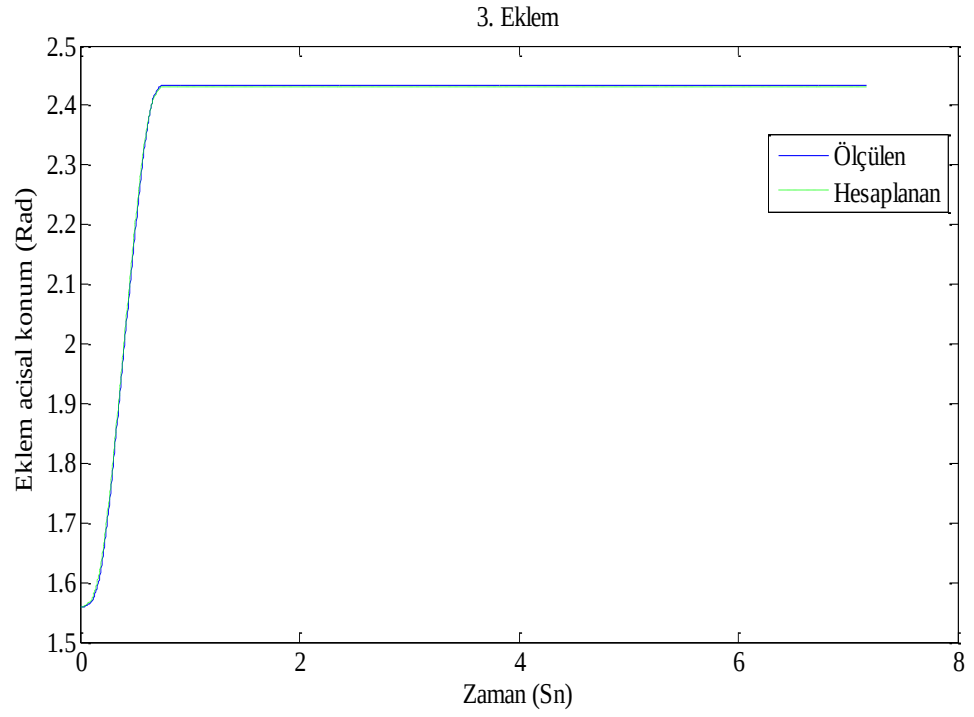


Şekil C 3.7 : 2. eklem açısai hız grafiğı.

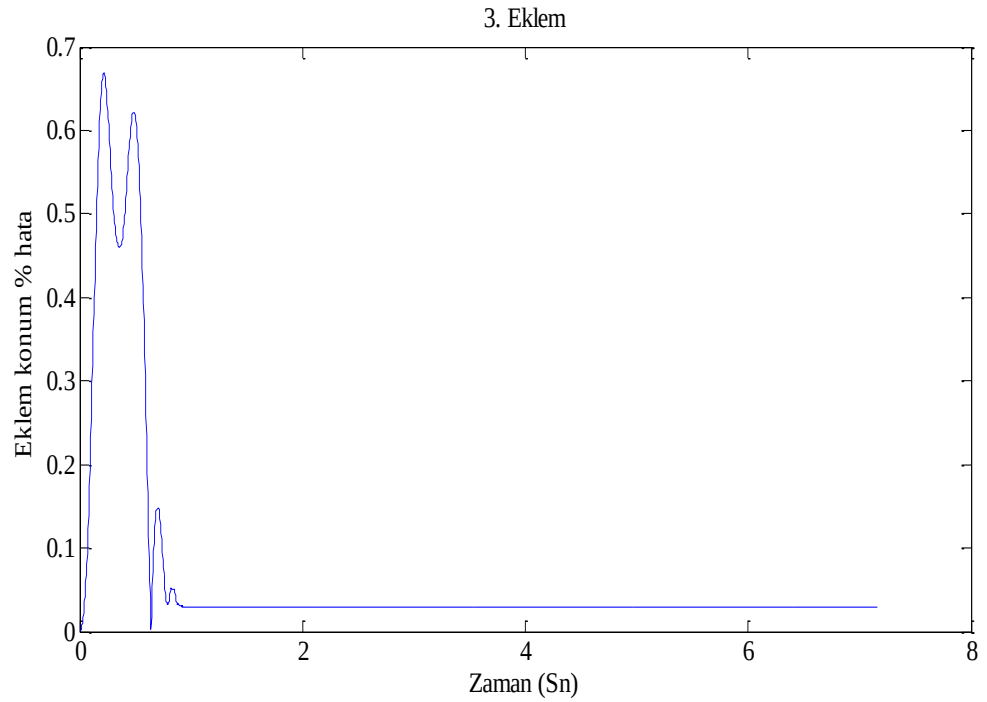


Şekil C 3.8 : 2. eklem tork grafiğı.

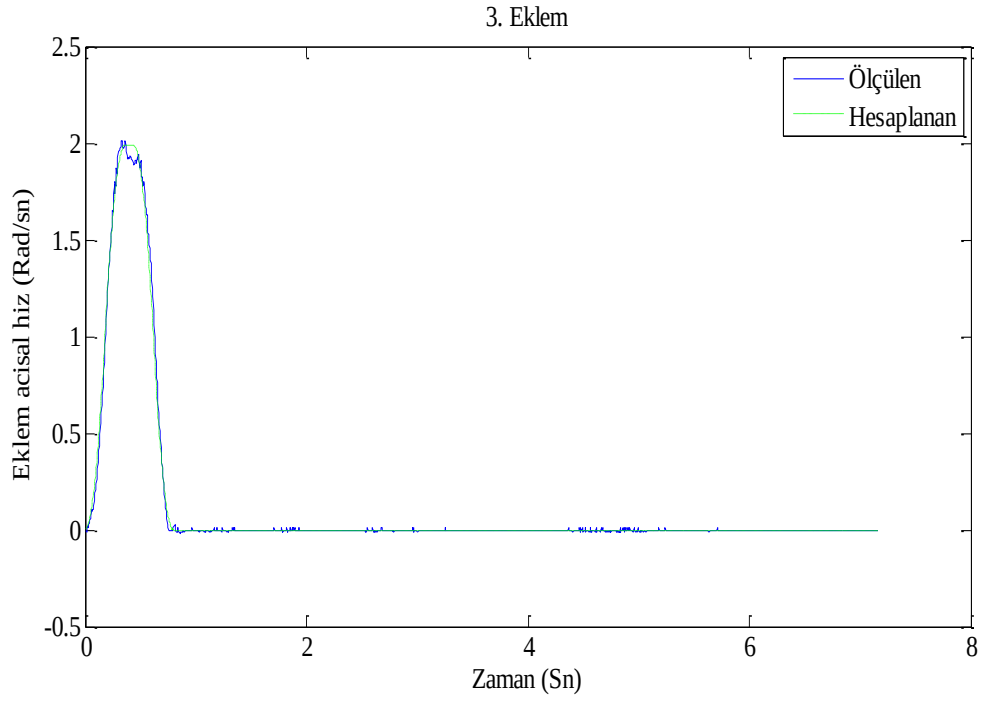
Yalnızca 3. eklemın 50 derece ve nominal hızının %60 ile hareket etmesiyle eklem açısai konum grafiğı Şekil C 3.9'da gösterilmektedir. Bunu sırasıyla eklem konum % hata, eklem açısai hızı, eklem tork grafikleri takip etmektedir.



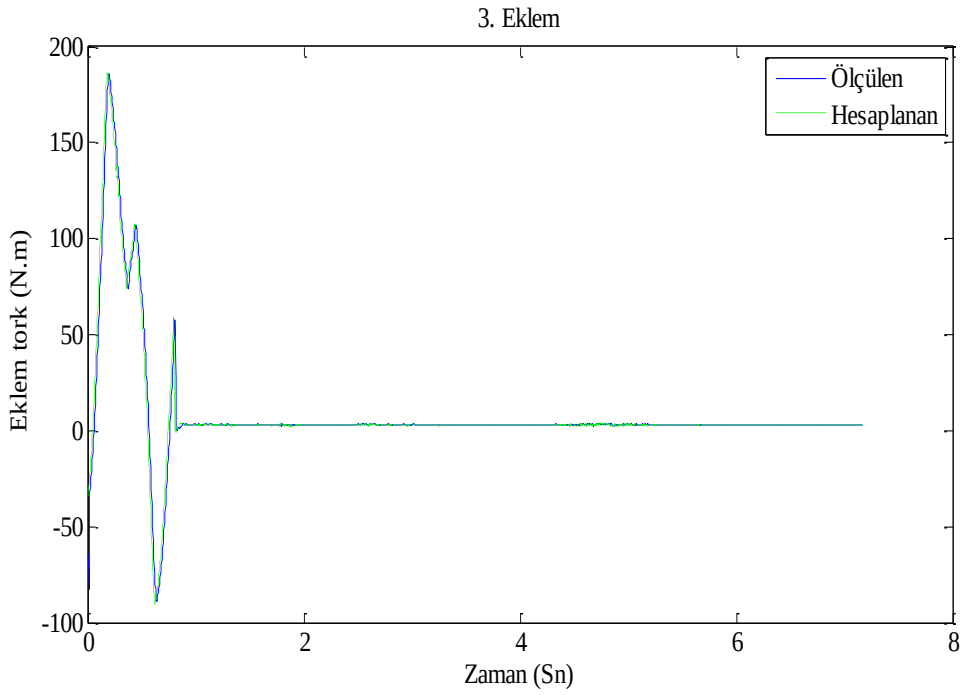
Şekil C 3.9 : 3. eklem açısı konum grafiği.



Şekil C 3.10 : 3. eklem açısı konum % hata grafiği.

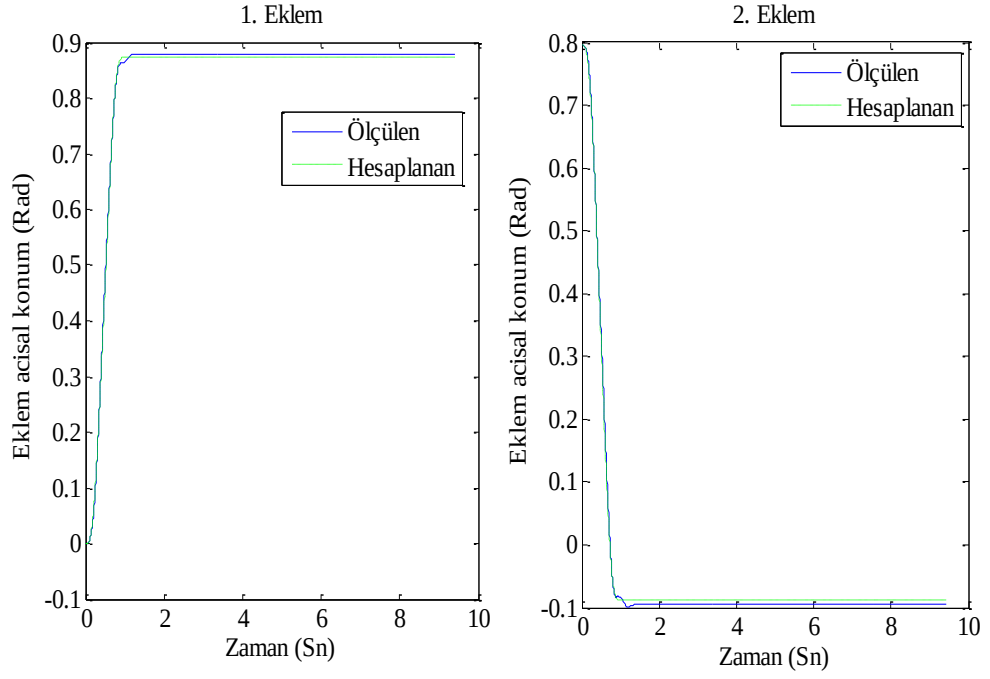


Şekil C 3.11 : 3. eklem açısai hız grafiğı.

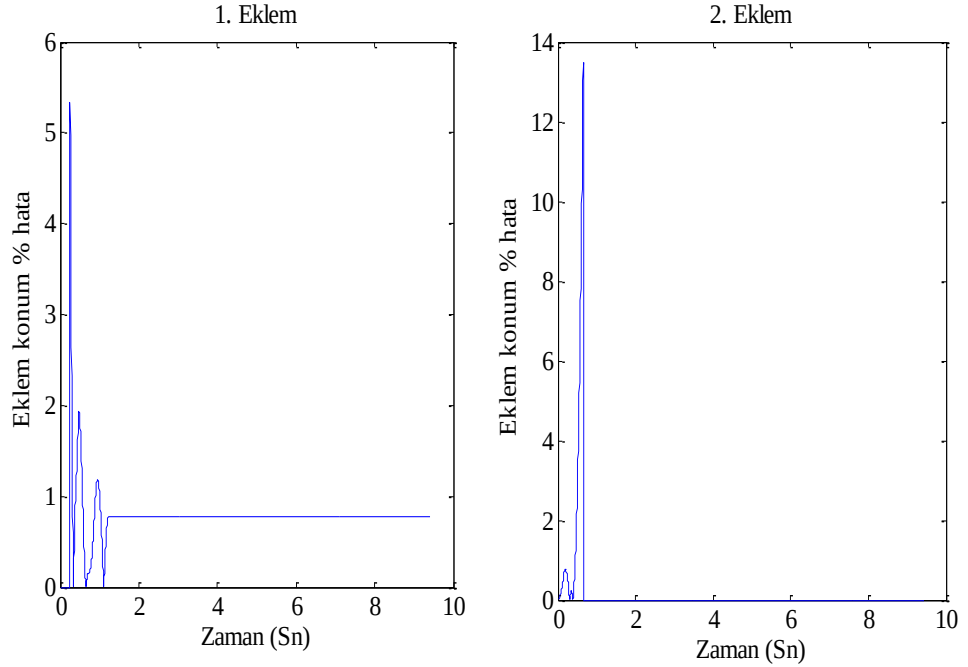


Şekil C 3.12 : 3. eklem tork grafiğı.

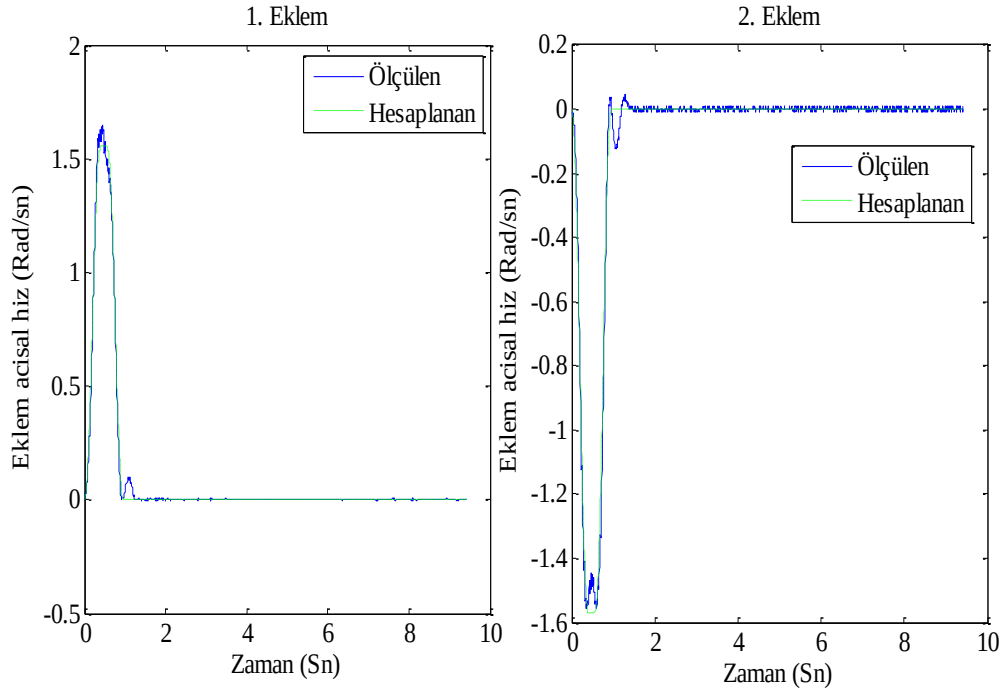
1. ve 2. eklem 50 derece ve nominal hızının %60 ile hareket etmesiyle eklem açısıl konum grafiği Şekil C 3.13’da gösterilmektedir. Bunu sırasıyla eklem konum % hata, eklem açısıl hızı, eklem tork grafikleri takip etmektedir.



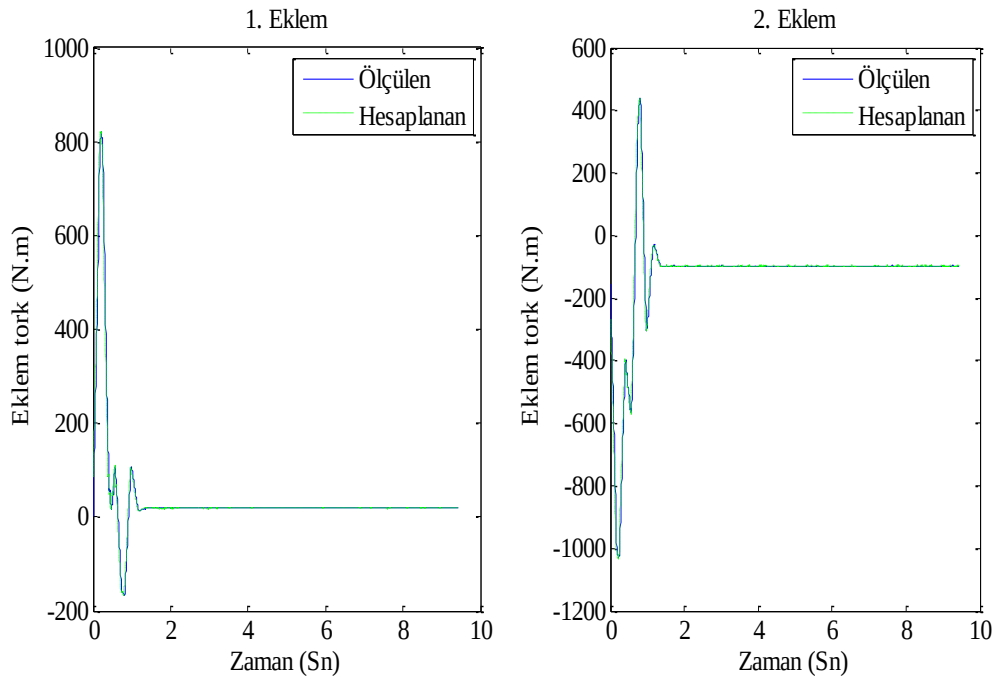
Şekil C 3.13 : 1. ve 2. eklemlerin açısıl konum grafikleri.



Şekil C 3.14 : 1. ve 2. eklemlerin açısıl konum % hata grafikleri.

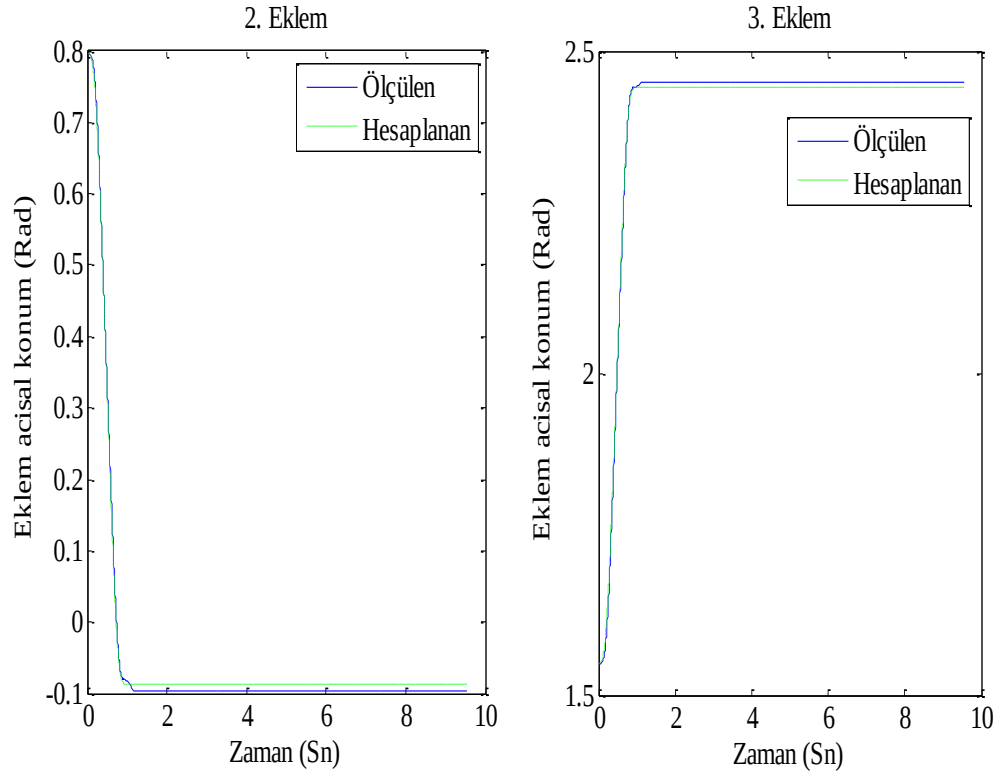


Şekil C 3.15 : 1. ve 2. eklemlerin açısal hız grafikleri.

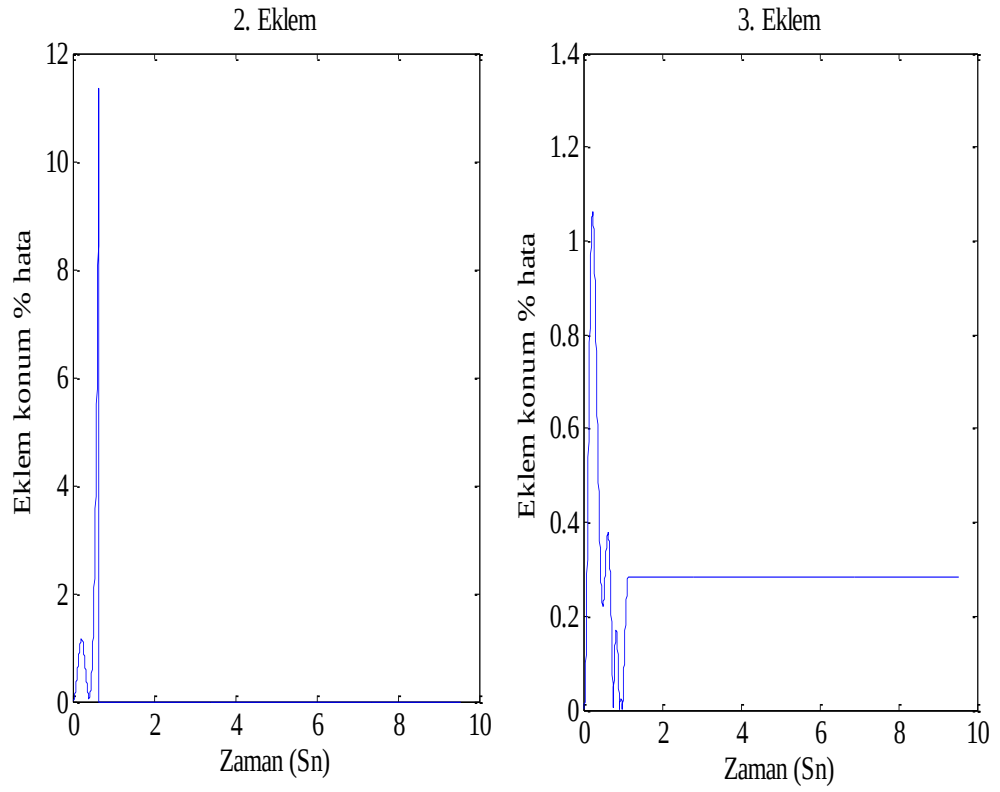


Şekil C 3.16 : 1. ve 2. eklemlerin tork grafikleri.

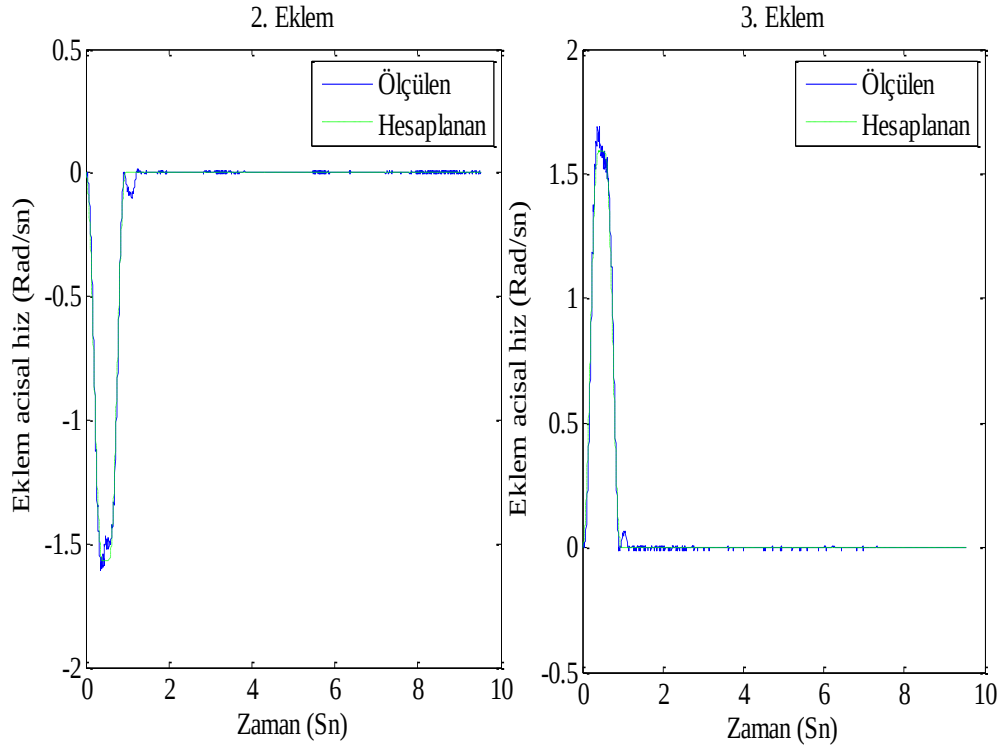
2. ve 3. eklemin 50 derece ve nominal hızının %60 ile hareket etmesiyle eklemlerin açısal konum grafiği Şekil C 3.17’de gösterilmektedir. Bunu sırasıyla eklemlerin konum % hata, eklemlerin açısal hızı, eklemlerin tork grafikleri takip etmektedir.



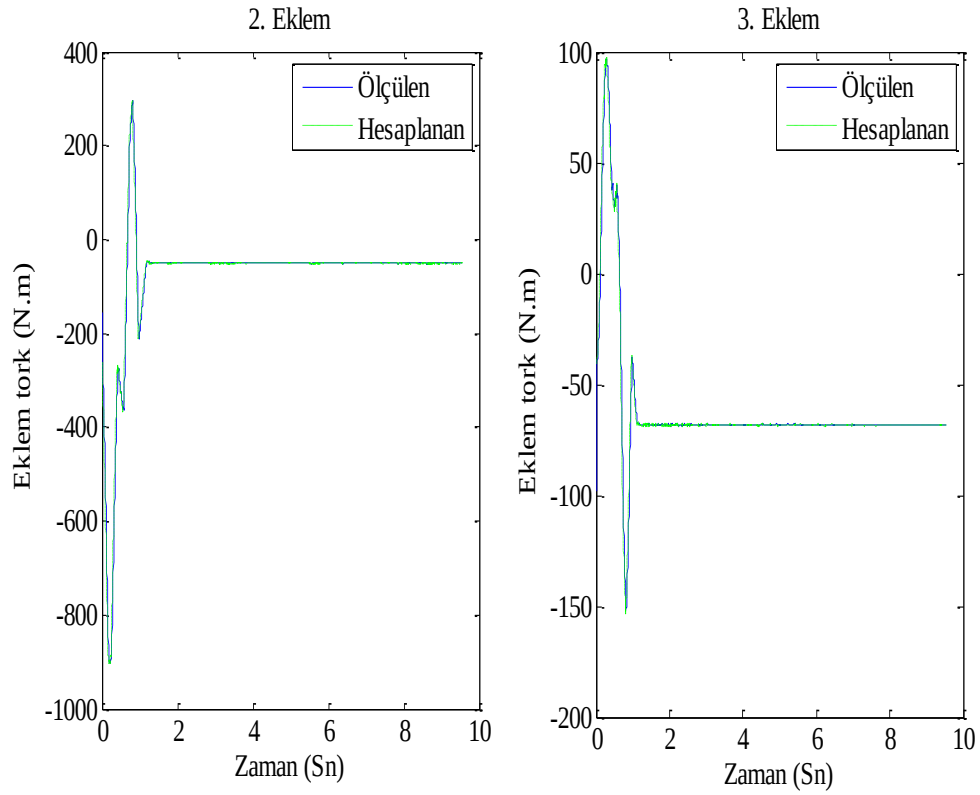
Şekil C 3.17 : 2. ve 3. eklemlerin açısai konum grafikleri.



Şekil C 3.18 : 2. ve 3. eklemlerin açısai konum % hata grafikleri.

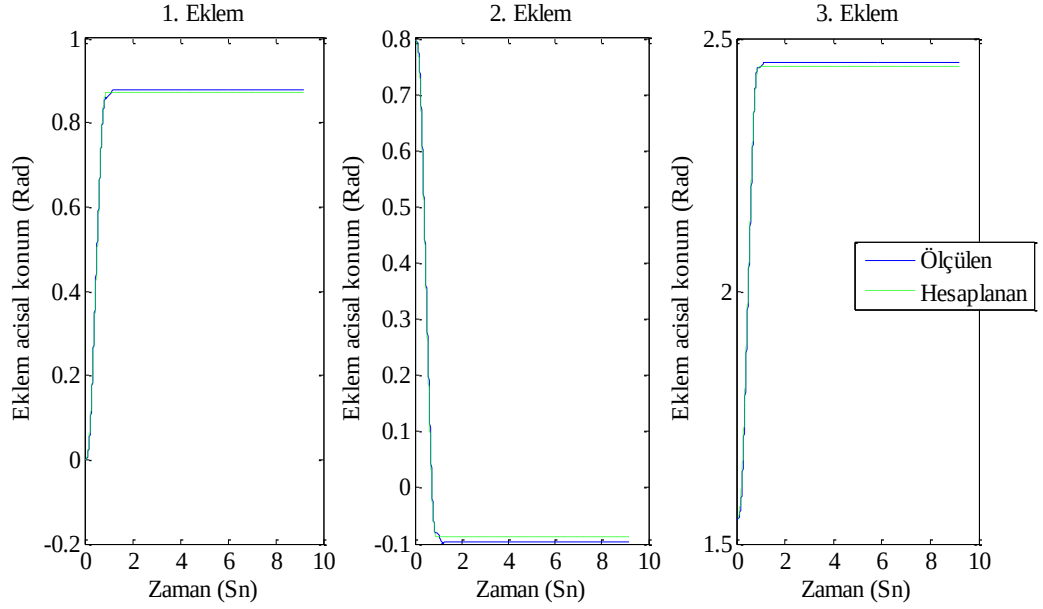


Şekil C 3.19 : 2. ve 3. eklemlerin açısai hız grafikleri.

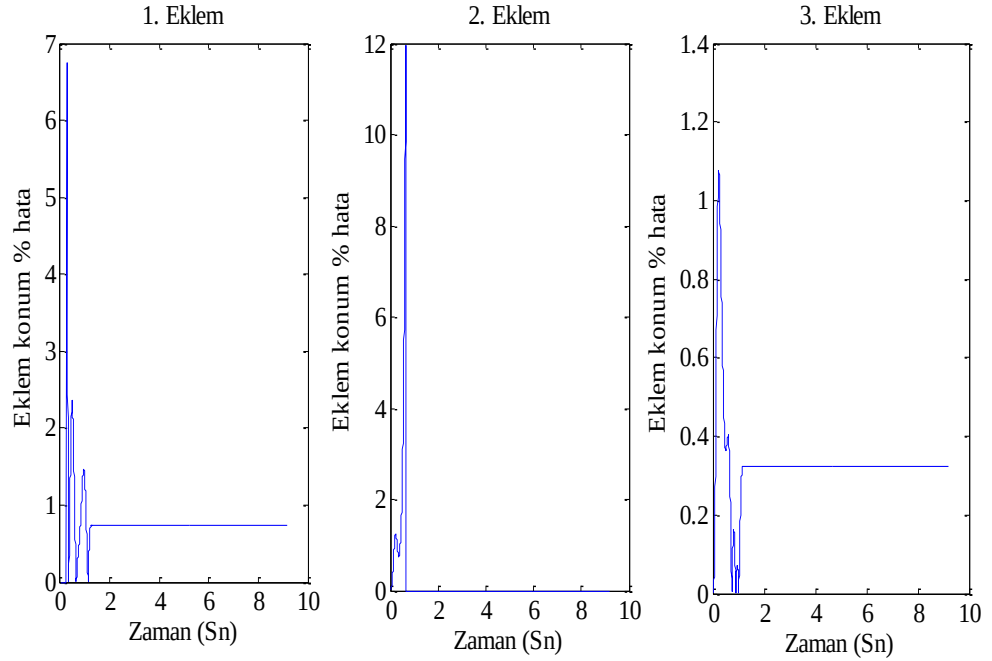


Şekil C 3.20 : 2. ve 3. eklemlerin tork grafikleri

1., 2. ve 3. eklemin 50 derece ve nominal hızının %60 ile hareket etmesiyle eklem açısıl konum grafiği Şekil C 3.21’de gösterilmektedir. Bunu sırasıyla eklem konum % hata, eklem açısıl hızı, eklem tork grafikleri takip etmektedir.



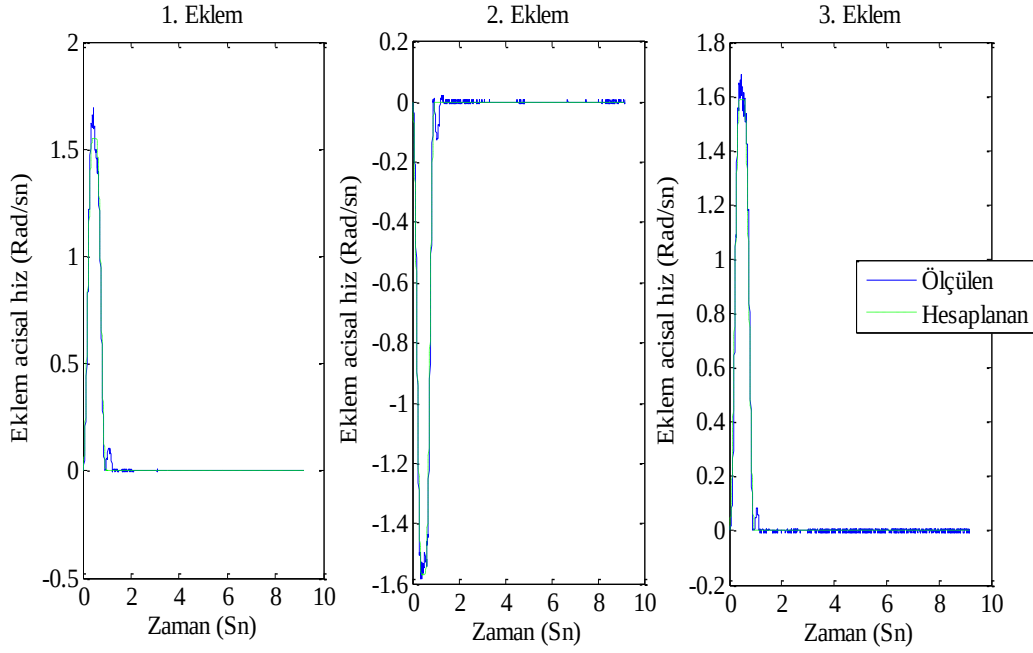
Şekil C 3.21 : 1., 2. ve 3. eklemlerin açısıl konum grafikleri.



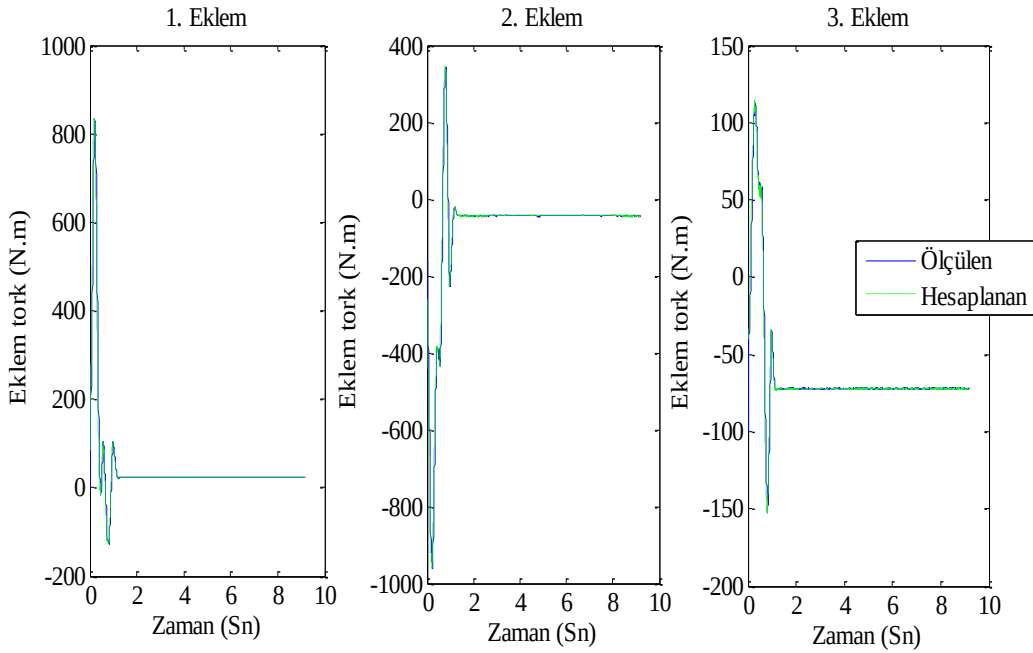
Şekil C 3.22 : 1., 2. ve 3. eklemlerin açısıl konum % hata grafikleri.

Eklem uzayında yörünge planlamasıyla tüm eklemlerin nominal hızının %60 ile hareket etmesiyle eklem açısıl konum grafiği Şekil C 3.25’de gösterilmektedir. Bunu

sırasıyla eklem konum % hata, eklem açısız hızı, eklem tork grafikleri takip etmektedir.

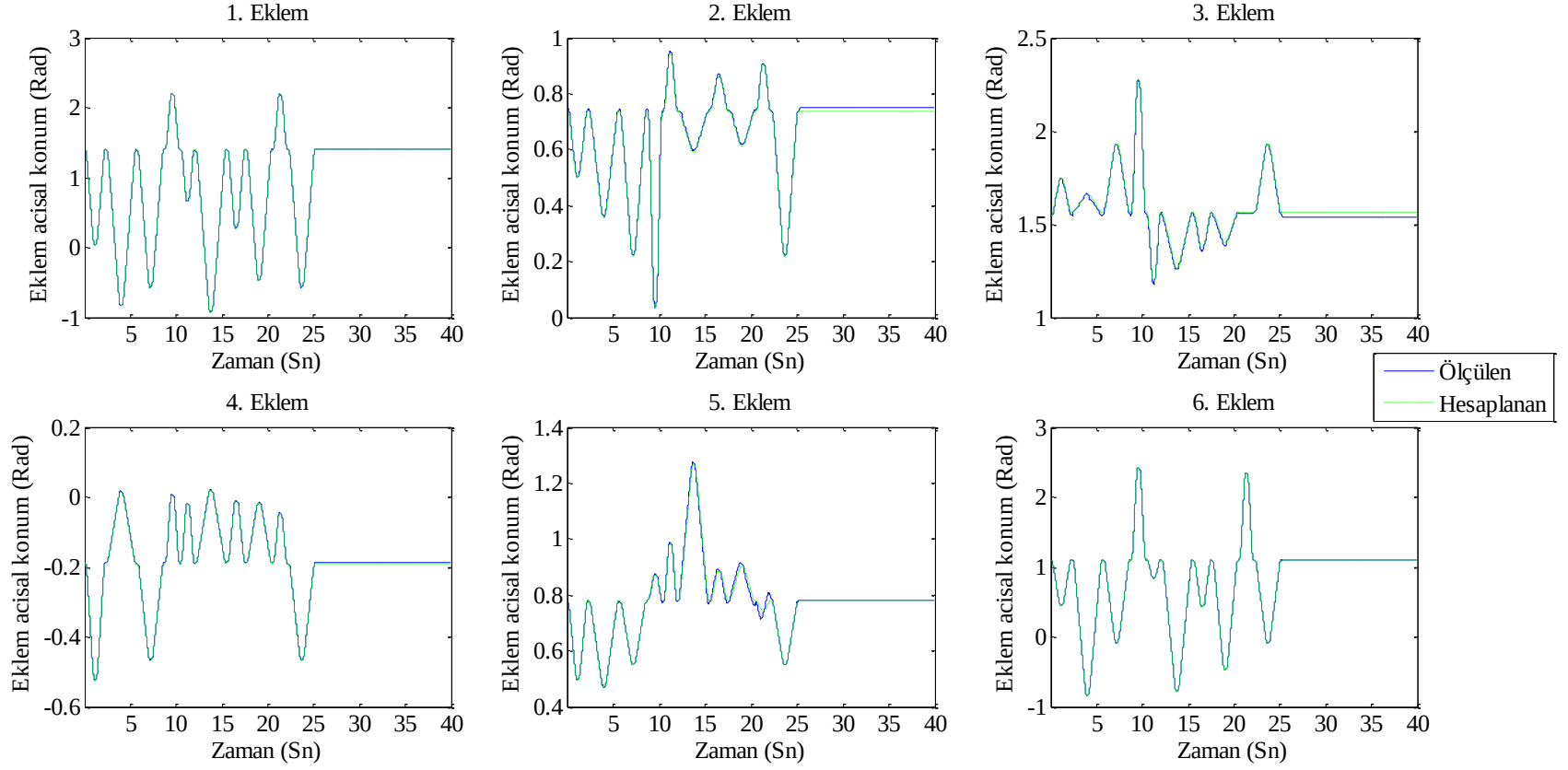


Şekil C 3.23 : 1., 2. ve 3. eklemlerin açısız hız grafikleri.

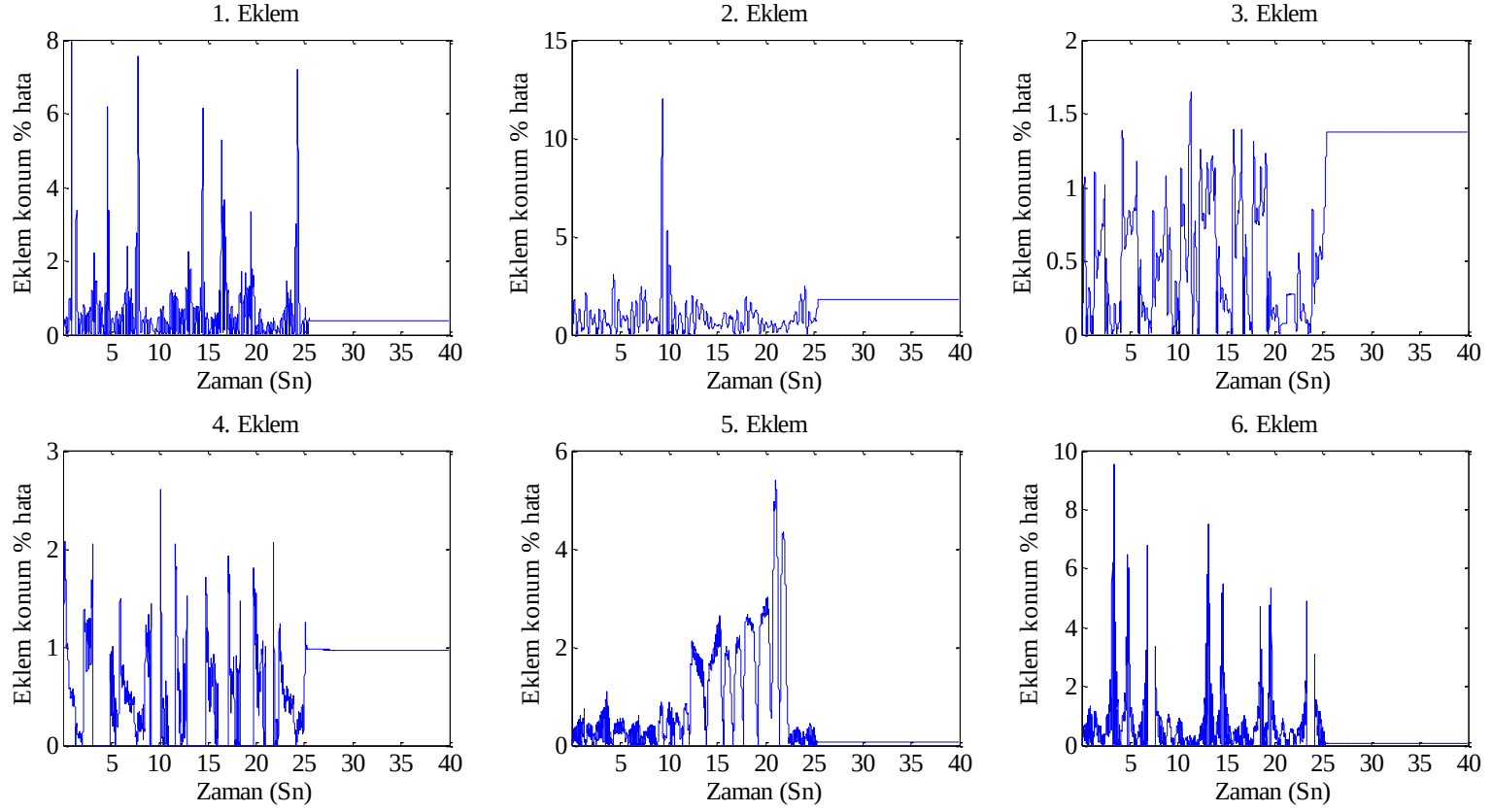


Şekil C 3.24 : 1., 2. ve 3. eklemlerin tork grafikleri.

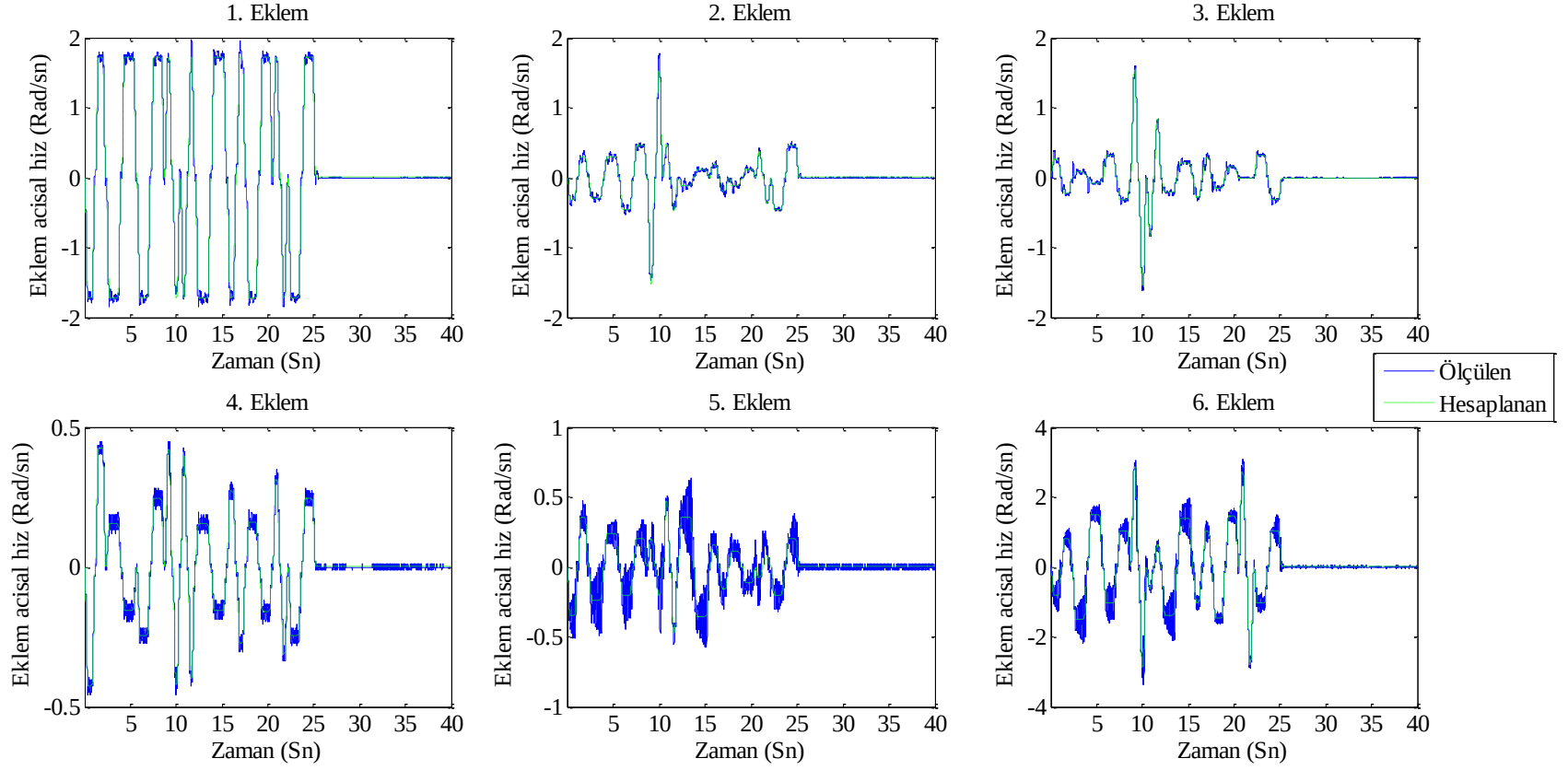
Görev uzayında yörünge planlamasıyla uç nokta maksimum hızının %60'u ile hareket etmesiyle eklem açısız konum grafiği Şekil C 3.29'da gösterilmektedir. Bunu sırasıyla eklem açısız hızı, uç nokta konum, uç nokta konum % hata, uç nokta hız ve eklem tork grafikleri takip etmektedir.



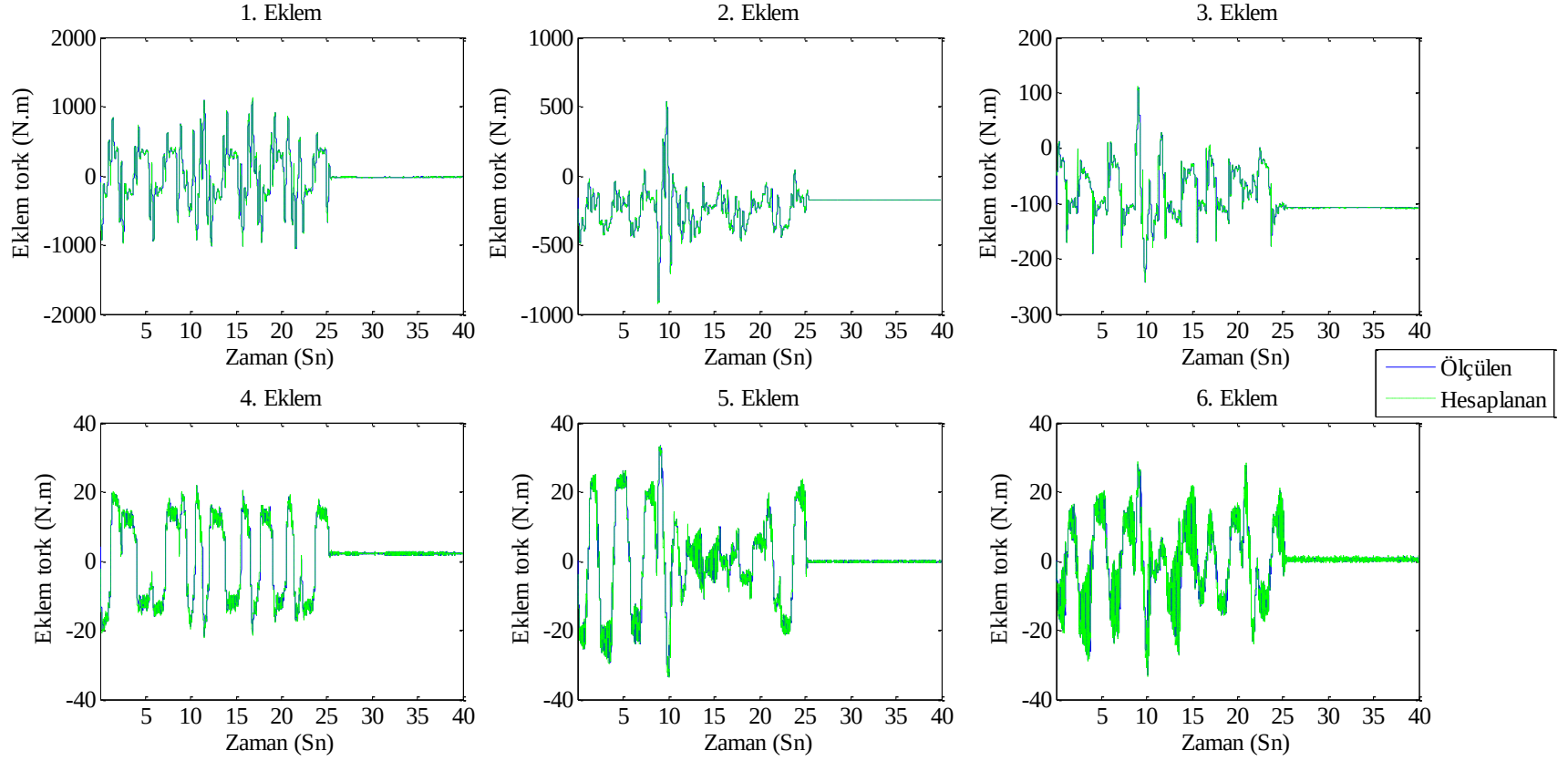
Şekil C 3.25 : Tüm eklemlerin açisal konum grafikleri.



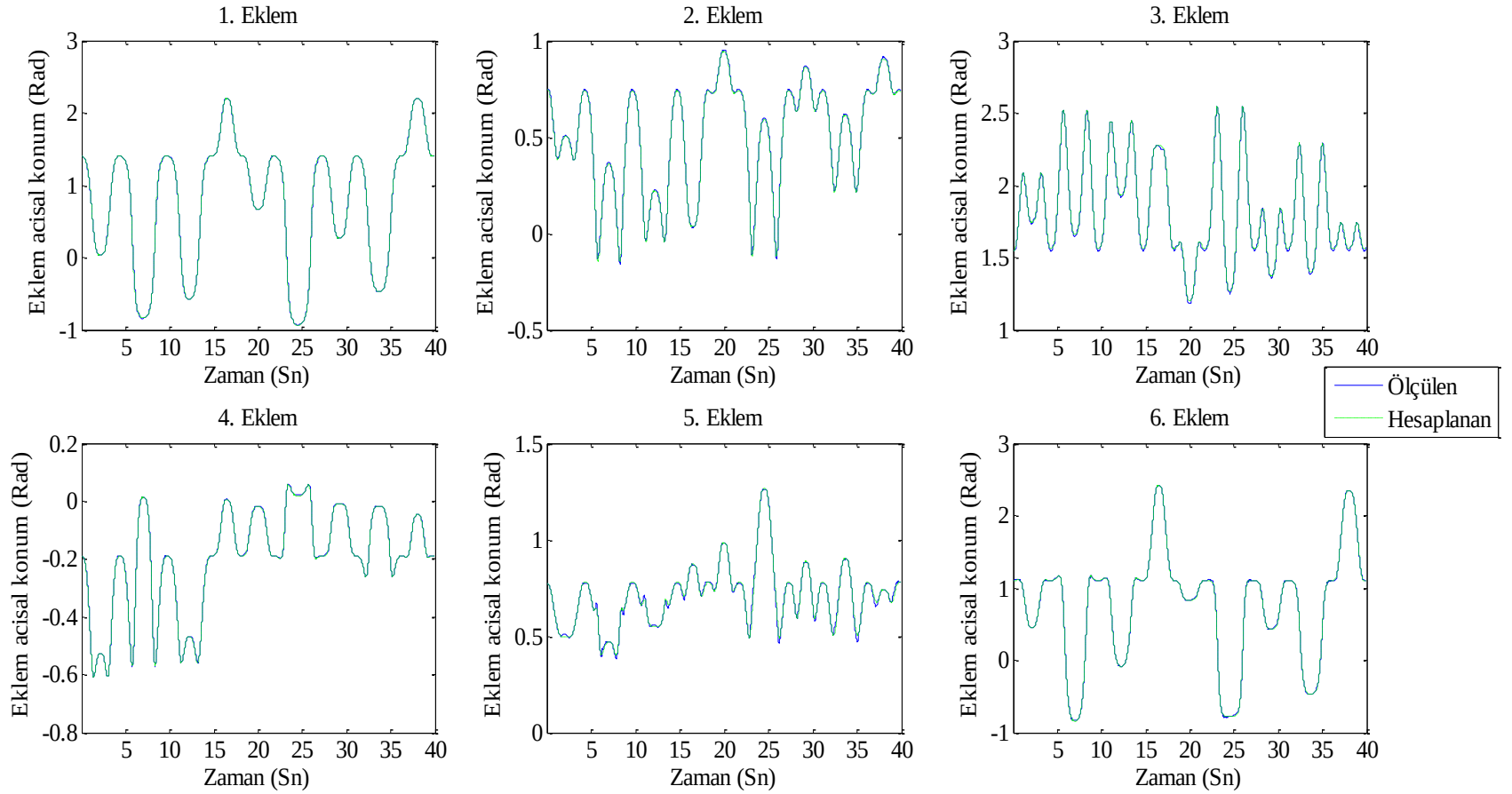
Şekil C 3.26 : Tüm eklemelerin açısal konum % hata grafikleri.



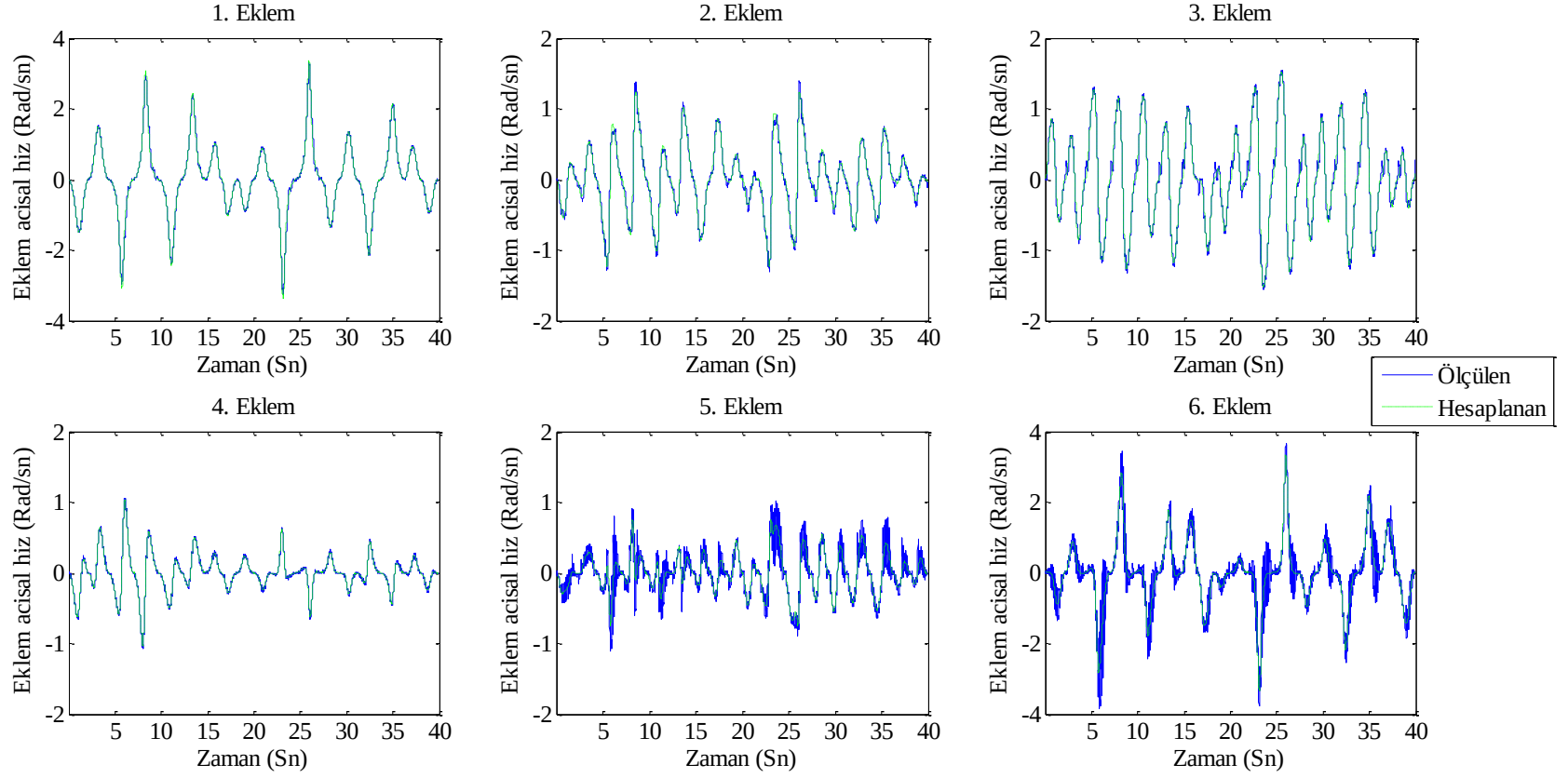
Şekil C 3.27 : Tüm eklemlerin açısai hız grafikleri.



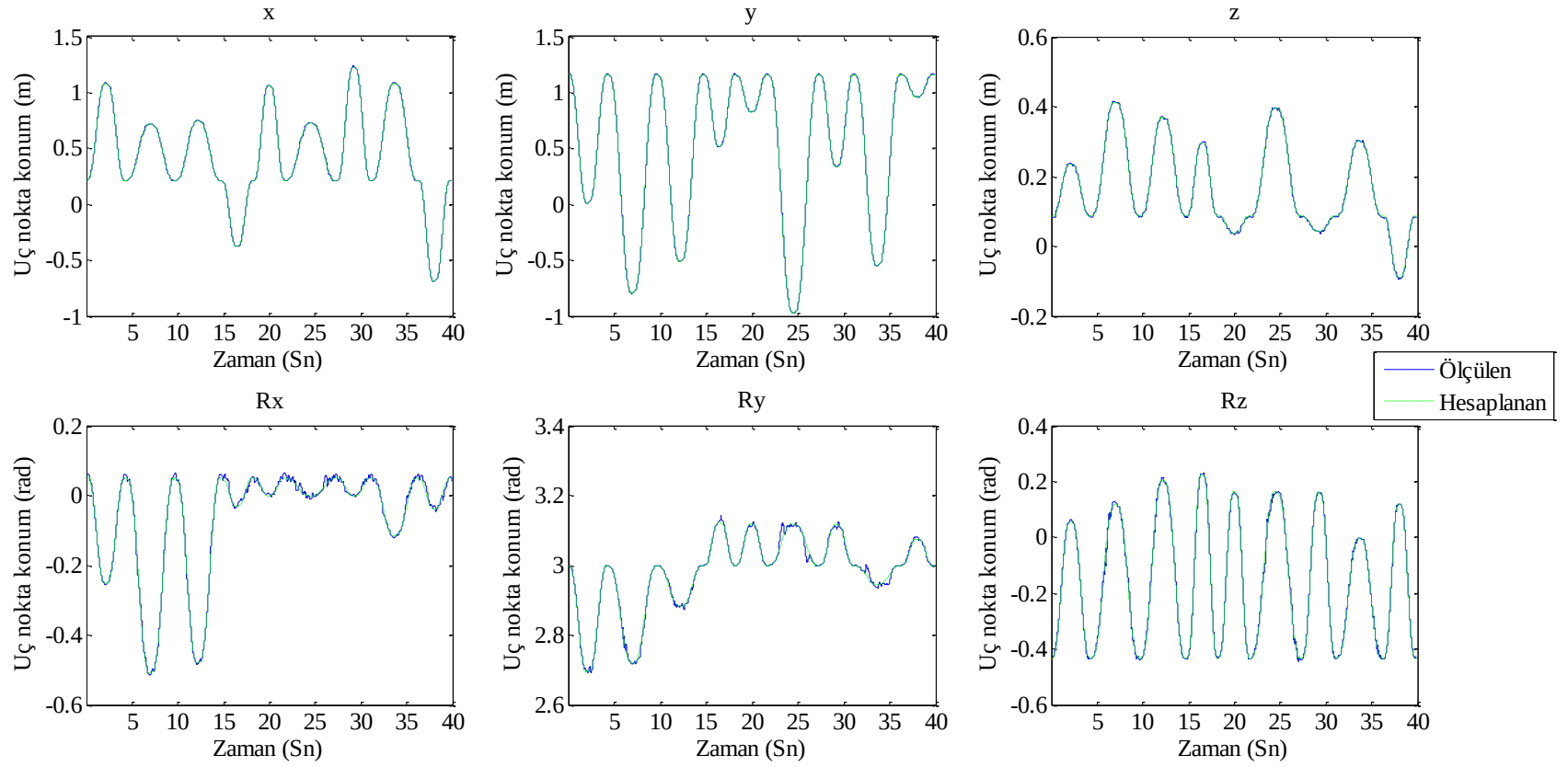
Şekil C 3.28 : Tüm eklemlerin tork grafikleri.



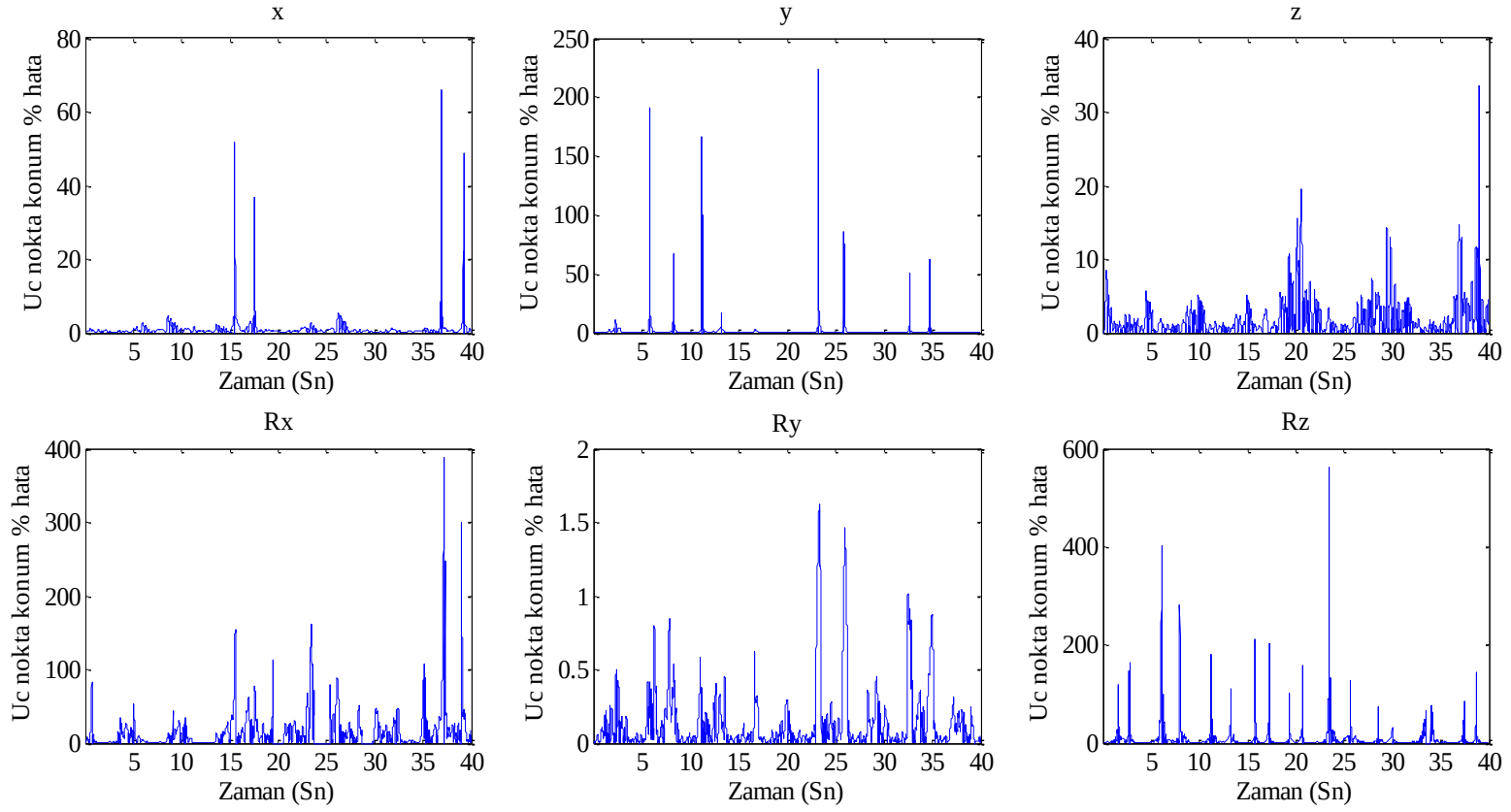
Şekil C 3.29 : Tüm eklemlerin açısai konum grafikleri.



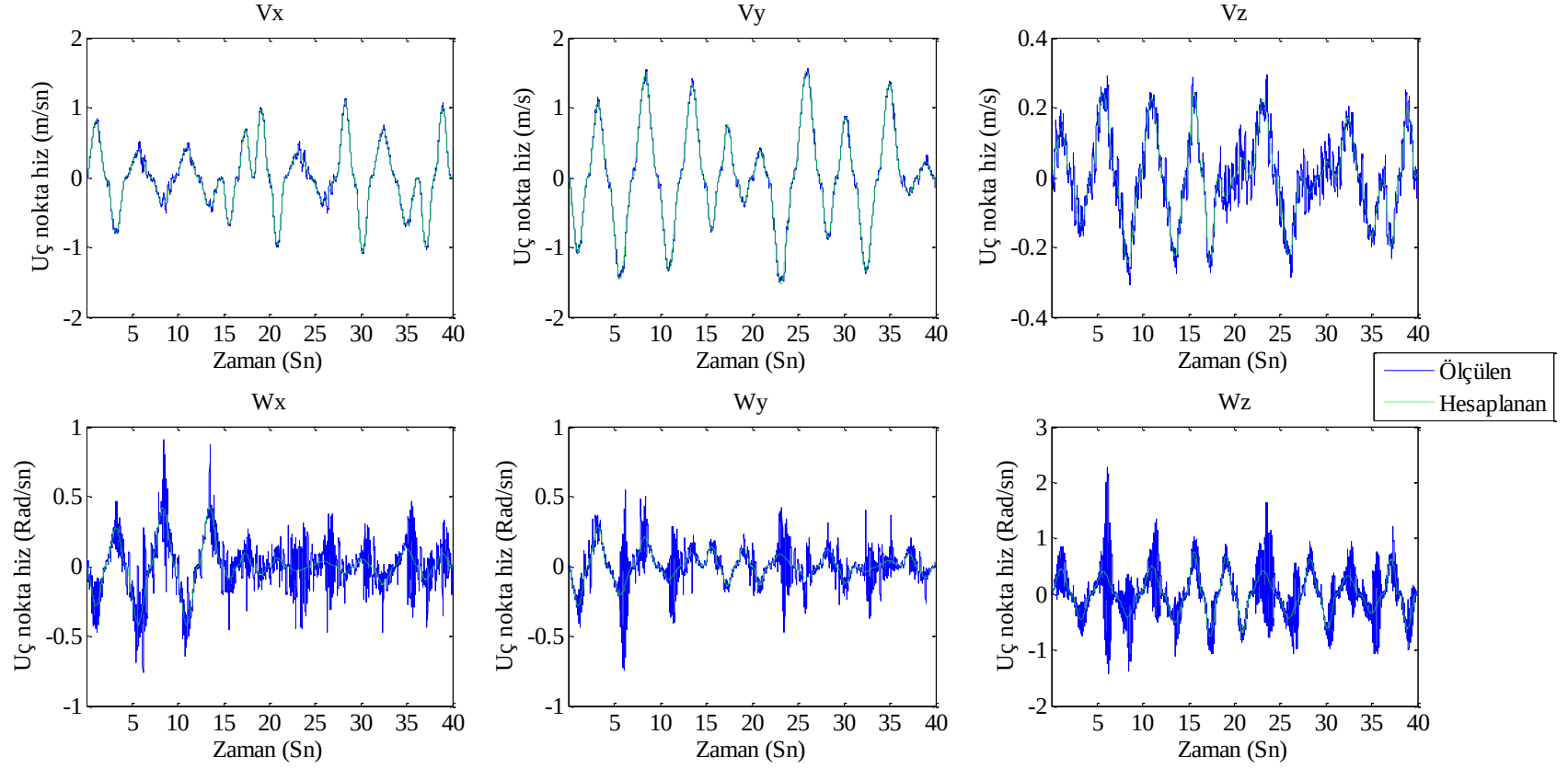
Şekil C 3.30 : Tüm eklemlerin açısıl hız grafikleri.



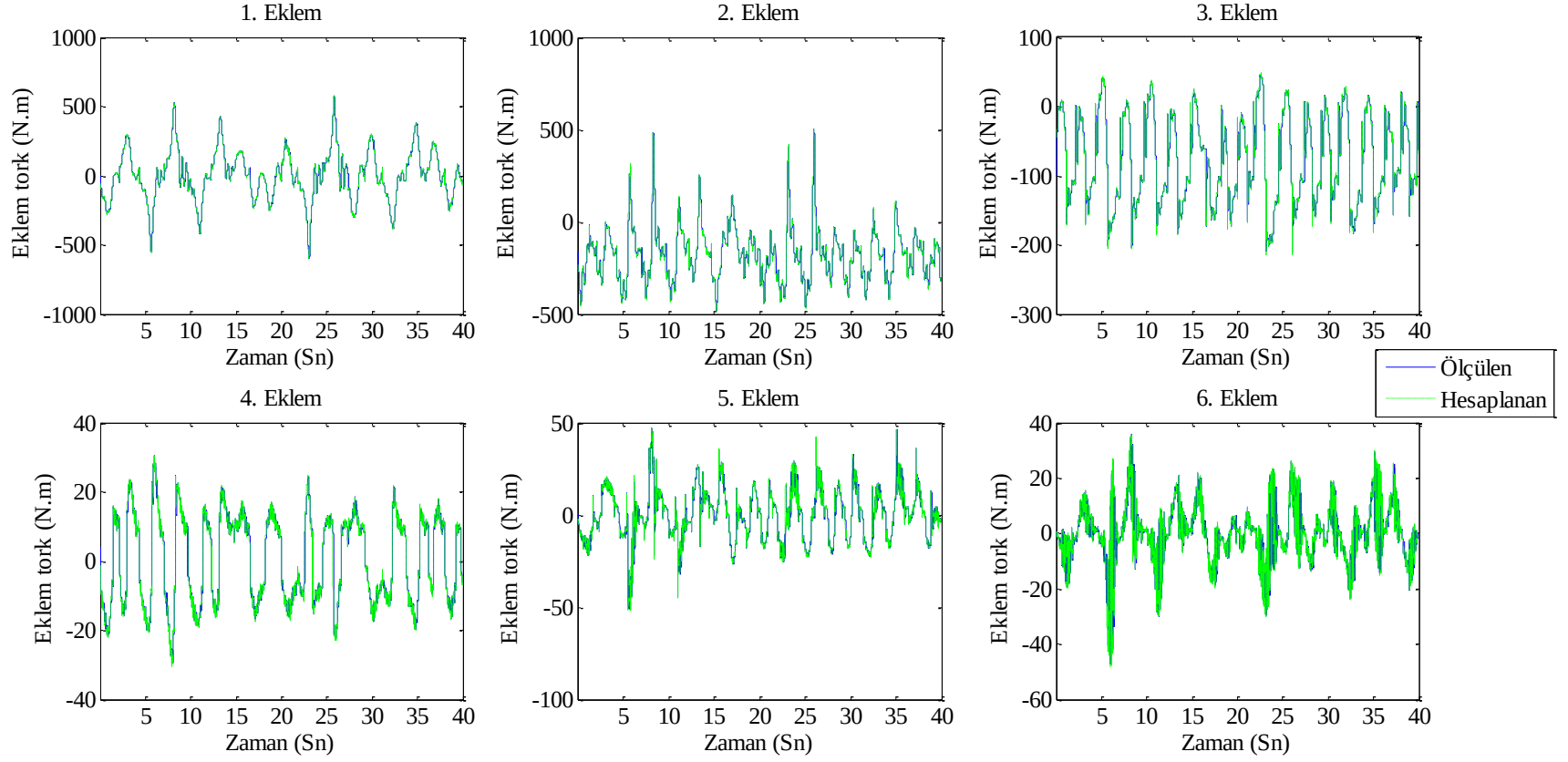
Şekil C 3.31 : Uç nokta konum grafikleri.



Şekil C 3.32 : Uç nokta konum % hata grafikleri.

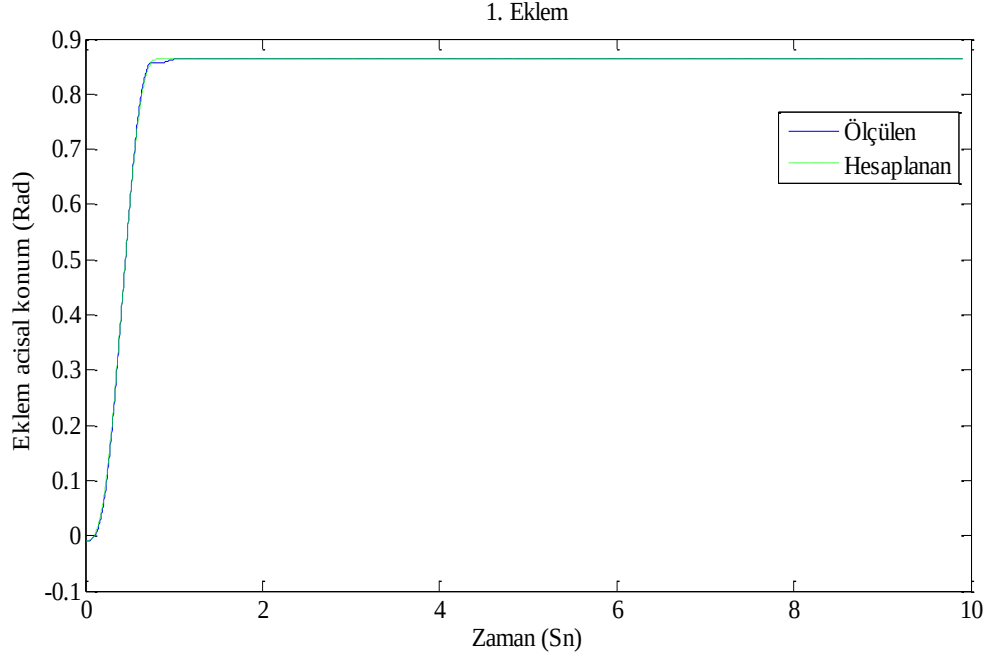


Şekil C 3.33 : Uç nokta hız grafikleri.

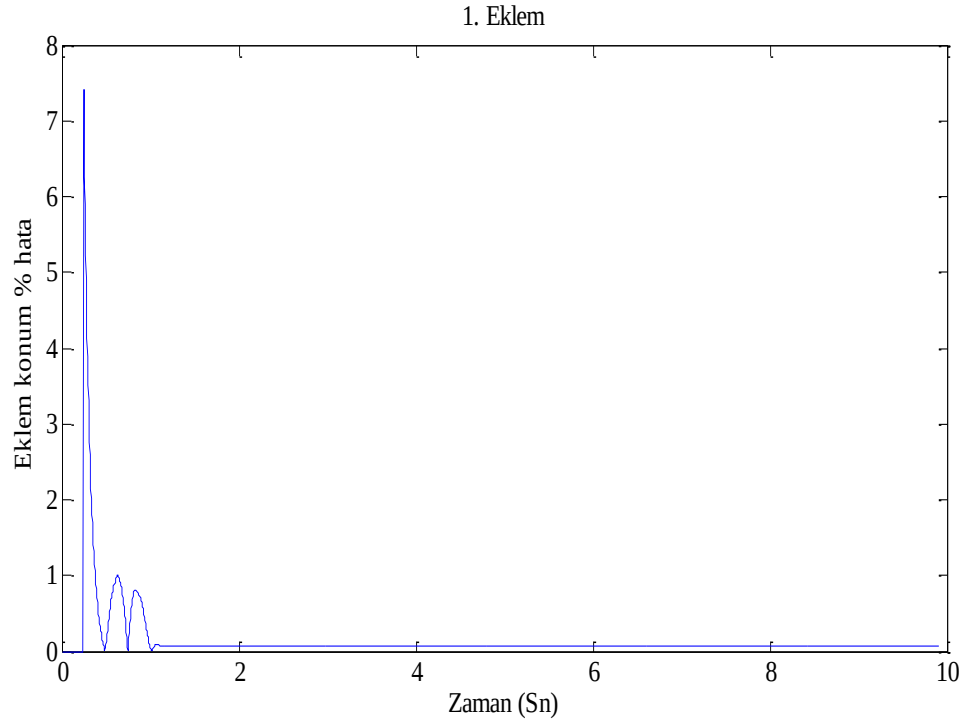


Şekil C 3.34 : Tüm eklemlerin tork grafikleri.

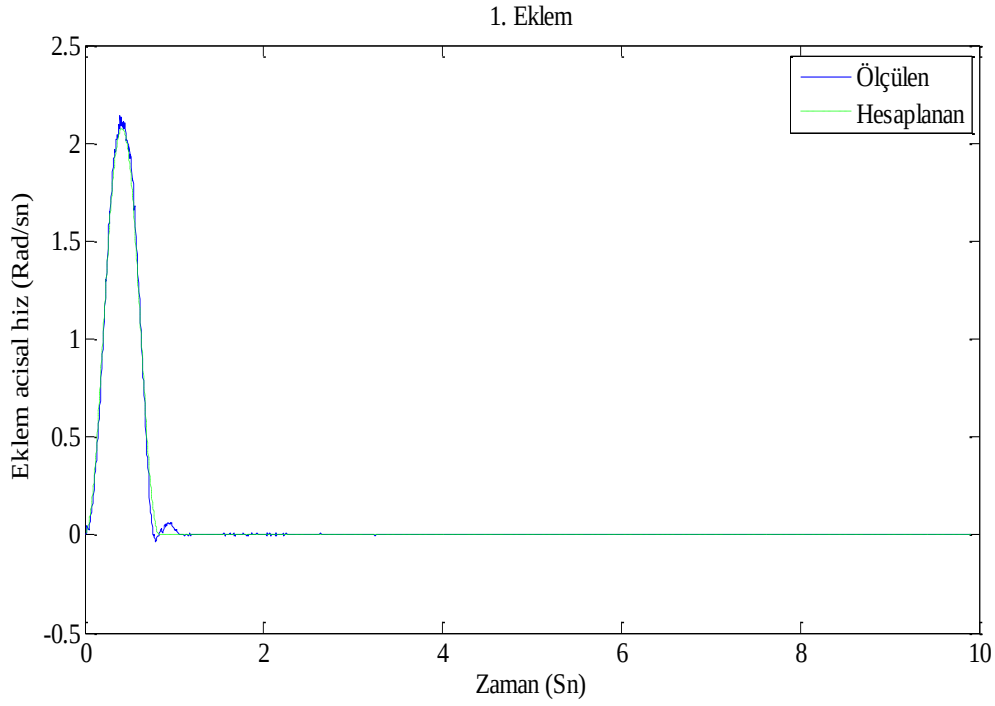
Yalnızca 1. eklem 50 derece ve nominal hızının %100 ile hareket etmesiyle eklem açısıl konum grafiği Şekil C 3.35’de gösterilmektedir. Bunu sırasıyla eklem konum % hata, eklem açısıl hızı, eklem tork grafikleri takip etmektedir.



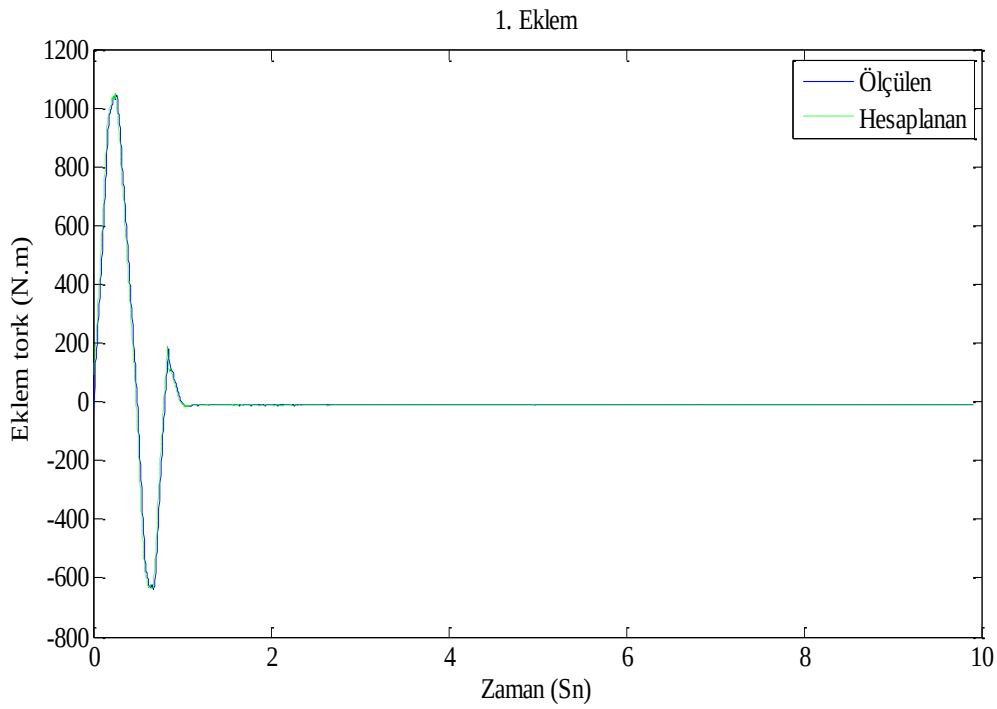
Şekil C 3.35 : 1. eklem açısıl konum grafiği.



Şekil C 3.36 : 1. eklem açısıl konum % hata grafiği.

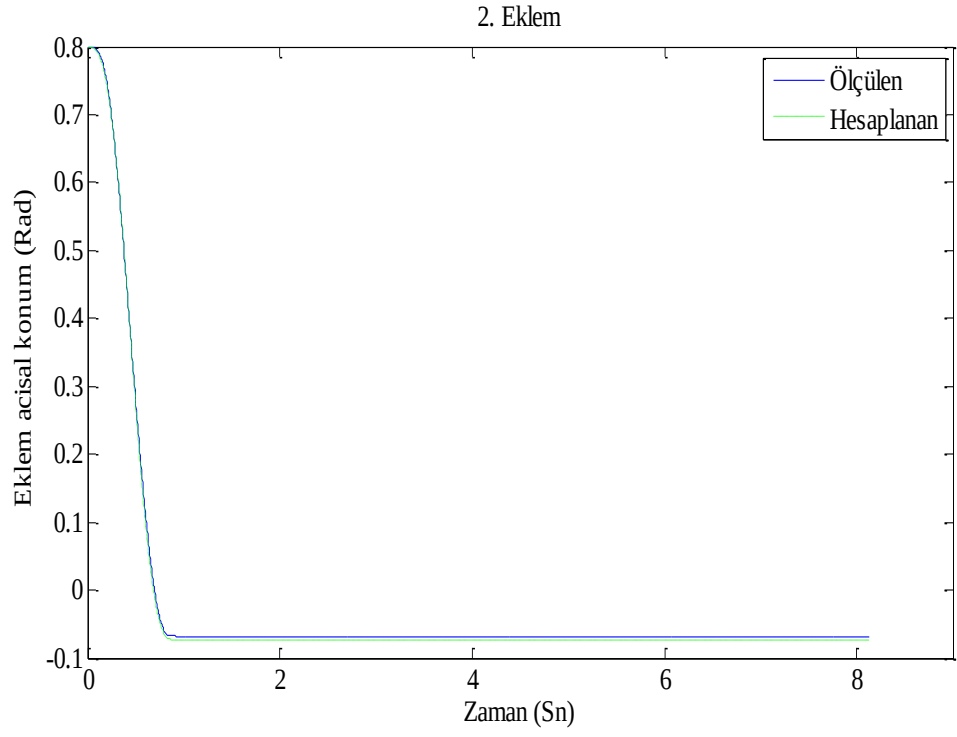


Şekil C 3.37 : 1. eklem açısai hız grafiğı.

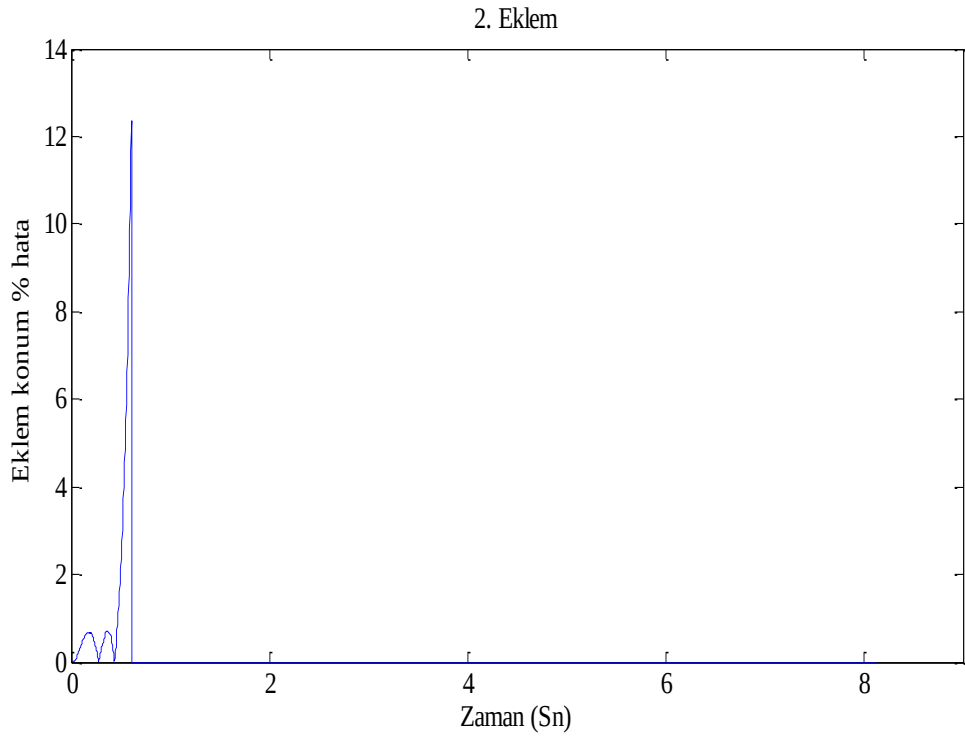


Şekil C 3.38 : 1. eklem tork grafiğı.

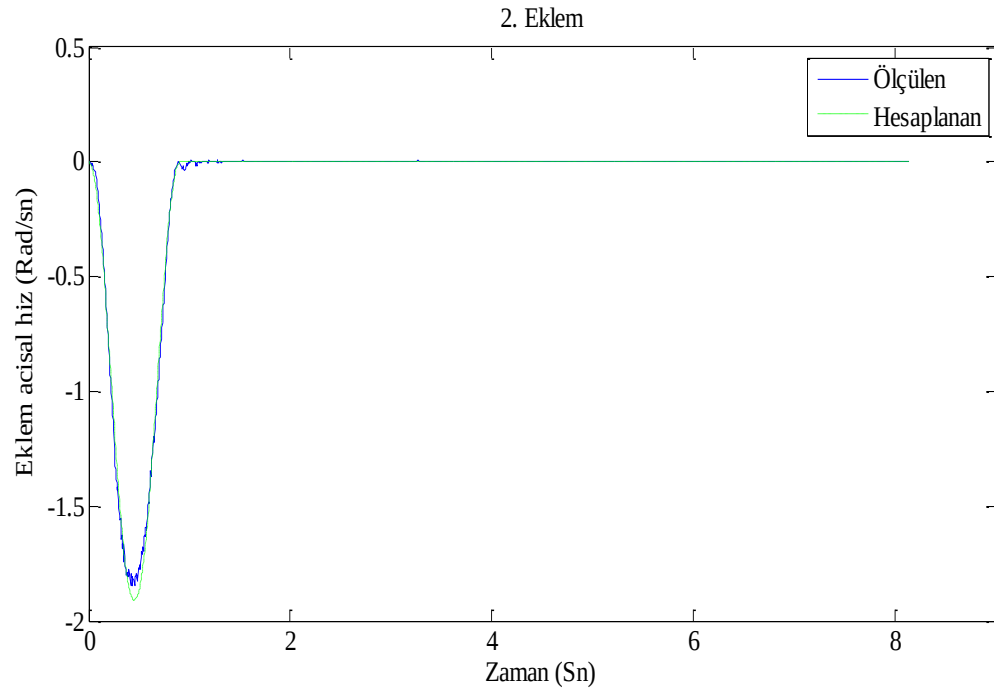
Yalnızca 2. eklem 50 derece ve nominal hızının %100 ile hareket etmesiyle eklem açısai konum grafiğı Şekil C 3.39'de gösterilmektedir. Bunu sırasıyla eklem konum % hata, eklem açısai hızı, eklem tork grafikleri takip etmektedir.



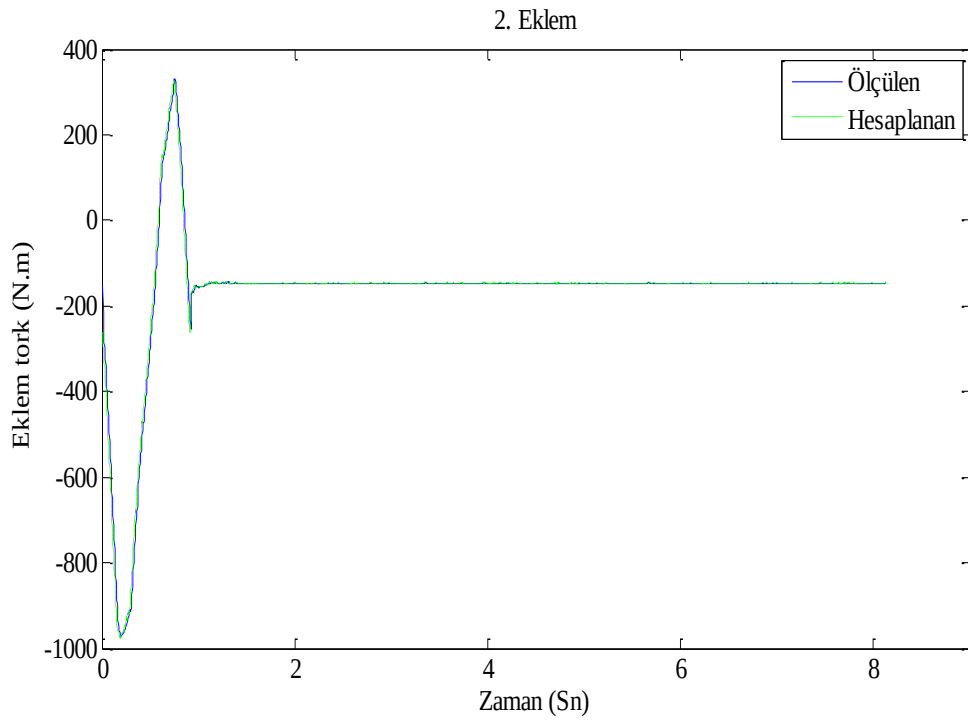
Şekil C 3.39 : 2. eklem açısai konum grafiği.



Şekil C 3.40 : 2. eklem açısai konum % hata grafiği.

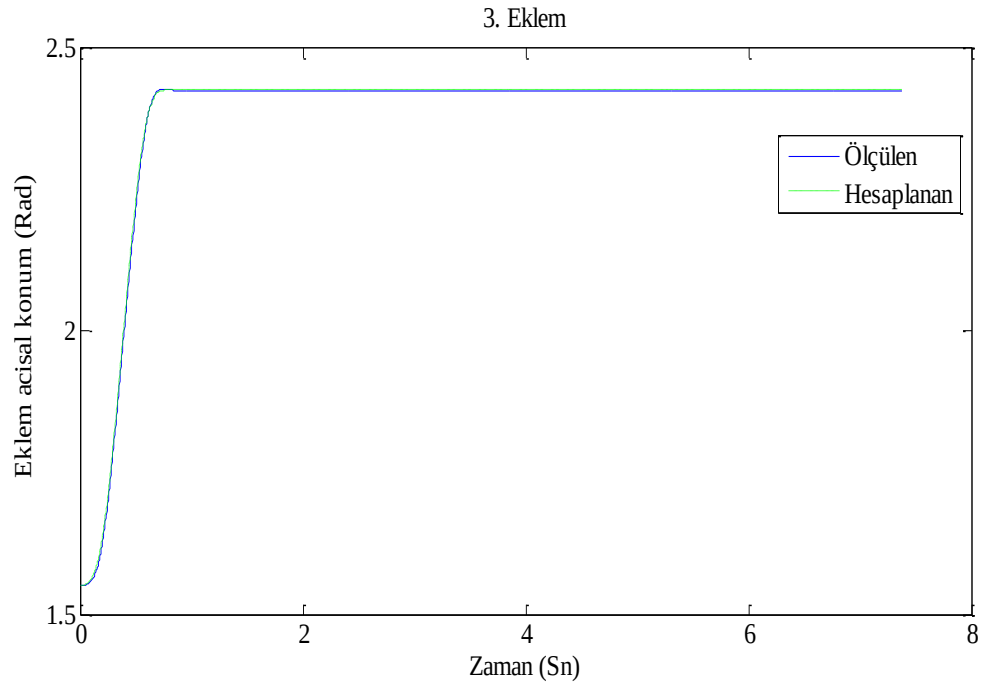


Şekil C 3.41 : 2. eklem açısız hız grafiğı.

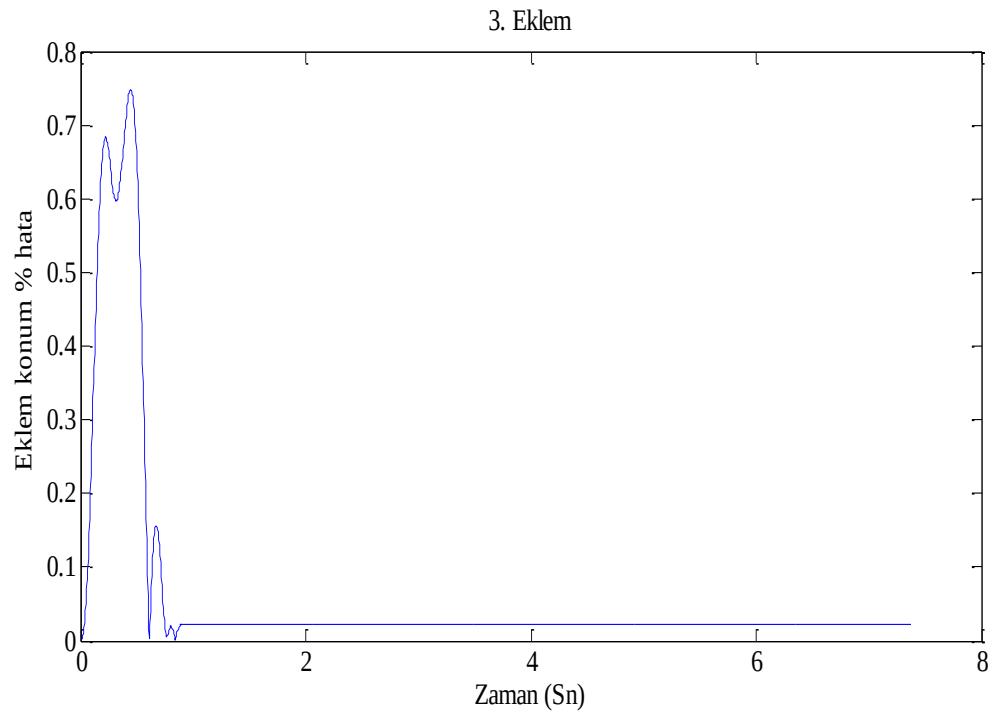


Şekil C 3.42 : 2. eklem tork grafiğı

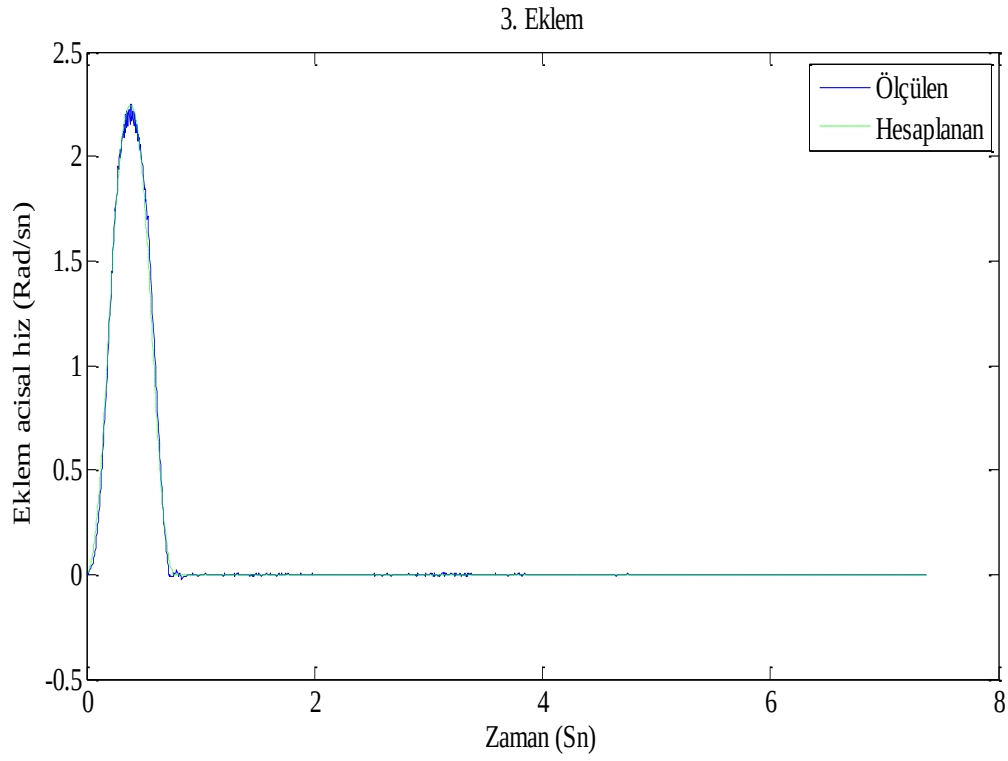
Yalnızca 3. eklemın 50 derece ve nominal hızının %100 ile hareket etmesiyle eklem açısız konum grafiğı Şekil C 3.43'de gösterilmektedir. Bunu sırasıyla eklem konum % hata, eklem açısız hızı, eklem tork grafikleri takip etmektedir.



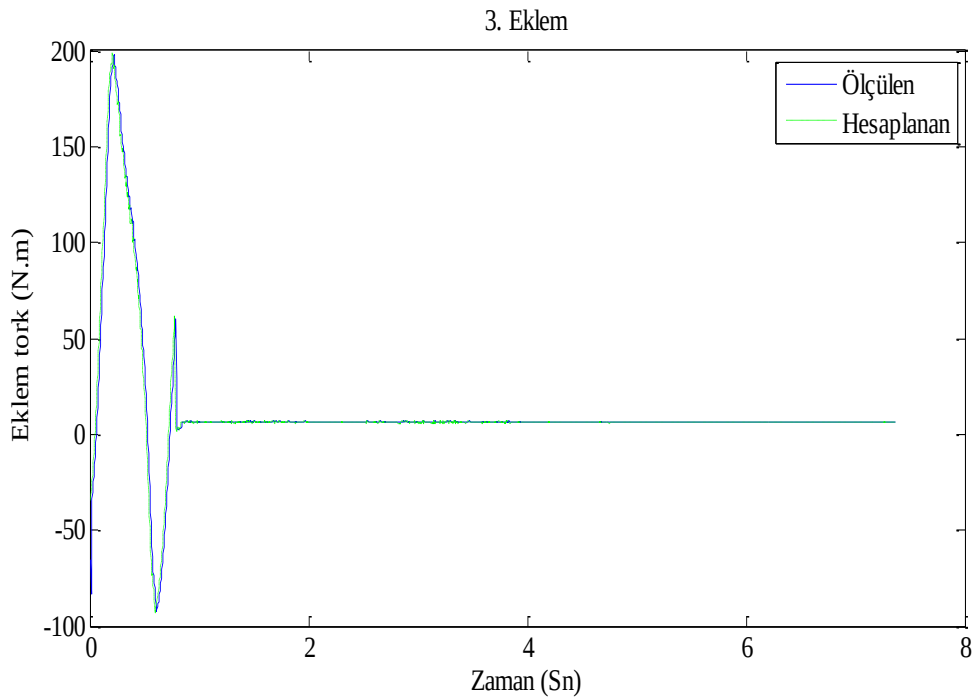
Şekil C 3.43 : 3. eklem açisal konum grafiği.



Şekil C 3.44 : 3. eklem açisal konum % hata grafiği.

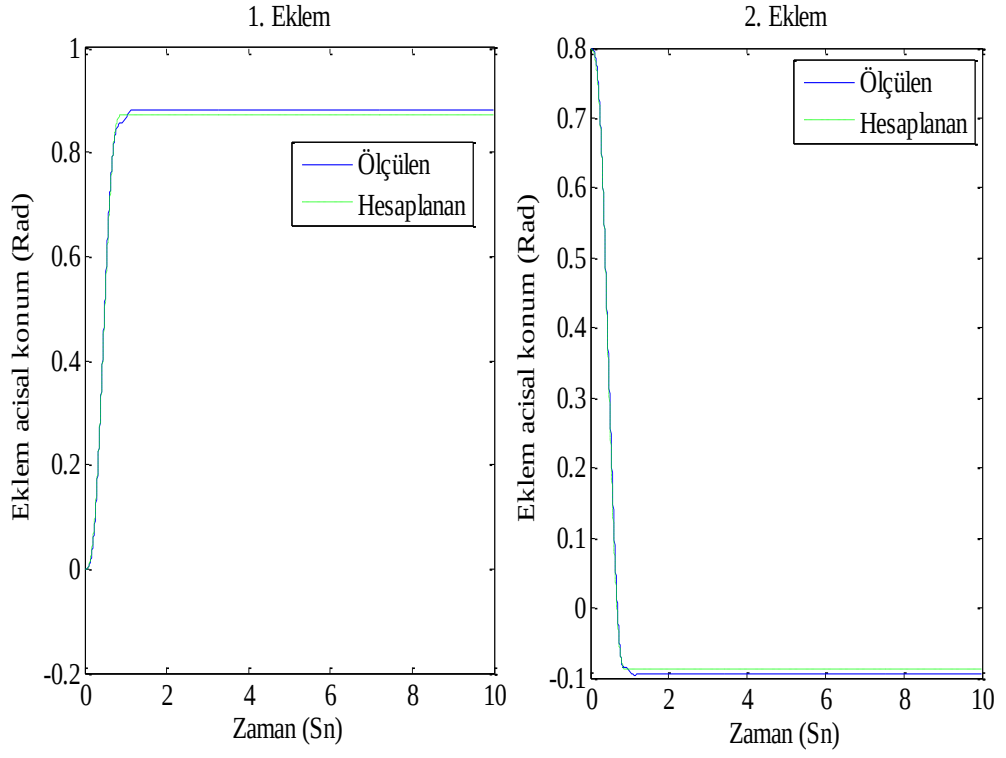


Şekil C 3.45 : 3. eklem açısal hız grafiği.

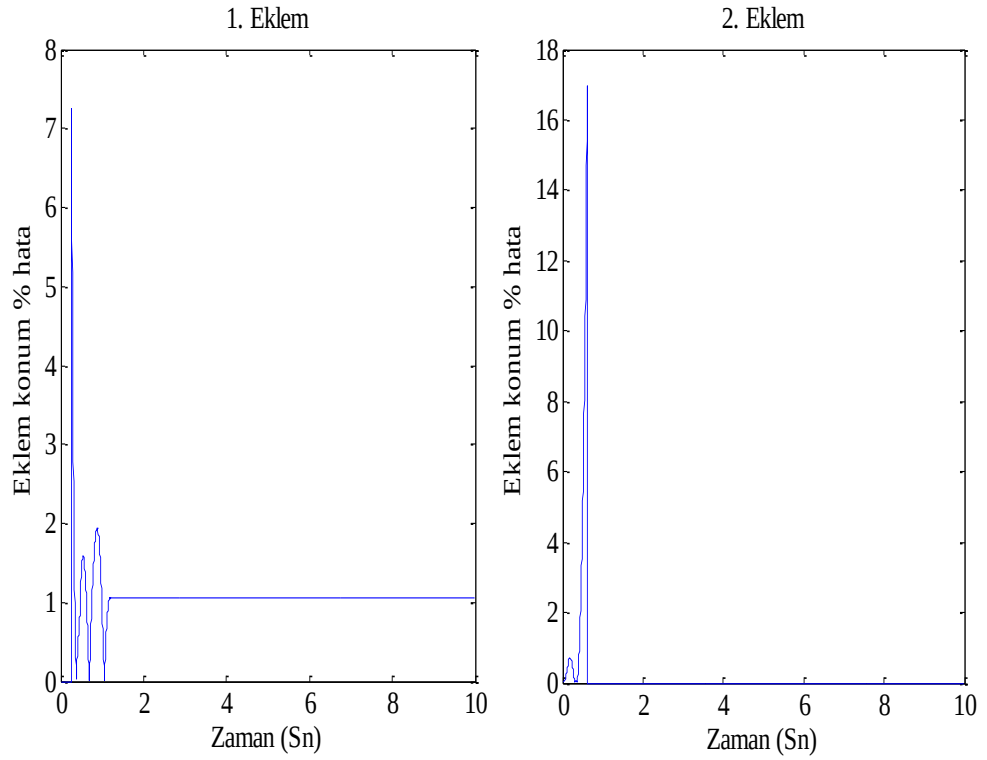


Şekil C 3.46 : 3. eklem tork grafiği.

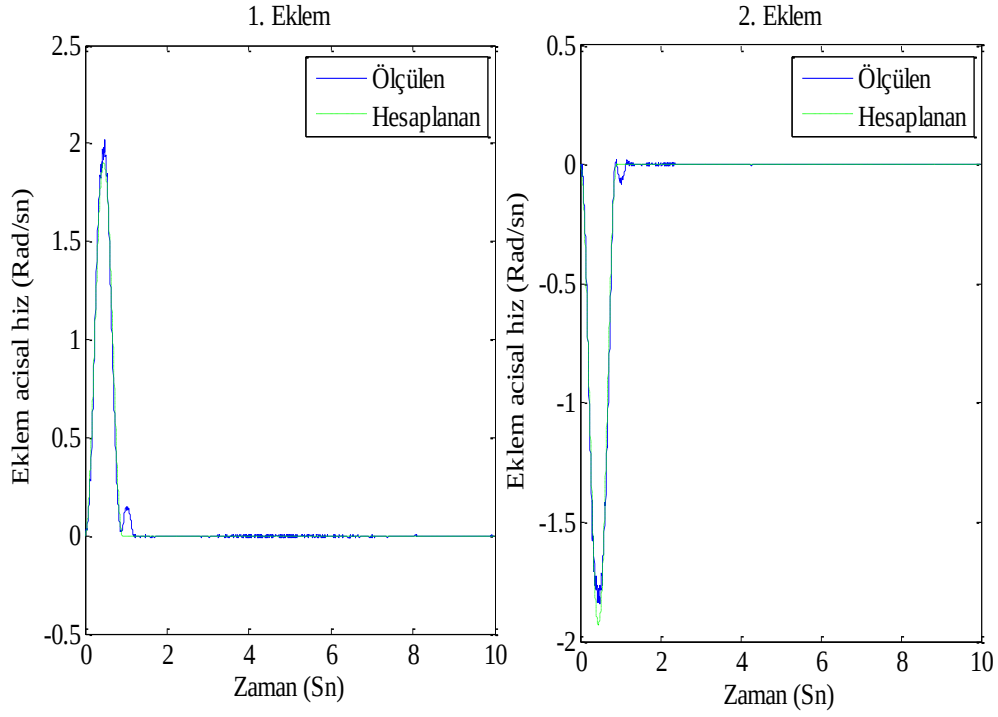
1. ve 2. eklemin 50 derece ve nominal hızının %100 ile hareket etmesiyle eklem açısal konum grafiği Şekil C 3.47'da gösterilmektedir. Bunu sırasıyla eklem konum % hata, eklem açısal hızı, eklem tork grafikleri takip etmektedir.



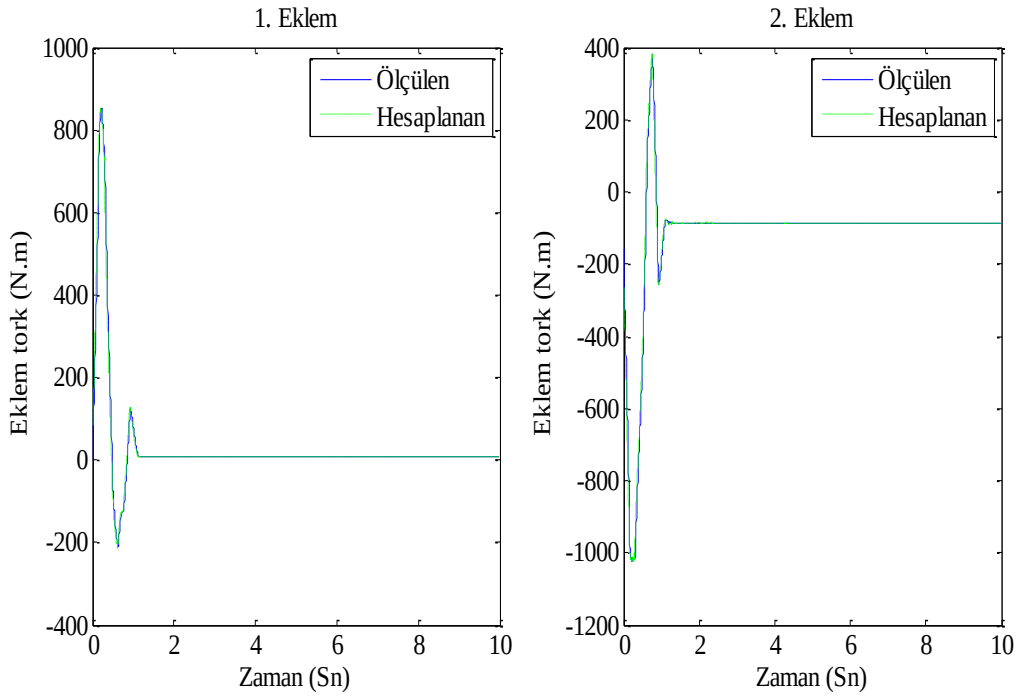
Şekil C 3.47 : 1. ve 2. eklemlerin açıl konum grafikleri.



Şekil C 3.48 : 1. ve 2. eklemlerin açıl konum % hata grafikleri.

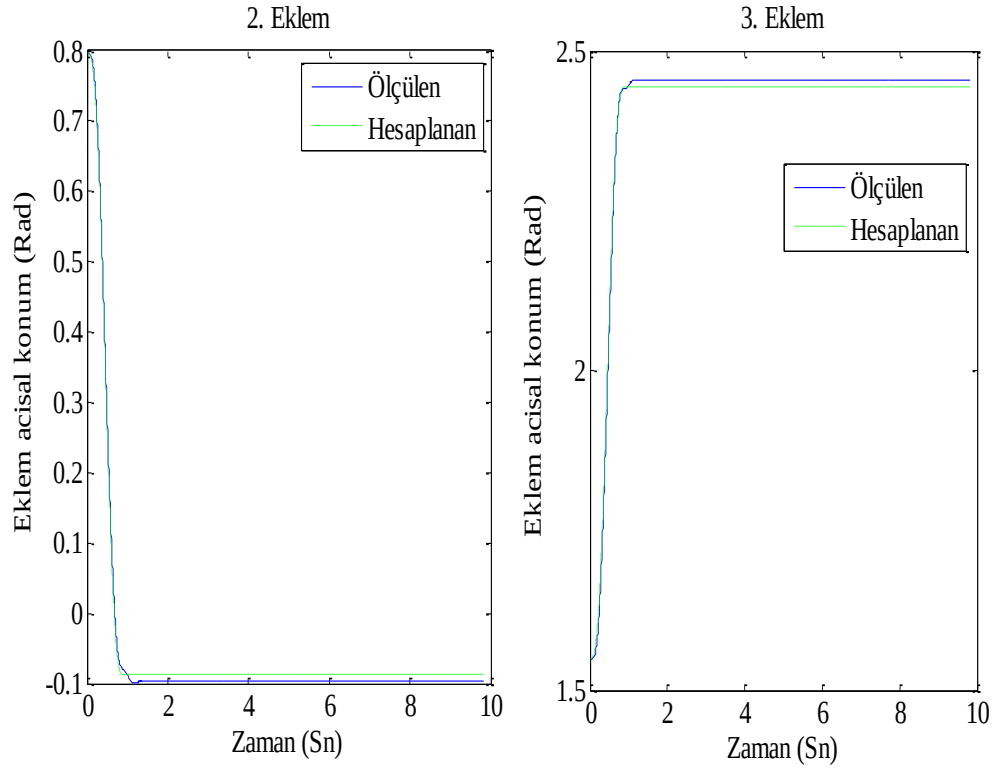


Şekil C 3.49 : 1. ve 2. eklemlerin açisal hız grafikleri.

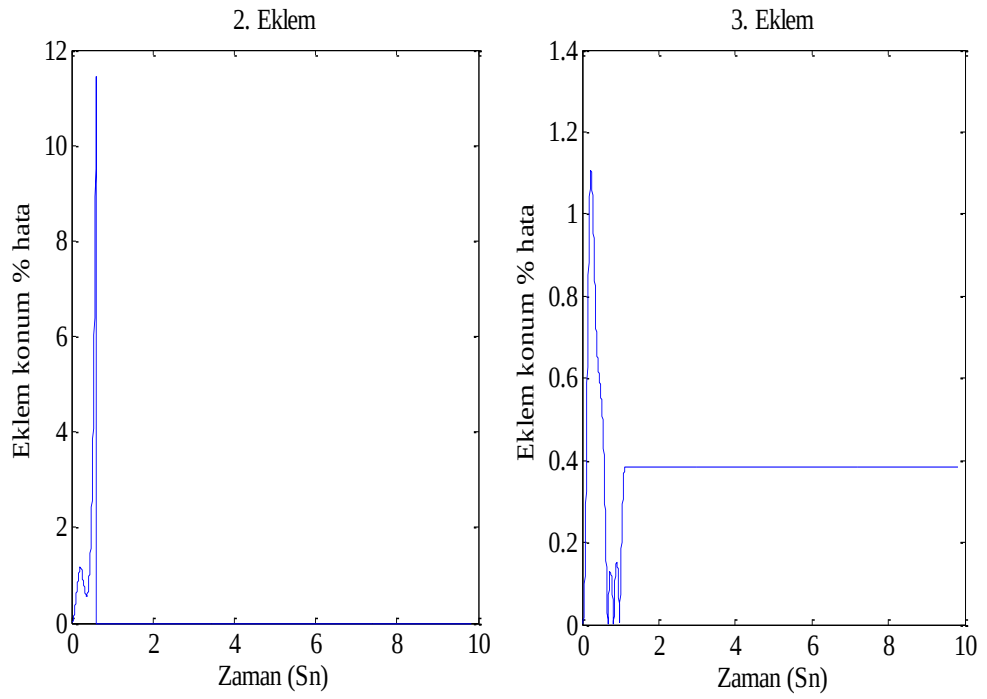


Şekil C 3.50 : 1. ve 2. eklemlerin tork grafikleri.

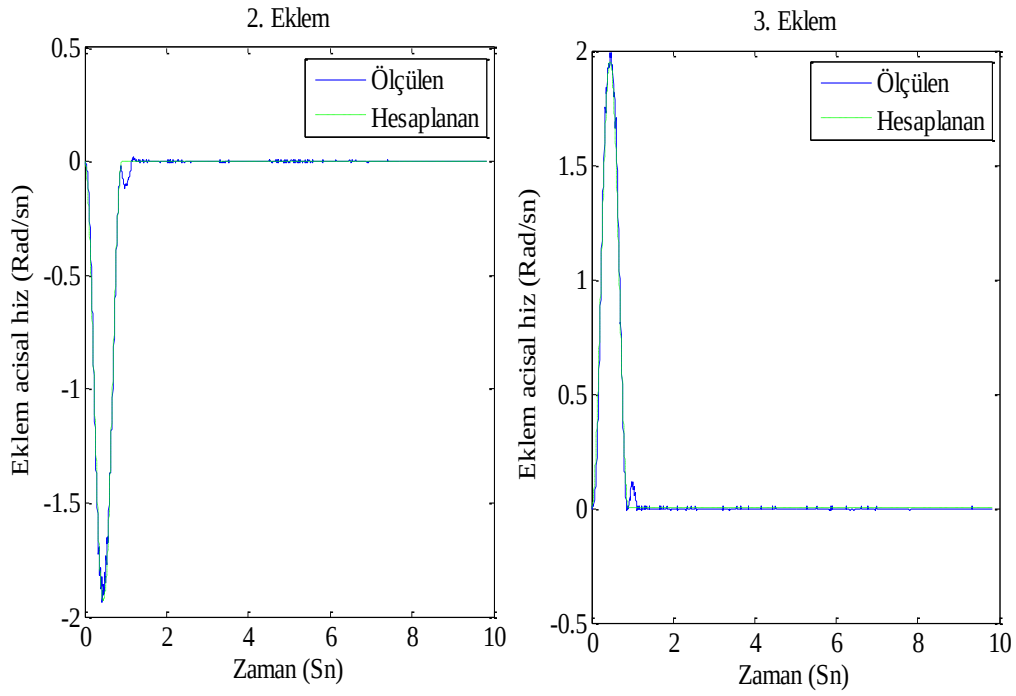
2. ve 3. eklemin 50 derece ve nominal hızının %100 ile hareket etmesiyle eklem açisal konum grafiği Şekil C 3.51’de gösterilmektedir. Bunu sırasıyla eklem konum % hata, eklem açisal hızı, eklem tork grafikleri takip etmektedir.



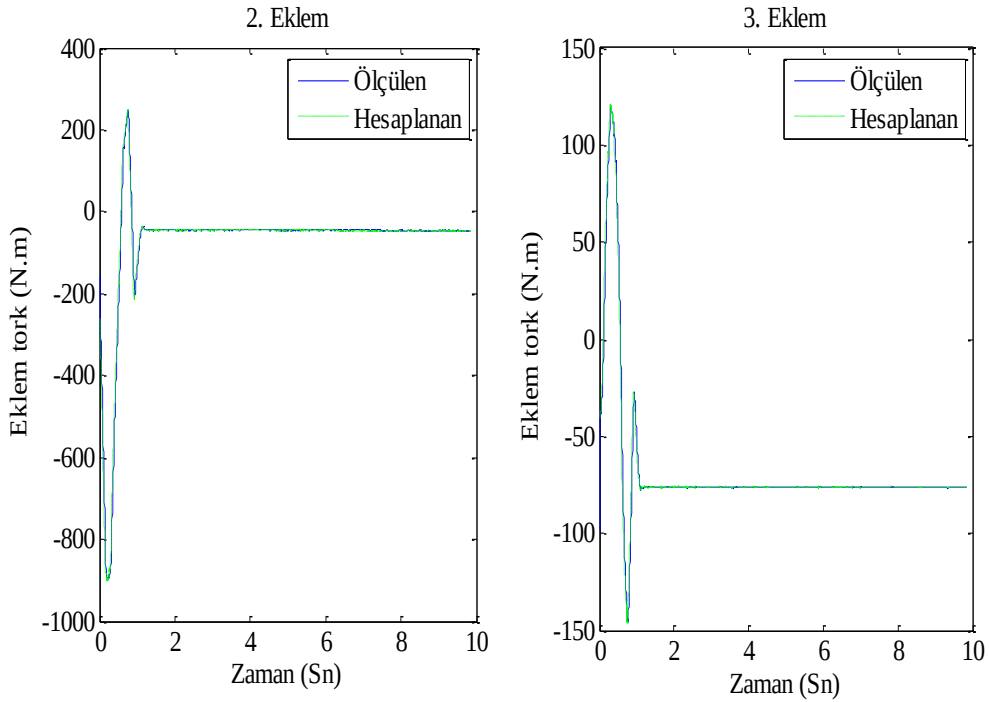
Şekil C 3.51 : 2. ve 3. eklemlerin açısai konum grafikleri.



Şekil C 3.52 : 2. ve 3. eklemlerin açısai konum % hata grafikleri.

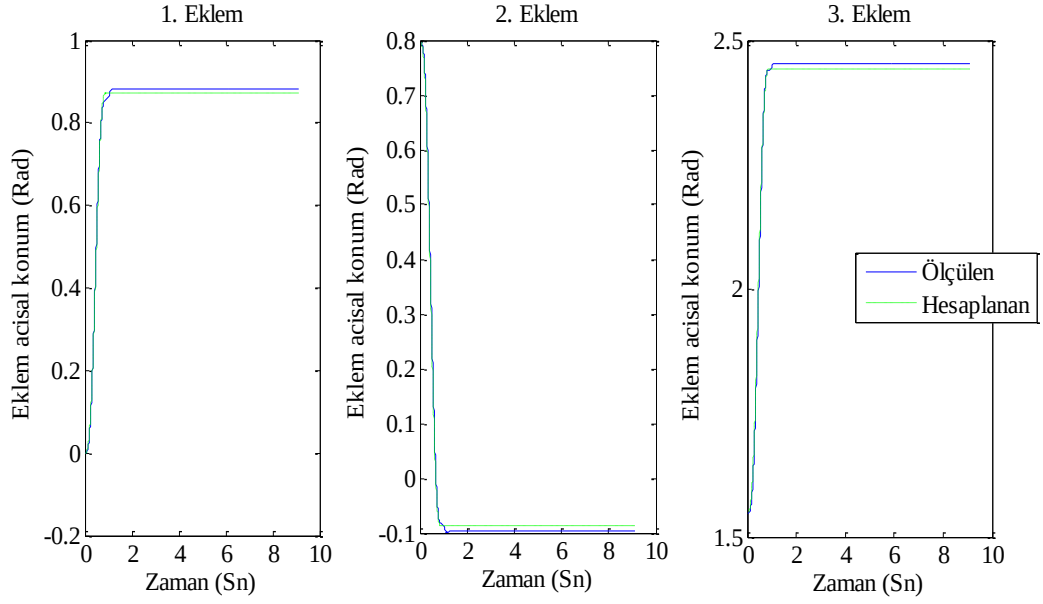


Şekil C 3.53 : 2. ve 3. eklemlerin açısız hız grafikleri.

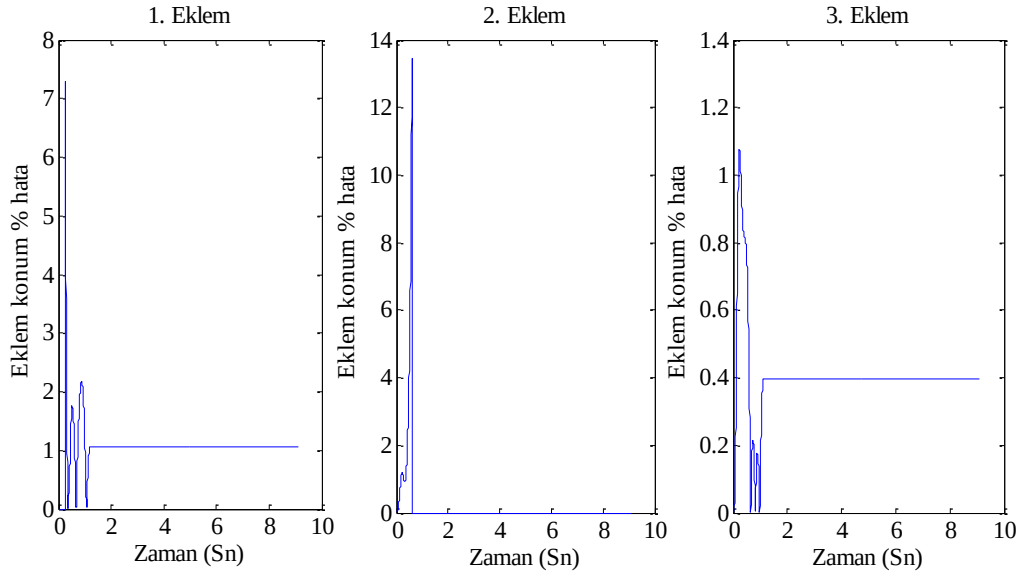


Şekil C 3.54 : 2. ve 3. eklemlerin tork grafikleri.

1., 2. ve 3. eklemin 50 derece ve nominal hızının %100 ile hareket etmesiyle eklem açısız konum grafiği Şekil C 3.55'de gösterilmektedir. Bunu sırasıyla eklem konum % hata, eklem açısız hızı, eklem tork grafikleri takip etmektedir.



Şekil C 3.55 : 1.,2. ve 3. eklemlerin açısai konum grafikleri.

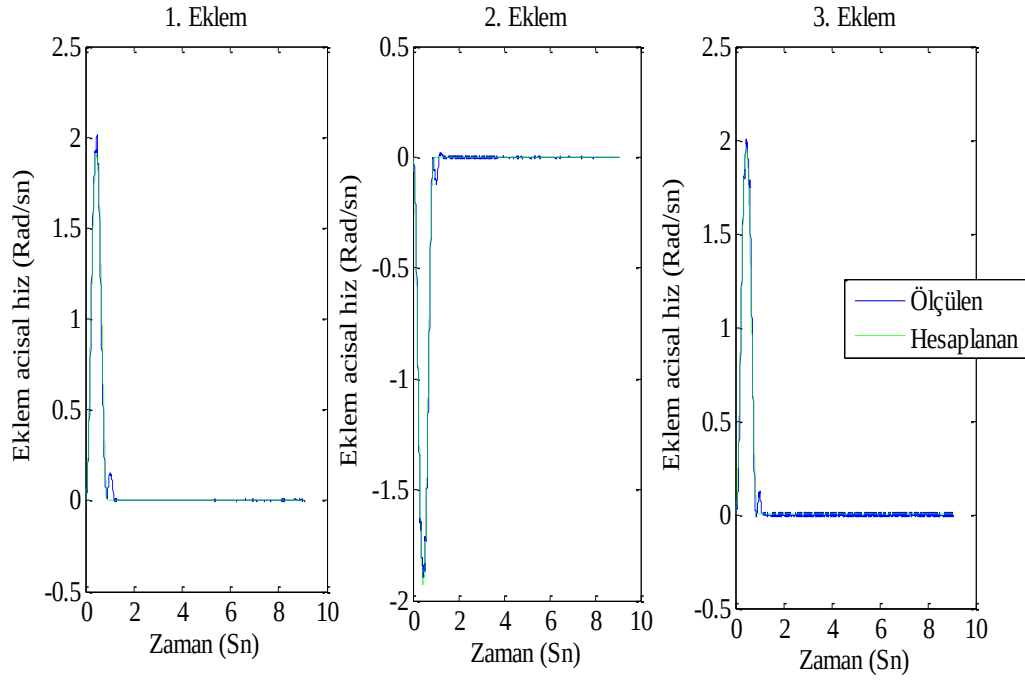


Şekil C 3.56 : 1., 2. ve 3. eklemlerin açısai konum % hata grafikleri.

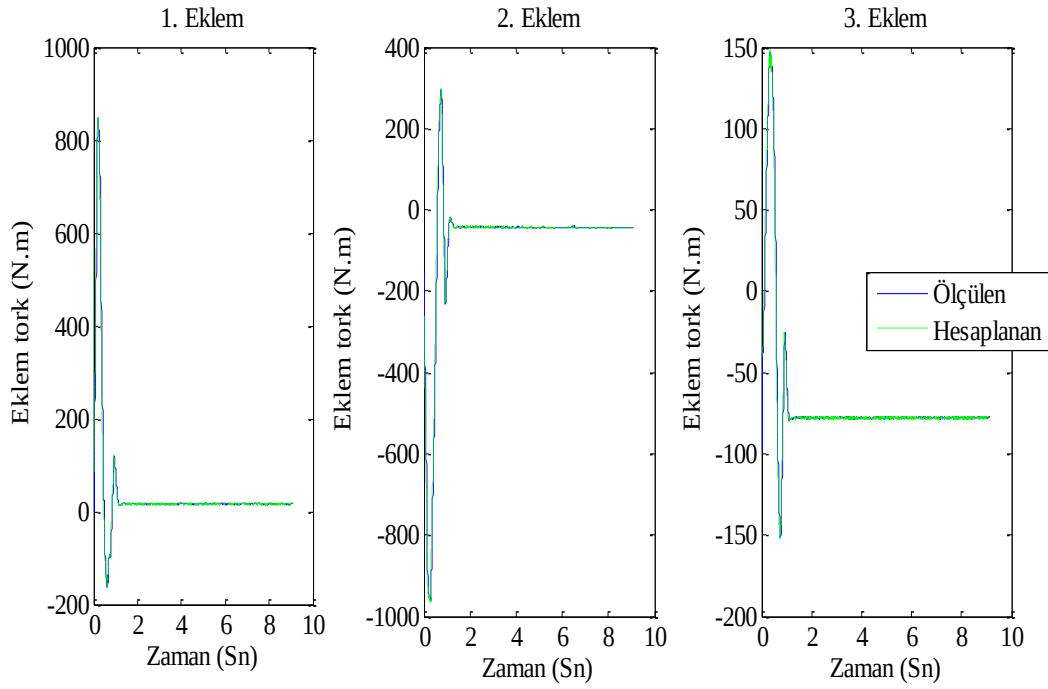
Eklem uzayında yörünge planlamasıyla tüm eklemlerin nominal hızının %100 ile hareket etmesiyle eklem açısai konum grafiğı Şekil C 3.59'de gösterilmektedir. Bunu sırasıyla eklem konum % hata, eklem açısai hızı, eklem tork grafikleri takip etmektedir.

EK D1 İki nokta arasındaki hareket sonuçları

Görev uzayında yörünge planlamasıyla uç nokta maksimum hızının %60 ve %100'ü ile hareket etmektedir.Şekil D 1.1 ila Şekil D 1.12 arasında grafikler verilmektedir.



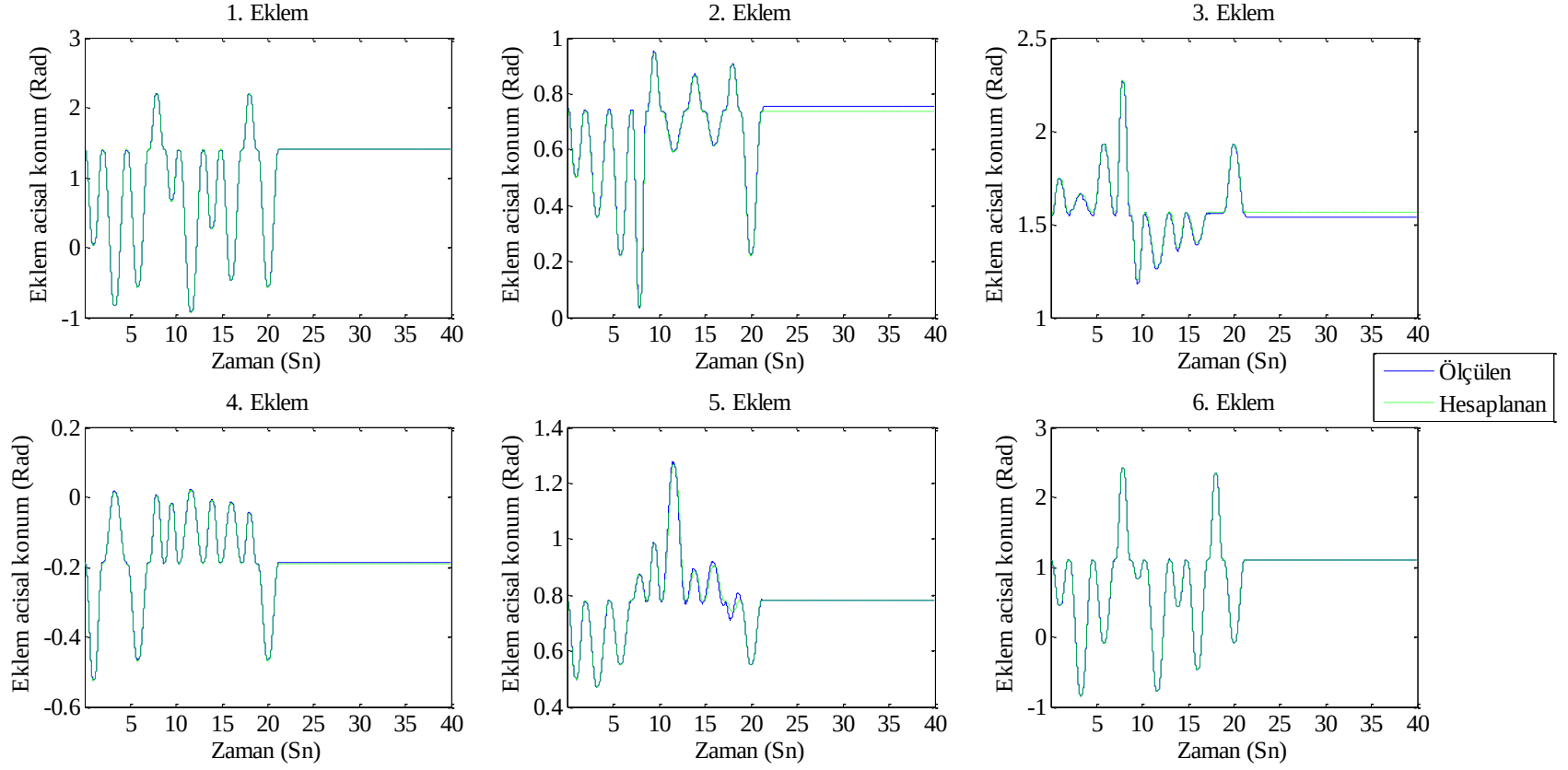
Şekil C 3.57 : 1., 2. ve 3. eklemlerin açısal hız grafikleri.



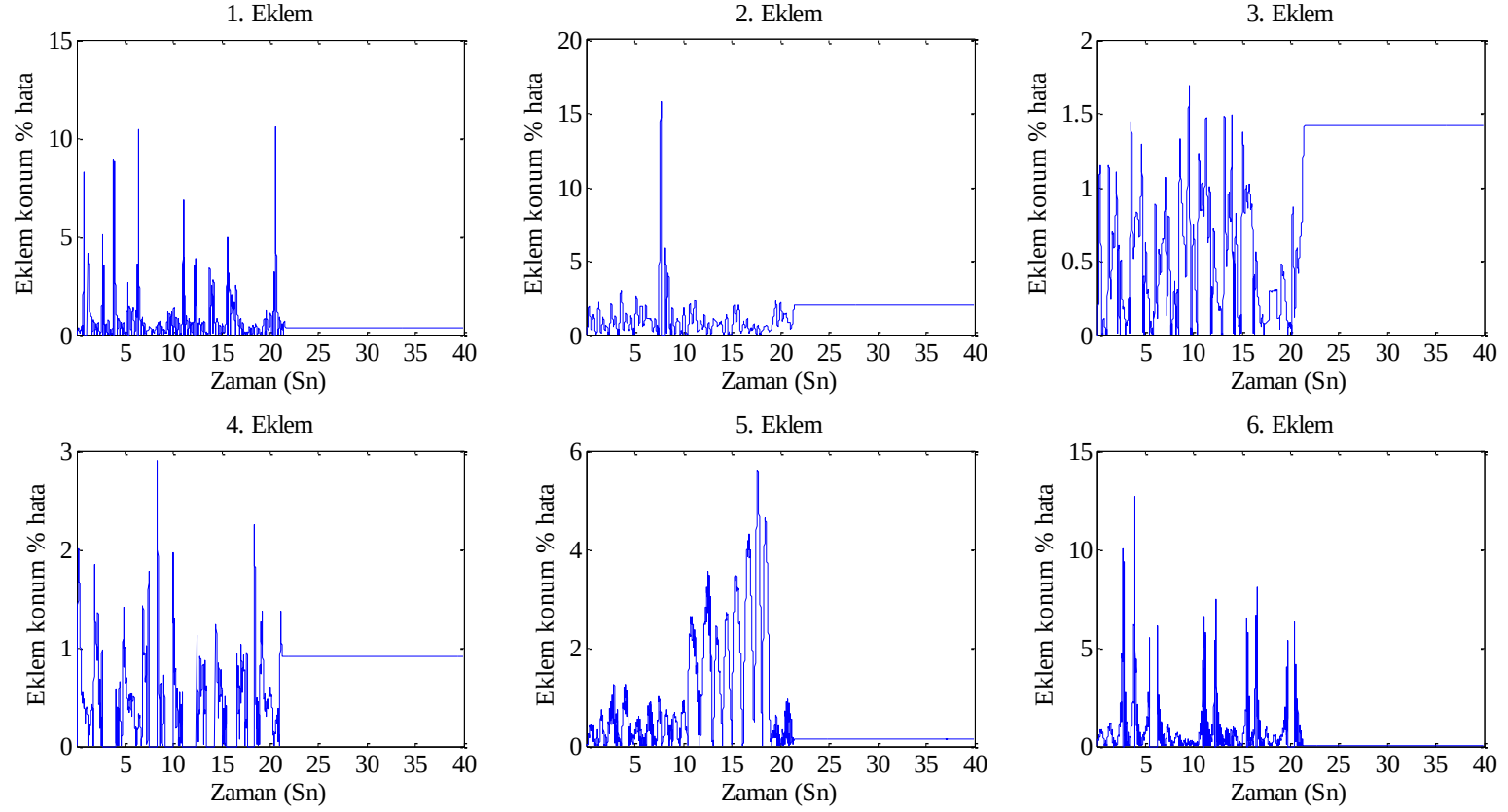
Şekil C 3.58 : 1., 2. ve 3. eklemlerin tork grafikleri.

EK D2 Değişken yükleme durumunda hareket sonuçları

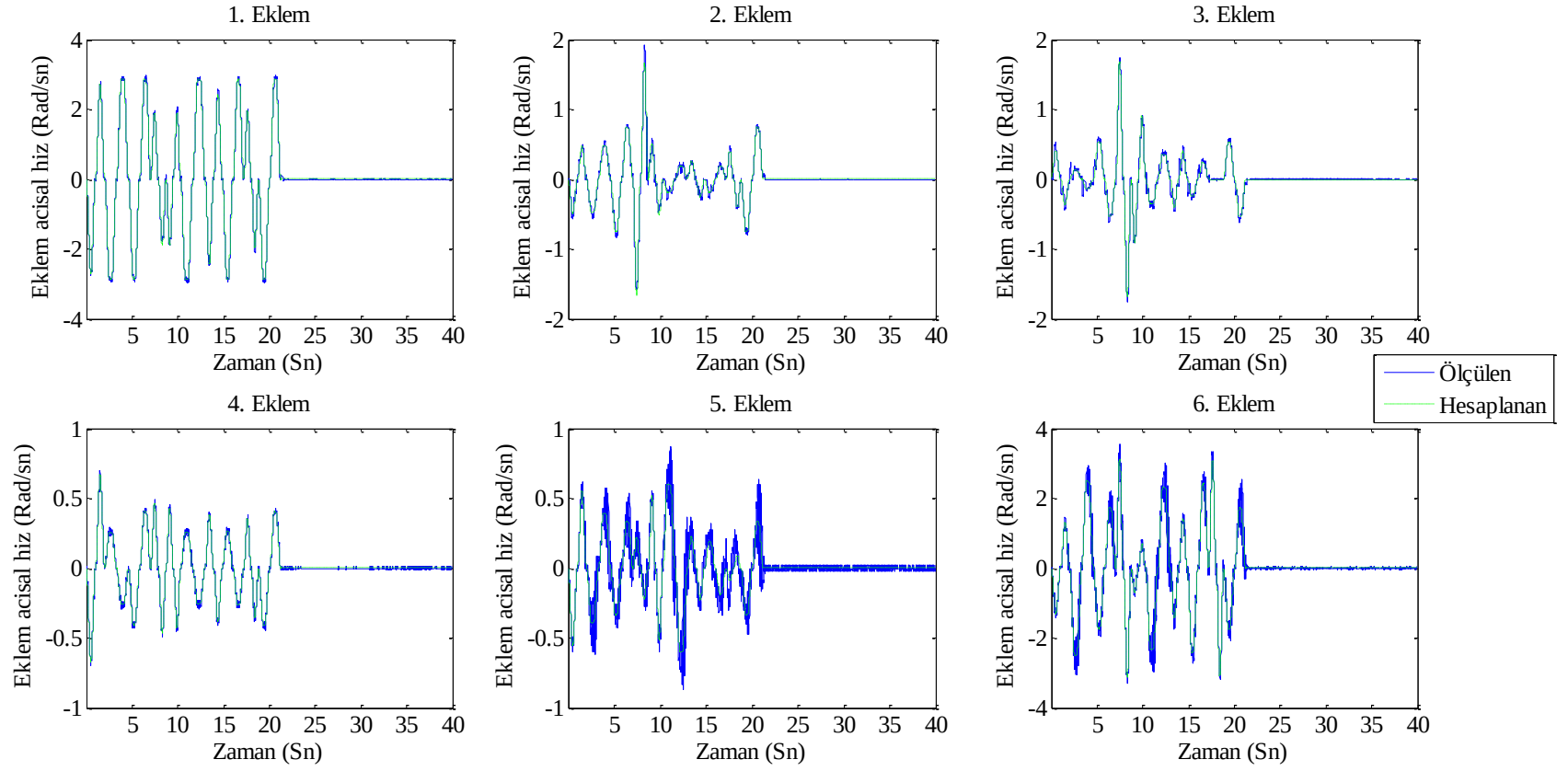
Manipülör, 2 kg ve 5kg ağırlığındaki iş parçalarıyla manipülör uç noktasının tespit edilen maksimum hızının %30, %60 ve %100 hızda hareket etmektedir.



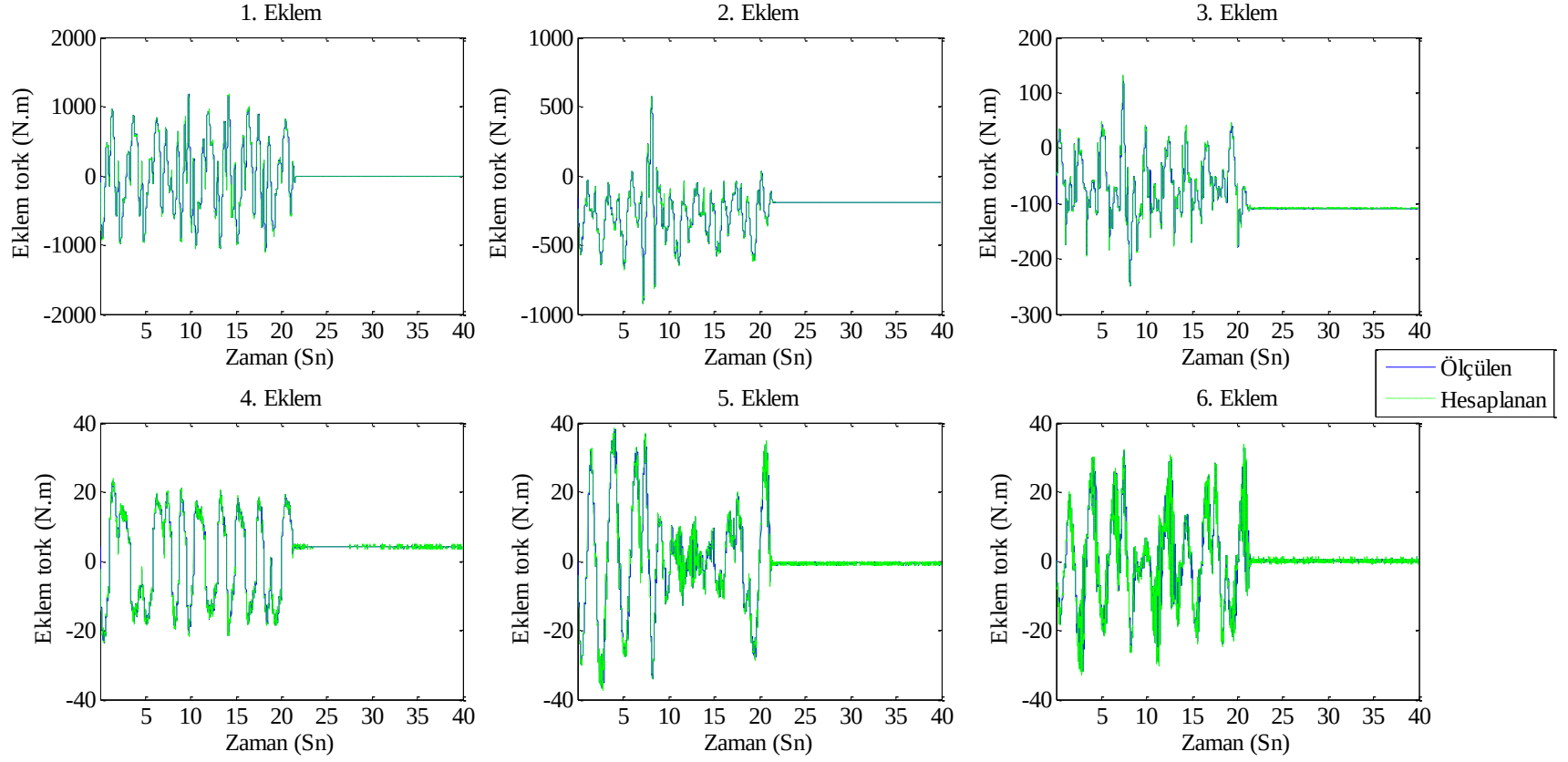
Şekil C 3.59 : Tüm eklemlerin açisal konum grafikleri.



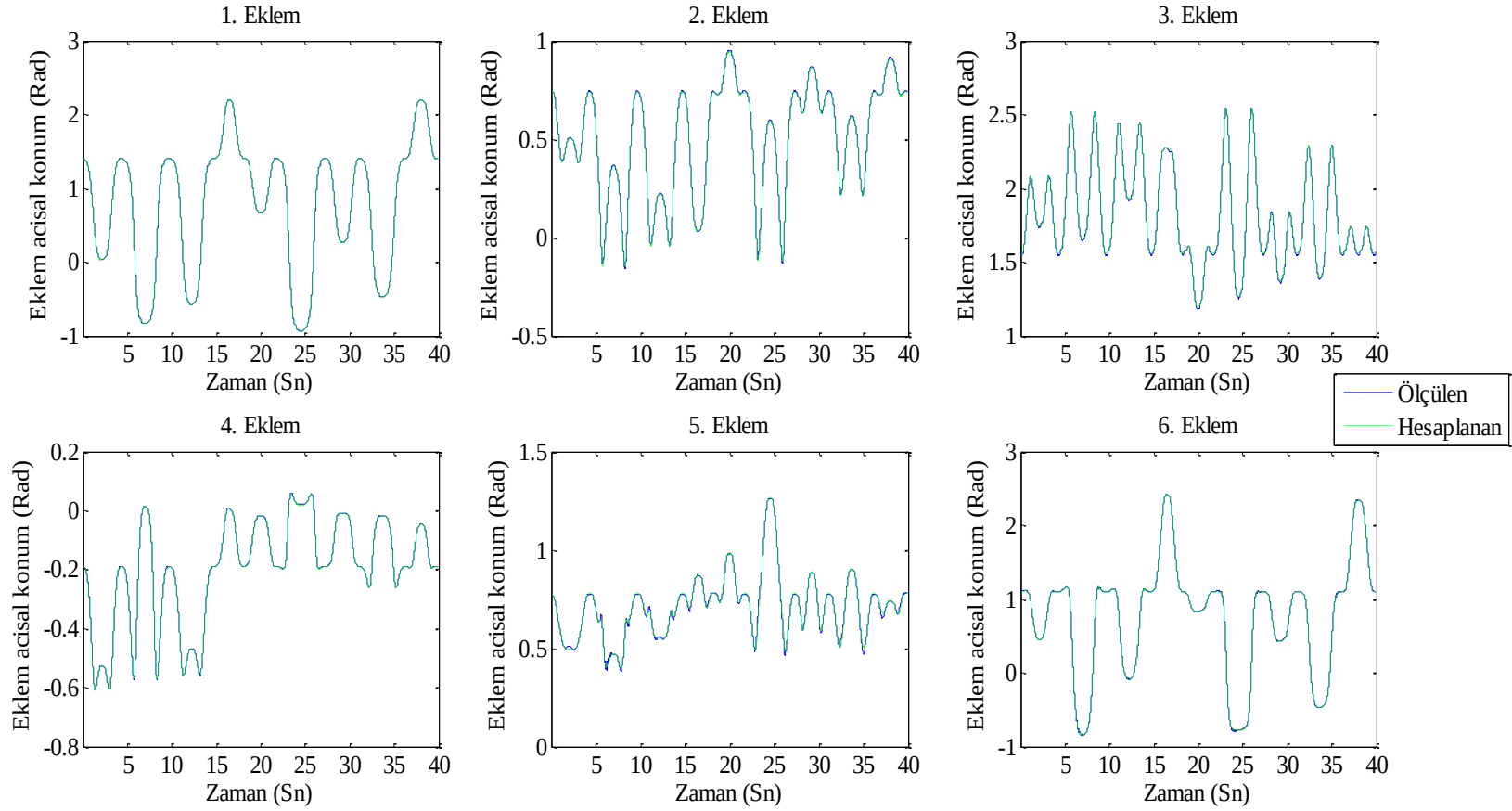
Şekil C 3.60 : Tüm eklemelerin açısal konum % hata grafikleri.



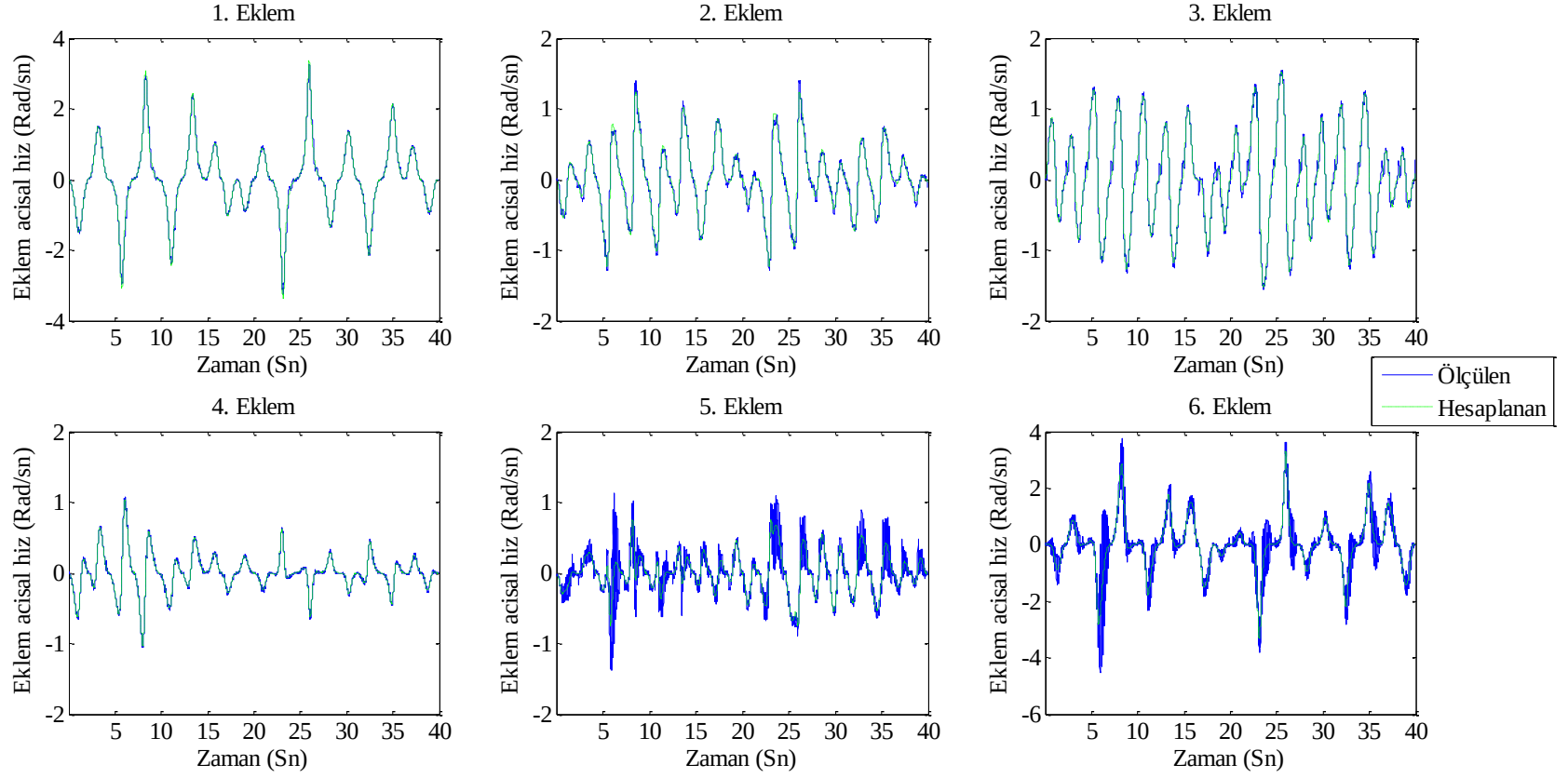
Şekil C 3.61 : Tüm eklemlerin açisal hız grafikleri.



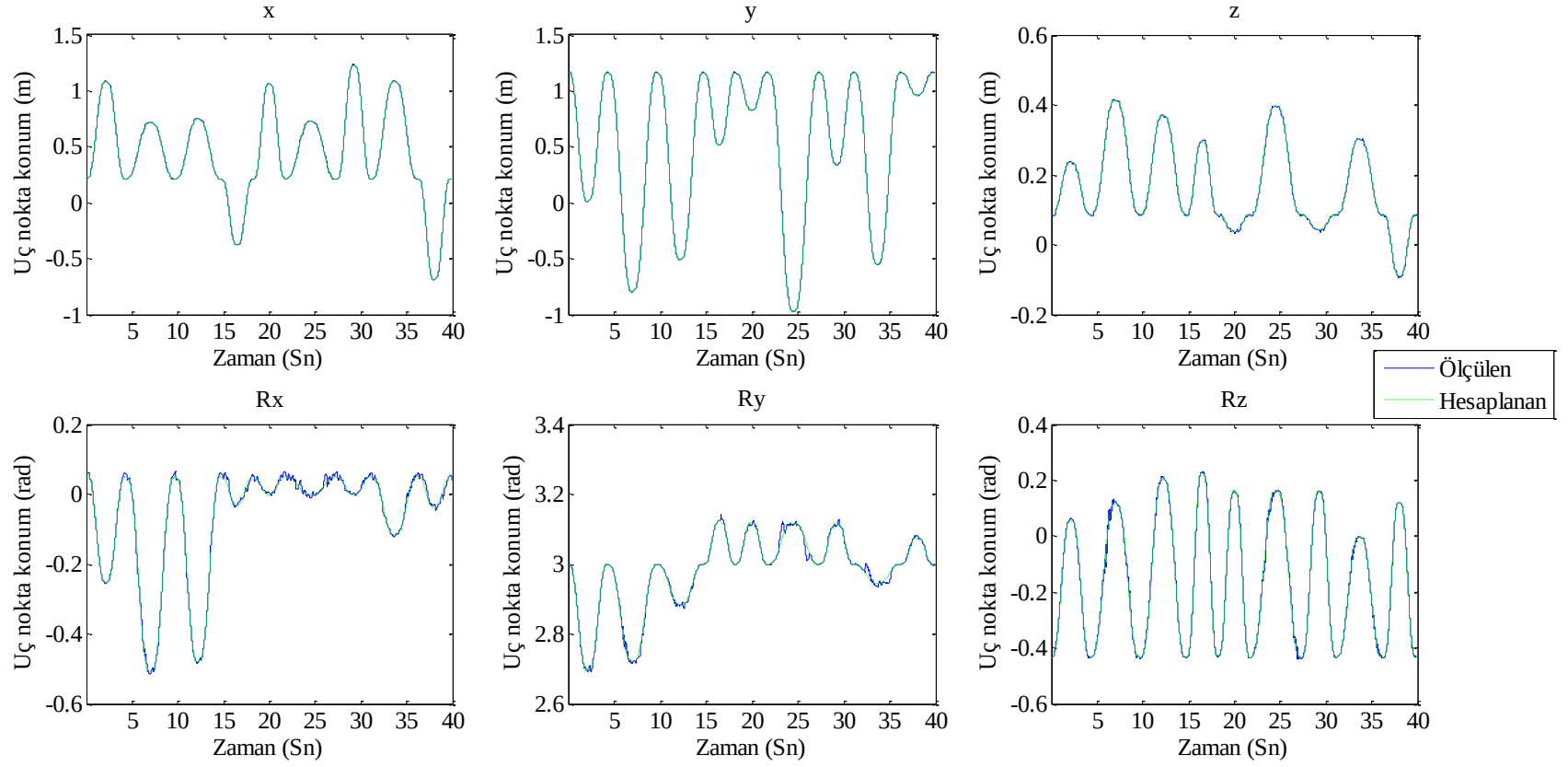
Şekil C 3.62 : Tüm eklemlerin tork grafikleri.



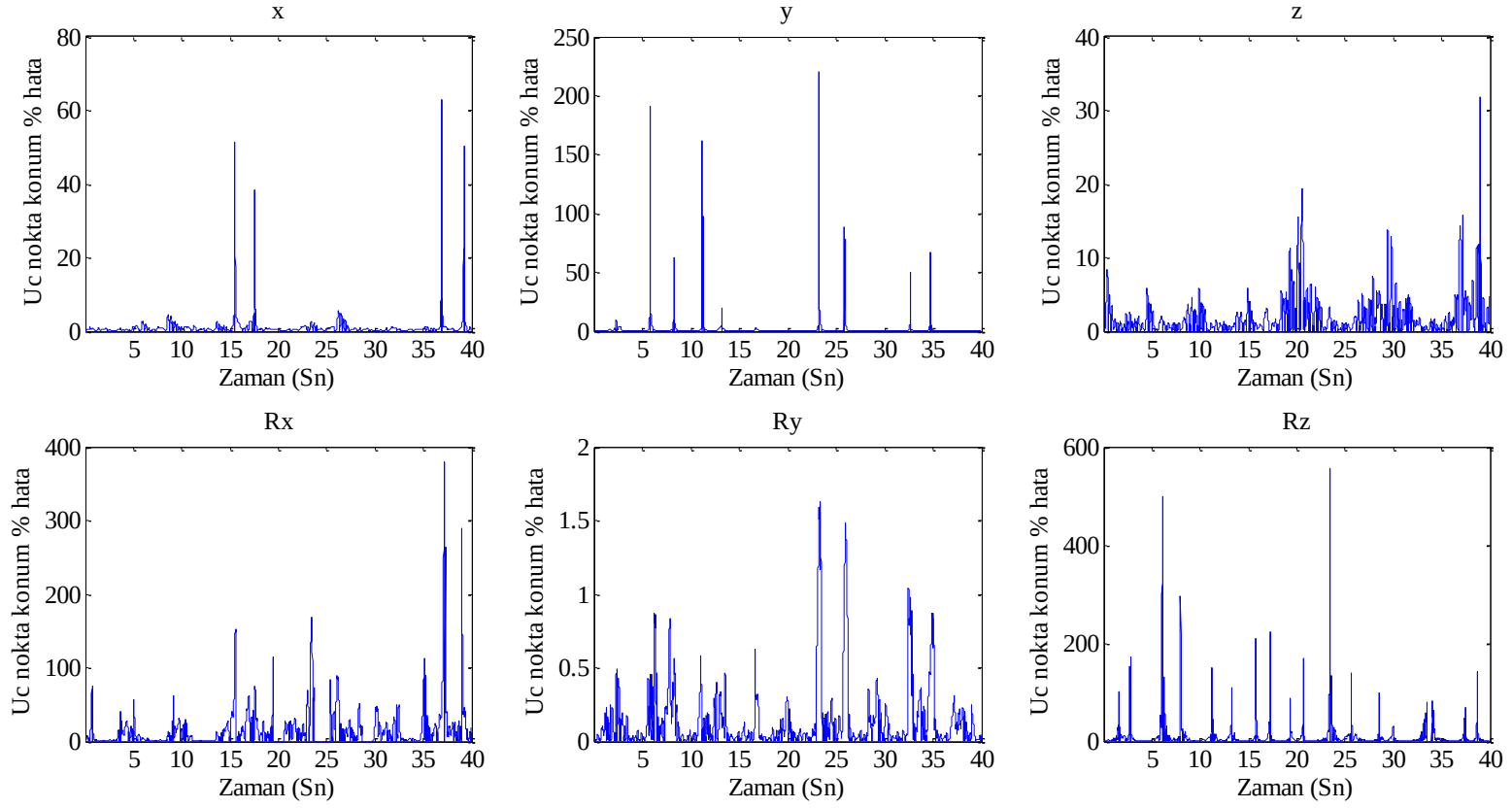
Şekil C 3.63 : Tüm eklemlerin açisal konum grafikleri.



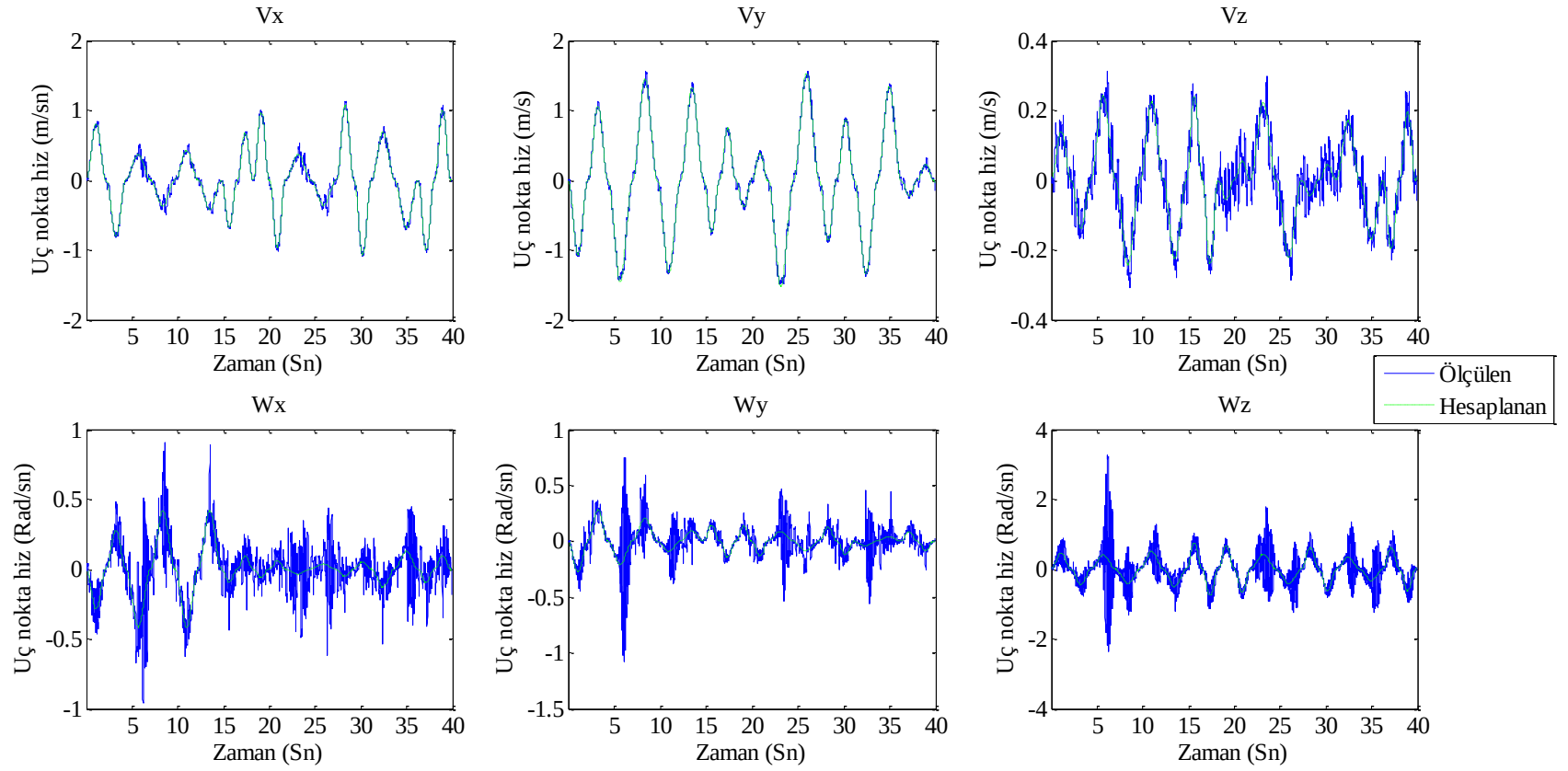
Şekil C 3.64 : Tüm eklemlerin açısal hız grafikleri.



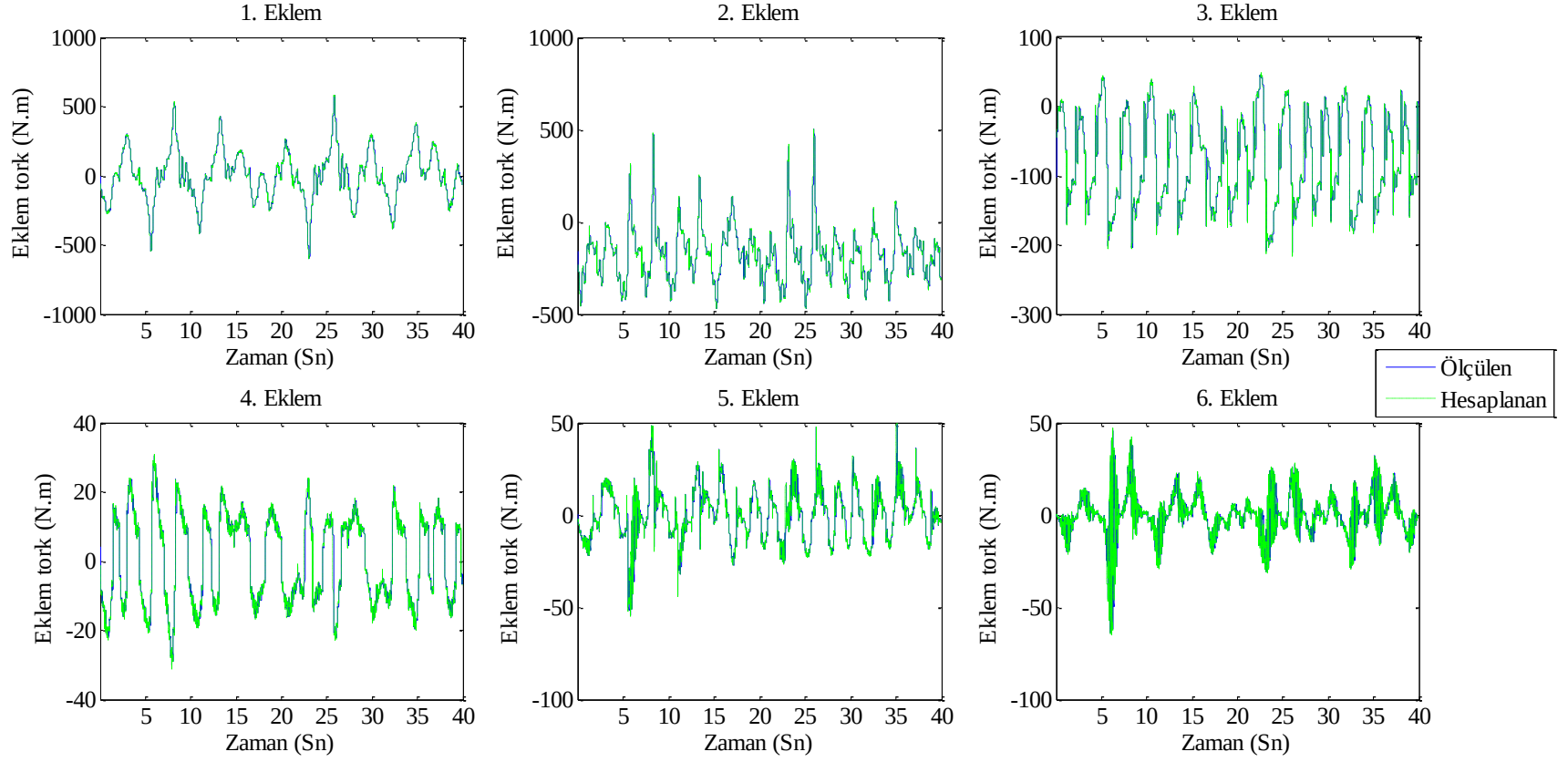
Şekil C 3.65 : Uç nokta konum grafikleri.



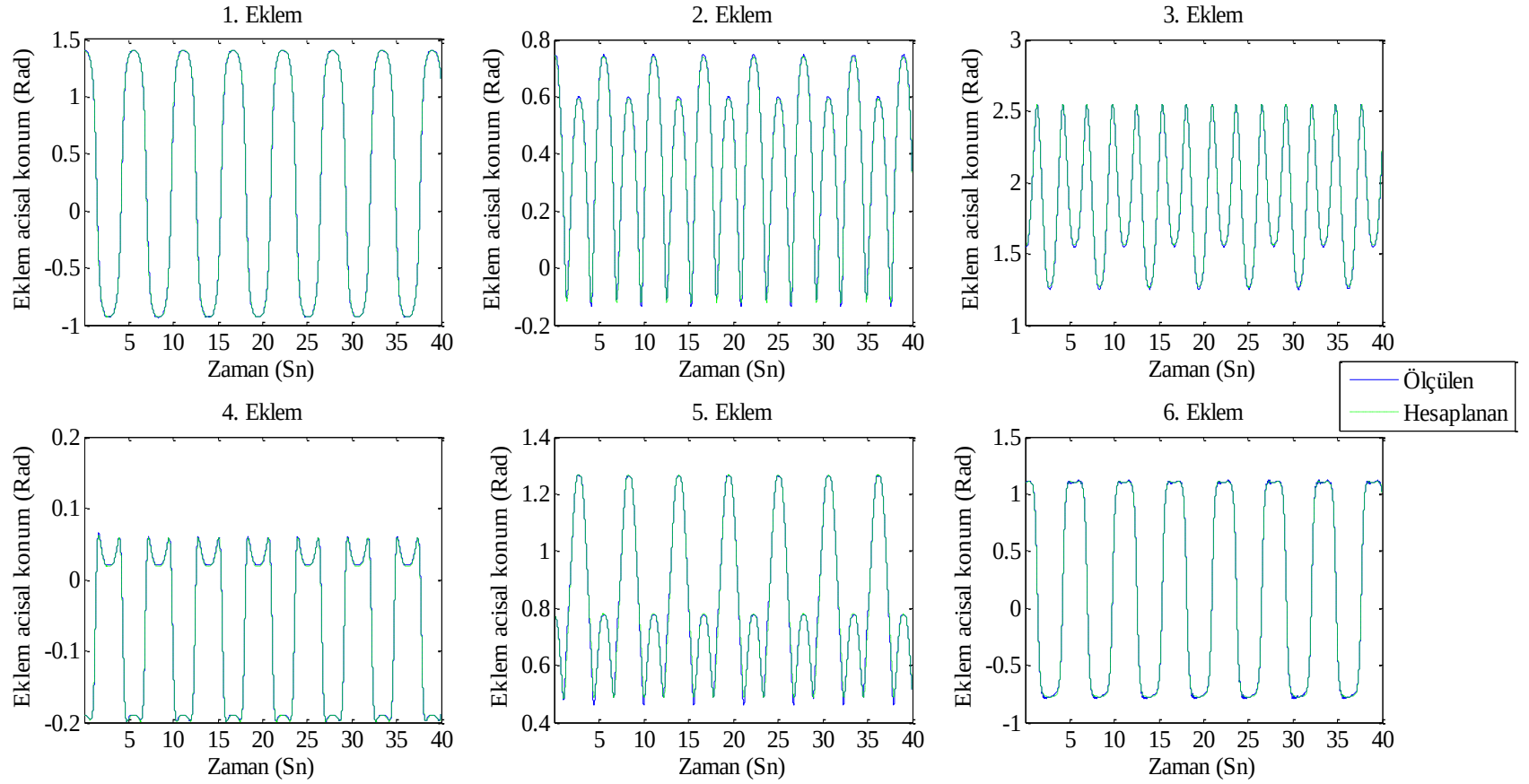
Şekil C 3.66 : Uç nokta konum % hata grafikleri.



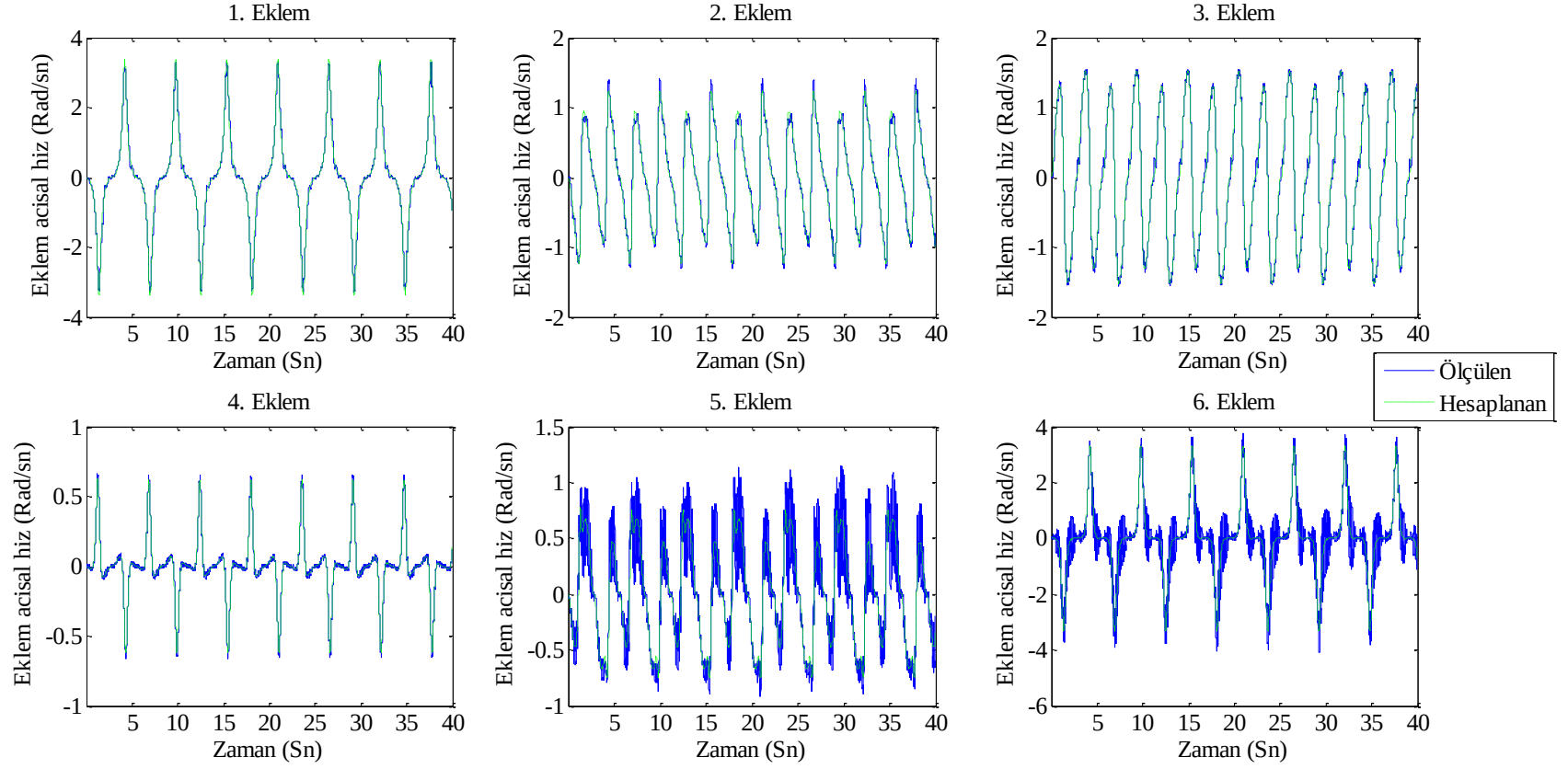
Şekil C 3.67 : Uç nokta hız grafikleri.



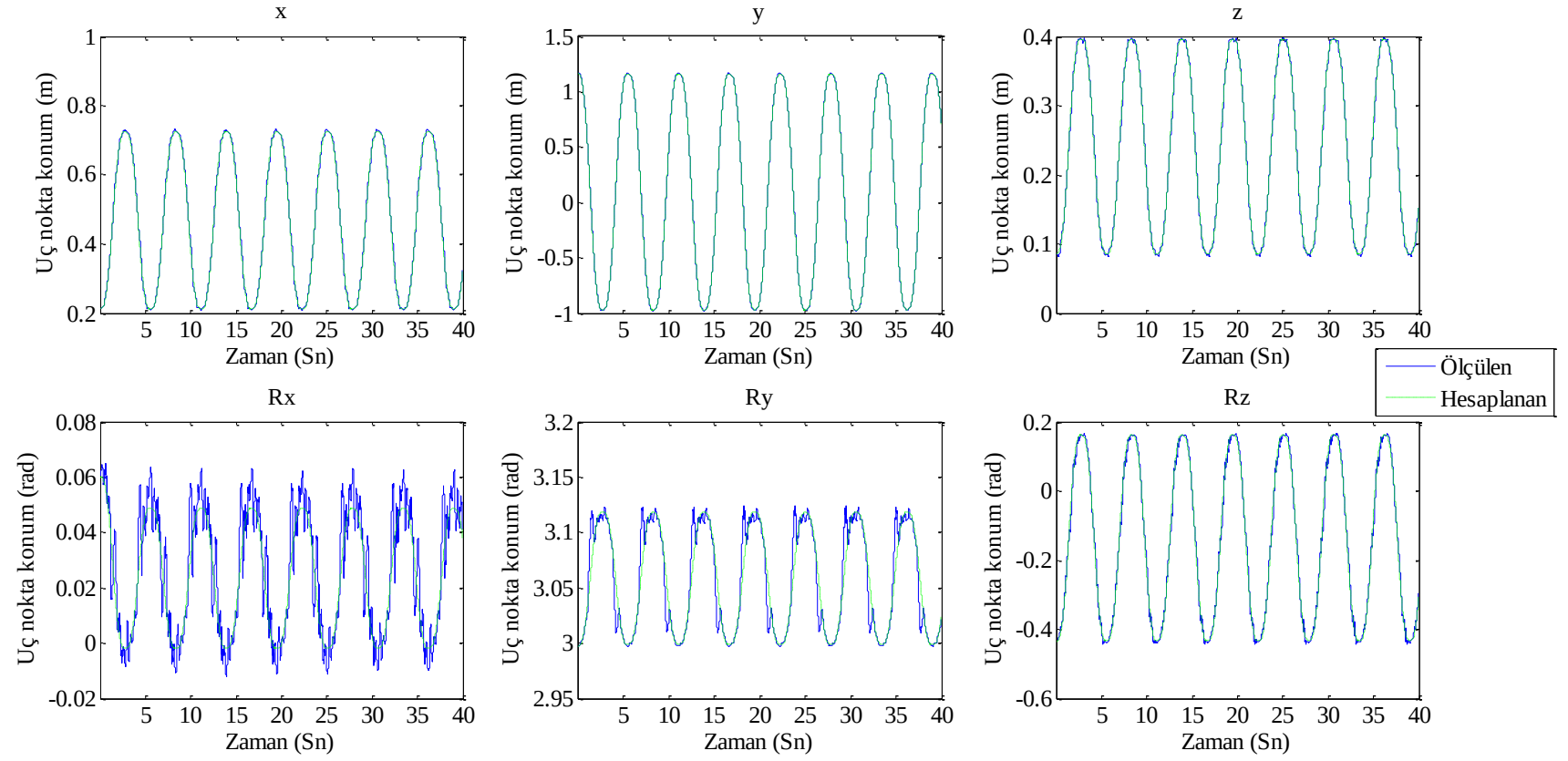
Şekil C 3.68 : Tüm eklemlerin tork grafikleri.



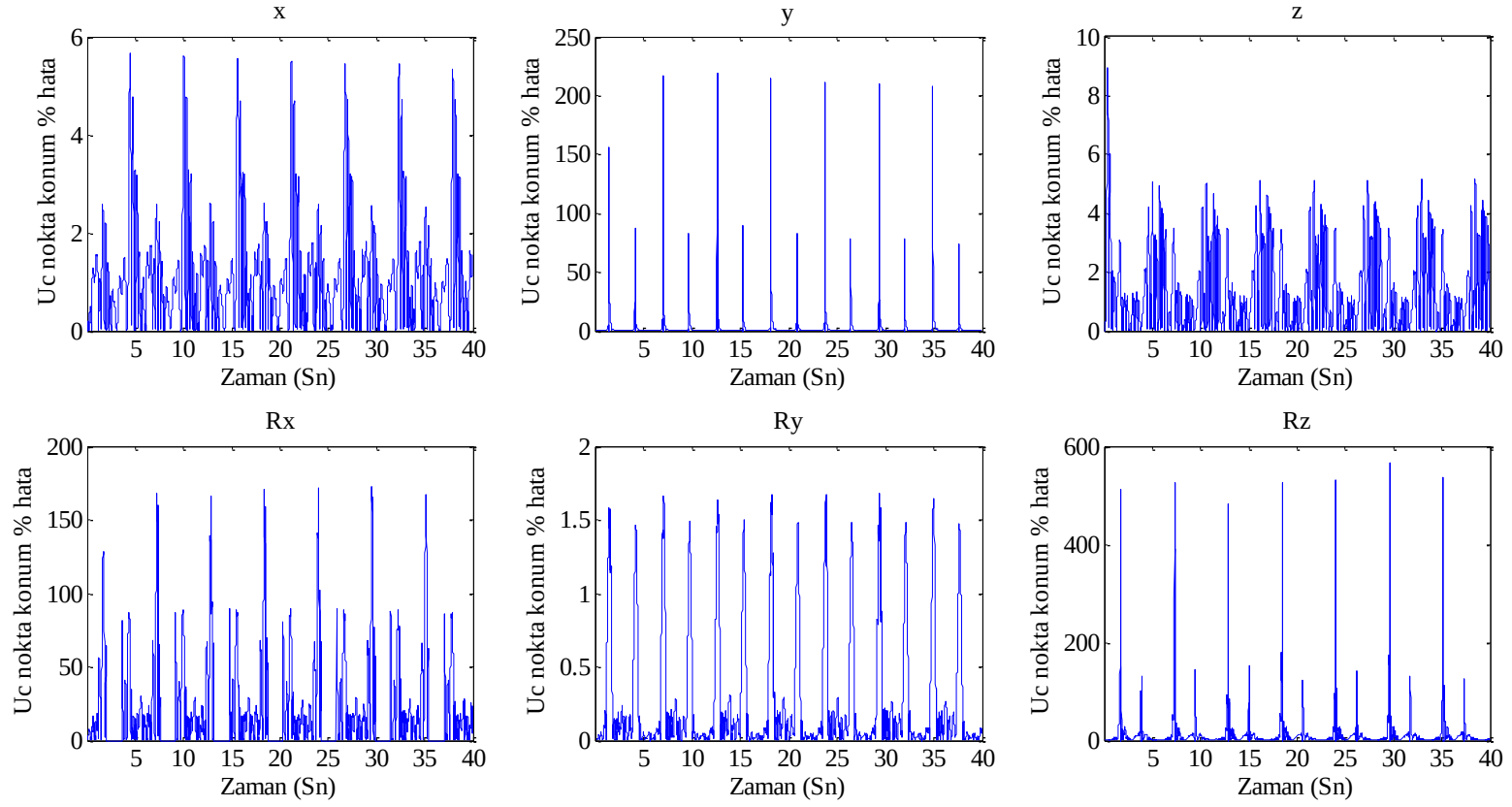
Şekil D 1.1 : Tüm eklemlerin açısai konum grafikleri(%30).



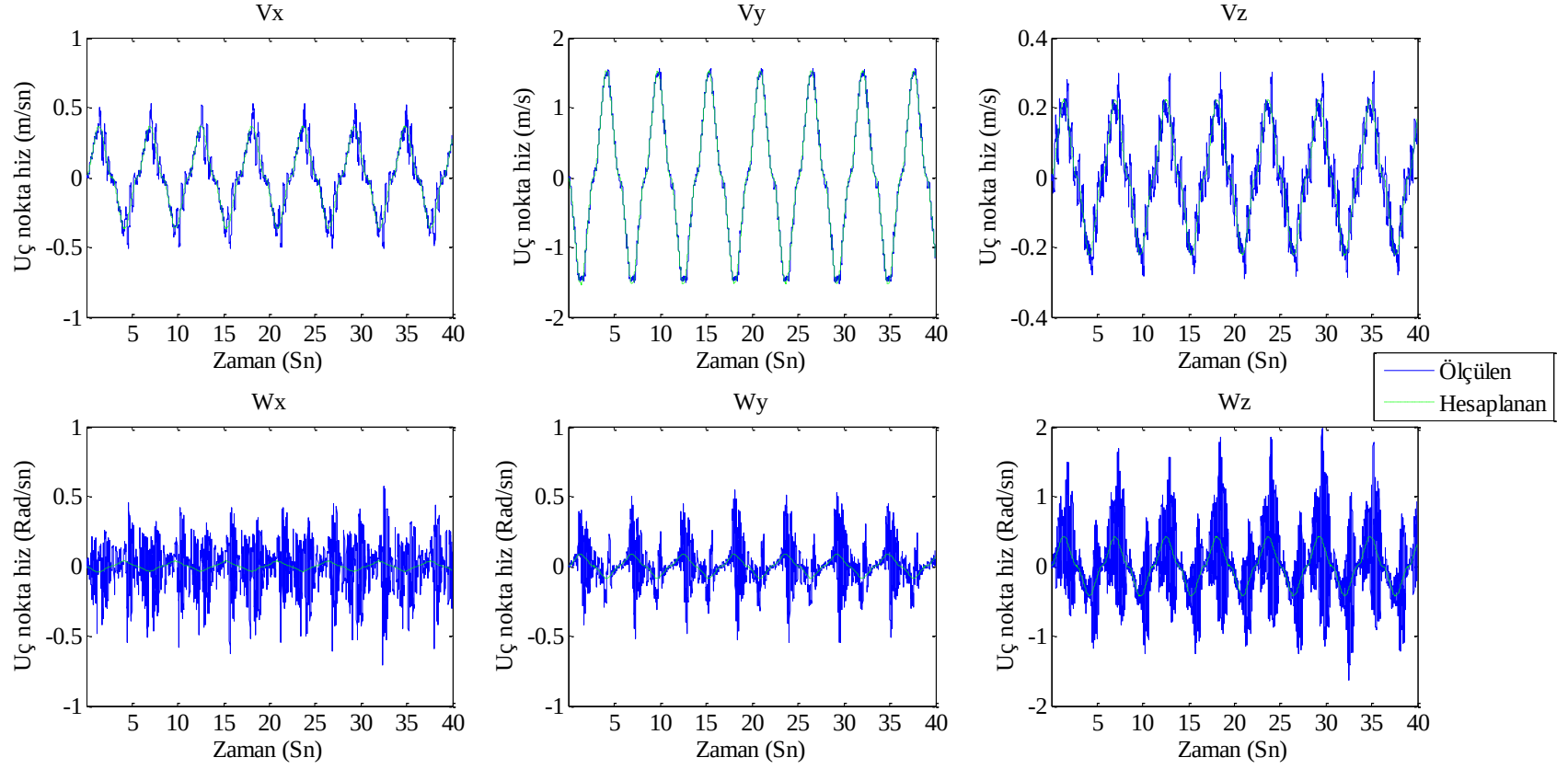
Şekil D 1.2 : Tüm eklemlerin açısal hız grafikleri(%30).



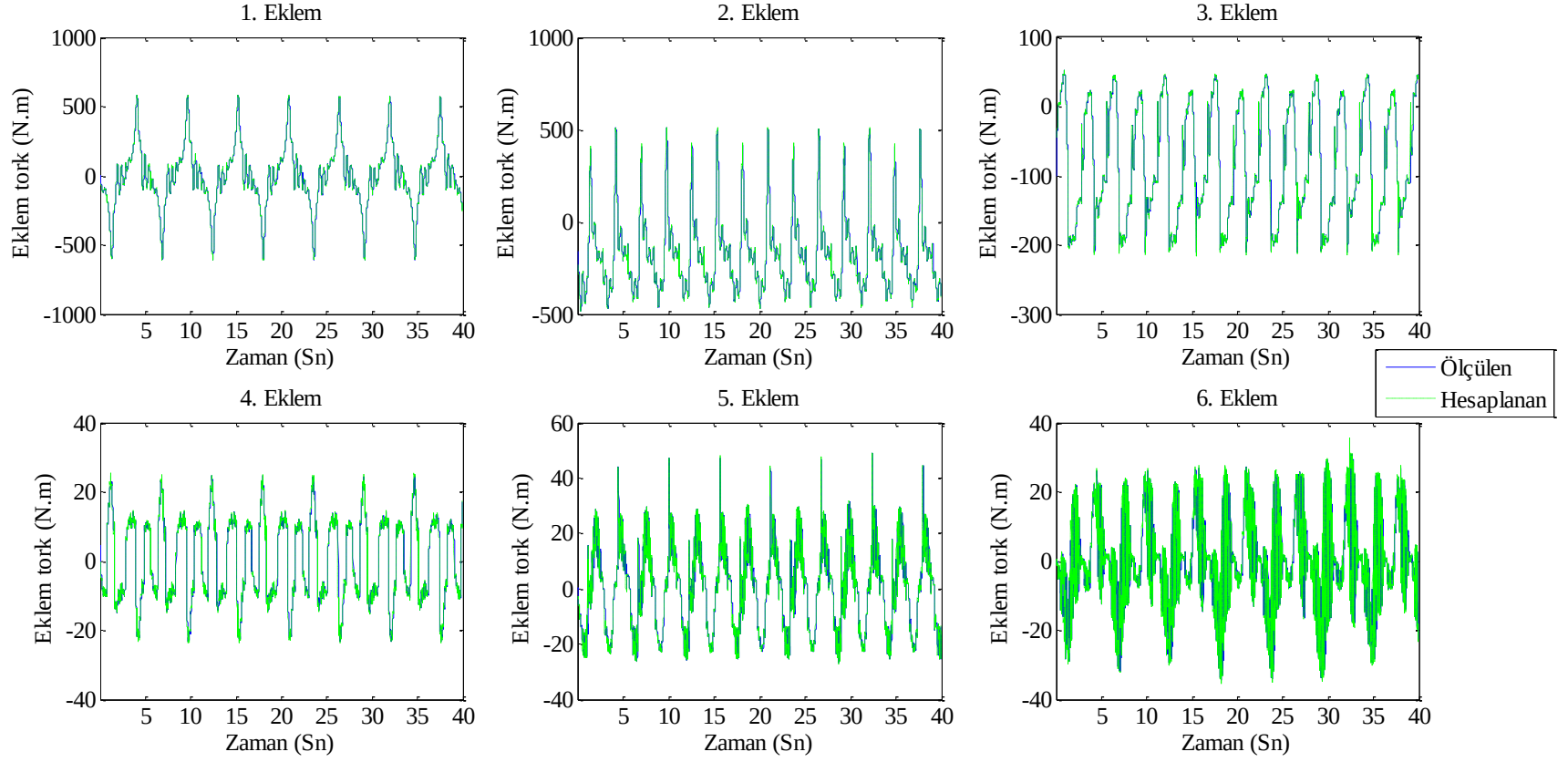
Şekil D 1.3 : Uç nokta konum grafikleri(%30).



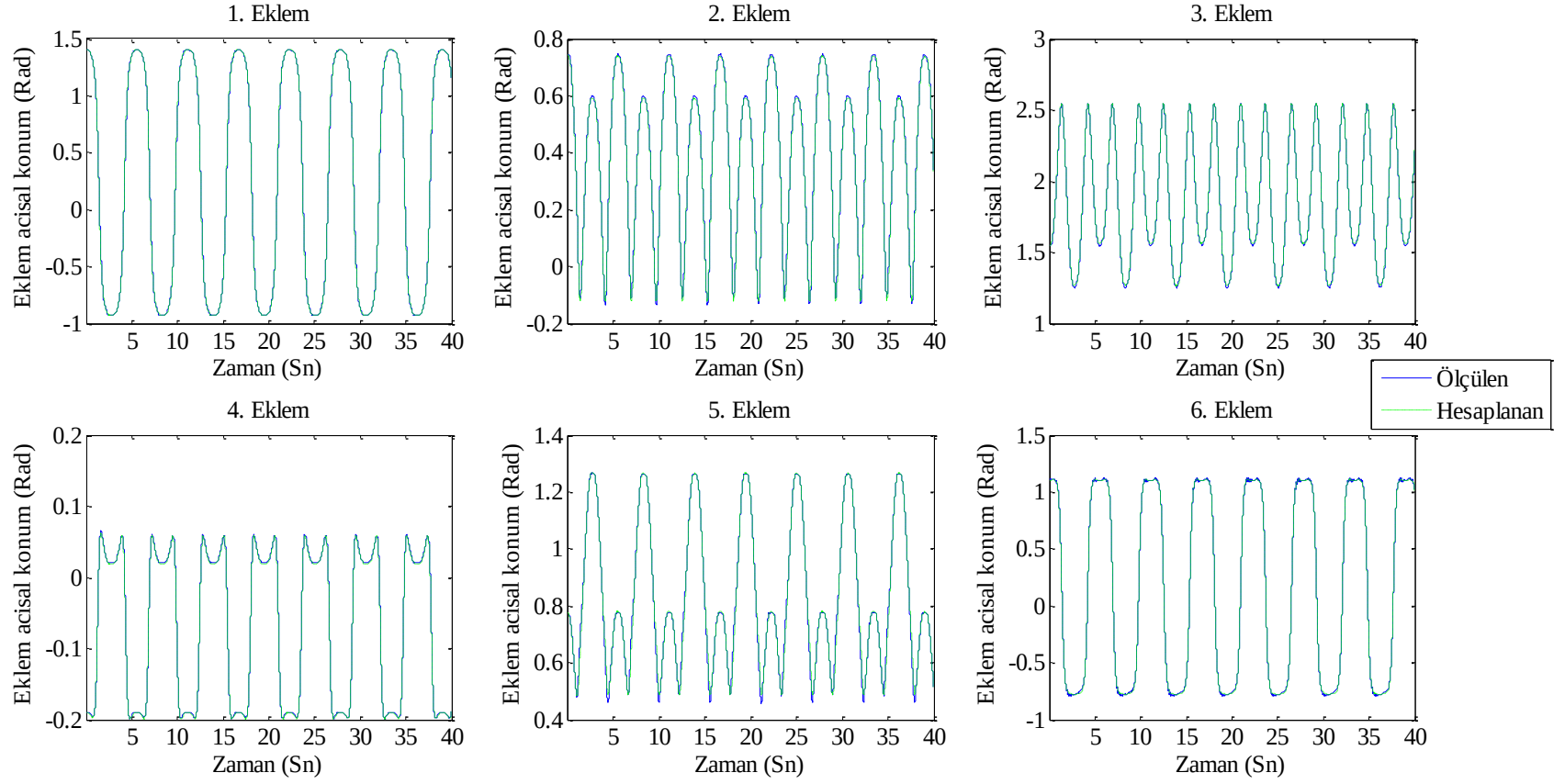
Şekil D 1.4 : Uç nokta konum % hata grafikleri(%30).



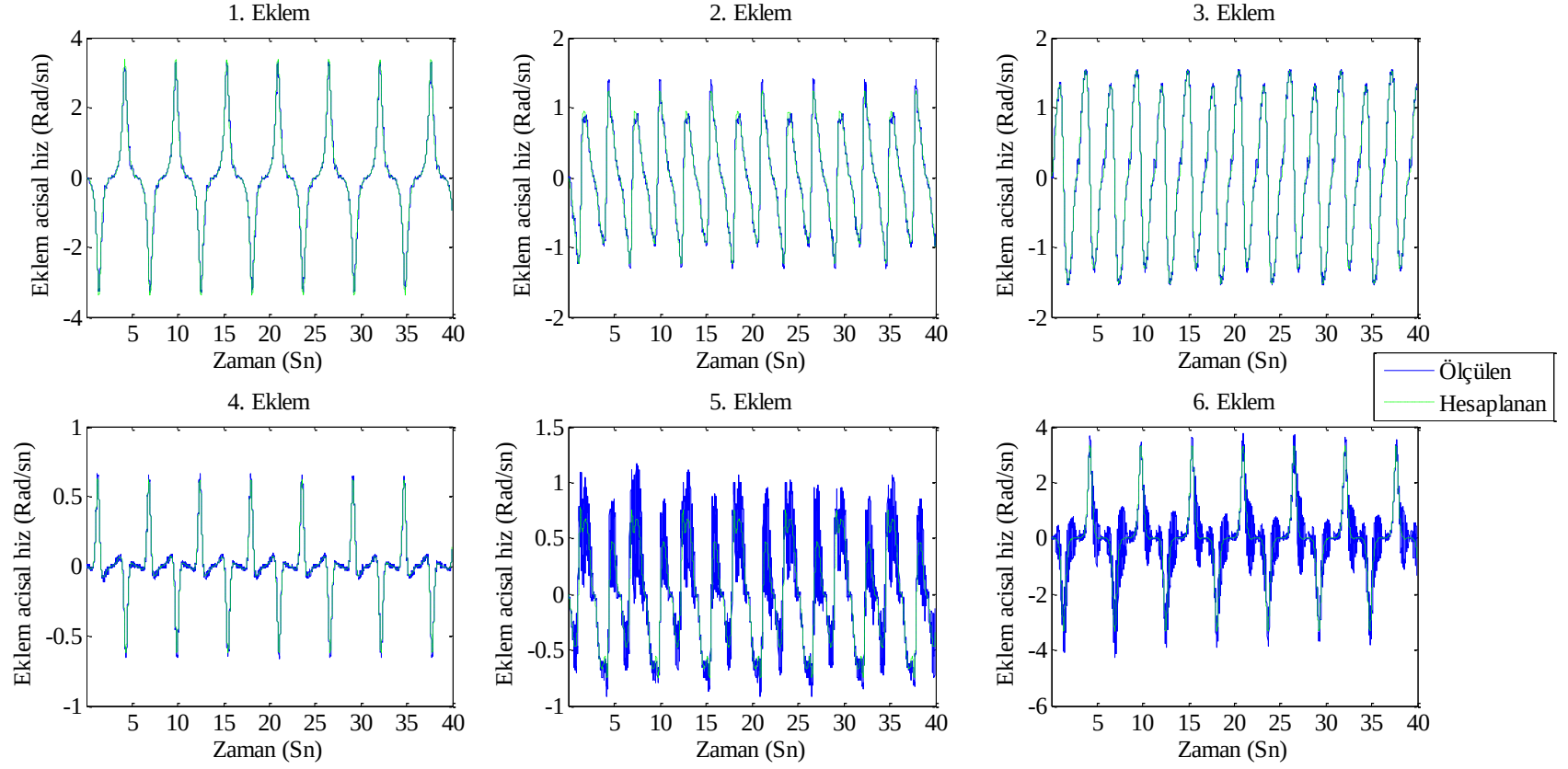
Şekil D 1.5 : Uç nokta hız grafikleri(%30).



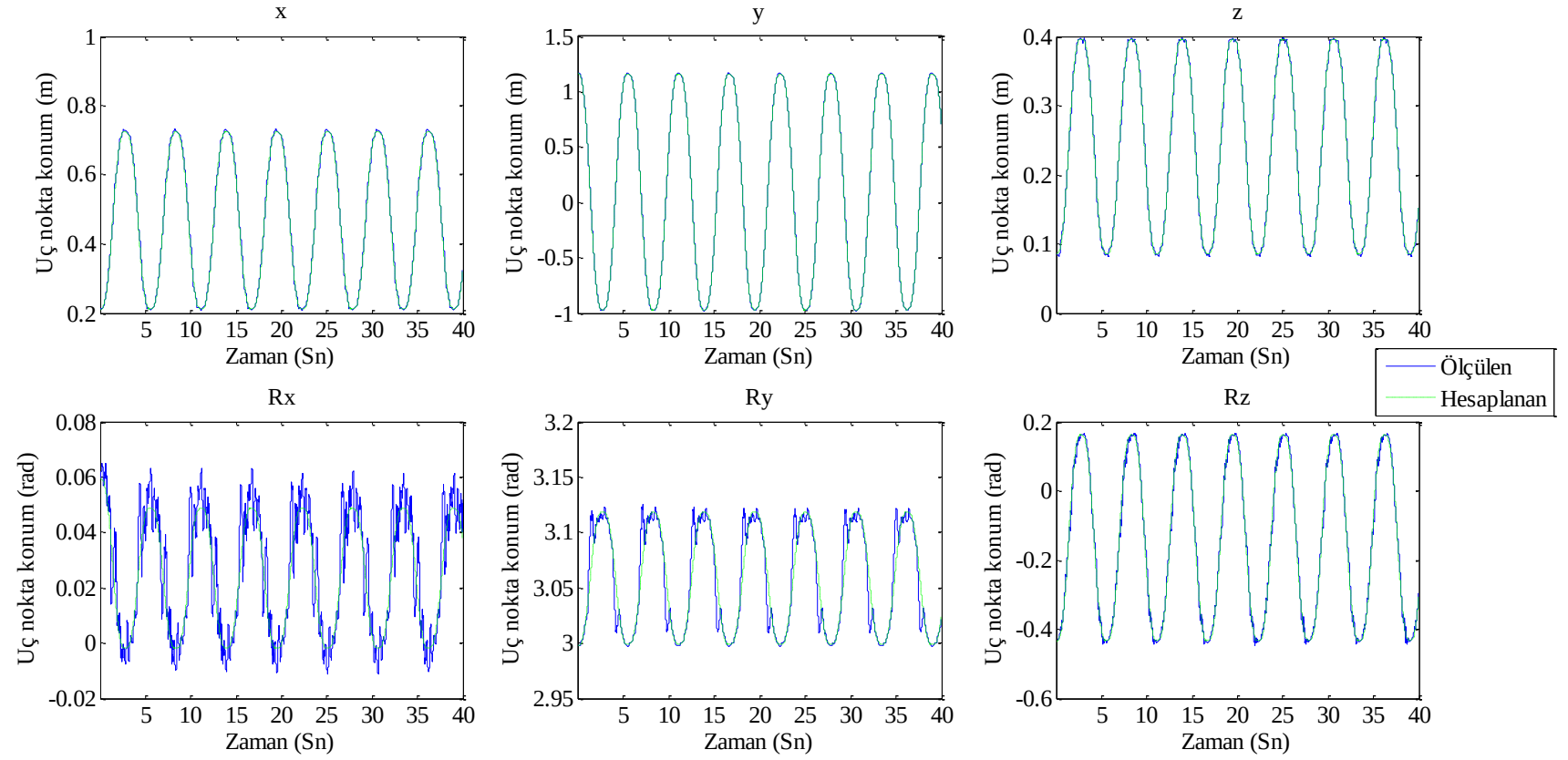
Şekil D 1.6 : Tüm eklemlerin tork grafikleri(%30).



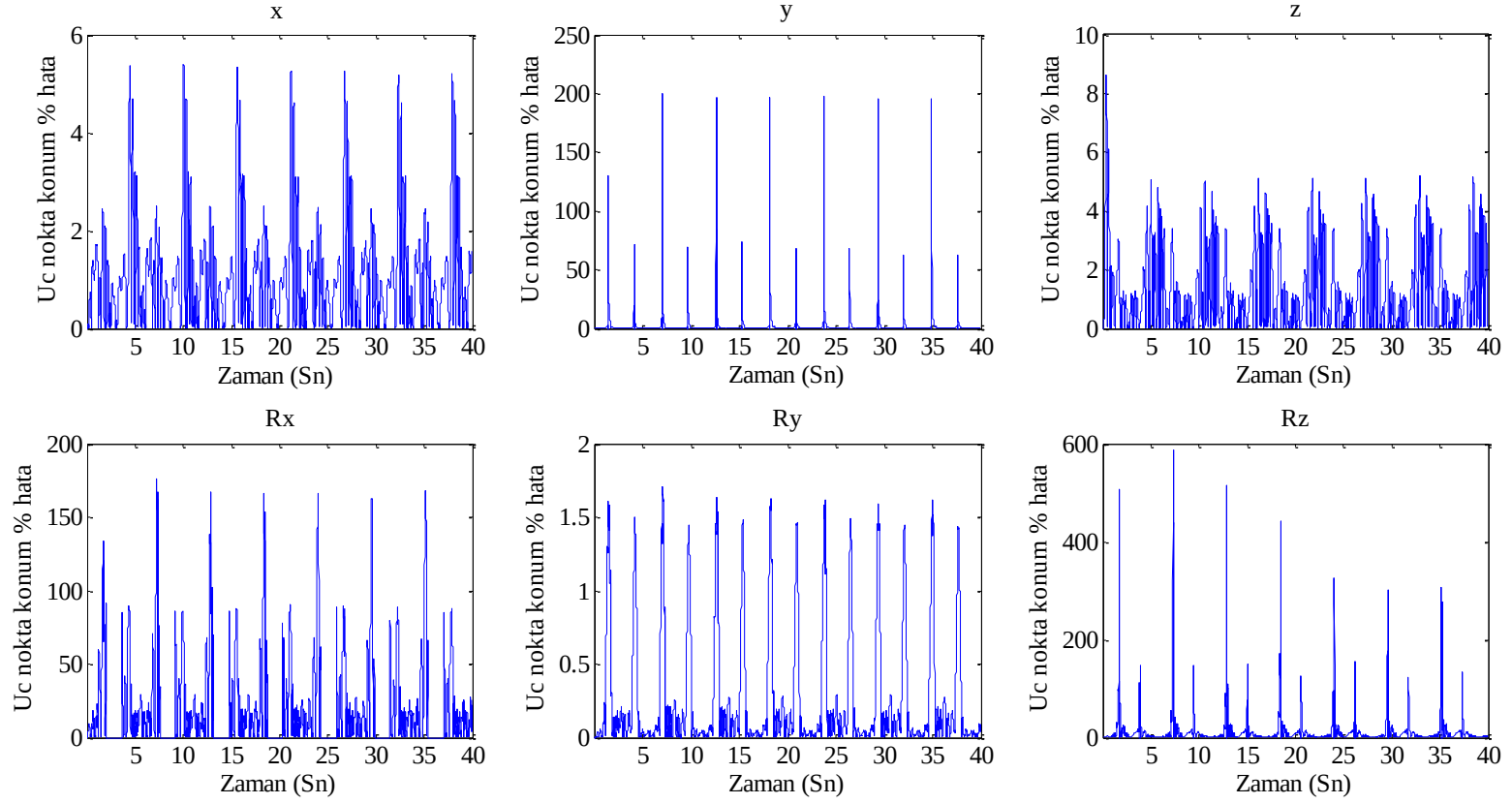
Şekil D 1.7 : Tüm eklemlerin açısai konum grafikleri(%60).



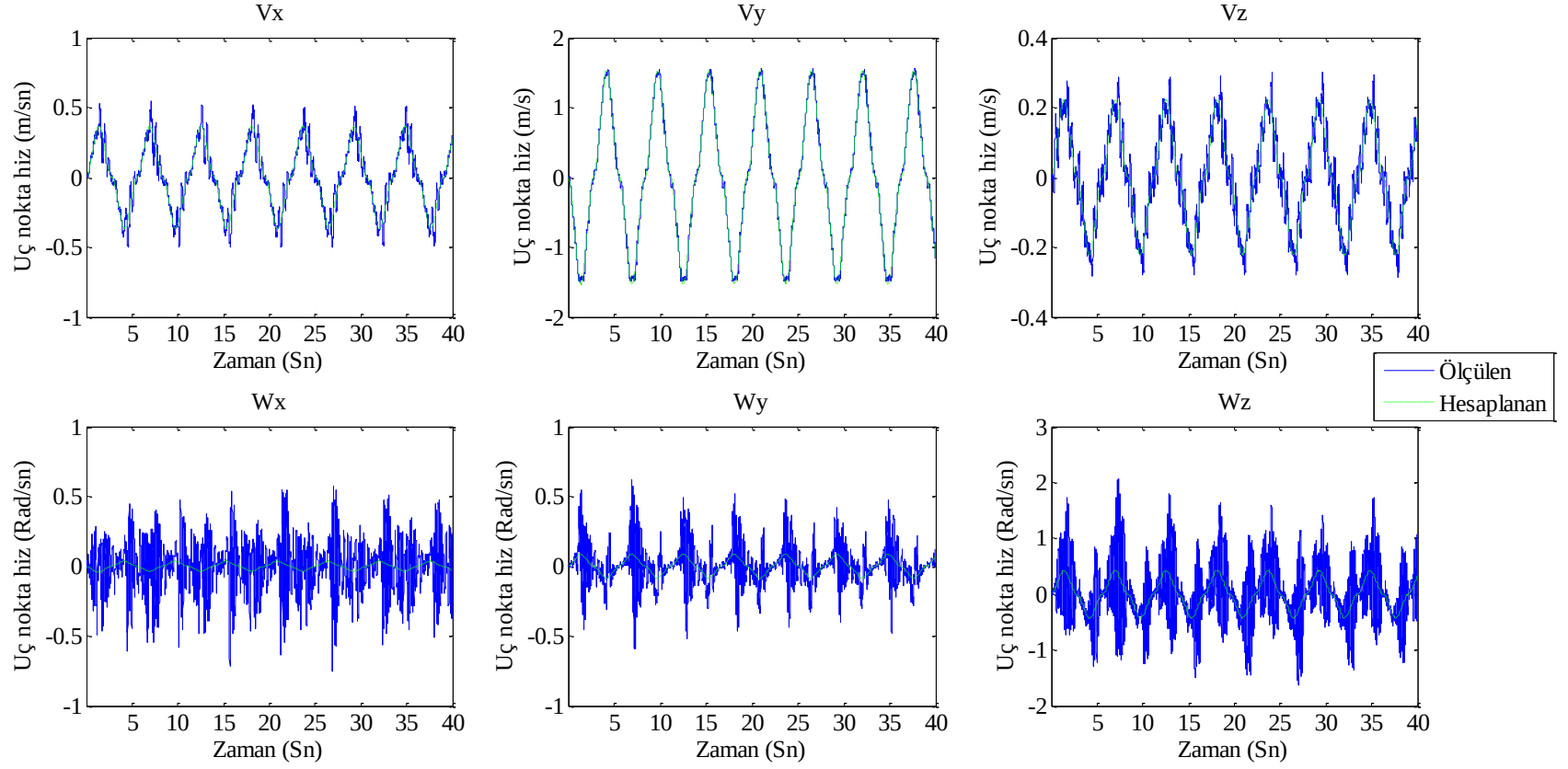
Şekil D 1.8 : Tüm eklemlerin açisal hız grafikleri(%60).



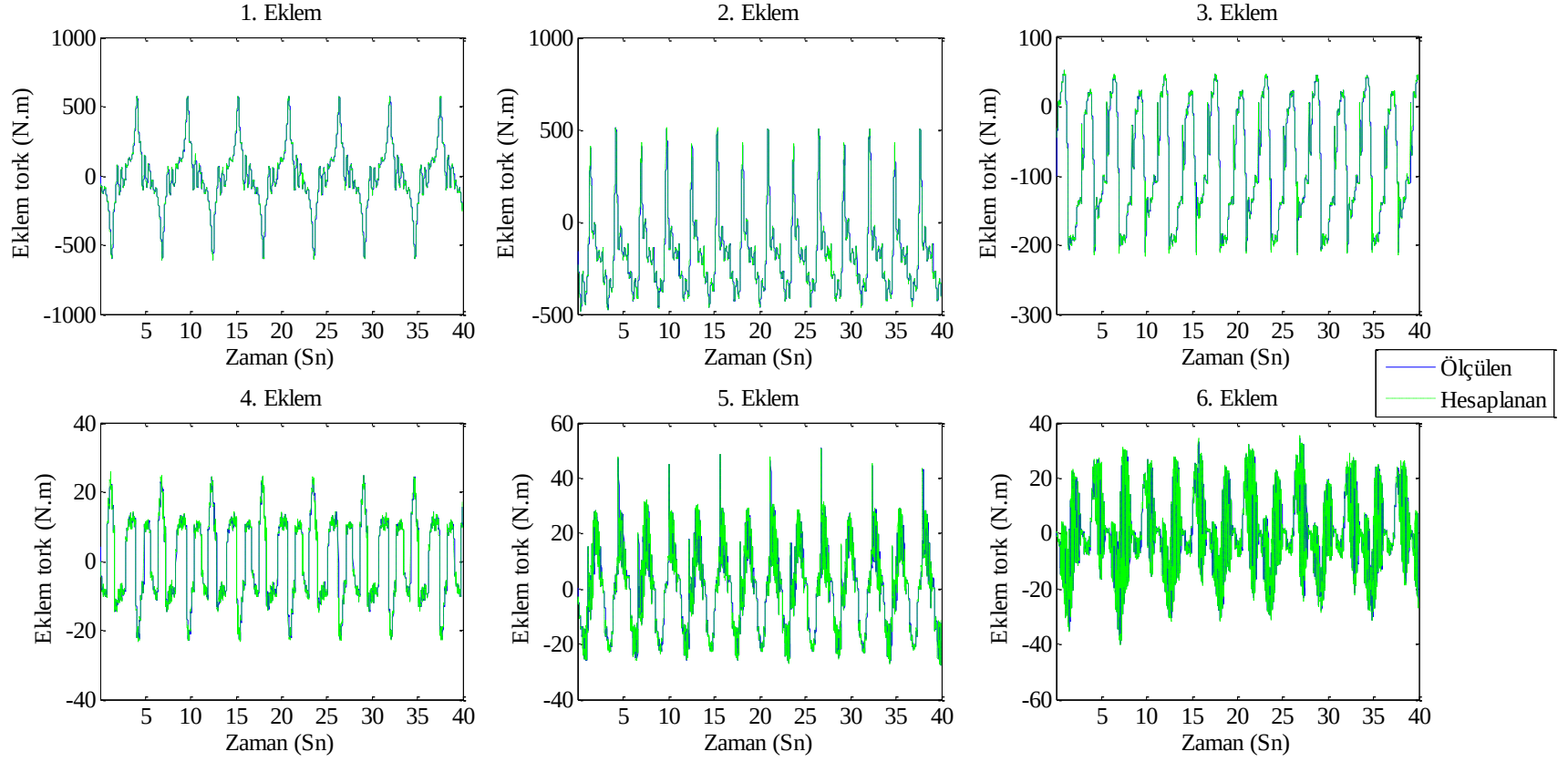
Şekil D 1.9 : Uç nokta konum grafikleri(%60).



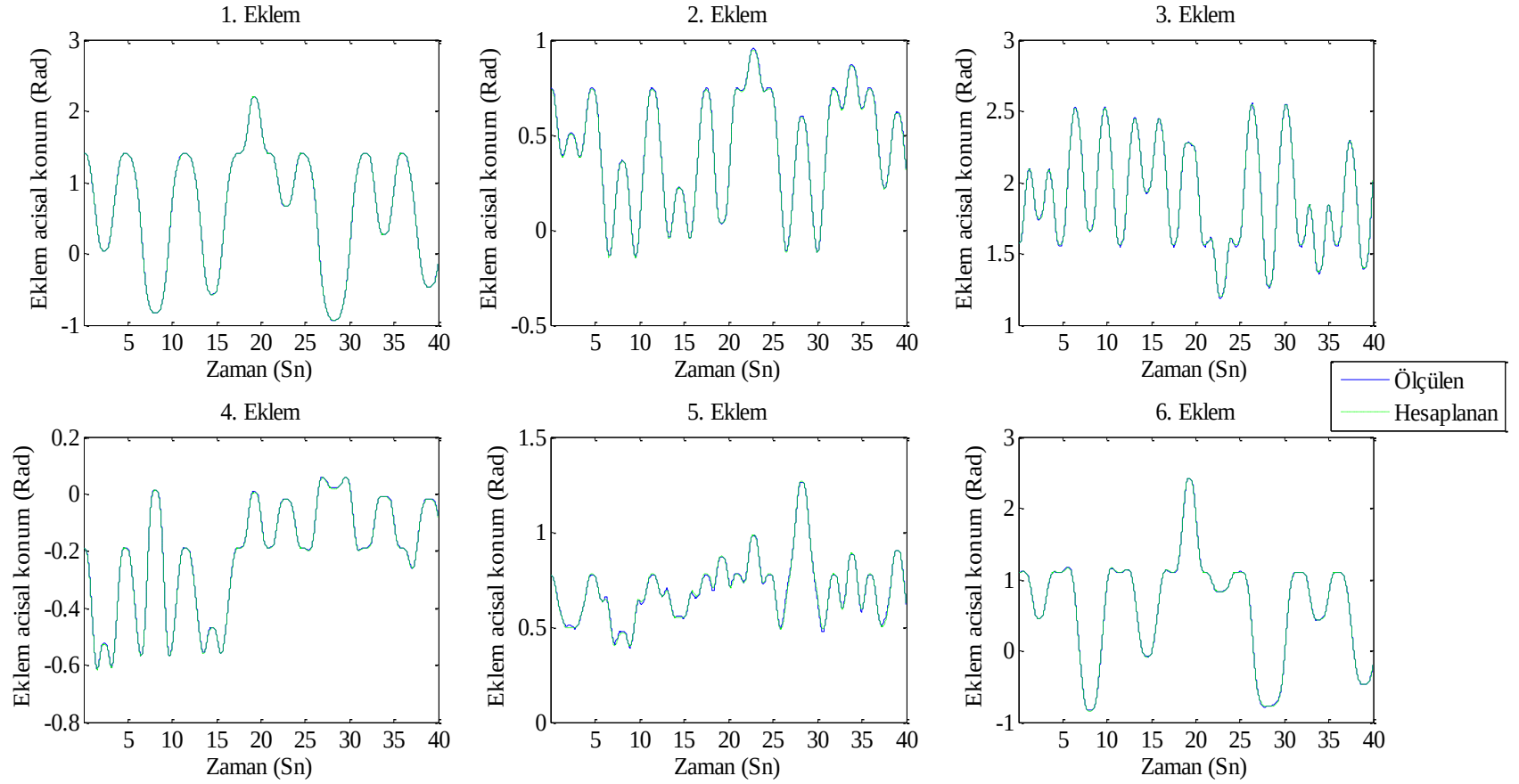
Şekil D 1.10 : Uç nokta konum % hata grafikleri(%60).



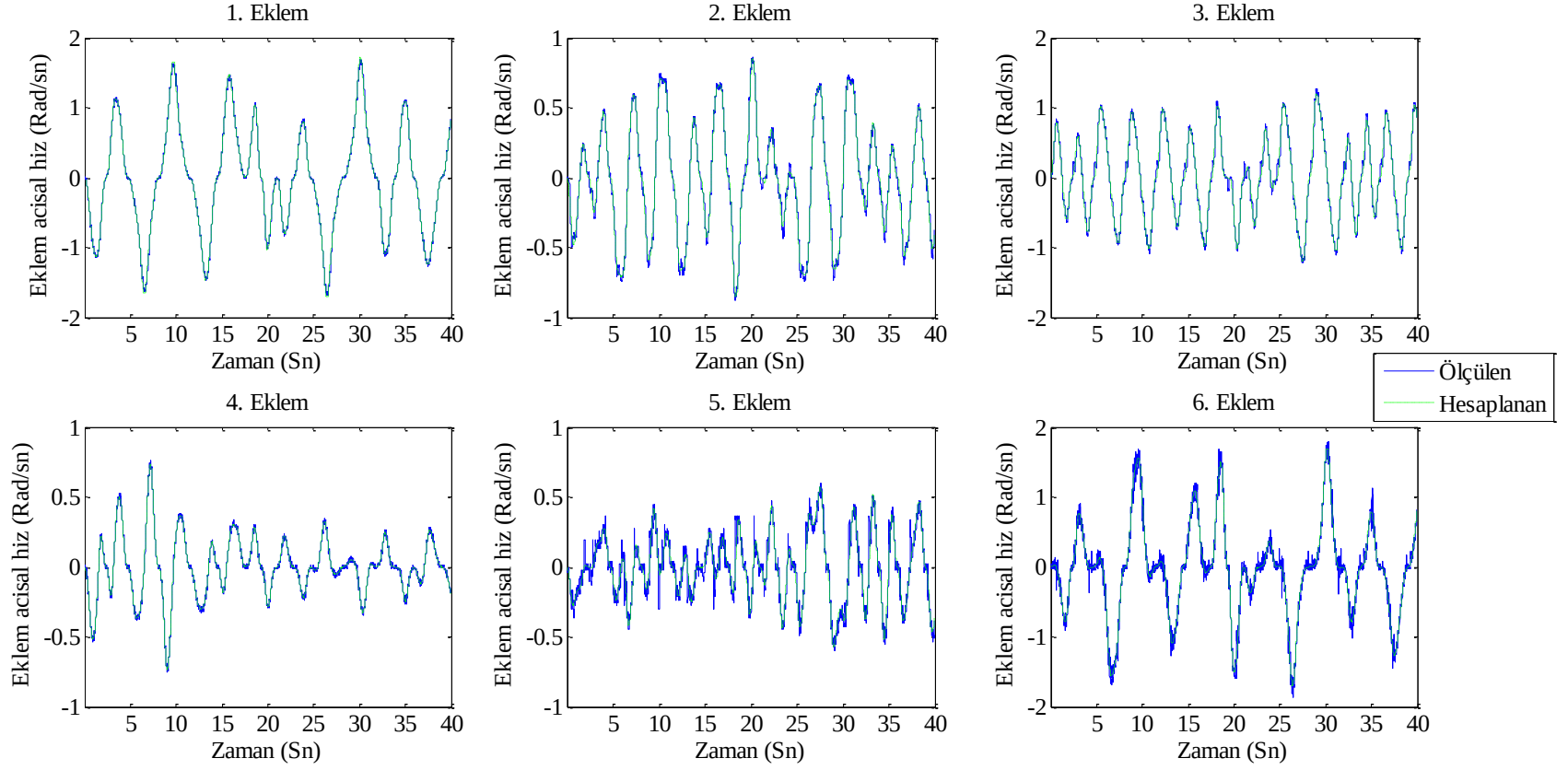
Şekil D 1.11 : Uç nokta hız grafikleri(%60).



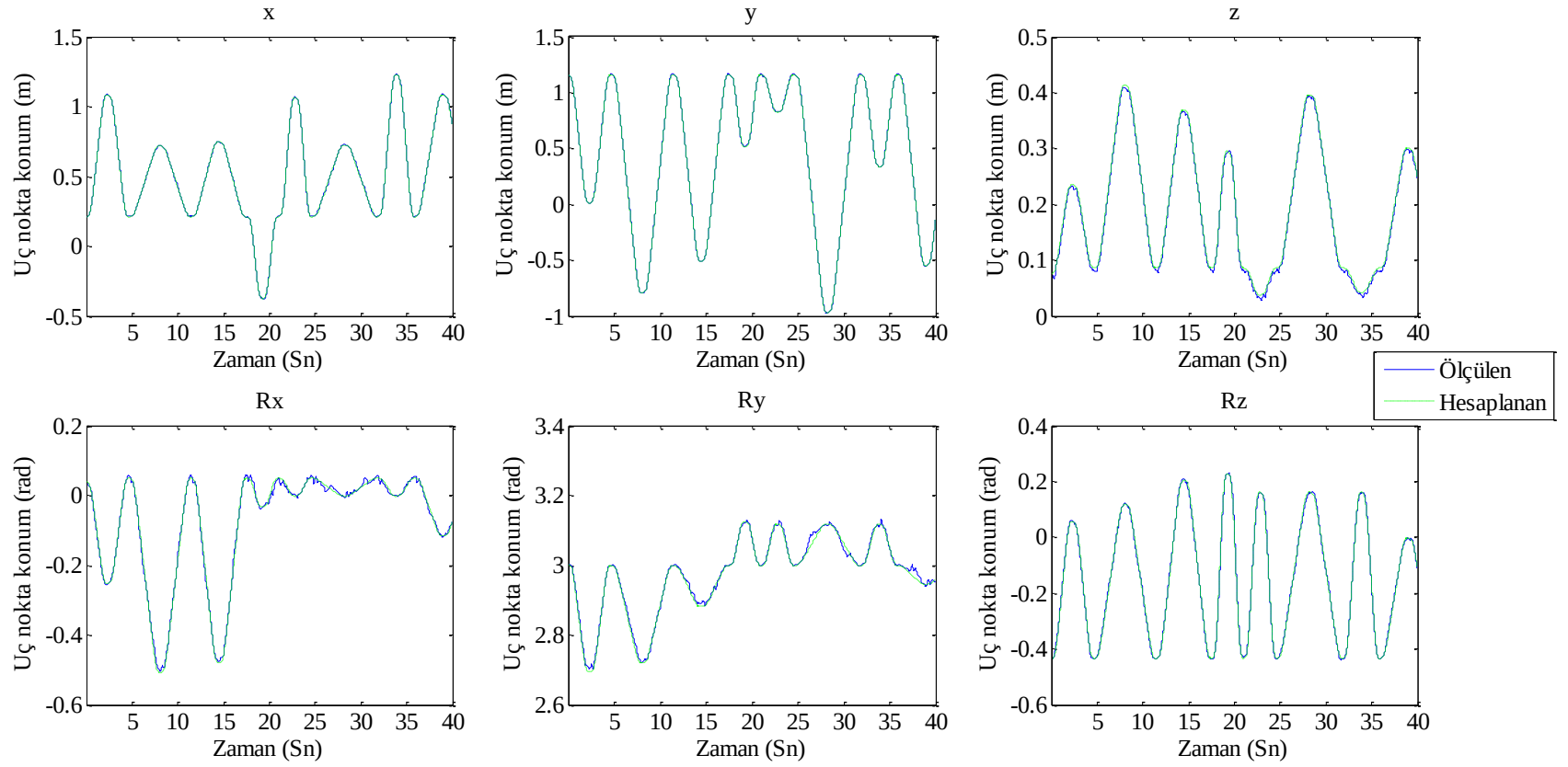
Şekil D 1.12 : Tüm eklemlerin tork grafikleri(%60).



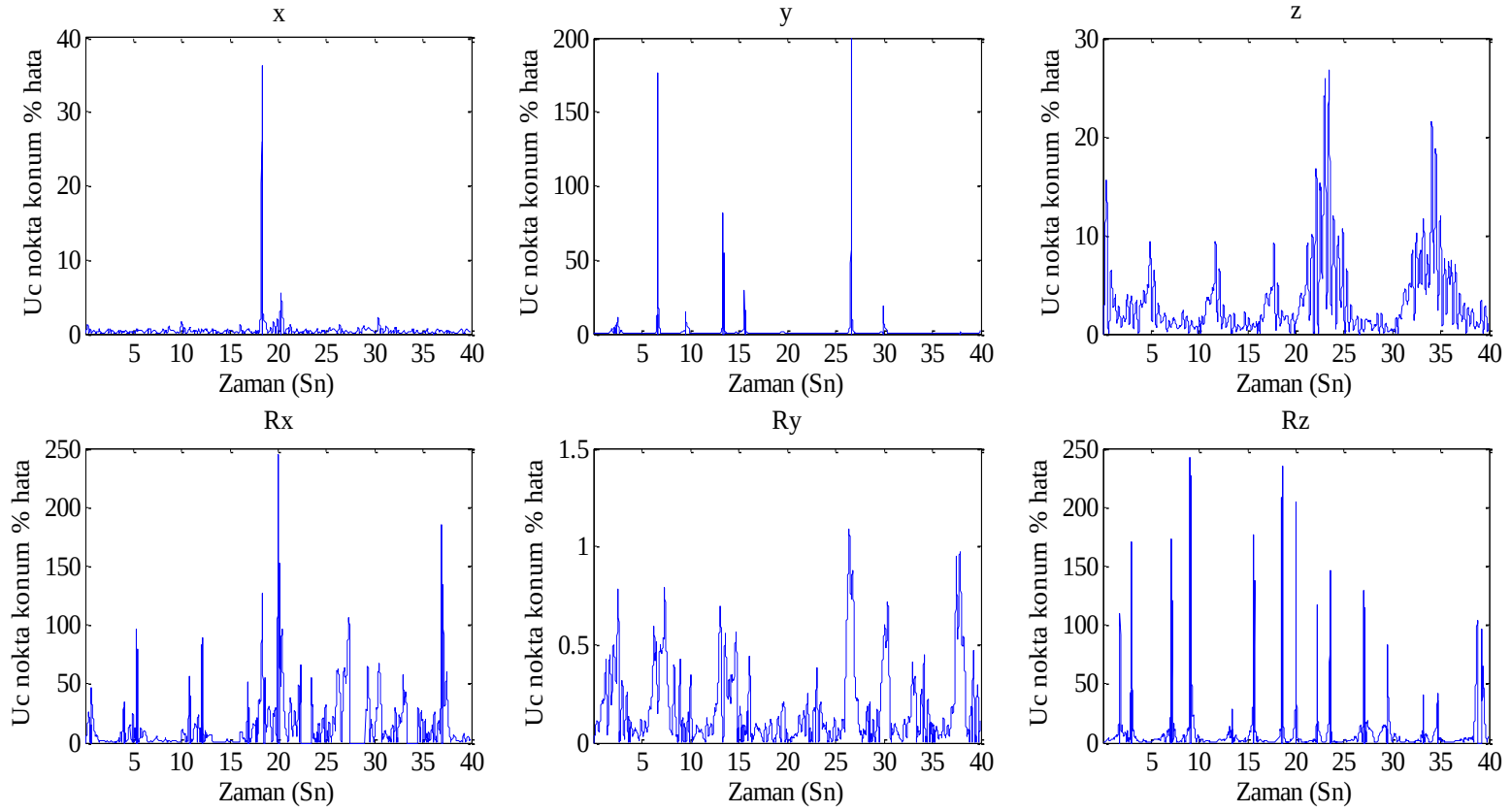
Şekil D 2.1 : Tüm eklemlerin açisal konum grafikleri(2kg - %30).



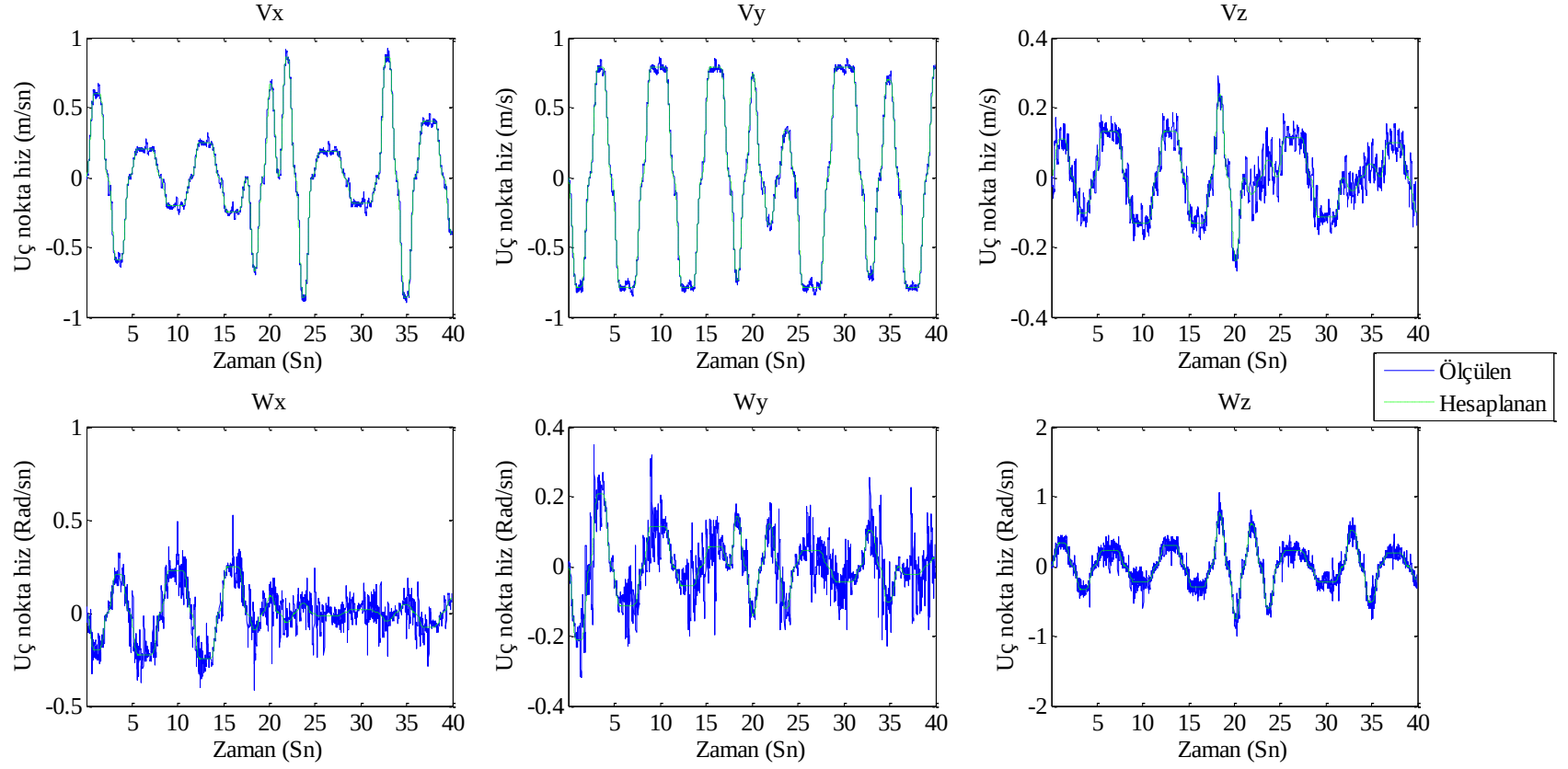
Şekil D 2.2 : Tüm eklemlerin açisal hız grafikleri(2kg - %30).



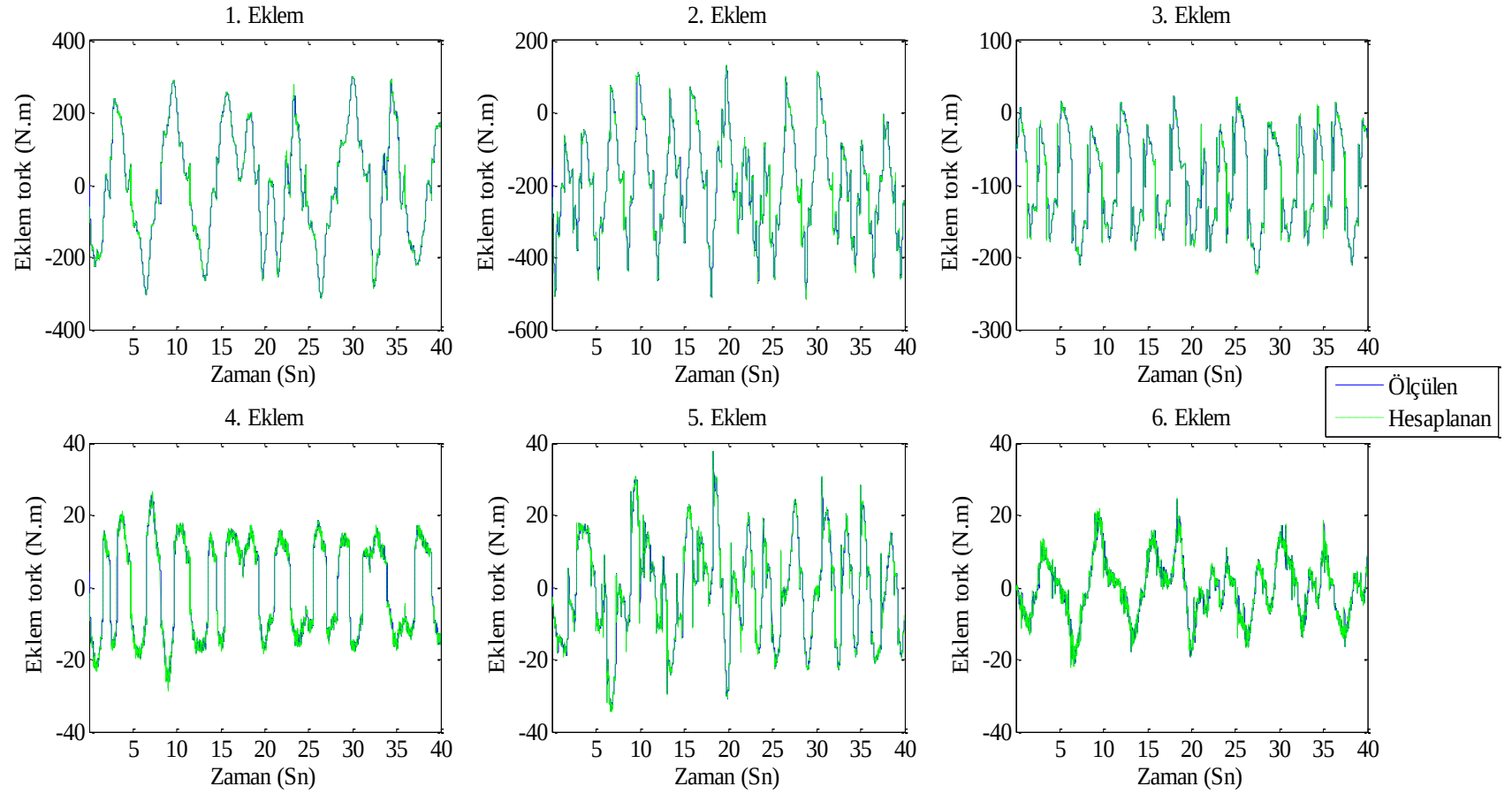
Şekil D 2.3 : Uç nokta konum grafikleri(2kg - %30).



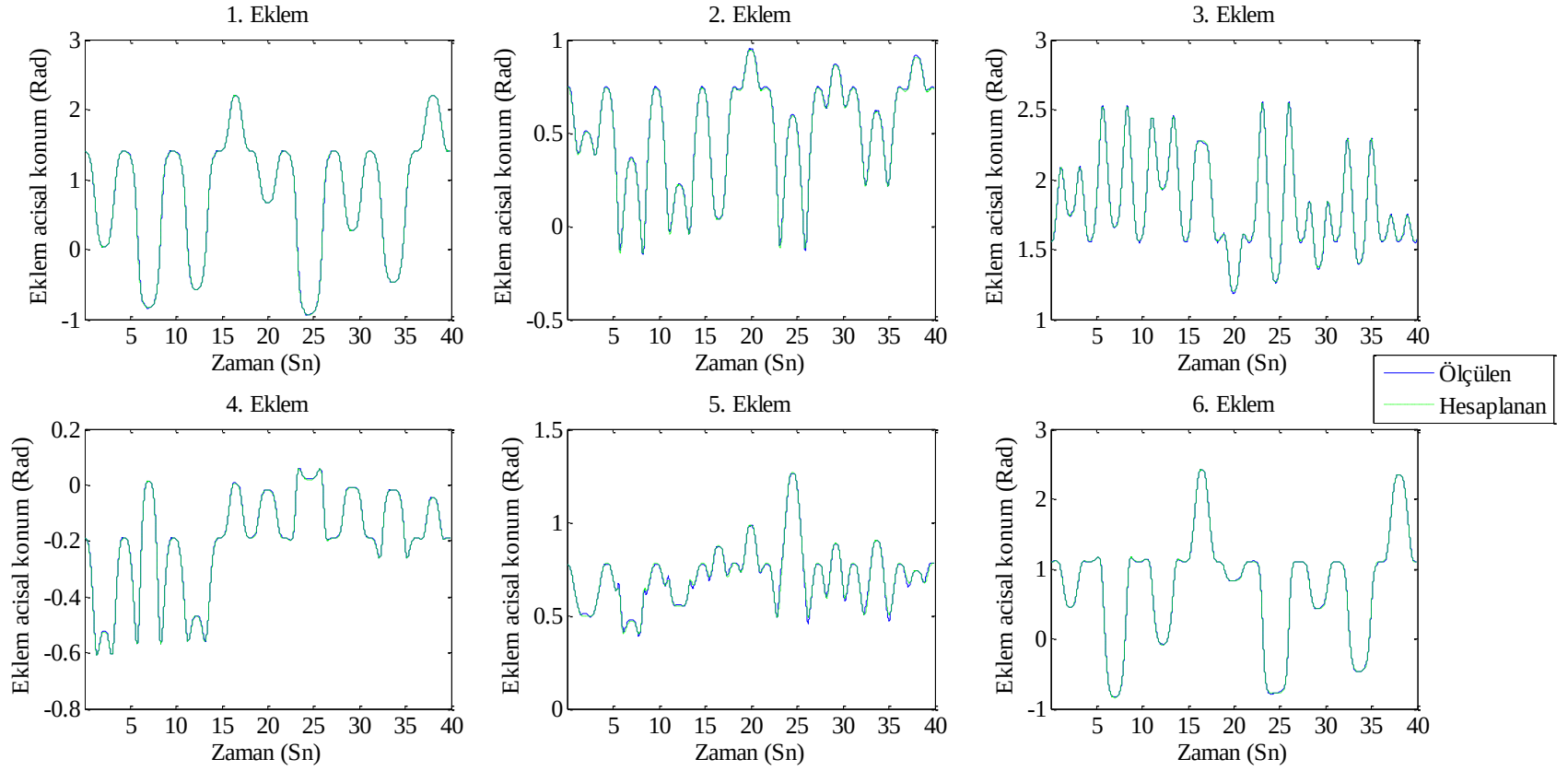
Şekil D 2.4 : Uç nokta konum % hata grafikleri(2kg - %30).



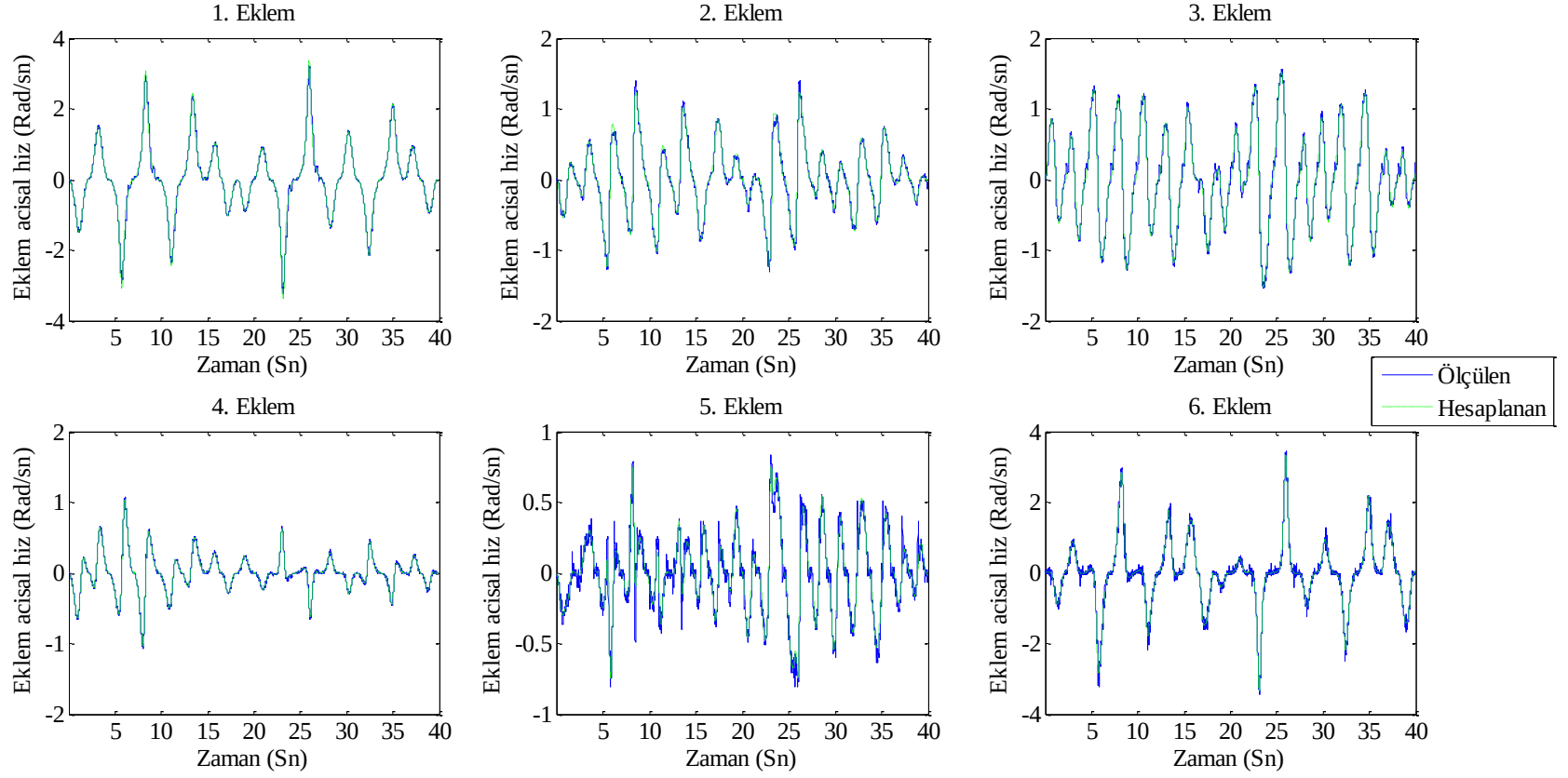
Şekil D 2.5 : Uç nokta hız grafikleri(2kg - %30).



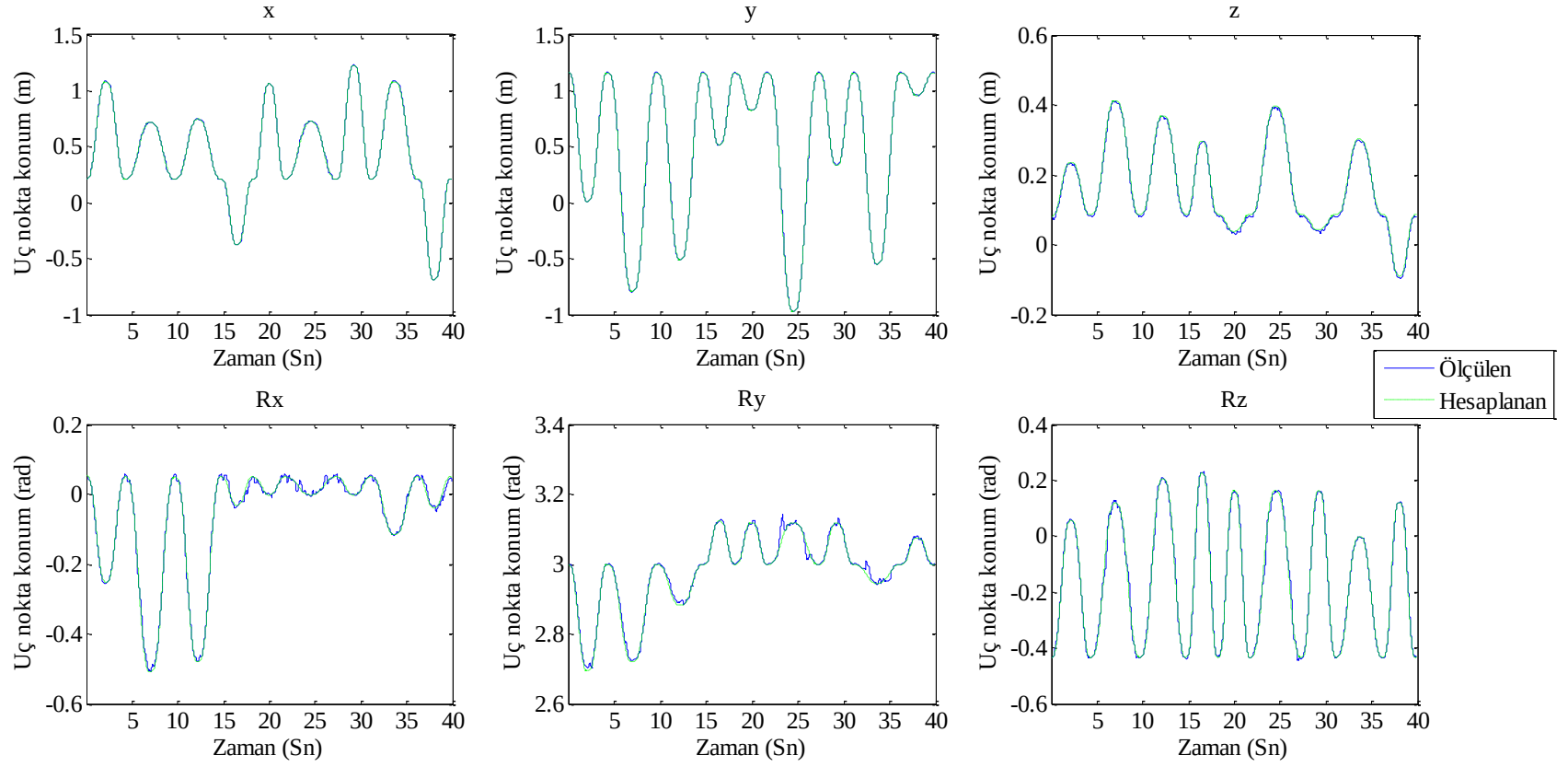
Şekil D 2.6 : Tüm eklemlerin tork grafikleri(2kg - %30).



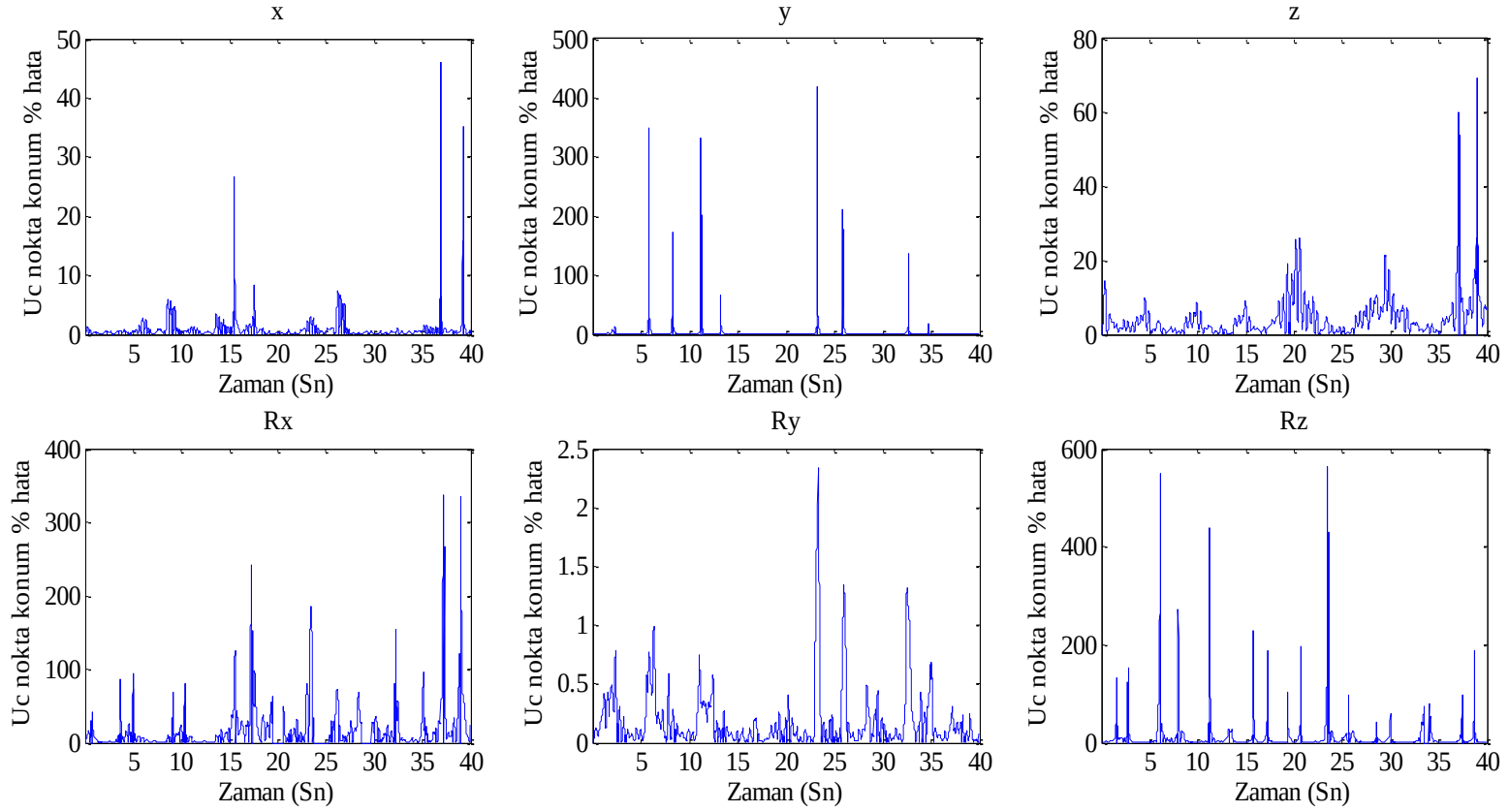
Şekil D 2.7 : Tüm eklemlerin açısai konum grafikleri(2kg - %60).



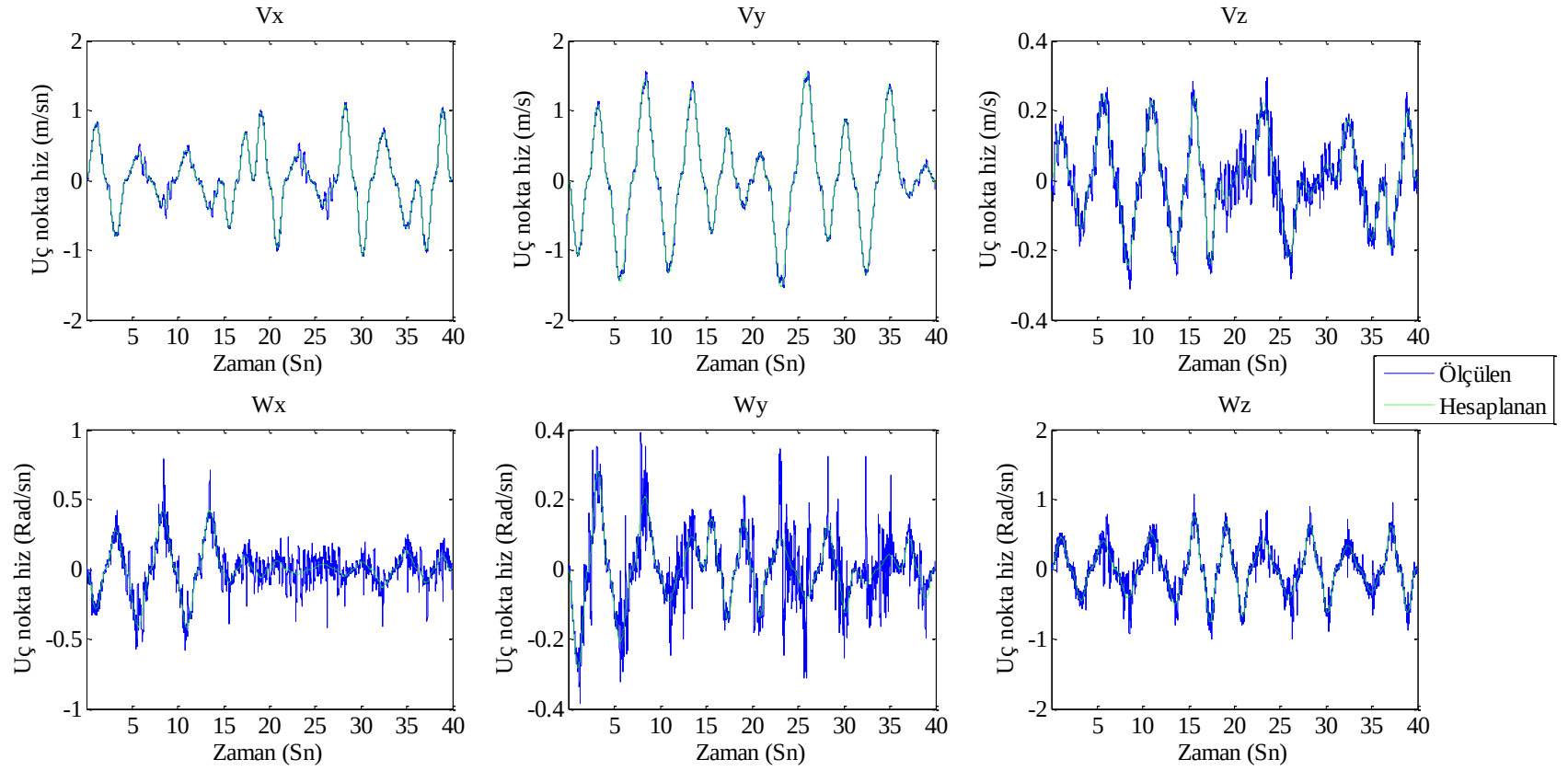
Şekil D 2.8 : Tüm eklemlerin açısai hız grafikleri(2kg - %60).



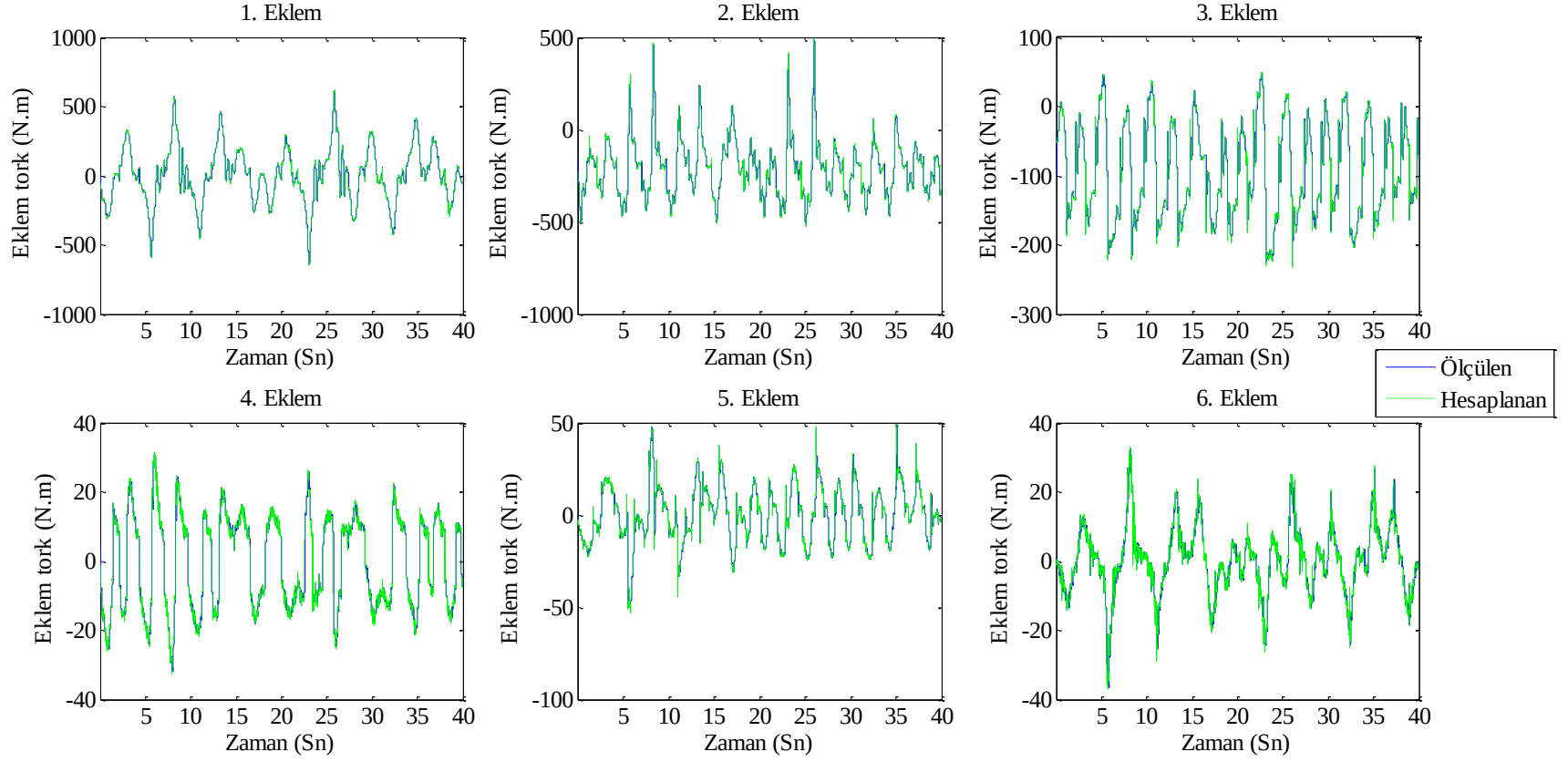
Şekil D 2.9 : Uç nokta konum grafikleri(2kg - %60).



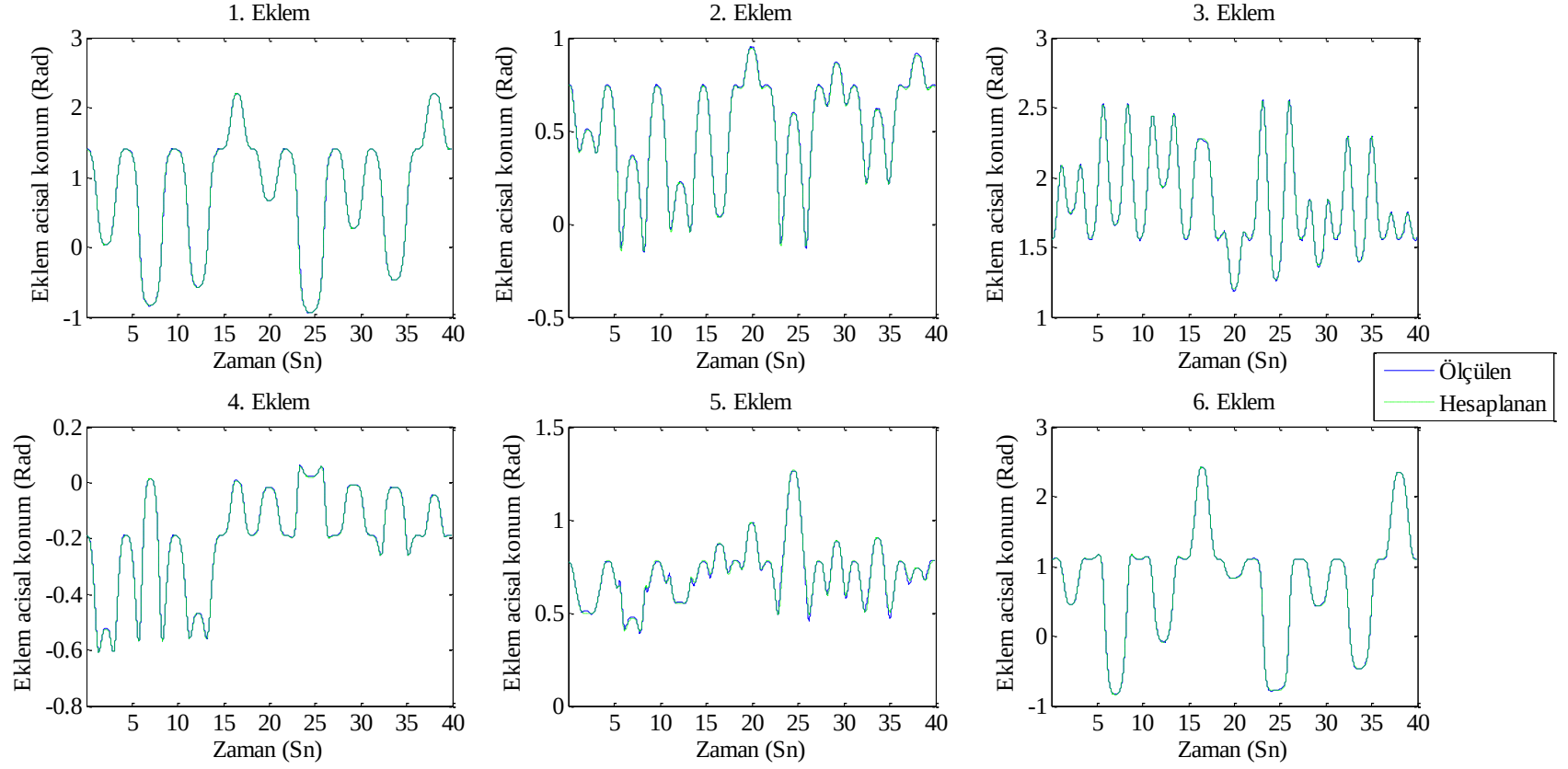
Şekil D 2.10 : Uç nokta konum % hata grafikleri(2kg - %60).



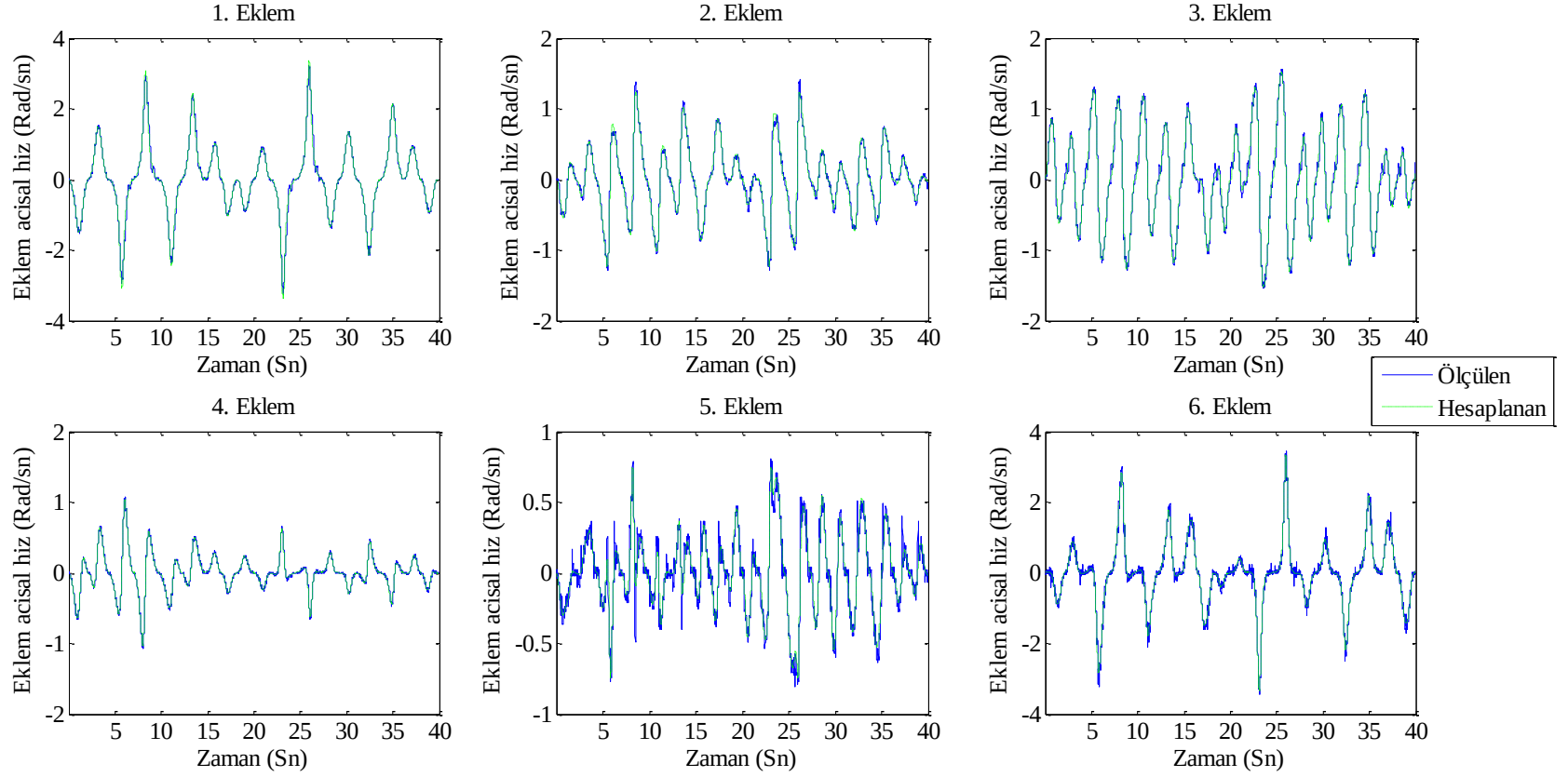
Şekil D 2.11 : Uç nokta hız grafikleri(2kg - %60).



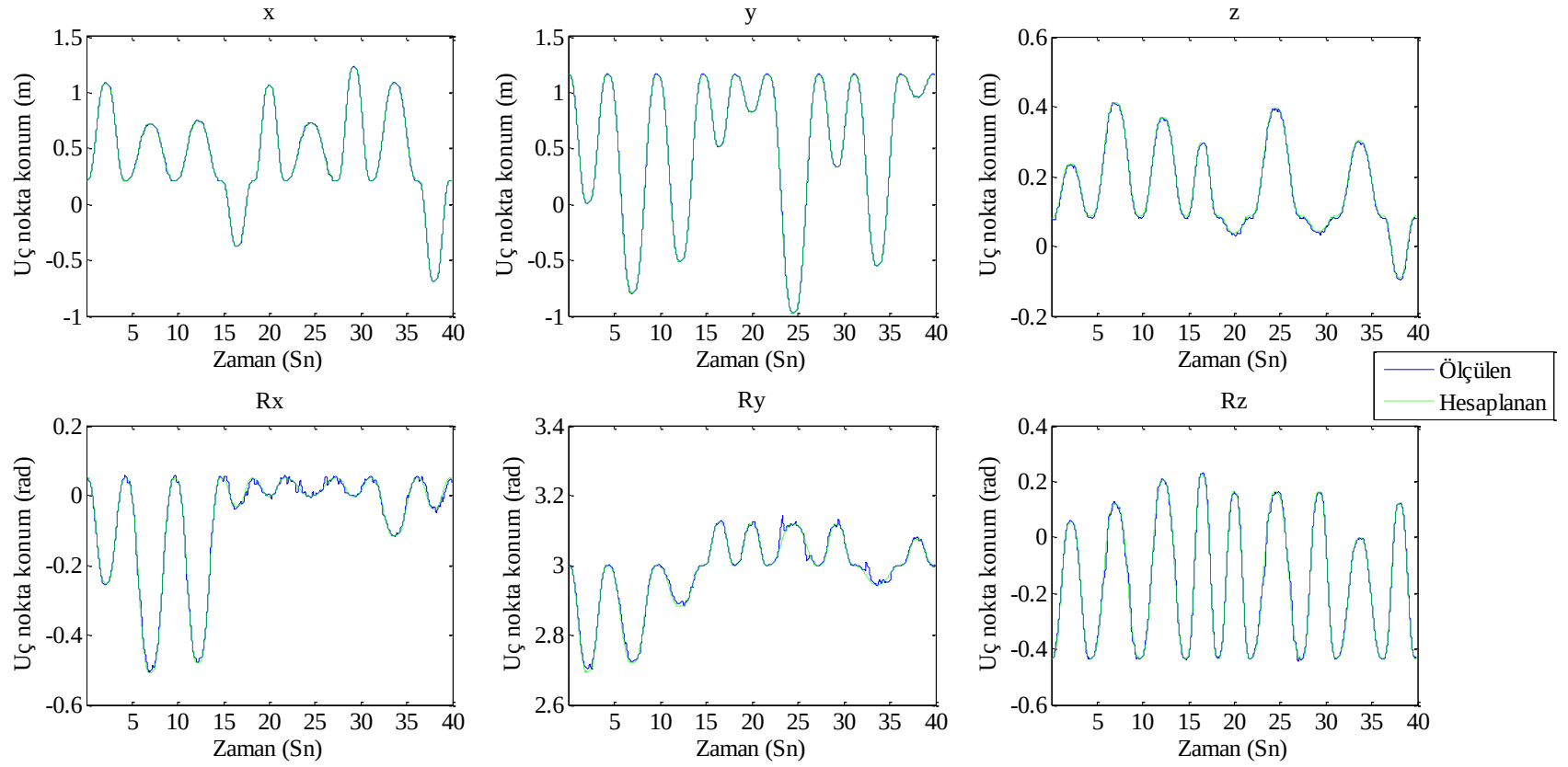
Şekil D 2.12 : Tüm eklemlerin tork grafikleri(2kg - %60).



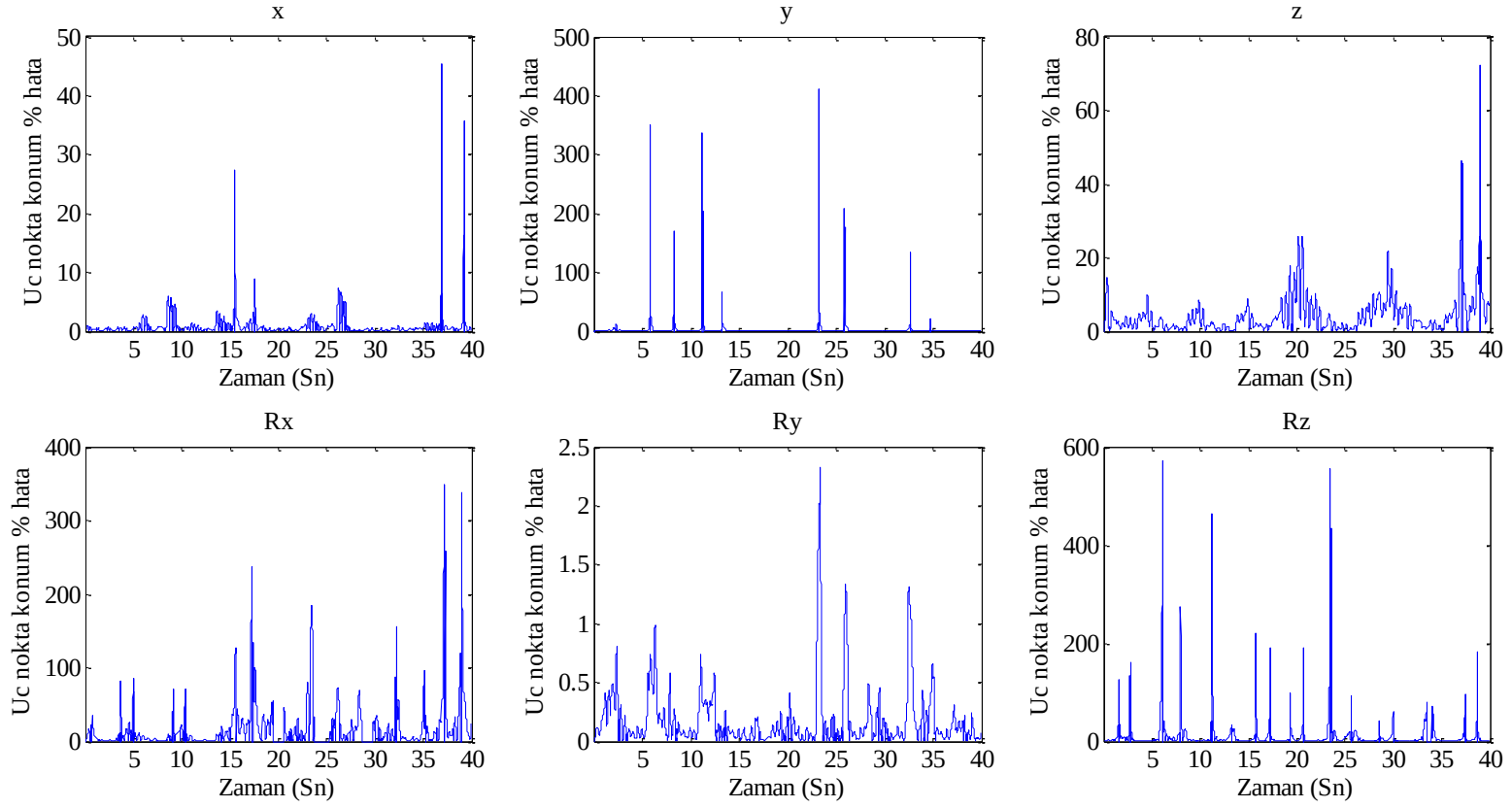
Şekil D 2.13 : Tüm eklemlerin açisal konum grafikleri(2kg - %100).



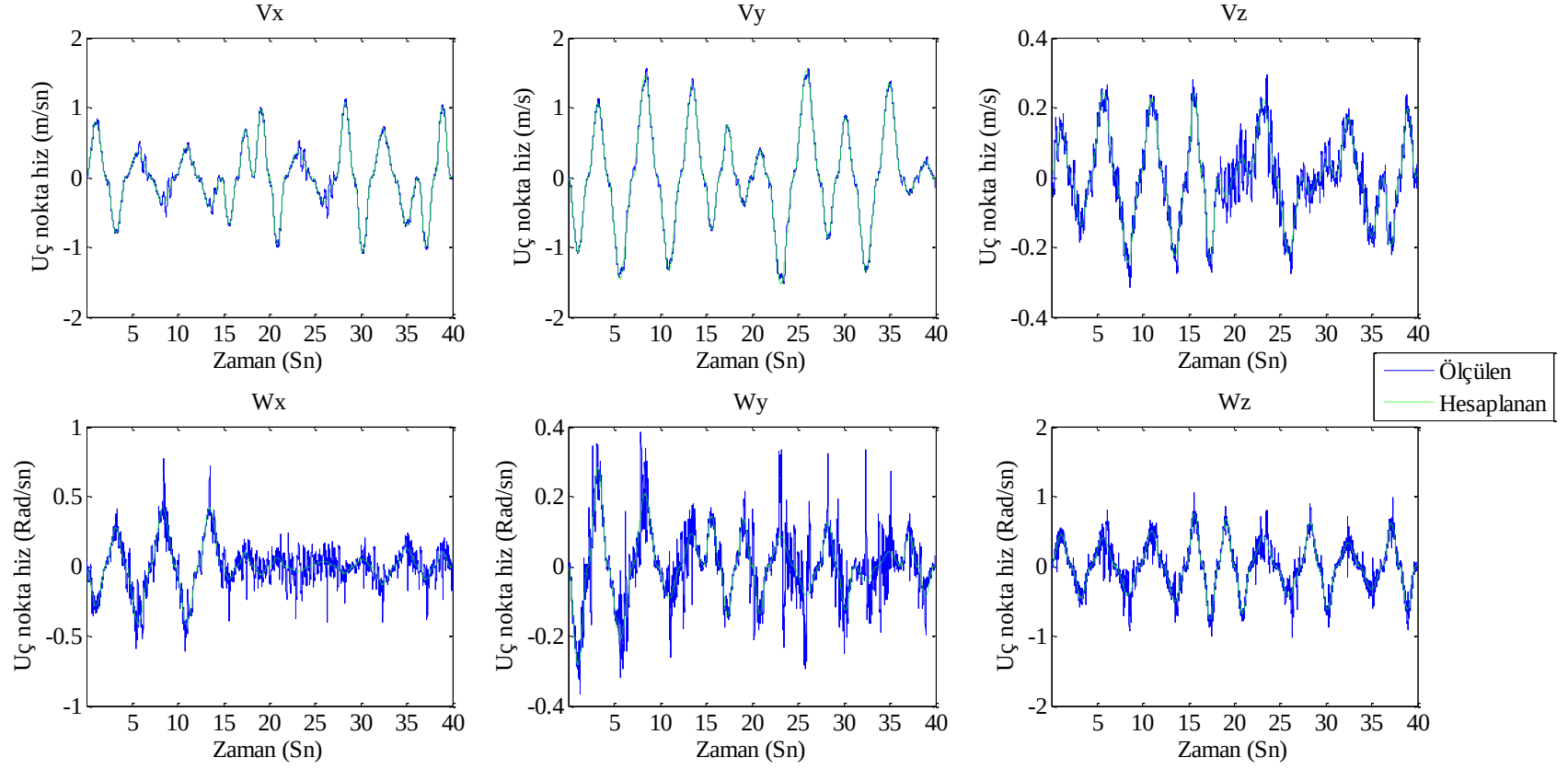
Şekil D 2.14 : Tüm eklemlerin açısai hız grafikleri(2kg - %100).



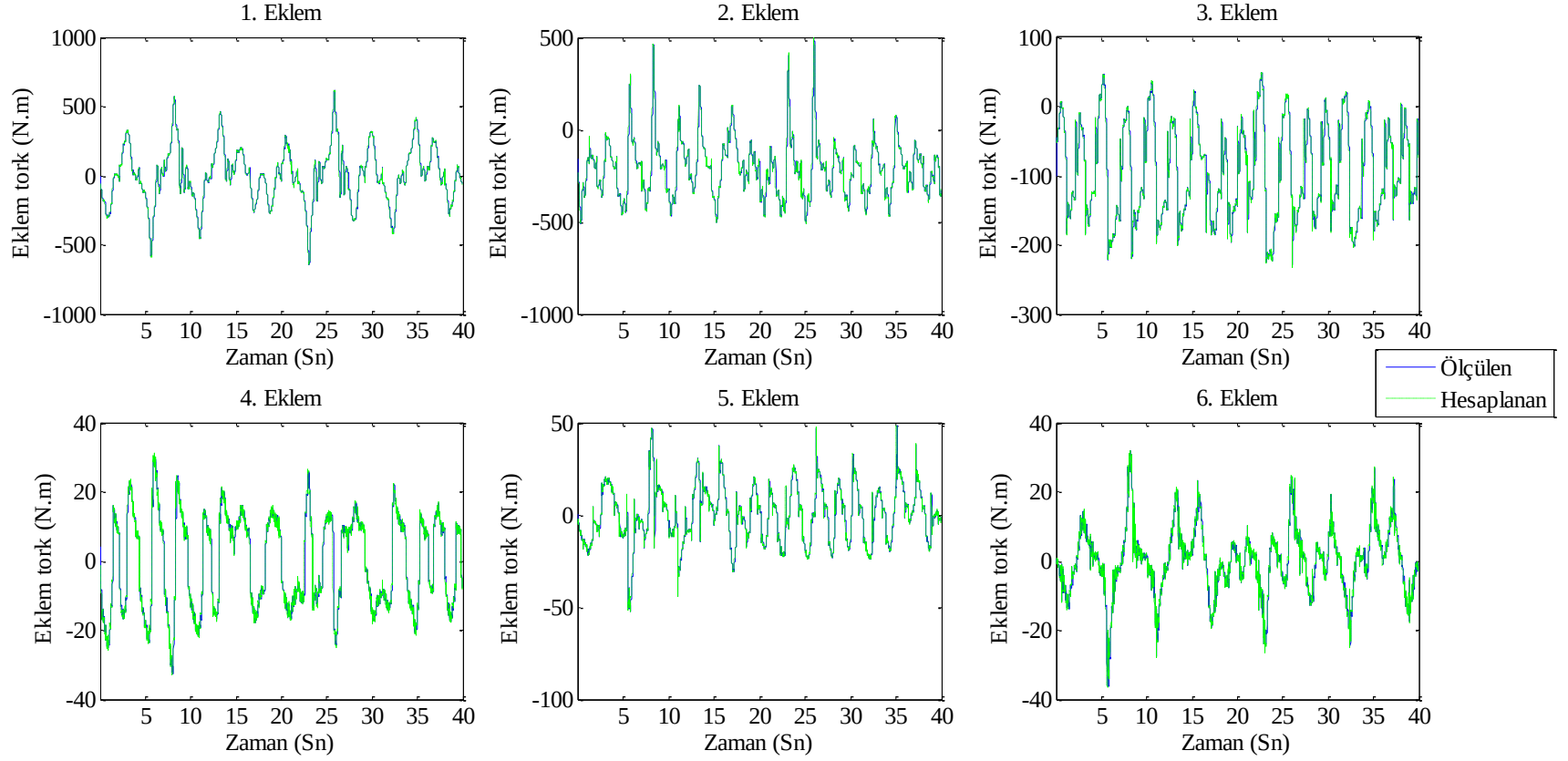
Şekil D 2.15 : Uç nokta konum grafikleri(2kg - %100).



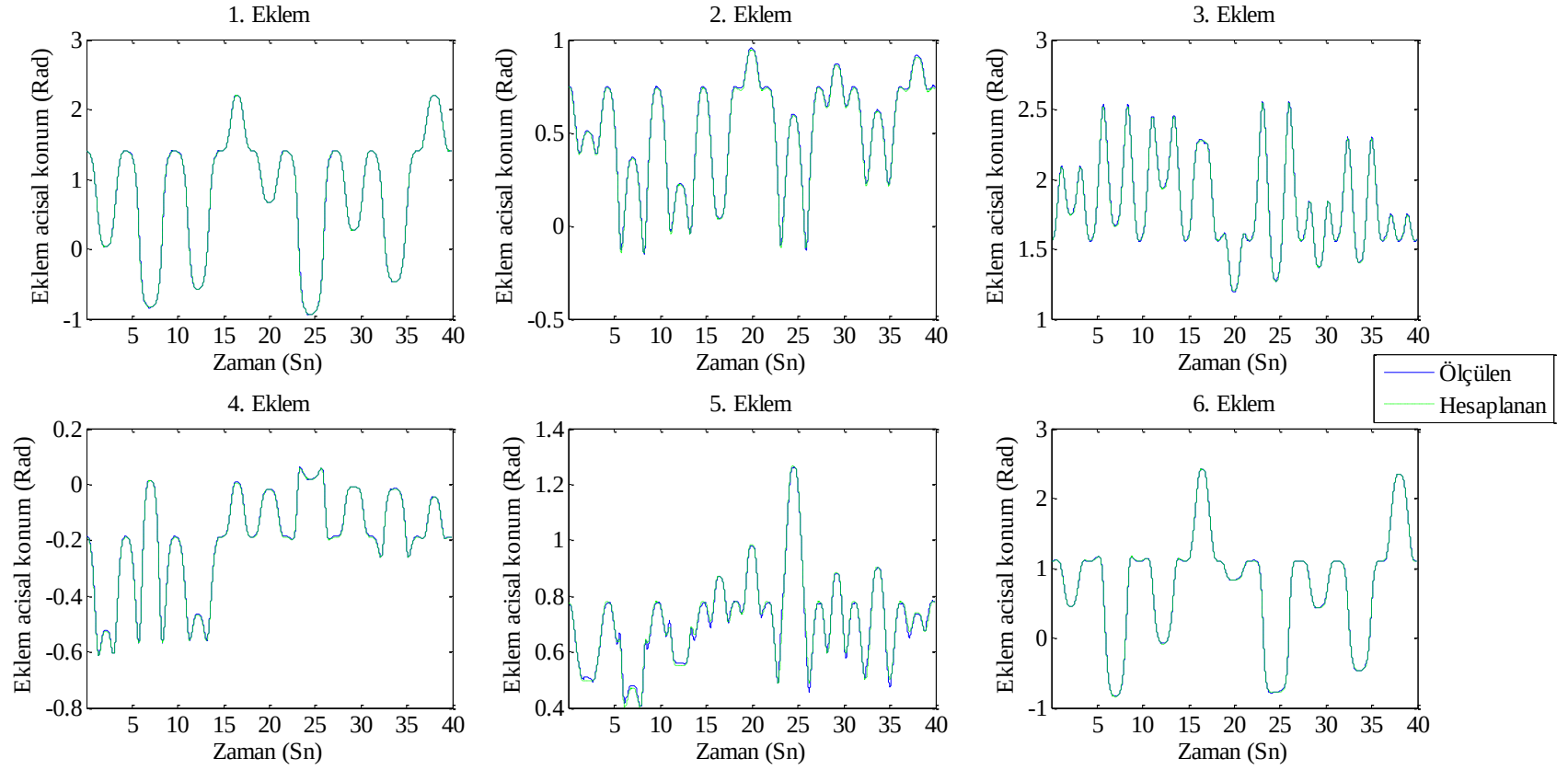
Şekil D 2.16 : Uç nokta konum % hata grafikleri(2kg - %100).



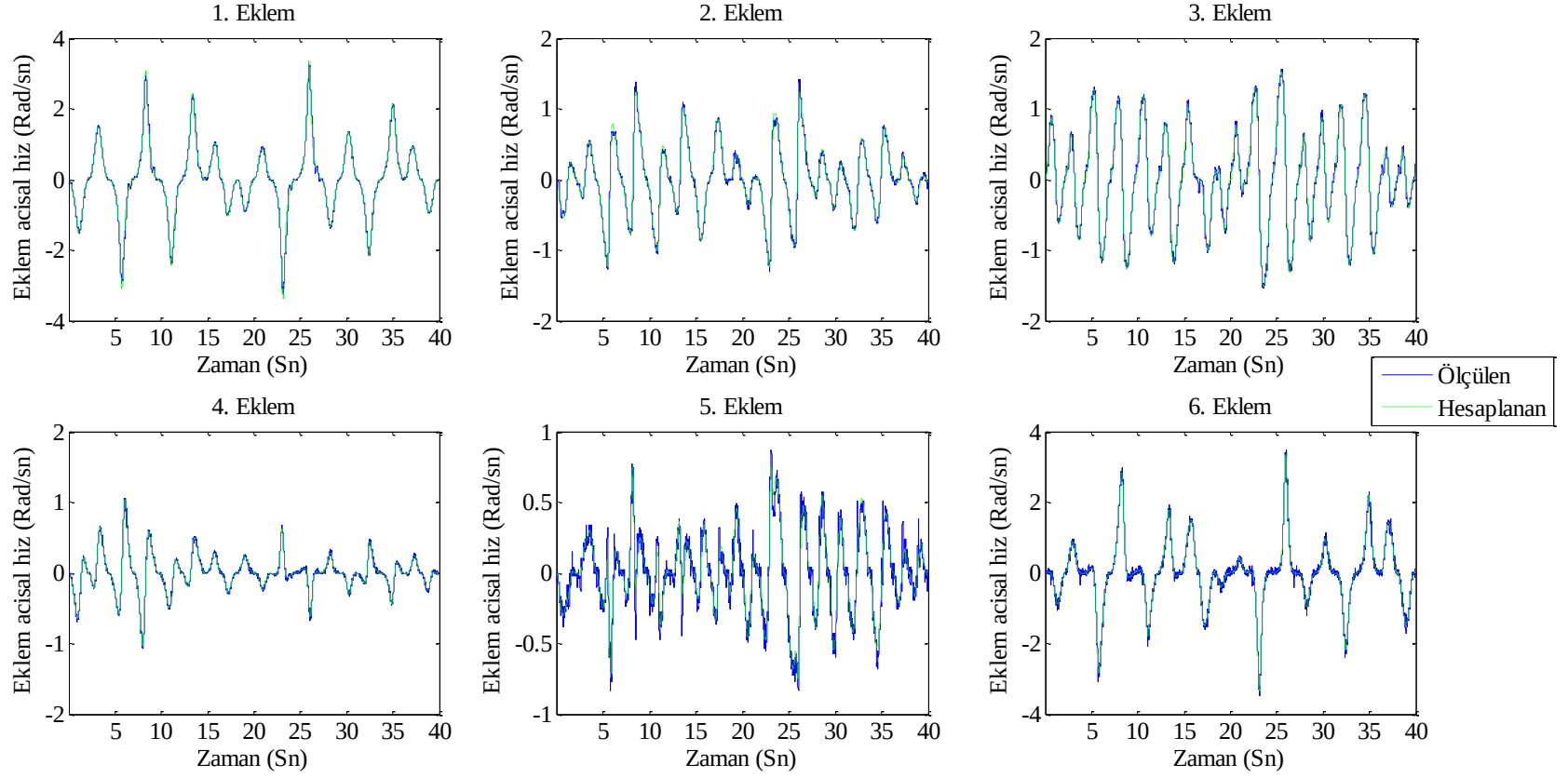
Şekil D 2.17 : Uç nokta hız grafikleri(2kg - %100).



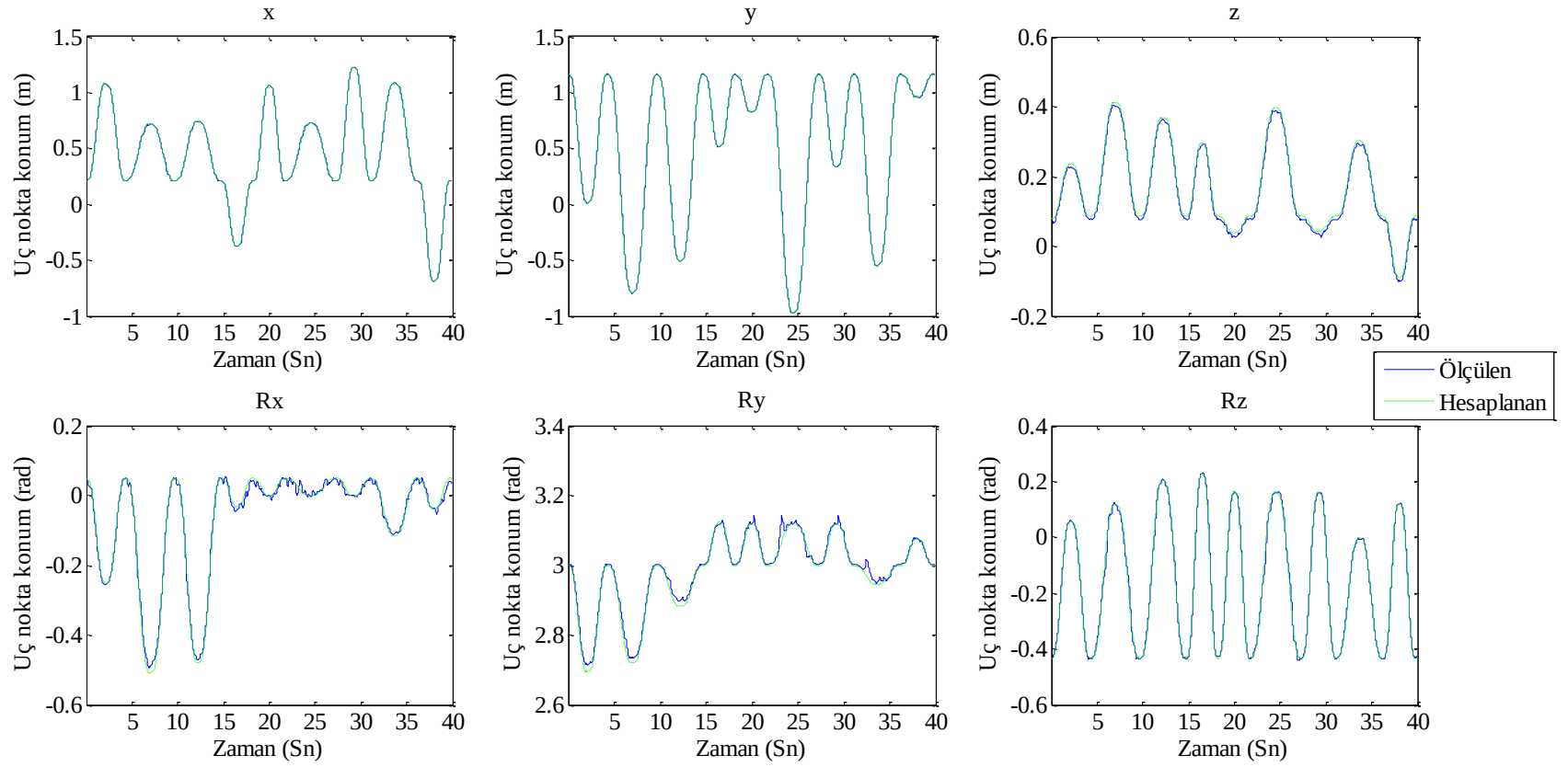
Şekil D 2.18 : Tüm eklemlerin tork grafikleri(2kg - %100).



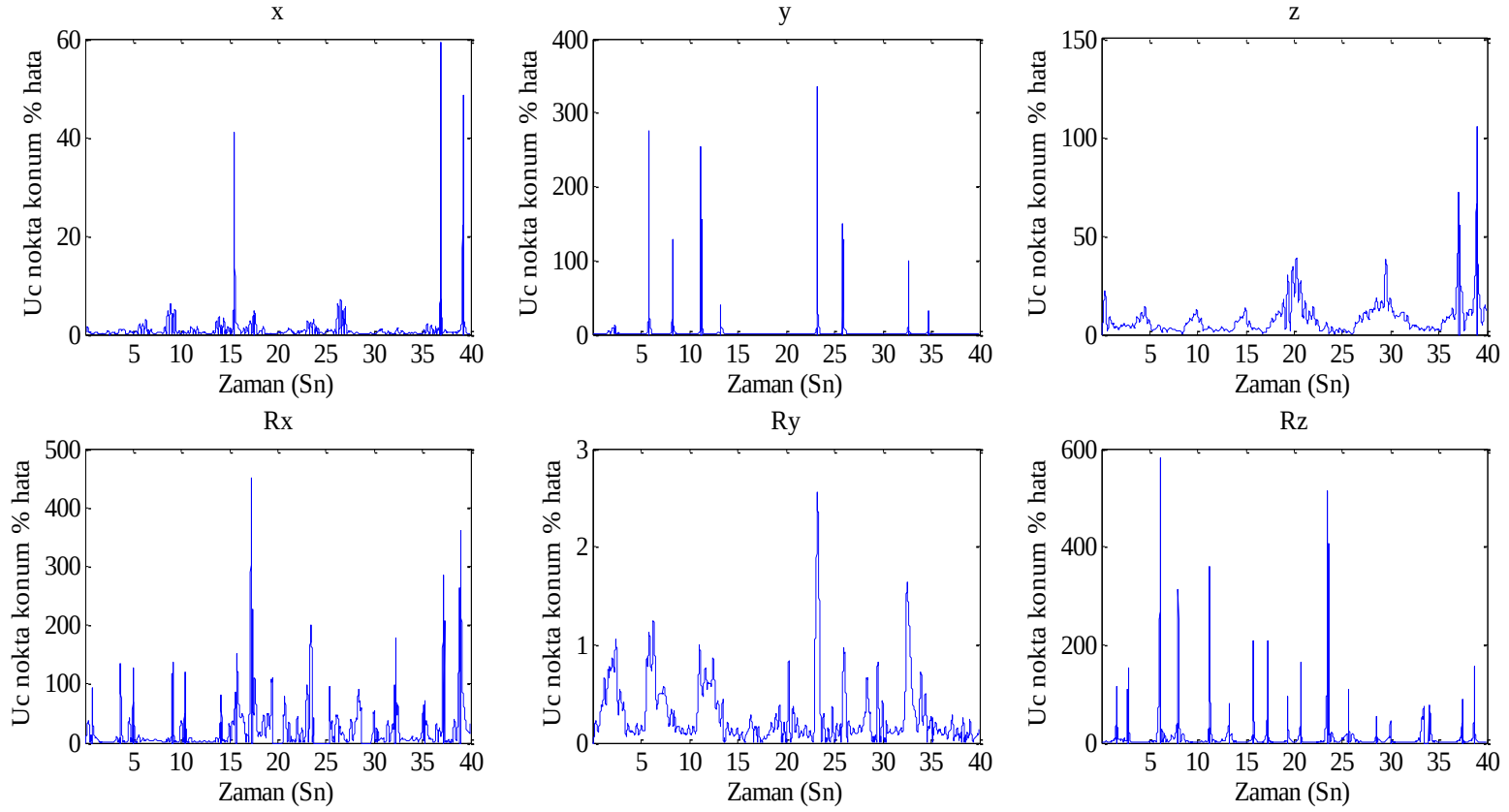
Şekil D 2.19 : Tüm eklemlerin açısai konum grafikleri(5kg - %60).



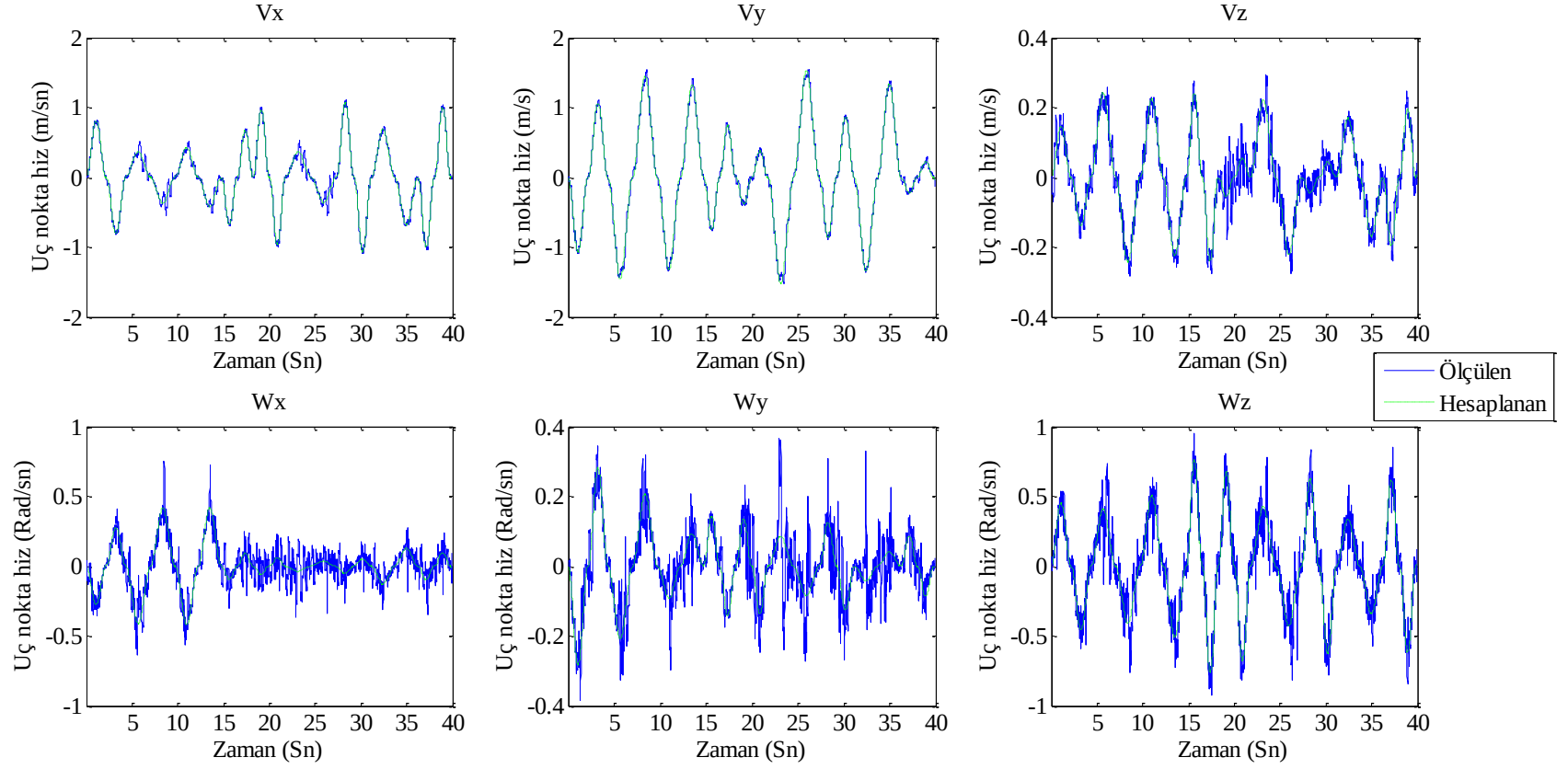
Şekil D 2.20 : Tüm eklemlerin açısal hız grafikleri(5kg - %60).



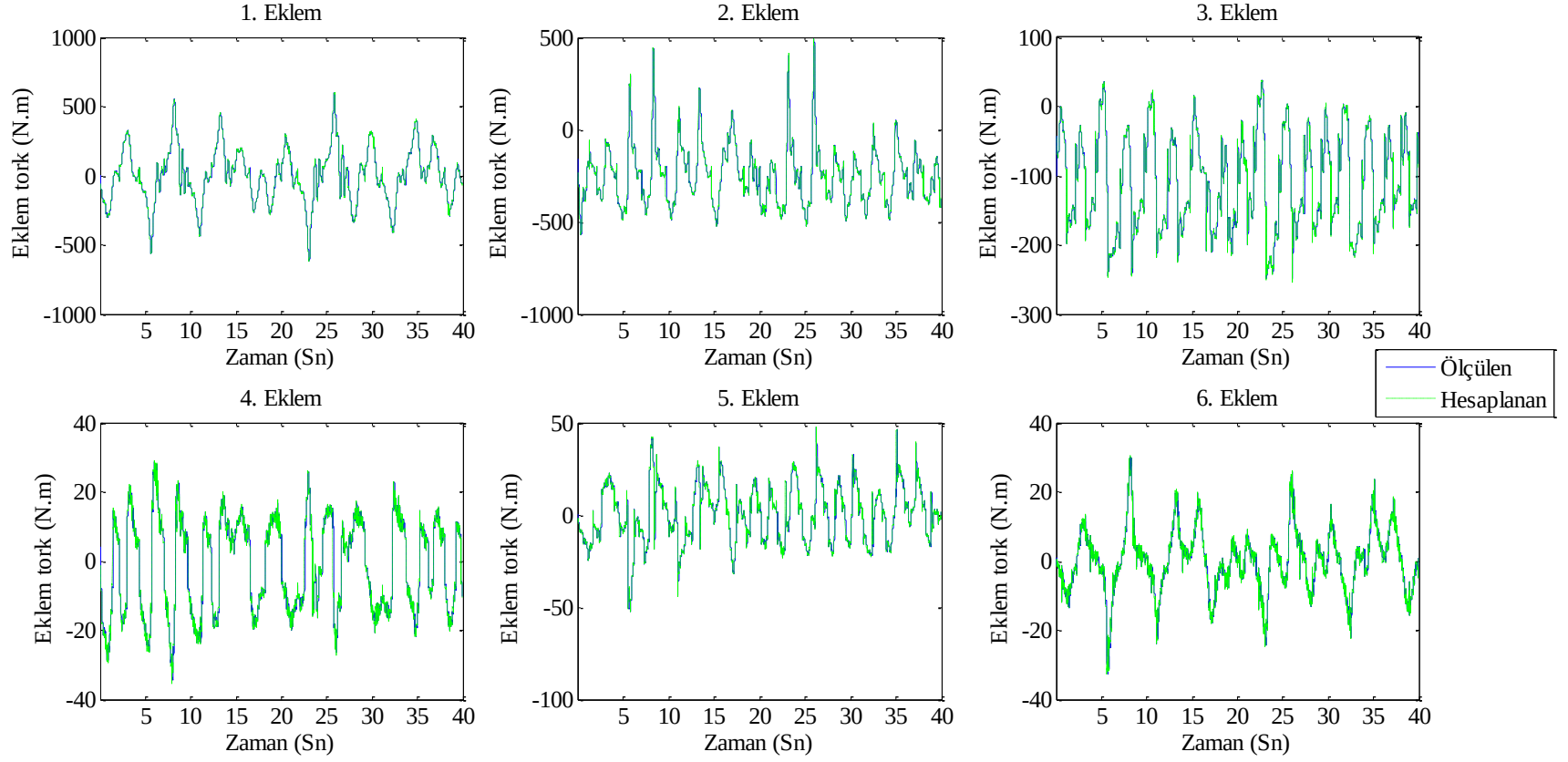
Şekil D 2.21 : Uç nokta konum grafikleri(5kg - %60).



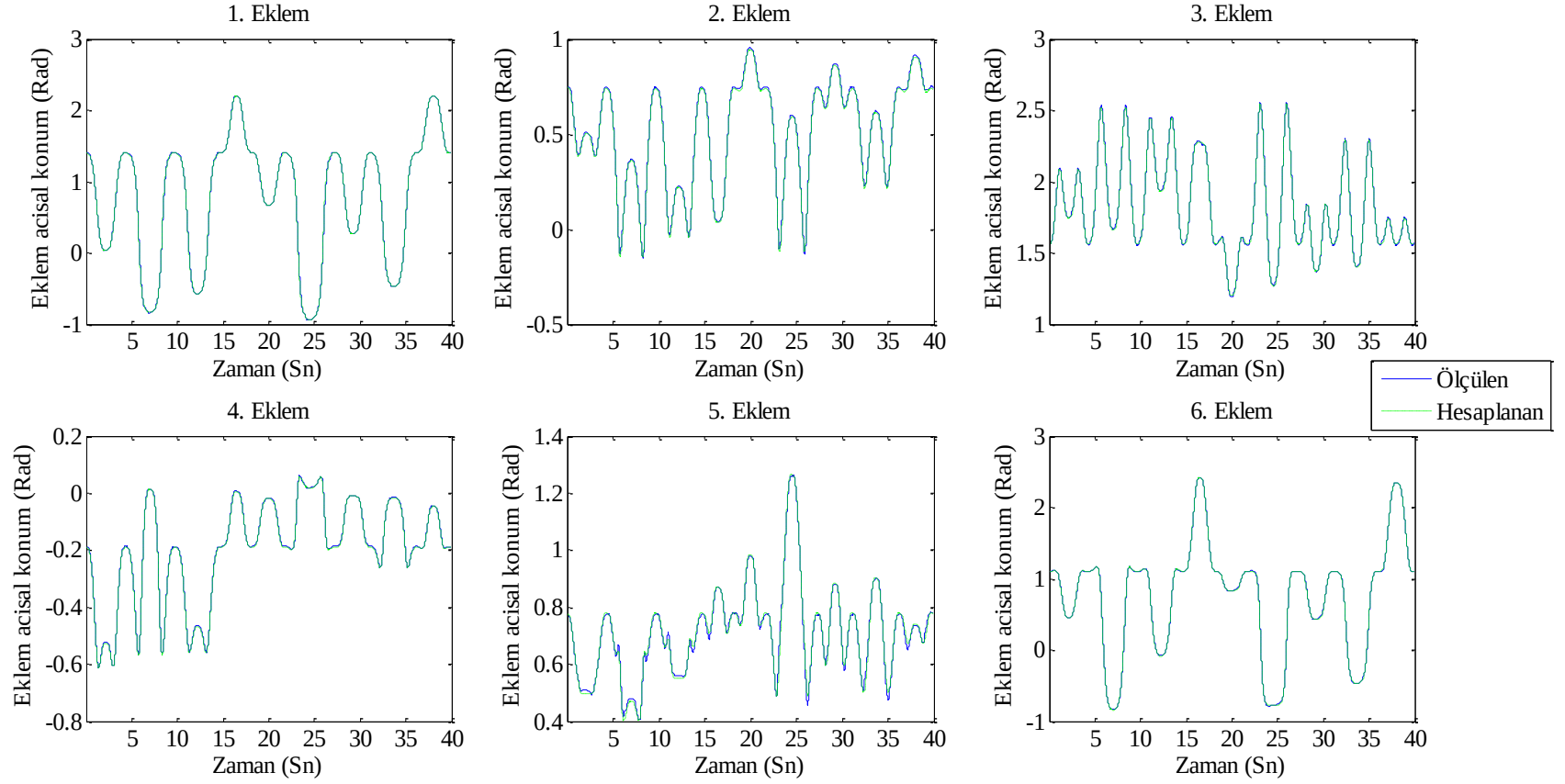
Şekil D 2.22 : Uç nokta konum % hata grafikleri(5kg - %60).



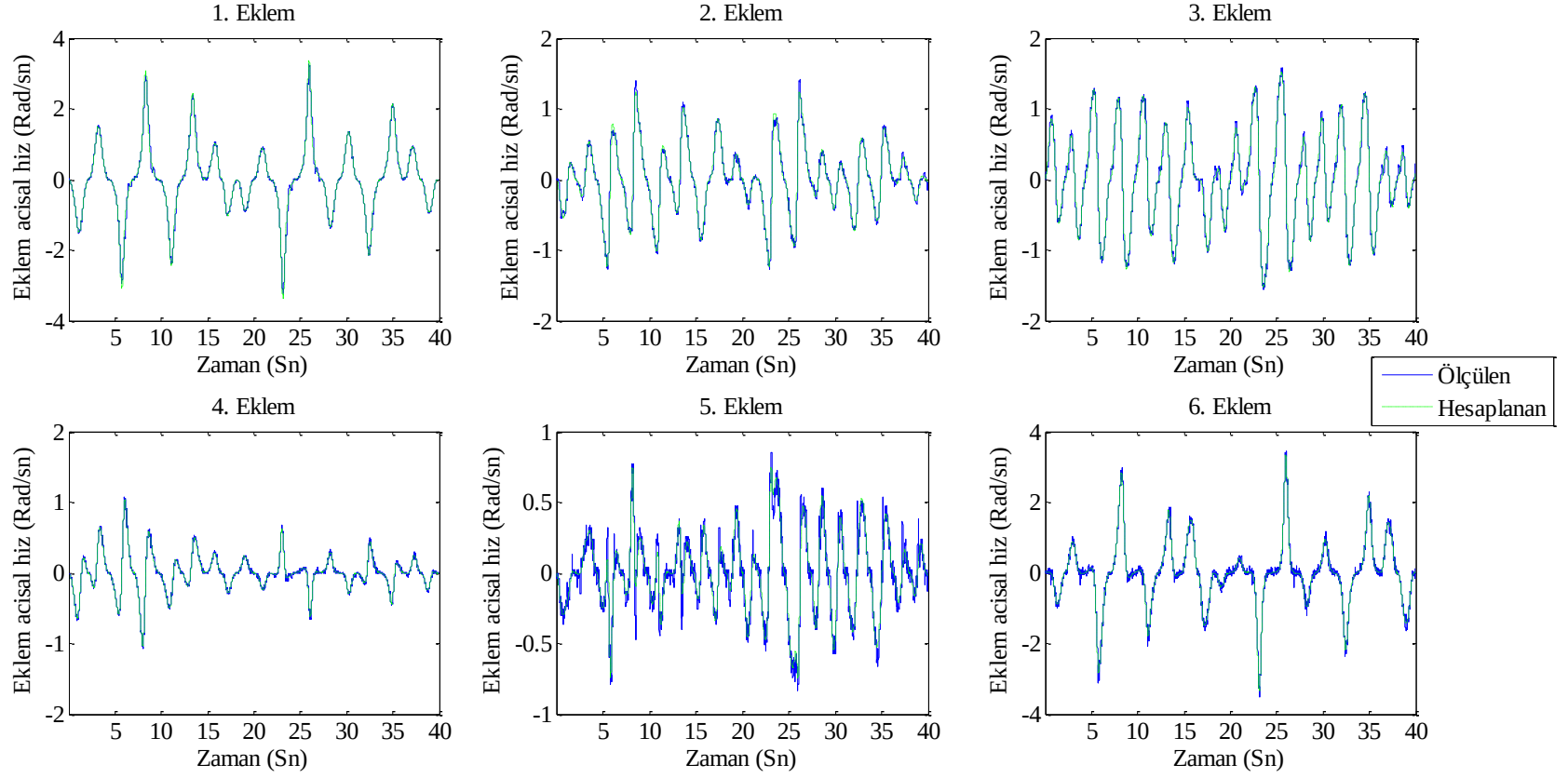
Şekil D 2.23 : Uç nokta hız grafikleri(5kg - %60).



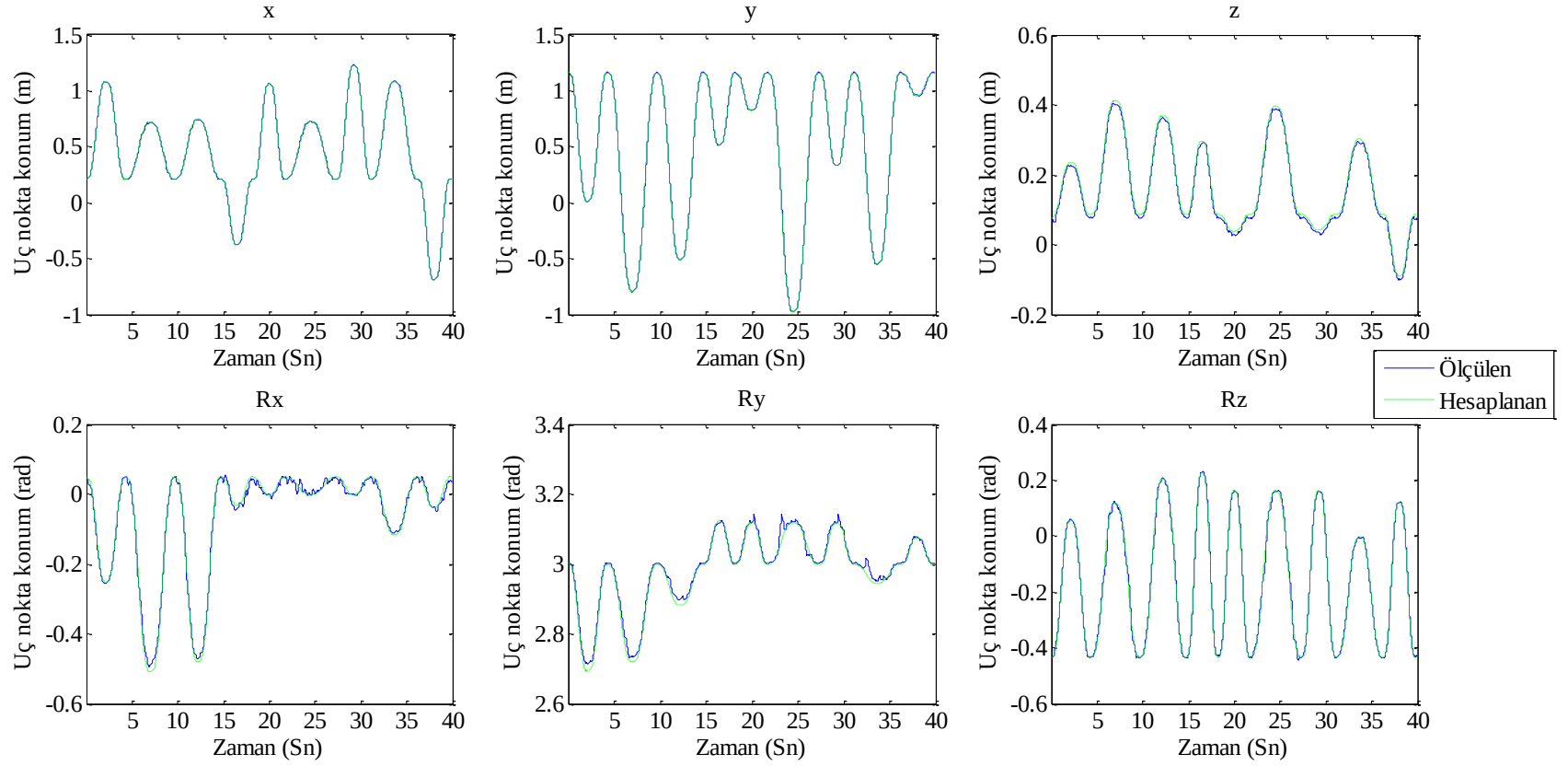
Şekil D 2.24 : Tüm eklemlerin tork grafikleri(5kg - %60).



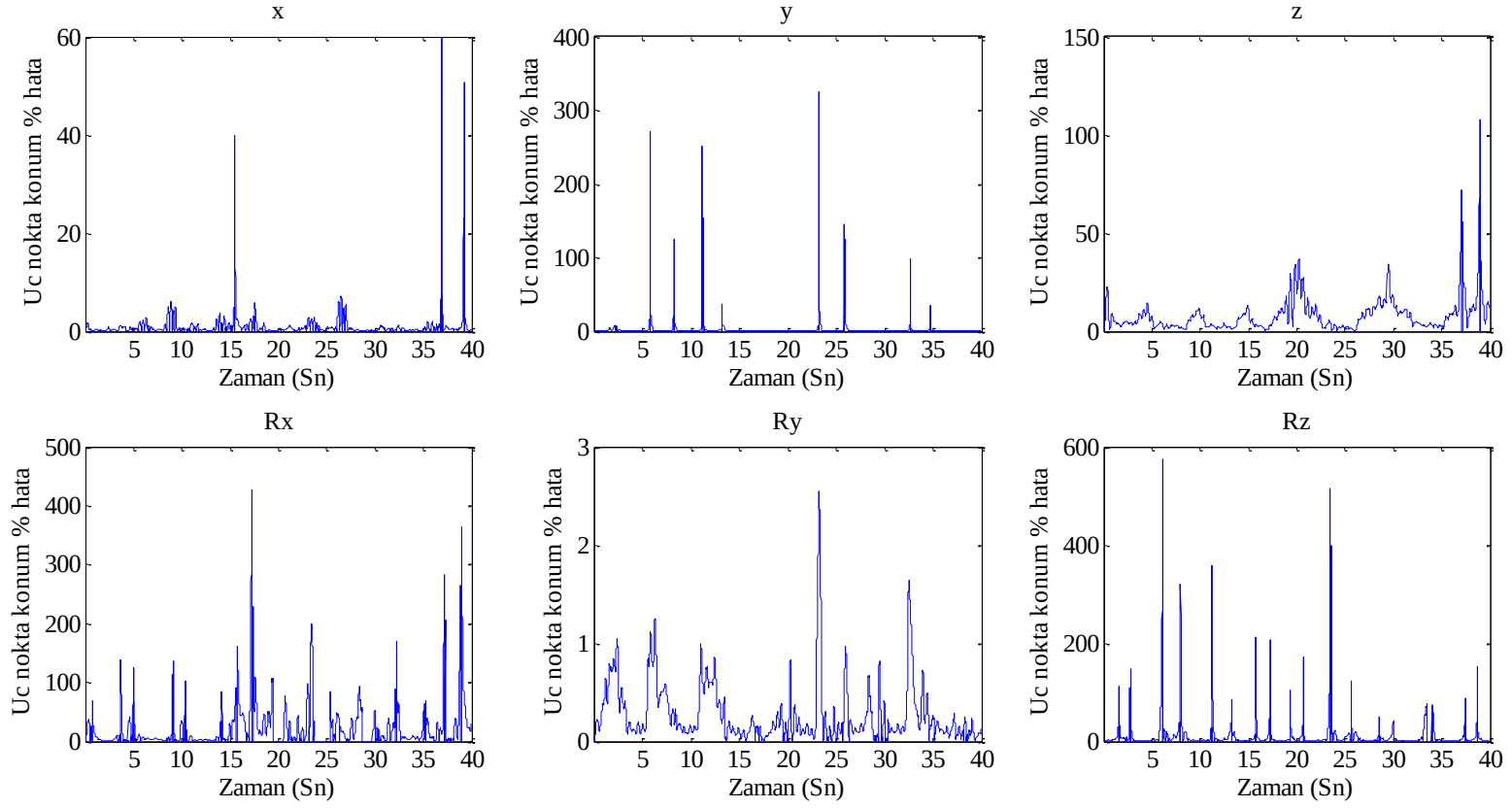
Şekil D 2.25 : Tüm eklemlerin açısai konum grafikleri(5kg - %100).



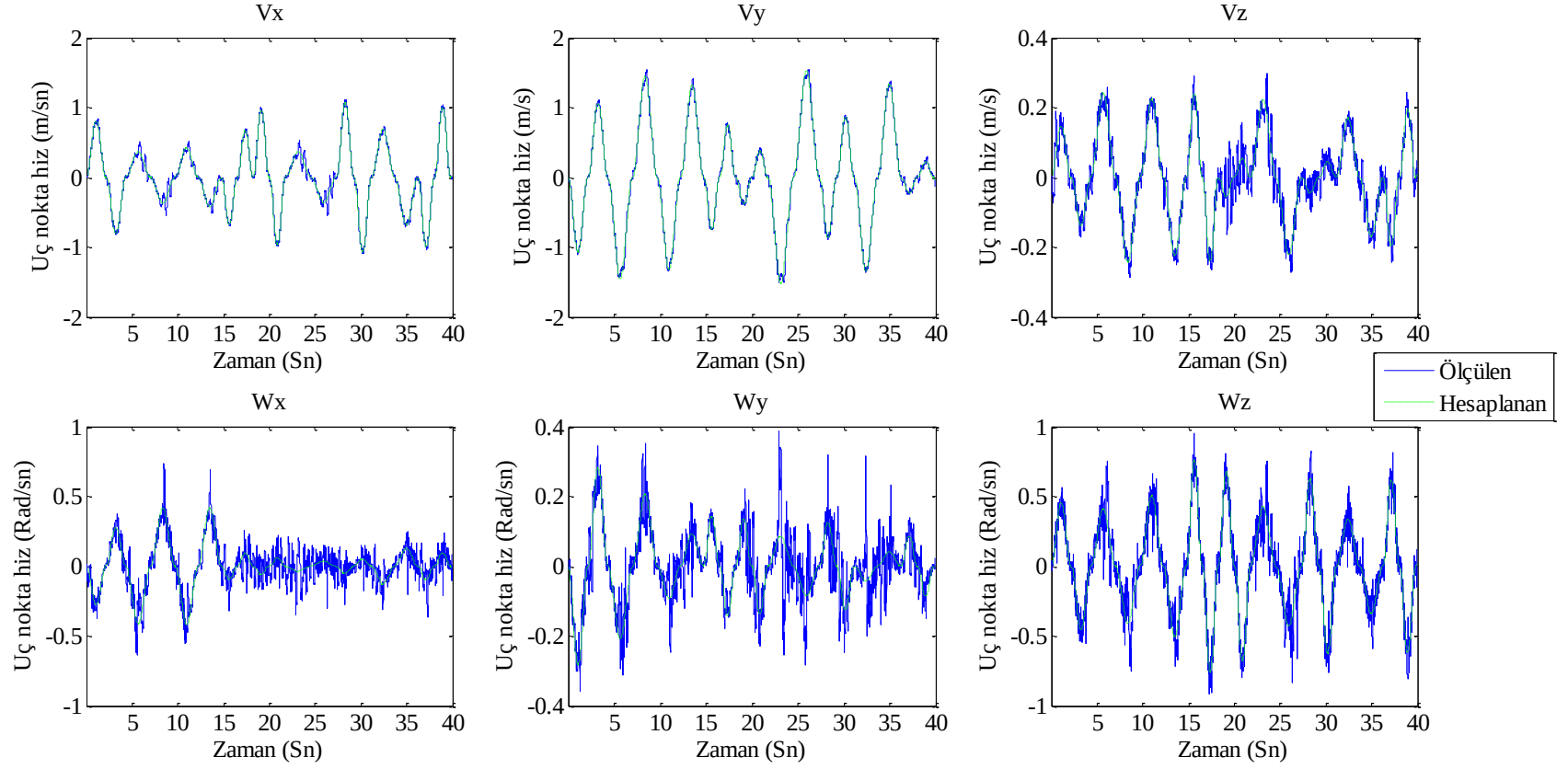
Şekil D 2.26 : Tüm eklemlerin açısai hız grafikleri(5kg - %100).



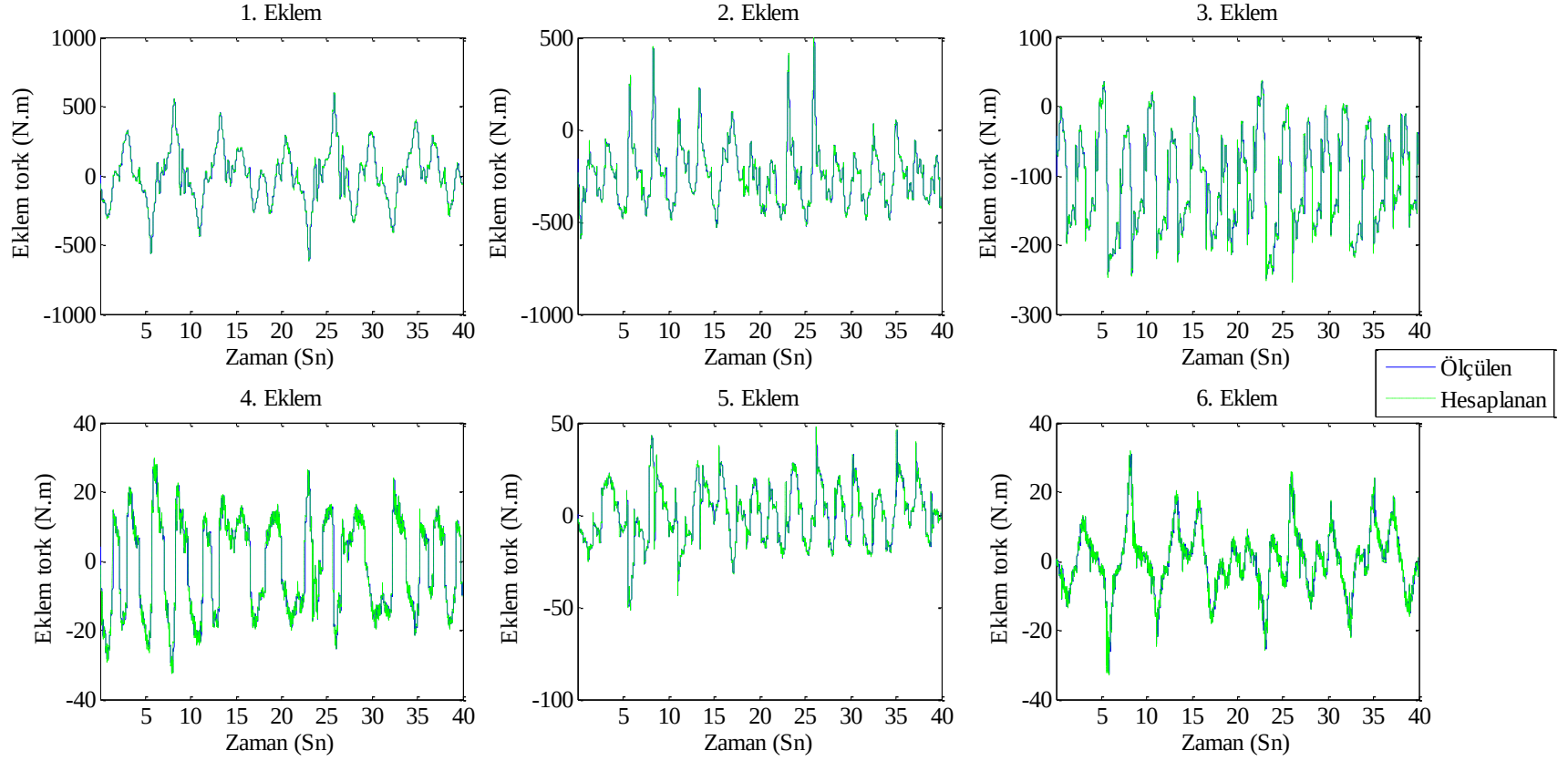
Şekil D 2.27 : Uç nokta konum grafikleri(5kg - %100).



Şekil D 2.28 : Uç nokta konum % hata grafikleri(5kg - %100).



Şekil D 2.29 : Uç nokta hız grafikleri(5kg - %100).



Şekil D 2.30 : Tüm eklemlerin tork grafikleri(5kg - %100).

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Egemen ZENGİN

Doğum Yeri ve Tarihi: Fatih – 21.04.1986

Adres: Kiptas Seyrantepe Konutları Maltepe – İstanbul

E-Posta: egemenzengin@hotmail.com

Lisans: Dokuz Eylül Üniversitesi