



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# Tepki kuvveti gözetleyici tabanlı tork kontrolü

## *Reaction force observer based torque control*

*Yazarlar (Authors):* Erim Can ÖZÇINAR<sup>1</sup>, Barkan UĞURLU<sup>2</sup>

*ORCID<sup>1</sup>:* 0000-0003-4720-8725

*ORCID<sup>2</sup>:* 0000-0002-9124-7441

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Özçınar E. C., ve Uğurlu B., “Tepki kuvveti gözetleyici tabanlı tork kontrolü”, *Politeknik Dergisi*, 24(4): 1629-1635, (2021).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.848036

# Tepki Kuvveti Gözetleyici Tabanlı Tork Kontrolü

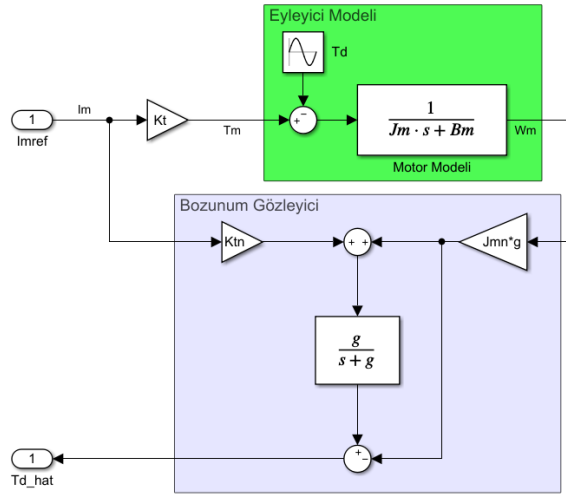
## Reaction Force Observer based Torque Control

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Tepki kuvveti gözetleyici tasarımı. (Design of a reaction force observer.)
- ❖ Sürtünme kuvveti kompanzasyonu. (Frictional force compensation.)
- ❖ Tepki kuvveti gözetleyicisinin uygulanması. (Implementation of the reaction force observer.)
- ❖ Tork kontrolcüsünün deneysel verilerle sınanması. (Validation of the torque control via experimental data.)

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bozunum gözetleyicisi, dış kuvvetlerin kestirimini sistem modelinin tersini kullanarak elde eden bir yöntemdir. (Disturbance observer is a method that estimates external forces through the use of inverse of the plant model.)



Şekil. 1: Bozunum gözetleyici blok diyagramı / Figure. 1: Block diagram of a disturbance observer.

### Amaç (Aim)

Bu araştırmanın temel amacı tepki kuvveti gözetleyicisi ile tork sensöründen geri besleme almaksızın bir tork kontrolcüsü sentezlemek ve kontrolcünün performansını sınamaktır. (The main objective of this research is to synthesize a torque controller without a feedback from a torque sensor and test its performance.)

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Tepki kuvveti gözetleyicisi kullanılarak bir tork kontrolcüsü sentezlenmiştir. (A torque controller was synthesized using a reaction force observer.)

### Özgünlük (Originality)

Bu çalışmanın özgünlüğü, geri sürülebilir olmayan sistemlerde uygulanışı teknik zorluklar içeren tepki kuvveti gözetleyici tabanlı bir kontrolcünün geri sürülebilir olmayan bir sisteme uygulanmasıdır. (The novelty of this research is to synthesize a reaction force observer-based controller for a non-backdrivable system.)

### Bulgular (Findings)

Tepki kuvveti gözetleyici bazlı tork kontrolünün deneysel performansı Coulomb sürtünmesinin kompanzasyonuna bağlıdır. (Experimental performance of a reaction force observer-based controller depends on friction compensation.)

### Sonuç (Conclusion)

Tepki kuvveti gözetleyici tabanlı tork kontrolcüsü tasarlanmış ve pratikteki uygulaması tartışılmıştır. (A reaction force observer-based torque controller was designed and its experimental implementation was discussed.)

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Tepki Kuvveti Gözetleyicisi Tabanlı Tork Kontrolü

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Erim Can ÖZÇINAR\*, Barkan Uğurlu<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Özyeğin Üniversitesi, Biyomekatronik Laboratuvarı,  
Makina Mühendisliği Bölümü, Çekmeköy, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> Özyeğin Üniversitesi, Biyomekatronik Laboratuvarı,  
Makina Mühendisliği Bölümü, Çekmeköy, İstanbul, Türkiye

(Geliş/Received : 29.12.2020 ; Kabul/Accepted : 21.06.2021 ; Erken Görünüm/Early View : 02.07.2021)

## ÖZ

Bu makalede tepki kuvveti gözetleyicisi baz alınarak bir tork kontrolcüsü tasarlanmış ve etkinliği geri sürülebilir olmayan bir eyleyici ünitesi üzerinde deneysel olarak sınanmıştır. Fiziksel insan-robot etkileşimi için son derece yüksek bir öneme haiz olan tork kontrolü için genellikle tork sensörleri veya özel olarak üretilen burulma yayları kullanılmaktadır. Bu ekipmanlar ise hem sistemi karmaşıktırmakta, hem de toplam ağırlığı arttırmaktadır. Tepki kuvveti gözetleyici yöntemi ise sisteme etkiyen dış kuvvetleri kestirebilmekte ve bu sayede sensör kullanmaksızın tork kontrolünün uygulanmasına olanak sağlamaktadır. Bu kestirim genellikle geri sürülebilir sistemlerde daha sağlıklı işlemektedir, dolayısıyla geri sürülemeyen sistemlerde (örneğin 1:100 dişli oranlı sistemler) uygulaması sınırlıdır. Bu noktadan hareketle, geri sürülemeyen bir sistem için tepki kuvveti gözetleyicisi bazlı bir tork kontrolü tasarlanmış ve uygulanmıştır. Sonuç olarak sürtünme kompanzasyonu sağlandığında tepki kuvveti gözetleyicisinin tork kontrolünü sağlayabildiği deneysel bulgular ışığında saptanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Tork kontrolü, tepki kuvveti gözetleyici, bozunum gözetleyici, sürtünme kompanzasyonu.

## Reaction Force Observer based Torque Control

### ABSTRACT

In this article, a reaction force observer-based torque controller was designed and experimentally implemented to a non-backdrivable actuator unit. Torque control is of importance when considering physical human-robot interaction and researchers usually use torque sensors or custom-built torsional springs. These elements lead to relatively more complicated systems and increase the total weight. In contrast, reaction force observers can estimate external forces acting on the system and thus enable torque control with no need of torque sensing. The estimation process performs better for backdrivable systems, therefore, its implementation to non-backdrivable systems, e.g., systems with a gear ratio of 1:100, is limited. To remedy this issue, a reaction force observer-based torque controller was designed and implemented. As a result, experimental data showed that reaction force observer leads to favorable torque control performance when supported with friction compensation.

**Keywords:** Torque control, reaction force observer, disturbance observer, friction compensation.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünya’da Kuvvet kontrolü ve tork kontrolü, fiziksel insan-robot etkileşiminin etkin bir şekilde yürütülebilmesi için son derece yüksek öneme haiz hususlardır [1]. Robot uç noktasına eklenen kuvvet sensöründen alınan geri besleme ile yapılan kuvvet kontrolü tek bir noktada etkisini gösterebilirken eklem seviyesinde gerçekleştirilen tork kontrolünün etkinliği daha geniş bir skalada gözlemlenebilir [2]. Ancak, eklem kontrolünü gerçekleştirmek için kullanılan tork sensörleri eyleyici ünitesinin oldukça karmaşıklaşmasına yol açarlar [2], ve bu sensörlerin kalibrasyonu da oldukça zorlu işlemleri barındırır [3]. Bu duruma alternatif olarak kullanılan burulma yayları ise sistemin toplam ağırlığını arttırmakla beraber ikincil bir dönel kodlayıcının kullanımını zorunlu hale getirmektedir [4].

Bozunum gözetleyici (İng.: disturbance observer), yüksek performanslı ve dayanıklı kuvvet kontrolcülerinin sentezlenmesine olanak veren en etkili

yöntemlerden bir tanesidir [5]. Bozunum gözetleyicinin iç ve dış çevrim kontrolünde ayrı ayrı kullanıldığı ve Tepki Kuvveti Gözetleyicisi olarak adlandırılan yöntemde ise kontrol edilecek sistemin modelinin tersi kullanılarak sisteme etki eden iç ve dış bozucu kuvvetleri kestirmek mümkündür. Kestirimi gerçekleştirilen bu kuvvetlerin sisteme iç çevrimde geri beslenmesiyle bastırılmaları sağlanır, dış çevrimde geri beslenmesiyle de performans metrikleri karşılanır. Hem kararlılığı hem de gürbüzlüğü kanıtlanmış olan bu yöntem, insanı robotlardan rehabilitasyon robotlarına uzanan geniş bir yelpazedeki mekatronik sistemlerin kontrolünde uzun bir süredir kullanılmaktadır [6-9].

Tepki kuvveti gözetleyicinin sadece motor tarafındaki dönel kodlayıcı verisini kullanması tork sensörüne olan ihtiyacı ortadan kaldırdığı için oldukça büyük bir avantaj sağlamaktadır [10]. Bu yöntemin en temel dezavantajı ise geri sürülebilir olmayan sistemlerde, örneğin 1:100 dişli oranına sahip elektrik tahrikli eyleyicilerde, istenen performansı verememesidir [11]. Bunun en temel sebebi ise etkileşim kuvvetlerinin dönel kodlayıcı tarafında herhangi bir etki yaratamaması ve dolayısıyla,

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : barkan.ugurlu@ozyegin.edu.tr

gözetleyicinin herhangi bir kestirimde bulunamaması gösterilmektedir.

Sürtünme kompanzasyonu ile geri sürülemeden sistemlerin geri sürdürülebilirlikleri oldukça geliştirilebilir [9]. Bu metodun uygulamasında hem Coulomb sürtünmesi hem de viskoz sürtünme kuvvetleri kompanze edilmektedir. Sürtünme kompanzasyonu kullanılarak tepki kuvveti gözleyicisinin performansı geri sürülemeden sistemler için artırılabilir. Bu noktadan hareketle, bu çalışmada, 1:100 dönüştürme oranına sahip bir dişli içeren fırçasız motorlu elektrikli bir tahrik ünitesi için tepki kuvveti gözleyicisi bazlı tork kontrolünün, sürtünme kompanzasyonu ile birlikte uygulanması hedeflenmiştir. Bu çalışmanın özgünlüğü, geri sürülebilir olmayan sistemlerde uygulanan teknik zorluklar içeren tork sensörsüz tork kontrolünün, tepki kuvveti gözleyicisi ve sürtünme kompanzasyonu yöntemlerinin entegrasyonu ile sentezlenmesi ve geri sürülebilir olmayan bir sistem için deneysel olarak uygulanmasıdır. Böylelikle, tork ölçümüne duyulan gereksinimin ne derece ortadan kaldırılıp kaldırılamayacağı deneysel olarak sınılanmıştır.

Bu makalenin ikinci bölümünde tepki kuvveti gözleyici tabanlı tork kontrolü alt birimleriyle beraber açıklanmıştır. Üçüncü bölümde ise sunulan kontrolcü deneysel olarak sınılanmış ve bulgular sunulmuştur. Makale dördüncü bölümde sonuçlandırılmıştır.

## 2. TEPKİ KUVVETİ GÖZETLEYİCİSİ TABANLI TORK KONTROLÜ (REACTION FORCE OBSERVER-BASED TORQUE CONTROL)

Tepki kuvveti gözleyici tabanlı kontrol, bozunum gözleyici, sürtünme kompanzasyonu ve tepki kuvveti gözleyici ana bloğunu içermektedir. Bu bölümde bu alt birimler ayrı ayrı açıklanmaktadır.

### 2.1 Bozunum Gözetleyici (Disturbance Observer)

Bozunum gözleyicisinin iç yapısı Şekil 1'de görülmektedir. Bu şekilde,  $\omega_m$ ,  $I_m$ ,  $I_{mref}$ ,  $J_m$ ,  $B_m$ ,  $K_t$  ve  $g$  sırası ile motor çıkış hızı, motor akımı, referans motor akımı, rotorun atalet momenti, rotorun viskoz sürtünme katsayısı, tork sabiti ve alçak geçiren filtre frekansı niceliklerine karşılık gelmektedir.  $J_{mn}$  ve  $K_{tn}$  ise  $J_m$  ve  $K_t$  parametrelerinin nominal değerleridir.  $T_m$ ,  $T_d$  ve  $\hat{T}_d$  ise motor torku, bozucu etkilerin toplam tork girdisi ve bu bozucu etkilerin bozunum gözleyici tarafından kestirimi olarak karşımıza çıkar. Bozunum gözleyicisi sistemden çıktı olarak alınan eyleyici hız verisini ve sistem modelinin tersini kullanarak  $\hat{T}_d$  değerinin kestirimini sağlar. Kestirimini sağladığı tork çıktısı sisteme geri beslenerek dış kuvvetlerin ve sistem belirsizliklerinin etkisi giderilebilir. Bu sayede, uygulanabilecek kontrol yöntemlerinin etkinlikleri önemli derecede artırılabilir [7].

Bozunum gözleyicisinin çıkışı, Şekil 1 göz önüne alındığında aşağıdaki gibi ifade edilir [9]:

$$\hat{T}_d = g\omega_m J_m - \frac{g}{s+g} (K_{tn} I_m + g\omega_m J_m) \quad (1)$$

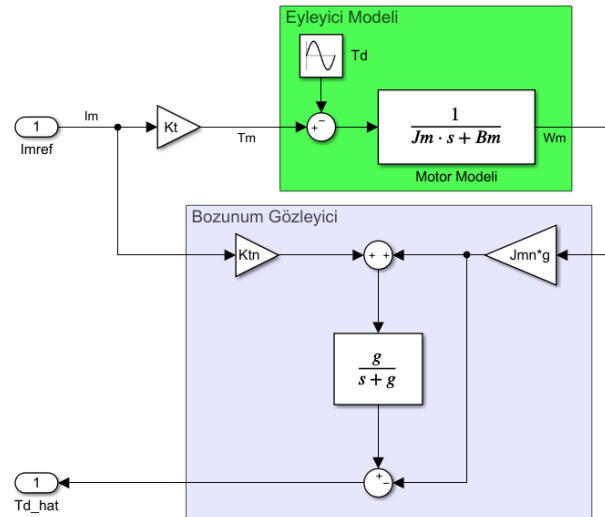
Denklem (1)'deki  $s$  Laplace operatörüdür. Bu denklemdeki parantez aşağıdaki gibi açılabilir:

$$\hat{T}_d = \omega_m J_m \frac{s}{\frac{1}{g}s+1} - \frac{1}{\frac{1}{g}s+1} K_{tn} I_m \quad (2)$$

Eğer nominal  $K_{tn}$  değeri gerçek  $K_t$  değerine yeterince yakınsa  $K_{tn} I_m \cong K_t I_m = T_m$  ifadesi sağlanır. Ayrıca filtre frekansı yeterince büyük seçilirse  $\frac{1}{g}$  değeri sıfıra yakınsar. Bu halde, denklem (2) şu şekilde ifade edilebilir:

$$\hat{T}_d \cong \omega_m J_m - T_m = T_d \quad (3)$$

Alçak geçiren filtre frekansının seçimi yapılırken hız ölçümünden kaynaklı gürültünün bastırılabilmesi için görece düşük, üstte bahsedilen kestirimin düzgün çalışabilmesi için de mümkün merteye yüksek seçilmesi gereklidir. Dolayısıyla bu seçim, bahse konu iki kriterin ödünleşmesi şeklinde deneysel olarak gerçekleştirilmelidir. Genellikle gürültü sorunu yaratmayacak en yüksek değer seçilir.



Şekil 1: Bozunum gözleyicisinin blok diyagramı (Block diagram of a disturbance observer)

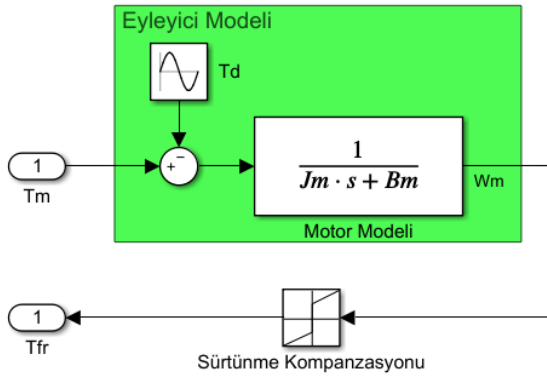
### 2.2 Sürtünme Kompanzasyonu (Friction Compensation)

Sürtünme kompanzasyonu, sistem üzerine etki eden Coulomb ve viskoz sürtünmelerinin etkilerini ortadan kaldırmak amacı ile kullanılır. Sisteme etki eden toplam sürtünme kuvveti denklem (4)'te gösterildiği gibi ifade edilebilir.

$$T_{fr} = \text{sign}(\omega_m)(\mu|\omega_m| + T_c) \quad (4)$$

Bu denklemde  $\omega_m$  motorun hız verisini,  $T_c$  sisteme etki eden Coulomb sürtünmesini,  $\mu$  viskoz sürtünme katsayısını ve  $T_{fr}$  ise toplam sürtünme kuvvetini belirtmektedir.

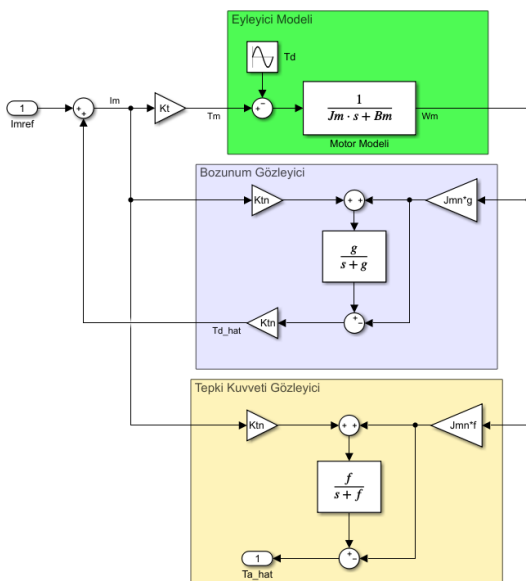
Sistem, dış kuvvet ve benzeri bir bozucu etki altında değilken, girişinden rampa girdisi verildiğinde bozunum gözetleyici sürtünme karakteristiğinin deneysel olarak eldesini sağlar [9]. Daha sonra bu sürtünme modeli ile elde eden kontrol sistemine eklenerek sisteme etki eden sürtünmeler kompanze edilmiş olur; bkz. Şekil 2.



Şekil 2: Sürtünme kompanzasyonu için oluşturulan basitleştirilmiş blok diyagramı (A simplified block diagram for friction compensation)

### 2.3 Tepki Kuvveti Gözetleyici (Reaction Force Observer)

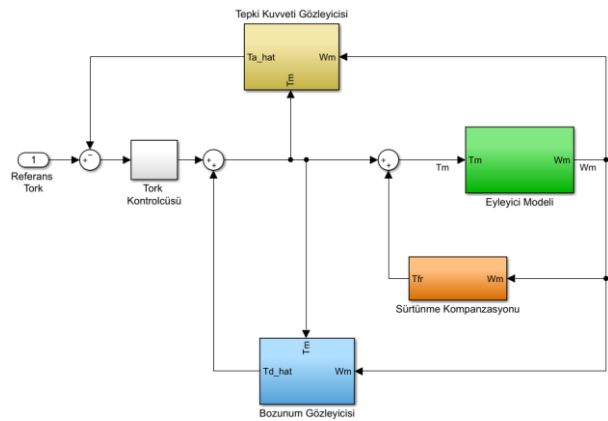
Tepki kuvveti gözlemcisinin iç yapısı Şekil 3'te görülmektedir. Temelde, tepki kuvveti gözetleyicisi, bozunum gözetleyicisinin hem iç hem de dış döngüde kullanımı prensibine dayanır. İç döngüdeki bozunum gözetleyicinin çıkışı sisteme geri beslenerek sistem üzerindeki belirsizliklerin giderilmesi sağlanır. Dış döngüdeki bozunum gözetleyicisi ise bu sayede sadece sisteme etkileyen dış kuvvetlerin kestirimini sağlar ve bir nevi kuvvet sensörü görevi görür. Şekil 3'te  $f$  tepki kuvveti gözetleyicisinin alçak geçiren filtre frekansını,  $\hat{T}_a$  ise tepki kuvveti kestirimini belirtmektedir.



Şekil 3: Tepki kuvveti gözetleyicisinin blok diyagramı (Block diagram of a reaction force observer)

### 2.4 Tepki Kuvveti Gözetleyicisi ve Sürtünme Kompanzasyonu (Reaction Force Observer And Friction Compensation)

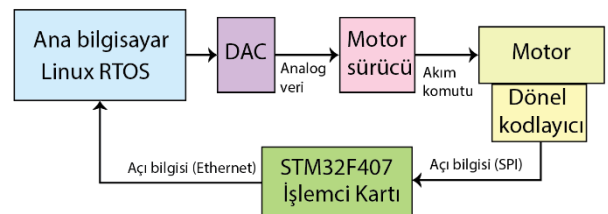
Sürtünme kompanzasyonu ile birlikte uygulanmış olan tepki kuvveti gözetleyicisi bazlı tork kontrolünün blok diyagramı Şekil 4'te gösterilmiştir. Bu blok diyagramında görüldüğü üzere bozunum gözetleyicisi bloğu girdi olarak eyleyici hız verisi ve eyleyici modeli bloğunun tork girdisini almaktadır. Böylelikle sistem üzerine etki eden dış kuvvetlerin ve sistem belirsizliklerinin kestirimini yapmakta ve kestirimini yaptığı bu değeri sisteme geri beslemektedir. Bu geri besleme sayesinde sisteme etki eden dış kuvvetlerin ve sistem belirsizliklerinin etkisi kompanze edilmiş olur. Aynı zamanda, tepki kuvveti gözetleyicisi bloğu ise bozunum gözleyicisi bloğunda olduğu gibi, girdi olarak eyleyici hız verisi ve eyleyici modeli bloğunun tork girdisini alarak kestirimini sağladığı tepki torku değerini kontrolcüye geri besler. Bu sayede eyleyicinin tork kontrolü gerçekleşir. Bunun dışında sürtünme kompanzasyonu bloğu, sistemin Coulomb sürtünmesini kompanze ettiği için sistemin geri sürülebilirliği pozitif yönde etkilenir. Bu sayede tepki kuvveti gözetleyicisinin performansı artar.



Şekil 4: Tepki kuvveti gözleyicisi tabanlı tork kontrolcüsü ve sürtünme kompanzasyonunun entegre edildiği basitleştirilmiş blok diyagramı (A simplified block diagram that depicts the integration of a reaction force observer and friction compensator)

## 3. DENEYSEL BULGULAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

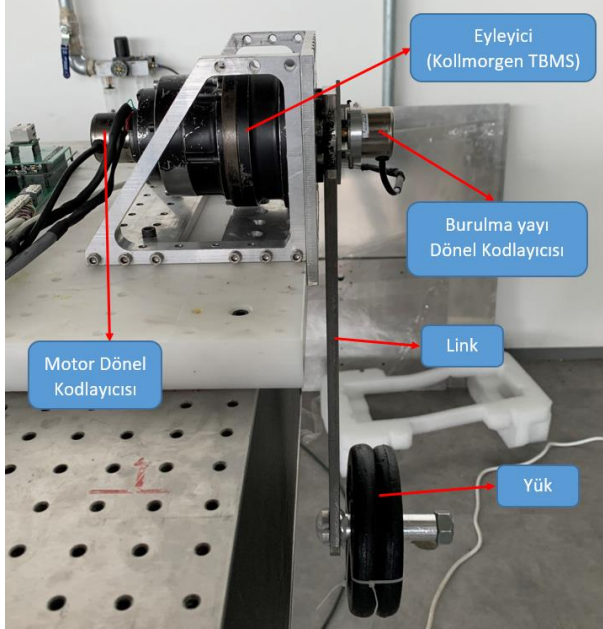
### 3.1 Deneysel Düzenek (Experimental Setup)



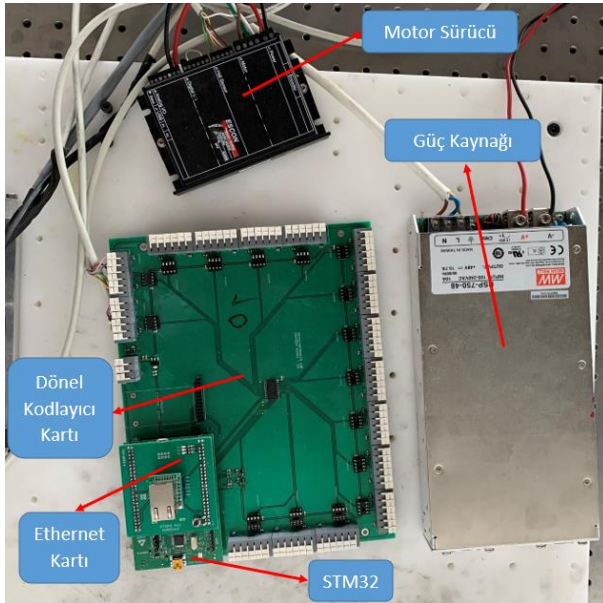
Şekil 5: Deneysel düzenek genel blok diyagramı (Block diagram of the experimental setup)



Sunulan kontrolcünün sınanması için gerekli olan düzenele ilgili blok diyagramı Şekil 5’te görülebilir. Bu blok diyagramındaki fiziksel bileşenler ise Şekil 6 ve 7’de gösterilmektedir. Sistemin parametreleri ise Tablo 1’de listelenmiştir.



Şekil. 6: Deney düzeneğinin mekanik yapısı (Mechanical structure of the experimental setup)



Şekil. 7: Deney düzeneğinde kullanılan donanım bileşenleri (Hardware elements used in the experimental setup)

Bu düzenekte görülmekte olan eyleyici, Kollmorgen TBMS-7631 fırçasız motoru ve 1:100 orana sahip harmonik dişliden (Harmonic Drive CSG-25-2A-100) oluşmaktadır. Eyleyici içerisinde bulunan motor dönel kodlayıcısı (enkoderi) motorun pozisyon verisini almak için eyleyicinin arka tarafına yerleştirilmiştir. Aynı zamanda, çıkış linki eyleyicinin ön tarafına bağlanmıştır ve eyleyiciye mekanik yük bağlamak için

kullanılmaktadır; bkz. Şekil 6. Şekil 7’de görülmekte olan motor sürücü, eyleyici ünitesinin içinde bulunan Kollmorgen TBMS-7631 fırçasız motorunu sürmek için kullanılmaktadır.

Eyleyici ünitesi içerisinde bir adet özel yapım burulma yayı ve bu yaydaki burulmayı ölçen ek bir dönel kodlayıcı da bulunmaktadır [4]. Bu yay ve dönel kodlayıcı sayesinde çıkış torku ölçülebilmektedir ancak bu çalışmadaki temel amaç bu ek komponentleri kullanmaksızın tork kontrolünü sağlayabilmek ve bu komponentlerin sistemden elimine edilmelerinin önünü açmaktır.

Şekil 7’de görülmekte olan STM32 kartı, SPI (İng. Serial Peripheral Interface) arayüzü yardımı ile dönel kodlayıcıdan veri okunması ve Ethernet modülü yardımı ile de okunan verilerin Linux tabanlı gerçek zamanlı işletim sistemi (RTOS) içeren ana bilgisayara aktarılması işleri için kullanılmıştır. İşletim sistemi 1 kHz örnekleme frekansında sistemin kontrolünü sağlamaktadır.

Tablo 1: Sistem ve kontrolcü parametreleri (System and controller parameters)

Parametre	Açıklama	Değer
$T_{max}$	En yüksek sürekli durma momenti	169 Nm
$J_{mn}$	Rotor atalet momenti	0.0002781 kg m <sup>2</sup>
$K_{tn}$	Tork katsayısı	0.175 Nm/A
$K_{bn}$	Zıt elektromotor kuvveti katsayısı	0.123 Vs/rad
$B_m$	Rotor viskoz sürtünmesi	0.0015 Nms/rad
$g$	Bozunum gözleyici frekansı	439.82 rad/s
$f$	Tepki kuvveti gözleyici frekansı	6.28 rad/s
$K_p$	Tork kontrolcüsü oransal kazanç	1
$K_i$	Tork kontrolcüsü integral kazanç	7
$L_m$	Motorun endüktansı	0.55 mH
$R_m$	Motorun iç direnci	0.388 Ohm
$V_i$	Besleme gerilimi	48 V DC
$I_{max}$	En yüksek sürekli akım	11.1 A DC

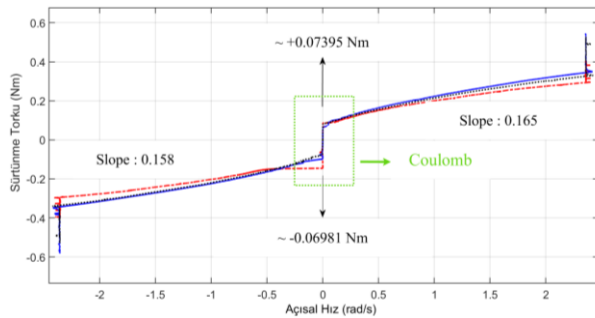
Normal koşullarda STM32 işlemci kartı, bir motordan oluşan sistemin tüm kontrol işlemlerini ve veri alışverişini yapabilecek kapasitededir. Ancak birden fazla motor içeren çok eklemlili sistemlerin tüm veri alışverişini ve kontrol işlemlerini kaldıramaz. Bu hususta, dönel kodlayıcıların 39-bit uzunluğunda bir veri sağladığı; bu verinin aynı anda tüm eklemlerden eş zamanlı toplanabilmesi ve 1 ms’lik bir döngü içerisinde kontrolcüye iletilebilmesi için Ethernet hızına ihtiyaç olduğu dikkate alınmalıdır. Bu sebeple, bahse konu kontrolcü ilerde çok eklemlili robotlara uyarlanacağından

ötürü dönel kodlayıcı verileri Ethernet üzerinden ana bilgisayara aktarılmakta ve ana bilgisayarda merkezi kontrol işlemi gerçekleştirilmektedir.

### 3.2 Sürtünme Karakterizasyonu (Friction Characterization)

İkinci bölümde özetlendiği üzere tepki kuvveti gözleyicisinin yüksek dişli oranlı sistemimizde düzgün sonuç vermesi için sistemin sürtünmesinin karakterize edilmesi gerekmektedir. Bu sebeple farklı rampa girdileriyle sistem hareket ettirilmiş, Coulomb ve viskoz sürtünme karakteristikleri deneysel olarak edinilmiştir. Bu sonuçlar Şekil 8’de görülmektedir:

Bu şekildeki mavi, kırmızı ve siyah çizgiler sürtünme torkunun açısal hıza göre değişimini farklı rampa girdi değerlerine göre vermektedir. Bu girdilerden bağımsız olarak Coulomb ve viskoz sürtünme modelleri birbirine yakın çıkmaktadır. Ancak model denklem (4)’te ifade edildiği gibi simetrik çıkmamıştır. Pozitif ve negatif yöndeki Coulomb sürtünmesi ile viskoz sürtünme katsayılarının farklı olduğu gözlemlenmiştir. Coulomb sürtünmesi pozitif yönde 0.07395 Nm iken negatif yönde 0.06981 Nm olarak karşımıza çıkmıştır. Keza, viskoz sürtünme katsayısı pozitif yönde 0.165 iken negatif yönde 0.158’dir. Buna sebep olarak robotun montajı esnasındaki engellenemeyen teknik aksaklıklar gösterilebilir, ancak bahse konu değerler birbirlerine görece yakındır.



Şekil. 8: Eyleyici ünitesinin sürtünme modelinin deneysel karakterizasyonu (Experimental friction characterization of the actuator unit)

Her ne kadar her iki yön için ortalama bir model kullanılabilir olsa da motorun dönüş yönüne göre farklı değerlerin kullanılması uygun görülmüştür. Dolayısıyla, basit bir if-else kontrol döngüsü kullanılarak farklı dönüş yönlerinde sürtünme modelinin parametre değerlerinin değişimi sağlanmıştır.

### 3.3 Tork Kestirimi (Torque Estimation)

Daha önce de bahsedildiği üzere eyleyici ünitesindeki burulma yayı ve bu yayın burulmasını ölçen dönel kodlayıcı ile tork ölçümü yapılabilmektedir. Ancak teklif edilen kontrolcü ile bu ek elemanlara gerek kalmadan tork kontrolü yapılması ve bu elemanların sistemden eliminasyonu hedeflenmiştir. Bu doğrultuda, tepki kuvveti gözleyicinin tork kestirim performansı

sinanmıştır. Şekil 9, tepki kuvveti gözleyicinin tork kestirim hatasını belirtmektedir.

Bu işlem için öncelikle tepki kuvveti gözleyici tabanlıya sıfır tork girdisi verilmiştir. Dolayısıyla eyleyicinin transparan davranması beklenmiştir. Eyleyici, görece olarak elle geri sürülebilir hale gelmiş olsa da tork kestirim hatası  $\mp 1.5 \text{ Nm}$  civarında ölçülmüştür. İlgili kısım Şekil 8’de sarı renkle tarı alanda belirtilmiştir. Akabinde  $t = 3.3 \text{ s}$  olduğunda ise tepki kuvveti gözleyici tabanlıya bir adım girdisi verilmiştir. Bu durumda ise tork kestirim hatasının sıfıra yakın bir değer aldığı gözlemlenmiştir.

Bu sonuçları yorumladığımızda ise kontrolcünün tork kestirim kapasitesinin %100 mekanik transparanlık sağlayamadığını, sıfır ve sıfıra yakın girdilerde  $1.5 \text{ Nm}$ ’ye varan hatalar verebileceğini söyleyebiliriz. Buna ana neden olarak ise eyleyici ünitelerinde tork kapasitesi arttırımı olarak sıkça kullanılan yüksek dişli oranını belirtebiliriz. Belirtmek gerekir ki, normal koşullarda oldukça düşük olan geri sürülebilirlik teklif edilen kontrolcü sayesinde olumlu yönde arttırılabilmektedir. Sıfıra yakın olmayan girdilerde ise (yaklaşık  $3 \text{ Nm}$  ve üstü) tork kestirim performansının oldukça uygun olduğu gözlemlenmiştir.

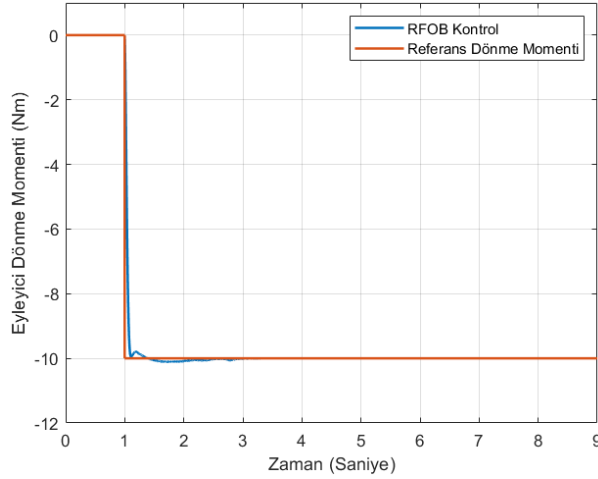


Şekil. 9: Tork kestirim hatası. Sarı taralı alan serbest hareketi göstermektedir (Torque estimation error. The yellow area indicates free movement)

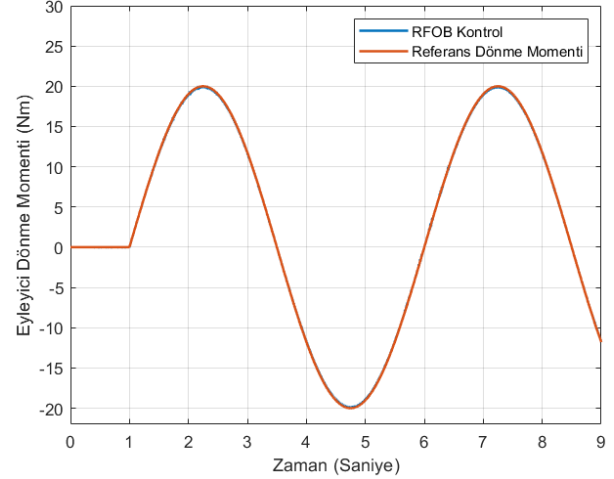
### 3.4 Basamak Girdi Bulguları (Step Input Results)

Sürtünme kompanzasyonu ile birlikte uygulanmış tepki kuvveti gözleyicisi bazlı tork kontrolcüsünün referans basamak girdisine göre performansı Şekil 10’da görülmektedir.

Bu deneyde basamak girdisinin değeri  $-10 \text{ Nm}$  olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, sistemin tork yanıtı verilen referans girdisini oldukça iyi takip etmiştir. Kalıcı durum hatası sıfıra yakın bulunmuştur. Kontrolcünün üst aşımı yaklaşık %1 civarında olup sistem kalıcı hale yaklaşık 0.18 saniyede ulaşmıştır. Bu bulgudan hareketle teklif edilen kontrolcünün sistemin tork kontrolünü layıkı ile başardığı gözlemlenmiştir.



**Şekil. 10:** Referans basamak girdisine göre sürtünme kompanzasyonu ile birlikte uygulanmış tepki kuvveti gözleyicisi bazlı tork kontrolcüsü performansı (Step input performance of the reaction force observer based control)



**Şekil. 11:** Referans sinüs girdisine göre sürtünme kompanzasyonu ile birlikte uygulanmış tepki kuvveti gözleyicisi bazlı tork kontrolcüsü performansı (Sine input performance of the reaction force observer based control)

### 3.5 Sinüs Girdi Bulguları (Sine Input Results)

Sürtünme kompanzasyonu ile birlikte uygulanmış tepki kuvveti gözleyicisi bazlı tork kontrolcüsünün referans sinüs girdisine göre performansı ise Şekil 11'de gösterilmiştir. Bu deneyde sinüs girdisinin genliği 20 Nm olarak, frekansı ise 0.2 Hz olarak belirlenmiştir. Bahse konu kontrolcünün dış iskelet robotlarda kullanımı hedeflendiğinden ve bu robotların genellikle düşük hızlarda hareket etmeleri beklendiğinden daha yüksek frekanslarda deney gerçekleştirilmemiştir.

Bu deneyin sonucunda ise kontrolcünün zamana bağlı girdileri de başarılı bir şekilde takip edebildiği görülmüştür. Genel olarak tork takip hatası 0.01 Nm' yi aşmamıştır. Gene tork yanıtı, tork referans girdisini de yaklaşık 0.05 saniyelik bir gecikmeyle takip etmiştir. Bu bulgular ışığında kontrolcünün performansının istenilen düzeyde olduğu kanısına varılmıştır.

## 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu makalede tepki kuvveti gözleyici tabanlı bir tork kontrolcüsü sentezlenmiştir. Geri sürülemeden sistemlerde bu kontrolcünün iyi performans verebilmesi için sürtünme modelinin karakterize edilmesi gerektiği savı ortaya atılmış ve tepki kuvveti gözleyici tabanlı kontrolcüye sürtünme kompanzasyonu bloğu entegre edilmiştir. Sentezlenen kontrolcü, 1:100 gibi yüksek dişli oranına sahip geri sürülemeden bir fırçasız motorun tork kontrolünde kullanılarak deneysel olarak sınanmıştır. Deney sonuçları ışığında bahse konu kontrolcünün etkin bir şekilde tork kontrolünü sağladığı gözlemlenmiştir. Ancak sistemin sıfır referans girdisine karşılık gelen durumda yeterince transparan davranmadığı kanısına da varılmıştır.

Tork kontrolcüsünün nihai görevi gerçek link tork değerinin girdi olarak verilen tork referans yörüngesini takip etmesidir. Bu bağlamda link torkuna karşılık gelen link açılma değişimi ise sistem dinamiğine bağlıdır. Örnek olarak bizim sistemimizde bu dinamik bağıntı aşağıdaki şekildedir:

$$\tau_l = J_{l0}\ddot{\theta}_l + b_l\dot{\theta}_l + mgl_c s \sin \theta_l \quad (5)$$

Denklemler (5)'te,  $J_{l0}$  linkin dönme noktasına göre atalet momentini,  $b_l$  dönme eksenindeki viskoz sürtünme katsayısını,  $m$  link kütesini,  $g$  yerçekimi ivmesini,  $l_c$  linkin dönme eksenine göre olan kütle merkezini verir. Link açısı  $\theta_l$ , tork ise  $\tau_l$ 'dir. Dolayısıyla eğer link açısının da kontrol edilmesi gerekirse ayrı bir geri besleme döngüsü oluşturularak kaskat yapıda bir kontrolcü oluşturulur. Bu kontrolcünün diğer kontrolcülerden farkının ise sistemin mekanik empedansının daha net ayarlanabilir olmasıdır ve literatürde empedans kontrolcüsü olarak geçmektedir [12]. Dolayısıyla, makalede sunulan tork kontrolü üzerine kaskat yapıda bir empedans bloğu da eklenerek farklı empedans değerlerinde link açısı kontrol edilebilir.

İnsan-robot fiziksel etkileşiminde önemli bir rol oynayan tork kontrolü konseptinin herhangi bir mekanik yay veya tork/kuvvet sensörü kullanılmadan görece başarılı olması önemli bir faktördür. Bu sayede dış iskelet robotlar ve fiziksel insanla etkileşim halinde olabilen cobot sistemleri daha basit donanımsal yapılara kavuşabilecektir. Makalemizde konu edilen tork kontrolcüsünün laboratuvarımızda üretilen dış iskelet sistemlerine uygulanışı bir sonraki çalışmamıza konu edilecektir [13,14].



**TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)**

Yazarlar yardımlarından ötürü laboratuvarımız mensubu Deniz Uğur' a teşekkürlerini sunarlar.

**ETİK STANDARTLARIN BEYANI  
(DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)**

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

**YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)**

**Erim Can Özçınar:** Deneyleri yapmış ve makaleyi yazmıştır.

**Barkan Uğurlu:** Deney sonuçlarını analiz etmiş ve makaleyi yazmıştır.

**ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)**

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] De Santis A., Siciliano B., De Luca A., and Bicci A., "An atlas of physical human-robot interaction," *Mechanism and Machine Theory*, 43: 253-270, (2008).
- [2] Albu-Schäffer A., Haddadin S., Ott C., Stemmer A., Wimböck T., and Hirzinger G. "The DLR lightweight robot: design and control concepts for robots in human environments," *Industrial Robot*, 34: 376-385, (2007).
- [3] Gautier M. and Jubien A., "Force calibration of KUKA LWR-like robots including embedded joint torque sensors and robot structure," in *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Chicago, US, 416-421, (2014).
- [4] Yildirim M. C., Sendur P., Bilgin O., Gulek B., Yapici G. G., and Ugurlu B., "An Integrated Design Approach for a Series Elastic Actuator: Stiffness Tuning, Fatigue Analysis, Thermal Management," in *IEEE International Conference on Humanoid Robots*, Birmingham, UK, 384-389, (2017).
- [5] Sariyildiz E., Oboe R., and Ohnishi K., "Disturbance observer-based robust control and its applications: 35th anniversary overview," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67: 2042-2053, (2020).
- [6] Sariyildiz E., and Ohnishi K., "Stability and robustness of disturbance-observer-based motion control systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62: 414-422, (2014).
- [7] Ohnishi K., Shibata M., and Murakami T., "Motion Control for Advanced Mechatronics," *IEEE Transactions on Mechatronics*, 1: 56-67, (1996).
- [8] Kaneko K., Kanehiro F., Morisawa M., Yoshida E., and Laumond J.-P., "Disturbance Observer that estimates External Force acting on Humanoid Robots," in *IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 1-6, (2012).
- [9] Ugurlu B., Nishimura M., Hyodo, K., Kawanishi M., and Narikiyo T., "Proof of Concept for Robot-aided Upper Limb Rehabilitation Using Disturbance Observers," *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 45: 110-118, (2015).
- [10] Sariyildiz E., and Ohnishi K., "On the explicit robust force control via disturbance observer," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62: 1581-1589, (2014).
- [11] Benallegue M., Gergondet P., Audren H., Audren A., Morisawa M., Lamiroux F., Kheddar A., and Kanehiro F., "Model-Based External Force/Moment Estimation for Humanoid Robots With No Torque Measurement," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Brisbane, Australia, 3122-3129, (2018).
- [12] Albu-Schaffer A., Hirzinger G., "Cartesian impedance control techniques for torque controlled light-weight robots," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Washington, US, 3122-3129, (2018).
- [13] Yildirim M. C., Kansizoglu A. T., Emre S., Derman M., Coruk S., Soliman, A. F., and Ugurlu B., "Co-Ex: A Torque-Controllable Lower Body Exoskeleton for Dependable Human-Robot Co-Existence," in *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, Toronto, Canada, 605-610, (2019).
- [14] Coruk S., Yildirim, M. C., Kansizoglu, A. T., Dalgic, O., and Ugurlu B., "Design and Development of a Powered Upper Limb Exoskeleton with High Payload Capacity for Industrial Operations," in *IEEE International Conference on Human-Machine Systems*, Rome, Italy, 1-4, (2020).