

İNSAN-ROBOT İŞ BİRLİĞİ İÇİN TEK SERBESTLİK DERECELİ SERİ ELASTİK EYLEYİCİ TASARIMI VE KONTROL PERFORMANSI

Sinan TÜFEKÇİ^{1, a)}, Berkehan AKYÜZ^{1, b)}, Sinem DOĞAN^{1, c)}, Senanur YILDIRIM^{1, d)}
Mertcan KOÇAK^{1, e)} ve Erkin GEZGİN^{1, f)}

¹İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği
Bölümü 35620, İZMİR

^{a)} sinantufekci.21@gmail.com ^{b)} berkehannakyuz@gmail.com ^{c)} sinemmdogann0@gmail.com

^{d)} senanuryildirim.tr@gmail.com ^{e)} mertcan.kocak@ikcu.edu.tr ^{f)} erkin.gezgin@ikcu.edu.tr

Bu çalışmada, insan-robot iş birliğine uygun geliştirilmiş tek serbestlik dereceli bir seri elastik eyleyici sisteminin yapısal tasarımı, prototiplenmesi ve ön kontrol çalışmaları süreci ele alınmıştır. Endüstri 5.0'a uygun olarak geliştirilen sistem, tek serbestlik dereceli bir yapı üzerine kurulmuş ve insanla doğrudan fiziksel etkileşime uygun şekilde planlanmıştır. Yapı; motor, yay elemanı, doğrusal kızaklar ve deplasman algılayıcısından oluşmaktadır. Kuvvet geri beslemesi, yay deformasyonuna dayalı olarak hesaplanmakta ve sistemin kontrol algoritmasına entegre edilmektedir. Geliştirilen sistemde Maxon EPOS2 70/10 motor sürücüsü ile birlikte çalışan EC motor kullanılmış, hareketli parçalar hızlı prototipleme yöntemiyle üretilmiştir. MATLAB/Simulink ortamında uygulanan kontrol algoritmasında gerçekleştirilen ön kontrol testlerinde yük hücresi ve algılayıcı verileri karşılaştırılmış, sistemin dinamik tepkileri incelenmiştir. Eyleyici, belirli bir eşik kuvvet değerine ulaşıldığında kontrollü tepki vererek esnek bir davranış sergilemiştir. Sonuçlar, geliştirilen sistemin kuvvet kontrollü uygulamalar ve işbirlikçi robot teknolojileri için etkili bir mühendislik çözümü sunduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Seri elastik aktüatör, insan-robot etkileşimi, mekatronik sistem tasarımı, kuvvet uygulama noktası

DESIGN AND CONTROL PERFORMANCE OF A SINGLE DEGREE OF FREEDOM SERIES ELASTIC ACTUATOR FOR HUMAN ROBOT COLLABORATION

ABSTRACT

In this study, the structural design, prototyping, and preliminary control process of a single degree-of-freedom series elastic actuator system developed for human-robot collaboration are presented. Designed in line with the principles of Industry 5.0, the system is structured on a single-axis mechanism and configured to allow direct physical interaction with humans. The structure consists of a motor, spring element, linear guides, and a force sensor. Force feedback is calculated based on spring deformation and integrated into the system's control algorithm. The system includes an EC motor driven by a Maxon EPOS2 70/10 controller, and its moving components were produced using rapid prototyping methods. In the control algorithm implemented in MATLAB/Simulink, preliminary tests were conducted by comparing data from a force sensor and a load cell, and the system's dynamic responses were evaluated. When a predefined force threshold is reached, the actuator responds in a controlled manner, exhibiting impedance-like behavior. The results demonstrate that the developed system offers an effective engineering solution for force-controlled applications and collaborative robot technologies.

Keywords: Series elastic actuator, human-robot interaction, mechatronic system design, actuation point.

1. GİRİŞ

Günümüzde endüstriyel otomasyon yalnızca üretim verimliliğini değil, aynı zamanda insan-makine etkileşiminin kalitesini de ön planda tutmalıdır. Sanayi devrimi ile başlayan endüstriyel gelişim sürecinin son aşaması olan Endüstri 5.0, insan merkezli bir üretim yaklaşımını ön plana çıkarmaktadır. Dijitalleşme, yapay zekâ ve otomasyon ekseninde şekillenen üretim modelleri, endüstri 5.0 ile insan dokunuşunu sürece dahil etmeyi amaçlamaktadır. Amaç artık sadece hızlı ve ucuz üretim değil, aynı zamanda insan yaratıcılığını ve sezgisini makineye entegre ederek hibrit bir iş gücü yaratmaktır. Böylece, 'insan-robot iş birliği' kavramı bir arayüz değil, üretim sürecinin merkezi olmaktadır [1].

İş birlikçi robotlar, insanla aynı fiziksel ortamda çalışabilen ve karşılıklı etkileşim kurabilen sistemler olarak tanımlanır [2]. Buna karşılık, endüstriyel robotlar ise belirli görevleri yüksek hız ve hassasiyetle gerçekleştirmek üzere tasarlanmış, sabit çalışma alanlarına sahip ve operatör müdahalesine kapalı sistemlerdir [3]. Endüstriyel robotlar, üretkenlik açısından avantaj sağlasa da esnek iş gücü modellerine ve insanla doğrudan etkileşime uygun değildir. İşbirlikçi robotlar ise insanlarla etkileşimleri sayesinde aynı dinamik çalışma alanını paylaşmak üzere tasarlanmışlardır [4]. Dolayısıyla, tekrar eden, yorucu veya hassas kuvvet gerektiren görevlerde insan-robot iş birliği, üretim verimliliğini artırırken operatörlerin ergonomik koşullarını da iyileştirmektedir [5]. İnsan-robot etkileşimi, insan ve robot arasındaki etkileşimi verimli ve güvenli hale getirerek operatörün bilişsel yükünü hafifletir, ergonomik rahatlama sağlamayı hedefler [6]. Sirintuna ve arkadaşlarının yaptığı çalışma, insan-robot etkileşimine, robotların insanlarla birlikte iş birliği yaparak çalışması ve esnek yük paylaşımına örnektir [7].

İnsan doğrudan temas hâlinde çalışabilen robot sistemlerinin geliştirilmesi, güvenlik ve hassasiyet konularında yeni çözümler gerektirir. Geleneksel endüstriyel robotlar, yüksek tork ve hız sağlayabilir. Ancak bu avantaj insanlarla doğrudan etkileşime uygun olmayan rijit yapı gerektirebilir. Yeni nesil iş birliğine dayalı robot sistemlerinde, özellikle fiziksel etkileşimlerde uyum sağlama, kuvvet geri besleme ve hassas kontrol özellikleri ön

plana çıkmaktadır. Bu bağlamda geliştirilen Seri Elastik Eyleyici (SEA) sistemleri, robotların dış kuvvetlere esnek şekilde yanıt verebilmesini sağlayarak iş birliğini daha doğal ve güvenli hâle getirmektedir [8].

Seri elastik eyleyici sistemleri, klasik rijit eyleyicilere kıyasla hem mekanik hem de kontrol olarak avantajlar sunar. Esnek bir eleman, motorla yük arasına yerleştirilir ve bu sayede uygulanan kuvvet hassas bir şekilde ölçülebilir ve kontrolü mümkün olur. Bu şekilde doğrudan insanla temas hâlinde çalışan robotların beklenmedik durumlarda tepki verebilmesini sağlar [9]. Özellikle kuvvet kontrollü uygulamalarda seri elastik eyleyici sistemleri pasif güvenlik sağlayan yapılarla dikkat çekmektedir. Ani çarpışmalarda enerjiyi yay sistemiyle absorbe eden bu tür mekanizmalar hem insanı korur hem de robotun zarar görmesini engeller [10]. Görgülü ve arkadaşlarının çalışmasında, yük seviyesine bağlı olarak sertliği kademeli şekilde değişen burulma tipi esnek mafsal tasarımı sunulmaktadır [11]. Bu yaklaşım, yüksek kuvvetlerde güvenliği artırmayı ve düşük kuvvetlerde hassasiyet sağlamayı hedeflemektedir. Benzer şekilde, bu çalışmada geliştirilen doğrusal yay tabanlı seri elastik eyleyici sistemi de insan-robot etkileşiminde güvenli ve hassas çalışma amacı taşımakta; ancak sürekli kuvvet geri beslemesi ve empedans benzeri kontrol yapısıyla burulma tabanlı çözümlere kıyasla daha doğrudan ölçüm ve kontrol avantajı sağlamaktadır.

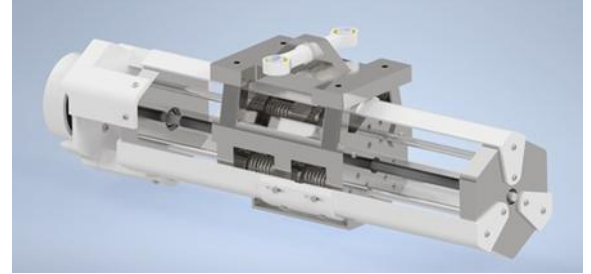
Günümüzde birçok özel firma ve araştırma merkezi, insanla uyumlu çalışan iş birlikçi robotlar geliştirmek amacıyla seri elastik eyleyici teknolojileri ile ilgili yoğun araştırmalar yürütmektedir. Bu alandaki en gelişmiş örneklerden biri olan KUKA'nın (Keller und Knappich Augsburg, Almanya) LBR iiwa (Intelligent Industrial Work Assistant) robot kolu, empedans kontrolü ve seri elastik hareket kabiliyetleri sayesinde insan-robot etkileşimine uygun olarak tasarlanmıştır [12,13].

Yürütülen bu çalışma, insanla doğrudan temas hâlinde çalışabilecek, kuvvet geri beslemesi sağlayan ve hassas hareketler gerçekleştirebilen bir seri elastik eyleyici sisteminin geliştirilmesini ve prototipinin üretilmesini amaçlamaktadır. Aynı zamanda üretilen prototipte sistemin uygulanabilirliğini test etmek ve değerlendirmek amacıyla

Yayların konumlandırılması ve sayısı, gerekli stabiliteyi ve doğru yay direncini sağlaması amacıyla prototipleme aşamasında belirlenmiştir. Yaylar, sistemin elastik bileşenlerini oluşturarak hem dış kuvvetlerin sönmülmesini sağlamakta hem de kuvvet geri besleme mekanizmasının temelini oluşturmaktadır. Yaylar arasındaki taşıyıcı blok üzerinde bir algılayıcı yer almaktadır. Bu algılayıcı, yayların sıkışma miktarını ölçerek sistemin uyguladığı kuvveti dolaylı olarak algılamakta ve kontrolcüye geri besleme sinyali göndermektedir. Eyleyicinin hem pozisyon hem de kuvvet kontrolü açısından çift yönlü ve hassas denetiminin sağlanması amaçlanmıştır. Sistemin her iki ucundaki destek yapıları ise doğrusal hareketi yönlendiren kızaklarla bütünleşmiş şekilde çalışmakta ve mekanik stabiliteyi sağlamaktadır. Görsel hem prototip öncesi tasarım mantığını hem de fiziksel yerleşim planını genel hatlarıyla ortaya koymaktadır. Bu çalışma kapsamında geliştirilen, Şekil 2'de 3 boyutlu katı modeli verilen seri elastik eyleyici sisteminin yapısal tasarımındaki temel kriterler, modülerlik, esneklik ve doğrusal kuvvet aktarımıdır. Tasarımın prototip aşamasında hızlı prototipleme cihazı kullanılarak, üretim süreci önemli ölçüde hızlandırılmış; maliyetler azaltılmış ve özellikle tasarımdaki revizyonların hızlı uygulanabilmesi sayesinde geliştirme süreci daha verimli ve esnek hale getirilmiştir. Tasarım montaj kolaylığı açısından avantajlı hale getirilmiştir. Tasarım, motor, esnek eleman, doğrusal kızaklar, kayar bloklar ve yük bağlantı arayüzü şeklinde alt birimlere sahiptir. Şekil 1 üzerinde de görülebileceği gibi, sistemin merkezinde doğrusal hareket mekanizması olarak helisel mafsallardan oluşmaktadır. Kızaklar üzerinde kayabilen taşıyıcı bloklar ise prizmatik mafsallardan oluşmaktadır. Bu sayede sistemin hareket doğruluğu artırılmış ve dış yükler arasında rijitliğin korunmasıyla güvenli bir çalışma olması amaçlanmıştır. Motorun ürettiği dönme hareketi helisel mafsallardan mekanizmasıyla doğrusal harekete dönüştürülmektedir. Yay elemanları ise mekanik olarak yük motor arasına konumlandırılmıştır. Yay sisteminin farklı sertlikteki yaylarla değiştirilebilmesi, seri elastik eyleyicinin kullanım ve uygulama alanına göre özelleştirilebilmesini sağlamıştır. Esneme miktarı, hareket sırasında oluşan

kuvvetlerin doğrudan göstergesidir. Yayların sistem simetrisi korunarak yerleştirilmesi hem ileri hem geri yöndeki kuvvetlerin ölçülebilmesini sağlamıştır. Yayların sıkışma miktarını tespit edebilmek için, yaylarla bağlantılı taşıyıcı blok üzerine, yüksek maliyetli algılayıcılara alternatif olarak tercih edilen uygun fiyatlı bir doğrusal yer değiştirme algılayıcısı konumlandırılmıştır. Bu algılayıcı, elastik elemanın deformasyonunu ölçerek sistemin uyguladığı kuvvet hakkında dolaylı bilgi sağlamaktadır. Algılayıcı, mekanik olarak darbelere maruz kalmayacak bir bölgeye yerleştirilmiş ve yapısal bloklar tarafından korunmuştur. Böylelikle, yayın deplasman miktarı doğrudan takip edilecek şekilde olup, minimum sürtünme ve maksimum doğruluk hedeflenmiştir.

Bu çalışmada eyleyiciye doğrusal hareket kazandırmak amacıyla Maxon (Sachseln, İsviçre) EPOS2 70/10 motor sürücüsü ile birlikte çalışan Maxon EC 60 Flat 422234 motor tercih edilmiştir. EPOS2 70/10 (Easy Positioning System), özellikle hassas pozisyon ve hız kontrolü gereken uygulamalarda yaygın olarak kullanılan, dijital bir pozisyon kontrol birimidir.



Şekil 2 Seri elastik eyleyici 3 boyutlu modeli

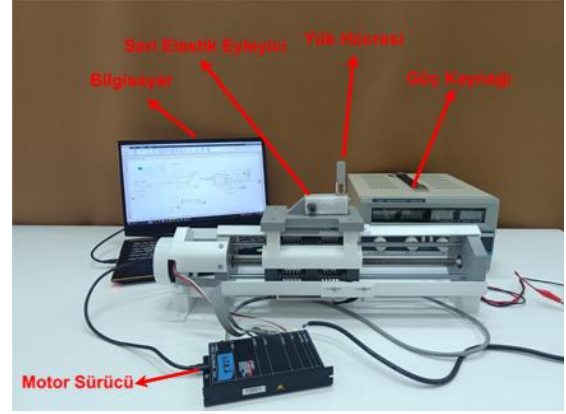
Kullanılan Maxon EC motor, düşük ataletli rotor yapısı sayesinde ani yön değişimlerinde dahi yüksek tepki hızına sahiptir. Motor şaftına entegre edilen enkoderden gelen geri besleme sinyallerini işleyerek, hassas pozisyon ve hız kontrolü gerçekleştirir.

3. ÖN KONTROL ÇALIŞMASI

Prototipi üretilen seri elastik eyleyicinin ön kontrol çalışmaları MATLAB Simulink (R2023b versiyon) modeli kullanılarak yapılmıştır. Bu kontrol süreci, sistemin temel dinamik özelliklerinin belirlenmesi, seçilen mekanizma bileşenlerinin yük taşıma kapasitelerinin değerlendirilmesi, yay sabiti hesaplamaları, algılayıcı yerleşiminin

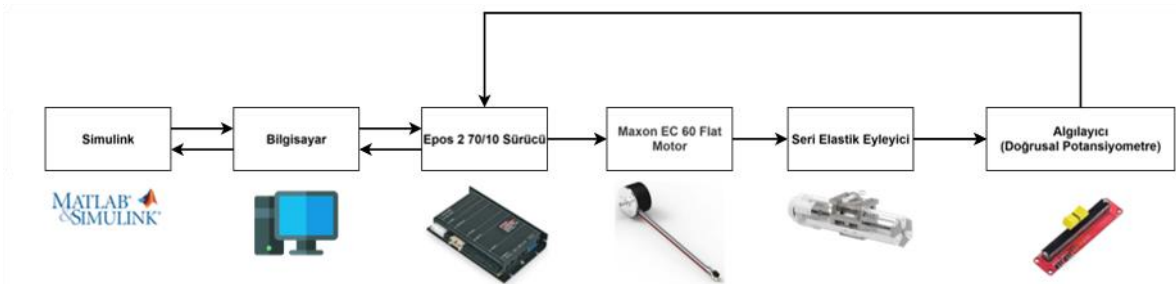
doğruluğu ve genel sistem stabilitesinin ön analizini ve değerlendirilmesini içermektedir. Şekil 3'te, geliştirilen seri elastik eyleyici sisteminin ön kontrol çalışmasına yönelik deneysel kurulumu görülmektedir. Mekanizma, güç kaynağı, motor, motor sürücüsü ve MATLAB Simulink ekranının yer aldığı bu kurulum ile ölçümler yapılmıştır. Bu düzenekte prototipi üretilen seri elastik eyleyicinin uç noktasına bir yük hücresi bağlanmıştır. Bu sayede sisteme verilen kuvvet ölçülebilmiş ve MATLAB Simulink üzerinde yapılmış olan kontrol algoritması üzerinden ölçülen sistemin kuvveti birbiri ile karşılaştırılabilmıştır. Ön kontrol kapsamında Hooke yasası kullanılarak yay sabiti 'k' belirlenmiştir.

Şekil 4'te, geliştirilen seri elastik eyleyici sisteminin genel çalışma prensibini temsil eden blok diyagram görülmektedir. MATLAB Simulink ortamında geliştirilen model, bilgisayara bağlanan EPOS 70/10 motor sürücüsüne komut göndermektedir. Bu sürücü ise motoru sürmekte ve eyleyicinin mekanik hareketini başlatmaktadır. Sistemin hareketi sonucunda oluşan yay deformasyonu, algılayıcı olarak kullanılan doğrusal potansiyometre tarafından ölçülerek kontrol sistemine geri besleme olarak iletilmektedir.

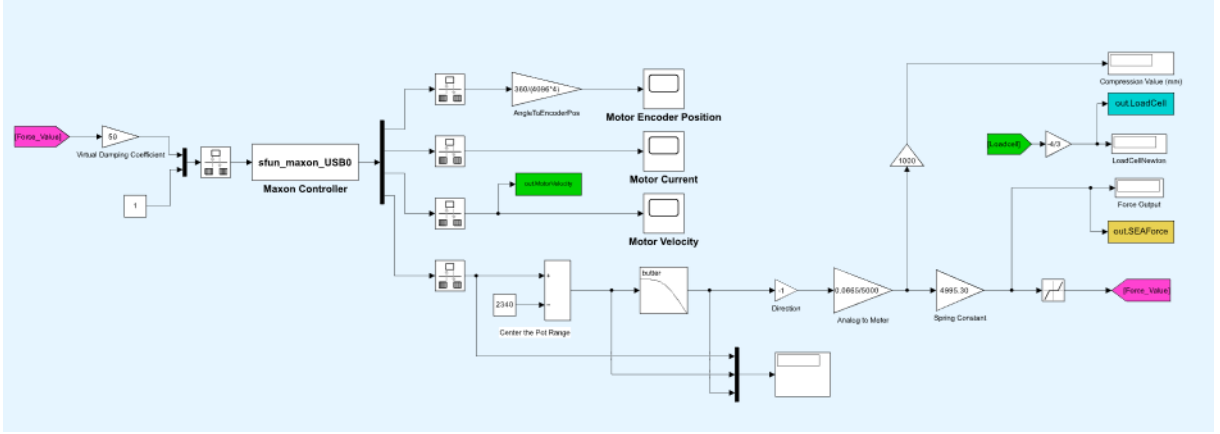


Şekil 3. Seri elastik eyleyicinin ön kontrol çalışması kurulumu

Şekil 5'te sunulan blok diyagram, Maxon EPOS2 motor sürücüsü ile seri elastik eyleyici tabanlı kuvvet geri beslemesini kullanan sabit sanal sürtünmeli admitans kontrol algoritmasını göstermektedir. Potansiyometreden alınan konum verisi, referans noktası olarak belirlenen 0 değerinde tutulmaya çalışılmakta; bu değerden sapma oluştuğunda hata sinyali üretilerek hız kontrolcüsüne (sfun_maxon_USB0) aktarılmaktadır. Potansiyometre verisi ve yay sabiti ile hesaplanan kuvvet (Şekil 5 Simulink diyagramındaki "Force_value" blokları), kontrol döngüsüne dâhil edilmeden önce sinyal gürültülerini azaltmak amacıyla filtreleme, ölçekleme ve birim dönüştürme aşamalarından geçirilmektedir. Kontrol algoritması, Eugenio [14] tarafından geliştirilen EPOS2 haberleşme kütüphaneleri temel alınarak hazırlanmış, sürücü ile MATLAB/Simulink arasında doğrudan iletişim sağlanmıştır. EPOS2 motor sürücüsünün otomatik oluşturulmuş dahili PID hız kontrolcüsü kullanılmış, "sfun_maxon_USB0" bloğu aracılığıyla tüm kontrol algoritmaları



Şekil 4. Seri elastik eyleyici çalışma prensibini gösteren blok diyagram



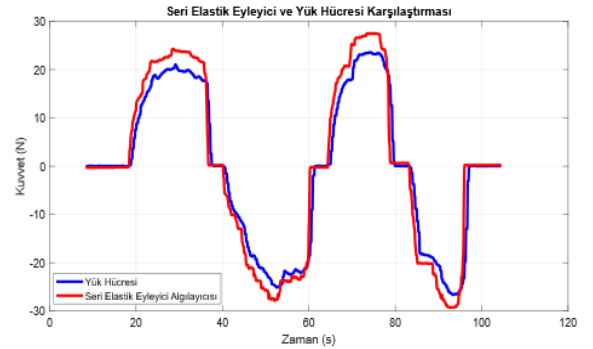
Şekil 5. MATLAB/Simulink (R2023b) ortamında geliştirilen kontrol algoritması

Simulink üzerinde uygulanmıştır. Kütüphane içerisindeki C tabanlı s-fonksiyonun çıkış portları ihtiyaçlar dahilinde güncellenmiştir. Bu kapsamda kütüphanenin halihazırdaki çıkış portu olan enkoder pozisyonuna ek olarak, motorun gerçek zamanlı hız ve akım değerlerinin ölçülmesi ve potansiyometrenin oluşturduğu analog sinyalin EPOS2 motor sürücüsünün dahili girdi pinleri üzerinden okunması sağlanmıştır.

Tek serbestlik dereceli seri elastik eyleyici sisteminin kontrol algoritmasının doğruluğunu ve sistemin karakteristiğini değerlendirmek amacıyla yapılan bu deneysel ölçümlerde, seri elastik eyleyicinin gövdesi zemine sabitlenmiştir. Donanım doğrulama çalışması sırasında sistemin uç noktasında bulunan yük hücresine, kullanıcı tarafından farklı büyüklüklerde ve farklı yönlerde kuvvetler uygulanmıştır. Bu kuvvet uygulamaları hem pozitif hem de negatif yönde, sistemin esnek tepkisini gözlemlemeye olanak sağlayacak biçimde gerçekleştirilmiştir. Donanım doğrulama çalışması süresince yük hücresinden ve seri elastik eyleyici algılayıcısından elde edilen veriler eş zamanlı olarak kaydedilmiş, böylece sistemin kuvvet geri besleme doğruluğu ve dinamik tepkisi karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Şekil 3'teki fiziksel kurulumla birlikte değerlendirildiğinde, bu diyagram sistemin dijitalden fiziksele geçişini ve veri akışını görselleştirme açısından tamamlayıcı rol oynamaktadır.

Elde edilen veriler Şekil 6'da ve 7'de sunulmuştur. Şekil 6'da verilen grafik, sistemde kullanılan algılayıcıdan elde edilen kuvvet verileri ile sistemin uç noktasına monte edilen yük hücresinden alınan doğrudan kuvvet ölçümünün zamanla değişimini

göstermektedir. Yatay eksen zaman (s), dikey eksen ise kuvvet (N) birimleri yer almaktadır. Grafik incelendiğinde, her iki ölçüm kanalının benzer dinamik değişim gösterdiği gözlemlenmektedir. Algılayıcıdan gelen veriler, Hooke yasasına göre hesaplanan kuvvet bilgisidir. Bu değerlerin yük hücresi verilerine yakın seyretmesi, hem algılayıcının yay deformasyonunu doğru ölçtüğünü hem de Hooke yasasına göre yapılan kuvvet hesaplamalarının yeterli doğrulukla kontrol algoritmasına aktarıldığını kanıtlamaktadır. Önemsiz düzeydeki sinyal sapmaları, mekanik sürtünme, sensör toleransı veya sistem gecikmeleri gibi fiziksel etkenlerden kaynaklanmakta olup, genel olarak veri setlerinin senkron bir şekilde ilerlediği görülmektedir.



Şekil 6. Yük hücresi ve SEA algılayıcı karşılaştırması grafiği

Şekil 7'da verilen grafik ise sistemde kullanılan algılayıcıdan elde edilen kuvvet verileri ve seri elastik eyleyicinin motor hızını göstermektedir. Hız birimi sağ dikey eksen rpm (devir/dakika) cinsinden, kuvvet ise sol dikey eksen Newton (N) cinsinden ifade edilmiştir. Bu grafik, kontrol algoritmasının davranışını ve sistemin eşik kuvvet değerine verdiği tepkiyi değerlendirmek açısından

oldukça önemlidir. Bu analizde temel hedef sistemin kontrol algoritmasının önceden tanımlanan sınır koşulları altında nasıl davrandığını gözlemlemektir. Kontrol algoritması, sisteme uygulanan kuvvetin 20 Newton sınırını aştığı durumlarda motorun kuvvet yönünde dönmesini tetikleyecek şekilde yapılandırılmıştır. Buradaki 20N değeri ise veri toplama amacıyla belirlenmiştir ve değişkendir. Grafikte bu eşik değerinin aşıldığı noktalarda, motor hızında yükselmeler ve yön değişimleri gözlemlenmektedir. Bu da sistemin kontrollü bir biçimde yanıt verdiğini ve empedans benzeri davranış sergileyerek insan-robot etkileşimi için gerekli esnekliği sağlayabilecek potansiyele sahip olduğunu ortaya koymuştur.



Şekil 7. SEA algılayıcı ve motor hızı karşılaştırması grafiği

4. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında geliştirilen tek serbestlik dereceli seri elastik eyleyici sistemi, yalnızca teorik bir araştırma ürünü değil, gerçek uygulamalara da entegre edilebilecek sağlam ve işlevsel bir mühendislik ürünüdür. Sistem, insanla etkileşime girebilecek şekilde geri besleme sağlayabilen bir yapı olarak tasarlanmıştır. Hem mekanik bileşenleri hem de kontrol algoritmaları bu hedef doğrultusunda düzenlenmiştir. Geliştirilen yapıda, motor, yay, algılayıcı ve mekanik kızaklar tasarlanmış bir düzende konumlandırılmış; sistemin hareket doğruluğu ve kararlılığı fiziksel prototipleme süreciyle doğrulanmıştır.

Kontrol algoritması MATLAB/Simulink (R2023b versiyon) ortamında geliştirilmiş ve sistemin tüm parametreleri Simulink modeli yaklaşımı çerçevesinde analiz edilmiştir. Bu doğrultuda yürütülen ön kontrol çalışmaları, sistemin kuvvet geri besleme doğruluğunu değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiş ve sistemin uç noktasına yerleştirilen yük hücresi

ile seri elastik eyleyici algılayıcısından elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlarda, bu veri setleri yüksek korelasyon göstermiş, algılayıcının deformasyon temelli kuvvet ölçümünün güvenli olduğu doğrulanmıştır.

Ayrıca, belirlenen kuvvet eşik değeri (20 Newton) aşıldığında motor ilgili yönde harekete geçmektedir. Bu da geliştirilen kontrol algoritmasının doğru ve senkronize çalıştığını ortaya koymaktadır. Bununla beraber tasarım, kuvvet tabanlı görevlerde pozitif performans sunmaktadır. Bu tür bir kontrol yapısı, robotik sistemlerin dış çevreyle fiziksel etkileşime girdiği anlarda hassas ve güvenli tepki üretebilmesini sağlamaktadır. Sonuç olarak, tasarlanan seri elastik eyleyici sistemi, kuvvet kontrollü robotik uygulamalarda, iş birliğine dayalı robot sistemlerinde ve insan-robot etkileşiminin ön planda olduğu senaryolarda kullanılabilir, özelleştirilebilir bir yapı sunmaktadır. Sistem tasarımı, akademik çalışmalarda, insan-robot iş birliği projelerinde ve kuvvet kontrollü sistem ihtiyaçlarında kullanılabilir esneklik, hassasiyet ve güvenlik kriterlerini karşılayan güçlü bir altyapı sunmaktadır. Gelecek çalışmalarda, sistemin çok serbestlik dereceli konfigürasyonları, empedans/admitans temelli kontrol stratejileri ve yapay zekâ destekli uyarlamalı kontrol algoritmaları ile birlikte daha geniş kapsamlı robotik platformlara entegre edilerek, sistemin performansı üst seviyelere çıkarılabilecektir.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında desteklenmiştir.

6. KAYNAKLAR

- [1] Nahavandi, S. (2019). Industry 5.0—A human-centric solution, *Sustainability*, 11(16), 4371. DOI 10.3390/su11164371.
- [2] Ajoudani, A., Zanchettin, A. M., Ivaldi, S., Albu-Schäffer, A., Kosuge, K., & Khatib, O. (2018). Progress and prospects of the human–robot collaboration, *Autonomous Robots*, 42, 957-975. DOI 10.1007/s10514-017-9677-2.
- [3] Weiss, A., Buchner, R., Tscheligi, M., & Fischer, H. (2011). Exploring human-robot cooperation possibilities for semiconductor manufacturing, *2011 International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS)*, IEEE, Philadelphia, PA,

- ABD, 173-177. DOI 10.1109/CTS.2011.5928683.
- [4] Chandrasekaran, B., & Conrad, J. M. (2015). Human-robot collaboration: A survey, *SoutheastCon 2015*, IEEE, Fort Lauderdale, FL, ABD, 1-8. DOI 10.1109/SECON.2015.7132964.
- [5] Villani, V., Pini, F., Leali, F., & Secchi, C. (2018). Survey on human-robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications, *Mechatronics*, 55, 248–266. DOI 10.1016/j.mechatronics.2018.02.009.
- [6] Hentout, A., Aouache, M., Maoudj, A., & Akli, I. (2019). Human-robot interaction in industrial collaborative robotics: A literature review of the decade 2008–2017, *Advanced Robotics*, 33(15–16), 764–799. DOI 10.1080/01691864.2019.1636714.
- [7] Sirintuna, D., Ozdamar, I., & Ajoudani, A. (2023). Carrying the uncarriable: a deformation-agnostic and human-cooperative framework for unwieldy objects using multiple robots, *2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, London, İngiltere, 7497-7503. DOI 10.1109/ICRA48891.2023.10160720.
- [8] Pratt, G., & Williamson, M. (1995). Series elastic actuators, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, IEEE, 399–406. DOI 10.1109/IROS.1995.525827.
- [9] Bicchi, A., Peshkin, M., & Colgate, J. E. (2008). *Safety for Physical Human–Robot Interaction*, Springer, Berlin.
- [10] De Luca, A., Albu-Schäffer, A., Haddadin, S., & Hirzinger, G. (2006). Collision detection and safe reaction with the DLR-III lightweight manipulator arm, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, IEEE, 1623–1630. DOI 10.1109/IROS.2006.282418.
- [11] Görgülü, I., Dede, M. I. C., & Kiper, G. (2025). A new safe flexible torsion joint design with softening stiffness characteristics, *Mechanism and Machine Theory*, 210, 106015. DOI 10.1016/j.mechmachtheory.2024.106015.
- [12] Hogan, N. (1985). Impedance control: An approach to manipulation, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 107(1), 1–24. DOI 10.1115/1.3140702.
- [13] Mokaram, S., Aitken, J. M., Martinez-Hernandez, U., Eimontaite, I., Cameron, D., Rolph, J., et al. (2017). A ROS-integrated API for the KUKA LBR iiwa collaborative robot, *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 15859-15864. DOI 10.1016/j.ifacol.2017.08.2366.
- [14] Eugenio. Commanding Maxon Motors EPOS2 Motor Controller from MATLAB. MATLAB Central File Exchange. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/53735-commanding-maxon-motors-epos2-motor-controller-from-matlab>, Erişim: 12 Ağustos 2025.