

Yumuşak Robotik için Tekstil Tabanlı Termal Aktüatörlerin ve Basınç Sensörlerinin Matematiksel Modelleri

Mathematical Models of Textile Based Thermal Actuators and Pressure Sensors for Soft Robotics

Mehmet Fatih Çelebi¹, Aslı Tunçay Atalay², Özgür Atalay³, Veysel Gazi⁴

¹Mekatronik Mühendisliği Bölümü
Marmara Üniversitesi, Maltepe
fatih.celebi@marmara.edu.tr

²Tekstil Mühendisliği Bölümü
Marmara Üniversitesi, Maltepe
asli.atalay@marmara.edu.tr

³Tekstil Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi, Beyoğlu
atalayoz@itu.edu.tr

⁴Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü
Yıldız Teknik Üniversitesi, Esenler
vgazi@yildiz.edu.tr

Özetçe

Rijit gövdeli endüstriyel robotik manipülatörler ve pnömatrik sıkıştırma sistemleri mekanoterapötik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Ancak rijit ve hacimli bileşenler, sistemin mobil ortamlarda giyilebilirliğini azaltmaktadır. Giyilebilir robot teknolojisindeki mevcut eğilim, hafiflikleri, uyumlulukları ve konfor özellikleri sayesinde bu tür cihazları tekstil/silikon malzemeleri kullanarak üretme eğilimindedir. Bu çalışmada, düşük kaynama noktalı sıvıların sıvı/gaz faz geçiş özelliğinden yararlanan, termal olarak güçlendirilmiş yumuşak akışkan aktüatörlerin matematiksel modelleri incelenmiştir. Araştırmamızın sonucu bu sıvıların sıvı/gaz hal geçişi dinamiklerinin matematiksel modelleri üzerine daha önce yapılan çalışma bulunmamıştır. Bu çalışmanın amacı literatüre bu katkıyı yapmaktır. Önerilen aktüatörler, istenen basınç seviyesini üretir ve mekanoterapi cihazlarını bu tür hacimli bileşenlerden kurtarmak için büyük bir potansiyele sahiptir. Geliştirilen yapı, tekstil bazlı ısıtıcılar, ince film aktüatörler ve düşük kaynama noktalı sıvıları içermektedir.

Abstract

Rigid-bodied industrial robotic manipulators and pneumatic compression systems are widely used in mechatronic therapeutic applications. However, rigid and bulky components reduce the wearability of the system in mobile environments. The current trend in wearable robot technology is to produce such devices using textile/silicone materials due to their lightweight, compatibility, and comfort features. In this study,

mathematical models of thermally enhanced soft fluid actuators utilizing the liquid-to-gas phase transition property of low-boiling-point liquids were investigated. No study was found on the mathematical models of the liquid/gas state transition dynamics of these liquids. The aim of the study is the contribution in this aspect. The proposed actuators generate the desired pressure level and have great potential to eliminate bulky components in mechatronic therapy devices. The developed structure includes textile-based heaters, thin film actuator shells, and low-boiling-point liquids.

1. Giriş

Yumuşak Doku Manipülasyonu (YDM) (İngilizcesi: Soft Tissue Manipulation, STM), fiziksel rehabilitasyon, hastalık önleme ve sağlığı geliştirmede önemli etkileri olan güçlü ve doğrudan bir mekanoterapi şeklidir [1]. Klinik uygulamalarda kas dokusunu manipüle etmek için farklı tipte cihazlar geliştirilmiştir ve pnömatrik kompresyon cihazları halihazırda piyasada ve yaygın olarak kullanılmaktadır [2]. Bununla birlikte, bu sistemlerin sınırlı kontrol modaliteleri ve uygulama sırasında vücuda uygulanan kuvvetleri izleme eksiklikleri vardır. Önceki çalışmalar, yumuşak dokunun yüklenme koşullarının mekanik tedavi üzerinde çok önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir [3]. Bu nedenle literatürde tekstil tabanlı yöntemleri içeren alternatif yaklaşımlar değerlendirilmektedir. Kas iyileşmesine yardımcı olmak için elektrik stimülasyonu [4] veya pnömatrik kompresyon [5] kullanan bazı YDM cihazları vardır.

Pnömatik sıkıştırma cihazları YDM'de oldukça yaygındır. Bununla birlikte, bu tür pnömatik sıkıştırma sistemleri, hacimli hava tüplerine ve hava kompresörlerine bağlıdır. Bu tür iyileştirici teknolojiler, kullanıcının hareket kabiliyetini ve rahatlığını ev veya hastane ortamlarıyla sınırlar. Öte yandan elektronik tekstiller ve giyilebilir fonksiyonel teknolojiler son yıllarda yeni gelişen bir pazar haline gelmiş ve tekstil malzemeler geleneksel tekstil konseptine göre daha işlevsel hale gelmişlerdir.

Bu yeni teknolojinin bir tanımı "Çevreden gelen uyaranları algılayabilen, bunlara tepki verebilen ve fonksiyonelliklerini tekstil yapısına entegre ederek bunlara uyum sağlayabilen tekstiller" olarak ifade edilebilir [6]. Bununla birlikte, bugüne kadar, biyo-geribildirim sistemleri ve tekstil yapıda hareket eden aktivasyon çok daha az dikkate alınmaktaydı. Tekstil yapının etrafında hareket ettiği, örneğin masaj yaparak rahatlama ve/veya iyileşme sağladığı bu tür akıllı tekstillere artan bir ilgi görülmektedir [7]. İlk nesil akıllı tekstil çalışmalarında sensörler üzerine odaklanılmaktaydı. Ancak, ikinci nesil akıllı tekstillerde aktüatörler üzerine de çalışmalar yapılmaktadır. Bu nedenle, akıllı tekstiller alanındaki mevcut çabalardan hareketle, bu yazıda tekstil bazlı bir aktüatörün geliştirilmesini ve termal enerjiyle hareket mekanizmalı robotik iyileştirici eldivendeki potansiyel uygulaması tartışılmıştır. Bahse konu eldiven, bilgisayar kullanımı ve diğer nedenlerle, karpal tünel sendromu gibi durumlardan ve buna benzer diğer durumlar ve kas tedavisinden kaynaklanan günlük kas yorgunluğunun giderilmesi veya tedavisi için kullanılabilir. Geliştirilen aktüatör diğer benzer uygulamalarda da kullanılabilir.

Bu makalenin katkısı sıvı/gaz halleri arasında geçiş yaparak çalışan yumuşak aktüatörlerin ve kendi geliştirdiğimiz tekstil tabanlı giyilebilir ve yıkanabilir basınç sensörlerinin genel matematiksel modelleri hakkında bir fikir vermektir. Bu sayede bilgisayar simülasyonu ortamında kontrolcü tasarımı ve sensör uygulamaları için kalibrasyon yöntemleri geliştirilebilir.

2. Sistem Hakkında Genel Bilgiler

Yumuşak pnömatik aktüatör sistemleri, yardımcı giyilebilir cihazlar olarak yumuşak robotların yapımında önde gelen teknolojilerdir [8]. Pnömatik hücrelerin yapımında silikon ve kauçuk gibi elastomerik malzemeler kullanılmaktadır [9]. Elastik malzemeler ısı, kimyasal direnç ve farklı aralık hareketlerine uyum yeteneği gibi bazı üstün özellikler verirken, elastomerik malzemelerin bazı özellikleri (malzeme yoğunluğu, sertlik, mukavemet) giyilebilir uygulamalarda zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Bazı yeni araştırmalar, günlük yaşam görevlerini yerine getirmeyi etkileyen çeşitli kas ve sinir rahatsızlıklarından muzdarip bireyler için yumuşak robotik eldivenlerin ve pnömatik cihazların yaratılması için kumaş bazlı aktüatörleri tanıtmıştır [10][11]. Bu nedenle tekstil bazlı yaklaşım, silikon muadilinden daha hafif, daha uyumlu ve konforlu bir alternatif sunmaktadır. Bununla birlikte, yaygın kullanımlarının önünde üstesinden gelinmesi gereken önemli engeller vardır. Bu yapılara yumuşak robotik olarak atıfta bulunulmasına rağmen, önemli sayıda bileşen sistem içinde hala serttir. Giyilebilir cihazlar için tam anlamıyla yumuşak robotik sistemler oluşturmak veya yeni teknolojiler geliştirerek sert bileşenleri yumuşak yapılara dönüştürmek için sistematik bir yaklaşıma ihtiyaç vardır. Bu nedenle, önceki bazı çalışmalar sıvı/buhar faz geçiş özelliğinden yararlanarak yumuşak aktüatörlerin geliştirilmesine odaklanmıştır. Miriyev vd. [12],

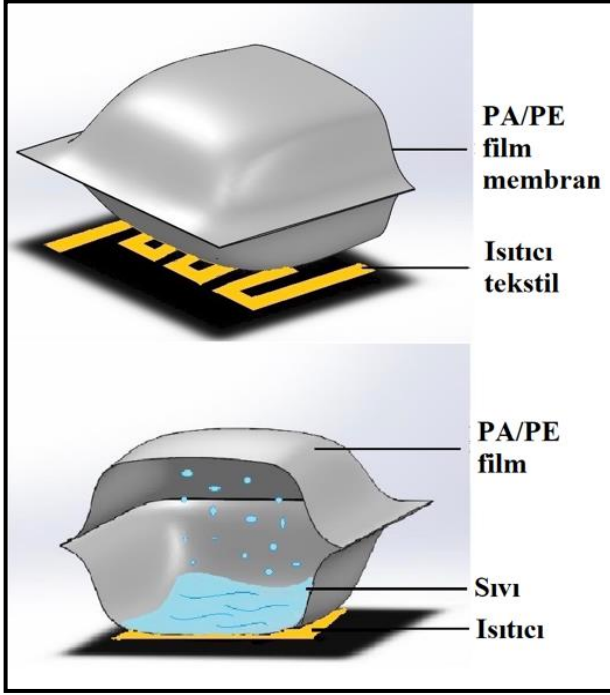
yapıyı genişletmek için silikonun gözenekleri içinde etanol kullanmışlardır. Silikon içindeki sıvıyı kaynatmak için ısıtma elemanı olarak dirençli tel kullanmışlardır. Başka bir çalışmada Garrad vd. [13] aktüatörler ve pompa oluşturmak için Novoc™ 7000 ile doldurulmuş silikon ve kauçuk üretilen kullanmışlardır. Isıtma elemanı olarak iletken kumaş parçası kullanmışlardır. Yakın tarihli bir çalışmada, yumuşak robotik cihazı bu tür hacimli bileşenlerden arındıran ısıyla çalışan yumuşak akışkan aktüatörler (İÇYAA, İngilizcesi: thermally powered soft fluidic actuators, TPFA) (İÇYAA'lar) geliştirilmiştir [14]. İÇYAA'ları hareket ettirmek için gereken basınç seviyesini oluşturmak için düşük kaynama noktalı sıvıların sıvı/buhar faz geçiş özelliği kullanılır. Tekstil tabanlı algılama ve ısıtma elemanları aracılığıyla, geliştirdiğimiz aktüatör, çevresel sıcaklık dalgalanmalarının varlığında dinamik basınç kontrolü sağlayan kapalı döngü besleme sistemine sahiptir [15]. Sıcaklık geribeslemeli olarak geliştirdiğimiz masaj sistemi, dahaki çalışmamızda tamamen tekstil tabanlı yumuşak basınç sensörleri kullanılarak sıcaklık yerine basınç geri beslemeli ve sert kılıfındaki sıcaklık sensörü yerine kendi üretimimiz olan tekstil sensör [16] kullanılarak tamamen yumuşak olarak iletilemiştir [17]. Ayrıca yine aynı çalışmada tekstil tabanlı sensörlerin kalibrasyon işlemi hakkında bilgiler de verilmiş, kısmi olarak sistemin genel matematiksel modeli çıkartılmıştır. Bu çalışmada ise geliştirdiğimiz aktüatörlerin ve sensörlerin ayrı ayrı matematiksel modellerini sunmaktayız.

2.1. Sistem Hakkında

Tekstil yapıdan üretilmiş ısıtıcı tarafından ısıtılan bir paket içerisinde düşük kaynama noktasına sahip bir kimyasal sıvı karışımı kullanılmıştır. Bu sıvı çeşitli farklı kimyasal sıvılar farklı oranlarda karıştırılarak, istenilen kaynama noktasının elde edildiği, az miktarda ısı değişimleri bile uygulandığında buharlaşarak paketin çeperlerine kuvvet uygulanmasını sağlayan bir karışımdır. Vücut sıcaklığının birkaç birim üstünde seçilebilen kaynama noktaları sayesinde, insan vücut sıcaklığının da alt sınır olarak kullanıldığı ve dolayısıyla vücut ısısının da enerji olarak kullanılması prensibi kullanılarak düşük güç tüketen aktüatörler üretilmektedir. Şişik ve sönük aktüatörün görüntüleri Şekil 1'de, aktüatörün ayrıntılı genel yapısı ise Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 1: Sönük ve şişik aktüatörlerin görüntüleri.



Şekil 2: Termal değişim ile hal değiştiren düşük kaynama noktalı sıvı ihtiva eden aktüatör sisteminin genel yapısı.

2.3. Test Düzenegi

Isıtıcıya istenilen referans sıcaklık değerine ulaşana kadar elektrik gücü uygulanmıştır. Modeli hesaplamak için kullanılan veri setinin uzunluğu 186 örnektir (= 372 saniye). Referans sıcaklık değeri, çalıştırma mekanizmasının uyguladığı referans bir kuvvet (veya basınç) değerine karşılık gelmektedir. Referans kuvvet değerlerine karşılık gelen referans sıcaklık değerleri deneysel olarak belirlenmiştir. Anahtarlama elemanı olarak H-köprü sürücüsü kullanılmıştır. Gelecekteki potansiyel bir çalışma olarak, bir soğutma mekanizması ve daha yeterli kontrol stratejileri dahil edilmesi düşünülmektedir.

Bu çalışmada, kontrolör olarak Arduino Lilypad kart ve elektrik devresinin sürücüsü olarak alüminyum soğutucusuz L298 mini sürücü modülü kullanılmıştır. Şişme durumunda gözlemlenen akım/voltaj oranı $0,4 \text{ A} / 5 \text{ V} = 0,08 \text{ S}$ 'dir. Bu oran tekstil ısıtıcısının empedansı ile ters orantılıdır.

Yaklaşık 100 ms yanıt süreli (sıcaklık dönüştürme için 93,75 ms ve 2 ms yazma çevrim süresi) DS18B20 model dijital termometre, 1 sn örnekleme hızında sıcaklık sensörü olarak kullanılmıştır.

Sıcaklık ölçümünde 1 saniyelik bir zaman gecikmesi ve mikrodenetleyicinin okuma/hesaplama gecikmeleriyle beraber toplam 2 saniyelik bir gecikme olduğu için ölçülen ve gerçek sıcaklık değerleri arasında bir miktar fark olabilir. Gerçek ve ayarlanmış limitler arasındaki tahmini maksimum sıcaklık farkı 4°C 'dir. Denetleyici gücü kapatmadan önce gerçek sıcaklık 48°C 'ye kadar yükselebilir ama referans değerimiz 44°C 'dir.

Tekstil ısıtıcı ile aktüatör çiftinin basıncını ölçmek için Newton cinsinden kuvvet değerini ölçebilen seri port çıkışlı bir dinamometre ile bir test teçhizatı tertip edilmiştir.

3D baskıdan bir ölçüm ucu üretilmiş ve kuvvet ölçerini ölçüm ucuna eklenmiştir. Böylece kuvvet değeri, ucun alanı bilinerek basınç değerine dönüştürülebilir. Ölçüm ucunun alanı, aktüatörün alanından küçük olmalıdır.

Test düzeneğiyle ilgili ilave bilgilere önceki çalışmalarımızdan erişilebilir [15][17].

3. Sistem Matematik Modelinin Elde Edilmesi

Giriş ve çıkış verilerini kullanarak sistemin matematiksel bir modelini elde etmek için MATLAB Sistem Tanımlama Araç Kutusu'nu (System Identification Toolbox) kullanıldı ve maksimum 2 saniyelik sıcaklık gecikmeli (sıcaklık sensörü, hesaplama gecikmeleri ve ısıtıcı kumaşın ısı geçişi gecikmesi nedeniyle) modeller elde edildi. Modellerin elde edildiği veri setinin, verilerinin uyumlanmış hali grafiksel olarak Şekil 3'de verilmiştir. Burada her veri vektörünün maksimum ve minimum değerleri arasındaki fark vektörün genliği olmak üzere bütün değerlerden vektörün minimum değeri çıkartılarak, vektörün genlik değerine bölünmüş, böylece bütün değerler 0-1 arasında gösterilmiştir. Gerçek akım 0 – 1 Amper, sıcaklık 30 – 60 °C, kapasitans 4 – 5 uF, kuvvet 0 – 1 Newton arasındadır.

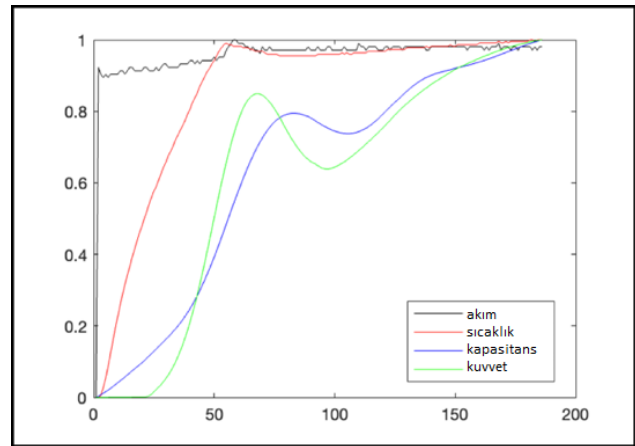
Daha önceki çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada ısıtıcı tekstil yapının sıcaklık/akım ilişkisi, düşük kaynama noktalı sıvı ihtiva eden aktüatör paketinin basınç/sıcaklık ilişkisi, ısıtıcı ve aktüatör paketinin beraber oluşturduğu aktüatör yapısının basınç/akım ilişkisi ve tekstil tabanlı basınç sensörünün sığa/basınç ilişkisi ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Burada Laplace uzayında verilen değişkenler $T(s)$, $I(s)$, $D(s)$ ve $C(s)$ sırasıyla ısıtıcının ölçülen sıcaklığı, ısıtıcının çektiği elektrik akımı, aktüatörün uyguladığı basınç ve kapasitif sensörün sığasıdır.

Hesaplanan sistem modelleri 3. derece olacak şekilde hesaplamalar yapılmıştır. Daha ileri dereceli hesaplanacak sistem modellerinin anlamlı olmayacağı düşünülmüştür.

Hesaplanan sistem modelinden de görüldüğü gibi daha önceki deneysel yöntemlere eş olarak, sistem 2 saniyelik gecikmeye sahiptir (e^{-2s}).

Hesaplanan modellerin uyuma oranları ve Bode diyagramı grafikleri Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 3: Modeller hesaplanırken kullanılan veri setinin uyumlanmış görüntüsü.

3.1. Isıtın tekstilin modeli (sıcaklık/akım ilişkisi)

Tekstil ısıtıcının sıcaklığı DS18B20 termometre kullanılarak °C cinsinden ölçülmüş ve eşzamanlı olarak çekilen akım değerleri mA cinsinden kaydedilmiştir. Hesaplanan sistem modeli Denklem 1’de verilmiştir.

$$\frac{T(s)}{I(s)} = \frac{0.04}{s^3 + 0.1s^2 + 0.004s + 9 \times 10^{-5}} \times e^{-2s} \quad (1)$$

Burada T(s) sıcaklık, I(s) akım değerlerinin Laplace uzayındaki değerlerine karşılık gelmektedir.

3.2. Düşük kaynama noktalı sıvı bulunduran paketin modeli (basınç/sıcaklık ilişkisi)

DS18B20 termometreden ölçülen sıcaklık değerlerine karşılık eşzamanlı olarak dijital bir dinamometreden alınan kuvvet değerleri kullanılarak düşük kaynama noktalı sıvı bulunduran aktüatör paketinin hesaplanan sistem modeli Denklem 2’de verilmiştir. Dinamometreye ölçülen kuvvet değerleri, dinamometre ucunun alanı olan 7 cm² değerine bölünerek kPa cinsinden basınç değerleri elde edilmiştir.

$$\frac{D(s)}{T(s)} = \frac{0.0002}{s^3 + 0.1s^2 + 0.001s + 1 \times 10^{-5}} \quad (2)$$

Burada D(s) basınç, T(s) sıcaklık değerlerinin Laplace uzayındaki değerlerine karşılık gelmektedir.

3.3. Isıtıcı & düşük kaynama noktalı sıvıyı ihtiva eden aktüatör paketinin genel modeli (basınç/akım ilişkisi)

Sıcaklık/akım ve basınç/sıcaklık modellerine ek olarak aynı verilerle direk olarak basınç/sıcaklık modeli de hesaplanmıştır. Bu modele aktüatörün genel modeli diyebiliriz. Hesaplanan tüm modeller ilgili sistemlerin dereceleri 3’ten fazla olmayacak şekilde, MATLAB System Identification Toolbox’ın hesapladığı sistem cevabı karşılaştırma oranları mümkün olduğunca yüksek olacak şekilde hesaplanmıştır.

$$\frac{D(s)}{I(s)} = \frac{9.86s^2 + 4.43s + 0.04}{s^3 + 0.14s^2 + 0.01s + 7 \times 10^{-5}} \times e^{-2s} \quad (3)$$

Burada D(s) basınç, I(s) akım değerlerinin Laplace uzayındaki değerlerine karşılık gelmektedir.

3.4. Tekstil basınç sensörü modeli (sığa/basınç ilişkisi)

Kendi ürettiğimiz tekstil tabanlı giyilebilir ve yıkanabilir basınç sensörlerine [16] uygulanmış basıncın dinamometre ile kPa cinsinden ölçülen değerleri ile bunlara karşılık sensör tarafından ölçülen sığa (kapasitans) değerlerinin pF cinsinden değerleri kullanılarak Denklem 4’teki sistem modeli hesaplanmıştır.

$$\frac{C(s)}{D(s)} = \frac{0.2s^2 + 0.007s + 7 \times 10^{-5}}{s^3 + 0.1s^2 + 0.005s + 5 \times 10^{-5}} \quad (4)$$

Burada C(s) sığa, D(s) basınç değerlerinin Laplace uzayındaki değerlerine karşılık gelmektedir.

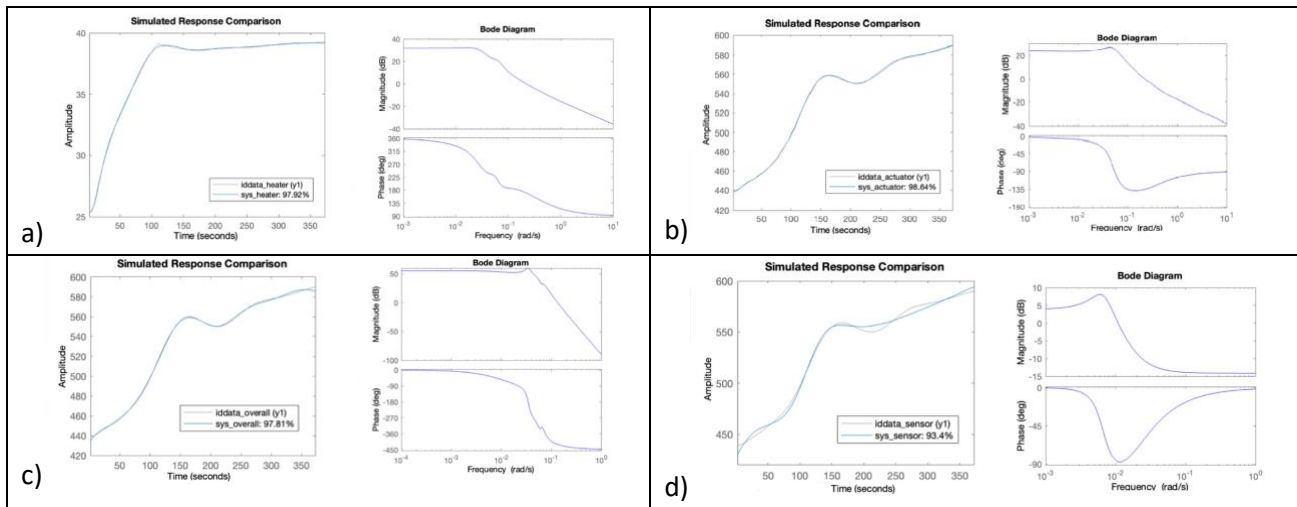
3. Sonuçlar

Bu çalışma ile yumuşak robotik için tekstil tabanlı termal aktüatörlerin matematiksel modelleri hakkında bir fikir edinilmeye çalışılmış ve elde edilen sonuçlar raporlanmıştır. Daha sonraki çalışmalarda bu modeller kullanılarak gerekli kontrolcü ve filtre tasarımları yapılabilir veya sistem üzerinde gerekli fiziksel değişimler yapılabilir.

Uygulamada da bu modellerin davranışları doğrulanmıştır.

Modeller kararlı ve kontrol edilebilirdir. Yalnızca ısıtın tekstilde zaman gecikmesi mevcuttur ve aynı 2 saniyelik gecikme aktüatörün genel sistem modelinde de görülmektedir. Elde edilen modellerden görülmüştür ki, tekstil tabanlı ısıtıcının sahip olduğu gecikmeye uygun kontrolcüler uygulanabilir. Isıtıcının sahip olduğu ısı geçişi gecikmesinin dışında, düşük kaynama noktalı sıvının kendi gecikmesinin olmadığı görülmüştür.

Şu an için fizyoterapi ve masaj uygulamalarında soğutucu olmadan da çalışma yeterli olmakta, bu uygulamaların zaten yavaş uygulanması gerektiği ve soğutma kontrolü sağlanamadığı için, kontrolcü olarak da ON/OFF kontrolden daha ileri modellere (PID gibi klasik kontrol yöntemlerine bile) ihtiyaç duyulmamaktadır.



Şekil 4: Hesaplanan modellerin uyuşma oranları ve Bode diyagramları

Farklı çalışmalarda anlık ısıtıcı sistemler ve ısıtma modunun yanında soğutma modunu da sağlayacak sistemler geliştirilebilirse bu tip robotik aktüatörler daha hızlı uygulamalarda da kullanılabilir. Soğutucu olarak hidrolik/pnömatik çözümler uygulayabiliyor olsak da bunu sağlayan motorlar sistemin yumuşak robotik ve tekstil tabanlı olması ilkesine ters düşmektedir. Bu yöntemler yerine jel peltier sistemler üzerine çalışmalarımız da devam etmektedir.

Ürettiğimiz tekstil tabanlı kapasitif kuvvet sensöründe ise zaman gecikmesi bulunmadığı gibi, mevcut ölçümlerin yapıldığı ölçüm aralığında neredeyse doğrusal ölçümler alınabildiği görülmüştür.

Teşekkür

Bu çalışmaya katkıları bulunan RoboTexTherapy Takımı eski üyeleri Zeynep Beler, Elif Dede, Ayşe Nur Camgöz, Hatice Nur Küçükşahin, Elif İrem Sınmaz ve Emine Esra Çelebi'ye, fizyoterapi alanında değerli görüşleri için Fzt. Görkem Açar'a ve değerli katkıları ve yol göstermeleri için Doç. Dr. Onur Cihan ve Prof. Dr. Emine Dilara Koçak hocalarımıza teşekkür ederiz.

Bu proje Avrupa Komisyonu tarafından Maria Sklodowska-Curie bireysel burs programı kapsamında RoboTexTherapy proje adı, 845683 proje numarasıyla ve TÜBİTAK tarafından 120C118 proje numarasıyla desteklenmiştir.

Bu proje TÜBİTAK MAM tarafından düzenlenen TEKNOFEST 2020 Biyoteknoloji ve İnovasyon yarışmasında öğrenci projesi olarak malmze desteği almış, yarışma sonunda ikincilik ödülünü kazanmıştır.

Ayrıca Adana Hacı Sabancı Organize Sanayi Bölgesi tarafından düzenlenen 2. Ulusal Sanayi Odaklı Ar-Ge projeleri yarışmasında lisansüstü projeler seviyesinde birincilik ödülüne layık görülmüştür.

Proje desteği veren ve ödüle layık gören tüm kurumlara teşekkür ederiz.

Kaynakça

- [1] M. T. Loghmani and M. Whitted, "Soft tissue manipulation: A powerful form of mechanotherapy," *Journal of Physiotherapy & Physical Rehabilitation*, vol. 1, no. 4, 2016.
- [2] R. J. Morris, "Intermittent pneumatic compression—systems and applications," *Journal of medical engineering & technology*, vol. 32, no. 3, pp. 179–188, 2008.
- [3] C. Haas, T. A. Butterfield, Y. Zhao, X. Zhang, D. Jarjoura, and T. M. Best, "Dose-dependency of massage-like compressive loading on recovery of active muscle properties following eccentric exercise: rabbit study with clinical relevance," *British Journal of Sports Medicine*, vol. 47, no. 2, pp. 83–88, 2013.
- [4] L. Snyder-Mackler, A. Delitto, S. W. Stralka, and S. L. Bailey, "Use of electrical stimulation to enhance recovery of quadriceps femoris muscle force production in patients following anterior cruciate ligament reconstruction," *Physical therapy*, vol. 74, no. 10, pp. 901–907, 1994.
- [5] P. Ben-Galim, E. L. Steinberg, Y. Rosenblatt, N. Parnes, A. Menahem, and R. Arbel, "A miniature and mobile intermittent pneumatic compression device for the prevention of deep-vein thrombosis after joint replacement," *Acta Orthopaedica Scandinavica*, vol. 75, no. 5, pp. 584–587, 2004.
- [6] L. V. Langenhove and C. Hertleer, "Smart clothing: a new life," *International Journal of Clothing Science and Technology*, vol. 16, no. 1/2, pp. 63–72, 2004.
- [7] N. K. Persson, J. G. Martinez, Y. Zhong, A. Maziz, and E. W. Jager, "Actuating textiles: next generation of smart textiles," *Advanced Materials Technologies*, vol. 3, no. 10, p. 1700397, 2018.
- [8] P. H. Nguyen and W. Zhang, "Design and computational modeling of fabric soft pneumatic actuators for wearable assistive devices," *Scientific reports*, vol. 10, no. 1, pp. 1–13, 2020.
- [9] P. Polygerinos, N. Correll, S. A. Morin, B. Mosadegh, C. D. Onal, K. Petersen, M. Cianchetti, M. T. Tolley, and R. F. Shepherd, "Soft robotics: Review of fluid-driven intrinsically soft devices; manufacturing, sensing, control, and applications in human-robot interaction," *Advanced Engineering Materials*, vol. 19, no. 12, p. 1700016, 2017.
- [10] L. Cappello, K. C. Galloway, S. Sanan, D. A. Wagner, R. Granberry, S. Engelhardt, F. L. Haufe, J. D. Peisner, and C. J. Walsh, "Exploiting textile mechanical anisotropy for fabric-based pneumatic actuators," *Soft robotics*, vol. 5, no. 5, pp. 662–674, 2018.
- [11] C. J. Payne, E. G. Hevia, N. Phipps, A. Atalay, O. Atalay, B. R. Seo, D. J. Mooney, and C. J. Walsh, "Force control of textile-based soft wearable robots for mechanotherapy," in *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2018, pp. 5459–5465.
- [12] A. Miriyev, K. Stack, and H. Lipson, "Soft material for soft actuators," *Nature communications*, vol. 8, no. 1, pp. 1–8, 2017.
- [13] M. Garrad, G. Soter, A. T. Conn, H. Hauser, and J. Rossiter, "Driving soft robots with low-boiling point fluids," in *IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*, Seoul, Korea (South), April 2019, pp. 74–79.
- [14] V. Sanchez, C. J. P. D. J. Preston, J. T. Alvarez, J. C. Weaver, A. T. Atalay, M. Boyvat, D. M. Vogt, R. J. Wood, G. M. Whitesides, and C. J. Walsh, "Smart thermally actuating textiles," *Advanced Materials Technologies*, vol. 5, no. 8, p. 2000383, 2020.
- [15] M. F. Çelebi, Z. Beler, E. Dede, E. D. Koçak, O. Atalay, A. Atalay, and V. Gazi, "Textile-Based Thermally Driven Actuators for Soft Robotic Mechanotherapy Applications," 2022 8th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), Istanbul, Turkey, 2022, pp. 1303–1308, doi: 10.1109/CoDIT55151.2022.9804015.
- [16] Ç. Gümüş, K. Özlem, F. Khalilbayli, Ö. F. Erzurumluoğlu, G. İnce, Ö. Atalay, and A. Tunçay Atalay, "Textile-Based Pressure Sensor Arrays: A Novel Scalable Manufacturing Technique", *Micro and Nano Engineering*, doi: 10.1016/j.mne.2022.100140
- [17] M. F. Çelebi, A. Atalay, Ö. Atalay, and V. Gazi, "Design, Modelling, and Control of An Entirely Textile-Based Wearable Actuating System with Sensor Feedback for Therapeutic Applications", *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, CoDIT 2022 Special Issue (Değerlendirme aşamasında – henüz yayınlanmamış).