

TEKNOFEST

HAVACILIK, UZAY VE TEKNOLOJİ FESTİVALİ

BİYOTEKNOLOJİ İNOVASYON YARIŞMASI

PROJE DETAY RAPORU

ÜNİVERSİTE VE ÜZERİ SEVİYESİ PROJE

KATEGORİSİ

TAKIM ADI

RoboTexTherapy

PROJE ADI

Tekstil Tabanlı Termal Aktüatörler İle Yumuşak Robotik

Uygulamaları

BAŞVURU ID

381815

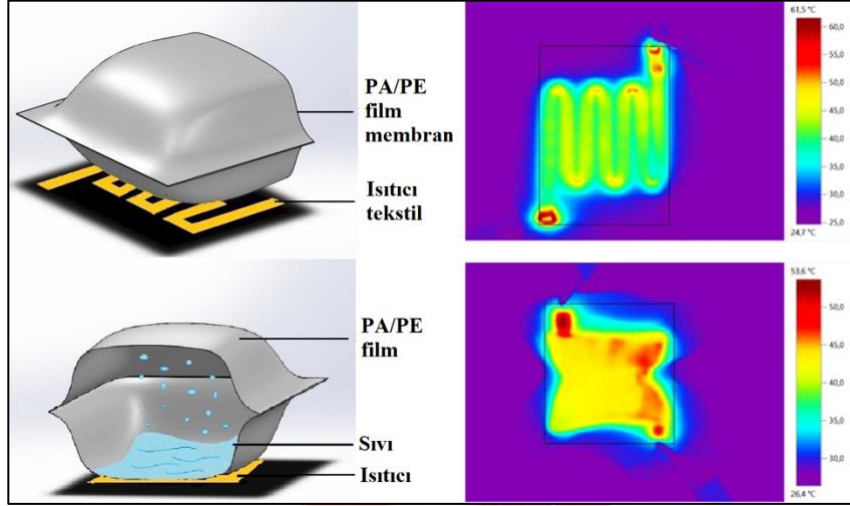
1. Proje Özeti (Proje Tanımı) (5 puan)

Bu proje yeni bir eyleyici sisteminin tasarlanması ve bu eyleyiciler kullanılarak bir rahatsızlığa yönelik yardımcı giyilebilir cihaz tasarlanması olmak üzere iki aşamalıdır. İlk aşama proje olarak tamamlanmış olup, ikinci aşama fikir aşamasında olup, belirli rahatsızlıklara yönelik prototipler tamamlanmış fakat hastalar üzerinde vaka analizlerinin 2022 yaz döneminde yapılması planlanmaktadır.

Projenin ilk aşaması Adana Hacı Sabancı Organize Sanayi Bölgesi [2. Sanayi Odaklı Ar-Ge ve İnovasyon Yarışması](#)'nda 1. seçilmiş olup, projenin ikinci aşaması bu projeden farklı bir prototiple ([Karpal tünel sendromu için tekstil tabanlı yumuşak robotik eldiven](#)), henüz ilk aşama tamamlanmadan katılan Teknofest 2020 Biyoteknoloji İnovasyon yarışmasında 2. seçilmiştir. Bu proje, "RoboTexTherapy" projesi kapsamında Maria Sklodowska-Curie Bireysel Destek Programı ([845683](#)) aracılığıyla Avrupa Komisyonu tarafından desteklenmiştir.

Gün geçtikçe gelişen mühendislik uygulamaları ile günümüzde artık farklı bilim dalları bir arada çalışarak ortak bir amaca hizmet edebilmektedir. Akıllı tekstillerin alt kolu elektronik tekstiller, tekstil alanında e-tekstiller veya giyilebilir elektronikler olarak bilinmektedirler. Elektronik tekstiller adından da anlaşıldığı üzere içerisinde elektronik ve tekstil yapılarının bir arada kullanıldığı ürünlerdir (Bilir, 2016). Günümüzde elektriksel olarak iletken özellikteki tekstil yapıları; endüstri, askeriye, uzay, tıp gibi birçok alanda kullanılarak, koruma, savunma, sağlık, iletişim, hesaplama, otomasyon amaçlı tekstil ürünleri olarak aktif rol almaya başlamıştır (Sünter, 2011). Giyilebilir tekstil yapılarına entegre edilen sensörler ile tıp alanında hastanın sağlık durumunu izleme, teşhis-tanı ve tedavi gibi uygulamalar gerçekleştirilebilmektedir. Tıp alanında fizik tedavi yöntemleri ile hastaların kas ve eklem rahatsızlıkları incelenebilmektedir. Fizik tedavi başlığı altında mekanoterapi ve termoterapi uygulamaları yer almaktadır.

Bu projede, mekanoterapi ve termoterapi yöntemlerini kullanabilen yenilikçi bir eyleyici kullanılarak boyun bölgesinde rahatsızlık hisseden kullanıcılar için portatif ve basit bir kullanım sunmayı amaçlayan tekstil tabanlı bir boyunluk tasarlanacaktır. Giyilebilir cihazda kullanılmak üzere gümüş kaplı naylon iplikten (Statex, 2021) üretilen tekstil yapıyı ısıtıcı ve içerisinde zehirsiz, kokusuz, renksiz ve yanmaz sıvı (3M™, 2021) ihtiva eden membrandan oluşan eyleyiciler (aktüatör) ve yine gümüş kaplı naylon kumaştan sensör üretilecektir. Elektrik iyi şekilde ileten gümüş kaplamalı naylon iplik nakış entegrasyon tekniği ile dokuma kumaşa entegre edilecektir. İçerisine Novec 7000 ve Novec 7001 sıvılarının 3:1 oranında karıştırılmasıyla elde edilen kimyasal sıvının enjekte edildiği Poliamid/Polietilen bir membran ve yine tekstil tabanlı kapasitif basınç sensöründen oluşmaktadır. Projenin yenilikçi yönü de bu sandviç yapısında yer almaktadır. Sandviç yapıdaki elemanların işlevleri sırasıyla şu şekilde açıklanabilir: gümüş kaplamalı naylon iplikle işlenmiş ısıtıcı kumaş; üstünden elektrik akımı geçmesiyle naylon ipliğin ve dolayısıyla kumaşın ısınması görevini yerine getirir. Bu ısıtma işlemiyle membran içerisinde bulunan Novec 7000 ve Novec 7001 sıvılarının düşük sıcaklıkta gaz hale geçmeleriyle şişmeye başlar. Bu süreçte ısıtıcı kumaşın yaklaşık 45 dereceye kadar ısıtılması ve membranın şişmesi ile termoterapi yöntemi tam anlamıyla ve mekanoterapi kısmen sağlanmış olur. Membranın şişmesinin kontrol edilmesi için kapasitif basınç sensöründen alınan basınç bilgisine bakılır. Bu basınç bilgisi belirlenen değeri aştığında, uygulanan elektrik gerilimine ara verilir ve ısıtıcı kumaşın soğumasıyla membranın içindeki kimyasalın gaz halden tekrar sıvı hale geçmesine imkân tanınır. Sıvı hale geçen kimyasal ile



Şekil 1 Aktüatör sisteminin genel yapısı (solda), ısıtıcının (sağ üst) ve membranın (sağ alt) aktif termal kamera görüntüleri

membranın sönmesi ve bu sürecin tekrarlanmasıyla hem termoterapi hem de mekanoterapi yöntemleri tam anlamıyla sağlanmış olur.

2. Problem/Sorun (5 puan)

2.1. Teknoloji yönünden sorun

Bugüne kadar yapılmış çalışmalarda, yumuşak pnömatik aktüatör sistemleri, yumuşak robotik sistem içeren yardımcı giyilebilir cihazların üretiminde önde gelen teknolojilerdir (Nguyen, 2020). Pnömatik hücrelerin yapımında silikon ve kauçuk gibi elastomerik malzemeler kullanılmaktadır (Polygerinos, 2017). 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 nöromüsküler rahatsızlıklardan muzdarip bireyler için yumuşak robotik eldivenlerin ve pnömatik cihazların tasarlanması için kumaş bazlı aktüatörleri tanıttı (Cappello, 2018) (Payne, 2018). Tekstil tabanlı yaklaşım, silikon muadilinden daha hafif, daha uyumlu, düşük profilli ve konforlu bir alternatif sunmaktadır. **Bununla birlikte, yaygın olarak kullanılmalarının önünde üstesinden gelinmesi gereken önemli engeller vardır. Bu yapılara yumuşak robotik olarak atıfta bulunulmasına rağmen, önemli sayıda bileşen sistem içinde hala katıdır. Giyilebilir cihazlar olarak gerçekten yumuşak robotik yapılar oluşturmak veya yeni teknolojiler geliştirerek katı bileşenleri yumuşak yapılara dönüştürmek için sistematik bir yaklaşıma ihtiyaç vardır.**

Prototip uygulama yukarıdaki örnek bir soruna çözüm olarak sunulmakta olup, başka sorunlara da çözümler tasarlanacaktır.

2.2. Rahatsızlık yönünden sorun

Boyun bölgesi anatomik yapısı gereğince oldukça hareketli bir yapıya sahiptir. Bu bölgenin hareketli olmasının pek çok avantajı olmasına rağmen yaralanmaya da açık bir bölge olduğu belirtilmektedir (Aydınlioğlu, 1997). Boyun ağrısı; servikal bölgenin lateral ve posterior bölgelerinde hissedilen rahatsızlık hissi olarak tanımlanmaktadır (Hoving, 2004). Yapılan bir

çalışmada boyun ağrısının bireylerin yaşamları boyunca görülme sıklığı yaklaşık %67-71 arasında bulunmuştur ve bu durum kişilerin üçte ikisinin en az bir kez boyun ağrısı problemiyle karşılaştığını göstermektedir (Hoving, 2004) (McLean, 2007). Ağrının görülme sıklığının fazla olması kişilerin sosyal yaşamını ve iş verimini de olumsuz yönde etkilemektedir.

Projeyi gerekli kılan nedenlerin başında mevcut durumda hastalara önerilen yumuşak boyunlukların tedavide tek başına yeterli olmayışı, tedavinin çok uzun sürmesi ve hastalarda kas zayıflığının görülmesidir. Hastalara boyunluk dışında önerilen fizik tedavinin maliyetli ve uzun zaman almasından dolayı tedavi etkinliği azdır ve genel olarak hastalar durumu görmezden gelerek ciddi bir rahatsızlık yaşayana kadar tedaviyi erteleyebilmektedir. Geç tedavi uygulanması hem sağlık sektöründeki harcamaları artırmakta hem de hastaların hayat kalitesini daha fazla düşürmektedir.

3. Çözüm (20 puan)

Mekanoterapi; kemik-eklem, kas veya sinir hastalıklarının, mekanik aletler yardımıyla yaptırılan hareketlere dayalı bir fizik tedavi şeklidir. Mekanoterapinin amacı, vücudun tümünü veya belli bölgelerini ve çeşitli eklemleri dış etkilerle hareketlendirip tedavilerini gerçekleştirmektir. **Termoterapi** ise ısıyla birlikte kan akışını arttıran ve ağrı hissini azaltmak için sinirleri uyaran bir fizik tedavi yöntemidir (Huang, 2013). Termoterapi, özellikle kas gerginliği veya spazm başta olmak üzere akut veya kronik ağrı semptomlarını tedavi etmek için ağırlı bölgeye uygulanan ısı tedavisidir.

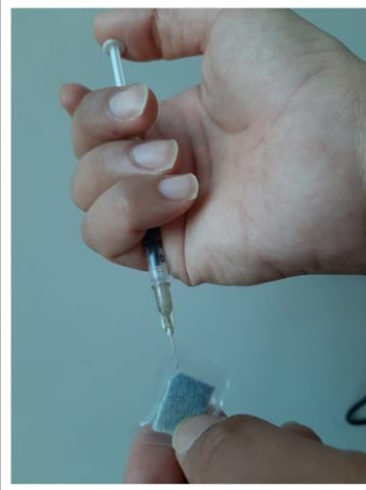
Termoterapi, kan damarlarını genişletir ve ciltteki kan akışını artırır. Yüzeysel kasları gevşetir, kas spazmını ve eklem sertliğini azaltır (Thermotherapy & Cryotherapy, 2020).

Yumuşak Doku Manipülasyonu (Soft Tissue Manipulation, STM), fiziksel rehabilitasyon, hastalık önleme ve sağlığı geliştirmede önemli etkileri olan güçlü ve doğrudan bir mekanoterapi şeklidir (Loghmani, 2016). Klinik uygulamalar için kas dokusunu manipüle etmek için farklı tipte cihazlar geliştirilmiştir ve pnömatik kompresyon cihazları halihazırda piyasada ve yaygın olarak kullanılmaktadır (Morris, 2008). Bununla birlikte, bu sistemlerin sınırlı kontrol modaliteleri vardır ve uygulama sırasında vücuda uygulanan kuvvetleri izleme eksikliği vardır ve önceki çalışmalar, yumuşak dokunun yükleme koşullarının mekanik tedavi üzerinde çok önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir (Haas, 2012). Bu nedenle literatürde tekstil tabanlı yöntemleri içeren alternatif yaklaşımlar değerlendirilmektedir. Kas iyileşmesine yardımcı olmak için elektrik stimülasyonu (Snyder-Mackler, 1994) veya pnömatik kompresyon (Ben-Galim, 2004) kullanan bazı STM cihazları vardır.

Önceki bazı çalışmalar sıvı-gaz hal değişimi özelliğinden yararlanarak yumuşak aktüatörlerin geliştirilmesine odaklanmıştır. Miriyev ve ark., yumuşak robotik yapıyı geliştirmek için silikonun gözenekleri içinde etanol ve ısıtıcı eleman olarak da tel kullanmışlardır (Mirivey, 2017). Başka bir çalışmada Garrad ve ark. aktüatörler ve pompa oluşturmak için Novec™ 7000 ile doldurulmuş silikon ve kauçuk üretilen, ısıtma elemanı olarak da iletken kumaş parçası kullanmışlardır (Garrad, 2019). Yakın tarihli bir çalışmada, yumuşak robotik cihazı bu tür hacimli bileşenlerden arındıran termal olarak güçlendirilmiş yumuşak akışkan aktüatörler (TPSFA'lar) geliştirilmiştir (Sanchez, 2020). TPSFA'ları harekete geçirmek için gerekli basınç seviyesini oluşturmak için düşük kaynama noktalı sıvıların sıvı-gaz hal değişimi özelliğini kullanır. **Tekstil tabanlı ısıtma ve algılama elemanları aracılığıyla geliştirilen aktüatör, çevresel sıcaklık dalgalanmalarının varlığında dinamik basınç kontrolü**

sağlayan kapalı döngü geri bildirimini gösterir. Bu projede, mekanoterapi uygulamaları için yumuşak robotik sistemler geliştirmek için yukarıda bahsedilen teknolojiyi kullanıyoruz. Gerçekleştirilen projede piyasada kullanılan ürünlere alternatif olarak masaj yapan, ağrıyı azaltan, hastayı rahatsız etmeyen, sosyal hayatı etkilemeyen, sıcaklık veren, hastaların basitçe kullanabileceği portatif bir ürün sunulmaktadır. **Proje hem basit boyunlukların eksik kaldığı uygulamaların (termoterapi ile Hot Pack ve mekanoterapi ile masaj ve manuel terapi yöntemleri) yerine getirilmesi hem de fizik tedavinin dezavantajlı konumda olduğu zaman ve maliyet noktalarında ucuz ve portatif olmasıyla ihtiyaçları karşılayacaktır.**

Boyun ağrıları hemen hemen herkeste görülen bir rahatsızlıktır. Boyunluk üzerine entegre edilen ısıtıcı ve eyleyici sistemi, mekanoterapi ve termoterapi uygulayarak masaj tedavisi yapmaktadır. Kişinin boynunda farklı bölgelere yapılan ısı artışı ve iyileştirici masaj sayesinde kaslarda rahatlama olmaktadır. Sıcaklık artışı sayesinde kaslarda sedatif etki olmaktadır ve kan dolaşımı hızlanmaktadır. Etkilerin dinamik verilmesi sayesinde inhibisyon olmamaktadır. Gerçekleştirilen bu prototip boyun ağrısının kronikleşmesinin önlenmesi, tedaviye erişimin hızlı olması, tedavi etkinliğinin artırılması ve sürdürülebilir olmasını sağlayabilecektir. Giyilebilir biyomedikal cihaz ile kişinin günlük hayat kalitesinin artırılması, iş performansından geri kalmaması, kişiye özel tedavi hizmeti ve iyileşme süresinin kısaltılmasını sağlayacaktır.



Şekil 2 Sıvının membrana enjeksiyonu

Zararsız ve yanmayan işlenmiş sıvıların karışımı (Novec™ 7000 (C₃F₇OCH₃) ve Novec™ 7100 (C₄F₉OCH₃)) ihtiva eden membran, gümüş kaplı naylon iplikten (Sahta, 2014) nakışla üretilen ısı panelleri ile yaklaşık 39-45°C sıcaklığa kadar ısıtılmaktadır ve eyleyiciler bu sıcaklık etkisiyle birlikte şişmektedir. Eyleyiciler sıralı ve periyodik olarak şişme-sönme hareketi yaparak hem mekanoterapi hem de termoterapi uygulamaktadır.

Boynun belirli bölgelerine masaj yaparak iyileşme sağlanabileceği düşünülmektedir. Hastalar sadece masaj ve sadece boyunluk kullanarak bile rahatlamaktadırlar. **Boyunluk üzerine entegre edilen üç aktüatörün fizik tedavi uzmanının ve/veya tıp doktorunun önereceği basıncı uygulayacak şekilde sıralı olarak şişmesi ve sönmesi ile ovalama masaj hareketini insan yerine boyunluğun kendisi yapacaktır.**



Şekil 3 Aktüatör sistemi ve boyunluk

4. Yöntem (20 puan)

Çalışmada birden fazla birbirlerinden farklı teknikler kullanılmıştır. Bu sebepten dolayı alt basamaklara ayrılmış, aşağıdaki maddelerde özetlenmiştir.

4.1. İletken Malzemenin Kumaşa Entegrasyonu

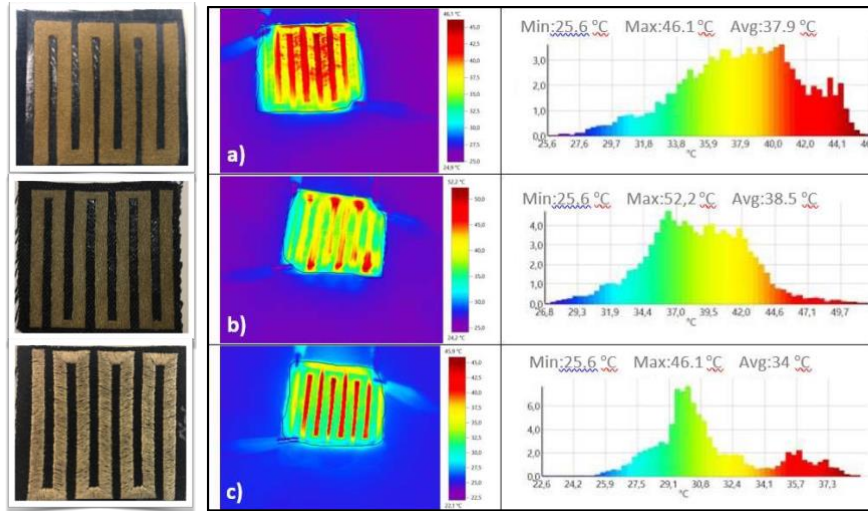
Isıtma fonksiyonlu tekstil yüzeylerinin elde edilmesi için ısıtma elemanının çeşitli yöntemler ile tekstil yapılarına entegre edilmesi gerekmektedir. Literatürde en bilinen yöntemler nakış teknolojisi, dokuma teknolojisi, örme teknolojisi ve baskı teknolojisidir. Elektro-iletken malzemenin üretilmiş iplikler kumaşa nakış teknolojisi ile işlenebilir, iletken iplik dokuma teknolojisi ile dokunup kumaş haline getirilebilir veya örme teknolojisi ile örme kumaş haline getirilebilir. İletken malzemenin üretilen veya iletken malzeme ile kaplanan kumaşlar lazer kesim ile istenilen şekillerde kesilip, kumaşa entegre edilebilir. İletken mürekkepler kullanılarak baskı teknolojisi ile kumaşa veya istenilen başka yüzeye iletken malzeme entegre edilebilir.

Bu çalışmada, Statex marka 235dtex inceliğe sahip, doğrusal direnci 100 Ω /cm olan gümüş kaplamalı naylon iplik nakış teknolojisi için Statex marka doğrusal direnci 3,3 Ω /cm olan gümüş kaplamalı örme kumaş ise hem lazer kesim hem de bıçak kesim teknikleri için kullanılmıştır.

Farklı tekniklerle üretilen numunelere ait performans değerleri (elektriksel direnç, güç, akım) ve bu tekniklerin 4 dakika içinde, farklı güç değerlerindeki sıcaklık değerleri Tablo-1’de verilmiştir. Hem üretim metodolojisinin hem de elektriksel performansın en iyi olduğu yöntem lazer kesim teknolojisi olduğu görülmüştür. Bıçak kesim tekniği literatürde kullanılmayan bir teknik. Bıçak kesimi için daha önceden metal bıçaklar tasarlanıp üretiliyor. İstenilen her şeklin hemen yapılamayacağı bıçak kesim tekniği bu dezavantajı nedeniyle seçilmemiştir.

Tablo-1: Entegrasyon Tekniklerinin Elektriksel Performans Karşılaştırması

Metot	Alan (cm ²)	Ortalama Sıcaklık (°C)	Süre (dk)	Direnç (Ω)	Akım (A)	Güç (W)
Nakış	25	37,9	4	27,36	0,20	1,10
Lazer Kesim	25	38,5	4	43,43	0,17	1,14
Bıçak Kesim	25	34	4	53,26	0,16	1,05
Nakış	25	30,2	4	27,36	0,11	0,31
Lazer Kesim	25	29,6	4	43,43	0,08	0,30
Bıçak Kesim	25	28,2	4	53,26	0,09	0,31
Nakış	25	34,1	4	27,36	0,16	0,69
Lazer Kesim	25	34,1	4	43,43	0,13	0,73
Bıçak Kesim	25	31,1	4	53,26	0,13	0,65



Şekil 4 (a) Bıçak kesim, (b) lazer kesim ve (c) nakış ısıtıcıların fotoğrafları, termal kamera görüntüleri ve sıcaklık dağılım haritaları

4.2 İletken Malzemenin Membran ile Kaplanması ve Kimyasal Enjeksiyonu

4.2.1 Membran Seçimi ve İletken Malzemenin Membran ile Kaplanması

Membran seçimi yapılırken Poliüretan (PU), Termoplastik Elastomer (TPE), Biaksial Polipropilen (BOPP), Cast (gerdirilmemiş) Polipropilen (CPP), PET/PE (Polietilen teraftalat/Polietilen) ve Polipropilen/Polietilen (PA/PE) malzemelerden üretilmiş filmler kullanılmıştır. Bu filmlerden beklentimiz sıvı ve gaz fazlarında herhangi bir sızıntıya ve geçirgenliğe müsaade etmeyen malzemelerden üretilmiş filmler olmasıdır. Tablo-2’de verilen özelliklere göre en iyi gaz geçirgenlik ve su buharı geçirgenliğine sahip malzeme Poliamid/Polietilen olduğundan dolayı, membran olarak PA/PE filmi bu çalışmada kullanılacaktır. PA/PE membran, Poliamid ve Polietilen karışımı bir malzemeden üretilmiş olup 70 mikron kalınlığa sahiptir ve 135°C-150°C derece sıcak presle 2-2.5 saniyede yapışmaktadır.

Tablo-2: Membran malzemelerinin özellikleri

Malzeme	Kalınlık (µm)	Oksijen geçirgenliği (cm ³ / m ³)	Buhar geçirgenliği (g / m ²)	Isıl yapışma sıcaklığı (°C)
TPE	38	85 - 646	-	121
TPU	50	85 - 646	-	121
PET/PE	76	180	< 15	145 - 155
PA/PE	70	123	< 15	135 - 150

İletken malzemenin üzeri, seçilen PA/PE membran ile araları boşluk olacak şekilde kaplanmıştır. Membranlar ısıtıcılara kumaş cepler dikilerek sabitlenmiştir.

Tablo-3: Membran numunelerinin geçirgenlik testleri

Döngü	TPE (g)	TPU (g)	PA/PE (g)	PET/PE (g)
1	2,83	2,17	2,92	3,72
2	2,82	2,17	2,92	3,72
3	2,81	2,16	2,92	3,72
4	2,80	2,16	2,92	3,72
5	2,79	2,16	2,92	3,72



Şekil 5 Membranların ısıtıcı kumaşa ceplerle sabitlenmesi

4.2.2. Kimyasal Sıvı Seçimi

Kimyasal seçimi için aranan sıvının özelliklerinden biri kimyasalın düşük kaynama noktasına sahip olmasıdır. Madde 4.2.1.'de iletken malzemenin üzerine yapıştırılan membranın arasına düşük kaynama noktasına sahip kimyasal sıvı enjekte edilecektir. Eldivenin ısıtılması gereken sıcaklık (39-45) °C'de olduğundan dolayı bu sıcaklığa yakın sıcaklıkta, kimyasal sıvının gaz fazına geçmesi gerekmektedir. Düşük kaynama noktası ile ısıtılan iletken paneller vesilesi ile kimyasal sıvı kaynayacaktır. Bu kimyasal sıvı fazından gaz fazına geçerek membranın şişmesini, ısı azalması ile gaz fazından sıvı fazına geçerek membranı sönmesini sağlayacaktır. Ayrıca kimyasalın yanmayan, toksik olmayan yapıda olması gerekmektedir.

Yapılan araştırmalar sonucunda ve Tablo 4'te belirtilen sıvılar içinden en uygun sıvıların Novec 7000 ve Novec 7100 kimyasallarının olduğu tespit edilmiştir. Kimyasal formülü $C_3F_7OCH_3$ (metil perfloropropil eter) olan 3M™ Novec™ 7000 sıvısının kaynama noktası 34°C. Yanıcı ve aşındırıcı değildir ve iyi termal stabiliteye sahiptir. Düşük sıcaklıklarda kullanışlıdır (-120°C'ye kadar). Sızıntı veya diğer ekipman arızası durumunda elektronik ekipmana zarar vermez. Novec 7100 sıvısının ham maddesi Metilnonaflorobütiller ($C_5H_3F_9O$) kimyasalıdır. Novec 7100 sıvısının önerilen çalışma sıcaklığı 50 °C olup kaynama sıcaklığı 61 °C'dir. Aerosol formülasyonlarında, taşıyıcı solvent ve yağlamada, çökeltme solventinde, ısı transferinde, veri merkezleri için daldırma ve soğutmada, hassas temizlemede ve buharla yağ almada kullanılır.

Tablo-4: Kullanılan sıvıların kaynama noktaları

Sıvı	Kaynama noktası (°C)
Su	100
Aseton	56
Etanol	78
3M™ Novec™ 7000	34
3M™ Novec™ 7100	61
½ Novec™ 7000 + ½ Novec™ 7100	47
¾ Novec™ 7000 + ¼ Novec™ 7100	40

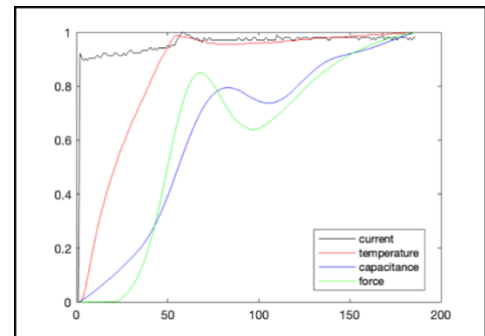


Şekil 6 Novec 7000/7100 karışımı

Seçilen kimyasallar 3'e 1 oranında, Novec 7100 ve Novec 7000 karıştırılarak PA/PE membrana enjekte edilmiştir (Şekil 7). Bu oranın ve ortalama 40 °C seçilmesinin nedeni, bir insanın ortalama vücut sıcaklığının 37 °C olması ve ısıtıcı kapatıldıktan sonra Novec karışımının tekrar konsantre olması için 3 °C aralık bırakılmasıdır.

4.3 Kontrolör tasarımı için sistem modelinin hesaplanması

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 kumaş özelliği nedeniyle) modeller elde edildi.



Şekil 7 Modellerin elde edilmesinde kullanılan normalize edilmiş veri seti

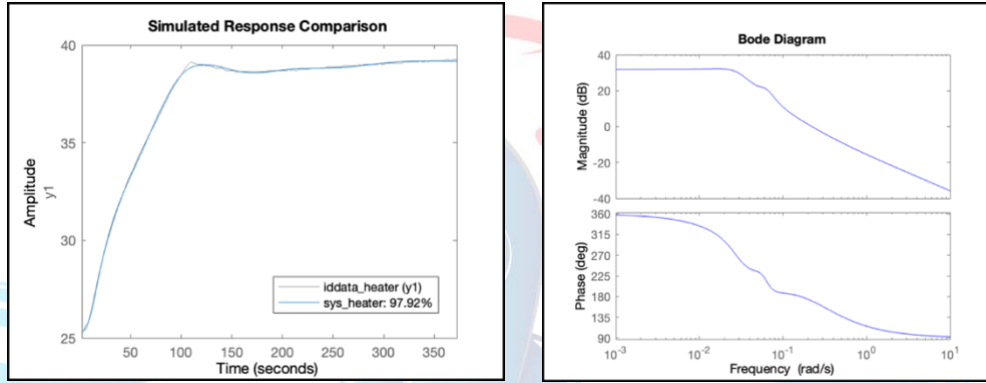
Modellerin elde edilmesinde kullanılan veri seti oluşturulurken örnekleme zamanı 2 saniye olarak veriler toplanmıştır ve 186 örnek (372 saniye \approx 6 dakika) aralarındaki ilişkinin gözle görülebilmesi için aşağıdaki gibi 0 – 1 arasında normalize edilmiştir.

Aşağıdaki bölümlerde $T(s)$, $I(s)$, $C(s)$ ve $D(s)$ sırasıyla Laplace uzayında ifade edilen ısıtıcı sıcaklığı, giriş elektrik akımı, sensör kapasitans işareti ve dinamometreden okunan değerdir.

4.3.1. Isıtıcı modelinin modeli (sıcaklık/akım ilişkisi)

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

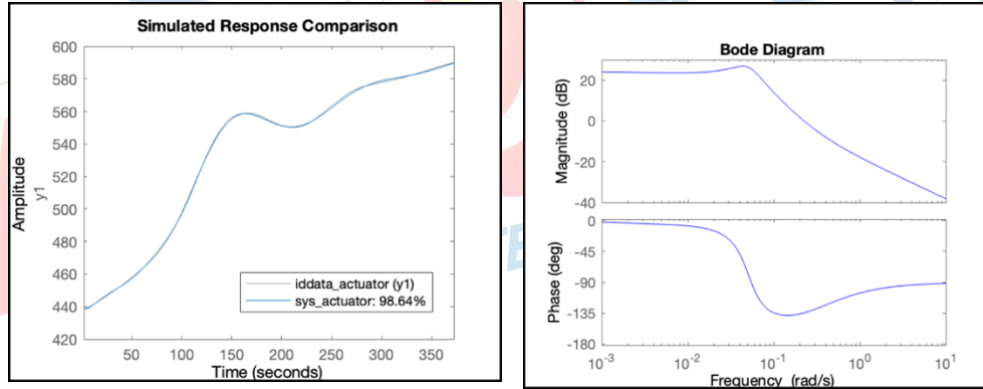
Hesaplanan sistem modelinden de görüldüğü gibi daha önceki empirik yöntemlerle bire bir eş olarak 2 saniyelik gecikme göstermektedir (e^{-2s}).



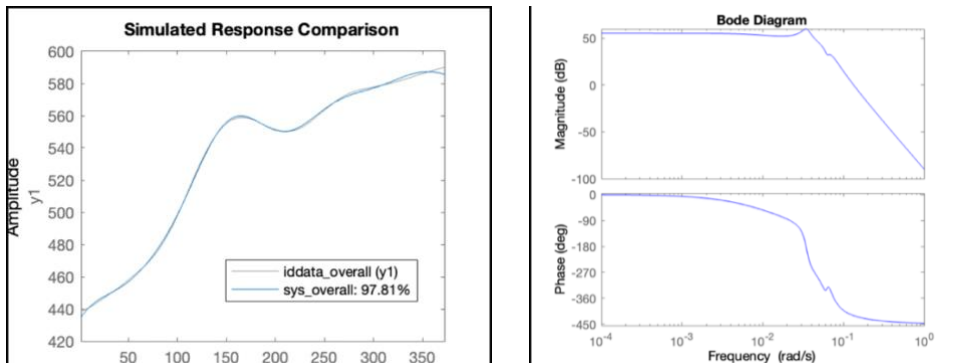
Şekil 8 Isıtıcı modeliyle verilerin uyuşma oranı ve Bode diyagramı

4.3.2. Membranın modeli (basınç/sıcaklık ilişkisi)

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



Şekil 9 Membran modeliyle verilerin uyuşma oranı ve Bode diyagramı



Şekil 10 Genel aktüatör modeliyle verilerin uyuşma oranı ve Bode diyagramı

4.3.2. Isıtıcı & Membranın genel modeli (akım/basınç ilişkisi)

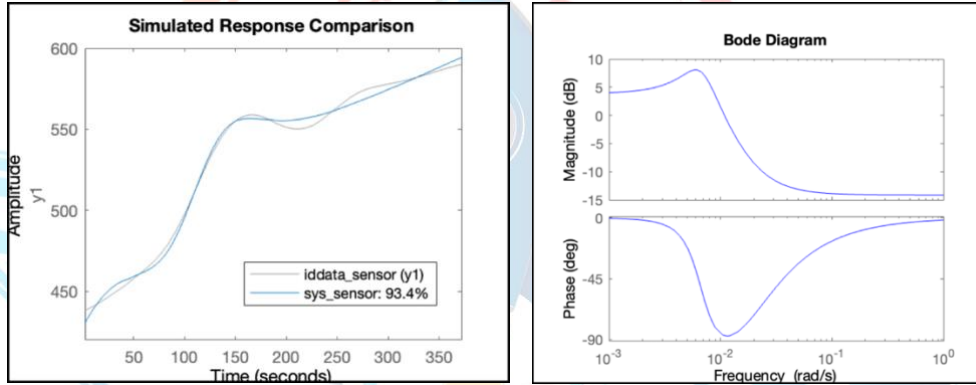
$$\text{Basitleştirilmiş model: } \frac{T(s)}{I(s)} \times \frac{D(s)}{T(s)} \equiv \frac{D(s)}{I(s)} = \frac{9.86s^2 + 4.43s + 0.04}{s^3 + 0.14s^2 + 0.01s + 7 \times 10^{-5}} \times e^{-2s}$$

Not: Uyuşma oranlarının %98 seviyelerinde olan ısıtıcı tekstil ile membran modellerinin direkt çarpımıyla genel modele ulaşamamamızı, sistemin doğrusal olmadığına işaret etmektedir diye yorumluyoruz.

4.3.3. Tekstil basınç sensörü modeli (basınç/kapasitans ilişkisi)

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

Modelden sensörün doğrusala yakın çalıştığını yorumluyoruz. Sığa değeri Farad cinsinden değil, ADC (analog to digital converter) birimiyle okunduğu için 8-bit ($2^8 = [0 \ 255]$) cinsindedir. Yani 1 kPa basınç değeri, onluk tabanda $5_{10} / 255$ çözünürlükle ifade edilebilmektedir ve 51 kPa ölçüm aralığımız mevcuttur.



Şekil 11 Sensör modeliyle verilerin uyuşma oranı ve Bode diyagramı

4.4. Test Düzenegi



Şekil 12 Test düzenegi

Isıtıcıya istenilen referans sıcaklık değerine ulaşana kadar elektrik gücü verilmiştir. Modeli hesaplamak için kullanılan veri setinin uzunluğu 186 örnektir (= 372 saniye). İstenen sıcaklık değeri, çalıştırma mekanizmasının uyguladığı istenen bir kuvvet (veya basınç) değerine karşılık gelir. İstenen kuvvet değerlerine karşılık gelen referans sıcaklık değerleri, bir deneme-yanılma metodolojisi kullanılarak ampirik olarak belirlendi. İlk prototip devresinde, elektrikli aktüatör olarak bir NPN BJT (transistör) kullanıldı. Ancak, devre kararlılığı sorunları nedeniyle, bir H-köprü sürücüsü ile değiştirildi. Gelecekteki potansiyel bir çalışma olarak, bir soğutma mekanizması ve daha yeterli kontrol stratejileri dahil etmeyi düşünülmektedir.

Bu çalışmada, kontrolör olarak Arduino Lilypad kart ve elektrik devresinin sürücüsü olarak alüminyum soğutucusuz L298 mini sürücü modülü kullanılmıştır. Değişiklik yapılması durumunda aynı çalışma voltajı, devre kurulumu ve program kodu ile diğer Arduino uyumlu geliştirici kartları da kullanılabilir. Şişme

durumunda gözlemlenen akım/voltaj oranı $0,4 \text{ A} / 5 \text{ V} = 0,08 \text{ S}$ 'dir. Bu oran tekstil ısıtıcısının empedansına bağlıdır.

Yaklaşık 100 ms yanıt süresi (sıcaklık dönüştürme için 93,75 ms ve 2 ms yazma çevrim süresi) ile 1 Kablolü protokol kullanan dijital bir termometre, DS18B20, 1 sn örnekleme hızında sıcaklık sensörü olarak kullanılmıştır. 1-Wire protokolü bir dijital iletişim protokolü olduğundan, bu sensör kontrolörün herhangi bir dijital giriş pinine bağlanabilir. Bluno/Arduino Nano'nun 5V beslemesi ile sensör çıkışını yukarı çekmek için besleme gerilimi ile sensörün çıkışı arasında bir $4.7\text{k}\Omega$ direnç kullanılmıştır.

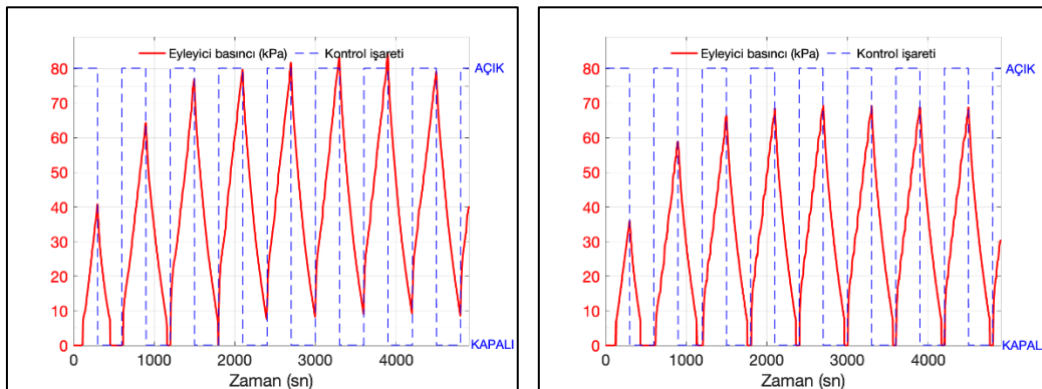
Sıcaklık ölçümünde 1 saniyelik bir zaman gecikmesi olduğu için (2 saniye toplam gecikmeye katkıda bulunan sensör ve hesaplama gecikmeleri nedeniyle), ölçülen ve gerçek sıcaklık değerleri arasında bir miktar fark olabilir. Gerçek ve ayarlanmış limitler arasındaki tahmini maksimum sıcaklık farkı 4°C 'dir. Başka bir deyişle, denetleyici gücü kapatmadan önce gerçek sıcaklık 48°C 'ye kadar yükselebilir. Ayrıca, gerçek ve ölçülen sıcaklık değerleri arasındaki farkın dış sıcaklık ve basınca bağlı olarak değişebilecektir. Bu durumda referans sıcaklığı değiştirilmelidir.

Bir tekstil ısıtıcı ile bir 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 ölçerinin ölçüm ucuna eklenmiştir. Böylece kuvvet değeri, ucun alanı bilinerek basınç değerine dönüştürülebilir. Ölçüm ucunun alanı, aktüatörün alanından küçük olmalıdır.

Sistem dinamiklerinin PE/PA membran üzerindeki etkisi ve tekrarlanan koşulların aktüatör performansının etkisini görmek için 500 şişirme ve söndürme döngüsü boyunca sistem takip edilmiştir. Test 3.5 gün sürmüştür. Her şişirme/söndürme döngüsü 10 dakika (5 dakika ısınma ve 5 dakika bırakma) sürmüştür. Testin başlangıcında ve sonrasında kaydedilen deneysel sonuçlar Şekil 14'de gösterilmektedir. Dinamometre mevcut konfigürasyonda 5 N'nin altındaki kuvvetleri ölçemediğinden 5 N'nin altındaki değerlerin sıfır olarak gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, ilk çevrimlerdeki toplam çevrim dinamikleri ile 500 çevrimden oluşan deney sonrası çevrimler arasında önemli bir fark olmadığı ve ayrıca aktüatörün görünür fiziksel durumunda önemli bir değişiklik olmadığı görülmektedir.

Döngülerdeki basınç farkı kararlı durumda (ısıtıcı yeterince ısındıktan sonra) birbirine yakındır. İki şekildeki döngülerin tepe noktalarındaki küçük farkın ($\sim 10 \text{ kPa}$), alt ekstremalar olduğundan, 3.5 günlük deney sırasında dış koşullardaki (gece ve gündüz arasındaki sıcaklık farkı gibi) değişiklikten kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 13 500 döngü testi başlangıcı ve sonunda basınç değerleri

Referans ile çıkış arasındaki zaman gecikmesi deneysel olarak 2 saniye olarak ölçülmüştür. Açma-kapama kontrol cihazının AÇIK fazı sırasında ısıtıcıya 10 V'luk bir voltaj uygulanmış ve bu voltajda ısıtıcı üzerinden ortalama 0.9 A akım ölçülmüştür.

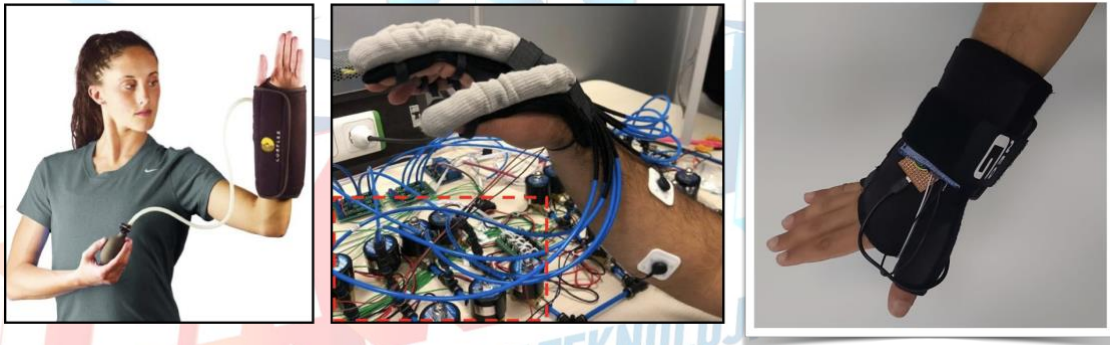
Ortezlerin maksimum tolere edilebilir ve rahatlama sağlayan basıncına ilişkin tahminler yaklaşık 5 kPa'dır (yani 0.5 N/cm²) (Cool, 1989) (Sanchez, 2020). Şekil 7'deki dalgaların tepe noktaları veya büyüklükleri aktüatörün üst basınç sınırlarıdır.

Sonuçlar, önerilen aktüatörlerin istenen basınç seviyesini oluşturduğunu ve mekanoterapi cihazlarını hacimli bileşenlerden kurtarmak için büyük potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

2019 yılında Tekstil tabanlı, yıkanabilir ve katlanabilir aktüatör fikriyle THS 1 seviyesinde başladığımız projede şu anda eldiven, çorap ve bu projedeki boyunluk prototipleri ile THS 7 seviyesinde olup, etik kurul izinleri ve vaka analizleri sonunda THS 8 seviyesi de tamamlanacaktır.

5. Yenilikçi (İnovatif) Yönü (15 puan)

Yenilikçi eyleyicilerin pnömomatik sistemlerle kıyaslanması aşağıdaki şekil ve tabloda verilmiştir. [Pazarda satılan bir ürün](#) (solda) (Corflex), [Harvard Üniversitesi'nde yapılan bir çalışmanın](#) benzeri olan ve Teknofest 2021'de 1.lik ödülü alan [TexRobots](#) (ortada) (2021, **Biyoteknoloji İnovasyon Yarışması, Proje Kategorisi, TexRobots**) ve bu projede önerdiğimiz sistemi kullanan [RobotexTherapy](#) (sağda) (2020, **Biyoteknoloji İnovasyon Yarışması, Proje Kategorisi, RoboTexTherapy Marmara**) projemiz ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 14 Cihazların karşılaştırılması. Corflex pnömomatik atel (solda), TexRobots (ortada), ve RoboTexTherapy (sağda)

Tablo-5: Cihazların Karşılaştırılması

Corflex	TexRobots	RoboTexTherapy
Sert ve ağır	Yumuşak ve nispeten hafif	Yumuşak ve hafif
İnsan gücü kullanılmaktadır	Yüksek güç tüketimi	Vücut ısısını kullanarak düşük güç tüketimi (5000 mAh power bank ile 4 saat)
Taşınabilir	Sabit	Taşınabilir
Yalnızca mekanoterapi	Yalnızca mekanoterapi	Mekanoterapi, termoterapi

• Boyunluk olarak aradığımızda [pazardaki ürünler](#) yine el pompalı ürünlere benzemektedir. Boyunluk ve eldiven yönlerinden kıyaslama yapıldığında üstünlükler benzerdir.

• ***İstenilen kaynama noktasına sahip eyleyici sıvısı üretimi*** de bu projenin yenilikçi yönlerinden biridir. Uyumlu Novec sıvıları, Novec™ 7000 kaynama sıcaklığı $T_{7000} = 34^{\circ}\text{C}$ ve Novec™ 7100 kaynama sıcaklığı $T_{7000} = 61^{\circ}\text{C}$, n de Novec™ 7000 sıvısının toplam karışıma oranı olmak üzere karıştırılarak $34 - 61^{\circ}\text{C}$ aralığında kaynama noktasına sahip sıvı şu formül kullanılarak üretilebilmektedir

$$T_{\text{karışım}} = n \times T_{7000} + (1 - n) \times T_{7100}.$$

- Projede önerdiğimiz sistem hem STM ile mekanoterapi, hem de termoterapi gerçekleştirme potansiyeline sahiptir.
- Sıvı-gaz hal değişimi yapan aktüatörlerin sistem modelleri sistem tanılama yöntemleriyle hesaplanmaya çalışılmıştır. Henüz çalışmalar tamamlanmamış, sadece birim basamak yanıtı tabanlı (black-box ARX) sistem tanılama yapılmıştır. Periyodik girdili sistem tanılama yöntemleri ile sistem modelleri çıkarılacak olup, ısıl sistemlerin tepki sürelerinin uzun olmasından dolayı şu an hesaplanan modellere göre pek fazla farklarının olması beklenmemektedir. Hesaplanan bu modellere dayanarak kontrolör tasarlanacak olup, bugüne kadar uygulanan aç/kapa (ON-OFF) kontrolöre göre varsa üstünlükleri incelenecektir.
- Önceki projelerimize göre boyunluk tasarımı dışında, ***eyleyicilerin sıralı olarak kontrol edilip, ovalama masajının yapılması*** da başka bir yeniliktir.
- ***Membranların üretiminde, halen bu konu üzerine çalışan diğer araştırmacıların da aşamadığı bir sorun olan, uzun bir süre sonra kalıcı şişme sorununu çözen ve seri üretimi kolaylaştıran “atık keçeleri kullanarak dikey üretim yöntemi” de literatürde incelediğimiz ve sorduğumuz araştırmalarda bulunmamaktadır. Yöntem projeyi sürdürülebilirlik yönünden de iyileştirmektedir.***

6. Uygulanabilirlik (10 puan)

Aktüatör sisteminin patent başvurusu planlanmaktadır. Takım üyelerinin hali hazırda kurduğu bir start-up şirketi (Haneio Teknoloji Ltd. Şti.) bulunmakta olup, bu proje özelinde şirket kurulduğunda da işe deneyimli bir şekilde başlanacaktır. Prototip üretimi, donanım ve yazılım çalışmaları tamamlanmış ve aktüatör sistem modelleme testleri yapılmıştır.

Çalışmamızın, [Fzt. Görkem AÇAR](#) ile etik kurul izinleri alındıktan, hastalar üzerinde test edildikten ve vaka analizleri yapıldıktan sonra ticari bir ürüne dönüştürülmesi planlanmaktadır. Robotik-Tekstil alanlarında konferanslara katılım sağlanacak ve geliştirilmiş ürün tanıtılacaktır. 18 Mayıs 2022’de IEEE ve IFAC’ın düzenlediği 8. Uluslararası Kontrol, Karar ve Bilgi Teknolojileri Konferansı’nda sunumu yapılacaktır/yapılmıştır. Robotik ve otomotiv sanayi ve tarım gibi alanlarında da uygulanabilirliği üzerine çalışmalar yürütülmesi düşünülmektedir.

2019 yılında tekstil tabanlı, yıkanabilir ve katlanabilir aktüatör fikriyle THS 1 seviyesinde başladığımız projede şu anda eldiven, çorap ve bu projedeki boyunluk prototipleri ile THS 7 seviyesinde olup, etik kurul izinleri ve vaka analizleri sonunda THS 8 seviyesi de tamamlanacaktır.

7. Tahmini Maliyet ve Proje Zaman Planlaması (5 puan)

Tablo-6: Proje Maliyet Tablosu (9 Mayıs 2022 fiyatları)

Malzeme	Miktar	Birim	Fiyat (TL)	Malzeme	Miktar	Birim	Fiyat (TL)
İletken iplik	30	m	120	LilyPad	1	adet	114
İletken kumaş	180	gr	520	L298 mini	2	adet	12
Membran	15	kg	1120	Li-Po pil	1	adet	160
Novec 7000	0.5	L	3000	Boyunluk	1	adet	160
Novec 7100	0.5	L	3000	Toplam			8296

Proje önceki yıllarda yaptığımız çalışmaların devamı niteliğinde olup, kur dalgalanmalarından dolayı önceki çalışmalarımızın maliyetini tam olarak verememekteyiz. Birçok demirbaş malzeme de üniversite ve özel şirketlerden bedelsiz olarak ödünç alınarak kullanılmıştır.

Bu genel toplam piyasada ikame olabilecek ürünlerin bir adetiyle bile kıyaslandığında işçilik hariç $\frac{3}{4}$ oranında ucuzdur ve tablodaki ilk dört kalem tek bir ürün için değil, birçok ürün için kullanılabilir. Bu kalemler bu dönem içerisindeki Ar-Ge deneylerinde kullanılan fiyatlardır.

Tablo-7: İş paketleri

Proje adımları	Sorumlu	Başarı katkısı	1. ve 2. ay	3. ve 4. ay	5. ve 6. ay	7. ve 8. ay
Literatür araştırmaları	Ayşe, Fatih, İrem, Hatice	10%				
İletken malzeme entegrasyon yöntemlerinin belirlenmesi	Hatice	20%				
Elektriksel ısı performans testlerinin yapılması ve en uygun yöntemin seçilmesi	Ayşe	20%				
Kontrol sistemi tasarımı	Fatih	20%				
Prototip ürün geliştirilmesi ve testlerin yapılması	Ayşe, Fatih, İrem, Hatice	30%				

8. Proje Fikrinin Hedef Kitlesi (Kullanıcılar) (5 puan)

Hemen hemen herkes boyun ağrısı yaşadığı için ürünü herkes kullanabilir. Belirli rahatsızlıklar için tasarlanacak diğer ürünler ilgili hastalığı yaşayan kişilere özel olarak tasarlanacaktır.

Yapılan bir çalışmada boyun ağrısının bireylerin yaşamları boyunca görülme sıklığı yaklaşık %67-71 arasında bulunmuştur ve bu durum kişilerin üçte ikisinin en az bir kez boyun ağrısı problemiyle karşılaştığını göstermektedir (Hoving, 2004) (McLean, 2007). Ağrının görülme sıklığının fazla olması kişilerin sosyal yaşamını ve iş verimini de olumsuz yönde etkilemektedir.

Geliştirilen aktüatör sistemi otomotiv ve robotik sanayinde co-bot (colloborative robot, işbirlikçi robot) uygulamalarında kullanımı da planlanmaktadır.

9. Riskler (10 puan)

Tablo-8: Risk tablosu

Risk	Risk yönetimi (B planı)	Risk skoru
Tekstil yapıları rijit yapılardan karmaşık olduğundan, klasik kontrol yöntemleri yetersiz olabilir.	Adaptif kontrol tekniği ve diğer benzer modern kontrol yöntemleri incelenecektir. Sistem modelleri zaten hesaplanmıştır ve daha ileri hesaplamalar da yapılabilir.	3 x 2 = 6 (Düşük)
Arduino Lilypad kartları CPU hızı ve bellek açısından yetersiz olabilir.	Arduino uyumluluğunun projenin profesyonellik ve tekrarlanabilirliği için önemli olması sebebiyle eğer CPU hızı ve bellek yetersizlikleri yaşanırsa, ARM tabanlı STM32 Nucleo kartlar veya Arduino uyumlu Intel mimarisine sahip diğer MCU kartlar gibi daha iyi belleğe sahip daha hızlı mikro denetleyiciler kullanılabilir.	3 x 2 = 6 (Düşük)
Hastalar memnun kalmayabilir.	Tasarım, aktüatörlerin yeri ve uygulanacak elektrik gücü yönünden değişikliklere açıktır.	1 x 4 = 4 (Düşük)

Tablo-9: Risk skoru matrisi

RİSK SKORU	ŞİDDET				
	1- Çok hafif	2-Hafif	3- Orta	4-Ciddi	5- Çok ciddi
OLASILIK					
1- Çok küçük	Önemsiz 1	Düşük 2	Düşük 3	Düşük 4	Düşük 5
2- Küçük	Düşük 2	Düşük 4	Düşük 6	Orta 8	Orta 10
3- Orta	Düşük 3	Düşük 6	Orta 9	Orta 12	Yüksek 15
4- Yüksek	Düşük 4	Orta 8	Orta 12	Yüksek 16	Yüksek 20
5- Çok yüksek	Düşük 5	Orta 10	Yüksek 15	Yüksek 20	Kabul Edilemez 25

10. Kaynaklar (5 puan)

- 3MTM (2021) NovecTM 7000 Engineered Fluid Technical Data. Erişim Tarihi 15 Mart, (2022), URL: <https://multimedia.3m.com/mws/media/121372O/3m-novec-7000-engineered-fluid-tds.pdf>
- 3MTM (2021) NovecTM 7100 Engineered Fluid Data Sheet. Erişim Tarihi 15 Mart, (2022), URL: <https://multimedia.3m.com/mws/media/199818O/3m-novec-7100-engineered-fluid.pdf>
- Aydınlioğlu A., Rağbetli MÇ. (1997). Discus intervertebralis: Embriyoloji ve anatomi(I); 4(4):232–6.
- Ben-Galim, P., Steinberg, E., Rosenblatt, Y., Parnes, N., Menahem, A., & Arbel, R. (2004). A miniature and mobile intermittent pneumatic compression device for the prevention of deep-vein thrombosis after joint replacement. *Acta Orthopaedica Scandinavica*, 75(5), 584-587. <https://doi.org/10.1080/00016470410001466>
- Bilir, M.Z. 2016. Balistik Koruyucu Elektronik Tekstil Ürün Tasarımı. Gazi Üniversitesi, Güzel Sanatlar Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara.
- Cappello, L., Galloway, K. C., Sanan, S., Wagner, D. A., Granberry, R., Engelhardt, S., Haufe, F. L., Peisner, J. D., & Walsh, C. J. (2018). Exploiting Textile Mechanical Anisotropy for Fabric-Based Pneumatic Actuators. *Soft Robotics*, 5(5), 662-674. <https://doi.org/10.1089/soro.2017.0076>
- Celebi, M. F., et. Al. (2022). Textile-Based Thermally Driven Actuators for Soft Robotic Mechanotherapy Applications. 2022 8th International Conference On Control, Decision And Information Technologies (CoDIT).
- Cool, J. C. (1989). Biomechanics of orthoses for the subluxed shoulder. *Prosthetics & Orthotics International*, 13(2), 90-96. <https://doi.org/10.3109/03093648909078219>
- Garrad, M., Soter, G., Conn, A. T., Hauser, H., & Rossiter, J. (2019). Driving Soft Robots with Low-Boiling Point Fluids. 2019 2nd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft). <https://doi.org/10.1109/robosoft.2019.8722812>
- Haas, C., Butterfield, T. A., Zhao, Y., Zhang, X., Jarjoura, D., & Best, T. M. (2012). 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*, 47(2), 83-88. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2012-091211>
- Hoving, J. L., De Vet, H. C., Twisk, J. W., Devillé, W. L., Van der Windt, D., Koes, B. W., & Bouter, L. M. (2004). Prognostic factors for neck pain in general practice. *Pain*, 110(3), 639-645. <https://doi.org/10.1016/j.pain.2004.05.002>.
- Huang, C., Holfeld, J., Schaden, W., Orgill, D., & Ogawa, R. (2013). Mechanotherapy: revisiting physical therapy and recruiting mechanobiology for a new era in medicine. *Içinde Trends in Molecular Medicine (C. 19, Issue 9, ss. 555-564)*. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.molmed.2013.05.005>
- Loghmani, M. T., & Whitted, M. (2016). Soft Tissue Manipulation: A Powerful Form of Mechanotherapy. *Journal of Physiotherapy & Physical Rehabilitation*, 1(4). <https://doi.org/10.4172/2573-0312.1000122>

- McLean, S. M., May, S., Moffett, J. K., Sharp, D. M., & Gardiner, E. (2007). Prognostic factors for progressive non-specific neck pain: A systematic review. *Physical Therapy Reviews*, 12(3), 207-220. <https://doi.org/10.1179/108331907x222967>
- Merskey H., Bogduk N. (1994). *Classification of Neck Pain. Descriptions of chronic pain syndromes and definition of pain.* 2nd edition. Seattle: IASP Press;194 p 103-110.
- Miriyevev, A., Stack, K., & Lipson, H. (2017). Soft material for soft actuators. *Nature Communications*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00685-3>
- Morris, R. J. (2008). Intermittent pneumatic compression—systems and applications. *Journal of Medical Engineering & Technology*, 32(3), 179-188. <https://doi.org/10.1080/03091900601015147>
- Nguyen, P. H., & Zhang, W. (2020). Author Correction: Design and Computational Modeling of Fabric Soft Pneumatic Actuators for Wearable Assistive Devices. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69094-9>
- Payne, C. J., Hevia, E. G., Phipps, N., Atalay, A., Atalay, O., Seo, B. R., Mooney, D. J., & Walsh, C. J. (2018). Force Control of Textile-Based Soft Wearable Robots for Mechanotherapy. 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). <https://doi.org/10.1109/icra.2018.8461059>
- Polygerinos, P., Correll, N., Morin, S. A., Mosadegh, B., Onal, C. D., Petersen, K., Cianchetti, M., Tolley, M. T., & Shepherd, R. F. (2017). Soft Robotics: Review of Fluid-Driven Intrinsically Soft Devices; Manufacturing, Sensing, Control, and Applications in Human-Robot Interaction. *Advanced Engineering Materials*, 19(12), 1700016. <https://doi.org/10.1002/adem.201700016>
- Sanchez, V., Payne, C. J., Preston, D. J., Alvarez, J. T., Weaver, J. C., Atalay, A. T., Boyvat, M., Vogt, D. M., Wood, R. J., Whitesides, G. M., & Walsh, C. J. (2020). Smart Thermally Actuating Textiles. *Advanced Materials Technologies*, 5(8), 2000383. <https://doi.org/10.1002/admt.202000383>
- Sanchez, V., Walsh, C. J., & Wood, R. J. (2020). Textile Technology for Soft Robotic and Autonomous Garments. *Advanced Functional Materials*, 31(6), 2008278. <https://doi.org/10.1002/adfm.202008278>
- Shieldex (2021) Statex 235 dtex High Conductive Thread Technical Data. Erişim Tarihi 15 Mart, (2022), URL: <https://www.shieldex.de/products/madeira-hc-12/>
- Snyder-Mackler, L., Delitto, A., Stralka, S. W., & Bailey, S. L. (1994). Use of Electrical Stimulation to Enhance Recovery of Quadriceps Femoris Muscle Force Production in Patients Following Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Physical Therapy*, 74(10), 901-907. <https://doi.org/10.1093/ptj/74.10.901>
- Sünter, N. 2011. İletken İpliklerin Üretim Yöntemlerinin ve Özelliklerinin İrdelenmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- Thermotherapy & Cryotherapy. (2020). Physioactive: <https://www.physioactive.sg/our-services/treatments/thermotherapy.cryotherapy/#:~:text=thermotherapy%20is%20the%20use%20of,and%20reduces%>