

## 3B YAZDIRILMIŞ MONOLİTİK YUMUŞAK TUTUCU SİMÜLASYONU

Mehmet Mert İlman<sup>1, a)</sup>

<sup>1</sup>Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Hasan Ferdi Turgutlu Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü 45400, MANİSA

<sup>a)</sup>mert.ilmann@cbu.edu.tr

Bu çalışmada, yumuşak robotik uygulamalarda yaygın olarak kullanılan iki farklı aktüatör tipi olan tendon kontrollü aktüatör (TKA) ile pnömatik kontrollü aktüatörün (PKA) yapısal performansları sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Her iki tasarım aynı geometrik boyutlar kullanılarak modellenmiş ve UltraFuse TPU 85A malzeme özelliklerine göre analiz edilmiştir. Eğilme ve bloke kuvvet analizleri sonucunda, TKA'nın PKA ile benzer eğilme performansı sergilediği, ancak PKA'nın daha yüksek gerinim oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bloke kuvvet altında her iki sistem benzer kuvvet üretmiş, ancak TKA'nın kaymaya bağlı olarak daha fazla şekil değişimine uğradığı belirlenmiştir. Ayrıca, üç parmaklı tendon kontrollü tutucu (TKT) prototipi üretilmiş ve servo motor girdisine karşılık gelen eğilme açıları, TKA simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, düşük torklu servo motorlarla çalışabilen, portatif ve tek parça olarak üretilebilen TKT sisteminin, pnömatik alternatiflere kıyasla daha ekonomik ve uygulanabilir bir çözüm sunabileceğini göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Yumuşak aktüatör, tendon kontrollü aktüatör, pnömatik kontrollü aktüatör, sonlu elemanlar analizi, 3B baskı

### SIMULATION OF 3D-PRINTED MONOLITHIC SOFT GRIPPERS

#### ABSTRACT

In this study, the structural performances of two commonly used actuator types in soft robotic applications—tendon-driven actuators (TKA) and pneumatically driven actuators (PKA)—were compared using the finite element method. Both designs were modeled with identical geometric dimensions and analyzed based on the material properties of UltraFuse TPU 85A. As a result of the bending and blocking force analyses, it was observed that TKA exhibited a bending performance comparable to that of PKA, although PKA generated higher strain. Under blocking force conditions, both systems produced similar output forces; however, TKA underwent greater deformation due to sliding effects. Additionally, a three-finger tendon-driven gripper (TKT) prototype was fabricated, and the bending angles corresponding to servo motor input were compared with TKA simulation results. The findings indicate that the TKT system, which can operate with low-torque servo motors and be manufactured as a single piece, offers a more economical and practical alternative compared to pneumatically driven systems.

**Keywords:** Soft actuator, tendon-driven actuator, pneumatic actuator, finite element analysis, 3D printing

#### 1. GİRİŞ

Yumuşak aktüatörler; biyouyumlu, esnek malzeme kullanımı, hassas yapıları ve çeşitli nesne geometrilerine uyum sağlayabilen kavrama yetenekleri sayesinde, robotik tutucular veya rehabilitasyon [1] ve dış iskelet sistemleri benzeri giyilebilir teknolojiler ya da haptik uygulamalar [2] gibi birçok alanda

önemli avantajlar sunmaktadır. Bu geniş uygulama yelpazesi, farklı amaçlara hizmet edebilecek çeşitli tasarım yaklaşımlarına olan ihtiyacı beraberinde getirmektedir. Bu tasarımların üretim öncesinde sonlu elemanlar yöntemi gibi sayısal analiz yöntemleriyle değerlendirilmesi hem üretim sürecini kısaltmakta hem de maliyet açısından önemli

katkılar sağlamaktadır. Aynı zamanda, bu analizler tasarım optimizasyonu için de güçlü bir zemin oluşturarak aktüatör performansının ve enerji verimliliğinin artırılmasına katkıda bulunmaktadır [3].

Simülasyon ortamları yalnızca tasarım iyileştirmeleri için değil, aynı zamanda farklı aktüatör türleri arasında seçim yapılmasını kolaylaştıran karşılaştırmalı değerlendirmeler için de önemli bir araçtır. Ancak, mevcut literatürde farklı tipte yumuşak aktüatörlerin performanslarını doğrudan karşılaştıran sistematik çalışmalara rastlanmamıştır.

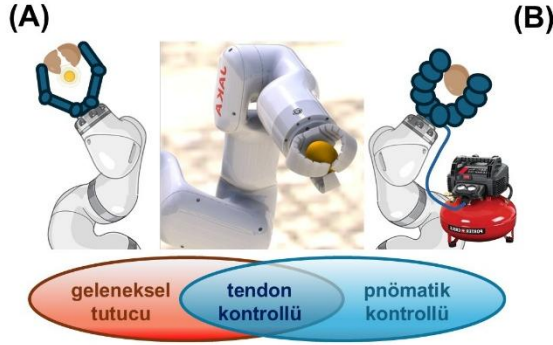
Bu çalışmada, farklı çalışma prensiplerine sahip iki yumuşak aktüatör tipi, tendon kontrollü aktüatör (TKA) ve pnömatik kontrollü aktüatör (PKA), yapısal açıdan karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Performans değerlendirmesinde yumuşak

aktüatörlerin karakterizasyonunda sıkça başvurulan eğilme ve bloke kuvvet analizlerinden yararlanılmıştır. Ardından, üç aktüatör parmağından oluşan TKT (Tendon Kontrollü Tutucu) prototipi ile elde edilen deneysel veriler, simülasyon sonuçları ile karşılaştırılarak sistem doğrulaması gerçekleştirilmiştir.

## Semboller ve kısaltmalar

### Kısaltma Açıklama

TKT	Tendon Kontrollü Tutucu
TKA	Tendon Kontrollü Aktüatör
PKT	Pnömatik Kontrollü Tutucu
PKA	Pnömatik Kontrollü Aktüatör



	geleneksel tutucu	tendon kontrollü	pnömatik kontrollü
kurulum	✓	✗	✓
uyum sağlama*	✗	✓	✓
narinlik**	✗	✓	✓
verimlilik	✓	✓	✗*o
hız	✓	✓	✗**

\* düzensiz şekilli objelere uyum sağlayarak kavrayabilme

\*\* kırılğan objelere zarar vermeden kavrayabilme

\*o pompa, servo motora kıyasla daha düşük verimlidir

\*\* pnömatik sistem, madde iletim süreci nedeniyle yavaş çalışır

Şekil 1. Tendon kontrollü tutucunun, geleneksel rijit ve pnömatik kontrollü tutucularla karşılaştırması. (A) Tutucuların robot kolu üzerindeki yerleşimi ve obje kavramalarına ilişkin görseller. (B) Tutucuların uyum sağlama, narinlik, verimlilik ve hız gibi unsurlara bağlı karşılaştırmaları, yeşil tik tutucunun ilgili unsurdan avantaj sağladığı, kırmızı tik ise dezavantaj sağladığını ifade etmektedir.

## 2. METODLAR

### 2.1. Yumuşak aktüatör tasarımı

TKT için, daha önce bir robotik yarışmada birincilik kazanmış dört uzuvlu bir tasarım [4] temel alınarak, yapının sadeliği ve üretim kolaylığı açısından üç uzuvlu bir versiyonu geliştirilmiştir (Şekil 4C). PKA ise aynı geometrik yapı korunarak, mevcut TKA tasarımının pnömatik kontrole uyarlanmasıyla oluşturulmuştur. Bu doğrultuda, PKA'da iç basınçla çalışan bir sistem tasarlandığı için, odacıklar aktüatörün karın bölgesinden sırt bölgesine taşınmıştır. TKT'de tendon çekildikçe yapı içine doğru kapanarak eğilme hareketi oluştururken, PKA'da bu hareket odacıkların içeriye doğru şişmesiyle sağlanmaktadır. İki aktüatörün adil şekilde karşılaştırılabilmesi amacıyla, her iki tasarımda da odacık sayısı ile toplam uzunluk, genişlik ve kalınlık gibi temel ölçüler sabit

tutulmuştur. PKA için ayrıca tüm odacıkların uzunlukları eşitlenerek, uygulanan basıncın dengeli dağılması ve odacıkların orantılı şişmesiyle düzgün bir kademeli eğilme hareketi elde edilmesi hedeflenmiştir.

### 2.2. Yumuşak aktüatör modellenmesi

Tendon Kontrollü Aktüatör (TKA) ve Pnömatik Kontrollü Aktüatör (PKA) için sonlu elemanlar analizine (FEA) dayalı yapısal bir modelleme gerçekleştirilmiştir. Aktüatörlerin yumuşak davranışını sağlayan malzeme olarak, Shore 85A sertliğe sahip UltraFuse TPU (Termoplastik Poliüretan) [5] tercih edilmiştir. Bu malzemenin hiperelastik karakteristiğini tanımlamak amacıyla, deneysel gerinim-gerilme verileri [6] üzerinden eğri uydurma yöntemiyle 3. dereceden Mooney-Rivlin modeline ait C10, C01 ve C11 parametreleri sırasıyla -0.9113 MPa, 6.0867 MPa ve 0.0724

MPa olarak hesaplanmıştır. Ayrıca malzeme yoğunluğu  $1.114 \text{ kg/cm}^3$ , akma dayanımı ise  $18.79 \text{ MPa}$  olarak tanımlanmıştır. Modellemede doğrusal olmayan çözüm yöntemi ve ikinci dereceden ağ yapısı kullanılmış, ağ kalitesini artırmak amacıyla şekil bozulması (skewness) değeri  $0.4$ 'ün altında tutulmuştur.

PKA modelinde, akışkan-katı etkileşiminin işlem karmaşıklığını artırması önlemek için iç basınç, doğrudan odacık yüzeylerine dik olarak uygulanmıştır. TKA için ise, tendonun uyguladığı kuvvetin konumu ve doğrultusu zamanla değiştiğinden, katı-katı etkileşimi göz önünde bulundurulmuştur. Bu doğrultuda tendon, ANSYS malzeme kütüphanesinde tanımlı polyeester malzeme ile modellenmiştir. Tendonun uç kısmına yalnızca yatay doğrultuda hareketine izin veren bir kayar mafsala eklenmiş; bu mafsala, tendonun uç yer değiştirme miktarı giriş olarak tanımlanmıştır. Bu sayede analiz sonunda tendona uygulanan kuvvet, ilgili mafsala yerleştirilen ölçüm probu aracılığıyla hesaplanabilmiştir.

Her iki aktüatör için yapılan bloke kuvvet analizlerinde ise, bükülme hareketini sınırlayacak şekilde  $1 \text{ mm}$  kalınlığında rijit bir plaka ek sınır koşulu olarak modele dahil edilmiştir. Temas mekaniğini simüle edebilmek amacıyla; odacıkların komşu yüzeyleri arasında, TKA modelinde tendon ile tendon yuvası arasında, ayrıca bloke kuvvet analizlerinde plaka ile aktüatör yüzeyi arasında temas tanımlamaları yapılmıştır. Tüm temaslar, saf ceza yöntemi (pure penalty) ile modellenmiş ve izin verilen maksimum yüzey geçirimi (penetrasyon)  $110 \text{ mikron}$  olarak sınırlandırılmıştır. Hesaplamaların basitleştirilmesi amacıyla tüm temaslar sürtünmesiz kabul edilmiştir.

### 2.3. TKT üretimi

Önceki çalışmada [7] üretimi gerçekleştirilen TKT, BambuLab A1 model 3B yazıcı ve UltraFuse TPU 85A filament kullanılarak imal edilmiştir. Yumuşak filamentler, PLA ve ABS gibi rijit filamentlere kıyasla yazıcının itme, geri çekme ve akış algılama sistemleriyle daha az uyumlu olduğundan, yazım öncesi ilave kalibrasyon gerektirmiştir. Bu kapsamda, Orca 2.3.0 dilimleyici yazılımı ile akış oranı, sıcaklık, basınç ve geri çekme parametreleri üzerinde testler yapılmış ve bu parametreler optimize edilmiştir. Ayrıca, filamentin yüksek higroskopik özelliği nedeniyle, uzun süreli

baskılarda kalite kaybını önlemek amacıyla Creality Space Pi filament kurutucu kullanılmıştır.

Bu üretim yöntemi sayesinde, TKA tek parça olarak destek malzemesi gerektirmeden basılabilmekte ve ek montaj işlemine ihtiyaç duymadan, yalnızca  $20$  dakika ila  $1$  saat arasında tamamlanan tendon ve servo motor kurulumu ile kullanıma hazır hâle getirilebilmektedir. Basit aç-kapa kontrolü ile çalışması, robot kollarına entegrasyonunu kolaylaştırmakta ve uygulama esnekliğini artırmaktadır. Kullanılan filament ve elektronik bileşenler dâhil olmak üzere toplam üretim maliyeti  $711 \text{ TL}$  olarak hesaplanmıştır [7].

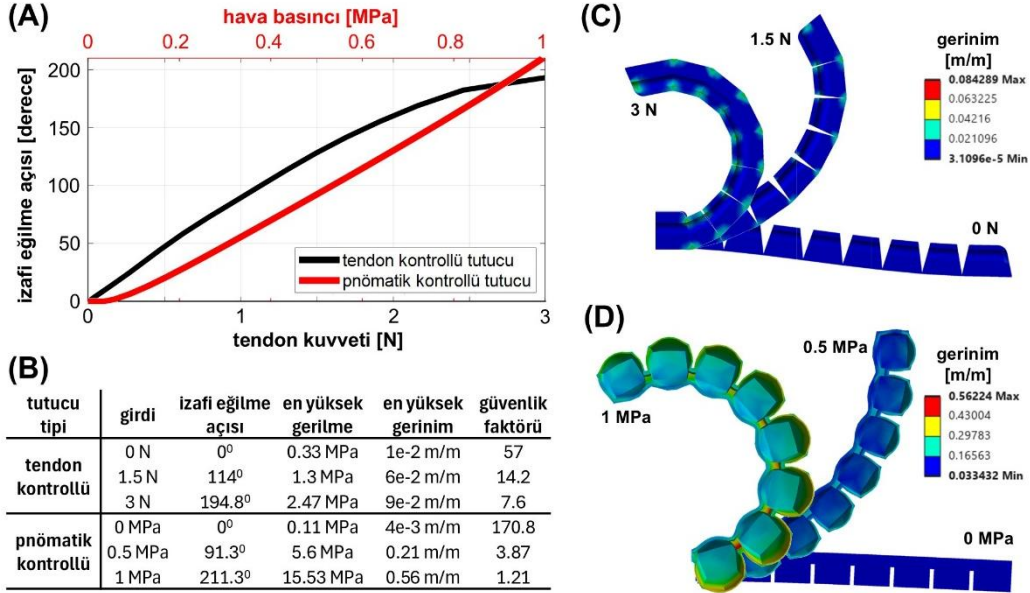
## 3. SONUÇLAR

### 3.1. Eğilme analizi

Eğilme analizi sonuçlarına göre, TKA'da  $0-3 \text{ N}$  aralığında uygulanan tendon çekme kuvveti ile  $194,8^\circ$  izafi eğilme açısı elde edilmiştir. PKA'da ise  $0-1 \text{ MPa}$  aralığında uygulanan hava basıncı sonucunda izafi eğilme açısı  $211,3^\circ$  olarak hesaplanmıştır (Şekil 2A). Girdi-çıkışı ilişkisi açısından incelendiğinde, PKA doğrusal bir eğilme davranışı sergilerken, TKA'nın eğilme eğrisi içbükey (konkav) bir form izlemektedir. Bu durum, TKA'da yer alan odacıklar arasındaki boşlukların başlangıçta kapanma payı oluşturmamasından kaynaklanmakta; yaklaşık  $200^\circ$ 'ye yaklaşıldığında odacıkların tamamen birleşmesiyle birlikte eğilme açısında değişim sınırlanmakta ve eğri plato oluşturmaktadır. Şekil 2B ve 2C'de her iki aktüatöre ait eğilme simülasyonlarına ilişkin görseller ile gerinim dağılımları sunulmuştur. Bu görsellerde, PKA'nın uygulanan basınçla orantılı olarak doğrusal biçimde artan kapanma oranı gözlemlenirken, TKA'nın eğilmesi tendon çekme miktarına bağlı olarak üstel (eksponansiyel) şekilde artmaktadır. Şekil 2B'de ayrıca, her iki aktüatör için giriş parametresi, izafi eğilme açısı, maksimum gerinim, gerilme ve güvenlik katsayısı değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu verilere göre; PKA,  $211,3^\circ$ 'lik eğilme için  $0,56 \text{ m/m}$  gerinime,  $15,33 \text{ MPa}$  maksimum gerilme değerine ve  $1,21$  güvenlik katsayısına sahiptir. TKA ise  $194,9^\circ$ 'lik eğilme için  $0,09 \text{ m/m}$  gerinim,  $2,47 \text{ MPa}$  gerilme ve  $7,6$  güvenlik katsayısına ulaşmıştır.

İki aktüatör arasında gözlemlenen gerinim farkının temel nedeni, eğilme hareketinin yapısal olarak nasıl sağlandığıyla ilgilidir. TKA'da eğilme, tendon çekildikçe alt (karın) bölgenin içe doğru bastırılarak kısılmasıyla elde edilirken; PKA'da bu genişleme, iç basınç etkisiyle dış yüzeydeki odacık çeperlerinin genişletilmesi sonucu oluşur. Bir tarafın düz,

diğer tarafın kıvrımlı olması yüzey alanını artırmakta ve bu sayede dış bölgeye uygulanan basınçla daha büyük bir uzama sağlanmaktadır. Bu nedenle, TKA yalnızca eğilmeye yönelik çalışırken, PKA hem eğilme hem de genişleme etkisini aynı anda barındırmakta ve daha yüksek gerinime sebep olmaktadır.



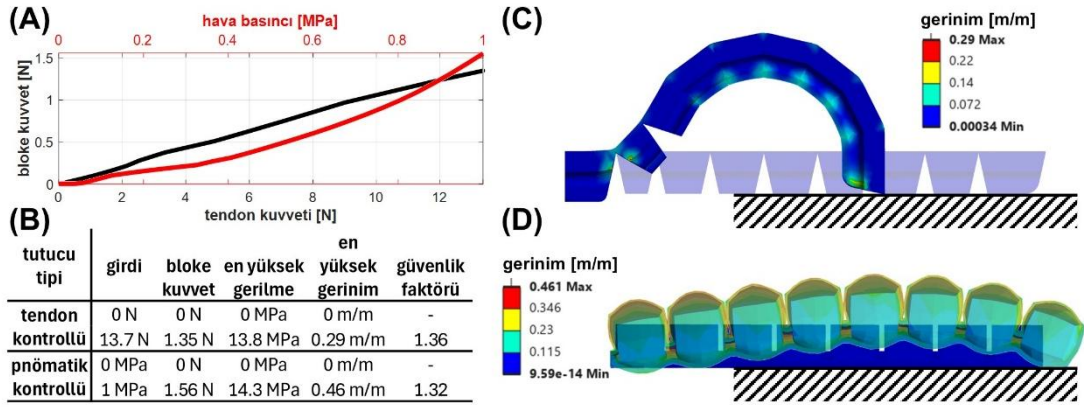
Şekil 2. TKA ve PKA eğilme analizi. (A) Aktüatörlerin benzer izafi eğilme açısına karşılık gelen girdilere bağlı karşılaştırmalı grafiğinde TKA için tendon çekme kuvveti, PKA içinse hava basıncı girdi olarak belirlenmiştir. (B) En yüksek, ortalama ve sıfır girdi değerleri için aktüatörlerin izafi eğilme açısı, gerilme, gerinim ve güvenlik faktörü değerlerini içeren tablo. Girdi sıfır değerindeyken yerçekimi dolayısıyla diğer değerler sıfırdan farklıdır. (C) TKA için simülasyon görselleri. (D) PKA için simülasyon görselleri.

### 3.2. Bloke kuvvet analizi

Bloke kuvvet analizi sonuçlarına göre, TKA'da 0–13,7 N aralığında uygulanan tendon çekme kuvvetiyle 1,35 N'luk bloke kuvvet elde edilmiştir. PKA'da ise 0–1 MPa aralığında uygulanan hava basıncı sonucunda 1,56 N'luk bloke kuvvet hesaplanmıştır (Şekil 3A). Girdi-çıkışı ilişkisi açısından değerlendirildiğinde, Şekil 2A'dan farklı olarak bu analizde TKA yaklaşık olarak doğrusal bir eğilme davranışı sergilerken; PKA'nın eğrisi dışbükey (konveks) bir form oluşturduğu görülmektedir. Bu durumun temel nedeni, TKA'da tendon çekme kuvveti ile oluşan bloke kuvvetin doğrudan lineer ilişki göstermesi iken; PKA'da uygulanan basınca bağlı olarak aktüatörün şekil değiştirmesiyle genişleyen yüzey alanının, oluşan tepki kuvvetini katlanarak artırmasıdır.

Şekil 3B ve 3C'de her iki aktüatörün bloke kuvvet altındaki simülasyon görselleri ve

gerinim dağılımları sunulmuştur. Ayrıca, Şekil 3B'de her iki aktüatöre ait giriş parametresi, bloke kuvvet, maksimum gerinim, gerilme ve güvenlik katsayısı değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu verilere göre; PKA, 1,56 N'luk bloke kuvvet altında 0,46 m/m gerinim, 14,3 MPa maksimum gerilme ve 1,32 güvenlik katsayısına sahiptir. TKA ise 1,35 N'luk kuvvet için 0,29 m/m gerinim, 13,8 MPa gerilme ve 1,36 güvenlik katsayısına ulaşmıştır. Her iki aktüatörde benzer gerilme ve güvenlik katsayısı değerlerinin elde edilmesinin nedeni, bloke kuvvet analizinde eğilme hareketinin sınırlandırılmasıdır. Bu sınırlandırma, PKA'nın serbest eğilme analizine kıyasla daha düşük gerinim üretmesine neden olmuş, dolayısıyla aktüatörlerin davranışlarını birbirine yakınlaştırmıştır.

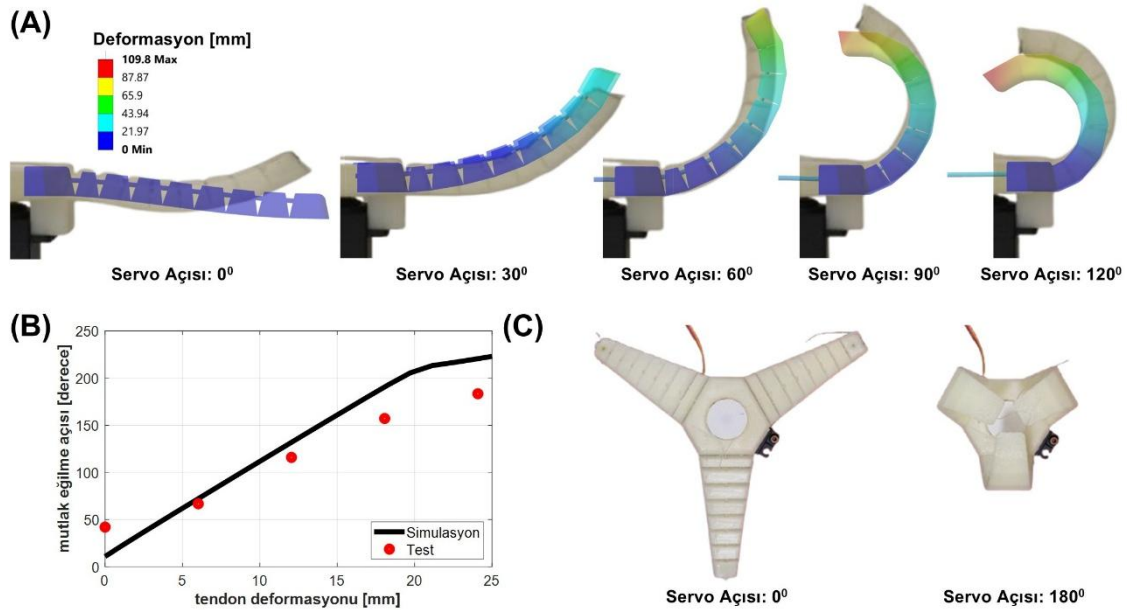


Şekil 3. TKA ve PKA bloke kuvvet çıktıları. (A) Aktüatörlerin benzer bloke kuvvet değerlerine karşılık gelen girdilere bağlı karşılaştırmalı grafiğinde TKA için tendon çekme kuvveti, PKA içinse hava basıncı girdi olarak belirlenmiştir. (B) En yüksek ve sıfır girdi değerleri için aktüatörlerin bloke kuvvet çıktısı, gerilme, gerinim ve güvenlik faktörü değerlerini içeren tablo. (C) TKA için simülasyon görselleri. (D) PKA için simülasyon görselleri.

### 3.3. TKT için analiz ve test karşılaştırması

Üretilen TKT prototipi ile TKA simülasyonu karşılaştırılırken, servo motorun açısız girdisine  $\theta_S$  karşılık gelen tendon yer değiştirmesi ( $\Delta x$ ), çapı 23 mm olan tendon makarası (DT) esas alınarak  $\Delta x = \pi \cdot DT \cdot \theta_S/360$  formülü ile hesaplanmıştır. Bu bağıntıya göre, Şekil 4A ve 4B’de, 30’ar derecelik servo motor açı farklarıyla elde edilen TKT prototipinin ve simülasyonun hem görsel hem de sayısal karşılaştırmaları sunulmuştur. Prototipin kurulum aşamasında tendon üzerinde ön gerilme bulunması nedeniyle, simülasyon ile test arasındaki başlangıç koşulları farklılık göstermektedir. Bu

farkı yansıtmak için, Şekil 2A’da kullanılan izafi eğilme açısı yerine mutlak eğilme açısı referans alınmıştır. Açı değişimlerinin hesaplanmasında, başlangıç konumunun açısız değeri yerine yerçekimi doğrultusunda tanımlanan birim vektör referans olarak kullanılmıştır. Buna göre simülasyonda başlangıç açısı  $10,9^\circ$  iken, prototipte bu değer  $42^\circ$  olarak ölçülmüştür. Ayrıca, prototipin test sırasında  $120^\circ$  servo motor hareketinden sonra daha fazla kapanmadığı ve sistemin doygunluğa ulaştığı gözlemlenmiştir. Şekil 4C’de ise, TKT prototipinin tam açık ve tam kapalı durumlarına ait görseller verilmiştir.



Şekil 4. Üretilen tendon tutucu ile simülasyonun servo açısı 0,30,60,90 ve 120 dereceler için hesaplanan tendon uzunluğu kullanılarak karşılaştırılması. (A) Gerçek tutucu ve modele ait aktüatörlerin kapanma aşamalarına ait görseller. (B) Gerçek tutucu ve modele ait aktüatörlerin tendon uzamasına bağlı eğilme açısı grafiği. (C) Üç aktüatörden oluşan gerçek tutucunun tam açık ve tam kapalı formları.

#### 4. TARTIŞMA VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada gerçekleştirilen analizler, her iki tip yumuşak aktüatörün de rijit tutucularda bulunmayan şekil değiştirme ve adaptif kavrama yeteneklerini ortaya koymuştur. Bu özellikler, tutucuların farklı geometri ve boyutlardaki nesnelere uyum sağlayabilme kabiliyetini artırmaktadır. Ayrıca, aktüatörlerin tek parça olarak 3B yazıcı ile üretilebilmesi, mafsallı ihtiyacı olmadan ekonomik ve kolay üretilebilir bir çözüm sunmaktadır.

Eğilme açısı analizinde, TKA'nın PKA'ya kıyasla benzer eğilme açısına daha düşük giriş değerleriyle ulaşabildiği görülmüştür. Her iki aktüatörün karşılaştırılabilir tasarım geometrilerine sahip olması bu farkı açıklamada kısıtlayıcı bir unsur olmakla birlikte, önceki literatürde yer alan Yap ve ark. [1] çalışmasında farklı bir PKA tasarımıyla yalnızca bu çalışmadaki hava basıncının dörtte biriyle benzer açılara ulaşıldığı bildirilmiştir. Yine de PKA'nın eğilme ile genişleme hareketi yapma zorunluluğu, onu TKA'ya göre daha yüksek bir enerji gereksinimiyle çalışmaya zorlamaktadır.

Bloke kuvvet analizinde ise her iki aktüatör benzer çıkış kuvveti üretmiş ve benzer güvenlik katsayısı değerlerine ulaşmıştır. Ancak, TKA'nın bu koşullarda daha fazla şekil değişimine uğraması, analiz sonunda güvenlik avantajını kısmen kaybetmesine neden olmuştur (Şekil 3C ve 3D).

Genel olarak değerlendirildiğinde, TKT düşük torklu servo motor gibi kompakt ve düşük güçlü bir sürücüyle çalışabilmesi sayesinde PKA ile benzer performans sağlayabilmektedir. Bu durum, TKT'yi enerji verimliliği ve taşınabilirlik açısından avantajlı kılmaktadır. Ancak, sistem kurulumu sırasında tüm parmakların aynı tendon gerginliğine sahip olmasının gerekliliği, montaj sürecini zorlaştıran önemli bir kısıttır. Gelecek çalışmalarda, bu kurulumu kolaylaştıracak yöntemlerin geliştirilmesi faydalı olacaktır. Ayrıca, bloke kuvvet testleri sırasında TKA'da

gözlemlenen aşırı kayma davranışı, kavrama performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu sorunun azaltılması için, temas yüzeylerinde sürtünmeyi artıracak kaplamalar veya 3B baskı seçimleri değerlendirilebilir.

Teşekkür

UMTS'nin sürekliliğini sağlayan tüm sempozyum düzenleyicileri ve katılımcılarına teşekkür ederim.

#### 5. KAYNAKLAR

- [1] Yap, H. K., Ng, H. Y., & Yeow, C. H. (2016). High-force soft printable pneumatics for soft robotic applications. *Soft robotics*, 3(3), 144-158. DOI 10.1089/soro.2016.0030.
- [2] Barreiros, J., Claire, H., Peele, B., Shapira, O., Spjut, J., Luebke, D., ... & Shepherd, R. (2018). Fluidic elastomer actuators for haptic interactions in virtual reality. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(2), 277-284. DOI 10.1109/LRA.2018.2888628.
- [3] İlman, M. M., Huber, A., Mishra, A. K., Sen, S., Wang, F., Lin, T., ... & Shepherd, R. F. (2025). In situ foliar augmentation of multiple species for optical phenotyping and bioengineering using soft robotics. *Science Robotics*, 10(103), DOI 10.1126/scirobotics.adu2394
- [4]<https://www.instructables.com/contest/robotics2017/#entries>, Erişim: 17 Temmuz 2025.
- [5][https://move.forward-am.com/hubfs/AES%20Documentation/Flexible%20Filaments/TPU%2085A/TDS/Ultrafuse\\_TPU\\_85A\\_TDS\\_EN\\_v2.5.pdf](https://move.forward-am.com/hubfs/AES%20Documentation/Flexible%20Filaments/TPU%2085A/TDS/Ultrafuse_TPU_85A_TDS_EN_v2.5.pdf), Erişim: 17 Temmuz 2025.
- [6]Kepenekci, M. (2021). Mechanical Behavior of Additively Manufactured Polymer Composite Structures and Interfaces, Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [7]<https://www.mmo.org.tr/izmir/haber/11-universitelerarası-bitirme-projeleri-sergisi-ve-yarismasi-5-haziran-2025#makina>, Erişim: 17 Temmuz 2025.