

Araştırma / Research

HİDRODİNAMİK KAVİTASYONA DAYALI BİYOMEDİKAL UYGULAMALAR İÇİN SİSTOSKOP TABANLI MİKROMANİPÜLATÖR TASARIMI VE GELİŞTİRİLMESİ

Canberk SÖZER¹ (ORCID: 0000-0003-3049-0824)
Hüseyin ÜVET¹ (ORCID: 0000-0003-0392-982X)*

¹Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Makine Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

Geliş / Received: 20.11.2017

Kabul / Accepted: 04.05.2018

ÖZ

Minimal invaziv cerrahisi, açık ameliyatlarda hasta vücuduna açılan büyük kesiler yerine küçük kesilerden müdahale etme yöntemidir. Bu bildiride minimal invaziv yönteminin ürogenital sistem üzerinde kullanılmasını sağlayan sistoskopun tasarımı, deney düzeneği ve doğrulaması sunulmaktadır. Geliştirilen sistoskop, mesaneye düşen böbrek taşlarının vücuttan atılmak üzere yüzeyinin deforme edilmesi ve prostat bölgesinin küçültülmesini amaçlamaktadır. Bu işlem, sistoskop üzerinde bulunan hidrodinamik kavite tüpünün hedef bölgeye yönlendirilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Sistoskop üzerinde, bükülebilir uç işlevcinin Stewart platformu tarafından manipüle edilmesini sağlayan paslanmaz çelik halatlar, görüntülemeyi ve ışıklandırmayı sağlayan 2mm çaplı kamera ve aydınlatma sistemi ile müdahaleyi sağlayan hidrodinamik kavite tüpünün yerleştirileceği çalışma kanalı bulunmakta olup sistemin toplam çapı 10mm'dir. Geliştirilen sistoskop, 2 serbestlik dereceli bükülebilir bir uç işlevciye sahiptir. Uç işlevci, iki serbestlik derecesinde $\pm 40^\circ$ aralığında bükülebilmektedir. Sistemin 3 boyutlu (3B) yazıcı ile ara prototipleri oluşturulmuş ve son prototipi DMLS (Direct Metal Laser Sintering) yöntemi ile metal tozlarından üretilmiştir. Üretilen son prototipin uç işlevci konumu görüntü işleme yöntemiyle bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: Mikro-Manipulatörler, Sistoskop Teknolojisi, Minimal İnvaziv Cerrahisi

DESIGN AND DEVELOPMENT OF SYSTOSCOPE MICROMANIPULATOR FOR HYDRODYNAMIC CAVITATION BASED BIOMEDICAL APPLICATIONS

ABSTRACT

Minimally invasive surgery is a method of intervening in small openings rather than large openings to the patient's body during open surgery. In this paper, the design of the cystoscope, the experimental setup and the validation of the minimally invasive method for the urogenital system are presented. The developed cystoscope aims to abrade surface of kidney stones in the abdomen to be removed from the body and to minimize the prostate area. This is accomplished by directing the hydrodynamic cavitation tube on the cystoscope to the target region. The developed cystoscope has stainless steel ropes that can be manipulated by the Stewart platform and a flexible tip that the ropes control. In addition, there is a working channel to place the hydrodynamic cavitation tube, which provides intervention with a 2mm diameter camera and lighting system for investigation. The total diameter of the system is 10mm. The developed cystoscope has a bendable end function with 2 degrees of freedom. The end-tip can be twisted at $\pm 40^\circ$ in two degrees of freedom. Intermediate prototypes of the system were created with a 3-dimensional (3B) printer and the final prototype was produced from metal powders by DMLS (Direct Metal Laser Sintering) method. The end-tip position of the last prototype produced was found by image processing methods.

Keywords: Micro-Manipulators, Sistoskop technology, Minimally invasive surgery

*Corresponding author / Sorumlu yazar. Tel.: +90 212 383 2888; e-mail / e-posta: huvet@yildiz.edu.tr

1. GİRİŞ

Tıptaki gelişmeler ile hastaya tanı koyma veya operasyon amacıyla yapılan girişimler, geleneksel ameliyatlardaki büyük kesiler yerine küçük kesiler ya da doğal deliklerden girilerek yapılmaya başlanmıştır. Bu gelişmeler, operasyon sonrasında hastadaki ağrı, hastanede uzun süre kalma ve uzun iyileşme süresi gibi süreçleri azaltmaktadır [1]. Endoskopi, iç anlamına gelen “endo” ve görüntüleme anlamına gelen “skopi” kelimelerinin birleşiminden oluşmakta olup ve vücut içinin görüntülenmesi, müdahale edilmesini sağlayan yöntemlerin genel adı olarak tanımlanabilmektedir. Endoskopi, uygulandığı bölgeye göre farklı isimler ile anılmaktadır. Görüntüleme ve müdahale etmek için başlıca kullanıldığı yerler; genel cerrahide “laparoskopi”, kalın bağırsakta “kolonoskopi”, mide ve yemek borusunda “gastroskopi”, ürolojide ise “sistoskopi”dir. Yapılan çalışmada, mesane taşlarının yüzeyini deforme etmeyi ve prostat bölgesini tıraşlamayı hedefleyen bir sistoskop geliştirilmiştir. Sistem üzerinde; soğuk ışık kaynağı, kamera, paslanmaz çelik halatlar ve hidrodinamik kaviteasyon tüpü için çalışma kanalı bulunmaktadır.

Tıbbi robotik alanı yoğun olarak esnek endoskopik robot kollarının tasarımı ve kontrolü üzerine çalışılmalar yapılmaktadır. Ürogenital sistemdeki minimal invaziv uygulamalarında kullanılan sistoskopun, rijit ve bükülebilir olmak üzere iki çeşidi vardır. Denholm ve ekibi (1990) tarafından yapılan kontrollü deneylere göre, rijit sistoskop ile ameliyat edilen hastaların operasyon sonrasındaki şikayet oranı %76 iken, bükülebilir sistoskop ile ameliyat edilen hastaların operasyon sonrasındaki şikayetleri %33 oranına düşmüştür [2]. Kato ve ekibi (2015), 180°'ye kadar bükülebilir iki bölmeli tendona dayalı endoskopik robot kolunun ileri kinematik modelini geliştirdi [3]. Lei ve ekibi (2010), tendona dayalı esnek bir üreteroskopun bükülme mekanizmasını sundu [4]. Seneci ve ekibi (2014), transluminal ve endoluminal cerrahide 2 serbestlik dereceli esnek robot kolunun kinematik modeli ve hassas kontrol stratejisini açıkladı [5]. Maeda ve ekibi (1996) dış çapı 2 mm olan SMA yayıyla harekete geçirilmiş aktif endoskopun yapısını göstermiştir [6]. De Sars ve ekibi (2010), iki çift antagonist SMA telinin tasarımı ve kontrolü ile 2 serbestlik dereceli aktif endoskopi yönlendirmeyi başarmıştır [7]. Mesane taşlarının yüzeyini deforme etme [8] ve prostat [9] bölgesini tıraşlama işlemini hidrodinamik kaviteasyon tüpü içerisinde geçen sıvı gerçekleştirir. Tüp içerisindeki ani çap düşüşü sonucunda sıvı basıncının düşüşü ve hızının artmasıyla su jeti oluşmaktadır. Bu su jetinin canlı hücreler üzerinde yıkıcı etkisi vardır.

Bu çalışma kapsamında tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen mikro-manipülör, böbrek taşı ve prostat organına müdahale için kullanılan klasik yöntemlerden farklı olarak hidrodinamik kaviteasyon metodu kullanılmaktadır. Hidrodinamik kaviteasyon, Bernoulli prensibine dayanarak su akışkanının geçtiği çap ve bununla doğru orantılı oluşan basınç ile ortaya çıkar. Alçak basınçlarda suyun buhar haline gelmesi ve daha sonra kendi hidrolik basıncı ile buharın yoğunlaşması patlaması ile oluşur. Hem buharlaşma hem de yoğunlaşma fazının bulunduğu bu durum sonucunda gemi pervaneleri, türbin veya pompanın fan kanatlarında yıkıcı etkiler gözlenir. Bu yıkıcı etki projede, böbrek taşı yüzeyinin deformasyonu ve büyüyen prostatın küçültülmesi için kullanılmıştır. Çalışmada kaviteasyonu sağlayan 3 mm çaplı tüpün girişine 5 ile 100 bar değerleri arasında kontrollü basınçlar, kabarcıklı durumdaki kaviteasyonun akış durumu ortaya çıkıncaya kadar basınç artırılarak uygulanmıştır. Oluşan bu su jeti böbrek taşı yüzeyinde deformasyon yaratmış ve biyomedikal alanda faydalı bir uygulama olarak kullanılmıştır [8].

Bu çalışma kapsamında eğilebilir mikro-manipülör tabanlı bir sistoskop prototipi geliştirilmiş ve hidrodinamik bir kaviteasyon tüpü ile kamera ünitesini taşıyacak şekilde tasarlanmıştır. Önerilen sistem, mesaneye düşen böbrek taşlarının yüzeyini deforme etmeyi ve prostattaki büyümelere müdahale ederek sorunları gidermeyi amaçlamaktadır. Bu sebeple, vücut içindeki sıvı ortamda çalışabilecek şekilde dizayn edilmiştir. Böyle bir sistemin en belirgin avantajı öncelikle toplam sistemin çalışmasında temelde hidrodinamik kaviteasyon kullanılması ve boyutlarının (çapının) minimal invaziv uygulamalarına uygun bir biçimde kamera dahil olarak 10 mm'nin altında olmasıdır. Diğer avantajları ise, sadece su kabarcıkları kullanmasından dolayı, lokal bir tedaviye olanak sağlaması, düşük enerji kullanmasından dolayı vücut içinde farklı kimyasal dönüşümlere sebep olmaması, yüksek ısı oluşturmayarak çevre dokulara zarar vermemesi ve sadece hava kabarcığı üretecek bir basınç tüpüne ihtiyaç duyması sebebi ile ucuz bir sistem olmasıdır.

Sistem içerisinde; hedef bölgeye doğru eğilmeyi sağlayan bükülebilir uç işlevci, ışıklandırmayı sağlamak için soğuk ışık kaynağı, alınan görüntüyü gerçek zamanlı aktarabilmek için kamera ve böbrek taşı ve prostata müdahale edecek hidrodinamik kaviteasyon probunu (tüpünü) barındırmaktadır. Yapılan çalışmada; üzerinde su geçirmez medikal kamera ve soğuk ışık kaynağı ve hidrodinamik kaviteasyon tüpü için 2 farklı çalışma kanalı bulunduran, tendon yapısı ile X ve Y eksenlerinde $\pm 40^\circ$ aralığında eğilebilir bir sistoskop sistemi geliştirilmiştir. Bu makalede; Bölüm 2’te prototip sistemin tasarımı ve modellenmesi, Bölüm 3’te son prototip üretimi, testleri, Bölüm 4’te sonuç ve tartışma kısımlarından oluşmaktadır.

HİDRODİNAMİK KAVİTASYONA DAYALI BİYOMEDİKAL UYGULAMALAR İÇİN SİSTOSKOP TABANLI MİKROMANİPÜLATÖR TASARIMI VE GELİŞTİRİLMESİ

2. SİSTOSKOP TABANLI MİKROMANİPÜLATÖR TASARIMI ve MODELLEMESİ

Sistoskop ünitesi, bir kavitasyon tüpünü mesane içinde istenilen bir bölgeye getirebilecek şekilde dizayn edilmiştir. Amaç, tüp ucundaki basınçlı su çıkışını istenilen bölgeye ulaştırabilmektir. Bu kapsamda geliştirilen düzenek vücut içinde istenilen noktaya ulaşabilecek 3 Boyutlu konumlandırma hassasiyetine sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Sistokopun hareketi vücut içerisinde ve sıvı bir ortamda olduğu için sistem parçalarının biyoyumlu malzemeye sahip olmaları ve su geçirmez özelliklerde bulunmaları gerekmektedir. Hidrodinamik kavitasyon tüpü olarak PEEK (PolyEther Ether Ketone) borular seçilmiştir. Bu tüpler esnek ve biyoyumlu yapıları nedeniyle projemizde kullanılmıştır. Ayrıca bu tüpler mekanik stabil yapılarda çalışmamız için avantaj sağlamaktadır. Mikromanipülatör yapısı da (Şekil 1-2) aynı şekilde biyoyumlu metal bir malzeme olan çelikten (high-grade steel) 3 boyutlu yazıcı (EOS M290 DMLS) ile üretilmiştir. Geri kalan parçalar, eklem noktaları ve tendon halatları bu yönde seçilmiştir. Yapılan çalışmanın vücuda minimum zararı verecek şekilde tasarlanması da önemlidir. Çalışmalarımızda 10 mm çapında üretilen bir sistoskop tasarımı üzerine yoğunlaşarak prototip üretilmiştir. Prototipi oluşturan parametreler makalenin ilerleyen kısımlarında detaylıca tartışılmıştır.

Geliştirilen prototip üzerinde; biri hidrodinamik kavitasyon tüpü biri de medikal kamera için olmak üzere iki farklı çalışma kanalı, X ve Y eksenlerinde $\pm 40^\circ$ aralığında eğilme sağlayabilmek amacıyla kullanılan dört adet tendon kanalı bulunmaktadır. Bu ihtiyacı karşılayabilmek için gereksinimler göz önüne alınarak, üzerinde farklı boyutlarda 6 adet kanal olan, en küçük dış çaplı prototip oluşturulmuştur. Hidrodinamik kavitasyonu sağlayabilmek için 1.5875 mm dış çaplı PEEK tüp kanal üretilmiştir. Tüpün prototipe yerleştirilebilmesi için 1.7 mm çaplı bir kanal, prototip üzerine yerleştirilmiştir. Kavitasyon tüpü küçültülemeyeceği için yer kazanmak amacıyla kamera ve $\pm 40^\circ$ aralığında eğilmeyi sağlamak için kullanılan tendon çaplarının ve ışıklandırma ve görüntüleme sistemi çapının küçültülmesi hedeflenmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda üzerinde soğuk ışık kaynağı bulunan 2 mm dış çaplı su geçirmez medikal kamera tedarik edilmiştir. Sadece kameranın dış çapı 1.2 mm olmakla birlikte, üzerinde bulunan fiberoptik ışık kaynağı dahil edilince dış çap 2 mm'e olmaktadır. İç içe bulunan görüntüleme ve ışıklandırma sistemi, prototipe 2.1 mm çapında bir kanal kullanılarak entegre edilmiştir. Yapılan deneylerin su içerisinde gerçekleşmesinden dolayı su geçirmez özelliğinden, kendi üzerinde ışık kaynağını bulundurarak fazladan bir kanala ihtiyaç duyulmamasını sağladığından, kısıtlı alanda kullanıma izin veren 2 mm dış çapa sahip olmasından ve eğilebilir bir shaft ile eğilebilir prototipe uyumlu olması nedenleriyle bu görüntüleme sistemi tercih edilmiştir. Eğilmeyi sağlayan 1 mm çaplı tendon halatlar prototip içerisine 90° açıyla yerleştirilen 4 adet 1.25 mm çaplı kanal içerisinden geçerek prototipin eğilmesini sağlamaktadır. Esnemeyen halatlar, Stewart platformunda oluşan eğilmeyi, en az kayıpla ileterek prototip ucunun eğilmesini sağlamaktadır. 1 adet 1.7 mm çaplı kanal, 1 adet 2.1 mm çaplı kanal ve 4 adet 1.25 mm çaplı kanal göz önüne alınarak dış-yuva eğilme yapısı eklendiğinde prototipin toplam dış çap 10 mm olmaktadır (Şekil 1).

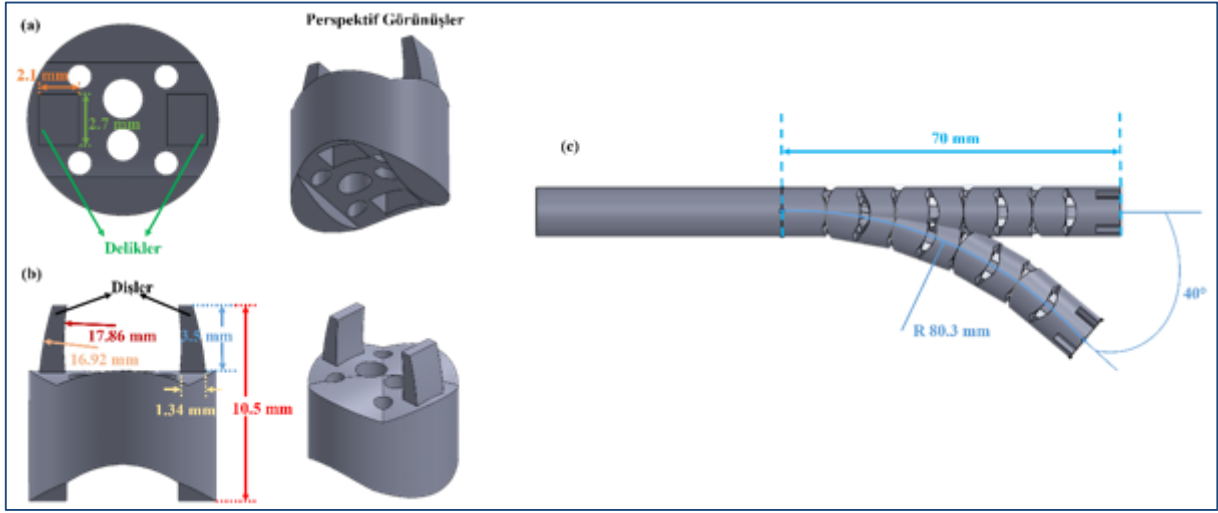


Şekil 1. Geliştirilen prototip bileşenlerinin çapları

Prototipin eğilebilen kısmı; taban parçası, X eksenini boyunca eğilebilen ara parça, Y eksenini boyunca eğilebilen ara parça ve uç parça olmak üzere 4 farklı mikromanipülatör parçasından oluşmaktadır. Prototipin eğilmesi ve merkezlenmesi, mikromanipülatör parçaları üzerindeki tasarlanan dış-yuva yapısı sayesinde gerçekleşmektedir. Mikromanipülatör parçaları, yapacakları harekete göre dış ve/veya yuva bulundurmaktadır. Taban parçasının alt yüzeyinde sadece dış, X eksenini boyunca eğilebilen ara parçanın ve Y eksenini boyunca eğilebilen ara parçanın alt yüzeylerinde yuva ve üst yüzeylerinde dış, uç parçasının ise sadece alt yüzeyinde yuva bulunmaktadır. Mikromanipülatör parçaları altında bulunan yuvaların boyutları 2.1 mm x 2.7 mm x 2.72 mm'dir (Şekil 2(a)). Dişlerin boyutları ise 1.34 mm x 2.5 mm x 3.5 mm'dir. Dişler kavisli olup 17.86 mm iç ve 16.92 mm dış eğrilik yarıçapına sahiptir. Diş uzunlukları da dahil olmak üzere taban parçasının uzunluğu 12.5 mm, ara parçaların dişlerle birlikte uzunluğu 10.5 mm (Şekil 2(b)) ve uç parçasının uzunluğu ise 11 mm'dir. Parçalar sırasıyla birleştirildiğinde eğilebilir kısmının başlangıç pozisyonundaki (0°) toplam boyu 70 mm olmaktadır. Prototip eğilebileceği son noktaya kadar geldiğinde (40°) eğrilik yarıçapı 80.3 mm olmaktadır (Şekil 2(c)). Şekil 2'de

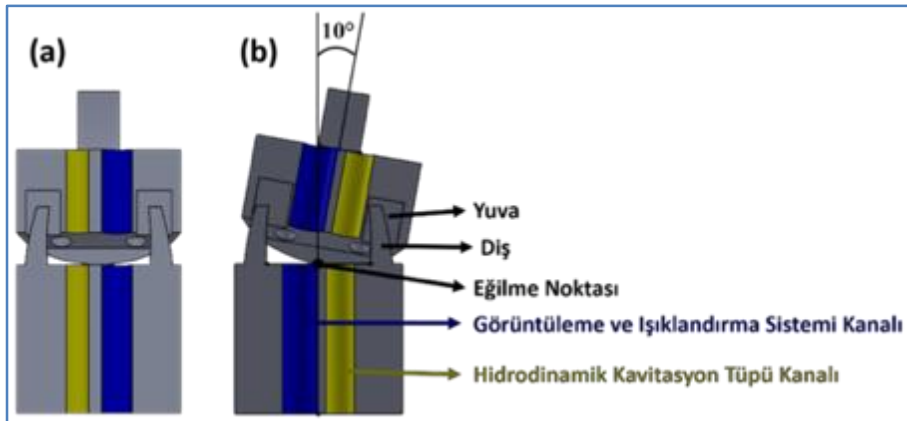
C. SÖZER, H. ÜVET

hem diş hem de yuva barındırdığı için X eksenini boyunca eğilebilen ara parça üzerinden detaylar verilmiştir. Diğer parçalarda da diş ve yuvaların yerleri aynıdır.



Şekil 2. X ekseninde eğilebilen ara parçanın detaylandırılması (a) yuvaların boyutlandırılması, (b) dişlerin boyutlandırılması ve parça uzunlukları, (c) prototipin 0° başlangıç konumundaki uzunluğu ve 40° son pozisyondaki eğrilik yarıçapı.

Prototipin eğilebilir kısmı için 4 farklı mikromanipülör parçasından oluşan 9 parça sırasıyla dizilerek birleştirilmiştir. Bu 9 parça aralarında 8 eğilme noktası oluşturmakta ve eğilme bu noktalarda gerçekleşmektedir. Yapılan katı model tasarımında, her bir eğilme noktasına eklenen diş-yuva yapısı sayesinde X veya Y ekseninde $\pm 10^\circ$ aralığında eğilmeye (Şekil 3) izin verilmektedir. Şekil 2(b)'de gösterilen iç kısımda 17.86 mm ve dış kısımda 16.8 mm eğrilik yarıçaplarına sahip dişler, 0°'lik başlangıç pozisyonunda parçaların birbirine temas edip, eğilme noktası oluşturduğu noktalarda yuvalara düz bir şekilde girmektedir (Şekil 3(a)). Eğilme gerçekleştiğinde ise dişler Şekil 3(b)'de gösterildiği gibi yuvaların çeperlerine dayanmakta ve eğilmeyi 10° ile sınırlandırmaktadır. 8 eğilme noktasının 4'ü X ekseninde, kalan 4'ü ise Y ekseninde eğilmeye izin vermektedir. Böylece birleştirilen son prototipin hem X hem de Y eksenlerinde toplam 40° eğilmesi sağlanabilmektedir.



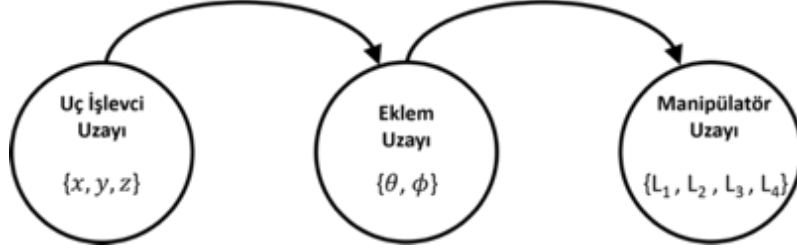
Şekil 3. Arka arkaya gelen iki mikromanipülör parçasının (a) 0° başlangıç durumundaki hali, (b) 10° eğilme durumundaki hali

Prototipin eğilebilir kısmı Stewart platformu ile kontrol edilmektedir. Oluşturulan katı model tasarımına göre 90° dairesel aralıkla yerleştirilen dört tendonun uygun miktarlarda çekilip serbest bırakılmasıyla prototipte eğilme sağlanmaktadır. Bir tendon, çaprazında bulunan tendon ile zıt yönde ve aynı miktarda hareket ettiği için Stewart platformu kontrolü kolaylaştırmış ve bu nedenle tercih edilmiştir. X, Y ve Z eksenlerinde dönme ve öteleme olmak üzere 6 ekseninde hareket edebilen Newport HXP50 – MECA Stewart platformu ve Newport HXP50 – ELEC Stewart platformu kontrolcüsü kullanılmıştır. Eğilme mekanizması tasarımı yapıldıktan sonra,

HİDRODİNAMİK KAVİTASYONA DAYALI BİYOMEDİKAL UYGULAMALAR İÇİN SİSTOSKOP TABANLI MİKROMANİPÜLATÖR TASARIMI VE GELİŞTİRİLMESİ

Stewart platformu ile prototipin eğilebilir kısmı arasındaki ilişki literatürde yapılan çalışmalar kullanılarak [10-11] matematiksel olarak ifade edilmiştir.

Eğilebilir prototip, Stewart platformu tarafından kontrol edilen tendon halatlar ile kontrol edilmektedir. Bu nedenle tendonların lineer yer değiştirmesi, eğilebilir kısmın eklem uzayı ve uç işlevcinin uzaysal hareketi arasındaki ilişki Şekil 4'te gösterildiği gibi ifade edilmiştir.



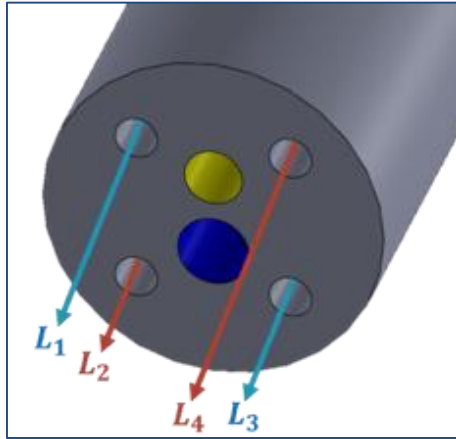
Şekil 4. Eğilme için kullanılan uzaylar arası ilişki

Operatör tarafından kontrol edilen prototipe, kumanda kolu aracılığıyla $\{x, y, z\}$ uzaysal konum bilgisi verilmektedir. Bu bilginin Stewart platformuna uygun bir dönüşümle iletilmesi gerekmektedir. Bu sayede Stewart platformu prototipi kontrol eden yuvarlanma ve yunuslama açılarında uygun miktarlarda eğilme hareketi yaparak istenilen hareket gerçekleştirebilmektedir. Bu dönüşüm, $\{x, y, z\}$ uzaysal hareketi, öncelikle prototipin eğilebilir kısmının açı değerlerine $\{\theta, \phi\}$ daha sonra da açı değerlerini elde edebilmek için Stewart platformunun eğilme açısına çevirmektedir. Prototipin uç işlevcinin uzaysal konumu olan $\{x, y, z\}$ ile eklem uzayı $\{\theta, \phi\}$ arasındaki ilişki (1) ve (2) denklemleriyle ifade edilmiştir. Bu denklemler operatör tarafından uç işlevci uzayında verilen komutları gerçekleştirebilmek için eğilebilir kısmın eklem açı değerlerini bulmak için kullanılan ters kinematik eşitlikleridir.

$$\phi = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \quad (1)$$

$$\theta = \frac{2N-1}{N} \cdot \arctan\left(\frac{\sqrt{x^2+y^2}}{z}\right) \quad (2)$$

Bu denklemlerde; N toplam eklem sayısını göstermektedir. $\{\theta, \phi\}$ eklem uzayı ile $\{L_1, L_2, L_3, L_4\}$ tendon boyları arasındaki matematiksel ilişki (3), (4), (5) ve (6) denklemleri ile ifade edilmiştir. Bu denklemlerde birbirleriyle çapraz olarak konumlandırılmış L_1 ve L_3 , L_2 ve L_4 antagonistik hareket eden çiftlerdir. Bu durum L_1 tendonunun çekildiği durumda L_3 tendonunun serbest bırakılması olarak örneklendirilebilir (Şekil 5). Bu denklemler, eklem uzayından Stewart platformu uzayına geçmek için kullanılan ters kinematik yöntemini ifade etmektedir. Yani, hedeflenen 40° eğilmeyi sağlayabilmek için tendon halatların ne kadar lineer yer değiştirme yapması gerektiğini gösterir. Değerler yerine konulduğunda 2.5 mm'lik bir yer değiştirmenin prototip ucunun 40° eğilebilmesini sağladığı hesaplanmıştır.



Şekil 5. Antagonistik tendon çiftleri

C. SÖZER, H. ÜVET

$$L_1 = L_0 + 2N \left[b \sin \left(\frac{\theta}{2} \right) - h_0 \sin^2 \left(\frac{\theta}{4} \right) \right] \quad (3)$$

$$L_2 = L_0 + 2N \left[a \sin \left(\frac{\theta}{2} \right) - h_0 \sin^2 \left(\frac{\theta}{4} \right) \right] \quad (4)$$

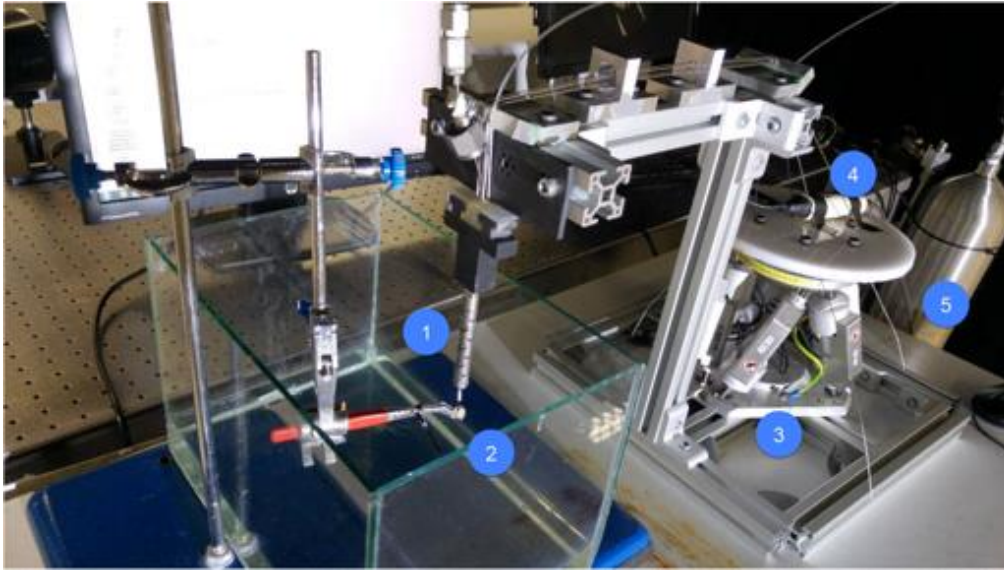
$$L_3 = L_0 - 2N \left[b \sin \left(\frac{\theta}{2} \right) + h_0 \sin^2 \left(\frac{\theta}{4} \right) \right] \quad (5)$$

$$L_4 = L_0 - 2N \left[a \sin \left(\frac{\theta}{2} \right) + h_0 \sin^2 \left(\frac{\theta}{4} \right) \right] \quad (6)$$

Bu denklemlerde; $a = \frac{d}{2} \sin(\phi)$, $b = \frac{d}{2} \cos(\phi)$, d bir antagonistik çift tendon arası dik mesafe, h_0 0° başlangıç pozisyonunda eklemler arasındaki mesafe, L_0 tendonların 0° başlangıç pozisyonundaki uzunluklarıdır. Prototipin eğilme mekanizmasını yönlendirebilmek, tendon tellerin kontrol edilmesi ile gerçekleşmektedir. 4 tendonu istenilen açıya göre kontrol edebilmek için (3-6) denklemlerinden faydalanılmıştır.

3. SON PROTOTİP ÜRETİMİ, TESTLERİ

Son prototip deney düzeneğinin tamamlanmasından sonra, prototip üzerine hidrodinamik kavitasyon tüpü ve görüntüleme sistemi yerleştirilmiştir. Hidrodinamik kavitasyon tüpünün ve üzerinde soğuk ışık kaynağı bulunduran medikal kameranın bağlantıları yapıldıktan sonra; prototip tutucusu, üzerinde bulunan tüp ve kamera kanalı içerisinde geçerek prototip ucuna kadar uzatılmıştır. Oluşturulan sistemin son hali Şekil 6'da gösterilmiştir.



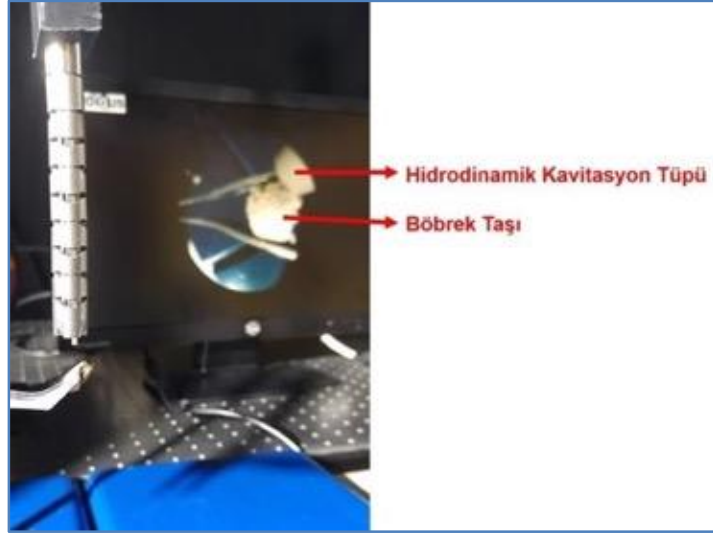
Şekil 6. Deney düzeneğini oluşturan bölümler. 1) Hidrodinamik kavitasyon ile çalışan sistoskop prototipi, 2) Böbrek taşı 3) Stewart platformu 4) Görüntüleme sistemi 5) Basınç tüpü

Oluşturulan katı model tasarımına göre dairesel 90° aralıkla yerleştirilen dört tendonun uygun miktarlarda çekilip serbest bırakılmasıyla prototipin eğilmesi sağlanmaktadır. Bir tendon, çaprazında bulunan tendon ile zıt yönde ve aynı miktarda hareket ettiği için Stewart platformu kontrolü kolaylaştırmış ve bu nedenle tercih edilmiştir. Stewart platformu X, Y ve Z eksenlerinde dönme ve öteleme hareketi yapabilmektedir. Prototipin eğilme mekanizmasını hareket ettirebilmek için X ekseninde dönme ile oluşan yuvarlanma (roll) ve Y ekseninde dönme ile oluşan yunuslama (pitch) hareket özellikleri kullanılmıştır. Stewart platformunu oluşturan 6 adet lineer motor ve üzerlerindeki enkoderler, kendi kontrolcüsü sayesinde kapalı çevrim bir kontrol sağlamaktadır. Prototip pozisyon kontrolünün yapılması gereken bu çalışma için platformun kendi içerisinde bir enkoderi olması çok önemli bir avantajdır.

Metal prototipi içeren son prototip deney düzeneği tamamlandıktan sonra, hasta vücudundan alınan gerçek bir böbrek taşı örneği ile laboratuvar ortamında deneylere başlanmıştır. Su içerisinde ve susuz ortamda yapılan deneylerde, farklı basınç değerleri kullanılmıştır. Farklı ortam ve basınç koşulları altında, kumanda kolu

HİDRODİNAMİK KAVİTASYONA DAYALI BİYOMEDİKAL UYGULAMALAR İÇİN SİSTOSKOP TABANLI MİKROMANİPÜLATÖR TASARIMI VE GELİŞTİRİLMESİ

kullanılarak eğilebilir prototip böbrek taşı üzerinde hareket ettirilmiştir. Farklı konumlara sabitlenen böbrek taşı üzerine, prototip yaklaştırılmış ve sabitlenmiştir. Yapılan deneyler başarılı sonuç vermiş ve kavitasyon baloncukları taş örneği üzerine operatör tarafından yönlendirilmiştir. Operatör prototip içerisindeki gerçek zamanlı görüntü veren su geçirmez medikal kamera sayesinde sıvı içerisindeki böbrek taşı ve hidrodinamik kavitasyon probunu (tüpünü) görebilmektedir (Şekil 7). Bu sayede kumanda kolu yardımıyla böbrek taşına yaklaşmak için gerekli komutları verebilmektedir. Deneylere başlarken böbrek taşı, laboratuvar ortamında sıvı içeren bir konteyner içerisine sabitlenmiş ve akışkana 5 ile 100 bar aralığında basınç uygulanmıştır. İlk olarak prototipin 0° başlangıç konumunda olduğu yerde kavitasyon taş üzerine uygulanmıştır. Daha sonra sabit tutulan taş üzerinde prototip kumanda kolu yardımıyla dolaştırılmış ve taşın farklı bölgelerine kavitasyon uygulanmıştır. Laboratuvar ortamında yapılan deneyler, başarılı sonuçlar vermiş ve böbrek taşı üzerinde deformasyonlar görülmüştür. Kullanılan malzemelerin biyouyumlu olması nedeniyle vücut içerisindeki ortamda rahatlıkla çalışabilecektir.



Şekil 7. Eğilebilir prototip içerisindeki kameranın operatöre gösterdiği görüntü verilmiştir.

5 ile 100 bar arasında farklı basınç değerleri uygulanan deneyler sırasında, prototip taş üzerine sabitlenerek farklı sürelerde taş üzerinde istenilen bölgelerde deformasyonlar oluşturulmuştur. Her basınç değerinde taşın tortu şeklinde küçük parçaların koptuğu gözlemlense de, aynı bölgeye 60 dakika boyunca 45 bar'lık basınç değerinin uygulanmasıyla taş kumdan daha büyük bir taş parçasının ayrıldığı görülmüştür (Şekil 8).



Şekil 8. Deneyler sonucunda kırılan böbrek taşı görülmektedir. Testlerimiz başarı ile sonuçlanmıştır.

4. SONUÇLAR

Yapılan çalışmada, böbrek taşı ve prostata müdahale etmek için kullanılan bir sistoskop prototip sistemi geliştirilmiştir. Sistemin amacı, hidrodinamik kavitasyon sonucunda oluşan kabarcıkların müdahale edilecek böbrek taşı veya prostat bölgesine yönlendirilmesidir. Çalışmanın başında ihtiyaçlar; X ve Y eksenlerinde $\pm 40^\circ$ eğilebilir uca sahip olması, operatör tarafından kumanda kolu ile kontrol edilebilmesi, operatöre görsel geri besleme vermesi amacıyla içerisinde su geçirmez medikal görüntüleme sistemi bulundurması ve hedef bölgeye müdahale edebilmek için üzerinde hidrodinamik kavitasyon tüpü içermesi olarak belirlenmiştir. Bu amaçlar doğrultusunda sistemin tasarım, üretim ve kontrol kısımları tamamlanarak çalışma başarıyla tamamlanmıştır.

İhtiyaçlar belirlendikten sonra aktif olarak kullanılan böbrek taşı ve prostat tedavi yöntemlerini belirleyebilmek için literatür taraması yapılmış ve kullanılan yöntem ve cihazlar belirlenmiştir. ESWL, PCNL, TURP, sistoskopi, üretroskopi ve açık ameliyat gibi farklı tedavi yöntemleriyle karşılaşılmıştır. Kullanılacak bölge ve ihtiyaçlar göz önüne alınarak, PEEK malzemeli kavitasyon tüpünü yönlendirebilmek için en uygun olan sistoskopi sisteminin geliştirilmesine karar verilmiştir. Yapılan taramada, sistoskopların da kendi arasında rijit ve esnek olmak üzere iki farklı şekilde olabileceği görülmüş ve diğerine olan üstünlüklerinden dolayı esnek bir sistoskop cihazı geliştirilmesi kararlaştırılmıştır.

Operatör, operasyon sırasında prototip uç konumunu ve hedef bölgeyi dışardan göremeyecektir. Bu nedenle prototip, su geçirmez bir medikal kameraya sahiptir. Kameranın etrafı fiber optik ışık kaynağı ile sarılı olup vücut içerisindeki karanlık ortamı aydınlatmayı amaçlamaktadır. Görüntüleme sistemi, operatöre gerçek zamanlı görsel geri besleme vermektedir. Bu geri beslemeyi alan operatör, prototipin eğilme kontrolü için kullanılan kumanda kolunu kontrol ederek hedef bölgeye yakınlaşmaya çalışmaktadır.

Prototip sistemini son içerdiği parça ise hidrodinamik kavitasyon tüpüdür. Böbrek taşı ve prostatı tedavi eden hidrodinamik kavitasyon sonucu oluşan kabarcıklar, bu tüp sayesinde oluşturulmaktadır. Tüpün ve sistoskopun deney düzeneği ayrı olmasına rağmen kavitasyon düzeneğinin son parçası olan tüp, prototip içerisine girerek sabitlenmektedir.

Çalışma sonunda yapılan deneylerde, hasta vücudundan alınan gerçek bir böbrek taşı üzerinde deneyler yapılmıştır. Sıvı içeren ve içermeyen iki farklı ortamda yapılan deneylerde, PEEK malzemeli hidrodinamik kavitasyon tüpünün bir ucuna 5 ile 100 bar aralığında farklı basınçlar farklı süreler boyunca uygulanmıştır. Kavitasyon sonucunda oluşan kabarcıklar kumanda kolu kullanılarak taş üzerindeki hedef bölgeye yönlendirilmiştir. Ayrıca eğilebilir uç; S, I, O gibi rastgele şekilli yörüngeler takip edilerek dolaştırılmış, hareket sınırları içerisindeki farklı noktalara yerleştirilen taşa doğru yönlendirilmiştir. Verilen tüm komutları başarılı bir şekilde yerine getiren sistoskop prototip sistemi çalışması başarıyla tamamlanmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK 1003-Öncelikli Alanlar Ar-Ge Projelerini Destekleme Programı kapsamında 113S092 koduyla desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] LACY, A. M., GARCÍA-VALDECASAS, J. C., DELGADO, S., CASTELLS, A., TAURÁ, P., PÍQUÉ, J. M., & VISA, J. "Laparoscopy-assisted colectomy versus open colectomy for treatment of non-metastatic colon cancer: a randomised trial" *The Lancet*, 359, 2224-2229, 2002.
- [2] DENHOLM, S. W., CONN, I. G., NEWSAM, J. E., & CHISHOLM, G. D. "Morbidity following cystoscopy: comparison of flexible and rigid techniques", *British journal of urology*, 66, 152-154, 1990.
- [3] KATO, T., OKUMURA, I., SONG, S. E., GOLBY, A. J., & HATA, N. "Tendon-driven continuum robot for endoscopic surgery: preclinical development and validation of a tension propagation model", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20, 2252-2263, 2015.
- [4] LEİ, MAN-CHEONG, AND RUXU DU. "A study on the bending mechanism of the flexible ureteroscope", *IEEE International Conference on Control Automation and Systems (ICCAS)*, 2019-2023, Gyeonggi-do, Korea, , 2010.

HİDRODİNAMİK KAVİTASYONA DAYALI BİYOMEDİKAL UYGULAMALAR İÇİN SİSTOSKOP TABANLI MİKROMANİPÜLATÖR TASARIMI VE GELİŞTİRİLMESİ

- [5] SENEÇİ, C. A., SHANG, J., LEİBRANDT, K., VİTIELLO, V., PATEL, N., DARZİ, A., YANG, G. Z., “Design and evaluation of a novel flexible robot for transluminal and endoluminal surgery”, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1314-1321, Chicago, USA, 2014.
- [6] MAEDA, S., ABE, K., YAMAMOTO, K., TOHYAMA, O., & ITO, H. “Active endoscope with SMA (shape memory alloy) coil springs”, IEEE Proceedings of Ninth International Workshop on Micro Electromechanical Systems, 290-295, San Diego, USA, 1996.
- [7] DE SARS, V., HALİYO, S., & SZEWCZYK, J. “A practical approach to the design and control of active endoscopes”, Mechatronics, 20, 251-264, 2010.
- [8] PERK, O. Y., ŞEŞEN, M., GOZUACIK, D., & KOŞAR, A., “Kidney stone erosion by micro scale hydrodynamic cavitation and consequent kidney stone treatment”, Annals of Biomedical Engineering, 40, 1895-1902, 2012.
- [9] GHOBANİ, M., YİLDİZ, M., GOZUACIK, D., & KOSAR, A., “Cavitating nozzle flows in micro-and minichannels under the effect of turbulence”, Journal of Mechanical Science and Technology, 30, 2565-2581, 2016.
- [10] Lİ, Z., VE DU, R., “Design and analysis of a bio-inspired wire-driven multi-section flexible robot”, International Journal of Advanced Robotic Systems, 10, 209, 2013.
- [11] SUZUMORİ, K., İİKURA, S., TANAKA, H., “Development of Flexible Microactuator and Its Applications to Robotic Mechanisms”, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1622-1627, Sacramento, California, 1991.