



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN:1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



3D baskılı termoplastik poliüretan esnek dönme mafsalinın direngenlik karakterizasyonu

Stiffness characterization of a 3D-printed thermoplastic polyurethane compliant revolute joint

Yazar(lar) (Author(s)): *Ufuk Tan BALER¹, Enis AYKIN², Ali Fethi OKYAR³, Nezh TOPALOĞLU⁴*

ORCID¹: 0000-0001-8598-056X

ORCID²: 0000-0003-2100-6869

ORCID³: 0000-0002-2561-7547

ORCID⁴: 0000-0003-0525-8900

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz(Tocitetothisarticle): Baler U. T., Aykın E., Okyar A. F., ve Topaloğlu N., “3D baskılı termoplastik poliüretan esnek dönme mafsalinın direngenlik karakterizasyonu”, *Politeknik Dergisi*, 25(1): 291-298, (2022).

Erişim linki(To link to this article):<http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.682638

3D Baskılı Termoplastik Poliüretan Esnek Dönme Mafsalının Direngelik Karakterizasyonu

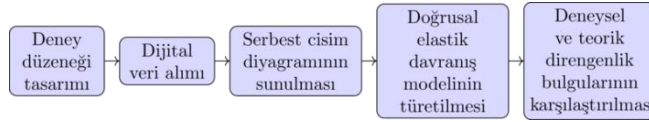
Stiffness Characterization of a 3D-Printed Thermoplastic Polyurethane Compliant Revolute Joint

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Doğrusal olmayan bir mekanik davranışın doğrusal yaklaşımla modellenmesi / Linear modeling of a nonlinear mechanical behaviour
- ❖ Açık kaynak araç ve betiklerle dijital veri alımı / Digital data acquisition with open-sourced tools and scripts
- ❖ Deneysel düzenek konfigürasyonu / Experimental setup configuration

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada farklı boyutlarda olan termoplastik poliüretan (TPU) esnek dönme mafsallarının torsiyonel direngelik sabitlerinin deney yöntemiyle bulunup, öne sürülen teorik modelle, mekanik karakterizasyonu değerlendirilmiştir. / In this study, the torsional stiffness constants of elastic TPU complaint hinges were obtained by an experimental method. These results were compared with a proposed theoretical model to evaluate their mechanical characterization.



Şekil. Grafik Özet / Figure. Graphical Abstract

Amaç (Aim)

Çalışmanın amacı özgün bir deney düzeneği ile esnek mafsal numelerinin torsiyonel direngelik katsayılarını bulmak ve sonuçları teorik modelle karşılaştırmaktır. / This study aims to compare the torsional spring stiffness constants of complaint hinges obtained from both a novel experimental setup and the theoretical model.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

3D baskılı bir kaldıraçın ucuna ağırlık uygulanması sonucunda mafsaldaki açısal deplasman, bir Arduino kartı ve ivmeölçer ile dijital olarak ölçülmüştür. / In the experimental setup, the angular displacement of the hinge, after the application of a weight placed at the tip of a 3D printed leverage, is digitally measured via an Arduino board and accelerometer.

Özgünlük (Originality)

Doğrusal mekanik davranış göstermeyen esnek dönme mafsalları doğrusal yaklaşımla modellenmiştir. / The rotating complaint hinges which mechanically behaves nonlinearly were modeled linearly.

Bulgular (Findings)

Deneysel yöntemle bulunan direngelik sabitleri, teorik model değerlerinin yaklaşık iki katı olmasının çeşitli sebepleri olduğu görüldü. / Various reasons were concerned why the stiffness constants obtained with the experimental method are approximately twice of the values calculated by the theoretical model.

Sonuç (Conclusion)

Torsiyonel direngelik sabiti düşük elastik modüle sahip mafsallar için öne sürülen deney düzeneğiyle daha doğru bulunabilir. / Torsional spring constant of a complaint hinge having a small elastic modulus might be measured more accurately by the proposed experimental setup.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards) Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

3D Baskılı Termoplastik Poliüretan Esnek Dönme Mafsalının Direngenlik Karakterizasyonu

Araştırma Makalesi / Research Article

Ufuk Tan BALER, Enis AYKIN, Ali Fethi OKYAR, Nezh TOPALOĞLU*

Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, İstanbul Yeditepe Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 31.01.2020 ; Kabul/Accepted : 27.12.2020 ; Erken Görünüm/Early View : 14.02.2021)

ÖZ

Bu çalışmanın amacı, termoplastik poliüretan (TPU) malzemesinden üretilmiş olan ve kendi rotasyon ekseninde dönebilen mekanizma parçalarının torsiyonel direngenlik sabitlerinin deneysel ve teorik olarak elde edilip karşılaştırılmasıdır. Hassas bir ölçüm sistemi kurularak dört numune için farklı yüklerde eğilme açıları ölçülmüş ve tepki momenti değerleri belirlenmiş, böylece deneysel torsiyonel direngenlikler hesaplanmıştır. Ankastrle levha kullanılarak elde edilen teorik model ile deneysel sonuçların genel itibarıyla uyumlu olduğu kaydedilmiştir. Dönme mafsalı boğaz bölgesi geometrik parametrelerinin sonucu ne şekilde etkilediği tartışılmıştır. Önerilen deney düzeneğinin dönme mafsalı torsiyonel direngenlik ölçümünde etkin bir şekilde kullanılabilmesi sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Esnek mafsal, torsiyonel direngenlik, ölçüm yöntemleri, mekanik tasarım, deney düzeneği.

Stiffness Characterization of a 3D-Printed Thermoplastic Polyurethane Compliant Revolute Joint

ABSTRACT

The aim of this study is to determine and compare the torsional stiffnesses of the revolute compliant joints that are made of thermoplastic polyurethane (TPU) material. By setting up a sensitive measurement system, tilt angles were measured at different loading values for four samples and the reaction moments are determined to calculate experimental torsional stiffness. The results of the theoretical model based on a cantilever plate model is in general compatible with the experimental results. The effect of the compliant hinge geometric parameters on the results are discussed. It is concluded that the proposed experimental setup can be used effectively in the measurement of the torsional stiffness of revolute compliant joints.

Keywords: Flexible hinges, torsional stiffness, measurement techniques, mechanical design, experimental setup.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Eklemeli imalat teknolojileri günümüzde gitgide ucuzlamakta ve yaygınlaşmaktadır. Özellikle son kullanıcı için tasarlanan üç boyutlu yazıcıların yaygınlaşması sonucunda, ABS ve PLA gibi yaygın termoplastik malzemelerin haricinde farklı malzemelerden filamentler de piyasada bulunmaya başlamıştır [1]. Bu malzemelerin her biri farklı mekanik özellikler göstermekte olup, bu özellikler yalnızca malzemeye göre değil, aynı malzeme için üreticiye göre de değişebilmektedir [2]. Ayrıca, basım sonrası ortaya çıkan ürüne ait mekanik özellikler, basım esnasında kullanılan proses parametrelerine göre de değişiklik gösterebilmektedir [3]. Bütün bu sebeplerden ötürü, eklemeli imalat malzemelerinin mekanik özelliklerinin modellenmesi ve ölçümü günümüzde ilgi gösterilen bir araştırma alanı haline gelmiştir [4].

Eklemeli imalat teknolojilerinin gitgide yaygınlaşan uygulama alanlarından biri de esnek mekanizma olarak üretilen döne ve prizmatik mafsalardır. Bu mafsal, tek malzemedan üretilmesi ve rulman gibi elemanlar barındırmaması sebebiyle birçok uygulamada uygun maliyetli ve pratik çözümler sunmaktadır [5, 6]. Eklemeli

imalat yöntemiyle üretilen esnek mekanizmalara örnek olarak ameliyat robotu eklemi [7], prostetik parmak ve tutucular [8, 9] ve hassas konumlama sistemleri [10, 11, 12] verilebilir. Özellikle termoplastik poliüretan (TPU) düşük elastik modüle ve yüksek yorulma limitine sahip olmasıyla esnek mekanizmalar için uygun bir seçenek haline gelmektedir [1, 13]. Ayrıca MEMS algılayıcı ve eyleyiciler de sıklıkla kullanılan mikro menteşeler ve mikrokirşler de, esnek mekanizmalara örnek olarak gösterilebilir.

Eklemeli imalat metotlarıyla üretilen esnek mekanizmaların analitik ve sonlu eleman yöntemiyle modellenmesi ile ilgili literatürde çeşitli çalışmalar mevcuttur. Lobontiu vd. [14] farklı boğaz yapılarına sahip dönme mafsalının detaylı analitik modelleri üzerine çalışmıştır. Alghamdi tarafından yapılan güncel bir çalışmada ise [15] metal eklemeli imalat yöntemi ile oluşturulan hücresel yapılar için sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Dönme mafsalı ve diğer esnek mekanizmaların analitik ve sonlu eleman modellerinin geniş bir özeti [5]'te bulunabilir.

Eklemeli imalat yöntemiyle üretilen yapıların mekanik özelliklerinin deneysel ölçümüyle ilgili az sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan birinde farklı termoplastik malzemeler için yorulma limitleri ölçülmüştür [16]. Bu çalışma neticesinde poliüretanın iki

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : nezh.topaloglu@yeditepe.edu.tr

milyon döngüye kadar yorulma limitine sahip olduğu ve bu sebeple esnek mekanizmalarda kullanım için uygun olduğu kaydedilmiştir. Yine güncel bir başka çalışmada ise [17], farklı menteşe yapıları esnek mekanizmalara çekme testi uygulanarak elastik modül ve akma dayanımı ölçümü yapılmıştır.

Literatürdeki deneysel çalışmalar incelendiğinde, genellikle eksenel uzama veya doğrusal hareket yönündeki yay sabiti ölçümü yapıldığı görülmektedir. Bir dönme mafsalsının deneysel karakterizasyonu ise, hem dönme açısı, hem de uygulanan momentin hassas ölçümünü gerektirmektedir. Bir dönme mafsalsının işlevsel karakterizasyonuna dair deneysel bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır. Bu çalışmada dönme mafsalsının deneysel olarak karakterizasyonunu yapmak suretiyle literature özgün ve güncel bir katkı sağlamak hedeflenmiştir. Ayrıca, esnek mekanizmalar için gelecek vadeden ve görece daha az araştırılmış olan poliüretan malzeme ile ilgili araştırmalara da katkı sağlanmıştır.

Bu çalışmanın amacı, dönme mafsalsı olarak kullanılmak amacıyla TPU malzemesinden üretilmiş ve belirli bir eksen etrafında dönme hareketi sağlayan bir bağlantı parçasının mekanik davranışının incelenmesine olanak veren deneysel bir düzeneğin kavramsal tasarımının yapılması, prototipinin üretilmesi, ölçümde kullanılması ve sonuçların teorik bir hesapla karşılaştırılmasıdır. Bu bağlamda, farklı kalınlıklardan üretilen parçaların torsiyonel direngenlikleri (κ) bulunacak, bulunan yay sabiti mekanik formüllere dayalı olarak geliştirilen teorik formülün geçerliğini sınamakta kullanılacaktır.

Makale giriş bölümünü takiben üç bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde incelemesi yapılan bağlantı parçasının teknik özellikleri, deney tasarımı ve uygulamasına ait ayrıntılar verilmiştir. Üçüncü bölümde doğrusal elastik davranış modelinin türetilmesi yer almaktadır. Son bölümde ise deneylerde elde edilen sonuçlar sunulmuş ve kurgulanan teorik mekanik model ile karşılaştırılmıştır.

2. MALZEME VE YÖNTEM (MATERIAL and METHOD)

Çalışmamızda torsiyonel direngenliği ölçülecek olan Dönme Mafsalsının farklı boyut ve kalınlıklarda kesilmiş dört örneği Şekil 1'de gösterilmiştir. Örnek parçaların tümü TPU malzemedeki FDM (fused deposition modeling) yöntemiyle üretilmiştir. TPU'nun yoğunluğu 1210 kg/m^3 [18], Poisson oranı ise $\nu = 0.48-0.5$ olarak verilmektedir [19]. Ayrıca TPU malzemesinin doğrusal davranış gösterdiği elastik modülü $30-33 \text{ N/mm}^2$ olarak verilmektedir [20, 21]. Eksenel yük altındaki gerilme-gerinme davranışı doğrusal olmadığından farklı gerinme anlarındaki gerilmeler Çizelge 1'deki gibi bildirilmiştir. Teorik model çalışması ise sadece doğrusal elastik bölgede kapsamında yapılmıştır.

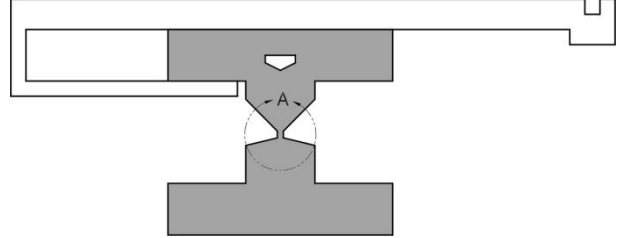


Şekil 1. Deneysel numuneleri (Test specimens)

Çizelge 1. TPU'nun eksenel çekme etkisi altındaki mekanik davranışı (Mechanical behavior of TPU under uniaxial loading) [22].

ε (mm /mm)	0.1	0.5	1.0	3.0	failure
σ (MPa)	2.40	5.40	6.70	11.3	27.5

Dönme mafsalsının torsiyonel direngenliğini belirlemek için geliştirilen kavramsal tasarımın çizimi Şekil 2'de gösterilmektedir. Bu şekilde koyu renkli alan dönme mafsalsını, içi boş alan ise deneysel çalışma için tasarlanmış olan askı kolunu temsil etmektedir. Askı kolu dönme mafsalsının üst parçasına sabitlenir ve ucuna asılacak yükler için bir moment kolu vazifesi görür. Askı kolunun çentikli ucuna yük asıldığında, dönme mafsalsının alt ve üst kısımları arasında açısal değişim oluşur. Dönme mafsalsının torsiyonel direngenliği, κ , açı değişiminin oluştuğueksendeiki tepki momentinin, M_r , oluşan açı değişimine, $\Delta\theta$ olan oranı şeklinde tanımlanır. $\Delta\theta$, yük asıldıktan sonra oluşan açı (θ_s) ile yük asılmadan öncekinin (θ_i) farkından bulunur.



Şekil 2. Kavramsal tasarım sonucunda deney düzeneğinin detay görünüşü (Detailed view of the experimental setup conceptual design)

2.1. Deneysel Enstrümantasyon (Experimental Instrumentation)

Dönme mafsalsının üst kısmının dönmesi sonucunda oluşan açı bilgisi elektronik duyargalar yoluyla elde edilmiştir. Bu amaçla kullanılmak üzere InvenSense marka MPU6050 model ivmeölçer seçilmiştir [23]. İvmeölçer üretici spesifikasyonunda ölçüm aralığı $\pm 2g$, ölçüm hassasiyeti ise birim yerçekimi ivmesi g 'nin $1/16384$ 'ü olarak verilmektedir. İvmeölçerden gelen açı verisinin kontrolü amacıyla deneysel düzeneği karşıdan gören bir kamera yerleştirilmiştir ve bu sayede yük asılmadan önceki kalibrasyon anında ve yük asıldıktan 90 saniye sonra olmak üzere, her bir deneyden iki görüntü alınmıştır. MPU6050'den gelen sinyal Arduino UNO kartı kullanılarak [24] kameranın aldığı sayısal görüntü ile birlikte olarak bilgisayara yollanır.

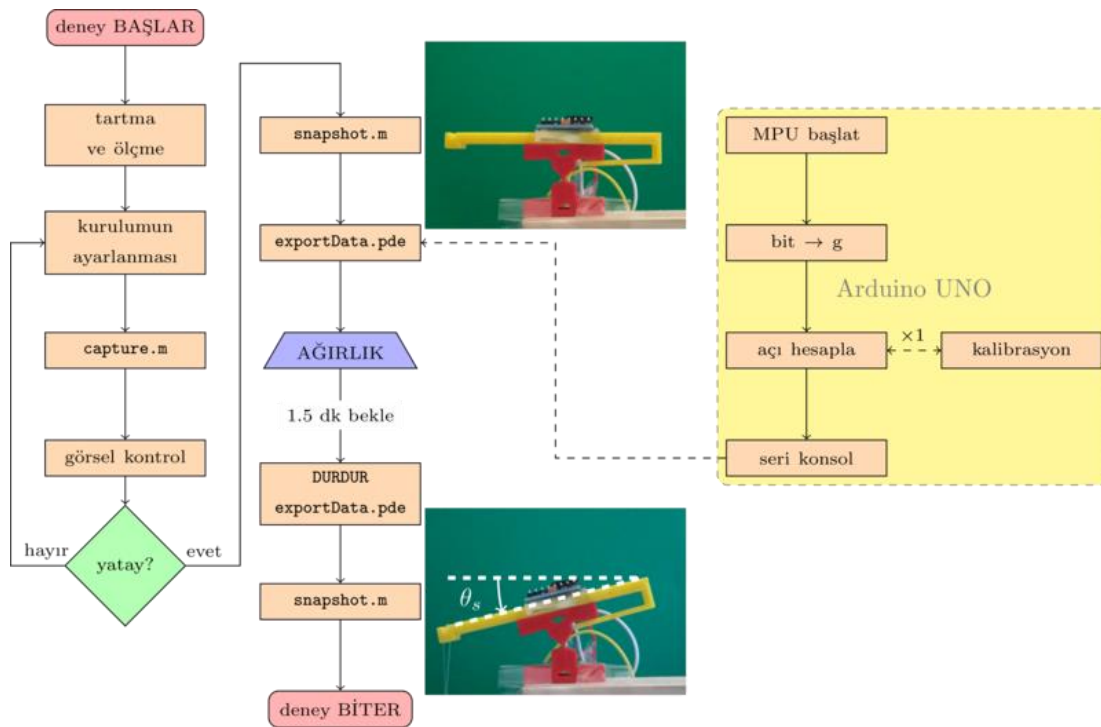
Fiziksel deneyin kurulmasında önemli olan kısımlardan bir tanesi kablolamadır. MPU-6050 VCC, GND, SCL ve SDA çıkış terminaleri sırasıyla sensörde bulunan Digital Motion Processor™ (DMP) işlemcisinin 13, 18, 23 ve 24 ayakları ile I2C haberleşme protokolü sayesinde bağlanmıştır [23]. VCC ve GND'nin işlevi doğrusal akımla çalışan işlemciye güç beslemektir. Öte yandan DMP içindeki ivmeölçerin sahip olduğu mikro boyuttaki kütlelin ivmesinin ölçülmesinde kullanılan kapasitif yöntem analog sinyal üretir. Bu analog sinyal analog-dijital dönüştürücü (ADD) sayesinde bit cinsine dönüştürüldüğü anda SDA (Serial Data) hattından I2C protokolü sayesinde master cihaz olan Arduino UNO'ya gider. SCL, SerialClockLine olarak adlandırılan bu hat ise işlemciden gelen bit cinsindeki ivme verisinin

aktarım hızının (frekans) stabil bir seviyede kalmasını sağlar.

Deneyde bu frekans, işlemcinin sağladığı öndeğer olan 1 kHz olarak ayarlıdır. Sonuç olarak deney sırasındaki veri alım frekansının parçanın dönüş hızına göre çok hızlı olduğundan açısal veri zamana bağlı olarak yüksekçözünürlükte temsil edilebilmiştir.

2.2 Deneysel İş Akışı (Experimental Workflow)

Deney tasarımı, iş akışı diyagramı olarak Şekil 3'te anlatılmıştır. İş akışının ana gidişatında sekiz adet işlem, bir adet karar verme ve bir adet de girdi bloğu bulunmaktadır. Bunlara ek olarak Arduino UNO olarak adlandırılmış bir alt-akış şeması da mevcuttur. Adımların sırasıyla anlatımı aşağıda yapılmıştır.

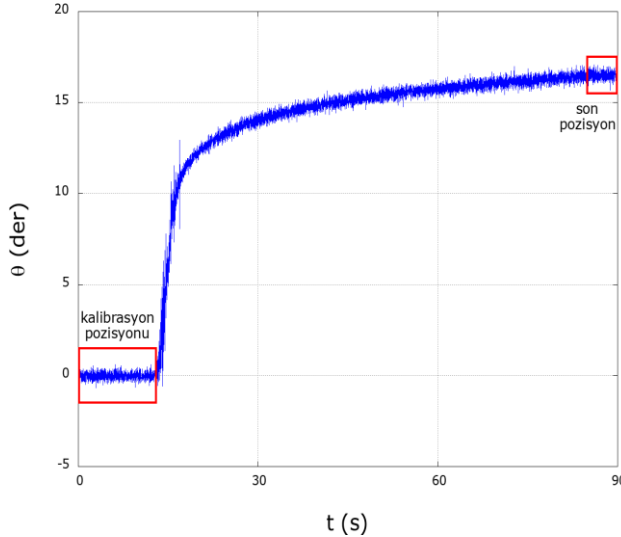


Şekil 3. İş akışı diyagramı (The workflow diagram)

Numunenin, deneye başlamadan önceki ilk açısal konumu olan θ_i kalibrasyon sırasında bulunur. Bunun için alınan 1000 adetlik örneklemin ortalaması bulunur (Şekil 4'te soldaki kırmızı kutunun içerisinde kalan veri). Ardından Arduino UNO programı içerisine alınan bu veri θ_i değişkenine atanır. Ağırlık asıldıktan 90 saniye sonraki açısal konum olan θ_s 'nin bulunması için 100 adetlik bir örneklem daha alınır (Şekil 4'te sağdaki kırmızı kutunun içerisinde kalan veri). Deney devam ettiği sürece açısal konum yavaş da olsa artmaya devam eder çünkü TPU malzeme Şekil 4'teki örnek deney sonucunda görüleceği gibi viskoelastik bir davranış özelliği sergilemektedir.

Deneyde veri alımından önce ağırlık ölçümleri yapılır. Bu ölçümlerde kullanılan terazinin hassasiyeti 1/10 gramdır. Bu adımda asılacak ağırlıklar, askı kolu ve MPU 6050 devre kartı tartılır. Asılacak ağırlıklar sırasıyla 4 g, 9.8 g, 13.8 g, 17.5 g olarak ölçülmüştür.

Ayrıca askı kolu ve MPU 6050 devre kartının toplam ağırlığı ise 7.8 gram olarak bulunmuştur. Sonrasında, bir sonraki kısımda açıklanacak olan reaksiyon momenti hesabında kullanılan uzunluklar bulunur. Rotasyon noktası ile ağırlığın asıldığı nokta arasındaki dik uzaklık $S = 37$ mm, rotasyon noktası ile askı kolunun üst noktası arası uzaklık, y_{kol} , ve rotasyon noktası ve numunenin üst parçasının kütle merkezi arası uzaklık, y_{ipu} , ise her dönme mafsalı için farklı ölçülmüştür. y_{kol} uzunluğu en büyük parçadan en küçük parçaya doğru sırasıyla 14.1 mm, 11.4 mm, 11.1 mm ve 11.1 mm olarak bulunmuştur.



Şekil 4. Askı koluna ağırlık asıldıktan sonra dönme mafsalsının dönmesini gösteren ivmeölçer verisi (Angular displacement data, acquired by the accelerometer, of the complaint hinge after hanging the weight on the lever)

Askı kolunun üzerine yerleştirilmiş olan sensöre bağlı kablolar MPU-6050'den çıkan kablolar direkt aşağısında olan bir breadboard'a ve oradan da Arduino UNO'ya bağlanmıştır. Bunların olası gerginliğinden dolayı ortaya çıkan kuvvetler torsiyonel moment yükü üzerinde etkili olabilir. Bu da deneydeki tepki momentinin formül yoluyla hesaplanan değerinden sapmasına sebep olabilir. Ama olası bu kuvvetler hesaplamada dikkate alınmamıştır. Yük faktörünün olabildiğince azaltılabilmesi için kablolar özel bir konfigürasyonda tutulmuştur.

Bilgisayar üzerinde çalışan betikler ve programlar, Octave [25] ve Processing [26] dilleri kullanılarak yazılmıştır. Şekil 3 ile gösterilen kurulumun yapılmasından sonra görsel kontrolün Şekil 2 ile gösterildiği gibi pozisyonlama kriterlerine uygun olduğu gözden geçirilir. Pozisyonlama kriterlerinin sağlandığı anlaşıldığında, *capture.m* ile son kontrol yapılmalıdır. Son kontrolde Octave üzerinde açılan pencerede, numunenin aktarma kolu ile yaptığı bütün dönüş görülmelidir. Bu noktada, kameradan bir görüntü alınır (*snapshot.m*) ve ivmeölçerden gelen açı bilgisinin görsel açı ile kontrolü yapılmış olur.

Veri alımı bilgisayar üzerinde Arduino bütünleşik geliştirme ortamı (BGO) yerine Processing BGO'su ile yönetilmektedir. Bu süreç *veriCikar.pde* programı

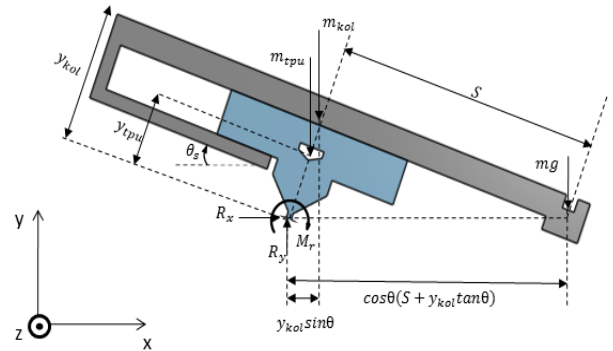
$$\sum_i M_{zi} = 0 \rightarrow -M_r - [(S + y_{kol} \tan \theta) \cos \theta] mg + (y_{kol} \sin \theta) m_{kol} g + (y_{tpu} \sin \theta) m_{tpu} g = 0 \quad (1)$$

Denklemden $M_r = M_r(m, \theta)$ bulunur. Bu şekilde asılan ağırlık, m , ve ondan dolayı oluşan θ cinsinden ifade bulan M_r , her veri noktası için tepki momentlerinin bulunmasında kullanılmıştır.

yardımıyla gerçekleştir. *veriCikar.pde* programı Arduino UNO içindeki *veriAl.ino*'dan gelen veriyi *veri.mat* adlı bir dosyaya yazar. *veri.mat*, açısal deplasman bilgilerini içerir. Şekil 4, örnek bir *veri.mat* dosyasından elde edilmiştir.

İş akışı sonucunda S1'den S4'e kadar her bir dönme mafsalı için asılan ağırlıklar ve bunlardan elde edilen θ_s değerleri kaydedilir. Bu değerler, bir sonraki bölümde verilen serbest cisim diyagramı kullanılarak dönme mafsalsının boğaz bölgesinde oluşan toplam tepki momentinin bulunmasında kullanılır.

DeneySEL olarak elde edilen veriler ve bunların sonucunda hesaplanan direngenlik katsayısı, aynı amaca yönelik doğrusal elastik bir davranış modelinin geliştirilmesine de yol açmıştır. Bu model kapsamında yapılan teorik çalışmalar bir sonraki bölümde yer almaktadır.



Şekil 5. Serbest cisim diyagramı (Free body diagram)

2.3 Serbest Cisim Diyagramı (Free Body Diagram)

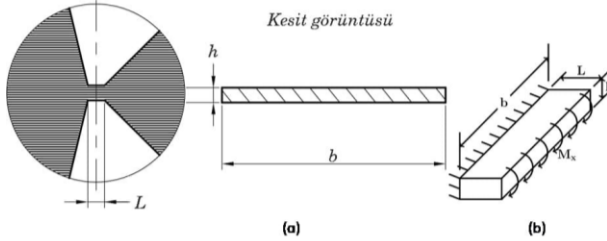
Şekil 5'te dönme mafsalsının hareketli olan üst kısmı ile kuvvet askı parçası, serbest cisim diyagramında birlikte gösterilmiştir. Tepki kuvvetleri ve moment, dönme mafsalsının ortasından geçen boğaz kısmında alınmıştır. Askı kolu ve dönme mafsalsının boğazın üstünde kalan kısmının ağırlıkları sırasıyla $m_{kol}g$ ve $m_{tpu}g$, ağırlık merkezlerinin ilk konfigürasyonda boğaza olan dikey uzaklıkları y_{kol} ve y_{tpu} , kolun ucuna asılan ağırlık mg , bu ağırlığın moment kolu S olarak alınmıştır. Gösterilen konfigürasyon θ açısında bulunmaktadır.

Reaktif momentin bulunduğu noktada kuvvet sisteminin yarattığı eşlenik etkinin denge denklemleri yazılır. Örneğin, sayfadan dışarıya doğru olan z -ekseni etrafında alındığında

3. DOĞRUSAL ELASTİK DAVRANIŞ MODELİ (LINEAR ELASTIC MODEL)

Bu kısımda torsiyonel direngenliğin teorik hesabında kullanılan model açıklanmıştır. Askı koluna kütleli asılmasını takiben Dönme Mafsalsında oluşan rotasyon,

elemanın özellikle boğaz bölgesinde meydana gelen şekil değiştirmesine bağlı olarak oluşmaktadır. Şekil 2’de yer alan deney düzeneğinde A kesitinin büyütülmüş görünüşünde yer alan boğaz bölgesinin detayı Şekil 6’da verilmiştir.



Şekil 6. Solda (a): Dönme Mafsalında bulunan boğaz kısmının detaylı görünüşü (Şekil 2’de A detayı). Dikdörtgen kesitli boğaz bölgesinin kesit ölçüleri (b ve h) ve uzunluğu (L). Sağda (b): teorik deformasyon modeli, sağ kenarından m_x büyüklüğünde bükülme momenti uygulanmış soldan ankastre kısa levha (On the left (a): Detailed view of the complaint hinge’s neck region (A section in Figure 2). The dimensions of the neck region having a rectangular cross-section (b and h), and a length (L). On the right (b): The theoretical deformation model of a short cantilevered plate, which is fixed from its left surface, subjected to a bending moment of m_x)

Şekil 6’nın solunda gösterilen numunenin boğaz bölgesi, L uzunluğunda, b derinliğinde ve h kalınlığında bir levha olarak kabul edilmiştir. Levhanın malzemesi bir önceki bölümde anlatılan doğrusal elastik izotropik malzemedir. Bu levhanın sol ucundan birim genişlik başına uygulanan m_x momenti

$$m_x = \frac{D}{\rho_x} = \frac{D\theta}{L} \quad (2)$$

ilişkisinden hesaplanabilir. Burada ρ_x şekil değiştirmeden oluşan x -ekseni etrafındaki bükülme yarıçapını gösterir. Bükülmüş levha uzunluğu L , bükülme yarıçapı ρ_x ile uçtaki açılma değişiminin çarpımına eşittir ($L = \theta\rho_x$). Burada ortaya çıkan θ , dönme mafsalının açılma değişiminden kaynaklanan önceki θ' ’den farklı değildir.

Denklemler 2’de görüldüğü gibi bükülme momenti, $1/\rho_x$ ile doğru orantılıdır. Aralarındaki oransallığı temsil eden parametre D , levhanın birim genişliği başına bükülme direngenliğidir (*flexural rigidity*). Bu değer

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (3)$$

formülünden hesaplanır [27]. D ’nin hesabında yer alan $E/(1-\nu^2)$ faktörü, düzlemsel gerinim (*plane strain*) durumunda elastik modülde meydana gelen artışla aynıdır. Kirişin toplam torsiyonel direngenliğini bulmak için Denklem 2’den $\kappa = M_r/\theta$ oranı çekilir. bm_x çarpımı, kenarda oluşan toplam tepki momenti M_r ’ye eşittir. Bu şekilde elde edilen teorik formül

$$\kappa = \frac{Db}{L} = \frac{Ebh^3}{12(1-\nu^2)L} \quad (4)$$

olarak ifade bulur. Sonuç bölümünde deneysel veriler ile karşılaştırılacak olan teorik model bu denklemden kaynaklanmıştır.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Dönme mafsalı olarak kullanılmak amacıyla TPU malzemesinden üretilmiş ve belirli bir eksen etrafında dönme hareketi sağlayan bir bağlantı parçasının mekanik davranışının incelenmesine olanak veren deneysel bir düzeneğin kavramsal tasarımı ve prototip üretimi önceki kısımda anlatılmıştı. Bu bölümde ise, torsiyonel direngenliği ölçülecek olan dönme mafsalından farklı ölçülerde Eriyik Yığılma Modelleme (FDM) tekniği kullanılarak üretilen dört adet numune üzerinde yapılan deneylerin sonuçları aktarılacak ve deney sonuçlarının teorik hesap ile karşılaştırması sunulacaktır.

Sırasıyla S1, S2, S3 ve S4 olarak adlandırılan numunelerin Denklem 4’te kullanılan boyutsal özellikleri Çizelge 2’de verilmiştir. Her bir numuneye sırasıyla $m = 4$ g, 9.8 g, 13.8 g, 17.5 g ağırlıklar asılmış ve bunun sonucunda oluşan açılma değişimleri tespit edilmiştir.

Çizelge 2. Deneylerde kullanılan numunelerin boğaz kısımlarının ölçüleri (mm olarak) (The dimensions (in mm) of the neck region of the specimens, which were used in the experiments.)

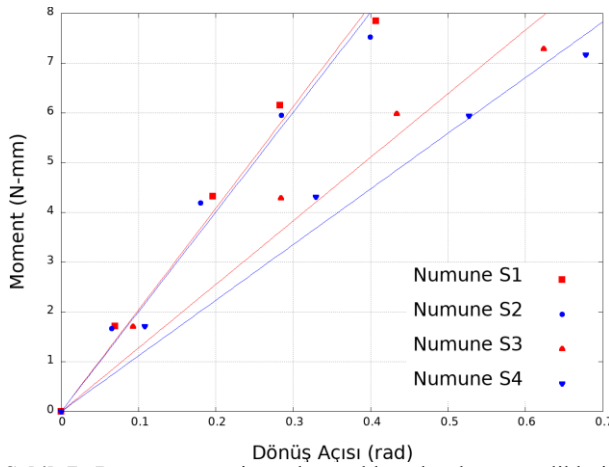
Numune	S1	S2	S3	S4
L	0.90	0.60	0.60	0.60
b	12.30	12.30	10.35	8.20
h	1.00	0.80	0.80	0.80

Asılan ağırlık m ile ölçülen açı θ , Denklem 1 içinde kullanılarak M_r değerleri bulunur. M_r değerleri her bir numune için θ ’ya bağlı olarak Şekil 7’de çizdirilmiştir. Her bir numuneden alınan verilere doğru oturtma işlemi yapılarak bulunmuş doğrular aynı şekil üzerinde çizdirilmiştir. Bu doğruların eğimlerinden Çizelge 3’te gösterilen deneysel κ değerleri, deneylerde kullanılan dört adet esnek dönme mafsal numunesinin torsiyonel direngenlikleri olarak [11.18, 20.43] N•mm/rad aralığında bulunmuştur. Değerlerin altında parantez içerisinde verilen değerler eğimdeki standart asimtotik oturtma hatasıdır.

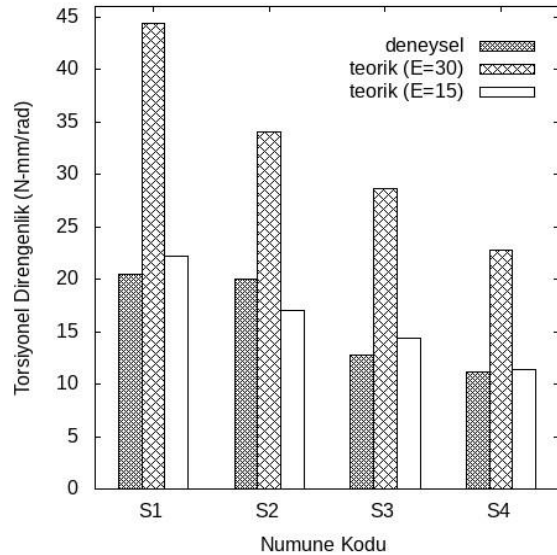
Çizelge 3. Deneysel (Şekil 7) ve teorik (Denklem 4) olarak elde edilen κ değerleri N•mm/rad cinsinden verilmiştir (κ values, which were obtained experimentally (Figure 7) and theoretically (Equation 4), are given in units of N•mm/rad.)

Numune	S1	S2	S3	S4
κ (deneysel)	20.43 (.685)	20.06 (.820)	12.77 (.711)	11.18 (.490)
κ (teorik, E=30 MPa)	44.40	34.10	28.69	22.73
κ (teorik, E=15 MPa)	22.20	17.05	14.35	11.36

Bu değerler ile karşılaştırmak için kurgulanan teorik model, deneysel sonuçların tutarlılığı hakkında fikir oluşturmakta yardımcı olmanın yanı sıra dönme mafsalsının torsiyonel direngenliğini yaklaşık olarak hesaplayan bir formül de vermektedir. Elastik modül olarak literatürde verilen 30 MPa değeri, Denklem 4'te verilen formül içerisine Çizelge 2'deki boyutsal değerlerle birlikte girildiğinde elde edilen teorik κ değerleri, Çizelge 3'ün üçüncü satırında sunulmaktadır. Diğer numunelere göre daha yüksek bir boğaz kalınlığına sahip olan S1 numunesi, en yüksek direngenlik değerine sahiptir. Ulaşılan bu sonuç, boğaz kalınlığının tasarlanan mafsalsal geometrisinin direngenliğini etkileyen en belirleyici parametre olduğunu, literatürde buna değinen yayınlarda olduğu gibi göstermektedir [17].



Şekil 7. Dört numunenin asılan yükler altında gösterdikleri torsiyonel davranış. Her bir numune için doğru oturtma işlemi yapılmıştır (The torsional behavior of the four specimens under the hung weights. For each specimen, a linear fit was applied.)



Şekil 8. Teorik (Denklem 4) ve deneysel (Çizelge 3) yöntemler sonucunda bulunan torsiyonel direngenlik değerlerinin karşılaştırması (The comparison of the torsional stiffness values, which were resulted from the theoretical calculation (Equation 4) and the experimental (Table 3) method.)

Çizelge 3'ün ortaya koyduğu direngenlik durumu, Şekil 8'de temsili hale getirilmiştir. Buradan görüldüğü gibi teorik modelde $E = 30$ MPa kullanıldığında çıkan değerler, deneyde ölçülenlerin yaklaşık iki katıdır. Bunun muhtelif sebepleri olduğu düşünülmektedir. Örneğin, açılı ölçümünün ağırlık asılmasından 90 s sonra yapılması, viskoelastik şekil değiştirmenin de etkili olmasına ve açılı değerinde büyümeye yol açar. Şekil 4'te oluşan açılal değişim yükün asılmasının hemen ardından 10 derece civarındayken, 90 s sonrasında bu değer 16,5 derecelere ulaşmıştır. Bu fark da, direngenlikteki %50'lik sapmanın yaklaşık %40'ını açıklamaktadır.

Teorik modelin ön gördüğü torsiyonel direngenliğin deneyselin yaklaşık iki katı çıkmasının arkasındaki bir başka sebep ise, oluşan açılıların birim açılıya göre çok da küçük kalmamalarıdır, yani küçük (doğrusal) şekil değiştirme ön kabulünün geçerliliğinin azalmasından kaynaklandığı söylenebilir. Doğrusal şekil değiştirme ilişkilerinde göz ardı edilen ikinci ve daha yüksek dereceden terimler, modelin fiziksel olarak da daha sert davranmasına yol açmaktadır.

Direngenlikler arasındaki %10'luk farkı açıklamada kullanılacak bir başka faktör, Bölüm 2.2'de de üzerinde durulan askı koluna giden kablolar konusudur. Askı kolunun üzerindeki duyarlığa bağlanan bu kabloların olası gerginliğinden dolayı, boğazda oluşan tepki momentinde azalma kaydedilmektedir. Ancak bu değerler ölçülemediği için kablolar özel bir konfigürasyonda tutulmuş olsa da, sonuçta teorik direngenliğin olması gerekenden daha yüksek çıkmasına sebep olmaktadır.

Tüm bu belirsizliklerin oluşturduğu sebeplerden dolayı Denklem 4 yoluyla elde edilen direngenlik, tutarlı olarak deneysel olandan yaklaşık iki kat fazladır. Teorik formül deneysel olana göre sert davrandığından, daha düşük bir elastik modül kullanarak deneysel davranışa yaklaşma çalışması yapılmıştır. Bu kapsamda orijinal elastik modül olan 30 MPa yerine bunun yarısı olan 15 MPa kullanılmış, bu şekilde çıkan direngenlik değerlerinin deneysel olanlara oldukça yakın olduğu ($\pm\%5$ hata payı ile) görülmüştür.

Teorik direngenlik denkleminde (Denklem 4) de görüldüğü gibi boğaz bölgesi geometrik parametreleri direngenliği etkilemekte olup, direngenliği en fazla etkileyen parametre boğaz kalınlığıdır. İdeale yakın bir dönme mafsalsı yapabilmek için boğaz kalınlığının mümkün oldukça ince yapılması gerekmektedir. Ancak 3B yazıcı limitlerinden dolayı boğaz kalınlığının artırması, hem de dönme mafsalsında bulunmaması gereken yatay ve düşey yöndeki (Şekil 5'teki x ve y eksenleri) öteleme serbestliğine sebebiyet vermesi dolayısıyla uygun bir yaklaşım değildir. Son olarak, boğaz genişliğinin azaltılması da eklem katı olması gereken x -ekseni etrafında dönüşünü kolaylaştıracağı için dezavantajlıdır. Bu durum, Lobontiuvd (2014) tarafından yapılan çalışmada da belirtilmiştir [14].

Sonuç olarak, deneysel torsiyonel direngenlik değerleri, teorik formüldeki sertlik göz önüne alınarak daha düşük bir elastik modül kullanılmak suretiyle oldukça yakın bir şekilde tahmin edilebilmektedir. Boğaz bölgesine sahip dönme mafsalının kavramsal tasarımında teorik direngenlik formülünün kullanılabilmesi, prototip üretiminden sonra ise çalışmada detaylandırılan deneysel yöntem ile torsiyonel direngenliğin ölçülebileceği gösterilmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Deneylerin yapılmasında emeği geçen takım arkadaşımız Faruk Zeytinci'ye ve numuneleri hazırlayan Cevat Volkan Karadağ'a teşekkürü bir borç biliriz.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Ufuk Tan BALER: Deney sonuçlarını analiz etmiş, grafikleri hazırlamış, Malzeme ve Yöntem kısmını yazmıştır.

Enis AYKIN: Deneyleri yapmış, deneysel bulguları elde etmiş, Giriş bölümünü yazmıştır.

Ali Fethi OKYAR: Lineer elastik model bölümünü yazmış, Şekiller 7 ve 8'i hazırlamıştır.

Nezih TOPALOĞLU: Makalenin tümünün kurgusunu hazırlamış, Tartışma ve Sonuç bölümünü yazmıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Mutlu R., Tawk C., Alici G. ve Sariyildiz E. "A 3D printed monolithic soft gripper with adjustable stiffness", *IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, China Beijing, 6235-6240, (2017).
- [2] Rodríguez-Panes A., Claver J. ve Camacho, A. M., "The influence of manufacturing parameters on the mechanical behaviour of PLA and ABS pieces manufactured by FDM: A comparative analysis", *Materials*, 11(8): 1333, (2018).
- [3] Günay M., Gündüz S., Yılmaz H., Yaşar N. ve Kaçar R., "PLA esaslı numunelerde çekme dayanımı için 3D baskı işlem parametrelerinin optimizasyonu", *Politeknik Dergisi*, 23(1): 73-79, (2019).
- [4] Wei H., Wang L., Niu X., Deng Y., Zhang Y. ve Cheng J., "Stiffness characteristics of a laser beam melted (LBM) additive-manufactured flexure mechanism", *Procedia CIRP*, 78: 144-148, (2018).
- [5] Lobontiu N., "Compliant Mechanisms: Design of Flexure Hinges", *CRC Press*, ABD, (2003).
- [6] Kaplan G., "Esnek Mekanizmaların Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi", yüksek lisans tezi, *Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2013).
- [7] Hu Y., Zhang L., Li W. ve Yang G. Z., "Design and fabrication of a 3-D printed metallic flexible joint for snake-like surgical robot", *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(2): 1557-1563, (2019).
- [8] Mutlu R., Alici G., in het Panhuis M. ve Spinks G., "Effect of flexure hinge type on a 3D printed fully compliant prosthetic finger", *2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Korea Busan, 790-795, (2015).
- [9] Tawk C., Gillett A., in het Panhuis M., Spinks G. M. ve Alici G., "A 3D-printed omni-purpose soft gripper", *IEEE Transactions on Robotics*, 35(5): 1268-1275, (2019).
- [10] Pham M. T., Teo T. J., Yeo S. H., Wang P. ve Nai M. L. S., "A 3-D printed Ti-6Al-4V 3-DOF compliant parallel mechanism for high precision manipulation", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 22(5): 2359-2368, (2017).
- [11] Sharkey J. P., Foo D. C., Kabla A., Baumberg J. J. ve Bowman R. W. "A one-piece 3D printed flexure translation stage for open-source microscopy", *Review of Scientific Instruments*, 87(2): 025104, (2016).
- [12] Lee C. ve Tarbutton J. A., "Compliance and control characteristics of an additive manufactured-flexure stage", *Review of Scientific Instruments*, 86(4): 045107, (2015).
- [13] Bates S. R., Farrow I. R. ve Trask R. S., "3D printed polyurethane honeycombs for repeated tailored energy absorption", *Materials and Design*, 112: 172-183, (2016).
- [14] Lobontiu N., "Out-of-plane (diaphragm) compliances of circular-axis notch flexible hinges with midpoint radial symmetry", *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 42(4): 518-538, (2014).
- [15] Alghamdi A., Maconachie T., Downing D., Brandt M., Qian M., ve Leary M., "Effect of additive manufactured lattice defects on mechanical properties: an automated method for the enhancement of lattice geometry", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 108: 957-971, (2020).
- [16] Balderrama-Armendariz C. O., MacDonald E., Roberson D. A., Ruiz-Huerta L., Maldonado-Macias A., Valadez-Gutierrez E. ve Espalin D., "Folding behavior of thermoplastic hinges fabricated with polymer extrusion additive manufacturing", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105(1-4): 233-245, (2019).
- [17] Wagner M. A., Huang J. L., Okle P., Paik J. ve Spolenak R., "Hinges for origami-inspired structures by multimaterial additive manufacturing", *Materials and Design*, 191: 108643, (2020).
- [18] Data MMP. *Covestro Desmopan® 2786A GMP TPU*.
- [19] QiH. J. ve Boyce M. C., "Stress-strain behavior of thermoplastic polyurethanes", *Mechanics of materials*, 37(8): 817-839, (2005).
- [20] Kanbur Y. ve Tayfun U., "Investigating mechanical, thermal, and flammability properties of thermoplastic polyurethane/carbon nanotube composites", *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 31(12): 1661-1675, (2018).

- [21] Hossieny N., Shaayegan V., Ameli A., Saniei M. ve Park C. B., "Characterization of hard-segment crystalline phase of thermoplastic polyurethane in the presence of butane and glycerol monostearate and its impact on mechanical property and microcellular morphology", *Polymer*, 112: 208-218, (2017).
- [22] Fang C., Yang R., Zhang Z., Zhou X., Lei W., Cheng Y., Zhang W. ve Wang D., "Effect of multi-walled carbon nanotubes on the physical properties and crystallisation of recycled PET/TPU composite", *RSC Adv.*, 8(16): 8920-8928, (2018).
- [23] Fedorov D. S., Ivoilov A. Y., Zhmud V. A. ve Trubin V. G., "Using of measuring system MPU6050 for the determination of the angular velocities and linear accelerations", *Automatics & Software Engineering*, 11(1): 75-80, (2015).
- [24] D'Ausilio A., "Arduino: A low-cost multipurpose lab equipment", *Behavior research methods*, 44(2), 305-313, (2012).
- [25] Eaton J. W., Bateman D., Hauberg, S. ve Wehbring R., "GNU Octave Version 5.1. 0 Manual: A High-Level Interactive Language for Numerical Computations", *Free Software Foundation*, (2019).
- [26] Reas C. ve Fry B., "Processing: programming for the media arts", *AI & SOCIETY*, 20(4): 526-538, (2006).
- [27] Cook R. D. ve Young C.D., "Advanced Mechanics of Materials", 2ed., *Prentice Hall*, Upper Saddle River, NJ, (2003).