



ELASTOMERİK MALZEMELERİN KATMANLI İMALATINDA TEMEL PARAMETRELERİN ANALİZİ

Ömer Elbaba ^{1,2}, Samet Sezer², Haydar Şahin¹, Savaş Dilibal¹

¹İstanbul Gedik Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü 34876 İstanbul

²Printek Mekatronik Sistemleri Ltd., İstanbul

ÖZET

Katmanlı imalat teknolojisindeki gelişmeler mekatronik, robotik, havacılık ve biyomedikal ürünler gibi birçok farklı uygulamanın üretim yapılmasına olanak sağlamaktadır. Bu uygulamalardaki istenen parametrelerden biri de esnek mekanik özelliklere sahip olunmasıdır. Geleneksel döküm teknolojisi kullanılarak yapılan üretimle karşılaştırıldığında katmanlı imalat tekniği birçok açıdan daha kolay son ürüne erişilebilen bir tekniktir. Bu çalışmada, esnek ürün elde edilmesi için katmanlı imalat teknolojisinde malzeme seçimi ve imalat parametreleri ile ilgili gerekli ön şartlar araştırılmıştır. Çekme dayanımı, sertlik, elastisite modülü gibi mekanik özellikler dikkate alınarak, kullanılacak uygulama gereksinimlerine göre polimerik malzeme seçimi yapılması gerektiği tespit edilmiştir. Ergiyik yığma (FDM) tekniği kullanılarak esnek polimerik filament ile imalat parametreleri belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Elastomerik malzeme, Katmanlı İmalat, Esnek filament

ANALYSIS OF THE BASIC PARAMETERS IN ADDITIVE MANUFACTURING OF THE ELASTOMERIC MATERIALS

ABSTRACT

The development in additive manufacturing technology facilitates the production of the final product for varied applications; such as mechatronics, robotics, aerospace and biomedical devices. The soft mechanical property is one of the desired parameters for these applications. The final product can be easily manufactured through the additive manufacturing process compared to the conventional casting technique. In this study, the prerequisite for material selection and manufacturing parameters in additive manufacturing investigated for the soft products. Taking into consideration the mechanical properties such as tensile strength, hardness and modulus of elasticity, it has been determined that polymeric materials should be selected according to the application requirements to be used. Manufacturing parameters were determined with a flexible polymeric filament using fused deposition modeling (FDM) technique.

Keywords: Elastomeric material, Additive manufacturing, Flexible filament

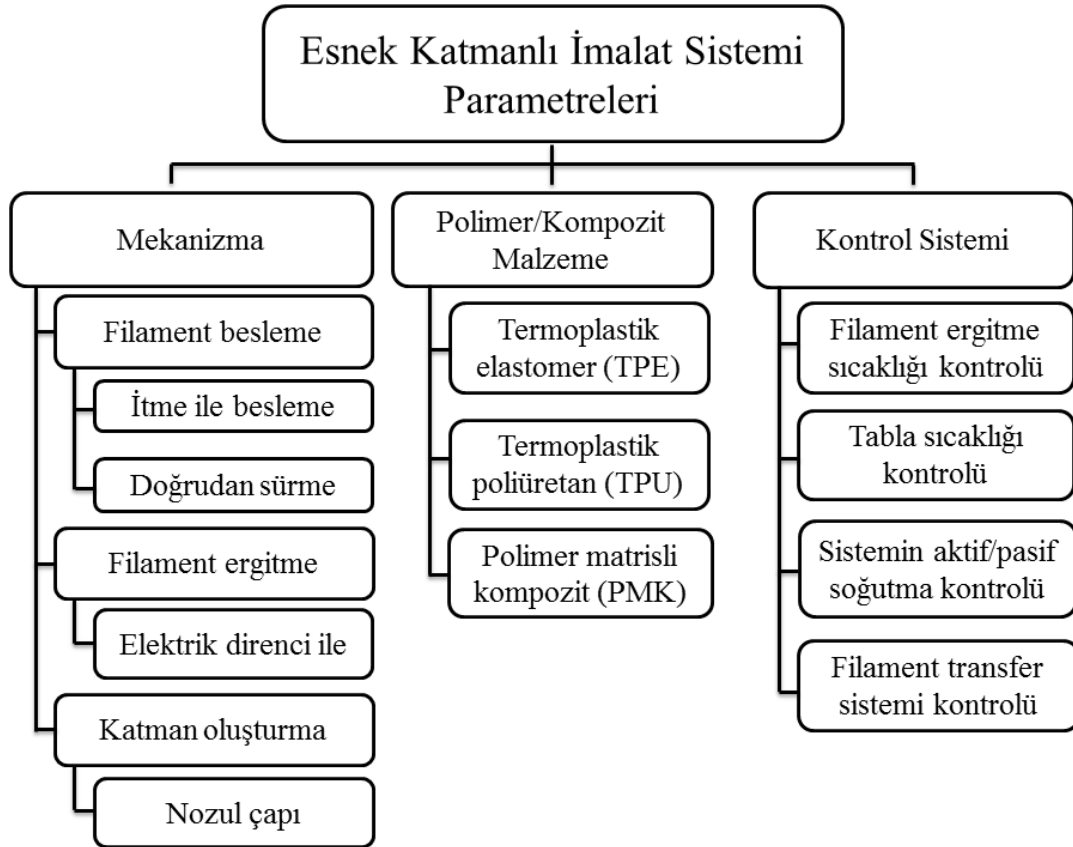
1.GİRİŞ

Endüstri 4.0 ile uyumlu üretim teknolojileri içerisinde yer alan katmanlı imalat teknolojisindeki yenilikler prototip veya ürün geliştirilmesinde hızlı ve yüksek kalitede alternatif çözümlerin ortaya çıkmasını sağlamıştır [1]. Döküm ve talaşlı imalattan farklı olarak polimer, metal ve kompozit malzemelerin katman katman biriktirme yapılarak üretimi, başta mekatronik [2], robotik [3], havacılık

[4] ve biyomedikal [5] alanlar olmak üzere birçok mühendislik uygulamasında etkin olarak kullanılmasının yolunu açmıştır. Son yapılan araştırmalarda elastomerik malzemelerin şekil bellekli alaşımlarla hibrid olarak kullanımı ile ilgili uygulamalar katmanlı imalatın önemini artırmıştır [6]. Özellikle polimer ve polimer matrisli kompozit malzemeler metallere göre daha düşük ergime sıcaklığına sahip olduğundan dolayı ergiyik yığma (FDM, fused deposition modeling) tekniği kullanılarak üretilmektedir [7]. Esnek üretim için polimer ve polimer matrisli kompozit malzemeler içerisinde seçim yapılmalıdır. Malzeme (filament) seçimi esnek katmanlı imalatta en önemli parametrelerden birini oluşturur. Esnek katmanlı imalat için gerekli olan polimerik malzeme yüksek çekme dayanımı yanında sertlik değeri de ürün esnekliği açısından detaylı olarak tespit edilmelidir.

Termoplastik elastomer malzemeler, çekme dayanımı 10-21 MPa aralığında ve sertliği 5-95A Shore aralığında olmasından dolayı esnek katmanlı imalatta tercih edilen bir malzemedir [2]. Düşük sertlik değerine sahip olan TPE filamentler çekme ve itmede karşılaşılan zorluklardan dolayı filament besleme mekanizmasında kullanıma uygun değildir. Bu nedenle genellikle esnek katmanlı imalat sistemlerinde sertliği 85-95A Shore aralığında değişen ticari TPE filamentler kullanılır [4].

Esnek katmanlı imalat sistemini temel olarak mekanizma, esnek malzeme ve kontrol olmak üzere üç ayrı grupta incelemek mümkündür. Bu çalışma kapsamında, Şekil 1’de esnek katmanlı imalat sisteminin temel alt sistemleri incelenerek detaylandırılmıştır. Kullanılan mekanizma sistemleri filament besleme, filament ergitme ve katman oluşturma alt sistemlerinden meydana gelir. İkinci önemli parametre olan malzeme seçiminde termoplastik elastomer (TPE), termoplastik poliüretan (TPU) ve polimer matrisli kompozit seçenekleri bulunmaktadır [8]. Üründen istenen, çekme dayanımı, sertlik, elastisite modülü gibi mekanik özellikler kullanılacak esnek malzemenin seçiminde önemli rol oynar. Esnek katmanlı imalat için dört ana kontrol algoritmasının oluşması gerekir. Bunlar filament ergitme sıcaklığı kontrolü, tabla sıcaklığı kontrolü, sistemin aktif/pasif soğutma kontrolü ve filament transfer sistemi kontrolüdür [9-10].

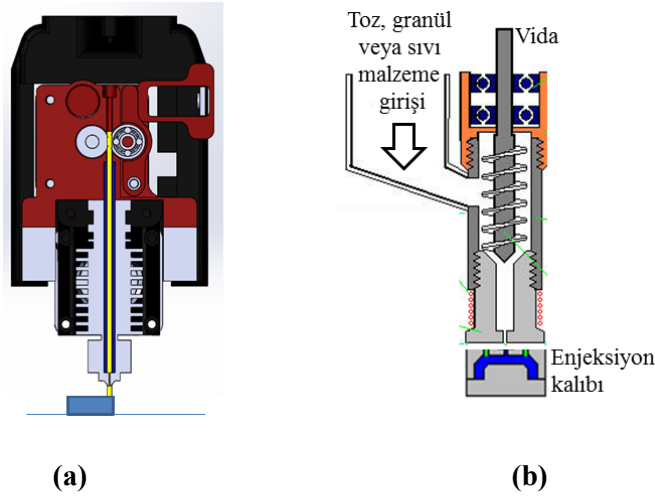


Şekil 1. Esnek katmanlı imalat sisteminin temel parametreleri

2. KATMANLI İMALATLA ESNEK PARÇALARIN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Katmanlı imalatta esnek parçaların üretimi ergiyik yığıma (FDM, fused deposition modeling), seçici lazer sinterleme (SLS, selective laser sintering) veya stereolitografi (SLA, stereo lithography apparatus) yöntemleri ile yapılabilir. En yaygın olarak kullanılan ergiyik yığıma yönteminde filament esnek olmasından dolayı filament besleme doğrudan sürme (direct drive) yöntemi tercih edilerek yapılır. Filament itme ile besleme (bowden) mekanizmasında esnek filament yeterince itilememesi sorunlarıyla karşılaşılır. Bu sorun ekstrüder içerisinde tıkanmalara neden olmaktadır. PLA veya ABS filamentlere göre esnek filament kullanımı için 3B yazıcının ısıtma sıcaklığı ve baskı hızı gibi parametrelerin esnek filament özelliklerine göre düzenlenmesi gerekir.

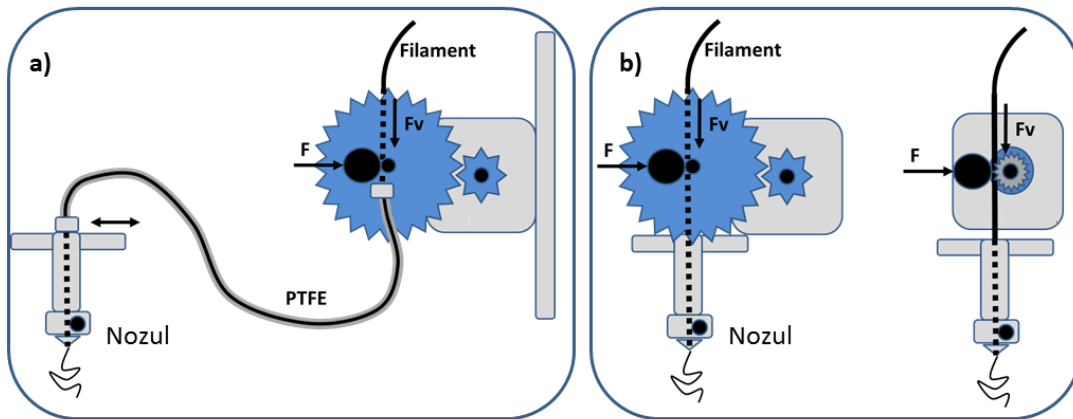
FDM tekniği kullanılarak yapılan ekstrüzyonla esnek üç boyutlu imalat, plastik enjeksiyondan imalat tekniği açısından farklılıklar gösterir. Plastik enjeksiyon sisteminde 3 boyutlu ürün elde edilmesi için, öncelikle ürüne ait kalıp imalatı gerekir. Şekil 2’de gösterilen katmanlı imalat yöntemlerinden biri olan FDM tekniğinde, esnek ürün elde edilmesinde kalıba gereksinim ortadan kalkmaktadır.



Şekil 2. Esnek ürün elde etmek için imal usulleri a) Ekstrüzyonla esnek 3B imalat b) Enjeksiyon kalıplama [11]

3. ESNEK KATMANLI İMALAT FİZİKSEL PARAMETRELERİ

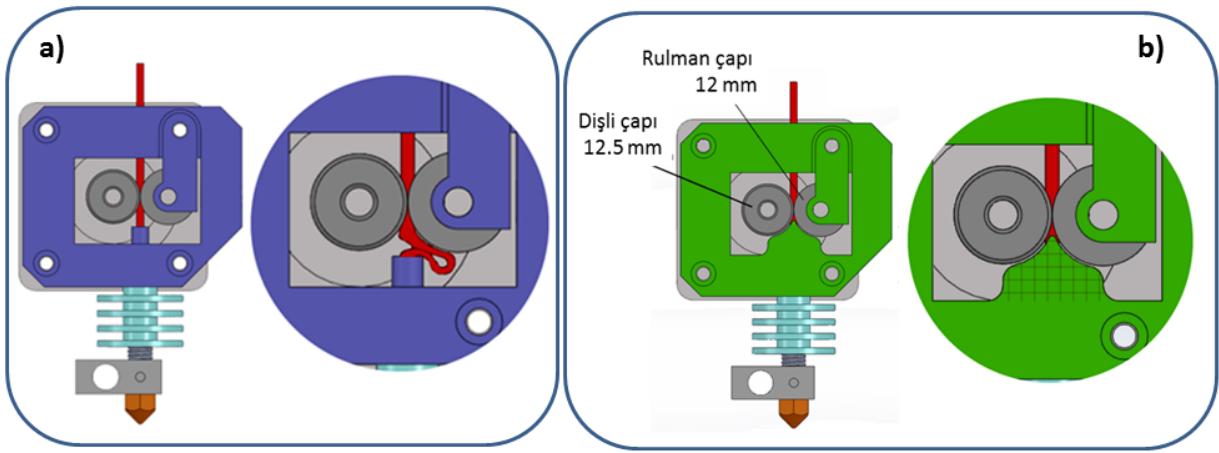
Esnek katmanlı imalat fiziksel parametreleri; mekanizma, polimerik malzeme ve kontrol sisteminde uygulanan parametreler olmak üzere üç ayrı gruptan oluşur. Mekanizma parametreleri altında yer alan filament besleme düzeneği itme ile besleme (bowden) ve doğrudan sürme (direct-drive) olmak üzere iki farklı şekilde olabilir.



Şekil 3. İtmeli ve doğrudan sürülen ekstrüder a) itme ile besleme b) doğrudan sürme [11]

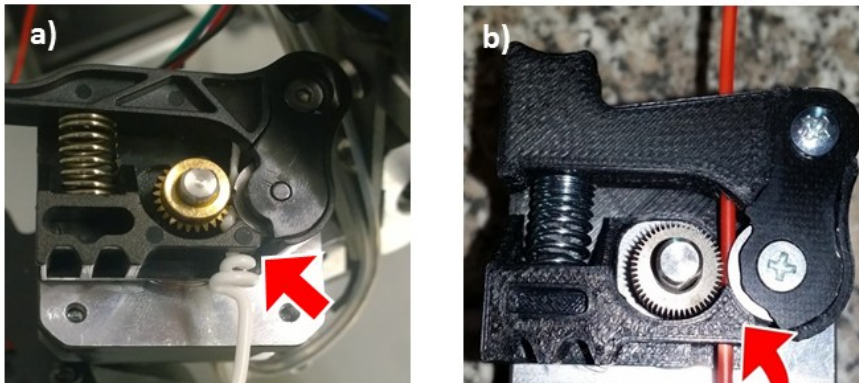
Esnek filament için itme ile besleme ve doğrudan sürme sistemleri karşılaştırıldığında, doğrudan sürme uygulanan ekstrüder sistemi ile daha sorunsuz sonuçlar elde edilir. İtmeli ile beslenen ekstrüder sisteminde filamentin iten adım motoru, filamentin ergitildiği sıcak uçtan çok uzakta bulunduğu için esnek filament ile baskılarda sorun oluşturmaktadır. Bu nedenle, esnek filament ile imalat için doğrudan sürülen ekstrüder sistemleri tercih edilmelidir.

Doğrudan sürülen ekstrüder sistemleri esnek filament ile baskı için tercih edilen bir sistem olmasına rağmen, ek tasarım değişikliklerine de ihtiyaç gösterir. Esnek filament, ekstrüder motorunun ucundaki itici dişli ve gergi rulmanını geçtikten sonra Z ekseninde yoluna devam edecek şekilde ekstrüder tasarımında gerekli değişiklik yapılmalıdır. Şekil 4’de soldaki tasarımda doğrudan sürülen ekstrüder sistemi ile esnek filament kullanabilmek mümkün değildir. Böyle bir tasarımda esnek filament, Z ekseninde ilerlemeyip itici dişli veya gergi rulmanı tarafına doğru yönelerek akıştaki sürekliliği bozabilmektedir. Filament besleme ünitesinin tasarımında Şekil 4’de sağdaki tasarımdaki gibi rulman çapı ile dişli çapı arasındaki çap farkı esnek filamentin transferinde katlanmaları engellemektedir.



Şekil 4. Esnek katmanlı imalat için filament besleme ünitesinin tasarımında yapılan değişiklik a) itme ile filamentin ilerlemesi b) doğrudan sürme ile filamentin ilerlemesi [12]

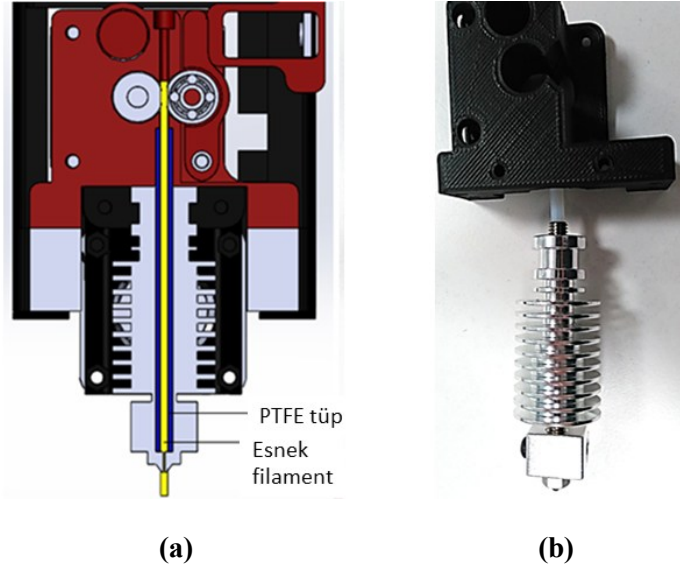
Doğrudan sürülen ekstrüder mekanizmasının esnek filamentle beslemeye uygun hale getirilmediği sistem Şekil 5’de gösterilmiştir. Şekil 5a’da esnek filament katlanarak devam ederken Şekil 5b’de tasarımı değiştirilen sistemde katlanmalar engellenmiştir.



Şekil 5. Doğrudan sürülen ekstrüder mekanizmasının esnek filamentle beslemeye uygun hale getirilmesi a) itici dişli ile nozul arasında filamentte burulma b) itici dişli ile nozul arasında kontrollü ilerleme [12]

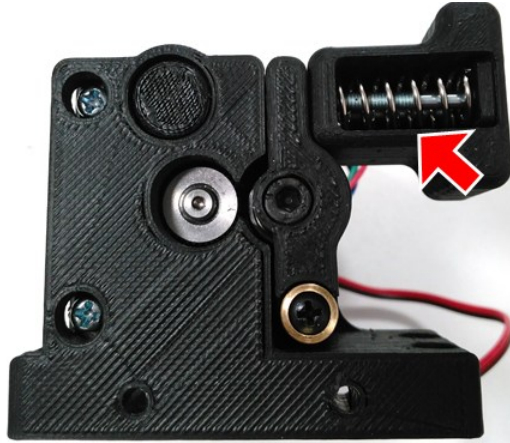
Esnek filamentle üretim için tasarımda dikkat edilmesi gereken diğer önemli husus, filamentin itici dişli ile nozul arasında kontrollü bir şekilde ilerlemesinin sağlanmasıdır. Esnek filament ekstrüder içerisinde olabilecek bölgesel katlaşmalardan etkilenmemesi için Şekil 6’da görüldüğü gibi metal yüzey ile

arasında yalıtım sağlanarak politetrafloroetilen (PTFE) tüp içerisinde nozula kadar ilerler. Böylece, esnek filament Z ekseninde katlanmaya veya nozul öncesinde ergimeye uğramadan nozul içine transferi gerçekleşir.



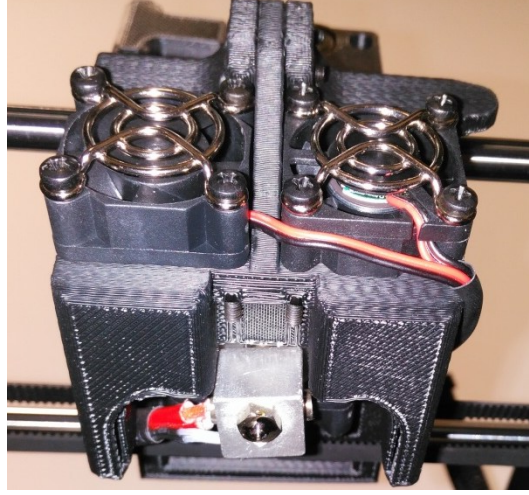
Şekil 6. Esnek filamentin PTFE tüp içinden geçerek ilerlemesinin a) tasarımı [11] ve b) prototipi

Esnek filament ile baskı yapılacağı zaman, filamente basma kuvveti uygulayan gergi yayının gerilerek daha fazla kuvvet uygulaması gerekmektedir. Esnek olmayan malzemelere aktif basma kuvveti uygulayan gergi yayı, esnek filament için aynı etkiyi gösteremez. Bu nedenle, gergi yayının biraz daha sıkılması ile gergi rulmanı filamente daha yüksek basma kuvveti uygulayabilir. Bu değişiklik esnek filamentin düzenli olarak sürekli akışını sağlar. Ekstrüder üzerinde bulunan esnek filament gergi yayı Şekil 7’de gösterilmiştir.



Şekil 7. Ekstrüder üzerinde bulunan esnek filament gergi yayı

3B yazıcıda hem esnek hem de esnek olmayan malzemeler kullanılarak baskı alınıyor ise, malzeme geçişleri arasında mutlaka temizleme filamentini kullanılmalı ve bu temizleme filamentini uzun bir süre akıtılıp sıcak uç iyice temizlenmelidir. Aksi takdirde esnek malzeme ile baskı sırasında esnek olmayan malzeme parçacıkları sıcak ucu tıkayarak baskı sırasında soruna neden olur. Ayrıca baskı kalitesini arttırmak için baskı soğutma fanı kullanılır. Böylece, malzemenin hızla soğuması sağlanarak katmanlar arası geçişlerde yüksek soğuma hızı elde edilir. Örnek bir baskı soğutma fanı uygulaması Şekil 8’de gösterilmiştir.



Şekil 8. Ekstrüder üzerinde aktif soğutma için kullanılan fan sistemi

FDM tekniğiyle geliştirilen üç boyutlu yazıcıların esnek üretim yapacak şekilde ayarlanması gerekir. Termoplastik elastomer (TPE) esnek filamentlerin baskı parametreleri PLA filamentle yapılan 3B baskıya göre farklılıklar göstermektedir. Baskı hızı 10-30 mm/sn arasında ayarlanmalıdır. Esnek malzeme ile baskı yaparken mümkünse geri çekme kullanılmamalıdır. Eğer kullanılacaksa geri çekme miktarı esnek olmayan malzemelere göre 1/3 oranında azaltılmalıdır. 1.75 mm kalınlığa ve 85A shore sertliğine sahip TPE filamentler, 210 °C - 230 °C arasındaki sıcaklıkta ekstrüder içinde eritilerek esnek imalat yapılır. Tablo 1’de esnek katmanlı imalatta kullanılan polimerik filament fiziksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 1. Esnek katmanlı imalatta kullanılan polimerik filament fiziksel özellikleri

Filament	Sertlik değeri (Shore A)	Yoğunluk	Baskı sıcaklığı	Aşınma dayanımı	Çekme oranı (%)
TPE	85A	1.20g/cm ³	210-230 °C	Orta	% 1,2 - 3,0
TPU	94A	1.21g/cm ³	210-230 °C	Yüksek	% 0,8 - 1,8

4. SONUÇ VE GELECEKTEKİ ÇALIŞMALAR

Esnek katmanlı imalat sistemi, polimerik veya polimer matrisli kompozit malzeme kullanılarak birçok mühendislik uygulamasında tercih edilir hale gelmiştir. Daha hızlı ve kaliteli prototip ve ürün geliştirilmesine olanak sağlayan bu imalat sistemleri ile tasarımdan üretime geçiş süreci hızlandırılmıştır. Esnek katmanlı imalat ile imalat teknolojilerine alternatif çözümler sunulmaktadır. Bu çalışmada, elastomerik malzemelerin katmanlı imalatında temel parametrelerin mekanizma, polimerik malzeme ve kontrol sistemi olduğu ortaya çıkarılmıştır. Kullanılan malzeme olarak TPU filament ve mekanizma olarak doğrudan sürme mekanizmasının esnek katmanlı imalatta kullanılması gerektiği tespit edilmiştir. Ayrıca, kontrol sisteminde nozul ve tabla sıcaklığının kontrolünün aktif kullanımı gerektiği görülmüştür. İleriki çalışmalarda esnek katmanlı imalatla üretilen esnek robotik sistemler ve uygulamaları ile ilgili çalışmalar aktarılacaktır.

5. KAYNAKLAR

- [1] Matsuno T., Wang Z., Hirai S., 2017. Grasping state estimation of printable soft gripper using electro-conductive yarn, *Robotics and Biomimetics*, pp.1-11.
- [2] Mansouri, MR, Montazerin H., Schmauder S., Kadkhodapour J.,2018. 3D-printed multimaterial composites tailored for compliancy and strain recovery, *Composite Structures*, 184, pp.11-17.
- [3] Engeberg ED, Dilibal S, Vatani M, Choi JW, Lavery J, Anthropomorphic finger antagonistically actuated by SMA plates, *Bioinspiration & Biomimetics* 10 (5), 056002.
- [4] Moscato, S., Bahr, R., Le, T., Pasian, M., Bozzi, M., Perregrini, L. and Tentzeris, M.M., 2016. Infill-Dependent 3-D-Printed Material Based on NinjaFlex Filament for Antenna Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 15, pp.1506-1509.
- [5] Przybytek, A., Kucińska-Lipka, J. and Janik, H., 2016. Thermoplastic elastomer filaments and their application in 3D printing. *Elastomery*, 20.
- [6] Dilibal S., 2016. The effect of long-term heat treatment on the thermomechanical behavior of NiTi shape memory alloys in defense and aerospace applications, *The Journal of Defense Sciences* 15 (2), pp. 1-23.
- [7] Kam M, İpekçi A, Saruhan H., 2017. Investigation of 3D Printing Filling Structures Effect on Mechanical Properties and Surface Roughness of PET-G Material Products, *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 6, pp. 114-121.
- [8] Shahzad M., Kamran A., Siddiqui MZ., Farhan M., 2015. Mechanical characterization and FE modeling of hyperelastic material, *Materials Research*, 18(5), pp. 918-924.
- [9] Parandoush, P., Lin, D., 2017. A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites, *Composite Structures*, 182, pp. 36–53.
- [10] Chena, Q., Lianga S., Thouas , A.G., 2013. Elastomeric biomaterials for tissue engineering, *Progress in Polymer Science*, 38, pp. 584–671.
- [11] Gebhardt, A., 2007. *Rapid Prototyping–Rapid Tooling–Rapid Manufacturing*. Carl Hanser, München.
- [12] <http://www.gyrobot.co.uk/blog/how-to-3d-print-with-flexible-filaments>, erişim tar. 06.03.2017