

Berk Barış Çelik 
TOBB ETÜ
Makine Mühendisliği Bölümü
Ankara

Batıhan Şener 
TOBB ETÜ
Makine Mühendisliği Bölümü
Ankara

Gökberk Serin 
TOBB ETÜ
Makine Mühendisliği Bölümü
Ankara

Hakkı Özgür Ünver* 
TOBB ETÜ
Makine Mühendisliği Bölümü
Ankara

Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 16-01-2020

Kabul: 13-02-2020

*Sorumlu Yazar: Hakkı Özgür Ünver

Email: hounver@etu.edu.tr

Ergiyik Filament Fabrikasyonu, 3B Yazıcılar İçin Kompozit Filament Ekstrüder Makinesi Geliştirilmesi

Bu çalışmanın temel içeriğini, ergiyik filament fabrikasyonu yönteminde malzemelerin filament geometrik yapısında olması önkoşulunu sağlamak için çeşitli kompozit malzemeler üzerine çalışmaya yönelik bir filament ekstrüzyon sisteminin geliştirilmesidir. Bu sistemin başarıyla tasarımı ve imalatından sonra, sistem ile fonksiyonel kompozit test numunelerinin hazırlanmış, çekme testleri yapılmış ve numunelerin endüstriyel isterleri karşılayıp karşılamadığı, kıyaslanarak incelenmiştir.

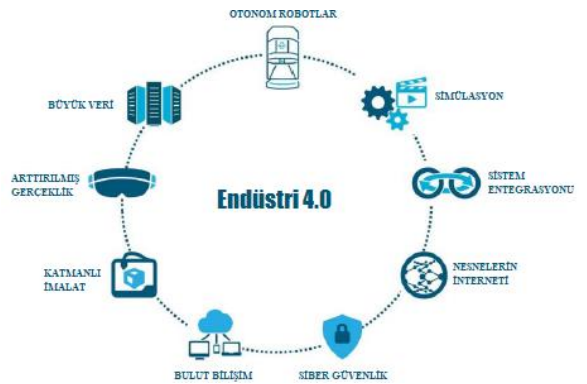
Anahtar Kelimeler: Ekstrüzyon, Polimer-matris kompozit, Karbon fiber, Mekanik özellikler, Eklemeli imalat, PLA.

GİRİŞ

Teknolojik gelişmeler, birçok farklı alanla beraber imalat alanına da yenilikler getirmiştir. Bu yenilikler, önceleri üretimi mümkün olmayan gözle bakılan bazı konseptlerin üretimini mümkün kılmıştır. Bu yeniliklerin bir kolu eklemeli imalat teknikleri olarak tanımlanabilir. Eklemeli imalat teknikleri ile ilgili kavramlar hem akademik hem de endüstriyel dünyada oldukça popülerdir, bu nedenle ürünlerin fiziksel özelliklerini artırmak, üretim zamanlarını kısaltmak ve eklemeli imalatla ilgili kullanım alanını genişletmek amacıyla birçok çalışma devam etmektedir. Nispeten yeni olan bu üretim uygulamaları, mühendislik uygulamalarında da genişlemekte ve yerini sağlamlaştırmaktadır. Hem son kullanıcıların hem de endüstriyel üreticilerin tercihleri ile 3B yazıcıların kullanımında çarpıcı bir büyüme olduğu görülmektedir.

Endüstri 4.0 uygulama alanları gereksinimleri eklemeli imalat yöntemlerine ihtiyaç yaratmaktadır. Eklemeli imalat, ardışık malzeme katmanlarını üst üste sererek üç boyutlu bir nesnenin yaratıldığı bir tür eklemeli üretim teknolojisi biçimidir [1]. 3B baskı

pazarı göz ardı edilemeyecek bir büyüme potansiyeli taşımaktadır. Endüstri 4.0, yüksek teknoloji ürünlerini üretmek için fazladan araç ve zaman harcamamak adına eklemeli imalat teknolojilerine ihtiyaç duymaktadır. Eklemeli imalatın endüstri 4.0'ın diğer bileşenleri arasındaki yeri Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Endüstri 4.0 şematik gösterimi [2].

Endüstrinin geleceği, eklemeli imalatı önemli bir konuma getirirse de, zorlukları da beraberinde getirmektedir. Endüstriyel kullanımda çoğunlukla metal esaslı yöntemler kullanılmakta ve incelenmektedir, çünkü endüstriyel gereksinimler ancak bu malzemelerle karşılanabilmektedir. Polimer bazlı ürünler ise hızlı prototipleme ile sınırlı kullanım alanına sahiptir.

Birçok malzemeye göre dayanımları daha yüksek olan metaller bile bazı alanlarda endüstrinin çeşitli ihtiyaçlarına cevap veremeyebilir. Bu koşullar farklı araştırma konuları yaratmıştır. Eklemeli imalat tekniklerinin tarih boyunca süregelen malzeme kullanımı Şekil 2'de görülmektedir.

Görüldüğü üzere, 2000'li yıllarda kompozit malzemeler test edilip eklemeli imalat yöntemlerinde kullanılmaya başlamıştır. Kompozit yapı malzemeler, maddelerinin en iyi özelliklerinin sağladığı davranışı gösterme avantajına sahiptir. Konvansiyonel üretim yöntemlerinden ziyade eklemeli imalat ile kullanımda zorluklar olsa da, kompozit malzemeler umut vericidir. Ergiyik filament fabrikasyonu, polimer malzemeler ile yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemin çalışma prensibi lülenin ergiyik malzemeyi (filament halinde) yüzeye itmesi ve katmanlı bir yapı oluşturması esasına dayanmaktadır. Filamentler, tüp geometrisinde üretilen malzemelerdir. 3B yazıcı mekanizmalarında çalışması için bu şekilde üretilmeleri gerekmektedir.

Lüleye sabit malzeme akışı filament formunda gerçekleşir ve ürün analitik olarak, baskı uzayındaki noktalardan oluşur. Şekil 3'te ergiyik filament fabrikasyonu 3B yazıcı şematik olarak gösterilmiştir.

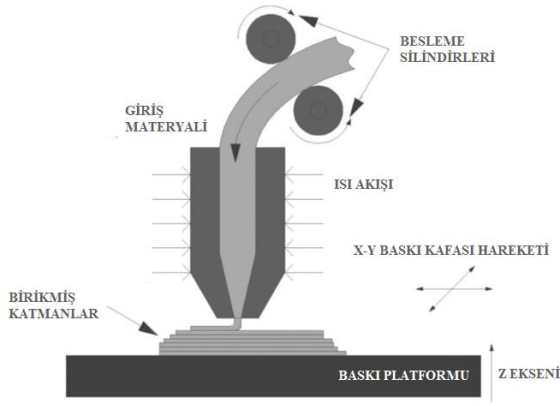
Filamentin özellikleri, ortaya çıkan ürünü doğrudan etkiler. Ergiyik filament fabrikasyonu sistemlerinin mekanizmaları birçok yönden ortaktır ve filament kalitesini ve içeriğini kontrol ederek imalat özelliklerini kontrol etmek mümkündür. Bu, bir filamentin kompozit karakteristiğinin, 3B baskı ürününü bir kompozit ürün haline getireceği anlamına gelmektedir. Bu nedenle bu çalışmada filament üretim sürecine odaklanılmıştır.

Üretilen plastik filament ekstrüder, PVC hariç tüm termoplastik malzemelerden filament yapmak için kullanılmaktadır. Üretilen filament hızlı prototipleme ve 3B baskı makinelerinde kullanılabilir [5]. Filament bir matrikse dağılmış olan fiber veya partikül takviyesinden oluşmaktadır [6]. Termoplastik matris kompozitler daha fazla tokluk ve geri dönüştürülebilirlik sağlamaktadır [7].

Polimer matriks içerisine farklı yüzdelerde karbon fiber karıştırılacağı için uzun denemeler yapmak gereklidir. Bu nedenle, filament üretim sürecine odaklanmak için sürdürülebilir bir sisteme ihtiyaç duyulmuştur. Bu ihtiyaç doğrultusunda, öncelikle piyasadaki ekstrüzyon sistemleri incelenmiştir, ardından matriks olarak kullanılacak en uygun polimer malzemeyi seçmek için çeşitli polimer malzemeler belirli isterler doğrultusunda incelenmiştir.



Şekil 2. Eklemeli imalatta kullanılan malzemelerin tarihsel ilerlemesi [3].



Şekil 3. Ergiyik filament fabrikasyonu 3B yazıcı şematik gösterimi [4].

EKSTRÜDER SİSTEMLERİ

Bu çalışmada ekstrüder sistemleri, endüstriyel sistemler ve kompakt sistemler olmak üzere iki farklı kategoride bulunmaktadır. Endüstriyel ölçekli sistemler daha iyi ve daha sürdürülebilir bir üretim kalitesi sağlarken kompakt çözümler bu çalışma için daha uygundur, çünkü bileşenlerin daha küçük ölçeklerde üretilmesi ve kontrol edilmesi daha kolaydır. Bu nedenle bu çalışmada kompakt tasarımlar incelenmiştir.

Ticari örnekler üzerinden bir araştırma yapılmıştır. Bunun nedeni ise ticari örnekler kendilerini bir kereden fazla kanıtlamış ve çok sayıda kullanıcı bu sistemleri test etmiş olmalarıdır. Böylece ürünlerin genel sonuçları daha iyi gözlemlenebilecektir. Ayrıca son kullanıcıların bu ürünler hakkındaki düşüncelerine ve yorumlarına ulaşmak daha kolay olacaktır.

Yapılan araştırma sonucunda çalışma konusuna uygun olacak iki sistemin detaylı incelemesi yapılmıştır. Birinci sistem, küçük ölçekli endüstriyel filament ekstrüzyon sistemi mantığı ile oluşturulmuş bir sistemdir. İkinci sistem ise daha kompakt bir tasarıma sahiptir ve filament üretmek için plastik atıkları kullanan bir sistemdir. İncelenen sistemlerden ilki Noztek isimli firmanın Xcalibur isimli modelidir. Bu sistem Şekil 4'te gösterilmiştir.

Farklı polimer türleriyle filament üretimine olanak tanıyan Xcalibur, farklı malzemelerin birleştirilmesini desteklemektedir. Soğutma sistemi olarak, su ile soğutma kullanmaktadır. Çalışma kapsamında incelenen bir diğer sistem ise 3devo isimli firmanın Composer 450 isimli modelidir. Bu sistem Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Xcalibur, ekstrüder sistemi [8].



Şekil 5. Composer 450, ekstrüder sistemi [9].

Sistem kompakt boyutlarına rağmen kabul edilebilir kalitede çıktı verebilmektedir. Soğutma sistemi olarak hava ile soğutma sağlayan bir fan kullanmaktadır. Bu sistem endüstriyel üretim için uygun değildir. Bu ürün ayrıca filament üretmek için farklı polimer türlerinin birleştirilmesine de olanak sağlar, ancak polimerler dışındaki materyallerin eklenmesini mümkün kılmamaktadır.

Yapılan araştırmalar ışığında, uzun deneme sürelerine dayanacak sürdürülebilirlikte olan aynı zamanda da kompakt tasarıma sahip bir sistem inşasına karar verilmiştir.

POLİMER MATRİKS SEÇENEKLERİ

Bu çalışma materyal kompozisyon özelliklerinin incelenmesini ve geliştirilmesini de içerdiğinden, ergiyik filament fabrikasyonunda kullanılmakta olan filament üretimi adına piyasa ve akademik dünyanın neler sunduğunu incelemek gerekir.

Piyasada çeşitli kompozit 3B baskı filamentleri vardır. Bakır, pirinç, bronz vb. metal katkılı örnekler bulmak mümkündür. Elektriksel ve termal iletkenlik ya da görünüm, gelişmiş mekanik

özellikler gibi fiziksel karakter için farklı malzeme bileşimleri kullanılmaktadır. Sebeplerinin ötesinde, bu filamentlerin tümü ergiyik filament fabrikasyonu için üretilmektedir, bu nedenle matris yapıları termoplastiklerdir. Ergiyik filament fabrikasyonunda yaygın olarak kullanılan termoplastikler, özellikleri ile birlikte Şekil 6'da gösterilmiştir.

Ergiyik filament fabrikasyonunda (FFF) kullanılan ana malzemelerdeki mevcut durum, Şekil 6'da verildiği gibidir. Metal takviyeli seçeneklerin dışında kompozit fiber (elyaf) takviyeli malzemeler de kullanılmaktadır ve bunlar geleneksel kompozit malzemeler ile benzer özelliklere sahiptir. Karbon fiber takviyeli filamentler, zaman geçtikçe daha fazla kabul görmeye başlamıştır. Bunların yanı sıra polikarbonat ve akrilonitril butadien stiren (PC-ABS) bileşimi gibi farklı termoplastik bileşimleri de bulunmaktadır. Fakat bu çalışmanın ana odağı kompozit iplik takviyeli polimerlerdir. Karbon fiber takviyeli filamentler birçok seçeneğe sahiptir. Bu seçenekler; farklı matrisler, karbon fiber oranları ve karbon partikül büyüklükleridir. Ortak olarak, tüm karbon fiber takviyeli filamentler hafiflik, boyutsal kararlılık, sertlikte ve dayanımda artış gibi avantajlara sahiptir. Tüm karbon fiber takviyeli filamentlerin 3B yazıcı lüleleri ve filament ekstrüzyon sistemleri üzerinde aşındırıcı etkisi bulunması, ayrıca karışım yapısının filamentler üzerinde kırılma eğilimine neden olması ise dezavantajlarıdır.

Yapılan araştırmalar sonucunda, baskı kalitesi, baskı kolaylığı, kolay yapışma gibi özelliklere sahip olduğu görülen polilaktik asit (PLA) polimerinin matris polimer olarak kullanılmasına karar verilmiştir.

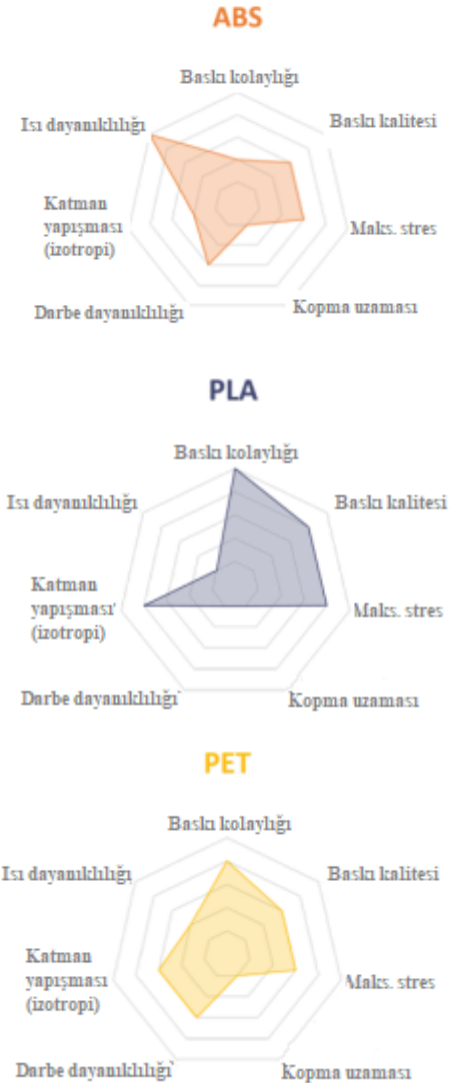
Genel Konsept

Daha önce de belirtildiği gibi, filamentler standardize edilmiş malzeme formlarıdır ve bu durum prosedürü de standart hale getirir. Böylece tüm filament ekstrüzyon sistemleri benzer bir yol izler. Geliştirilecek sistemin ana bileşenleri Şekil 7'de gösterilmektedir.

Sistemin çalışması birkaç temel işlem içermektedir. Bu işlemler ve ilgili sistem bileşenleri sırasıyla aşağıdaki gibidir:

- DC motor sürüşü ve ekstrüzyon vidasını döndürülmesi (DC Motor, redüktör, ekstrüzyon vidası)
- Ekstrüzyon kovanın ısıtılması (Kovan, kelepçe rezistans)

- Kovan içindeki malzeme akışına katı madde eklenmesi (giriş haznesi, hammadde)
- Malzemenin eritilmesi ve şekillendirilmesi (lüle)
- Filamentin soğutulması (fan ya da su ile soğutma)
- Filament geometrisinin ayarlanması (tolerans çektirmesi)
- Filamentin sarılması (filament sarıcı sistem)
- Numunelerin üretilmesi (3B yazıcının entegrasyonu)
- Numune testleri (test ekipmanı)



Şekil 6. 3B baskıda kullanılan termoplastiklerin örnekler ağı grafikleri [10].

TASARIM

Tasarım kriteri

Proje sistemi için tasarım kriterleri üç ana başlıkta incelenebilir; maliyet verimliliği, güvenilirlik ve işlevsellik.

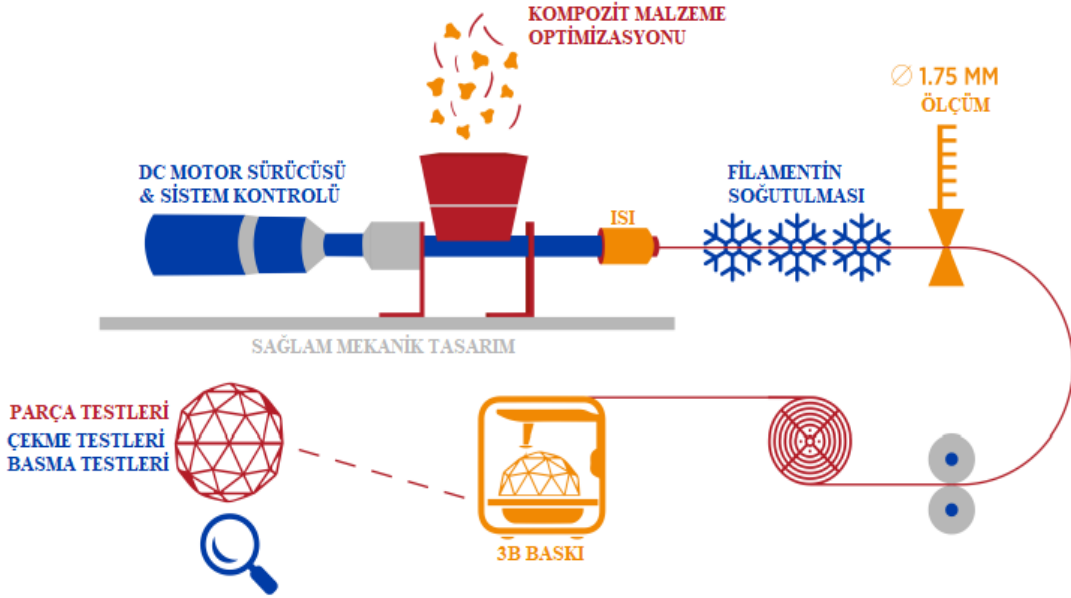
Maliyet verimliliği, çalışmanın uygulanabilirliği için çok önemlidir. Bu projenin temel amaçlarından biri, sınırlı kaynaklar ile inşa edilmiş bir ürün oluşturmaktır. Bu amaç, maliyet verimliliğini proje için en önemli kriterlerden biri haline getirmektedir. Satışa hazır bir cihaz yerine testler süresince ihtiyaçları karşılayacak bir sistem hedeflenmektedir. Filament veya malzeme karışımları üretmek için kullanılan endüstriyel sistemler oldukça pahalı ekipmanlar içermektedir. Tüm tasarım seçenekleri kısıtlı bir bütçe çerçevesinde yapılmıştır.

Güvenilirlik, tasarım tercihlerindeki beklentiler ile ilgili kriterlerdir. Farklı bileşenler, güvenilirlikle ilgili farklı çözümler gerektirebilir: Örneğin söz konusu seçenek belirli sıcaklık değerleri altında çalışabilir, ancak güvenilirlik kriterleri için ana konu aynı zamanda ne kadar verimli olduğudur. Bir bileşenden beklenen sonuç, çeşitli tasarım çözümleri için farklı olabilir.

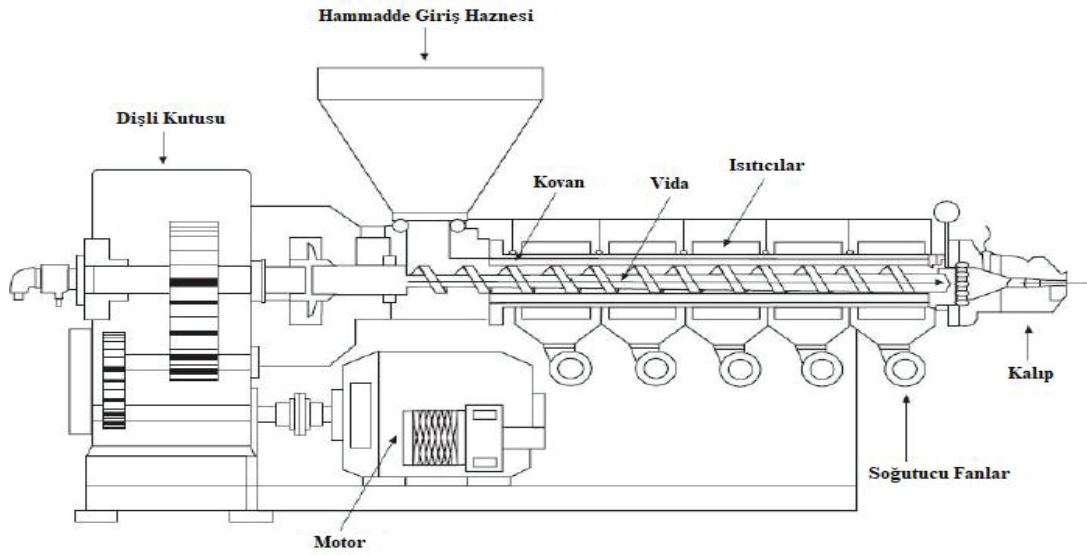
İşlevsellik ve modülerlik temel kriterlerdir. Bir tasarım kararında işlevsellik kriterleri, bileşenin ana işlevini nasıl yerine getirdiği ile doğrudan ilgilidir. İşlevsellik ve güvenilirlik arasındaki temel fark; işlevsellik bileşenin ana işlevine odaklanırken, güvenilirliğin ana işlevin sürdürülebilirliğine odaklanmasıdır.

Başlıca Tasarım Seçenekleri

Ekstrüzyon sisteminin majör tasarım başlıkları eritme bölümü, sıkıştırma bölümü, ısıtma sistemi ve filament soğutma sistemidir. Sistemin ısıtılması, eritme prosedürünü gerçekleştirmeyi amaçlar. Erime malzemenin şekillendirilmesi için akışkan hale getirilmesi gereklidir. Ekstrüzyon bölümünden çıkan filament istenilen sıcaklıkta olmalıdır, bu nedenle hammaddeye ısı işlem uygulanması gerekmektedir. Bahsedilen işleme ilişkin tasarım kararları şunlardır: ekstrüzyon kovani, ekstrüzyon vidası, kelepçe rezistans(lar) ve soğutma sistemi. Ürün Mimarisi bölümünde tüm bu sistem bileşenlerini ayrıntılı olarak açıklanacaktır. Şekil 8'de standart bir ekstrüzyon sistemi kesiti çizimi gösterilmiştir.



Şekil 7. Konsept tasarım.

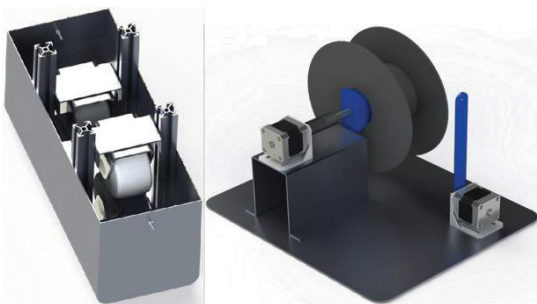
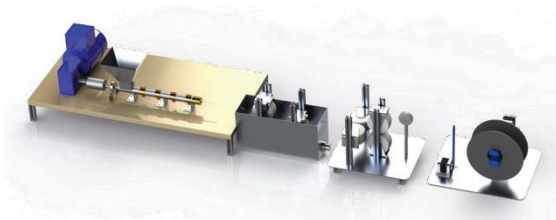


Şekil 8. Standart ekstrüzyon sistemi kesit görüntüsü [11].

ÜRÜN MİMARISI

Konsept Alternatifleri

Yapılan çalışmalar ve araştırmalar sonucunda ortaya çıkan konsept tasarım Şekil 9'da gösterilmiştir:

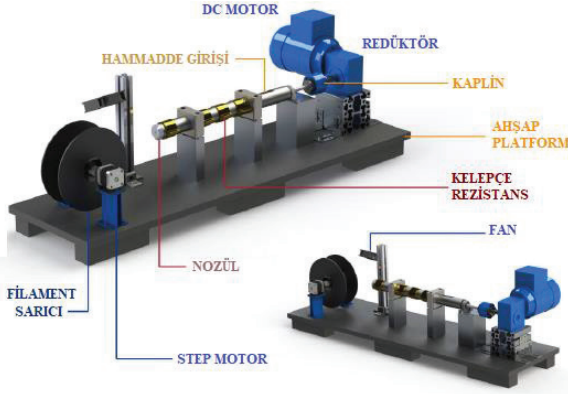


Şekil 9. Filament ekstrüzyon sistemi, soğutma sistemi ve sarma sistemi konsept tasarımları.

Konsept tasarım için tercih edilen bileşenlerin kolay ulaşılabilir standart parçalar olmasına özen gösterilmiştir, bu nedenle tasarım modüler bir formda olmuştur. Bu tasarımda; uygun fiyatlı ve kolay tedarik edilebilecek malzeme kullanımına ve esnek bir tasarım olmasına dikkat edilmiştir. Esnek bir tasarım yapılması ile tasarımın ihtiyaçlar doğrultusunda değiştirilebilmesini mümkün kılmak amaçlanmıştır. Çalışma prensipleri mevcut filament ekstrüzyon sistemleriyle benzerdir. Modülerlik ve maliyet verimliliği göz önünde bulundurularak hazırlanan konsept tasarım üzerinde yapılan çalışmalar ve denemeler sonucunda nihai tasarıma ulaşılmıştır. Aşağıdaki bölümde, nihai tasarımdan ve görsellerinden bahsedilecektir.

Nihai Konsept Tasarım

Konsept tasarım üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda ortaya çıkan sistemin genel yapısı Şekil 10'da görülmektedir:

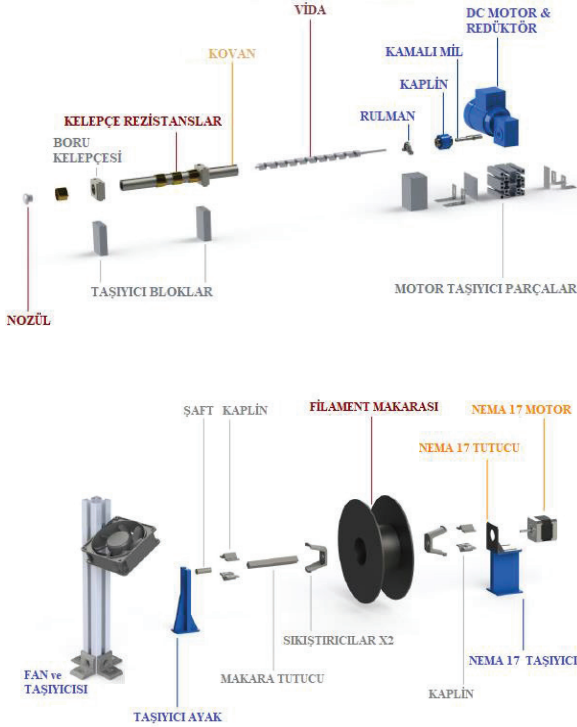


Şekil 10. Ekstrüder ve filament sarma sistemi.

Sistem 3 ana alt sistemde incelenebilir:

- Ekstrüzyon bölümü
- Soğutma bölümü
- Sarma bölümü

Bu 3 ana alt sistemin ayrılmış görüntüleri Şekil 11’de gösterilmiştir.



Şekil 11. Nihai tasarım ayrılmış görüntüleri.

Sistem çok sayıda iterasyon sonunda son haline ulaşmıştır.

ANALİZLER

Hesaplamalı Akışkan Analizi

Proje sistemi hakkında daha iyi bir bakış açısına sahip olmak için bir dizi analiz yapılmıştır. Bu analizler ANSYS 19.2 Fluent programı kullanılarak yapılmıştır.

Ekstrüzyon sistemi, bir kontrol cihazına bağlı dört adet kelepçe rezistansa sahiptir, bu nedenle analiz durumunu eşit dağılmış bir durum haline getirdiği varsayılabilir. Analizde Enerji ve Katılaşma & Erime Modelleri kullanılmıştır. Tablo 1 ve 2’de verilen PLA ve sistem için bu özellikler verilmiştir.

Tablo 1: PLA malzeme özellikleri [12].

Vizkozite	0.3 kg/m.s
Katılaşma Sıcaklığı	58.5 °C
Sıvılaşma Sıcaklığı	155 °C
Saf Çözücü Erime Özısı	2060 J/kg.K

Tablo 2: Sistem özellikleri

PLA Giriş Akış Oranı	1.004e-5 kg/s
Ortam Basıncı	101.325 kPa
Giriş Sıcaklığı	93 °C
Kovan Yüzey Sıcaklığı	160 °C
Lüle Sıcaklığı	130 °C

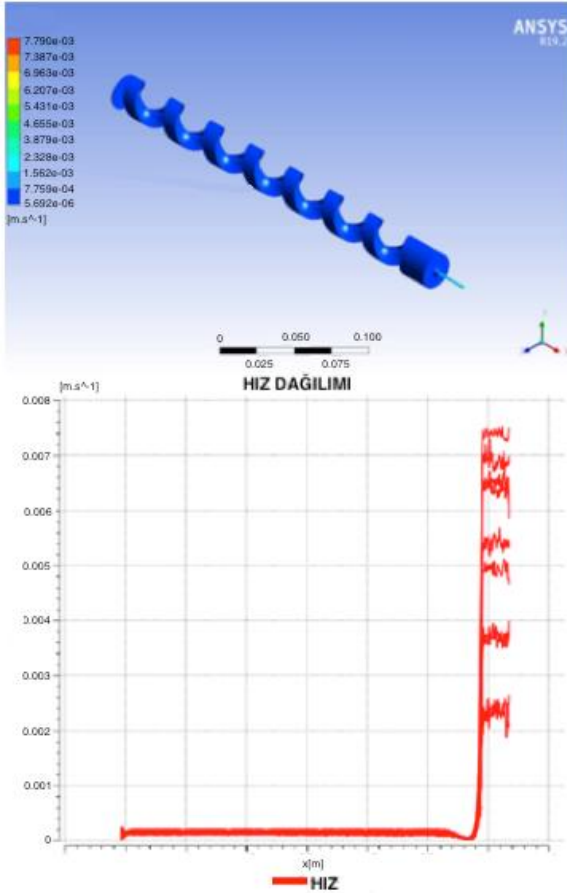
Şekil 12’de PLA polimerinin ANSYS 19.2 Fluent programı kullanılarak yapılan analizler doğrultusunda ortaya çıkan hız dağılımı görülmektedir. Şekil 13’te ise yine aynı akışkan analiz programı kullanılarak yapılan analizler doğrultusunda elde edilmiş basınç dağılımı görülmektedir.

ÜRETİM VE MONTAJ

Sistem Bileşenleri İmalatı

Teknik çizimlere göre, öncelikle matkap ucu temin edilmiştir. Matkap ucu alındıktan sonra çelik boru ölçülere göre kesilmiştir. Taşıyıcı destekler sistemin hafifliği için alüminyumdan üretilmiştir. Çelikten, farklı kalınlık denemeleri yapmak için farklı çaplarda lüleler üretilmiştir. Boruyu desteklere sabitlemek için iki adet hidrolik boru tutucu, DC motordan matkap ucuna tork vermek için kamalı mil, kamalı mil ve matkap ucu arasında bağlantı kurmak için bir adet kaplin, soğutmaya sağlayacak bir adet

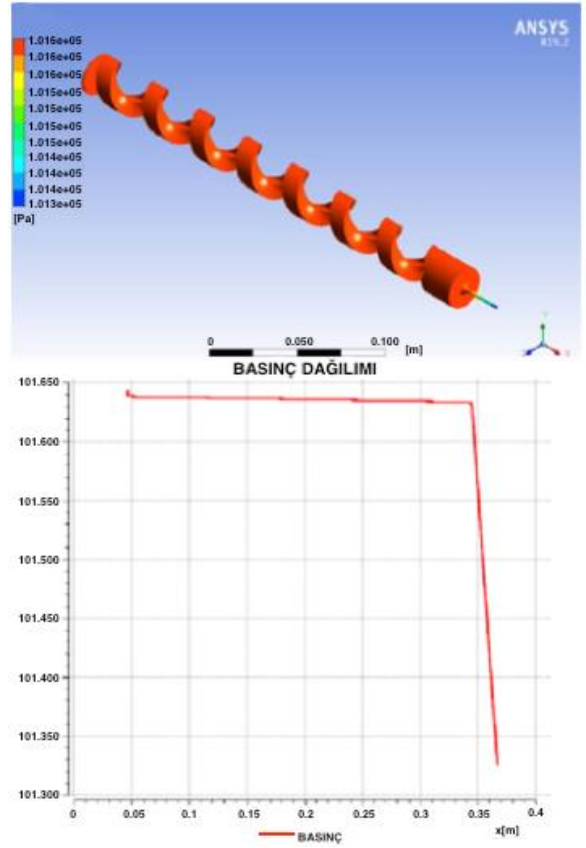
fan ve boruyu ısıtmak için dört adet kelepçe rezistans temin edilmiştir. Kelepçe rezistanslarının sayısının dört adet olarak belirlenmesinin sebebi ise, ısının çelik boruya eşit olarak dağıtılacak olmasıdır. Bir adet rulman, Nema 17 step motor tutucu ve Nema 17 step motor temin edilmiştir. İki parçalı step motor tutucu, küçük boyutlu bir mil ve bir kaplin 3B baskı ile üretilmiştir. Sistemin üzerinde durduğu platform ise ahşaptan üretilmiştir.



Şekil 12. PLA hız dağılımı.

Sistem Montajı

İlk olarak, hidrolik boru tutucular ve DC motor desteklere vidalanmıştır. Daha sonra, hidrolik boru tutucularına çelik boru oturtulmuştur ve DC motor sigma profiller ile istenilen yüksekliğe yerleştirilmiştir. Bir sonraki adımda, kamalı mil ve matkap ucu kapline bağlanmıştır. Kamalı milin diğer ucu DC motora bağlanmıştır ve matkap ucu çelik borunun içine yerleştirilmiştir. Ekstrüzyon sisteminin montaj kısmının son adımında ise, kelepçe dirençler çelik boruya bağlanmıştır.



Şekil 13. PLA basınç dağılımı.

Montajın ikinci kısmı, filament sarma bölümüdür. İlk olarak Nema 17 step motor tutucusu 3B basılmış tutucuya vidalanmıştır. Ardından, Nema 17 step motor, motor tutucusuna ve vidalanan parçalar taban platformuna vidalanmıştır. Daha sonra, makara 3B basılmış şafta ve mil, 3B basılmış kaplin ile Nema 17 step motoruna bağlanmıştır. Şaftın diğer tarafı diğer 3B baskılı tutucu kısmına yerleştirilmiştir. Soğutma fanı ve fan tutucu sigma profil birbirine yapılandırılmıştır.

Montaj aşamasının son adımı, mekanik parçaların sistemin elektronik parçalarıyla bağlanması ile sona ermiştir.

Tasarım revizyonları

Elektronik devre elemanlarının tasarımında, ısıtıcıları kontrol etmek için bir Arduino ve kullanıma hazır PID kontrolcüler arasında seçim yapılmıştır. Kolay programlanabilirlik ve düşük maliyetler sebepler nedeni ile Arduino kullanımına karar verilmiştir [13]. Soğutma işlemi ilk aşamada durgun su içerisinden geçirilerek sağlanmıştır fakat su soğutma sistemi, su ve filament arasındaki aşırı temas nedeniyle başarısız olmuştur. Soğutma sistemi, suyu düşük akış hızıyla lüle çıkışındaki filament

üzerine pompalamak için bir pompa sistemi olarak değiştirilmiştir, ancak filament çapı düzensizlikleri gözlemlenmiştir. Son olarak, su soğutma sistemi yerine fan soğutma sistemine geçilmiştir. Fan soğutma sistemi ile filament çapında istenilen başarı sağlanmıştır. Son olarak yapılan bu revizyon Şekil 14'de gösterilmiştir.

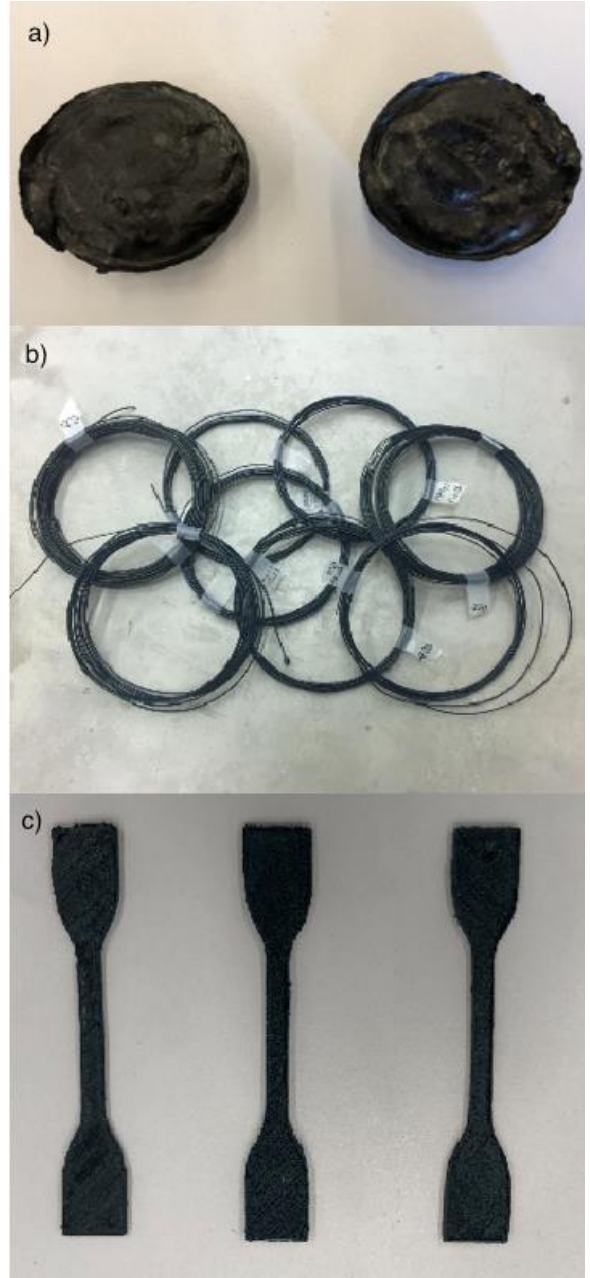


Şekil 14. Ana tasarım revizyonu.

TEST NUMUNESİ İMALAT SÜRECİ

Karbon fiberler yüksek çekme dayanımına ve yüksek mekanik mukavemete sahiptir. Yapılan literatür taraması sonucunda; karbon fiber takviyeli PLA'nın çekme dayanımı, süneklik gibi mekanik özelliklerini geliştirmek hedeflenmiştir. İşlem PLA'nın karbon fiber tozu ile karıştırılmasıyla başlamıştır. İlk olarak, PLA granülleri bir fırında seramik kaselerde eritilmiştir. Granüller polimer işleme endüstrisinde kullanılan yaygın bir hammaddedir [14]. Daha sonra, seramik kaselere farklı miktarlarda karbon elyaf tozu eklenmiştir ve ısıya dayanıklı bir çubukla karıştırıldıktan sonra tekrar fırına koyulmuştur. Bir saat ısıtılma sonunda fırın kapatılmıştır ve sünekliği arttırmak için karışımlar yavaşça soğumaya bırakılmıştır. Üç saat süren yavaş soğutmanın ardından, karışımlar fırından çıkarılmıştır. Kaseler kırılarak soğutulmuş karışımlar kaselerden ayrılmıştır. Bu karışımlar Şekil 15a'da görülmektedir.

Karışımlar, ekstrüder giriş açıklığı boyutlarına ulaşana kadar bir çekiç yardımıyla küçük parçalara ayrılmıştır. Karbon fiber takviyeli PLA granülleri kovan içerisine atılmıştır. DC motor tarafından döndürülen matkap ucu, granülleri kovan içerisinde ilerletmeye başlamıştır. Granüller boru içinde hareket ederken katıdan akışkan hale geçmeye başlamıştır. Granüller, çıkıştaki lüleye ulaştığında tamamen akışkan hale geçmiştir. Akışkan matriks ve karbon fiber PLA karışımı lüleden ekstrüde edilmiştir. Ekstrüde edilmiş filamentin çapı, standart filament boyutu olan 1.75 mm'den daha fazla olmuştur. Filament, lülenin dışına doğru çıktığında sıcaklığı 130 °C idi. Üretilen filamentler Şekil 15b'de gösterilmiştir.



Şekil 15. Test numunesi imalat aşamaları

Bu sıcaklığın, yapılan ölçümlere göre lüle sıcaklığı ile aynı olduğu gözlemlenmiştir. Sıcak filament fan yardımı ile sarılmaya gitmeden önce durgun hava ile temas sağlandığı için soğuma başlamıştır. Sarma kısmında, iki adet 3B basılı parça tarafından tutulan bir Nema 17 motor, makaraya merkezlenmiş bir 3B baskılı mil tarafından döndürülmüştür. Şaftın dönüş hızı, filamentin çıkış hızından daha yüksek olduğu için istenen filament çapına ulaşılmıştır. İstenilen ± 0.1 mm toleranslarda üretilen filament, delta tipi FFF 3D yazıcıya yerleştirilmiştir ve test numuneleri üretilmiştir. Üretilen test numuneleri Şekil 15c'de gösterilmiştir.

Karbon fiber ile ekstrüde edilmiş filament 3B baskı parametreleri, PLA filamentin 3B baskı parametrelerinden farklı olmuştur.

Farklı olan parametreler,

- Baskı sıcaklığı
- Lüle çapı
- Filament iletim hızı
- Baskı kafasının dış çevrede ilerleme hızı

olarak belirlenmiştir.

Lülenin tıkanmasını önlemek amacıyla baskı sıcaklığı ve lüle çapı artırılmış ve filament akışı azaltılmıştır. Dış çevrede kafa ilerleme hızı, filamentlerin kenarlardan uzaklaştırılmasını önlemek için azaltılmıştır. Çekme testi numunesinin iç dolgu sürekliliğini arttırmak için doldurma hızı düşürülmüştür.

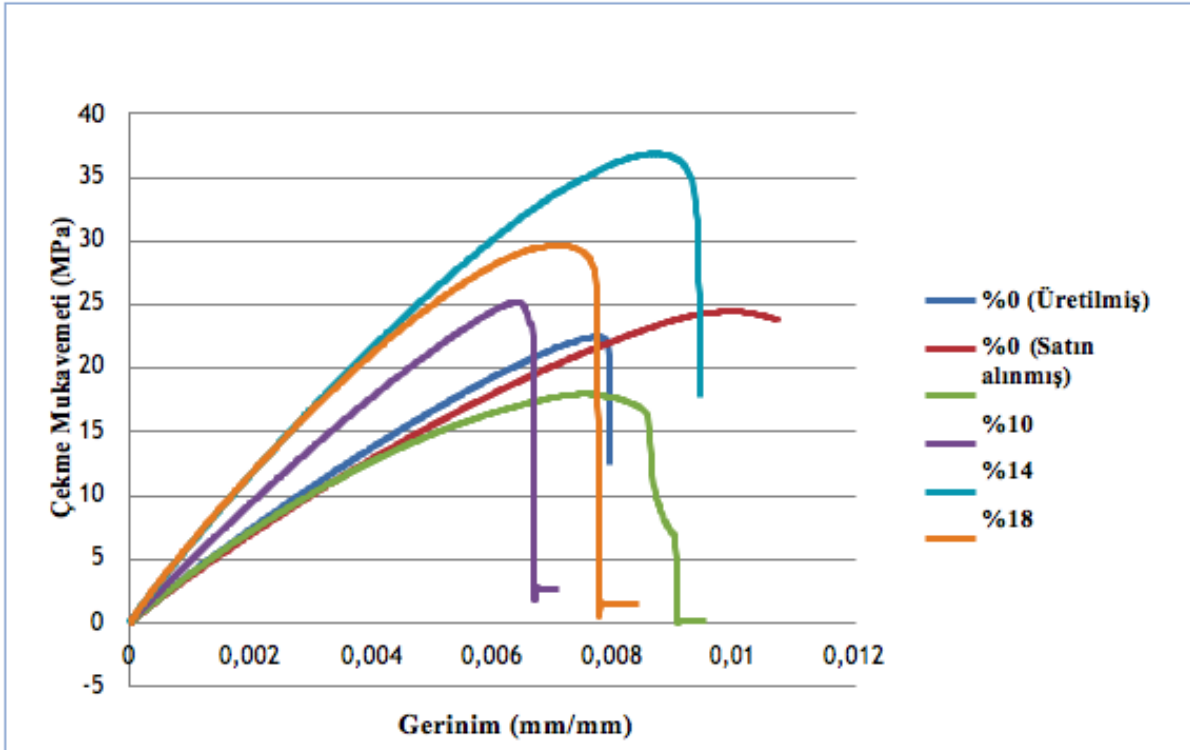
DOĞRULAMA TESTLERİ

İmal edilen karbon fiber takviyeli filamentler kullanılarak 3B basılan çekme numunelerinin dayanım değerlerini elde etmek için çekme testleri yapılmıştır. Kompozit malzemeler için belirlenmiş bir standart olduğu için ASTM D638 TİP IV çekme numunesi standartları, malzeme testleri için

kullanılmıştır. Üretilen çekme numunelerine yapılan çekme testi sırasında bazı numuneler geçersiz sayılmıştır. Geçersiz oluşun sebebi; numune içinde oluşan porozitelerdir. Porozite oluşumunu etkileyen faktörlerin büyük bir oranda lüle sıcaklığı, baskı hızı ve katman kalınlığıyla ilgili olduğu belirlenmiştir. Çekme testi sonuçları Grafik 1 ve Tablo 3'te gösterilmiştir.

Yapılan testler sonucunda piyasada satılan PLA filamenti ve projede üretilen PLA filamentinin çekme dayanımı değerlerinin yakın olduğu görülmüştür (21.68 MPa, 23.22 MPa). Ağırlıkça %10 karbon fiber oranına sahip çekme numunesinin ağırlıkça %0 olandan düşük olmasının nedeni, karbon fiber oranından bağımsız olarak, çekme numunesinin 3B basımı sırasında oluşan makine kaynaklı hatalardır. Ağırlıkça %14 ve ağırlıkça %18 karbon fiber oranına sahip çekme numunelerinin, çekme dayanımındaki artışının nedeni ise karbon fiber parçacıklarının katmanların birbirine yapışmasındaki artıştır. %22 ağırlık karbon fiber oranının porozitelere neden olduğu gözlemlenmiştir. Numunenin çekme mukavemetinin poroziteli yapı nedeniyle azaldığı görülmüştür. Tablo 3'te gösterildiği gibi, karbon fiber oranlarının artışı ile Young modülünün arttığı görülmüştür. Bu nedenle çekme numunelerinin sertliği artmıştır.

Grafik 1. Yüzde karbon oranlarına göre çekme mukavemeti-gerinim grafiği.



Tablo 3. Farklı yüzde karbon fiber oranlarına göre deney sonuçları.

Karbon Fiber Oranı (%)	Deney	Çekme Gerilmesi (Mpa)	Young Modülü (Gpa)	Maks. Uzama (mm)	Maks. Gerinim (%)
%0 (üretilmiş)	1	22,45707	3,735946	0,194219	0,776876
	2	23,99962	3,0497632	0,234937	0,939748
	Ortalama	23,228345	3,3928546	0,214578	0,858312
%0 (satın alınmış)	1	18,90444	2,7610688	0,255797	1,023188
	2	24,47266	3,4560344	0,249219	0,996876
	Ortalama	21,68855	3,1085516	0,252508	1,10032
10%	1	18,01201	3,7154111	0,188297	0,753188
	2	12,68282	3,2055687	0,135922	0,543688
	Ortalama	15,347415	3,46048	0,1621095	0,648438
14%	1	25,17958	4,7707677	0,159937	0,639748
	2	24,31666	5,5787741	0,150047	0,600188
	Ortalama	24.748	5,1747709	0,154992	0,619968
18%	1	35,03613	5,8835857	0,202547	0,810188
	2	36,86876	5,829892	0,216625	0,8665
	Ortalama	35,952445	5,85673885	0,209586	0,838344
22%	1	25,92513	6,6448686	0,130906	0,523624
	2	29,64635	6,0046636	0,176703	0,706812
	Ortalama	27,7855735	6,3247661	0,1538045	0,615218

SONUÇ

Üretilen filamentin çapı; lüle çapına, borunun sıcaklığına, lüle sıcaklığına ve motorun çalışma hızına bağlıdır. İterasyonların bir sonucu olarak, borunun sıcaklığı 160 °C, lüle sıcaklığı 130 °C, motor devri 8 Hz ve lüle çapı 2.5 mm olarak ayarlanmıştır. Tasarım ve üretim iterasyonlarının sonucunda, ± 0.1 mm tolerans ile 1.75 mm çapta filamentler üretilmiştir. Piyasada PLA ve PLA + granüllerinin bulunamaması nedeniyle, hazır filamentler granül haline getirilmiştir. Bu granüller filament üretmek için kullanılmıştır.

Karbon fiber yoğunluğu arttıkça, PLA partiküllerinin numune içindeki etkileşimi de azalmıştır. Bu azalma, test numunelerinde plastik deformasyona neden olmuştur. PLA parçacıkları arasındaki etkileşimin azalması, yük etkisi altında iken deplasmanda azalmaya neden olmuştur. Karbon fiber oranı arttıkça gerilme düşmüştür. Süneklikte artış görülmüştür.

Gelecek çalışmalarda farklı polimer matrisler ve farklı iplikler kullanılarak testlerin devam ettirilmesi planlanmaktadır.

FUSED FILAMENT FABRICATION, DEVELOPMENT OF A COMPOSITE FILAMENT EXTRUDER FOR 3D PRINTERS

The main purpose of this study is the development of a filament extrusion system. This system's main requirement is to produce composite filaments which will be use in research for FFF 3D Printing. After design and development of the prototype, functional composite test samples were prepared for FFF 3D printing. Finally, various composite-polymer ratios are printed according to ISO standarts and tensile tested for comparision..

Keywords: Extrusion, Polymer-matrix composite, Carbon fiber, Mechanical properties, Additive manufacturing, PLA.

KAYNAKÇA

1. Wankhade, H., Bahaley, G., "Design and Development of Plastic Filament Extruder for 3D Printing", IRA Int. J. Of Technology and Engineering, 2018, 10(3), pp.23-40.

2. Investor Place Financial News, <https://investorplace.com/wpcontent/uploads/2017/01/3dprintingmsn.jp> [Şubat 2019'da erişilmiştir.]
3. Global One-Stop Reports Center, <http://www.gosreports.com/3d-printing-materials-development-history/> [Ocak 2019'da erişilmiştir.]
4. Jerez, R., Travieso, J.A., Corbella, X., "Finite element analysis of the thermal behavior of a RepRap 3D printer liquefier", *Mechatronics*, 2016, 36, pp.119-126.
5. Harimalairajan, K., Sadhanathan, S., Sakthivel, R., "Development of Plastic Filament Extruder for 3D-Printing", *Int. J. of Mechanical and Production Engineering*, 2016, 4(11), pp.32-35.
6. Zhong, W., Li, F., Zhang, Z., Song, L., Li, Z., "Short Fiber Reinforced Composites for Fused Deposition Modeling", *Materials Science and Engineering: A*, 2001, 301(2), pp.125-130.
7. Tekinalp, H., Kunc, V. Velez, M., "Highly Oriented Carbon Fiber-Polymer Composites via Additive Manufacturing", *Composites Science and Technology*, 2014, 105, pp.144-150.
8. Noztek, <http://www.noztek.com> [Şubat 2019'da erişilmiştir.]
9. 3devo, <https://3devo.com/products/> [Şubat 2019'da erişilmiştir.]
10. 3D Hubs, <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materials-compared> [Mart 2019'da erişilmiştir.]
11. AZoM Materials Science Industry, <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=13566> [Nisan 2019'da erişilmiştir.]
12. Farah, S., Anderson, D., Langer, R., "Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications - A comprehensive review", *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2016, 107, pp.367-392.
13. Albi, E., Kozel, K., Ventoza, D., "Akabot: 3d printing filament extruder", *Mechanical Engineering Senior Thesis*, Santa Clara University, 2014.
14. Volpato, N., Kretschek, D., Foggiatto, J.A., "Experimental analysis of an extrusion system for additive manufacturing based on polymer pellets", *Int. J. Of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 81, pp.1519-1531.