

ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

EKLEMELİ İMALAT İLE DEMİR KATKILI FİLAMAN ÜRETİMİ İÇİN EKSTRÜZYON CİHAZININ TASARIMI, İMALATI VE CİHAZIN TERMAL ANALİZİ

DESIGN, MANUFACTURING AND THERMAL
ANALYSIS OF EXTRUSION DEVICE FOR IRON-
INCLUSION FILAMENT PRODUCTION BY ADDITIVE
MANUFACTURING

Yazarlar (Authors): Barış Güneç^{id*}, Ertuğrul Durak^{id}



Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Güneç B., Durak E., "Eklemeli İmalat ile Demir Katkılı Filaman Üretimi İçin Ekstrüzyon Cihazının Tasarımı, İmalatı Ve Cihazın Termal Analizi" *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 8(3): 459-467, (2024).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1571711

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>

EKLEMELİ İMALAT İLE DEMİR KATKILI FİLAMAN ÜRETİMİ İÇİN EKSTRÜZYON CİHAZININ TASARIMI, İMALATI VE CİHAZIN TERMAL ANALİZİ

Barış Güneç^a , Ertutuğrul Durak^a 

^a Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE

* Sorumlu Yazar: gunenbaris@gmail.com

(Geliş/Received: 11.09.24; Düzeltme/Revised: 09.11.24; Kabul/Accepted: 09.12.24)

ÖZ

Eklemeli imalat, malzeme ve imalat teknolojilerinin ilerlemesiyle her geçen gün farklı özellikte makine parçalarının üretilmesine olanak tanımaktadır. Farklı katkı maddelerini içeren yazıcı filamanları ile imal edilen parçaların mekanik, termal, kimyasal ve manyetik vb. özelliklerinde iyileşmeler elde edilmektedir. Bu çalışmada, katkılı filaman üretimine uygun ekstrüderlerin özelliklerinin daha iyi tanımlanabilmesi ve bu konuda yapılacak bilimsel çalışmalara kaynak oluşturabilmesi amacıyla, üç boyutlu yazıcılarda kullanılmaya uygun, katkılı filaman ekstrüzyonu yapabilecek bir ekstrüder tasarımı gerçekleştirilmektedir. Çalışmanın kapsamı; ekstrüder milinin seçimi, tahrik iletim ve yataklama elemanlarının belirlenmesi, kovan ve nozul sistemine ısıtıcı bantların yerleştirilmesi, PID kontrol sistemiyle istenen sıcak değerlerinin yönetilmesi, Solidworks programı kullanılarak termal simülasyonunun yapılması ve termal görüntüleme kamerası yardımıyla gerçek değerlerin simülasyon sonuçlarıyla kıyaslanması gibi adımları içermektedir. Kurulan deney düzeneğinde bulunan kovan gövdesindeki ısıtma bölgelerinin zamana bağlı sıcaklık değişim grafikleri oluşturulmakta ve incelenmektedir. Yapılan çalışmada cihazın iyileştirilebilmesi amacıyla kovan yüzeyine uygulanan taş yünü ceket sayesinde, hedef sıcaklık değerine ulaşmak için ısıtıcı bantların enerji tüketiminde %32,88 oranında iyileşme sağlandığı görülmektedir. Ayrıca, her bölge için zamana bağlı sıcaklık değişim grafikleri ayrı ayrı oluşturulmakta ve izolasyonun, orta kısımda hedef sıcaklığın aynı süre içinde 12 °C üzerine çıkmasına neden olduğu tespit edilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli İmalat, Demir Katkılı Filaman, Filaman Ekstrüzyonu, PLA, Termal Simülasyon.

DESIGN, MANUFACTURING AND THERMAL ANALYSIS OF EXTRUSION DEVICE FOR IRON- INCLUSION FILAMENT PRODUCTION BY ADDITIVE MANUFACTURING

ABSTRACT

Advancements in materials and manufacturing technologies are enabling the production of machine parts with diverse characteristics through additive manufacturing. Significant improvements in mechanical, thermal, chemical, and magnetic properties, among others, are being achieved with 3D printer filaments that contain different additives. To better define the characteristics of extruders suitable for the production of filaments with additives, and to serve as a resource for studies in this area, an extruder capable of producing additive-containing filaments for use in 3D printers has been designed. The scope of the study includes the selection of the extruder screw, the drive transmission and bearing components, the barrel and nozzle system, the placement of barrel heaters within the setup, the control of the desired temperature values using a PID control system, conducting thermal simulations with the help of SolidWorks, and comparing the actual values with the simulation results using a thermal imaging camera. Time-dependent temperature change graphs for the heating zones of the barrel body in the established system were created and examined. The study found that by improving the device, the effect

of heater bands on the power required to reach the target temperature was improved by 32,88% with the application of a rock wool jacket to the barrel surface. Additionally, separate time-dependent graphs for each zone were created, revealing that the insulation increased the temperature by 12°C above the target in the middle section of the barrel body within the same time frame.

Keywords: Additive Manufacturing, Iron-infused Filament, Filament Extrusion, PLA, Thermal Simulation.

1. GİRİŞ

Ekstrüzyon işlemi, termoplastik malzemelerin kontrollü bir şekilde eritilerek, belli bir geometrik şekle sahip bir kalıptan geçirilmesi suretiyle sürekli bir ürün elde edilmesi işlemidir. Bu yöntem, üç boyutlu (3D) baskı teknolojisinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Eritilmiş biriktirme modellemesi (FDM, Fused Deposition Modeling) ya da Erimiş Filaman Üretimi (FFF, Fused Filament Fabrication) gibi süreçlerin temelini oluşturmaktadır. Ekstrüzyon işlemi, polimer malzemelerin istenilen formlarda üretimini sağlarken, üretim sürecinde hız, hassasiyet ve maliyet avantajları sunmaktadır. Demir katkılı filaman üretiminde ekstrüder, yalnızca bir polimeri eritmeyi değil, aynı zamanda demir partikülleriyle homojen bir karışım sağlamayı da amaçlamaktadır [1-2].

Demir partiküllerinin polimer matrisi içinde eşit şekilde dağılması için özel bir vida tasarımı ve karıştırma mekanizması gereklidir. Aksi takdirde, demir partikülleri filamanın belirli bölgelerinde yoğunlaşabilir ve bu heterojen yapı ise filamanın mekanik ve manyetik özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Ayrıca demir partikülleri, ekstrüderde aşındırıcı etki yaratabilmektedir. Bu nedenle, ekstrüderin iç yüzeyinde aşınmaya dayanıklı malzemeler kullanılmalı ve vida sistemi bu malzemelerin zarar görmesini önleyecek şekilde tasarlanmalıdır [3].

Demir katkılı polimerlerde hem polimerin erime noktası hem de demir partiküllerinin sıcaklıkla olan etkileşimi dikkate alınmalıdır. Özellikle yüksek demir içeriği, ısıl iletkenlik özelliklerini değiştirebilir ve polimerin dengesiz bir şekilde soğumasına neden olabilmektedir. Demir katkılı filamanlar, metalik özelliklere sahip olmasının yanı sıra manyetik özellikleri sayesinde de çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılabilmektedir. Örneğin, manyetik sensörlerin üretiminde, elektromanyetik kalkan

oluşturabilmek amacıyla ve hatta dekoratif ürünlerde kullanılabilmektedir. Bu tür filamanların üretiminde ekstrüderin uygun tasarımı, sadece homojen bir karışım elde edilmesini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda üretilen filamanın kalitesini ve performansını da doğrudan etkilemektedir [4-5].

Demir katkılı filamanlar, geleneksel plastik filamanların yanı sıra metalin özelliklerini de taşıyan yenilikçi bir malzeme kategorisidir. Bu filamanlar, plastik polimer matrisi içinde demir partiküllerinin homojen dağılımıyla üretilmektedir. Metalik katkı sayesinde üretilen parçaların mekanik, manyetik ve elektriksel performansının artırılmasına imkan sağlamaktadır. Demir katkılı filamanlar, özellikleri itibarıyla geniş bir uygulama yelpazesine sahip olup, özellikle dayanıklılık, manyetik etkileşimler ve elektriksel iletkenlik gibi avantajlar sunmaktadır [6].

Yapılan literatür araştırmalarında demir katkılı filaman imalatına uygun ekstrüder tasarımına yönelik yeterli çalışmalara yer verilmediği gözlemlenmektedir. Sektörde bulunan ekstrüderlerin çok yüksek maliyetli, büyük boyutlu ve filaman imalatına uygun olmaması nedeniyle bu çalışmada ekonomik, kompakt ve demir katkılı filaman imalatına uygun bir ekstrüder tasarımı yapılmaktadır. Ayrıca tasarımı yapılan ekstrüderin 3 boyutlu termal analizi benzetim ortamında gerçekleştirilmektedir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Amirov vd. [7], yaptıkları çalışmada 3D yazıcı filamanını tedarik edilen bir ekstrüderle kendileri üretmeyi amaçlamaktadırlar. Yapılan çalışmada, kendi ürettikleri filamanın mekanik özelliklerinin karakterizasyonu ve ekstrüzyon parametrelerinin iyileştirilmesi için çalışmalar yer almaktadır. Çalışmada elde ettikleri filamanların, tedarik edilen filamanlara nazaran daha ekonomik olduğu ve zaman tasarrufu sağladığı düşünülmektedir. PLA malzemelerin

ekstrüzyon temelli eklemeli imalatla en fazla kullanılan malzemelerden biri olmasının temel sebeplerinden biri biyolojik temelli olduğundan biyolojik olarak parçalanabilen malzeme olmasıdır. PLA malzemelerin geri dönüştürülmesinde polimer yapı kalitesinin azalması nedeniyle bir co-ekstrüzyon düzeneği ve özel bir nozul kullanılarak geri dönüştürülmüş PLA filamanın belirli miktarını yeniden kazandırılmaya çalışılmaktadır [8].

İyi bir filaman üretimi için sıcaklık ve ekstrüzyon hızının doğru ayarlanması gerekmektedir. Ekstrüzyon hızının artması ham plastiğin düzgün erimemesine, kabarcık oluşumuna ve filamanda pürüzlü bir yüzeyli olmasına sebep olabilmektedir. Filamanın nihai çapının nozul çapı ve filamanın çekme hızına bağlı olduğu incelenmiş ve çalışmada kullanılan ekonomik bir filaman cihazı imalatı gerçekleştirilmiştir. Çalışmadaki filaman ekstrüderi, tek bölgede bir ısıtma bandı içermekte olup optimum sıcaklık dağılımı ise yalnızca gözlemsel sonuçlar üzerinden incelenmektedir. Polimer ekstrüzyonunda sistemin optimize edilmemiş parametrelerle kullanılması %15-20 oranlarına varan enerji kayıplarına sebep olabilmektedir. Ürün kalitesi; erimiş polimer akış kontrolü, erime sıcaklığı, vida hızı gibi parametrelerin doğru ayarlanması ile mümkün olabilmektedir. Bu çalışmada tek vidalı bir ekstrüder parametrelerinin doğru ayarlanabilmesi amacıyla bulanık mantık denetleyicisi geliştirilmektedir. Çalışmada açık döngülü bir sistem ile kıyaslama yapılarak ekstrüderin enerji verimliliğinin sağlanabileceği gösterilmektedir [9-10]. Demir partiküllerinin varlığı filamanın manyetik özellikler kazanmasını sağlayabilmektedir. Demir katkı filamanlar, manyetik alanlarla etkileşime girebilmektedir. Bu özellik, manyetik sensörler, elektromanyetik kalkan ve diğer manyetizma temelli uygulamalarda, endüstriyel robotik veya manyetik bağlantı gerektiren uygulamalarda, büyük bir avantaj sağlamaktadır. Manyetik özellikleri demir katkı filamanların, elektronik, otomotiv ve mühendislik uygulamalarında kullanılmalarına olanak vermektedir. Saf polimerler tipik olarak elektriksel iletkenlik sağlamazken, demir katkı filamanlar bir dereceye kadar elektriksel iletkenlik sağlayabilmektedir. Demir partiküllerinin malzeme içinde varlığı, özellikle düşük akım gerektiren uygulamalarda elektrik iletimi sağlamaktadır. Bu özellikler, demir

katkılı filamanların sensörler, devre elemanları ve elektromanyetik girişim (EMI) koruma uygulamalarında kullanılmasını kolaylaştırmaktadır. Demir katkısı filamanlara, görsel olarak metalik bir görünüm sunmaktadır. Bu, endüstriyel tasarımlarda dekoratif unsurların yaratılmasında, metal hissi veren hafif parçalar üretmek için uygun bir yöntem olarak kullanılabilmesine olanak vermektedir. Ek olarak, demir içeriği filamanın ağırlığını artırır, bu da bazı uygulamalarda ürünün el ile temasında daha sağlam hissedilmesini sağlamaktadır [7-11]. Bu sebeple ekonomik ve demir katkı filaman imalatına uygun bir ekstrüderin tasarımı için, termal simülasyon ve analizinin yapılması gerekli olup, enerji verimliliği için de termal izolasyonun etkisinin incelenmesi önemlidir.

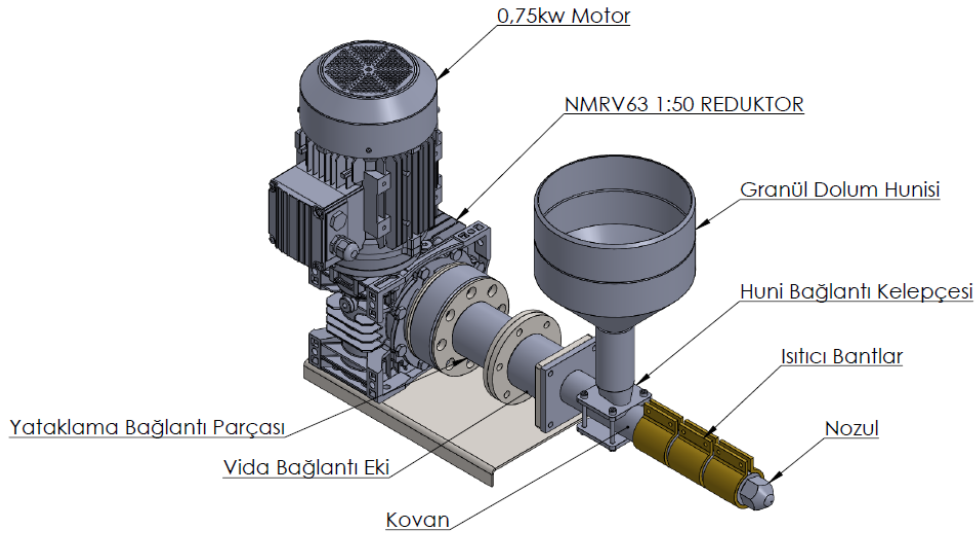
3. MATERYAL VE YÖNTEM

Demir katkı filamanların üretimine olanak sağlayacak bir ekstrüder kovanı; besleme, erime ve şekillendirme olmak üzere üç temel bölümden oluşmaktadır. Ekstrüderde polimer, granül veya toz formunda cihazın huni kısmına yerleştirilmektedir. Bu aşamada vida sistemi, malzemeyi ileriye doğru taşımakta ve polimer sıcaklık etkisiyle sıvı hale gelmektedir. Erimiş polimer, belirli bir nozul çapından geçirilerek istenen kalınlık ve şekle sahip filaman üretilmektedir. Üretilen filaman, bir soğutma hattına alınarak katılaşmakta ve bobin haline getirilmektedir. Bu filaman daha sonra 3 boyutlu baskı makinelerinde kullanılabilir [11]. L/D oranı, vida tasarımında "uzunluk/çap oranı" anlamına gelmekte olup, vida uzunluğunun çapına oranı olarak hesaplanmaktadır. Ekstrüder tasarımında, vida helis açısı ve kanal boşluk yüksekliği arttıkça enerji verimliliği artış göstermekte; ancak, L/D oranının artması enerji verimliliği üzerinde olumsuz etki yaratmaktadır. Vida hızının azaltılması ve sıkıştırma oranının artırılması ise vida verimliliğini ve dolayısıyla enerji verimliliğini yükseltmektedir [13]. Bu çalışmada kullanılan vida, 15:1 L/D oranına ve 2.8 sıkıştırma oranına sahip olarak belirlenmektedir. Yapılan çalışmada 20 mm çapında vida kullanılmaktadır. Kovan ve nozul malzemeleri olarak 38CrMoAlA tercih edilmektedir. Vida doğrusalığı 0.015 mm olup, nitrasyon derinliği 0.5-0.8 mm arasında değişmekte ve yüzey sertliği 900 – 1000 HV arasında yer almaktadır. Gövdenin ayakta durabilmesi amacıyla

tasarlanan yapı, St37-2 çelik levha malzemeden lazer kesimle imal edilmektedir. Bağlantı elemanları ise 1040 kalite çelikten üretilmektedir. Gövde üzerinde üç adet K tipi termokupl, REX-C100 ısı kontrol üniteleri ve yerli bir firmadan temin edilen üç adet 250 W ısıtma gücüne sahip rezistans kullanılmaktadır. Demir katkılı filaman üretiminde kullanılan ekstrüderlerin performansı, doğru bileşen seçimi ve tasarımıyla doğrudan ilişkilidir. Bu çalışmada, ekstrüzyon miline tahrik vermek amacıyla 0,75 kW gücünde asenkron motor tercih edilmektedir. Kullanılan motorun çıkış devri 1425 d/d olarak belirlenmiştir. Motor çıkış mili, NRW63 gövdeli bir sonsuz vidalı dişli kutusuna bağlıdır. Sonsuz dişli tahvil oranı 50 olarak belirlenmektedir. Motor için sürücü olarak “Vacon 0010-1L-0004-2” modeli kullanılmıştır.

(<https://www.vacondrives.com/>). Ekstrüzyon sürecinde malzemenin homojen bir şekilde karıştırılması, eritilmesi ve filaman haline getirilmesi için vida tasarımı, nozul çapı, sıcaklık kontrolü ve motor gücü gibi temel bileşenlerin her birinin kritik bir rol oynadığı bilinmektedir. Ekstrüderde kullanılan vida, polimer ve demir partiküllerinin etkili bir

şekilde karıştırılmasını ve erimesini sağlayan temel bileşen olarak görev yapmaktadır. Vida tasarımı, malzeme akışını düzenleyerek filaman üretim kalitesini doğrudan etkileyen en önemli unsurlardan biri tanesidir [10]. Tek bir vida ile polimer ve katkı maddeleri karıştırılmakta ve eritilebilmektedir. Kullanılan vida üç bölümden oluşmaktadır. Şekil 1.'de çalışmada tasarlanan sistem elemanları gösterilmektedir. Besleme bölgesi malzemenin vida içine alındığı ilk bölgedir. Bu bölgede demir katkılı polimerin etkili bir şekilde alınması ve aşağıya doğru taşınması önemlidir. Sıkıştırma bölgesinde vida, malzemeyi sıkıştırarak daha yoğun bir karışım sağlamakta ve erime işlemini hızlandırmaktadır. Bu kısımda malzemenin düzgün bir şekilde eritilmesi sağlanmaktadır. Karıştırma bölgesi malzemenin tamamen eridiği ve demir partiküllerinin polimer matrisi içinde homojen bir şekilde dağıtıldığı bölümdür. Karıştırma işlemi ne kadar etkili olursa, filamanın kalitesi o kadar artmaktadır. Tek vidalı ekstrüderler basit yapısı nedeniyle yaygın olarak sektörde kullanılmaktadır, ancak homojen karışım sağlamakta bazen yetersiz kalabileceği düşünülmektedir[3].



Şekil 1. Solidworks ile Tasarlanan Ekstrüder Düzenegi

Ekstrüderin çıkışında bulunan nozul, eritilmiş polimerin filaman haline dönüştüğü bileşen olmaktadır. Nozul çapı, filamanın çapını belirlemekte ve baskı kalitesi üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olmaktadır. Filaman üretiminde yaygın olarak kullanılan çaplar 1,75

mm ve 2,85 mm'dir. Nozul çapı, ekstrüzyon işlemi sırasında malzemenin düzgün bir şekilde akmasını sağlamaktadır. Şekil 2.'de nozul, kovan ve mil gösterilmektedir. Daha küçük çaplı nozullar, daha ince ve hassas filaman üretimine olanak tanımaktadır. Bununla

birlikte, demir katkılı filamanlarda, partikül boyutuna bağlı olarak daha büyük çaplı nozullar tercih edilebilmektedir. Küçük çaplı nozulların kullanılması demir partiküllerinin nozul çıkışının tıkanmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle, demir katkılı filaman üretiminde, partikül boyutu ile uyumlu bir nozul çapı seçimi önem taşımaktadır. Bu çalışmada, ekstrüder nozul çapı 1,75mm olarak belirlenmektedir.



Şekil 2. Ekstrüderde kullanılan vida, nozul ve kovan sistemi

3.1. Termal Analiz

Ekstrüderde sıcaklık kontrolü, polimerin düzgün bir şekilde erimesini ve homojen bir karışım elde edilmesini sağlamak için kritik öneme sahiptir. Demir katkılı filamanlarda, metal partiküllerin varlığı nedeniyle sıcaklık kontrolü daha hassas yapılmalıdır. Ekstrüder üzerinde üç adet PID ısı kontrol ünitesi REX-C100, K tipi termokupl, SSR-40 DA katı hal rölelerinden üçer adet kullanılmaktadır. Şekil 3.'te gösterilen sistemde kullanılan bileşenler 3 mm çelik levha malzemeden imal edilen bir ayak üzerine monte edilmektedir. Sistem besleme gerilimi olarak AC 220 V, 50 Hz. ve katı hal röleleri için DC 24V ile çalışmaktadır.



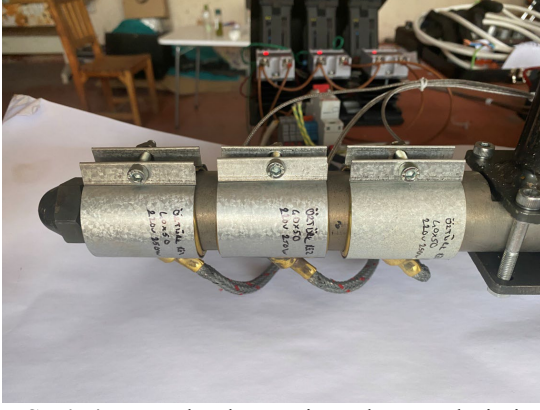
Şekil 3. Isı kontrol ve takip Ünitesi

Her bir kademe için, Şekil 4.'te gösterilen 250 W gücünde ısıtıcı bant rezistans kullanılmaktadır. Kullanılan rezistanslar, mika yalıtımlı ve pirinç gövdelidir. Rezistanslar $\varnothing 40 \times 50$ mm ölçülerinde olup, 220V AC elektrik ile kumanda edilmektedir. Sistemde sıcaklık ölçümü amacıyla, termokupl olarak K serisi 6 mm çapında termokupl kullanılmaktadır. Düzenekte bulunan PID kontrolcüler (REX-C100) Çizelge 1.'de belirtildiği şekilde ayarlanmaktadır. Kurulan düzenekte, ısıtıcı bantlara uygulanan gerilim, katı hal röleleri yardımıyla açılıp kapatılmaktadır. Devredeki ısıtıcıların açılıp kapanmasını yöneten PID devreleri, hedef sıcaklık ile mevcut sıcaklık arasındaki farka bağlı olarak çalışmaktadır.

Çizelge 1. PID kontrolcüsüne ait parametreler

PID Parametresi	Değer
Ary	0
P	30
I	240
D	60
Ar	100
r	2
Sc	0
LcY	0
Aru	0

Besleme bölgesinde (Bölge 1) polimer ve demir partikülleri hala katı halde bulunmaktadır. Bu nedenle sıcaklık, polimerin yumuşamadan beslenmesini sağlamak amacıyla düşük tutulmaktadır. Yüksek sıcaklığın besleme boğazında tıkanmalara yol açabileceği yapılan çalışmalarda gözlemlenmiştir. Bu çalışmada, hareket aktarım organları ve bağlantılar nedeniyle en geç sıcaklık hedef değerine ulaşan bölge olmuştur. Erime bölgesi (Bölge 2), polimerin eriyerek akışkan hale geçtiği bölgedir ve bu bölgede sıcaklık artırılmaktadır. Sıcaklık, kullanılan polimerin erime noktasına uygun olarak ayarlanmalıdır (örneğin; PLA için 180-210°C, ABS için 230-260°C). Karıştırma bölgesinde (Bölge 3) ise sıcaklık, malzemenin homojen bir şekilde karışmasını sağlayacak seviyede tutulmaktadır. Aynı zamanda, demir partiküllerinin polimer içinde düzgün bir şekilde dağılmasını sağlamak için belirlenen sıcaklık sınırının üzerine çıkılmaması gerekmektedir.



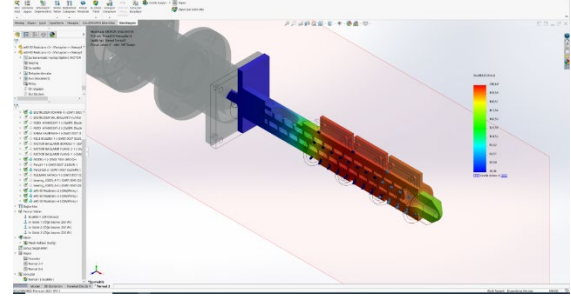
Şekil 4. Termokupl ve rezistansların yerleşimi

Metal partikülleri ısı iletkenliği arttırdığı için, ekstrüderin farklı bölgelerinde sıcaklık kontrolü daha hassas yapılmalıdır. Aksi takdirde, malzeme beklenenden daha hızlı soğuyabilmekte veya aşırı ısınarak polimerin bozulmasına neden olabilmektedir [6].

3.2. Termal Simülasyonun Modellenmesi

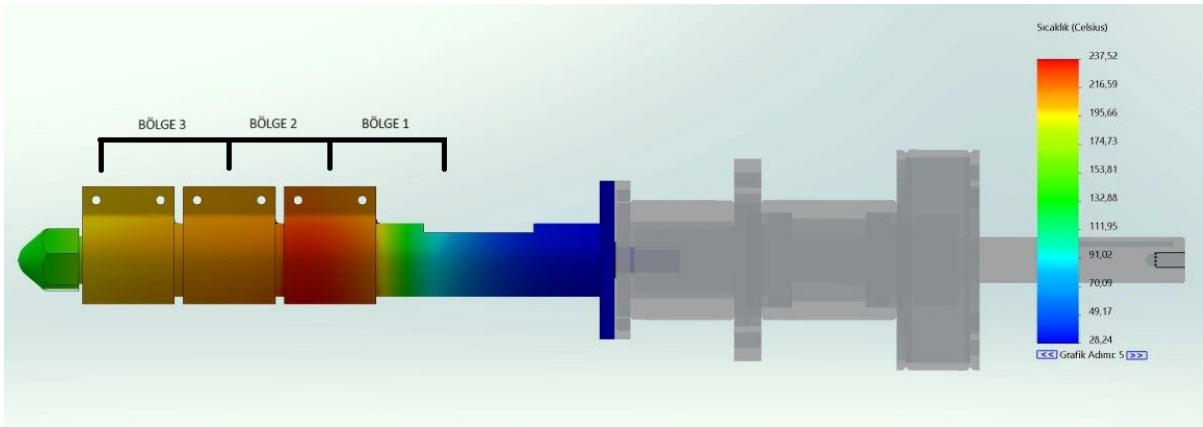
Ekstrüder tasarımındaki ısı dağılımını gözlemlemek amacıyla, Solidworks programında yer alan sonlu eleman çözümü kullanılmaktadır. Üç kademedan oluşan

ısıtıcılar ve termokupllar için, katı modelde belirlenen ölçüler dikkate alınmaktadır. Bu katı model parçaların montajında yer alan ısıtıcılar, Solidworks programında termal yük olarak belirlenen noktalarda her üç bölge için belirlenen noktalarda tanımlanmaktadır. Sistemin kesit görüntüsünde termal yüklerin dağılımı Şekil 5.'te gösterilmektedir. Termal yük olarak gerçek değer olan 250 W değeri kullanılmaktadır.



Şekil 5. Termal yükler ve sensorların dağılımı

Kurulan düzeneğin program içerisindeki görüntüsü Şekil 6.'da gösterilmektedir. Sistemde yer alan tüm elemanlar katı model olarak tasarlanmakta ve montajı yapılmaktadır.



Şekil 6. Simülasyon sonucunda sıcaklık dağılımı

Sistemde bulunan kovan üzerindeki ısıtıcı bantlar, kovan sıcaklık değerini sabit tutmak amacıyla yüzeylerine kelepçelenmektedir. Kovan gövdesinden konveksiyon ve radyasyonla ortama aktarılan kayıp ısı enerjisini azaltmak için, kovanın etrafına 30 mm kalınlığında taş yünlü bir ceket sarılmaktadır. Bu taş yünü ceket, ısıtıcı bant, kovan ve termokuplları sararak kovandan kaybedilen ısı enerjisini korunmasına yardımcı olmaktadır. Yapılan çalışmada hem izolasyonlu hem de izolasyonsuz durumda ortam ve ekstrüder sıcaklığı 22°C, bağıl nem ise %45 civarında

olacak şekilde deneye başlanmaktadır. Burada PID devreleri için eşik değeri 170°C olarak belirlenmektedir. Her üç bölgede eşik değeri olan 170°C aşıldığında deney sonlandırılmaktadır. Çalışmada, her 10 saniyede bir üç bölgeye bağlı termokupllardan gelen veriler kaydedilerek Excel dosyasına aktarılmaktadır. Excel'de elde edilen değerler bir grafik haline getirilebilmektedir. Düzenekte yer alan ısıtıcı bantların yakınında bulunan termokupllar hedef ısı değerlerini aştığı anda, sistemin enerji tüketim miktarlarını ölçmek amacıyla, ısıtıcıların bağlı olduğu devreye priz

tipi bir wattmetre (<https://s-line.com.tr/sline-web/>) yerleştirilmektedir. Böylece çalışmada, hedef sıcaklık değerinin aşılması anında ve eşit süre içerisinde ısıtıcı bantların tüketim miktarlarındaki değişimler gözlemlenmektedir.

4. DENEYSEL SONUÇLAR

Yapılan çalışmada ekonomik, kompakt bir ekstrüder düzeneği oluşturulmaktadır. Şekil 7.'de tasarımı ve imalatı gerçekleştirilen düzenek yer almaktadır. Ekstrüderin katı modeli Solidworks yazılımıyla yapılmakta ve termal yükler programa tanımlanmaktadır. Simülasyonu yapılan kovandaki ısı dağılımları incelenmektedir. Şekil 8.'de yer alan termal kamera görüntüsü ile simülasyon sonuçları kıyaslandığında, sıcaklık dağılımının tutarlı bir benzerlik gösterdiği gözlemlenmektedir.

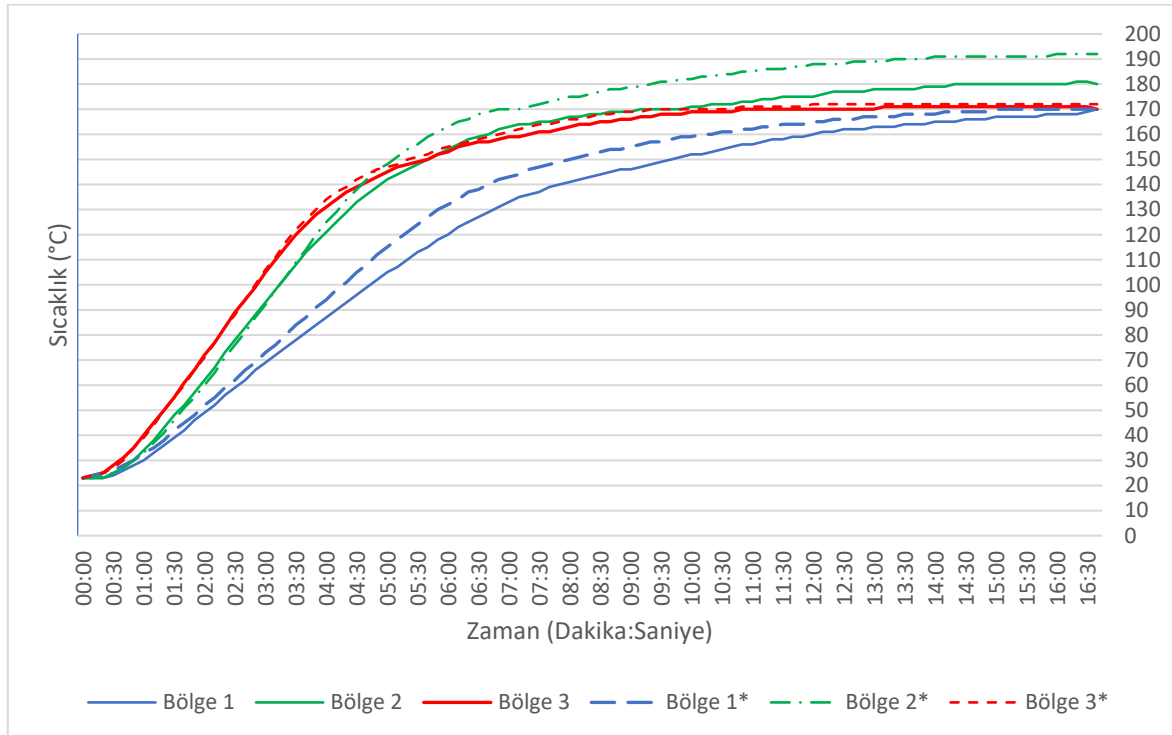


Şekil 7. Termal kamera ile alınan fotoğraf örneği



Şekil 8. Termal kamera ile görüntülenen kovanın sıcaklık dağılımı

Ekstrüder üzerindeki üç bölge için alınan değerlerde, izolasyon yapılmış bölgelerde daha hızlı yükselen bir sıcaklık grafiği elde edilmektedir. Hedef süre sonunda elde edilen bir diğer bulgu, izolasyonsuz durumda olan Bölge 2'nin maksimum sıcaklık değerinin 180°C'ye ulaştığı, izolasyon yapılan düzeneğe Bölge 2*'nin maksimum sıcaklığının 192°C olduğu gözlemlenmektedir. Elde edilen bu değerler, Şekil 9'da "Bölge (1 - 2 - 3)" izolasyonsuz, "Bölge (1* - 2* - 3*)" izolasyonlu olarak gösterilmektedir. Deneyde kullanılan şebeke gerilimi AC 220.9V ve frekans 50Hz olarak ölçülmektedir.



Şekil 9. Kovan Bölgelerinin Zamana Bağlı Sıcaklık Değişimi

Yapılan ikinci gözlemede, bant ısıtıcıların izolasyonlu durumda çektiği maksimum anlık güç tüketimi 694.1W olarak ölçülmektedir. İzolasyon yapılmayan sistemde ise bu değer 697.6W olduğu tespit edilmektedir. Hedef sıcaklık olan 170°C 'ye ulaşmaya kadar, ekstrüder kovanının izolasyonlu ve izolasyonsuz durumda tükettiği toplam enerji miktarı Çizelge 2'de gösterilmektedir. İzolasyonlu kovan, hedef sıcaklığa 16 dakika 40 saniyede ulaşırken, izolasyonsuz kovan aynı sıcaklığa 19 dakika 12 saniyede ulaşabilmektedir.

Çizelge 2. İzolasyonun enerji tüketimine etkisi

Özellik	Biri m	İzolasyonlu u	İzolasyonsuz z
Tüketilen Toplam Enerji Miktarı	kWh	0,073	0,097
Anlık Maksimum Enerji Miktarı	kW	0,6941	0,6976

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Çalışma sonunda, simülasyonda takip edilen termal analizdeki ısı dağılımının, sistemin termal kamera ile gözlemlenmesi ile elde edilen görüntülerle büyük oranda örtüştüğü gözlemlenmektedir. İmalatı gerçekleştirilen makinede, PLA malzemeye göre yapılan optimizasyon sonucunda ortalama 3 m/dakika üretim hızında 1,75 mm çapında katkılı filaman üretimi gerçekleştirilmektedir. Çalışmada, filaman içerisine eklenen %98 saflıkta, 100 µm elekten geçirilmiş demir tozu kullanılmaktadır. Elde edilen filamandaki demir katkısının kütle oranı ortalama %10 olarak ölçülmektedir. Tasarlanan katı model ve bu modele ait simülasyon, ekstrüder üzerindeki ısı dağılımının termal kamera ile elde edilen görüntülerle uyumlu olduğunu ortaya koymaktadır. Bu sonuç, gelecekteki çalışmalarda simülasyon verileri üzerinden farklı analizlerin yapılmasına olanak tanıyacaktır. Kovan bölgelerinin hedef sıcaklığa ulaşması sırasında, özellikle orta bölgenin (Bölge 2), uç (Bölge 3) ve dip kısımdaki (Bölge 1) sıcaklıklarına kıyasla daha yüksek sıcaklığa ulaştığı gözlemlenmektedir. Orta bölümün her iki yanında bulunan ısıtıcı bantların etkisi nedeniyle bu bölgedeki sıcaklık artışının daha yüksek olduğu düşünülmektedir. Bölge 1'de ise

bu durumun tam tersi bir durum tespit edilmiştir. Kovan bağlantı elemanları, vidalı mil yataklaması ve hareket aktarım elemanlarının bu kısma bağlı olmasının, sıcaklık artış hızını fark edilebilir ölçüde azalttığı görülmektedir. Güç tüketimi incelendiğinde, zamana ve sıcaklık sınırına bağlı gözlemlerde anlık maksimum çekilen gücün, izolasyon bulunmadığında 3.5 W daha yüksek olduğu tespit edilmektedir. Bu farkın oluşmasındaki temel nedenin şebeke gerilimindeki dalgalanmalar olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, izole edilen kovanda, özellikle uç (Bölge 3*) ve orta kısımda (Bölge 2*) sıcaklığın daha hızlı yükselmesi sebebiyle PID kontrolcüsünün, sıcaklık farkına göre bantlardaki çalışma sürelerini daha uzun tutmasının da sebep olabileceği düşünülmektedir. Bu konu, gelecekte yapılacak başka bir çalışmada değerlendirilebilir. Aynı süre içerisinde yapılan gözlemlerde, izolasyon yapılmamış sistemin hedef sıcaklığa ulaştırılabilmesi için gereken güç miktarı 0,097 kWh olarak ölçülürken, izolasyon yapılmış düzenekte bu değer 0,073 kWh olarak ölçülmektedir. İzolasyonun, kurulan sistemde %32,88 oranında enerji tasarrufu sağladığı tespit edilmektedir.

Daha uzun süreli çalışmalarda, kovan yüzeyine uygulanan izolasyon yardımıyla sistemdeki enerji kayıplarının önlenilebileceği düşünülmektedir. Bu durum, sistemin enerji kayıplarını önlemede kovan üzerine uygulanan termal izolasyonun önemini göstermektedir. Demir katkılı filaman üretiminde enerji verimliliğinin önemi hem maliyetlerin azaltılması hem de sürdürülebilir üretim süreçlerinin geliştirilmesi açısından büyük bir önem taşımaktadır. Metal katkılı filaman üretimi, yüksek enerji gereksinimi olan bir süreç olduğundan, enerji verimliliği sağlanması, üretim maliyetlerini düşürmenin yanı sıra sistem ömrünü uzatmak ve çevresel etkileri azaltmak için kritik bir faktördür. Bu nedenle, ekstrüzyon sürecinde sıcaklık kontrolü, termal izolasyon gibi enerji verimliliğini artıracak önlemlerin uygulanması, demir katkılı filaman üretiminde hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir katkı sunmaktadır.

KAYNAKLAR

1. F. Cerejo, D. Gatões ve M. T. Vieira, “Optimization of metallic powder filaments for additive manufacturing extrusion (MEX)”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 115, Issue 7, Pages 2449-2464, 2021.
2. E. H. Tümer ve H. Y. Erbil, “Extrusion-Based 3D Printing Applications of PLA Composites: A Review”, *Coatings*, Cilt 11, Sayı 4, Sayfa 4, 2021.
3. V. S. Vakharia, L. Kuentz, A. Salem, M. C. Halbig, J. A. Salem ve M. Singh, “Additive Manufacturing and Characterization of Metal Particulate Reinforced Polylactic Acid (PLA) Polymer Composites”, *Polymers*, Vol. 13, Issue 20, Page 3545, 2021.
4. S. Akkurt, “Plastik malzeme bilimi, teknolojisi ve kalıp tasarımı”, Sayfa 50-51, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2007.
5. S. Levy, “Plastics Extrusion Technology Handbook”, Pages 83-96, Industrial Press Inc., South Norwalk, 1989.
6. K. Doungkeaw ve J. Tungtrongpaioj, “Printability and Mechanical Properties of PLA/Iron Composites for FDM 3D Printing”, *Key Eng. Mater.*, Vol. 978, Pages 47-51, 2024.
7. A. Amirov vd., “3D printing of PLA/magnetic ferrite composites: effect of filler particles on magnetic properties of filament”, *Processes*, Vol. 10, Issue 11, Pages 2412, 2022.
8. J. Sasse, L. Pelzer, M. Schön, T. Ghaddar, ve C. Hopmann, “Investigation of Recycled and Coextruded PLA Filament for Additive Manufacturing”, *Polymers*, Vol. 14, Issue 12, Pages 12, 2022.
9. J. Deng vd., “Energy monitoring and quality control of a single screw extruder”, *Appl. Energy*, Vol. 113, Pages 1775-1785, 2014.
10. M. Nassar, M. El Farahaty, S. Ibrahim, ve Y. Hassan, “Design of 3D filament extruder for Fused Deposition Modeling (FDM) additive manufacturing”, *Int. Des. J.*, Vol. 9, Issue 4, Pages 55-62, 2019.
11. N. D. Watson ve P. Von Lockette, “Deposition Controlled Magnetic Alignment in Iron-PLA Composites”, <https://hdl.handle.net/2152/90192>, Kasım 22, 2023.
12. D. V. Rosato, *Extruding Plastics: A practical processing handbook*, Pages 208–213, Springer Science & Business Media, 2013.
13. S. Y. Kim, S. P. Hersh ve P. L. Grady, “Factors affecting the energy efficiency of single screw extruders”, *Fibre Sci. Technol.*, Vol. 17, Issue 1, Pages 41-61, 1982.