

5 EKSEN 3B YAZICI TASARIMI VE UYGULAMASI

Deniz Altunkaynak^a*, Burhan Duman^b, Kerim Çetinkaya^c

^aGazi Üniversitesi Vakfı Özel Okulları, Ankara, Türkiye

^bIsparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği, Isparta, Türkiye

^cAntalya AKEV Üniversitesi, Sanat ve Tasarım Fakültesi, Antalya, Türkiye

*Sorumlu Yazar: daltunkaynak@gmail.com

(Geliş/Received: 02.06.2020; Düzeltme/Revised: 06.07.2020; Kabul/Accepted: 16.07.2020)

ÖZ

Bu çalışmada, 5 eksen 3B yazıcının tasarımı ve prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Prototip üretilen 3B yazıcıda geleneksel Kartezyen tip hareket eksenleri (X, Y ve Z) ile yazıcı tablasının dönüş hareketini sağlayan (A ve C) eksenler ilave edilerek 5 eksenli 3B yazıcı elde edilmiştir. 5 eksen hareketleri için Arduino Atmega2560 kart kullanılarak X, Y ve Z eksen motorlarının, destek gereken yerlerde ise Arduino Nano kart kullanılarak A ve C eksen motorlarının kontrolü sağlanmıştır. Arduino Nano kart için C++ dilinde yazılan kodlar ile yazdırma işlemi sırasında bilgisayar ve Arduino Atmega2560 kart arasında iletişim kurulması sağlanmıştır. Kartlar arası geçiş ise Python dilinde yazılan kod ile gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, 5 eksen 3B yazıcı ile başarılı yazdırma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Geleneksel 3B yazıcı ile kıyaslandığında, destek malzemesinin 5 eksen 3B yazıcıda kullanılmamasından dolayı zamandan tasarruf ve daha az hasarlı bölgelere sahip ürün elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli İmalat. Hızlı Prototipleme. 3B Yazıcı. 5 Eksen. Destek Malzeme.

5 AXIS 3D PRINTER DESIGN AND APPLICATION

ABSTRACT

In this study, the design and prototype production of 5 axis 3D printer has been realized. A 5-axis 3D printer was obtained by adding the conventional Cartesian type motion axes (X, Y and Z) and the axes that provide the rotational movement of the printer table (A and C) in the 3D printer produced in the prototype. Control of X, Y and Z axis motors using Arduino Atmega2560 processor for 5 axis movements, and A and C axis motors using Arduino Nano processor where support is provided. With the codes written in C++ language for Arduino Nano processor, communication between the computer and Arduino Atmega2560 processor has been provided during the printing process. The transition between processors was realized with the code written in Python language. As a result, successful printing experiments were carried out with a 5-axis 3D printer. Compared to the traditional 3D printer, the product with time-saving and less damaged areas was obtained due to the fact that the support material was not used in the 5-axis 3D printer.

Keywords: Additive Manufacturing. Rapid Prototyping. 3D Printer. 5 Axis. Support material.

1. GİRİŞ

Dijital endüstri; üretimle doğrudan ya da dolaylı olarak ilişkili olan bütün birimlerin birbiri ile ortak çalışmasını yönetmekte, dijital verilerin yazılım ve bilişim teknolojilerinin birbiri ile entegre olarak çalışmasını öngörmektedir. Dijital endüstrinin teknolojik alanlarından biri olan 3 Boyutlu (3B) yazıcılar, üretim felsefesinin geleceğini şekillendiren önemli bir unsurdur. 3B yazıcılar, tüketiciyi üretimin bir parçası haline getirerek üretim felsefesinin dönüşmesine katkı sağlamaktadır [1].

3B yazıcılar Bilgisayar Destekli Tasarım (BDT) dosyalarından fiziksel model üretmeye yarayan yöntem ve teknolojilere verilen genel tanımlamadır. Tasarım hatalarının üretim aşamasından önce tespiti

imkan sağlayan 3B yazıcılar aynı zamanda ürünün en kısa sürede son kullanıcıya ulaşmasını sağlamaktadır. Eklemeli İmalat Yöntemleri (EİY)'nin bir dalı olan 3B yazdırma teknolojisinin temel amacı, geleneksel imalat yöntemleri ile üretilmeyecek karmaşık geometrili modellerin üretilmesi ve böylece üretimde sınırlılığın ortadan kaldırılmasıdır. 3B yazdırma yönteminin çalışma prensibi, BDT yazılımları ile hazırlanan geometrinin, bilgisayar kontrollü bir tezgahta, birbiri üzerine katmanların yığılması prensibine dayanmaktadır [2].

3B yazdırma teknolojileri, üretimde kullanılan malzeme ve üretim şekline göre üç ana grup altında toplanabilir. Bunlar; sıvı malzemenin lazer ile kürlenmesi, toz malzemenin sinterlenmesi, katı malzemenin eritilerek yığılması ile ürün üretilmesi şeklindedir. Bu teknolojilerin başlıcaları: Stereolitografi (Stereolithography-SLA), Seçici Lazer Sinterleme (SelectiveLaserSintering-SLS) ve Eriyik Yığıma Yöntemi (FusedDepositionModeling- FDM) olarak sayılmaktadır [3-8].

Esnek polimerlerden yüksek dayanımlı metallere kadar farklı geometrili parçalar EİY ile üretilmektedir. En yaygın olarak kullanılan Eİ tekniğı, termoplastiklerin düşük sıcaklıkta şekillendirebilirliğine dayanan, katı/yarı katı malzemenin ürünü oluşturmak için biriktirildiğı Eriyik Yığıma Yöntemidir. FDM, metaller için kullanılan SLS/DMLS gibi diğeri EİY'lerine göre daha ekonomiktir. Fakat FDM'nin ağırlıklı olarak prototip üretilmesiyle sınırlı olduğı bilinmektedir. EİY geliştirilmeye devam ederken, EİY'nin seri üretimde kullanıma yöntemleri üzerine halen çalışmalar devam etmektedir [9].

3B dijital modelin belirli aralıklarda bir düzlem ile kesişiminden kesit alanların elde edilmesi işlemi dilimleme olarak tanımlanmaktadır. Elde edilen alanlar için işlemin hangi hareketler ile yapılacağını belirlemesi için de takım yolu oluşturulmaktadır. Hesaplanan takım yoluna göre 3B yazıcı katmanları yığmak suretiyle ürün imalatını gerçekleştirmektedir. 3B yazdırmada STL dosya formatı kullanılmaktadır. STL dosya formatı, geometrik modeli tanımlayan üçgen yüzeylerden oluşmaktadır. Dilimleme olarak adlandırılan 3B verilerin 2B verilere dönüştürülme sürecinde bazı hatalar meydana gelebilmektedir. Ürün yazdırma sonrası boyutsal küçülme olarak adlandırabileceğimiz merdiven basamağı etkisi bu hataların başında gelmektedir. Meydana gelen hataların giderilmesi amacı ile farklı yöntemler geliştirilmiştir [10,11].

Anglada vd. önerdikleri algoritmada, ön tanımlı tolerans ile başlangıç yüzeylerini yaklaştıran üçgenleme gerçekleştirmektedir. Bu yaklaşturma işleminin kenarlarda çatlak olmadan (kapalı polihedron kapalı bir başlangıç yüzey olması durumunda) uygun olduğı belirtilmiştir. Algoritmada lokal yüzey eğrilerinin yönlü davranışlarının gözönünde tutulmasıyla daha hassas sınırlara dayandığı ve sonuçta az sayıda üçgen ile üçgenleme yapıldığı ifade edilmiştir. Çalışma sonunda kıvrımlı yüzeylerde daha iyi üçgenleme elde edildiğı gösterilmiştir [12].

Wang vd. STL üçgenlemeden yeniden örgü için güçlü ve etkili olarak belirttikleri bir prosedür geliştirmişlerdir. Uygulama sonunda merdiven basamağı etkisinin nispeten azaldığını göstermişlerdir [13].

Szilvasi ve Matyasi, yüzey temsilindeki kusurları tarayan ve STL dosyadan polihedral veri yapısı inşası ile yaklaşık yüzey analizi yapan bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonunda karmaşık geometrili ürün yazdırmada, yüzeylerdeki hasar noktalarının azaldığını belirtmişlerdir [14].

Lai ve Lai, bir üçgen model içinde var olabilecek hatalı yüzeyleri algılayan ve ortadan kaldıran bir yaklaşım önermişlerdir. Oluşturulan algoritma ile bozulmaların, problemlili köşelerin, iç kesişmelerin, tamamlanmamış bağlantıların ve tutarsız düzlem normallerinin algılanabildiğini ve bu hataların otomatik olarak ortadan kaldırılabilirdiğini göstermişlerdir [15].

Marchandise vd. BDT dosyalarında, radyal taban fonksiyonları ile yeniden üçgenlerle örme ve örgü tamiri için özel yaklaşım sunan bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada önerilen algoritmanın boşluklar, terslenen normaller, üst üste binmeler ve T-birleşme gibi ciddi topolojik ve geometrik hataların tamirinde uygun sonuç verdiğini örneklerle sunmuşlardır [16]. Bi vd. çalışmalarında ada şeklindeki

boşlukları otomatik olarak onaran otomatik bir algoritma geliştirmişlerdir. Algoritmanın doğru ve kararlı şekilde çalıştığını deneysel olarak göstermişlerdir [17].

Liepa, üçgenleştirilmiş örgüdeki boşlukların doldurulması üzerine bir çalışma yapmıştır. Çalışmada, yapısal olmayan üçgenleştirilmiş örgüdeki boşlukların doldurulması için bir metod tanımlanmıştır. Sınırı belirlenmiş üçgen yüzey örgüsünün yamanması sonucunda çevreleyen üçgen yüzey örgüsünün yoğunluğu ve şeklinde interpolasyon yapılmıştır. Önerilen metod, sınır belirleme içeren bir boşluk doldurma işlemi, boşluğun üçgenlenmesi, hassaslaştırma ve kaplama adımlarını içermektedir. Önerilen metod merdiven basamağı etkisini azaltmayı başarmıştır [18].

Hu vd. çalışmalarında yama bölgesinde yama işleminden sonra oluşan üçgenleri, çift yönlü filtre uygulayarak iyileştirme yapmışlardır. Çalışma sonunda yama bölgelerinde meydana gelen dilimleme hatalarını ortadan kaldırmayı başarmışlardır [19]. Nooruddin ve Türk'ün, hacimsel alanda morfolojik işlemler ile topolojik yüzey basitleştirme tekniği hacimsel çalışmaların başlangıcı olarak gösterilmektedir. Tekniğin avantajı kontrollü topoloji değişikliği, dahada basitleştirmeye imkan tanınması, girdi olarak rastgele çokgenler kümesini kabul etmesi, çıktı olarak çoklu üçgen yüzey örgüsü üretmesi ve renk gibi yüzey özelliklerini korumasıdır. Giriş çokgen modellerinin hacimlere dönüştürülmesinin yaran çok sayıda bozulmuş çokgenlerin onarılabilmesidir [20].

Geleneksel 3B yazdırma teknolojisinde, malzemeyi Z eksen yönünde katmanlar halinde yığarak nesneler ve parçalar oluşturulmaktadır. Bununla birlikte, yazdırma işleminde kademeli ve karmaşık parçalar için destek malzemesi kullanılması gerekmektedir. Kullanılan destek malzemeleri maliyete ve yazdırma zamanına etki etmektedir. Geleneksel 3B yazdırma teknolojisinde X,Y ve Z eksenlerine ek olarak iki ek eksen eklenmesi ile 5 eksen 3B yazdırma yöntemi geliştirilmiştir. Ek eksenler kutupsal koordinat sistemi ile döndürmekte böylece destek malzemesi kullanmadan ürün yazdırılabilmekte ve yazdırma sonrası boyut küçülme olarak adlandırabileceğimiz merdiven basamağı etkisi nispeten ortadan kalkmaktadır [21-24].

3B yazdırma teknolojisinde, yazıcı başlığı hareketli veya hareketsiz olabilen bir tabla üzerinde parçayı oluşturmaktadır. Yazıcı başlığı filament olarak isimlendirilen ham maddeyi yazdırma başlığına katı/yarı katı hale getirerek katmanlar halinde yığmaktadır. 5 eksenli 3B yazdırmada ise ürün aşağıdan yukarı doğru tek bir hareketle değil, 5 farklı yönde ilerleyen bir mekanizmadan meydana gelmektedir. Böylece yazdırma işleminde ince detaylar elde edilebildiği gibi kavisli katmanlar da yapılabilir [21-24].

Mitsubishi Electric Research Laboratuvarları'nda, 5 eksen yazdırma yapılırken, ek eksen hareketlerini tablanın döndürülmesi ile elde etmişlerdir. Çalışmada Naylon, PLA, ABS malzemeleri ile başarılı yazdırma işlemleri yapılmıştır [25]. Tolar ve Herrman, X, Y ve Z eksenine ek olarak 3 eksenle dönebilen yazdırma alanını tasarlamışlardır. Aynı anda başlığı ve tablayı hareket ettiren yazılım geliştirerek, 5 eksen 3B yazıcılarda olduğu gibi destek malzemesi olmadan daha hassas üretim yapan 6 eksen 3B yazıcı tasarımı ve prototip üretimini gerçekleştirmişlerdir [26]. 5 Axismaker isimli İngiltere merkezli firma tarafından prototip üretimi yapılan 5 eksen 3B yazıcıda ek eksen hareketleri, tablanın döndürülmesi yerine yazdırma başlığı ile verilmektedir [27]. Japonya'da Enomoto firması tarafından üretilen cihaz, 5 eksen 3B yazdırmada CNC ve 3B yazıcı teknolojilerini birleştirilerek üretim sağlamaktadır. Böylece çekme/basma mukavemeti yüksek, hasarsız yüzeylere sahip ürünler yazdırılmaktadır [28]. Endüstriyel tip olarak üretilen 5 eksen 3B yazıcılar, Avusturya ve Polonya menşeli olup, her türlü polimerden ve metal çubuktan yazdırma işlemini yapabilmektedirler. Su soğutmalı servo motorların kullanıldığı 5 eksen 3B yazıcılarda, ek eksen hareketleri tablanın döndürülmesi ile elde edilmektedir [29,30].

Bu çalışmada destek malzemesi kullanımını ortadan kaldırmak için 5 eksen 3B yazıcı tasarımı ve prototip üretimi amaçlanmıştır. Geleneksel 3B yazıcıya döner tabla eklenerek A ve C olmak üzere iki adet eksen hareketi elde edilmektedir. Açık kaynak 3 eksen dilimleyici üzerine Python dilinde yazılan komutlar ile dilimleme işlemini gerçekleştirerek 5 eksen dilimleyici yazılımı kullanılmadan, iki farklı kontrol kartı ile yazdırma işlemi amaçlanmaktadır. Çalışmada, destek malzemesi kullanılmadığından

daha kısa sürede yazdırma işlemini gerçekleştirmek, daha hasarsız yüzeylere sahip ürünler elde etmek, nispeten merdiven basamağı etkisini ortadan kaldırmak amaçlanmaktadır.

2.TASARIM VE YÖNTEM

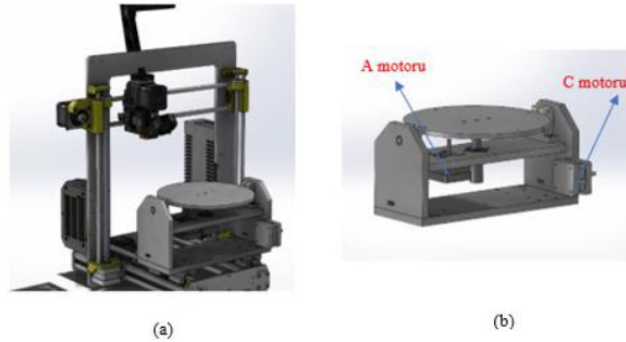
Tasarımı ve uygulaması yapılan 5 eksen 3B yazıcının genel olarak gövde ve döner tabla olmak üzere iki ana bileşeni bulunmaktadır. Bu bileşenler için Kartezyen yazıcı tipi seçilen 5 eksen 3B yazıcının genel özellikleri Çizelge 1’de gösterilmektedir.

Çizelge 1. 5 eksen 3B yazıcının genel özellikleri.

Genel boyutlar (mm)	475* 430* 365
Yazdırma alanı (mm)	150 *150*150
Döner tabla boyutları (mm)	130*275*100
Kullanılan malzeme	6 mm’lik sac levha; alüminyum 701 serisi
Motor sayısı ve özellikleri	7 adet Nema 17 step motor
A ve C eksen tahrik sistemi	Kayış kasnak sistemi
Kart	Arduino Atmega2560, Arduino Nano

5 eksen 3B yazıcı genel özelliklerine baktığımızda iki adet kart kullanıldığı görülmektedir. Geleneksel Kartezyen (X, Y, Z) eksenleri için Arduino Atmega2560 kart kullanılmaktadır. Döner tabla eksen hareketleri (A ve C) için Arduino Nano mikro kart kullanılmaktadır.

A ve C olarak adlandırılan eksenleri çalıştıran döner sistem modellemesi SolidWorks BDT yazılımı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 1). Modelleme yapılırken; motor tahriklerinde kayış kasnak mekanizması kullanılarak motor torku 2:1 oranında artırılmıştır. Prusa İ3 marka yazıcı gövdesi referans alınarak SolidWorks BDT yazılımında yazıcının konstrüksiyon tasarımı yapılmıştır. Şekil 1(a)’da 5 eksen 3B yazıcının konstrüksiyon tasarımı verilmiştir.



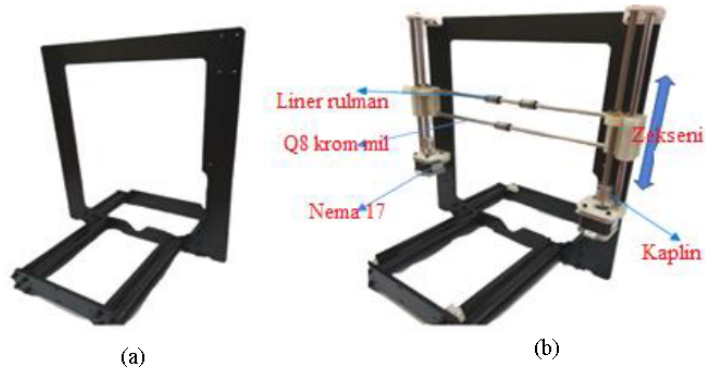
Şekil 1. 5 eksen 3B yazıcı konstrüksiyon resmi (a), Döner tabla modeli (b).

Döner tabla tasarımında; A eksenini ve C eksenini çalıştıran motorlar Şekil 1(b)’de gösterilmektedir. 5 eksen 3B yazıcıda tüm eksenlere hareketi vermek için Nema 17 motor kullanılmıştır. Ekstrüder motoru da dahil olmak üzere toplam 7 adet Nema 17 motor kullanılmıştır. Tasarımı yapılan 5 eksen 3B yazıcının mekanik elemanları Çizelge 2’de gösterilmektedir.

Çizelge 2. 5 eksen 3B yazıcının mekanik elemanları.

1.6 mm'lik sac levha	9. GT 2,5 Kayışlar (kapalı)
2.Nema 17 step motorlar	10.GT 2 Kayışlar
3.Mk8 Ekstrüder dişlisi	11.GT 2,5 Kasknaklar
4.V6 Hotent set	12.GT 2 Kasknaklar
5.T8 Vidalı miller	13.Rulmanlar
6.Q8 Krom kaplı miller	14.Liner rulmanlar
7.30*30 Sigma profiller	15.3B yazıcı kalibrasyon seti
8.5*8 Esnek kaplinler	16.Cıvata-somun seti

Tasarımı yapılan 3B yazıcının gövde sistemi Prusa i3 marka yazıcı gövdesi referans alınarak tasarlanmıştır. Katı model tasarımına uygun olarak cihazın gövdesi 6 mm et kalınlığında çelik sac levhadan imal edilmiştir. Şekil 2(a)'da çelik sac malzemeden imal edilen gövde gösterilmektedir. Şekil 2(b)'de ise 5 eksen 3B yazıcının Z eksen yönü ile bazı mekanik bileşenleri gösterilmektedir.

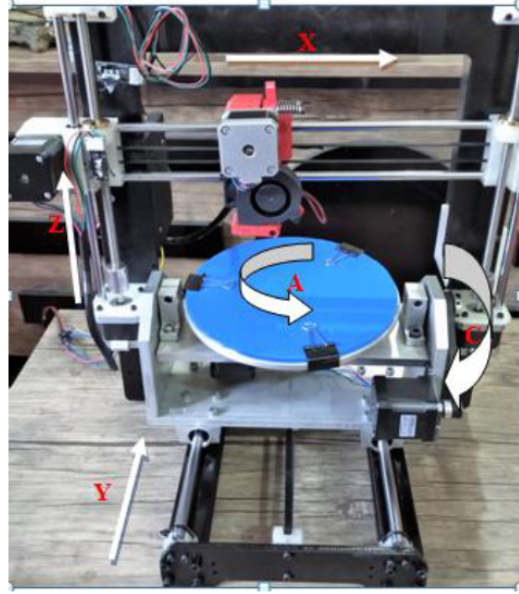


Şekil 2. 5 eksen 3B yazıcı sac gövde (a), Z eksen hareket iletimi (b).



Şekil 3. Tabla eksen hareketleri (a), kayış kasknak sistemi (b).

A ve C eksenlerini tahrik ettirecek motorların yer alacağı döner tabla, alüminyum 701 serisinden frezede işlendikten sonra mekanik elemanların montajı yapılmıştır. Şekil 3(a)'da A ve C eksen hareketleri gösterilmektedir. Şekil 3(b)'de C eksen kayış kasknak iletim sistemi gösterilmektedir. 5 eksen 3B yazıcıda X, Y ve Z eksenleri referans alınan 3B yazıcı ile aynı çalışma prensibine sahiptir. Z eksen hareketi için 2 adet Nema 17 motor kullanılmıştır. Şekil 4'de montajı yapılan gövde ve eksen yönleri gösterilmektedir.



Şekil 4. 5 eksen 3B yazıcının eksen yönleri.

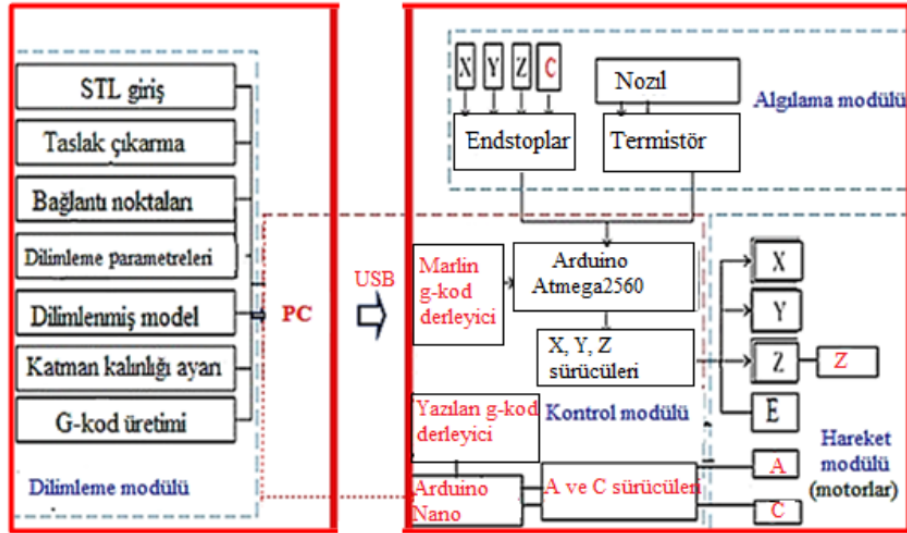
C eksen motoru kayış kasnak sistemi ile tablayı sağa ve sola toplamda 90° açığa kadar döndürebilmektedir. A eksenini dönüştürmesi ile sağlanmıştır. Kayış kasnak sistemi sayesinde A ve C eksenlerinde motor hızı 1:2 oranında azaltılarak, tork 2:1 oranında artırılmıştır. A ve C eksenlerini taşıyan döner tabla, yazıcı tablasına CNC tezgahında açılan kanallar aracılığıyla yerleştirilmiştir.

3. 5 EKSEN 3B YAZICI KONTROLÜ VE YAZILIMI

3.1. 5 Eksen 3B Yazıcı Kontrolü

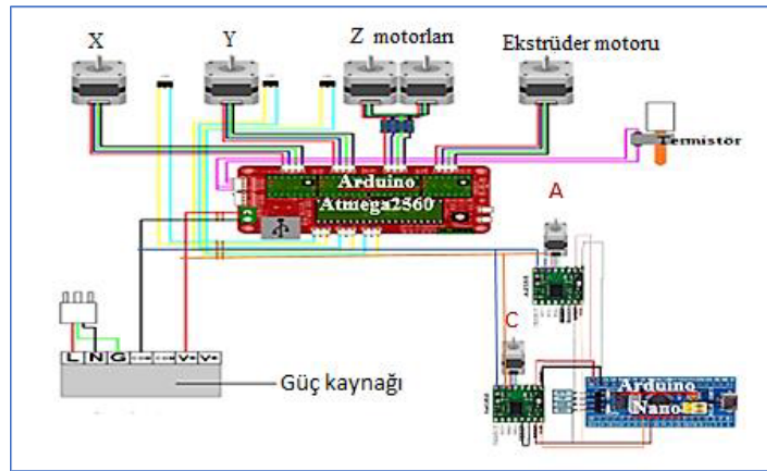
Arduino Atmega2560 ve Arduino Nano mikro kartlar eksen hareketlerinin elde edilmesinde kullanılmıştır. Arduino Atmega2560 açık kaynaklı olup Marlin Firmware dayanan bir yazılıma sahip kontrol kartıdır. 5 eksen 3B yazıcıda, Marlin Firmware X, Y ve Z eksen motorları ile ekstrüder motoruna (E) hareket vermektedir. A ve C eksen motor hareketlerini kontrol etmek için Arduino Nano mikro kart kullanılmıştır. Arduino Nano, Marlin Firmware yerine özel olarak yazılmış G-kod derleyiciden komut almaktadır. Arduino Nano devreye girdiğinde Arduino Atmega2560 kart devreden çıkmaktadır. Şekil 5'de 5 eksen 3B yazıcının basitleştirilmiş kontrol ünitesi gösterilmektedir.

Tasarlanan 5 eksen 3B yazıcıda, tabla ısıtması bulunmadığı için termistör ekstrüderi ısıtmak için kullanılmıştır. Z eksenini çalıştıran motor sayısı 2 adet olduğundan motorlar birbirine paralel bağlanmıştır. A ve C olarak adlandırılan iki eksenin sürücülerini Arduino Nano mikro kart kontrol etmektedir.



Şekil 5. 5 eksen 3B yazıcının kontrol ünitesi.

Kullanılan elektronik elemanların üretici firmaların tarafından verilen bağlantı şemalarına göre sistemin elektronik montajına geçilmiştir. Şekil 6'da sistemin Arduino Atmega2560 kart ve Arduino Nano kart bağlantı şeması gösterilmiştir.



Şekil 6. 5 eksen 3B yazıcı kartların bağlantı şeması.

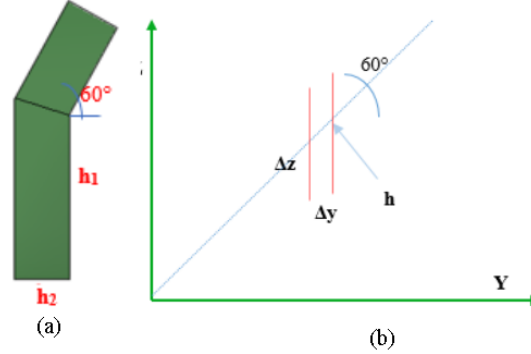
3.2. 5 Eksen 3B Yazıcı Yazılımı

3.2.1. Arduino Nano yazılımı

5 eksen 3B yazıcıda, Marlin Firmware tarafından desteklenen Arduino Atmega2560 kart X, Y ve Z eksenlerini kontrol etmek için kullanılmıştır. A ve C eksenlerini kontrol etmek için ise Arduino Nano kart kullanılmıştır. C++ programlama dilinde yazılan G-kod derleyici Arduino Nano ile bilgisayarın iletişim kurmasını sağlamaktadır. Arduino Nano, A ve C eksen motorlarına hareket vereceği zaman bilgisayarla iletişim kurmaktadır. Böylece tabla dönerken Arduino Atmega2560 kart devreden çıkıp Arduino Nano kart devreye girmektedir.

3.2.2. Matematiksel model

5 eksen 3B yazıcının 5 eksen G-kod oluşturabilmesi için, kutupsal koordinat sistemi kullanılmıştır. X eksenini her seferinde sabit bırakarak diğer değişkenlerde oynama yapılarak yazdırılmak istenen ürünün tüm eksenlere olan uzaklığı tespit edilmektedir. Şekil 7(a)'da yazdırılmak istenen ürünün önden görünüşü gösterilmektedir. Şekil 7(b)'de ise ürün yazdırılırken oluşan yer değiştirme grafik şeklinde gösterilmektedir.



Şekil 7. Önden görünüş(a), yer değiştirme grafiksel gösterim(b).

Şekil 7' de gösterilen sembollerin ifade karşılığı aşağıdaki gibidir.

Z= Z eksen,

Y= Y eksen,

h = Yazdırılmak istenen ürünün merkezinin, dönme eksenine olan dik uzaklığı,

h_1 =Yazdırılmak istenen ürünün yüksekliği,

h_2 =Yazdırılmak istenen ürünün genişliği,

Δz = Yazdırılmak istenen ürünün Z eksenindeki değişme miktarı,

Δy = Yazdırılmak istenen ürünün Y eksenindeki değişme miktarıdır,

Eş. (1)'de ürün yazdırılırken tabla döndükten sonraki Z ekseninde değişme miktarı, Eş. (2)'de ise Y ekseninde değişme miktarı bulunmaktadır.

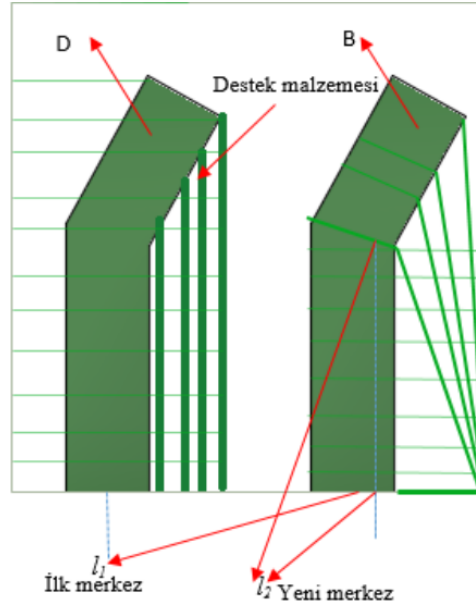
$$\Delta z = h_1 - h \cdot \sin 60 \quad (1)$$

$$\Delta y = h_2 - h \cdot \sin 60 \quad (2)$$

Eş. (3)'de tablanın ve ekstrüderin dönmeden önceki merkezi elde edilmektedir. Eş. (4)'de ise tabla döndükten sonra ki merkez hesaplanmaktadır. l_1 = Tabla dönmeden önceki merkez, l_2 = Python'da yazılan kod bloğundan gelen komut ile tabla döndükten sonraki merkezdir.

$$l_1 = ((h_1 - 2\sqrt{h_2/3})) \cdot \cos 30 - h_1 \quad (3)$$

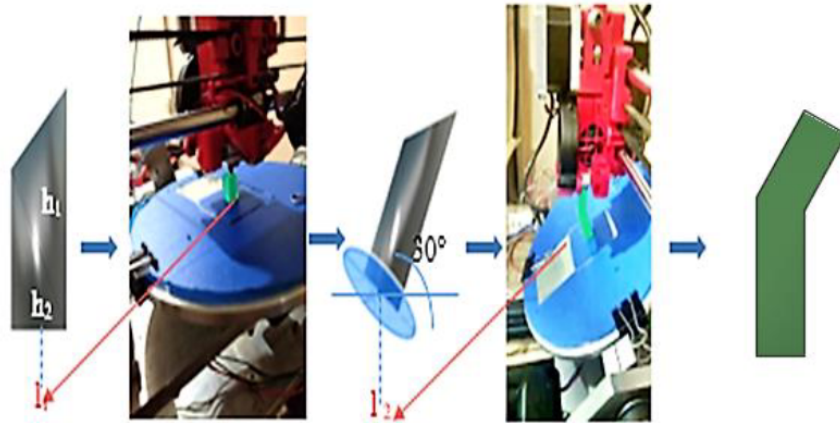
$$l_2 = (h_1 - 2\sqrt{h_2/3}) \cdot \cos 60 \quad (4)$$



Şekil 8. Yazdırılan ürünün grafiksel gösterimi.

Şekil 8’de yazdırılmak istenen ürünün 3 eksen ve 5 eksen yazdırmaları grafiksel olarak gösterilmektedir. Belirlenen modele göre D ile adlandırılan 3 eksen de yazdırılan ürünün merkezi l_1 ’dir. D ürününde destek malzemesi kullanılarak yazdırma işlemi sonlandırılmaktadır. B ile adlandırılan 5 eksen yazdırma da ise l_1 ile gösterilen merkez noktasına kadar 3 eksen gibi çalışmakta destek gerekli kısımlar yazdırılırken 5 eksen 3B yazıcının tablası dönerek A ve C eksenleri devreye girmektedir. Bu durumda yazdırma işlemi l_2 ile gösterilen yeni merkezden devam ederek, destek malzemesi kullanılmadan tamamlanmaktadır.

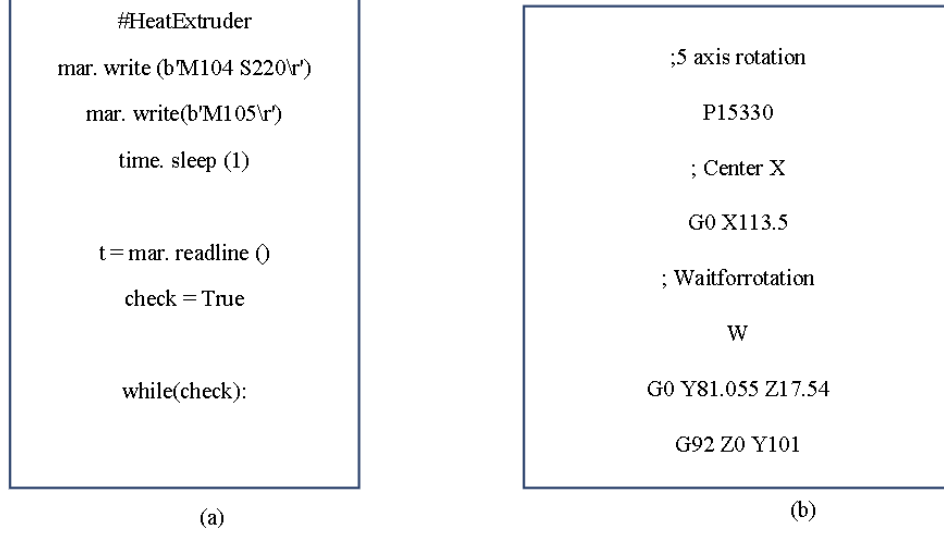
Şekil 9’da 5 eksen yazdırma aşamaları merkezin değişimine göre gösterilmektedir.



Şekil 9. 5 eksen yazdırma aşamaları.

3.2.3. İşlemciler arası iletişim kuran yazılım

5 eksen 3B yazıcının kontrol ünitesi olarak Arduino Atmega2560 kart ile Arduino Nano kart kullanılmıştır. Arduino Atmega2560 kart, X, Y ve Z eksenlerini kontrol ederken, Arduino Nano kart A ve C eksenlerini kontrol etmektedir. Python dilinde yazılan kod bloğu ekstrüder sıcaklığını 220°C olana kadar Şekil 10(a)'da ki "While (check)" döngüsünde kalmakta, 220°C'den sonra döngüden çıkmaktadır. Ürün X, Y ve Z eksenlerinde yazdırılırken komutları Arduino Atmega2560 kart'a gönderirken, destek gereken kısımlar yazdırılırken komutları Arduino Nano karta göndermektedir. Şekil 10(b)'de ekstrüder döndürmenin ardından oluşan yeni yazdırma merkezine götürüldüğü görülmektedir. En son satırda ise döndürülen parçanın yeni merkezine göre takım yolu oluşturulmaktadır.

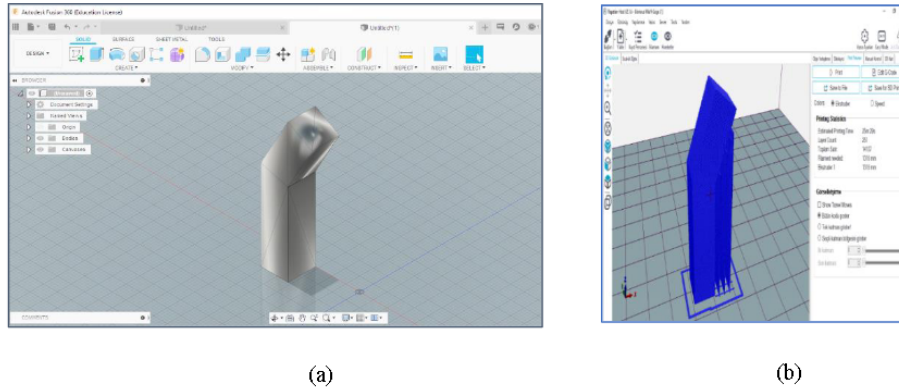


Şekil 10. Ekstrüder sıcaklık komutları (a), yer değiştirme komutları (b).

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

4.1. 3 Eksen 3B Yazıcıda Ürün Yazdırma

3 eksen 3B yazdırma için Şekil 16'da gösterilen ürün Fusion 360 BDT programında modellenmiştir.



Şekil 11. Yazdırılan ürünün katı modeli (a), yazdırılan ürünün dilimleme işlemi (b).

Şekil 11(a)'da yazdırılan ürünün katı modeli gösterilmektedir. Şekil 11(b)'de ise modellenen ürün Repetier Host dilimleme yazılımına gönderilerek dilimlere ayrılması gösterilmektedir. Dilimle işleminden sonra geleneksel 3 eksen 3B yazıcıda yazdırılma işlemi gerçekleştirilmiştir. Yazdırma işleminde PLA malzeme kullanılırken, nozul çapı 4 mm, yazdırma doluluk oranı %30, yazdırma hızı 41

mm/sn olarak belirlenmiştir. Parametre seçiminde 3B yazıcının lise düzeyinde ki eğitim kurumlarında uygulama örneklerinde genel olarak kullanılan yazdırma parametreleri seçilmiştir.

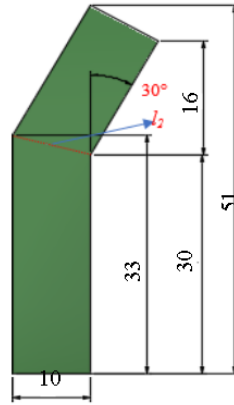
4.1.1. 5 eksen 3B yazıcıda ürün yazdırma

Repetier Host Cura modülünde dilimlenen ürün, ilk aşamada 3 eksen yazdırma işlemi gibi yazdırılmaktadır. Kod dosyasındaki G28 komutu ile tüm eksenler (X, Y ve Z) sıfır noktasına gönderilmektedir. M 104 ve S 220 komutları ile ekstrüder 220°C derece sıcaklığa ulaştıktan sonra yazdığımız G-kod dosyası çalışmaya başlamaktadır. P15330 komutu ile Arduino Nano kart devreye girmektedir. “P153301” komutu 1 numaralı motor 533 adım 0 yönünde döndür anlamına gelmektedir. Burada bizim tanımladığımız 1 numaralı motor C eksenini döndüren motordur. 533 adım karşılığı ise 30° açığa gelmektedir. “P153301” komutunun anlamı C eksenini yönünde motoru 30° açı ile döndür demektir. Denklem (5)’de 533 değerini bulan formül görülmektedir.

Eş. (5)’de n , 30° açığa denk gelen rakamsal değeri, 30 değeri elde etmek istediğimiz açıyı, 1.8 Nema 17 motor adım sayısını, 1,6 ise bobin başına düşen akım miktarını belirtmektedir. Döner tabladaki eksen hareketleri için tasarlanan, kayış kasnak sistemi motor torkunu 2:1 oranında artırdığı için eşitlik 2 ile çarpılmıştır. Çıkan değer en yakın tam sayı değeri olarak 533 değerine yuvarlanarak sonuç bulunmuştur.

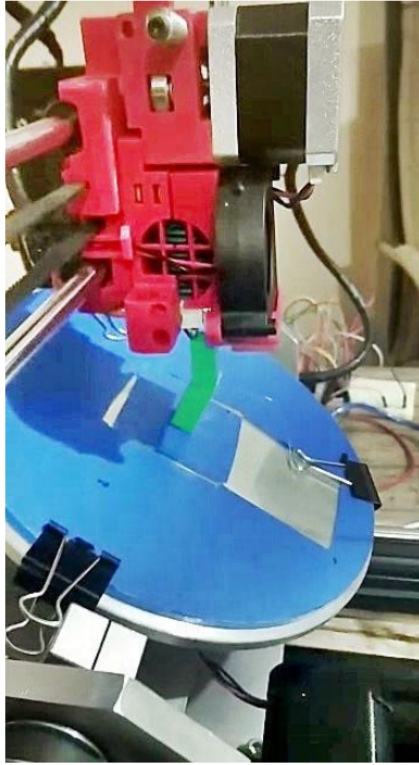
$$n = 2(30/1.8 * 1.6) = 533 \quad (5)$$

Şekil 12’de yazdırılan ürünün, ölçülendirilmesi gösterilmektedir. Şekilde l_2 noktasına kadar ürün X, Y ve Z eksenlerinde yazdırılmakta, l_2 noktasından sonra P153301 komutu ile C motoru devreye girerek, tabla 30° açı ile dönerek yazdırma işlemi devam etmektedir. l_2 noktasına kadar Arduino Atmega2560 kart devredeyken, l_2 noktasından sonra Arduino Nano kart devreye girmektedir.



Şekil 12. 5 eksen 3B yazıcıda yazdırılan ürün ölçüleri.

5 eksen 3B yazıcıda destek gerekli kısımlar yazdırılırken, döner tabla, Python dilinde yazılan komut satırları ile dönmektedir (Şekil 13). Python bu komutları kullanarak 5 eksen yazıcının G-kodlarını Arduino Nano karta göndermektedir. Böylece Arduino Nano kart döndürme işini gerçekleştirmektedir. Şekil 13’de Python dilinde yazılan komut satırları ve G-kodları gösterilmektedir.



```

elif (x [0] == "P"):
    print("Axis:")
    nano. write (bytes (x [1:],
'ASCII'))
    elif (x [0] == "W"):

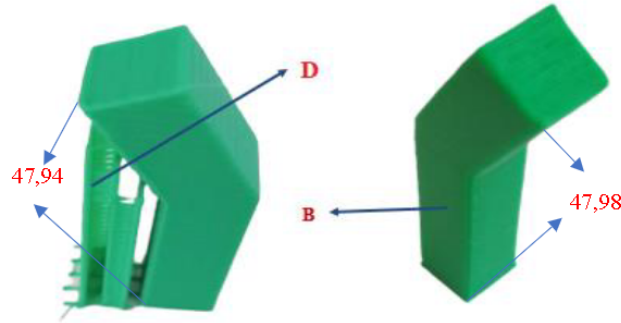
;5 axis rotation
P15330
; Center X
G0 X113.5
; Wait for rotation
W
G0 Y81.055 Z17.54
G92 Z0 Y101
; Second part of the part
M82; absolute extrusion mode

```

Şekil 13. Ürün yazdırma sonunda 5 eksen 3B yazıcı üzerindeki konumu.

4.2. Tartışma

Şekil 14’de 3 eksen ve 5 eksen yazdırma işlemi sonunda elde edilen ürünler gösterilmiştir. D ile gösterilen ürün 3 eksen 3B yazıcıda B ile gösterilen ürün 5 eksen 3B yazıcıda yazdırılmıştır. İki yazdırma içinde aynı parametreler ve aynı malzeme kullanılmıştır.



Şekil 14. 3 eksen ve 5 eksen yazıcılarda yazdırılan ürünler.

Yazdırılan ürünler incelendiğinde, 3 eksen yazıcıda yazılan ürünün yazdırma süresi 5 eksen yazıcıdan daha uzun sürmüştür. D ürünü toplamda, 25 dakika 23 saniye sürede yazdırırken, aynı parametreler kullanılarak B ürünü yazdırmak için bu süre 24 dakika 47 saniyedir.

Destek parçası temizlerken geçen süre ve ürün yüzeyinde meydana gelecek hasarlar dikkate alındığında hem zaman olarak hem de ürün kalitesi olarak 5 eksen 3B yazıcının performansının yüksek olduğu görülmüştür. Zamanla birlikte en önemli avantaj destek malzemesi temizlenirken meydana gelecek yüzeydeki hasarların meydana gelmemesidir. Yazdırma süresi açısından, 5 eksen yazdırma işleminin hissedilir derecede daha az zamanda tamamlandığı görülmektedir. Ayrıca yazdırılan ürün üzerinde yapılan ölçme sonucu Şekil 14’de görüldüğü gibi merdiven basamağı etkisinin nispeten önlendiği görülmektedir. Döner tablanın açılma hareketlerinde zamanı kısalttığı ve yazdırma işlemine olumlu katkı sağladığı belirlenmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada 5 eksen 3B yazıcı tasarımı ve prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. 5 eksen 3B yazıcı kontrol ünitesi için çift kart kullanılmaktadır. Arduino Atmega2560 kart X, Y ve Z eksenlerini kontrol ederken, Arduino Nano kart A ve C eksenlerini döndürmek için kullanılmaktadır. Arduino Nano kontrol kartı ile bilgisayar ile iletişim kurmasını sağlayan kodlar C++ programlama dili ile, sıcaklık ayarı ve eksenler arasındaki geçişi sağlayacak kodlar da Python programlama dili ile gerçekleştirilmiştir. Böylece destek gereken kısımlar yazılırken tabla döndüğü için destek malzemesi kullanılmadan yazdırma işlemi gerçekleştirilmektedir.

Çalışmanın sonucunda;

- 5 eksen yazdırma işleminde destek malzemesi kullanmadığı için daha kısa sürede ürün yazdırma işlemi gerçekleştirilmiştir.
- 5 eksen yazdırma işlemi ile 3 eksen yazdırma kıyaslandığında daha hasarsız yüzeylere sahip ürün elde edilmiştir.
- X, Y, Z eksenlerinden A ve C eksenlerine geçiş otomatik olarak sağlanmıştır.
- Nispeten merdiven basamağı etkisi ortadan kalkmıştır.

5 eksen 3B yazıcının geliştirilmesi için öneriler;

- Kullanıcı dostu bir sistem için otomatik kalibrasyon yapan bir yazılım geliştirilmesi,
- Nozıl ile yazdırma yüzeyi arasındaki mesafeyi otomatik olarak algılayabilen X eksenini için sensör yerleşimi,
- A eksenini için açılma hesap yapan bir alt sistem tasarlanarak, otomatik kalibrasyon sisteminin eklenmesi,
- Yapılan çalışma mekanik tasarımdır. Manuel kodlar ile 5 eksen çalıştırılmıştır. İlerde yapılacak çalışmalar için yerli bir 5 eksen dilimleyici yazılması olarak sıralanabilir.

KAYNAKLAR

1. Yıldız, A., “Endüstri 4.0 ve akıllı fabrikalar”, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Cilt:22, Sayı 2, Sayfa 546-556, 2018.
2. Çelik,İ., “Hızlı prototipleme teknolojileri ve uygulama alanları”, Dumlupınar Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü Dergisi, Cilt 31, Sayı 1, Sayfa 53-60, 2013.
3. STM., “Katmanlı imalat teknolojileri ve havacılık uygulamaları”, Sektör Değerlendirme Raporu, Ağustos, 2016.
4. Szykiedansa, K., Credo, W., “Mechanical properties of FDM and SLA low-cost 3-D prints, procedia engineering”, The 20th International conference: Machine modeling and simulations, vol 136, Issue 1, Pages 257 – 262, 2016.
5. Ermutur, M., “Hızlı Prototip ve Üretim Teknolojilerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, Sayfa 87-100, 2002.

6. Prince, D.J., "3D Printing: an industrial revolution", Journal of Electronic Resources in Medical Libraries, Vol. 11, Issue 1, Pages 39-45, 2014.
7. İnternet: 3D Printing From Scratch, "Types of 3D Printer", <http://3dprintingfromscratch.com/common>, March 18, 2020.
8. Ma, X.L., "Research on application of sla technology in the 3d printing technology", Applied mechanics and materials, 401-403 (2013).
9. Isa, M.A., "Multi-axis Additive Manufacturing and 3D Scanning of Free form Models by", Doctoral Thesis, Koç Universty, Graduate School Of Science And Engineering, İstanbul, Pages 6-110 (2018).
10. Duman, B., Kayacan, C., "Eklemeli imalatta kullanılan STL dosyalarının hataları ve onarım yöntemleri", 1. 3B Baskı Teknolojileri Sempozyumu, 5-7 Mayıs, İstanbul, 2016.
11. Özkan, D.Ç., "Hızlı prototipleme teknolojisinin gelişimi, çeşitleri ve imalat sektöründe sağladığı avantajlar", MMO, Mühendis ve Makine, Cilt 3, Sayı 1, Sayfa 34-41, 2019.
12. Anglada, M.V., Garcia, N.P., Crosa, P.B., "Directional adaptive surface triangulation." Computer Aided Geometric Design, Vol. 16, Issue 1, Pages 107-126, 1999.
13. Wang, D., Hassan, O, Morgan, K., Weatherill, N., "Enhanced remeshing from stl files with applications to surface grid generation", Commun. Numer. Meth. Engng, Vol. 23, Issue,1, Pages 227-239, 2007.
14. Szilvasi, M., Matyasi, G.Y., "Analysis of STL files", Mathematical and Computer Modelling, Vol. 38, Issue,1, Pages 945- 960, 2003.
15. Lai, J.Y., Lai, H.C., "Repairing triangular meshes for reverse engineering applications", Advances in Engineering Software, Vol. 37, Issue,1, Pages 667-683, 2006.
16. Marchandise, E., Piret, C., Remacle, J.F., "CAD and mesh repair with radial basis functions", Journal of Computational Physics, Vol. 23, Issue, 1, Pages 2376-2387, 2012.
17. Bi, F.L., Hu, Y., Chen, X.Y., Ma, Y., "Island hole automatic filling algorithm in triangular meshes", Applied Mechanics and Materials, Vol. 1, Issue, 1, Pages 3486-3489, 2013.
18. Liepa, P., "Filling holes in meshes", Proceedings of the 2003 Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Geometry processing", Vol 1, Issue, 1, Pages 200-205, 2003.
19. Hu, P., Wang, C., Li, B., Liu, M., "Filling holes in triangular meshes in engineering", Journal of Software, Vol. 7, Issue, 1, Pages 1141-148, 2012.
20. Nooruddin, W. C., Turk, F.S., "Simplification and repair of polygonal models using volumetric techniques", IEEE Transactions On Visualization and Computer Graphics, Vol. 9, Issue, 2, Pages 19-205, 2003.
21. Wang, M., Haiguang, Z., Qingx, H.Y., Herfried, L., "Research and implementation of a non-supporting 3D printing method based on 5-axis dynamic slice algorithm", Robot. Comput. Integr. Manuf., Vol. 57, Issue,1, Pages 496-505, 2019.
22. Asif, M., Lee, J.H., Lin, Y.P., "New photopolymer extrusion 5-axis 3D printer", Additive Manufacturing, Vol. 23, Issue, 1, Pages 355-361, 2018.
23. Keating, S., and N. Oxman., "Compound fabrication: a multi-functional robotic platform for digital design and fabrication", Robot. Comput. Integr. Manuf., Vol 29, Issue, 6, Pages 439-448, 2013.
24. Grutle, K. Q., "5 Axis 3D Printer", M. Sc. Thesis, Universty of Oslo, Department of Informatics, Norway, Pages 45-70, 2015.

25. Yerazunis, W.S., Barnwell III, J.C, Nikovski, D.N., “Strengthening abs, nylon, and polyester 3d printed parts by stress tensor aligned deposition paths and five-axis printing”, International Solid Freeform Fabrication Symposium, Cambridge, August, 2016.
26. Internet: ZHAW, “ZHAW Master Students develop novel 3D Printers”, <https://www.zhaw.ch/de/engineering/ueber-uns/news/news/eventnews/zhaw-masterstudenten-entwickeln-neuartigen-3d-drucker>, January 18, 2020.
27. Internet: 5X, “5 Axis Maker”, <http://www.5axismaker.com/5axis>, January 18, 2020.
28. Internet: Techogeek, “Hybrid 3D Printer Using 5-Axis Control”, <https://www.techandgeek.com/hybrid-3d-printer-using-5-axis-control>, January 10, 2020
29. Internet: Aniwaa, “5Axvshaper”, <https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/verashape-vshaper-5-axis> , January 10, 2020.
30. Internet: Hage3d 3d Printer 175x, “ Largest 5-Axis Gantry Material Extrusion Printer”, <https://hage3d.com/index.php/en/hage3d-3d-printer-175-x>, January 5, 2020.