

SEÇMELİ LAZER SİNERLEME TEZGÂHI İÇİN İMALAT YAZILIMI GELİŞTİRİLMESİ

Burhan DUMAN*, **M. Cengiz KAYACAN²**

Geliş Tarihi/ Received: 05.11.2016, Kabul tarihi/Accepted: 28.11.2016

Özet

Alışılmamış imalat yöntemlerinden biri olan eklemeli imalat teknikleri, 80'li yılların sonlarına doğru gelişmeye başlamıştır. Başlangıçta polimerlerden iletişim ve muayene araç gereçleri olarak prototip yapmak için kullanılmıştır. Daha sonra 90'lı yıllarda hızlı prototipleme sistemlerindeki gelişmelerle metal ve seramikten son kullanım direkt fonksiyonel parçalar üretilmeye başlanmıştır. Günümüzde de seçmeli lazer sinterleme/ergitme (SLS/SLE) makineleri ile birçok alanda çeşitli metal tozları kullanılarak klasik imalat yöntemleri ile imal edilemeyecek kadar karmaşık geometride olan parçaların çok hızlı bir şekilde imalatı yapılabilmektedir. Bu çalışmada, SLS/SLE tezgâhında ve diğer eklemeli imalat sistemlerinde kullanılacak bir yazılım geliştirilmiştir. Geliştirilen yazılım, araştırma-geliştirme (AR-GE) amaçlı üretilmiş olan bir Doğrudan Seçmeli Lazer Sinterleme tezgâhına uyarlanmıştır. Yazılım iki modülden oluşmaktadır. Birinci modül ile, STL (STeryoLitografi) dosya formatındaki katı modelin üç boyutlu (3B) görüntülenmesi, üçgen yüzey örgüsü boşluk kontrolü-tamiri ve modelin dilimlenmesi gerçekleştirilmiştir. İkinci modül ile de, birinci modülde dilimlenmiş modelin iki boyutlu (2B) dilimlerinin gösterimi, tabla üzerinde yerleşimi, farklı tarama desenlerinde tarama yollarının oluşturulması, bu tarama yollarındaki toplam lazer mesafesinin hesaplanması, seçilen tarama desenine ve lazer parametrelerine göre yakma işleminin yapılması, tezgah servo motorları hareketlerinin sağlanması gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen yazılım Eİ makineleri üretimi çalışmalarına ve SLS/SLE alanında yapılacak AR-GE faaliyetleri için altyapı oluşturmaya katkı sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli imalat, seçmeli lazer sinterleme (SLS), seçmeli lazer ergitme (SLE), STL dosya onarım, dilimleme, tarama yolu

DEVELOPMENT OF MANUFACTURING SOFTWARE FOR SELECTIVE LASER SINTERING MACHINE

Abstract

Additive Manufacturing (AM) techniques, one of the non-conventional manufacturing methods, first emerged in the late 1980s. At the beginning, it was used to make prototype from polymers as a tool for communication and inspection. Later in 1990s, advancements in the rapid prototyping systems paved the way for manufacture of end-use direct functional parts from metal and ceramic. Nowadays, selective laser sintering/melting (SLS/SLM) machines makes it possible for some parts which could not be manufactured through conventional methods due to their geometrical complexity, to be manufactured rapidly by using various metal powders in many areas. In this study, a software that will be able to be used in SLS/SLM bench and in other additive manufacturing system, has been developed. The software has been adapted to a Direct Selective Laser Sintering bench manufactured for research-development (R&D) purposes. The software consists of two modules. In the first module, the solid

*Süleyman Demirel Üniversitesi Uluborlu S.Karasoy MYO, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Isparta
E-posta: burhanduman@sdu.edu.tr

model in stereolithography (STL) file format was visualized as three dimensional (3D), its hole control and fix was made and it was sliced. In the second module, two dimensional (2D) slice of the model which was sliced in the first module was shown, it was replaced on a process table, scan path was created with different scan pattern, the total distance on that scan path was calculated, burning process was started according to scan pattern selected and laser parameters, bench servo motors movements were carried out. The software developed shall contribute to set up a substructure for manufacturing studies for AM machines and R&D activities to be held in SLS/SLM field.

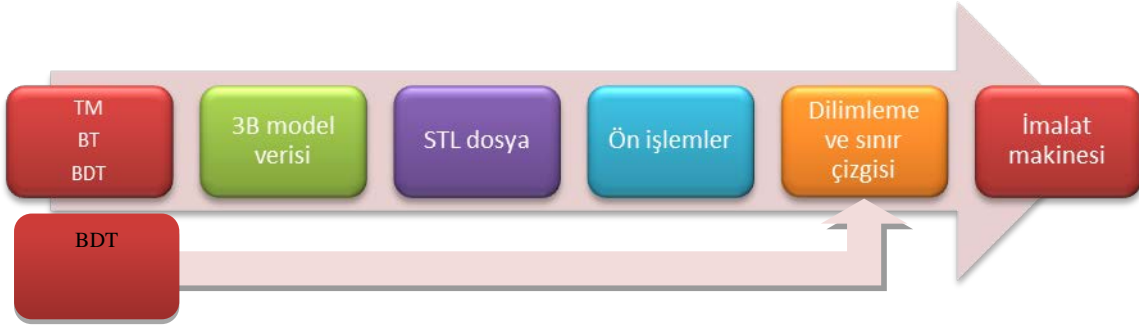
Key Words: Additive manufacturing,, selective laser sintering (SLS), selective laser melting (SLM), STL file repair, slicing, scan path

1. Giriş

Alışılmamış imalat yöntemlerinden biri olan eklemeli imalat (Eİ) teknikleri, 80'li yılların sonlarına doğru gelişmeye başlamıştır. Eklemeli imalat, üç boyutlu (3B) geometrik verileri kullanarak malzemenin bir biri ardına katman katman eklenmesiyle, karmaşık geometri fiziksel parçaların göreceli olarak hızlı bir şekilde imalatını gerçekleştiren bir imalat tekniğidir. Bu teknikte parçanın imalatında, bilgisayar destekli tasarım (BDT) programları ile çizim, tersine mühendislik (TM), bilgisayarlı tomografi (BT) gibi farklı yöntemlerle elde edilen 3B model verisi kullanılır. 3B katı model çok sayıda ince katmanlara ayrılır (dilimlenir) ve imalat sistemleri, parça tamamlanıncaya kadar her bir katmanı ardışık biçimde inşa etmek için bu geometrik veriyi kullanırlar (CustomPartNet, 2014; SME, 1970; Stratasys, 1989; Giannatsis ve Dedoussis, 2009; Çelik vd., 2013).

En yaygın kullanılan eklemeli imalat tekniklerinden birisi Seçmeli Lazer Sinterleme (SLS) ve Seçmeli Lazer Ergitme (SLE)' dir. Özellikle de metal parçaların eklemeli imalatında tercih edilen yöntemlerdendir. SLS ve SLE tekniğinde, ısıtıldığında kaynaşabilen toz halindeki bir inşa hammaddesi ince ve düzgün bir tabaka halinde yayılarak yüzeydeki seçilen bölgeler lazer ışınıyla taranır. Işının yüzeye çarptığı noktalarda oluşan sıcaklıkla toz malzeme kısmen eriyerek veya sinterlenerek temas halinde olduğu diğer toz taneleri ile kaynaşır. Bu işlemde sonra inşa zarfının tabanında bulunan platform, bir katman kalınlığı kadar aşağı çekilir. Her katmanın inşası için bu işlemler gerektiği kadar (katman sayısına) tekrarlandıktan sonra, inşa süresince doğal bir destek görevi üstlenmiş olan serbest tozlar fırça veya vakumlu emici ile manuel olarak temizlenerek imal edilen parça alınır (Deckard, 1989; King ve Tansey, 2002; Partee vd., 2006; Neğiş, 2014).

İmalatı düşünülen 3B katı model çoğu durumda doğrudan imalat makinesine gönderilmemektedir. 3B Model ilk olarak, eklemeli imalat standart arabirimi olan STL biçimli dosyaya dönüştürülür. Daha sonra, hata kontrolü ve onarımı, tablaya yerleşim ve inşa yönü, ihtiyaç halinde destek yapılarının oluşturulması gibi bazı ön işlemlere tabi tutulur. Ön işlemlerden geçirilen 3B model dilimlenerek (2B katmanlara ayrılarak) imalata hazır hale getirilir ve imalat makinesine gönderilir. Ayrıca, imalatı düşünülen 3B katı model STL dosya dönüşümü yapılmadan da dilimlenerek imalat makinesine gönderilebilmektedir (Şekil 1). İmalat makineleri, dilimlenerek elde edilmiş sınır çizgilerinden oluşan 2B geometrik veriyi kullanarak katman katman imalat işlemini gerçekleştirirler.



Şekil 1. Eklemeli imalat işlemi veri akışı

Eİ işlemleri için yazılımlar 3B tasarım yazılımları, eklemeli imalat yazılımları ve tezgâh kontrol yazılımları olmak üzere üç kategoriye ayrılabilir. Eİ işleminin model tasarımından sonraki önemli bir aşamasını Eİ yazılımları yerine getirmektedir. Katı modelden imalat makinesine gönderilmeye hazır imalat verisi (her bir katmanın sınır çizgilerini oluşturan 2B geometrik veri) oluşturmaya kadar olan bütün işlemler Eİ yazılımları tarafından gerçekleştirilmektedir. İmalat verisinden fiziksel parça imalatının Eİ makinesinde yapılmasını sağlayan yazılımlar da tezgâh kontrol yazılımlarıdır.

İmalat verisi oluşturmaya kadar olan aşamalar bütün Eİ teknolojilerinde hemen hemen aynıdır. Fakat imalat verisinden parçanın imalatına kadar olan aşamalar teknolojiler arasında farklılık göstermektedir. Her teknolojinin kendine has makine donanımı ve işleyişi bulunmaktadır. Bu nedenle süreç yazılımı Eİ teknolojilerinde farklılık göstermektedir.

Eİ yazılımları çoğunlukla STL dosya formatını kullanmaktadırlar. STL dosya formatı, bütün BDT formatları ile yüksek çözünürlüklü 3B yazdırma bağlantısı için defacto standardıdır (Stratasys, 1989; 3DSystems, 1986; Kai vd., 1997; Wikinetfabb, 2014). STL formatı modelin dış yüzeyini temsil eden sıralanmamış bir üçgen yüzey listesinden ibarettir. ASCII ve ikili (binary) olmak üzere iki tür STL dosya formatı vardır (Zhang vd., 2003). Bir STL dosyası, üçgen yüzeyleri oluşturan her üç vektör için belirtilen x, y, z koordinatları ve bir normal vektörle tanımlanır. STL dosya formatıyla çalışmanın; üç boyutlu BDT verilerinin basit bir şekilde temsil edilmesi, çoğu Eİ ve BDT sisteminde kullanılabilmesi ve geometrik şekillerin veri transferi için basit dosyalar sağlaması gibi birçok belirgin avantajları vardır (Özüğür, 2006).

BDT yazılımı ile modelin STL dosya oluşumunda veya daha sonra üçgen yüzeyler arasında deliklerin (boşlukların) oluşması, kötü kenarlar, özdeş üçgenler, üst üste binme, kesişme, kıvrımlanmalar-kırıksıklıklar ve ters çevrilmiş normaller gibi bazı hatalar oluşabilmektedir (Ito vd., 2002; Yarkınoğlu, 2007). Bu gibi durumlarda modelde olabilecek hatalar Eİ yazılımı tarafından kontrol edilir ve ihtiyaç durumuna göre onarımı yapılabilir.

Literatürde STL dosyalarındaki hataları onarmak için bazı farklılıklarla beraber bir birine benzer yöntemler kullanılmıştır. Wang vd. (2007), STL üçgenlemeden yeniden örgü için güçlü ve etkili olarak belirttikleri bir prosedür geliştirmişlerdir. Szilvasi ve Matyasi (2003), yüzey temsilindeki kusurları tarayan ve STL dosyadan polihedral veri yapısı inşası ile yaklaşık yüzey analizi yapan bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Başka bir çalışmada, lokal yüzey eğrilerinin yönlü davranışları hesaba katılarak daha hassas sınırlar temel alınmış ve

sonuçta az sayıda üçgen ile üçgenleme yapıldığı ifade edilmiştir. Kesilen yamalar ve kıvrımlı yüzeylerde daha iyi üçgenleme elde edildiği gösterilmiştir (Anglada vd., 1999).

BDT dosyalarında, yeniden üçgenlerle örme ve örgü tamiri için özel yaklaşım sunan bir çalışma ile boşluklar, terslenen normaller, üst üste binmeler ve T-birleşme gibi ciddi topolojik ve geometrik hataların tamir edildiği bildirilmiştir (Marchandise, 2012). Lai ve Lai (2006), bir üçgen model içinde var olabilecek hatalı yüzeyleri algılama ve ortadan kaldırmak için yaklaşım önermişlerdir. Bir algoritma ile bozulmaların, problemlı köşelerin, iç-kesişmelerin, tamamlanmamış bağlantıların ve tutarsız düzlem normallerinin algılanabildiği ve tüm bu hataların otomatik olarak ortadan kaldırılabilirdiği birkaç örnek ile gösterilmiştir. Liepa (2003), çalışmasında tanımladığı bir metotla, sınırı belirlenmiş üçgen yüzey örgüsünün yamanmasını ve yamayı çevreleyen üçgen yüzey örgüsünün yoğunluğunda ve şeklinde interpolasyon yapmıştır. Önerilen metot, sınır belirleme, boşluğun üçgenlenmesi, hassaslaştırma ve kaplama adımlarını içermektedir.

Kusursuz ya da onarımı yapılan STL dosya bir sonraki aşamada dilimlenerek, imalat makinelerinin kullanacağı 2B katman verileri elde edilir. Eİ verisi elde etmek için tasarlanan modelin dilimlenmesinde farklı yöntemler bulunmaktadır. Bu farklı yöntemler, imal edilecek parçada yüzey pürüzlülüğü, şekil doğruluğu gibi çıkış özelliklerinin en iyisini sağlamaya yönelik ortaya çıkmıştır. Çünkü imal edilen parçada, dilimleme işleminden kaynaklı bazı hatalar olabilmektedir. Bu hatalar, dilimleme işlemine alınacak 3B model verisinden veya her bir katman için belirtilen dilim kalınlığından kaynaklanmaktadır.

Modelin geometrisinden kaynaklanan en önemli dilimleme hatası merdiven basmağı etkisidir ve tamamen giderilememektedir. Merdiven basmağı etkisi hacimsel hatalara sebep olmakta ve imal edilmiş parça yüzeyi kötüleşmektedir. Basamaklı kenarların varlığı nedeniyle, dilimler BDT modelin tamamen dışında veya içinde olabilir. Bazı durumlarda da, BDT modelinin bir kısmında dilim kenarları içeride ve diğer kısmında dışarıda olabilir. Bu durum şekil bozulma denilen çevreleme sorununa yol açmaktadır (Pandey vd., 2003). Bir başka dilimleme problemi de, parçanın bazı özelliklerinin (kısmılarının) dilim kalınlığı sebebi ile göz ardı edilmiş olmasıdır. Bu durumda parçanın dilimleme ekseninde yer alan ve dilim kalınlığından daha ince detaylar imalat esnasında oluşturulamayacaktır (Matusik vd., 2015).

Bahsedilen bu olumsuzlukları gidermek için; doğrudan dilimleme (Kulkarni ve Dutta, 1996), tekbiçimli dilimleme (Liao ve Chiu, 2001), adaptif dilimleme (Dolenc ve Makela, 1994; Tyberg ve Bohn, 1998; Ma ve He, 1999), bölgeye dayalı adaptif dilimleme (Mani vd., 1999), eşit olmayan zirve yükseklikleri ile adaptif doğrudan (STEP dosyadan) dilimleme (Zhou vd., 2004), CSG katı model tekniğinden Dixel-tabanlı doğrudan dilimleme (Zhu ve Yu, 2001), yakın mesafe analizi kullanan dilimleme algoritması (Vatani vd., 2009) gibi çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda, kendi yöntemlerine özgü avantajlarla dilimlemedeki hataları minimuma indirecek sonuçların elde edildiği bildirilmiştir. Merdiven basmağı etkisi hatası katman (dilim) kalınlığının inceltmesi ile azalmakta fakat bu durum da çok fazla inşa zamanına gerektirmektedir (Pandey vd., 2003).

Eİ makineleri, dilimlenmiş verilerden oluşan sınır çizgileri arasındaki alanda belirlenen tarama desenine (yol planına) göre, eklemeli imalat yönteminin gerektirdiği işlemi yaparak (ergiterek harç yağma, lazer ile toz ergitme vd.) imalatı gerçekleştirir. SLS/SLE işleminde tarama desenini tarama yolları oluşturmaktadır. Tarama yolu; imalat esnasında lazer ışığının bir katmandaki toz üzerinde vektörel ilerleme hareketleridir (izlediği yoldur). Lazer ışığı toz üzerinde, imal edilecek 3B parçanın her bir diliminin sınır çizgileri arasında belirli yönlerde ve şekillerde gezdirilir.

SLS ve SLE için tarama yolu literatürde; tarama deseni, tarama yöntemi veya tarama stratejisi olarak isimlendirilmektedir. Yatay tarama, zig-zag tarama, fırça tarama, ızgara tarama, ada tarama gibi bir çok tarama deseni vardır. Belirtilen tarama desenleri, imal edilecek parçanın yoğunluğunu-gözenekliliğini, sinterleme hızını, yüzey kalitesini/yüzey pürüzlülüğünü, üretim etkinliğini, dayanımını ve hassasiyetini (boyut doğruluğu) artırmak/iyileştirmek (Khan ve Dickens, 2008; Kruth vd., 2009; Beal vd., 2006; Xie vd., 2005; Mumtaz vd., 2008; Zhang vd., 2008; Yasa vd., 2009; Simchi, 2006; Bertol vd., 2010); içteki artık ısıl gerilmeleri gidermek ve ısı yayılımı dolayısıyla parçada oluşacak büzülme, çarpıklık ve kıvrılma gibi kusurların üstesinden gelmek (Choi vd., 2009; Simchi ve Pohl, 2003; Nickel vd., 2001; Zhang vd., 2008; Mercelis ve Kruth, 2006; Liang ve Hongzan, 2006; Jhabvala, 2010), topplaşma etkisini ortadan kaldırmak, katmanlar arasındaki bağın iyi bir şekilde oluşmasını sağlamak, kenar etkisini, lazer markalama ve atlama zamanı gibi zaman gecikmelerini azaltmak için araştırılmış ve ortaya çıkmıştır (Yasa vd., 2009; Choi vd., 2009; Zhang vd., 2008; Jhabvala, 2010).

Çalışmada, laboratuvar tipi SLS/SLE tezgâhında imalat işlemini gerçekleştirebilecek komple bir eklemeli imalat yazılımının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Yazılım iki modülden oluşmaktadır. Birinci modül ile, STL dosya formatındaki katı modelin 3B görüntülenmesi, üçgen yüzey örgüsü boşluk kontrolü-tamiri ve modelin dilimlenmesi gerçekleştirilmektedir. İkinci modül ile de, birinci modülde dilimlenmiş modelin iki boyutlu (2B) dilimlerinin gösterimi, tabla üzerinde yerleşimi, farklı tarama desenlerinde tarama yollarının oluşturulması, belirlenen tarama desenine ve lazer parametrelerine göre yakma işleminin yapılması, tezgah servo motorları hareketlerinin kontrolü gerçekleştirilmektedir.

Eİ alanında çeşitli Eİ ve STL görüntüleme yazılımları bulunmaktadır. Bunların bir kısmı lisanslama ile ticari olarak satılmakta, bir kısmı ise ücretsiz sunulmaktadır. En önde gelen ticari yazılımlar Materialise Magic, NetFabb Professional, 3Data Expert yazılımlarıdır (3ders, 2016; 3dprintingindustry, 2016). Ultimaker Cura, ReplicatorG, Simplify3D, Slic3r gibi yazılımlar ücretsiz olarak elde edilebilmektedir (3dprintingfb, 2016). Bahsedilen yazılımlar imalat verisi oluşturmada kullanılabilen fakat SLS/SLE tezgâhı için tezgâh kontrol yazılımı olarak kullanılamamaktadır. SLS/SLE tezgâhları/makineleri için süreç yazılımları kendi tezgâh donanımlarına uygun olarak üretici firmalar tarafından sağlanmakta ve kendine özgü olmaktadır.

Önceki çalışmalarda; STL dosya kusurlarının onarılması, farklı dilimleme algoritmaları, Eİ'nin farklı teknolojileri için veri oluşturma ile ilgili konulardaki yazılımlara (Bircan, 2008; 3dprintingfb, 2016) rastlanmaktadır. Geliştirilen yazılım, hem Eİ verisi oluşturma yazılımını hem de SLS/SLE işlemi süreç yazılımını içermesi açısından bütüncül bir yaklaşımla önceki çalışmalardan farklılık göstermektedir.

AR-GE amaçlı SLS/SLE tezgâh tasarımı ve geliştirilmesi kurumun çalışmaları arasında yer aldığı için de böyle bir yazılımın geliştirilmesi kaçınılmaz bir zorunluluktur.

2. Materyal ve Metot

Çalışma kapsamında geliştirilen yazılım, AR-GE amaçlı üretilmiş olan 200W fiber lazer üniteye sahip Doğrudan Seçmeli Lazer Sinterleme (DLS) tezgâhı için düşünülmüş ve bu tezgâha uyarlanmıştır.

Yazılım geliştirmede C# programlama dili kullanılmıştır. Geliştirilen yazılımın 3B ve 2B grafik kullanıcı ara yüzü ve alt yapısı XAML tabanlı WPF platformu ile oluşturulmuştur.

2.1. Metot

Geliştirilen yazılım modül yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Görüntüleme ve imalat modülü olmak üzere iki modül bulunmaktadır. Görüntüleme modülü parçaların üç boyutlu ve katı model olarak görüntülenmesi, kayıp üçgen yüzeylerin (boşlukların) otomatik onarılması, modelin dilimlenmesi işlemlerini yerine getirmektedir. İmalat modülü ile modelin dilim verilerinin iki boyutlu gösterimi, çalışma alanında parçanın yerleşimi, dilimler için farklı desenlerde tarama yolu oluşturulması ve gösterimi, lazer ve galvano birimleri parametre ayarı, tezgâh donanımlarının kontrolü ve çalıştırılması gerçekleştirilmektedir.

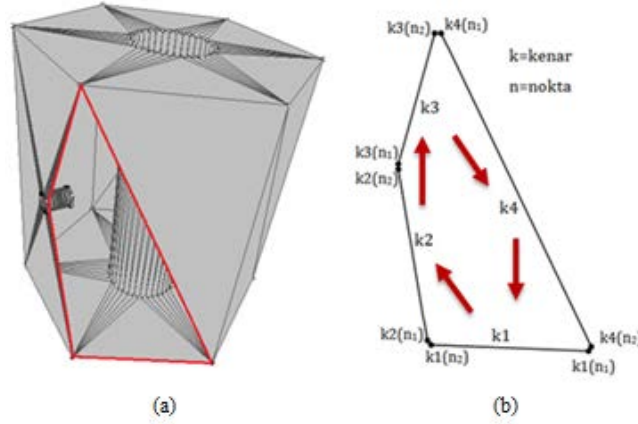
2.1.1. STL dosya onarımı

Çalışmada ilk olarak, üçgenleştirilmiş yüzeydeki boşlukların tespiti için bir algoritma çikartılmıştır. Algoritmanın birinci aşamasında herhangi bir üçgen yüzey noktası (vertex) değerinin aynısından en az üç adet olup olmadığına bakılır. Eğer aynı nokta değeri üçten az ise yazılım burada boşluğun (kayıp üçgen yüzeyin) olduğunu, yüzeyin tam olarak kapalı olmadığını tanımlar.

Algoritmanın ikinci aşamasında, bütün üçgen yüzeylerin kenarları tek tek ele alınarak komşu kenar (aynı kenardan) olup olmadığına bakılır. Eğer katı modelde boşluk yok ise veya katı modelden üçgen yüzeylere dönüştürmede hata yok ise katı modelin üçgen yüzeylerinin bütün kenarlarının en az bir adet komşuluğunun olması gerekmektedir. Fakat komşusu olmayan kenar var ise orada mutlaka bir problem vardır. Problemin olduğu durumda algoritma komşuluğu olmayan üçgen yüzey numaralarını bir listeye kaydeder. Listeye kaydedilen üçgen yüzeyler, yama yapılacak bölüm olarak adlandırılır.

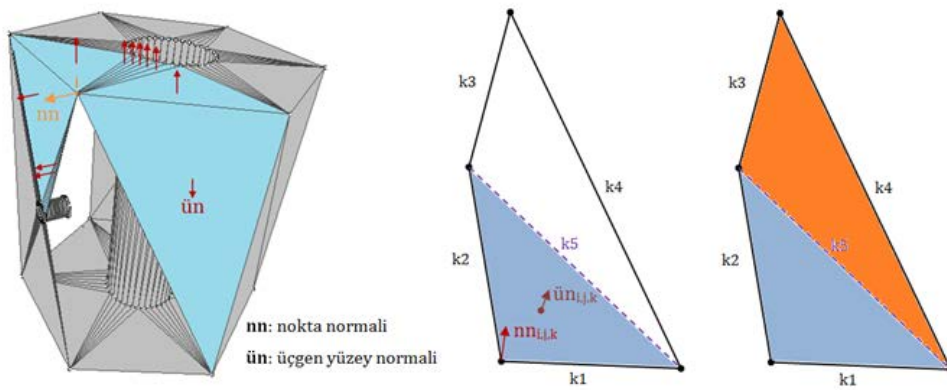
STL dosyanın hata kontrolünün yapılması ile tespit edilen boşlukların onarılması, belirlenen sınırlar dâhilinde üçgenler oluşturmak (yama yapmak) suretiyle yapılmaktadır. Yama yapma yöntemi maddeler halinde açıklanmıştır.

- Daha önce tespit edilen ve komşuluğu bulunmayan üçgen yüzey kenarları (Şekil 2a) listesinden rastgele bir kenar alınır ve kenar listesinden ele alınan kenarın ikinci noktasının koordinat değerlerine eşit olan başka bir kenarın birinci noktası aranır. Eşleşen kenar bulunduğu o kenarın ikinci noktası ile aynı değere sahip başka bir kenarın birinci noktası aranır. Belirtilen işlemlere, ilk defa ele alınan kenarın birinci noktası ile aranan diğer kenarın ikinci noktası eşit olana kadar devam edilir. Böylece kenarlar sıralanmış ve kapalı bir çizgi elde edilmiş olur (Şekil 2b). Uzayda kapalı bir çizgi şeklini oluşturan sıralı kenarlar ayrı bir listede tutulur.



Şekil 2. Boşluklu bölgede kapalı bir çizgi elde edilmesi a) modeldeki boşluk kusuru, b) üçgen yüzey kenarlarının birleştirilmesi (bütün n1 ve n2 noktaları aynı noktalardır)

- Sıralı kenarlar listesindeki bütün noktaların normaleri hesaplanır. Hesaplama, noktanın ortak olduğu bütün üçgen yüzey normalerinin ortalaması alınarak yapılmaktadır. Şekil 3'de "i" noktası renkli üçgen yüzeylerin tümünün ortak noktasıdır.
- Sıralı kenar listesinden ilk kenar (k1) ile ikinci kenar (k2, ortak noktası olan iki kenar) ele alınarak, ortak olmayan diğer noktaları ile yeni bir kenar tanımlanarak (k5) üçgen elde edilir (Şekil 3). Elde edilen üçgenin normali ($\bar{u}_{i,j,k}$) hesaplanır ve ortak noktanın normal vektörü ($\bar{n}_{i,j,k}$) ile "nokta çarpım" ($\bar{u}_{i,j,k} \cdot \bar{n}_{i,j,k}$) yapılır. Bunun dışında, ele alınan iki kenar arasındaki açı (θ) kosinüs teoremi ile hesaplatılır. Eğer $\bar{u}_{i,j,k} \cdot \bar{n}_{i,j,k} > 0$ ise ve $\alpha_{min} > \theta > \alpha_{max}$ ise o üçgen doğru bir üçgen olarak değerlendirilerek (Hu vd., 2012) üçgen yüzey listesine kaydedilir. Aynı zamanda k1 ve k2 kenarları sıralı kenar listesinden silinir ve yeni oluşan k5 kenarı sıralı listenin sonuna eklenir. Burada α_{min} ve α_{max} istenilen üçgen boyutu için yazılıma girilecek en düşük ve en yüksek açı değerlerini ifade etmektedir.



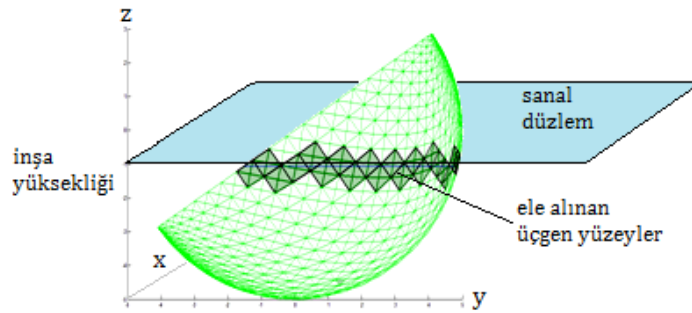
Şekil 3. Boşluklu bölgenin üçgenleştirilmesi (üçgen yüzey oluşumu)

Eğer $\bar{u}_{i,j,k} \cdot \bar{n}_{i,j,k} < 0$ ise elde edilen üçgen yanlış üçgen olarak tanımlanır ve işleme listedeki bir sonraki ardışık kenarlardan devam edilir. Belirtilen işlemler, kenar listesindeki eleman sayısı "üç" olduğunda sonlandırılır. Kenar sayısı üç olduğunda bu kenarlar doğrudan bir üçgen yüzey oluşumu için kullanılır ve işlem tamamlanır. Boşluklu tek bölüm

için yapılan yukarıdaki işlemler, eğer birden fazla bölüm var ise, bölümlerin tamamı için uygulanarak STL dosyadaki boşluk kusurları yamanmış olur. Onarım işleminde aynı üçgen numarasına ait iki kenar karşılaştırılmaz.

2.1.2 Dilimleme işlemi ve sınır çizgisi (kontur) oluşturma

Literatürde farklı dilimleme yöntemleri bulunmaktadır. Çalışmada bu yöntemlerden biri olan STL dosyadan tek biçimli dilimleme yöntemi (Vatani vd., 2009) benimsenmiştir. Bu yöntem belirlenen bir sabit katman kalınlığına ve belli bir grup üçgen yüzeyle işlem yapılmasına dayanmaktadır. Dilimleme işlemi hızlandırmak için de bütün üçgen yüzeylerin ele alınarak düzlem (ışın) ile kesişimlerinin hesaplanması yerine, inşa yüksekliğinin bir üçgen yüzeyin minimum ve maksimum z değeri arasında olan üçgen yüzeyler ile kesişim hesabı yapılmaktadır (Şekil 4). Her bir katman düzlemi ile üçgen yüzey kesişimlerinden elde edilen noktaların birbiri ile birleştirilerek kapatılmasından sınır çizgileri (çevre çizgileri) oluşturulmaktadır. Sınır çizgisi oluşturulmasında kafa-kuyruk yaklaşımı kullanılmıştır.



Şekil 4. İnşa yüksekliğine yakın mesafe üçgenlerin ele alınması (Vatani vd., 2009)

Üçgen yüzeyler ile sanal dilimleme düzlemi kesişimi farklı noktalarda olabilmektedir. Bu kesişim noktaları Eşitlik 1 ile elde edilebilir.

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{z - z_1}{z_2 - z_1} \quad (1)$$

Bu eşitlikte x, y, z kesişim noktaları, x_1 , y_1 , z_1 ve x_2 , y_2 , z_2 üçgen yüzey kenarının başlangıç ve bitiş noktalarıdır ve 2 nolu eşitlik sağlanmalıdır.

$$z_{v1} \leq z_{düzlem} \leq z_{v2} \quad (2)$$

Burada, z_{v1} kesişim kenarının 1. noktasının z değeri, z_{v2} kesişim kenarının 2. noktasının z değeri, $z_{düzlem}$ düzlemin z değeridir.

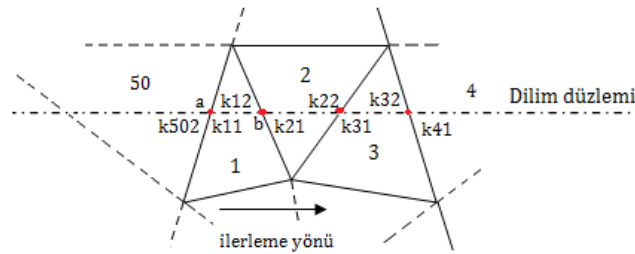
Belirlenen katman sayısı veya katman kalınlığı parametresine göre $z=0$ dan başlayarak katman kalınlığı miktarınca artırılarak en yüksek z değerine kadar sanal düzlemler (dilimleme düzlemleri) oluşturulur. Üçgen yüzeyler, üçgen yüzey dizisinden sıra ile okunarak noktalarının en düşük ve en yüksek z değeri bulunur. İlk sanal düzlem yüksekliği (z değeri) üçgen yüzey noktalarının z değeri arasında kalıyor ise iki doğru kesişim formülü uygulanarak kesişim nokta değerleri (x,y,z) bulunur. Bulunan nokta değerleri katman numarasına göre sınır çizgisi oluşturmak için bir diziye kaydedilir ve ayrıca ikili dosyaya yazılır. Bütün

yüzeyle okunduktan sonra katman yüksekliği z değeri artırılarak bir sonraki katmana (sanal düzleme) geçilir. Bu işlemler inşa yüksekliğine kadar tekrar edilir ve z değeri en yükseğe ulaşınca sonlandırılır. İşlemler tamamlandığında her bir katman için kesişim nokta değerleri hafızada ve “*.bin” uzantılı ikili dosyada tutulmaktadır. Elde edilen kesişim noktaları daha sonra katmanların sınır (çevre) çizgilerini oluşturmak için kullanılmıştır.

Sınır çizgisi oluşturma işlemi

Sınır çizgisi, her bir katmandaki düzlem ile üçgen yüzey kesişim noktalarının saat yönünde ya da saat yönünün tersi yönünde birbiri ile birleştirilerek kapatılmasından oluşmaktadır. Katı modelin geometrik özelliğine bağlı olarak birden fazla sınır çizgisi oluşabilmektedir. Çoklu sınır çizgisi olması durumunda genellikle en dışta, diğer sınır çizgilerini kapsayan bir sınır çizgisi bulunmaktadır. Her bir katman için elde edilen kesişim noktaları aynı zamanda sınır çizgisini oluşturan noktalardır.

Sınır çizgisi oluşturmada komşu üçgenlerdeki kesişim noktalarını bir biri ardına dizme (kafakuyruk) yöntemi kullanılmıştır. Şekil 5' de k_{11} noktası, 1 nolu üçgen yüzeyin düzlemle kesiştiği birinci nokta (a noktası)'dır. Diğer nokta (b noktası) ise k_{12} 'dir. k_{12} noktası 2 nolu üçgenin birinci kesişim noktası k_{21} ile aynıdır. Bunun benzeri 2 nolu üçgenin ikinci kesişim noktası k_{22} , 3 nolu üçgenin birinci kesişim noktası k_{31} ile aynıdır. Sanal düzlemin kestiği bütün komşu üçgenlerde benzer durum söz konusudur. Aynı kesişim noktası değerlerinden faydalanılarak komşu üçgenlerdeki kesişim noktaları bir birini takip edecek şekilde sıralanır ve sınır çizgisi oluşturulur.



Şekil 5. Sınır çizgisi oluşturmada düzlem ile üçgen kesişimleri

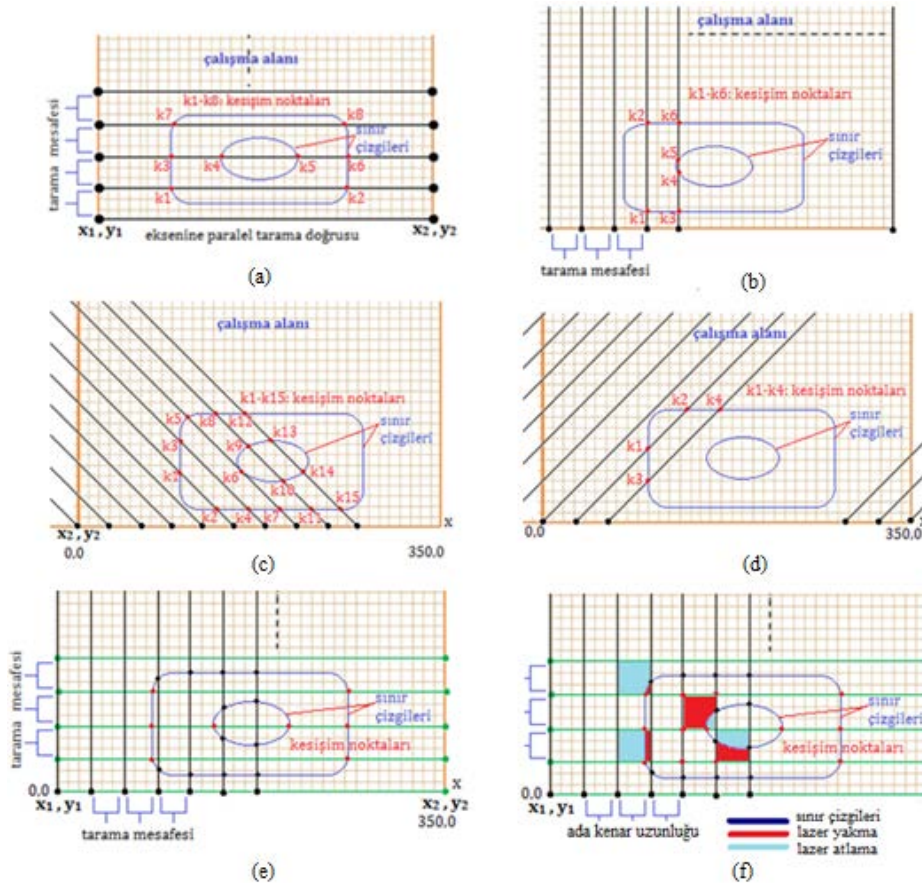
2.1.3 Tarama Yolu Oluşturma

Tarama yolu, imalat esnasında bir katmanda lazer ışınının nereden nereye yakma yapacağını (hareket edeceğini) tanımlamaktadır. Tarama yolu, sınır çizgisi içerisinde kalan alanlar için oluşturulmakla birlikte seçmeli olarak sınır çizgisi üzerinde de oluşturulabilmektedir.

Tarama yolu oluşturmak için sınır çizgileri ile X-Y düzlemi boyunca belirlenen sanal çizgilerin kesişimlerine bakılır. Sanal çizgiler tanımlanan aralıklarla (tarama mesafesi), çalışma alanını (tezgah iş tablası boyutlarına göre belirlenmiş 340x340mm düzlem) tarar. Tarama sırasında, söz konusu katmandaki modelin/parçanın sınır çizgileri ile sanal tarama çizgilerinin kesişme durumu iki doğru kesişim formülüne göre incelenir ve bulunan kesişim koordinatları (x ve y) depolanır.

Yatay tarama için tarama yolu; çalışma alanının tamamının tarama mesafesi kadar aralıklarla x eksenine paralel çizgilerle taranması ile oluşturulur (Şekil 6a). Düşey tarama için ise çalışma alanı tarama mesafesi kadar aralıklarla y eksenine paralel çizgilerle taranır (Şekil 6b). Sağa ve sola açılı tarama yönteminde çalışma alanı, x eksenine $+45^{\circ}$ ve -45° açı yapan birbirine paralel tarama doğruları ile taranır (Şekil 6c,d). Izgara tarama yöntemi için tarama yolu oluşturulmasında da çalışma alanı ilk olarak yatay yönde ve daha sonra da düşey yönde birbirine paralel çizgilerle taranır (Şekil 6e). Belirtilen tarama yöntemlerinde, bir katmanda tarama çizgileri ile sınır çizgileri kesişimleri o katman için tarama yolu koordinatlarını oluşturur. Aynı işlemler her katman için tekrar edilir.

Ada tarama yönteminde tarama yolunun oluşturulması, sınır çizgileri ile yatay tarama çizgilerinin ve sıralı olmayan adacıklar (kareler) halinde tarama esasına dayanmaktadır (Şekil 6f). İlk olarak, üretilecek parçanın maksimum x ve y değerleri ile ada kenar uzunluğu ele alınarak x ve y düzleminde aynı zamanda toplamda kaç adet ada(kare) oluşturulacağı hesaplanmaktadır. Rastgele bir sayı üretilerek o sayının hangi adayı (kareyi) işaret ettiği bulunur. İşaret edilen adanın (karenin) alt ve üst köşe koordinatlarına göre tarama çizgileri koordinatları yatay taramada olduğu gibi hesaplanır. Bu işlemler sıra ile bütün katmanlar için tekrar edilerek kesişim nokta koordinatları katman indisi ile beraber depolanır.



Şekil 6. Tarama yöntemleri a) yatay tarama, b) düşey tarama, c) sola açılı tarama, d) sağa açılı tarama, e) ızgara tarama, f) ada tarama

2.1.4 Lazer ile yakma/ergitme işlemi

Lazer üniteye, geometrik alanın lazer ışını ile taranarak yakılması işlemi vektör komutları kullanılarak yaptırılmaktadır. Bütün katmanlar için kesişim noktaları bulunduktan sonra

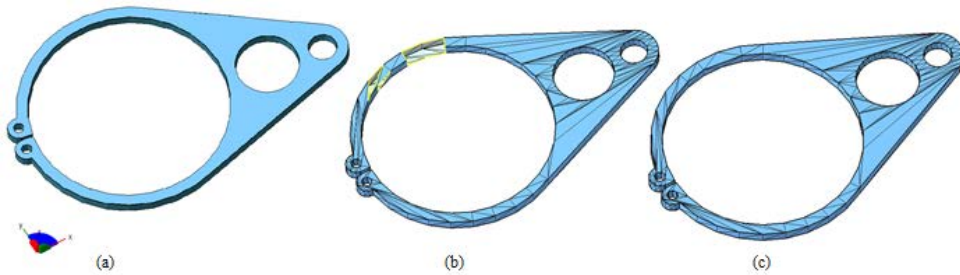
yakma işlemi için gerekli olan tarama yolu koordinatları elde edilmiş olur. Elde edilen koordinatlardan tek-çift kuralına göre katı bölge tespiti yapılarak daha sonra bir katmanda lazer ile yakma ya da atlama yapılmasına karar vermek için kullanılır. Katı bölgeler lazer ışını ile yakmanın yapılacağı yerlerdir ve bu bölgelerde lazer ışını açılır, boş bölgelerde ise lazer ışını kapatılır.

3. Araştırma Bulguları

Yazılımda imalat verisinin hazırlanması sırası ile STL formatındaki 3B modelin hata kontrolü ve onarımı, dilimleme, sınır çizgisi oluşturma, lazer ışın tarama yolu oluşturma şeklinde gerçekleşmektedir. Yazılımda geliştirilen algoritmaların çalıştırılması sonucunda elde edilen bulgular bu bölümde verilmiştir.

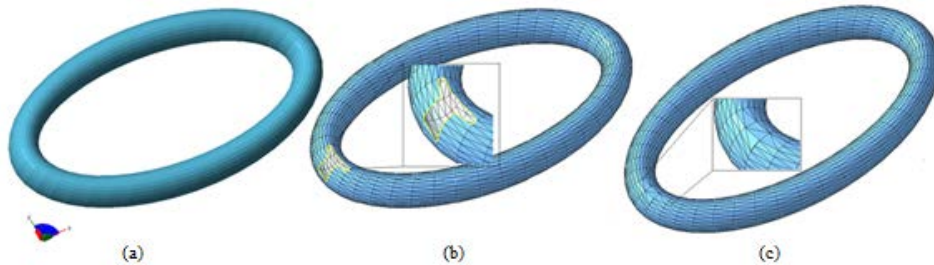
3.1. STL dosya hata kontrolü ve onarımı

Çalışmada STL dosya hata (boşluk) kontrolü ve onarımı için geliştirilen algoritma, farklı geometrilerdeki modeller için sınanmıştır. Elde edilen sonuçlar şekil olarak verilmiştir. Şekil 7a' da gösterilen kahve bardağı tutucusu modelinde birden fazla boşluk oluşturulmuş (Şekil 7b) ve algoritmanın çalışması sonucunda modelin yama yapılmış hali Şekil 7c' de gösterilmiştir.



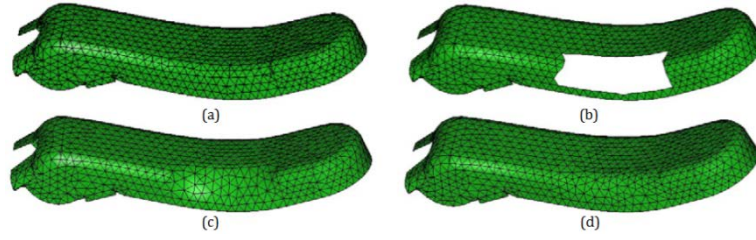
Şekil 7. Test edilen kahve bardağı tutucusu a) katı modeli, b) boşluk oluşturulmuş ve c) yama yapılmış hali

Bir başka test modelinde (Şekil 8a), oval kısımda boşluk oluşturulmuş (Şekil 8b) ve algoritmanın çalışması sonucunda modelin yama yapılmış hali Şekil 8c' de gösterilmiştir.



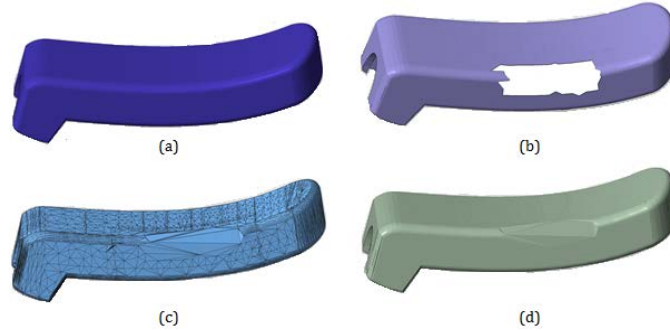
Şekil 8. Test edilen elipsoid torus a) katı modeli, b) boşluk oluşturulmuş ve c) yama yapılmış hali

Test işlemlerinden edilen sonuçlara göre boşluk tespit ve yama yapma algoritmalarının farklı geometriye sahip modellerde (köşeli, oval) doğru çalıştığı görülmüştür. Fakat yuvarlak geometriye sahip modellerde geometrik şekil doğruluğunun tam olarak sağlanması garanti edilememektedir. Literatürde geometrik şekil doğruluğunun sağlandığı bir çalışmada (Hu vd., 2012), yama bölgesinde yama işleminden sonra oluşan üçgenler tekrar farklı bir üçgenleştirme ile iyileştirme yapılarak elde edilmiş ve bi-leteral filtre uygulanmıştır. Belirtilen çalışmada geliştirilen metot karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir (Şekil 9). Şekil 9a’ da test edilen model ve Şekil 9b’ de ise modelde oluşturulan boşluk gösterilmiştir. Liepa (2003)’ nin metodu ile yama işlemi sonucunda (Şekil 9c) geometrik şekil doğruluğu tam olarak sağlanamamakta fakat Hu vd. (2012)’ nin metodu ile yama işlemi sonucunda (Şekil 9d) geometrik şekil doğruluğu sağlanmaktadır.



Şekil 9. Yama yapma işlemi sonucu a) test edilen model, b) boşluk oluşturulmuş hali, c) Liepa (2003) ’nin metodu ile yama işlemi, d) Hu vd. (2012) ’nin metodu ile yama işlemi

Çalışmadaki boşluk tespit ve yama yapma işlemi, Hu vd. (2012)’nin çalışmalarındaki test modeline benzer bir model için yapılmıştır. Model (Şekil 10a) kıvrım noktasında boşluk oluşturulmuş (Şekil 10b) ve daha sonra yazılım tarafından boşluk kontrolü yaptırılarak yama yapma işlemi gerçekleştirilmiştir. İşlem sonucunda Şekil 10c’deki üçgenleme görüntüsü ve Şekil 10d’deki katı model görüntüsü elde edilmiştir.



Şekil 10. Geliştirilen yazılım ile yama yapma işlemi sonucu a) test modeli, b) boşluk oluşturulmuş hali, c) yama işlemi sonucu üçgen yüzey görünümü ve d) katı model görünümü

Çalışmada gerçekleştirilen yama algoritması ile yama işlemi gerçekleştirilebilmekte ve bunun sonucunda geometrik şekil doğruluğuna önemli derecede yaklaşılmaktadır. Hu vd. (2012)’nin geliştirdikleri metot ile yama işleminde, ada şeklinde meydana gelen boşluklar ve iki ayrı boşluğun ortak bir noktaya sahip olduğu durumlar göz önünde bulundurulmamıştır.

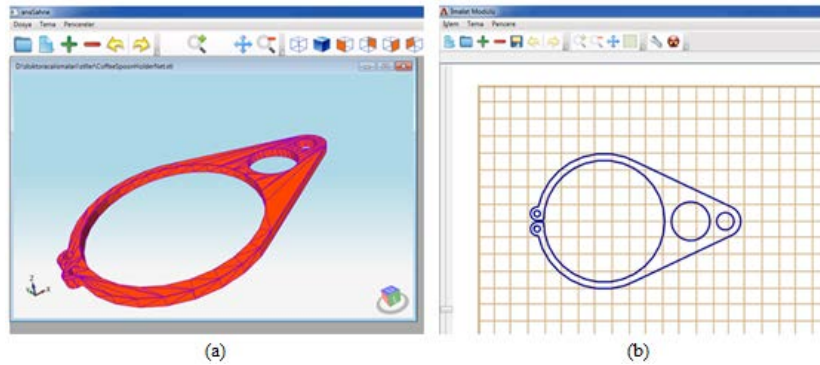
Çalışmada gerçekleştirilen yama algoritmasında, ortak noktaya sahip birden fazla boşlukta üçgenleştirme ile yama yapılabilmektedir.

3.2 Dilimleme ve sınır çizgisi oluşturma

Çalışmada gerçekleştirilen yazılımda, 3B modelin dilimleme işlemi görüntüleme modülünde ve sınır çizgisi oluşturma imalat modülünde gerçekleştirilmiştir. Dilimleme algoritması, “tek biçimli dilimleme” olarak adlandırılan sabit katman kalınlığına göre çalışmaktadır. Sabit katman kalınlığı, kullanıcıdan arayüz vasıtası ile alınırken motor adım mesafesi ve toz tanecik boyutu değerlerinin girilmesi ön koşuldur. Belirlenen katman kalınlığında imalat işlemin uygulanabilirliğinin olması için, donanımsal kısıtlamalar ve toz karakteristiği sebebi ile belirtilen değerlerin göz önünde bulundurulması mecburi bir durumdur.

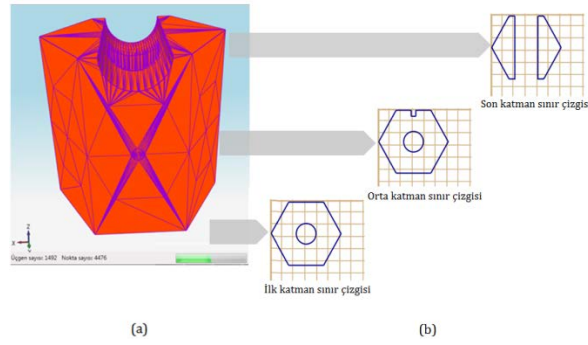
Algoritma, arayüze parametre olarak girilen dilim kalınlığını toz tanecik boyutundan büyük olması ve motor adım mesafesinin katları olması gerekliliğini denetler. Aksi durumda kullanıcı uyarılarak şartlara uygun yeni değer girilmesi istenir. Dilim kalınlığı doğru olarak girildikten sonra belirtilen aralıklarla dilimleme işlemi gerçekleştirilir. Dilimleme algoritması birden çok modelde test edilmiş ve başarılı sonuçlara ulaşılmıştır.

Ele alınan bir test modeli (Şekil 11a), motor adım mesafesi değeri 5, toz tanecik boyutu değeri 50 ve dilim (katman) kalınlığı 50 mikron girilerek dilimlenmiştir. İmalat modülüne dilimlenmiş dosya aktarılmış ve ilk katmanın sınır çizgileri görüntüsü verilmiştir (Şekil 11b).



Şekil 11. Model A dilimleme işlemi sonucu a) dilimlenecek test modeli, b) dilimlenmiş modelin ilk katman sınır çizgileri görüntüsü

Benzer şekilde farklı bir test modeli (Şekil 12a), dilimlenerek imalat modülüne aktarılmış ve üç farklı katmanın sınır çizgileri görüntüsü verilmiştir (Şekil 12b).

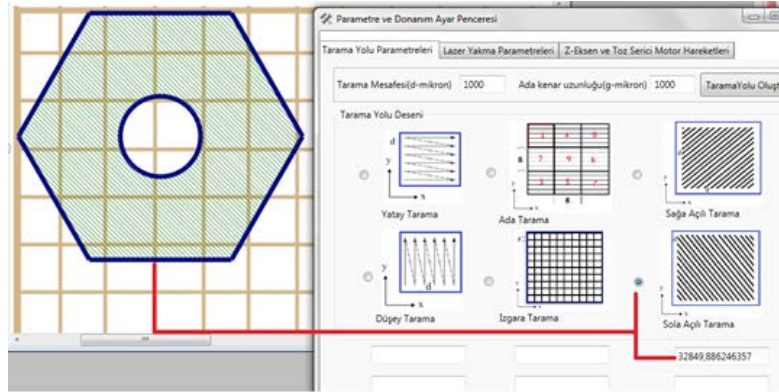


Şekil 12. Model B dilimleme işlemi sonucu a) dilimlenecek test modeli, b) dilimlenmiş modelin katman sınır çizgileri görüntüleri

3.3 Tarama yolu gösterimi

Yazılımda tarama desenini seçilmesi ve tarama yolunun oluşturulması, imalat modülünden gerçekleştirilmektedir. Tarama Yolu Parametreleri ekranında, imal edilecek parça/parçaların her bir katmanı için seçilen bir tarama desenine göre lazer tarama yolları oluşturulmaktadır. Ayrıca seçilen bir tarama yolu için lazerin kat edeceği mesafe mikron cinsinden hesaplanmaktadır. Burada belirlenmesi gereken parametreler *tarama mesafesi* ve *tarama deseni*' dir. Eğer ada tarama yapılacak ise bir adanın kenar uzunluğu da belirtilmelidir.

İş tablasında bulunan parça veya parçalar için tarama deseni seçildiğinde ve belirlenen tarama mesafesine göre tarama yolu oluşturulduğunda programda oluşturulan tarama yolları yeşil çizgilerle simüle edilmiştir (Şekil 13).



Şekil 13. Sola açılı tarama yolu oluşturulması ara yüz gösterimi

4. Sonuç

Çalışmada, Eİ' nin bir yöntemi olan SLS/SLE nin tasarımdan sonraki tüm aşamalarını bütün olarak yerine getirebilecek, geliştirmeye açık, modüler, kullanımı kolay bir Eİ yazılımı geliştirilmiştir. Yazılım, temelinde SLS/SLE işlemi için geliştirilmiş olsa da diğer Eİ yöntemleri için de uyarlanabilir niteliktedir.

Geliştirilen yazılım, katı modelin STL dosyasını okuyarak ekranda üç boyutlu olarak değişik bakış açılarıyla gösterebilmektedir. STL dosya biçiminde yazılıma aktarılan modeldeki boşluk

ve ters üçgen yüzey hatalarının olup olmadığını tespit edilebilmektedir. Tespit edilen boşluklar üçgenleştirme ile yama yapılabilir. Yama yapma işlemi, farklı modellerde oluşturulan boşluklarla test edilmiş ve boşlukların üçgenler ile kapatılmasında başarılı sonuçlar alınmıştır. Çalışmada gerçekleştirilen yama algoritması, iki ayrı boşluğun ortak bir noktaya sahip olduğu birden fazla boşlukta üçgenleştirme ile yama yapabilmektedir.

Geliştirilen yazılım, hatasız modeli veya hataları onarılmış olan modeli z-ekseni boyunca, belirlenen değerlerde aynı aralıklarla (tek biçimli) dilimleme yaparak katman sınır çizgilerini başarılı bir şekilde oluşturabilmektedir. Her bir katman (dilim) için sınır çizgileri içerisindeki yakma yapılacak alanlarda, lazer ışık tarama yollarını farklı desenlerde çıkartabilmektedir. Her bir katman için lazer tarama yolu mesafesinin hesaplanabiliyor olması, imalat zamanı açısından en uygun tarama deseninin seçilmesinde yol gösterici olacaktır.

Yazılımın, DMLS tezgâhına uyarlanarak yapılan deneysel çalışmalardan, tezgâhın tüm donanımlarını kontrol edebildiği ve amacına uygun bir şekilde işletebildiği görülmüştür. Lazer ünitesini, galvano tarayıcıyı, toz serme ünitesini ve z-eksen motorunu kontrol ederek belirlenen işlem parametrelerine ve tarama yolu desenine göre bir katmanda yakma işlemini yaptırabilmektedir.

Geliştirilen yazılım diğer Eİ makinelerine de uyarlanabilir olması göz önünde bulundurulduğunda özellikle ulusal Eİ makinesi üretimi çalışmalarına ve SLS/SLE alanında yapılacak AR-GE faaliyetleri için altyapı oluşturmaya katkı sağlayacaktır. Ayrıca matematik ve mühendislik gibi diğer bilim dallarında, STL dosyaların 3B görüntülenmesi içeren çalışmalarda ve onarılmış STL dosya çıktısı vermesi açısından kusursuz STL dosyadan statik analiz yapan çalışmalarda kullanılabilir.

5. Teşekkür

Yazarlar, çalışmayı 2668-D-11 nolu Proje ile maddi olarak destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na teşekkür eder.

Kaynaklar

- Anglada, M.V., Garcia, N.P., Crosa, P.B. (1999). Directional adaptive surface triangulation. *Computer Aided Geometric Design*, 16, 107-126.
- Beal, V.E., Erasenthiran, P., Hopkinson, N., Dickens, P., Ahrens, C.H. (2006). The Effect Of Scanning Strategy On Laser Fusion Of Functionally Graded H13/Cu Materials. *The International Journal Advanced Manufacturing Technology*, 30, 844-852.
- Bertol, L.S., Júnior, W.K., Silva, F.P., Aumund-Kopp, C. (2010). Medical design: Direct Metal Laser Sintering of Ti-6Al-4V. *Materials and Design*, 31, 3982-3988.
- Bircan, D.A. (2008). Development of a Nurbs Based Adaptive Slicing Procedure For Fused Deposition Modeling In Rapid Prototyping Applications. Çukurova University, Institute of Natural and Applied Sciences, Ph.D. Thesis, 161p, Adana.

- Choi, K-H., Kim H-C., Doh Y-H., Kim D-S. (2009). Novel Scan Path Generation Method Based On Area Division For SFFS. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 23, 1102-1111.
- CustomPartNet, Inc., <http://www.custompartnet.com/wu/additive-fabrication> (2014.03.20).
- Çelik, İ., Karakoç, F., Çakır, M. C., Duysak, A. (2013). Hızlı Prototipleme Teknolojileri ve Uygulama Alanları. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 31, 53-69.
- Deckard, C., (1989). Method And Apparatus For Producing Parts By Selective Sintering. US Patent 4,863,538.
- Dolenc, A., Makela, I. (1994). Slicing Procedures For Layered Manufacturing Techniques. *Computer-Aided Design*, 26(2), 119-126.
- Giannatsis, J., Dedoussis, V. (2009). Additive Fabrication Technologies Applied To Medicine And Health Care: A Review, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 40, 116-127.
- Hu, P., Wang, C., Li, B., Liu, M. (2012). Filling Holes In Triangular Meshes In Engineering. *Journal Of Software*, 7, 1, 141-148.
- Ito, Y., Nakahashi, K. (2002). Surface Triangulation For Polygonal Models Based On CAD Data. *International Journal For Numerical Methods In Fluids*. *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 39, 75-96.
- Jhabvala J. (2010). Study Of The Consolidation Process Under Macro-and Microscopic Thermal Effects in Selective Laser Sintering and Selective Laser Melting. *Faculte Sciences Et Techniques De L'ingenieur*, Doctoral Thesis, 155p, Switzerland.
- Kai, C.C., Jacob, G.G.K., Mei, T. (1997). Interface Between CAD and Rapid Prototyping Systems Part 1: A Study of Existing Interfaces. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 13, 566-570.
- Khan, M., Dickens, P.M. (2008). Processing Parameters For Selective Laser Melting (SLM) Of Gold. September, 278-289.
- King, D., Tansey, T., (2002). Alternative materials for rapid tooling. *Journal of Materials Processing Technology*, 121, 313-317.
- Kruth, J.-P., Yasa, E., Deckers, J. (2009). Roughness Improvement in Selective Laser Melting. <https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/197936/2/08pp075.doc> (2012.10.18).
- Kulkarni, P., Dutta, D. (1996). An Accurate Slicing Procedure For Layered Manufacturing. *Computer-Aided Design*, 28, 9, 683-697.
- Lai, J.Y., Lai, H.C. (2006). Repairing Triangular Meshes For Reverse Engineering Applications. *Advances in Engineering Software*, 37, 667-683.

- Liang, M., Hongzan, B. (2006). Temperature And Stress Analysis And Simulation In Fractal Scanning-Based Laser Sintering. *The International Journal Advanced Manufacturing Technology*, 34, 898-903.
- Liao, Y.-S., Chiu, Y.-Y. (2001). A New Slicing Procedure for Rapid Prototyping Systems. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 18, 579-585.
- Liepa, P. (2003). Filling Holes In Meshes. *Proceedings of the 2003 Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Geometry processing*. Switzerland Eurographics Association, 200-205.
- Ma, W., He, P. (1999). An Adaptive Slicing And Selective Hatching Strategy For Layered Manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 89-90, 191-197.
- Mani, K., Kulkarni, P., Dutta, D. (1999). Region-based Adaptive Slicing. *Computer-Aided Design*, 31, 317-333.
- Marchandise, E., Piret, C., Remacle, J.-F. (2012). CAD And Mesh Repair With Radial Basis Functions. *Journal of Computational Physics*, 231, 2376-2387.
- Matusik, W., Bickel, B., Umetani, N. (2015). http://computational-fabrication.com/Matusik_Part1.pdf (2016.10.10).
- Mercelis, P., Kruth, J-P. (2006). Residual Stresses In Selective Laser Sintering And Selective Laser Melting. *Rapid Prototyping Journal*, 12, 5, 254-265.
- Mumtaz, K.A., Erasenthiran, P., Hopkinson, N. (2008). High Density Selective Laser Melting Of Waspaloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 195, 77-87.
- Neğiş, E., (2014). <http://www.turkcadcam.net/rapor/autofab/> (2014.09.09).
- Nickel A.H., Barnett, D.M., Prinz, F.B. (2001). Thermal Stresses And Deposition Patterns In Layered Manufacturing. *Materials Science and Engineering*, A317, 59-64.
- Özğür, B. (2006). Hızlı Prototipleme Teknikleri İle Kompleks Yapıdaki Parçaların Üretilebilirliklerinin Araştırılması. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 117s, Ankara.
- Pandey, P.M., Reddy, N.V., Dhande, S.G. (2003). Slicing Procedures in Layered Manufacturing: A Review. *Rapid Prototyping Journal*, 9, 5, 274-288.
- Partee, B., Hollister, S.J., Das, S., (2006). Selective Laser Sintering Process Optimization for Layered Manufacturing of CAPA® 6501 Polycaprolactone Bone Tissue Engineering Scaffolds. *Journal of Manufacturing Science and Engineering (ASME)*, 128, 531-540.
- Simchi, A., Pohl, H. (2003). Effects Of Laser Sintering Processing Parameters On The Microstructure And Densification Of Iron Powder. *Materials and Engineering*, A359, 119-128.

Simchi, A. (2006). Direct Laser Sintering Of Metal Powders: Mechanism, Kinetics And Microstructural Features. *Materials Science and Engineering*, A428, 1-2, 148-158. Society of Manufacturing Engineers (SME), (1970).

<http://www.sme.org/Tertiary.aspx?id=17485#sthash.gkpsIRmg.dpuf> (2014.03.20).

Stratasys Ltd. (1989). <http://www.stratasys.com> (2014.1019.).

Szilvasi, M., Matyasi, Gy. (2003). Analysis of STL Files. *Mathematical and Computer Modelling*, 38, 945-960.

Tyberg, J., Bohn, J.H. (1998). Local adaptive slicing. *Rapid Prototyping Journal*, 4, 3, 118-127.

Vatani, M., Rahimi, A.R., Brazandeh, F., Sanati, N.A. (2009). An Enhanced Slicing Algorithm Using Nearest Distance Analysis for Layer Manufacturing. *PWASET*, 37, 721-726.

Wang, D., Hassan, O., Morgan, K., Weatherill, N. (2007). Enhanced Remeshing From STL Files With Applications To Surface Grid Generation, *Commun. Numer. Meth. Engng.*, vol.23, pp.227-239.

Xie, J.W., Fox, P., O'Neill, W., Sutcliffe, C.J. (2005). Effect Of Direct Laser Re-Melting Processing Parameters And Scanning Strategies On The Densification Of Tool Steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 170, 516–523.

Yarkinoğlu, O. (2007). Computer Aided Manufacturing (CAM) Data Generation For Solid Freeform Fabrication. Middle East Technical University, The Graduate School Of Natural And Applied Sciences, Master Thesis, 110p, Ankara.

Yasa, E., Deckers, J., Craeghs, T., Badrossamay, M., Kruth, J-P. (2009). Investigation On Occurrence Of Elevated Edges In Selective Laser Melting. Ph.D. Support Program for Students in Foreign Countries, Department of Mechanical Engineering, Catholic University of Leuven, Belgium, 180-192.

Zhang, L.-C., Han, M., Huang, S.-H. (2003). CS File – An Improved Interface Between CAD and Rapid Prototyping Systems. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol.21, pp.15-19.

Zhang, W., Shi Y., Liu B., Xu L., Jiang W. (2008). Consecutive Sub-Sector Scan Mode With Adjustable Scan Lengths For Selective Laser Melting Technology. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 41, 706-713.

Zhou, M.Y., Xi, J.T., Yan, J.Q. (2004). Adaptive Direct Slicing With Non-Uniform Cusp Heights For Rapid Prototyping. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 23, 20-27.

Zhu, W.M., Yu, K.M. (2001). Dixel-Based Direct Slicing of Multi-Material Assemblies. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 18, 285-302.

3ders, (2016). <http://www.3ders.org/3d-software/3d-software-list.html> (2016.23.11).

3dprintingfb, (2016). <http://3dprintingforbeginners.com/software-tools/> (2016.23.11).

3dprintingindustry, (2016). <https://3dprintingindustry.com/news/deskartes-3data-expert-version-10-3-launched-95439/> (2016.23.11).

3DSystems, (1986). <http://www.3dsystems.com> (2014.09.09).