

# Hızlı Donma Prototipleme Yöntemi ile Parça Üretimi

İsmail DURGUN<sup>1</sup>, Emre DORUK<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>TOFAŞ, Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. 16369 BURSA

(Geliş / Received : 16.07.2014 ; Kabul / Accepted : 04.11.2014 )

## ÖZ

Günümüzde imalat sektörüne bakıldığında talaşlı ve talaşsız üretim olmak üzere iki ana imalat yöntemi ön plana çıkmaktadır. Bunlar, tormalama, frezeleme, delme gibi talaşlı imalat yöntemleri ve döküm, dövme, soğuk/sıcak çekme, ekstrüzyon, sac metal işleme gibi talaşsız imalat yöntemleridir. Bu yöntemlere ilave olarak, elektro erozyon yöntemi, tel erozyon yöntemi, kimyasal işleme, ultrasonik işleme ve lazer kesim gibi ileri imalat yöntemleri de kullanılmaktadır. Ürün geliştirme sürecinde tasarımcıların ihtiyaçlarına anında cevap verebilecek imalat yöntemlerinden birisi de hızlı protipleme yöntemidir. Bu çalışmada, hızlı protipleme yöntemlerinden biri olan hızlı donma (buzlandırma) protipleme yöntemi ile parça üretimi tanıtılacak, inşa süresini kısaltma yolları tartışılacak ve işlem basamaklarına etki eden faktörler analiz edilerek, diğer hızlı protipleme yöntemlerine göre avantaj ve dezavantajları ortaya konacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Hızlı protipleme, hızlı donma ile protipleme

## Part Production Using Rapid Freezing Prototyping

### ABSTRACT

Today, when we look at the manufacturing sector, two main manufacturing method has come to the fore: traditional manufacturing methods and chipless manufacturing methods. These traditional manufacturing methods are turning, milling, drilling and chipless manufacturing methods are casting, forging, cold / hot rolling, extrusion, sheet metal processing. In addition to this method, electrical discharge machining, wire electrical discharge machining, chemical treatment, ultrasonic treatment and laser cutting are used as advanced manufacturing techniques. Rapid prototyping is one of the manufacturing method which can respond immediately to the needs of the designers in the product development process. In this study, one of the rapid prototyping method, rapid freezing prototyping will be described, discussed ways which shorten the construction period and the factors that influence treatment processes will be analyzed. Advantages and disadvantages over other rapid prototyping methods will be exposed.

**Keywords:** Rapid prototyping, rapid freezing prototyping

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

1980'li yıllardan günümüze birçok Katı Serbest Formlu İmalat (KSFİ) teknikleri araştırılmış ve bazı yöntemler ticari olarak geliştirilmiştir. Kullanılan bu tekniklerle CAD modeli oluşturulan 3 boyutlu kompleks geometriyi parçaları serbest şekillendirilmesi amaçlanmıştır [1]. Direkt ya da indirekt olarak KSFİ yöntemlerinin kalıba, parçaya ya da döküme uygulanması ile hızlı protipleme gerçekleştirilmiş olur. Bu şekilde üretilen parçalar dizayn parametrelerinin belirlenmesine ve düşük miktarda üretilecek olan ürünlerin imalatına olanak sağlamaktadır. Direkt hızlı protipleme, katı serbest şekillendirme fabrikasyon tekniklerini veya üretim sonrası basamağın kullanımını içermektedir. Bu yöntemlerin başında Seçici Lazer Sinterleme (SLS) gelmektedir. Endirekt hızlı protipleme yöntemleri ise KSFİ tekniğinin yanı sıra geleneksel yöntemlerle çoğaltma tekniğini de kapsamaktadır. Bu konudaki en güzel örnekler, Oda Sıcaklığında Sertleştirme (RTV) dökümü, kum kalıplama, hassas döküm, metal sprey, Keltool ve benzeri örneklerdir. Endirekt hızlı protipleme yöntemleri günün-

müde direkt hızlı protipleme yöntemlerine göre daha çok kullanılmaya başlanmıştır [2],[3].

Endirekt hızlı protipleme yöntemleriyle elde edilen prototiplerin mekanik özellikleri daha az hassas hale gelmektedir. Bunun en önemli nedeni KSFİ tekniklerinin yanı sıra geleneksel çoğaltma yöntemlerinin kullanılmasıdır. Dolayısı ile üretilecek prototipte kullanılacak materyalin ABS plastik, seramik veya metal olması gibi bir şart yoktur [7]. Ancak aşağıdaki özellikler oldukça kritiktir:

- Doğruluk: Genel anlamda bakılacak olursa üretilecek olan parçanın doğruluğunun, dizayn parametrelerini belirlemek için üretilen parçadan daha yüksek olması gerekmektedir [4].
- Yüzey Kalitesi: Prototipte ulaşılan en iyi yüzey kalitesi aynı zamanda üretilecek parçada da ulaşılabilecek en iyi yüzey kalitesini göstermektedir. Bir çok yöntemde yüzey kalitesini optimum hale getirmek için üretim sonrası cilalama yapılır.
- Kolay parça ayrımı: Bu özellik parça dizaynında kısıtlamaları azaltmaktadır. Eğer parça kalıptan kolay ayrılabilir değilse kalıp iki üç parçaya ayrılmak durumunda kalır. Bu da zaman kaybına ve doğruluk miktarında azalmaya sebep olur.

\* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: emredoruk@tofas.com.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2015.18.2, 53-61

- Kolay parça birleşimi: Kompleks geometrilere sahip parçalarda istenilen bir başka özelliştir. Parça; oryantasyon, kuvvet ya da aşırı komplekslikten dolayı tek bir parça halinde üretilemiyorsa parça parça üretilir ve daha sonra birleştirilir.

Yukarıda söz edilen özelliklere sadece birkaç KSFİ tekniği sağlamaktadır. Örneğin, Tarayarak Işıklı Kürtleme Tekniği (SLA); doğruluk oranı yüksek ve düzgün yüzey kalitesine sahip parçalar üretebilmesine karşın parça ayırma basamağı oldukça güçtür. Öte yandan, Ergiyik Biriktirme Modelleme Tekniği (FDM) ile yapılan balmumu parçalar kolay birleşme ya da ayırma özelliklerine sahip, hassas dökümde kullanılabilir olmalarına karşın yüzey kalitesi ve doğruluk gibi özelliklerde istenilen noktada değildirler [5].

Hızlı Prototipleme ve dizayn parametrelerinin belirlenmesi için üretilen prototiplerin şeffaf ve renkli olması parça üzerinde daha net ve açık bir değerlendirme yapılmasına olanak sağlar. Plastik kullanıldığı KSFİ tekniğine (Ergiyik Biriktirme Modelleme Tekniği, FDM gibi) dayalı yöntemlerin neredeyse hepsinde renklendirilmiş parça üretmek mümkündür. Ancak FDM ile yapılan parçaların birçoğunda şeffaflık özelliği bulunmamaktadır. Genel olarak bu prototipleme yöntemleri yeterli olsa da özel durumlarda (ameliyat planı oluşturma) bu yöntemler yetersiz kalmaktadır.

Yukarıda bahsi geçen özellikleri her anlamda sağlayabilen yöntem Hızlı Buzlandırma Prototipleme (HBP) yöntemidir. Suyu ana materyal, hızlı buzlandırmayı üretim tekniği olarak kullanan HBP yöntemi ile düzgün doğruluk oranlarına ve yüzey kalitesine sahip parçalar üretilebilmektedir. Dizayn parametrelerinin belirlenmesine sağladığı diğer faydalar ise; kolay birleştirme ve ayırmaya olanak sağlaması, şeffaf olması ve kolay renklendirilebilir olmasıdır.

## 2. HIZLI BUZLANDIRMA İLE PROTOTİPLEME (RAPID FREEZING PROTOTYPING)

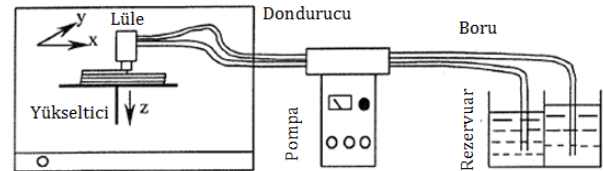
Hızlı buzlandırma ile prototipleme yöntemi, suyun katman katman yüzeye yayılarak buzlandırılması esasına dayanan yeni bir yöntemdir. Suyu ana şekillendirme materyali olarak kullanan Hızlı Buzlandırma Prototipleme (HBP) yöntemi aşağıda verilen özellikleri ile diğer KSFİ tekniklerinden ayrılmaktadır [6-7].

- HBP hızlı ve temiz bir prototip üretim tekniğidir. İşlem süreci ve işlem süresince kullanılan materyalin çevreye ya da operatöre herhangi bir zararı yoktur. İşlem basamağı sırasında kızılötesi ışınlar kullanılmamakta, duman, koku, gürültü gözlenmemektedir.
- HBP yöntemi ile yüzeyi mükemmel yakın doğruluk oranlarına sahip şekiller üretilebilmektedir. Ancak bu konu hala gelişime açıktır.
- Buz kullanılarak üretilmiş parçaların kalıptan ayrılması oldukça kolaydır. Kalıp ısıtılır ve ardından kurutularak zarar verilmeden parçanın ayrılması sağlanır. Ayrıca buzun kendi kendine kaynak olabilen

yapısı, ayrı parçaların kolay bir şekilde birleştirilmesine yardımcı olmaktadır. Dolayısı ile kompleks geometrilere sahip parçalar ayrı ayrı üretilerek kolay bir şekilde birleştirilebilirler.

- HBP yönteminin ısı birikim problemleri yoktur. Kristal yapıya sahip olan su katmanları arasında bağ hidrojen bağı ile gerçekleşmektedir. Dolayısı ile enjektörün meme ucundaki materyal donma noktasının biraz üzerinde tutulur. Sıvı yüzeye döküldüğünde açığa çıkan ısı çevredeki soğuk hava ve sıvının döküldüğü yer tarafından kolayca absorbe edilir, bu yolla herhangi bir ısı birikimi söz konusu olmaz. Bir başka KSFİ tekniği olan FDM yönteminde kullanılan materyal ise kristal yapıya sahip değildir. Dolayısı ile düzgün akışkanlık ve tabakalar arasında düzgün bir bağ oluşturmak için enjektör memesindeki materyal yüksek bir sıcaklığa kadar ısıtılır. Sıvı uygulandığında çevresel faktörler bu ısıyı absorbe edemez ve ısı birikimi oluşur. Oluşan ısı birikimi parçanın yüzey kalitesine ve doğruluğuna direk olarak etki eder.

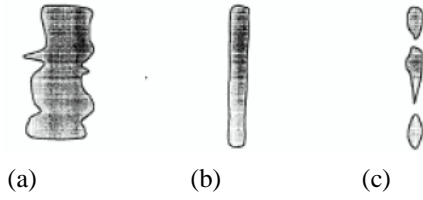
Bu yöntem uygulanırken Şekil 1'de görüldüğü üzere su rezervuardan peristaltik pompa yardımı ile enjeksiyon memesine (nozzle) pompalanır. Enjeksiyon memesine pompalanan su buz tabakaların üstüne enjekte edilir. Yeni enjekte edilen su hem düşük çevre sıcaklığı hem de uygulandığı buz tabakanın sıcaklığı sayesinde kısa bir sürede katılaşır ve katmana yapışır. Gerekli görülen yerlerde destek materyali kullanılır. İşlem sırasında enjeksiyon memesi ve nakil borularının sıcaklığı suyun donma noktasının hemen üzerindedir. Bu şekilde materyalin kusursuz bir şekilde akması amaçlanır [7].



Şekil 1- Hızlı Buzlandırma ile Prototipleme Yönteminin İşlem Basamağı (Process Steps of Rapid Freezing Prototyping) [7]

Hızlı buzlandırma prototipleme (HBP) yönteminde parça boyut hassasiyetinin ve yüzey kalitesinin düzgün olabilmesi için ısı transfer mekanizmalarının çok iyi hesaplanması ve erken katılaşma, lokal buzlanma gibi durumlardan kaçınmak için ekstra önlemler almak gereklidir [8].

Katmanlar oluşturulurken enjeksiyon memesinin içindeki sıvının akış oranı ile XY katman düzleminde yapılan hareketin hızlarının oranı çok önemlidir. Bu oran çok yüksek olduğu zaman enjeksiyon memesinden çıkan sıvının akışı kontrol edilemez hale gelir. Bu oranın çok düşük olması donan su tanecikleri arasında devamlılığı ortadan kaldırır (Şekil 2). Bu oranı kontrol etmenin en doğru yolu peristaltik pompanın dönüş hızını kontrol etmektir.



Şekil 2- Enjeksiyon Memesi İçindeki Sıvının Akış Hızı ile XY Katman Düzleminde Yapılan Hareketin Hızları Arasındaki Oranın Etkileri. a) Oran çok yüksek b) Normal oran c) Düşük Oran (The schematic drawing of strands for different ratios of material flow rate to XY moving speed. a) Ratio too large b) Normal ratio c) Ratio too small) [7]

Hızlı buzlandırma prototipleme yönteminde buz katmanlarının oluşturulması esnasında kullanılan lümenin bağlı olduğu jetler ikiye ayrılmaktadır. Bunlar sürekli ve ayrık jetlerdir. Sürekli jetlerde akış oranını ayarlamak zor iken, ayrık jetlerde bu oran daha kolay ayarlanabilmektedir. Ayrık jetlerde sürücü kuvveti piezoelektrik kristallerle sağlanmakta bu durum, daha iyi bir akışkanlık sağlamaktadır [9].

Hızlı buzlandırma prototipleme yöntemini sonlu elemanlar yöntemini kullanarak simüle etmek mümkündür. Bu simülasyonlarda değişken parametreler olarak katılma süresi, katman yüksekliği, çevre sıcaklığı, su sıcaklığı, malzeme çökelti oranı gibi etkiler modellenir. Bu değişkenler arasında katılma süresine etki eden faktörler belirlenerek, hızlı buzlandırma prototiple yöntemi ile elde edilecek parçanın kalitesinin optimum seviyede olması amaçlanır [10].

Bu yöntem ile elde edilen buz kalıplar, dişçilik ve tıp (ortopedi) alanında kompleks geometriye sahip tekil seramik parçaların imalatında da kullanılabilir [11].

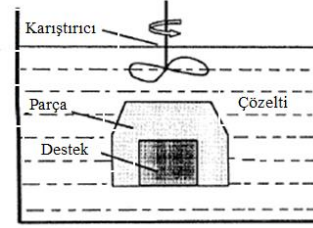
Hızlı prototipleme ile parça üretiminde geliştirilmesi ve üzerinde çalışılması gereken konular; katmanlı üretim, parça boyut hassasiyetleri, ve üretim parametrelerinin optimizasyonu şeklinde sıralanabilir. 3 boyutlu kompleks parçaların üretilmesi için de sistem kontrolünü gerçekleştiren yazılımların geliştirilmesi gerekmektedir.

### 3. DESTEK MATERYALİNİN BELİRLENMESİ (DETERMINATION OF SUPPORT MATERIAL)

Destek materyali kullanılan HBP yönteminde, yukarıda bahsedilen işlemlerden sonra destek materyali kalıptan ayrılır. Şekil 3'te de görüldüğü üzere destek materyalini ayırmak için özel bir karışım kullanılır. Ara madde olan buz, saf buzun altında yer alır ve bu şekilde sadece ara madde olan buzun çözülmesi amaçlanır. Destek materyali ayırmak için kullanılacak sıvının şu iki önemli özelliğe sahip olması gerekmektedir [4]:

- Destek materyali, kullanılan karışım içinde çözülmemeli ve ayrılma esnasında saf buz olan esas kalıba zarar vermemelidir.

- Destek materyali suyun içerisinde yükseltilecek ya da iyice batırılarak saf buzdan kolayca ayrılması sağlanmalıdır. Şekil 3'de görüldüğü üzere ayrılma sürecini hızlandırmak için karıştırıcı kullanılabilir.



Şekil 3- Destek Materyalini Ayırma Mekanizması (Support removal of Rapid Freezing Prototyping parts) [4]

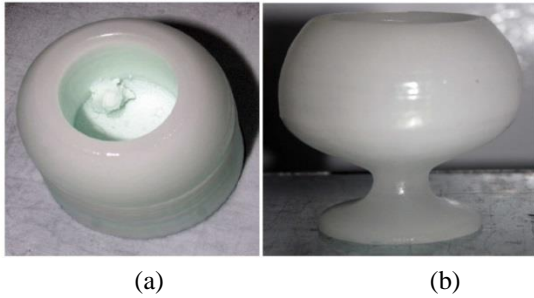
Hızlı Buzlandırma Prototipleme (HBP) yönteminde kullanılan iki önemli destek sıvısı tuzlu su ve şekerli sudur. Bryant ve Leu (2008) yaptıkları deneyde %33'ü şeker, %67'si su alan bir çözelti hazırlamışlardır. Karışımın bu şekilde hazırlanmasındaki en önemli neden, çözeltinin donma noktasının saf suyun donma noktasının hemen altında olmasıdır (-5.6 °C). Çünkü şeker su karışımı % 33-67 oranını sağlandığı zaman ötektik noktaya ulaşmaktadır. Bu durum destek materyalin 0-5.6 °C arasında ayrışmasına olanak sağlar [12]. Karışım hazırlanırken dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta ise karışımın kullanılacak olan materyallerin HBP yönteminin çevreci yapısını bozmamaktır. Tablo 1'de su/buz karışımının ve destek sıvısı olarak şekerli suyun kullanıldığı karışımın özellikleri verilmektedir.

Tablo 1- Su/Buz ve Şeker Çözeltisinin Özellikleri (Properties of water/ice and sugar solution) [12]

	Su/Buz	Şeker Çözeltisi
Yoğunluk		
$\rho_{\text{kati}}$ :	917 kg/m <sup>3</sup>	917 kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{\text{sıvı}}$ :	1000 kg/m <sup>3</sup>	1140 kg/m <sup>3</sup>
Özgül Isı		
$c_{\text{kati}}$ :	2094 J/kg-°C	1404 J/kg-°C
$c_{\text{sıvı}}$ :	4174 J/kg-°C	2800 J/kg-°C
Isıl Yayımlılık	1.146x10-6 m <sup>2</sup> /s	1.146x 10-6 m <sup>2</sup> /s
Isıl İletkenlik	0.6 W/m-°C	~0.6 W/m-°C
Erime Gizli Isı	335000 J/kg	234000 J/kg
Isı Transferi Kat Sayısı	8.66 W/m <sup>2</sup> -°C	~8.66 W/m <sup>2</sup> -°C

Bazı bilim adamları şekerli suyun yerine tuzlu suyu destek materyali olarak düşünmüşlerdir. Bryant ve Leu'nun yaptıkları çalışmalar göstermiştir ki, tuzlu suyun parçalanma (degradation) özelliğinden dolayı bu işlem için uygun değildir. Şekil 4'de tuzlu suyun destek

materyali olarak kullanıldığı bir uygulama gösterilmektedir.



Şekil 4- Konyak Bardağı (a) Tuzlu suyun destek materyali olarak kullanıldığı durum (b) destek materyalinin -4°C'de eritildiği durum (Balloon glass (a) when used in salt water as support material (b) in the case support material is dissolved in -4 °C) [13]

Leu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada ise, ötektik glikoz çözeltisinin destek materyali olarak kullanıldığı durumda, tuz veya şekerden elde edilen destek materyaline göre daha iyi sonuçlar verdiği ortaya konulmuştur. Ötektik glikoz destek materyali özellikle ince cidarlı ve küçük yarıçaplı malzemelerin hızlı buzlandırma prototipleme yöntemi ile üretilmesine olanak sağlamaktadır [14].

#### 4. İNŞA ZAMANINA ETKİ EDEN FAKTÖRLER (FACTORS EFFECTING CONSTRUCTION TIME)

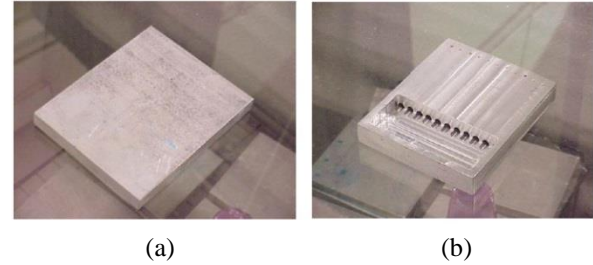
##### 4.1. Çevre ve Tabaka (Katman) Sıcaklığının Etkisi (Effect of Environment and Layer Temperature)

Destek materyalinin kullanıldığı işlemlerde difüzyonu minimize etmek için kullanılacak en önemli yöntem çevre sıcaklığını daha da düşürmektir. Bu amaçla HBP yönteminde sıvı nitrojen kullanılarak ortam soğutulur ve donma süresi kısaltılarak difüzyon mümkün olduğunca engellenir. Ancak soğutma süresini kısaltılırken çevre sıcaklığının çok düştüğü unutulmamalıdır. Çok düşük çevre sıcaklıklarının kullanıldığı düzeneklerde, elektronik donanımlar zarar görebilir. İstenildiği takdirde nitrojen sıvısı çevre sıcaklığını -196 °C'e kadar düşürebilmektedir. Dolayısı ile optimum soğutma hızı için çevre sıcaklığı hesaplanmalıdır.

Leu [15] yaptığı simülasyon çalışmasında bir katman suyun donma süresinin, tabaka (alüminyum tabaka) sıcaklığının azaltılması ile ne kadar azaldığını görmeyi amaçlamıştır. Çalışmada aynı zamanda ısı kaybı, sıvı oranı ve sıcaklık düşüşü zamana bağlı fonksiyonlar halinde yazılmış ve incelenmiştir. Tablo 2'de tabaka sıcaklığının donma süresine etkisi gösterilmiştir. -140°C'de katmanlar arasındaki bekleme süresinin 5 saniyeye kadar düştüğü tespit edilmiştir. Ancak yukarıda bahsedildiği üzere her ne kadar simülasyonda -140°C ulaşılsa da pratikte buna ulaşmak güçtür. Bu doğrultuda Leu, Isanka ve Richards (2009) yaptıkları deneysel çalışmada yeni bir katman geliştirerek katmanlar arasındaki bekleme süresini 15 saniyeye düşürmüşlerdir [16].

Leu, Isanka ve Richards kullandıkları bu yeni tabakanın altından soğutma kanalları oluşturmuşlardır. Dolayısı ile ortam sıcaklığını direk düşürmek yerine damlaların donma süresini azaltmak için nitrojen sıvısını, Şekil 5'te görülen soğutma kanallarından geçirmişlerdir. Bu da onlara %60'lık bir zaman tasarrufu sağlamıştır.

Tablo 2- Katmanlar arasındaki bekleme süresi, damlaların donma süresi ve tabaka sıcaklığı arasındaki değişim (Simulation results (from Fluent) of time to freeze the first layer of water above the substrate and wait time at various ambient temperatures) [15]



Şekil 5- Leu, Richards ve Isanka'nın Kullandıkları Tabakalar (a) Orijinal Tabaka (b) Modifiye Edilmiş Tabaka (The original substrate (left) and the modified substrate (right)) [16]

##### 4.2. Cebri Konveksiyon (Forced Convection)

Su katmanı alüminyum tabakanın üstüne döküldüğünde bir yandan tabaka tarafından ısı iletir, üst kısmından ise ısı konveksiyona maruz kalır. Alüminyumun sahip olduğu yüksek ısı iletkenliği işlemin başlama anından itibaren su ile tabaka arasında iyi bir ısı alışverişine olanak sağlar. Parçanın yüksekliği arttıkça (katmanlar üst üste geldikçe) ısı iletimi buzun sahip olduğu düşük ısı iletkenlikten dolayı hızlı bir şekilde zayıflar [16]. Leu yaptığı simülasyon çalışmasında (-35°C çevre sıcaklığında gerçekleştirilmiştir) bunu incelemiş ve Tablo 3'te verilen değerlere ulaşmıştır. Rakamlardan da görüldüğü üzere yükseklik arttıkça alüminyum tabakanın su katmanları üzerindeki etkisi zayıflamakta ve donma süresi uzamaktadır. Bunun sebebi suyun ısı iletim katsayısının alüminyuma göre çok düşük olmasıdır.

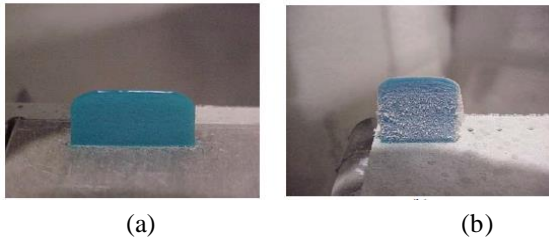
Tablo 3- Leu'nun Buz Katmanlarının Yüksekliği ile Donma Süresi Arasında Bulduğu İlişki (Simulation result of time to freeze for a water layer deposited at various heights) [16]

Yükseklik	Donma Süresi (s)
0mm (tabaka yüzeyinde)	2.8
1mm	5.8
2.5mm	8.4
5mm	10.1
10mm	12
12.5mm	14.4
15mm	17.1
17.5mm	20.6

Parçanın yüksekliği arttıkça alüminyum tabakayla iletişimi azalan buz ile ortam arasında konveksiyon gerçekleşecektir. Buz tabaka ile ortam arasındaki ısı transferini güçlendirmek için Leu, Isanaka ve Richards (2009) fan rüzgarından faydalanarak sisteme nitrojen takviyesi yapmayı düşünmüşlerdir. Yapılan bu deney sonucunda cebri konveksiyon ile yaptıkları çalışmada daha hızlı soğutma elde ettikleri tespit edilmiştir. Bu durumda katmanlar arasındaki bekleme süresi 20 saniyeye inmiştir (cebri konveksiyon olmadığı takdirde

Sıcaklık (°C)	Donma Süresi (s)	Bekleme Zamanı (s)
-140	0.8	5.0
-120	0.9	5.5
-100	1.1	6.4
-80	1.0	7.0
-60	1.5	8.0
-40	2.5	10.5
-20	4.7	13.7
-10	9.6	20.2

40 saniye olarak ölçüm yapılmıştır). Cebri konveksiyon her ne kadar %50'lik bir zaman tasarrufu sağlamış olsa da bazı problemleri beraberinde getirmiştir. Cebri konveksiyon kullanıldığında oluşan parçalarda buzlanmalar (frosting) gözlemlenmiştir (Şekil 6-b). Her ne kadar inşa zamanını azaltan bir etken olarak karşımıza çıksa da bu yöntem, ortaya çıkardığı kötü yüzey sonucu mantıklı bir seçenek olarak görülmemektedir [16].

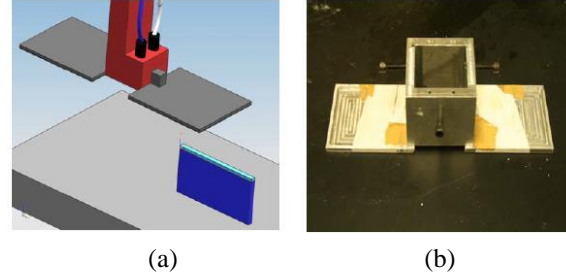


Şekil 6- Cebri Konveksiyonun Etkisi (a) Cebri Konveksiyon Uygulanmamış Parça (b) Cebri Konveksiyon Uygulanmış Parça (An ice wall built (a) without forced convection and (b) with forced convection) [16]

#### 4.3. Dondurucu Tabaka Kullanılması (Using Freezing Layer)

Katmanlar arasındaki bekleme zamanını kısaltmaya yönelik Leu, Isanaka ve Richards (2009) tarafından önerilen bir başka yöntem ise önceden soğutulmuş plaka kullanmaktır. Z ekseninde hareket eden plaka su katmanını oluşturulduktan sonra o katmanın seviyesine indirilir ve suya etki ederek hızlı bir soğutma sağlar. Şekil 7 dondurulmuş plakanın CAD modelini ve gerçek uygulamasını göstermektedir [16]. Hızlı soğutmanın dışında dondurulmuş plakanın bir başka avantajı yeni

oluşmuş su tabakasının düzleştirilmesini sağlar. Isıl iletim, konveksiyondan daha etkin bir ısı transferi tipi olması sebebiyle ile dondurulmuş tabaka daha verimli bir şekilde inşa zamanını düşürebilmektedir. Deneylerde görülen en önemli problem suyun dondurulmuş plaka üzerinde donup kalmasıdır. Donan suyun kırılmadan dondurulmuş plakadan ayrılması mümkün değildir. Dolayısı ile bu tekniğin başarılı bir şekilde uygulanması için dondurulmuş plaka ve su arasındaki yüzeye bir film uygulanmalıdır.



Şekil 7- (a) Dondurulmuş Plaka CAD Modeli, (b) Dondurulmuş Plaka (The chilling plate investigated: (a) the CAD model and (b) the actual plate) [16]

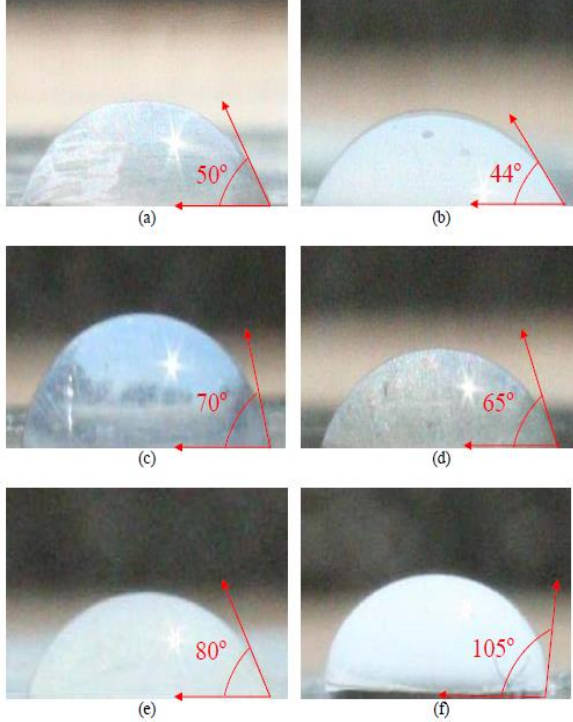
Leu, bu konu hakkında da simülasyonlar yapmış ve önemli sonuçlara ulaşmıştır [15]. 3x3 mm<sup>2</sup> kare bir levha kullanılan simülasyon modelinde, levhanın kalınlığı 0.2 mm olarak belirlenmiştir. Dondurulmuş plakanın sıcaklığı -20°C'den -8°C'ye yükseltilmiştir. Ancak simülasyon göstermiştir ki dondurulmuş plakanın 50 saniyeden fazla uygulanması istenmeyen ısı artışlarına sebep olmaktadır. Bu problemin üstesinden gelmek için Leu kullandığı dondurulmuş plakada soğutma kanalları oluşturmuştur (Şekil 8).



Şekil 8- Soğutma plakası (Chilling Plate) ve Alüminyum tabaka (The chilling plate and aluminum substrate) [16]

Dondurulmuş plaka kullanımını zorlaştıran en önemli problem, suyun plakaya yapışmasını engellemek için kullanılması gereken materyaldir. Leu, Isanaka ve Richards bu konuda çalışmalarını yapmışlar ve farklı ara malzemeler kullanarak su damlalarını incelemişlerdir. Bu doğrultuda, sadece cilalanmış yüzey, boya ile kaplanmış alüminyum sac metal, mylar, seloteyp, lateks ve teflon gibi farklı materyaller kullanılmış ve kullanılan her bir materyal ile su damlasının temas açısı karşılaştırılmıştır (Şekil 9). Temas açısı arttıkça suyun yüzeyi kabullenmesi o kadar zorlaşmaktadır. Dolayısı ile temas açısı büyük olan

yöntemi tercih etmek en doğru sonucun alınmasını sağlayacaktır. Çünkü dondurulmuş tabaka kullanılan bu teknikte amacımız suyun plakaya yapışmaması ve bir an önce ayrılmasıdır. Şekil 9'da da görüldüğü gibi teflon 105° ile en iyi sonucu vermektedir. Ayrıca bu açı başka deneylerle de ispatlanmıştır [17].



Şekil 9- Su Damlasının Farklı Yüzeylerle Yaptığı Temas Açısı (a) Kaplanmamış Yüzey (b) Boya ile Kaplanmış Alüminyum Sac Levha (c) mylar (d) seloteyp (e) lateks (f) Teflon (Enhanced images of a water droplet on various surfaces: (a) no surface coat (polished face), (b) paint coated aluminum sheet, (c) mylar, (d) cellophane tape, (e) latex and (f) Teflon) [16].

Bulunan bilgiler ışığında teflon kullanılmış ve deney tekrar edilmiştir. Tekrar edilen deneyde 0.1mm kalınlığında teflon kullanılmıştır ve katmanlar arasındaki bekleme zamanında ciddi bir düşüş gözlemlenmiştir. 40 saniye olan katmanlar arası bekleme zamanı 10 saniyeye düşmüş ve %75'lik bir kazanç sağlanmıştır. Teflonun ara yüz olarak kullanıldığı dondurulmuş plaka tekniğinin cebri konveksiyon yöntemine göre daha basit ve daha verimli olduğu açıktır [16].

## 5. İNŞA ZAMANININ BELİRLENMESİ

(DETERMINATION OF CONSTRUCTION TIME)

### 5.1. Değişken Basamak Parametrelerinin Analizi

(Analysis of Variable Process Parameters)

Şekil 1'de gösterilen ve genel olarak kullanılan üretim prensibi, HBP yönteminde karşımıza iki değişken parametre çıkarmaktadır. Bunlar, suyun beslenme oranı "f" ve tarama hızı "v" dir. Her iki parametreyi

değiştirmek katman kalınlığının ve çizgi genişliğinin değişmesine neden olmaktadır. Suyun beslenme oranı, su basıncı "P" ve enjeksiyon memesi çapı "d" ile kontrol edilebilmektedir. Su basıncı ise, enjeksiyon memesi ucu ve su kaynağındaki yükseklik farklılıklarından yararlanılarak kontrol edilir. Tarama hızı ise kullanılan yazılım sayesinde XY düzleminde önceden belirlenmiştir.

Suyun beslenme hızını belirlemek için enjeksiyon memesinden çıkan damlalar göz önünde bulundurulmuştur. Damlanın ölçüleri enjeksiyon memesi çapı ve suyun yüzey gerilimine bağlıdır. Aşağıda verilen denklem bir damlanın ağırlığını bulmak için kullanılmaktadır [18]:

$$m = \frac{\pi d \sigma F}{g} (d/V^3)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

m: damlanın kütlesi

$\sigma$ : suyun yüzey gerilimi

V: damlanın hacmi

$(d/V^3)^{\frac{1}{3}}$ : deneysel korelasyon fonksiyonu

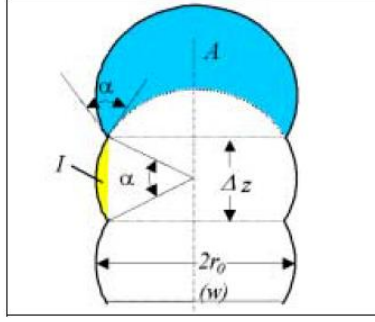
Deneysel korelasyon fonksiyonunun 1 alınması birbirinden bağımsız damlaların bulunmadığı ve enjeksiyon memesinin ucunda hiçbir su damlacığının asılı kalmadığı anlamına gelmektedir [18]. Yukarıda verilen denklem aynı zamanda enjeksiyon memesinden her bir enjektörde ne kadar damlanın yüzeye aktarıldığını bulmada da kullanılabilir. Yüksek frekansa sahip işlemlerde bu önemli bir problem haline gelmektedir. Enjeksiyon memesi çok kısa bir süre açık kalacağından tek bir damla oluşumu için yeterli suyun gelip gelmediği kontrol edilmelidir. Bu durum su beslenme hızının belirlenmesine daha zor bir hale getirmektedir.

Suyun beslenme hızı invisit akış modeli kullanılarak hesaplanır. Bernoulli denklemi kullanılarak akan sıvının hız enjeksiyon memesi devamlı açılmış gibi hesaplanır [19]. Suyun beslenme hızı, enjeksiyon memesinin yarı çapı d, enjeksiyon memesinin görev döngüsü N (görev döngüsü enjeksiyon memesinin ucunun açık olduğu zamanın toplam zaman oranıdır) ve enjeksiyon memesi ve su tankı arasındaki yükseklik farkı h, kullanılarak bulunur [20]:

$$f = \frac{\pi}{4} d^2 N \sqrt{2g\Delta h} \quad (2)$$

Denklemlerde bulunan rakamların gerçekte örtüşmesi için enjeksiyon memesinin ve su tankından gelen suyun yolu temiz olmalıdır. Su damlacıkları tabaka ile temas eder etmez birbirleri ile bağ kurarlar ve bir çizgi oluştururlar. Bu çizginin uzunluğu tarama hızı, v, ve zaman, t, çarpılarak bulunur. Bu çizginin hacmi ise  $A \cdot v \cdot t$ 'ye eşit olacaktır (A: alan). Ayrıca oluşan çizginin hacmi aynı zamanda su beslenme oranının, f, zaman, t, ile çarpımına eşit olacaktır [21]. Yukarıdaki bilgiler göz önüne alındığında su çizgisinin kesiti denklem 3'te verildiği gibi olacaktır.

$$A = f/v$$



Şekil 10- Buz çizgisinin kesit gösterimi (Cross section illustration of an ice line) [20], [22]

Şekil 10 damlaların üst üste gelmesi ile oluşan kesiti göstermektedir. Bu şekilde görüldüğü gibi katman kalınlığı ve çizgi genişliği arasındaki ilişki şu şekilde ifade edilebilir [20]:

$$\Delta z = w \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (4)$$

(3) ve (4) nolu denklemler bir araya getirilerek katman kalınlığı ve çizgi genişliği aşağıdaki gibi bulunabilir [20]:

$$\Delta z = \sqrt{f \cdot \frac{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{v}} \quad (5)$$

$$w = \sqrt{f/v \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (6)$$

$\alpha$  = su ile buzun temas açısıdır. Bu açının  $20^\circ$  olduğu belirlenmiştir [21]. Elde edilen (5) ve (6) numaralı formüllerde de görülmüştür ki katman kalınlığı ve çizgi genişliği en başta belirlenen iki parametreye bağlıdır. Bunlar, tarama hızı ve su beslenme oranıdır.

Bryant, Sui ve Leu yaptıkları deneylerde bu formülleri kullanmışlar, teorik ve pratikteki rakamları karşılaştırmışlardır. Yaptıkları deneyde enjeksiyon memesi çapı 0.003 in (0.0762mm), görev döngüsü %50, yükseklik farkı ( $\Delta h$ ), 3158 mm olarak alınmıştır. Bu veriler formüllerde yerlerine konduğunda suyun beslenme oranı  $17.95 \text{ mm}^3/\text{s}$  olarak bulunmuştur. Deneyde ölçülen değer ise  $18.76 \text{ mm}^3/\text{s}$  dir. Suyun beslenme oranında %4.3'lük bir hata tespit edilmiştir. Bu işlemler sırasında tarama hızı  $50 \text{ mm/s}$  de sabit tutulmuştur [20].

## 5.2. Yüzey Pürüzlülüğü ve İnşa Süresi (Surface Roughness and Construction Time)

Katmanlı üretim sistemi kullanılan her işlemden katman kalınlığı çok önem taşımaktadır, bunun en önemli nedeni katman kalınlığının yüzey pürüzlülüğüne yaptığı etkidir. Katmanlı tabakalarda “merdiven etkisi” yüzey pürüzlülüğünü etkileyen önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. HBP yönteminde katman kalınlığı su beslenme oranı azaltılarak veya tarama hızı artırılarak düşürülebilir, ancak bu durumda inşa zamanı da artacaktır [21]. Yüzey pürüzlülüğü matematiksel olarak şu şekilde ifade edilebilir;

$$R = I/\Delta z \quad (I = 0.5\alpha r_0^2 - 0.5r_0^2 \sin\alpha) \quad (7)$$

$I$ ,  $\Delta z$ ,  $\alpha$  ve  $r_0$  Şekil 10’da gösterilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü hesaplamalarında  $\alpha$ ’nın biriminin radyan olduğunu unutulmamalıdır. Şekil 10 ve (5) nolu denklemden yararlanarak yarıçap  $r_0$  [20]:

$$r_0 = \frac{w}{2} = \sqrt{\frac{0.5f}{v \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}} \quad (8)$$

(5) ve (8) nolu denklemler (7) nolu denklemde yerine yazılırsa [20]:

$$R = k\sqrt{f/v} \quad (k = \frac{(\alpha - \sin\alpha)}{8 \sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)}) \quad (9)$$

(9) nolu denklemde de görüldüğü üzere yüzey pürüzlülüğü yukarıda söz edildiği gibi su beslenme oranına ve tarama hızına bağlı olarak değişmektedir.

İnşa zamanına etki eden en önemli parametre ardışık katmanlar arasındaki geçiş süresidir. Beklenmesi gereken minimum zaman işlenmiş katmanın donma hızına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Sui ve Leu yaptıkları çalışmada minimum inşa zamanını aşağıdaki gibi formülize etmişlerdir:

$$t_{\min} = \frac{E \cdot \Delta z}{\lambda \Delta T \sqrt{m}} \sqrt{1 + \frac{\lambda \Delta T}{E \phi}} \quad (10)$$

$E$ : entalpi  $E = \rho (L + c\Delta T)$ ,

$\rho$ : suyun özkütlesi,

$L$ : erimenin gizli ısısı,

$c$ : suyun özgül ısısı

$\Delta z$ : katman kalınlığı

$\lambda$ : ısı iletkenliği

$\Delta T$ : su sıcaklığı ile donma noktası arasındaki sıcaklık farkı

$$m = \frac{2h}{\lambda w}$$

$h$ : ısı transferi katsayısı,  $w$ : katman genişliği

$\phi$ : ısı yayılma katsayısı

Yukarıda formüle edilen minimum inşa süresi, tarama hızı ve suyun beslenme oranı direkt olarak 3 boyutlu buz kalıplarının hızlı prototipleme ile üretimini etkileyen parametrelerdir. Bu parametrelerin belirlenmesi üretilecek parçaya özgü hesaplamaları gerektirmektedir. Bu hesaplamaların tamamı çıkan parçanın yüzey kalitesini ve boyutsal doğruluğunu etkileyecektir [23].

## 6. SONUÇLAR (RESULTS)

Hızlı buzlandırma ile prototipleme, diğer yöntemlere göre daha ucuz, çevreci, düşük enerji tüketimine sahip bir hızlı prototipleme yöntemidir. Yapılan çalışmaların incelendiği ve yöntemin veriminin araştırıldığı bu makalede şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- HBP yöntemi yeni, çevreci ve az enerji tüketen bir yöntemdir.
- HBP yöntemi, kolay birleştirme ve ayırmaya olanak sağlaması, şeffaf olması ve kolay renklendirilebilir

olması yönüyle diğer hızlı prototipleme yöntemlerine göre avantajlıdır.

- HBP yönteminin dezavantajı düşük sıcaklıklı bir operasyon ortamı gerektirmesidir.
- HBP yöntemi bir çok avantajına rağmen yaygın olarak ticarileşmemiştir.
- Tek seferde üretilemeyecek, parça parça üretilerek daha sonra birleştirilecek kompleks 3 boyutlu parçaların üretimi için uygundur. Çünkü kalıptan çıkarılması kolay, elde edilen parçaların yüzey kalitesi ve boyutsal hassasiyeti yüksektir.
- Kompleks geometrilere sahip parçaların üretimi için destek materyali kullanılır.
- Kullanılan destek materyali olarak şekerli su ve tuzlu su düşünülmüş, ancak tuzlu su, parçalanma özelliğinden dolayı kullanıma uygun bulunmamıştır. Yeni bir uygulama olarak ötektik glikoz destek materyali kullanılmış ve destek materyali ince cidarlı ve küçük yarıçaplı parçaların üretiminde verimliliği arttırmıştır.
- Çevre ve tabaka sıcaklığının önemi tespit edilmiş, katmanların yüksekliği arttıkça tabaka sıcaklığının etkisinin azaldığı incelenen deneylerle gösterilmiştir.
- İnşa zamanını düşürmek için cebri konveksiyon ve dondurulmuş plaka gibi teknikler incelenmiş ve cebri konveksiyon tekniğinin uygulamasının zor olduğu gösterilmiştir. Dondurulmuş plaka tekniğinde ise suyun plaka yüzeyinde donmaması için ara yüze ihtiyaç olduğu gösterilmiş ve incelenen deneyler sonucu en iyi ara yüz maddenin sağlığı yüksek temas açısı dolayısı ile teflon olduğu anlaşılmıştır.
- İnşa zamanını belirleyen iki önemli parametrenin (suyun beslenme oranı ve tarama hızıdır) yüzey pürüzlülüğüne olan etkisi de matematiksel olarak gösterilmiştir.
- Hızlı donma prototipleme yöntemi protez ve implant yapımında kullanılmaktadır.
- Yöntem, katmanlı üretim, parça boyut hassasiyetleri, üretim parametrelerinin optimizasyonu, 3 boyutlu kompleks parçaların üretilmesi için sistem kontrolünü gerçekleştiren yazılımların geliştirilmesi gibi konularda geliştirilmeye açıktır.

Hızlı prototipleme yöntemlerinin son derece maliyetli olduğu bu alanda hızlı buzlandırma ile prototipleme hem çevreyi hem operatörü koruyan, çevreci ve hızlı bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Günümüzde parça görsel prototipinin oluşturulmasında ve silikon kalıbı oluşturmada kullanılan bu yöntem, önümüzdeki yıllarda yapılacak çalışmalarla kullanım alanını genişletmeye devam edecektir.

## 7. KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Schmidt, L. D., "How Chrysler Is Using Stereolithography Rapid Prototyping Survey Results", *Proceedings of the Fifth International Conference on Rapid Prototyping*, 359-370, 1994.
- [2] Leu, M. C., Zhang, W., "Research and Development in Rapid Prototyping and Tooling in the United States", *Proceedings of the International Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing*, (1998).
- [3] Yang, B., Leu, M. C., and Zhang W., "Rapid Tooling of Dies and Molds through Rapid Fabrication of EDM Electrodes", *Proceedings of the North American Stereolithography Users Group Conference*, (1998).
- [4] Jacobs, P. F., "The Effects of Shrinkage Variation on Rapid Tooling Accuracy", *Proceedings of the North American Stereolithography Users Group Conference*, (1998).
- [5] Zhang, W., "Rapid Freezing Prototyping", *Report of the Robotics and Intelligent Manufacturing Laboratory*, (1998).
- [7] Zhang, W. Leu, M.C., Zhiming J., Yan Y., " Rapid Freezing Prototyping With Water", Newark, (1999).
- [8] Leu, M.C., Zhang, W., Sui, G., "An Experimental and Analytical Study of Ice Part Fabrication with Rapid Freeze Prototyping", *University of Missouri-Rolla*, Rolla, Missouri, USA, (1999).
- [9] Feng, C., Yan, Y., Zhang, R., "Comparison and analysis of continuously jetting and discretely jetting method used in rapid ice prototype forming", *Materials and Design*, 23: 77-81, (2002).
- [10] Feng, C., Yan, S., Zhang, R., Yan, Y., "Heat transfer analysis of rapid ice prototyping process by finite element method", *Materials and Design*, 28: 921-927, (2007).
- [11] Moritz, T., Richter, H.J., "Ice-mould freeze casting of porous ceramic components", *Journal of the European Ceramic Society*, 27: 4595-4601, (2007).
- [12] Bryant, F.D., Leu, M.C., " Modeling and Experimental Results of Concentration with Support Material in Rapid Freeze Prototyping", *Engineering Missouri University of Science and Technology Journal*, 411-428, (2008).
- [13] Barnett, E., Angeles, J., Pasini, D., Sijpkens, E., " Robot-Assisted Rapid Prototyping for Ice Sculptures", *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1-6, (2009).
- [14] Leu, M.C., Liu, Q., Bryant, F.D., "Study of Part Geometric Features and Support Materials in Rapid Freeze Prototyping", *University of Missouri*, Rolla, MO 65409, USA.
- [15] [http://utwired.engr.utexas.edu/lff/symposium/proceedings\\_archive/pubs/manuscripts/2009/2009-20-leu.pdf](http://utwired.engr.utexas.edu/lff/symposium/proceedings_archive/pubs/manuscripts/2009/2009-20-leu.pdf)
- [16] Leu, M.C., Isanaka, S.P., Richards, V.L., " Increase of Heat Transfer to Reduce Build Time in Rapid Freeze Prototyping", *Missouri University of Science and Technology Journal*, 219-230, (2009).
- [17] <http://ofalloncasting.com/PDF/RapidFreezePrototyping.pdf>
- [18] Brodkey, R. S., *The Phenomena of Fluid Motions*, Addison-Wesley, Dover, (1968).



- [19] Munson, B. R., Young, D. F., Okiishi, T. H., *Fundamentals of Fluid Mechanics*, John Wiley & Sons, New York, (1994).
- [20] Bryant, F.D., Sui G., Leu, M.C., “A Study on Effects of Process Parameters in Rapid Freeze Prototyping”, *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 635-642, (2002).
- [21] Sui, G., Modeling and Analysis of Rapid Freeze Prototyping, *PhD dissertation*, University of Missouri-Rolla, (2002).
- [22] Sui, G., Zhang, W., Leu, M.C.,” Study On Water Deposit in Rapid Freeze Prototyping Process”, *University of Missouri Journal*, 342-349, (2000).
- [23] Liu, Q., Sui, G., Leu, M.C., “Experimental Study on the Ice Pattern Fabrication for the Investment Casting by Rapid Freeze Prototyping (RFP)”, *Computers in Industry*, 48: 181-197, (2002).