

**Atf İçin:** Ateş İ, Manay E, Şahin B, 2021. Farklı İmalat Yöntemleri İle Elde Edilen Mikrokanalların Metrolojik Karakterizasyonu. İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11(2): 1455-1467.

**To Cite:** Ates I, Manay E, Sahin B, 2021. Metrological Characterization of Microchannels Obtained by Different Fabrication Methods. Journal of the Institute of Science and Technology, 11(2): 1455-1467.

### Farklı İmalat Yöntemleri İle Elde Edilen Mikrokanalların Metrolojik Karakterizasyonu

İbrahim ATEŞ<sup>1\*</sup>, Eyüphan MANAY<sup>1</sup>, Bayram ŞAHİN<sup>2</sup>

**ÖZET:** Mikro imalat teknolojilerindeki gelişmeler yüksek hassasiyetli, düşük maliyetli ve yüksek performansa sahip mikro sistemlerin imalatın olanaklı hale getirmiştir. Mikrokanallar, mikro sistemlerin temel bileşenlerinden biri olarak mikroelektromekanik, kimyasal ve biyolojik cihazlar gibi mikro ve nano akışkan uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Mikrokanalların malzemesine, boyutsal imalat hassasiyetine, yüzey yapısına, istenen mekanik ve termal özelliklerine bağlı olarak çeşitli mikro imalat yöntemleri geliştirilmiştir. Genel olarak, bu imalat yöntemlerinin hassas mekanik imalat, silikon temelli imalat ve polimer işleme teknolojilerine dayandığı söylenebilir. Ancak, mikro ölçekli imalatlarda istenen hassasiyet ve kaliteye ulaşabilmek için bu imalat tekniklerinde birtakım değişiklikler yapmak gerekir. Çoğu imalat yönteminde aynı prosesi kullanarak hem makro hem de mikro ölçekte istenen özelliklerde ürün elde etmek mümkün değildir. Bu çalışmada, farklı ısı transferi ve akış prosesinde kullanılmak üzere farklı imalat metotları ile elde edilen mikrokanallı ısı alıcıların boyut ve yüzey karakteristikleri karşılaştırılmıştır. Mikrokanallı ısı alıcılar, litografi, hassas mekanik işleme, lazer tabanlı imalat yöntemleri, elektroerozyonla işleme yöntemleri kullanılarak üretilmişlerdir. Elde edilen mikrokanalların metrolojik işlemleri optik mikroskop ve optik profilometre ile yapılmıştır. İmalat yöntemleri, her bir mikrokanal için aynı imalat toleransının yakalanabilmesi, mikrokanalların dikdörtgen kesitli profile sahip olması, mikrokanal tabanında radyüs oluşumu, yüzey pürüzlülük değerinin kontrol edilebilmesi ve yüzeyin homojen bir pürüzlülük dağılımına sahip olması açısından değerlendirilmiştir. Bu kriterleri en iyi sağlayan yöntemin dalma elektroerozyonla üretilen mikrokanallı ısı alıcılar olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Mikro imalat yöntemleri, mikrokanal, yüzey karakterizasyonu

### Metrological Characterization of Microchannels Obtained by Different Fabrication Methods

**ABSTRACT:** Advances in microfabrication technologies have enabled the production of high precision, low cost and high performance micro systems. Microchannels are widely used in microfluidic and nanofluidic applications, such as microelectromechanical, chemical and biological devices, as one of the basic components of micro systems. Various microfabrication methods have been developed depending on the material of microchannels, dimensional accuracy, surface structure, desired mechanical and thermal properties. In general, it can be said that these production methods are based on precision mechanical manufacturing, silicon-based fabrication and polymer processing technologies. However, in order to achieve the desired precision and quality in micro-scale productions, it is necessary to make some changes in these manufacturing techniques. It is not possible to obtain products with the desired properties in both macro and micro scale by using the same process in most fabrication methods. In this study, the size and surface characteristics of microchannel heat sinks obtained with different manufacturing techniques for use in heat transfer and flow process were compared. Microchannel heat sinks are manufactured using lithography, precision mechanical processing, laser-based production methods, electro-erosion processing methods. Metrological characterization of the microchannels obtained were made with an optical microscope and an optical profilometer. The microfabrication methods used have been evaluated in terms of achieving the same production tolerance for each microchannel, having micro-channels rectangular profile, radius formation at the microchannel base, controlling the surface roughness value and having a homogeneous roughness distribution of the surface. It has been observed that the method that best meets these criteria is microchannel heat sinks manufactured by sinking electro-erosion technique.

**Keywords:** Microfabrication methods, microchannel, surface characterization

<sup>1</sup>İbrahim ATEŞ ([Orcid ID: 0000-0002-9644-9667](https://orcid.org/0000-0002-9644-9667)), Eyüphan MANAY ([Orcid ID: 0000-0002-5456-8756](https://orcid.org/0000-0002-5456-8756)), Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye

<sup>2</sup> Bayram ŞAHİN ([Orcid ID: 0000-0002-7016-644X](https://orcid.org/0000-0002-7016-644X)), Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: İbrahim ATEŞ, e-mail: ibrahim.ates@erzurum.edu.tr.

Bu çalışma İbrahim ATEŞ'in Doktora tezinden üretilmiştir.

## GİRİŞ

Nobel ödüllü ünlü fizikçi Richard Feynman 1959 yılında yaptığı “There is Plenty of Room at the Bottom” adlı konuşmasında mikro/nano ölçekte imalat ve ölçüm yöntemlerinin geliştirilmesiyle minyatürize edilmiş yapıların üretilip karakterize edilebileceğini ve bunun birçok yeni keşiflere ve teknolojik gelişmelere yol açabileceğini iddia etmiştir (Feynman, 1992). Takip eden yıllarda, malzeme ve imalat teknolojisindeki hızlı ilerlemelerle birlikte 1981’de taramalı tünelleme mikroskobu ve 1989’da atomal kuvvet mikroskobunun geliştirilmesi özellikle elektromekanik ve elektronik sistemlerin gittikçe küçülen boyutlarda üretilebilmesini hızlandırmıştır. Günümüzde, minyatürleşme eğilimi bilgisayar ve cep telefonu gibi elektronik cihazlarda açık bir şekilde görülmektedir. Elektronik cihazların hem küçülmesi hem de fonksiyonlarının artması söz konusu cihazların birim hacmi başına düşen işlev sayısının üssel olarak artmasına neden olmuştur.

Mikro elektro-mekanik sistemler (MEMS) üzerine daha fazla transistör yerleştirmek sistem performansını genellikle artırır. Diğer yandan, ilave edilen her bir transistör daha fazla ısı üretimine neden olur. Bilgisayar çiplerinde ortalama ısı akısının 2-4.5 MWm<sup>-2</sup>’ye ulaşması beklenirken yerel kızgın noktalarda bu değer 12-45 MWm<sup>-2</sup> olması öngörülmektedir (Karayiannis ve Mahmoud, 2017). Füzyon reaktörleri, lazer diodları, radar cihazları ve askeri avionik sistemler gibi uygulamalarda 10<sup>2</sup>-10<sup>3</sup> MWm<sup>-2</sup> mertebesinde çok yüksek ısı akısı değerlerine ulaşılacağı rapor edilmiştir (Kadam ve Kumar, 2014). Günden güne daha kompakt hale gelen modern elektronik sistemlerden olan ısı üretiminin artmaya devam etmesi daha yüksek ısı akılarında ısı atımı ihtiyacına yol açmıştır.

MEMS’lerin küçük yapıda olması nedeniyle yüksek ısı akılarına maruz kalmaları, performans kaybı oluşmadan çalışması için cihazda minimum sıcaklık gradyeninin sağlanması gerekliliği ve güvenli bir maksimum çalışma sıcaklığının altında tutulma zorunluluğu yeni ısı yönetim sistemlerinin geliştirilmesini zorunlu hale getirmiştir. MEMS’lerde gelişmiş soğutma teknolojilerine olan bu ihtiyaç, sürekli olarak yeni soğutma tekniklerinin araştırılmasını teşvik etmiştir. Bu noktada, mikrokanallı ısı alıcılar yüksek ısı atımı potansiyeline sahip etkili yöntemlerden biri olarak görülmektedir. Mikrokanallı ısı alıcı basitçe bir plaka veya alttaş üzerine açılmış ve kanatçıklarla birbirinden ayrılmış paralel küçük kanallardan oluşan bir mikro ısı değiştirici olarak düşünülebilir. Mikro ısı sistemler çok yüksek yüzey alan/hacim oranına sahip olmaları, yüksek hızda momentum, ısı ve kütle aktarımını gerçekleştirebilmeleri, hafif olmaları, daha az yer kaplamaları, daha az soğutucu akışkan gerektirmeleri gibi birçok üstünlüğü bünyesinde barındırdığından yüksek performanslı ısı yönetim sistemi olarak gelecek vadetmektedir.

Mikrokanallar, mikroelektronik, MEMS, kimyasal ve biyolojik cihazlar gibi mikro ve nano akışkan uygulamalarının yaygın olduğu sistemlerin temel bileşenlerinden biridirler. Temel olarak, üretilecek parçaların malzemesine, boyutsal imalat hassasiyetine, yüzey yapısına, istenen mekanik ve termal özelliklerine bağlı olarak çeşitli imalat yöntemleri geliştirilmiştir. Diğer yandan, mikro ölçekli imalatlarda istenen hassasiyet ve kaliteye ulaşabilmek için konvansiyonel imalat tekniklerinde birtakım değişiklikler yapmak gerekir. Çünkü çoğu imalat metodunda aynı prosesi kullanarak hem makro hem de mikro ölçekte istenen özelliklerde ürün elde etmek mümkün değildir (Kockman, 2013).

Mevcut literatür incelendiğinde farklı imalat metotları ile üretilen, ısı ve akış proseslerinde kullanılan mikrokanallı ısı alıcıların metrolojik özelliklerinin karşılaştırılması ile ilgili bir çalışma yazarların bilgisi dahilinde mevcut değildir. Bu çalışmada, farklı imalat metotları ile mikrokanallı ısı alıcı imalatını ve yüzey pürüzlendirme işlemi yapılarak, bu imalat tekniklerinin üstünlükleri ve zayıf noktaları tespit edilmiştir. Mikrokanallı ısı alıcılar, litografi, hassas mekanik işleme, lazer tabanlı imalat yöntemleri, elektroerozyonla işleme yöntemleri kullanılarak üretilmiştir. Elde edilen mikrokanalların

metrolojik işlemleri optik mikroskop ve optik profilometre ile yapılmıştır. İmalat yöntemleri, her bir mikrokanal için aynı imalat toleransının yakalanabilmesi, mikrokanalların dikdörtgen kesitli profile sahip olması, mikrokanal tabanında radyüs oluşumu, yüzey pürüzlülük değerinin kontrol edilebilmesi ve yüzeyin homojen bir pürüzlülük dağılımına sahip olması açısından değerlendirilmiştir. Böylelikle, mikrokanallı ısı alıcı üretimi için kullanılan imalat tekniklerinin değerlendirmesi açısından geniş veri tabanı sunulmuş ve literatüre önemli bir katkı yapılmıştır.

## MATERYAL VE METOT

Bu çalışma için ilk olarak farklı mikro imalat metotları ile mikrokanallı ısı alıcı numuneleri üretilmiştir. Daha sonra, üretilen mikrokanalların boyut ve pürüzlülükle ilgili karakterizasyonu Erzurum Teknik Üniversitesi Yüksek Teknolojiler Araştırma Merkezi laboratuvarlarında bulunan Bruker marka Contour GTK 3D optik profilometre ve Carl Zeiss marka optik mikroskop kullanılarak yapılmıştır.

### Litografi

Litografi, mikrokanal imalatında yaygın olarak kullanılan başlıca imalat metotlarından biridir. Litografi temelde, bir maske üzerindeki geometrik desenin fotorezist adı verilen ışığa duyarlı bir polimer malzeme ile kaplanmış silikon gibi yarı iletken bir alttaş üzerine aktarılması işlemidir. Uygulamada farklı tipte litografi yöntemleri bulunmakla birlikte mikrokanal imalatında yaygın olanı fotolitografi yöntemidir. Fotolitografi ile alttaş üzerine aktarılan geometrik desen eklemeli (örneğin biriktirme ve lift-off işlemi) veya çıkarmalı (örneğin aşındırma işlemi) mikro imalat işlemine tabi tutularak istenen ölçü ve biçimde nihai ürün elde edilmiş olur. Fotolitografi yöntemi hakkında daha detaylı bilgiler muhtelif kaynaklarda bulunabilir (Campell, 2008; Mack, 2008; Madou, 2011; Luttge 2016).

### Aşındırma

Aşındırma prosesi, yaygın olarak kullanılan çıkarmalı mikro imalat yöntemlerindedir. Aşındırma, bir alttaş üzerindeki malzemenin kimyasal veya fiziksel yollarla uzaklaştırılması ile istenen yapının elde edilmesidir. Islak ve kuru olmak üzere aşındırma prosesi iki kategoriye ayrılabilir. Kimyasal aşındırma olarak ta bilinen ıslak aşındırma prosesinde, yüzey üzerinden malzeme kaldırma işlemi potasyum hidroksit, tetra metil amonyum hidroksit gibi kimyasal aşındırıcı sıvı solüsyonlar ile gerçekleştirilir. Literatürde uygulamaya bağlı olarak kimyasal aşındırma için birçok reçete bulmak mümkündür (Anonim, 2003). Fiziksel aşındırma olarak ta bilinen kuru aşındırma yönteminde malzeme kaldırma işlemi plazma halindeki muhtelif gazların yüzey üzerine bombardıman yapılmasıyla elde edilir. Her iki yöntemde izotropik ve anizotropik biçimde aşındırma yapmak mümkündür. İzotropik aşındırmada, aşındırma hızı yönden bağımsız olup bütün yönlerde aynı oranda malzeme kaldırma işlemi gerçekleşir. Bu yöntemle yuvarlak profile sahip şekiller elde edilir. İzotropik ve ıslak anizotropik aşındırma teknikleri ile birbirine paralel olmayan yan yüzeyler elde edilirken kuru anizotropik aşındırma temelli yöntemler ile birbirine paralel dik yüzeyler elde etmek çoğu malzeme için mümkündür.

### Mikro Mekanik İşleme

Temelde mekanik imalat yöntemlerini, frezeleme, tornalama, delme ve taşlama olarak dört sınıfa ayırabiliriz. Bu yöntemlere ait mikro işleme teknolojisindeki makineler geleneksel makro boyuttaki mekanik işlemede kullanılan makinelerin küçültülmüş versiyonu olarak düşünülebilir. Ancak makro boyuttaki mekanik işleme ile mikro boyuttaki mekanik işleme yöntemleri talaş oluşumu, kesme kuvvetleri, takım geometrisi, titreşim, proses kararlılığı gibi konularda temel farklılıklara sahiptir (Liu et al. 2004). Mikro mekanik işleme, yarı iletken temelli üretim yöntemlerine göre, alüminyum, çelik, pirinç, bakır, polimer gibi çok farklı malzemelerden üretime izin vermesine karşın, işleme sürecini

etkileyen parametreler ve imalat sırasında karşılaşılan problemler ve çözümlerine yönelik çalışmalar diğer mikro imalat yöntemlerine göre oldukça azdır (Madou, 2011).

### **Lazerli Mikro İmalat**

İlk olarak 1970'li yıllarda imalat teknolojisinde uygulanmaya başlanan lazerli işleme günümüzde birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Neredeyse bütün malzemeler için uygun olması, karmaşık mikro yapıların kalıp veya maske gerektirmeden direkt üretilebilmesi, işleme süresinin kısa ve ekonomik olması, seri üretime uygunluğu lazer-tabanlı imalat tekniklerinin yaygınlaşmasında önemli rol oynamıştır. Lazer ile uzaklaştırma yöntemi, yüksek enerjili lazer ışın demetinin iş parçası üzerine odaklanması ve bu ışın demetini oluşturan fotonların iş parçası tarafından emilmesi sonucu ısınan bölgenin buharlaşması veya süblimleşmesi ile malzeme kaldırma işlemidir. Dolayısıyla, bu yöntemde malzeme kaldırma işlemi, litografi, aşındırma ve mikro mekanik işlemeden farklı olarak ısı enerjisi etkisiyle gerçekleşmektedir.

### **Seçici Lazer Sinterleme/Ergitme**

Seçici lazer sinterleme/ergitme yöntemleri, temelde hızlı prototipleme ihtiyacını karşılamak için geliştirilen eklemeli imalat yöntemlerindedir. 1990'lı yıllarda hızlı prototipleme yöntemlerindeki gelişmelerle birlikte bu yöntemler nihai, fonksiyonel parçaların imalatında da kullanılmaya başlanmıştır (Duman ve Kayacan, 2017). 1989 yılında Dr. Carl Deckard tarafından geliştirilen ve patenti alınan Seçici Lazer Sinterleme işlemi, esas olarak, toz halindeki malzemelerin yüksek enerjili lazerler ile ısıtılması sonucu birbiriyle birleşmesi esasına dayanan katmalı imalat tekniğidir. Bu yöntemde, çelik, titanyum, kalay, krom, poliamid, seramik malzemeler, elastomerler, polikarbonatlar gibi çok çeşitli malzemeler işlenebilir.

Seçici lazer sinterleme ile aynı konseptte sahip, direk metal lazer sinterleme veya seçici lazerli ergitme yönteminde ise toz malzemelerin birleşmesi için lazerle sinterleme yerine tamamen ergitme yapılır. Bu yöntem, 1990'lı yılların ikinci yarısında F&S Streolithographietechnik GmbH firmasından Dr. M. Fockele ve Dr. D. Schwarze ve Fraunhofer ILT şirketinden Dr. W. Meiners, Dr. K. Wissenbach ve Dr. G. Andres tarafından metal parçaların üretilmesi için geliştirilmiştir. Seçici lazerli ergitme yöntemi ile ilgili kapsamlı bir literatür taraması Yap ve ark. (2015) tarafından yapılmıştır.

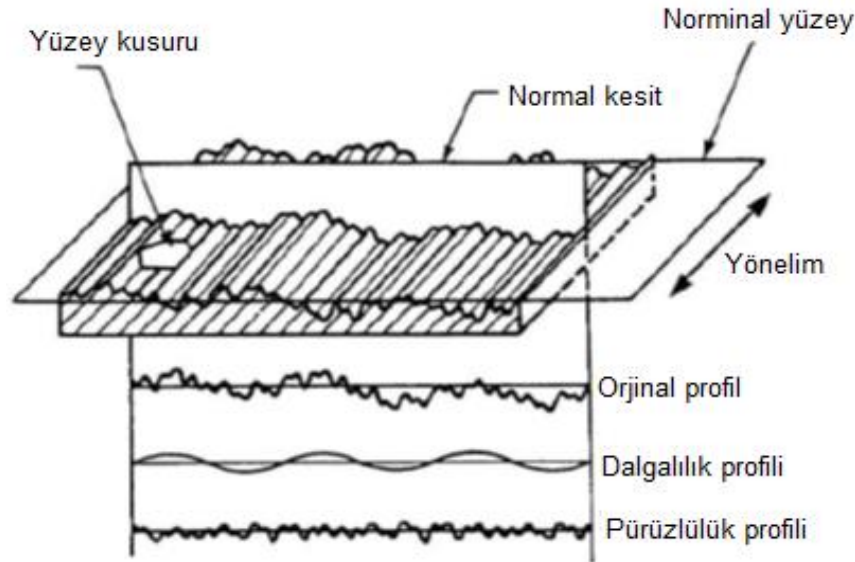
### **Elektroerozyonla İşleme Yöntemi**

Geleneksel olmayan imalat yöntemlerinin ilklerinden biri olan elektro erozyonla işleme yöntemi, dielektrik sıvı ortam içerisinde elektrot ve elektriksel olarak iletken iş parçası arasında oluşturulan kontrollü, yüksek frekanslı kıvılcımlar sonucu açığa çıkan ısı enerjisi ile malzeme kaldırma işlemidir.

İmalat teknolojisinde yaygın olarak kullanılan iki tip elektro erozyonla işleme yöntemi vardır. Bunlar, dalma elektro erozyonla işleme ve tel elektro erozyonla işleme yöntemleridir. İki yöntemde de elektriksel erozyon ile malzeme kaldırma gerçekleşmesine rağmen çalışma şekli ve kullanım yerleri açısından farklılar vardır. Dalma elektro erozyonla işleme yöntemi ilk geliştirilen yöntem olup geleneksel elektro erozyonla işleme yöntemi olarak ta bilinir. Tel elektro erozyonla işleme yöntemi, 1960-1970'li yıllarda, dalma elektro erozyonda kullanılan elektrotların daha az işçilik gerektiren ve maliyeti düşük elektrotlarla değiştirilmesine yönelik çalışmalar sonucu ortaya çıkmıştır (Markopoulos ve Davim, 2018). Tel elektro erozyonla işleme yönteminde, dalma elektro erozyondaki gibi takım, elektrot şeklinin iş parçasına izdüşümü söz konusu değildir. Dalma elektro erozyon yöntemi ile üç boyutlu karmaşık şekilli geometrilerin imalatı ve kör deliklerin açılması mümkündür. Tel elektro erozyonla işleme yönteminde ise iş parçasının tüm kesiti boyunca olan profillerin oluşturulması için uygundur (Kocabaş, 2013).

## Yüzey karakteristikleri

Yüzey yapısı veya tekstürü, nominal yüzeyden olan tekrarlayan ve rastlantısal sapmalar sonucu yüzeyin sahip olduğu üç boyutlu topografya olarak tanımlanabilir. Nominal veya ideal yüzey tasarlanan yüzey biçimi olup boyutları teknik resimde ölçülerle gösterilen yüzeylerdir. Gerçek yüzeyler ise, malzemenin sınırlarını içerirler ve yüzey yapısı hakkında bilgi verirler (Inamdar, 2006). Yüzey yapısındaki sapmaları karakterize eden başlıca fiziksel parametreler, pürüzlülük (nano ve mikro pürüzlülük), dalgalılık (makro pürüzlülük), yönelim (desen yönü) ve hata olarak sıralanabilir (Şekil 1).



Şekil 1. Yüzey yapısı karakteristikleri (Bhushan 2001).

Farklı tipteki sapmalar birbirinden dalga boyu ile ayrılır. Pürüzlülük yüzeydeki kısa dalga boylu mikro/nano ölçekli dalgalanmaları gösterir. Yüzey üzerinde farklı büyüklük ve aralıklarla bulunan yükseltmeler ve vadiler pürüzlülüğe ait temel karakteristik yapılardır. Dalgalılık ise daha uzun dalga boylu yüzey düzensizlikleri olup makro pürüzlülük olarak ta adlandırılır. Makine veya iş parçasındaki bir hata, titreşimler, ısı işlem, çarpılma gibi etkenlerden kaynaklanabilir. Yönelim, imalat sürecine özgü baskın yüzey deseninin yönünü ifade eder. Hatalar, yüzeydeki istenmeyen, beklenmedik yapılardır. Bunların haricinde, yüzeyde normalden çok büyük dalga boylu sapmaların olduğu form hataları da görülebilir (Bhushan, 2001).

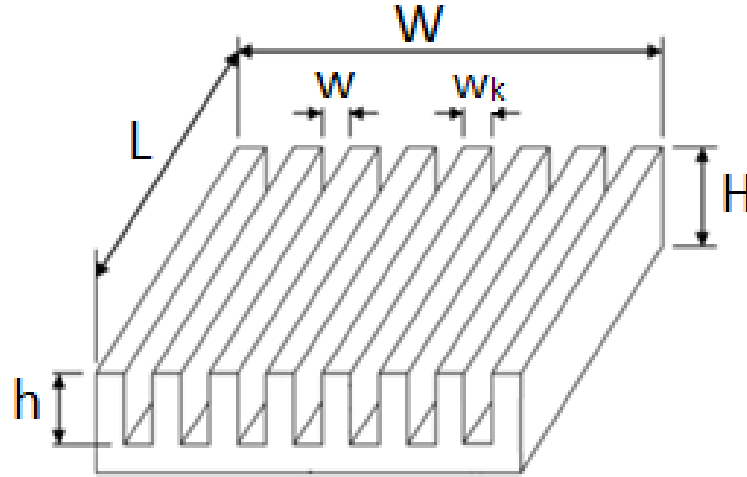
Gerçek yüzeyler çok karmaşık olduğundan yüzeyin özelliklerini tanımlayan çok çeşitli pürüzlülük parametresi vardır. Uygulamaya bağlı olarak bazı parametreler önem kazanabilir. Karakterizasyonda kullanılan pürüzlülük parametre sayısı arttıkça yüzey hakkında daha fazla bilgi edinilmiş olunur. Yüzey pürüzlülük parametreleri; genlik parametreleri, uzaklık parametreleri ve hibrit parametreler olmak üzere genel olarak üç kategoride incelenebilir (Gadelmawla ve ark., 2002). Genlik parametreleri, yüzeyin düşey yöndeki yüzey sapmalarını tanımlarken uzaklık parametreleri ise yatay yöndeki sapmaları tanımlar. Hibrit parametreler ise, genlik ve uzaklık parametrelerinin birleşimi olup triboloji gibi farklı mühendislik uygulamalarında yüzeyi karakterize etmede kullanılır.

## Mikrokanalların yüzey pürüzlülüğü

Çizelge 1'de, deneylerde kullanılan mikrokanallı ısı alıcıların boyutlarını göstermektedir. Bu çalışmada kullanılan mikrokanallı ısı alıcılarda, imalat prosesi sonrası yüzeylerinde ortalama pürüzlülük değeri ( $R_a$ ) 1  $\mu\text{m}$ -3  $\mu\text{m}$  aralığında olacak şekilde random pürüzlülük elde edilmiştir.



Çizelge 1. Deneyleerde kullanılan mikrokanallı ısı alıcılarının ölçüleri.



## ÖLÇÜLER

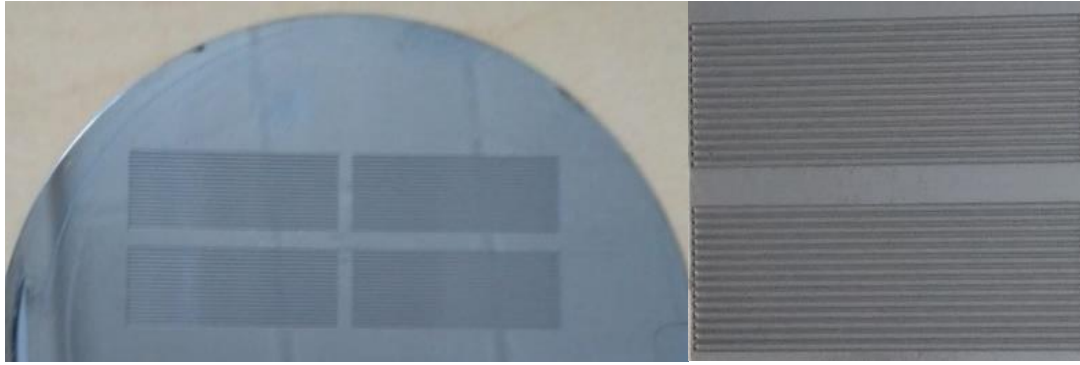
No	Isı alıcı genişliği, $W$ (mm)	Isı alıcı uzunluğu, $L$ (mm)	Isı alıcı kalınlığı, $H$ (mm)	Mikrokanal genişliği, $w$ ( $\mu\text{m}$ )	Mikrokanal yüksekliği, $h$ ( $\mu\text{m}$ )	Hidrolik çap, $D_h$ ( $\mu\text{m}$ )
1	12	30	2,3	300	450	360
2	12	30	2,3	500	450	473
3	12	30	2,3	700	450	547

## BULGULAR VE TARTIŞMA

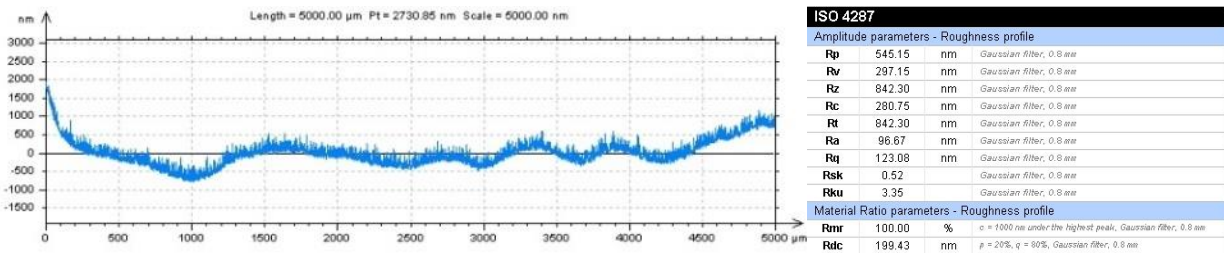
## Mikrokanallı ısı alıcılarının karakterizasyonu

Üretilen mikrokanallı ısı alıcıların boyut ve yüzey karakterizasyonu Bruker marka Contour GTK 3D optik profilometre ve Carl Zeiss marka optik mikroskop yardımıyla yapılmıştır. Mikrokanal tabanındaki yüzey pürüzlülük değerleri optik profilometre ile ölçülmüştür. Her bir mikrokanalın başlangıç, orta ve son bölgelerinden olmak üzere üç farklı noktadan yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmış olup, elde edilen değerlerin ortalaması mikrokanalın pürüzlülük değeri olarak belirlenmiştir. Bir ısı alıcıdaki bütün mikrokanalların yüzey pürüzlülük ölçüm değerlerinin ortalaması söz konusu ısı alıcının yüzey pürüzlülük değeri olarak alınmıştır. Mikrokanalların genişlik ve yükseklik ölçümleri optik mikroskopla karakterize edilmiştir. Optik mikroskopta ayrıca, mikrokanalların yan yüzeylerinin dikliği ve mikrokanal tabanındaki köşelerin yapısı kontrol edilmiştir.

Bu kısımda farklı imalat yöntemleri ile elde edilen mikrokanalların boyut ve yüzey karakterizasyonu sonuçları sunulmuştur. İlk olarak Sabancı Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde Şekil 2'de gösterildiği gibi silikon alttaş üzerine fotolitografi yöntemiyle değişik boyutlarda mikrokanallar açılmıştır. Kanalların yüzey pürüzlülük ölçümleri KLA-TENSOR P6 profilometre ile yapılmıştır. Örnek yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları Şekil 3'te verilmiştir. Mikrokanalların ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin 0,1 mikronun altında olduğu görülmüştür. Oldukça pürüzsüz olan yüzeylerde pürüzlülük oluşturmak için Oxford PlasmaLab System 100 ICP 300 Deep RIE cihazında kuru aşındırma (etching) işlemi uygulanmıştır. Fiziksel aşındırma olarak ta bilinen bu yöntemde malzeme kaldırma işlemi plazma halindeki muhtelif gazların yüzey üzerine bombardıman yapılmasıyla elde edilmektedir. Cihaz üzerinde, çalışma parametreleri olan gaz cinsi, debi, basınç sıcaklık, RF, aşındırma süresi değiştirilerek farklı aşındırma reçeteleri uygulanmıştır. Bu işlemler sonunda yüzey pürüzlülüğünde kayda değer bir değişim görülmemiştir.



Şekil 2. Fotolitografi yöntemiyle silikon üzerine açılan mikrokanallar.

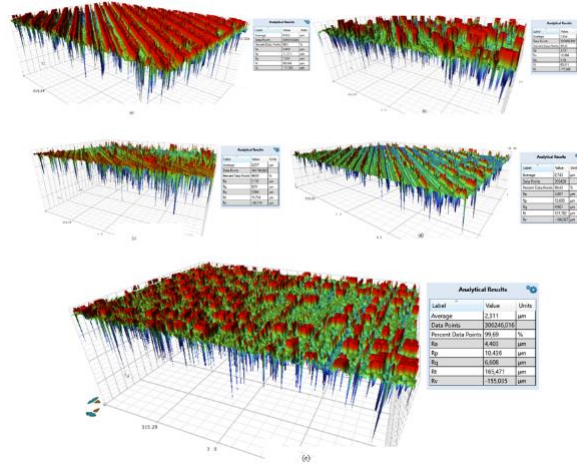


Şekil 3. Fotolitografi yöntemiyle oluşturulan mikrokanallara ait yüzey pürüzlülük ölçümü.

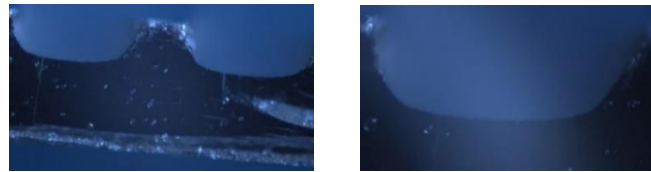
Bu yöntem alternatif olarak, ıslak aşındırma yöntemiyle pürüzlülük elde edilmeye çalışılmıştır. Kimyasal aşındırma olarak ta bilinen ıslak aşındırma prosesinde, yüzey üzerinden malzeme kaldırma işlemi potasyum hidroksit, tetra metil amonyum hidroksit gibi kimyasal aşındırıcı sıvı solüsyonlar ile gerçekleştirilir. Pürüzlendirme sağlamak için silikon mikrokanallar 70°C'deki saf su, amonyum hidroksit ve hidrojen peroksit karışımının 5:1:1 hacimsel oranındaki kimyasal çözeltisi içine atılmıştır. Bu yöntemde de istenen pürüzlülük değerleri elde edilememiştir. Bu yöntemin ayrıca dezavantajı kanalın bütün yüzeylerinden aşındırma yapmasıdır ki bu da kanal boyutlarının değişmesi anlamına gelmektedir. Bu yüzden, literatürde uygulamaya bağlı olarak kimyasal aşındırma için birçok reçete bulunmasına rağmen bu yöntemle daha fazla pürüzlendirme yapılmamıştır.

Fotolitografi ile üretilen silikon mikrokanalların pürüzlendirilmesi için kuru ve ıslak aşındırmadan başka farklı metotlar da denenmiştir. İlk olarak, Conceptlaser marka 3D metal yazıcıda kanalların pürüzlendirme denemeleri yapılmıştır. Bunun için farklı lazer atım konfigürasyonuna bağlı olarak silikon alttaş üzerinde farklı yüzey pürüzlülüklerinin oluşturulması hedeflenmiştir. Elde edilen pürüzlülük sonuçları Şekil 4'te gösterilmiştir. Bu yöntemde, 2-6 µm aralığında olacak şekilde yüzey pürüzlülük artışı sağlansa da Şekil 4'ten görüleceği gibi homojen olmayan bir yüzey yapısı elde edilmiştir. Homojen olmayan bir yüzey yapısı deneysel verileri etkileyip sonuçların yanlış olarak değerlendirilmesine yol açacağından bu yöntemle pürüzlendirme işleminden vazgeçilmiştir. Ayrıca, 3D yazıcıda parça sabitleme işlemi yapılamadığından kanalların üretilip sonradan sadece kanalların içine isabet edecek şekilde lazer gönderimi oldukça zor gözükmemektedir.

Litografi yönteminin bir diğer dezavantajı, elde edilen kanalların dikdörtgen yerine trapez veya oval kesite sahip olmasıdır. Şekil 5'de kanalların optik mikroskop ile elde edilen kesit görüntüleri verilmiştir. Bu durum, kaynama karakteristiklerini etkileyeceğinden litografi ile mikrokanallı ısı alıcı imalatı bu çalışma için uygun gözükmemektedir.

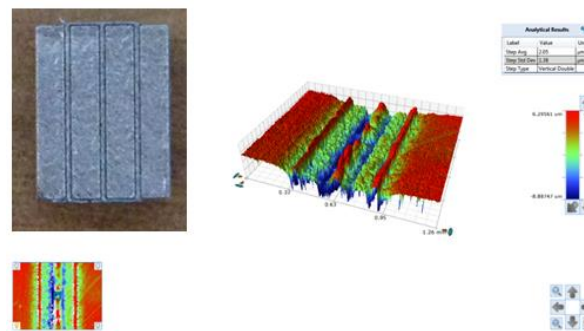


Şekil 4. 3D metal yazıcıda lazer atışlarıyla pürüzlülük oluşturma sonuçları.



Şekil 5. Fotolitografi ile üretilen silikon mikrokanalların optik mikroskopta alınan profil görüntüleri.

İstenen özelliklerde mikrokanallar elde etmek için kullanılan yöntemlerden biri de Seçici Lazerli Ergitme yöntemi olmuştur. Bu amaçla, ConceptLaser marka üç boyutlu metal yazıcıda, 0,3 mm genişliğinde ve 0,45 mm derinliğinde paslanmaz çelik malzemeden üç adet mikrokanal imalatı yapılmıştır. Toz çapı 25-100 mikrometre arasında değişmektedir. Elde edilen parça ve optik profilometre ölçümleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Optik profilometre görüntüleri incelendiğinde efektif bir kanal yapısının, özellikle de kanal derinliğinin oluşmadığı görülmektedir. Diğer yandan, tam olarak ergimeyen tozlar kanalın ortasında birikerek iki bölmeli bir kanal oluşumuna neden olmuştur. Kanal boyutlarının küçük olması bu tür sonuçlara yol açmış olabilir.

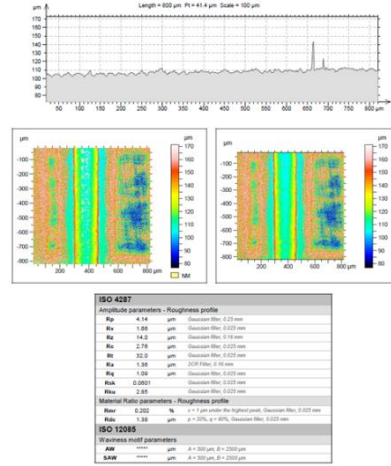


Şekil 6. Seçici lazer ergitme yöntemiyle elde edilen kanalların yapısı.

Mikrokanallı ısı alıcı imalat denemelerinde kullanılan yöntemlerden bir diğeri de mikro (ultra hassas) frezeleme yöntemi olmuştur. Mikro CNC frezeleme makinesinde, farklı işleme parametreleriyle alüminyum malzeme üzerine on adet mikrokanal açtırılmıştır. Böylelikle, işlem parametrelerini değiştirerek farklı yüzey pürüzlülük değerlerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Örnek bir yüzey ölçüm görüntüsü Şekil 7'de verilmiştir. Pürüzlülük ölçümleri sonucu üretilen mikrokanallardaki pürüzlülüğün

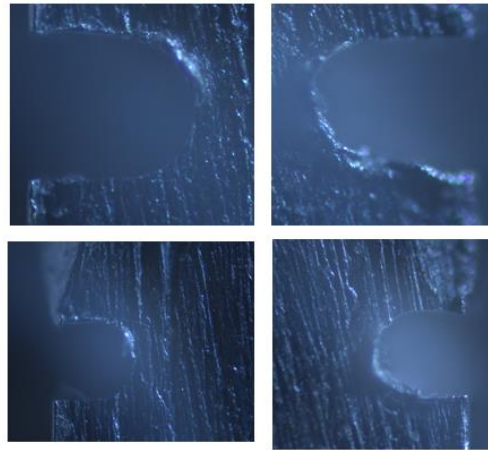


1  $\mu\text{m}$ -7  $\mu\text{m}$  aralığında olduğu görülmüştür. Ancak bazı kanallardaki ölçümlerde pürüzlülük değerlerinde 2 mikrometreyi aşan farklılıklar olduğu görülmüştür.



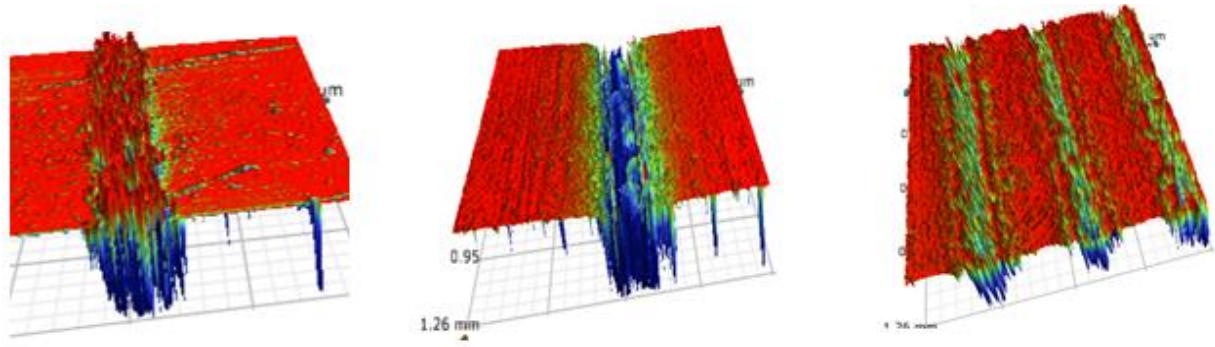
Şekil 7. Mikro frezeleme ile üretilen mikrokanallara ait örnek yüzey pürüzlülük ölçümü.

Diğer yandan, optik mikroskopla elde edilen kesit yapısı incelemelerinde ise Şekil 8’de gösterildiği gibi üretilen kanalların neredeyse yarı dairesel kesite sahip olup dikdörtgen yapıdan uzak olduğu görülmüştür. Ayrıca kanalların giriş ve çıkışlarında çapakların oluştuğu gözlenmiştir. Bu problemlerle birlikte, farklı boyutlardaki mikrokanallarda benzer yüzey pürüzlülük değerlerinin elde edilmesindeki zorluklar mikro mekanik işleminin bu çalışma için uygun olmadığını göstermiştir.



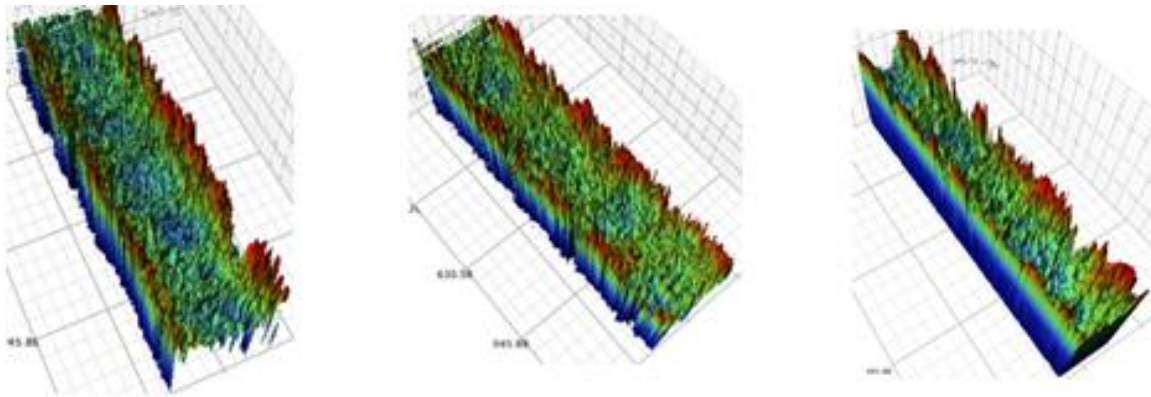
Şekil 8. Mikro frezeleme ile üretilen mikrokanalların kesit görüntüleri.

Mikrokanalların imalat yöntemleri ile ilgili literatür incelendiğinde mikro/nano/femto saniye lazerlerin bu amaçla kullanıldığı görülmektedir (Prakash ve Kumar 2015). Bu çalışma kapsamında, bakır, alüminyum ve paslanmaz çelik malzemeler üzerine nanosaniye mertebelerinde atım yapabilen lazerlerle farklı çalışma parametreleriyle (lazer gücü, frekansı, ilerleme hızı) muhtelif ölçüde mikrokanal açma denemeleri yapılmıştır. Şekil 9’da kanalların optik profilometre ile alınmış görüntüleri verilmiştir. 3D metal yazıcı ile üretilen kanallardakine benzer problemlerle karşılaşmıştır. Optik profilometre görüntüleri incelendiğinde efektif bir kanal yapısının oluşmadığı görülmüştür.



Şekil 9. Nano saniye mertebeli lazerlerle üretilen mikrokanalların optik profilometre görüntüleri.

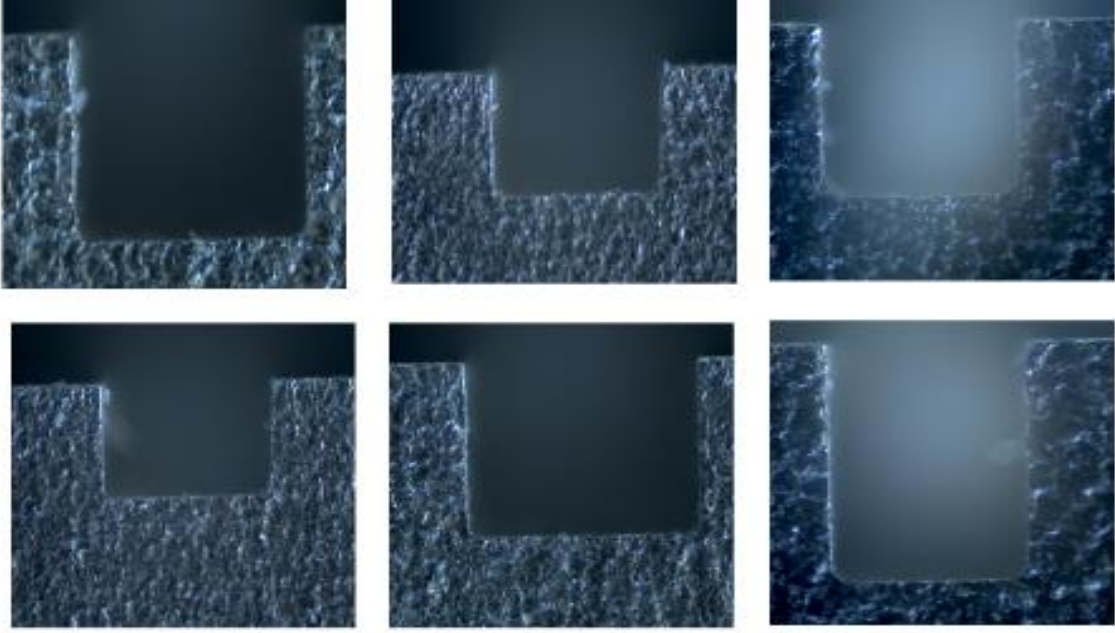
Bu çalışmada, elektro erozyonla mikrokanal imalatı ilk olarak tel elektro erozyon yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 10'da tel erozyonla elde edilen kanalların optik profilometre ile elde edilen yüzey yapısı gösterilmiştir. Bu yöntemde, daha önce bahsedilen yöntemlere nazaran homojen bir yüzey pürüzlülük dağılımı elde edilmiştir. Ancak, pürüzlülüğün nispeten yüksek değerlerde ( $5-12 \mu\text{m}$ ) olduğu görülmüştür. Bu durum, seçilen işleme parametrelerinden kaynaklanmış olabilir. Çünkü literatürde çok daha düşük pürüzlülük değerinin elde edildiği tel erozyon çalışmaları mevcuttur (Jones ve Garimella, 2009; Jafari ve ark., 2016). Kanal yan yüzeylerinin dik olduğu, ancak taban yüzeyiyle yan yüzeylerin birleşim köşelerinin yuvarlatılmış olduğu görülmüştür. Tel elektrotun belli bir çapa sahip olması köşelerde radyüs oluşmasına neden olmuştur. Benzer durum Jafari ve ark., (2016) tarafından da rapor edilmiştir.



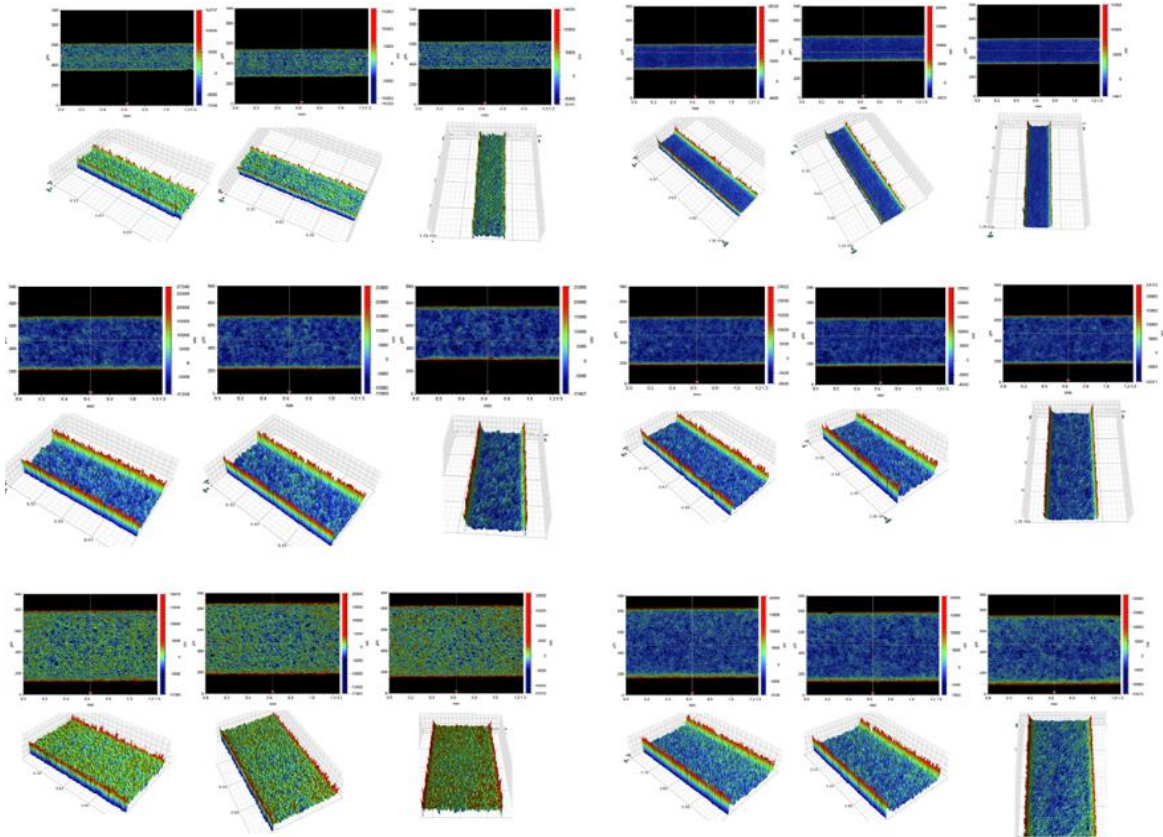
Şekil 10. Tel erozyon yöntemiyle üretilen mikokanallara ait örnek optik profilometre görüntüleri.

Tel elektro erozyonla üretilen mikrokanallar, homojen yüzey yapısına sahip olması ve kanal yan yüzeylerinin dik olması açısından üstünlüklere sahiptir. Ancak, yüzeylerin birleşme yerlerinin radyüslü olması tel çapından dolayı kaçınılmazdır. Tel elektro erozyon yönteminin diğer yöntemlere nazaran daha iyi sonuçlar vermesi endüstride tel erozyon kadar yaygın olmasa da özellikle kalıp imalatında tercih edilen, keskin köşelerin elde edilebileceği bir diğer elektro erozyon yöntemi olan dalma elektro erozyon ile mikrokanal imalatını ön plana çıkarmıştır. Bu amaçla, Ankara'da bulunan Hasemek firmasına, ilk olarak deneme amaçlı farklı ölçülerde ve yüzey pürüzlülük değerlerine 20 adet mikrokanal ürettirilmiştir. Üretilen mikrokanalların boyut ve yüzey karakterizasyonu optik profilometre ve optik mikroskop ile yapılmıştır. Şekil 12'de görüldüğü gibi üretilen mikrokanallar homojen bir pürüzlülüğe sahiptir. Yüzey pürüzlülük değerleri  $0.75 \mu\text{m}-3 \mu\text{m}$  aralığında olduğu görülmüştür. Aynı boyuttaki kanallarda farklı yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Aynı zamanda, farklı boyutlardaki kanallarda benzer yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Şekil 11'de kanalların optik mikroskoptan

alınmış kesit görüntüleri verilmiştir. Kanalların dikdörtgen bir profile sahip olduğu, köşelerde yok denecek kadar bir radyüs olduğu görülmüştür. Diğer imalat yöntemleri ile karşılaştırdığımızda en iyi profil bu metotla elde edilmiştir.



Şekil 11. Dalma erozyon yöntemiyle üretilen mikrokanalların örnek kesit görüntüleri.



Şekil 12. Dalma erozyonla üretilen mikrokanalların örnek optik profilometre görüntüleri.



Yukarıda ayrıntılarıyla verilen imalat denemeleri sonucu bu çalışma kapsamında mikrokanallı ısı alıcı imalatında kullanılan farklı imalat metotlarının karşılaştırması Çizelge 2’de verilmiştir. Sonuç olarak, en uygun yöntemin dalma elektro erozyon metodunun olduğu görülmüştür. Dalma elektro erozyon yöntemiyle, homojen yüzey yapısına sahip, boyutsal hassasiyeti yüksek, dikdörtgen kesit profilli 1 µm – 3 µm ortalama yüzey pürüzlülüğüne sahip mikrokanal imalatı gerçekleştirilmiştir.

**Çizelge 2.** Farklı imalat yöntemleri ile elde edilen mikrokanallı ısı alıcıların karşılaştırılması.

İmalat Yöntemi	Boyutsal hassasiyet	Homojen yüzey yapısı	Dik ve keskin köşeli profil	Yüzey pürüzlülüğünün kontrol edilebilirliği
Litografi ve aşındırma	✓	✓	✗	✗
Lazer temelli işleme	✗	✗	✗	✗
Mikro mekanik işleme	✓	✗	✗	✗
Tel erozyon	✓	✓	✗	✓
Dalma erozyon	✓	✓	✓	✓

## SONUÇ

Bu çalışmada, akış kaynama prosesinde kullanılmak için farklı imalat metotları ile elde edilen mikrokanallı ısı alıcıların boyut ve yüzey karakteristikleri karşılaştırılmıştır. Mikrokanallı ısı alıcılar, litografi, hassas mekanik işleme, lazer tabanlı imalat yöntemleri, elektroerozyonla işleme yöntemleri kullanılarak üretilmişlerdir. Elde edilen mikrokanalların metrolojik işlemleri optik mikroskop ve optik profilometre ile yapılmıştır. İmalat yöntemleri, her bir mikrokanal için aynı imalat toleransının yakalanabilmesi, mikrokanalların dikdörtgen kesitli profile sahip olması, mikrokanal tabanında radyüs oluşumu, yüzey pürüzlülük değerinin kontrol edilebilmesi ve yüzeyin homojen bir pürüzlülük dağılımına sahip olması açısından değerlendirilmiştir. Bu kriterleri en iyi sağlayan yöntemin dalma elektroerozyonla üretilen mikrokanallı ısı alıcılar olduğu görülmüştür.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından “117M223” nolu proje ile desteklenmiştir.

## Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

## Yazar Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

## KAYNAKLAR

- Anonim, 2003. Wet-Chemical Etching and Cleaning of Silicon. Virginia Semiconductor, Web sitesi: [https://www.virginiasemi.com/?cont\\_uid=54](https://www.virginiasemi.com/?cont_uid=54), Erişim Tarihi: 03.10.2020.
- Bhushan B, 2001. Surface Roughness Analysis and Measurement Techniques. In: Modern Tribology Handbook, Bhushan B. (eds), CRC Press, 1, 49-119, USA.
- Campbell SE, 2008. Fabrication Engineering at the Micro- and Nanoscale. Oxford University Press, New York.
- Duman B, Kayacan MC, 2017. Doğrudan Metal Lazer Sinterleme/Ergitme Yöntemi ile Kanal Edilecek Parçanın Mekanik Özelliklerinin Tahmini. SDU Teknik Bilimler Dergisi, 7(1): 12-28.
- Feynman RP, 1992. There’s Plenty of Room at the Bottom [data storage]. Journal of Microelectromechanical Systems, 1(1): 60-66.

- Gadelmawla ES, Koura MM, Maksoud TMA, Elawa IM, Soliman HH, 2002. Roughness Parameters. *Journal of Material Processing Technology*, 123(1): 133-145.
- Inamdar KH, 2006. Some Studies on the Analysis of Surface Quality of Flat Metal Surfaces Using Image Processing Techniques. Doktora Tezi, Shivaji University, Kolhapur, India.
- Jafari R, Okuyucu-Özyurt T, Ünver HO, Bayer O. 2016. Experimental Investigation of the Flow Boiling of R134a in Microchannels. *Experimental Thermal and Fluid Sciences*, 79: 222-230.
- Jones BJ, Garimella SV, 2009. Surface Roughness Effect on Flow Boiling in Microchannels. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 1(4): 041007.
- Karayiannis TG, Mahmoud MM, 2017. Flow Boiling in Microchannels: Fundamentals and Applications. *Applied Thermal Engineering*, 115: 1372-1397.
- Kadam S, Kumar R, 2014. Twenty First Century Cooling Solution: Microchannel Heat Sinks. *International Journal of Thermal Sciences*, 85: 73-92.
- Kocabaş Ş, 2013. Elektroerozyonla İşlemede İşlem Parametrelerinin Malzeme Giderilmesi ve Yüzey Kalitesine Etkilerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Luttge R, 2016. Nano- and Microfabrication for Industrial and Biomedical Applications. Elsevier, Oxford.
- Mack C, 2008. Fundamental Principles of Optical Lithography. John Wiley&Sons, West Sussex.
- Madou MJ, 2011. Fundamentals of Microfabrication and Nanotechnology. CRC Press, Vol. 2, Florida.
- Markopoulos AP, Davim JP, 2018. Advanced Machining Processes: Innovative Modeling Techniques. Taylor & Francis, London.
- Prakash S, Kumar S, 2015. Fabrication of Microchannels: A Review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacturing*, 229(8): 1273-1288.
- Yap CY, Chua CK, Dong ZL, Liu ZH, Zhang DQ, Loh LE, Sing SL, 2015. Review of Selective Laser Melting: Materials and Applications. *Applied Physics Reviews*, 2(4): 041101.