



ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ  
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ


INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING  
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

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

## MİKRO-AKIŞKAN ÇİPİN ZAMANA BAĞLI BASINÇ ANALİZİ

### TIME-BASED PRESSURE ANALYSIS OF MICRO-FLUID CHIP

Yazar (Author): Osman Ülker 


**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Ülker O., “ Mikro-Akışkan Çipin Zamana Bağlı Basınç Analizi ” *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 4(2): 116-123, (2020).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.744962

Araştırma Makale/ Research Article

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

# MİKRO-AKIŞKAN ÇİPİN ZAMANA BAĞLI BASINÇ ANALİZİ

Osman Ülker<sup>a</sup> 

<sup>a</sup>Muş Alparslan Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, TÜRKİYE

\* Sorumlu Yazar: [o.ulkir@alparslan.edu.tr](mailto:o.ulkir@alparslan.edu.tr)

(Geliş/Received: 29.05.2020; Düzeltme/Revised: 13.06.2020; Kabul/Accepted: 06.07.2020)

## ÖZ

Mikro elektromekanik sistemler (MEMS), ölçülen bir mekanik sinyalin makine tarafından okunabilir bir sinyale dönüştürülmesini sağlayan mekanik ve elektromekanik mikro ölçekte bileşenlerden oluşan bir teknolojidir. Geleneksel mekanik üretimin aksine, MEMS cihazının üretiminde, entegre bir devre ile uyumlu olan yüzey mikroişleme ve toplu mikroişleme süreçlerini içeren yarı iletken yöntemi kullanılır. Bu aygıtlar veya sistemler makro ölçekteki etkileri algılama, denetleme, etkinleştirme ve oluşturma yeteneğine sahiptir.

Bu çalışmada, mikro litre ve daha küçük hacimlerdeki akışkanların mikro ölçekteki kanallar içerisinde kontrol edilmesini ve hareket etmesini sağlayan bir sistem olan mikro-akışkan çipin tasarımı 3B tasarım programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mikro-akışkan, tek kanal girişli ve dört kanal çıkışlı olacak biçimde tasarlanmıştır. Bu mikro-akışkanın ön fiziksel testleri, araştırılması ve zamana bağlı basınç analizleri COMSOL MultiPhysics programı ile yapılmıştır.

Tasarımı gerçekleştirilen mikro-akışkan çipin  $t=0, 0.5, 1, 1.5$  ve  $2$  s zaman değerlerine bağlı akış yönü ve basınç analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda mikro-akışkan kanallarında zamana bağlı akış yönü ve basınç değerleri farklılık göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Mikro-akışkan, Mikro elektromekanik sistem (MEMS), COMSOL, Basınç analizi.

## TIME-BASED PRESSURE ANALYSIS OF MICRO-FLUID CHIP

### ABSTRACT

Micro electromechanical systems (MEMS) is a technology consisting of mechanical and electromechanical micro scale components that enable a measured mechanical signal to be converted into a machine readable signal. Unlike conventional mechanical production, the semiconductor method is used in the production of the MEMS device, which includes surface micro processing and batch micro processing processes compatible with an integrated circuit. These devices or systems are capable of detecting, controlling, activating and creating macro-scale effects.

In this study, the design of the micro-fluidic chip, which is a system that enables the control and movement of fluids in micro liter and smaller volumes inside the micro scale channels, has been carried out using the 3D design program. The microfluidic was designed to have one channel inlet and four channel outlet. Preliminary physical tests and investigation of this micro-fluid were carried out using the COMSOL MultiPhysics program and the required time dependent pressure tests.

Flow direction and pressure analysis of the designed micro-fluidic chip based on  $t = 0, 0.5, 1, 1.5$  and  $2$  s time values were performed. As a result of the analysis, time-dependent flow direction and pressure values differed in the micro-fluidic channels.

**Keywords:** Micro-fluid, Micro electromechanical system (MEMS), COMSOL, Pressure analysis.

## 1. GİRİŞ

Yarı iletken teknolojisinde yaşanan gelişmeler neticesinde, bu alanda çalışan firmalar üretimini daha da arttırmıştır. Bunun sonucunda, farklı üretim yöntemleri kullanılarak günümüzün mikro elektromekanik sistemlerinin (MEMS) temelleri atılmıştır [1]. MEMS alanında yapılan çalışmalar 1960'lı yıllarda başlamıştır ve günümüzde çok ciddi gelişmeler göstermiştir. İsminden de anlaşılacağı gibi, bu alanda

üretile sistemler mikro ve nano seviyelerdedir. Günümüzde, MEMS teknolojisinin biyomedikal, mikro robotik, mikro giriş, giyilebilir cihazlar ve mikro aktüatör gibi birçok uygulama alanları vardır [2-5].

Mikro-akışkan çip sistemleri, akışkanlar mekaniği, fizik ve nano teknolojiyi bir araya getirerek mikro seviyelerde tasarlanan ve elektrik akımının geçebileceği kanallara sahip olan bir teknolojidir [6]. Burada akışkan, hava veya ısının mikro-akışkan kanallardan geçtiği kanalların birkaç µm ile birkaç nm arasında değiştiği bir kanal grubu veya entegre bir devre olarak tanımlanır.

İlk mikro-akışkan cihazlar genellikle silikon ve camdan üretilmiştir. Ancak bu malzemelerin yüksek maliyet ve düşük gaz geçirgenliği gibi bazı olumsuz özellikleri nedeniyle sağlık alanında kullanılması yetersiz kalmıştır. İleriki çalışmalarda ise işlenmesi kolay, esnek ve ucuz bir malzeme olan organik polimerler kullanılmıştır [7-9]. 1990'lı yıllarda ise silikon bazlı organik polimerlerden biri olan polidimetilsiloksan (PDMS) geliştirildi. Bu gelişmeyle birlikte, mikro-akışkan çiplerde yaygın olarak kullanıldı ve günümüzde de kullanılmaya devam edilmektedir. İlerleyen yıllarda hücre ve proteinleri ayırma modelleri de, biyosensörler, kültür ve araştırmalar gibi biyolojik uygulamalarda mikro-akışkan cihazlar kullanılmıştır [10-12].

2000'li yıllardan itibaren ilaç geliştirmek için doku ve organ modelleri kullanılarak mikro-akışkan çipler üzerindeki çalışmalar artmıştır. Bu modellerle birlikte biyolojik süreçlerin araştırılmasıyla bir çipte organ geliştirilmiştir. Ayrıca karaciğer, kalp, kas ve göz gibi insan hayatında büyük öneme sahip organların çip üzerinde birçok doku modeli üzerinde çalışmalar yapılmıştır [13-15].

Günümüzde birçok alanda mikro-akışkanlar kullanılmaktadır. Yu ve ark. bağırsaktan alınan bir modelle oluşturulan bir organ çip de ilaç emilim performansını test etmiştir. Mikro-akışkan bağırsakta numuneler üst kısma yerleştirildi ve verilen ilaçların emilimini kontrol etmek için gözenekli bir zar yerleştirildi [16]. Crowley ve ark. mikro çip üzerindeki laboratuvar uygulamaları için düzlemsel mikro filtreler kullanarak plazmayı kandan ayırmayı amaçlamıştır. Ayrıca çalışmada kullanılan mikro ölçekli kan filtrasyon tasarımının geniş etkileri olabileceği belirtilmiştir [17]. Abate ve ark. yaptıkları deneysel çalışmalarda mikro-akışkanlar üzerindeki 'T' bağlantılarının bir süre sonra tıkanıpı tespit etmiştir. Mikro-akışkanlardaki bu bağlantıların da zaman zaman sıvıların 'T' dönüşlerini damlacıklar halinde bloke ettiği belirlenmiştir [18]. Chien ve ark. mikro-akışkan cihazlar için çok portlu akış kontrol çalışmasında, zaman sabitini azaltmayı ve basınçları hesaplayarak bir algoritma geliştirmeyi amaçladı. Bu yöntem ile çip üzerindeki laboratuvarın biyokimyasal deneyler için yeni bir yol açabileceğini vurguladılar [19]. Ayrıca mikro-akışkanlarda akan sıvıları kontrol etme yeteneğinin önemli bir özellik olduğunu açıklamışlardır. Bu çalışma ile basınç ve hız kontrol işlemleri gerçekleştirildi. Özellikle mikro-akışkanların kontrol uygulamaları üzerine birçok akademik çalışma mevcuttur.

Bu çalışmada geliştirilen mikro-akışkan çip modeli, belirli bir miktarda sıvı ile beslenen bir cihazın tasarımını içermektedir. Mikro-akışkan dört giriş ve bir çıkış kanalına sahip olacak biçimde tasarlanmış ve analizi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu akışkan çip kanallarındaki basınç kontrol edilmiştir. Bu kanallar vasıtasıyla kanın ilerlemesinde bir kimyasal sistemi ve akış hücresini incelemek mümkün olabilecektir.

## 2. MATERYAL VE METOT

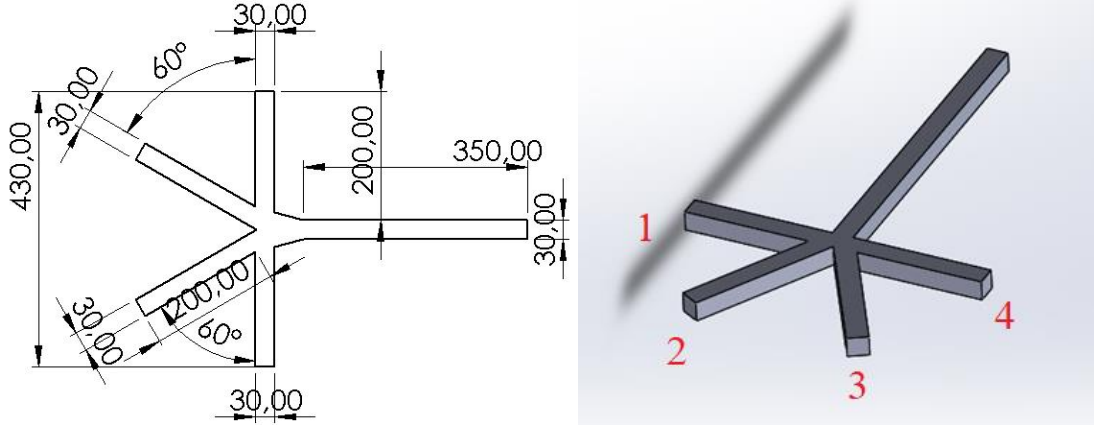
### 2.1. Tasarım Kriterleri

Çip üzerinde bir laboratuvar (LOC), otomasyon ve yüksek verimli tarama elde etmek için bir veya birkaç laboratuvar fonksiyonu yalnızca milimetreden birkaç santimetreye tek bir kompakt devre üzerine entegre eden bir cihazdır. LOC alanındaki çalışmalar biyokimya ve biyomühendislik gibi sağlık bilimleri ile ilişkili alanlarda giderek popüler hale gelmiştir. LOC uygulamaları, kimyasal reaktörler, ısı eşanjörleri, separatörler ve karıştırıcılar gibi tüm kimyasal işlemleri çeşitli teknikler veya yöntemlerle dahil edebilir.

Bu çalışmada, 4 kanal girişli ve 1 kanal çıkışlı mikro-akışkan tasarım çalışması yapılmıştır. Modelleme aşamasından sonra, infüzyon basıncının optimizasyonu ve zaman kontrolü gerçekleştirilmiştir.

- 4 kanal girişine sahip ve 1 kanal çıkışlı mikro-akışkan tasarımı
- Mikro-akışkanın 3B geometrik çizimi zamana bağlı olarak gerçekleştirilmiştir

4 kanallı mikro-akışkanın 3B tasarımı ve ölçeklendirilmesi Şekil 1’de gösterilmiştir. Kanal genişliği 30x30µm olarak belirlenmiştir. Birbirine yakın bulunan kanallar giriş kanalı olarak belirlenir. Bu kanallar tek kanalda toplanır ve çıkış kanalı ortaya çıkar. Mikro-akışkan çipin tasarımı SolidWorks programında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. 4 kanallı mikro-akışkanın teknik resmi ve 3B tasarımı.

## 2.2. COMSOL MultiPhysics ile Analiz

Bu çalışmada analiz işlemleri zamana bağlı olarak inceleneceği için COMSOL programı kullanılmıştır. Şekil 1’de 3B tasarımı SolidWorks programı ile yapılan mikro-akışkan çip COMSOL programına aktarılmıştır. Daha sonra mikro-akışkan çip, akış dinamiğine uygun olarak örülmüştür. Daha sonra giriş-çıkış kanalı için giriş parametreleri tanımlanmıştır. Giriş ve çıkış kanalları programda tanımlanmıştır. Bu kanallardan geçen sıvı değerleri sabit tutulur ve Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Mikro-akışkan çip kanallarında kullanılan sıvı özellikleri

Özellik	Değişken	Değer	Birim
Yoğunluk	rho	1000	kg/m <sup>3</sup>
Dinamik viskozite	mu	1e-3	Pa-s

Geliştirilen model, sadece hızı laminar davranış gösteren büyüklükte olan akışkan akışını modellemektedir. Bu durum, yeterli sayıda elemanla sıkıştırılamaz akış için tam momentum dengesi ve süreklilik denklemlerinin sayısal bir çözümünü alabileceğimiz anlamına gelir. Çözmemiz gereken denklemler, zaman alanındaki Navier-Stokes denklemleridir.

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} - \nabla \cdot \mu(\nabla u + (\nabla u)^T) + pu \cdot \nabla u + \nabla p = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (2)$$

Burada  $\rho$  yoğunluğu ( $kg/m^3$ ),  $u$  hız ( $m/sn$ ),  $\mu$  dinamik viskoziteyi ( $Pa \cdot sn$ ) ve  $p$  basıncı ( $Pa$ ) ifade etmektedir. Bu durumda sıvı, karşılık gelen yoğunluk ve viskozite değerlerine sahip sudur.

Girişler ve çıkış için sınır koşulları ayarlanmış bir basıncı varsayar; ayrıca viskoz gerilmenin ortadan kalktığını varsayarlar:

$$[\nabla \cdot \mu(\nabla u + (\nabla u)^T)] \cdot n = 0 \quad (3)$$

$$p = p_i \quad (4)$$

Çıkıştaki basıncı sıfıra ayarlanması ve girişlerde zamana bağlı ifadeleri kullanmak gerekmektedir.

$$p_i = 50 + 10 \sin(\pi t + \alpha) \quad (5)$$

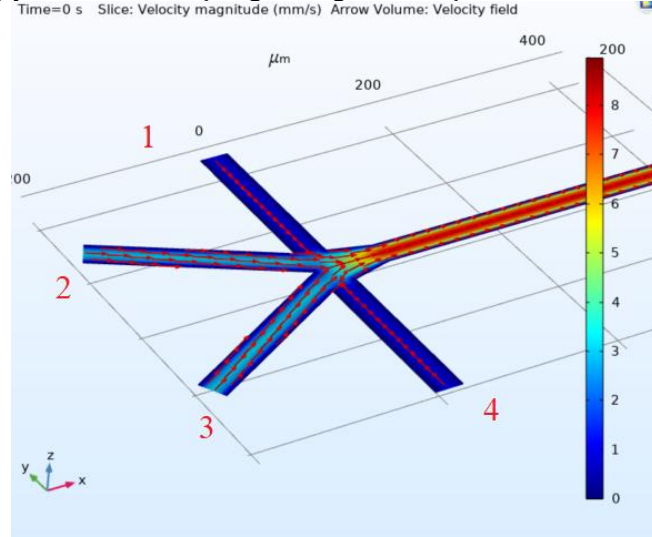
Burada  $t$  zaman (sn) ve  $k$  sıfır ile bir arasında bir değerdir. Bu basitleştirilmiş örnek, giriş sınırına bağlı olarak  $\alpha$  fazını  $\pi/4$ ,  $\pi/2$ ,  $3\pi/4$  veya  $\pi$  olarak ayarlamaktadır.

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

#### 3.1. t=0 sn İçin 4 Kanallı Mikro-Akışkan Yönleri ve Basınç Analizi

Malzeme seçimi ve yöntemdeki tasarım çalışmalarının tamamlanmasıyla birlikte zamana bağlı basınç analizini tamamlamak için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bazı testler yapılmıştır. Önceki bölümde tasarlanan LOC'ların programa dahil edilmesi için dinamik viskozite ve yoğunluk tanımlanmış, ardından sınır koşulları ve sıvı bilgileri için gerekli basınç parametreleri girilmiştir. Son olarak mikro-akışkana mesh işlemi yapılmıştır. Benzer şekilde, gerekli testler mikro-akışkanlar üzerinde belirlenen giriş ve çıkışların belirlenmesi ile başlanmıştır.

Bu çalışmada 4 kanallı mikro-akışkandaki çıkış noktası içerisinde alınan referanslara göre  $t=0$ , 0.5, 1, 1.5 ve 2 sn arasındaki akış yönleri ve basınç değerleri incelenmiştir. Şekil 2'de  $t=0$  sn'deki 4 kanallı mikro-akışkandaki akış yönleri ve basınç değerleri gösterilmiştir.



Şekil 2. t=0 sn için 4 kanallı mikro-akışkandaki akış yönü ve basınç analizi.

Şekil 2'de görüldüğü gibi 1 ve 4 numaralı kanaldan gelen basınç değerleri birbirine zıt yönlü fakat aynı büyüklüktedir. Öte yandan 2 ve 3 numaralı girişten gelen basınç değerleri hemen hemen birbirleriyle aynı büyüklüktedir. 2 ve 3 numaralı kanallardan gelen basıncın büyüklüğü ve doğrultusu daha büyük olduğundan ve çıkış yönüne en yakın doğrultu üzerinde bulunduğu için akışın büyük çoğunluğu bu iki kanal içerisinde sağlanmaktadır.  $t=0$  sn zamanı için elde edilen basınç değerleri aşağıdaki gibidir:

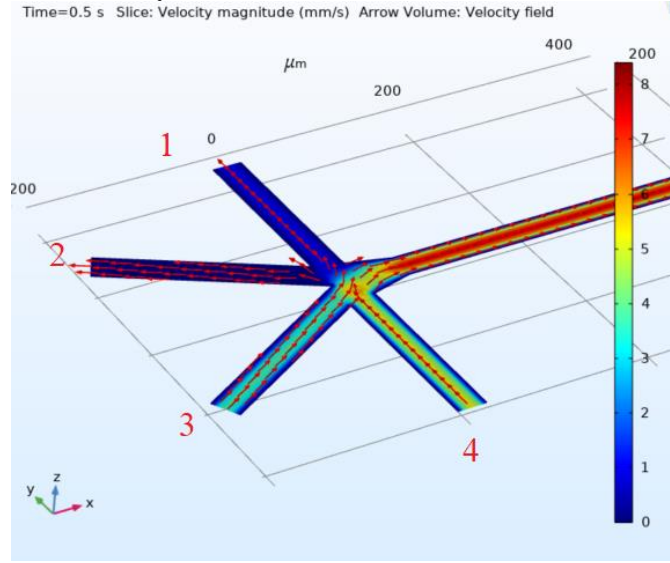
- 1 numaralı kanaldaki basınç: 50 Pa
- 2 numaralı kanaldaki basınç: 57 Pa
- 3 numaralı kanaldaki basınç: 60 Pa
- 4 numaralı kanaldaki basınç: 50 Pa

#### 3.2. t=0.5 sn İçin 4 Kanallı Mikro-Akışkan Yönleri ve Basınç Analizi

Şekil 3'de  $t=0.5$  sn'deki 4 kanallı mikro-akışkandaki akış yönleri ve basınç değerleri gösterilmiştir. Şekil 3'de görüldüğü gibi 3 ve 4 numaralı kanaldan gelen basınçların büyüklükleri diğer 1 ve 2 numaralı girişten gelen basınç değerlerinden daha büyüktür. Özellikle 4 ve 1 arasında oluşan basınç farkından dolayı 1 numaralı girişten gelen akışın yönü değişmektedir. Aynı zamanda 1 numara gibi 2 numaradan gelen basınç değeri küçük olduğu için çıkışa akışkan gelmeden boğaz içerisinde geri dönmektedir.  $t=0.5$  sn zamanı için elde edilen basınç değerleri aşağıdaki gibidir:

- 1 numaralı kanaldaki basınç: 40 Pa

- 2 numaralı kanaldaki basınç: 43 Pa
- 3 numaralı kanaldaki basınç: 50 Pa
- 4 numaralı kanaldaki basınç: 60 Pa

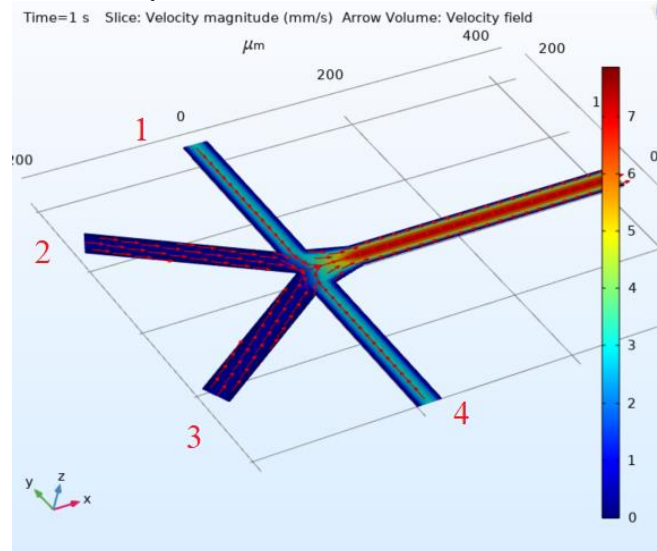


Şekil 3. t=0.5 sn için 4 kanallı mikro-akışkandaki akış yönü ve basınç analizi.

### 3.3. t=1 sn İçin 4 Kanallı Mikro-Akışkan Yönleri ve Basınç Analizi

Şekil 4'de t=1 sn'deki 4 kanallı mikro-akışkandaki akış yönleri ve basınç değerleri gösterilmiştir. Şekil 4'de görüldüğü gibi 1 ve 4 numaralı girişten gelen akışkan basınçları birbirine eşit büyüklüktedir ve en yüksek basınç bu iki kanal içerisinde gerçekleşmektedir. Ancak bu zıt yönlü eşit büyüklük birbirini dengelemektedir. Burada 2 ve 3 numaralı kanal içerisinden gelen akışkanlar 1 ve 4 den gelen akışkanlara yön vererek çıkışa sürüklenmektedir. t=1 sn zamani için elde edilen basınç değerleri aşağıdaki gibidir:

- 1 numaralı kanaldaki basınç: 50 Pa
- 2 numaralı kanaldaki basınç: 43 Pa
- 3 numaralı kanaldaki basınç: 40 Pa
- 4 numaralı kanaldaki basınç: 50 Pa



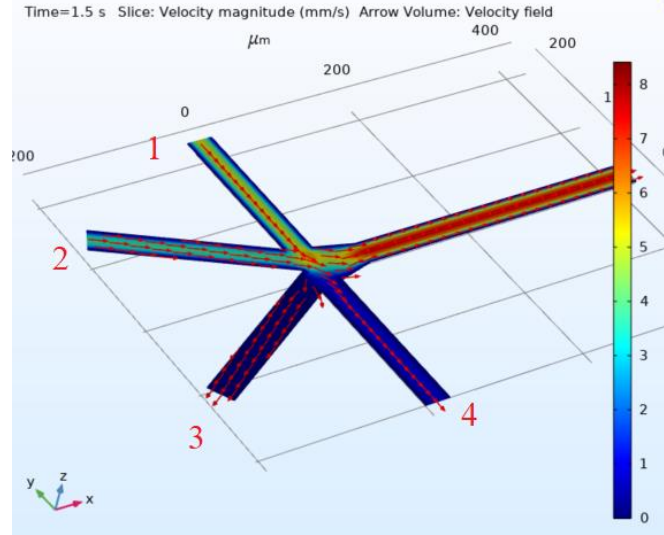
Şekil 4. t=1 sn için 4 kanallı mikro-akışkandaki akış yönü ve basınç analizi.

### 3.4. t=1.5 sn İçin 4 Kanallı Mikro-Akışkan Yönleri ve Basınç Analizi

Şekil 5'da t=1.5 sn'deki 4 kanallı mikro-akışkandaki akış yönleri ve basınç değerleri gösterilmiştir. Şekil 5'da görüldüğü gibi 1 numaralı kanaldan 4 numaralı kanala doğru bakıldığında basıncın azaldığı görülmektedir. Bu durumda 1 ve 2 numaralı kanal içerisinden akan akışkanın basınç değeri yüksek

olduğu için 3 ve 4 numaralı kanal içerisinden akan akışkanın büyüklüğü çıkış kanalından geçemeyecek kadar az olduğundan, diğer giriş kanallarından gelen basınç değerine karşı koyamamıştır ve giriş yönüne zıt olarak hareket etmektedir.  $t=1.5$  sn zamanı için elde edilen basınç değerleri aşağıdaki gibidir:

- 1 numaralı kanaldaki basınç: 60 Pa
- 2 numaralı kanaldaki basınç: 58 Pa
- 3 numaralı kanaldaki basınç: 50 Pa
- 4 numaralı kanaldaki basınç: 40 Pa

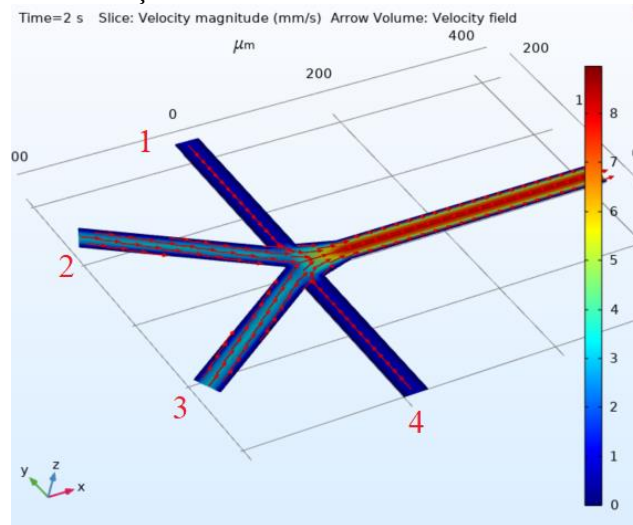


Şekil 5.  $t=1.5$  sn için 4 kanallı mikro-akışkandaki akış yönü ve basınç analizi.

### 3.5. $t=2$ sn İçin 4 Kanallı Mikro-Akışkan Yönleri ve Basınç Analizi

Şekil 6'de  $t=2$  sn'deki 4 kanallı mikro-akışkandaki akış yönleri ve basınç değerleri gösterilmiştir. Şekil 6'de görüldüğü gibi 1 ve 4 numaralı girişten gelen akışkan basınçları birbirine eşit büyüklüktedir ama en yüksek basınç 2 ve 3 numaralı kanal içerisinde gerçekleşmektedir. Ancak bu zıt yönlü eşit büyüklük birbirini dengelemektedir. Burada 2 ve 3 numaralı kanal içerisinden gelen akışkanlar 1 ve 4 den gelen akışkanlara yön vererek çıkışa sürüklemektedir.  $t=2$  sn zamanı için elde edilen basınç değerleri aşağıdaki gibidir:

- 1 numaralı kanaldaki basınç: 50 Pa
- 2 numaralı kanaldaki basınç: 58 Pa
- 3 numaralı kanaldaki basınç: 60 Pa
- 4 numaralı kanaldaki basınç: 50 Pa



Şekil 6.  $t=2$  sn için 4 kanallı mikro-akışkandaki akış yönü ve basınç analizi.

#### 4. SONUÇ

MEMS cihazlar veya sistemler makro ölçekteki etkileri algılama, denetleme, etkinleştirme ve oluşturma yeteneğine sahip bir teknolojidir. Bu teknolojinin gelişmesi hem sağlık hem de mühendislik alanında birçok fayda sağlayacaktır. Mikro-akışkan sistemler de akışkanlar mekaniği, fizik ve nano teknolojiyi bir araya getirerek mikro seviyelerde tasarlanan ve elektrik akımının geçebileceği kanallara sahip olan bir MEMS teknolojisidir.

Bu çalışmada, 3 boyutlu tasarım programlarından biri olan SolidWorks programı ile mikro-akışkan bir çipin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Mikro-akışkandaki kanal sayısı dört giriş ve bir çıkış olacak biçimde tasarlanmıştır. Bu mikro-akışkanın ön fiziksel testleri ve araştırılması için zamana ve basınca bağlı analizleri COMSOL MultiPhysics programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Mikro-akışkan çipin analizlerindeki çıkış noktası içerisinde alınan referanslara göre  $t=0, 0.5, 1, 1.5$  ve  $2$  sn zaman arasındaki akış yönleri ve basınç değerleri incelenmiştir. Analizler sonucunda farklı zaman değerlerinde kanallardaki akış yönleri ve basınç değerleri farklılık göstermiştir. Elde edilen bu basınç değerleri mikro-akışkanın üretim sürecinde büyük önem taşıyacaktır. Ayrıca bu çalışmanın gelecek akademik yayınlar için önemli bir kaynak olacağı düşünülmektedir.

#### KAYNAKLAR

1. Behera, B. and Chandra, S., “An innovative gas sensor incorporating ZnO–CuO nanoflakes in planar MEMS technology”, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 229, Issue 2, Pages 414-424, 2016.
2. Ertugrul, İ., Akkus, N., Aygül, E., Yalçinkaya, S. and Ertunç, H. M., “MEMS fabrication using PµSL technique based 3D printer”, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, Vol. 4, Issue 1, Pages 38-43, 2020.
3. Ülkir, O. and Ertugrul, I., “Mikro Giriş Uzunluğu Değişiminin Deformasyona Etkisinin Araştırılması”, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Vol. 18, Issue 2, Pages 136-141, 2020.
4. Özsoy, K., “Üç boyutlu (3B) yazıcı teknolojisinin eğitimde uygulanabilirliği: senirkent MYO örneği”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Vol. 7, Issue 2, Pages 111-123, 2019.
5. Ertugrul, I., “The Fabrication of micro beam from photopolymer by digital light processing 3D printing technology”, *Micromachines*, Vol. 11, Issue 5, Pages 518, 2020.
6. Upadhyaya, S. M., Raju, C. S. K. and Saleem, S., “Nonlinear unsteady convection on micro and nanofluids with Cattaneo-Christov heat flux”, *Results in Physics*, Vol. 9, Issue 3, Pages 779-786, 2018.
7. Thomases, B. and Guy, R. D., “Polymer stress growth in viscoelastic fluids in oscillating extensional flows with applications to micro-organism locomotion”, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 269, Issue 5, Pages 47-56, 2019.
8. Xu, K., Chen, Y., Okhai, T. A. and Snyman, L. W., “Micro optical sensors based on avalanching silicon light-emitting devices monolithically integrated on chips”, *Optical Materials Express*, Vol. 9, Issue 10, Pages 3985-3997, 2019.
9. Wu, J., He, Z., Chen, Q. and Lin, J. M., “Biochemical analysis on microfluidic chips”, *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, Vol. 80, Issue 5, Pages 213-231, 2016.
10. Voicu, D., Lestari, G., Wang, Y., DeBono, M., Seo, M., Cho, S. and Kumacheva, E., “Thermoplastic microfluidic devices for targeted chemical and biological applications”, *RSC Advances*, Vol. 7, Issue 5, Pages 2884-2889, 2017.
11. Ma, J., Wang, Y. and Liu, J., “Biomaterials meet microfluidics: from synthesis technologies to biological applications”, *Micromachines*, Vol. 8, Issue 8, Pages 255-268, 2017.
12. Lee, J. M., Zhang, M. and Yeong, W. Y., “Characterization and evaluation of 3D printed microfluidic chip for cell processing”, *Microfluidics and Nanofluidics*, Vol. 20, Issue 1, Pages 5-20, 2016.



13. Martucci, D. H., Todão, F. R., Shimizu, F. M., Fukudome, T. M., Schwarz, S. D. F., Carrilho, E. and Lima, R. S., "Auxiliary electrode oxidation for naked-eye electrochemical determinations in microfluidics: Towards on-the-spot applications", *Electrochimica Acta*, Vol. 292, Issue 3, Pages 125-135, 2018.
14. Yang, Y., Noviana, E., Nguyen, M. P., Geiss, B. J., Dandy, D. S. and Henry, C. S., "Based microfluidic devices: emerging themes and applications", *Analytical Chemistry*, Vol. 89, Issue 1, Pages 71-91, 2017.
15. Khan, S. M., Gumus, A., Nassar, J. M. and Hussain, M. M., "CMOS enabled microfluidic systems for healthcare based applications", *Advanced Materials*, Vol. 30, Issue 16, Pages 25-35, 2017.
16. Yu, F., Nivasini, D., Kumar, O. S., Choudhury, D., Foo, L. C. and Ng, S. H., "Microfluidic platforms for modeling biological barriers in the circulatory system", *Drug Discovery Today*, Vol. 23, Issue 4, Pages 815-829, 2018.
17. Crowley, T.A. and Pizziconi V., "Isolation of plasma from whole blood using planar microfluidic for lab-on-a-chip applications", *Journay of Royal Society of Chemistry*, Vol. 5, Issue 3, Pages 922-929, 2005.
18. Abate A.R., Mary, P., Steijn, V.V. and Weitz, D.A., "Experimental validation of plugging during drop formation in a T-junction", *Lab on Chip*, Vol. 12, Issue 8, Pages 1516-1521, 2011.
19. Chien, R.L. and Parce, W. J., "Multiport flow-control system for lab-on-a-chip microfluidic devices", *Springer*, Vol. 371, Issue 2, Pages 106-111, 2001.