



Bir Mikrokanaldaki Kayma Akışında Basınç Kaybı Analizi

Erhan Öztürk¹, Ramazan Çoştı^{2*}, Kenan Kaya³

¹ İstanbul Aydın Üniversitesi, Anadolu Bil MYO, Otomotiv Teknolojisi Bölümü, İstanbul, Türkiye, (ORCID: 0000-0002-5221-9843), erhanozturk@aydin.edu.tr

^{2*} İstanbul Aydın Üniversitesi, Anadolu Bil MYO, Otomotiv Teknolojisi Bölümü, İstanbul, Türkiye, (ORCID: 0000-0002-0547-7655), ramazancostu@aydin.edu.tr

⁴ İstanbul Aydın Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye, (ORCID: 0000-0002-6897-4077), kenankaya@aydin.edu.tr

(İlk Geliş Tarihi 18 Ekim 2022 ve Kabul Tarihi 30 Kasım 2022)

(DOI: 10.31590/ejosat.1200616)

ATIF/REFERENCE: Öztürk, E., Çoştı, R. & Kaya, K. (2022). Bir Mikrokanaldaki Kayma Akışında Basınç Kaybı Analizi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (45), 471-484.

Öz

Karakteristik boyutları 1 µm'den 1 mm'ye kadar değişen mikro cihazlar, günümüzde kalp pilinden mürekkep püskürtmeli yazıcılara kadar birçok alanda başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Bunların içinde mikro pompalar veya mikro ısı eşanjörleri gibi mikro akışkanlı cihazlar (Micro Fluidic Device, MFD) çok önemli bir yere sahiptir. MFD'lerin ana kullanıcıları, otomotiv ile uçak firmalarını içeren mikro elektronik, ecza, kimya, tıbbi ve gıda teknolojileri gibi sanayilerdir. Çalışmada, öncelikle projenin tanımı ve amacı hakkında bilgi verilmiş, mikrokanallar, kayma akışı ve hesaplamalı akışkan dinamiği hakkında literatür araştırması yapıp genel bilgiler verilmiş, daha sonra yapılan çalışmalar detaylı bir şekilde gösterilip sonuçlandırılmıştır. Bu projede, bir mikrokanalda nitrojen gazının kayma akışı ANSYS Fluent 15.0 yazılımı kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada, yakınsaklık açılarına ve hidrolik çapa bağlı olarak üçerli iki gruba ayrılıp, altı farklı mikrokanal kullanılmıştır. İlk üç çözüm aynı uzunluk, derinlik ve hidrolik çap kullanılırken, sırasıyla 4°, 8° ve 12°'lik yakınsaklık açıları ile yapılmıştır. Diğer gruptaki üç çözüm ise aynı uzunluk, derinlik ve yakınsaklık açısı kullanılırken sırasıyla 118, 147 ve 177 µm hidrolik çaplarda mikrokanallar kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen basınç kayıpları kendi aralarında karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kayma Akışı, Basınç Kaybı, Hidrolik Çap, Yakınsaklık Açısı, Mikrokanal.

Pressure Loss Analysis in Shear Flow in a Microchannel

Abstract

Micro devices with a characteristic size ranging from 1 µm to 1 mm are used successfully in many fields from pacemakers to inkjet printers. Among these, micro fluid devices such as micro pumps or micro heat exchangers (Micro Fluidic Device, MFD) have a very important place. The main users of MFDs are industries such as micro electronics including automotive and aircraft companies, pharmaceuticals, chemistry, medical and food technologies. In the study, firstly, information was given about the definition and purpose of the project, literature research was made and general information was given about microchannels, slip flow and computational fluid dynamics, and then the studies were shown and concluded in detail. In this project, the slip flow of nitrogen gas in a microchannel was investigated numerically using ANSYS Fluent 15.0 software. In the study, depending on the convergence angles and hydraulic diameters, they were divided into two groups of three and six different microchannels were used. The first three solutions were made with convergence angles of 4°, 8° and 12°, while using the same length, depth and hydraulic diameter. Three solutions in the other group were made using microchannels with hydraulic diameters of 118, 147 and 177 µm respectively, while using the same length, depth and convergence angle. The obtained pressure losses were compared and interpreted among themselves.

Keywords: Slip Flow, Pressure Losses, Hydraulic Diameters, Convergence Angles, Microchannels.

* Sorumlu Yazar: ramazancostu@aydin.edu.tr

1. Giriş

Günden güne teknolojinin hızla gelişmesiyle, günlük yaşamımızda yer alan cihazlar ile birlikte tıp, uzay, elektronik, kimya ve birçok diğer teknoloji alanında kullanılan cihaz boyutlarının küçüldüğünü görebiliriz. İmalat ile malzeme teknolojisindeki gelişmeler, mikro ölçekli ısı pompaları, ısı makineleri, yakma sistemleri ve algılayıcı gibi cihazların gelişimine, yaygınlaşmasına ve yeni cihazların icat edilmesine olanak sağlamıştır. Bu cihazlar biyoloji, tıp, uzay, havacılık, bilişim ve otomotiv sektörlerinde kullanılmakta olup, Mikro-Elektro-Mekanik Sistemler (MEMS), Mikro-Opto-Elektronik Sistemler (MOEMS), Mikro-Akış Cihazları (MFD) olmak üzere genel olarak üç kategoride sınıflandırılmaktadır. Mikro akışkan cihazlarının içinde birbiri ile bağlantılı olan mikrokanallar bulunmaktadır. Yüksek verimlilikte bir cihaz üretimi, mikrokanal içindeki akışkan akışı ve ısı geçişi özelliklerinin iyi bir şekilde anlaşılmasına bağlıdır [1, 2].

Karakteristik boyutları 1 µm'den 1 mm'ye kadar değişen mikro cihazlar, günümüzde kalp pilinden mürekkep püskürtmeli yazıcılara kadar birçok alanda başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Bunların içinde mikro pompalar veya mikro ısı eşanjörleri gibi mikro akışkanlı cihazlar (Micro Fluidic Device, MFD) çok önemli bir yere sahiptir. MFD'lerin ana kullanıcıları, otomotiv ile uçak firmalarını içeren mikro elektronik, ecza, kimya, tıbbi ve gıda teknolojileri gibi sanayilerdir [1].

Bu farklı cihazların çoğunun özü, karakteristik ölçüleri mikron mertebesinde olan ve çeşitli kesit alanlarına (en yaygınları dikdörtgen, yamuk ve daire) sahip bir veya daha çok mikrokanala dayanmaktadır. MFD'lerin başarısı küçük hacim ile yüzeylerde yüksek ısı akışı geçişi kapasiteleri ile ilgilidir. MFD'lerde kullanılmakta olan mikrokanalların hidrolik çapları 1 µm ile 2 mm arasında değişkenlik gösterir [1-7].

Pek çok makale, hidrolik çapı 100 mm'den daha küçük olan mikrokanalların tek fazlı akışkan akışı ile ısı geçişini analiz eden ilk çalışmayı Wu ve Little (1983) tarafından yazılmış makaleyi göstermektedir. Bu doğru değildir. Gerçekte, ilk deneysel çalışma Poiseuille (1840) tarafından cam mikro tüplerin testi ile başlanmıştır [1].

Bileşenlerin küçültülmesi bir miktar ölçek etkisi (scaling effect) ve gerçek mikro etkiler (micro effect) ortaya koyabilmektedir. Bu iki kavramın ayırt edilmesi çok önemlidir. Herwig ve Haussner (2003)'ün tanımlamasına göre ölçek etkisi, referans geometrik ölçeğinde ihmal edilebilen, ölçek değiştiğinde ise önemli olan bir etkidir. Örneğin, bir kanalın hidrolik çapının azalması, hacminde mevcut alanından daha büyük azalmaya neden olmaktadır, yani mikro akışkanlı sistemlerde alan ile hacim oranı çok yüksek olma eğilimi gösterirler. Bu nedenle, mikro akışkanların davranışı, diğer normal boyutlu borulardaki akışlardan tamamiyle farklıdır [1].

Aynı zamanda, bir mekanik sistemi mikro ölçeklere küçültmenin pek çok yararı vardır. Böyle bir sistemde hacim ile ilgili kuvvetlerin (ağırlık/atalet) önemi kalmaz. Bunun sonucunda mikro ölçekli mekanik sistemlerin çok hızlı olduğu gözlemlenir. Böylelikle anlık hareket edip, durabilen mekanizmalardan; büyük ivmeli hareketlere dayanabilen duyuçulara kadar birçok sistem (mikro ölçekli dünyada) hayata geçirilebilir. Ayrıca bu sistemler, büyük ölçekli makine sistemlerine göre daha az güç harcayıp, daha az yer kaplarlar. Seri üretimin uygun koşullarda yapılmasıyla

da bu tip sistemlerin çok ucuza imal edilebilecekleri önemli bir gerçektir [1-5].

Cihazların küçülmesi, hayatımızı pek çok anlamda kolaylaştırmış olsa bile bazı sorunları beraberinde getirmiştir. Bunlardan bazıları malzeme yetersizliği ve üretim tekniklerinin yetersizliği gibi önemli sorunlardır. Günümüzde bu sorunlar ile ilgili çalışmalar devam etmektedir. Bir diğer sorun ise, mikro cihazların çalışırken açığa çıkardıkları ısıdır. Bunun sonucunda mikro akış karakterlerinin incelenmesi gereklidir [1].

1.1. Problem Tanımı

Son yıllarda cihaz boyutlarının küçültülmesi ile minyatürleşme alanında yaşanan gelişmeler sonucunda, karakteristik boyutları 1 µm'den 1 mm'ye kadar değişen Mikro-Elektro-Mekanik Sistemler (MEMS) adında bir alan ortaya çıkmış ve ısı ile akış transferi konusundaki araştırmaları hızlandırmıştır. MEMS üretimi ve kullanımı, mikro akışkan adı verilen, olağandışı ve keşfedilmemiş koşullar altında çalışan yeni bir disiplin ile ortaya çıkmıştır. Tıp, uzay, biyoloji ve havacılık gibi alanlarda kullanılan MEMS cihazları, içlerinde birbirine bağlı ve mikron ölçülerinde olan ve mikrokanal adı verilen kanallar bulundurmaktadır. Yüksek verimliliğe sahip bir cihazın üretimi, mikrokanal içerisindeki akışkanın akışı ve ısı transferi özelliklerinin tam anlamıyla anlaşılmasına bağlıdır [1-5].

Bileşenlerin minyatürleştirilmesi bir miktar ölçek etkisi (scaling effect) ve gerçek mikro-etkiler (micro-effect) ortaya koyabilmektedir. Örneğin, bir kanalın hidrolik çapındaki azalma, hacminde söz konusu alanındakinden daha büyük bir azalma meydana getirmektedir, yani mikro-akışkanlı sistemlerde alan-hacim oranı çok yüksek olma eğilimindedir. Bu sayede, mikro-akışkanların davranışı, normal boyutlu borulardaki akışlardan tamamen farklı olabilir [2-8].

Bu projede amaç, bir mikrokanalda nitrojen gazının kayma akışının ANSYS Fluent 15.0 yazılımı kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada, yakınsalık açılarına ve hidrolik çapa bağlı olarak üçerli iki gruba ayrılıp, altı farklı mikrokanal kullanılmıştır. İlk üç çözüm aynı uzunluk, derinlik ve hidrolik çap kullanılırken, sırasıyla 4°, 8° ve 12°'lik yakınsaklık açıları ile yapılmıştır. Diğer gruptaki üç çözüm ise aynı uzunluk, derinlik ve yakınsaklık açısı kullanılırken sırasıyla 118, 147 ve 177 µm hidrolik çaplarda mikrokanallar kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen basınç kayıpları kendi aralarında karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır.

1.2. Problemin Seçilme Amacı

Pahalı ve uzun süren deney sistemleri kurmak yerine, daha az maliyetli bir yöntem olan hesaplamalı akışkanlar dinamiği sayesinde, deneylerde uygulanması zor olan koşulların incelenmesi mümkün olmuştur. Böylece literatüre bilimsel katkıda bulunulmaya çalışılmıştır. Ayrıca ANSYS FLUENT yazılımının günümüzde yaygın olmamasından dolayı, programın işlevselliği ve programda yapılabilecek çalışmalar gösterilmeye çalışılmış, böylece programın kullanımının yaygınlaşması amaçlanmıştır.

1.3. Çalışma Yöntemi

Öncelikle literatür araştırmaları yaparak kayma akışı modeli hakkında bilgi edinilecektir. Daha önce bu konuyla ilgili yapılan araştırmalar, çalışmalarımızda bize yol gösterecektir. ANSYS FLUENT yazılımında yapılan araştırmalarla altyapı oluşturulup, edinilen bilgilerden yola çıkarak farklı yakınsaklık açıları ve

hidrolik çaplarda mikrokannallardaki basınç kayıpları bulunup kıyaslanacaktır.

1.4. Planlama

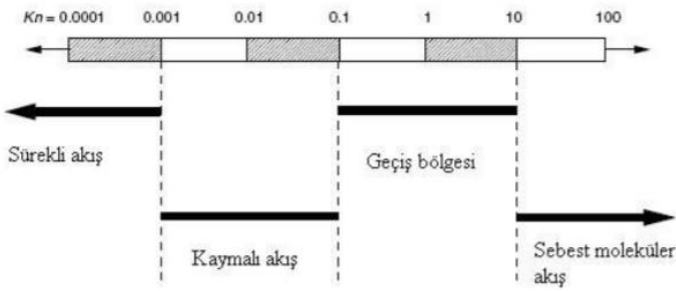
- Kaynak araştırması yapılması.
- Kayma akışı modellerinin incelenmesi.
- Kayma akışı modellerinin araştırılması.
- ANSYS programının modüllerinin seçilmesi.

2. Kaynak Araştırması

2.1. Knudsen Sayısı

Geometrik ölçeğin azalması nedeniyle, gaz moleküllerinin ortalama serbest yolu, cihazın uzunluk ölçeği ile karşılaştırılabilir. Akışın etki derecesini ölçme amacıyla, moleküllerin ortalama serbest yolunun, cihazın karakteristik uzunluğuna oranı olarak tanımlanan boyutsuz Knudsen Sayısı (Kn) parametresine bakılır. Knudsen sayısı aşağıda gösterildiği şekilde tanımlanmaktadır [1, 3, 6].

$$Kn = \frac{\lambda mfp}{L} \quad (1)$$



Şekil 2.1 Knudsen Sayısına Bağlı Olarak Akış Karakteri [1].

2.2. Akış Çeşitleri

Knudsen sayısının 10-3'ten küçük olduğu bölgeye sürekli akış bölgesi (continuum flow region) ismi verilir. Süreklilik ve termodinamik denge kabulleri geçerlidir. Bir sistemin termodinamik dengede olabilmesi için sırasıyla ısı denge, mekanik denge, faz dengesi ve kimyasal denge şartlarını sağlaması gerekir. Bunu kısaca açıklayacak olursak, sistemin sıcaklık değerlerinin her noktada aynı olması ısı dengede olduğunu gösterir. Sistemin herhangi bir noktasında basıncın değişmemesi mekanik dengede olduğunu gösterir. Bir sistemin iki faza sahip olup, her fazın kütlesi dengelendiğinde fazlar değişmiyor ise bu sistem faz dengesi şartını sağlıyor demektir. Son olarak bir sistemin kimyasal dengede olabilmesi için, kimyasal bileşiminin zamanla değişmemesi gereklidir. Dolayısıyla, sınır şartı olarak cidarda kaymama sınır şartı geçerlidir ve bu sınır şartı altında Navier-Stokes denklemi kullanılarak akışın çözümü yapılır. Yüzeğe yakın yerdeki akışın sıcaklığı yüzey sıcaklığına eşittir [1, 3, 6, 16-18].

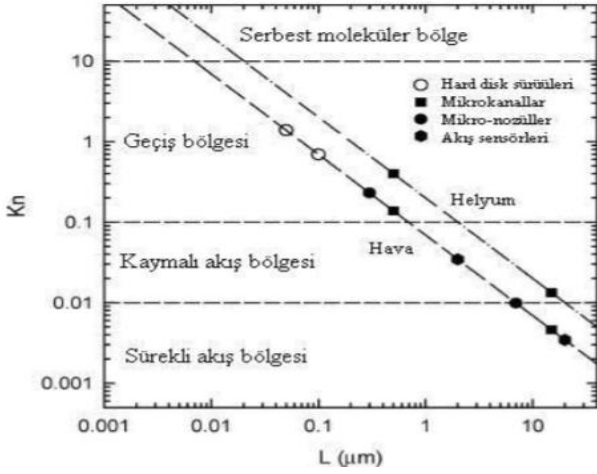
Knudsen sayısının 10-1 ile 10 arasında olduğu bölgeye geçiş akışı bölgesi (transition flow region) ismi verilir. Bu bölgede süreklilik ve termodinamik denge kabulleri geçerli değildir ve dolayısıyla Navier-Stokes denklemi kullanılamayacaktır. Bu bölge için alternatif analiz metotları geliştirilmiştir. Burnet denklemleri veya partikül tabanlı doğrudan Monte Carlo

simülasyonu metodunun kullanılmasıyla çözüme gidilebilir. Bunların yanı sıra bu bölgenin başlangıcında hız ve ısı sınır şartlarının ikinci mertebeden (second-order) hale getirilmesi ile Navier-Stokes denklemlerinin kullanılacağı araştırmacılar tarafından gösterilmiştir [1, 3, 6, 12].

Knudsen sayısının 10-3 ile 10-1 arasında olduğu bölgeye kaymalı akış bölgesi (slip flow region) adı verilmektedir. Navier-Stokes denklemleri, bu bölgede sürekli ortam fiziği geçerli olmadığı için, geçiş akışı bölgesinde olduğu gibi, hız ve sınır şartlarının yeniden düzenlenmesi şartı ile kullanılabilir. Bu bölgede hız sınır şartı için sürekli ortamda geçerli olan geleneksel cidarda kaymama sınır şartı yerine, kayma hızı sınır şartı (slip velocity boundary condition) kullanılır. Isıl sınır şartı için ise, sürekli ortamda geçerli olan akışkanın sıcaklığının duvar sıcaklığına eşit olduğunu söyleyen ısı sınır şartı yerine cidarda sıcaklık sıçraması sınır şartı kullanılır. Bu değişiklikler sayesinde Navier-Stokes denklemi kullanılabilir hale gelir. Fakat, sınır şartlarının yeniden düzenlenmesi ile Navier-Stokes denkleminin kullanılmasının küçük hataları beraberinde getireceği göz önüne alınmalıdır. Kaymalı akışın meydana gelebilmesi için akış basıncının çok küçük olması veya akış karakteristik uzunluğunun çok küçük olması gerekir. Sürekli akışta yüzeydeki akış hızı sıfır ve ihmal edilebilir mertebede iken kaymalı akışta hız sıfırdan farklıdır [1, 3, 6, 9].

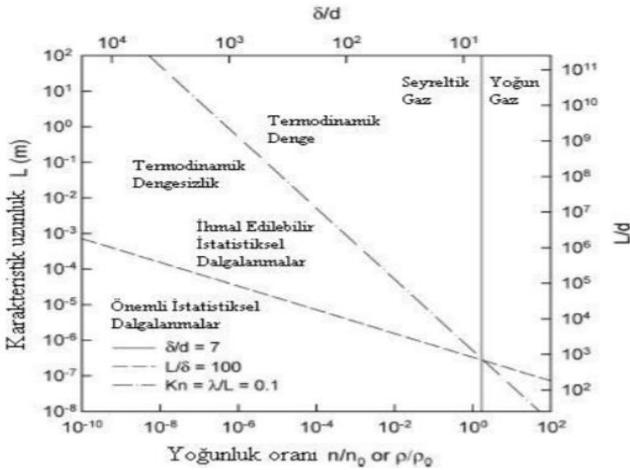
Knudsen sayısının 10'dan büyük olduğu bölgeye serbest moleküler akış (free molecular flow) bölgesi adı verilmektedir. Bu bölgede moleküllerin ortalama serbest uzaklıkları akışın karakteristik uzunluğundan oldukça büyüktür ve sonuç olarak yüzeye çarpıp yansıyan moleküller diğer moleküllere çarpmadan önce çok uzun yol almaktadır. Bu bölgede moleküller arası çarpışma, moleküllerin duvar ile çarpışması göz önüne alındığında ihmal edilebilir mertebededir [1, 3, 6].

Şekil 2.2 bazı mikro-akış elemanlarının Knudsen (Kn) sayısına ve karakteristik uzunluğa (L) bağlı olarak hangi akış rejiminde olduğunu göstermektedir. Şekilden görüleceği üzere birçok mikro-sistem elemanının kaymalı akış bölgesinde ya da geçiş akışı bölgesinin hemen başlangıcında çalıştığı görülmektedir. Bunun dışında hard disk sürücülerinin Kn sayısının 1'i aştığı bölgede çalıştığı görülmektedir. Son zamanlarda mikro-üretim tekniklerindeki hızlı gelişmeler mikro-sistemlerin boyutlarının mikron mertebelerinin oldukça altına rahatlıkla düşürebilmektedir. Bu ölçeklere inilmesi ile geçiş akışı bölgesinin üstlerine doğru yaklaşmaktadır.



Şekil 2.2 Standart atmosferik şartlarda karakteristik uzunluk (L) ve Knudsen sayısına (Kn) göre mikro-akış elemanlarının akış rejimlerinin gösterilmesi [1].

Termodinamik denge koşulları Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Başka bir deyişle bu grafik Navier-Stokes denkleminin geçerli olduğu bölgeleri göstermektedir. Bu grafik molekül çapı $d = 4.10 \cdot 10^{-10}$ [m] olan gazların durumunu simgelemektedir. Yaklaşık olarak hava moleküllerinin çapı da bu mertebelerde olduğundan, bu grafik akışkanın hava olması durumu için de bilgi vermektedir. Grafiğin sol ordinatı karakteristik uzunluğu (L) göstermektedir. Sağ ordinat ise karakteristik uzunluk ile molekül çapının birbirlerine oranını (L/d) göstermektedir. Grafiğin alt apsisi gaz yoğunluğunun referans yoğunluğa oranını (ρ/ρ_0) ya da bu orana eşit olan birim hacimdeki molekül sayısının referans durumdaki birim hacimdeki molekül sayısına oranını (n/n_0) göstermektedir. Son olarak grafiğin üst apsisi moleküller arasındaki ortalama uzaklığın molekül çapına oranını (δ/d) göstermektedir.[1]



Şekil 2.3 Navier-Stokes denkleminin geçerli olduğu bölgelerin gösterimi [1].

2.3. Navier-Stokes Denklemleri

Kütlenin Korunumu:
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

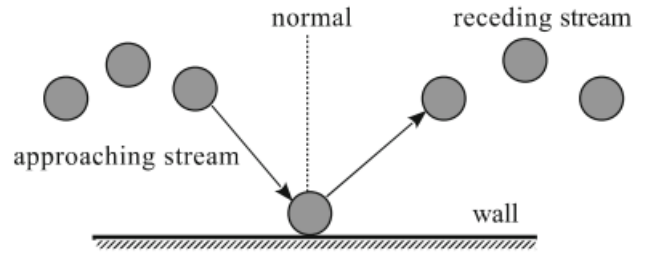
Momentumun Korunumu:
$$\frac{\partial \rho v_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_j v_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} - \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (3)$$

Enerjinin Korunumu:
$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_j E)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\tau_{ij}) \quad (4)$$

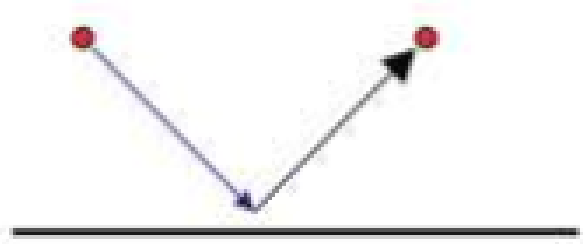
2.4. Kayma Akışı Modelleri

2.4.1 Maxwell'in Kayma Teorisi ve Birinci Dereceden Kayma Sınır Koşulu

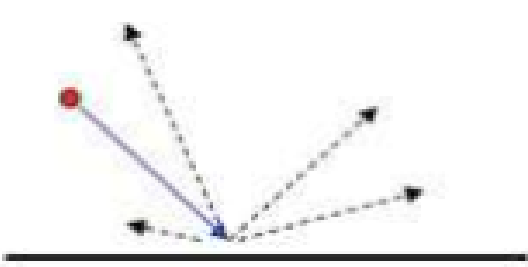
Maxwell kayma kavramı üzerinde çalışmış ve duvarın yanındaki kayma uzunluğunu ölçmüştür. Gaz-duvar etkileşimi sırasında, gaz molekülleri, duvara yaklaşan ve uzaklaşan iki akış olarak ayrılır.



Şekil 2.4 Gaz-duvar etkileşimi.



Şekil 2.5 Aynasal etkileşim.



Şekil 2.6 Dağınık etkileşim.

Maxwell tüm etkileşimlerin aynasal ya da dağınık olarak sınıflandırılabilirliğini ve etkileşimi ölçmek için teğetsel momentum barındırma katsayısı (TMBK) olarak bir parametre tanımlayabildiğini varsaydı;

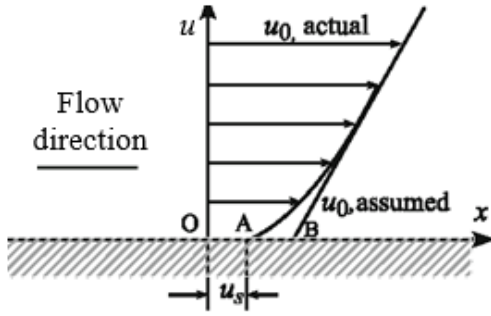
$$\sigma_v = \frac{\tau_i - \tau_r}{\tau_i - \tau_w} \quad (5)$$

Yukarıdaki eşitlikte, sırasıyla τ_i ve τ_r gelen ve yansıyan moleküllerin teğetsel momentumu; τ_w ise duvarın teğetsel momentumudur. Sabit bir duvar için $\tau_w = 0$ olur ve ayrıca τ_w yüzeyde adsorbe edilmiş olabilecek, yeniden yayılan moleküllerin teğetsel momentumudur. σ' da bulunan v alt indisi,

hızın yerleşimine atıfta bulunduğumuzu vurgulamaktadır. Aynasal etkileşim sırasında gelen ve yansıtılan moleküllerin teğetsel momentumu eşittir ancak momentumlarının normal bileşeni tersine çevrilir. Yani aynasal etkileşim için, $\tau_i = \tau_r$ ve $\sigma_v = 0$ 'dır. Öte yandan, dağınık etkileşim sırasında, molekül duvarla etkileşimden sonra herhangi bir rastgele yönde hareket edebildiğinden, sabit bir duvar için momentumu ortalama olarak sıfırdır ve aksi taktirde τ_w 'ye eşittir. Yani dağınık etkileşim için, $\tau_r = \tau_w$ ve $\sigma_v = 1$ 'dir. Aynasal ve dağınık etkileşimler bu nedenle σ_v sınırlarını güzel bir şekilde tanımlar ve tüm pratik değerlerin bu iki sınır dahilinde olması beklenir. Bir molekül geldiği yöne geri yansıtılırsa, σ_v birlikten daha büyük olabilir ve bu duruma saçılma adı verilir. Ancak, bu durumla sık sık karşılaşılabilir. Herhangi bir akışta, f toplam etkileşimlerin dışındaki dağınık etkileşimin bir parçasıysa TMBK'nın etkin değeri;

$$\sigma_v = f x \sigma_{v,dağınık} + (1 - f) x \sigma_{v,aynasal} = f x 1 + (1 - f) x 0 = f \quad (6)$$

Bu nedenle, σ_v dağınık etkileşimlerin oranını da belirtir. Bu etkileşimler sırasında, duvar yaklaşmakta olan akımın teğetsel momentumu ile uzaklaşan akım tarafından taşınan arasındaki farktan dolayı viskoz bir sürüklenme yaşar.



Şekil 2.7 Duvara doğrusal olarak uzatılan gerçek hız profili.

Maxwell, yaklaşan akımın u_0 'a eşit olarak uzanan bir hız gradyanı sergilediğini varsayarken, u_s , Şekil 2.4.4'te gösterildiği gibi duvardaki kayma hızıdır. Duvara yaklaşan akımın oluşturduğu teğetsel momentum şu şekilde analiz edilebilir: Duvara getirilen momentum, karşılık gelen moleküller akım tarafından gazın başka bir yerine iletilen momentumun büyüklüğüne eşittir. Bu nedenle, gelen momentum birim zaman başına birim alan başına $\frac{\mu}{2} \frac{du_0}{dy}$ 'dir, burada μ viskozite katsayısıdır ve y duvar için normaldir. Gazların kinetik teorisinden, birim duvar alanı başına düşen molekül sayısı, ortalama $\frac{1}{4} n \bar{v}$ hızına sahip birim hacim başına n molekülü olan bir gaz için \bar{v} 'dir. Bu moleküller, m 'nin molekülün kütlesi olduğu bir mu_s momentumu taşıyacaktır. Bu nedenle, kayma hızı u_s nedeniyle birim zaman başına birim alan başına gaz tarafından taşınan momentum, akış yönü $\frac{1}{4} nm \bar{v}$ çarpı u_s 'dir. Dolayısıyla gelen momentum bu iki bileşenin toplamıdır. Yukarıdaki argüman sadece dağınık olarak yansıyan moleküller için geçerliyken, aynasal yansıyan moleküller Şekil 2.4.3'ten anlaşıldığı üzere sürüklemeye katkıda bulunmazlar. Duvardaki sürüklenme, gelen ve giden momentumun farkı olduğundan, $p = mn$ yoğunluğunu kullandığımız yerde,

$$\sigma_s \left(\frac{1}{2} \mu \frac{du_0}{dy} + \frac{1}{4} \rho u_s \bar{v} \right) = \mu \frac{du_0}{dy} \quad (7)$$

eşitliğini elde ederiz. Bu nedenle, kayma hızı u_s ,

$$u_s = 2 \left(\frac{2-\sigma_v}{\sigma_v} \right) \frac{\mu}{\rho \bar{v}} \frac{du_0}{dy} \quad (8)$$

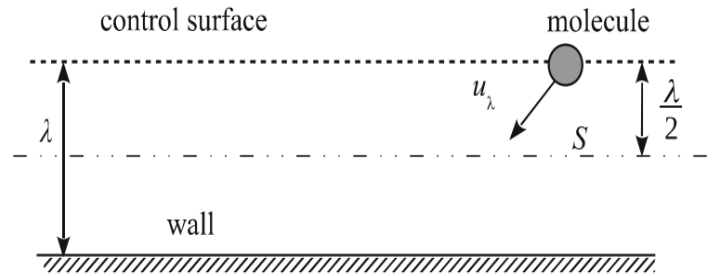
şeklinde yazılabilir. Yukarıdaki denkleme kinetik teorisinin standart bir sonucu olan $\bar{v} = 2 \left(\frac{2RT}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}}$ eklendikten sonra,

$$u_s = \left(\frac{2-\sigma_v}{\sigma_v} \right) \lambda \frac{du}{dy} \Big|_w \quad (9)$$

elde edilir (Ayrıca burada ortalama serbest yol $\lambda = \left(\frac{\mu}{\rho} \right) \sqrt{\frac{\pi RT}{2}}$ için ifadeler kullandık.). Hızın ilk y türevi ile sadece bir kayma katsayısı σ_v 'nin (ya da $C_1 = \frac{2-\sigma_v}{\sigma_v}$) yukarıdaki denkleme dahil edildiği unutulmamalıdır. Bu nedenle yukarıdaki model, "birinci dereceden" kayma sınırı koşulu olarak bilinir.

2.4.2 İkinci Dereceden Kayma Sınır Koşulu

Bu bölümde ikinci dereceden bir hız kayma modeli türetilmiştir. Türetme biraz sezgisel olmasına rağmen, yukarıda türetilen modelin nasıl genişletilebileceği hakkında önemli ipuçları verir. $\lambda/2$ 'nin duvardan uzakta bulunan bir kontrol yüzeyinin momentumunu geçtiği düşünülürse " λ " gazın ortalama serbest yoludur (Şekil 2.4.5).



Şekil 2.8 İkinci dereceden sınır kayma koşulu.

Bu kontrol yüzeyini geçen momentumun yarısı, yüzeyden λ mesafesinden gazla (gaz hızının u_λ olduğu yerde), diğer yarısı duvardan etkileşimden sonra gazla getirilir. Bu son momentumun büyüklüğü, duvardaki hem aynasal hem de dağınık yansımalar nedeniyle bileşenler içerir. Dağınık bileşen $\sigma_v u_w$ 'ye katkıda bulunurken, aynasal bileşen $(1 - \sigma_v) u_\lambda$ 'ya katkıda bulunur. Dolayısıyla,

$$u_{\frac{\lambda}{2}} = \frac{u_\lambda}{2} + \frac{\sigma_v u_w + (1-\sigma_v) u_\lambda}{2} \quad (8)$$

eşitliğini elde ederiz. Taylor serisinde u_λ 'yi $\frac{\lambda}{2}$ kadar genişletirsek

$$u_\lambda = u_{\frac{\lambda}{2}} + \frac{\lambda}{2} \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{\frac{\lambda}{2}} + \frac{\lambda^2}{8} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \Big|_{\frac{\lambda}{2}} + \dots \quad (9)$$

ve bu seriyi elde ettiğimiz denklemin içine yerleştirirsek;

$$\left(u_{\frac{\lambda}{2}} - u_w \right) = \frac{\lambda}{2} \frac{2-\sigma_v}{\sigma_v} \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{\frac{\lambda}{2}} + \frac{\lambda^2}{8} \frac{2-\sigma_v}{\sigma_v} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \Big|_{\frac{\lambda}{2}} + \dots \quad (10)$$

Şimdi kontrol yüzeyini $\frac{\lambda}{2}$ mesafesinden duvara doğru hareket ettirirsek,

$$\left(u_{\frac{\lambda}{2}} - u_{\omega}\right) = \lambda \frac{2-\sigma_v}{\sigma_v} \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{\frac{\lambda}{2}} + \lambda^2 \frac{2-\sigma_v}{\sigma_v} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \Big|_{\frac{\lambda}{2}} + \dots \quad (11)$$

elde ederiz. $u_g - u_{\omega} = u_s$ Olarak tanımlar ve u_g 'yi $u_{\lambda/2}$ ile yer değiştirirsek, genel ikinci dereceden kayma sınır koşulu olan

$$u_s = \frac{2-\sigma_v}{\sigma_v} \left(\lambda \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{\frac{\lambda}{2}} + \lambda^2 \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \Big|_{\frac{\lambda}{2}}\right) \quad (12)$$

eşitliğini elde ederiz.

2.5 HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği)

CFD (Computational Fluid Dynamics), yani HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) anlamına gelen akışkan akışı, ısı transferi ve kimyasal reaksiyonlar gibi sistemlerin bilgisayar üzerinden simülasyonu analize verilen isimdir. Bu metot pek çok endüstriyel ve endüstriyel olmayan uygulamada yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

HAD, matematiksel metotlar ve belirli algoritmalar ile akışkanların analizini, bilgisayar üzerinde gerçekleştirerek sonuçları simülasyon şeklinde aktaran bir disiplindir. HAD bir bilgisayar programı veya yazılımı değildir. Sadece ANSYS gibi akış analizi yapılabilen programlarda kullanılan bir metottur. Örneğin bir mühendis, otomobil veya uçak tasarlamak istediğinde aerodinamik, mühendislik prosesinde çok önemli yere sahiptir. Ancak, aerodinamik prosesler kolaylıkla ölçülemez. Genel olarak mühendislerin tek yolu, tasarımlarını optimize ederek, ürünün prototipini teste tabi tutmalarıdır. Geçmişten günümüze bilgisayar teknolojisinin yaygınlaşması ile hesaplamalı akışkan dinamiği yani HAD, yaygın olarak akışkan akışlarında kullanılmaya başlanmıştır. HAD analizinde akışın basıncı, sıcaklığı, hızı, yoğunluğu ve viskozitesi gibi fiziksel özelliklerine göre incelemeler yapılmıştır. HAD uygulamaları, ANSYS-Fluent gibi bilgisayar uygulamalarıyla günümüzde artmaya devam etmektedir. HAD ile gerçeğe çok yakın analizler yapıldığı için, deney ve prototip testlerinin maliyetleri de büyük oranda azalmıştır. Bunun doğal sonucu olarak da ürünlerin fiyatı düşmüştür [8-15].

2.5 Kayma ve Kaymama Sınır Koşullarında Akış

Kaymama sınır koşulu, sıvı hızının, sınır tabakası ile doğrudan teması halinde sınırın hızı ile aynı olduğunu varsayar. Sınır ve bu sıvı arasında göreceli bir katman olmadığı için kayma olmaz. Kayma sınır koşulu hız fonksiyonunda bir süreksizlik olduğunu, başka bir deyişle, sıvı ile sınır arasında göreceli bir hareket olduğunu varsayar. Bu nedenle kayma vardır. Hız fonksiyonunun, sınırın hızına erişebileceği sınır içindeki varsayımsal mesafeye kayma uzunluğu (L_s) denir. Sıvı alanının son katmanının hızı ile sınırdaki hız arasındaki tutarsızlığın;

$$\Delta v_{boundary} = \frac{\partial v_x}{\partial z} \Big|_{boundary} L_s \quad (13)$$

olduğu varsayılabilir [6].

Kayma uzunluğu sadece sıvı ve katının eşleşmesine bağlıdır. Bu nedenle deneylerle teorik olarak belirlenebilir. Kaymama sınır koşulu, genel olarak 300nm üstündeki karakteristik uzunluk ölçeklerinde katı sınırlar ve sıkılaştırılmayan sıvılarla çalışılan mikroakışkanlardaki çoğu uygulamada uygulanabilir.

Kaymama sınır koşulu uygulanmadığı zaman, kayma dikkate alınmalıdır. Bu durumlarda sınırdaki hız sıfırdan farklıdır.

3. Bir Mikrokanalda 3 Boyutlu Kayma Akışı

Bu projede; yakınsak bir mikrokanalda, gaz olarak nitrojen gazının kullanıldığı (Şekil 3.1) ve mikrokanal malzemesinin alüminyum seçildiği bir kayma akışının deneysel ve sayısal analizi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmamızda parametre değerleri olarak yakınsama açıları 40, 80, 120, 80, 80 ve 80, hidrolik çapları 143, 147, 150, 118, 147 ve 177 μm , uzunlukları birbirine eşit (20 mm) olan 6 farklı mikrokanal kullanılmıştır. Bu mikrokanallar, üçerli gruplar olmak üzere iki gruba ayrılarak, ilk grupta (Çözüm I, Çözüm II, Çözüm III) nozüldeki basınç farkının (ΔP) yakınsaklık açısıyla değişimi, ikinci grupta ise (Çözüm IV, Çözüm V, Çözüm VI) yine basınç farkının hidrolik çap ile (D_h) değişimi incelenmiştir.

Name	nitrogen	Material Type	fluid
Chemical Formula	n2	Fluent Fluid Materials	nitrogen (n2)
		Mixture	none
Properties			
Thermal Conductivity (w/m-k)	constant	Edit...	0.0242
Viscosity (kg/m-s)	constant	Edit...	1.663e-05
Molecular Weight (kg/kgmol)	constant	Edit...	28.0134
L-J Characteristic Length (angstrom)	constant	Edit...	3.621

Şekil 3.1 Nitrojen gazının özellikleri.

Maxwell, yaklaşan akımın u_0 'a eşit olarak uzanan bir hız gradyanı sergilediğini varsayarken, u_s , Şekil 2.4.4'te gösterildiği gibi duvardaki kayma hızıdır. Duvara yaklaşan akımın oluşturduğu teğetsel momentum şu şekilde analiz edilebilir: Duvara getirilen momentum, karşılık gelen moleküler akım tarafından gazın başka bir yerine iletilen momentumun büyüklüğüne eşittir. Bu nedenle, gelen momentum birim zaman başına birim alan başına $\frac{\mu}{2} \frac{du_0}{dy}$ dir,

3.1 Açının Etkisi

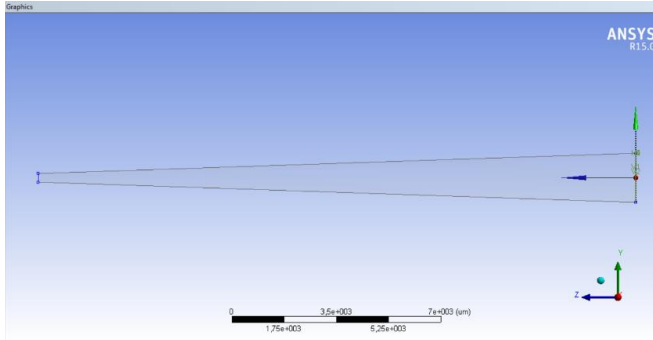
I, II ve III çözümlerinde, nozüldeki basınç farkının yakınsaklık açısıyla değişiminin analizleri aşağıda adım adım sunulmuştur. Mikrokanaldaki akışın, mikrokanalın ve nitrojen gazının özellikleri aşağıdaki Tablo 3.1'de belirtilmiştir. Nitrojenin gazının girdiği kısım (inlet), mikrokanalın alanı daha büyük olan kısmı olarak seçilmiştir.

Tablo 3.1 Çözüm I, Çözüm II ve Çözüm III parametreleri.

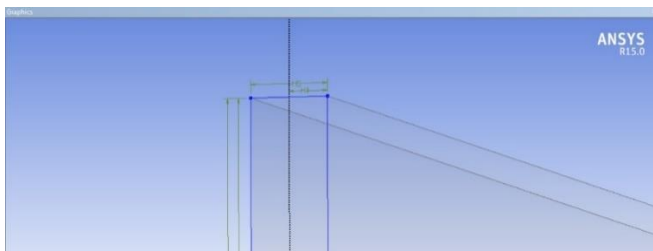
	Çözüm I	Çözüm II	Çözüm III
Yakınsama açısı	4	8	12
Kütleli debi (kg/s)	0,0000001	0,0000001	0,0000001
Hidrolik çap (D_h) (μm)	143	147	150
Uzunluk (mm)	20	20	20
W_s (μm)	293	291	291
W_L (μm)	1680	3077	4480
H (μm)	79	78	78
Knudsen	0,043	0,042	0,041
Reynolds	0,84	0,48	0,33

3.1.1 Çözüm I

Kayma akışı için yatay uzunluğu 20 mm, dikey uzunluğu 1680 μm , kalınlığı ise 79 μm olan bir mikrokanal modeli kullanılmıştır. Aşağıda, Şekil 3.2, Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te, kullanılan model ve uzunlukları gösterilmiştir.



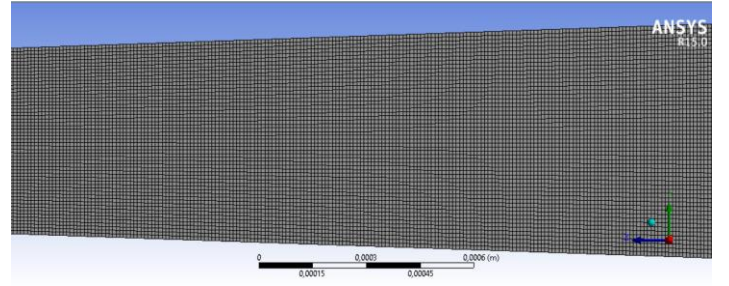
Şekil 3.2 Çözüm I için geometri modeli.



Şekil 3.3 Çözüm I'in kesiti.

Dimensions: 4	
<input type="checkbox"/> H4	39,5 μm
<input type="checkbox"/> H5	79 μm
<input type="checkbox"/> V1	840 μm
<input type="checkbox"/> V2	1680 μm

Şekil 3.4 Çözüm I'in uzunlukları.



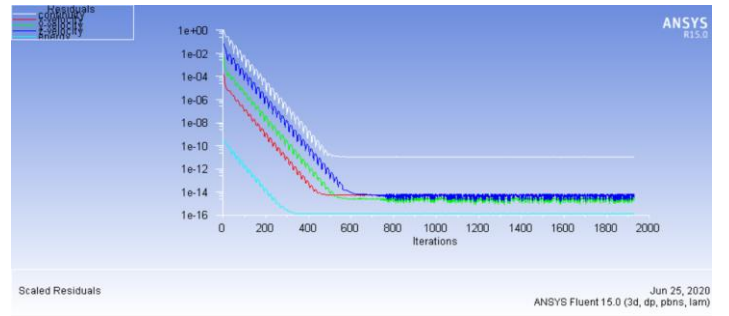
Şekil 3.5 Çözüm I'in çözüm ağı kesiti.

Details of "Mesh"	
<input checked="" type="checkbox"/> Sizing	
Use Advanced Size Fun...	On: Proximity
Relevance Center	Medium
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Num Cells Across Gap	8
<input type="checkbox"/> Proximity Min Size	Default (5,002e-006 m)
<input type="checkbox"/> Max Face Size	Default (5,002e-004 m)
<input type="checkbox"/> Max Size	Default (1,0004e-003 m)
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,20)
Minimum Edge Length	7,9e-005 m

Şekil 3.6 Çözüm I'in çözüm ağı detayları.

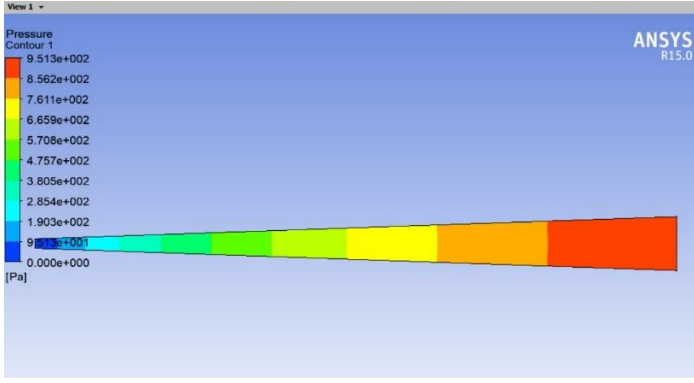
Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	1021608
<input type="checkbox"/> Elements	891440
Mesh Metric	None

Şekil 3.7 Çözüm I'in çözüm ağı istatistikleri.

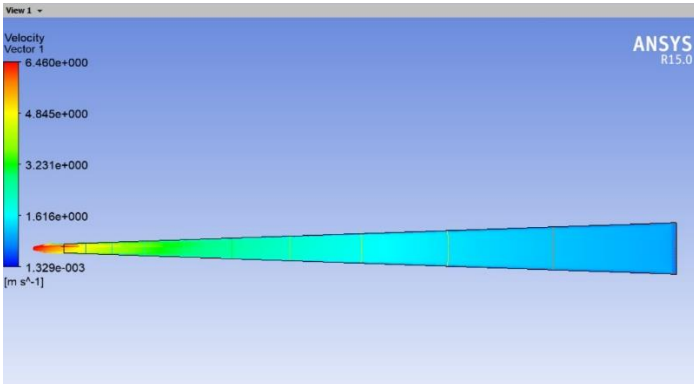


Şekil 3.8 Çözüm I için momentum ve enerji denklemlerindeki artık değerler.

X, y ve z momentum denklemleri ile enerji denklemindeki artık değerlerin yaklaşık 700 iterasyondan sonra sabit hale geldiği ve sayısal çözümün yakınsadığı görülmüştür.



Şekil 3.9 Çözüm I basınç kontürleri.

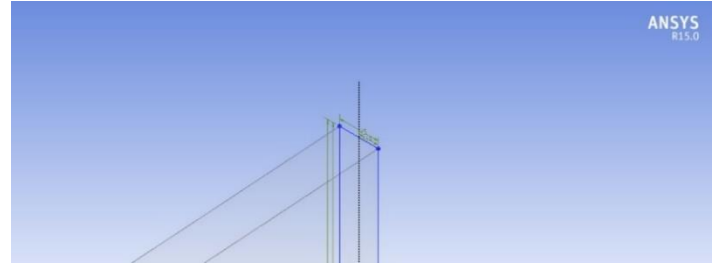


Şekil 3.10 Çözüm I hız vektörleri.

Sonuç olarak yapılan bu çalışmalar sonucunda 4 ° yakınsaklık açısındaki ΔP basınç farkı 948,65 Pa olarak hesaplanmıştır. Bu değer, aslında girişteki basınçtır. Çıkışta basınç 0 Pa değerinde sabit olduğu için giriş basıncı bizi doğrudan ΔP basınç farkına ulaştırmıştır.

3.1.2 Çözüm II

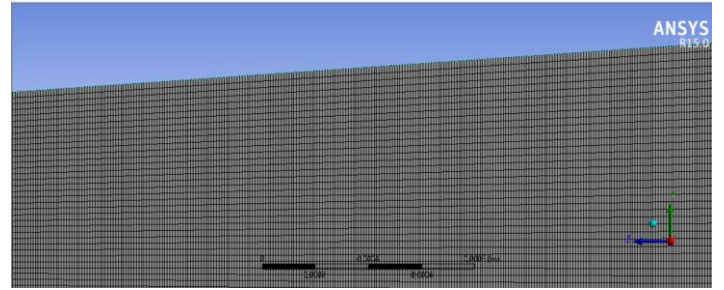
Kayma akışı için yatay uzunluğu 20 mm, dikey uzunluğu 3077 μm , kalınlığı ise 78 μm olan bir mikrokana model kullanılmıştır. Aşağıda Şekil 3.11, Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'te, kullanılan model ve uzunlukları gösterilmiştir.



Şekil 3.12 Çözüm II'nin geometri kesiti.

Dimensions: 4	
<input type="checkbox"/> H4	39 μm
<input type="checkbox"/> H5	78 μm
<input type="checkbox"/> V1	1538,5 μm
<input type="checkbox"/> V2	3077 μm

Şekil 3.13 Çözüm II'nin uzunlukları.



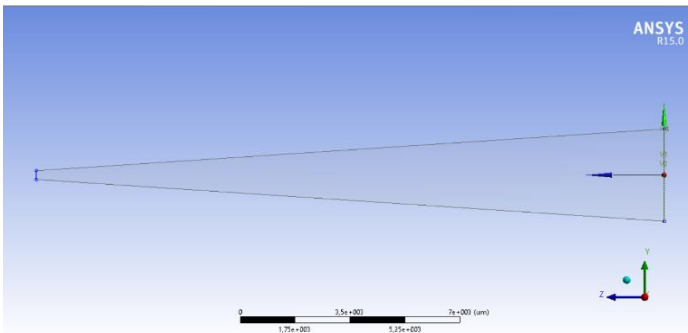
Şekil 3.14 Çözüm II'nin çözüm ağı kesiti.

Details of "Mesh"	
<input checked="" type="checkbox"/> Sizing	
Use Advanced Size Fun...	On: Proximity
Relevance Center	Medium
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Num Cells Across Gap	8
<input type="checkbox"/> Proximity Min Size	Default (5,0431e-006 m)
<input type="checkbox"/> Max Face Size	Default (5,0431e-004 m)
<input type="checkbox"/> Max Size	Default (1,0086e-003 m)
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,20)
Minimum Edge Length	7,8e-005 m

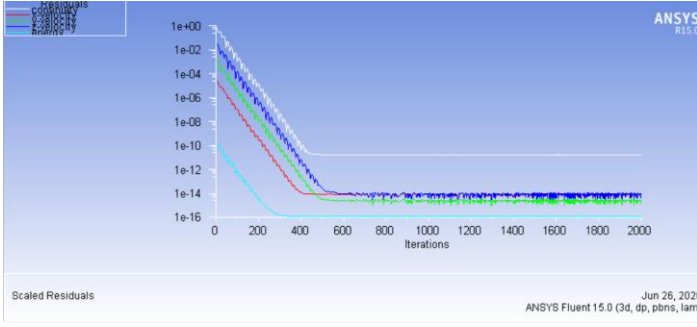
Şekil 3.15 Çözüm II'nin çözüm ağı detayları.

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	1110780
<input type="checkbox"/> Elements	970432
Mesh Metric	None

Şekil 3.16 Çözüm II'nin çözüm ağı istatistikleri.



Şekil 3.11 Çözüm II için geometri modeli.

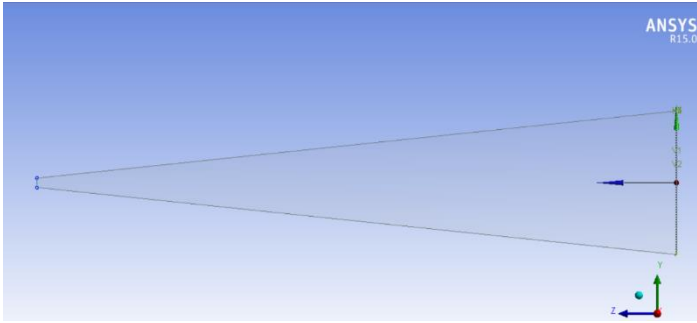


Şekil 3.17 Çözüm II için momentum ve enerji denklemlerindeki artık değerler.

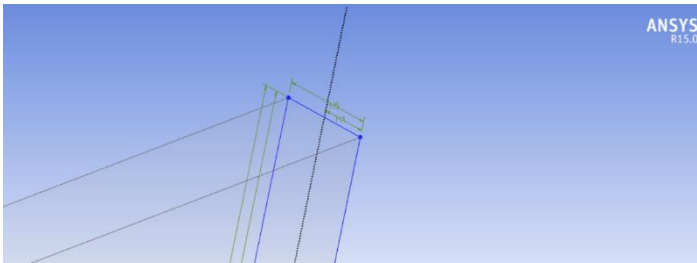
X, y ve z momentum denklemleri ile enerji denklemindeki artık değerlerin yaklaşık 500 iterasyondan sonra sabit hale geldiği ve sayısal çözümün yakınsadığı görülmüştür. Sonuç olarak yapılan bu çalışmalar sonucunda 8° yakınsaklık açısındaki ΔP basınç farkı 658,15 Pa olarak hesaplanmıştır. Bu değer, aslında girişteki basınçtır. Çıkışta basınç 0 Pa değerinde sabit olduğu için giriş basıncı bizi doğrudan ΔP basınç farkına ulaştırmıştır.

3.1.3 Çözüm III

Kayma akışı için yatay uzunluğu 20 mm, dikey uzunluğu 4480 μm , kalınlığı ise 78 μm olan bir mikrokanal modeli kullanılmıştır. Aşağıda Şekil 3.18, Şekil 3.19 ve Şekil 3.20'de, kullanılan model ve uzunlukları gösterilmiştir.



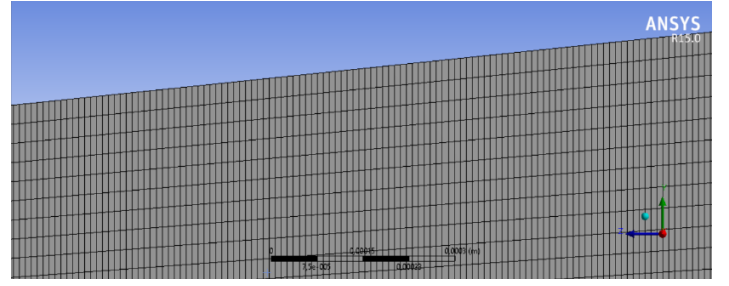
Şekil 3.18 Çözüm III için geometri modeli.



Şekil 3.19 Çözüm III'ün geometri kesiti.

Dimensions: 4	
<input type="checkbox"/> H4	39 μm
<input type="checkbox"/> H5	78 μm
<input type="checkbox"/> V1	2240 μm
<input type="checkbox"/> V2	4480 μm

Şekil 3.20 Çözüm III'ün uzunlukları.



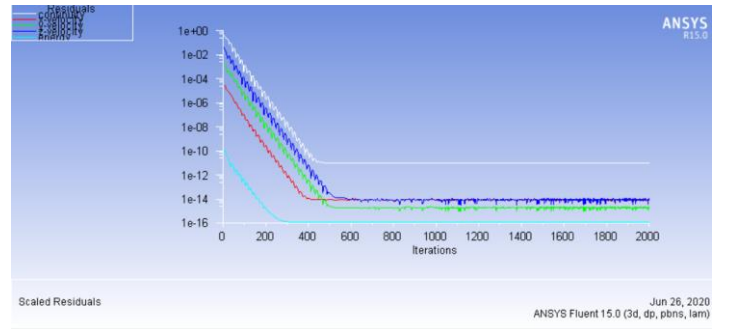
Şekil 3.21 Çözüm III'ün çözüm ağı kesiti.

Sizing	
Use Advanced Size Fun...	On: Proximity
Relevance Center	Medium
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Num Cells Across Gap	8
<input type="checkbox"/> Proximity Min Size	Default (5,1079e-006 m)
<input type="checkbox"/> Max Face Size	Default (5,1079e-004 m)
<input type="checkbox"/> Max Size	Default (1,0216e-003 m)
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,20)
Minimum Edge Length	7,8e-005 m

Şekil 3.22 Çözüm III'ün çözüm ağı detayları.

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	1151154
<input type="checkbox"/> Elements	1006256
Mesh Metric	None

Şekil 3.23 Çözüm III'ün çözüm ağı istatistikleri.



Şekil 3.24 Çözüm III için momentum ve enerji denklemlerindeki artık değerler.

X, y ve z momentum denklemleri ile enerji denklemindeki artık değerlerin yaklaşık 450 iterasyondan sonra sabit hale geldiği ve sayısal çözümün yakınsadığı görülmüştür. Sonuç olarak yapılan bu çalışmalar sonucunda 12° yakınsaklık açısındaki ΔP basınç farkı 508,29 Pa olarak hesaplanmıştır. Bu değer, aslında girişteki basınçtır. Çıkışta basınç 0 Pa değerinde sabit olduğu için giriş basıncı bizi doğrudan ΔP basınç farkına ulaştırmıştır.

3.2 Hidrolik Çapın Etkisi

Çözüm IV, Çözüm V ve Çözüm VI'da nozuldeki basınç farkının hidrolik çapa göre değişiminin analizleri aşağıda adım

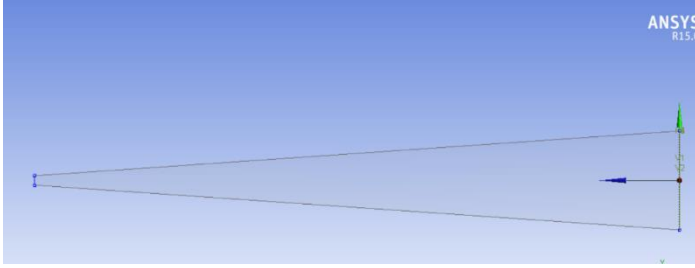
adım sunulmuştur. Mikrokanaldaki akışın, mikrokanalın ve nitrojen gazının özellikleri aşağıdaki Tablo 3.2’de belirtilmiştir. Nitrojenin gazının girdiği kısım (inlet), mikrokanalın alanı daha büyük olan kısmı olarak seçilmiştir.

Tablo 3.2 Çözüm IV, Çözüm V ve Çözüm VI parametreleri.

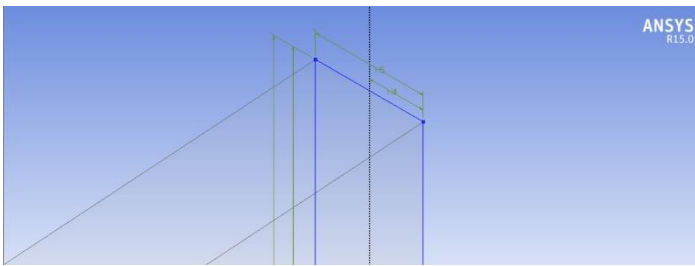
	Çözüm IV	Çözüm V	Çözüm VI
Yakınsama açısı	8	8	8
Kütleli debi (kg/s)	0,0000001	0,0000001	0,0000001
Hidrolik çap (D_h) (μm)	118	147	177
Uzunluk (mm)	20	20	20
W_s (μm)	267	291	276
W_L (μm)	3067	3077	3073
H (μm)	62	78	95
Knudsen	0,052	0,042	0,035
Reynolds	4,83	4,77	4,72

3.2.1 Çözüm IV

Kayma akışı için yatay uzunluğu 20 mm, dikey uzunluğu 3064 μm , kalınlığı ise 62 μm olan bir mikrokanal modeli kullanılmıştır. Aşağıda Şekil 3.25, Şekil 3.26 ve Şekil 3.27’de, kullanılan model ve uzunlukları gösterilmiştir.



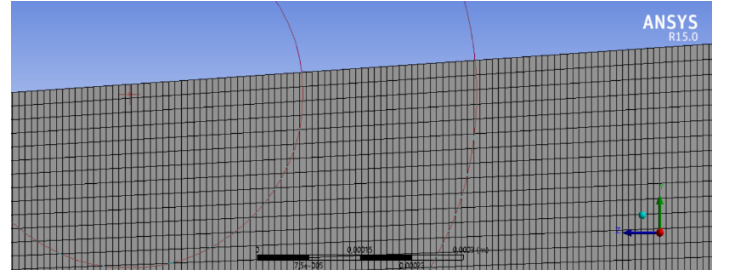
Şekil 3.25 Çözüm IV için geometri modeli.



Şekil 3.26 Çözüm IV'ün geometri kesiti.

Dimensions: 4	
<input type="checkbox"/> H4	31 μm
<input type="checkbox"/> H5	62 μm
<input type="checkbox"/> V1	1533,5 μm
<input type="checkbox"/> V2	3067 μm

Şekil 3.27 Çözüm IV'ün uzunlukları.



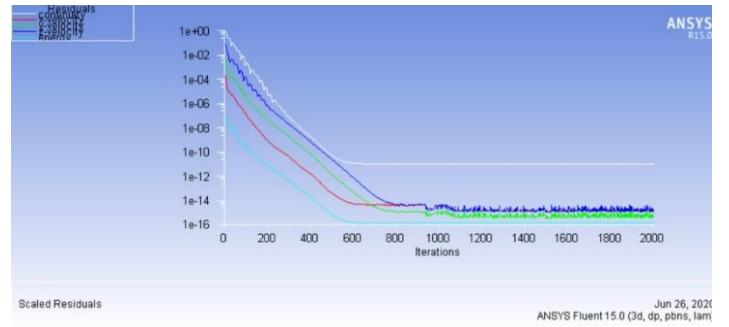
Şekil 3.28 Çözüm IV'ün mesh kesiti.

Sizing	
Use Advanced Size Fun...	On: Proximity
Relevance Center	Medium
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Num Cells Across Gap	8
<input type="checkbox"/> Proximity Min Size	Default (5,0427e-006 m)
<input type="checkbox"/> Max Face Size	Default (5,0427e-004 m)
<input type="checkbox"/> Max Size	Default (1,0085e-003 m)
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,20)
Minimum Edge Length	6,2e-005 m

Şekil 3.29 Çözüm IV'ün çözüm ağı detayları.

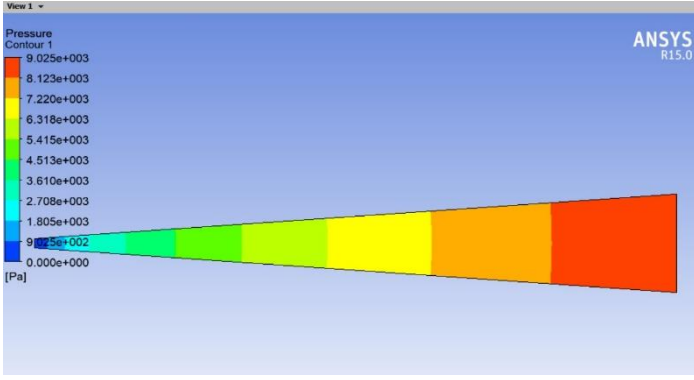
Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	1281168
<input type="checkbox"/> Elements	1119960
Mesh Metric	None

Şekil 3.30 Çözüm IV'ün çözüm ağı istatistikleri.

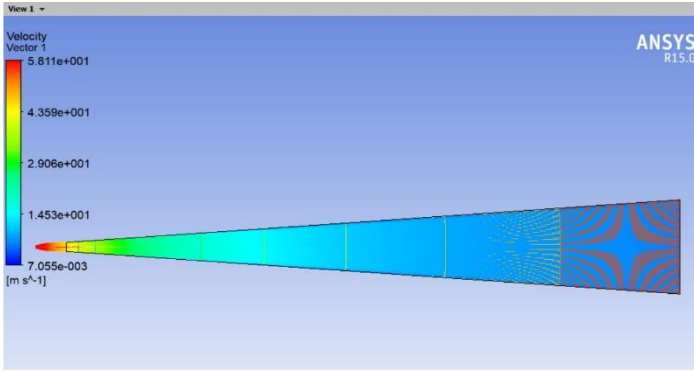


Şekil 3.31 Çözüm IV için momentum ve enerji denklemlerindeki artık değerler.

X, y ve z momentum denklemleri ile enerji denklemindeki artık değerlerin yaklaşık 800 iterasyondan sonra sabit hale geldiği ve sayısal çözümün yakınsadığı görülmüştür.



Şekil 3.32 Çözüm IV basınç kontürleri.

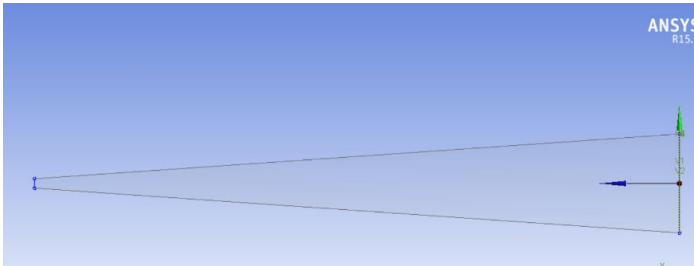


Şekil 3.33 Çözüm IV hız vektörleri.

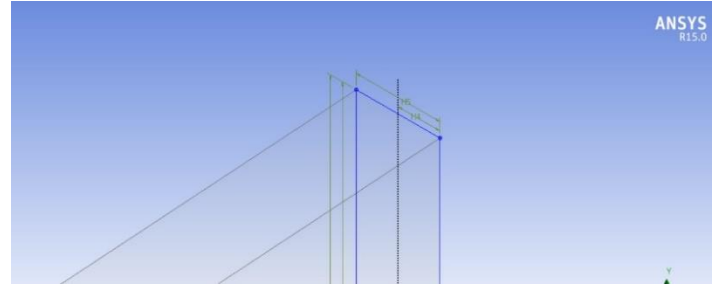
Sonuç olarak yapılan bu çalışmalar sonucunda hidrolik çap 118 μm olarak seçildiğinde ΔP basınç farkı 8997 Pa olarak hesaplanmıştır. Bu değer, aslında girişteki basınçtır. Çıkışta basınç 0 Pa değerinde sabit olduğu için giriş basıncı bizi doğrudan ΔP basınç farkına ulaştırmıştır.

3.2.2 Çözüm V

Kayma akışı için yatay uzunluğu 20 mm, dikey uzunluğu 3077 μm , kalınlığı ise 78 μm olan bir mikrokanal modeli kullanılmıştır. Aşağıda Şekil 3.34, Şekil 3.35 ve Şekil 3.36'da, kullanılan model ve uzunlukları gösterilmiştir.



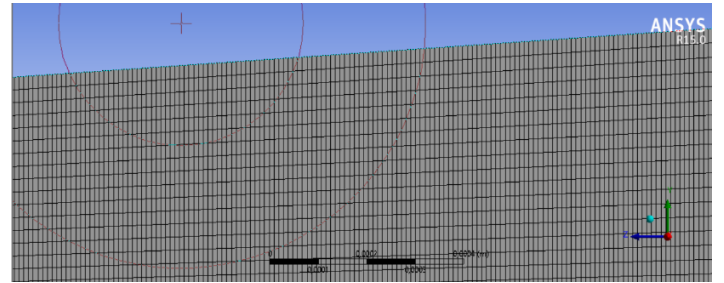
Şekil 3.34 Çözüm V'in geometri modeli.



Şekil 3.35 Çözüm V'in geometri kesiti.

Dimensions: 4	
<input type="checkbox"/> H4	39 μm
<input type="checkbox"/> H5	78 μm
<input type="checkbox"/> V1	1538,5 μm
<input type="checkbox"/> V2	3077 μm

Şekil 3.36 Çözüm V'in uzunlukları.



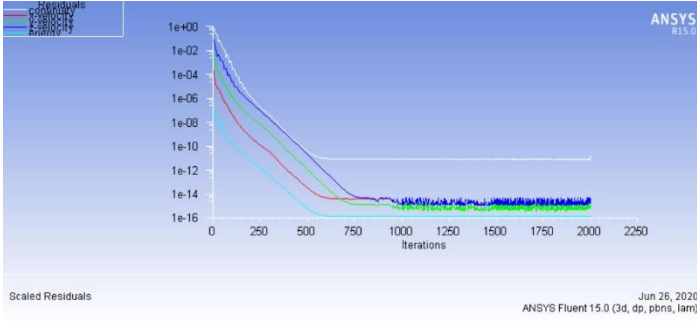
Şekil 3.37 Çözüm V'in çözüm ağı kesiti.

Sizing	
Use Advanced Size Fun...	On: Proximity
Relevance Center	Medium
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Num Cells Across Gap	8
<input type="checkbox"/> Proximity Min Size	Default (5,0431e-006 m)
<input type="checkbox"/> Max Face Size	Default (5,0431e-004 m)
<input type="checkbox"/> Max Size	Default (1,0086e-003 m)
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,20)
Minimum Edge Length	7,8e-005 m

Şekil 3.38 Çözüm V'in çözüm ağı detayları.

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	1110780
<input type="checkbox"/> Elements	970432
Mesh Metric	None

Şekil 3.39 Çözüm V'in çözüm ağı istatistikleri.

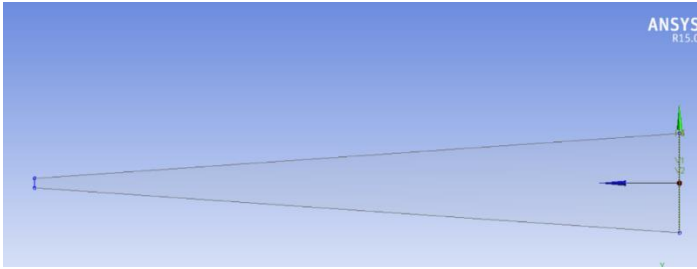


Şekil 3.40 Çözüm V için momentum ve enerji denklemlerindeki artık değerler.

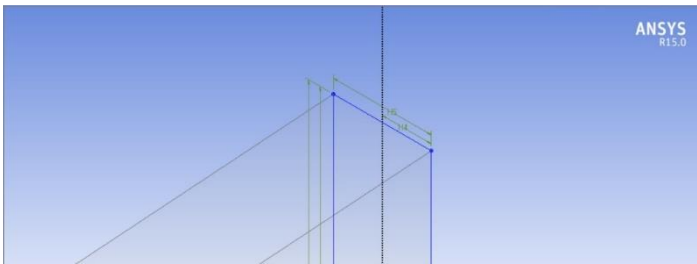
X, y ve z momentum denklemleri ile enerji denklemindeki artık değerlerin yaklaşık 800 iterasyondan sonra sabit hale geldiği ve sayısal çözümün yakınsadığı görülmüştür. Sonuç olarak yapılan bu çalışmalar sonucunda 147 μm hidrolik çap değerinde, ΔP basınç farkı 7529,1 Pa olarak hesaplanmıştır. Bu değer, aslında girişteki basınçtır. Çıkışta basınç 0 Pa değerinde sabit olduğu için giriş basıncı bizi doğrudan ΔP basınç farkına ulaştırmıştır.

3.2.3 Çözüm VI

Kayma akışı için yatay uzunluğu 20 mm, dikey uzunluğu 3073 μm , kalınlığı ise 95 μm olan bir mikrokanal modeli kullanılmıştır. Aşağıda Şekil 3.41, Şekil 3.42 ve Şekil 3.43'te, kullanılan model ve uzunlukları gösterilmiştir.



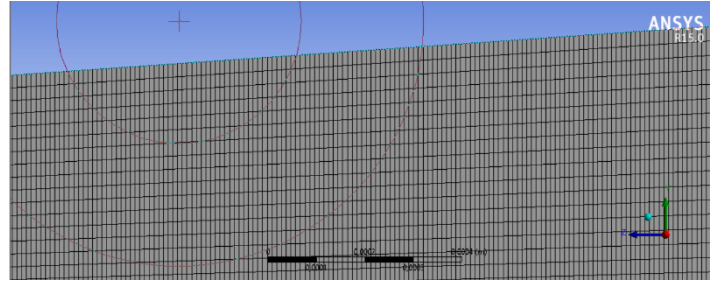
Şekil 3.41 Çözüm VI'nın geometri modeli.



Şekil 3.42 Çözüm VI'nın geometri kesiti.

Dimensions: 4	
<input type="checkbox"/> H4	47,5 μm
<input type="checkbox"/> H5	95 μm
<input type="checkbox"/> V1	1538,5 μm
<input type="checkbox"/> V2	3077 μm

Şekil 3.43 Çözüm VI'nın uzunlukları.



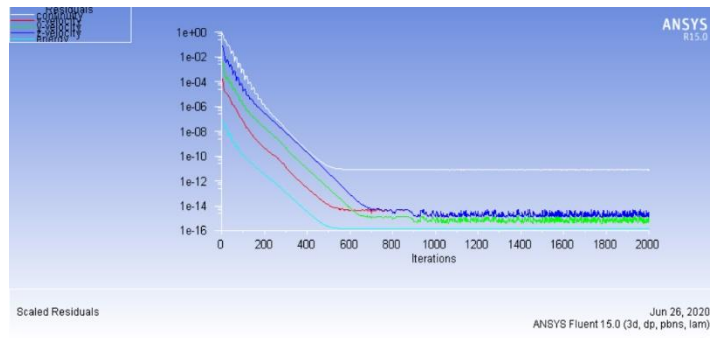
Şekil 3.44 Çözüm VI'nın çözüm ağı kesiti.

Sizing	
Use Advanced Size Fun...	On: Proximity
Relevance Center	Medium
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Num Cells Across Gap	8
<input type="checkbox"/> Proximity Min Size	Default (5,0431e-006 m)
<input type="checkbox"/> Max Face Size	Default (5,0431e-004 m)
<input type="checkbox"/> Max Size	Default (1,0086e-003 m)
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,20)
Minimum Edge Length	9,5e-005 m

Şekil 3.45 Çözüm VI'nın çözüm ağı detayları.

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	699219
<input type="checkbox"/> Elements	607936
Mesh Metric	None

Şekil 3.46 Çözüm VI'nın çözüm ağı istatistikleri.



Şekil 3.47 Çözüm VI için momentum ve enerji denklemlerindeki artık değerler.

X, y ve z momentum denklemleri ile enerji denklemindeki artık değerlerin yaklaşık 600 iterasyondan sonra sabit hale geldiği ve sayısal çözümün yakınsadığı görülmüştür. Sonuç olarak yapılan bu çalışmalar sonucunda 177 μm hidrolik çap değerinde, ΔP basınç farkı 4608,6 Pa olarak hesaplanmıştır. Bu değer, aslında girişteki basınçtır. Çıkışta basınç 0 Pa değerinde sabit olduğu için giriş basıncı bizi doğrudan ΔP basınç farkına ulaştırmıştır.

4. Sonuçlar

Maliyeti yüksek ve uzun zaman alan deney sistemleri kurmak yerine, daha az maliyetli bir yöntem olan hesaplamalı akışkanlar dinamiği sayesinde, deneylerde uygulanması vakit alan koşulların incelenmesi mümkün olmuştur. ANSYS Fluent yazılımı sayesinde, uzun deney uğraşları vermek yerine simülasyonlar ile çalışmalarımızı yaparak zamandan ve maliyetten kazanç sağlanmıştır.

Çalışmada, 6 farklı mikrokanalda akan nitrojen gazının, farklı yakınsaklık açıları (4°, 8° ve 12°) ve farklı hidrolik çaplarda (118, 147 ve 177 µm) basınç kaybını analiz edilmiştir. Sürtünme faktörü (f) her bir çözümde;

$$f = (P_i^2 - P_o^2) \left[\frac{1}{G^2 RT} - \frac{1}{P_i P_o} \right] \frac{Dh}{L} \quad (14)$$

formülü kullanılarak bulunmuştur. Burada;

Pi: Giriş basıncı (Fluent' te okunan değere 101325 Pa atmosfer basıncı eklenerek elde edilmiştir),

P0: Çıkış basıncı (101325 Pa değerinde sabit),

R: Nitrojen için spesifik gaz sabiti (296,8 J/kgK),

T: Sıcaklık (300K),

Dh: Hidrolik çap (m),

L: Uzunluk (m)

G=m /A : (Kütleli debi her bir çözüm için oluşturulan parametre tablosunda verilmiştir),

A=V/L: Kesit Alanı (m²) (Hacim değeri her bir çözüm için ayrı olarak ANSYS üzerinden okunmuştur ve uzunluk değeri her çözümde 20mm olarak sabittir).

Viskoz basınç kaybı (ΔP_v) ise her bir çözüm için;

$$\Delta P_v = \frac{G^2 f L}{2 D \rho_m} \quad (14)$$

Eşitliği kullanılarak elde edilmiştir. Burada;

ρ_m : Ortalama Yoğunluk (kg/m³) (ANSYS üzerinden okunmuştur).

Son olarak ise, toplam basınç kaybı (ΔP_t) ANSYS üzerinden okunmuştur. Yakınsaklık açılarına göre çalışmalar yapılırken, aynı uzunluk, derinlik, hidrolik çap değerleri kullanılmıştır. Çözüm I için nitrojen gazının giriş hızı 0,2514745 m/s, Çözüm II için 0,3661377 m/s ve Çözüm III için 0,2514745 m/s'dir.

Tablo 4.1 Yakınsaklık açısına bağlı olarak basınç kaybı.

	Çözüm I	Çözüm II	Çözüm III
Basınç oranı, P_i/P_0	1,009	1,0065	1,005
Sürtünme faktörü, f	9,42	19,05	33,085
Viskoz basınç kaybı, ΔP_v (Pa)	946,44	656,86	557,52
Toplam basınç kaybı, ΔP_t (Pa)	948,65	658,15	508,29

Verilen parametrelere formüllere uygulanması sonucunda 4°'lik yakınsaklık açısında (Çözüm I) giriş basıncı ve çıkış basıncı oranının (P_i/P_0) 1,009 olduğunu görüyoruz. Yakınsaklık açısı 8° olarak ayarlandığında 4° yakınsaklık açısına göre (Çözüm II) %0,25 azalarak 1,0065 değerine, 12° olarak ayarlandığında (Çözüm III) %0,40 azalarak 1,005 değerine düşmüştür.

Sürtünme faktörü (f) Çözüm I için 9,42 iken, Çözüm II için %102,23 artarak 19,05 olurken, Çözüm III için %219,38 artarak 33,085 değerine ulaşmıştır.

Viskoz basınç kaybı (ΔP_v) ise Çözüm I için 946,44'tür. Çözüm II için bu değer %30,60 azalarak 656,86 olurken, Çözüm III için %41,39 azalarak 557,52 olarak ölçülmüştür.

Yakınsaklık açılarına göre basınç kaybına bakacak olursak, açı arttıkça basınç kaybının azaldığını görebiliriz. Çözüm I için açı 4° olarak ayarlandığında basınç kaybı 948,65 Pa olurken, Çözüm II için 8° olarak kullanıldığında %30,62 azalarak 658,15 Pa değerine düşmektedir. Aynı zamanda, Çözüm III için yakınsaklık açısı 12° olarak alındığında, basınç kaybı Çözüm I'e göre %46,42 azalarak 508,29 Pa değerine gerilemektedir.

Tablo 4.2 Hidrolik çapa bağlı olarak basınç kaybı.

	Çözüm I	Çözüm II	Çözüm III
Basınç oranı, P_i/P_0	1,088	1,074	1,045
Sürtünme faktörü, f	163,49	225,39	240,83
Viskoz basınç kaybı, ΔP_v (Pa)	8786,54	7351,12	4538,36
Toplam basınç kaybı, ΔP_t (Pa)	8997	7529,1	4608,6

Yakınsaklık açısı arttıkça mikrokanallardaki en büyük genişlikler sırasıyla Çözüm I, Çözüm II ve Çözüm III için 1680, 3077 ve 4480 µm olmuş ve çapın artmasıyla birlikte basınç kayıpları azalmıştır.

Hidrolik çap ile basınç kaybı değişimleri için çalışmalar yapılırken ise, aynı uzunluk, aynı yakınsaklık açısı ve derinlik değerleri kullanılmıştır. Nitrojen gazının giriş hızı Çözüm IV, Çözüm V ve Çözüm VI için sırasıyla 4,621109 m/s, 3,661299 m/s ve 3,00614 m/s'dir.

Verilen parametrelere formüllere uygulanması sonucunda 118 µm hidrolik çapta (Çözüm IV) giriş basıncı ve çıkış basıncı oranının (P_i/P_0) 1,088 olduğunu görüyoruz. Hidrolik çap 147 µm olarak ayarlandığında 118 µm hidrolik çapta göre (Çözüm V) %1,29 azalarak 1,074 değerine, 177 µm olarak ayarlandığında (Çözüm VI) %3,95 azalarak 1,045 değerine düşmüştür.

Sürtünme faktörü (f) Çözüm IV için 163,49 iken, Çözüm V için %37,86 artarak 225,39 olurken, Çözüm III için %47,31 artarak 240,83 değerine ulaşmıştır.

Viskoz basınç kaybı (ΔP_v) ise Çözüm IV için 8786,54'tür. Çözüm V için bu değer %16,34 azalarak 7351,12 olurken, Çözüm VI için %48,35 azalarak 4538,36 olarak ölçülmüştür.

Hidrolik çap değişimine göre basınç kaybına bakılırsa, hidrolik çap arttıkça basınç kaybının azaldığını görebiliriz. Çözüm IV için hidrolik çap 118 µm olarak ayarlandığında basınç kaybı 8997 Pa iken, Çözüm V için 147 µm olarak alındığında %16,32 azalarak 7529,1 Pa olmuştur. Hidrolik çap Çözüm VI için 177 µm olarak alındığında ise basınç kaybının Çözüm IV'e göre %48,68 azalarak 4608,4 Pa değerine düştüğü görülebilir.

Hidrolik çap arttırdıkça Reynolds sayısı artar. Reynolds sayısı artınca sürtünme katsayısı düşer ve dolayısıyla basınç kaybı azalır.

4. Kaynaklar

1. Dolu, C., Mikrokanal Isıl Performansı Üzerinde Kayma Akışı Modeli Hassasiyeti Etkilerinin Araştırılması. 2007, Fen Bilimleri Enstitüsü.
2. Parlak, N., Gur, M., Engin, T. ve Parlak, Z. , Mikroborularda Su Akışının Termodinamik Analizi.
3. Hanoon, H.A. and A.K. Alshara, Performance Characteristics of Parallel Slip Flow Microchannel Heat Exchanger. Basrah Journal for Engineering Science, 2011. 11(1): p. 16-30.
4. Sobhan, C. and G. Peterson, A review of convective heat transfer in microchannels. Mühendis ve Makina, 2006. 557: p. 10-67.
5. Chen, C., S. Lee, and J. Sheu, Numerical analysis of gas flow in microchannels. Numerical Heat Transfer, Part A Applications, 1998. 33(7): p. 749-762.
6. Rapp, B.E., Microfluidics: Modeling, Mechanics and Mathematics. 2016: William Andrew.
7. Anderson, J.D., Governing equations of fluid dynamics, in Computational fluid dynamics. 1992, Springer. p. 15-51.
8. Pawar, R., Patil, R., Patil, D., Rahegaonkar, A., Pardeshi, S., and Patange, A. (2022). Development of a Model for Predicting Brake Friction Lining Thickness and Brake Temperature. International Journal of Prognostics and Health Management, 13(1).
9. Mingozzi, F., Verdin, P. G., Gucci, L., and Tirovic, M. (2022). CFD and experimental study of heat dissipation from an anti-coning, pin vented, inboard mounted brake disc. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 09544070221126216.
10. Alavi, S. H., and Eipakchi, H. (2019). Analytical method for free-damped vibration analysis of viscoelastic shear deformable annular plates made of functionally graded materials. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 47(4), 497-519.
11. Cravero, C., and Marsano, D. (2022). Flow and thermal analysis of a racing car braking system. Energies, 15(8), 2934.
12. Yun, C. M., Cho, G. J., Kim, H., and Jung, H. (2022). A Study on the Train Brake Position-Based Control Method for Regenerative Inverters. Energies, 15(18), 6572.
13. Öztürk, E., Özcan ,O., Aslan, E., ve Kaya, K., "Pürüzlü Silindir Etrafındaki Türbülanslı Akışın Sayısal Olarak İncelenmesi," Presented At The 4. Uluslararası Erciyes Bilimsel Araştırmalar Kongresi, Kayseri, 2020.
14. Belhocine, A., and Abdullah, O. I. (2022). Finite element analysis (FEA) of frictional contact phenomenon on vehicle braking system. Mechanics based design of structures and machines, 50(9), 2961-2996.
15. Preda, C., Bleotu, R. M., and Pinca-Bretotean, C. (2022, February). Study and thermal analysis of vanes shape design

for brake disc in automotive industry. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 2212, No. 1, p. 012025). IOP Publishing.

16. Kaya, K., and Özcan, O. (2021). An approximate analytic solution of uniform laminar flow in a circular open channel. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 43(6), 1-9.
17. Wang, Y., Xu, R., and Zhang, K. (2022). A car-following model for mixed traffic flows in intelligent connected vehicle environment considering driver response characteristics. Sustainability, 14(17), 11010.
18. Kuraishi, T., Terahara, T., Takizawa, K., and Tezduyar, T. E. (2022). Computational flow analysis with boundary layer and contact representation: I. Tire aerodynamics with road contact. Journal of Mechanics, 38, 77-87.
19. Putra, M. R. A., Nizam, M., Tjahjana, D. D. D. P., Arifin, Z., Lenggana, B. W., and Inayati, I. (2022). Analysis of Heat Generation on Unipolar Axial Eddy Current Brake Disc and Its Effect on Braking Performance. World Electric Vehicle Journal, 13(10), 180.