İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI GEOMETRİLERDE GÖZENEKLİ ORTAM İÇEREN BİR KANALDA YÜKSEK VİSKOZİTELİ YAVAŞ AKIŞ İÇİN ARAYÜZEY HIZI VE HIZ ALANLARININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK TESPİTİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hasan BAŞCI

Anabilim Dalı : Uçak ve Uzay Mühendisliği

Programı : Uçak ve Uzay Mühendisliği

OCAK 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI GEOMETRİLERDE GÖZENEKLİ ORTAM İÇEREN BİR KANALDA YÜKSEK VİSKOZİTELİ YAVAŞ AKIŞ İÇİN ARAYÜZEY HIZI VE HIZ ALANLARININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK TESPİTİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hasan BAŞCI
(511071145)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : **20 Aralık 2010**
Tezin Savunulduğu Tarih : **26 Ocak 2011**

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Hayri ACAR (İTÜ)**
Eş Danışman : **Prof. Dr. A. Cihat BAYTAŞ (İTÜ)**
Diğer Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. N. L. Okşan ÇETİNER-YILDIRIM (İTÜ)**
Doç. Dr. Mustafa ÖZDEMİR (İTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Yalçın URALCAN (İTÜ)

OCAK 2011

Aileme,

ÖNSÖZ

Öncelikle bu çalışmanın gerçekleştirilmesi sürecinde yol göstericilikleriyle bana her türlü desteği sağlayan danışmanlarım Yrd. Doç. Dr. Hayri Acar ve Prof. Dr. A. Cihat Baytaş'a tüm yardımları için teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalışmanın gerçekleştirilmesi için hiç bir yardımı esirgemeyen Doç. Dr. N. L. Okşan Çetiner Yıldırım ve Yrd. Doç. Dr. Duygu Erdem'e değerli destekleri için teşekkürü borç bilirim.

Trisonik Araştırma Laboratuvarı'ndaki tüm çalışanlara ve arkadaşlara da ayrıca herşey için teşekkür ederim. Oluşturulan arkadaşlık ortamı ve birliktelik olmasaydı her şey daha zor olurdu. Bu yüzden tüm dostlara çok teşekkürler.

Son olarak ise yanımda olduklarını her zaman hissettiğim aileme en derin teşekkürlerimi sunuyorum. Annem, babam ve kardeşimin sonsuz sevgilerini karşılaştığım her zorlukta yanımda hissettim. Ben de hepsine sevgilerimi sunmayı borç bilirim.

Kasım 2010 Hasan BAŞCI

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KISALTMALAR ..... **ix**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xiii**
ÖZET ..... **xv**
SUMMARY ..... **xvii**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Gözenekli Ortamlarla İlgili Bazı Temel Tanımlar 1
1.2 Tezin Amacı 2
1.3 Konuyla İlgili Daha Önceden Yapılmış Önemli Bazı Çalışmalar 5
2. MATEMATİK MODEL **9**
2.1 Matematik Modelin Oluşturulması ve Arayüz Sınır Şartının Belirlenmesi 9
3. DENEYSEL ÇALIŞMA **11**
3.1 Deney Düzeneğinin Tanıtılması 11
3.2 DPIV Hız Ölçüm Yönteminin Çalışma Prensibi 14
3.3 Deneyin Yapılışı 16
3.4 Deney Verilerinin İşlenmesi 19
4. SAYISAL ÇALIŞMA **25**
4.1 Deneysel Çalışmada Kullanılan Kanalın Sayısal Çözümü 25
4.1.1 Gambit ile modelleme ve ızgara yapılarının oluşturulması 25
4.1.2 Fluent yazılımı ile sayısal çözümleme 26
4.2 Analitik Geçirgenlik Hesabında Yardımcı Olacak Sayısal Çözüm 27
4.2.1 Gambit ile modelleme ve ızgara yapılarının oluşturulması 27
4.2.2 Fluent yazılımı ile sayısal çözümleme 28
5. GEÇİRGENLİĞİ VEREN ANALİTİK BİR YÖNTEMİN TESPİTİ **31**
6. SONUÇLAR **39**
6.1 Analitik Çalışma Sonuçları 39
6.2 Sayısal ve Deneysel Sonuçlar 43
6.3 Yorum 53
KAYNAKLAR **55**

KISALTMALAR

PIV : Particle Image Velocimetry
DPIV : Digital Particle Image Velocimetry
CCD : Charged Couple Device
FFT : Fast Fourier Transform
SIMPLE : Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations
ε : Gözeneklilik
Φ : Katı hakim yüzdesi
k : Geçirgenlik
V_a : Akışkan ya da boşluk hacmi
V_t : Toplam hacim
u_i : Arayüz hızı
u_d : Gözenekli ortam ortalama hızı
u_{max} : Serbest akış bölgesi maksimum hızı
μ : Dinamik viskozite
ΔP : Basınç düşümü
$\langle U \rangle$: Ortalama hız
α : Kayma katsayısı
D : Gözenekli ortam çubuk referans uzunluğu
S : Çubuk merkezleri arası uzunluk
u_b : Birim hücre sınır hızı
δ : Birim hücre yarı yüksekliği
Q : Hacimsel Debi

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 6.1 : Kullanılan geometriler için gözeneklilik ve geçirgenlik değerleri. 39
Çizelge 6.2 : Farklı geometrilere göre elde edilen büyüklüklerin karşılaştırılması. ...52

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Deneysel ve sayısal olarak incelenecek kanalın şematik gösterimi. 2
Şekil 1.2 : Kullanılan gözenekli ortam geometrileri. 3
Şekil 3.1 : Deney düzeneğinin şematik gösterimi. 11
Şekil 3.2 : İncelenen gözenekli ortam geometrileri. 12
Şekil 3.3 : Gözenekli ortamın montajdan önceki ve sonraki hali. 12
Şekil 3.4 : Gözenekli ortamın kanala yerleştirilmiş hali. 13
Şekil 3.5 : Deney düzeneği. 14
Şekil 3.6 : DPIV sistemi ölçüm prensiplerinin şematik gösterimi. 16
Şekil 3.7 : DPIV sisteminin ölçüm yapılacak bölgede konumlandırılması. 17
Şekil 3.8 : Deneyler sırasında alınmış örnek DPIV görüntüsü. 19
Şekil 3.9 : Örnek çapraz-korelasyon sonucu.....20
Şekil 3.10 : Örnek maskeleme sonucu.....21
Şekil 3.11 : Belli bir büyüklük aralığı dışında kalan vektörlerin elenmesi. 22
Şekil 3.12 : Elenen vektörlerin yerine ortalama vektörlerin yerleştirilmesi 23
Şekil 3.13 : Deney setindeki verilerin zaman ortalaması. 24
Şekil 4.1 : Gambit'te modellenen kanal geometrisi. 26
Şekil 4.2 : Izgara yapıları. 26
Şekil 4.3 : Gambitte modellenen kanal geometrisi. 28
Şekil 4.4 : Örnek Izgara Yapısı. 28
Şekil 5.1 : Her üç geometri için birim hücreler.....31
Şekil 5.2 : Farklı gözeneklilik değerleri için ub hız profilleri: (a) ε=0.9, (b) ε=0.87, (c) ε=0.82, (d) ε=0.78, (e) ε=0.73. 33
Şekil 6.1 : Denklem 5.17'nin diğer metodlarla karşılaştırılması. 40
Şekil 6.2 : Denklem 5.21'in diğer metodlarla karşılaştırılması. 41
Şekil 6.3 : Denklem 5.25 için geçirgenliğin gözeneklilikle değişimi. 42
Şekil 6.4 : Geçirgenliğin çubuk geometrisine göre değişimi. 43
Şekil 6.5 : Boş kanaldaki hız profilinin Poiseuille profili ile karşılaştırılması. 44
Şekil 6.6 : Dairesel geometri için farklı y konumlarında duvar etkilerinin kontrolü. 45
Şekil 6.7 : Kare geometri için farklı y konumlarında duvar etkilerinin kontrolü. 45
Şekil 6.8 : 45^o döndürülmüş kare geometri için farklı y konumlarında duvar etkilerinin kontrolü. 46
Şekil 6.9 : Dairesel geometri vektör haritaları (a)deneysel (b)sayısal.....47
Şekil 6.10 : Kare geometri vektör haritaları (a)deneysel (b)sayısal. 47
Şekil 6.11 : 45^o döndürülmüş kare geometri vektör haritaları (a)deneysel (b)sayısal. 47
Şekil 6.12 : Dairesel geometride sayısal ve deneysel hız profilleri. 48
Şekil 6.13 : Kare geometride sayısal ve deneysel hız profilleri. 49
Şekil 6.14 : 45^o döndürülmüş kare geometride sayısal ve deneysel hız profilleri. 49
Şekil 6.15 : Farklı geometrilerde hız profillerini karşılaştırılması. 50
Şekil 6.16 : Farklı geometrilerde arayüz bölgesi hız profillerinin karşılaştırılması. 51

FARKLI GEOMETRİLERDE GÖZENEKLİ ORTAM İÇEREN BİR KANALDA YÜKSEK VİSKOZİTELİ YAVAŞ AKIŞ İÇİN ARAYÜZEY HIZI VE HIZ ALANLARININ DNEYSEL VE SAYISAL OLARAK TESPİTİ

ÖZET

Gözenekli ortamlarda akış ve ısı geçişi olayları günümüzde makine, uçak, uzay, kimya, jeofizik, inşaat ve nükleer gibi pekçok disiplinin ilgisini çeken bir çalışma konusu olarak mühendislik araştırmalarında önemli bir yer tutmaktadır. Konuyu önemli kılan başlıca etken pekçok bilimsel ve teknolojik uygulamada kullanılan gözenekli ortam sistemleri hakkında hala kesin olarak açıklığa kavuşturulamayan noktaların bulunmasıdır.

Yapılan bu çalışmada, bir kısmı gözenekli ortam içeren bir kanal içindeki akış olayı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmada, gözenekli ortam pleksiglas çubukların bir matris halinde dizilmesi ile oluşturulmuştur. Dairesel, kare ve 45^o döndürülmüş kare olmak üzere üç farklı çubuk geometrisi kullanılarak üç farklı kanal oluşturulmuş ve geometrinin hız profiline etkileri gözlemlenmiştir. Özellikle gözenekli ortam ve serbest akış bölgesi sınırını oluşturan arayüz hattındaki hızların geometri ile değişimi, çalışmanın en temel konusunu oluşturmuştur. Hız alanının DPIV sistemi kullanılarak elde edildiği deneyler ayrıca bir de sayısal çalışmayla desteklenmiştir. Sayısal çalışma, kanalın eş ölçekte üç boyutlu bir modelinin oluşturulması, bu model üzerinde ızgara yapısının oluşturulması ve çözüm basamaklarını kapsamaktadır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, sayısal ve deneysel çalışmaların sonuçlarının çok büyük bir uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Çalışma sonucunda hız profillerinin ve arayüz hızlarının değişen ortam geometrisi ile ne şekilde değiştiği iyi bir şekilde ortaya konulmuştur.

Çalışmanın diğer bir amacı da analitik bir geçirgenlik hesabının oluşturulmasını içermektedir. Geçirgenliğin gözenekli ortam çalışmaları için oldukça önemli bir değişken olması bu çabayı anlamlı kılmaktadır. Çalışmanın bu kısmında inceleme konusu olan dairesel, kare ve 45^o döndürülmüş kare geometride çubuklardan oluşan gözenekli ortamlar için analitik geçirgenlik hesapları başarılı bir şekilde elde edilmiştir. Dairesel ve kare çubuklardan oluşan gözenekli ortamlar için elde edilen geçirgenlik bağıntıları, daha önceden kaynaklara girmiş diğer çalışmalarla karşılaştırılmış ve güvenilir sonuçlar sağladıkları görülmüştür. 45^o döndürülmüş kare çubuklarla oluşturulmuş gözenekli ortam için geçirgenliği veren bir bağıntı kaynak araştırmasında bulunamamıştır. Bu nedenle, bu çalışmada ortaya konan bağıntı çalışmanın katkısı olarak değerlendirilebilir.

DETERMINATION OF INTERFACE VELOCITIES AND VELOCITY FIELDS FOR HIGHLY VISCOUS SLOW FLOW IN A CHANNEL THAT INCLUDES VARIOUS POROUS MEDIA GEOMETRIES

SUMMARY

The fluid flow and heat transfer phenomena within porous media is accounted as a significant subject among engineering researches which attracts attention of many disciplines like mechanical, aeronautics, astronautics, chemical, geophysics, civil and nuclear engineering. The chief factor of importance of the subject is that there are still unknown points about porous media systems which have wide area of use in many scientific and technological applications.

This study covers the experimental and computational investigation of fluid flow in a channel which partially includes a porous zone. In the experimental part of the study, the porous media is produced using a matrix-like array of plexiglass rods. The study includes three different geometries of porous media which are formed using rods with circular, square and 45^o rotated square cross sections. The effect of different geometries on velocity profile is observed at the study. Especially the effect of 3 different geometries on the behaviour of the velocity magnitudes on interface line, which is the boundary between the porous media and free flow region, is aimed as the most significant investigation of the study. During the experiments DPIV system is used for obtaining the velocity field and these results are also supported by a computational analysis. The computational part of the study includes the design stage of an equally sized 3-D model of the experimental channel, the meshing stage of the channel and the solution stage. At the end of the study a good agreement between experimental and computational results is observed. By means of the results of the study the effect of the geometry on the behaviour of the velocity profiles and interface velocities are clearly figured out.

The second purpose of the study covers the proposal of an analytical method for the determination of permeability. The importance of the permeability for porous media studies makes this effort meaningfull. In this part of the study, analytical permeability determination methods are successfully obtained for all three investigated geometries which are composed of rods with circular, square and 45^o rotated square cross sections. The analytical expressions obtained for geometries with circular and square cross sectioned rods are compared with former studies found in the literature search and a reliable agreement is observed. An analytical expression which calculates the permeability of 45^o rotated square rods is not discovered during literature search. For this reason the expression obtained at this current study can be evaluated as contribution of the study.

1. GİRİŞ

Gözenekli ortamlarda akış ve ısı geçişi olayları, mühendislik uygulamaları ve bilimsel incelemelerde her geçen gün daha fazla önem kazanan bir çalışma alanı olarak araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Bu duruma başlıca sebep olarak gözenekli ortam uygulamalarının, pek çok farklı disipline ait farklı konuda kendine yer bulmuş olması gösterilebilir. Gözenekli ortamların kullanıldığı belli başlı uygulama alanlarına ısı değiştiriciler, süzgeç sistemleri, ısıl yalıtım uygulamaları, yakıt hücreleri, uçak kanatlarındaki sınır tabaka emme uygulamaları, hava ve uzay araçlarında kullanılan ısı kalkanı çalışmaları, nükleer reaktör çekirdekleri, petrolün yeraltından çıkarılması, jeotermal enerji kaynaklarının kullanılması, kanın doku içinde akışı ve jeofiziksel akışkanlar mekaniği örnek olarak gösterilebilir. Böyle geniş bir uygulama alanına sahip olması nedeniyle gözenekli ortamlarda akışkan akışı ve ısı geçişi problemleri makina, kimya, nükleer, jeotermal, uçak, uzay gibi pek çok mühendislik disiplininin ilgisini çekmiştir. Gözenekli ortam problemleri ile bu derece önem arz eden bilimsel ve teknolojik uygulamalarda karşılaşıldığı için bu konu iyi derecede anlaşılması ve bilinmesi gereken bir konu haline gelmiştir.

1.1 Gözenekli Ortamlarla İlgili Bazı Temel Tanımlar

Gözenkli ortamlarda akışkan akışı ve ısı geçişi olaylarını etkileyen parametreleri tanımlamadan önce, gözenekli ortamın genel bir açıklamasının yapılması gereklidir. Dullien (1992) tarafından yapılan çalışmaya göre, bir malzemenin gözenekli ortam olarak nitelendirilebilmesi için iki temel özelliğe sahip olması gerekmektedir. Bunlardan ilki, malzemenin içerisinde toplam boyuta oranla çok küçük olan ve birbiri ile bağlantısı bulunan boşluklar bulunmasıdır. Malzemenin gözenekli ortam olarak nitelendirilebilmesi için sağlaması zorunlu olan ikinci şart ise, akışkanın malzemenin bir ucundan girdikten sonar diğer ucundan çıkabilmesidir. Gözenekli ortamlar en genel şekliyle doğal ve yapay gözenekli ortamlar olarak iki temel gruba ayrılabilir. Doğal gözenekli ortam olaylarına, nehir yatakları üzerindeki akış ve kanın akciğer dokularındaki mikroskobik ölçekteki akışı örnek verilebilirken, yapay

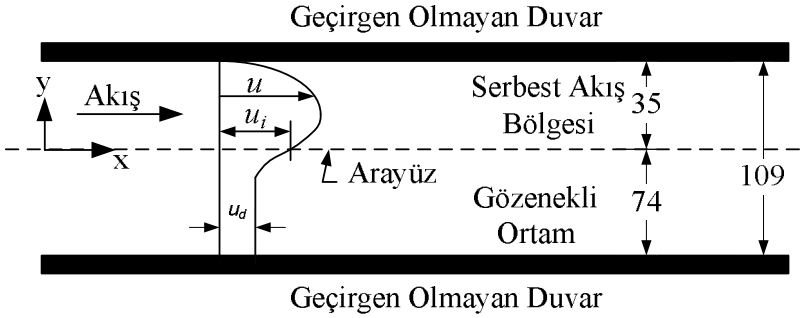
gözenekli ortamlara nükleer yakıt çubukları, süzgeçler, uçak kanatlarındaki sınır tabaka emme sistemleri ve yalıtım malzemeleri örnek olabilir(Baytaş, 2006). Gözenekli ortamlarda akış olaylarını etkileyen en temel iki değişken gözeneklilik ve geçirgenliktir.Gözeneklilik malzeme içindeki toplam boşluk hacminin toplam malzeme hacmine oranı şeklinde, aşağıda denklem **(1.1)**'de görüldüğü gibi hesaplanır. Sadece malzemenin geometrisine bağlı bir özelliktir ve ε ile ifade edilir.

$$\varepsilon = \frac{V_a}{V_t} \qquad (\mathbf{1.1})$$

İfadede V_a akışkanın doldurduğu boşluk hacmini belirtirken V_t toplam hacimdir. Geçirgenlik ise temel olarak gözenekli ortamın kütle geçiş yeteneği olarak düşünülebilir. Gözenekli ortamın akış iltekenliğinin yani malzemenin içinden akışkanın geçme kolaylığının bir ölçüsüdür. Geçirgenlik özelliğinin büyüklüğü akışkana değil gözenekli malzemeye bağlı olarak değişir. Geçirgenlik k ile gösterilmektedir ve birimi m^2'dir.

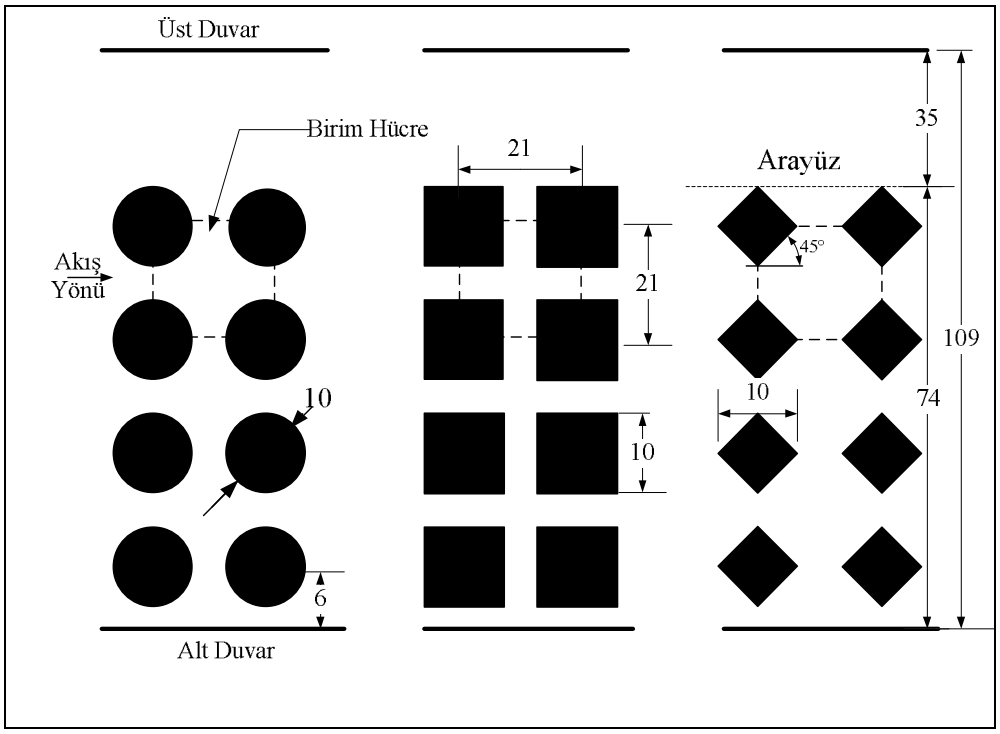
1.2 Tezin Amacı

Gözenekli ortamlarda akışkan akışı ve ısı transferi olaylarının sahip olduğu geniş uygulama alanı nedeniyle bugüne kadar bu konuda çok sayıda çalışma yapılmıştır. Fakat tüm bu çalışmalara rağmen konuyla ilgili hala aydınlığa kavuşturulamayan noktalar mevcuttur. Bu tezde amaçlanan, Şekil 1.1'de gösterildiği gibi, bir kısmı gözenekli ortam bir kısmı ise serbest akış bölgesi içeren bir kanalda; gözenekli ortam ve serbest akış bölgesinin arasındaki sınırı oluşturan arayüzdeki hız değerlerinin tespiti ve bu hız değerlerinin değişen gözenekli ortam geometrisi ile ne şekilde değiştiğinin anlaşılmasıdır.



Şekil 1.1 : Deneysel ve sayısal olarak incelenecek kanalın şematik gösterimi

Çalışma deneysel ve sayısal olmak üzere iki ayrı basamağı kapsamaktadır. Deneysel kısımda gözenekli ortam bir matris halinde dizilmiş çubuklar kullanılarak üretilmiştir. Şekil 1.2'de görüldüğü gibi dairesel, kare ve 45^o döndürülmüş kare olmak üzere üç farklı kesite sahip çubuklar kullanılarak farklı geometrilere sahip üç farklı gözenekli ortam elde edilmiştir.



Şekil 1.2 : Kullanılan gözenekli ortam geometrileri

Daha sonra bu çubuk demetlerinin arasında oluşan hız alanının tespiti DPIV (Digital Particle Image Velocimetry) sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlerde amaçlanan, gözenekli ortamı oluşturan çubukların geometrisi değişince arayüz hattındaki hızın nasıl değiştiğinin bulunmasıdır. Çalışmanın sayısal kısmı ise, kanalın aynı boyutlarda sayısal bir modellemesinin ve daha sonra çözümlemesinin yapılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve sayısal verilerin elde edilmesinin ardından ise iki yöntemle elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve çözümün güvenilirliği kontrol edilmiştir. Birbirini destekleyen bu iki çözüm yöntemi yardımıyla da arayüz hattındaki büyüklükler hesaplanmış ve çalışmanın temel hedefi olarak, yukarıda da bahsedildiği gibi, arayüz hızlarının değişen geometri ile nasıl değiştiği araştırılmıştır. Arayüz bölgesindeki hız dağılımının bilimsel ve teknolojik açıdan önemi; ısı ve kütle geçişi prensipleriyle gelişen olaylarda arayüz bölgesinin taşıdığı önemden kaynaklanmaktadır. Gerek bilimsel ve teknolojik çalışmalara

gerekse de doğada karşılaşılan olaylara bakıldığında bu konuya dair pek çok pratik örnek vermek mümkün olmaktadır. Mesela bir uçak kanadı üzerinde gözenekli ortam yardımıyla akım ayrılmalarını engellemeyi amaçlayan bir uygulama düşünülürse, arayüz hızının olaya etkisi daha rahat anlaşılabilir. Bilindiği gibi kanat üzerinde akım ayrılmasına yol açan olay, gittikçe kalınlaşan sınır tabaka nedeniyle kanat yüzeyindeki bir noktada kanat yüzeyine dik doğrultudaki $\partial u/\partial y$ hız gradyeninin sıfır değerini almasıdır. Gözenekli ortam kullanımıyla kanat yüzeyi üzerinde bir arayüz hızının oluşturulması ve bu arayüz hızı yardımıyla ayrılmanın geciktirilmesi veya önlenmesi mümkündür. Arayüz hızının önem kazandığı bir diğer çalışma disiplini ise jeolojidir. Toprak erozyonu gözönüne alındığında; zemin içerisindeki boşluklar nedeniyle bir gözenekli ortam gibi davranırken, rüzgar toprak üzerinde bir serbest akım bölgesi oluşturmaktadır. Toprak yüzeyi üzerinde oluşan arayüz hızı ise kaymalara neden olmaktadır. Arayüz hızının etkisi ısı makinelerinin tasarımında da önemlidir. Buna örnek olarak boru demeti şeklinde tasarlanmış bir ısı değiştiricisi düşünülebilir. Böyle bir sistemde taşınım ile ısı geçişinin en önemli miktarının boru demetinin serbest akımla komşu olduğu açık yüzeylerde gerçekleşeceği belirgindir. Arayüz hızının kullanıldığı uygulamalara bir örnek de tıp alanındandır. Göz lenslerinin gereken rahatlıkta kayma hareketi yapabilmesi lens ve göz dokusu arasında kalan sıvı bölgeye bağlıdır ve bu bölgede hareket göz dokusu üzerinde oluşan arayüz hızı ile gerçekleşmektedir. Bunun yanısıra inşaat mühendisliği disiplininde kıyı ve liman inşaatları alanında da arayüz hızları önem kazanmaktadır. Bir köprü inşaatı düşünüldüğünde köprüyü taşıyan kolonların karaya basması durumunda zemin üzerinde hız sıfır kabul edilebilecekken, kolonların bir akarsu zeminine basması durumunda zemindeki hız sıfır olarak kabul edilemeyecektir ve bu duruma uygun bir tasarım gerekecektir. Tüm bu örnekleri günlük hayattan veya bilimsel ve teknolojik uygulamalardan başka pek çok örnekle çoğaltmak mümkündür. İşte bu yüzden arayüz hızının saptanması ve farklı geometrilerde nasıl bir davranış izlediğinin belirlenmesi çalışmada asıl amaç olarak yerini almıştır.

Çalışma, arayüz hattındaki hız ve hıza bağlı değişkenlerin tespiti ve bunların değişen geometri ile değişiminin incelenmesi haricinde, ulaşılması hedeflenen diğer bir amaç olarak, bir de analitik geçirgenlik hesabı içermektedir. Bu hesapta da çalışmanın diğer kısmında olduğu gibi, gözenekli ortamı modellemekte kullanılan çubukların geometrilerinin değişiminin ortaya çıkaracağı etkiler gözlemlenmiştir. Bunu yapmak

için bahsedilen analitik geçirgenlik hesabı; dairesel, kare ve 45^o döndürülmüş kare olmak üzere, çalışmada gözenekli ortamı modellemek için kullanılan tüm çubuk geometrileri için ayrı ayrı yapılmış ve daha farklı geometrilere uyarlanması da mümkün olan analitik bir çözüm yöntemi ortaya koyulmuştur. Kare ve 45^o döndürülmüş kare çubuklardan oluşan gözenekli ortamların analitik geçirgenlik çözümüne, yapılan tüm araştırmalara rağmen kaynaklarda rastlanmamıştır. Bu çalışmada bu çözümlerin yapılmış olması çalışmanın sağladığı katkılardan biri olarak görülebilir.

1.3 Konuyla İlgili Daha Önceden Yapılmış Önemli Bazı Çalışmalar

Gözenekli ortamlar üzerine hız alanının ve arayüz hızlarının saptanmasına yönelik yapılmış olan çalışmaların temeli Beavers ve Joseph (1967) tarafından yapılmış olan deneye dayandırılabilir. Arayüzdeki sınır koşullarının tespit edilmesinin hedeflendiği bu çalışmada, geçirgenliği olmayan bir üst yüzey ve arayüz olarak da geçirgen bir alt yüzeye sahip olan bir kanal yapısı kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada arayüz sınır koşulu, α ile ifade edilen bir boyutsuz kayma katsayısına bağlı olarak bulunmuştur.

Gupte ve Advani (1997) bir serbest akışkan bölge ve bir gözenekli bölge içeren kanallarında gerçekleştirdikleri deneylerinde Lazer Doppler Anemometresi kullanarak geçirgen yüzey yakınındaki akış yapısını incelemişlerdir. Bu çalışmada geçirgenliğin, akışkan vizkozitesinin, akış debisinin ve kanalın alt ve üst yüzeyleri arasında kalan boşluğun kanal boyunca hız profiline ve arayüz hızına üzeri etkileri üzerinde durulmuştur.

Goharzadeh ve diğ. (2005) yaptıkları çalışmada PIV (Particle Image Velocimetry) ve kırılma indisi eşleme yöntemlerini kullanarak serbest akışkan gözenekli ortam arayüzeyindeki akış yapısını incelemeyi amaçlamışlardır. Yaptıkları deneyde gözenekli ortamı modellemek için farklı çaplara sahip saydam cam boncuklar kullanmışlardır ve değişik gözeneklilik ve geçirgenlik değerleri için hız profilini ve arayüzey hızını elde etmişlerdir.

Shams ve diğ. (2003) yaptıkları deneysel çalışmada; dairesel çubukların akrilik bir disk üzerine dikey olarak eşit aralıklarla yerleştirilmesi yoluyla elde ettikleri

gözenekli ortamda, gözenekli ortam sınırındaki akış alanını PIV tekniği kullanarak elde etmişlerdir.

Tachie ve diğ. (2003) dairesel, kare ve üçgen kesitli çubuklardan oluşan gözenekli ortamlarda farklı gözeneklilik değerleri için PIV sistemi kullanımıyla hız alanını elde etmişler; elde edilen bu hız verileri arcılığıyla ise vorteks oluşumunu ve bu oluşumun çubuk geometrisi ve gözeneklilik ile ilişkisini incelemişlerdir.

Tachie ve diğ. (2004) gerçekleştirdikleri bir başka deneysel çalışmada ise, farklı gözeneklilik değerleri için, çubukların dairesel bir diskin yan yüzeyleri üzerine matris halinde dizilmesi ile elde edilmiş bir gözenekli ortam üzerinden dairesel Couette akışını PIV sistemi kullanarak analiz etmişlerdir.

Agelinchaab ve diğ. (2006) çalışmalarını dikdörtgen kesitli bir kanalın alt yüzeyine dikey olarak yerleştirdikleri çubuklardan elde edilen gözenekli ortam aracılığıyla gerçekleştirmişlerdir. PIV sistemi kullanarak gerçekleştirdikleri deneysel çalışmalarında, geçirgenliğin, gözenekliliğin ve gözenekli ortamı oluşturan silindir çubukların yüksekliğinin arayüz hızı ve serbest akışkan bölgesinden gözenekli ortamın içine olan kütle geçiş miktarı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir.

Gözenekli ortamlarda geçirgenlik üzerine yapılmış çalışmaların temeli, geçirgenliğin tanımı niteliğinde olan Darcy yasasına kadar dayanır. Nield ve Bejan (2006) tarafından yapılan çalışmayla, geçirgenliğin gözenekli ortamın akış iletkenliğinin bir ölçüsü olduğu ve Darcy yasasıyla tanımlandığı, ayrıca akışkan özelliklerine değil gözenekli ortam geometrisine bağlı olduğu ortaya konulmuştur.

Ergün (1952) gerçekleştirdiği deneysel çalışma ile geçirgenliğin ampirik olarak hesaplanabilmesini sağlayan bağıntısını ortaya koymuştur. Bu bağıntı, daha çok verinin kullanılması yoluyla Macdonald ve diğ. (1979) tarafından kontrol edilmiş ve doğrulanmıştır.

Sangani ve Acrivos (1982) geniş bir gözeneklilik aralığında geçirgenliğin değişimini analitik ve sayısal olarak incelemişler, düşük hızlı akışa dik olarak yerleştirilmiş periyodik diziler halindeki silindirler olarak tanımladıkları gözenekli ortamda, ortalama hızın silindirler üzerindeki birim uzunluk başına ortaya çıkardığı kuvvetin belirlenmesinden yola çıkmışlardır.

Jackson ve James (1986) diziler halindeki silindir çubuklarla modellenen gözenekli ortamda, çubukların akışa dik ve paralel olduğu durumlar için geçirgenliği birim

hücre yaklaşımıyla hesaplamaya çalışmıştır. Gerçekleştirilen çalışmada, silindir çaplarının ve gözenekliliğin değişimine göre geçirgenliğin davranışı incelenmiştir.

Tamayol ve Bahrami (2009) tarafından gerçekleştirilen analitik çalışmada da birim hücre yaklaşmı kullanılmış ve geçirgenlik, geniş bir gözeneklilik aralığında akışın gözenekli ortama dik ve paralel olduğu durumlar için elde edilmiştir.

2. MATEMATİK MODEL

Bir kısmı gözenekli ortam içeren bir kanal düşünüldüğünde, gözenekli ortam bölgesi ile serbest akış bölgesini ayıran arayüz hattındaki ani hız artışı dikkat çeken bir unsur olarak ortaya çıkmaktadır. Arayüz hattındaki akış durumunun gözenekli ortam uygulama ve araştırmalarında oldukça önemli bir yer tutması ve yapılan bu çalışmada da değişen gözenekli ortam geometrisine göre arayüz hızının tespitinin amaçlanması; arayüz hattındaki bu hız gradyeninin tespiti için kullanılacak bir matematik modelin öne sürülmesini gerekli kılmıştır. Oluşturulacak olan bu matematik model tanımlanırken akış şartları daimi, tam gelişmiş, laminer ve sıkıştırılamaz olarak kabul edilmiştir.

2.1 Matematik Modelin Oluşturulması ve Arayüz Sınır Şartının Belirlenmesi

Gözenekli ortam içerisinden akışın incelenmesinde kullanılan en alışıldık bağıntı oldukça iyi tanınan ampirik Darcy bağıntısıdır (Gupte ve Advani, 1997). Darcy bağıntısına göre akış daimi, tek yönlü ve sıkıştırılamazdır. Ayrıca ifade viskoz etkileri göz önüne almaz ve Reynolds sayısının birden büyük olduğu yüksek hızlı akışlar için geçerli değildir. Kütle kuvvetlerinin ihmaliyle bu denklem aşağıda görüldüğü gibi ifade edilir;

$$\nabla\langle p\rangle = -\frac{\mu.\langle u\rangle}{k} \qquad (\mathbf{2.1})$$

İfadede μ akışkanın dinamik viskozitesini, k gözenekli ortamın geçirgenliğini, $\nabla\langle p\rangle$ akışa uygulanan basınç gradyenini, $\langle u\rangle$ gözenekli ortamdaki ortalama akış hızını temsil etmektedir. Gözenekli ortam içinde bu denklemden yararlanılırken serbest akış bölgesinde yavaş akış şartları için aşağıda verilen Stokes denklemine başvurulur;

$$\mu\frac{d^2u}{dy^2} = \frac{dp}{dx} \qquad (\mathbf{2.2})$$

Arayüz hattında hızın ve kayma gerilmelerinin sürekliliğinin sağlanabilmesi için bu iki denklemin bir arada kullanılmasının gerekliliği açıktır. Ancak görüldüğü gibi Darcy denklemi birinci derece kısmi diferansiyel denklemken Stokes denklemi ikinci dereceden kısmi diferansiyel denklemdir. Bu problemin üstesinden Brinkman denklemi ile gelinmiştir (Brinkman, 1947). Aşağıda verilen Brinkman denklemi Stokes denklemi gibi ikinci derecedendir ve arayüz hattında kayma gerilmelerinin ve hızın sürekliliğini sağlamaktadır;

$$\frac{\mu.\langle u\rangle}{k} = -\frac{dp}{dx} + \mu'\frac{d^2\langle u\rangle}{dy^2} \qquad (\mathbf{2.3})$$

Denklemdeki μ' terimi hem gözenekli ortamın geometrisine ve yapısına hem de akışkana bağlı olarak değişebilen etkin viskozitedir. Denklemin çözümü için gerekli olan arayüz sınır şartı Beavers ve Joseph (1967) tarafından aşağıdaki gibi verilmiştir;

$$\left.\frac{du}{dy}\right|_{y=0} = \frac{\alpha}{\sqrt{k}}(u_i - u_d) \qquad (\mathbf{2.4})$$

Denklemde geçen α terimi $(\mu/\mu')^{1/2}$ ifadesine karşılık gelmekte ve kayma katsayısı olarak adlandırılmaktadır. Arayüz hattını $y = 0$ seçerek $y \leq 0$ bölgesinde **(2.3)** numaralı denklemi çözmek için **(2.4)** numaralı ifadede verilen arayüz sınır şartına ek olarak aşağıdaki sınır şartlarından da faydalanılır;

$$y = 0 \Rightarrow \langle u\rangle = u_i \qquad (\mathbf{2.5})$$

$$y \to -\infty \Rightarrow \langle u\rangle = u_d \qquad (\mathbf{2.6})$$

Tüm bu sınır şartlarının kullanımıyla **(2.3)** numaralı denklem çözüldüğünde aşağıdaki ifade elde edilir (Gupte ve Advani, 1997);

$$\langle u\rangle = u_d + (u_i - u_d)exp\left[\frac{y}{\sqrt{k}(\mu'/\mu)^{1/2}}\right] \qquad (\mathbf{2.7})$$

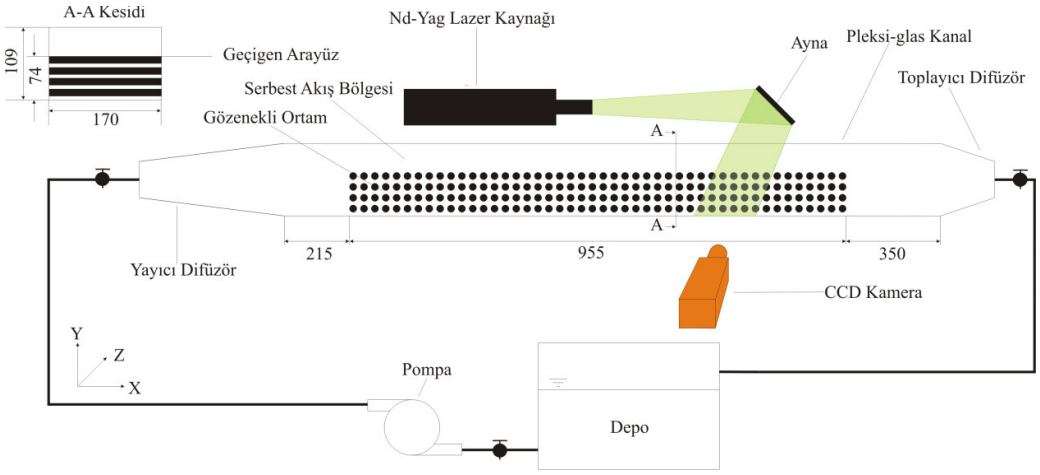
Bu aşamadan sonra yapılması gereken ifadenin y'ye göre türevinin alınması ve bu türevin y=0 değerinin elde edilmesidir (Agelinchaab ve diğ. , 2006);

$$\left.\frac{du}{dy}\right|_{y=0} = \frac{1}{(\mu'/\mu)^{1/2}\sqrt{k}}(u_i - u_d) \qquad (\mathbf{2.8})$$

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1 Deney Düzeneğinin Tanıtılması

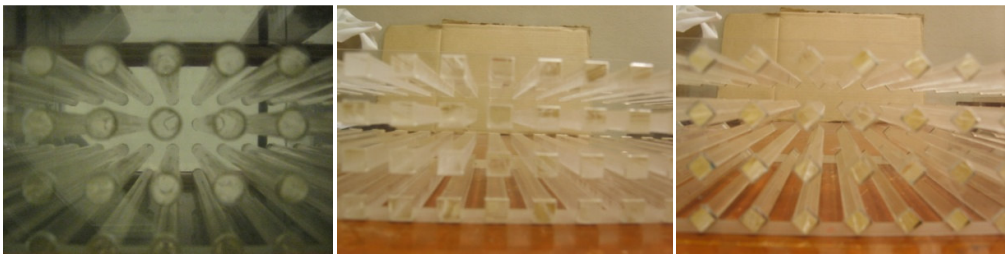
Deneysel çalışmada kullanılacak düzeneğin temel parçaları kanal, gözenekli ortam, DPIV sistemi, pompa, travers mekanizması ve yağ deposu olarak sıralanabilir. Şekil 3.1'de şematik gösterimi görülen deney düzeneği TÜBİTAK projesi desteği ile İTÜ Trisonik Araştırma Laboratuvarı imkanları kullanılarak kurulmuştur.



Şekil 3.1 : Deney düzeneğinin şematik gösterimi

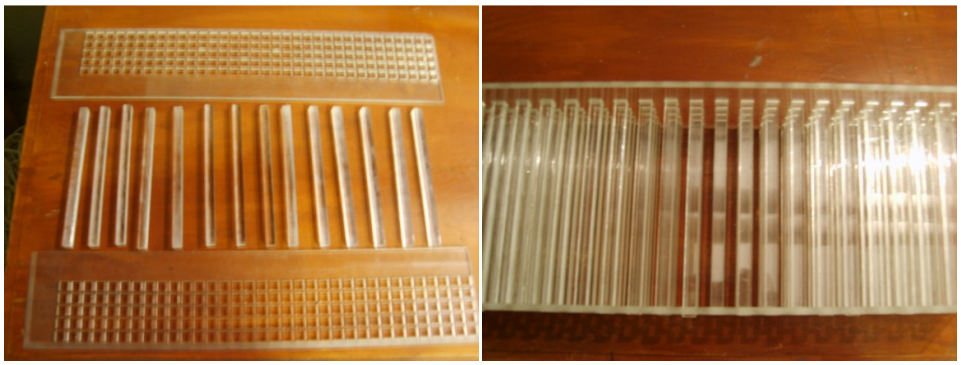
Toplam uzunluğu 2 m olan dikdörtgen kesitli eğimsiz kanal 109 mm iç yükseklik ve 170 mm iç genişliğe sahiptir. Tamamı pleksiglas malzemeden üretilmiş olan kanal, daha düzgün bir akış yapısının elde edilmesi için girişte bir yayıcı difüzör çıkışta ise bir toplayıcı difüzör içermektedir. Akış, bağlı olduğu elektronik kontrol ünitesi ile hacimsel debinin kontrolüne imkan sağlayan Tuthill Pump Group üretimi 1000 series 1014 model mekanik dişli pompa ile sağlanmıştır. Pompa 39.8 l/dk maksimum debi değeri ile düşük veya yüksek debilerde deney yapmayı mümkün kılmaktadır. Deney akışkanı olarak Viscoflex NT-22 yağı kullanılmıştır. Bu yağın kullanılma sebebi ışığı kırma indisinin kanalın ve gözenekli ortamın üretildiği malzeme olan pleksi-glas malzemenin ışığı kırma indisi olan 1.49 değeri ile hemen hemen aynı olmasıdır. Kırılma indislerinin bu şekilde eşleştirilmesi yoluyla optik bozuntuların üstesinden gelinmiş ve elde edilen DPIV görüntülerinin kalitesi önemli derecede artırılmıştır. Bu

yağın seçiminde ışığı kırma indisi dışında yoğunluk, viskozite gibi diğer fiziksel özellikler de dikkate alınarak deneyin güvenilirliği garantilenmiştir. Yağın Newtonyen özellik göstermesi ve 0.902 gr/cm^3'lük yoğunluğu deneyin gerçekleştirilmesi için oldukça uygun değerlerdir. Ayrıca yağın viskozitesi 23^{o}C oda sıcaklığında %$\pm$1.0 hata mertebesine sahip bir reometre ile 20 mm^2/s olarak ölçülmüştür ki bu da deney için uygun bir değerdir. Deneylerde kullanılmak üzere Şekil 3.2'de görüldüğü gibi dairesel, kare ve 45^o döndürülmüş kare kesitli çubuklardan oluşan 3 farklı gözenekli ortam üretilmiştir.



Şekil 3.2 : İncelenen gözenekli ortam geometrileri

Gözenekli ortamlar basit bir imalat yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Gözenekli ortamların üretilmesindeki temel prensip ilk önce pleksi-glas malzemeden sağ ve sol duvarlar üretmek ve bu duvarlara çubukların geçirileceği delikler açmak daha sonra ise açılan deliklerden gözenekli ortamı oluşturacak çubukları geçirmekten ibarettir. Şekil 3.3'de gözenekli ortamın montajdan önceki ve sonraki hali gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : Gözenekli ortamın montajdan önceki ve sonraki hali

Sağ ve sol duvarlar üzerine çubukların geçirileceği delikleri hassas ölçülerde delmek için bilgisayar destekli bir lazer kesim cihazı kullanılmıştır. Aynı şekilde duvarlara geçirilecek çubukların kesiminde de bu lazer kesim cihazından yararlanılmıştır. Gözenekli ortamlar oluşturulurken her üç kesit geometrisi için de dikeyde 4 sıra yatayda 46 sıra çubuk kullanılmıştır ki bu rakam geometri başına 184 çubuk

anlamına gelmektedir. Bu rakamlara göre tüm çubukların yerleştirilmesi sonucunda gözenekli ortamın uzunluğu 955 mm, kanal tabanından yüksekliği ise tabandan itibaren bırakılan 1 mm boşluk ile birlikte 74 mm olmaktadır. Gözenekli ortam kanalda difüzör çıkışından itibaren 215 mm mesafede konumlandırılmıştır. Şekil 3.4'te dairesel çubuklu gözenekli ortamın kanalın içine yerleştirilmiş hali görülmektedir.

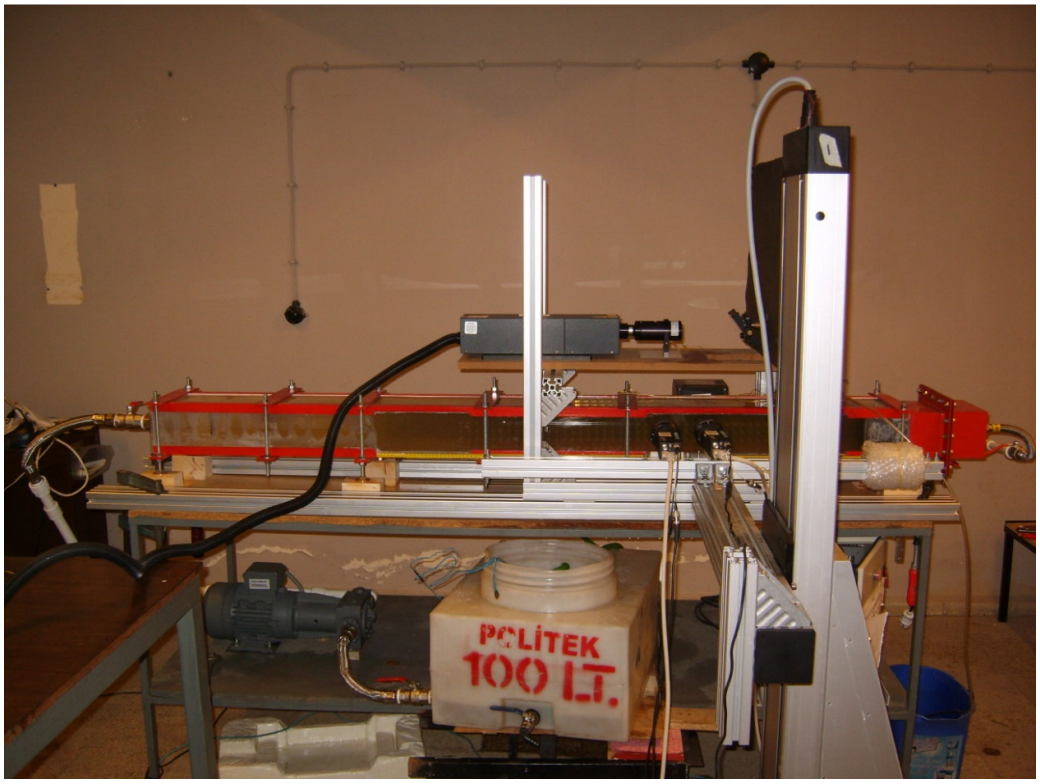


Şekil 3.4 : Gözenekli ortamın kanala yerleştirilmiş hali

Çubukların uzunluğu 180 mm'dir. Ancak çubukları bir arada tutmaya yarayan sağ ve sol yan duvarlar 5'er mm kalınlıkta olduğundan gözenekli ortamın akışa maruz kalan aktif genişliği 170 mm olmaktadır. Dairesel çubuklarda çap, kare çubuklarda kenar uzunluğu ve 45^{o} döndürülmüş kare çubuklarda köşegen uzunluğu 10 mm'dir. Bir çubuğun merkezinin hem yatay hem de dikey doğrultuda komşu çubuğun merkezine olan mesafesi 21 mm'dir. Şekil 3.1'de de gösterildiği gibi çalışmada gözenekli ortamın girişinden çıkışına doğru olan doğrultu x ekseni, kanalın tabanından tavanına doğru olan doğrultu ise y ekseni olarak tanımlanmıştır.

Deneylerde hız alanının saptanması DPIV sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçların elde edilmesi için 1600 x 1200 piksel çözünürlüğe sahip 8 bit'lik Dantec Flow Sense 2M model CCD kamera ile görüntü alınmıştır. Veri alınacak akışkan alanı maksimum 120 mj/pulse enerjili, 532 nm dalgaboyuna sahip Nd:Yag lazer ile aydınlatılmıştır. Sistemin hız alanı görüntü alabilme üst frekansı 15Hz'dir. DPIV sistemi tarafından takip edilmek ve hız verisine çevrilmek üzere parçacık olarak

gümüş kaplı cam kürecikler kullanılmıştır. Akışkana eklenen bu parçacıklar ortalama 10 μm çapındadır ve akışı takip eder özelliktedir. DPIV sistemi ile hem görüntü almada hem de elde edilen görüntülerin işlenip hız verisine çevrilmesinde DPIV sisteminin üreticisi olan Dantec Dynamics şirketinin paket programı olan Dynamic Studio kullanılmıştır. Ayrıca veri alınması esnasında CCD kameranın istenilen konuma getirilmesi işlemi de bilgisayar destekli bir travers mekanizması sayesinde gerçekleştirilmiştir. Böylece CCD kameranın çok hassas miktarlarda hareket ettirilebilmesi sağlanmıştır. Deney düzeneğinin tüm parçaları içeren bir fotoğrafı aşağıda Şekil 3.5'te verilmiştir.



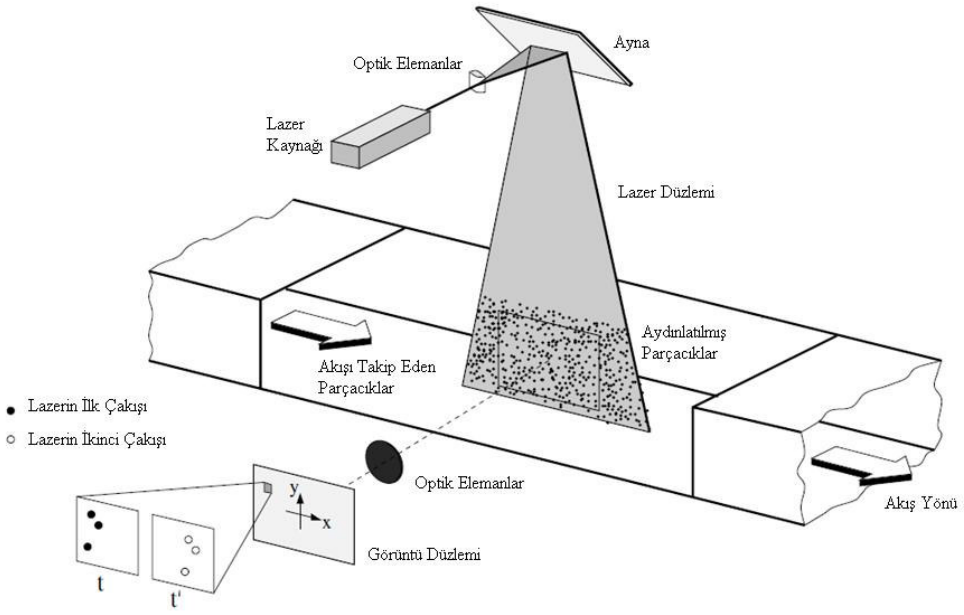
Şekil 3.5 : Deney düzeneği

3.2 DPIV Hız Ölçüm Yönteminin Çalışma Prensibi

Deneysel çalışmada akışkan hız alanının ölçümü için İTÜ Trisonik Araştırma Laboratuvarı imkanları dahilinde bulunan Dantec Dynamics üretimi DPIV sistemi kullanılmıştır. Deney sürecinin daha iyi anlaşılabilmesi için DPIV siteminin çalışma prensibinin kısaca açıklanması faydalı olacaktır.

DPIV sistemi parçacık görüntüleme yöntemi ile akışkan hız alanını tespit etmeye yönelik bir sistemdir ve akışkana ait zamana bağlı hız alanları elde edilmesi mantığına göre çalışır. DPIV kullanımının en büyük üstünlükleri ölçüm sisteminin doğrudan akışkanın içinde bulunmaması nedeniyle akış yapısının bozuntuya uğramaması ve DPIV sistemi ile akış alanındaki tüm hız vektörlerinin aynı anda elde edilebilmesidir. DPIV sisteminin temel elemanları lazer kaynağı, CCD kamera, veri toplama ve işlemede kullanılacak bilgisayar sistemi ve bunların uyumlu bir şekilde çalışmasını sağlayacak senkronizasyon elemanıdır. Gerçekleştirilecek ölçümde ilk olarak yapılması gereken akışkan hareketini görülebilir hale getirecek parçacıkların akışkana eklenmesidir. Bu parçacık ekleme işlemi incelenen akışın yapısına uygun bir şekilde gerçekleştirilmelidir. Çünkü eklenen parçacıkların akışı takip eder nitelikte olmalarının gerekliliği açıktır. Bu noktada önem kazanan etkenler parçacık boyutu, parçacık şekli, eklenme miktarı, parçacık özkütlesinin akışkan özkütlesine oranı ve parçacıklara etkiyebilecek kütle kuvvetleridir. Örneğin akışkan ve parçacık özkütlelerinin birbirlerinden yüksek oranda farklı olması durumunda parçacık akışkanı takip edici özellik gösteremeyecektir ve deney sonuçlarının güvenilirliği istenilen seviyede olmayacaktır. Tüm bu etkenler gözönüne alınarak yapılan parçacık ekleme işleminden sonra ölçüm aşaması başlar. Ölçüm aşamasında yapılacak ölçüme uygun şekilde kalibre edilmiş sistemde, lazer çok küçük ve bilinen bir zaman farkı ile incelenen alanı iki defa aydınlatır. Parçacıkların lazer sayesinde görünür hale geldiği bu iki aydınlanma anı, lazerle senkronize olarak çalışan ve aydınlanma sırasında oluşan lazer düzlemine dik olacak şekilde yerleştirilmiş CCD kamera tarafından görüntülenir. Daha sonra çok kısa zaman aralıklarında alınmış bu iki görüntü kullanılarak hız vektörlerinin elde edilmesi işlemine geçilmesi gerekmektedir ki burada veri işlemede kullanılan bilgisayar sistemi ve yazılım devreye girer. Öncelikle görüntü eşit büyüklükte sorgu alanlarına bölünür. Her görüntüdeki sorgu alanları bir önceki görüntü ile aynı büyüklükte ve aynı konumdadır. Çok kısa zaman aralığında alınmış iki görüntünün ilki üzerinde belli bir sorgu alanı içinde kalan parçacıkların konumu ile ikinci görüntü üzerindeki aynı sorgu alanı içinde kalan parçacıkların konumu karşılaştırılır. Çapraz-korelasyon adı verilen yöntemle iki görüntüdeki parçacıklar arasındaki ortalama konum farkı elde edilir ve konum farkının zaten bilinen zaman aralığına bölünmesiyle de ilgili sorgu alanındaki hız vektörü elde edilmiş olur. Görüntü üzerindeki tüm sorgu alanlarına bu işlemin uygulanmasıyla incelediğimiz akış bölgesinin vektör haritası elde edilir.

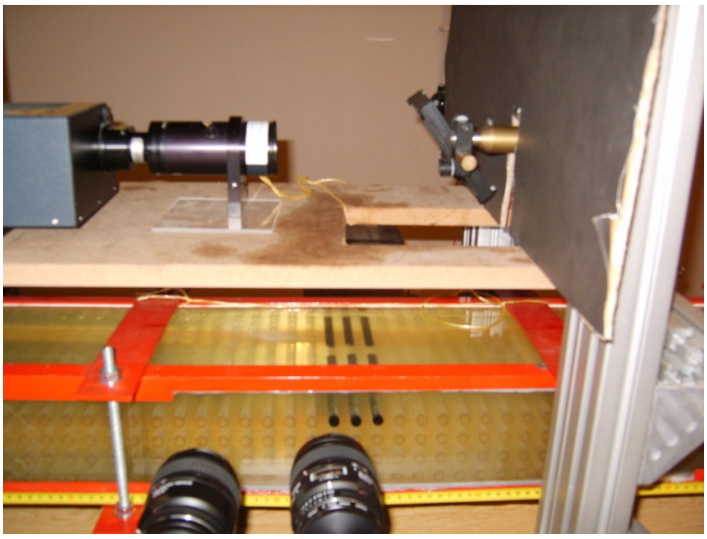
Ancak deney sürecinde incelenen akış bölgesi içinde meydana gelebilecek bozuntular ve diğer deney hataları ihtimaline karşı, deneyin güvenilirliğini sağlamak için bu görüntü alma işlemi deney şartlarına göre yeterli sayıda tekrarlanmalıdır. DPIV ölçüm sisteminin temel prensipleri aşağıda Şekil 3.6'da şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.6 : DPIV sistemi ölçüm prensiplerinin şematik gösterimi

3.3 Deneyin Yapılışı

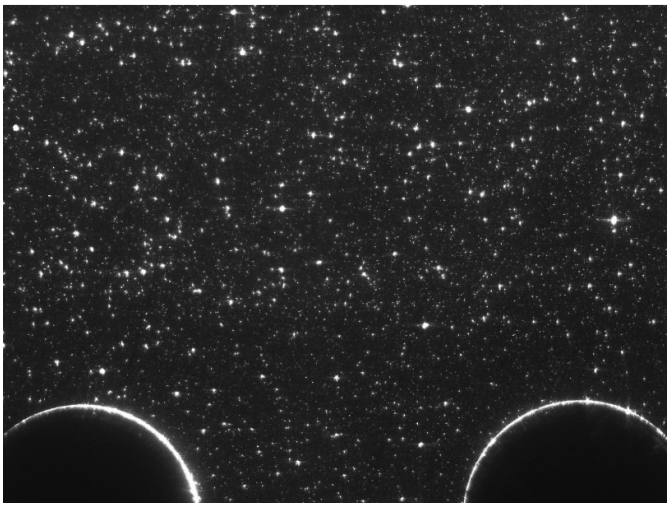
Deneyde DPIV görüntüsü alınacak bölge olarak gözenekli ortamın başlangıcından itibaren 33 ve 34'üncü çubuk sütunlarının arasındaki alan seçilmiştir. Bu bölge gözenekli ortamın başlangıcı x=0 kabul edilirse; x=677mm ile x=698 mm arasına denk gelmektedir. Ölçümlerin yapılmasında gözenekli ortamın başlangıcından bu kadar ileride bir bölgenin seçilmesinin nedeni akışın ölçüm bölgesine gelmeden önce tam gelişmiş hale gelmiş olmasını sağlamaktır. Aşağıda Şekil 3.7'de DPIV sisteminin bahsedilen görüntü alınacak bölgeye göre konumlandırılması verilmiştir.



Şekil 3.7 : DPIV sisteminin ölçüm yapılacak bölgede konumlandırılması

Şekilde de görüldüğü gibi lazer kaynağı kanalın üzerindeki bir platforma akışa paralel olacak şekilde yerleştirilmiştir. Deney düzeneğinde lazer kaynağı tarafından küresel ve silindirik lensler kullanılarak oluşturulan yaklaşık 1 mm kalınlığındaki lazer düzlemi; 45^{o}'lik bir açıyla konumlandırılmış düz ayna vasıtasıyla kırılarak ölçüm alınacak bölgeye yönlendirilmiştir. Burada önemli olan ölçüm bölgesinde oluşturulan lazer düzleminin dikey ve eksenel yönde düzlüğü ve kalınlık miktarıdır. Tüm ölçümler öncesi sonuçların kalitesini garanti altına almak amacıyla bu konu dikkate alınmıştır. Deneyler esnasında pompanın hacimsel debi değeri pompaya bağlı olan elektronik kontrol ünitesi yardımıyla 0.16 m^3/h olarak ayarlanmıştır. Bu değer dairesel çubuklarda çap, kare çubuklarda kenar ve 45^{o} döndürülmüş kare çubuklarda köşegen uzunluğuna göre hesaplanan Reynolds sayısı değerini 1 yapmaktadır. Ayrıca deneyler safhasında yapılan tüm ölçümlerin öncesinde ve sonrasında termometre ile yağ sıcaklığının kontrolü yapılmış ve sıcaklığın hep 22 ^{o}C civarında olduğu görülmüştür. Bu konu önemlidir çünkü akışkanın pompa motoru veya çevre etkiler nedeniyle ısınması akışkanın viskozitesini değiştirecektir. Buna bağlı olarak da akışın istenilen Reynolds sayısı değişecektir. Optik bozuntuların önüne geçmek amacıyla, kanalın ve çubukların üretildiği malzeme olan pleksiglasın ışığı kırma indisi olan 1.49 değerine hemen hemen eşit ışığı kırma indisine sahip Viscoflex NT-22 yağının deney akışkanı olarak kullanıldığı yukarıda belirtilmişti. Su ile yapılan pek çok deneyde kullanılan elektromanyetik debimetrelerin bu akışkanın debisini ölçmek için kullanımı uygun olmamaktadır. Çünkü bu yağın elektik iletkenliği bu tarz bir debimetrenin kullanımı için yeterli değildir. Bu sebepten dolayı

deneyler esnasında pompaya ait elektronik ünite ile sağlanan 0.16 m^3/h değerindeki debinin kontrolü için ölçekli kap kullanılmıştır. Deneylere başlanmadan önce DPIV ölçümleri ile ilgili genel bilgi verirken de bahsedildiği gibi akışkana parçacık eklenmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Akışkan içinde daha çabuk sürede homojen dağılımın sağlanması için parçacıklar akışkana azar azar ve karıştırılarak ilave edilmiştir. Bu işlem akışın kamera tarafından gözlenmesiyle ölçüm yapılacak istenilen parçacık miktarına ulaşılıncaya kadar sürdürülmüştür. Ölçümlere geçilmeden önce yapılması gereken bir işlem de kameranın netliğinin ayarlanmasıdır. Bu işlem, ölçüm yapılması planlanan bölgenin yeterince net bir görüntüsü elde edilinceye kadar kameranın odak ayarının değiştirilmesiyle sağlanmıştır. İstenilen netlik sağlandıktan sonra ise lazer düzlemi ile aynı mesafede yerleştirilmiş ve boyutları bilinen bir referans görüntülenmiş ve bu bilinen boyutlar sayesinde sisteme görüntülenen alanın gerçek büyüklüğü tanıtılmıştır. DPIV görüntülerinin ölçüm bölgesinde tüm kanal yüksekliğini kapsaması için görüntüler tabandan tavana kadar sekiz eşit parça halinde alınmıştır. Bu işlem kameranın dikey doğrultuda ölçüm yapılacak bölgeye ötelenmesi ile gerçekleştirilmiştir. Bu ötelemeler için gerekli çok hassas hareket miktarları bilgisayar sistemi ile kontrol edilen travers mekanizması ile sağlanmıştır. Ölçüm bölgesinin bu şekilde parçalara bölünmesiyle kamera tüm kanal yüksekliğini tek bir seferde görüntülenmesine kıyasla çok daha yakından görüntü alabilmiştir. Bu da görüntülenen her bir bölgede çok daha fazla vektör elde edilmesine yani daha yüksek çözünürlükte sonuçlara ulaşılmasına olanak sağlamıştır. Dairesel çubuklardan oluşturulmuş gözenekli ortam üzerinde yapılan deneyler sırasında alınmış bir DPIV görüntüsü örnek olarak aşağıda Şekil 3.8'de verilmiştir.



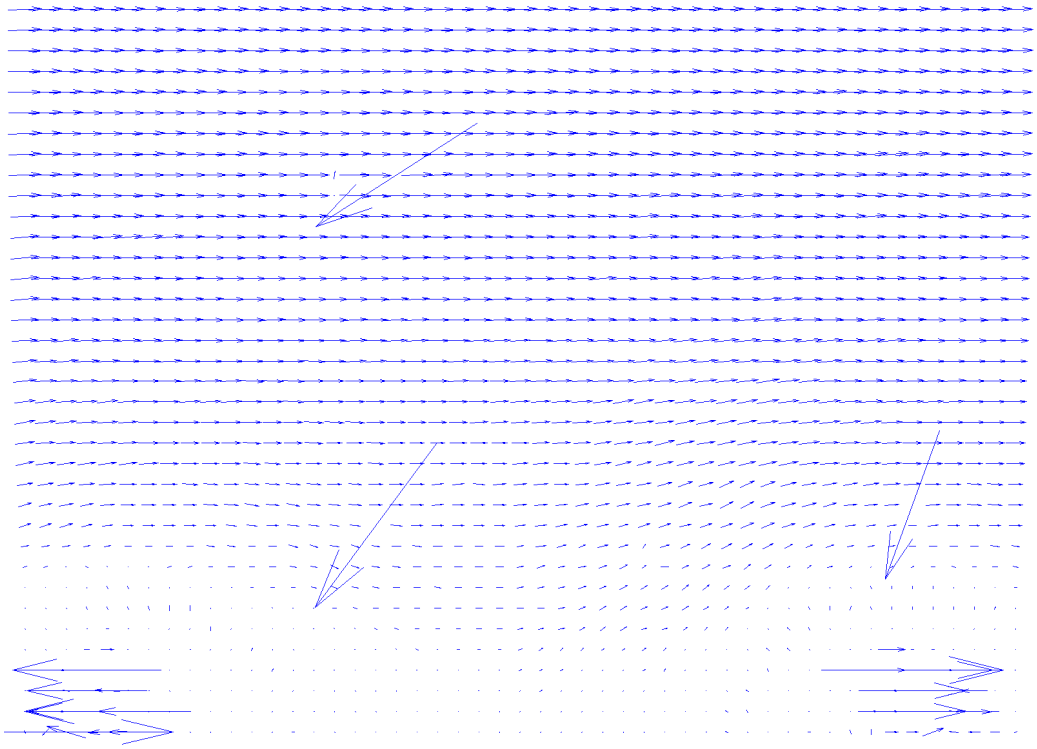
Şekil 3.8 : Deneyler sırasında alınmış örnek DPIV görüntüsü

Tüm ölçüm bölgelerinde 10 Hz görüntü alma frekansı ile en az 475 görüntüden oluşan iki set ölçüm yapılmıştır. Her set için bu görüntülerin zaman ortalamasının alınması, böylelikle de akış bölgesinde özellikle çubukların arkasında meydana gelen zamana bağlı periyodik hareketin etkilerinin önüne geçilerek daimi olduğu düşünülen akış şartlarının sağlanması hedeflenmiştir. Ölçümlerde lazerin iki çakımı arasındaki süre ise 8000 μs olarak ayarlanmıştır. Ölçümler üç farklı çubuk geometrisinden oluşan üç farklı gözenekli ortam için de bu değerler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Farklı gözenekli ortamların kanal içine yerleştirilmesi işlemi kanal yağı boşaldıktan sonra bu işin yapılması amacıyla sökülüp takılabilir şekilde üretilmiş olan kanal çıkışının açılmasıyla gerçekleştirilmiştir.

3.4 Deney Verilerinin İşlenmesi

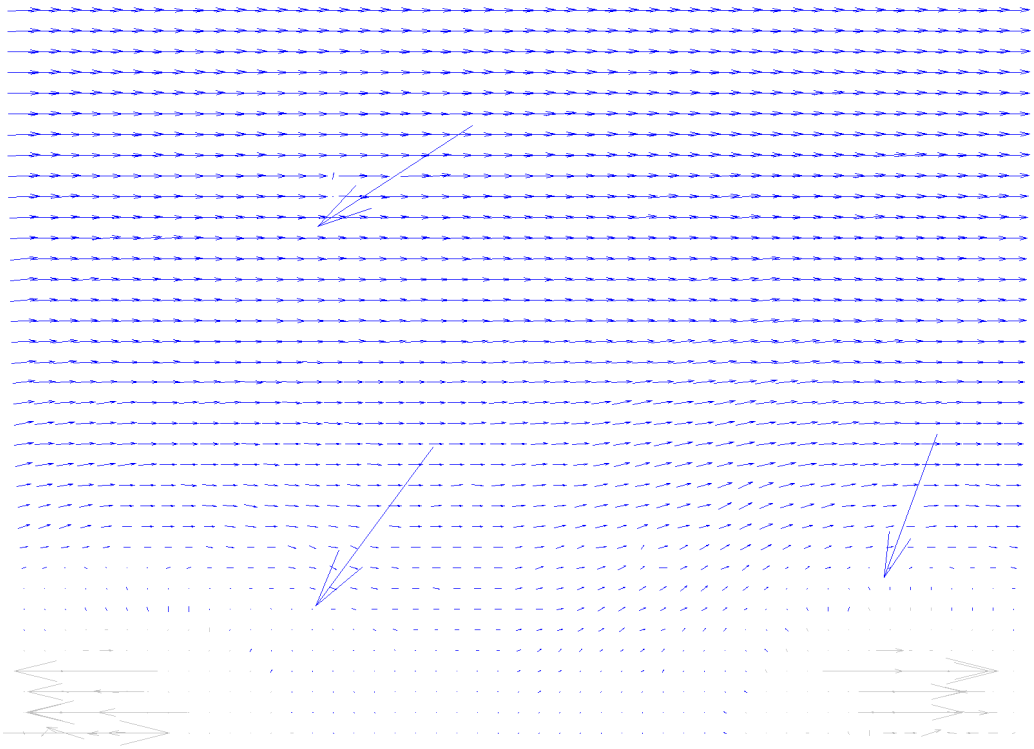
DPIV sistemi ile ölçüm prensiplerinin verildiği kısımda da anlatıldığı gibi ard arda alınmış iki görüntü üzerinden hız vektörlerinin elde edilmesi çapraz-korelasyon işlemi ile gerçekleştirilmektedir. Buna göre verilerin işlenmesi safhasında ilk olarak deneyler sırasında gerçekleştirilen her ölçüm için; ardışık iki görüntüden oluşan ve en az 475 veri içeren setler çapraz-korelasyon işlemine tabi tutulmuştur. Çapraz-korelasyon işlemi yapılırken her geometride alınan farklı dikey konumlardaki her sekiz ölçüm için de görüntüler 64 x 64 piksellik sorgu alanlarına bölünmüş ve bu alanların merkezlerinde hız vektörleri hesaplanmıştır. Buna ek olarak her bir sorgu alanına etrafındaki komşu sorgu alanlarına doğru aradaki mesafenin %50'si oranında kaydırma uygulanmıştır. Ölçümlerde kameranın 1:2.4 büyütme oranı ile akış

alanında 0.57 mm x 0.57 mm'lik vektörel çözünürlüğe ulaşılmıştır. Yukarıda Şekil 3.8'de verilen örnek görüntüye ait çapraz-korelasyon sonucu aşağıda Şekil 3.9'da verilmiştir.



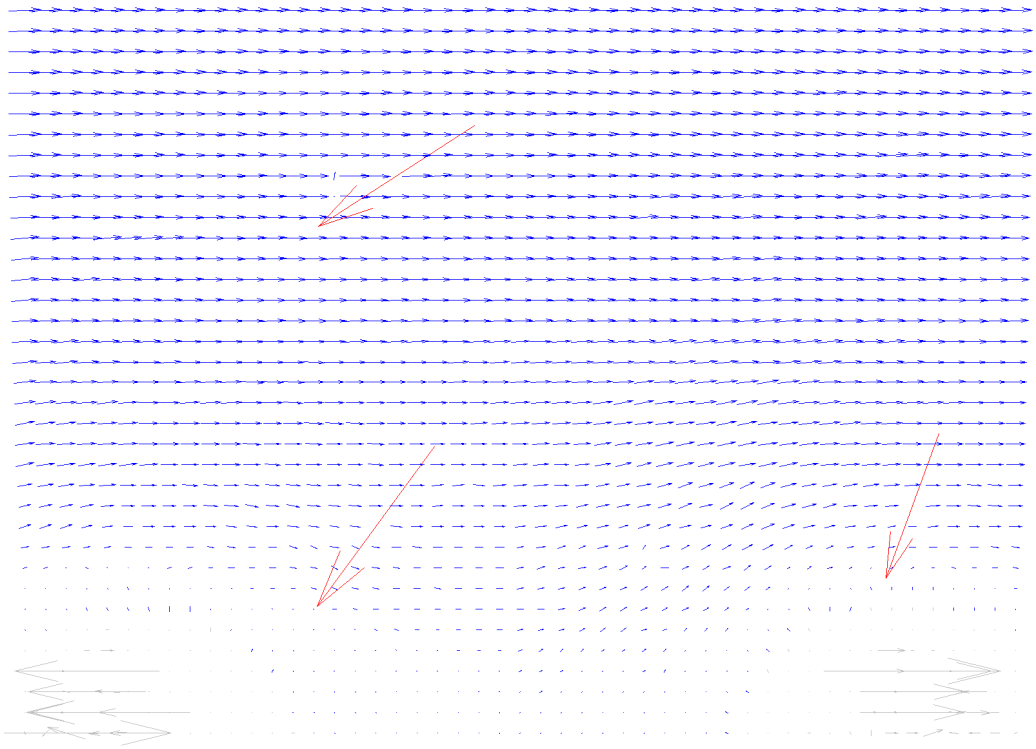
Şekil 3.9 : Örnek çapraz-korelasyon sonucu

Verilerin işlenmesi sürecinde çapraz-korelasyondan sonra gerçekleştirilen işlem maskeleme işlemidir. Elde edilen DPIV resimleri hem akışkan bölgeyi hem de çubukların belli bir kısmını yani katı bölgeyi de içermektedir. Çapraz-korelasyon işlemi esnasında bilgisayar yazılımına hangi bölgenin akışkan, hangi bölgenin katı olduğu tanıtılmamış olduğu için katı bölge içerisinde ve üzerinde de hız vektörleri oluşturulmaktadır. Maskeleme işleminin amacı da bu yanlış vektörleri elemektir. Örnek olarak kullanılan görüntü maskeleme işleminin ardından aşağıda Şekil 3.10'da görülen hali almaktadır.



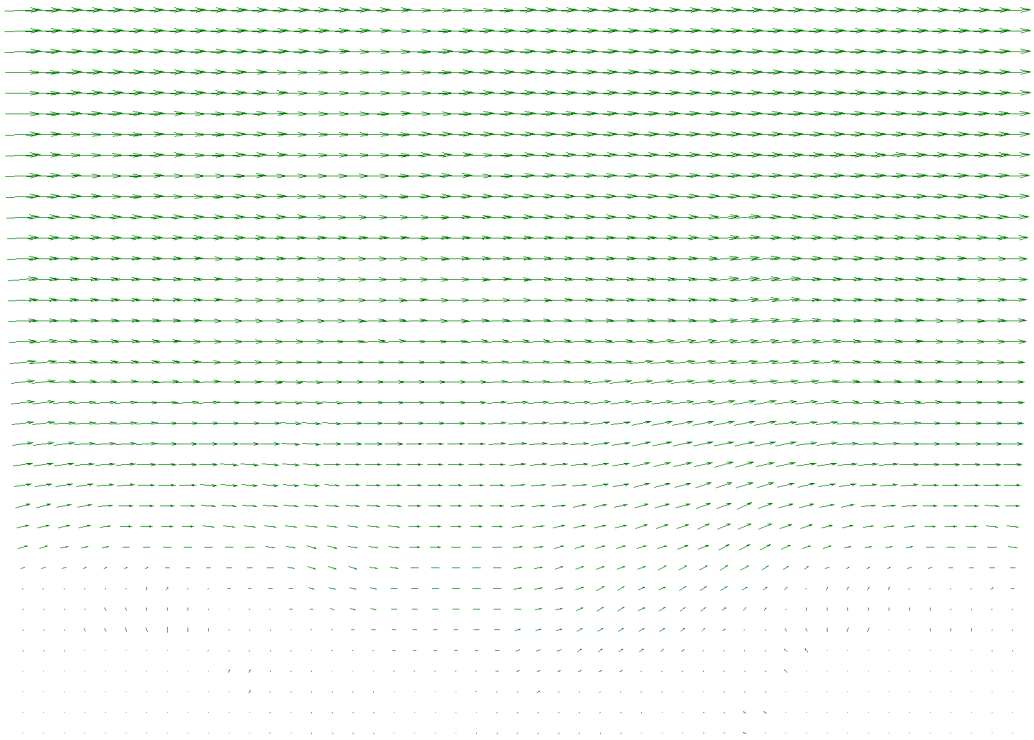
Şekil 3.10 : Örnek maskeleme sonucu

Maskeleme işlemi ile katı bölgelerde ortaya çıkan yanlış vektörlerin temizlenmesinin ardından yapılması gereken işlem, akışkan bölgede aydınlatma eksikliği, parlama ya da akışın parçacıklarla homojen ve yeterli beslenememesi sonucu ortaya çıkan bazı yanlış vektörlerin de temizlenmesidir. Bu yanlış vektörlerin düzeltilmesi, vektör haritasının geneli göz önüne alınarak, doğru olduğu düşünülen uygun bir vektör büyüklüğü aralığı belirlenmesi ve bu aralığın dışında kalan uyumsuz büyüklükte vektörlerin elenmesi yoluyla yapılmıştır. Aşağıda Şekil 3.11'de örnek görüntü için bu işlemin sonucu görülmektedir.



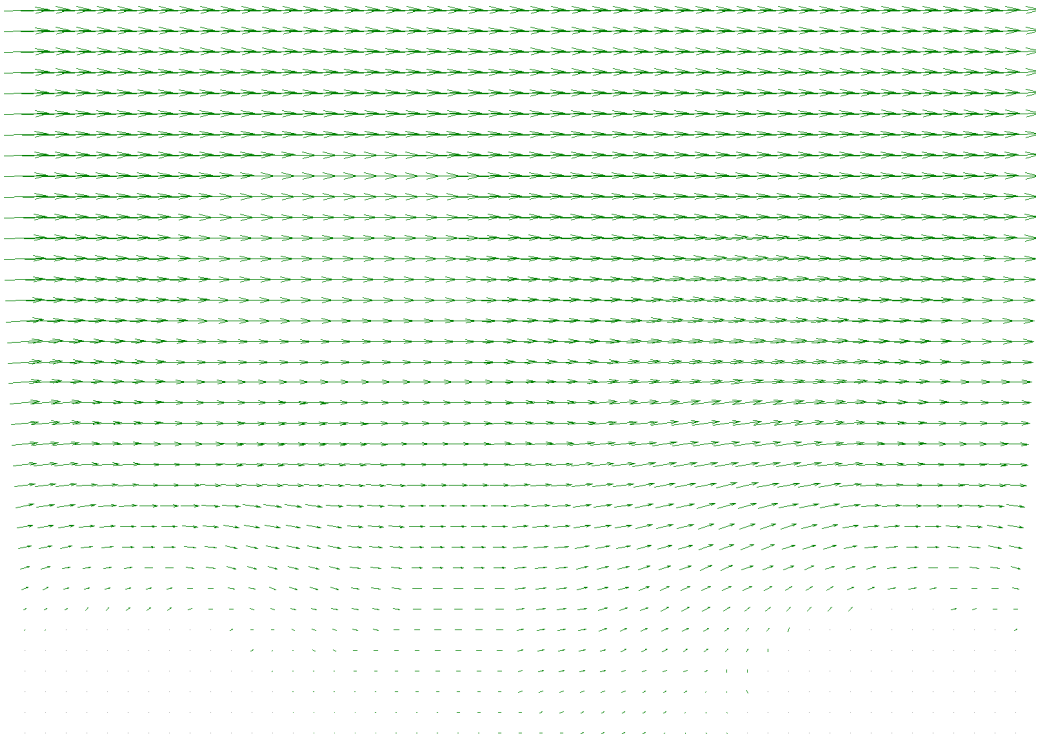
Şekil 3.11 : Belli bir büyüklük aralığı dışında kalan vektörlerin elenmesi

Bu aşamadan sonra ise vektör haritasındaki tüm vektörlerin uzunlukları, kendilerine komşu olan vektörlerin uzunlukları ile aritmetik ortalamaya tabi tutularak bir düzeltme işlemi gerçekleştirilir. Bu işlem ile hem elenen vektörlerin yerine uyumlu büyüklükte vektörlerin yerleştirilmesi hem de daha önceki aşamalarda elenememiş olan bazı uyumsuz büyüklükte vektörlerin düzeltilmeleri sağlanmıştır. Bu işlem elenmiş veya uyumsuz olan vektörün yerine komşu vektör büyüklüklerinin aritmetik ortalamasının alınmasıyla üretilmiş yeni bir vektörün oluşturulmasına dayanmaktadırır. Bu işlemin sonucu örnek görüntü için aşağıda Şekil 3.12'de görülmektedir.



Şekil 3.12 : Elenen vektörlerin yerine ortalama vektörlerin yerleştirilmesi

Son aşama ise deney esnasında akışkan ortamında, özellikle çubukların arkasında meydana gelen zamana bağlı olayların sürekli olduğu düşünülen vektör haritasında hataya yol açmasını engellemektir. Buna karşı önlem olarak, deney süresince ardışık olarak çekilmiş resim çiftlerinden oluşan ve en az 475 adet alınmış olan verilerin zaman ortalaması alınarak, sürekli olduğu düşünülen vektör haritası elde edilmiştir. Aşağıda Şekil 3.13'te bu işlemin sonucu örnek deney seti için verilmiştir. Bu vektör haritası yukarıda anlatılan örnek görüntü için yapılan tüm işlemlerin deney setindeki diğer tüm görüntüler için de yapılmasından sonra hepsinin ortalamasının alınmasıyla elde edilmiştir.



Şekil 3.13 : Deney setindeki verilerin zaman ortalaması

Tüm bu veri işleme süreci DPIV sisteminin üretici firması olan Dantec Dynamics'in DPIV yazılımı olan Dynamic Studio yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

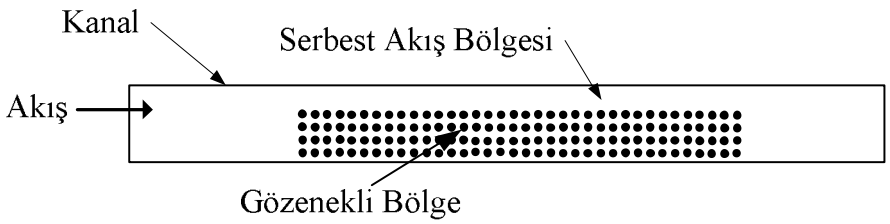
4. SAYISAL ÇALIŞMA

Yapılan çalışmanın tanıtımında da değinildiği gibi çalışmanın ana amacı gözenekli ortam içeren kanalda hız alanının ve arayüz hızının deneysel ve sayısal tespiti olmakla birlikte; çalışmadaki ikinci bir amaç da gözenekli ortamlarda analitik bir geçirgenlik hesabının gerçekleştirilmesidir. Çalışmanın bu kısmında da sözkonusu iki amacın karşılanabilmesi için iki ayrı sayısal çalışma yapılmıştır. İlk sayısal çözümde; deneysel olarak elde edilen verilerin sayısal bir çözümle karşılaştırılabilmesi ve hız alanının güvenilebilir bir tayininin yapılabilmesi amacıyla deneyde kullanılan gözenekli kanalın eş ölçekte üç boyutlu bir modeli oluşturulmuş ve sayısal olarak çözdürülmüştür. Dairesel, kare ve 45^{o} döndürülmüş kare olmak üzere deneysel kısımda incelenen tüm çubuk geometrileri için modeller sayısal çalışmada da oluşturulmuş ve böylece her geometri için karşılaştırma yapılabilmiştir. İkinci sayısal çözümde ise sadece yapılacak analitik geçirgenlik çözümünü desteklemek amacıyla farklı geçirgenlik değerlerinde iki boyutlu pekçok gözenekli kanal modellenmiş ve sayısal olarak çözdürülmüştür. Sayısal çalışmalarda kanal modellerinin oluşturulması ve ızgara yapısının oluşturulması için Gambit yazılımı, sayısal çözümleme için ise Fluent yazılımı kullanılmıştır.

4.1 Deneysel Çalışmada Kullanılan Kanalın Sayısal Çözümü

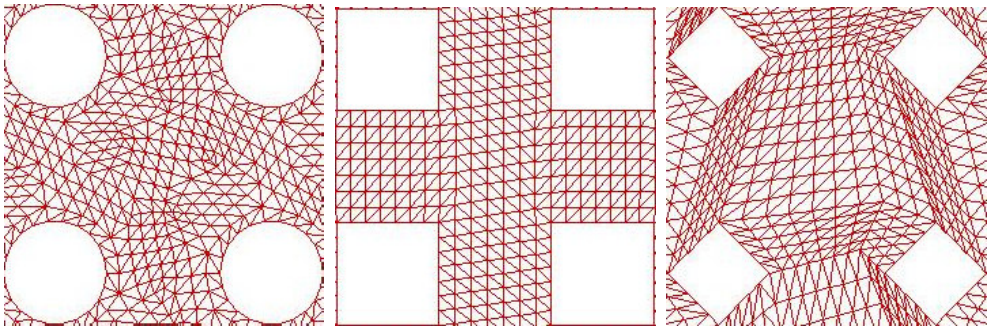
4.1.1 Gambit ile modelleme ve ızgara yapılarının oluşturulması

Deneysel çalışmada kullanılan her üç geometride kanal da Gambit yazılımı kullanılarak üç boyutlu ve eş ölçekli olarak oluşturulmuştur. Ancak sayısal çalışmada deneysel çalışmada var olan yayıcı ve toplayıcı difüzörler Şekil 4.1'de de görüldüğü gibi modellenmemiştir. Çünkü deneysel çalışmada bu parçaların üretilme sebebi kanala giriş ve çıkış kısımlarında düzgün bir hız dağılımı elde edebilmekti; ancak Fluent yazılımının kullanıldığı sayısal çalışmada hız girişi zaten düzgün dağılımlı olarak verilebilmektedir.



Şekil 4.1 : Gambit'te modellenen kanal geometrisi

Izgara yapıları oluşturulurken her üç geometri için de düzgün dağılımlı olmayan ızgara yapısı kullanılmıştır. Çünkü karmaşık yapıda olan kanalda düzgün dağılımlı elemanlarla ızgara yapısı oluşturulamamaktadır. Izgara yapısı oluşturulurken *hexahedral/wedge* elemanlar kullanılmıştır. Izgara yapısının oluşturulmasıyla; modellenen kanallarda boyutların büyüklüğü ve üç boyutlu modelleme nedeniyle çubuk geometrisine bağlı olarak 7 milyon ile 8 milyon arasında hücre sayısına ulaşılmıştır. Her üç geometri için de ızgara yapısı aşağıda Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2 : Izgara yapıları

4.1.2 Fluent yazılımı ile sayısal çözümleme

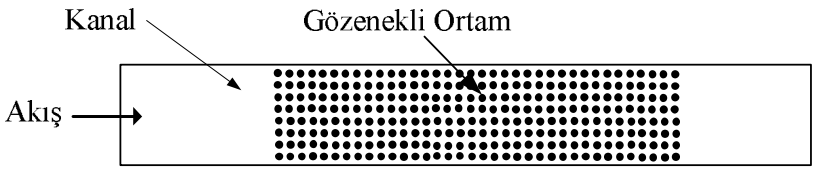
Gambit yazılımı ile geometrisi oluşturulan ve ızgara yapısı atanan kanal modellerinin sayısal çözümü hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı Fluent kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal çözümleme sürecinde basınç temelli Navier-Stokes denklemlerinin zamandan bağımsız ve *implicit* kabullerle çözülmesi yoluna gidilmiştir. Çözümler çift hassasiyetli olarak gerçekleştirilerek sonucun daha doğru bir şekilde elde edilmesi sağlanmıştır. Akışkanın kanala giriş hızı olarak 0.0025 m/s değeri kullanılmıştır. Bu değer deneysel çalışmanın tanıtımında da aktarıldığı şekilde her üç çubuk geometrisi için de Reynolds sayısını 1 yapan değerdir. Bu da Fluent yazılımında laminer çözüm seçeneğine gidileceğini göstermektedir. Ayrıklaştırma

sürecinde momentum denklemleri için ikinci dereceden *upwind* yöntemi kullanılarak ikinci dereceden hata mertebelerinde çalışılması ve böylelikle elde edilen çözümün doğruluk seviyesinin artırılması sağlanmıştır. Basınç ayrıklaştırması için ise standart yöntem kullanılmıştır. İterasyonlar sırasında basınç hız ilşkisinin sağlanmasında kullanılan yöntem ise hesaplamalı akışkanlar dinamiği çalışmalarında kullanımı oldukça yaygın olan SIMPLE algoritmasıdır (Patankar 1980). İterasyonlar sırasında hem süreklilik hem de momentum denklemleri için yakınsama kriteri 10^{-6} olarak belirlenmiştir. Çözümlerin elde edilmesinin ardından kanala giren akışkan ve çıkan akışkan arasındaki kütlesel debi farkına bakılmış ve sıfıra çok yakın olduğu görülmüştür. Bu şekilde kütlenin korunumuna dayanarak yakınsamanın kontrolü yapılmıştır.

4.2 Analitik Geçirgenlik Hesabında Yardımcı Olacak Sayısal Çözüm

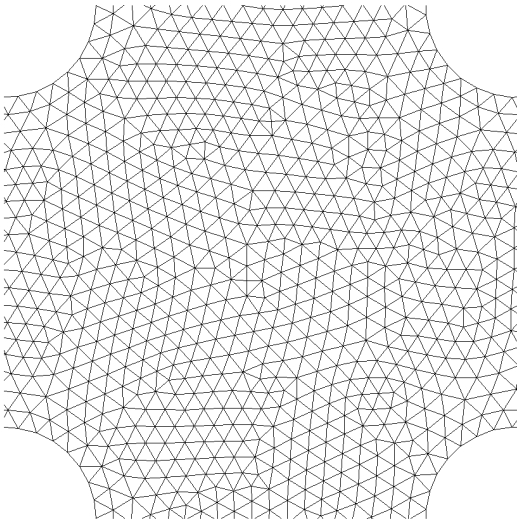
4.2.1 Gambit ile modelleme ve ızgara yapılarının oluşturulması

Çalışmanın bu kısmında modellenen ve ızgara yapıları atanan iki boyutlu gözenekli kanallar sadece analitik geçirgenlik hesabını desteklemek amacıyla kullanılmıştır. Sadece dairesel geometride çubukların kullanıldığı bu kısımda 5 farklı gözeneklilik değerinde 5 farklı model oluşturulmuştur. Bu modellerin gözeneklilik değerleri 0.73, 0.78, 0.82, 0.87 ve 0.9'dur. Gözenekliliğin malzeme içindeki toplam boşluk hacminin toplam malzeme hacmine oranı olduğu yukarıda verilmişti. Farklı gözeneklilik değerlerinde kanallar da eş çaplı çubukların merkezleri arasındaki mesafeler değiştirilerek oluşturulmuştur. Çubuklar birbirine yaklaştırıldığında doğal olarak daha sık bir yapı oluşacak ve akışkan kısmın geçebileceği boşluk azalacaktır. Bunun aksi bir durum ise tam tersi sonuç verecektir. Bu kısımda oluşturulan modeller Şekil 4.3'te de görüldüğü gibi çubukların 8 satır ve 46 sütundan oluşacak şekilde kanal duvarları arasına yerleştirilmesiyle elde edilmiştir ve deneysel çalışmada olduğu gibi bir serbest akış bölgesi içermemektedir. Çünkü bu kısımda yapılacak çözümde ilgilenilen araştıma konusu arayüz hızının tespiti değil geçirgenliğin saptanmasıdır. Dikey olarak sıralanan çubuk satırlarının sayısının yüksek seçilmesinin nedeni duvar etkilerinden uzak bir bölgede bilgi alabilme imkanı sağlamaktır. Aynı şekilde giriş ve çıkış etkilerinden de uzak kalmak amacıyla tüm gözeneklilik değerleri için modellerde kanal yüksekliğinin kanal uzunluğuna oranı 0.093 alınmıştır.



Şekil 4.3 : Gambitte modellenen kanal geometrisi

Modellerin ızgara yapıları oluşturulurken düzgün dağılımlı olmayan üçgensel elemanlar kullanılmıştır çünkü dairesel geometrilerle oluşturulan gözenekli kanal modellerinde düzgün dağılımlı bir ızgara yapısı kullanabilme imkanı bulunmamaktadır. Izgara yapılarının oluşturulmasıyla farklı gözeneklilik değerlerindeki modeller için yaklaşık 160000 ile 500000 arasında değişen hücre sayılarına ulaşılmıştır. Çalışmada çubuklar üzerinde oluşan sınır tabaka içerisindeki hız dağılımıyla ilgilenilmediği ve daha büyük ölçekte çalışılarak iki komşu çubuk arasındaki hız dağılımı gözlemlendiği için duvarlar üzerinde sınır tabaka ızgara yapısı ya da belli bir büyütme oranıyla oluşturan bir ızgara yapısının kullanımına gidilmemiştir. Çözümlerde kullanılan örnek bir ızgara yapısı aşağıda Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4 : Örnek Izgara Yapısı

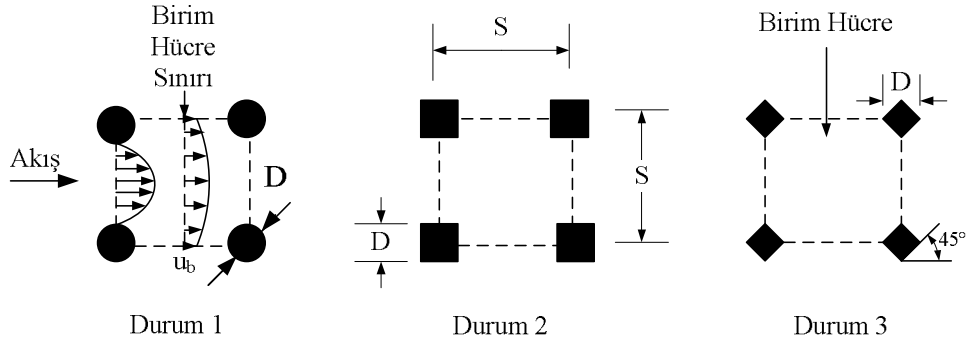
4.2.2 Fluent yazılımı ile sayısal çözümleme

Fluent yazılımı ile yapılan sayısal çözümlemede basınç temelli Navier-Stokes denklemleri zamandan bağımsız ve *implicit* kabullerle çözdürülmüştür. Çözümlerde

daha yüksek doğruluk mertebelerine ulaşılabilmesi için çift hassasiyetli çözdürücü tercih edilmiştir. Analizlerde Reynolds sayısı 1 olacak şekilde çözüm yapılarak laminer akış şartları sağlanmıştır. Çözümün doğruluk seviyesinin artırılması amacıyla momentum denklemlerinin çözümünde ikinci dereceden hata terimleri veren ikinci derece *upwind* ayrıklaştırma yöntemine gidilmiş, basınç ayrıklaştırması ise standart yöntem ile gerçekleştirilmiştir. İterasyonlarda basınç hız ilişkisinin kurulmasında ise oldukça sık kullanılan bir yöntem olan SIMPLE algoritması seçilmiştir (Patankar, 1980). İterasyonlar 10^{-6} yakınsama mertebesine kadar sürdürülmüştür. Yakınsamanın kontrolü yine deneysel çalışmada kullanılan kanal için yapılan Fluent çözümlemesi için açıklandığı gibi gerçekleştirilmiştir.

5. GEÇİRGENLİĞİ VEREN ANALİTİK BİR YÖNTEMİN TESPİTİ

Çalışmanın bu kısmında kullanılan her üç geometride gözenekli ortam için geçirgenliği veren analitik bir yöntemin elde edilmesi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem Tamayol ve Bahrami (2009) tarafından ortaya konulan yöntemin daha da geliştirilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Yöntem elde edilirken korunum denklemlerinden yola çıkılmış ve birim hücre yaklaşımı kullanılmıştır. Yöntemde gözenekli ortamın yatay ve dikey yönde sonsuz sayıda çubuk içerdiği düşünülmüştür. Her bir birim hücre gözenekli ortamın birbirine yatay ve dikey yönde komşu olan çubuk merkezlerini köşe kabul edecek şekilde parçalara bölünmesiyle oluşturulmuştur. Birim hücre geometrileri aşağıda Şekil 5.1'de gösterilmiştir;



Şekil 5.1 : Her üç geometri için birim hücreler

Çalışmada ilk olarak dairesel kesitli çubuklardan oluşan gözenekli ortam için analitik bir geçirgenlik bağıntısı elde edilmiştir. Bunun için momentum denklemlerinden yola çıkılmıştır. Hızın y bileşeninin sıfır kabul edilmesi ve çok yavaş akış koşullarının uygulanmasıyla x-momentum denklemi aşağıdaki Stokes denklemine indirgenir;

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu}\frac{dp}{dx} \qquad (\mathbf{5.1})$$

Birim hücrenin yarı yüksekliği δ olarak tanımlanır ve merkez y=0 alınırsa; +δ ve – δ yükseklikleri x doğrultusu boyunca alt ve üst birim hücre sınırlarını verecektir. Alt ve üst sınırlarda x=0 konumundan x=D/2 konumuna kadar sınır hızı sıfır olacaktır. Çünkü bu kısımlarda akışkan daire yüzeylerine temas etmektedir ve kaymazlık sınır

şartı etkindir. Ancak yine alt ve üst sınırlarda x=D/2 mesafesinden x=S/2 mesafesine kadar diğer birim hücrelerle olan komşuluk neticesinde duvar sınır şartı uygulanamayacak, buralarda bir u_b sınır hızı oluşacaktır. Buna göre denklem **(5.1)** aşağıdaki sınır şartlarıyla çözülmelidir;

$$0 \leq x \leq \frac{D}{2} \; ve \; y = \mp\delta \; \Rightarrow u = 0 \qquad (\mathbf{5.2})$$

$$\frac{D}{2} \leq x \leq \frac{S}{2} \; ve \; y = \mp\delta \; \Rightarrow u = u_b \qquad (\mathbf{5.3})$$

Çözüm için x=0 ve x= S mesafeleri arası değil x=0 ve x=S/2 mesafeleri arası sınır şartı olarak kullanılmıştır. Çünkü birim hücre simetrik olduğundan bu şekilde doğru çözüme ulaşmak mümkündür. Bu sınır şartlarına göre denklem **(5.1)** çözüldüğünde hız profili aşağıdaki gibi bulunur;

$$0 \leq x \leq \frac{D}{2} \; \Rightarrow u = \frac{1}{2\mu}\frac{dP}{dx}(\delta^2 - y^2) \qquad (\mathbf{5.4})$$

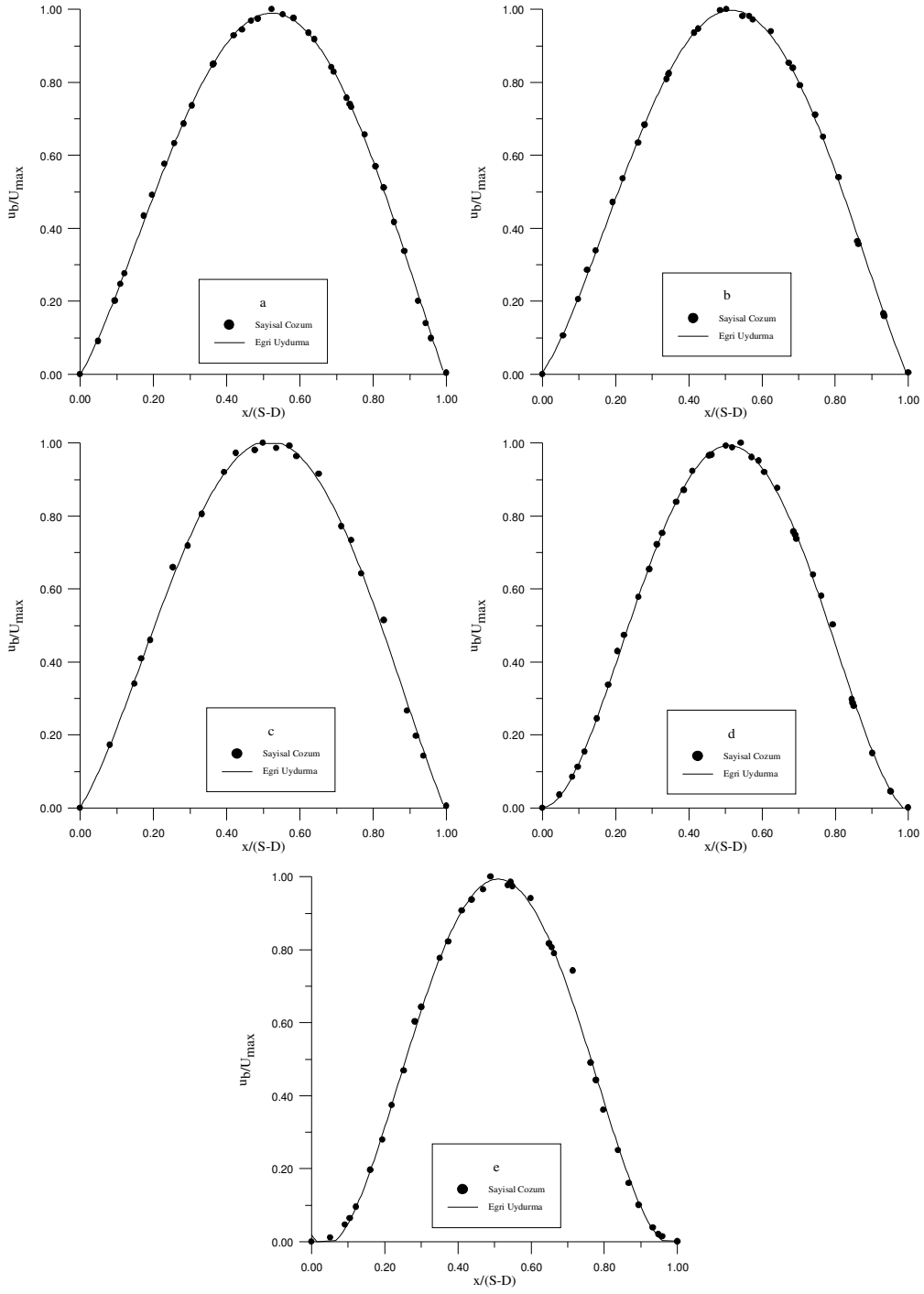
$$\frac{D}{2} \leq x \leq \frac{S}{2} \; \Rightarrow \; u = \frac{1}{2\mu}\frac{dP}{dx}(\delta^2 - y^2) + u_b \qquad (\mathbf{5.5})$$

Hız profillerinde geçen δ terimleri gözenekli ortam geometrisine göre aşağıdaki gibi tanımlanır;

$$\delta = \begin{cases} 0 \leq x \leq \dfrac{D}{2} \; \Rightarrow \; \dfrac{S}{2} - \sqrt{\dfrac{D^2}{4} - x^2} \\ \dfrac{D}{2} \leq x \leq \dfrac{S}{2} \; \Rightarrow \; \dfrac{S}{2} \end{cases} \qquad (\mathbf{5.6})$$

Bu aşamadan sonra yapılması gereken **(5.5)** numaralı denklemde geçen ub sınır hızının x=D/2 ve x=S/2 konumları arasında nasıl değiştiğinin tanımlanmasıdır ki bu kısım Tamayol ve Bahrami (2009) tarafından yapılan çalışmanın geliştirildiği kısımdır. Bahsedilen çalışmaya göre ub sınır hızı x=D/2 konumundan x=S/2 konumuna kadar doğrusal bir artış göstermekte, birim hücre simetrik olduğu için ise x=S/2 konumundan x=S-D/2 konumuna kadar da doğrusal bir azalma göstermekteydi. Fakat yapılan bu çalışmada ub'nin değişimi ilgili kısımda anlatılmış olan bir sayısal model kullanılarak incelenmiş ve geniş bir gözeneklilik aralığında ub'nin parabolik eğilim gösterdiği saptanmıştır. Yapılan sayısal çalışma sadece analitik çalışmada öne sürülen bu fikri desteklemek için yapılmış ve matematiksel işlemlere herhangi bir etkisi olmamıştır. Sayısal modelde; yatay ve dikey yönde

sonsuz sayıda çubuk olduğunu varsayan birim hücre yaklaşımını kullanabilmek için yatay ve dikey yönde yüksek sayıda çubuk modellenmiş ve duvar etkilerinden uzak kalan orta bölgelerden ub profilleri elde edilmiştir. Bu ub profilleri aşağıda Şekil 5.2'de verilmektedir;



Şekil 5.2 : Farklı gözeneklilik değerleri için u_b hız profilleri: (a) ε=0.9, (b) ε=0.87, (c) ε=0.82, (d) ε=0.78, (e) ε=0.73

Bu profillere göre birim hücre sınırlarındaki u_b sınır hızları özellikle yüksek gözeneklilik değerleri için x=D/2 ve x=S-D/2 konumları arasında parabolik bir değişim ortaya koymaktadır. O zaman Tamayol ve Bahrami (2009) tarafından yapılan çalışmadaki lineer u_b tanımı yerine parabolic bir u_b tanımı gerekmektedir. Bu tanım çalışmada aşağıdaki gibi yapılmıştır;

$$u_b = \langle U \rangle g(\varepsilon) \left\{ \frac{2x}{S-D} - \frac{4x^2}{(S-D)^2} \right\} \qquad (\mathbf{5.7})$$

İfadede $\langle U \rangle$ ortalama hızken $g(\varepsilon)$ gözeneklilik değişiminin u_b hız profiline olan etkisini göstermektedir ve aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır,

$$g(\varepsilon) = 1.274\varepsilon - 0.274 \qquad (\mathbf{5.8})$$

Bu ifade gözenekliliğin en düşük olabileceği durum olan dairesel çubukların birbirine temas ettiği durumda yani ε=0.215 durumunda $g(\varepsilon) = 0$ değerini, gözenekliliğin en yüksek olabileceği durum olan ε değerinin 1'e yakınsadığı durum için $g(\varepsilon) = 1$ değerini vermektedir. Yani yapılmış olan işlem ε gözeneklilik değişiminin alabileceği tüm değerler için 0 ve 1 arasında değişen bir fonksiyon türetilmesidir.

Bu aşamadan sonra yapılması gereken işlem basınç düşümüne ulaşmaktır. Bunun için aşağıdaki denkelmde gösterildiği gibi debiden yola çıkılır;

$$Q = \langle U \rangle S = \int_{-\delta}^{+\delta} u dy \qquad (\mathbf{5.11})$$

Bu bağıntıya hız ifadelerini veren denklem **(5.7)** ve **(5.8)** ayrı ayrı yerleştrilidiğinde aşağıdaki denklemler elde edilir;

$$0 \le x \le \frac{D}{2} \Rightarrow Q = \int_{-\delta}^{+\delta} \left[\frac{1}{2\mu} \frac{dP}{dx} (\delta^2 - y^2) \right] dy \qquad (\mathbf{5.12})$$

$$\frac{D}{2} \le x \le \frac{S}{2} \Rightarrow Q = \int_{-\delta}^{+\delta} \left[\frac{1}{2\mu} \frac{dP}{dx} (\delta^2 - y^2) + u_b \right] dy \qquad (\mathbf{5.13})$$

Her iki ifade için de δ ve u_b değerleri yerine konulduktan sonra integraller alınır ve basınç gradyenleri çekilirse;

$$0 \le x \le \frac{D}{2} \Rightarrow \frac{dp}{dx} = \frac{3\mu Q}{2\left(\frac{S}{2} - \sqrt{\frac{D^2}{4} - x^2}\right)^3} \qquad (\mathbf{5.14})$$

$$\frac{D}{2} \le x \le \frac{S}{2} \Rightarrow \frac{dp}{dx} = \frac{12\mu Q}{S^3}\left(1 - g(\varepsilon)\left\{\frac{2x}{S-D} - \frac{4x^2}{(S-D)^2}\right\}\right) \qquad (\mathbf{5.15})$$

Bu adımdan sonra yapılması gereken işlem basınç gradyenlerinin integre edilmesi yoluyla basınç düşümünün bulunmasıdır. Her iki aralık için de integrasyon işleminin yapılması ve elde edilen basınç düşümlerinin birbirine eklenmesiyle toplam basınç düşümü aşağıdaki gibi bulunur;

$$\Delta P = 6\mu Q\left\{\frac{3D^2S\left(\tan^{-1}\left(\frac{D}{\sqrt{S^2-D^2}}\right)+\frac{\pi}{2}\right)}{(S^2-D^2)^{5/2}} + \frac{2D\left(S^2+\frac{D^2}{2}\right)}{S(S^2-D^2)^2}\right\}$$

$$+\frac{12\mu Q}{S^3}(S-D)\left[\frac{6-g(\varepsilon)}{6}\right] \qquad (\mathbf{5.16})$$

Bu noktadan sonra yapılması gereken elde edilen basınç düşümünü **(2.1)** numaralı bağıntı ile ifade edilen Darcy denkleminde yerine koyarak geçirgenliği çekmekten ibarettir. Ancak bunu yaparken ifade basitleştirme amacıyla $\Phi = 1 - \varepsilon$ olarak tanımlanan katı hacim oranı ve $\Phi' = \pi/4\Phi$ değeri cinsinden yazılmıştır. Bu işlemin yapılmasıyla geçirgenlik aşağıdaki gibi elde edilmiştir;

$$K = D^2\left\{\begin{array}{c}\frac{12\left(\sqrt{\Phi'}-1\right)}{\Phi'\sqrt{\Phi'}}\left[\frac{6-g(\varepsilon)}{6}\right] + \frac{12}{(\Phi'-1)\sqrt{\Phi'}}\frac{\left(\Phi'+\frac{1}{2}\right)}{(\Phi'-1)} \\ + \frac{18\sqrt{\Phi'}\left[\tan^{-1}\left(\frac{1}{\sqrt{(\Phi'-1)}}\right)+\frac{\pi}{2}\right]}{(\Phi'-1)^{5/2}}\end{array}\right\}^{-1} \qquad (\mathbf{5.17})$$

Kare ve 45° döndürülmüş kare çubuklardan oluşmuş gözenekli ortamlar için geçirgenlik bağıntıları da yine aynı prensipler takip edilerek elde edilmiştir. Kare çubuklardan oluşan gözenekli ortam için δ yarı yükseklik değeri aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\delta = \begin{cases} 0 \le x \le \dfrac{D}{2} \Rightarrow \dfrac{S}{2} - \dfrac{D}{2} \\ \dfrac{D}{2} \le x \le \dfrac{S}{2} \Rightarrow \dfrac{S}{2} \end{cases} \qquad (\mathbf{5.18})$$

Kare çubuklar için sınır hızının gözenekliliğe bağlı olarak değişimini veren $g(\varepsilon)$ fonksiyonu ise aşağıdaki gibi elde edilmiştir;

$$g(\varepsilon) = \varepsilon \qquad (\mathbf{5.19})$$

Burada ε gözeneklilik değerinin kare çubukların birbirine temas ettiği en küçük değeri olan 0 için $g(\varepsilon) = 0$, gözenekliliğin en yüksek olabileceği ε=1 durumu için $g(\varepsilon) = 1$ olmaktadır.

Kare geometriye göre tanımlanan bu δ değerleri ve yine denklem **(5.7)**'de belirtilen parabolik sınır hızı profili kullanılarak dairesel geometri için uygulanan prosedürün aynısı uygulandığında basınç düşümü aşağıdaki gibi elde edilir;

$$\Delta P = \frac{12\mu QD}{(S-D)^3} + \frac{12\mu Q}{S^3}(S-D)\left[\frac{6-g(\varepsilon)}{6}\right] \qquad (\mathbf{5.20})$$

Buradan da yine bağıntı **(2.1)**'de verilen Darcy yasası ile geçirgenlik aşağıdaki gibi çekilir;

$$K = D^2 \left\{ 12 \left(\frac{1}{\left(\frac{1}{\sqrt{\Phi}} - 1\right)^3} + \Phi\left(1 - \sqrt{\Phi}\right)\left[\frac{6-g(\varepsilon)}{6}\right] \right) \right\}^{-1} \qquad (\mathbf{5.21})$$

45^o döndürülmüş çubuklardan oluşturulmuş gözenekli ortam için yarı yüksekliği veren δ değerleri ise aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\delta = \begin{cases} 0 \le x \le \dfrac{D}{2} \Rightarrow \left(\dfrac{S}{2} - \dfrac{D}{2}\right) + x\tan\alpha \\ \dfrac{D}{2} \le x \le \dfrac{S}{2} \Rightarrow \dfrac{S}{2} \end{cases} \qquad (\mathbf{5.22})$$

Burada α=45^o değerindedir. Söz konusu geometri için sınır hızının gözenekliliğe bağlı olarak değişimini veren $g(\varepsilon)$ fonksiyonu ise aşağıdaki gibi elde edilmiştir;

$$g(\varepsilon) = 2\varepsilon - 1 \qquad (\mathbf{5.23})$$

Bu fonksiyon elde edilirken de yine gözenekliliğin alabileceği tüm değerler için 0 ve 1 arasında değişen bir fonksiyon türetilmesi prensibine başvurulmuştur. Buna göre

45^{o} döndürülmüş çubukların birbirine temas ettiği en düşük gözeneklilik değeri olan ε=0.5 için $g(\varepsilon) = 0$, ε gözeneklilik değerinin 1 değerine yakınsadığı en yüksek gözeneklilik durumu için ise $g(\varepsilon) = 1$ olmaktadır.

45^{o} döndürülmüş kare çubuklara göre tanımlanan δ değerleri ve yine denklem **(5.7)**'de verilen parabolik hız profili kullanılarak dairesel geometride kullanılan prosedürün aynısı uygulandığında basınç düşümü aşağıdaki gibi bulunur;

$$\Delta P = 6\mu Q\left(\frac{1}{(S-D)^2} - \frac{1}{S^2}\right) + \frac{12\mu Q}{S^3}(S-D)\left[\frac{6-g(\varepsilon)}{6}\right] \qquad (\mathbf{5.24})$$

Daha sonra yine denklem **(2.1)**'de verilen Darcy yasasından geçirgenlik aşağıdaki gibi çekilir;

$$K = D^2\left\{6\left(\frac{1}{\left(\frac{1}{\sqrt{2\Phi}} - 1\right)^2} - 2\Phi\right) + 24\Phi\left(1-\sqrt{2\Phi}\right)\left[\frac{6-g(\varepsilon)}{6}\right]\right\}^{-1} \qquad (\mathbf{5.25})$$

6. SONUÇLAR

6.1 Analitik Çalışma Sonuçları

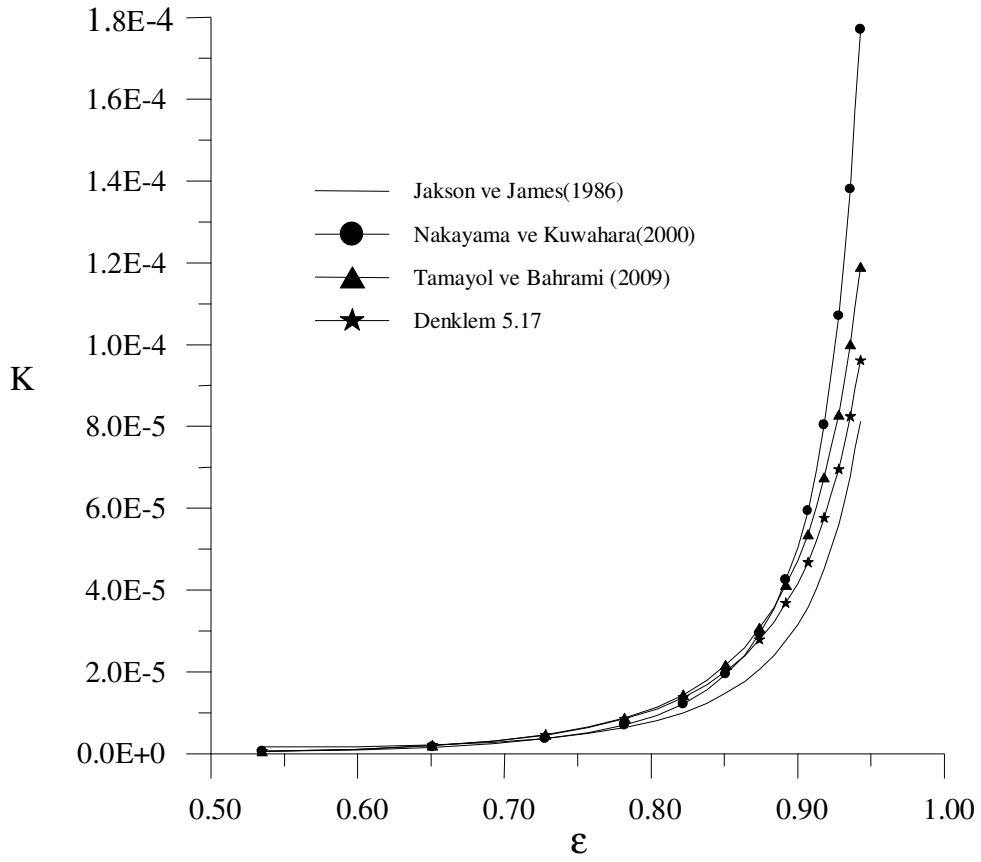
Analitik çalışma sonuçları incelenirken **(5.17)**, **(5.21)** ve **(5.25)** numaralı denklemlerde ortaya konan analitik geçirgenlik tespiti yöntemlerinin geçmiş çalışmalarla karşılaştırmasının yapılmasından önce deneysel çalışma sonuçlarına bağlı olarak yapılacak ileriki hesaplamalarda gerekli olduğu için deneysel çalışmada kullanılan gözenekli ortamların geçirgenliğinin hesaplanması faydalı olacaktır. Bunun gerçekleştirilmesi için önce denklem **(1.1)** kullanılarak tüm geometrilerdeki birim hücreler için gözeneklilik hesaplanmış buradan da denklem **(5.17)**, **(5.21)** ve **(5.25)** kullanılarak geçirgenlik değerleri aşağıda Çizelge 6.1'de verilmiştir;

Çizelge 6.1 : Kullanılan geometriler için gözeneklilik ve geçirgenlik değerleri

	Dairesel	**Kare**	**45^o Döndürülmüş Kare**
ε	0.822	0.773	0.887
k	1.37E-05	9.75E-06	2.07E-05

Deneysel sonuçlarda kullanılacak bu değerlerin tespitinden sonra **(5.17)**, **(5.21)** ve **(5.25)** numaralı denklemlerde ortaya konmuş olan analitik geçirgenlik hesabı yöntemlerinin geçerliliğinin saptanması amacıyla bu denklemlerin geçmiş çalışmalarla bir karşılştırmasının yapılması gerekli görülmüştür. Bunu gerçekleştirmek için hem yeni önerilen **(5.17)**, **(5.21)** ve **(5.25)** numaralı denklemlerin hem de daha önceden literatüre geçmiş denklemlerin geniş bir gözeneklilik aralığı için geçirgenlik sonuçları çizdirilmiştir. Geçirgenliği tespit etmekte kullanılacak analitik yöntemin oluşturulması esnasında birim hücre sınırındaki hız değerleri düşük gözeneklilik değerlerinde lineer değişirken, yüksek gözeneklilik değerlerinde bu değişimin parabolik bir eğilim gösterdiği belirtilmişti. Buna göre yeni sunulan yöntem ve önceki yöntemlere göre elde edilen geçirgenlik değerleri karşılaştırıldığında artan gözeneklilik değeri ile elde edilen geçirgenlik değerleri arasındaki farkın büyümesi beklenen sonuçtur. Bu durum dairesel çubuklar

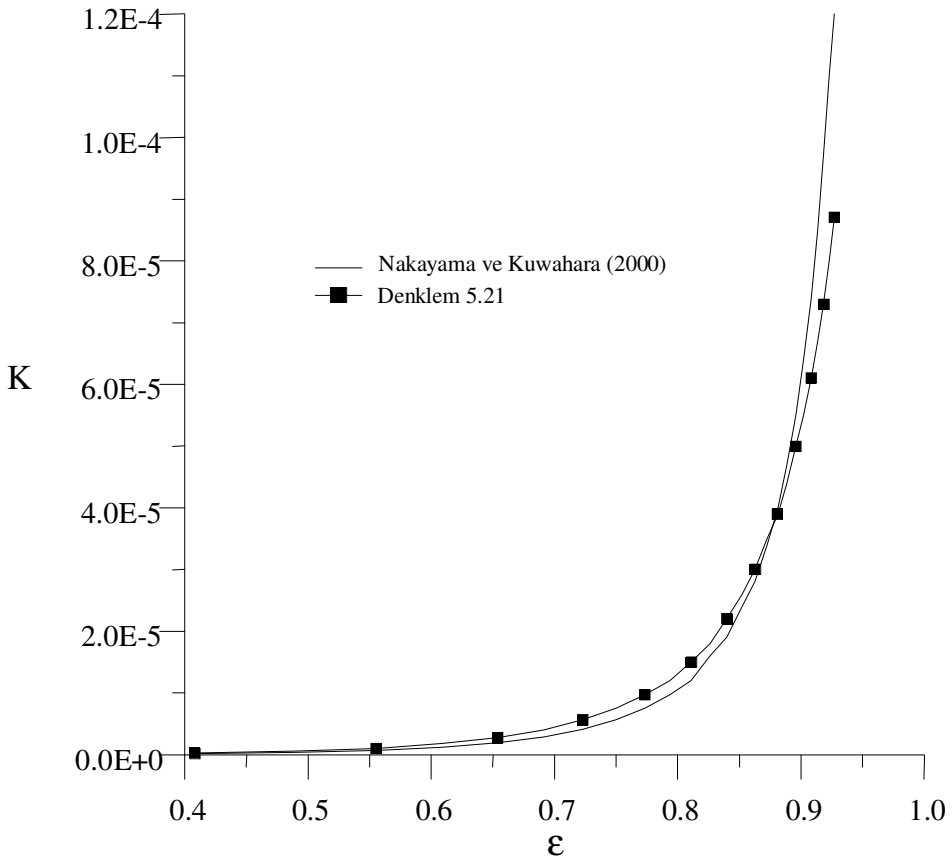
için elde edilmiş yeni bağıntıyı daha önceki yöntemlerle karşılaştıran Şekil 6.1'de görülmektedir.



Şekil 6.1 : Denklem **5.17**'nin diğer metodlarla karşılaştırılması

Grafikte gözenekliliğin 0.5'ten 1'e kadar olan değerleri için farklı yöntemlerle elde edilmiş geçirgenlik değerleri görülmektedir. Grafiğe göre gözenekliliğin yaklaşık 0.8'den küçük olduğu durumlarda tüm yöntemlerle elde edilen geçirgenlik değerleri birbirine yakın olmaktadır. Ancak gözenekliliğin yaklaşık 0.8'den büyük olduğu durumlarda yöntemlerin verdiği sonuçlar arasında farklar ortaya çıkmaktadır. Profiller incelendiğinde yüksek gözeneklilik değerlerinde; parabolik sınır hız profili ile oluşturulan yeni yöntemin yine analitik bir yöntem olan Jackson ve James (1986) yöntemine yakın olan bir eğilim gösterdiği gözlemlenirken; lineer sınır hız profilinin kullanıldığı Tamayol ve Bahrami (2009) yönteminin tamamen ampirik bir yöntem olan Nakayama ve Kuwahara (2000) yöntemine yakın olan bir eğilim gösterdiği gözlenmektedir.

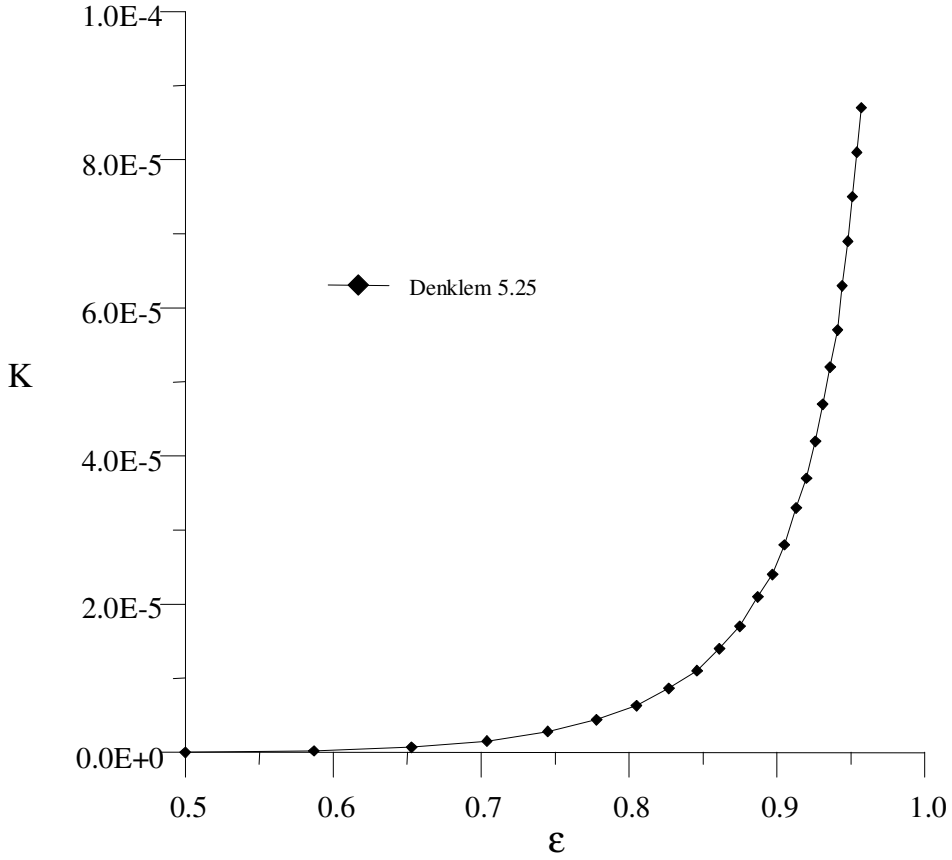
Kare çubuklarla oluşturulmuş gözenekli ortamlarda geçirgenlik hesabı için kullanılan başka bir analitik yöntem literatürde bulunmadığı için yeni sunulan analitik yöntemle elde edilen sonuçlar Şekil 6.2'de sadece Nakayama ve Kuwahara (2000) tarafından ortaya konulmuş olan ampirik yöntem sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.2 : Denklem **5.21**'in diğer metodlarla karşılaştırılması

Grafiğe göre yaklaşık olarak 0.8'den küçük gözeneklilik değerleri için her iki yöntemle de elde edilen sonuçlar birbirine çok yakın olurken, büyük gözeneklilik değerleri için yöntemlerin sonuçları arasında kabul edilebilir sınırlar içinde kalan farklar ortaya çıkmaktadır. Bu uyum, çalışmanın amaçları arasında olan farklı geometriler için geçirgenliği veren analitik bağıntıların türetilmesi işinin başarılı bir şekilde gerçekleştiğini de göstermektedir.

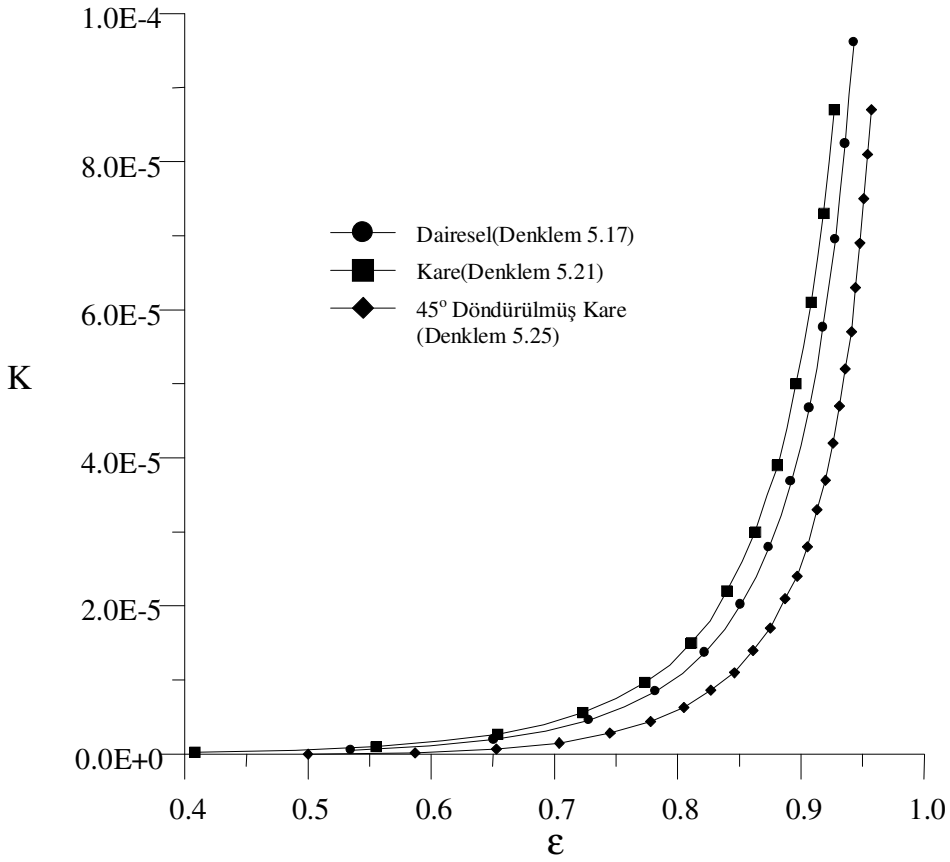
Yapılan literatür araştırmalarında 45^{o} döndürülmüş kare çubuklarla oluşturulan gözenekli ortamların geçirgenliğini veren analitik veya ampirik herhangi bir bağıntı bulunamamıştır. Bu nedenle Şekil 6.3'te sadece bu çalışmada türetilen analitik yöntemle elde edilen geçirgenliğin gözenekliliğe göre değişimi grafiği verilmiştir.



Şekil 6.3 : Denklem **5.25** için geçirgenliğin gözeneklilikle değişimi

Bu profilin her ne kadar başka bir yöntemle karşılaştırılabilme imkanı olmasa da yüksek gözeneklilik değerlerinde aniden artan geçirgenliği ile mantıklı bir eğilim gösterdiği söylenebilir.

Çalışmada geçirgenliği analitik olarak hesaplamak için sunulan bağıntıların kullanımıyla elde edilmiş olan gözeneklilik-geçirgenlik grafikleri çubuk geometrisinin ortaya çıkardığı sonucun anlaşılması için Şekil 6.4'te bir arada verilmiştir.

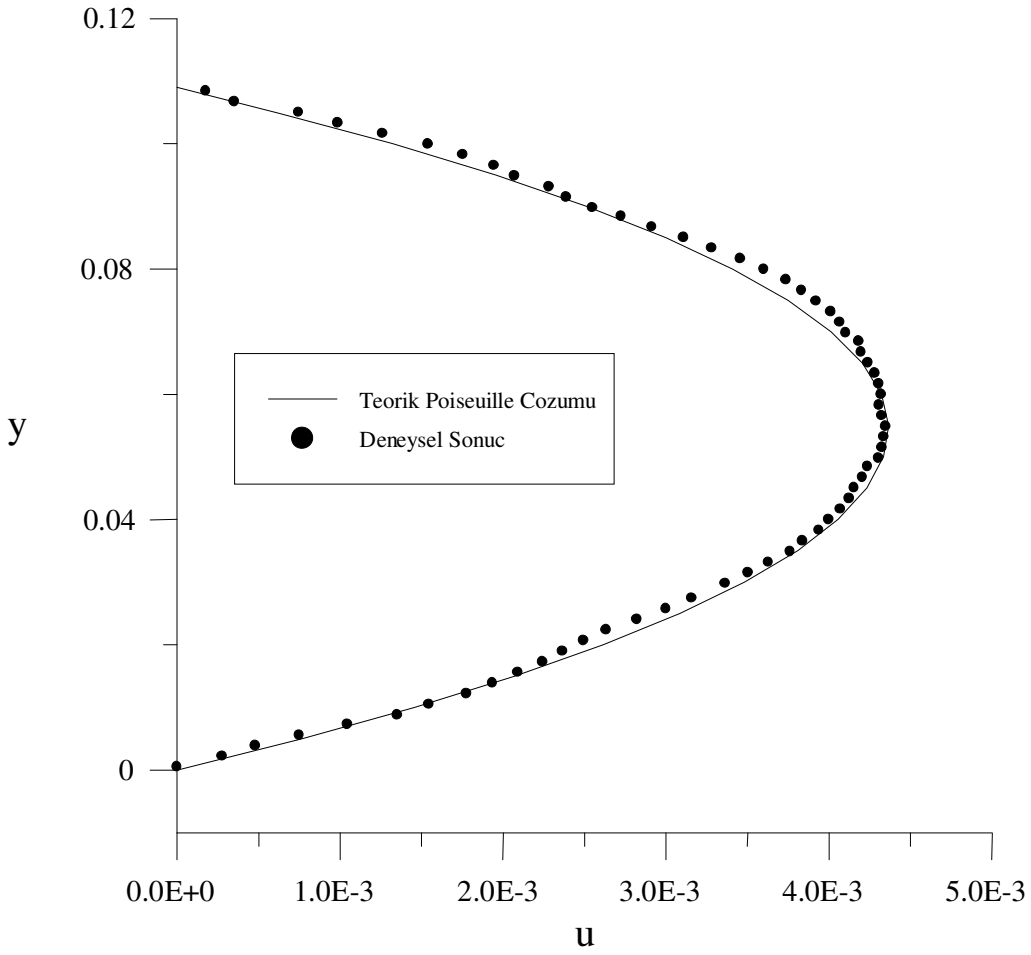


Şekil 6.4 : Geçirgenliğin çubuk geometrisine göre değişimi

Şekle göre değişen geometrinin geçirgenlik üzerinde kayda değer bir etki sahibi olduğu açıktır. Aynı gözeneklilik değerleri için en yüksek geçirgenliği kare çubuklardan oluşan gözenekli ortam sağlarken en düşük geçirgenliği 45^o döndürülmüş kare çubuklardan oluşan gözenekli ortamın sağladığı rahatlıkla görülmektedir.

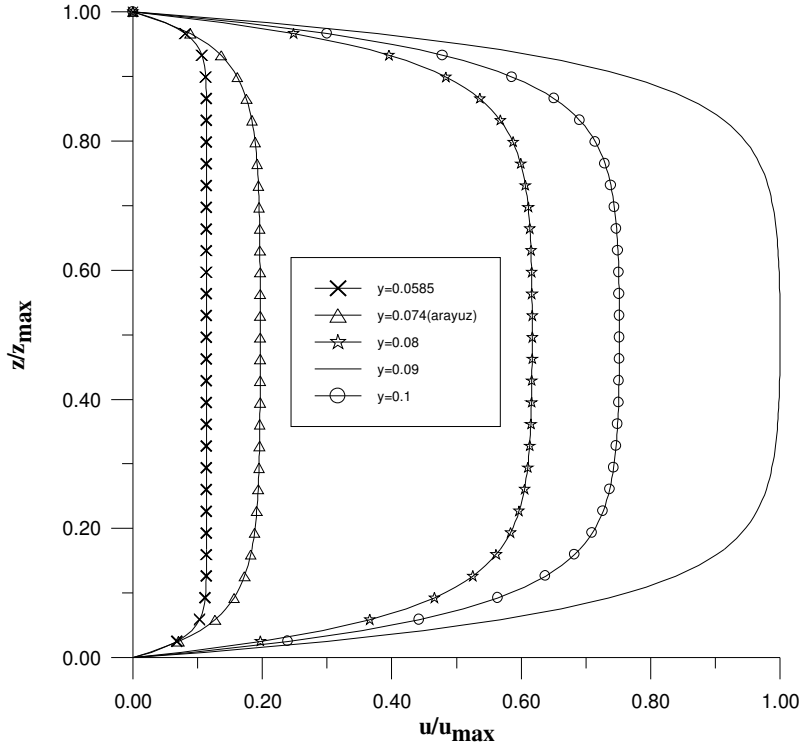
6.2 Sayısal ve Deneysel Sonuçlar

Sonuçların değerlendirilmesi aşamasında ilk olarak yapılan boş kanal DPIV ölçümlerinin sonucunda ölçüm bölgesindeki akışın tam gelişmiş laminer akış şartlarını sağlayıp sağlamadığının kontrolüdür. Buna göre Şekil 6.5'de de görüldüğü gibi boş kanal ile yapılan deney verilerinden oluşturulan hız profili analitik olarak hesaplanan laminer akış Poiseuille hız profili ile iyi bir uyum göstermiştir. Bu akış türüne göre kanal merkezindeki hız değeri ortalama hızın 1.5 katı olmaktadır.

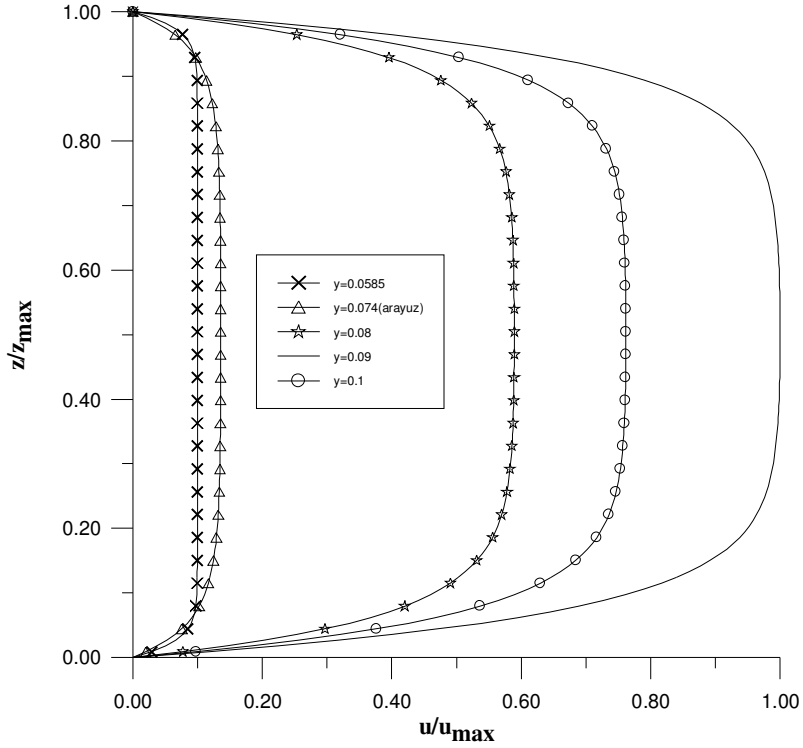


Şekil 6.5 : Boş kanaldaki hız profilinin Poiseuille profili ile karşılaştırılması

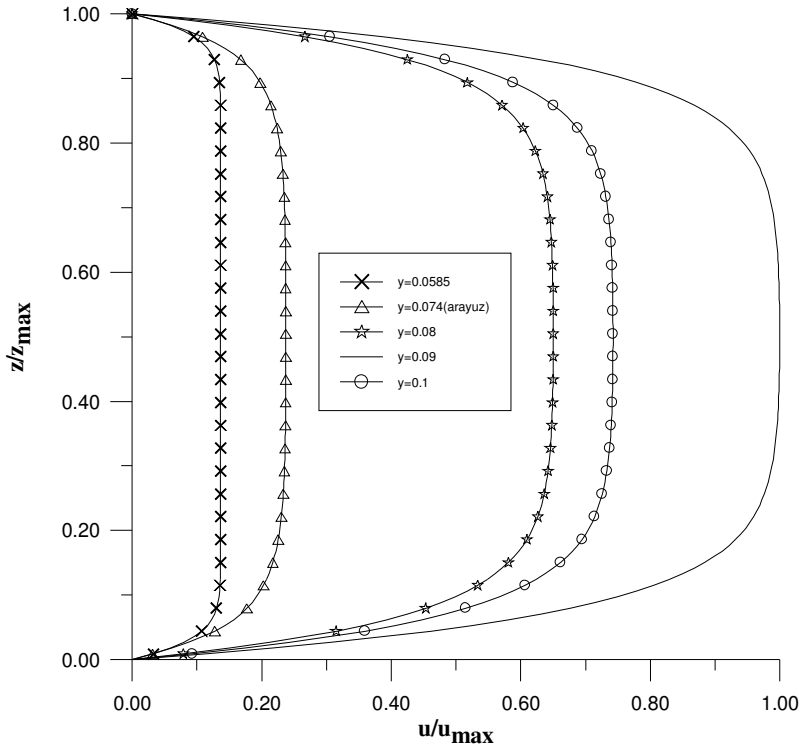
Kanalda girişte çıkışa doğru akım yönündeki doğrultunun x ekseni, tabandan tavana doğru olan doğrultunun y ekseni olarak alındığı belirtilmişti. Buna göre çubukların bir ucundan diğer ucuna olan derinlik de z eksenidir. Bu eksen üzerinde yan duvarların birbirine yakınlığının üç boyutluluk etkilerini devreye sokma ve sonuçların güvenilirliğini tehlikeye atma riski vardır. Bunun için sonuçların yorumlanması aşamasında yapılması gereken en öncelikli işlerden biri kanalda yan duvarlar nedeniyle bir üç boyutluluk etkisinin oluşup oluşmadığının kontrolüdür. Bu kontrol Fluent ile elde edilen sayısal çözüm yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.6, 6.7 ve 6.8'de görülen grafiklerde z ekseni doğrultusunda ve farklı y yüksekliklerinde 33 ve 34'üncü silindirlerin merkezlerinin tam ortasından alınmış hız profilleri görülmektedir. Profillerin alındığı y yükseklikleri hem arayüzü, hem serbest akış bölgesini hem de gözenekli ortamı içermektedir.



Şekil 6.6 : Dairesel geometri için farklı y konumlarında duvar etkilerinin kontrolü



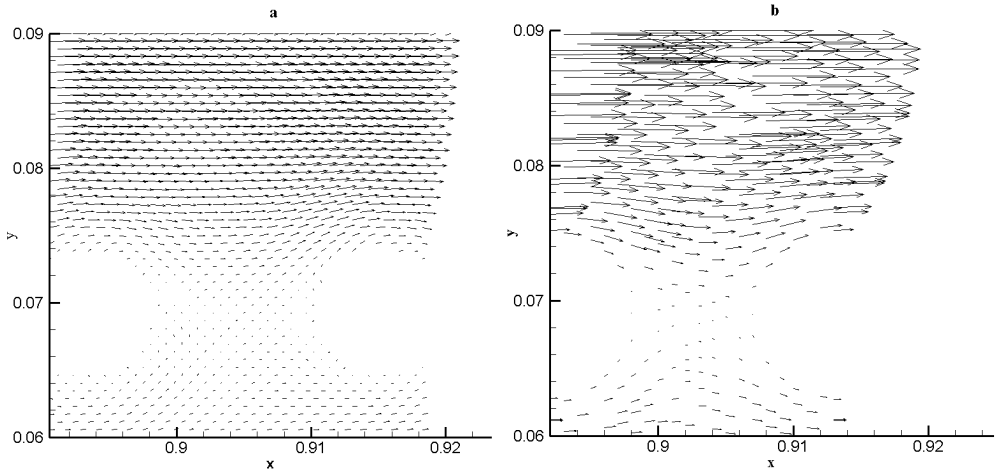
Şekil 6.7 : Kare geometri için farklı y konumlarında duvar etkilerinin kontrolü



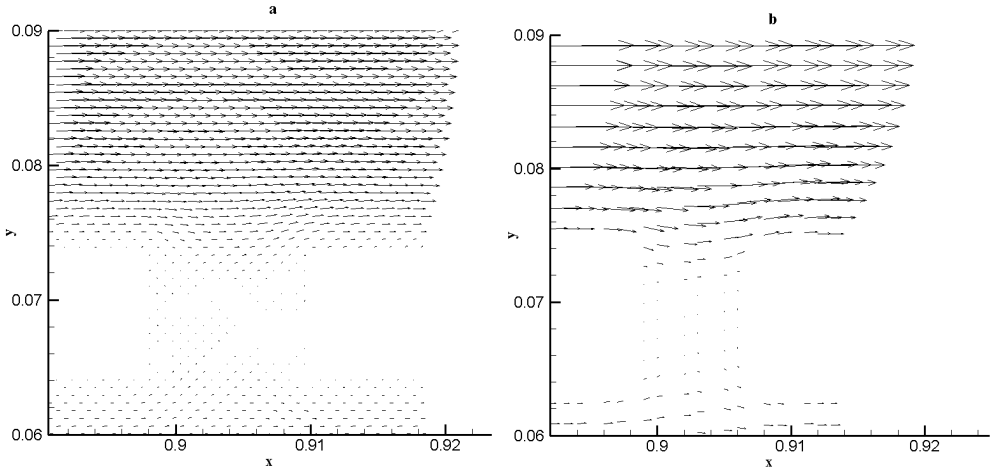
Şekil 6.8 : 45^{o} döndürülmüş kare geometri için farklı y konumlarında duvar etkilerinin kontrolü

Grafiklere göre her üç gözenekli ortam geometrisinde de yan duvarlara yakın küçük bir sınır tabaka bölgesi haricinde hız profillerinin z ekseni boyunca lineer olduğu görülmektedir. Yani z ekseni doğrultusunda hızlar büyük ölçüde sabit ve hız profilleri merkeze göre simetriktir. Bu da kanalda üç boyutluluk etkileri olmadığını ve z ekseninin ortaları civarında bir y-x düzlemi kesit olarak alınarak iki boyutluluk kabulü yapılabileceğini gösterir.

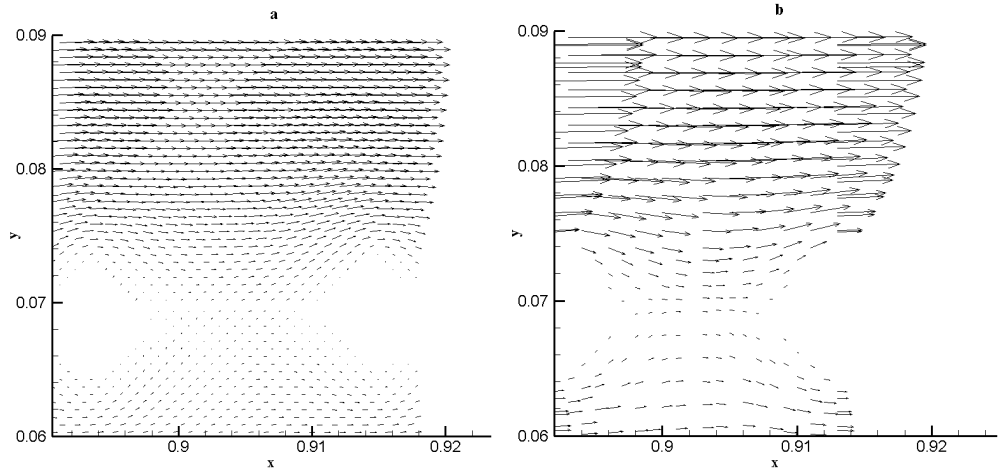
Şekil 6.9-11'de arayüz civarında hem sayısal hem de deneysel verilerden her üç geometri için de elde edilmiş olan hız vektör haritaları verilmiştir. Her üç geometride de sayısal ve deneysel vektör haritaları birbiriyle uyumlu sonuçlar göstermiştir.



Şekil 6.9 : Dairesel geometri vektör haritaları (a)deneysel (b)sayısal



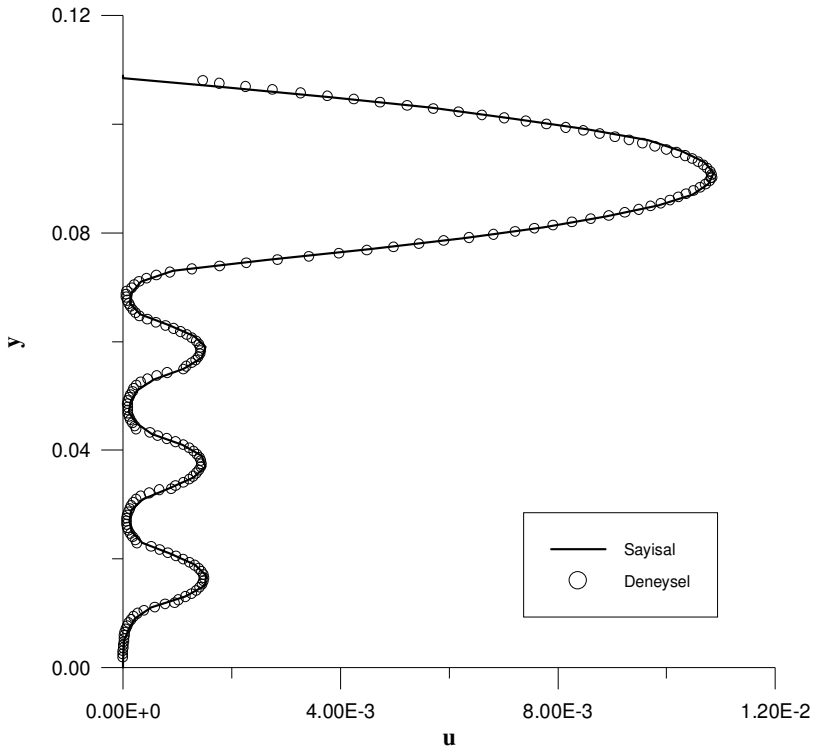
Şekil 6.10 : Kare geometri vektör haritaları (a)deneysel (b)sayısal



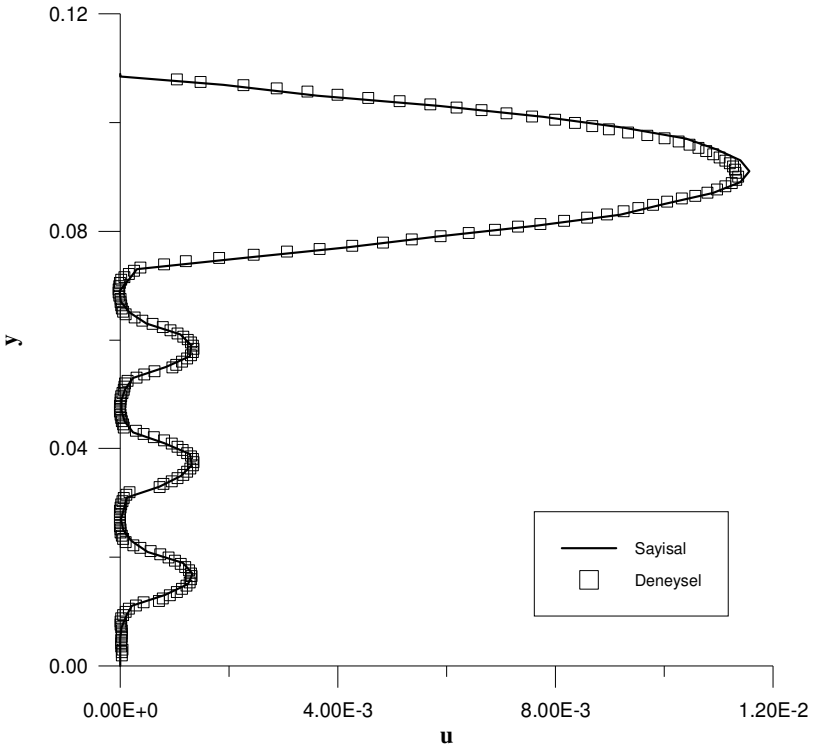
Şekil 6.11 : 45^{o} döndürülmüş kare geometri vektör haritaları (a)deneysel (b)sayısal

Bu vektör haritalarına bakıldığında serbest akış bölgesinde hız vektörlerinin gözenekli bölgeye göre çok daha büyük oldukları görülmektedir. Gözenekli bölgedeki hız vektörlerinin serbest akış bölgesine göre oldukça küçük kalmaları nedeniyle kanal içinde farklı büyüklük mertebelerinde iki ayrı hız alanının bulunduğu düşünülebilir. İşte bu iki bölge arasındaki geçiş arayüz civarında gerçekleşmektedir. Gözenekli ortam içlerinden serbest akış bölgesine geçilirken arayüz civarında ortaya çıkan yüksek hız gradyenleri vektör haritalarından görülmektedir.

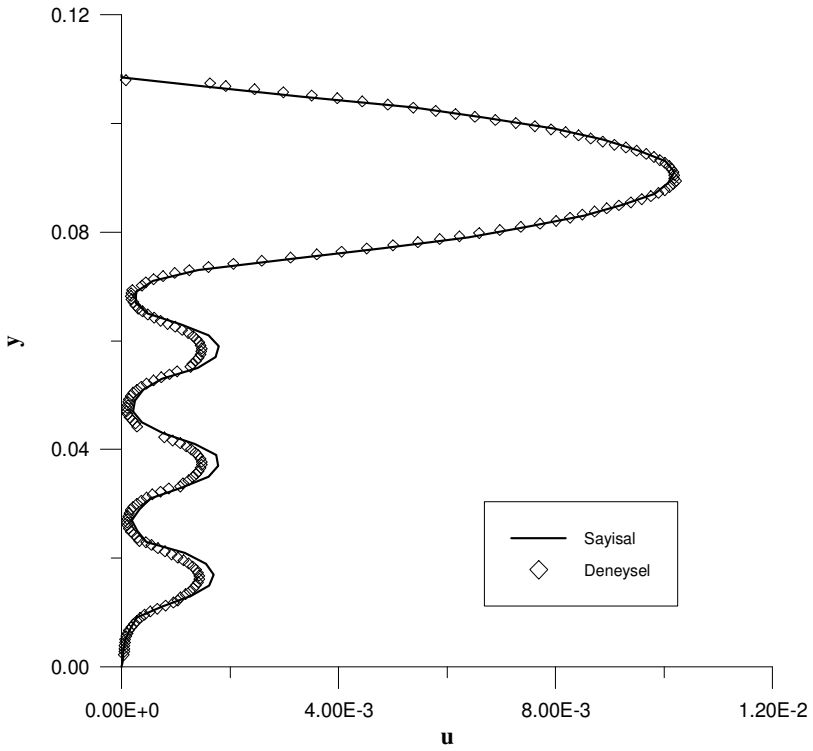
Kanal tabanından kanal tavanına kadar olan hız dağılımları her üç geometri için de Şekil 6.12-14'te verilmiştir. Profiller hem deneysel hem de sayısal çözüm için yine 33 ve 34'üncü sütunlar arsında hız vektörlerinin belirli y seviyelerinde ortalamalarının alınmasıyla elde edilmiştir. Bu y seviyeleri deneysel ve sayısal vektör haritalarının çözünürlüğüne göre belirlenmiştir.



Şekil 6.12 : Dairesel geometride sayısal ve deneysel hız profilleri



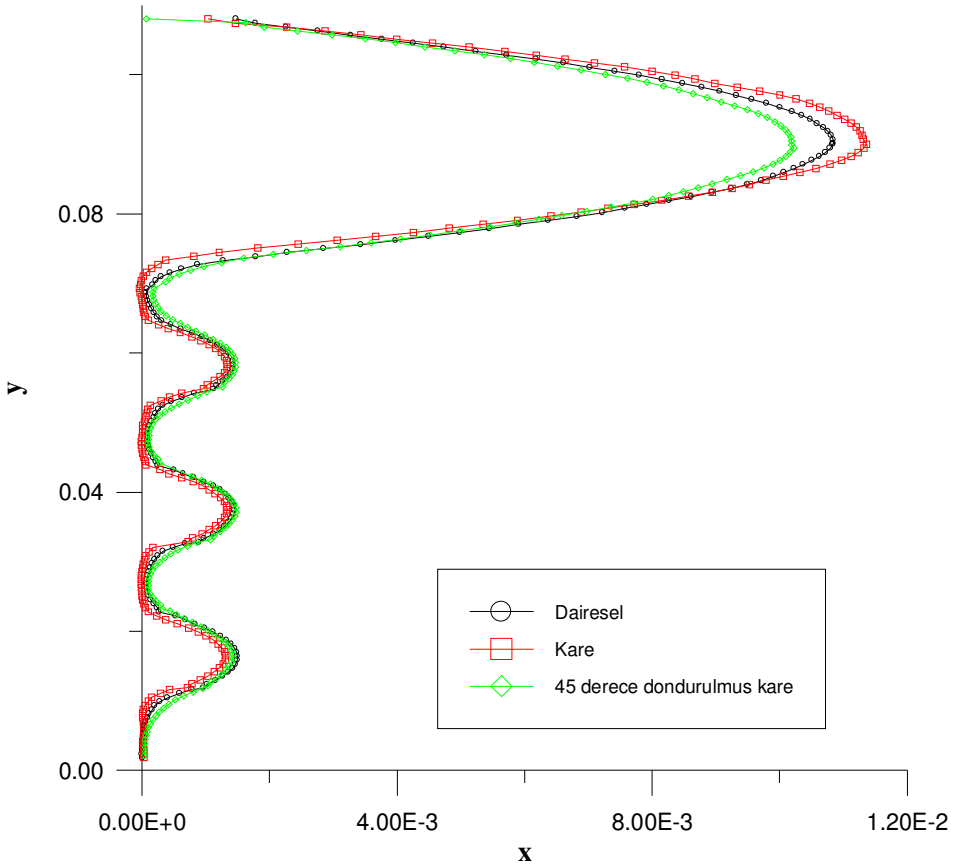
Şekil 6.13 : Kare geometride sayısal ve deneysel hız profilleri



Şekil 6.14 : 45^{o} döndürülmüş kare geometride sayısal ve deneysel hız profilleri

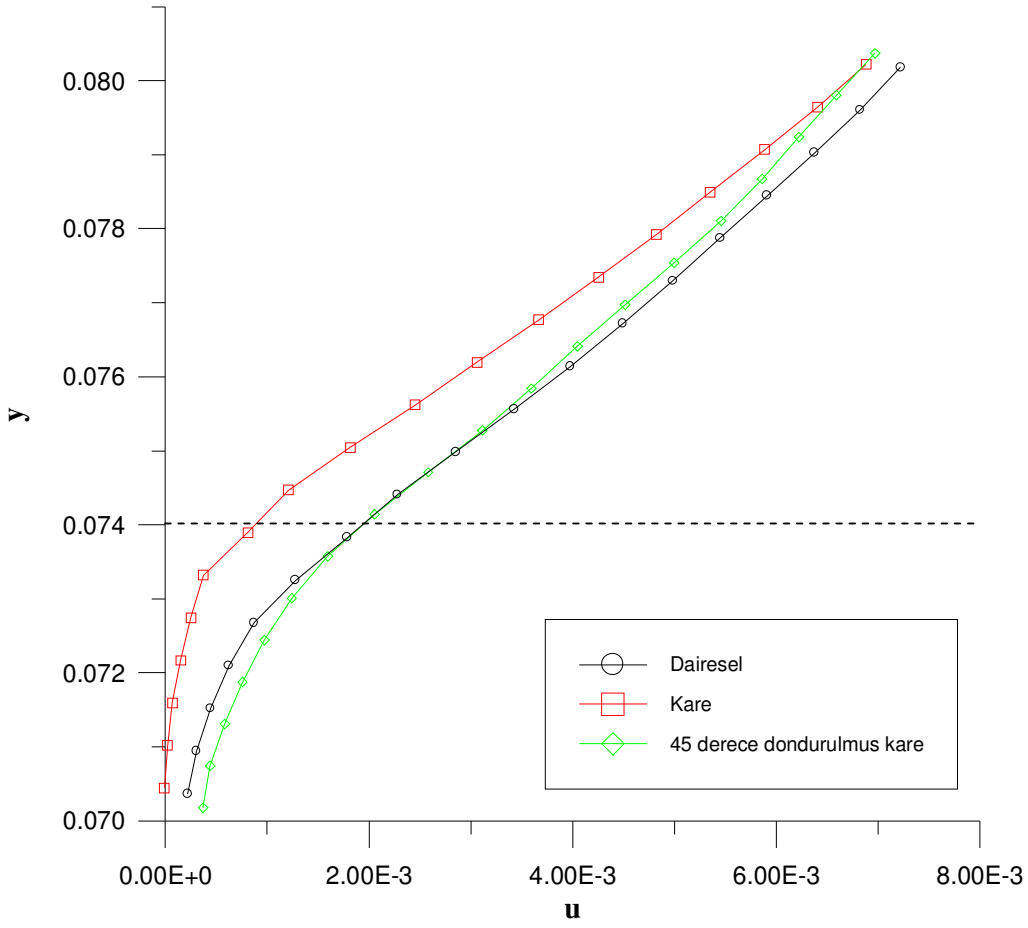
Her üç çubuk geometrisi için de deneysel ve sayısal hız profillerinin birbirleriyle oldukça iyi bir uyum içerisinde oldukları görülmektedir. Bu da her üç çubuk geometrisi için de deneysel ve sayısal sonuçların birbirlerini doğruladıklarının göstergesidir. Her üç geometri için de hızın arayüzden gözenekli ortam içlerine doğru hızlı bir düşüş gösterdiği, arayüzden serbest akım bölgesine doğru ise bunun tam tersi olarak çok hızlı bir artış göstererek serbest akım bölgesinde maksimum hıza ulaştığı görülmektedir.

Çalışmanın en başta gelen amaçlarından biri çubuk geometrisinin hız dağılımı ve arayüz hızları üzerindeki etkisinin tespit edilmesiydi. Bu etkinin ortaya çıkartılabilmesi için yukarıda ayrı ayrı verilmiş olan hız profilleri Şekil 6.15'te üst üste çizdirilerek hız profillerinin çubuk geometrilerine göre değişiminin gözlemlenebilir hale gelmesi sağlanmıştır. Deneysel ve sayısal çözümler birbirlerine çok yüksek uyum sağladığı için bu grafik oluşturulurken sadece deneysel verilerden oluşturulan profillerin çizdirilmesi yeterli görülmüştür.



Şekil 6.15 : Farklı geometrilerde hız profillerini karşılaştırılması

Grafiğe göre her üç geometride gözenekli ortam için de kanala giriş hızı aynı ve sabit olmasına rağmen serbest akış bölgesinde oluşan maksimum hız değerleri farklı olmaktadır. Buna göre en yüksek maksimum hız değeri kare çubuklardan oluşturulmuş gözenekli ortamda meydana gelirken, en düşük maksimum hız değerine ise 45^{o} döndürülmüş kare çubuklardan oluşturulmuş gözenekli ortamda rastlanmıştır. Arayüz civarındaki hız davranışı ise Şekil 6.16 yardımıyla daha kolay yorumlanabilir. Bu grafik yukarıda hız profilini tüm bölge için veren Şekil 6.15'in arayüz civarındaki kısmının daha büyük bir ölçekte çizilmesiyle elde edilmiştir.



Şekil 6.16 : Farklı geometrilerde arayüz bölgesi hız profillerinin karşılaştırılması

Kanalda gözenekli ortam ve serbest akış bölgesi arasındaki arayüz hattının tabandan itibaren 0.074 m konumunda olduğu deney düzeneğinin tanıtımı kısmında verilmişti. Şekil 6.16 yardımıyla arayüz hızlarının çubuk geometrisine göre değişimi gözlemlendiğinde serbest akış bölgesinde en yüksek maksimum hız değerine sahip olan kare kesitli çubuklardan oluşturulmuş gözenekli ortamın en düşük arayüz hızına sahip olduğu görülmektedir. Dairesel ve 45^{o} döndürülmüş kare çubuklardan oluşan

gözenekli ortamların ortaya çıkardığı arayüz hızlarının ise birbirine çok yakın olduğu görülmektedir.

Matematik modelin verildiği kısımda da verildiği gibi α kayma katsayılarını arayüz civarındaki hız gradyenlerini kullanarak bulmak mümkündür. Şekil 6.16'daki eğrilere arayüz civarında teğet olan doğrular oluşturularak hız gradyenleri elde edilebilir. Bu işlemin yapılmasıyla da değişen gözenekli ortam geometrisine göre arayüz hızının nasıl değiştiği bilgisine ulaşılabilecektir. Buna göre tüm gözenekli ortam geometrileri için elde edilmiş arayüz hızları ve matematik modelde kullanılan diğer büyüklükler Çizelge 6.2'de verilmiştir. Çizelgede verilen u_i arayüz hızları ve u_{max} serbest akış maksimum hızları deneysel verilerden alınan değerlerdir. Gözenekli ortam içindeki hız değeri olarak kabul edilen u_d ise yine deneysel verilerden bu bölgedeki hız değerlerinin ortalaması alınarak elde edilmiştir. Arayüz hattındaki hız gradyenini veren $(du/dy)_i$ değerleri yukarıda da belirtildiği gibi Şekil 6.16'da verilen profillerde arayüz hattına teğet oluşturulması ile elde edilmiştir. $\sqrt{k}$ değerlerine ise denklem **(5.17)**, **(5.21)** ve **(5.25)** kullanılarak elde edilen geçirgenlik değerlerinin kare kökünün alınmasıyla ulaşılmış ve tüm bu bilinenler aracılığıyla denklem **(2.4)**'teki α kayma katsayılarına ulaşılmıştır.

Çizelge 6.2 : Farklı geometrilere göre elde edilen büyüklüklerin karşılaştırılması

	Dairesel	**Kare**	**45^o Döndürülmüş Kare**
$\mathbf{u_i}$	0.002869	0.001768	0.002855
$\mathbf{u_d}$	6.51E-04	5.03E-04	7.05E-04
$\mathbf{u_{max}}$	0.010846	0.013561	0.010224
$\mathbf{(du/dy)_i}$	0.995151	1.0822	0.895351
$\boldsymbol{\sqrt{k}}$	3.70E-03	3.12E-03	4.55-03
α	1.66	2.67	1.89

Bu büyüklüklerin elde edilmesiyle birlikte çalışmanın öncelikli amacı olarak belirtilen arayüz civarındaki hız ve hıza bağlı büyklüklerin değişen geometriye göre ortaya çıkardıkları davranış yorumlanabilir hale gelmiştir. Farklı geometrilerde ortaya çıkan arayüz hızları karşılaştırıldığında Şekil 6.16 için de ifade edildiği gibi en düşük arayüz hızının kare kesitli geometride ortaya çıktığı, dairesel geometride ortaya çıkan hızın ise 45^o döndürülmüş kareye göre çok küçük bir miktarda daha fazla olduğu görülmektedir. α kayma katsayısı değerlerine bakıldığında da en yüksek değeri kare çubuklardan oluşan gözenekeli ortam sağlarken, en düşük değeri veren geometri daireseldir. Yani arayüz hızları ile α kayma katsayıları arasında birbirinin

tersi yönde gelişen bir ilşki vardır. Geometriye göre arayüz hızı artıkça α kayma katsayısı düşmektedir. Hız gradyenlerinin değişen geometriye göre davranışının incelenmesiyle ise en yüksek hız gradyeninin kare geometride ortaya çıktığı görülürken, en düşük hız gradyeninin ise 45^o döndürülmüş kare geometride meydana geldiği görülmektedir. Kare geometride çubuklardan oluşturulmuş gözenekli ortamın serbest akış bölgesinde en yüksek maksimum hız değerine sahip olduğu düşünülürse böyle büyük bir gradyene ihtiyaç duyması anlaşılabilir. Bu durumun tam tersi 45^o döndürülmüş kare çubuklarda oluşan gözenekli ortam için geçerlidir. Buna göre artan maksimum hız değerleri ile hız gradyenlerinin de arttığı söylenebilir yani maksimum hız değerleri ve hız gradyenleri arasında aynı yönlü bir ilişki olduğu söylenebilir.

6.3 Yorum

Yapılmış olan bu çalışma ile bir kısmı gözenekli ortam içeren bir kanalda gözenekli ortam ve serbest akış bölgesi arasında bulunan arayüz hattındaki hız ve hıza bağlı değişkenlerin gözenekli ortamı oluşturan çubuk geometrilerinden ne şekilde etkilendiğini ortaya koymak amacıyla hem deneysel hem de sayısal yöntemlerin devreye sokulduğu oldukça geniş kapsamlı bir araştırma meydana çıkartılmıştır. Buna ilave olarak bir de gözenekli ortam çalışmalarında oldukça önemli bir büyüklük olan geçirgenliğin tespiti amacıyla farklı gözenekli ortam geometrilerine yönelik analitik bir hesaplama yöntemi ortaya konulmuştur.

Çalışmanın deneysel kısmında farklı geometrilerde çubuklar kullanılarak oluşturulmuş gözenekli ortamlarda hız dağılımları incelenmiş ve her geometri için arayüz bölgeleri civarında gözenekli ortamdan serbest akış bölgesine geçiş olayında ortaya çıkan oldukça büyük hız gradyeni gözlemlenmiştir. Elde edilen hız profilleri yardımıyla incelenen üç geometri tipi için de arayüz hızları ve serbest akış bölgesinde meydana gelen maksimum hızlar karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmaya göre en düşük arayüz hızının kare çubuklardan oluşturulmuş gözenekli ortamda oluştuğu tespit edilirken dairesel çubuklardan oluşturulmuş gözenekli ortamda ortaya çıkan arayüz hızının 45^o döndürülmüş çubuklardan çok az bir miktarda yüksek olduğu anlaşılmıştır. Serbest akış bölgesinde ortaya çıkan maksimum hızlar karşılaştırıldığında ise en yüksek maksimum hızın kare çubuklardan oluşturulumuş gözenekli ortamda, en düşük maksimum hızın ise 45^o döndürülmüş kare çubuklarda meydana geldiği görülmüştür. Tüm bu gözlemlere göre; yapılan bu çalışmada

gözenekli ortamı oluşturan çubukların geometrilerinin değiştirilmesi yolu ile hız profillerinin değiştirlebileceği çok net bir şekilde ortaya çıkarılmıştır.

Geçirgenliğin hesaplanması için analitik bir yöntemin ortaya konulmasını amaçlayan çalışmanın diğer kısmında ise incelemesi yapılan her üç gözenekli ortam geometrisi için de sözkonusu analitik bağıntılar başarılı bir şekilde elde edilmiştir. Dairesel ve kare geometrilerde çubukların kullanıldığı gözenekli ortamlar için elde edilen bağıntılar daha önceden ortaya konulmuş olan bağıntılarla karşılaştırıldığında güvenilir sonuçlara ulaşıldığı görülmüştür. 45^o döndürülmüş kare çubukların kullanıldığı gözenekli ortam için ise daha önceden ortaya konulan bir geçirgenlik hesabına literatürde rastlanmamıştır. Bu sebeple bu geometri için ortaya konulan bağıntı çalışmanın katkısı olarak değerlendirilebilir. Çalışmanın bu kısmında yapılanlar sadece sözkonusu üç gözenekli ortam geometrisi için analitik geçirgenlik hesabını vermekle kalmamış ayrıca çok farklı pek çok geometriye uygulanabilecek bir yöntem sunmuştur.

KAYNAKLAR

Agelichaab, M., Tachie, M.F. ve Ruth, D.W., 2006. Velocity measurement of flow through a model three-dimensional porous medium, *Physics of Fluids*, Vol. **18**, 017105-1, 11

Baytaş, A.C., 2006. Gözenekli ortamlarda taşınım olayı, *İTÜ dergisi/c fen bilimleri*, Cilt:**4**, Sayı:1, 3-13

Beavers, G.S. ve Joseph, D.D., 1967. Boundary conditions at a naturally permeable wall, *J. Fluid Mech.*, Vol.**30**, 197- 207

Brinkman, H.C., 1947. A calculation of the viscous force exerted by a flowing fluid on a dense swarm of particles, *Applied Scientific Research*, A,Vol. **1,** 27-34

Dullien, F.A.L., 1992. *Porous Media, Fluid Transport and Pore Structure*, Academic Press, INC. New York

Ergün, S., 1952. Fluid flow through packed columns, *Chem. Eng. Process*, Vol. **48** (1952) 89-94.

Goharzadeh, A., Khalili, A. ve Jorgensen, B.B., 2005. Transition layer thickness at a fluid-porous interface, *Physics of Fluids*, Vol. **17**, 057102

Gupte, S.K. ve Advani, S.G., 1997. Flow near the permeable boundary of a porous medium: An experimental investigation using LDA, *Experiments in Fluids* Vol. **22**, pp. 408-422

Jackson, G.W. ve James, D.F., 1986. The permeability of fibrous porous media, *The Canadian Journal Of Chemical Engineering*, Vol. **64**, pp. 364-374

Macdonald, I.F., El-Sayed, M.S., Mow,K. ve Dullien, F.A.L., 1979. *Flow through porous media*, Vol. **18** (3), 199-208

Nakayama, A. ve Kuwahara, F., 2000. Numerical modelling of convective heat TRANSFER in porous media using microscopic structures, *Handbook of Porous Media*, ed. by Kambiz Vafai, pp. 441- 488, Marcel Dekker

Nield, D.A., ve Bejan, A., 2006. *Convection in Porous Media (3rd edition.)*, Springer, New York

Patankar, V. S., 1980. *Numerical heat transfer and fluid flow*, Hemisphere Pub. Cor., New York

Sangani, A.S. ve Acrivos, A., 1982. Slow flow past periodic arrays of cylinders with application to heat transfer, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. **8** (3), pp. 193-206

Shams, M., James, D.F. ve Currie, I.G., 2003. The velocity field near the edge of a model porous medium, *Exp. Fluids*, Vol. **35**, pp. 193-198

Tachie, M.F., James, D.F. ve Currie, I.G., 2004. Slow flow through a brush, *Phys. Fluids*, Vol. **16**, pp. 2-7

Tachie, M.F., James, D.F. ve Currie, I.G., 2003. Velocity measurements of a shear flow penetrating a porous medium, *J. Fluid Mech*, Vol. **493**, pp. 319-343

Tamayol, A. ve Bahrami, M., 2009. Analytical determination of viscous permeability of fibrous porous media, *Int. J. of Heat and Mass Trans.*, Vol. **52**, 2407-2414

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Hasan BAŞCI

Doğum Yeri ve Tarihi: Ankara 06.07.1985

Adres:

Lisans Üniversite: Eskişehir Osmangazi Üniveristesi Makina Mühendisliği Bölümü