

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YARISI GÖZENEKLİ ORTAM İLE DOLU KANALDA
ARAYÜZEY HIZININ
DENEYSEL OLARAK TESPİTİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Sema ARSLAN**

Anabilim Dalı : Uçak ve Uzay Mühendisliği

Programı : Uçak ve Uzay Mühendisliği

Tez Danışmanı: Prof. Dr. A. Cihat BAYTAŞ

EYLÜL 2009

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YARISI GÖZENEKLİ ORTAM İLE DOLU KANALDA
ARAYÜZEY HIZININ
DENEYSEL OLARAK TESPİTİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Sema ARSLAN
(511071129)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04 Eylül 2009
Tezin Savunulduğu Tarih : 17 Eylül 2009**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. A. Cihat BAYTAŞ (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Yrd. Doç. Dr. Duygu ERDEM (İTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Yalçın URALCAN (İTÜ)**

EYLÜL 2009

ÖNSÖZ

Gözenekli ortamlarda akış olayları çeşitli mühendislik disiplin alanlarında çok geniş uygulama alanlarına sahiptir. Bu kadar yaygın olması yanında yeniliklere açık ve gelişmekte olması tam olarak bilimsel açıklığa kavuşmamış bölümlerin olduğunun bir göstergesidir. Bu konu mühendislik disiplinleri dışında yer bilimleri, akarsu yatakları ve tıp alanında da uygulama alanına sahiptir.

Bu nedenle çalışmanın temel amacı gözenekli ortamların bulunduğu ve ilgili olduğu bölümlerde akış olaylarının tam olarak anlaşılmasına yardımcı olmak olmuştur. Teorik ve sayısal çalışmalarla konuyu sınamak ve deneysel çalışmayı gerçekleştirip çıkan sonuçların doğruluğunu sayısal sonuçlarla karşılaştırmak bu çalışmanın hedefleri arasında birinci sırada gelmiştir.

Çalışmanın sonunda öncelikle danışmanım Prof. Dr. A. Cihat BAYTAŞ'a, her türlü yardım ve desteği için minnetlerimi sunarım.

Yrd. Doç. Dr. Duygu ERDEM, Yrd. Doç. Dr. Hayri ACAR ile Doç Dr. N. L. Okşan ÇETİNER'e değerli katkı ve yardımlarından dolayı teşekkürü bir borç bilirim. Deney düzeneğinin yapımı sırasında her türlü yardımı yapan Teknisyen Aliosman TABANLI'ya ayrıca teşekkür ederim.

Trisonik Araştırma Merkezi'ndeki tüm arkadaşlara her türlü yardım ve ayrıca değerli dostlukları için teşekkürler.

Aileme sevgi dolu yürekleri, bana olan güvenleri ile hayat yolumu aydınlattıkları için özellikle anne ve babama çok teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışmaya ve 107M592 No'lu bilimsel araştırma projesine olan değerli katkıları nedeniyle TÜBİTAK'a teşekkürlerimi iletirim. İTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne, Lisansüstü Tezlerini Destekleme Programı'nda çalışmamıza yaptıkları değerli katkılar için teşekkür ederim.

Eylül 2009

Sema ARSLAN

Uçak Mühendisi-Özel Pilot

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	ii
ÖZET.....	xii
SUMMARY.....	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1 Gözenekli Ortam Dolu Kanalda Akış Problemi ve Uygulama Alanları	2
1.2 Bu Konuda Daha Önce Yapılan Çalışmalara Topluca Bir Bakış	2
2. MATEMATİK MODELLEME VE ANALİTİK ÇÖZÜM	9
2.1 Matematik Model	9
2.2 Problemin Açıklanması	10
2.3 Analitik Çalışma-Kesin Çözüm	13
2.3.1 Analitik Çalışma-Berrak Akışkan Bölgesi	13
2.3.2 Analitik Çalışma-Gözenekli Ortam Dolu Bölge	15
2.3.3 Analitik Çalışma-Arayüzey	19
2.4 Analitik Çözüm	21
3. SAYISAL ÇÖZÜMLEME.....	29
3.1 Sayısal Çözümlemede Fluent ve Gridgen Mühendislik Programları.....	29
3.1.1 Geçirgenlik Hesabı	32
3.2 Sayısal Çözümleme Sonuçları	34
4. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	43
4.1 Deney Düzeneği	44
4.2 Gözenekli Ortam	46
4.3 Hız Alanı Görüntüleme Tekniği - DPIV	47
4.4 Deneyin Yapılışı.....	49
4.5 Deney Sonuçları	50
5. SONUÇLAR.....	57
KAYNAKLAR.....	59
EKLER.....	63
EK A.1	64
EK A.2	65

KISALTMALAR

A	: Alan (m^2)
c, c₁, c₂, C	: İntegral Sabitleri
C_E	: Şekil Sürüklenme Katsayısı
D	: Silindir Çapı (m)
Da	: Darcy Sayısı
DPIV	: Digital Particle Image Velocimetry
F	: Forchheimer Sürüklemesi
h_f	: Akışkan Ortam Yüksekliği (m)
h_p	: Gözenekli Ortam Yüksekliği (m)
H	: Kanal Toplam Yüksekliği (m)
g(ε)	: Gözenekliliğe Bağlı Lineer Fonksiyon, $g(ε)=1.274ε-0.274$
K	: Geçirgenlik (m^2)
l	: Gözenekli Ortam ile Kanal Taban Duvarı Arasındaki Mesafe (m)
L	: Uzunluk (m)
LDA	: Laser Doppler Anemometry
P	: Basınç (N/m^2)
PET	: Positron Emission Tomography
PIV	: Particle Image Velocimetry
Q̇	: Hacimsel Debi ($m^3/saat$)
r	: Silindir Yarıçapı (m)
Re	: Reynolds Sayısı
Re_{hf}	: Berrak Akışkan Bölgesi Reynolds Sayısı
ReL	: Berrak Akışkan için Atalet Parametresi
RIM	: Refractive Index Matching (Işığın Kırma İndisi Aynı Olan Katı-Akışkan Malzemeler ile Sınırdaki Akım Görüntüleme Tekniği)
u	: Berrak Akışkan Bölgesinde x-yönündeki Hız ($m.s^{-1}$)
u*	: Berrak Akışkan Bölgesinde Boyutsuz Hızı
U	: Gözenekli Ortam Dolu Bölgede x-yönündeki Hız ($m.s^{-1}$)
U*	: Gözenekli Ortam Dolu Bölgede Boyutsuz Hız
U₁	: Boyutsuz Sayılardan Oluşan Bir Sabit
U_i	: Arayüzey Hızı ($m.s^{-1}$)
U_B	: Boyutsuz Arayüzey Hızı (U_i^*)
U_D	: Darcy Hızı ($m.s^{-1}$)
x,y	: Kartezyen Koordinatlar (m)
y*	: Boyutsuz y Kartezyen Koordinatı
z	: Boyutsuz Bir Fonksiyon
α	: Kayma Sabiti
β	: Kayma Gerilmesi Sıçrama Koşulu Sabiti
ε	: Gözeneklilik
η	: Berrak Akışkan Kısım Özelliği Belirten Alt İndis
Λ_{hf}	: Atalet Parametresi
μ(μ₁)	: Dinamik Viskozite ($kg\ m^{-1}\ s^{-1}$)

$\mu_{eff}(\mu_2)$	: Etkin Viskozite ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)
ν	: Kinematik Viskozite ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
ϕ	: Gözenekli Ortam Katı Cisim Hacim Oranı, $\phi = 1 - \varepsilon$
ϕ'	: Boyutsuz Parametre, $\phi' = \pi/4\varepsilon$
ρ	: Yoğunluk (kg.m^{-3})
ρ_f	: Berrak Akışkan Yoğunluğu (kg.m^{-3})
ω	: Gözenekli Ortam Kısmı Özelliği Belirten Alt İndis

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 : Arayüzey için tanımlanmış hız sınır koşulları.....	12
Çizelge 2.2 : Berrak akışkan bölgede matematik model.....	15
Çizelge 2.3 : Gözenekli bölgede matematik model.....	19
Çizelge 2.4 : Arayüzey bölgesi için ortak çözümde kullanılacak bağıntılar.....	20
Çizelge 4.1 : Deneysel çalışma sonuçları.....	54
Çizelge 4.2 : Deneysel, Sayısal ve Analitik Çalışmalardan Elde Edilen Veriler.	55

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Gözenekli Kanalin Şematik Biçimsel Gösterimi ve Koordinat Ekseni....	10
Şekil 2.2 : Kanal Kesiti Boyunca Ortalanmış Hız Dağılımı ($Rehf\Lambda hf = 10$ ve $Da=0.01$).....	22
Şekil 2.3 : Kanal Kesiti Boyunca Ortalanmış Hız Dağılımı ($Rehf\Lambda hf = 5$ ve $Da=0.05$).....	23
Şekil 2.4 : Kanal Kesiti Boyunca Ortalanmış Hız Dağılımı ($Rehf\Lambda hf = 10$ ve $Da=0.01$).....	24
Şekil 2.5 : Kanal Kesiti Boyunca Ortalanmış Hız Dağılımı ($Rehf\Lambda hf = 5$ ve $Da=0.05$).....	25
Şekil 2.6 : Arayüzey Hızı ile Kayma Gerilmesi Sıçrama Koşulu Sabiti Değişimi....	27
Şekil 3.1 : Sayısal Çözümün İki Boyutlu Kanal Modeli.	30
Şekil 3.2 : Gözenekli Ortam Hücresi.....	30
Şekil 3.3 : Akışkan ve Gözenekli Bölge Ağı.	31
Şekil 3.4 : Berrak Akışkan ve Gözenekli Bölge Ağı-Açıklamalı Gösterim.	31
Şekil 3.5 : Fluent Programındaki İki Boyutlu Kanal Çözüm Ağı.	32
Şekil 3.6 : Geçirgenlik ve Gözeneklilik Değerlerinin Hesaplanması için Kullanılan Gözenekli Ortam Birim Geometrisi.	33
Şekil 3.7 : Fluent-Sayısal Çözüm Akış Hız Vektörleri.	35
Şekil 3.8 : Kanal İçi Hız Alanları.....	36
Şekil 3.9 : Kanal İçi Ortalanmış Hız Alanı $x=1.30002$ m ile $x=1.287849$ m aralığı.	37
Şekil 3.10 : Kanal İçi Ortalanmış Hız Alanı $x=1.287849$ m ile $x=1.275737$ m aralığı.....	38
Şekil 3.11 : Kanal İçi Ortalanmış Hız Dağılımı $x=1.275722$ m ile $x=1.263556$ m aralığı.....	38
Şekil 3.12 : Kanal İçi Ortalanmış Hız Dağılımı $x=1.263554$ m ile $x=1.252290$ m aralığı.....	39
Şekil 3.13 : Kanal İçi Ortalanmış Hız Dağılımı $x=1.252290$ m ile $x=1.241444$ m aralığı.....	40
Şekil 4.1 : Deney Düzeneği.....	43
Şekil 4.2 : Yayıcı Difüzör-Alt Kısım.....	44
Şekil 4.3 : Toplayıcı Difüzör.....	45
Şekil 4.4 : Gözenekli Ortam.....	46
Şekil 4.5 : CCD Kamera: Dantec Flow Sense 2M (Url-2, 2009).....	47
Şekil 4.6 : DPIV Ölçüm Prensipleri (Url-1, 2009).....	49
Şekil 4.7 : Deney Anı.....	50
Şekil 4.8 : Ortalanmış Deneysel Kanal İçi Hız Alanı $0.25 \text{ m}^3/\text{saat}$ debiye sahip akış.....	51
Şekil 4.9 : Ortalanmış Deneysel Kanal İçi Hız Alanı $0.3 \text{ m}^3/\text{saat}$ debiye sahip akış.....	52

Şekil 4.10 : Ortalanmış Deneysel Kanal İçi Hız Alanı	
0.35 m ³ /saat debiye sahip akış.....	52
Şekil 4.11 : Karşılaştırmalı Ortalanmış Arayüzey Hız Alanları.....	53
Şekil A.1 : Deney Düzeneği Şeması.....	65

YARISI GÖZENEKLİ ORTAM İLE DOLU KANALDA ARAYÜZEY HIZININ DENEYSEL OLARAK TESPİTİ

ÖZET

Bu çalışmada, alt yarısı gözenekli ortam dolu dikdörtgen kesitli bir kanalda daimi, sıkıştırılamaz ve laminar bir akış oluşturularak; berrak akışkan bölgesi ile gözenekli ortam dolu bölge arasındaki kalan sınırdaki arayüzey hızı DPIV yöntemi kullanılarak deneysel olarak incelenmiştir.

Deneysel çalışmadan önce, kısmi gözenekli ortam dolu dikdörtgensel kesitli bir kanalda akış için yapılan daimi, laminar ve uniform akış kabullerinden sonra sınır şartları belirlenmiştir. Matematik model ve analitik çözümler elde edilmiştir. Berrak akışkan bölge için Stokes denklemi kullanılırken gözenekli ortam dolu bölgede Brinkman-Forchheimer düzeltmeli Darcy denklemi kullanılmıştır. Bu iki bölge sınırı olan arayüzey geçiş bölgesinde ise bu denklemlerin ortak çözümü kullanılmıştır. Matematik model ve analitik çözüm üzerinde çalışılırken mühendislik bilgisayar yazılımlarından Fortran ve Matlab programlama dilleri ve Grapher grafik programları kullanılmıştır. Sayısal çözümlemede Gridgen ve Fluent mühendislik bilgisayar programları kullanılmıştır. Sayısal çözümler sonucu elde edilen u-hız bileşeni değer verilerinin aritmetik ortalaması düzlemde belirlenmiş alanlar için alınarak kanalın belirli noktalarında kanal yüksekliği boyunca ortalanan hız dağılımı bulunmuştur. Deneysel çalışmada arayüzey hızının tespiti farklı debi değerleri için gerçekleştirilip DPIV yöntemiyle veri toplanmıştır. Veriler işlenerek arayüzey hızının tespiti için düzlemsel hız alanları elde edilmiştir. Düzlemsel hız alanlarının maskeleyme ve kötü vektörlerden ayırma işlemleri sonucunda hız verilerinin ortalaması alınarak hız-kanal yüksekliği grafikleri çizdirilmiştir.

Çalışmanın konusu, arayüzey hızının deneysel olarak bulunması ile analitik ve sayısal çalışmalarla bu çalışmanın desteklenmesidir. Çalışmanın önemi, güncel ve gelişime açık olup tam açıklanamayan noktalarının bulunmasıdır. Buna örnek olarak kayma gerilmesi sıçrama koşulu sabiti verilebilir. Bu yüzden gözenekli ortam ile akışkan bölge arasındaki geçiş olaylarının bilimsel açıklaması günümüzde hala tam olarak anlaşılmış değildir. Arayüzeydeki hız dağılımlarının incelenmesi gözenekli ortamlardaki yeni ve temel çalışmalar grubuna girmektedir. Çalışmanın ve konunun önemlerinden bir diğeri ise farklı mühendislik disiplinlerinde olduğu kadar, uçak ve uzay mühendisliğinde özel uygulama alanlara sahip olmasıdır.

Deneyler İstanbul Teknik Üniversitesi Trisyonik Laboratuvarı'nda, sıfırdan tasarlanıp üretilen deney düzenekleri ile gerçekleştirilmiştir. Gözenekli ortam oluşturmak için dairesel kesitli silindirik pleksiglas çubuklar yatay ve dikey olarak belirli aralıklara sahip gridler halinde kanal tabanına düzgün bir şekilde yerleştirilmiştir. Akışkan olarak ise deneylerde su kullanılmıştır. Deneyler debi değerlerinin değiştirilmesi ile tekrarlanmıştır.

Çalışma sonucunda, deneysel veriler özetlenmiştir. Arayüzey hız tespitinden sonra sonuçlar bölümünde analitik ve sayısal çalışma ile deneysel veriler tartışılmıştır.

EXPERIMENTALLY DETERMINATION OF THE INTERFACE VELOCITY OF THE CHANNEL FILLED WITH POROUS MEDIUM PARTIALLY

SUMMARY

In this study, by creating steady, laminar and incompressible flow in a rectangular cross-sectioned channel which is filled with porous medium located at the bottom, the interface velocity profile on the boundary between the clear fluid region and the porous medium region is observed experimentally using DPIV method.

Earlier than experimental study, the boundary conditions are assigned after assuming the flow conditions as steady, laminar and uniform in the partially porous medium filled rectangular cross-sectioned channel. Mathematical model is found out and the analytical solutions are determined. For the clear fluid region, Stokes equation is used, and for the porous medium region Brinkman-Forchheimer extended Darcy Equation is used. On the boundary of these two regions, the common solution for these equations which are told above are used. During working on the mathematical model and the analytical solution, engineering softwares such as Fortran and Matlab-programming languages and Grapher are used. For the numerical solution of the problem Gridgen and Fluent engineering softwares are used. After the data acquisition of numerical study, by averaging u-velocity component magnitudes arithmetically over a specific area in plane, average velocity profiles is figured out for all channel height in the specific points. In the experimental study, the velocity profile in the interface is examined for different mass flow rates and data acquisition is done by using DPIV method. By data processing, planar velocity maps are found out in order to determine the velocity profile at the interface. After discretization of bad vectors from planar velocity maps and masking, velocity-channel height graphs are plotted by taking the averaged velocity data.

The subject of this study is determining the interface velocity experimentally and supporting this work with analytical and numerical solutions. The importance of this study is new and evolving, and there are some points which could not be explained exactly. Shear stress jump condition constant can be given as an example for this argument. That's why, the scientific explanations to the transition phenomena between the saturated porous medium region and clear fluid region haven't understood yet fully today. Investigations of the interface velocity profiles are included in the new and basic studies category for porous media. Another importance of the study is that as well as different engineering disciplines, aeronautic and astronautic engineering have specific application areas about this topic.

Experiments are done in the Trisomic Research Center at Istanbul Technical University with producing and developing the whole experimental setup from beginning to the end. For preparing the porous medium, circular cross-sectioned cylindrical plexiglass parallel located at the bottom of the channel with specific horizontal and vertical distances like in grid lines homogenously. As fluid, liquid water is used during the flow for the experiments. Experiments are repeated by changing mass flow rates.

At the end of the study, the experimental data are summarized. After the determination of interface velocity, experimental data, analytical, and numerical solutions are discussed in the results section.

1. GİRİŞ

Çalışmanın ana konusu, gözenekli ortamın bittiği ve yalnızca berrak akışkanın olduğu sınırdaki arayüzey hızını bulmaktır. Berrak akışkanın bulunduğu üst bölge ile bitişik alt kısımdaki akışkana doymuş gözenekli ortam dolu bölge arasındaki sınır arayüzey olarak tanımlanmaktadır. Bu yüzeydeki hız sınır şartı gözenekli ortamın geçirgenliğine ve akışkan özelliklerine bağlıdır. Doymuş gözenekli ortam dolu bölge ile berrak akışkan bölge arasındaki akış olaylarını anlamak için arayüzey hızı ve bağlı olduğu değişkenler araştırılmıştır.

Bu konuda yapılan ilk deneysel çalışma Beavers ve Joseph (1967) tarafından yapılmıştır. İçi kısmen gözenekli ortam dolu bir kanal üreterek akışın arayüzeyde hız sınır koşulunu araştırmışlardır. Gözeneklilik ve geçirgenlik değerlerinin arayüzey hız şartına etkisini çalışmalarında incelemişlerdir. Bu temel deneysel çalışma sonucunda ise arayüzey hızının büyüklüğü hakkında fikir edinilmiştir. Düşük Reynolds sayıları haricindeki deneysel ölçümlerin sonuçları ile çalışmadaki teorik noktalar bağdaşmıştır. Ayrıca kayma hız sıçrama koşulunun bağlı olduğu, gözenekli malzeme özelliklerinden geçirgenlik ile akışkanın viskozitesi arayüzey sınır bölgenin karakteristiklerini oluşturduğu sonucuna varmışlardır.

Beavers ve Joseph (1967)'ı izleyen çalışmalarda berrak akışkan bölge ile doymuş gözenekli ortam dolu bölgeye geçiş olayları araştırılmaya devam edilmiştir. Arayüzey akış olaylarıyla ilgili kuramsal ve deneysel çalışmalar ivme kazanarak sürmektedir. Kayma gerilmesi sıçrama koşulu ile hız alanı konusuna açıklık getirilmeye çalışılmaktadır.

(Bear, 1988)'ın çalışmasında, deney sonucundaki hız verileri ile hesaplanan hız verileri karşılaştırılmıştır. Matematik model olarak gözenekli ortam için Darcy Akış modeli kullanılmıştır. Ayrıca Darcy Akış Modeli'nde ortalanan hız değeri kullanılmıştır. Karşılaştırma işlemi sonunda deneysel sonuçlarla hesaplanan hız verileri uyumaktadır.

1.1 Gözenekli Ortam Dolu Kanalda Akış Problemi ve Uygulama Alanları

Çalışmaların yoğunlaşarak devam etmesi uygulama alanlarının çok geniş olmasından kaynaklanmaktadır. Belli başlı uygulama alanları olarak uçak ve uzay mühendisliği, ısı mühendisliği, kimya mühendisliği, okyanus coğrafyası, hidroloji ve tıp bulunmaktadır.

Uçaklarda burun ve kanatlardaki akışı iyileştirme, roketlerdeki yüksek ısı sonucu soğutma problemleri, ısı yalıtımı, toprak içinde kimyasal atıkların dağılımı, yakıt hücrelerinde ısı ve kütle geçişi problemleri, okyanus tabanlarındaki akış olayları, nehirlerdeki gözenekli akış yatakları ile kanın damarla doku arasındaki iletimi bu alanlardaki uygulamalara örnek gösterilebilir.

Uçak mühendisliğinde gözenekli ortamlar süpersonik uçaklarda performansı arttırmak için gövdede ve kanatta özel bölgelerde kullanılmaktadır. Gözenekli ortamlar geçirgen arayüzey oluşturarak hız ve ısı sınır tabaka kontrolüne fırsat vermektedir.

1.2 Bu Konuda Daha Önce Yapılan Çalışmalara Topluca Bir Bakış

Çalışmanın bu kısmında arayüzeyde akış olayları konusunda yayınlanan makaleler ve incelemeler hakkında bilgi verilmiştir.

Gözenekli bir yapı üzerinde akış özelliği üzerine yapılan çalışmalar oldukça farklı ve bir o kadar da değişik uygulamalara sahiptir. Hidroloji alanından yeraltı kaynak suları akışları örneği verilebilir. Bir diğer farklı uygulama ise tıp alanından endothelial-hücre glycocalyx ile kaplanmış kırmızı kan hücrelerinin yağlama problemidir. Damiano ve diğ. (1996) yaptıkları çalışmada glycocalyx malzemesini bozulabilir gözenekli yapı olarak kullanıp akış olaylarını incelemişlerdir.

Prandtl, 1904 yılında yaptığı deneylerin raporunda, bir hız sınır tabaka kontrol yöntemi olan emme yönteminin başarılı bir şekilde silindir arkasındaki sınır tabakanın ayrılmasını engellediğini bildirmiştir (Schlichting, 1979). Emme yöntemi ile sınır tabaka kontrolü, gözenekli ortam kullanılarak akışın sürtünme katsayısı sabitini değiştirme prensibine dayanır.

Alt kısmı gözenekli ortam ile kaplı, üst komşu kısımda berrak akışkan olan dikdörtgensel kesitli bir kanal içinde laminar akış konusundaki çalışmalar literatürde bulunmaktadır.

Mühendislik uygulamalarında önem kazanan alanlar olarak, terleme ile soğutma (transpiration cooling), kurutma işlemleri, ısı yalıtım, Güneş enerjisi kolektörleri, ısı boruları, nükleer reaktörler, ham petrol çıkarma işlemi, jeofizik mühendislik örnekleri verilebilir (Alazmi ve Vafai, 2001).

Beavers ve Joseph (1967)'ı destekleyen diğer çalışmalar, Taylor (1971) ve Richardson (1971) tarafından yapılmıştır. Yivli bir plakayı ideal bir gözenekli ortam olarak kabul edip akış modeli üzerinde çalışmışlardır.

Ochoa-Tapia ve Whitaker (1995) ise arayüzey hız sınır şartını yeniden düzenleyerek geliştirmişlerdir. Çalışmalarında aynı hızda ve düzgün, her noktası aynı fiziksel özelliğe sahip iki ortam bulunmaktadır. Bu iki ortam gözenekli ortam bölgesi ve berrak akışkan bölge olarak ele alınmıştır. Sınırdaki homojen olmayan bir geçiş bölgesi tanımlayarak arayüzey saptanmıştır. Çalışmalarında arayüzey, geçirgenliğin karekökü ($\sqrt{K}$) mertebesinde bir kalınlığa sahip bir geçiş bölgesi olarak gösterilmiştir.

Önceki yaklaşımlardan farklı olarak Brinkman (1948) arayüzeyde kayma hızı sınır koşulu için, ortalanan hacim akış modeli kullanmıştır. Çalışmada matematik model, Darcy Akış Yasası'na difüzyon teriminin eklenmesiyle elde edilmiştir. Berrak akışkan bölgede ise Stokes Denklemi kullanılmıştır.

Brinkman (1948) çalışmasına benzer çalışmalardan biri, sıfırdan farklı kayma gerilmesi sıçrama koşulu sabiti (β) değerleri için LDA yöntemiyle yapılan deneysel bir çalışmadır (Gupte ve Advani, 1997). Çalışmada deneyler Brinkman modelinin geçerliliğini araştırmak için gerçekleştirilmiştir. Bu deneysel çalışmada Hele-Shaw hücre yöntemi kullanılmıştır.

Hele-Shaw hücresi kısmen rastgele dizilişli liflerle oluşturulmuş gözenekli bir ortama sahip kompozit bir yapıdan oluşmaktadır. Hücrenin yapısı nedeniyle liflerle dolu olmayan bitişik kısımda açık kanal akışı görülürken arayüzeyde geçirimli duvardan iç gözenekli kısımlara doğru da Darcy Akışı gerçekleşmektedir.

Liflerle doldurulmamış kısmın geçirgenliği bilinmekle birlikte ideal gözenekli ortam gibi davranmaktadır. Ayrıca bu hücre bölümünün geçirgenliği kısmen liflerle dolu gözenekli ortamın geçirgenliğinden yüksektir. Genele uygulanabilirliğinin zayıf olması nedeniyle sonraki deneysel çalışmalarda bu yöntem uygulanmamıştır.

Hele-Shaw Hücresi yöntemiyle gerçekleştirilen deney sonucunda gözenekli ortamın kayma sabitinin akışkanın dinamik viskozitesine ve hızına bağlı olmadığı yapılan ölçümler yardımıyla ortaya çıkmıştır. Farklı gözeneklilik değerleri ile arayüzeyde akış olayları ve momentum transferi incelenmiştir. Hız profillerinin farklı gözeneklilik değerlerine bağlı değişimi saptanmıştır.

Brinkman (1948) çalışmasındaki çözüm ile Hele-Shaw Hücresi kullanılarak gerçekleştirilen deney sonucundaki veriler karşılaştırılmıştır. Bu veriler kıyaslandığında gözenekli ortamda sınır tabaka derinliğinin Hele-Shaw Hücresinin kalınlığına bağlı olup $\sqrt{K}$ 'ya bağlı olmadığı sonucu elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar ile örtüşen geliştirilmiş Brinkman modelinin arayüzeyde gözenekli ortama geçişte hız değerindeki değişimini saptamak için kullanılması önerilmiştir.

Poulikakos ve Kazmierczak (1987) iç kısmı gözenekli duvar tabakası ile kaplı silindirik boru içinde zorlanmış taşınım problemini teorik olarak incelemiştir. Çalışmalarında her farklı durum için duvar ısı akısı ile duvar sıcaklığı sabit alınmıştır. Çalışmalarında gözenekli kısımdaki akış olaylarını hesaba katılması ve akışın duvar ile akışkan arasındaki ısı değişimlere etkisini incelenmesi bir yeniliktir.

Gözenekli ortam içindeki akış için ve gözenekli ortam sınırında Brinkman Akış Modeli kullanılarak çözüm elde etmişlerdir. Sonuçlar Nusselt sayısına ve birçok parametreye bağlı olarak çıkmıştır. Çalışmanın önemli yanlarından birisi Nusselt sayısının gözenekli ortam kısmının cidar kalınlığına bağlı olmasının bulunmuş olmasıdır. Çalışma sonuçlarına göre gözenekli ortam cidar kalınlığı için kritik bir değer, Nusselt sayısı asgari bir değere ulaştığında bulunmaktadır.

Bir diğerk çalışma ise Sahraoui ve Kaviany (1992) tarafından yapılmış bir sayısal çalışmadır. Sahraoui ve Kaviany (1992) çalışmalarında kayma sabitinin sadece arayüzeyde bulunduğu yere değil; kanal derinliğine, akış yönüne, gözeneklilik değerine, yüzey topolojisine ve gözenekli ortam akış hızına bağlı olduğunu göstermişlerdir. Ek olarak artan atalet kuvvetlerin viskoz etkileri yenmesiyle akış koşullarında Reynolds sayısı artarken arayüzeydeki kayma sabiti de artmıştır. Berrak akışkan bölgede akış hızı artarken arayüzeydeki kayma gerilmesinden kaynaklanan viskoz etkiler azalmıştır. Çalışmalarının sonucunda belirli Reynolds değer aralığındaki kayma sabiti değişimi grafik üzerinde gösterilmiştir.

Kuznetsov (1997)'un çalışmasında kullanılan arayüzey hız sınır koşulları Ochoa-Tapia ve Whitaker (1995)'in çalışmalarından alınmıştır. Bu arayüzey hız sınır koşulları kullanılarak analitik çözüm yapılmıştır. Farklı kayma gerilmesi sıçrama koşulu sabiti (β) değerleri ile yapılan bu analitik çalışmada, Brinkman Denklemi'ne Forchheimer Sürüklemesi terimi eklenerek kesin çözüm elde edilmiştir. Çalışmanın sonucu yüksek Reynolds sayıları ile çalışmak analitik çözüm için mümkün olmuştur.

Breguem ve diğ. (2004) alt kısmında yerleşik gözenekli ortam bulunan bir kanalda Stokes akışının sayısal simülasyonunu elde etmişlerdir. Çalışmada gözenekli ortamı üç boyutlu kartezyen koordinatlarda ızgara dilimlere ayrılmış homojen küpler oluşturmaktadır. Bu çalışmayla (Ochoa-Tapia ve Whitaker, 1995)'in analitik çözümünün karşılaştırılması sonucu verilerdeki uyuşmanın iyi olduğu görülmüştür. β kayma gerilmesi sıçrama koşulu sabitinin arayüzey yerleşimine (merkezden üst yüzeye kadar) bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir.

Breguem ve diğ. (2005) çalışmalarında, 1930'lu yıllarda Almanların sınır tabakakemme yöntemini uçak kanadına uyguladıklarını açıklamışlardır. Bu yöntemin çalışma şekli; sınır tabakadaki akışkanı kontrolle türbülanslı akış bölgesine geçişin önlenmesi ve sonucunda akım ayrılmasının önüne geçilmesidir. Aynı zamanda bu yöntemle kanat hücum kenarındaki akış için daha yüksek oturma açıları mümkün olmaktadır. Metod türbülanslı akış bölgesine geçişi geciktirmekte kalmayıp sürüklemeyi de azaltmada yardımcı olmaktadır. Arayüzeyde akış olaylarının daha iyi anlaşılması bu yöntemde taşıma kuvvetinin katsayısının artması örneğindeki gibi kazançlara neden olacaktır.

Alazmi ve Vafai (2001) tarafından arayüzey hız sınır koşulu için diğer çalışmalarda verilen bağıntıları kıyaslamışlardır. Çalışmalarında arayüzey kayma hızı konusunda karşılaştırmalar ile değerlendirmeler mevcuttur. Gözenekli ortam dolu bölge ile berrak akışkan bölge arasındaki hidrodinamik ve ısı arayüzey şartlar için geniş kapsamlı karşılaştırmalı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Isıl dağılma özelliği ile kayma hızı sabiti farklı modeller için araştırılmıştır.

Analiz için beş değişik birincil hidrodinamik arayüzey koşulu ile dört farklı ısı arayüzey durumu oluşturulmuştur. Çalışmanın ana amacı, bu farklı modeller arasındaki çeşitliliği analiz etmek ve bu modeller kullanılarak her farklı koşul için arayüzeyde ısı geçişi ve akış olayları nitelikleri üzerindeki etkileri göstermek olmuştur.

Analiz sonucunda genel olarak koşulların çeşitliliğinin arayüzey hız alanları üzerinde etkileri, sıcaklık dağılımı üzerine etkilerine göre daha belirgin olmuştur. Nusselt sayısı üzerindeki etkisi ise sıcaklık dağılımına etkisine kıyasla daha az olduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte analiz sırasında düşük Re sayıları ve/veya büyük Darcy sayıları için küçük farklılıklar görülebilmektedir. Etkin viskozite değerinin farklı seçilmesi hız alanı üzerinde göreceli olarak küçük ve sıcaklık dağılımı ile yerel Nusselt sayıları üzerinde ise belirgin olmayan bir etkisi olduğu bulunmuştur. Son olarak çalışmada farklı koşullar için arayüzey hızı, arayüzey sıcaklığı ve ortalama Nusselt sayısı arasındaki değişimler için bağıntılar sağlanmıştır.

Whitaker (1999) çalışmasında gözenekli ortam için sürekli ortam kabulü yapılmıştır. Çalışmada ortalanan hacim yöntemi tanımlanmıştır. Akış alanının bir küçük uzaysal hacim üzerine ortalanması ile ortalanan-hız tanımı elde edilmiş ve kullanılmıştır.

Goharzadeh ve diğ. (2005) gözenekli ortam ile berrak akışkan bölgesi arasında kalan geçiş tabakasının kalınlığını bulmak için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Deneyde kullandıkları hız görüntüleme yöntemi sayesinde arayüzeyde iki boyutlu hız alanını inceleme imkanı olmuştur. İncelenen çalışmaların en gelişmiş ve başarılı olanıdır. PIV ve RIM yöntemleri ile ölçümler gerçekleştirilmiştir. Düşük çözünürlük nedeniyle verimsiz olan PET yöntemi kullanılması tercih edilmemiştir.

Bu yöntemlerle, doğru ve yüksek hassasiyete sahip çözümler için gözenekli ortam ve berrak akışkan bölgede hız alanları ölçülmüştür. Arayüzey hız profilini bulmak için ölçülen hız bileşenleri değerlerinin ortalamaları bulundukları alan üzerinden aritmetik olarak alınmıştır. Deneysel çalışma arayüzeyden gözenekli ortama geçişte oluşan tabakanın kalınlığı hakkında bilgi vermiştir. Sonuç olarak geçiş bölgesi kalınlığının, geçirgenliğin karekökünden çok gözenekli ortamın yapısını oluşturan taneciklerin çapına bağlı olduğu görülmüştür.

Literatürde konunun çözümü için kullanılan diğer bir yaklaşım ise berrak akışkan bölge ile gözenekli ortam dolu bölge arasındaki momentum transferini modellemektir. Bu yaklaşımda arayüzeyde kanal yüksekliğine bağlı olarak değişen dinamik viskozite ile geçirgenlik fonksiyonları tanımlanmaktadır.

Çalışmaların amacı arayüzeydeki akış olaylarını incelemek ve bu konuya kesin bir açıklama getirmektir. Arayüzeyde akış karakteristikleri ile ısı geçişi olaylarının açıkça anlaşılması için kesin çözüme ulaşmak gerekmektedir. Böylece birçok mühendislik dalında uygulama alanına sahip olan gözenekli ortamlardaki akış konusu tam olarak bilimsel açıklığa kavuşturulabilir.

2. MATEMATİK MODELLEME VE ANALİTİK ÇÖZÜM

2.1 Matematik Model

Gözenekli ortam bölgesi ile berrak akışkan bölgesinin arayüzey kısmında kayma gerilmesi sıçrama koşulu ve akış olayları dikkat edilmesi gereken önemli bir konudur. Bu nedenle öncelikle matematik model oluşturularak analitik çözümün yapılması uygun bulunmuştur.

Gözenekli ortam için sürekli ortam tanımı kullanılmıştır. Gözeneklilik, ortamdaki boşluk hacminin toplam hacime oranı olarak bilinir. Berrak akışkan bölgede Stokes denklemi kullanılmıştır. Kanal içindeki akış için daimi, laminar ve sıkıştırılamaz akış kabulü yapılarak sınır şartları yazılmıştır. Akışkana doymuş gözenekli ortam dolu bölgede Brinkman-Forchheimer düzeltmeli Darcy akış modeli kullanılmıştır. Arayüzeyde ise berrak akışkan bölge ile gözenekli ortam dolu bölge için oluşturulan matematik modelin ortak çözümü yapılmıştır. Ortak çözümünden hız sınır şartı analitik olarak bulunmuştur.

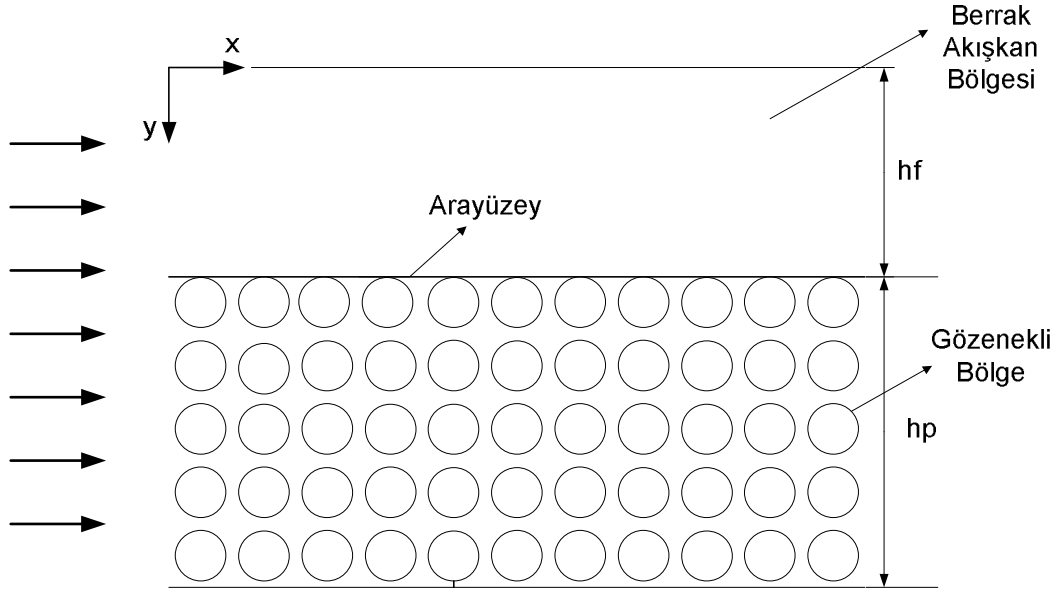
Matematik modelde dikdörtgen kesitli kanal girişinde üniform iki boyutlu olan akış, genişletici difüzörlerden geçerek kanal içinde tam gelişmiş akış haline gelmektedir. Kanal üst ve alt duvarı geçirimsizdir ve berrak akışkan bölgesi kanalın üst kısmında bulunmaktadır. Alt yarısında ise homojen, akışkana doymuş gözenekli ortam bulunmaktadır. Çözümlerde izotropik ve yarı-sonsuz gözenekli ortam kabulü yapılmıştır. Yapılan diğer kabuller ise akışkanın sıkıştırılamaz ve özelliklerinin konumdan bağımsız olmasıdır.

Serbest kanal akışında Stokes Yasası geçerli olup Poiseuille Akış özelliği görülmektedir.

Gözenekli ortamdaki akış için Brinkman-Forchheimer düzeltmeli Darcy Akış Modeli kullanılmıştır.

2.2 Problemin Açıklanması

Akış özellikleri eğimsiz bir kanal içinde tamamen gelişmiş, zamandan bağımsız ve laminar olarak tanımlanmıştır. **Şekil 2.1**'de kanal kesiti ana hatlarıyla gösterilmiştir. Görüldüğü gibi akış kanal içine x-yönünde, düzgün dağılı olarak girmektedir.



Şekil 2.1 : Gözenekli Kanalin Şematik Biçimsel Gösterimi ve Koordinat Eksenleri.

Kanal içinde berrak akışkan bölge yüksekliği h_f ve gözenekli bölge yüksekliği h_p olarak verilmiştir. Berrak akışkan bölgesinden gözenekli bölgeye geçişte sınır arayüzey olarak tanımlanmıştır.

Berrak akışkan bölge $0 \leq y \leq h_f$ aralığı ile ifade edilmiştir. Berrak akışkan bölgesinde (2.1) Stokes denklemi kullanılmıştır.

$$-\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \quad (2.1)$$

Gözenekli ortam dolu bölge $h_f \leq y < \infty$ aralığı ile ifade edilmiştir. Gözenekli ortam dolu bölgede matematik model için Brinkman-Forchheimer düzeltmeli Darcy Akış denklemi kullanılmıştır (2.2).

$$-\frac{\partial P}{\partial x} + \mu_{\text{eff}} \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} - \frac{\mu}{K} U - \frac{\rho_f \epsilon F}{\sqrt{K}} U^2 = 0 \quad (2.2)$$

Forchheimer katsayısı, F , (2.2) denkleminde atalet terimi olarak yer almaktadır. F , Reynolds sayısına ve gözenekli ortamı oluşturan geometrik yapıya bağlıdır. F için gözlem ve deneylere bağlı olarak ileri sürülen bağıntılar Ergün (1952) ve Baytaş (2006) çalışmalarında bulunabilir.

Gözenekli ortama geçişte akışkanın viskozitesi berrak akışkan bölgedeki viskoziteden değişik olarak μ_{eff} diye tanımlanmıştır. Gözenekli ortam dinamik viskozitesi etkin viskozite olarak belirtilmiştir.

Basınç gradyanı (2.1) ve (2.2) denklemlerinde sabit ve birbirine eşittir. Kanal içinde basınç değişimi ihmal edilecek kadar küçük olduğundan basınç gradyanı sabit alınmaktadır. Kanal içinde her noktada basınç eşit olduğu için berrak akışkan bölgesi ve gözenekli ortam dolu bölgede basınç gradyanları birbirine eşittir.

Geçirimsiz üst duvarda kayma olmaması sınır koşulundan yararlanılmıştır (2.3).

$$y=0 \text{ için } u=0 \quad (2.3)$$

Arayüzeyde akışkan hızının sürekliliği ve kayma gerilmesi sıçrama koşulu yardımıyla arayüzeyde sınır koşulları yazılmıştır (2.4).

$$\begin{aligned} y = h_f \quad u &= U = U_i \\ y = h_f \quad \mu_{eff} \frac{dU}{dy} \Big|_w - \mu \frac{du}{dy} \Big|_\eta &= \beta \frac{\mu}{\sqrt{K}} u \end{aligned} \quad (2.4)$$

Bu çalışmada analitik çözüm için Ochoa-Tapia ve Whitaker (1995) ve Kuznetsov (1997) çalışmalarındaki yukarıda görülen kayma gerilmesi sıçrama koşulu bağıntısı kullanılmıştır. Kayma gerilmesi sıçrama koşulu sabiti β ile temsil edilmiştir.

Son olarak,

$$y \rightarrow \infty \quad u \rightarrow U_D \text{ ve } \frac{dU}{dy} \Big|_w \rightarrow 0 \quad (2.5)$$

sınır koşulları yazılmıştır. y değerleri sonsuza giderken gözenekli ortam dolu bölgede akış hızı Darcy hızına gider. Darcy hızı sabit olduğundan gözenekli ortam dolu bölgede akış hızı gradyanı değeri de sıfıra gitmelidir (2.5).

Bu çalışmada ise, Ochoa-Tapia ve Whitaker (1995) çalışmasındaki $\mu_{\text{eff}} = \mu/\varepsilon$ eşitliğinden dinamik viskoziteler arasındaki bağıntı olarak matematik modelde yararlanılmıştır.

Arayüzeyde hız sınır koşulları ile ilgili bağıntılar daha önce yapılan çalışmalardan derlenerek **Çizelge 2.1**'de görüldüğü gibi özetlenmiştir. Hız ve hız gradyanındaki alt indislerden + gözenekli bölgeyi, - ise berrak akışkan bölgeyi temsil etmektedir.

Çizelge 2.1 : Arayüzey için tanımlanmış hız sınır koşulları.

Çalışma	Hız	Hız Gradyanı
Vafai ve Kim (1990)	$u_+ = u_-$	$\left. \frac{du}{dy} \right _+ = \left. \frac{du}{dy} \right _-$
Poulikakos ve Kazmierczak (1987)	$u_+ = u_-$	$\mu_{\text{eff}} \left. \frac{du}{dy} \right _+ = \mu \left. \frac{du}{dy} \right _-$
Ochoa-Tapia ve Whitaker (1995), Kuznetsov (1997)	$u_+ = u_-$	$\frac{\mu}{\varepsilon} \left. \frac{du}{dy} \right _+ - \mu \left. \frac{du}{dy} \right _- = \beta_1 \frac{\mu}{\sqrt{K}} u$
Ochoa-Tapia ve Whitaker (1998)	$u_+ = u_-$	$\frac{\mu}{\varepsilon} \left. \frac{du}{dy} \right _+ - \mu \left. \frac{du}{dy} \right _- = \beta_1 \frac{\mu}{\sqrt{K}} u + \beta_2 \rho u^2$
Beavers ve Joseph (1967), Sahraoui ve Kaviany (1992)		$\left. \frac{du}{dy} \right _- = \frac{\alpha}{\sqrt{K}} (U_i - U_D)$

Çizelge 2.1'de görüldüğü üzere Beavers ve Joseph (1967) çalışmalarında geçiş bölgesinde arayüzey için önerdikleri hız sınır koşulunda α kayma sabiti olarak verilmiştir. Geçirgenlik ise K ile temsil edilmiştir. Konu ile ilgili diğer temel çalışmalar, Ochoa-Tapia ve Whitaker (1995) ile Kuznetsov (1997) tarafından gerçekleştirilmiştir. Arayüzeyde gözenekli ortam bölgesinde kayma gerilmelerinde bir sıçrama vardır. Bu değişim kayma hızı olarak da adlandırılmaktadır. $\sqrt{K}$ mertebesinde etkilenen hız gradyanındaki değişim için bir parametreye ihtiyaç duyulmuştur. Bu yeni parameter, α , kayma sabiti olarak tanımlanmıştır.

Brinkman (1948), akışkan viskozitesi için çalışmasında $\mu_{\text{eff}} = \mu$ eşitliği kullanmıştır. Kuznetsov (1997) çalışmasında kesin bir dinamik viskozite tanımı yapmamakla beraber Ochoa-Tapia ve Whitaker (1995) çalışmasındaki dinamik viskozite tanımını kullanmıştır. Kayma gerilmesi sıçrama koşulunun deneysel olarak incelenmesi gerektiğini belirtmiştir.

2.3 Analitik Çalışma-Kesin Çözüm

2.3.1 Analitik Çalışma-Berrak Akışkan Bölgesi

Berrak akışkan bölgesinde (2.1) denklemi iki kez y yönünde integre edilirse

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial y} &= \frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} y + c_1 \\ u(y) &= \frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial x} y^2 + c_1 y + c_2\end{aligned}\tag{2.6}$$

hız gradyanı ile hız alanı yukarıdaki gibi bulunmuş olur (2.6).

Sınır koşullarından $y = 0$ için $u = 0$ olduğu bilinmektedir. Böylece integral sabitlerinden $c_2 = 0$ bulunmuştur. $y = h_f$ 'de, yani arayüzeyde $u = U_i$ olduğundan (2.6) denkleminde hız alanı yardımıyla diğer integral sabiti bulunmuştur (2.7).

$$c_1 = \frac{U_i}{h_f} - \frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial x} h_f\tag{2.7}$$

Berrak akışkan bölgesi için hız alanı ve integral sabitlerinin düzenlenmesiyle

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial y} &= \frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} y + \frac{U_i}{h_f} - \frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial x} h_f \\ u(y) &= \frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial x} y^2 + \frac{U_i}{h_f} y - \frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial x} h_f y\end{aligned}\tag{2.8}$$

boyutlu haldeki hız gradyanı ve hız alanı yukarıdaki gibi bulunmuştur (2.8).

Hız alanı ve hız gradyanları bulunduktan sonra boyutsuzlaştırma işlemleri yapılmıştır. Hız alanı Darcy hızına bölünerek boyutsuzlaştırılmıştır. Boyutsuzlaştırma işlemi için hız gradyanı terimleri ise Darcy Hızı ile bölünüp berrak akışkan bölge yüksekliği ile çarpılmıştır (2.9).

$$\begin{aligned}\frac{\partial u^*}{\partial y^*} &= \frac{\partial u}{\partial y} \frac{h_f}{U_D} \\ u^* &= \frac{u}{U_D}\end{aligned}\tag{2.9}$$

Boyutsuz yükseklik y^* , boyutsuz arayüzey hızı ise U_B olarak tanımlanmıştır (2.10).

$$y^* = \frac{y}{h_f}$$

$$U_B = \frac{U_i}{U_D}$$
(2.10)

(2.2) denklinde (2.5) sınır koşulundan yararlanılarak $\mu_{\text{eff}} \frac{\partial^2 U}{\partial y^2}$ terimi gözenekli bölgede ihmal edilebilir. Bu bölgede akış hızı Darcy hızı değerine giderken hız gradyanı da sıfıra gitmektedir. Doğal olarak $\mu_{\text{eff}} \frac{\partial^2 U}{\partial y^2}$ terimi değeri de sıfıra gidecektir. Böylece basınç gradyanı aşağıdaki gibi elde edilir (2.11).

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\mu \frac{U_D}{K} - \frac{\rho_f \varepsilon F}{\sqrt{K}} U_D^2$$
(2.11)

(2.8) denklemlerinde basınç gradyanı terimi yerine (2.11) bağıntısı kullanılarak hız alanı ve hız gradyanı aşağıdaki gibi yeniden yazılmıştır (2.12).

$$u^* = U_B y^* + \frac{1}{2} \left\{ \frac{h_f^2}{K} + \frac{\rho_f U_D h_f \varepsilon F h_f}{\mu \sqrt{K}} \right\} (-y^{*2} + y^*)$$

$$\frac{\partial u^*}{\partial y^*} = U_B - \frac{1}{2} \left(\frac{h_f^2}{K} + \frac{\rho_f U_D h_f \varepsilon F h_f}{\mu \sqrt{K}} \right)$$
(2.12)

Hız alanını boyutsuz değişkenler halinde ifade etmek için ara işlemler yapılmıştır. Boyutsuz değişkenler aşağıdaki gibi elde edilmiştir (2.13).

$$\frac{1}{Da} = \frac{h_f^2}{K} \quad Re_{h_f} = \frac{\rho_f U_D h_f}{\mu} \quad \Lambda_{h_f} = \frac{\varepsilon F h_f}{\sqrt{K}}$$
(2.13)

Berrak akışkan bölgesinde $0 \leq y^* \leq 1$ aralığında boyutsuz hız alanı ve hız gradyanı aşağıdaki gibi bulunur (2.14).

$$u^* = U_B y^* + \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{Da} + Re_{h_f} \Lambda_{h_f} \right\} (y^* - y^{*2})$$

$$\frac{\partial u^*}{\partial y^*} = U_B - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{Da} + Re_{h_f} \Lambda_{h_f} \right)$$
(2.14)

Çizelge 2.2'de berrak akışkan bölgesi için oluşturulan matematik modelin özeti verilmiştir.

Çizelge 2.2 : Berrak akışkan bölgede matematik model.

Boyutsuz Aralık	$0 \leq y^* \leq 1$
1. Sınır Koşulu	$y = 0$ için $u = 0$
2. Sınır Koşulu	$y = h_f$ için $u = U_i$
Basınç Gradyanı	$\frac{\partial P}{\partial x} = -\mu \frac{U_D}{K} - \frac{\rho_f \varepsilon F}{\sqrt{K}} U_D^2$
Hız Alanı	$u(y) = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial x} y^2 + \frac{U_i}{h_f} y - \frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial x} h_f y$
Boyutsuz Hız Alanı	$u^* = U_B y^* + \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{Da} + Re_{h_f} \Lambda_{h_f} \right\} (y^* - y^{*2})$
Boyutsuz Hız Gradyanı	$\frac{\partial u^*}{\partial y^*} = U_B - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{Da} + Re_{h_f} \Lambda_{h_f} \right)$

2.3.2 Analitik Çalışma-Gözenekli Ortam Dolu Bölge

Gözenekli ortam dolu bölge $h_f \leq y < \infty$ aralığında tanımlanmıştır. Gözenekli ortam dolu bölgede (2.2) denklemi geçerlidir. Bu denklemde ara işlemler gerçekleştirilmiştir. İkinci mertebeden diferansiyel terim denklemin sol tarafında yalnız bırakılarak diğer terimler sağ tarafa yazılmıştır. Bu terimin katsayısı denklemin sol tarafına bölünerek düzenleme işlemi yapılmıştır (2.15).

$$\frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu_{eff}} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{\mu_{eff}} \frac{\rho_f \varepsilon F}{\sqrt{K}} U^2 + \frac{\mu}{\mu_{eff}} \frac{U}{K} \quad (2.15)$$

Düzenlemenin bir sonraki adımında aşağıdaki matematiksel ifadeden yararlanılmıştır (2.16).

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{d}{du} \left(\frac{du}{dy} \right) \frac{du}{dy} = \frac{1}{2} \frac{d}{du} \left(\frac{du}{dy} \right)^2 \quad (2.16)$$

(2.15) denkleminin iki katı alınıp u yönünde bir kez integre edilmiştir. Bu işlem sonucunda elde edilen ifade aşağıda görüldüğü üzere hız gradyanının karesi olmuştur (2.17).

$$\left(\frac{du}{dy} \right)^2 = \frac{1}{\mu_{eff}} \frac{\partial P}{\partial x} U + \frac{1}{\mu_{eff}} \frac{\rho_f \varepsilon F}{\sqrt{K}} \frac{U^3}{3} + \frac{\mu}{\mu_{eff}} \frac{U^2}{2K} + C \quad (2.17)$$

(2.17) denklemi terimlerinin katsayıları düzenlenerek tekrar yazılınca aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir (2.18).

$$\left(\frac{dU}{dy}\right)^2 = \frac{2\mu}{\mu_{\text{eff}}} \left\{ \frac{\rho_f \epsilon F}{\mu \sqrt{K}} \frac{U^3}{3} + \frac{U^2}{2K} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} U + c \right\} \quad (2.18)$$

Gözenekli ortam dolu bölge için hız gradyanını elde etmek için yukarıdaki (2.18) ifadesinin karekökü alınmıştır. Bu işlem sonunda hız gradyanı aşağıdaki gibi bulunmuştur (2.19).

$$\frac{dU}{dy} = \left[\frac{2\mu}{\mu_{\text{eff}}} \left\{ \frac{\rho_f \epsilon F}{\mu \sqrt{K}} \frac{U^3}{3} + \frac{U^2}{2K} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} U + c \right\} \right]^{1/2} \quad (2.19)$$

Gözenekli ortam dolu bölgenin boyutlu hız gradyanını boyutsuzlaştırmak için ara işlemler berrak akışkan bölgesindeki boyutsuz değişkenler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gözenekli ortam dolu bölge boyutsuz akışkan hızı U^* olarak tanımlanmıştır (2.20).

$$\frac{dU^*}{dy^*} = \frac{dU}{dy} \frac{h_f}{U_D} \quad (2.20)$$

$$U^* = \frac{U}{U_D}$$

Boyutsuz hız gradyanı ve hız alanı yukarıda (2.20)'deki ifade ile elde edilmiştir.

Boyutsuz hız gradyanı aşağıdaki gibi elde edilmiştir (2.21).

$$\frac{dU^*}{dy^*} = \sqrt{\left(\frac{2\mu}{\mu_{\text{eff}}}\right)} \left\{ \frac{h_f^2}{U_D^2} \frac{\rho_f \epsilon F}{\mu \sqrt{K}} \frac{U^3}{3} + \frac{h_f^2}{U_D^2} \frac{U^2}{2K} + \frac{h_f^2}{U_D^2} \frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} U + \frac{h_f^2}{U_D^2} c \right\}^{1/2} \quad (2.21)$$

Boyutsuz hız gradyanındaki terimler de boyutsuz değişkenler cinsinden ifade edilmiştir (2.22).

$$\frac{dU^*}{dy^*} = \sqrt{\left(\frac{2\mu}{\mu_{\text{eff}}}\right)} \left\{ \frac{1}{3} \text{Re}_{h_f} \Lambda_{h_f} (U^*)^3 + \frac{1}{2\text{Da}} (U^*)^2 + \frac{h_f^2}{\mu U_D} \frac{\partial P}{\partial x} U^* + \frac{h_f^2}{U_D^2} c \right\}^{1/2} \quad (2.22)$$

Sınır koşulundan, y değerleri sonsuza giderken hız gradyanı değeri de sıfıra gideceğinden integral sabitinin değeri aşağıdaki gibi bulunmuştur (2.23).

$$c = -\frac{U_D^2}{h_f^2} \left\{ \frac{1}{3} \text{Re}_{h_f} \Lambda_{h_f} + \frac{1}{2\text{Da}} + \frac{h_f^2}{\mu U_D} \frac{\partial P}{\partial x} \right\} \quad (2.23)$$

İntegral sabiti için (2.23) bağıntısı (2.22) ifadesinde yerine yazılıp boyutsuz hız gradyanı aşağıdaki gibi elde edilmiştir (2.24).

$$\frac{dU^*}{dy^*} = \sqrt{\left(\frac{2\mu}{\mu_{\text{eff}}}\right) \left[\frac{1}{3} \text{Re}_{h_f} \Lambda_{h_f} (U^*)^3 + \frac{1}{2\text{Da}} (U^*)^2 + \frac{h_f^2}{\mu U_D} \frac{\partial P}{\partial x} U^* - \left(\frac{1}{3} \text{Re}_{h_f} \Lambda_{h_f} + \frac{1}{2\text{Da}} + \frac{h_f^2}{\mu U_D} \frac{\partial P}{\partial x} \right) \right]^{1/2}} \quad (2.24)$$

Boyutsuz hız alanını elde etmek amacıyla (2.24) denkleminin sağ tarafındaki terimler sol tarafa geçirilirken sol tarafındaki boyutsuz hız gradyanının paydası denklemin sağ tarafına geçirilmiştir. Bu işlem sonunda ifade y yönünde bir kez integre edilmiştir (2.25).

$$\int_1^{y^*} dy^* = \sqrt{\left(\frac{\mu_{\text{eff}}}{2\mu}\right) \frac{3}{\text{Re}_{h_f} \Lambda_{h_f}}} \int_{U_B}^{U^*} \frac{dU^*}{\sqrt{(U^*)^3 + \frac{3(U^*)^2}{2\text{DaRe}_{h_f} \Lambda_{h_f}} + \frac{3h_f^2 U^*}{\mu U_D \text{Re}_{h_f} \Lambda_{h_f}} \frac{\partial P}{\partial x} - \left(1 + \frac{3}{2\text{DaRe}_{h_f} \Lambda_{h_f}} + \frac{3}{\mu U_D \text{Re}_{h_f} \Lambda_{h_f}} \frac{\partial P}{\partial x}\right)}} \quad (2.25)$$

(2.25) ifadesinde basınç gradyanı yerine (2.11) bağıntısı yazılıp U_1 boyutsuz değişkeni ile ifade düzenlenince aşağıdaki gibi bir bağıntı elde edilmiştir (2.26).

$$y^* - 1 = \sqrt{\left(\frac{\mu_{\text{eff}}}{2\mu}\right) \frac{3}{\text{Re}_{h_f} \Lambda_{h_f}}} \int_{U_B}^{U_*} \frac{dU^*}{\sqrt{(U^*)^3 - (U_1 + 2)(U^*)^2 + (2U_1 + 1)U^* - U_1}} \quad (2.26)$$

Boyutsuz hız alanını elde etmek amacıyla (2.26) ifadesindeki terimler tekrar düzenlenmiştir (2.27).

$$(y^* - 1) \sqrt{\left\{ \frac{2\mu}{\mu_{\text{eff}}} \frac{\text{Re}_{h_f} \Lambda_{h_f}}{3} \right\}} = \int_{U_B}^{U_*} \frac{dU^*}{(U^* - 1)\{U^* - U_1\}^{1/2}} \quad (2.27)$$

(2.27) ifadesindeki integrali çözmek için değişken dönüşümü aşağıdaki ifadelerden yararlanılarak yapılmıştır (2.28).

$$\begin{aligned} U^* &= U_1 - (U_1 - 1) \tan^2 t \\ dU^* &= 2(U_1 - 1) \frac{\tan t}{\cos^2 t} dt \end{aligned} \quad (2.28)$$

Değişken dönüşümü ile elde edilen ifade aşağıdaki gibi olmuştur (2.29).

$$(y^* - 1) \sqrt{\left\{ \frac{2\mu}{\mu_{\text{eff}}} \frac{\text{Re}_{\text{hf}} \Lambda_{\text{hf}}}{3} (1 - U_1) \right\}} = 2 \int_{U_B}^{U^*} \frac{dt}{(\cos^2 t - \sin^2 t)} \quad (2.29)$$

İntegral için gerçekleştirilen trigonometrik işlemler aşağıdaki gibi bulunmuştur (2.30).

$$\tan^2 t = \frac{U^* - U_1}{1 - U_1}, \tan t = \sqrt{\frac{U^* - U_1}{1 - U_1}} = \frac{\sin t}{\cos t}, \sin t = \cos t \sqrt{\frac{U^* - U_1}{1 - U_1}} \quad (2.30)$$

(2.29) ifadesindeki integral işlemi (2.30) ifadesi yardımıyla alınca aşağıdaki gibi yeni bir bağıntı elde edilmiştir (2.31).

$$\begin{aligned} &-(y^* - 1) \sqrt{\left\{ \frac{2\mu}{\mu_{\text{eff}}} \frac{\text{Re}_{\text{hf}} \Lambda_{\text{hf}}}{3} (1 - U_1) \right\}} \\ &= \ln \left\{ \frac{\frac{\sqrt{(1 - U_1)} - \sqrt{(U^* - U_1)}}{\sqrt{(1 - U_1)}}}{\frac{\sqrt{(1 - U_1)} + \sqrt{(U^* - U_1)}}{\sqrt{(1 - U_1)}}} \right\} \Bigg|_{U_B}^{U^*} \end{aligned} \quad (2.31)$$

Yukarıdaki (2.31) bağıntısındaki doğal logaritma ifadesinden kurtulmak amacıyla ifadenin eksponansiyeli alınmıştır. Bu işlem sonunda elde edilen bağıntı düzenlenerek boyutsuz bir z fonksiyonu tanımlanmıştır (2.32).

$$z = e^{-\left\{ \frac{2\mu}{\mu_{\text{eff}}} \frac{\text{Re}_{\text{hf}} \Lambda_{\text{hf}}}{3} (1 - U_1) \right\}} \left\{ \frac{\sqrt{(U_B - U_1)} - \sqrt{(1 - U_1)}}{\sqrt{(U_B - U_1)} + \sqrt{(1 - U_1)}} \right\} \quad (2.32)$$

(2.32) ifadesinde gözenekli ortam dolu bölge boyutsuz hızları z fonksiyonu ve U_1 cinsinden yazılınca boyutsuz hız alanı elde edilmiştir (2.33).

$$U^* = U_1 + \left(\frac{z+1}{z-1} \right)^2 (1 - U_1) \quad (2.33)$$

Gözenekli ortam dolu bölgede $1 \leq y^* \leq \infty$ aralığında boyutsuz hız alanı bulunmuştur. **Çizelge 2.3**'te gözenekli ortam dolu bölge için kullanılan matematik modelin özeti verilmiştir.

Çizelge 2.3 : Gözenekli bölgede matematik model.

Boyutsuz Aralık	$1 \leq y^* \leq \infty$
1. Sınır Koşulu	$y = h_f : U = U_i$
2. Sınır Koşulu	$y \rightarrow \infty : U \rightarrow \infty \quad \frac{dU}{dy} \rightarrow 0 \quad (y^* \rightarrow \infty \quad U^* \rightarrow 1)$
Basınç Gradyanı	$\frac{dP}{dx} = -\mu \frac{U_D}{K} - \frac{\rho_f \varepsilon F}{\sqrt{K}} U_D^2$
Boyutsuz Hız Alanı	$U^* = U_1 + \left(\frac{z+1}{z-1} \right)^2 (1 - U_1)$

2.3.3 Analitik Çalışma-Arayüzey

Berrak akışkan bölgesi ile gözenekli ortam dolu bölge için bulunan boyutsuz hız alanları arayüzeyde denklem sistemi olarak çözülünce arayüzey hızı bulunabilmiştir. Hızların sürekliliği ve kayma gerilmesi sıçrama koşulu yardımı ile bir bağıntı bulunmuştur.

Çizelge 2.4'te her iki bölgenin ayrı boyutsuz hız alanları çözümleri görülmektedir. Arayüzeydeki kayma gerilmesi sıçrama koşulu ifadesi çözümler için önceden tanımlanan bölüm içindeki boyutsuz değişkenler kullanılarak boyutsuzlaştırılmıştır.

Çizelge 2.4 : Arayüzey bölgesi için ortak çözümde kullanılacak bağıntılar.

Aralık	$0 \leq y^* \leq 1$	$1 \leq y^* \leq \infty$
Boyutsuz Hız Alanı	$u^* = U_B y^* + \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{Da} + Re_{hf} \Lambda_{hf} \right\} (y^* - y^{*2})$	$U^* = U_1 + \left(\frac{z+1}{z-1} \right)^2 (1 - U_1)$

Kayma gerilmesi sıçrama koşulu ile ilgili bağıntı (2.4) ifadesindeki gibi tanımlanmıştır. Boyutsuzlaştırma işlemi sonunda ifade aşağıdaki gibi bulunmuştur (2.34).

$$\frac{\partial U^*}{\partial y^*} - \frac{\mu}{\mu_{eff}} \frac{\partial u^*}{\partial y^*} = \beta \frac{\mu}{\mu_{eff}} U^* \frac{1}{Da} \quad (2.34)$$

(2.34) ifadesinde gözenekli ortam dolu bölge boyutsuz hız gradyanı ve berrak akışkan bölgesi boyutsuz hız gradyanı için sırasıyla (2.14) ve (2.23) ifadeleri yerleştirilmiştir.

Bu işlem sonunda elde edilen bağıntı ise kayma gerilmesi sıçrama koşulu sabiti için yeni bir boyutsuz ifade oluşturmaktadır (2.35).

$$\sqrt{\frac{2\mu}{\mu_{eff}} \left[\frac{1}{3} Re_{hf} \Lambda_{hf} (U^*)^3 + \frac{1}{2Da} (U^*)^2 + \frac{h_f^2}{\mu U_D} \frac{\partial P}{\partial x} U^* - \left(\frac{1}{3} Re_{hf} \Lambda_{hf} + \frac{1}{2Da} + \frac{h_f^2}{\mu U_D} \frac{\partial}{\partial x} \right) \right]} - \frac{\mu}{\mu_{eff}} \left[U_B - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{Da} + Re_{hf} \Lambda_{hf} \right) \right] = \beta \frac{\mu}{\mu_{eff}} \frac{U^*}{\sqrt{Da}} \quad (2.35)$$

Arayüzeyde hız sınır koşulundan yararlanılarak (2.35) ifadesi yeniden yazılmıştır. Böylece arayüzeyde kayma gerilmesi sıçrama koşulu sabiti ile ilgili boyutsuz bağıntı son halini almıştır (2.36).

$$\sqrt{\left(\frac{2\mu_{eff}}{\mu} \right) \frac{Re_{hf} \Lambda_{hf}}{3} (U_B - 1) \sqrt{\{U_B - U_1\}}} = -\frac{1}{2} \left(\frac{1}{Da} + Re_{hf} \Lambda_{hf} \right) + U_B \left(1 + \frac{\beta}{\sqrt{Da}} \right) \quad (2.36)$$

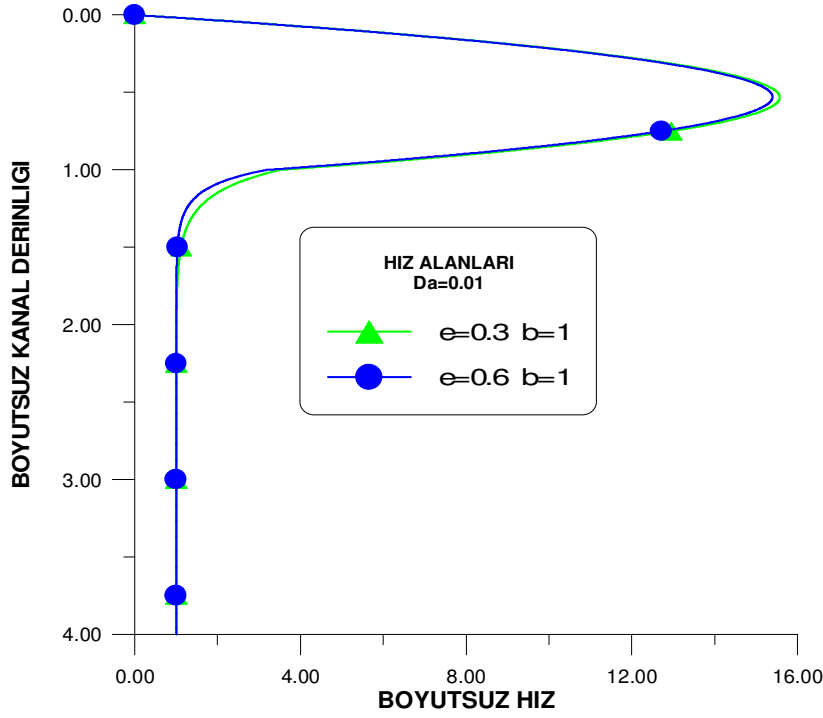
2.4 Analitik Çözüm

Fortran programlama dili yardımıyla kesin çözüm için bir bilgisayar programı yazılmıştır. Bu bilgisayar programın kodu **Ek A1**'de bulunmaktadır. Arayüzey hızındaki değişimler ve değişkenlerin etkileri Grapher ve Microsoft Excel programı aracılığıyla grafikler çizdirilerek gösterilmiştir.

Analitik çözüm için gözeneklilik değerleri olarak 0.3, 0.52, 0.6 ve 0.79 verilmiştir. Ayrıca bir özel durum olarak gözeneklilik değeri için $\mu_1 = \mu_2$ bağıntısı kullanılmıştır. Berrak akışkan bölge ile gözenekli ortam dolu bölge dinamik viskoziteleri arasındaki ilişkiyi veren bu bağıntı gözeneklilik değeri olarak 1'e karşılık gelmektedir. 1, -1, 0 ve -1.47 değerleri kayma gerilmesi sıçrama koşulu sabiti olarak alınıp çözümler yapılmıştır.

Dinamik viskozitenin değişimi arayüzeyde hız alanı için farklığa sebep olmaktadır. Ochoa-Tapia ve Whitaker (1995) modelindeki dinamik viskozite bağıntısında dinamik viskozitenin gözeneklilik ile ters orantılı olduğu görülmektedir. Gözeneklilik arttığında arayüzey hız değerinin azaldığı bağıntılarda matematiksel olarak görülmektedir.

Hız alanı ve kanal yüksekliği grafiklerde boyutsuz olarak verilmiştir. Arayüzey bölgesi konumu kanal yüksekliğinin 1 değerini aldığı boyutsuz yüksekliktedir. Berrak akışkan bölge 0 ile 1 arasındaki boyutsuz yükseklikte yer almaktadır. Gözenekli ortam dolu bölge ise 1 ile 4 boyutsuz kanal yüksekliği arasında bulunmaktadır.



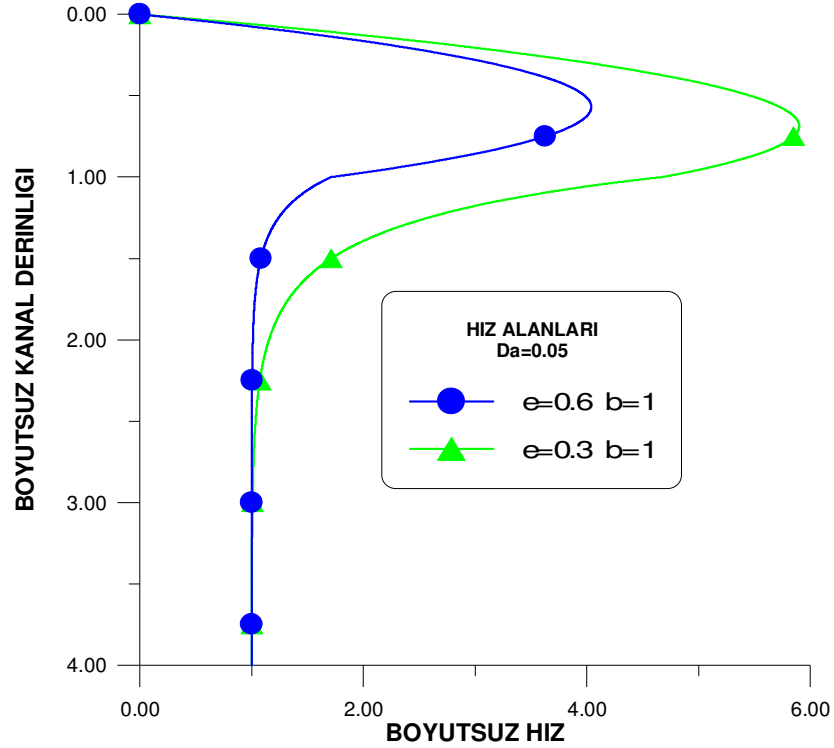
Şekil 2.2 : Kanal Kesiti Boyunca Ortalanmış Hız Dağılımı ($Re_{h_f}\Lambda_{h_f} = 10$ ve $Da=0.01$)

Şekil 2.2’de kayma gerilmesi sıçrama koşulu sabiti β , değeri 1 alınarak 0.3 ve 0.6 gözeneklilik değerleriyle çözüm yapılmıştır. Çözümde $Re_{h_f}\Lambda_{h_f} = 10$ ve $Da=0.01$ değerleri sabit tutulmuştur. Da sayısı da geçirgenlik ve berrak akışkan bölgesi yüksekliğine bağlı boyutsuz bir sayı olarak bilinmektedir. $Re_{h_f}\Lambda_{h_f}$ terimi analitik çözümde elde edilmiş boyutsuz bir atalet terimidir. Boyutsuz atalet terim olarak tanımlanmasının nedeni Reynolds sayısının terim içinde bulunmasından kaynaklanmaktadır. Boyutsuz atalet terimi, berrak akışkan bölgesinin Reynolds sayısı haricinde gözenekli ortamın yapısı, gözeneklilik, berrak akışkan bölge yüksekliği ve akışkan yoğunluğu gibi parametreler içermektedir.

Boyutsuz arayüzey hızının değişimi yukarıda bu iki farklı gözeneklilik değerine bağlı olarak görülmektedir. 0.3 gözeneklilik değerinde boyutsuz arayüzey hızının değeri 0.6 gözeneklilik değerindeki boyutsuz arayüzey hız değerinden daha büyük olduğu görülmektedir. Yalnız arayüzey hız değerleri arasındaki farkın çok az olduğu görülmektedir. Boyutsuz arayüzey hız değeri 0.3 gözeneklilik değeri için 3.2 olarak hesaplanmıştır.

Bu grafikten çıkarılabileceğimiz sonuç, arayüzey bölgesinde gözeneklilik değeri artarken boyutsuz arayüzey hız değerinin buna bağlı olarak azalmış olmasıdır.

Böylece fiziksel olarak ortamdaki parçacıklar arasındaki hacimsel boşluğun büyümesi anlamına gelen gözeneklilik değerinin artışı, arayüzeyde geçiş bölgesinde akışkanın gözenekli ortama daha rahat geçişini sağladığı görülmektedir.



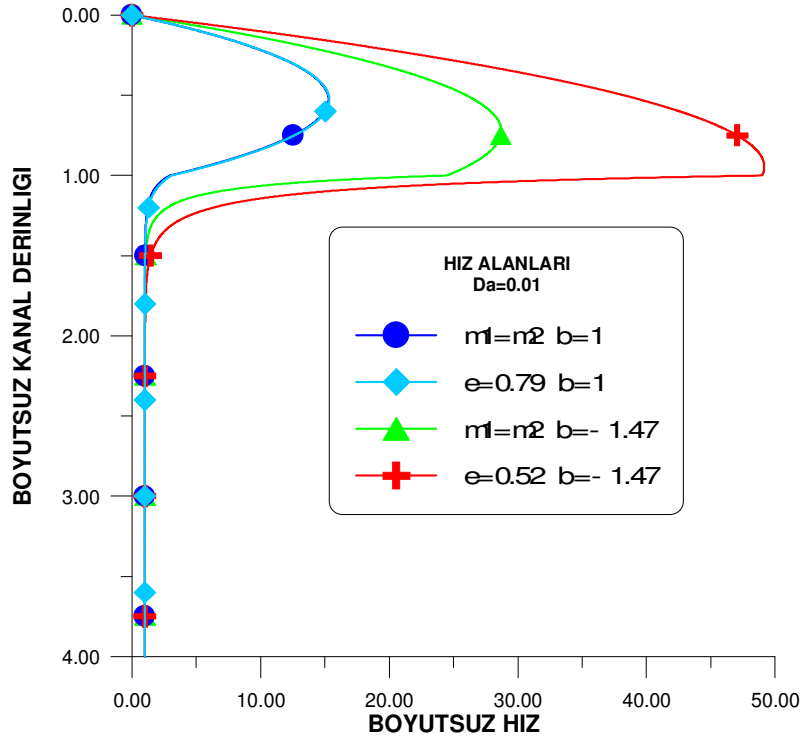
Şekil 2.3 : Kanal Kesiti Boyunca Ortalanmış Hız Dağılımı ($Re_{hf} \Lambda_{hf} = 5$ ve $Da=0.05$).

Şekil 2.3'te görülen boyutsuz hız alanı elde edilirken Şekil 2.2'deki gözeneklilik değerleri ve kayma gerilmesi koşulu sabiti değeri ile çözüm tekrarlanmıştır. Bu kez farklı olarak boyutsuz atalet terimi değeri 5 alınıp Da sayısı 0.05 değerine yükseltilmiştir.

Çözüm sonucu elde edilen boyutsuz hız alanı, Şekil 2.2'ye kıyasla daha düşük değer aralığında çıkmıştır. Şekil 2.3'te 0 ile 6 boyutsuz hız değer aralığındaki profil, Şekil 2.2'de 0 ile 16 aralığındadır. Akışkanın Reynold sayısı, boyutsuz atalet terimin değerinin düşmesiyle bir önceki çözüme oranla azalmıştır.

Bu durumda Şekil 2.3'te görüldüğü üzere boyutsuz arayüzey hızları için fark 0.3 ve 0.6 gözeneklilik değerleri için oldukça büyük çıkmıştır. Gözeneklilik değeri 0.6 olarak alındığında ise boyutsuz arayüzey hız değeri 1.7 olarak hesaplanmıştır.

Da sayısının artışı ise geçirgenliğin artışına sebep olmuştur. Kanal içindeki akışın berrak akışkan bölgeden gözenekli bölgeye geçişi etkileyen diğer bir etken de geçirgenliğin artışı olmuştur.



Şekil 2.4 : Kanal Kesiti Boyunca Ortalanmış Hız Dağılımı ($Re_{n_f} \Lambda_{n_f} = 10$ ve $Da=0.01$).

Şekil 2.4'te farklı gözeneklilik değerleri için çözüm tekrarlanmıştır. Gözeneklilik değerleri sırasıyla 0.79, 0.52 olarak alınmıştır. Diğer gözeneklilik değeri ise $\mu = \mu_{eff}$ bağıntısı kullanılarak hesaplanmıştır. $\mu_1 = \mu_2$ olarak şekil üzerinde berrak akışkan bölge ile gözenekli ortam dolu bölge dinamik viskoziteleri arasındaki bağıntı olarak tanımlanmıştır.

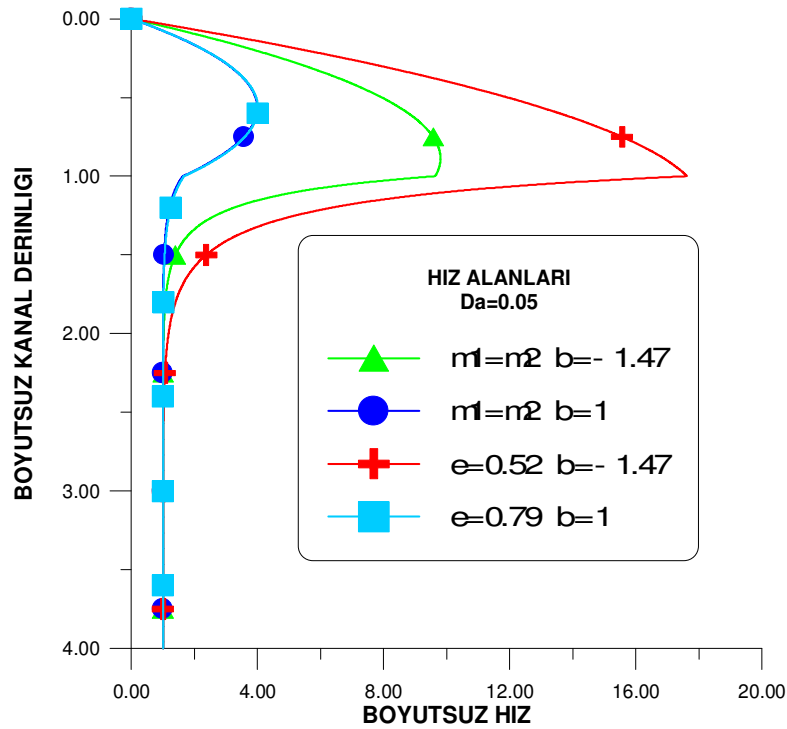
Diğer çözümlerden farklı olarak bu kez kayma gerilmesi sıçrama koşulu sabiti için de farklı değerler verilerek çözüm tekrarlanmıştır. Kayma gerilmesi sıçrama koşulu sabiti 1 ve -1.47 değerleri için hesaplamalar yapılmıştır. Boyutsuz atalet terimi değeri 10 ve Da sayısı 0.01 olarak alınmıştır.

Şekil 2.4'te gözeneklilik değerinin $\mu = \mu_{eff}$ bağıntısıyla hesaplanıp kayma gerilmesi sıçrama koşulu sabiti β 'nın 1 ve -1.47 değeri için sabit tutulduğu iki ayrı durum bulunmaktadır. Bu çözümlerde gözeneklilik değeri sabitken β 'nın pozitif ve negative değerleri boyutsuz arayüzey hızını değiştirmektedir. $\beta=-1.47$ değerine sahipken boyutsuz arayüzey hız değeri 24.5 olarak hesaplanmıştır. $\beta=1$ değerindeyken ise boyutsuz arayüzey hız değeri 3 bulunmuştur.

Kayma gerilmesi sıçrama koşulu sabiti değeri -1.47 yerine 1 alınınca gözeneklilik değerleri farklı alınsa bile boyutsuz arayüzey hız değerleri yine düşmüştür.

Şekil 2.4'te kayma gerilmesi sıçrama koşulu değeri 1 olarak sabitken farklı gözeneklilik değerleri için boyutsuz arayüzey hız değerleri birbirine çok yakın değerlerde bulunmuştur. Diğer taraftan kayma gerilmesi sıçrama koşulu değeri -1.47 olarak sabitken ise farklı gözeneklilik değerleri için boyutsuz arayüzey hız değerleri arasındaki fark büyük çıkmıştır.

Gözeneklilik değerinin 0.52 olarak çözüm yapılınca boyutsuz arayüzey hız değeri 48 olarak hesaplanmıştır. Gözeneklilik değeri $\mu = \mu_{eff}$ bağıntısıyla hesaplanınca ise boyutsuz arayüzey hız değeri 24 olarak bulunmuştur. Bunun yanında boyutsuz hız profilinin önceki çözümlere göre değiştiği görülmektedir.



Şekil 2.5 : Kanal Kesiti Boyunca Ortalanmış Hız Dağılımı ($Re_{h_f} \Lambda_{h_f} = 5$ ve $Da=0.05$).

Şekil 2.5'te bulunan boyutsuz hız alanını elde etmek için **Şekil 2.4**'teki belirtilen gözeneklilik ve kayma gerilmesi koşulu sabiti değerleri için bu kez $Re_{hf}\Lambda_{hf} = 5$ ve $Da=0.05$ değerleri verilerek çözüm yeniden yapılmıştır.

Bu çözüm, bir önceki çözüme göre daha düşük boyutsuz arayüzey hız değer aralığına sahip çıkmıştır. Boyutsuz hız değer aralığı 0 ila 20 arasında yer almaktadır.

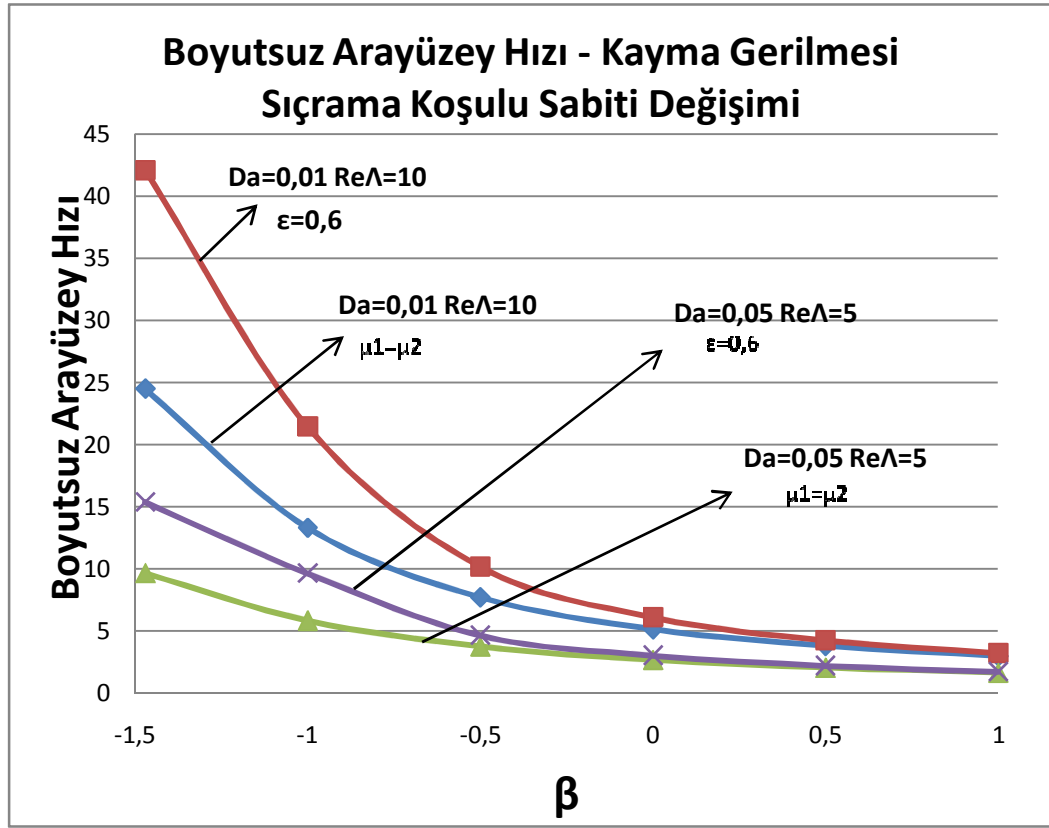
Kayma gerilmesi sıçrama koşulu sabiti 1 ve -1.47 değerleri için hesaplamalar yapılmıştır. **Şekil 2.5**'te gözeneklilik değerinin $\mu_f = \mu_{eff}$ bağıntısıyla hesaplanıp kayma gerilmesi sıçrama koşulu sabiti β 'nın 1 ve -1.47 değeri için sabit tutulduğu iki ayrı durum bulunmaktadır. Bu çözümlerde gözeneklilik değeri sabitken β 'nın pozitif ve negative değerleri boyutsuz arayüzey hızını değiştirmektedir. β -1.47 değerine sahipken boyutsuz arayüzey hız değeri 9.7 olarak hesaplanmıştır. β 1 değerindeyken ise boyutsuz arayüzey hız değeri 1.6 bulunmuştur.

Kayma gerilmesi sıçrama koşulu sabiti değeri -1.47 yerine 1 alınınca gözeneklilik değerleri farklı olsa bile boyutsuz arayüzey hız değerleri düşük çıkmıştır.

Şekil 2.5'te kayma gerilmesi sıçrama koşulu değeri 1 olarak sabitken farklı gözeneklilik değerleri için boyutsuz arayüzey hız değerleri birbirine çok yakın değerlerde bulunmuştur. 1.75 değerinde bir boyutsuz arayüzey hızı bulunmuştur.

Diğer taraftan kayma gerilmesi sıçrama koşulu değeri -1,47 olarak sabitken ise farklı gözeneklilik değerleri için boyutsuz arayüzey hız değerleri arasındaki fark büyük çıkmıştır. Gözeneklilik değerinin 0,52 olarak çözüm yapılırken boyutsuz arayüzey hız değeri 18 olarak hesaplanmıştır. Gözeneklilik değeri $\mu = \mu_{eff}$ bağıntısıyla hesaplanınca ise boyutsuz arayüzey hız değeri 9.6 olarak bulunmuştur.

(Ochoa-Tapia ve Whitaker, 1995) çalışmalarında arayüzeyde kayma gerilmesi sıçrama koşulu sabiti değerleri hesaplanmıştır. Bu değer aralığının çözümlere göre değişebildiği gösterilmiştir. Ayrıca kayma gerilmesi sıçrama koşulu sabitinin arayüzey hızına bağlı olduğu görülmüştür. Kuznetsov (1997) çalışmasında ise bu kayma gerilmesi sıçrama koşulu sabiti değerlerini analitik çalışmasında kullanmak üzere düzenleyerek almıştır.



Şekil 2.6 : Arayüzey Hızı ile Kayma Gerilmesi Sıçrama Koşulu Sabiti Değişimi.

Şekil 2.6’da kayma gerilmesi sıçrama koşulu sabiti değer aralığı -1.47 ile 1 alınmıştır. Hesaplamalarda, gözenekli ortam dolu bölgeki dinamik viskozite için berrak akışkan bölgesindeki dinamik viskozite ile gözeneklilik değeri ile arasında bir bağıntı kullanılmıştır. Böylece gözenekli ortam dolu bölgedeki dinamik akışkan viskozitesi için $\mu_1 = \mu_2 \varepsilon$ bağıntısından faydalanılmıştır. Bu bağıntıda gözeneklilik değeri 0.6 olarak alınmıştır. $Da=0,05$ ile $Re\Lambda=5$ ve $Da=0,01$ ile $Re\Lambda=10$ değerleri için hesaplamalar tekrarlanmıştır.

Şekil 2.6’da kayma gerilmesi sıçrama koşulu sabiti değer aralığında arayüzey hızının β ’ya bağlı olarak değişimi görülmektedir.

Şekil 2.2’de görüleceği üzere bu analitik çalışmada $Da=0,01$ ile $Re\Lambda=10$ ve $\varepsilon=0.6$ gözeneklilik değeri için boyutsuz arayüzey hız değeri 6 olarak hesaplanmıştır. Vafai ve Kim (1990) analitik çalışmalarında ksein çözüm sonucunda $Re\Lambda=10$ değeri için boyutsuz arayüzey hız değerini aynı şekilde 6 olarak bulmuşlardır.

3. SAYISAL ÇÖZÜMLEME

3.1 Sayısal Çözümlemede Fluent ve Gridgen Mühendislik Programları

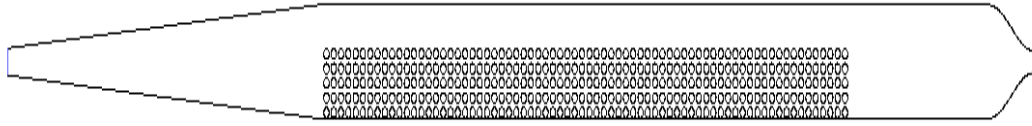
Analitik çalışma ile kesin çözüme ulaşılan problemin sayısal çözümlemesi bu bölümde yapılmıştır. Sayısal çözümleme için Fluent hesaplamalı akışkanlar mekaniği bilgisayar programı ile Gridgen sonlu elemanlar ağ atama ve sınır koşulları belirleme mühendislik programlarından yararlanılmıştır. Sayısal çözümleme ile elde edilen verilerin işlenmesi Microsoft Office Excel programı yardımıyla yapılmıştır. Ayrıca Tecplot programı grafik gösterimlerinde ve Microsoft Office Visio programı ise şema çizimlerinin hazırlanmasında kullanılmıştır.

Sayısal çözümlemede hız alanları, sayısal çözümleme sonucunda elde edilen hız datalarının aritmetik ortalamaları alınarak bulunmuştur. Hız datalarının ortalamaları eşit alanlar kullanılarak alınmıştır. Kanal içinde akışın tam geliştiği ve akışın çıkış etkilerinden uzak olduğu bir yerleşke seçilmiştir. Bu yerleşkede x-yönünde belirli bir uzunluk için kanal yüksekliği boyunca eşit aralıklar alınarak alanlar oluşturulmuştur.

Bu alanlar içinde kalan x-yönündeki hız bileşenlerinin aritmetik ortalaması alınarak bulunan ortalananmış hız değerleri hız alanı oluşturmak için kullanılmıştır. Hız alanı bulunurken, alanı meydana getiren x ve y noktalarının da aritmetik ortalamaları alınmıştır. Böylece ortalananmış halde bulunan hız alanının kanal yüksekliği boyunca değişimi çalışılan kanal aralığı için grafik üzerinde gösterilebilmiştir.

Bilgisayar ortamında deney düzeneğindeki kanalın teknik resim çizimi ve modellemesi, AutoCad ve Catia programları yardımıyla yapılmıştır.

AutoCad ve Catia'da modellenmiş haldeki teknik çizimler Gridgen'de açılarak Fluent çözümü aşaması için gridler hazır hale getirilmiştir. Böylece Gridgen programıyla ağ atanmış olan iki boyutlu kanal modeli için sınır koşulları matematik modeldeki gibi belirlenebilmiştir. Bu çizim ve modellemeler ağ atama işleminden sonra **Şekil 3.1**'de görüldüğü gibi sayısal çözüm için Fluent programına aktarılmıştır.

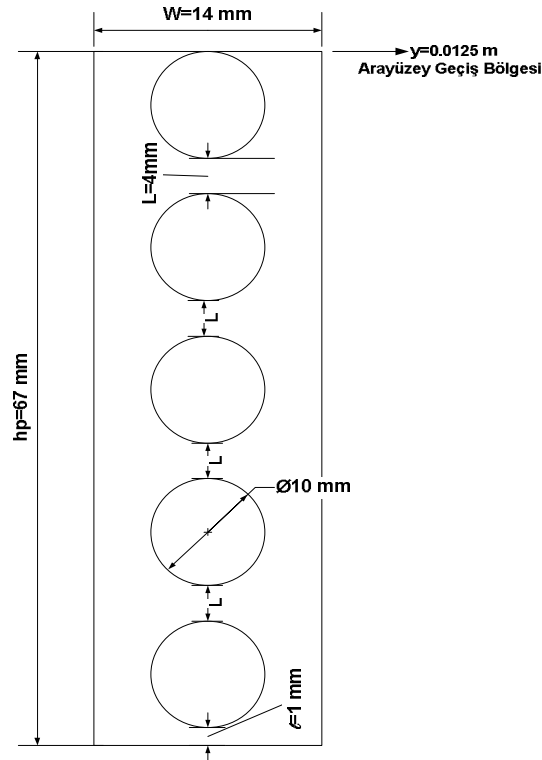


Şekil 3.1 : Sayısal Çözümün İki Boyutlu Kanal Modeli.

Kanal uzunluğu 1.97 m olarak tasarlanmıştır. Yayıcı difüzöre bitişik olarak gözenekli ortam yerleştirilmiştir. Kanal yüksekliği 109 mm olarak belirlenmiştir. Yayıcı difüzör uzunluğu 600 mm ve toplayıcı difüzör uzunluğu 105 mm olarak tasarlanmıştır. Toplayıcı difüzör tasarımında eğri oluşturma hesaplarında Bell-Mehta Yöntemi kullanılmıştır. Toplayıcı difüzör 105 mm uzunluğa ve 109 mm yüksekliğe sahiptir.

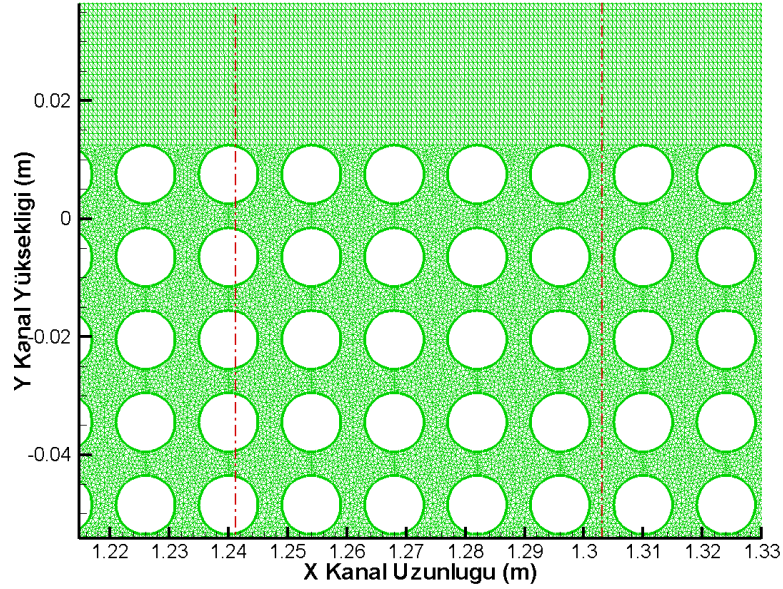
Gözenekli ortamın boyutları Şekil 3.2’de tek bir sıra görüldüğü üzere 71 adet homojen hücrenin kanal tabanına yerleştirilmesiyle meydana gelmiştir.

Şekil 3.2’de gözenekli ortamı oluşturan hücrelerden biri örnek olarak gösterilmiştir. Sayısal çözümde arayüzey bölgesi $y=0.0125$ m’de yer almaktadır. Böylece kanal üst noktası $y=0.0545$ m’de yer alırken kanal tabanı ise $y=-0.0545$ m’de yer almaktadır.



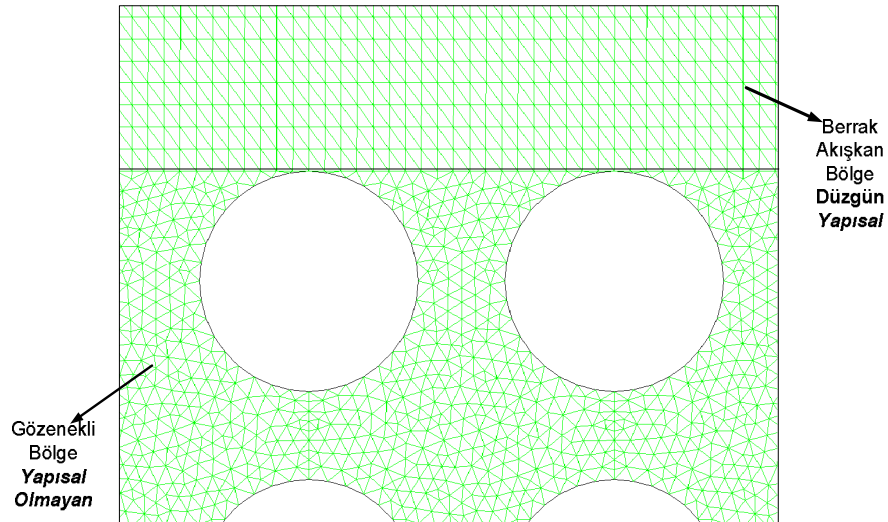
Şekil 3.2 : Gözenekli Ortam Hücresi.

Şekil 3.3'te sayısal çözümlemede çalışılan yerleşke görülmektedir. Yerleşke $x=1.241$ m ile $x=1.300$ m arasında bulunmaktadır. Sayısal çözümleme sonucunda hız vektörleri Tecplot programına aktarılarak bu aralıkta ağlar üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : Akışkan ve Gözenekli Bölge Ağı.

Şekil 3.3'te sayısal çözüm sonucunda hız alanlarını oluşturmak için seçilen bölge kırmızı noktalı ve çizgili doğrularla çevrelenmiş olduğu görülmektedir. Seçilen yerleşkede ortalanmış hız alanları, 13 mm aralık ve 1 mm yükseklikteki eşit alanlardan oluşan beş ana bölgede incelenmiştir.



Şekil 3.4 : Berrak Akışkan ve Gözenekli Bölge Ağı-Açıklamalı Gösterim.

Şekil 3.4'te berrak akışkan bölgede daha düzgün yapıda bir ağ atanmışken gözenekli bölgedeki ağ atanması farklı olduğu görülmektedir. Bu farklılığın nedeni ise akışkan ve duvar sınırlarının berrak akışkan bölgede gözenekli ortam dolu bölgeye göre düzgün olmasıdır.

Gridgen programında sonlu elemanlar ağ ataması, berrak akışkan bölgede yüksek doğruluk derecesi ile hassas çözüm elde etmek için kesin ve iyi organize olmuş ağ atama olarak bilinen düzgün yapısal seçeneği yardımıyla yapılmıştır.

Gözenekli ortam dolu bölgede sınırların dairesel olması ağ atılacak alanın düzgün dikdörtgensel alanlara bölünmesini engellemektedir. Düzgün yapısal olmayan ağ atama yöntemi sınır koşullarına uygulanabilir en uygun yöntemdir. Bu bölgedeki alanlara ancak üçgensel ağlar atanabildiği için bu özellik seçilmiştir.

Şekil 3.5'te ise ağ atanmış halde Fluent programına gönderilmiş olan iki boyutlu kanal modeli, sayısal çözüme hazır hale getirilmiştir. Sınır koşulları ve yapılan kabuller belirtilmiştir. Çözüm için yapılan kabuller, kanalın içindeki akışın zamandan bağımsız, laminar ve iki boyutlu olmasıdır. Ayrıca Fluent'te çözüm yapılırken yüksek hassasiyet seçeneği ile basınç temelli Navier-Stokes Denklemleri kullanılmıştır.



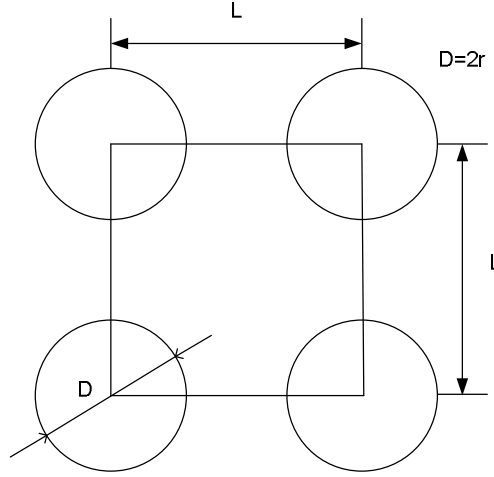
Şekil 3.5 : Fluent Programındaki İki Boyutlu Kanal Çözüm Ağı.

3.1.1 Geçirgenlik Hesabı

Sayısal çözüm aşamasında, geçirgenlik değeri gözenekli ortamı oluşturan bölgenin teknik resim çizimleri üzerinden Fluent programı tarafından otomatik olarak hesaplanmıştır.

Bu nedenle sayısal çözüm verilerinin elde edilmesinin ardından kayma gerilmesi sıçrama koşulu sabiti tespiti için gözenekli ortamın geçirgenlik değerinin hesaplanmasına ayrıca ihtiyaç duyulmuştur.

Sangani ve Acrivos (1982) çalışmalarında gözenekli ortamı oluşturan geometrik yapıyı kare şeklindeki ebatları belli olan birim hücrelerle temsil etmişlerdir. **Şekil 3.6**'da kare şeklindeki birim gözenekli ortam yapı hücresi görülmektedir.



Şekil 3.6 : Geçirgenlik ve Gözeneklilik Değerlerinin Hesaplanması için Kullanılan Gözenekli Ortam Birim Geometrisi.

Şekil 3.6'da görülen düzgün kare şekline sahip olan birim düzlemsel hücre, gözenekli ortam gözeneklilik ve geçirgenlik değerlerinin hesaplanması için oluşturulmuştur. Birim hacim için karenin içinde kalan boş alanın toplam kare alanına oranı gözeneklilik olarak tanımlanmıştır (Sangani ve Acrivos, 1982). Böylece gözeneklilik değerini veren bağıntı aşağıdaki gibi elde edilmiştir **(3.1)**.

$$\varepsilon = \frac{L^2 - \frac{\pi D^2}{4}}{L^2} = 1 - \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{L} \right)^2 \quad (3.1)$$

Yukarıdaki gözeneklilik bağıntısı yardımıyla gözenekli ortamdaki katı cisim hacminin toplam hacme oranını veren bağıntı bulunmuştur **(3.2)**.

$$\phi = 1 - \varepsilon \quad (3.2)$$

Bu çalışmada, gözenekli ortamı oluşturan silindirlerin çapı $D=10$ mm ve merkezleri arasındaki mesafe $L=14$ mm olarak belirlenmiştir. Bu değerler yukarıdaki bağıntılarda yerine konulunca hesaplanan gözeneklilik değeri $\varepsilon=0.599$ olarak bulunmuştur. Katı cisim hacim oranı ise $\phi=0.401$ olarak hesaplanmıştır. Geçirgenlik değerini veren bağıntı Sangani ve Acrivos (1982) çalışmasında aşağıdaki gibi bulunmuştur **(3.3)**.

$$\frac{K}{r^2} = \frac{1}{8\phi} \{-\ln\phi - 1.476 + 2\phi - 1.77\phi^2 + 4.076\phi^3\} \quad (3.3)$$

Geçirgenlik değeri (3.3) denklemi kullanılarak $\phi = 0.401$ değeri için $K=1.698 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ olarak hesaplanmıştır.

Bir diğer geçirgenlik değeri hesabı Tamayol ve Bahrami (2009) tarafından yapılmıştır (3.4).

$$\frac{K}{D^2} = \left\{ \frac{12(\sqrt{\phi'} - 1)}{\phi' \sqrt{\phi'}} \left[\frac{2 - \mathbb{E}(\varepsilon)}{2} \right] + \frac{18 + 12(\phi' - 1)}{\sqrt{\phi'}(1 - \phi')^2} \right. \\ \left. + \frac{18\sqrt{\phi'} \left[\tan^{-1} \left(\frac{1}{\sqrt{\phi'} - 1} \right) \right]}{(\phi' - 1)^{\frac{5}{2}}} \right\}^{-1} \quad (3.4)$$

Tamayol ve Bahrami (2009) çalışmasında geçirgenlik değerini veren bağıntı, gözenekli ortamı oluşturan silindirlerin çapının karesine bölünerek boyutsuzlaştırılmıştır. Bu boyutsuz geçirgenlik bağıntısındaki $g(\varepsilon)$ terimi gözenekliliğe bağlı lineer bir fonksiyondur ve ϕ' ise boyutsuz bir parametredir (3.5).

$$\mathbb{E}(\varepsilon) = 1.274\varepsilon - 0.274 \quad (3.5)$$

$$\phi' = \pi/4\phi$$

$\varepsilon=0.599$ için (3.5) bağıntısı yardımıyla $g(\varepsilon)=0.489$ olarak hesaplanmıştır. Boyutsuz parametre $\phi = 0.401$ için $\phi' = 1.959$ olarak bulunmuştur. $D=10 \text{ mm}$ ve $L=14 \text{ mm}$ değerleri ile hesaplanan geçirgenlik değeri $K=1.738 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ olmuştur.

Bu çalışmada Sangani ve Acrivos (1982) çalışmasındaki geçirgenlik denklemleri kullanılarak bulunan geçirgenlik değeri $K=0.17 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ kullanılmıştır.

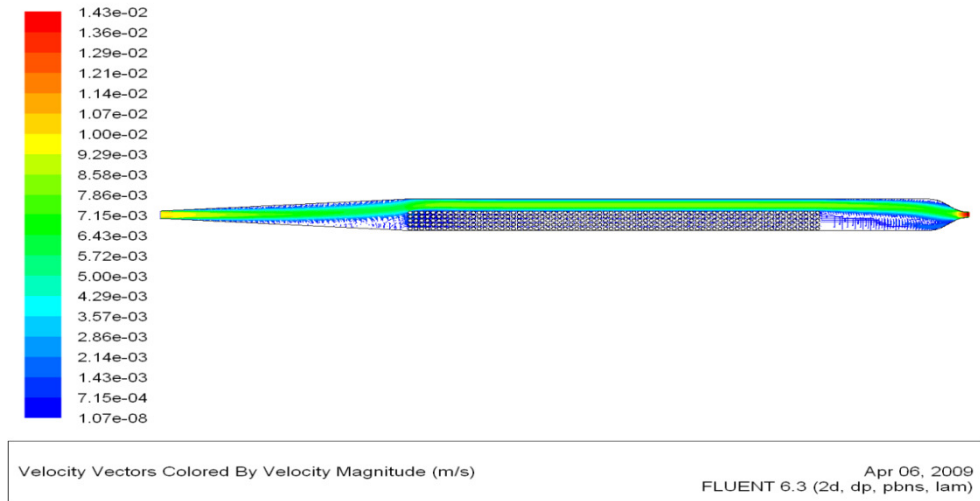
3.2 Sayısal Çözümleme Sonuçları

İki boyutlu ağ atanmış ve sınır koşulları belirlenmiş sayısal çözümlemeye hazır 445306 yapısal olmayan üçgensel sonlu elemanlar hücresi, 230922 düğüm noktası bulunmaktadır. Bununla birlikte giriş ve çıkış kesitinde 108 adet iki boyutlu hücresel alan, kanal içerisinde 659331 adet ve sınır bölgelerde ise 17040 tane iki boyutlu hücresel alan bulunmaktadır.

Fluent programında çözüm yapılırken dikkat edilen noktalardan bir tanesi çözümün yakınsama değeri olmuştur. Sayısal çözüm, 7000 iterasyon sonucunda süreklilik ve hızlar için istenilen değerlere yakınsamış ve çözümün doğruluğu ile hassasiyeti sağlanmıştır. Çözüm yakınsama değerleri süreklilik için 7.6205×10^{-9} olmuştur. x-yönünde hızın yakınsaması 9.9966×10^{-8} olurken y-yönündeki yakınsama değeri ise 2.5778×10^{-8} olarak çıkmıştır.

Fluent programında çözüm kontrolü için ayrıklaştırma işleminde standart basınç prensibi kullanılırken, momentum için de ikinci mertebeden *upwind* metodu kullanılmıştır.

0.3 L/dk ($=0.018 \text{ m}^3/\text{saat}$) değerindeki bir debinin 26 mm çapa sahip yayıcı difüzörün giriş kesitinden kanal içine girerken üniform $0.94 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ hız değerinde olduğu hesaplanmıştır. Bu değer programda kanala giriş hızı olarak verilmiştir.



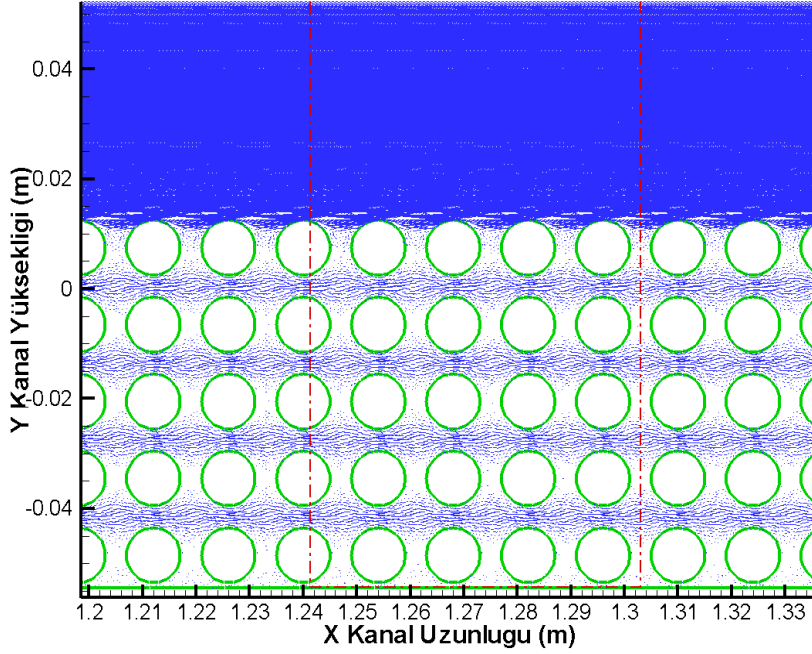
Şekil 3.7 : Fluent-Sayısal Çözüm Akış Hız Vektörleri.

Şekil 3.7'de çözüm sonunda kanal içindeki iki boyutlu akış hız vektörleri ve hız değerleri renkli skala yardımıyla görülmektedir. Gözenekli ortam dolu kısımda hız değerleri berrak akışkan bölgeye göre düşük değerlerde çıkmıştır.

Çözümde azami hız değeri 0.0143 m/s olarak çıkışta saptanmıştır. En düşük hız değerine ise $1.07 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ ile yayıcı difüzör bölgesinden sonraki gözenekli ortama giriş kısmında rastlanmıştır.

Kanalın tümü için sayısal çözüm sonucu elde edilen datalarda 247962 noktada bileşke hız, x-yönündeki hız bileşeni, y-yönündeki hız bileşeni, toplam basınç, statik basınç, dinamik basınç ve hız gradyanları bilgileri yer almıştır.

Fluent mühendislik program yardımı ile elde edilen sayısal çözüm verileri Tecplot bilgisayar grafik programında işlenerek kanal içi akışın hız vektörleri elde edilmiştir. **Şekil 3.8**'de kanal içinde kırmızı çerçeve ile sınırlandırılmış $x=1.241$ m ile $x=1.300$ m aralığında mavi renkteki akış hız vektörleri görülmektedir.



Şekil 3.8 : Kanal İç Hız Alanları.

Sayısal çözümleme sonucu elde edilen verilerin işlenmesi bölüm başında anlatıldığı gibi yapılmıştır. Bu veri işlemleri dışında, gözenekli ortam dolu bölgede x-yönündeki ortalanan hız bileşenlerinin aritmetik ortalaması alınarak Darcy hızı elde edilmiştir.

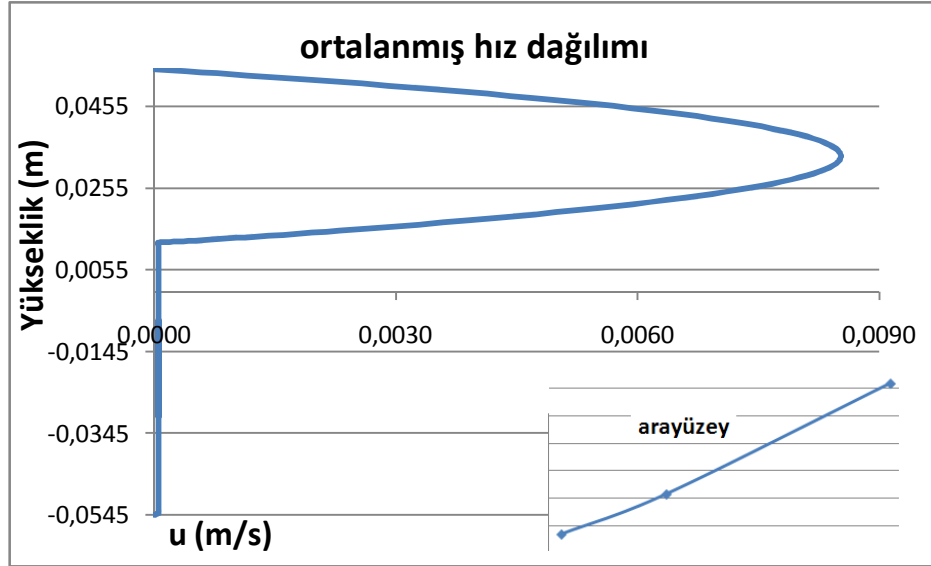
Sayısal çözümlemede **Çizelge 2.1** :deki arayüzey hız sınır koşullarından Beavers ve Joseph (1967) çalışmasındaki bağıntı kullanılarak kayma sabiti α 'yı bulmak mümkün olmuştur (3.6).

$$\frac{du}{dy} = \frac{\alpha}{\sqrt{K}} (U_i - U_D) \quad (3.6)$$

Özetle, ortalanan hız alanları bulunduğundan sonra sırasıyla hız gradyanları ve kayma sabiti değerleri hesaplanabilmektedir.

Kanal üst ve alt duvarları geçirimsiz olduğu için sınır koşullarından $y=0.045$ m ve $y=-0.045$ m noktalarında hız değerleri her zaman $u=0$ m/s değerini almaktadır.

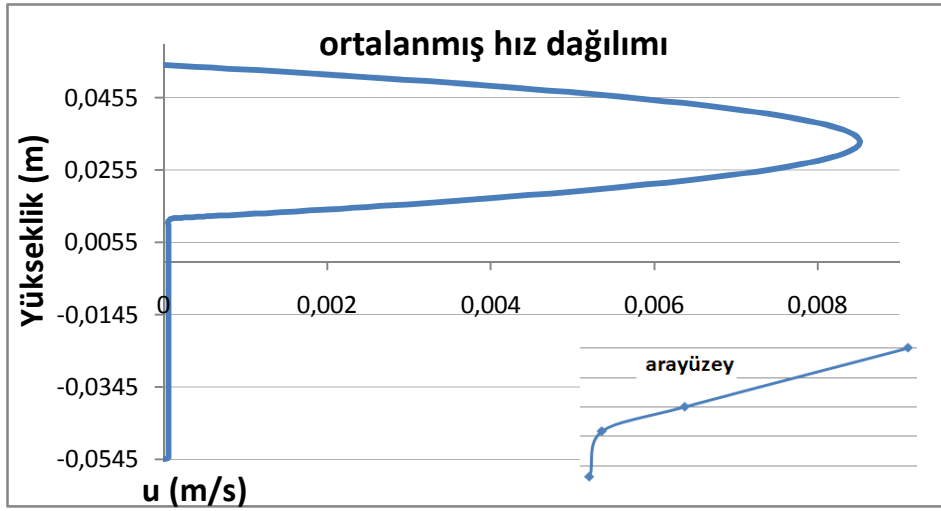
Gözenekli ortam dolu bölgeye geçerken arayüzeyde hızların sürekliliği şartı nedeniyle arayüzey hız değeri hesaplanabilmektedir. Arayüzeyde farklı dinamik viskozitelere sahip iki bölge arasında akışkan geçişi nedeniyle bir kayma gerilmesi sıçraması görülmektedir.



Şekil 3.9 : Kanal İçi Ortalanmış Hız Alanı
x=1.30002 m ile x=1.287849 m aralığı.

Şekil 3.9'da görüldüğü üzere x=1.30002 m ile x=1.287849 m aralığında oluşturulmuş eşit alanlar üzerinden ortalanan hızlar ile ortalanan hız alanı bulunmuştur. Arayüzeyde y=0.0125 m'de arayüzey hız değeri $U_i=0.00043$ m/s bulunmuştur. Gözenekli ortam dolu bölgede Darcy hızı $U_D=0.00005$ m/s hesaplanmıştır. Arayüzeyde hız gradyanı değeri 0.843 (1/s) bulunmuştur.

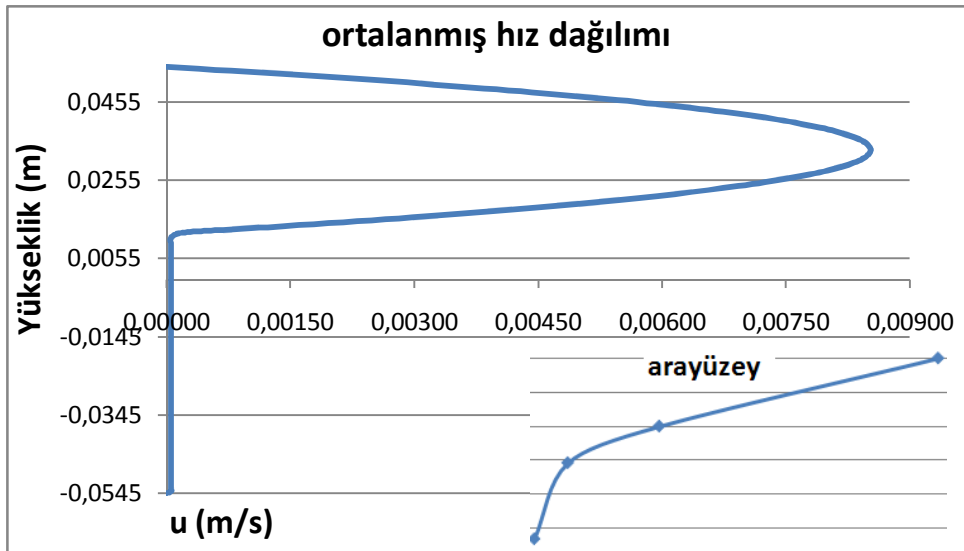
Şekil 3.9'da berrak akışkan bölgesinde akışın tam geliştiği anlaşılmaktadır. Yukarıda bulunan ortalanan hız alanı bilgileri yanında (3.6) bağıntısı yardımıyla x=1.3002 m ile x=1.287849 m aralığında kayma sabiti değeri $\alpha=2.89$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.10 : Kanal İçi Ortalanmış Hız Alanı
 $x=1.287849$ m ile $x=1.275737$ m aralığı.

Şekil 3.10’da görüldüğü üzere $x=1.287849$ m ile $x=1.273757$ m aralığında oluşturulmuş eşit alanlar üzerinden ortalanan hızlar ile ortalanan hız alanı bulunmuştur. Arayüzeyde $y=0.0125$ m’de arayüzey hız değeri $U_i=0.00041$ m/s bulunmuştur. Gözenekli ortam dolu bölgede Darcy hızı $U_D=0.00005$ m/s hesaplanmıştır. Arayüzeyde hız gradyanı ise 0.805 (1/s) değerine eşit çıkmıştır.

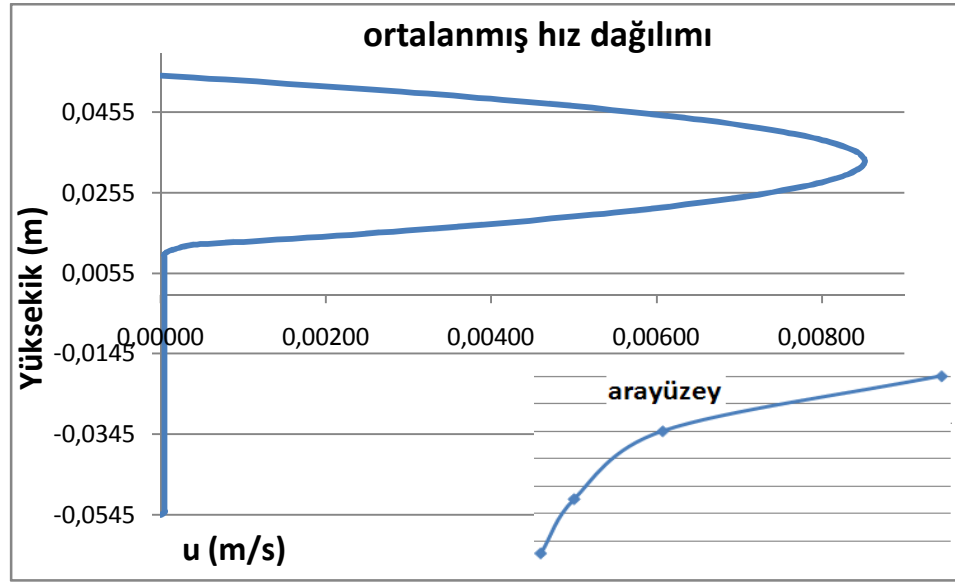
Şekil 3.10’da yukarıda bulunan ortalanan hız alanı bilgileri yanında (3.6) bağıntısı yardımıyla $x=1.287849$ m ile $x=1.275737$ m aralığında kayma sabiti değeri $\alpha=2.92$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.11 : Kanal İçi Ortalanmış Hız Dağılımı
 $x=1.275722$ m ile $x=1.263556$ m aralığı.

Şekil 3.11'de görüldüğü üzere $x=1.275722$ m ile $x=1.263556$ m aralığında oluşturulmuş eşit alanlar üzerinden ortalanan hızlar ile ortalanan hız alanı bulunmuştur. Arayüzeyde $y=0.0125$ m'de arayüzey hız değeri $U_i=0.00042$ m/s bulunmuştur. Gözenekli ortam dolu bölgede Darcy hızı $U_D=0.00006$ m/s hesaplanmıştır. Arayüzeyde hız gradyanı ise 0.721 (1/s) değerine eşit çıkmıştır.

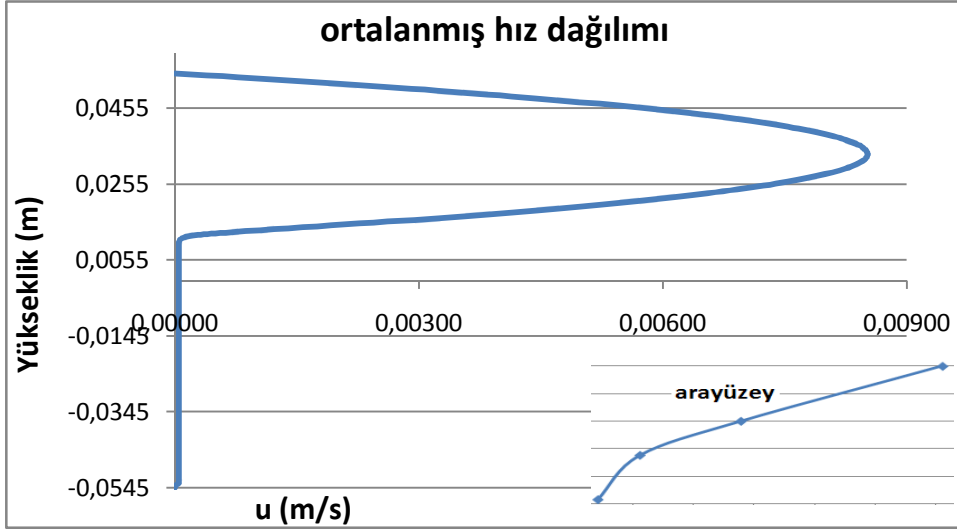
Şekil 3.11'de bulunan ortalanan hız alanı bilgileri yanında (3.6) bağıntısı yardımıyla $x=1.275722$ m ile $x=1.263556$ m aralığında kayma sabiti değeri $\alpha=2.61$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.12 : Kanal İçi Ortalanmış Hız Dağılımı
 $x=1.263554$ m ile $x=1.252290$ m aralığı.

Şekil 3.12'de görüldüğü üzere $x=1.263554$ m ile $x=1.252290$ m aralığında oluşturulmuş eşit alanlar üzerinden ortalanan hızlar ile ortalanan hız alanı bulunmuştur. Arayüzeyde $y=0.0125$ m'de arayüzey hız değeri $U_i=0.00040$ m/s bulunmuştur. Gözenekli ortam dolu bölgede Darcy hızı $U_D=0.00005$ m/s hesaplanmıştır. Arayüzeyde hız gradyanı ise 0.531 (1/s) değerine eşit çıkmıştır.

Şekil 3.12'de bulunan ortalanan hız alanı bilgileri yanında (3.6) bağıntısı yardımıyla $x=1.263554$ m ile $x=1.252290$ m aralığında kayma sabiti değeri $\alpha=1.98$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.13 : Kanal İçi Ortalanmış Hız Dağılımı
 $x=1.252290$ m ile $x=1.241444$ m aralığı.

Şekil 3.13'te görüldüğü üzere $x=1.252290$ m ile $x=1.241444$ m aralığında oluşturulmuş eşit alanlar üzerinden ortalanan hızlar ile ortalanan hız alanı bulunmuştur. Arayüzeyde $y=0.0125$ m'de arayüzey hız değeri $U_i=0.00056$ m/s bulunmuştur. Gözenekli ortam dolu bölgede Darcy hızı $U_D=0.00005$ m/s hesaplanmıştır. Arayüzeyde hız gradyanı ise 0.625 (1/s) değerine eşit çıkmıştır.

Şekil 3.13'te bulunan ortalanan hız alanı bilgileri yanında (3.6) bağıntısı yardımıyla $x=1.252290$ m ile $x=1.241444$ m aralığında kayma sabiti değeri $\alpha=1.60$ olarak hesaplanmıştır.

Şekil 3.13'teki ortalanan hız alanı bilgileri yardımıyla hacimsel debi hesaplanmıştır. Hacimsel debi birim kesit alandan birim zamanda ortalama bir hızla geçen akışkanın büyüklüğüdür. Kanal yüksekliği boyunca ortalanan hızların alan ile çarpımı debi değerini vermektedir (3.10).

$$(3.10)$$

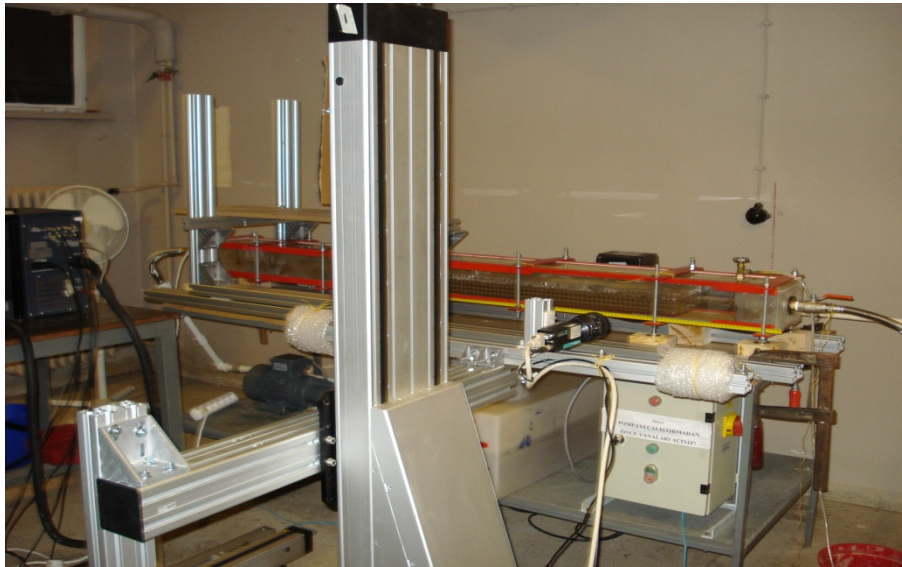
Kanal yüksekliği boyunca $y=-0.0545$ m ile $y=0.0545$ m arasında 1 mm aralıklarla debi değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan debilerin aritmetik ortalaması alınarak ortalanan hız alanının bulunduğu $x=1.246867$ m noktasında ortalama hacimsel debi değeri 0.267 m³/saat olarak bulunmuştur.

Yapılan sayısal çalışma sonunda $x=1.241$ m ile $x=1.300$ m aralığında her özdeş bölge için kayma gerilmesi sıçrama koşulu sabiti değerleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Hesaplanan beş değer aritmetik ortalaması alındığında elde edilen ortalama kayma sabiti değeri $\alpha=2.4$ olarak bulunmuştur.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Deney düzeneği İTÜ Trisonik Araştırma Merkezi'nde kurulmuştur. Dikdörtgensel kesitli eğimsiz bir deney kanalı imal edilmiştir. Gözenekli ortamın üretilmesi ve kanala yerleştirilmesi bir sonraki adım olmuştur. Kanalda düzgün akış elde etmek için kullanılacak olan yayıcı ve toplayıcı difüzörler tasarlanarak üretilmiştir. İmal edilen tüm deney düzeneği elemanları pleksiglas malzemeden oluşmaktadır.

Deney düzeneğindeki diğer elemanlar debimetre, mekanik dişli pompa, çift kaviteli lazer, CCD kamera ve onu hareket ettiren düzenek olarak sıralanabilir. **Şekil 4.1**'de deney düzeneği ve elemanları görülmektedir.



Şekil 4.1 : Deney Düzeneği.

Deney düzeneğinin tamamlanması ile kanalda düzgün akış elde edilmesi için gerekli pompa debisinin ayarlanması ve DPIV kalibrasyonu deney öncesi yapılan çalışmalardır.

4.1 Deney Düzeneği

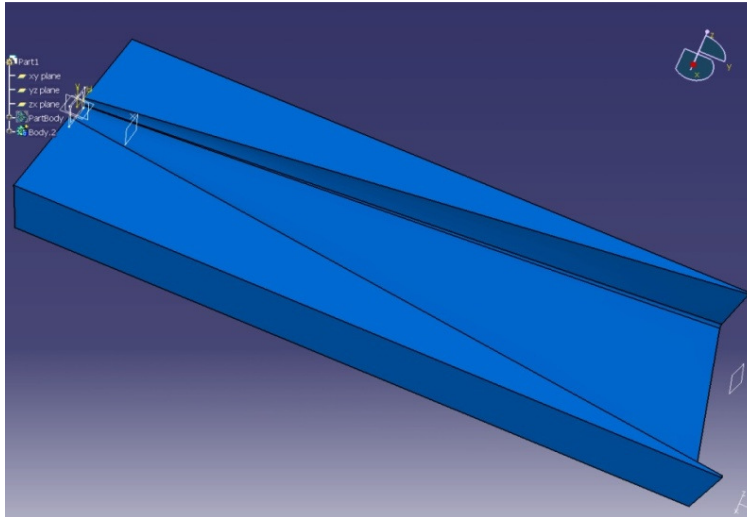
Deney düzeneğinde kanal, saydamlık önemli olduğu için pleksiglas malzemeden üretilmiş olup düzeneğin en hassas kısmını oluşturmaktadır. Deney sırasında akış özelliği kanal içi akış olarak ayarlanmıştır. **EK A.2**'de deney düzeneği genel hatlarıyla gösterilmiştir.

Kanal iç yüksekliği 109 mm olup eğimsiz olduğu için kanal boyunca değişmemektedir. Difüzörlerde kanal genişliği 176 mm olup cidar kalınlıklarıyla beraber genişlik 180 mm olmaktadır. Kanalın toplam uzunluğu 2 m'dir.

Gözenekli ortam 994 mm uzunluğunda ve 67 mm yüksekliğindedir. Kanal içine alt kısma kanal girişinden itibaren 700 mm ileride yerleştirilmiştir. DPIV yöntemiyle görüntüleme işlemi kanalın bu kısmında gerçekleştirilmiştir.

Kanal giriş itibariyle ölçüm yapılacak bölgeye kadar akışın tam gelişmiş ve laminar olması gerekmektedir. Ölçümlerin hatasız yapılabilmesi için akışın düzgün ve çalkantısız olarak ölçüm kısmına ulaşması gerekir. Kanal içine gelen akışkanın jet akış özelliğinden kurtulması için giriş kısmına yayıcı bir difüzör yerleştirilmiştir.

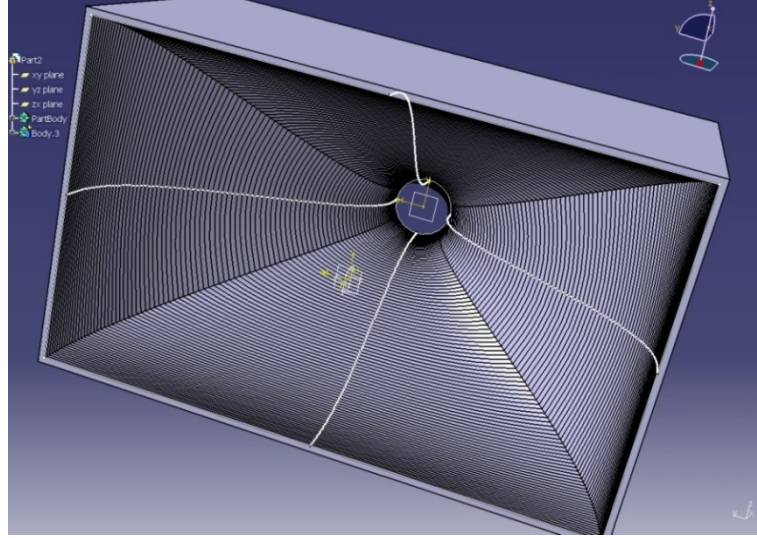
Şekil 4.2'de görüldüğü üzere yayıcı difüzör 600 mm uzunluğunda 26 mm çapa sahip dairesel giriş kesiti ile 109 mm yükseklikte tasarlanıp iki simetrik parça olarak CNC frezede üretilmiştir.



Şekil 4.2 : Yayıcı Difüzör-Alt Kısım.

Yayıcı difüzör çelik pimlerle parçaları sabitlenmiş ve şeffaf silikon yardımıyla kanal girişine yapıştırılarak yerleştirilmiştir.

Kanal içine çıkış kısmına ise toplayıcı bir difüzör yerleştirilmiştir. Böylece akışkan istenilen hıza ulaşarak kanaldan çıkar ve depoya ulaşır. Akışkan depoya ulaşınca tekrar pompa yardımıyla önceki debi değeri değişmeden tekrar kanal içine gönderilir. Debi sabit tutularak akış özellikleri deney süresince bozulmamış olur.



Şekil 4.3 : Toplayıcı Difüzör.

Şekil 4.3'te görüldüğü üzere toplayıcı difüzör bir dikdörtgensel prizma pleksiglas bloktan CNC freze yardımıyla tek parça olarak imal edilmiştir. 109 mm yükseklik ile 105 mm uzunluğa sahiptir. Kanal içi çıkış kısmına şeffaf silikon ile yapıştırılarak yerleştirilmiştir. Toplayıcı difüzör tasarımında geliştirilmiş Bell-Mehta Yöntemi'nden yararlanılmıştır (Brassard ve Ferchichi, 2005). Difüzör eğrileri yöntem kullanılarak giriş ve çıkış yükseklikleri ile difüzör uzunluğu verilerek çizdirilmiştir.

Deney düzeneğinde mekanik dişli bir su pompası, debimetre ve bir su deposu yer almaktadır. Kanal içinde x-yönünde bir boyutlu akış için Tuthill Pump Group'tan 1000 Series 1014 model mekanik dişli bir pompa kullanılmıştır. Pompa debi değerinin azami 39.8 L/dk'ya çıkabilmesi istenilen düşük veya yüksek debi ayarlarında deneylerin yapılabilmesini mümkün kılmıştır.

Debimetre olarak ise Krohne Optiflux 1000 DN 10 mm/ 3/8 inch kullanılmıştır. 0 ile 1m³/ saat aralığındaki debi değerlerini göstermektedir. Sinyal dönüştürücü olarak ise IFC010 modeli kullanılmıştır.

Depo içinde bulunan akışkan pompa yardımıyla istenilen debi değerlerinde kanal içine gönderilmektedir. 100 L'lik bir hacme sahip olan depoda deney sırasında akış için 76 L su yeterli olmaktadır.

4.2 Gözenekli Ortam

Gözenekli ortamı oluşturan pleksiglas silindirik çubuklar düşey yönde 5, yatay yönde 71 sıradan oluşmaktadır. Bu silindir çubuklar dairesel kesitli olup 10 mm çapa sahiptir. Çubukların uzunlukları 178 mm kadardır. **Şekil 4.4**'te gözenekli ortamın bir kısmı görülmektedir. Bu çubuklar 5 mm cidar kalınlığına sahip pleksiglas plakalara yerleştirilmiştir. Dairesel kesitli silindir çubuklar ve plakalar lazer kesici yardımıyla kesilerek üretilmiştir. Deney düzeneğinde bu çubuklardan 355 adet kullanılmıştır.



Şekil 4.4 : Gözenekli Ortam.

Dairesel kesitli silindir çubuklar kanal içine aynı hizada düzgün bir sistem oluşturacak şekilde yerleştirilmiştir. Gözeneklilik değeri önceki bölümde $\varepsilon=0.599$ olarak hesaplanmıştır. Geçirgenlik değeri ise $K=1.7 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ olarak bulunmuştur.

3 mm kalınlığa sahip pleksiglas malzemenin ışığı kırma endeksi 1.4893 ile 1.4999 değerleri arasında yer almaktadır (Url-3, 2009). Pleksiglas malzemenin ışığı kırma endeksinin akışkan olarak kullanılan suyun ışığa kırma endeksine yakın değere sahip olması, lazerin istenilen alanı aydınlatması için gerekli olan hassasiyeti ve doğruluğu sağlamıştır.

Veri toplama ve işleme için gerekli olan Dantec Dynamics yazılımı ve bilgisayar desteği DPIV sisteminde bulunmaktadır. Aynı zamanda CCD kamera hareketini sağlayan üç boyutlu bir travers sistem ile uyumlu olarak kullanılabilir. Bu travers sistem hassas bir şekilde kameranın bilgisayarla uzaktan kumanda edilmesini sağlamaktadır.

DPIV Sistem bir çift kaviteli (*double pulsed*) lazer ile silindirik lensler ve bir CCD kameradan oluşmaktadır. Lazer aracılığı ile aydınlatılan düzlemin lazerin iki çıkışı arasındaki görüntüleri CCD kamera ile kaydedilir.

Deney düzeneğinde çift kaviteli, azami 120mJ/pulse enerjili ve 531 nm dalgaboyuna sahip New Wave Solo PIV Nd:Yag Lazer kullanılarak deney ortamı aydınlatılmıştır. Kantitatif akış görüntüleri, DPIV yardımı ile elde edilip gerekli işlemlerden geçirilmiştir.

Bir adet 8-bit'lik ve 1600x1200 piksel çözünürlük özellikli Dantec Flow Sense 2M model dijital kamera yardımıyla görüntüler alınmıştır. Görüntüler 5 Hz'lik bir hız ile alınmıştır. **Şekil 4.5**'te kullanılan CCD dijital kamera görülmektedir.



Şekil 4.5 : CCD Kamera: Dantec Flow Sense 2M (Url-2, 2009).

4.3 Hız Alanı Görüntüleme Tekniği - DPIV

Seçilen akış düzlemindeki hız alanını ölçmek için DPIV (Dijital Parçacık Görüntüleyerek Hız Alanı Belirleme Yöntemi) kullanılmıştır. Trisonik Araştırma Merkezi'nde gerçekleştirilecek deneyler için gerekli olan iki boyutlu DPIV sistemi araştırma merkezi olanakları içerisinde mevcuttur.

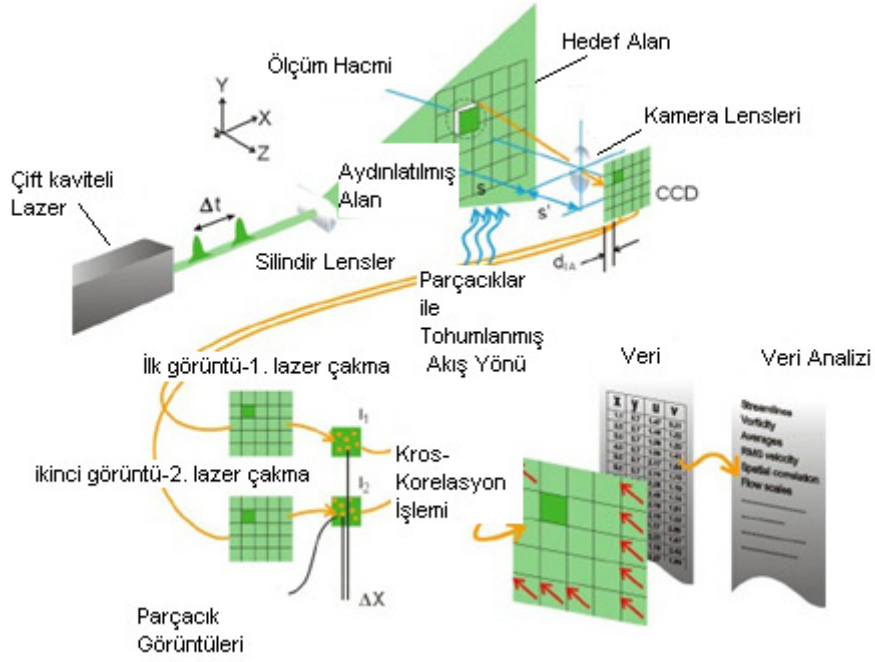
DPIV sistemi deney düzeneğinde akışın iki hız bileşenini u ve v 'yi ölçecek şekilde ayarlanmıştır. Böylece lazer düzlemine dik doğrultudaki hız bileşenini bulmaya gerek kalmamıştır. Elde edilen hız dağılımı arayüzey hızının tespitinde kullanılmıştır.

Parçacık görüntüleyerek hız ölçümü akışkanların hızlarını ölçmek için kullanılan sistemler arasında son elli yılda oldukça önem kazanmıştır. Deney sırasında lazer çalışırken akış içerisinde doğrudan yer alma şartının olmaması, böylece akımın bozulmaması DPIV yönteminin önem kazanmasının nedenlerinden sadece biridir. Diğer nedenlerden biri ise yöntemin düzlemdeki tüm akış alanı hızlarının tek seferde ölçülebilmesine olanak sağlamasıdır. Bu açıdan özellikle farklı akış türlerinde, düzlemsel ve anlık hız alanlarının ölçümüne olanak sağlaması, LDA ve sıcak tel anemometresi ile hız ölçümü gibi yöntemlere göre bariz şekilde üstündür.

DPIV tekniği tüm alanda optik teknolojiyi kullanan ve oldukça kullanışlı bir ölçüm sistemidir. Akışkan içerisindeki gümüş kaplı ve 10 µm çaplı küre şeklindeki parçacıkların hareketini görüntüleyerek basit bir yer değiştirme prensibi yardımıyla hız alanını hesaplama yöntemidir.

Parçacık izlemeye dayalı bir yöntem olan DPIV uygulamalarında akışkana deney öncesinde veya esnasında gümüş kaplı küresel parçacıklardan eklemek gerekmektedir.

Birbirini takip eden zamanlarda çok küçük bir zaman farkıyla düzlemsel deney alanı lazer çakması ile aydınlatılır. Lazer çakması ile aynı anda çalışan ve işleyen bir kamera yardımıyla görüntüler kaydedilir. Kaydedilen her iki görüntü çifti istenen büyüklükteki sorgulama alanlarına bölünerek kros-korelasyon yöntemi ile akışkana dahil edilmiş olan küresel gümüş kaplı taneciklerin ötelenme değeri hesaplanır. Böylece iki görüntü arasında bilinen zaman aralığı için basit yer değiştirme prensipleri olan $\vec{u} = \frac{\Delta \vec{x}}{\Delta t}$ ile $\vec{v} = \frac{\Delta \vec{y}}{\Delta t}$ bağıntıları kullanılarak dikey ve yatay eksenlerdeki hız vektörleri hesaplanır (Raffel ve diğ., 1998).

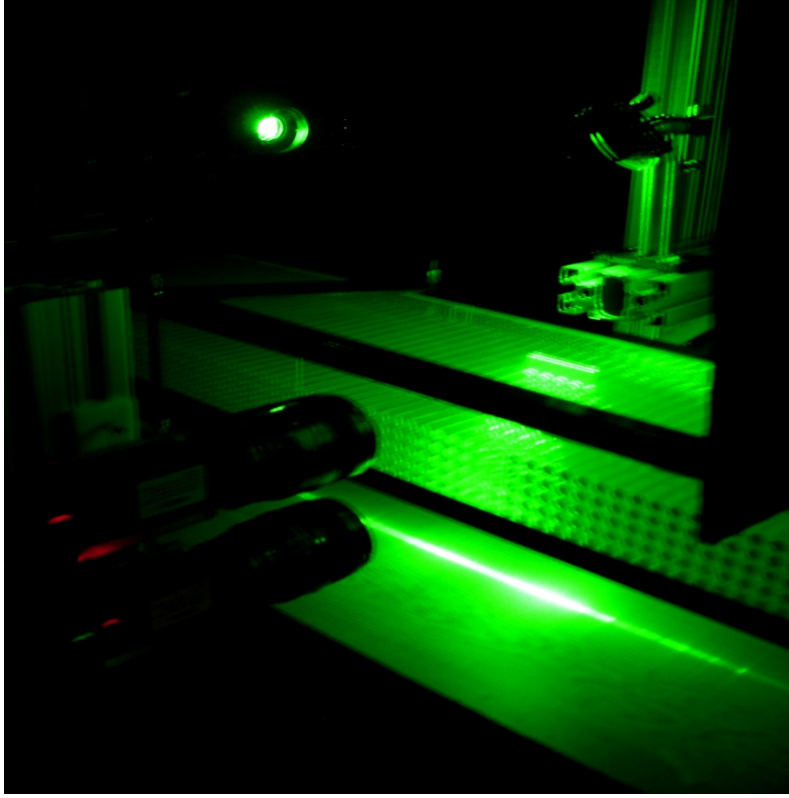


Şekil 4.6 : DPIV Ölçüm Prensipleri (Url-1, 2009).

Şekil 4.6’da görülen DPIV yönteminin çalışma şekli ve ölçüm prensipleri özetlenmiştir. Görüldüğü üzere lazerin önceden belirlenmiş bir hız değeriyle iki adet lazer çakımı arasında parçacıkların akış içinde bir önceki zamana göre hareketi belirlenir. Parçacık hareketleri arasında geçen zamanın bilinmektedir. Yer değiştirme miktarının deney sonunda belirlenmesi ile hız alanlarının hesaplanması mümkün olmaktadır.

4.4 Deneyin Yapılışı

Deneyler 0.25, 0.30 ve 0.35 m³/saat gibi üç farklı debi değerleriyle gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında lazer güç değerleri *high external* 250 olarak ayarlanmıştır. 5 Hz’lik görüntü alma hızı ile lazerin iki çakma arasındaki süre 8000 μs olarak belirlenmiştir. Deneylerin her ölçüm aşamasında 256 adet görüntü alınmıştır. 64 piksele 64 piksel boyutunda küçük alanlara bölünmüş haldeki görüntüler ile veriler işlenmiştir. Şekil 4.7’de deney sırasında çekilmiş bir fotoğraf görülmektedir.



Şekil 4.7 : Deney Anı.

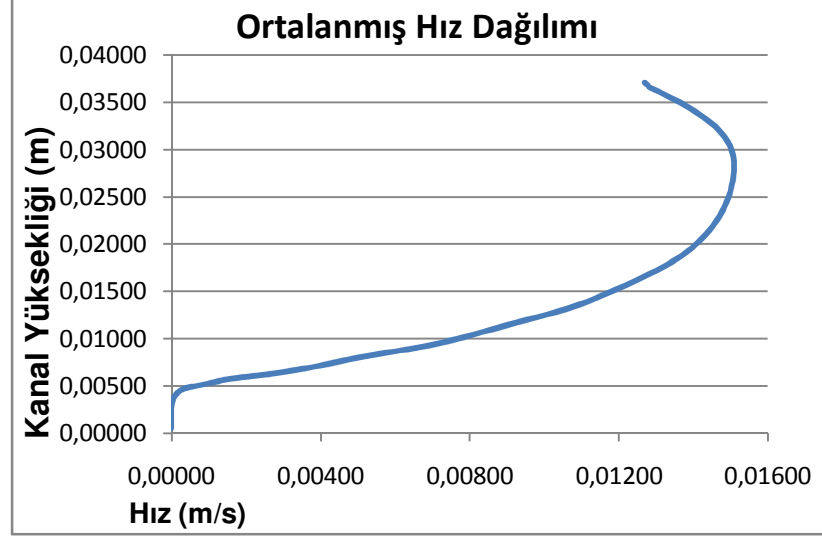
Deney kanal girişinden itibaren $x=1.275$ mm ile $x=1.355$ m aralığında görüntü alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu aralıkta, kanalın arayüzey bölgesine odaklanılarak hız alanları görüntülenmiştir. Hız alanı, berrak akışkan bölgesinde arayüzey bölgesine yakın kısım ve gözenekli ortam dolu bölgede üst dikey sıradaki üç silindirin kısmı için oluşturulmuştur. Böylece tüm kanal yerine arayüzey bölgesine odaklanmış kamera yardımıyla deney anında hedef alan içinde görüntülenmesi amaçlanan vektör sayısı veri analizi için yüksek hassasiyet ve doğruluk oranıyla elde edilmiştir.

4.5 Deney Sonuçları

Deney sırasında kanal içi görüntü alınan konumlar $y=0.00051$ m ile $y=0.03703$ m yükseklikleri arasında bulunmaktadır. Arayüzey $y=0.00572$ m kanal yüksekliğinde yer almaktadır. Deney boyunca CCD kameranın konumu değiştirilmeden sadece debi değerleri ayarlanarak DPIV yöntemi ile görüntüler alınmıştır.

DeneySEL hız alanlarının ortalamasının alınması ve Darcy hızı değerlerinin hesaplanması önceki bölümde sayısal çalışmada kullanılan yöntemle benzer şekilde yapılmıştır.

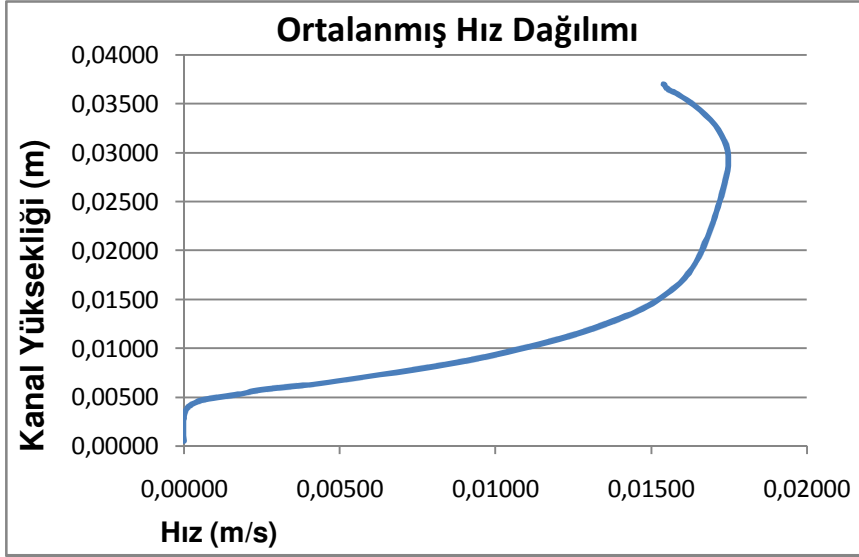
İlk aşamada $0.25 \text{ m}^3/\text{saat}$ debi değeri ile yapılmış deney sonunda DPIV yöntemiyle elde edilmiş x-yönündeki ortalanan hız bileşenleri **Şekil 4.8**'deki gibi görülmektedir. Gözenekli ortam dolu bölgede Darcy hızını elde etmek için ortalama alma işlemi bir sonraki adımda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.8 : Ortalanmış Deneysel Kanal İçi Hız Alanı $0.25 \text{ m}^3/\text{saat}$ debiye sahip akış.

Şekil 4.8'de kanal içi ortalanan hız dağılımı görülmektedir. Bu bilgilerden Darcy hızı $U_D=0.000021 \text{ m/s}$ bulunmuştur. Arayüzey hız değeri ise $U_i=0.00155 \text{ m/s}$ hesaplanmıştır. Arayüzeyde hız gradyanı değeri grafik yardımıyla 1.704 (1/s) olarak bulunmuştur.

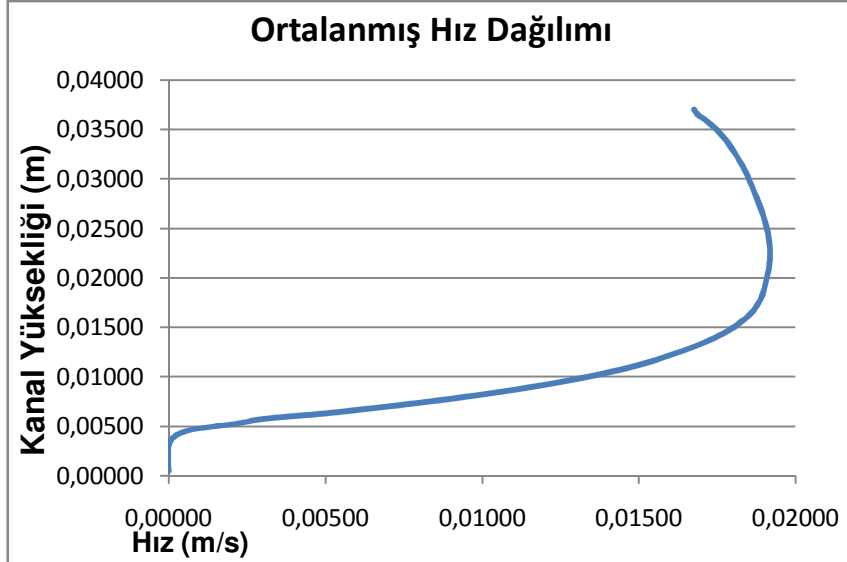
$0.25 \text{ m}^3/\text{saat}$ debideki kanal içi akış için ortalanan hız alanı bilgileri yanında (3.6) bağıntısı yardımıyla kayma sabiti değeri $\alpha=1.453$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.9 : Ortalanmış Deneysel Kanal İçi Hız Alanı
0.3 m³/saat debiye sahip akış.

Şekil 4.9’da kanal içi ortalananmış hız dağılımı görülmektedir. Bu bilgilerden Darcy hızı $U_D=0.00002$ m/s bulunmuştur. Arayüzey hız değeri ise $U_i=0.00249$ m/s hesaplanmıştır. Arayüzeyde hız gradyanı değeri grafik yardımıyla 2.343 (1/s) olarak bulunmuştur.

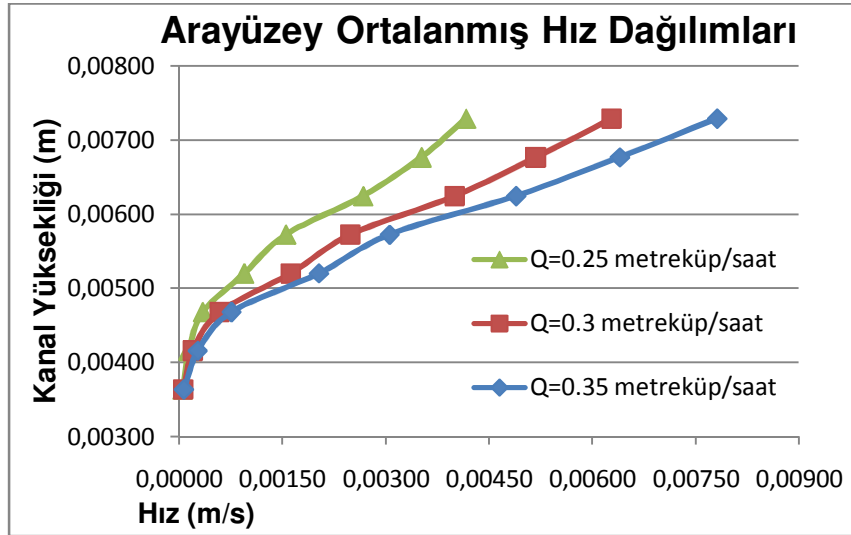
0.3 m³/saat debideki kanal içi akış için ortalananmış hız alanı bilgileri yanında (3.6) bağıntısı yardımıyla kayma sabiti değeri $\alpha=1.237$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.10 : Ortalanmış Deneysel Kanal İçi Hız Alanı
0.35 m³/saat debiye sahip akış.

Şekil 4.10'da kanal içi ortalanan hız dağılımı görülmektedir. Bu bilgilerden Darcy hızı $U_D=0.000024$ m/s bulunmuştur. Arayüzey hız değeri ise $U_i=0.00305$ m/s hesaplanmıştır. Arayüzeyde hız gradyanı değeri grafik yardımıyla 2.819 (1/s) olarak bulunmuştur.

0.35 m³/saat debideki kanal içi akış için ortalanan hız alanı bilgileri yanında (3.6) bağıntısı yardımıyla kayma sabiti değeri $\alpha=1.215$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.11 : Karşılaştırmalı Ortalanmış Arayüzey Hız Alanları.

Şekil 4.11'de deneysel çalışmada farklı debilerle tekrarlanan ölçümlerle elde edilmiş arayüzeyde bölgesindeki ortalanan hız alanları görülmektedir. Yukarıdaki grafikten anlaşılacağı üzere debi değerinin artması ile birlikte arayüzey hız değerleri artmıştır. Bununla birlikte debi değeri arttıkça arayüzeyde hız gradyanı değeri artmaktadır.

Çizelge 4.1'de üç farklı debi değeriyle gerçekleştirilen deneylerin sonucunda ortalanan arayüzey hız değerleri ile birlikte bulunan bilgiler aşağıdaki gibi listelenmiştir. Arayüzeydeki hız gradyanı yanında Darcy hızları da hesaplanmıştır. Bu bilgiler yardımıyla arayüzeyde kayma sabiti değerleri bulunmuştur.

Çizelge 4.1 : Deneysel çalışma sonuçları.

Debi (m ³ /saat)	Ortalanmış Arayüzey Hızı (m/s)	Darcy Hızı (m/s)	Arayüzey Hız Gradyanı (1/s)	Kayma Sabit (α)
0.25	0.00155	0.000021	1.704	1.453
0.30	0.00249	0.000020	2.343	1.237
0.35	0.00305	0.000024	2.819	1.215

Goharzadeh ve diğerleri (2005) deneysel çalışmalarında berrak akışkan bölgesinde Reynolds sayısını 21 almışlardır. Deney düzeneğinde gözenekli ortam dolu ve berrak akışkan bölgesini 40 mm olarak belirlemişlerdir. Gözenekli ortamı oluşturan borosilikat cam küresel taneciklerin çapı ise 6.5 mm olarak ölçülmüştür. Gözeneklilik değeri 0.41 ± 0.01 ve geçirgenlik değeri $1.3 \times 10^{-8} \pm 0.07 \times 10^{-8} \text{ m}^2$ olarak belirtilmiştir. Akışkanın deney sırasındaki hacimsel debisi 5L/dk ($0.30 \text{ m}^3/\text{saat}$) olarak ayarlanmıştır.

Çalışmalarında deney sonucunda ortalananmış arayüzey hız değeri $3 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ olarak bulunmuştur. Bu çalışmada ise $0.30 \text{ m}^3/\text{saat}$ debi ve Reynolds sayısı değeri yaklaşık 30 ile gerçekleştirilen deney sonucunda arayüzey hız değeri **Çizelge 4.1**'de görüldüğü üzere $2.49 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ bulunmuştur.

Prinos ve diğerleri (2003) deneysel ve sayısal çalışmaları üç dikey sıra halindeki 10 mm çaplı küresel taneciklerle 0.7144 gözeneklilik ve $3.57 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ geçirgenlik değerine sahip gözenekli ortam dolu kanal için laminar akış kabulüyle gerçekleştirilmiştir. Akışkan yüksekliği 50 mm olup Reynolds sayısı 43.06 olarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda analitik ve sayısal hesaplamalar yapılmıştır. Arayüzeydeki hız değeri $0.264 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ olarak hesaplanmıştır. Darcy hız değeri ise $3.56 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ bulunmuştur.

Çizelge 4.2'de bu çalışmada yapılan sayısal ve analitik çalışmalardan elde edilen kayma gerilmesi sıçrama koşulu ve kayma sabitleri haricinde referans çalışmalardan alınmış deneysel ve teorik bilgiler derlenmiştir (Ochoa-Tapia ve Whitaker, 1995). Derleme sonucunda farklı malzemelerin farklı geçirgenlik değerleri ve ortalama parçacık çapları görülmektedir. Bu değişkenlere bağlı olarak kayma sabiti değerleri çizelgede gösterilmiştir.

Çizelge 4.2 : Deneysel, Sayısal ve Analitik Çalışmalardan Elde Edilen Veriler.

Malzeme	Çalışma	D ($\times 10^{-3}$ m)	K (m^2)	α
Pleksiglas	Bu Çalışma Deneysel 0.3 m ³ /saat	10	1.7×10^{-6}	1.237
Pleksiglas	Bu Çalışma Sayısal 0.267 m ³ /saat	10	1.7×10^{-6}	2.4
Foametal B	Deneysel ve Analitik Çalışma Ochoa-Tapia ve Whitaker (1995) Beavers ve Joseph (1967)	1.14	3.94×10^{-8}	1.45
Foametal C		0.33	8.2×10^{-8}	4.0
Aloksit		0.69	1.6×10^{-9}	0.1

Deneysel çalışma sonucu elde edilen bilgiler doğrultusunda arayüzeyde debi değerinin artışı ile birlikte arayüzey hız değerinin arttığı tespit edilmiştir. Arayüzeyde hız değerleri artarken kayma sabiti değerleri azalmıştır.

Kayma sabiti değerleri arayüzeyde hız değerlerinin artışıyla birlikte azalmaktadır. Bu atalet kuvvetlerin artışı, viskoz kuvvetlerinin arayüzey hızı üzerindeki etkisini azaltmaktadır.

5. SONUÇLAR

Bu çalışma arayüzey hızının deneysel olarak bulunması ile ilgili olmuştur. Çalışma deneysel kısım dışında analitik ve sayısal çözümlemelerle genişletilmiştir. Güncel ve gelişime açık bir çalışmadır. Bu konuda tam açıklanamayan noktalarının bulunması çalışmayı gelişime ve değişime açık hale getirmektedir. Örnek olarak kayma gerilmesi sıçrama koşulu sabiti verilebilir. Gözenekli ortam ile akışkan bölge arasındaki geçiş olaylarının bilimsel açıklaması günümüzde hala tam olarak anlaşılmış değildir. Arayüzeyde hız alanının incelenmesi konusu yeni ve temel çalışmalar grubundadır. Bu çalışmanın ve konunun önemlerinden bir diğeri ise farklı mühendislik disiplinlerinde olduğu kadar, uçak ve uzay mühendisliğinde de özel uygulama alanlara sahip olmasıdır.

Bu çalışmada, kısmi gözenekli ortam dolu bir kanalda daimi, sıkıştırılamaz ve laminar bir akış oluşturularak; berrak akışkan bölgesi ile gözenekli ortam dolu bölge arasındaki kalan sınırdaki arayüzey hızının tespiti için ilk olarak analitik çalışma yapılmıştır. Arayüzey hızının sayısal çözümle tespiti için sonraki adımda $0.0018 \text{ m}^3/\text{saat}$ kanala giriş debi değerine sahip akış için Fluent mühendislik programı yardımıyla iki boyutlu olarak çalışma yapılmıştır. Bu çalışmanın en son aşamasında ise arayüzey hızının bulunması için 0.25 , 0.3 ve $0.35 \text{ m}^3/\text{saat}$ debi değerleri için DPIV yöntemi kullanılarak deneyler olarak gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışmadan önce, kanal tabanından itibaren 67 mm yüksekliğe sahip gözenekli ortam dolu kanalda akış için yapılan daimi, laminar ve uniform akış kabullerinden sonra sınır şartları belirlenmiştir.

Matematik model ve analitik çözümler boyutsuz halde elde edilmiştir. Analitik çözüm yapılırken berrak akışkan bölge için Stokes denklemi kullanılırken gözenekli ortam dolu bölgede Brinkman-Forchheimer düzeltmeli Darcy denklemi kullanılmıştır.

Gözenekli ortam dolu bölge ile berrak akışkan bölgesi sınırı olan arayüzeyde bu denklemler ortak çözülerek arayüzey hızını veren boyutsuz bağıntı elde edilmiştir. Analitik çalışma sonucunda elde edilen matematik model yardımıyla boyutsuz halde kanal içindeki akışın hız dağılımını bulmak mümkün olmuştur.

Bu aşamada analitik çözüm üzerinde çalışılırken mühendislik bilgisayar yazılımlarından Fortran ve Matlab programlama dilleri ve Grapher grafik programları kullanılmıştır. Sayısal çözümlemede ise Gridgen ve Fluent mühendislik bilgisayar programları kullanılmıştır.

Sayısal çözümleme sonucu elde edilen veriler Microsoft Office Excel programı yardımıyla işlenmiştir. Sayısal çözümler sonucu elde edilen verilerden u-hız bileşeni değerlerinin aritmetik ortalaması düzlemde belirlenmiş özdeş alanlar için alınarak kanalın belirli bir noktasında kanal yüksekliği boyunca ortalanan hız dağılımı bulunmuştur. Sayısal çözümleme sonucunda elde edilen kayma hızı sabiti değerleri $x=1.30002$ m ile $x=1.241444$ m arasındaki özdeş beş bölgede sırasıyla 2.89, 2.92, 2.61, 1.98 ve 1.60 olmuştur.

Deneysel çalışmada arayüzey hızının tespiti üç farklı debi değeri için gerçekleştirilip DPIV yöntemi yardımıyla veriler toplanmıştır. Veriler işlenirken gerçekleştirilen adımlar hız alanlarının maskelenmesi, kötü vektörlerin ayırıştırılması ve kros-korelasyon olmuştur. Bu veriler işlendikten sonra arayüzey hızının tespiti için düzlemsel hız alanları elde edilmiştir. Düzlemsel hız alanlarının x-yönündeki hız bileşenlerinin aritmetik ortalaması alınarak çalışılan noktada kanal yüksekliği boyunca hız dağılımı grafikleri çizdirilmiştir.

Elde edilen deneysel veriler ve bu verilerle oluşturulmuş ortalanan hız dağılımları grafikleri ile arayüzey bölgesinde hız tespit edilmiştir. Böylece arayüzey hızı ile birlikte kayma sabiti değerlerini hesaplamak mümkün olmuştur.

Yapılan çalışmalar sonucunda arayüzeyde hızın atalet kuvvetlerin artmasıyla birlikte arttığı, buna karşılık viskoz kuvvetlerin hız üzerindeki etkilerinin azaldığı görülmüştür. **Çizelge 4.1**'de görüldüğü üzere kayma sabiti değerlerinin debi değerlerinin artması ile birlikte azaldığı görülmüştür. Kayma sabiti değerleri 0.25, 0.3 ve $0.35 \text{ m}^3/\text{saat}$ debi değerleri için sırasıyla 1.453, 1.237 ve 1.215 bulunmuştur.

KAYNAKLAR

- Alazmi B. ve Vafai K.**, 2001: Analysis of fluid flow and heat transfer interfacial conditions between a porous medium and a fluid layer, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, **44**, 1735-1749.
- Allan, F.M. ve Hamdan, M.H.**, 2002: Fluid Mechanics of the interface region between two porous layers, *Applied Math. and Computation*, **128**, 37-43.
- Baytaş, A.C.**, 2006: Gözenekli ortamlarda taşınım olayı, *itüdergisi/c*, Cilt 4, Sayı 1, 3-13.
- Bear, J.**, 1988: *Dynamics of fluids in porous media*, Dover, New York, Amerika.
- Beavers, G. S. ve Joseph, D. D.**, 1967: Boundary Conditions at a naturally permeable wall, *J. Fluid Mech.*, **30**, Part 1, 197-207, İngiltere.
- Brassard, D. ve Ferchichi, M.**, 2005: Transformation of a Polynomial for a Contraction Wall Profile, *Journal of Fluids Engineering*, **127**, 183-185.
- Breguem, W.P., Boersma, B. J. ve Uittenbogaard, R. E.**, 2005: The Laminar Boundary Layer over a Permeable Wall, *Trans. Porous Media*, **59**, 267-300.
- Brinkman, H.C.**, 1948: On the permeability of media consisting of closely packed porous particles, *Appl. Sci. Res.*, **A1**, 8-16.
- Chandesris, M. ve Jamet, D.**, 2007: Boundary Conditions at a planar fluid-porous interface for a Poiseuille flow, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, **49**, 2137-2150.
- Chandesris, M. ve Jamet, D.**, 2007: Boundary Conditions at a fluid-porous interface: An *a priori* estimation of the stress jump coefficients, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, **50**, 3422-3436.
- Damiano, E. R., Duling, B. R., Ley, K., ve Skalak, T. C.**, 1996: Axisymmetric pressure-driven flow of rigid pellet through a cylindrical tube lined with a deformable porous wall layer, *J. Fluid Mech.*, **314**, 163-189.
- Ergün S.**, (1952): Fluid flow through packed columns, *Chemical Engineering and Progress*, **8**, 89-94.
- Goharzadeh, A., Khalili, A. ve Jørgensen, B. B.**, 2005. Transition layer thickness at a fluid-porous interface, *Physics of Fluids*, **17**, No.5, 057102.
- Goharzadeh, A., Saidi, A., Wang, D., Merzkirch, W. ve Khalili, A.**, 2006. An Experimental Investigation of the Brinkman Layer Thickness at a Fluid-Porous Interface, *IUTAM Symposium*, 445-454, Almanya.

- Goyeau, B., Lhuillier, D., Gobin, D. ve Velarde, M. G.**, 2003: Momentum Transport at a Fluid-Porous Interface, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, **46**, 4071-4081, Fransa.
- 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*, **22**, 408-422, Amerika.
- Kuznetsov, A. V.**, 1997: Influence of the Stress Jump Condition at the Porous-Medium/Clear-Fluid Interface on a Flow at a Porous Wall, *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, **24**, No.3, 401-410, Amerika.
- Ochoa-Tapia, J.A. ve Whitaker, S.**, 1995: Momentum transfer at the boundary between a porous medium and a homogeneous fluid-I.Theoretical development, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, **38**, No.14, 2635-2646.
- Ochoa-Tapia, J.A. ve Whitaker, S.**, 1995: Momentum transfer at the boundary between a porous medium and a homogeneous fluid-II.Comparison with experiment, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, **38**, No.14, 2647-2655.
- Ochoa-Tapia, J.A. ve Whitaker, S.**, 1998: Momentum jump condition at the boundary between a porous medium and a homogenous fluid: inertial effects, *J. Porous Media* **1**, 201-217.
- Poulikakos, D. ve Kazmierczak, M.**, 1987: Forced Convection in a Duct Partially Filled with a Porous Material, *J. Heat Transfer*, **109**, 653-662, IL Amerika.
- Raffel, M., Willert, C. ve Kompenhans, J.**, 1998. *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide*, Springer Publications, 61-78.
- Richardson, S.A.**, (1971): A model for the boundary condition of a porous material, Part 2, *J. Fluid Mechanics* **49**, 327-336.
- Sahraoui, M., ve Kaviany, M.**, 1992: Slip and No-slip Boundary Condition at Interface of Porous, Plain Media, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **35** (4), 927.
- Sangani, A. S. ve Acrivos, A.**, 1982: Slow flow past periodic arrays of cylinders with application to heat transfer, *Int. J. Multiphase Flow*, **8**, 193-206.
- Schlichting, H.**, 1979. *Boundary Layer Theory*, Seventh Edition, McGraw-Hill Book Company, 378-402.
- Tamayol, A. ve Bahrami, M.**, 2009: Analytical determination of viscous permeability of fibrous porous media, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, **52**, 2407-2414.
- Taylor, G. I.**, 1971: A model for the boundary condition of a porous material-Part 1, *J. of Fluid Mechanics*, **49**, Part 2, 319-326.
- Whitaker, S.**, 1999: *The Method of Volume Averaging*, Kluwer-Academic, Dordrecht, The Netherlands.
- Url-1** <<http://dantecdynamics.com/Default.aspx?ID=1049>>, alındığı tarih 06.04.2009.
- Url-2** <<http://dantecdynamics.com/Default.aspx?ID=725>>, alındığı tarih 20.04.2009.

Url-3 <[http://en.wikipedia.org/wiki/Poly\(methyl_methacrylate\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Poly(methyl_methacrylate))>, alındığı tarih 11.07.2009.

Vafai, K. ve Kim, S. J., 1990: Fluid Mechanics of the Interface Region Between a Porous Medium and a Fluid Layer- an Exact Solution, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, **11**, No.3, OH, Amerika.

EKLER

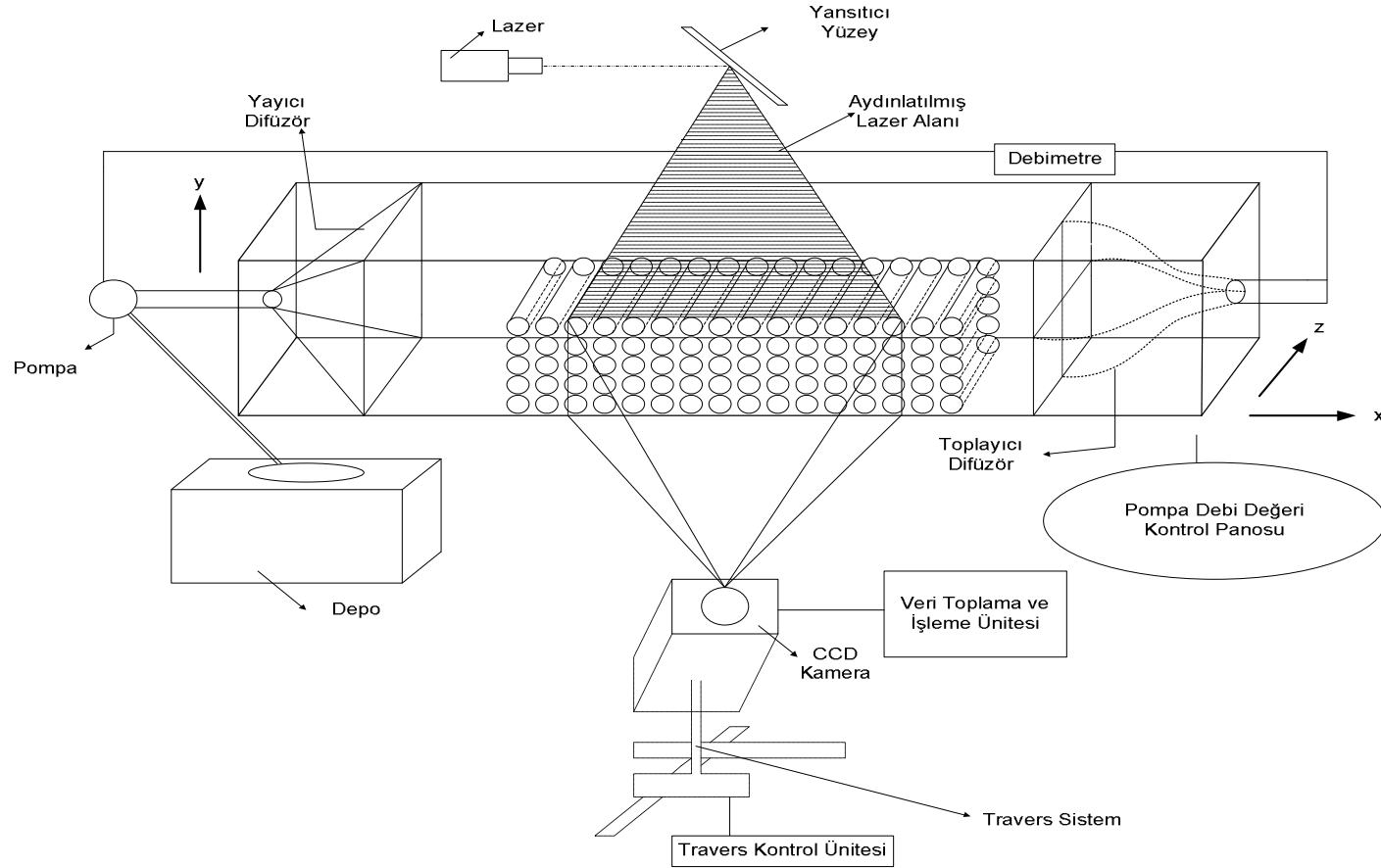
EK A.1 : Fortran Kodu (for uzantılı Fortran dosyası)

EK A.2 : Deney Düzenegi Şeması

EK A.1

```
PROGRAM HIZ_PROFIL
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
REAL,DIMENSION(1,4000)::Y,Z,U
DATA Da,E,BETA,ReL/0.05,1.0,-1.47,5.0/
U1=-2.0-1.5/(ReL*Da)
  B=SQRT(1.0-U1)
  C=1.0/Da+ReL
  F=1.0+BETA/SQRT(Da)
  G=2.0*ReL/3.0*E
!coefficients of cubic polynomial of UB
!By the help of Matlab find the real root
  a0=-U1*G-0.25*C*C
  a1=2*U1*G+G+F*C
  a2=-U1*G-2*G-F*F
  a3=G
PRINT*,'a0=',a0, 'a1=',a1, 'a2=',a2, 'a3=',a3
  UB=9.641 !Matlab help for finding out the roof of third degree polynomial
  A=SQRT(UB-U1)
!SET INITIAL VALUES FOR Y,Z and U
Y(1,1)=0.0
Y (1,1002)=1.0+H
U(1,1)=0.0
H=0.001 ! VERTICAL STEP SIZE
OPEN(UNIT=7,FILE='KUZ1.DAT')
WRITE(7,54)
  DO I=1,1001
    Y(1,I+1)=Y(1,I)+H
    U(1,I)=UB*Y(1,I)+0.5*C*(Y(1,I)-(Y(1,I)*Y(1,I)))
WRITE(7,55) Y(1,I),U(1,I)
  END DO
  do J=1002,4000
    Y(1,J+1)=Y(1,J)+H
    Z(1,J)=(EXP(-(Y(1,J)-1.0)*SQRT(G)*B))*((A-B)/(A+B))
    U(1,J)=U1+(1-U1)*(((Z(1,J)+1)*(Z(1,J)+1))/((Z(1,J)-1)*(Z(1,J)-1)))
WRITE(7,55) Y(1,J),U(1,J)
  end do
CLOSE(7)
54  FORMAT(6X,'ANALITIK COZUM:HIZ',/,8X,'Y',8X,'HIZ')
55  FORMAT(2F10.6)
END PROGRAM HIZ_PROFIL
```

EK A.2



Şekil A.1 : Deney Düzeneği Şeması.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Sema Arslan

Doğum Yeri ve Tarihi: Münich Almanya 21.08.1984

Adres: Güzide Hanım Sok. No:9 Daire:5 Yayla 34188
Bahçelievler İstanbul

Lisans Üniversitesi: İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak Mühendisliği
(2007)